

Kontrol kualitas pekerjaan *retubing*, *metal coating* dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW

Quality control of retubing, metal coating and ceramic coating works on the front and right side of CFB BOILER OF 112 MW PLTU

SKRIPSI

Oleh:
Nama: Mario Barera
NPM: 213030020



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2024**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Mario Barera

Nomor Pokok Mahasiswa : 213030020

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil plagiarism.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 14 April 2025

Penulis,

Materai 10.000

Mario Barera

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a: Mario Barera

NPM: 213030020

Program Studi: Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya: Skripsi, makalah, laporan magang kerja, karya profesi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Kontrol kualitas pekerjaan *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 14 April 2025

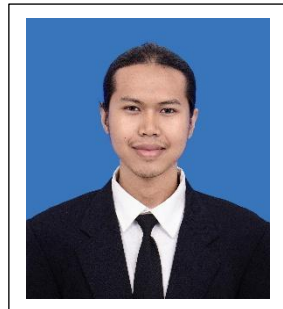
Yang menyatakan,

Materai 10.000

Mario Barera

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Kontrol kualitas pekerjaan *retubing, metal coating* dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW



Nama: Mario Barera
NPM: 213030020

Pembimbing Utama

Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T.

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Widyanti Kwintarini, M.T.



LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Kontrol kualitas pekerjaan *retubing, metal coating* dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW



Nama: Mario Barera
NPM: 213030020

Tanggal sidang skripsi: 18 Juni 2025

Ketua : Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T.

Sekretaris : Dr. Ir. Widiyanti Kwintarini, M.T.

Anggota : Prof. Dr. Ing. Ir. Priyono Soetikno, DEA.

Anggota : M. Reza Hermawan, S.T., M.T.

Widiyanti Kwintarini
9/7/25
M. Reza Hermawan

KATA PENGANTAR

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan anugerah-Nya, yang telah menjadi pondasi utama dalam penyelesaian draft skripsi ini yang berjudul “Kontrol kualitas produk *retubing, metal coating dan ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW”. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan, namun diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pembaca. Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada:

1. Orang tua saya, Bapak Dede Idik Permana dan Ibu Yayan Haryani Gustian, serta adik-adik tercinta, yang telah memberikan dukungan, doa, dan motivasi tiada henti.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T., pembimbing utama, atas arahan, ilmu, dan dukungannya yang sangat inspiratif selama penyusunan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Ir. Widiyanti Kwintarini, M.T., pembimbing kedua, atas bimbingan dan dukungan yang tulus sepanjang proses penyusunan.
4. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T., Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan, sekaligus dosen wali, atas bantuan dan bimbingannya.
5. Seluruh dosen Teknik Mesin Universitas Pasundan beserta staf dan jajarannya, yang telah memberikan ilmu dan dukungan selama ini.
6. Bapak Lufti Nur Hakim, Manager unit IP Teluk Sirih beserta jajarannya, atas dukungan dan kerjasamanya.
7. Team Lapi Ganeshatama Consulting, atas bantuan dan kesempatan yang diberikan.
8. Seseorang yang tidak bisa disebutkan namanya, dan rekan-rekan Teknik Mesin Angkatan 2021, atas kebersamaan dan dukungannya dalam perjalanan ini.

Akhir kata, semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat dan memberikan sumbangsih pemikiran untuk perkembangan pengetahuan, baik bagi Penulis maupun bagi pembacanya.

Bandung, 14 Februari 2025

Penulis,

Mario Barera

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VI
DAFTAR GAMBAR.....	IX
DAFTAR TABEL	XIII
ABSTRAK	XV
<i>ABSTRACT</i>	XVI
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	2
3. Tujuan.....	2
4. Manfaat.....	3
5. Lingkup masalah.....	3
6. Sistematika penulisan	3
BAB II STUDI LITERATUR	5
1. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU)	5
2. <i>Boiler</i>	6
A. Konduksi	6
B. Konveksi	7

C.	Radiasi.....	7
3.	<i>Fluidized bed system</i>	7
A.	<i>Atmospheric fluidized bed combustion (AFBC)</i>	8
B.	<i>Circulating fluidized bed combustion (CFBC)</i>	8
C.	<i>Pressurized fluidized bed combustion (PFBC)</i>	9
4.	<i>Retubing</i>	10
5.	<i>Sandblasting</i>	11
A.	<i>Dry sandblasting</i>	11
B.	<i>Wet sandblasting</i>	11
6.	<i>Metal coating</i>	11
7.	<i>Ceramic Coating</i>	11
8.	Penelitian Terdahulu.....	12
BAB III METODOLOGI		15
1.	Tahapan penelitian.....	15
2.	Langkah Penelitian	15
3.	Tempat Penelitian	16
4.	Keberhasilan Pengukuran	16
5.	Ketidaksesuaian Pengukuran	17
6.	Ketidakpastian Pengukuran	18
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		19
1.	Proses pekerjaan <i>retubing</i>	19
A.	Proses <i>cutting tube existing</i>	19
B.	Fabrikasi <i>tube</i> baru.....	19
C.	<i>Fit up tube</i>	21
D.	<i>Welding tube</i>	22
E.	Hasil data <i>retubing</i> pada sisi <i>front wall</i>	23
F.	Data hasil <i>retubing</i> pada sisi <i>right wall</i>	50

G.	Analisis total tingkat keberhasilan pekerjaan <i>retubing</i> pada dua sisi (<i>Front wall</i> dan <i>right wall</i>) boiler CFB.....	79
2.	Mengukur Hasil <i>Metal Coating</i>	81
A.	Persiapan Spesimen.....	81
B.	Proses <i>Sandblasting</i>	82
C.	Proses metal coating (<i>Thermal arc spray coating</i>)	82
D.	Hasil data metal coating pada sisi <i>front wall</i>	84
3.	Mengukur Hasil <i>Ceramic Coating</i>	117
A.	Proses Pelapisan <i>Ceramic Coating</i>	117
B.	Hasil Data <i>Ceramic Coating</i> pada Sisi <i>Front wall</i>	117
C.	Hasil Data <i>Ceramic Coating</i> pada Sisi <i>Right wall</i>	132
D.	Analisis Total Keberhasilan Pekerjaan <i>Ceramic Coating</i> dari Dua Sisi (<i>Front wall</i> dan <i>Right wall Boiler</i>).....	141
4.	Alat dan bahan	143
A.	<i>Retubing</i>	143
B.	<i>Sandblasting</i>	153
C.	<i>Metal Coating</i>	157
D.	<i>Ceramic Coating</i>	159
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		161
1.	Kesimpulan.....	161
2.	Saran	162
DAFTAR PUSTAKA		163
LAMPIRAN.....		167
1.	Data Hasil <i>Retubing</i>	167
2.	Data Hasil <i>Metal Coating</i>	200
3.	Data Hasil <i>Ceramic Coating</i>	266

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Siklus rankine [5].	5
Gambar 2. Siklus PLTU [6].	6
Gambar 3. Skema proses AFBC dasar [16].	8
Gambar 4. Konfigurasi tipikal untuk reaktor bed fluida beredar [18].	9
Gambar 5. Skema siklus gabungan pembakaran bed fluida bertekanan	9
Gambar 6. Diagram <i>flowchart</i>	15
Gambar 7. Lokasi penelitian	16
Gambar 8. Proses <i>cutting tube existing</i>	19
Gambar 9. Proses <i>Cutting tube</i> baru	20
Gambar 10. Proses <i>beveling</i>	20
Gambar 11. Proses <i>cleaning tube</i>	20
Gambar 12. Proses <i>Fit-Up</i>	21
Gambar 13. Proses Pengukuran <i>Hi-Lo</i>	21
Gambar 14. Proses Pengukuran <i>Gap</i>	22
Gambar 15. Proses <i>Welding</i>	22
Gambar 16. Diagram hasil pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada sudut 0°	23
Gambar 17. Diagram hasil pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada sudut 90°	24
Gambar 18. Diagram hasil pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada sudut 180°	26
Gambar 19. Diagram hasil pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada sudut 270°	27
Gambar 20. Diagram pengukuran keseluruhan <i>Hi-Lo</i>	29
Gambar 21. Diagram pengukuran <i>gap</i> pada sudut 0°	31
Gambar 22. Diagram pengukuran <i>gap</i> pada sudut 90°	32
Gambar 23. Diagram pengukuran <i>gap</i> pada sudut 180°	34
Gambar 24. Diagram pengukuran <i>gap</i> pada sudut 270°	35
Gambar 25. Diagram pengukuran keseluruhan <i>gap</i>	37
Gambar 26. Diagram hasil pengukuran <i>V-Groove</i>	39
Gambar 27. Diagram Pengukuran <i>Capping</i> pada Sisi <i>Inside</i>	41
Gambar 28. Diagram pengukuran <i>capping</i> pada sisi <i>outside</i>	42
Gambar 29. Diagram pengukuran keseluruhan <i>capping</i>	44
Gambar 30. Diagram pengukuran <i>bead width</i> pada sisi <i>inside</i>	46
Gambar 31. Diagram pengukuran <i>bead width</i> pada sisi <i>outside</i>	47
Gambar 32. Diagram pengukuran keseluruhan <i>bead width</i>	49

Gambar 33. Diagram pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada Sudut 0°	51
Gambar 34. Diagram Pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada Sudut 90°	52
Gambar 35. Diagram Pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada Sudut 180°	54
Gambar 36. Diagram Pengukuran <i>Hi-Lo</i> pada Sudut 270°	55
Gambar 37. Diagram Pengukuran Keseluruhan <i>Hi-Lo</i>	57
Gambar 38. Diagram Pengukuran <i>Gap</i> pada Sudut 0°	59
Gambar 39. Diagram Pengukuran <i>Gap</i> pada Sudut 90°	61
Gambar 40. Diagram Pengukuran <i>Gap</i> pada Sudut 180°	63
Gambar 41. Diagram Pengukuran <i>Gap</i> pada Sudut 270°	64
Gambar 42. Diagram Pengukuran Keseluruhan <i>Gap</i>	66
Gambar 43. Diagram Pengukuran <i>V-Groove</i>	68
Gambar 44. Diagram Pengukuran <i>Capping</i> pada Sisi <i>Inside</i>	69
Gambar 45. Diagram Pengukuran <i>Capping</i> pada Sisi <i>Outside</i>	71
Gambar 46. Diagram Pengukuran Keseluruhan <i>Capping</i>	72
Gambar 47. Diagram Pengukuran <i>Bead Widht</i> pada Sisi <i>Inside</i>	74
Gambar 48. Diagram Pengukuran <i>Bead Widht</i> pada Sisi <i>Outside</i>	75
Gambar 49. Diagram Pengukuran Keseluruhan <i>Bead Width</i>	77
Gambar 50. Proses <i>Sandblasting</i>	82
Gambar 51. Proses <i>metal coating</i>	84
Gambar 52. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik A	85
Gambar 53. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik B	86
Gambar 54. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik C	87
Gambar 55. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> keseluruhan.....	89
Gambar 56. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik A	90
Gambar 57. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik B	92
Gambar 58. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik C	93
Gambar 59. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> keseluruhan.....	94
Gambar 60. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik A	96
Gambar 61. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik B	98
Gambar 62. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik C	99
Gambar 63. diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> keseluruhan	101
Gambar 64. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik A	103
Gambar 65. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik B	104
Gambar 66. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik C	105
Gambar 67. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> keseluruhan.....	107

Gambar 68. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik A	108
Gambar 69. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik B	110
Gambar 70. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> titik C	111
Gambar 71. Diagram hasil pengukuran <i>metal coating</i> keseluruhan.....	113
Gambar 72. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik A	118
Gambar 73. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik B	119
Gambar 74. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik C	120
Gambar 75. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> keseluruhan.....	121
Gambar 76. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik A	123
Gambar 77. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik B	124
Gambar 78. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik C	125
Gambar 79. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> keseluruhan.....	126
Gambar 80. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik A	127
Gambar 81. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik B	129
Gambar 82. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik C	130
Gambar 83. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> keseluruhan.....	131
Gambar 84. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik A	133
Gambar 85. Diagram hasil pengukuran <i>ceramic coating</i> titik B	134
Gambar 86. Diagram Hasil Pengukuran <i>Ceramic Coating</i> titik C.....	135
Gambar 87. Diagram Hasil Pengukuran <i>Ceramic Coating</i> Keseluruhan.....	136
Gambar 88. Diagram Hasil Pengukuran <i>Ceramic Coating</i> titik A	137
Gambar 89. Diagram Hasil Pengukuran <i>Ceramic Coating</i> titik B.....	138
Gambar 90. Diagram Hasil Pengukuran <i>Ceramic Coating</i> titik C.....	139
Gambar 91. Diagram Hasil Pengukuran <i>Ceramic Coating</i> Keseluruhan.....	140
Gambar 92. Material <i>tube</i>	143
Gambar 93. Mesin <i>cutting grinder</i>	144
Gambar 94. Mesin <i>angle grinder</i>	145
Gambar 95. Mesin <i>Beveling</i>	145
Gambar 96. Tang jepit/klem <i>tube</i>	146
Gambar 97. <i>Hi-lo gauge</i>	147
Gambar 98. <i>Taper gauge</i>	148
Gambar 99. Mesin Las GTAW	148
Gambar 100. Kawat Las GTAW.....	149
Gambar 101. Mesin Las GMAW.....	150
Gambar 102. Kawat Las GMAW	151

Gambar 103. <i>Welding Gauge</i>	151
Gambar 104. <i>Digital Vernier Caliper</i>	152
Gambar 105. <i>Mesin Sandblasting</i>	153
Gambar 106. <i>Mesin Sandblasting</i>	154
Gambar 107. <i>Replica Tape</i>	155
Gambar 108. <i>Material Sandblasting</i>	156
Gambar 109. <i>Partikel Material Sandblasting</i>	156
Gambar 110. <i>Mesin Metal Coating</i>	157
Gambar 111. <i>Konsumable Metal Coating</i>	158
Gambar 112. <i>Elcometer 456</i>	159
Gambar 113. <i>Konsumable Ceramic Coating</i>	159
Gambar 114. <i>Spray Gun</i>	160

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Rekapitulasi Data Keberhasilan <i>Retubing</i> per Sisi	79
Tabel 2. Parameter proses <i>metal coating</i>	83
Tabel 3. Parameter proses <i>ceramic coating</i>	117
Tabel 4. Spesifikasi dan Parameter <i>Tube</i>	143
Tabel 5. Spesifikasi dan parameter mesin cutting grinding	144
Tabel 6. Spesifikasi dan parameter mesin <i>angle grinder</i>	144
Tabel 7. Spesifikasi dan parameter mesin <i>beveling</i>	145
Tabel 8. Spesifikasi dan parameter tang jepit/klem <i>tube</i>	146
Tabel 9. Spesifikasi dan parameter <i>Hi-Lo gauge</i>	147
Tabel 10. Spesifikasi dan parameter <i>taper gauge</i>	147
Tabel 11. Spesifikasi dan parameter mesin Las GTAW	148
Tabel 12. Spesifikasi dan parameter kawat las GTAW	149
Tabel 13. Spesifikasi dan Parameter Mesin Las GMAW	150
Tabel 14. Spesifikasi dan Parameter Kawat Las GMAW	150
Tabel 15. Spesifikasi dan Parameter Welding Gauge	151
Tabel 16. Spesifikasi dan Parameter <i>Digital Vernier Caliper</i>	152
Tabel 17. Spesifikasi dan Parameter Mesin <i>Sandblasting</i>	153
Tabel 18. Spesifikasi dan Parameter Elcometer 124	154
Tabel 19. Spesifikasi dan Parameter <i>Replica Tape</i>	155
Tabel 20. Spesifikasi dan Parameter Material <i>Sandblasting</i>	156
Tabel 21. Spesifikasi dan Parameter Mesin <i>Metal Coating</i>	157
Tabel 22. Spesifikasi dan Parameter Konsumable <i>Metal Coating</i>	158
Tabel 23. Spesifikasi dan Parameter Elcometer 456	158
Tabel 24. Spesifikasi dan Parameter <i>Ceramic Coating</i>	159
Tabel 25. Tabel Spesifikasi dan Parameter <i>Spray Gun</i>	160
Tabel 26. Hasil persentase keberhasilan <i>retubing</i>	161
Tabel 27. Hasil persentase keberhasilan <i>metal coating</i>	161
Tabel 28. Hasil persentase keberhasilan <i>ceramic coating</i>	162
Tabel 29. Hasil Data Pengukuran <i>Hi-Lo Sisi Front wall</i>	167
Tabel 30. Nilai Deviasi <i>Hi-Lo sisi front wall</i>	170
Tabel 31. Hasil Data Pengukuran Gap Sisi <i>Front wall</i>	172
Tabel 32. Hasil data pengukuran <i>gap sisi right wall</i>	175

Tabel 33. Hasil data pengukuran dan nilai deviasi V-Groove sisi <i>front wall</i>	178
Tabel 34. Hasil data pengukuran dan nilai deviasi <i>capping</i> sisi <i>front wall</i>	181
Tabel 35. Hasil data pengukuran dan nilai deviasi <i>bead width</i> sisi <i>front wall</i>	184
Tabel 36. Hasil data pengukuran <i>Hi-Lo</i> sisi <i>right wall</i>	186
Tabel 37. Nilai deviasi pengukuran <i>Hi-Lo</i> sisi <i>right wall</i>	188
Tabel 38. Hasil data pengukuran <i>gap</i> sisi <i>right wall</i>	190
Tabel 39. Nilai Deviasi Pengukuran <i>Gap</i> Sisi <i>Right wall</i>	193
Tabel 40. Hasil Data Pengukuran dan Nilai Deviasi <i>V-Groove</i> Sisi <i>Right wall</i>	194
Tabel 41. Hasil Data Pengukuran dan Nilai Deviasi <i>Capping</i> Sisi <i>Right wall</i>	196
Tabel 42. Hasil Data Pengukuran dan Nilai Deviasi <i>Bead Width</i> Sisi <i>Right wall</i>	198
Tabel 43. Hasil Data Pengukuran <i>MC</i> dan Deviasi Sisi <i>Front wall</i> Elevasi 16-18 m	200
Tabel 44. Hasil Data Pengukuran <i>MC</i> dan Deviasi Sisi <i>Front wall</i> Elevasi 18-19 m	216
Tabel 45. Hasil data pengukuran <i>MC</i> dan deviasi sisi <i>front wall</i> elevasi 23-25 m	228
Tabel 46. Hasil data <i>metal coating</i> dan deviasi sisi <i>right wall</i> elv 16-18 m	247
Tabel 47. Hasil data <i>metal coating</i> dan deviasi sisi <i>right wall</i> elv 23-25 m	257
Tabel 48. Hasil data pengukuran <i>CC</i> dan deviasi sisi <i>front wall</i> elevasi 16-18 m.....	266
Tabel 49. Hasil data pengukuran <i>CC</i> dan deviasi sisi <i>front wall</i> elevasi 18-19 m.....	282
Tabel 50. Hasil data pengukuran <i>CC</i> dan deviasi sisi <i>front wall</i> elevasi 23-25 m.....	294
Tabel 51. Hasil data pengukuran <i>CC</i> dan deviasi sisi <i>right wall</i> elv 16-18 m.....	313
Tabel 52. Hasil data pengukuran <i>CC</i> dan deviasi sisi <i>right wall</i> elv 23-25 m.....	322

ABSTRAK

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan teknologi *Circulating Fluidized Bed* (CFB) *Boiler* memiliki tantangan teknis dalam menjaga keandalan operasionalnya, terutama pada bagian dinding depan (*front wall*) dan dinding kanan (*right wall*) *boiler*. Kerusakan akibat suhu tinggi, erosi, dan korosi sering terjadi pada komponen ini, yang berakibat pada kebocoran pipa (*tube leak*) dan menurunnya efisiensi pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol kualitas yang efektif dalam proses *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* guna memastikan keandalan serta umur panjang komponen *boiler*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji metode kontrol kualitas yang diterapkan dalam proses perbaikan *boiler* CFB di PLTU 112 MW, khususnya pada bagian *retubing*, pelapisan logam (*metal coating*), dan pelapisan keramik (*ceramic coating*). Metodologi penelitian mencakup inspeksi visual, pengukuran keselarasan (*Hi-Lo inspection*), pengukuran celah (*gap inspection*), pengujian pengelasan, serta uji ketebalan pelapisan. Standar industri yang digunakan mengacu pada spesifikasi teknis yang relevan, termasuk standar pengelasan ASME dan metode inspeksi *non-destruktif*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol kualitas yang ketat dalam proses *retubing* mampu memastikan ketepatan dimensi dan kekuatan struktur sambungan las. Sementara itu, *metal coating* dan *ceramic coating* terbukti meningkatkan ketahanan material terhadap korosi dan erosi, sehingga memperpanjang masa pakai *boiler*. Dengan implementasi sistem kontrol kualitas yang optimal, diharapkan efisiensi dan keandalan pembangkit listrik dapat ditingkatkan serta biaya pemeliharaan jangka panjang dapat ditekan secara signifikan.

Kata kunci: *Retubing, metal coating, ceramic coating, boiler CFB, kontrol kualitas, PLTU 112 MW*

ABSTRACT

Steam Power Plant (PLTU) with Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler technology has technical challenges in maintaining its operational reliability, especially on the front wall and right wall of the boiler. Damage due to high temperatures, erosion, and corrosion often occurs on these components, which results in tube leaks and decreased plant efficiency. Therefore, an effective quality control system is needed in the retubing, metal coating, and ceramic coating processes to ensure the reliability and longevity of boiler components. This study aims to assess the quality control methods applied in the CFB boiler repair process at 112 MW PLTU, specifically in the retubing, metal coating, and ceramic coating sections. The research methodology includes visual inspection, Hi-Lo inspection, gap inspection, welding test, and coating thickness test. The industry standards used refer to relevant technical specifications, including ASME welding standards and non-destructive inspection methods. The results showed that the application of strict quality control in the retubing process was able to ensure the dimensional accuracy and structural strength of the welded joints. Meanwhile, metal coating and ceramic coating are proven to improve the material's resistance to corrosion and erosion, thus extending the boiler's service life. With the implementation of an optimal quality control system, it is expected that the efficiency and reliability of the power plant can be improved and long-term maintenance costs can be significantly reduced.

Keywords: Retubing, metal coating, ceramic coating, CFB boiler, quality control, 112 MW PLTU

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Latar Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Teluk Sirih dengan kapasitas 2×112 MW merupakan salah satu pembangkit listrik berbasis energi fosil yang memanfaatkan sistem *boiler* tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) sebagai komponen utama dalam proses konversi energi panas menjadi energi listrik. Sistem ini dirancang untuk beroperasi secara kontinu pada suhu dan tekanan tinggi, sehingga keandalan setiap komponen, khususnya *boiler*, sangat berpengaruh terhadap efisiensi dan stabilitas operasional unit pembangkit. *Boiler* CFB bekerja dengan prinsip pencampuran partikel padat, seperti pasir kuarsa dan batu bara halus, dalam aliran gas panas yang bergerak turbulen. Proses pembakaran berlangsung secara merata dan efisien, didukung oleh struktur *boiler* yang memiliki ruang bakar vertikal dan dilengkapi dengan *loop seal* serta cyclone separator. *Loop seal* berfungsi menjaga sirkulasi material padat antara furnace dan cyclone separator, sedangkan cyclone separator memisahkan partikel padat dari gas pembakaran sebelum dikembalikan ke sistem. *Boiler* ini memiliki empat sisi yaitu *front wall*, *rear wall*, *left wall* dan *right wall* dengan ketinggian *boiler* 41 m untuk kasus ini terutama berlaku untuk bagian *Front wall* (dinding depan) dan *right wall* (dinding kanan) *boiler*, yang sangat rentan terhadap kondisi operasional ekstrem. Namun demikian, pembangkit ini menghadapi banyak masalah teknis dari sudut pandang operasional, terutama terkait dengan fenomena kerusakan material seperti contohnya yaitu *tube leak*.

Meskipun efisien dalam proses pembakaran, sistem sirkulasi partikel pada *boiler* CFB juga menimbulkan efek samping berupa degradasi material pipa akibat gesekan dan tumbukan partikel abrasif dalam suhu tinggi. Fenomena ini mengakibatkan terjadinya erosi (pengikisan mekanis) dan korosi (reaksi kimia) pada permukaan luar pipa. Selain itu, proses *thermal cycling* yang terjadi saat start-up dan shutdown berulang dapat menimbulkan *thermal fatigue* yang menyebabkan munculnya retakan mikro (*microcrack*) pada struktur logam pipa. Kombinasi dari kerusakan-kerusakan ini berpotensi menyebabkan *tube leak* atau kebocoran pipa, yang dapat mengganggu tekanan sistem, membahayakan personel, dan bahkan menghentikan operasi unit secara darurat [1]. Kebocoran pada sistem perpipaan *boiler* adalah penyebab utama masalah, penurunan efisiensi pembangkit dan peningkatan biaya pemeliharaan [2].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan tindakan rekondisi yang bersifat komprehensif, tidak hanya untuk memperbaiki kerusakan tetapi juga mencegah kerusakan serupa di masa mendatang. Tindakan teknis yang diterapkan terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu: *retubing* (penggantian pipa yang rusak), pelapisan logam (*metal coating*) untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, serta pelapisan keramik (*ceramic coating*) guna menambah ketahanan terhadap abrasi. Ketiga tahapan ini diterapkan secara bertahap pada dua sisi *boiler* yang menjadi objek penelitian, yakni *front wall* dan *right wall* [3]. Agar hasil pekerjaan memenuhi spesifikasi teknis dan standar mutu yang telah ditentukan, dilakukan proses pengendalian kualitas (*quality control*) pada setiap tahapan. Pada proses *retubing*, kualitas sambungan las dievaluasi berdasarkan lima parameter utama, yaitu *Hi-Lo*, *gap*, *V-groove*, *capping*, dan *bead width*. Sedangkan pada tahap pelapisan (*metal* dan *ceramic coating*), kualitas pekerjaan diuji dengan mengukur ketebalan lapisan menggunakan alat ukur digital, kemudian dibandingkan dengan standar ketebalan yang tercantum dalam dokumen pengadaan proyek.

2. Rumusan masalah

Untuk menjaga keberlanjutan operasi pembangkit listrik, proses *retubing* adalah tindakan pemeliharaan yang sangat penting saat menyusun laporan skripsi. Keberhasilan *retubing* bergantung pada kontrol kualitas. Salah satu rumusan masalah yang dapat dijelaskan adalah:

- A. Bagaimana metode kontrol kualitas produk *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW dilakukan?
- B. Apakah produk *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* telah memenuhi standar pekerjaan yang ditetapkan?

3. Tujuan

Untuk memastikan bahwa kualitas material *tube* yang digunakan dalam proses *retubing* memenuhi spesifikasi teknis dan standar industri yang ketat, penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa pipa dapat berfungsi dengan baik dalam kondisi tekanan dan suhu. Adapun tujuan penelitian mencakup beberapa poin penting berikut:

- A. Mengukur dan menganalisis
- B. Mengumpulkan standar metode pengendalian kualitas yang diterapkan pada pekerjaan *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW berdasarkan standar industri pembangkit listrik.

- C. Membandingkan hasil pengukuran parameter-parameter *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB PLTU 112 MW dengan standar pekerjaan yang ditetapkan

4. Manfaat

Penulis mendapatkan manfaat yang besar dari penelitian ini karena memperluas pengetahuan dan pemahaman tentang proses *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* serta pentingnya kontrol kualitas untuk sistem pembangkit listrik. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi panduan bagi industri untuk menerapkan kontrol kualitas yang tepat pada proses *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* yang akan membantu operasi pembangkit listrik berjalan dengan efisien dan berkelanjutan.

5. Lingkup masalah

Untuk menghindari masalah yang dapat muncul dalam pengerjaan tugas akhir ini, maka ditetapkan lingkup masalah sebagai berikut:

- Penelitian akan fokus pada *boiler* CFB di PLTU dengan kapasitas 112 MW
- Analisis akan dibatasi pada pekerjaan *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* di sisi depan dan kanan *boiler* CFB.
- Parameter yang diukur dalam kontrol kualitas meliputi *visual inspection*, *gap inspection*, *Hi-Lo inspection*, *welding inspection*, *thickness measurement*, radiografi, *magnetic testing*, dan *dye penetrant*.
- Penelitian ini juga mencakup jumlah *tube* pada setiap wall *boiler*, yaitu 172 *tube* di *front wall*, 172 *tube* di *rear wall*, 80 *tube* di *right wall*, dan 80 *tube* di *left wall*. Selain itu, spesifikasi *tube* yang digunakan memiliki diameter 60 mm dengan lebar fin 18 mm.

6. Sistematika penulisan

Sistematika penulisan dalam laporan skripsi ini terdiri dari lima bab, dengan konten masing-masing bab dan daftar pustaka. Bab yang tercantum mencakup Pendahuluan, Studi Literatur, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran, diikuti dengan Daftar Pustaka dan Lampiran.

BAB I: PENDAHULUAN

Bab pertama membahas latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

BAB II: STUDI LITERATUR

Bab kedua ini menguraikan teori-teori dasar yang relevan, termasuk tentang pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), boiler, sistem fluidized bed, *retubing*, metal coating, ceramic coating, serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan topik penelitian.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ketiga mencakup tahapan penelitian, langkah-langkah yang dilakukan, tempat penelitian, serta metode yang digunakan dalam pengumpulan dan analisis data.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab keempat menyajikan hasil pengukuran, analisis data, dan pembahasan tentang kualitas pekerjaan *retubing*, metal coating, dan ceramic coating pada sisi depan dan kanan boiler CFB PLTU 112 MW, dengan parameter yang telah ditentukan.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab terakhir berisi kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk perbaikan atau penelitian lanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

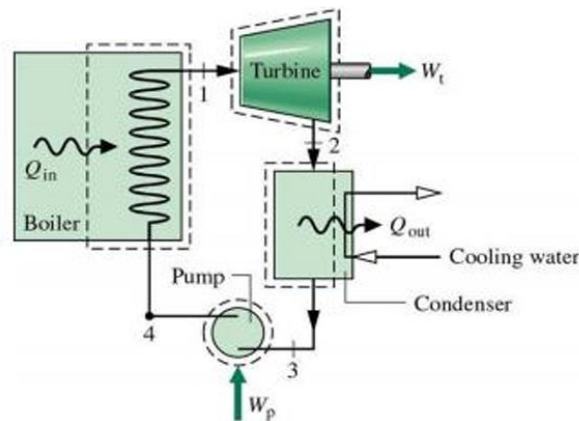
LAMPIRAN

BAB II STUDI LITERATUR

1. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan jenis pembangkit listrik yang menggunakan energi panas dari pembakaran bahan bakar, seperti batu bara, minyak atau gas, untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. Pembangkit ini memproduksi listrik dengan dimanfaatkannya uap panas yang dihasilkan *boiler* yang berasal dari pemanasan air [4]. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator listrik, sehingga menghasilkan energi listrik.

Prinsip kerja PLTU didasarkan pada siklus rankine, dimana air dipanaskan dalam *boiler* hingga berubah menjadi uap bertekanan tinggi. Uap ini dialirkan ke turbin untuk menggerakkan generator, lalu mengalami proses kondensasi dan kembali ke *boiler* untuk dipanaskan kembali. Dengan sistem ini, PLTU mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar secara efisien. Untuk lebih memahami prinsip kerja PLTU, dapat dilihat pada gambar 1 berikut:

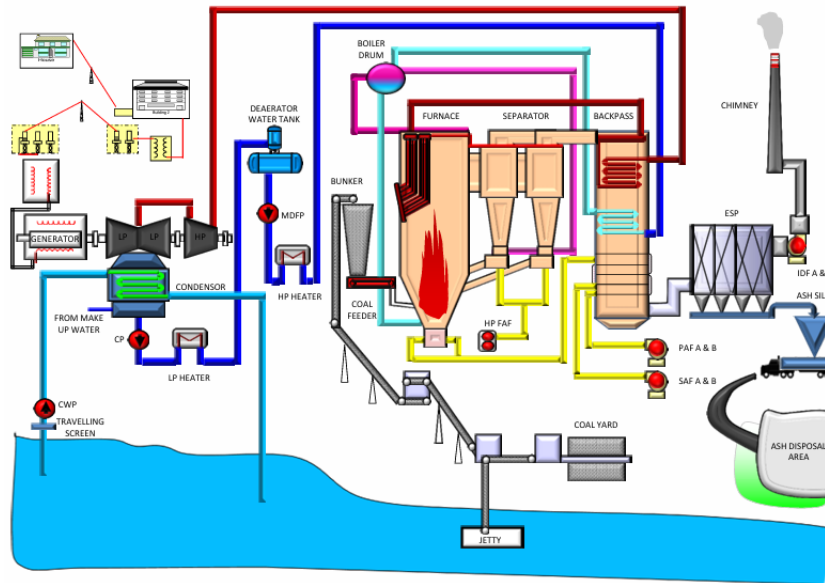


Gambar 1. Siklus rankine [5].

PLTU memiliki beberapa komponen utama, antara lain:

- *Boiler* = berfungsi untuk memanaskan air hingga menjadi uap bertekanan tinggi.
- Turbin Uap = Mengubah energi uap menjadi energi mekanik untuk menggerakkan generator.
- Generator = Mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik.
- Kondensor = Mendinginkan uap bekas dari turbin dan mengubahnya kembali menjadi air.
- Pompa Air Umpan = memompa air hasil kondensasi kembali ke *boiler*.

Struktur dan komponen utama dalam PLTU dapat dilihat pada Gambar 5 berikut:



Gambar 2. Siklus PLTU [6].

PLTU sering digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik dalam skala besar karena efisiensinya yang tinggi serta ketersediaan bahan bakar yang melimpah, terutama batubara. Salah satu contoh PLTU yang beroperasi di Indonesia adalah PLTU Teluk Sirih, yang terletak di Sumatra Barat dengan kapasitas pembangkit mencapai 122 MW per unit.

2. Boiler

Boiler, atau yang dikenal sebagai ketel uap, merupakan suatu sistem peralatan termal yang dirancang untuk menghasilkan uap melalui proses perpindahan panas dari pembakaran bahan bakar. Untuk menghasilkan uap dengan tekanan dan suhu tertentu, sistem ini terdiri dari berbagai komponen yang saling terintegrasi [7]. Proses konversi energi dalam *boiler* melibatkan tiga mekanisme perpindahan panas utama:

A. Konduksi

Perpindahan panas yang terjadi melalui interaksi molekul dalam suatu medium tanpa perpindahan molekul itu sendiri disebut konduksi. Dalam hal *boiler*, mekanisme ini terutama terjadi pada:

- Dinding pipa pemanas (*tube wall*) yang mentransmisikan panas dari gas pembakaran ke air.
- Material isolasi yang meminimalkan kehilangan panas ke lingkungan
- Perpindahan panas melalui lapisan kerak atau deposit pada permukaan pemanas [8].

B. Konveksi

Konveksi terjadi antara permukaan padat dan fluida yang bergerak membutuhkan kombinasi efek konduksi dan pergerakan fluida. Dalam sistem *boiler*, konveksi terjadi pada:

- Perpindahan panas dari gas pembakaran ke permukaan pipa
- Transfer panas dari permukaan pipa ke air/uap.
- Sirkulasi natural atau paksa dalam drum *boiler*.

C. Radiasi

Perpindahan panas radiasi terjadi melalui pancaran gelombang elektromagnetik tanpa menggunakan medium perantara. Radiasi dalam *boiler* dominan pada:

- Perpindahan panas dari nyala api ke permukaan pemanas.
- Transfer energi dalam ruang bakar pada temperature tinggi.
- Radiasi dari gas pembakaran panas ke permukaan penyerap panas.

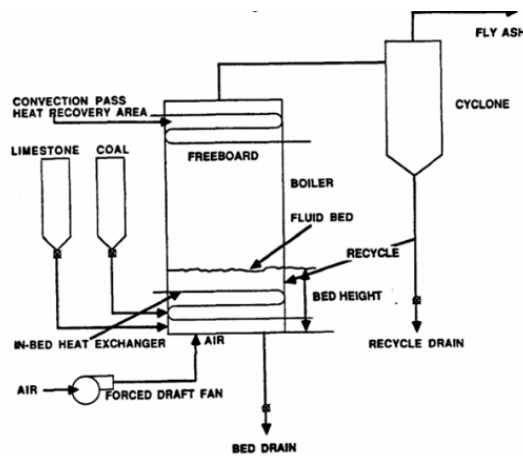
3. *Fluidized bed system*

Boiler fluidized bed system (FBS) merupakan inovasi teknologi pembangkit uap terakhir yang menerapkan asa fluidisasi [9], [10]. Proses ini melibatkan pemanasan material dasar berupa pasir silika yang difluidisasikan menggunakan udara primer. Selanjutnya, bahan bakar dimasukkan bersamaan dengan udara sekunder ke dalam ruang pembakaran yang memiliki suhu operasional antara 800 hingga 900° [11]. Sistem ini menghasilkan peredaran terus-menerus antara komponen ruang pembakaran dan pemisah siklon [12].

Keunggulan teknologi ini mencakup beberapa aspek: efektivitas pembakaran yang maksimal, kemampuan menggunakan beragam jenis bahan bakar [13], serta pengendalian emisi yang unggul, khususnya dalam menekan kadar Nox [14]. Selain itu, stabilitas pengoperasian yang sangat baik dapat dicapai melalui pemerataan suhu dan sistem kendali yang akurat. Berdasarkan karakteristik tersebut, teknologi FBS menjadi pilihan yang tepat untuk pembangkit tenaga listrik berskala besar yang mengutamakan kinerja optimal dengan meminimalkan dampak terhadap lingkungan [15]. Berikut merupakan tiga *fluidized bed system* yang diterapkan pada *boiler* di PLTU yaitu:

A. *Atmospheric fluidized bed combustion (AFBC)*

Sistem AFBC ini merupakan generasi pertama teknologi *fluidized bed* yang beroperasi pada tekanan atmosfer. Dalam sistem ini, udara pembakaran diinjeksikan dari bawah melalui distributor dengan kecepatan yang cukup untuk memfluidisasi campuran bahan bakar dan bed material proses pembakaran terjadi pada temperatur yang relatif rendah (800-900°C) dibandingkan pembakaran konvensional, yang memberikan keuntungan dalam pembentukan NOx yang lebih rendah. Kecepatan fluidisasi yang moderat (1,2-3,7 m/s) menciptakan regime pembakaran yang stabil dengan pencampuran yang baik antara bahan bakar dan udara [16].

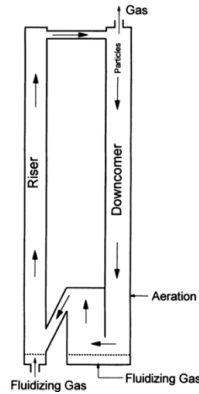


Gambar 3. Skema proses AFBC dasar [16].

Untuk menjamin kontinuitas operasi, sistem AFBC dilengkapi dengan sistem pengumpanan bahan bakar yang dirancang khusus. Sistem ini memastikan aliran bahan bakar yang stabil dan terdistribusi secara merata kedalam pembakaran. Proses ini didukung oleh sistem pembuangan abu yang bekerja secara kontinu untuk mengeluarkan residu pembakaran tanpa mengganggu proses operasional. Selanjutnya, panas yang dihasilkan dari proses pembakaran secara optimal melalui *heat exchanger* terintegrasi untuk menghasilkan uap [17].

B. *Circulating fluidized bed combustion (CFBC)*

CFBC merepresentasikan evolusi signifikan dalam teknologi FBC dengan mengadopsi kecepatan fluidisasi yang lebih tinggi dan sistem sirkulasi material. Operasi pada kecepatan 4-8 m/s menciptakan *regime transport pneumatic* yang menghasilkan pencampuran lebih intensif dan waktu kontak yang lebih lama antara bahan bakar dan udara. Temperatur operasi terjaga pada 850-900°C optimal untuk pembakaran dan pengendalian emisi [18].



Gambar 4. Konfigurasi tipikal untuk reaktor bed fluida beredar [18].

Ruang pembakaran atau *riser* merupakan jantung dari sistem CFBC, tempat berlangsungnya proses pembakaran utama dan perpindahan panas. Di dalam ruangan ini, *bed* material bersirkulasi secara vertikal dengan kecepatan tinggi mencapai 4-8 m/s kecepatan fluidisasinya, menciptakan pencampuran yang intensif antar bahan bakar dan udara pembakaran. Gas pembakaran yang mengandung partikel padat kemudian mengalir menuju siklon separator yang dirancang dengan presisi tinggi untuk memisahkan partikel padat dari gas pembakaran dengan efisiensi mencapai 99% [18].

C. *Pressurized fluidized bed combustion (PFBC)*

PFBC merepresentasikan teknologi FBC paling *advanced* dengan operasi pada tekanan tinggi (6-16 bar). Pengoperasian pada tekanan tinggi memungkinkan integrasi dengan siklus kombinasi, dimana gas pembakaran bertekanan tinggi dapat langsung menggerakkan turbin gas sebelum pemanfaatan panasnya untuk menghasilkan uap. Temperatur operasi 850-950°C optimal untuk pembakaran dan efisiensi sistem .

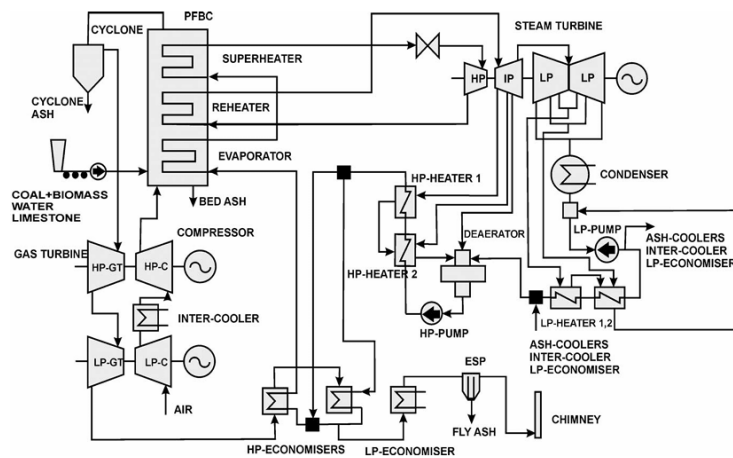


Fig. 1. Schematic of the pressurized fluidized bed combustion combined cycle.

Gambar 5. Skema siklus gabungan pembakaran bed fluida bertekanan

Sistem ini bekerja memasukan campuran bahan bakar (batu bara, biomassa, air, dan batu kapur) ke dalam ruang pembakaran bertekanan, dimana prosesnya dimulai dari pembakaran bahan bakar yang menghasilkan gas panas untuk menggerakkan turbin gas (HP-GT dan LP-GT) [13], sementara panas sisanya dimanfaatkan untuk menghasilkan uap melalui sistem *evaporator*, *superheater*, dan *reheater* yang kemudian uap ini menggerakkan turbin uap bertingkat (HP, IP, LP) [19], dan untuk menjaga efisiensi, sistem dilengkapi dengan berbagai peralatan pendukung seperti *Economizer* untuk memanfaatkan panas sisa, ESP untuk menangkap abu terbang, serta *condenser* untuk mengubah uap bekas kembali menjadi air yang akan disirkulasikan ke sistem, sehingga menghasilkan siklus pembangkit listrik yang efisien dan lebih ramah lingkungan di banding pembangkit konvensional [20].

4. Retubing

Proses *retubing* pada *boiler* CFB merupakan rangkaian aktivitas pemeliharaan yang fundamental dalam menjaga keandalan sistem pembangkit [21]. Prosedur ini diawali dengan penghentian operasi unit secara terkendali, dilanjutkan dengan proses pelepasan *tube* yang telah mengalami penurunan kualitas material menggunakan teknik pemotongan yang terkalibrasi [22], [23]. Tahap berikutnya adalah pemasangan *tube* pengganti melalui prosedur pengelasan yang memenuhi spesifikasi dan standar ASME, dengan penekanan pada kualifikasi welder dan parameter pengelasan yang tervalidasi [24].

Untuk memastikan kualitas hasil pengelasan, serangkaian pengujian *non-destruktif* wajib dilaksanakan, mencakup pemeriksaan radiografi, uji penetrasi, dan pengujian tekanan hidrostatis, [25]. Setiap metode pengujian memiliki fungsi spesifikasi dalam verifikasi integritas sambungan las dan kemampuan *tube* dalam menahan tekanan operasional [26]. Tahap akhir prosedur meliputi pengopresian kembali sistem secara bertahap, dimulai dari pemanasan gradual hingga pengujian performa menyeluruh untuk memverifikasi efektivitas penggantian *tube* dalam mengoptimalkan kinerja *boiler* [25]. Adapun tahapan pada proses *retubing* ini yaitu:

- Proses *cutting tube existing*
- Fabrikasi *tube* baru
- Proses *fit-up tube*
- Pengukuran *Hi-Lo* dan pengukuran *gap*

5. *Sandblasting*

Jenis penyemprotan kering ini biasanya digunakan untuk benda-benda yang terbuat dari metal atau besi yang tidak berisiko mengeluarkan percikan api saat penyemprotan. Contohnya adalah membersihkan bodi rangka mobil, tiang pancang, dan bagian kapal laut.

A. *Dry sandblasting*

Jenis penyemprotan kering ini biasanya digunakan untuk benda-benda yang terbuat dari metal atau besi yang tidak berisiko mengeluarkan percikan api saat penyemprotan. Contohnya adalah membersihkan bodi rangka mobil, tiang pancang, dan bagian kapal laut.

B. *Wet sandblasting*

Wet sandblasting ini digunakan pada benda metal atau besi yang rentan terbakar atau di lokasi yang rawan kebakaran, seperti tangka bahan bakar, kilang minyak *offshore*, dan pom bensin. Pasir silika yang digunakan dicampur dengan bahan kimia khusus anti karat untuk mengurangi percikan api selama proses *sandblasting*.

6. *Metal coating*

Pelapisan logam (*metal coating*) adalah suatu proses teknologi yang mencakup penerapan lapisan pelindung pada permukaan logam dasar melalui beragam teknik aplikasi [27]. Metode yang umum digunakan meliputi *electroplating*, pelapisan celup panas (*hot-dipgalvanizing*), penyemprotan termal, dan deposisi uap fisik (PVD). karakteristik permukaan logam, termasuk:

- Peningkatan ketahanan terhadap korosi
- Optimasi ketahanan terhadap keausan
- Perbaikan sifat konduktivitas elektrik
- Peningkatan nilai estetika.

Keberhasilan proses pelapisan logam ditentukan oleh tiga faktor kunci [28]:

- Metode persiapan permukaan yang sistematis dan menyeluruh
- Pengendalian variabel proses secara akurat

Seleksi material pelapis yang mempertimbangkan kompatibilitas dengan logam dasar dan kesesuaian dengan spesifikasi penggunaan.

7. *Ceramic Coating*

Pelapisan keramik (*ceramic coating*) merupakan teknik penerapan bahan keramik ke permukaan substrat yang dapat dilaksanakan melalui beragam metode, seperti

penyemprotan plasma, deposisi uap kimia (CVD), atau pelapisan sol-gel [29]. Proses ini menghasilkan lapisan pelindung yang memiliki beberapa keunggulan, antara lain ketahanan terhadap suhu tinggi, ketahanan terhadap keausan, kestabilan kimiawi, serta kemampuan isolasi termal yang unggul. Kualitas hasil pelapisan sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama:

- Pengaturan parameter proses yang optimal,
- Persiapan permukaan yang memadai,
- Keserasian pemuaian termal antara lapisan keramik dengan substrat yang digunakan [30].

8. Penelitian Terdahulu

- a. Menurut penelitian yang dilakukan oleh A. H. Rana dan S. H. Zala, perihal “Analisis performa *boiler* industry di Yash chemicals pvt ltd, Bhavnagar”, bertujuan untuk mengidentifikasi kehilangan energi pada sistem *boiler* berbahan bakar kayu serta menghitung efisiensinya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi *boiler* hanya mencapai 38,20% yang disebabkan oleh tingginya kehilangan panas melalui gas buang dan kerusakan isolasi sistem [31].
- b. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ganesha R. Chate, Raviraj M. Kulkarni, Nikhir R., Vaibhav R. Chate, perihal “*Ceramic material coating: emerging future applications*,” tujuan penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi aplikasi potensial dari pelapisan material keramik dalam berbagai bidang seperti Teknik mesin, aerospace, biomedis, energi dan industri semikonduktor. Kesimpulannya penelitian ini menunjukkan bahwa pelapisan keramik dapat meningkatkan sifat-sifat material seperti ketahanan korosi, ketahanan panas, dan biokompatibilitas, serta memperpanjang lifetime material yang dilapisi [29].
- c. Menurut penelitian terdahulu yang dilakukan oleh H.S. Aljibori, A. Alamiery, dan A.A.H. Kadhum, perihal “*Advances in corrosion protection coatings: a comprehensive review*,” tujuan penelitian ini adalah untuk memberikan tinjauan komprehensif tentang kemajuan terbaru dan tren yang muncul dalam pelapisan perlindungan korosi. Kesimpulannya menunjukkan bahwa pelapisan ini sangat penting untuk melindungi berbagai industri dari dampak buruk korosi dengan menyoroti peningkatan signifikan dalam formula organik, keramik, dan pelapisan logam, serta teknik pengujian baru untuk menilai pelapisan [27].
- d. Menurut penelitian yang dilakukan oleh David N. French, perihal “*Failures of boiler and related equipment*,” Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis penyebab

kegagalan pada ketel uap dan peralatan terkait dalam pembangkit tenaga uap, baik yang menggunakan bahan bakar fosil maupun reaktor nuklir sebagai sumber panas utama. Kesimpulan penelitian ini adalah bahwa sebagian besar kegagalan disebabkan oleh operasi yang tidak tepat dan cacat pabrikan, dengan *overheating* dan korosi menjadi penyebab utama kegagalan pada komponen-komponen bertekanan dalam ketel uap [21].

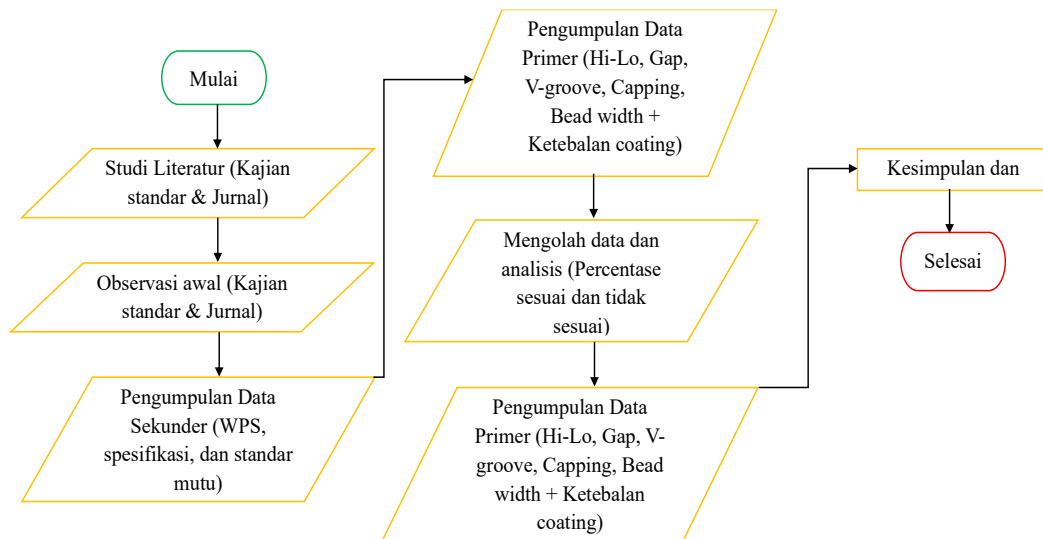
- e. Menurut Penelitian S.A. Jenabali Jahromi, S. Javadpour, dan Kh. Gheisari tentang "*Failure analysis of welded joints in a power plant exhaust flue*" bertujuan menganalisis penyebab kegagalan sambungan las pada saluran pembuangan pembangkit listrik, dengan kesimpulan bahwa pemilihan elektroda yang tidak tepat dapat menyebabkan pembentukan fase sigma, yang melemahkan struktur akibat embrittlement dan kelelahan termal, sehingga diperlukan pemilihan bahan las yang sesuai untuk menjaga keandalan dan efisiensi sistem [26].
- f. Menurut penelitian yang dilakukan oleh S.Cicero, F. Gutiérrez-Solana, dan J.A. Álvarez, perihal "*Structural integrity assessment of different components of power plant*" yang bertujuan menganalisis integritas struktural beberapa komponen pembangkit listrik untuk menentukan apakah kegagalan yang terjadi dapat menyebabkan kerusakan umum pada komponen lain atau jika tindakan yang dilakukan setelah kegagalan cukup untuk memastikan operasi yang benar dari pembangkit listrik. Kesimpulan dari penelitian ini menyatakan bahwa kegagalan komponen disebabkan oleh proses retak yang dibantu oleh *hydrogen* pada material yang sensitive, yang diakibatkan oleh perlakuan panas yang tidak memadai oleh produsen, dan bahwa kemungkinan besar tidak ada retak tambahan atau jika ada, jumlah yang terbatas dan tidak akan memengaruhi kondisi operasi dari pembangkit listrik [32].
- g. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Muhamad Waldi, Eddy Agus Basuki, Budi Prawara, Erie Martides, Endro Juniarto, Perihal "Kajian *thermal spray coating* dengan teknologi *High Velocity Oxy-Fuel* (HVOF) serta perlakuan pasca prosesnya sebagai pelindung *boiler tubes* pembangkit listrik tenaga uap" yaitu bertujuan untuk mengevaluasi *Thermal Spray Coating* (TCS) berbasis *High Velocity Oxy-Fuel* (HVOF) dan perlakuan pasca pelapisannya dalam melindungi pipa *boiler* Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), dengan Kesimpulan bahwa teknologi ini terbukti efektif meningkatkan ketahanan terhadap korosi, erosi, dan oksidasi, sekaligus mendukung efisiensi termal serta memperpanjang umur pemakaian komponen pada kondisi operasi bersuhu tinggi [33].

- h. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Risqullah, H., Kardiman, K., & Dirja, I. (2022). Perihal “Proses *sandblasting* dalam proses fabrikasi baja struktur pada proyek *refinery development master plan* (RDMP) di PT AJP” yaitu tujuan dari jurnal ini adalah untuk menjelaskan proses sandblasting dalam pabrikan baja struktur di PT AJP, yang mencakup langkah-langkah persiapan, pelaksanaan, hingga inspeksi material, serta pentingnya tahap ini untuk memastikan kualitas pelapisan dan mencegahnya korosi. Kesimpulannya adalah bahwa sandblasting merupakan tahap penting dalam fabrikasi yang dilakukan untuk membersihkan permukaan material dan menciptakan tekstur yang mendukung daya rekat lapisan pelindung [34].
- i. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Bigwanto, A. Perihal “Analisis proses *sandblasting* dengan variasi jarak, sudut dan waktu terhadap kekasaran permukaan dengan metode *respons surface*” tujuan dari analisis pengaruh variasi jarak, sudut, dan waktu penyemprotan dalam proses *sandblasting* terhadap kekasaran permukaan baja menggunakan metode *response surface*, guna menemukan parameter optimal untuk hasil yang maksimal. Kesimpulannya, variasi tersebut berpengaruh signifikan terhadap kekasaran permukaan, dengan parameter optime ditemukan pada jarak 448,98 mm, sudut 30° [35].
- j. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ghosh, D., Roy, H., Saha, A., & subramania, C. Perihal “*Failure analysis of boiler water wall tube: a case study from thermal power plant*” Tujuan dari jurnal ini adalah untuk menganalisis penyebab kegagalan pada tabung dinding air *boiler* di pembangkit listrik tenaga uap dan memberikan rekomendasi pencegahan agar kegagalan serupa tidak terulang. Kesimpulannya, kegagalan disebabkan oleh kombinasi cacat las dan aliran fluida yang tidak stabil yang menyebabkan kelelahan material akibat bebas dinamis [1].

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Dibawah ini merupakan langkah-langkah yang akan dilakukan dalam melakukan penelitian ini:



Gambar 6. Diagram *flowchart*

2. Langkah Penelitian

a. Studi literatur

Sebelum memulai penelitian, dilakukan kajian mendalam mengenai *retubing boiler*, *metal coating*, *ceramic coating*, dan mempelajari tentang *boiler CFB*.

b. Pengumpulan data sekunder

Data sekunder yang dikumpulkan meliputi:

- SOP untuk pekerjaan *retubing*.
- SOP untuk pekerjaan *metal coating*.
- SOP untuk pekerjaan *ceramic coating*.
- Faktor-faktor penyebab kebocoran pada *tube boiler CFB*.

c. Pengumpulan data primer dari pekerjaan lapangan

Pengumpulan data primer melalui tahap inspeksi seperti inspeksi visual, inspeksi V-groove, inspeksi gap, inspeksi *Hi-Lo*, inspeksi pengelasan, dan inspeksi profil permukaan.

d. Pengolahan data dan analisis data

Data yang diperoleh akan dianalisis untuk mendapatkan data aktual mengenai “*Retubing, metal coating, dan ceramic coating*”.

e. Kesimpulan dan rekomendasi

Dari analisis data yang dilakukan, dihasilkan kesimpulan dan rekomendasi bahwa semakin teliti dan akurat proses *retubing, metal coating, dan ceramic coating*, semakin baik hasilnya dan dapat mengurangi kebocoran pada tabung *boiler CFB*.

3. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PLTU Teluk Sirih (2×112 MW) berlokasi di desa Teluk Sirih RT 01/RW 04, Kelurahan Teluk Kabung Tengah, Kecamatan Bungus Teluk Kabung, Kota Padang, Sumatra Barat.



Gambar 7. Lokasi penelitian

4. Keberhasilan Pengukuran

Keberhasilan pengukuran mengacu pada sejauh mana hasil pengukuran sesuai dengan standar atau nilai yang diharapkan. Pengukuran dianggap berhasil jika hasilnya berada dalam rentang yang dapat diterima, sesuai dengan toleransi yang telah ditentukan.

a. Penjelasan Keberhasilan Pengukuran

Keberhasilan pengukuran merupakan indikator seberapa tepat dan akurat suatu proses pengukuran dalam mencapai hasil yang sesuai dengan standar yang telah ditetapkan. Pengukuran dianggap berhasil apabila sebagian besar titik pengukuran berada dalam batas toleransi yang ditentukan, yang menunjukkan bahwa proses pengukuran dapat dilakukan dengan baik dan tidak ada kesalahan yang signifikan. Semakin banyak titik pengukuran

yang berada dalam rentang toleransi yang diterima, semakin tinggi tingkat keberhasilan pengukuran tersebut. Hal ini mencerminkan kualitas dan konsistensi dari alat ukur serta prosedur pengukuran yang digunakan, serta menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh dapat diandalkan dan sesuai dengan ekspektasi yang diinginkan. Sebaliknya, semakin sedikit titik yang memenuhi standar, semakin rendah tingkat keberhasilan pengukuran tersebut, yang dapat menandakan adanya variabilitas atau kesalahan dalam proses pengukuran.

b. Rumus Menghitung Keberhasilan

Keberhasilan pengukuran dapat dihitung dengan menggunakan persentase titik pengukuran yang berada dalam rentang toleransi yang telah ditetapkan. Rumus untuk menghitung keberhasilan pengukuran adalah sebagai berikut:

$$K_{berhasil} = \left(\frac{N_{memenuhi}}{N_{total}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

Dimana:

- $K_{berhasil}$ = Tingkat keberhasilan pengukuran (%)
- $N_{memenuhi}$ = Jumlah titik pengukuran yang memenuhi standar
- N_{total} = Jumlah total titik pengukuran

5. Ketidaksesuaian Pengukuran

Ketidaksesuaian pengukuran menunjukkan adanya perbedaan antara hasil pengukuran dengan nilai yang diinginkan atau standar yang telah ditetapkan. Ketidaksesuaian ini terjadi ketika hasil pengukuran berada di luar batas toleransi yang diterima.

a. Penjelasan Ketidaksesuaian Pengukuran

Ketidaksesuaian pengukuran dapat berupa over measurement (pengukuran melebihi standar) atau under measurement (pengukuran kurang dari standar). Tingkat ketidaksesuaian ini dihitung dengan melihat seberapa banyak pengukuran yang keluar dari batas toleransi yang telah ditetapkan.

b. Rumus Menghitung Ketidaksesuaian

Rumus untuk menghitung ketidaksesuaian pengukuran adalah sebagai berikut:

$$K_{tidak\ sesuai} = \left(\frac{N_{tidak\ sesuai}}{N_{total}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Dimana:

- $K_{tidak\ sesuai}$ = Tingkat ketidaksesuaian pengukuran (%)
- $N_{tidak\ sesuai}$ = Jumlah titik pengukuran yang tidak memenuhi standar (baik *over* maupun *under measurement*)
- N_{total} = Jumlah total titik pengukuran

6. Ketidakpastian Pengukuran

Ketidakpastian pengukuran mengacu pada variabilitas yang ada dalam hasil pengukuran. Ketidakpastian ini mencakup pengaruh berbagai faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran, baik itu kesalahan alat, kondisi lingkungan, atau teknik pengukuran yang digunakan.

a. Penjelasan Ketidakpastian Pengukuran

Ketidakpastian pengukuran sering kali dihitung dengan menggunakan statistik seperti deviasi standar atau interval kepercayaan, yang memberikan gambaran mengenai rentang nilai di mana hasil pengukuran diperkirakan berada. Ketidakpastian ini penting untuk memahami sejauh mana hasil pengukuran dapat bervariasi.

c. Rumus Menghitung Ketidakpastian

Untuk menghitung ketidakpastian pengukuran, salah satu pendekatan yang digunakan adalah menghitung deviasi standar dari serangkaian pengukuran. Rumus deviasi standar adalah sebagai berikut:

$$\sigma = (x_{max} - x_{min})/2 \quad (3)$$

Dimana:

- σ = Deviasi standar (Ketidakpastian)
- x_{max} = Nilai maksimum dari hasil pengukuran
- x_{min} = Nilai minimum dari hasil pengukuran

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Proses pekerjaan *retubing*

A. Proses *cutting tube existing*



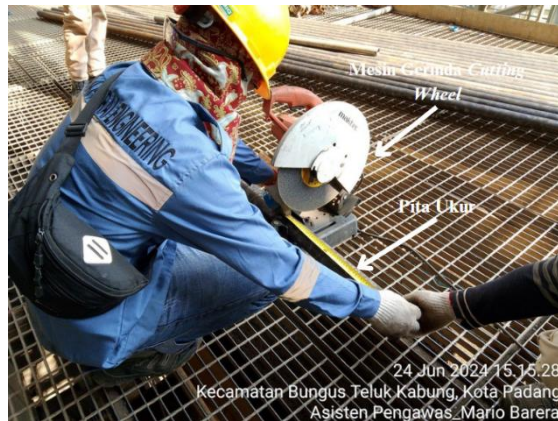
Gambar 8. Proses *cutting tube existing*

Pada Gambar 8, merupakan tahap awal dalam proses *retubing* dilakukan dengan pemotongan *tube* lama yang telah mengalami penurunan performa. *Tube* yang perlu diganti diidentifikasi berdasarkan hasil inspeksi sebelumnya yang menunjukkan adanya kerusakan berupa korosi, penipisan dinding, kebocoran, atau penurunan efisiensi perpindahan panas.

Proses *cutting tube* dilaksanakan menggunakan peralatan potong presisi untuk menghindari kerusakan pada header dan struktur pendukung lainnya. Selama proses *cutting*, parameter-parameter seperti kecepatan potong, kedalaman, dan teknik pemotongan dicatat untuk analisis efektivitas metode.

B. Fabrikasi *tube* baru

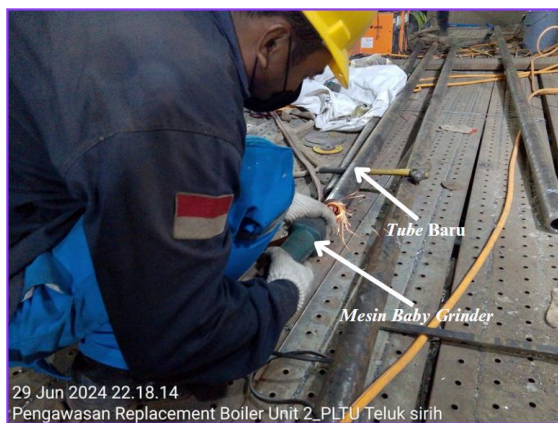
Setelah *tube* lama dilepaskan, dilakukan fabrikasi *tube* pengganti dengan spesifikasi material yang sesuai. Material *tube* yang digunakan yaitu ASTM A210/ASME SA210. Pada Gambar 9, 10 dan 11 merupakan serangkaian proses fabrikasi *tube*, diawali dengan pemotongan material sesuai dengan panjang yang dibutuhkan dengan toleransi $\pm 0,5$ mm, pembentukan ujungnya dengan metode *beveling* dengan ukuran joint angle 30° sesuai dengan dokumen WPS yang ada, dengan begitu dapat memfasilitasi pemasangan dan pemasangan yang optimal, serta pembersihan permukaan dengan untuk menghilangkan kontaminan yang dapat mempengaruhi kualitas sambungan las.



Gambar 9. Proses *Cutting tube* baru



Gambar 10. Proses *beveling*



Gambar 11. Proses *cleaning tube*

Pascaproses fabrikasi *tube* bar, tahapan selanjutnya yang dilaksanakan adalah proses *fit up tube* yang meliputi pengukuran *Hi-Lo* dan pengukuran *gap*. Kedua pengukuran tersebut merupakan parameter krusial dalam menentukan kualitas penempatan dan kesesuaian dimensi antarkomponen yang akan dipadukan dalam proses penyambungan.

C. *Fit up tube*

Proses *fit up tube* merupakan tahapan kritis dalam pabrikasi yang bertujuan untuk memastikan ketepatan posisi dan jarak antarkomponen sebelumnya dilakukan pengelasan. Prosedur ini mencakup pengukuran *Hi-Lo* (perbedaan ketinggian permukaan) dan *gap* (celah) antara dua *tube* yang akan disambungkan, yang dilakukan menggunakan alat ukur presisi untuk memverifikasi bahwa parameter-parameter tersebut berada dalam batas toleransi yang diizinkan sesuai standar yang berlaku. Ketepatan dalam proses *fit up tube* ini sangat menentukan kualitas sambungan las yang dihasilkan dan mencegah terjadinya cacat pengelasan seperti *incomplete fusion* atau *misalignment* yang dapat menurunkan integritas struktur secara keseluruhan. Dapat dilihat pada gambar berikut ini merupakan serangkaian proses *fit up tube* dari proses pemasangan *tube* baru, pengukuran *Hi-Lo*, pengukuran *gap* dan proses *tack weld*.



Gambar 12. Proses *Fit-Up*



Gambar 13. Proses Pengukuran *Hi-Lo*



Gambar 14. Proses Pengukuran *Gap*

D. *Welding tube*

Prosedur pengelasan pada penelitian ini menggunakan metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan mesin las Jasic TIG200P dan elektroda tipe CHG-56 Atlantic, yang diaplikasikan melalui serangkaian tahapan sistematis. Adapun tahapan pengelasan dimulai dengan proses *tack weld*. Setelah pelaksanaan *tack weld*, dilakukan verifikasi ulang terhadap parameter geometris sambungan, khususnya pengukuran *Hi-Lo* dan *gap*, untuk memastikan tidak terjadinya pergeseran atau deformasi selama proses pengikat awal. Apabila hasil pengukuran masih berada dalam rentang toleransi standar yang dipersyaratkan, proses selanjutnya berlanjut pada tahap *root pass* untuk membentuk akar sambungan las, kemudian dilanjutkan dengan *hot pass* guna memperbaiki dan menyempurnakan penetrasi las, serta diakhiri dengan proses *capping* yang berfungsi memberikan lapisan akhir untuk melindungi dan memperkuat konstruksi sambungan *tube*.



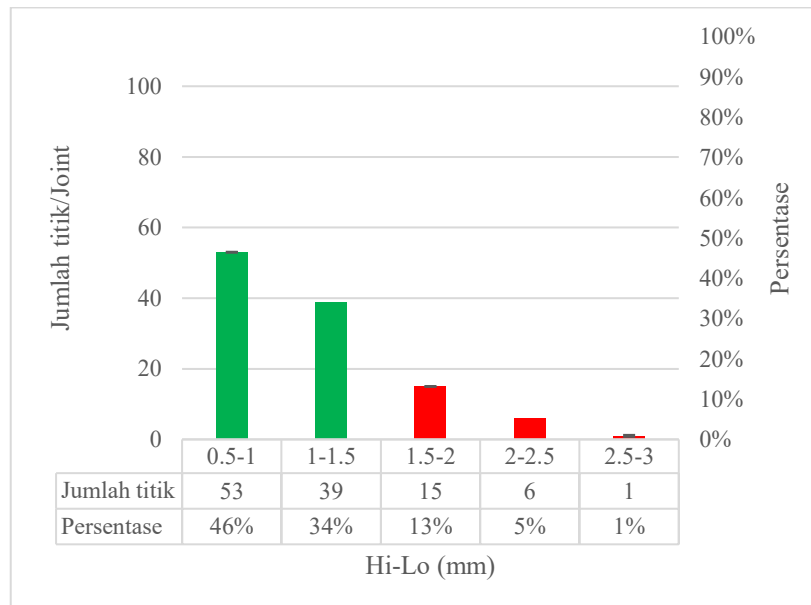
Gambar 15. Proses *Welding*

E. Hasil data *retubing* pada sisi *front wall*

Berikut merupakan data hasil *retubing* per sambungan *tube*, yang menunjukkan jumlah total sambungan *tube* yang memenuhi ketentuan sesuai dengan dokumen *Welding Procedure Specification* (WPS) yang berada di dokumen pengadaan serta jumlah sambungan yang tidak memenuhi ketentuan sesuai dengan dokumen tersebut. Diagram di bawah ini menyajikan diagram data yang diperoleh dari hasil pengukuran pada sisi dinding depan (*front wall*). Pengukuran tersebut mencakup beberapa parameter yaitu pengukuran *Hi-Lo*, *gap*, *v-groove*, *capping*, dan *bead width*. Berikut merupakan hasil diagram datanya:

a. Hasil data pengukuran *Hi-Lo*

Pengukuran *Hi-Lo* dilakukan untuk mengevaluasi perbedaan ketinggian atau ketidaksesuaian pada sambungan las pipa, dengan batas toleransi yang mengacu pada standar ASME Section IX, yaitu maksimum 1,5 mm. Nilai *Hi-Lo* yang melebihi batas ini dianggap tidak sesuai standar dan berpotensi mempengaruhi kualitas sambungan las. Dalam diagram berikut, klasifikasi hasil pengukuran ditunjukkan melalui warna hijau untuk nilai yang sesuai standar ($\leq 1,5$ mm) dan warna merah untuk nilai yang tidak sesuai standar ($> 1,5$ mm).



Gambar 16. Diagram hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 0°

Pada Gambar 16, terlihat hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 0° . Dari total 114 titik pengukuran, sebanyak 92 titik (atau 81% dari total pengukuran) memiliki nilai *Hi-Lo* kurang dari 1,5 mm, sehingga dinyatakan telah memenuhi standar.

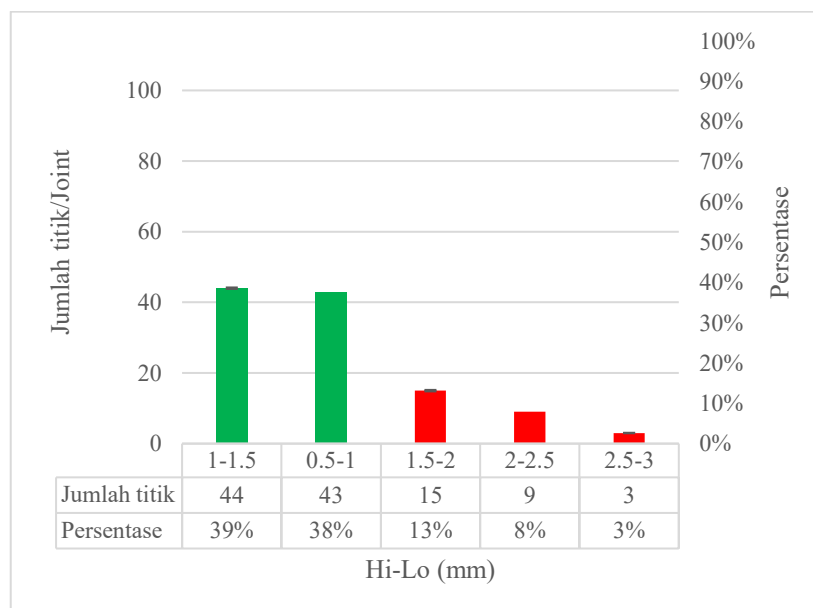
Jika dilihat lebih rinci, mayoritas pengukuran berada pada interval 0,5-1 mm, yaitu sebanyak 53 titik atau setara dengan 46% dari total pengukuran. Kemudian disusul oleh

interval 1-1,5 mm dengan 39 titik (34%). Untuk nilai di luar batas toleransi, jumlah terbanyak ditemukan pada interval 1,5-2 mm sebanyak 15 titik (13%).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang menunjukkan adanya variasi atau kesalahan dalam pengukuran. Sumber ketidakpastian ini dapat berasal dari beberapa faktor:

- Instrumen Pengukuran: *Hi-Lo* gauge yang digunakan mungkin memiliki ketelitian yang terbatas, yang dapat menyebabkan ketidakpastian dalam hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Jika pengukuran dilakukan di posisi yang sulit dijangkau atau tidak ideal, ini dapat memperburuk ketidakpastian.
- Kesalahan Pembacaan: Meskipun alat pengukuran ini lebih presisi dibandingkan dengan alat manual, kesalahan pembacaan yang terjadi selama proses pengukuran atau kesalahan dalam pencatatan dapat memperbesar ketidakpastian.
- Kalibrasi Alat: Ketidakpastian juga dapat berasal dari kalibrasi alat yang tidak tepat atau tidak terpelihara dengan baik.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (81%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan kemungkinan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah perbaikan dalam pengukuran dan kalibrasi alat harus dipertimbangkan untuk meminimalisir ketidakpastian dan meningkatkan akurasi pengukuran di masa mendatang..



Gambar 17. Diagram hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 90°

Sementara itu, Gambar 17 menunjukkan hasil pengukuran *Hi-Lo* Pada sudut 90°. Dari total 114 titik pengukuran, terdapat 87 titik atau 76,3% yang dinyatakan memenuhi standar, sedangkan 27 titik atau 23,7% tergolong tidak sesuai standar.

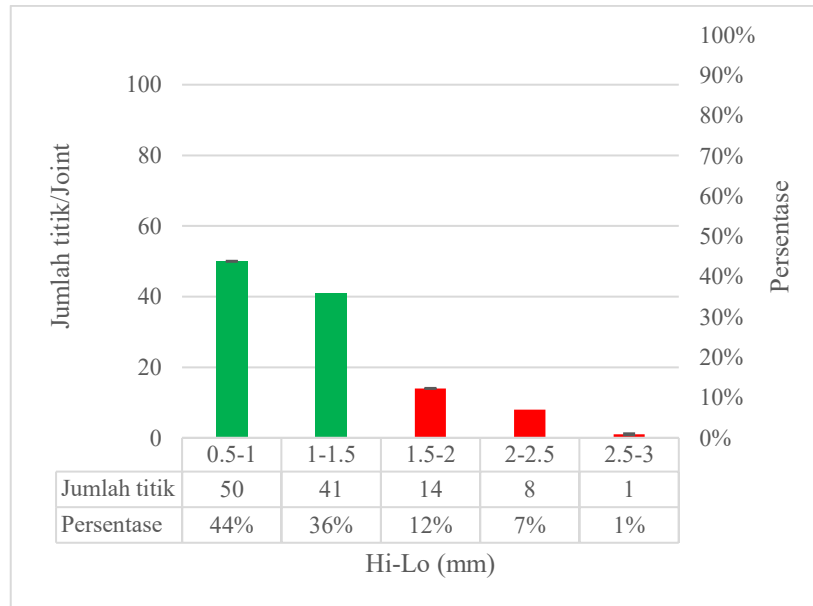
Jika dilihat lebih rinci, jumlah pengukuran terbanyak berada pada interval 1-1,5 mm, yaitu 44 titik (39%), disusul oleh interval 0,5-1 mm dengan 43 titik (38%). Sementara itu, pada rentang nilai melebihi batas toleransi, jumlah tertinggi tercatat pada interval 1,5-2 mm sebanyak 15 titik (13%).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang menunjukkan adanya variasi atau kesalahan dalam pengukuran. Sumber ketidakpastian ini dapat berasal dari beberapa faktor:

- Instrumen Pengukuran: *Hi-Lo gauge* yang digunakan mungkin memiliki ketelitian yang terbatas, yang dapat menyebabkan ketidakpastian dalam hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Jika pengukuran dilakukan di posisi yang sulit dijangkau atau tidak ideal, ini dapat memperburuk ketidakpastian.
- Kesalahan Pembacaan: Meskipun alat pengukuran ini lebih presisi dibandingkan dengan alat manual, kesalahan pembacaan yang terjadi selama proses pengukuran atau kesalahan dalam pencatatan dapat memperbesar ketidakpastian.
- Kalibrasi Alat: Ketidakpastian juga dapat berasal dari kalibrasi alat yang tidak tepat atau tidak terpelihara dengan baik.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (76,3%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan kemungkinan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah perbaikan dalam pengukuran dan kalibrasi alat harus dipertimbangkan untuk meminimalisir ketidakpastian dan meningkatkan akurasi pengukuran di masa mendatang.

Secara keseluruhan, meskipun terdapat ketidakpastian dalam pengukuran, namun hasil yang diperoleh tetap mencerminkan kondisi yang cukup representatif dari keadaan lapangan yang sebenarnya. Oleh karena itu, meskipun terdapat sejumlah faktor yang dapat memengaruhi akurasi pengukuran, penelitian ini memberikan gambaran yang jelas mengenai variabilitas hasil yang terjadi. Hasil ini dapat dijadikan sebagai acuan untuk penelitian lebih lanjut dengan pendekatan yang lebih cermat dalam mengurangi potensi kesalahan yang ada.



Gambar 18. Diagram hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 180°

Gambar 18 menampilkan hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 180°. Dari total 114 titik pengukuran, tercatat 91 titik atau 80% dinyatakan memenuhi standar (nilai *Hi-Lo* ≤ 1,5 mm), sedangkan 23 titik atau 20% berada di luar batas toleransi.

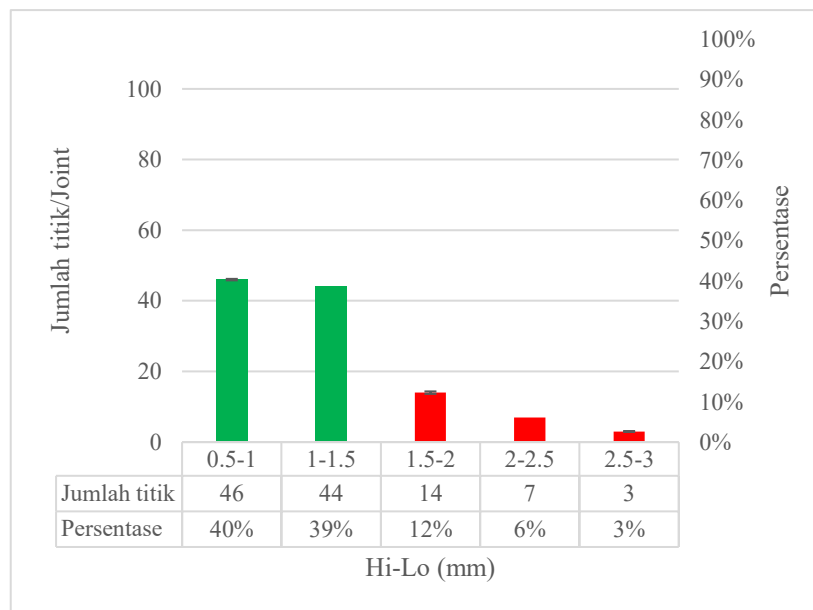
Jika dilihat lebih rinci, jumlah pengukuran terbanyak berada pada interval 0,5-1 mm, yakni 50 titik (44%), diikuti oleh interval 1-1,5 mm dengan 41 titik (36%). Sementara itu, pada rentang nilai yang melebihi standar jumlah tertinggi terdapat pada interval 1,5-2 mm sebanyak 14 titik (12%).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang menandakan adanya kemungkinan variasi atau kesalahan dalam hasil pengukuran. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- **Kondisi Lingkungan:** Pengukuran yang dilakukan di lingkungan yang kurang stabil, seperti di area dengan suhu atau kelembapan yang bervariasi, dapat mempengaruhi ketepatan pengukuran. Kondisi suhu yang tinggi atau kelembapan tinggi dapat menyebabkan perubahan bentuk atau ekspansi pada material, yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
- **Teknik Pengukuran:** Kesalahan dalam teknik pengukuran juga dapat berperan dalam ketidakpastian. Pengukuran yang tidak dilakukan dengan konsisten atau pada posisi yang tepat dapat menghasilkan data yang tidak akurat. Misalnya, penerapan tekanan yang tidak merata saat menggunakan *Hi-Lo* gauge atau kurangnya kestabilan saat membaca hasil pengukuran.

- Ketidakakuratan Pengukuran pada Bagian Tertentu: *Hi-Lo* gauge bisa mengalami kesulitan saat digunakan di bagian-bagian dengan permukaan yang tidak rata atau pada titik yang lebih jauh dari titik pengukuran ideal. Ketidakpastian ini lebih besar pada bagian dengan celah yang sempit atau bentuk yang kompleks.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini digital, ketidakpastian tetap ada terkait dengan batas resolusi alat. Jika *Hi-Lo* gauge tidak mampu menangkap perbedaan yang sangat kecil, pengukuran pada skala yang lebih kecil bisa menyebabkan penyimpangan.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (80%) berada dalam standar, tetap ada potensi variabilitas yang perlu dipertimbangkan, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Untuk meningkatkan keandalan hasil pengukuran, perbaikan dalam kondisi lingkungan, teknik pengukuran yang lebih presisi, dan kalibrasi alat secara berkala sangat disarankan.



Gambar 19. Diagram hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 270°

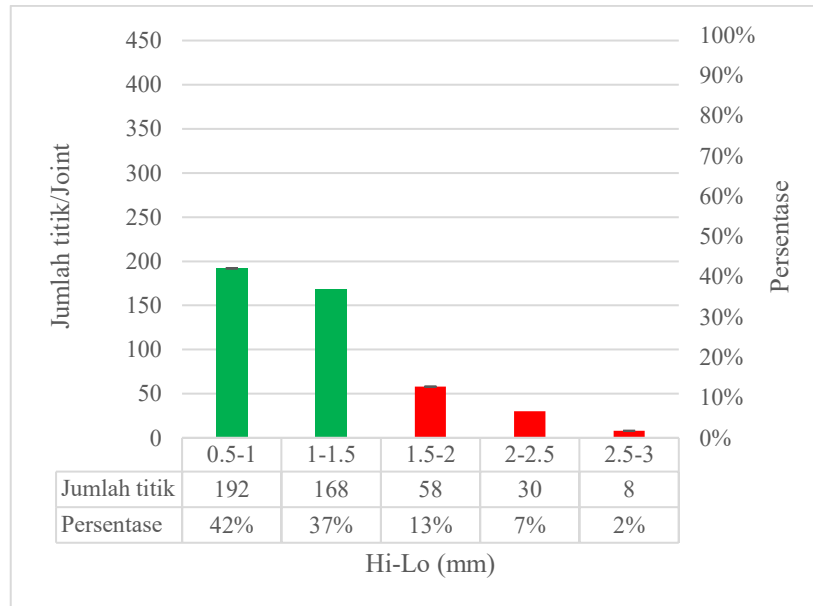
Selanjutnya, Gambar 19 menunjukkan hasil pengukuran *Hi-Lo* pada sudut 270°. Dari 114 titik pengukuran, sebanyak 90 titik atau 79% teridentifikasi sesuai standar, sedangkan 24 titik atau 21% tergolong tidak memenuhi standar. Secara lebih detail, jumlah pengukuran terbanyak terdapat pada interval 0,5-1 mm sebanyak 46 titik (41%), kemudian diikuti interval 1-1,5 mm dengan 44 titik (39%). Untuk titik yang tidak sesuai standar, jumlah tertinggi berada pada interval 1,5-2 mm dengan 14 titik (12%).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang menunjukkan adanya potensi kesalahan atau variasi dalam hasil pengukuran. Beberapa faktor yang berkontribusi pada ketidakpastian ini adalah:

- Kesalahan Posisi Pengukuran: Ketidakpastian dapat muncul jika pengukuran dilakukan di area yang tidak rata atau sulit dijangkau, yang bisa mengganggu ketepatan pembacaan alat. Misalnya, posisi pengukuran yang lebih jauh atau dalam celah sempit dapat meningkatkan risiko kesalahan.
- Pengaruh Kondisi Permukaan: Ketidakpastian juga dapat dipengaruhi oleh kondisi permukaan yang tidak rata atau bentuk permukaan yang tidak ideal. Permukaan pengukuran yang lebih kasar atau tidak konsisten bisa menyebabkan variasi dalam hasil pengukuran.
- Resolusi Alat: Meskipun menggunakan alat digital, ketidakpastian bisa timbul dari keterbatasan resolusi alat dalam mendeteksi perbedaan yang sangat kecil. Pengukuran yang sangat halus mungkin tidak terdeteksi dengan akurat oleh alat, mempengaruhi hasil pengukuran di rentang nilai yang sangat dekat.
- Kesalahan Operator: Meskipun alat ini digital, ketidakpastian juga bisa berasal dari kesalahan operator, baik dalam hal pembacaan hasil atau pengukuran yang dilakukan dengan tekanan atau sudut yang tidak konsisten.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun sebagian besar pengukuran (79%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi yang dapat mempengaruhi hasil, terutama pada titik yang tidak sesuai standar. Untuk mengurangi ketidakpastian, langkah-langkah seperti perbaikan teknik pengukuran, penggunaan alat yang lebih presisi, dan memastikan pengukuran dilakukan dengan posisi yang lebih stabil dan tepat akan sangat bermanfaat.

Untuk itu, penyusunan prosedur yang lebih sistematis dalam pelaksanaan pengukuran serta pemilihan alat yang lebih sesuai dengan kondisi lapangan diharapkan dapat meningkatkan ketepatan hasil pengukuran. Dengan demikian, meskipun ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi ketidakpastian, penerapan prosedur yang tepat serta penggunaan teknologi terbaru akan mengurangi margin kesalahan dan meningkatkan keandalan data yang diperoleh. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi untuk penelitian lebih lanjut dalam upaya meminimalisir kesalahan dan meningkatkan akurasi pengukuran di masa depan.



Gambar 20. Diagram pengukuran keseluruhan *Hi-Lo*

Adapun Gambar 20 merangkum hasil pengukuran *Hi-Lo* secara keseluruhan dari semua sudut. Dari total 456 titik pengukuran, terdapat 360 titik atau 79% yang dinyatakan memenuhi standar, sedangkan 96 titik atau 21% teridentifikasi tidak sesuai standar.

Jika dirinci lebih lanjut, pengukuran terbanyak berada pada interval 0,5-1 mm sebanyak 192 titik (42%) diikuti interval 1-1,5 mm dengan 168 titik (37%). Sementara itu, pada nilai di luar standar, jumlah tertinggi tercatat pada interval 1,5-2 mm sebanyak 58 titik (13%). Secara umum, hasil ini mengindikasikan bahwa mayoritas sambungan pada keseluruhan pengukuran telah memenuhi standar ASME Section IX, meskipun terdapat sejumlah titik yang perlu diperbaiki untuk meningkatkan kualitas sambungan secara menyeluruh.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang berarti ada variasi dalam pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi hasil secara keseluruhan. Beberapa faktor yang memengaruhi ketidakpastian ini antara lain:

- Variasi Teknik Pengukuran: Meskipun prosedur pengukuran yang dilakukan cukup standar, variasi dalam teknik pengukuran antara pengukuran satu dengan lainnya bisa menyebabkan penyimpangan hasil.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu, kelembapan, atau faktor eksternal lainnya dapat mempengaruhi material yang diukur, sehingga berpotensi menambah ketidakpastian dalam pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Beberapa titik yang lebih sulit dijangkau atau pada posisi yang tidak ideal bisa menambah ketidakpastian karena ketidakakuratan pembacaan alat.

- Kesalahan Operator: Kesalahan manusia dalam pembacaan alat atau pengukuran yang kurang hati-hati bisa berkontribusi pada ketidakpastian ini.

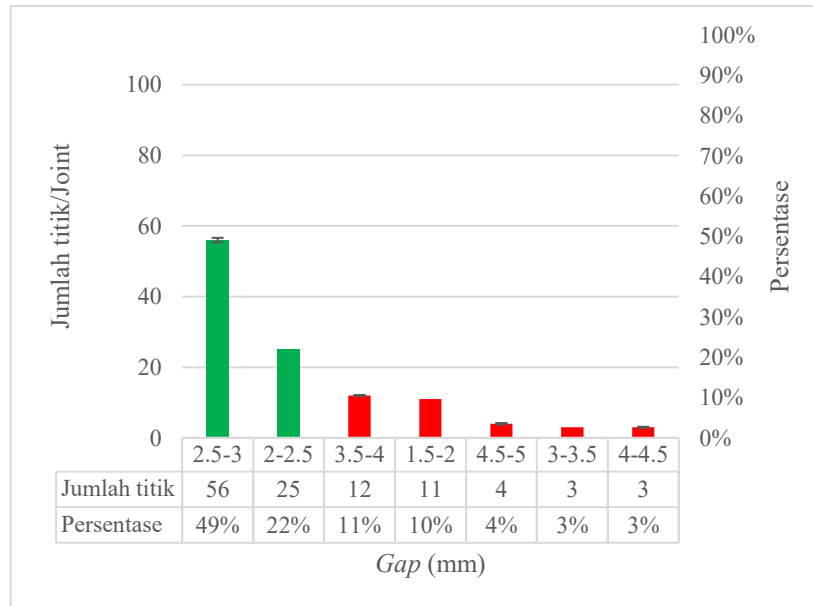
Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar, penting untuk mempertimbangkan adanya variabilitas dalam pengukuran yang perlu diperbaiki. Untuk meningkatkan kualitas sambungan secara menyeluruh, pengurangan ketidakpastian melalui kalibrasi lebih lanjut, peningkatan teknik pengukuran, dan perhatian terhadap faktor lingkungan sangat diperlukan.

b. Hasil data pengukuran *gap*

Pengukuran *gap* dilakukan untuk mengetahui celah sambungan antar pipa sebelum proses pengelasan, yang berpengaruh langsung terhadap kualitas dan kekuatan sambungan las. Standar ukuran *gap* yang digunakan dalam evaluasi ini mengacu pada dokumen pengadaan, dimana tercantum persyaratan dalam *Welding Procedure Specification* (WPS) yang sesuai dengan ASME Section IX. Berdasarkan WPS tersebut, toleransi maksimum *gap* ditetapkan pada rentang 2-3 mm. Celah sambungan yang berada dalam rentang ini dinyatakan memenuhi standar, sedangkan nilai yang lebih kecil dari 2 mm atau lebih besar dari 3 mm dianggap tidak sesuai standar. Hasil Pengukuran *gap* disajikan dalam diagram dengan klasifikasi warna: warna hijau menunjukan nilai yang sesuai standar (2-3 mm) sedangkan warna merah menandakan nilai yang tidak sesuai standar (di bawah 2 mm atau di atas 3 mm). klasifikasi ini memudahkan identifikasi visual terhadap distribusi kualitas sambungan yang diukur.

Secara lebih rinci, distribusi hasil pengukuran *gap* pada tiap sudut pengukuran dapat dilihat melalui Gambar 21 hingga Gambar 25 berikut. Diagram ini memperlihatkan jumlah titik pengukuran pada tiap rentang nilai *gap* serta persentase kelulusannya, sehingga memudahkan analisis kualitas sambungan pada setiap area pengukuran.

Seiring dengan adanya ketidakpastian yang tetap berada dalam batas yang dapat diterima, penting untuk menerapkan prosedur pemeriksaan kualitas sambungan secara berkala. Hal ini akan memastikan konsistensi dalam pelaksanaan pengukuran dan menjaga hasil yang lebih stabil serta terukur. Dengan prosedur yang tepat dan alat ukur yang sesuai, ketepatan hasil pengukuran dapat dipertahankan, sehingga kualitas sambungan tetap memenuhi standar yang ditetapkan. Hasil yang diperoleh dari pengukuran ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk perbaikan lebih lanjut dalam penelitian dan pengembangan teknik pengukuran yang lebih presisi di masa yang akan datang.



Gambar 21. Diagram pengukuran *gap* pada sudut 0°

Gambar 21 menunjukkan hasil pengukuran *gap* pada sudut 0°. Dari total 114 titik pengukuran, terhadap 81 titik atau 71% yang sesuai standar (nilai *gap* 2-3 mm), sedangkan 33 titik atau 29% dinyatakan tidak sesuai standar.

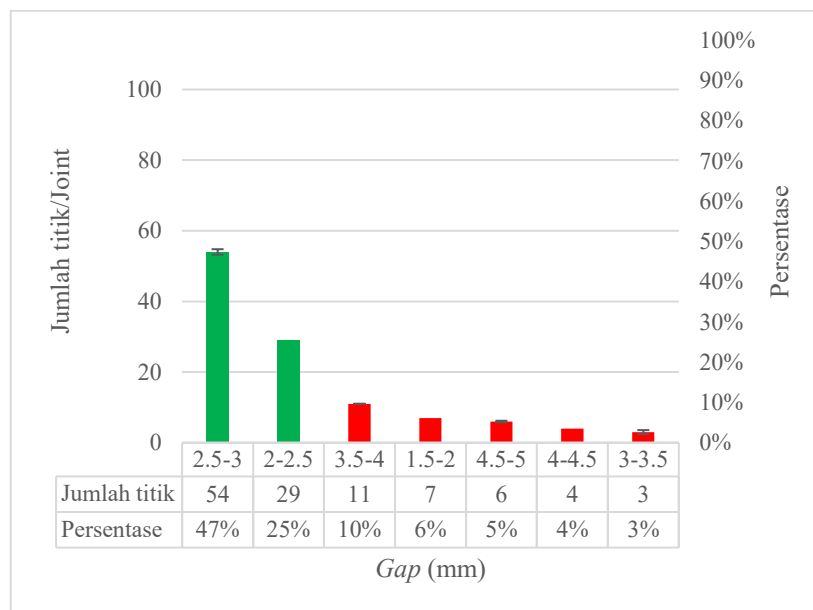
Jika dilihat lebih rinci, distribusi terbesar berada pada interval 2,5-3 mm dengan 56 (49%), diikuti interval 2-2,5 mm sebanyak 25 titik (22%). Sementara itu, nilai dibawah standar tercatat pada interval 1,5-2 mm sebanyak 11 titik (10%) dan nilai di atas standar tertinggi berada di interval 3,5-4 mm dengan 12 titik (11%). Hasil ini menunjukkan mayoritas sambungan sudah memenuhi spesifikasi WPS, namun tetap perlu perhatian pada titik-titik yang melebihi atau kurang dari batas toleransi.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran *gap* ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakkuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.

- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun mayoritas pengukuran (71%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 22. Diagram pengukuran *gap* pada sudut 90°

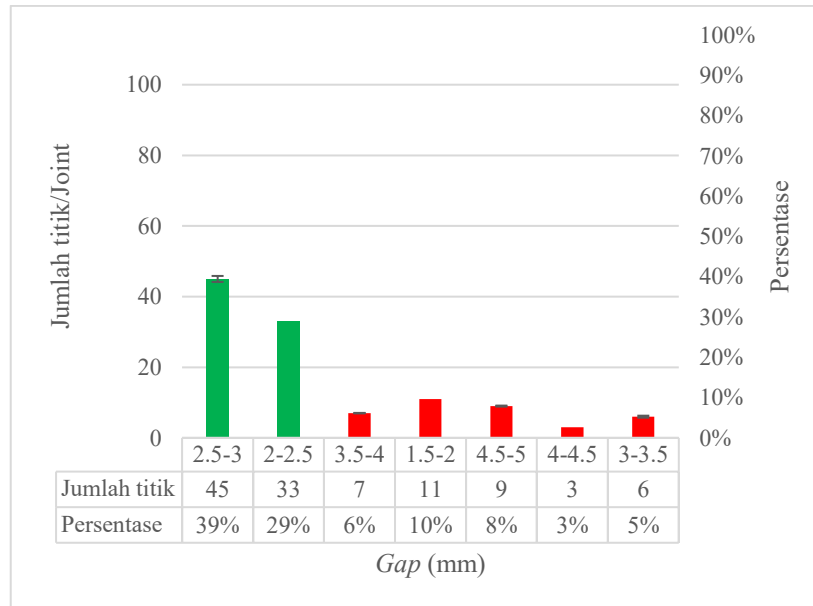
Gambar 22 memperlihatkan hasil pengukuran *gap* pada sudut 90°. Dari total 114 titik pengukuran, ditemukan 83 titik atau 73% yang sesuai standar, dan 31 titik atau 27% yang tidak sesuai standar. Distribusi terbanyak berada pada interval 2,5-3 mm sebanyak 54 titik (47%), diikuti interval 2-2,5 dengan 29 titik (25%). Untuk nilai di luar standar, jumlah tertinggi berada pada interval 3,5-4 mm sebanyak 11 titik (10%). Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan sambungan pada sudut 90° sudah sesuai standar dengan persentase kesesuaian yang baik meskipun masih ada titik yang perlu dievaluasi.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan tapper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkontrol.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun mayoritas pengukuran (73%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

Dengan menerapkan langkah-langkah yang telah disebutkan, ketidakpastian dalam pengukuran dapat diminimalkan dan akurasi hasil pengukuran dapat ditingkatkan. Hasil yang didapatkan dari pengukuran ini, meskipun masih dalam rentang batas toleransi yang dapat diterima, memberikan gambaran yang cukup akurat mengenai kondisi lapangan. Oleh karena itu, penting untuk terus mengembangkan teknik pengukuran serta memastikan kondisi alat dan lingkungan pengukuran tetap stabil untuk mendukung ketepatan hasil yang lebih tinggi. Penelitian lebih lanjut diharapkan dapat memperkuat temuan ini dan meningkatkan kualitas serta presisi pengukuran pada masa yang akan datang.



Gambar 23. Diagram pengukuran *gap* pada sudut 180°

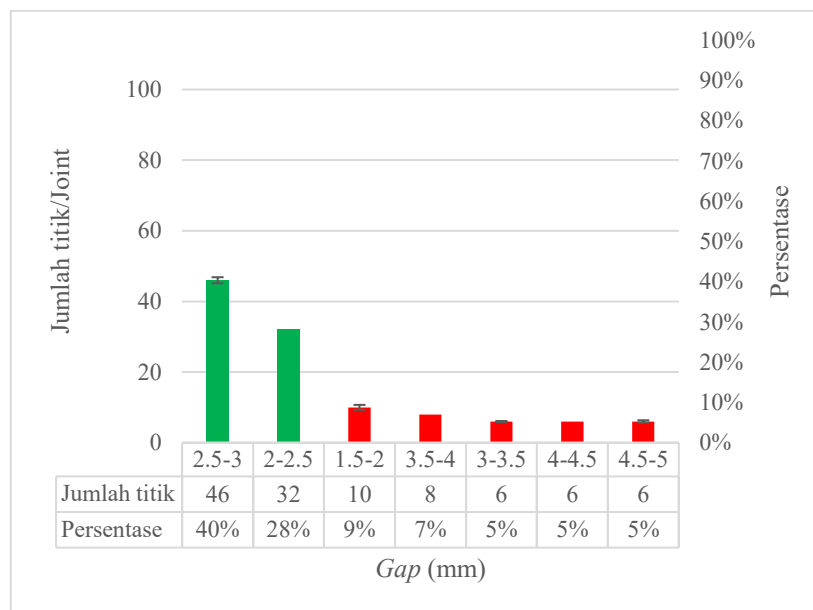
Gambar 23 memperlihatkan hasil pengukuran *gap* pada sudut 180°. Dari total 114 titik pengukuran, tercatat 78 titik atau 68% dinyatakan sesuai standar sementara 36 titik atau 32% berada di luar standar. Distribusi terbanyak berada di interval 2,5-3 mm dengan 45 titik (39%), diikuti interval 2-2,5 mm sebanyak 33 titik (29%). Jumlah titik yang berada di bawah standar tercatat pada interval 1,5-2 mm sebanyak 11 titik (10%), sedangkan nilai di atas standar tertinggi berada di interval 4,5-5 mm sebanyak 9 titik (8%). Hasil ini menunjukkan sebagian besar pengukuran sudah sesuai standar, tetapi terdapat peningkatan jumlah titik di luar toleransi dibandingkan sudut lainnya, sehingga diperlukan perhatian lebih pada area sudut 180°.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran *gap* ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakkuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.

- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun mayoritas pengukuran (68%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 24. Diagram pengukuran *gap* pada sudut 270°

Hasil Pengukuran *gap* pada sudut 270° ditampilkan pada Gambar 24. Dari total pengukuran 114 titik, terdapat 78 titik atau 68% yang memenuhi standar, yaitu pada interval 2-3 mm yang ditandai dengan warna hijau (46 titik pada interval 2,5-3 mm dan 32 titik pada interval 2-2,5 mm). Sementara itu, terdapat 36 titik atau 32% yang tidak sesuai standar, ditandai dengan warna merah. Titik tidak sesuai ini tersebar pada interval di bawah 2 mm sebanyak 10 titik (9%) dan pada interval di atas 3 mm, ada 8 titik (7%) untuk interval 3,5-4 mm, serta 6 titik (5%) pada interval 3-3,5 mm, 4-4,5 mm dan 4,5-5 mm. Hasil ini

menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar pengukuran telah memenuhi standar, masih ada beberapa titik yang memerlukan evaluasi perbaikan, khususnya pada celah sambungan yang terlalu sempit atau terlalu lebar.

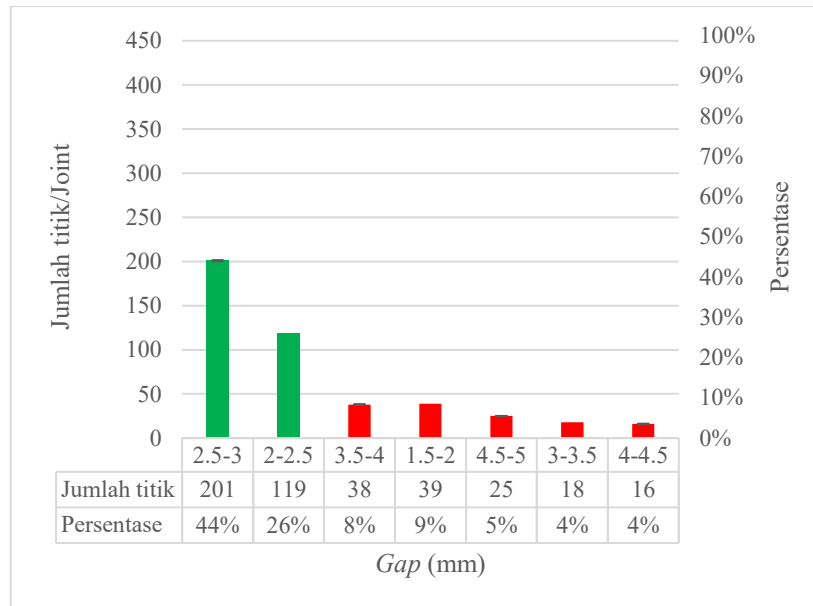
Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Taper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun mayoritas pengukuran (68%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

Walaupun ketidakpastian yang tercatat berada dalam batas yang masih dapat diterima, penting untuk terus melakukan evaluasi dan perbaikan pada prosedur pengukuran. Hal ini bertujuan untuk mengurangi faktor-faktor yang dapat menyebabkan variabilitas hasil, seperti kesalahan operator dan kondisi alat yang tidak ideal. Penerapan prosedur yang lebih tepat dan penggunaan alat yang lebih canggih akan memungkinkan pencapaian hasil pengukuran yang lebih akurat dan konsisten. Penelitian lebih lanjut mengenai variabilitas

hasil ini dapat membantu memperbaiki dan menyempurnakan teknik pengukuran yang ada, sehingga dapat menghasilkan data yang lebih valid dan dapat diandalkan.



Gambar 25. Diagram pengukuran keseluruhan *gap*

Selanjutnya, Gambar 25 menyajikan diagram pengukuran *gap* secara keseluruhan dari semua sudut. Dari total pengukuran, diperoleh 320 titik atau 70% yang sesuai standar, ditandai dengan warna hijau, yang tersebar pada interval 2,5-3 mm sebanyak 201 titik (44%) dan interval 2-2,5 mm sebanyak 119 titik (26%). Sedangkan persentase ketidaksesuaian mencapai 30% dengan total 136 titik yang ditandai dengan warna merah. Titik-titik yang tidak memenuhi standar ini berada pada interval di bawah 2 mm sebanyak 39 titik (9%), interval 3-3,5 mm sebanyak 18 titik (4%), interval 3,5-4 mm sebanyak 38 titik (8%), interval 4-4,5 mm sebanyak 16 titik (4%), serta interval 4,5-5 mm sebanyak 25 titik (6%).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran *gap* ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan tapper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal

ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.

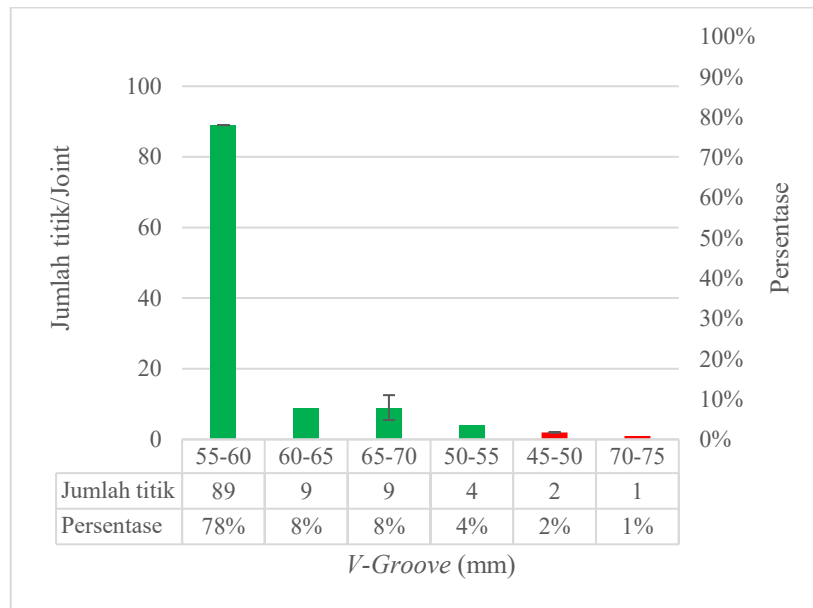
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun mayoritas pengukuran (70%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi. Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa mayoritas sambungan sudah memenuhi persyaratan sesuai *Welding Procedure Specification* (WPS) yang mengacu pada ASME Section IX. Namun, masih terdapat sekitar 28% titik pengukuran yang tidak sesuai standar, sehingga diperlukan tindakan evaluasi dan koreksi lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas sambungan las, terutama pada area yang memiliki *gap* dibawah atau di atas batas toleransi

c. Hasil data pengukuran *V-Groove*

Pengukuran sudut *V-Groove* dilakukan untuk memastikan sudut bevel pada sambungan pipa sesuai dengan standar yang telah ditetapkan dalam dokumen pengadaan. Standar sudut bevel yang digunakan dalam evaluasi ini merujuk pada *Welding Procedure Specification* (WPS) yang memenuhi ketentuan ASME Section IX, yaitu sebesar 60° dengan toleransi $\pm 10^\circ$. Hal ini tercantum dalam dokumen pengadaan yang menyatakan bahwa: “Sudut bevel pada sambungan las harus berada dalam kisaran $60^\circ \pm 10^\circ$, sesuai dengan WPS dan standar ASME Section IX untuk memastikan penetrasi dan kualitas las yang optimal.” Sudut bevel yang berada dalam rentang 50° hingga 70° dinyatakan memenuhi standar, sedangkan nilai dibawah 50° atau di atas 70° dianggap tidak sesuai standar. Hasil pengukuran sudut *V-Groove* ditampilkan dalam diagram dengan klasifikasi warna: warna hijau menunjukkan nilai yang sesuai standar (50° - 70°), sedangkan warna merah menunjukkan nilai yang tidak

sesuai standar (kurang dari 50° atau lebih dari 70°). Klasifikasi ini mempermudah identifikasi visual terhadap distribusi kualitas sudut bevel yang diukur.



Gambar 26. Diagram hasil pengukuran *V-Groove*

Berdasarkan Gambar 26, hasil pengukuran sudut *V-Groove* dari total pengukuran 114 titik, diperoleh 111 titik atau 97% yang sesuai standar, ditandai dengan warna hijau, dan 3 titik atau 3% yang tidak sesuai standar, ditandai dengan warna merah. Distribusi menunjukkan bahwa sebanyak 89 titik sambungan atau sebesar 78% berada pada interval 55°-60°, serta 9 titik sambungan atau 8% berada pada interval 60°-65°, terdapat 4 titik sambungan (4%) dengan sudut 50°-55° dan 9 titik sambungan (8%) pada interval 65°-70°. Seluruh titik pada interval 50°-70° termasuk dalam standar toleransi yang ditetapkan. Sementara itu, terdapat 2 titik sambungan (2%) pada sudut 45°-50°. dan 1 titik sambungan (1%) pada sudut 70°-75°, yang diluar batas toleransi sehingga dinyatakan tidak sesuai standar.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 1%, yang menunjukkan adanya kemungkinan variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi pengukuran sudut. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan ketidakpastian ini adalah:

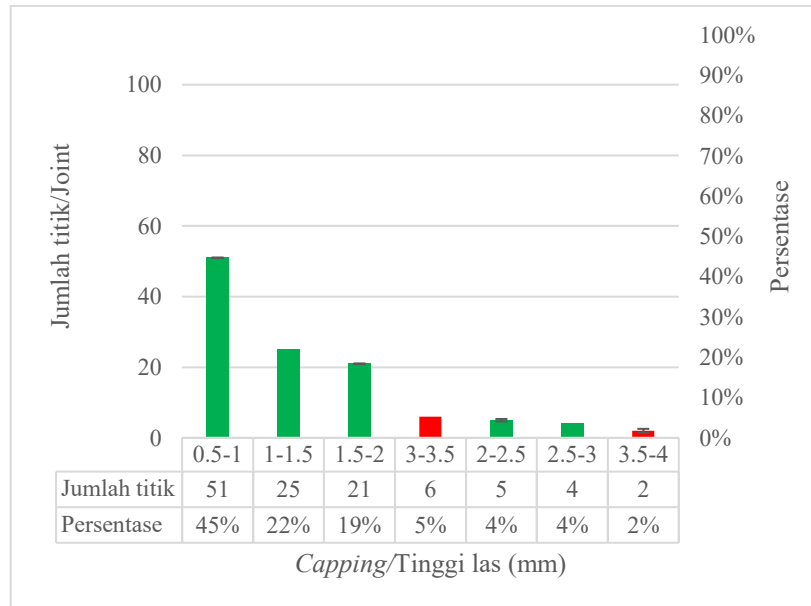
- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan welding gauge dapat menyebabkan ketidakpastian apabila alat tidak dibaca dengan tepat atau tidak digunakan dengan konsisten. Misalnya, jika pembacaan dilakukan dengan tangan yang tidak stabil atau jika alat pengukur tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini dapat memperkenalkan kesalahan pengukuran.

- Ketidakakuratan Penempatan Alat: Penempatan welding gauge pada sambungan yang tidak sejajar atau tidak tepat dapat menyebabkan ketidakpastian dalam pengukuran sudut. Penggunaan alat pada area yang sulit dijangkau juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
- Kondisi Alat: Ketidakpastian juga dapat berasal dari kondisi alat yang tidak terkalibrasi dengan baik. Welding gauge yang telah digunakan dalam waktu lama tanpa perawatan atau kalibrasi dapat menunjukkan ketidakakuratan dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan, dapat mempengaruhi pengukuran, terutama jika alat pengukur terbuat dari bahan yang terpengaruh oleh perubahan suhu. Hal ini bisa menyebabkan penyimpangan dalam pengukuran sudut, terutama pada material yang terpengaruh oleh suhu tinggi atau rendah.

Dengan ketidakpastian sebesar 1%, meskipun mayoritas pengukuran (97%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti kalibrasi lebih sering, peningkatan teknik pengukuran, dan memastikan kondisi pengukuran yang lebih stabil, sangat disarankan.

d. Hasil data pengukuran *capping*

Pengukuran *capping* dilakukan untuk mengevaluasi ketinggian permukaan penutup las (*weld cap*) dari sambungan las setelah proses pengelasan selesai. Standar ketinggian *capping* yang digunakan mengacu pada dokumen pengadaan yang menyebutkan bahwa toleransi maksimum ketinggian *capping* adalah 3 mm, sesuai dengan WPS yang dirancang berdasarkan standar ASME Section IX. Hal ini tercantum dalam dokumen pengadaan sebagai berikut: “Maximum reinforcement height shall not exceed 3 mm as per ASME Section IX.” Ketinggian *capping* yang ≤ 3 mm dinyatakan memenuhi standar, sedangkan nilai yang melebihi 3 mm dinyatakan tidak sesuai standar. Hasil pengukuran *capping* disajikan dalam diagram dengan klasifikasi warna: warna hijau menunjukkan nilai sesuai standar (≤ 3 mm), sedangkan warna merah menunjukkan nilai yang tidak sesuai standar (> 3 mm). Klasifikasi warna ini membantu mempermudah identifikasi visual kualitas hasil pengelasan.



Gambar 27. Diagram Pengukuran *Capping* pada Sisi *Inside*

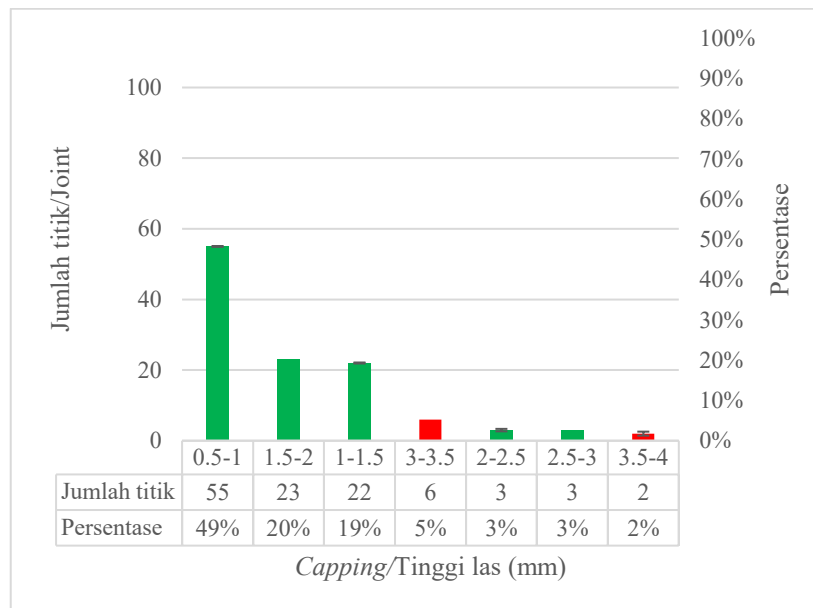
Berdasarkan Gambar 27, hasil pengukuran *capping* pada sisi *inside* menunjukkan bahwa sebagian besar sambungan telah memenuhi standar. Sebanyak 51 titik sambungan atau 45% berada pada interval 0,5–1 mm, diikuti oleh 25 titik sambungan (22%) pada interval 1–1,5 mm, 5 titik sambungan (5%) pada interval 2,5–3 mm, dan 21 titik sambungan (19%) pada interval 1,5–2 mm. Seluruh titik pada tiga interval ini dinyatakan sesuai standar karena berada di bawah batas maksimum 3 mm. Namun, terdapat 6 titik sambungan (6%) pada interval 3–3,5 mm, dan 4 titik sambungan (4%) pada interval 3,5–4 mm yang tidak sesuai standar karena melebihi batas toleransi tinggi *capping*. Hal ini menunjukkan tingkat ketidaksesuaian sebesar 8% pada sisi *inside*.

Pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 7%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran. Beberapa faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Kesalahan Pengukuran pada Posisi Pengukuran: Penggunaan *welding gauge* pada sambungan yang mungkin tidak rata atau pada posisi yang sulit dijangkau dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam pengukuran. Ketidakpastian lebih tinggi dapat terjadi jika alat tidak ditempatkan dengan presisi atau pada permukaan yang tidak sejajar.
- Ketidakakuratan Pembacaan Alat: Meskipun *welding gauge* adalah alat yang tepat, ketidakpastian bisa muncul jika pembacaan hasil dilakukan dengan tidak hati-hati atau jika ada kesalahan dalam membaca skala pengukuran, terutama ketika pengukuran dilakukan di area yang terbatas.

- Keterbatasan Resolusi Alat: Welding gauge memiliki batas resolusi tertentu, yang bisa menyebabkan ketidakpastian, terutama jika perbedaan ukuran berada dalam rentang yang sangat kecil. Alat yang kurang presisi mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil dalam ukuran capping dengan cukup akurat.
- Faktor Lingkungan: Perubahan kondisi lingkungan seperti suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi alat pengukur atau bahan yang diukur. Misalnya, suhu yang tinggi dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi pada material, yang akhirnya berdampak pada pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 7%, meskipun sebagian besar pengukuran (94%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang melebihi batas toleransi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keakuratan hasil pengukuran, penting untuk mengkalibrasi alat secara berkala dan memastikan pengukuran dilakukan dengan teknik yang lebih tepat dan konsisten.



Gambar 28. Diagram pengukuran *capping* pada sisi *outside*

Berdasarkan Gambar 28, hasil pengukuran *capping* pada sisi luar (*outside*) menunjukkan bahwa dari total 114 titik pengukuran, mayoritas berada pada rentang 0,5–1 mm sebanyak 55 titik atau setara 49%. Kemudian, terdapat 22 titik atau 19% pada rentang 1–1,5 mm, serta 23 titik atau 20% pada rentang 1,5–2 mm. Ketiga rentang ini berada dalam batas toleransi maksimum 3 mm sesuai dokumen pengadaan dan standar ASME Section IX, sehingga dinyatakan memenuhi standar.

Selain itu, terdapat 3 titik atau 3% pada rentang 2–2,5 mm, serta 3 titik atau 3% pada rentang 2,5–3 mm, yang juga masih memenuhi standar karena berada di bawah batas maksimum toleransi. Secara keseluruhan, jumlah titik pengukuran yang memenuhi standar sebanyak 106 titik atau 94%. Namun demikian, ditemukan 6 titik atau 5% pada rentang 3–3,5 mm, dan 2 titik atau 2% pada rentang 3,5–4 mm, yang telah melebihi batas toleransi 3 mm dan dinyatakan tidak sesuai standar.

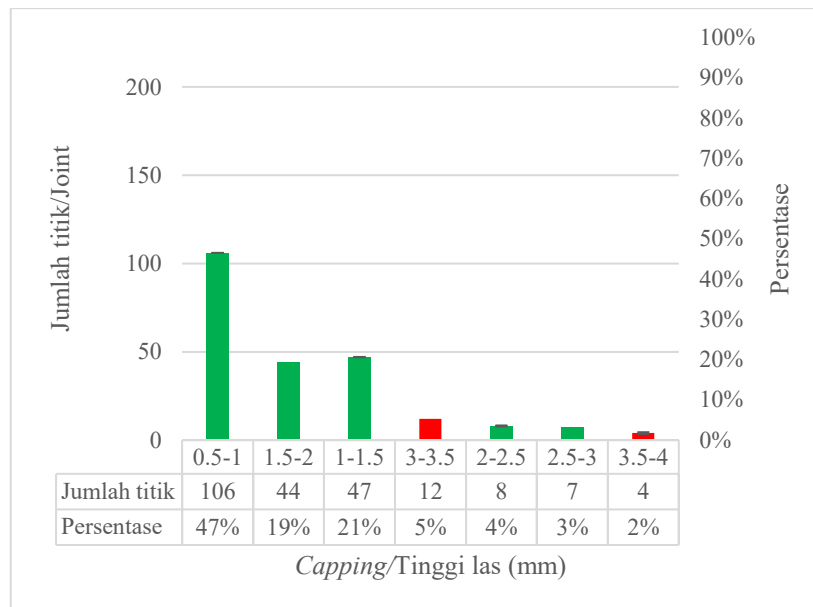
Pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 7%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran. Beberapa faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Kesalahan Pengukuran pada Posisi Pengukuran: Penggunaan welding gauge pada sambungan yang mungkin tidak rata atau pada posisi yang sulit dijangkau dapat menyebabkan ketidakakuratan dalam pengukuran. Ketidakpastian lebih tinggi dapat terjadi jika alat tidak ditempatkan dengan presisi atau pada permukaan yang tidak sejajar.
- Ketidakakuratan Pembacaan Alat: Meskipun welding gauge adalah alat yang tepat, ketidakpastian bisa muncul jika pembacaan hasil dilakukan dengan tidak hati-hati atau jika ada kesalahan dalam membaca skala pengukuran, terutama ketika pengukuran dilakukan di area yang terbatas.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Welding gauge memiliki batas resolusi tertentu, yang bisa menyebabkan ketidakpastian, terutama jika perbedaan ukuran berada dalam rentang yang sangat kecil. Alat yang kurang presisi mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil dalam ukuran capping dengan cukup akurat.
- Faktor Lingkungan: Perubahan kondisi lingkungan seperti suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi alat pengukur atau bahan yang diukur. Misalnya, suhu yang tinggi dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi pada material, yang akhirnya berdampak pada pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 7%, meskipun sebagian besar pengukuran (94%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang melebihi batas toleransi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keakuratan hasil pengukuran, penting untuk mengkalibrasi alat secara berkala dan memastikan pengukuran dilakukan dengan teknik yang lebih tepat dan konsisten.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa kualitas tinggi capping pada sisi luar sebagian besar telah memenuhi spesifikasi yang ditetapkan. Meski demikian, keberadaan

8 titik atau sekitar 7% yang tidak memenuhi standar tetap perlu diperhatikan untuk mencegah potensi permasalahan pada kualitas sambungan las di kemudian hari.



Gambar 29. Diagram pengukuran keseluruhan *capping*

Berdasarkan Gambar 29, hasil pengukuran *capping* secara keseluruhan menunjukkan bahwa dari total 228 titik pengukuran, sebagian besar berada pada rentang 0,5–1 mm sebanyak 106 titik atau sekitar 47%. Selanjutnya, terdapat 47 titik atau 21% pada rentang 1–1,5 mm, dan 44 titik atau 19% pada rentang 1,5–2 mm. Ketiga rentang ini menunjukkan bahwa mayoritas hasil pengelasan berada dalam batas standar tinggi *capping* maksimum 3 mm yang telah ditetapkan dalam dokumen pengadaan serta mengacu pada standar ASME Section IX.

Selain itu, ditemukan 8 titik atau 4% pada rentang 2–2,5 mm, serta 7 titik atau 3% pada rentang 2,5–3 mm, yang juga masih tergolong memenuhi standar karena berada di bawah batas maksimum toleransi 3 mm. Dengan demikian, secara keseluruhan terdapat 212 titik atau 93% yang memenuhi standar. Namun demikian, terdapat 12 titik atau 5% yang berada pada rentang 3–3,5 mm, serta 4 titik atau 2% pada rentang 3,5–4 mm. Kedua rentang ini telah melebihi batas toleransi yang diizinkan, sehingga dinyatakan tidak sesuai standar.

Pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 7%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran. Beberapa faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Kesalahan Pengukuran pada Posisi Pengukuran: Penggunaan welding gauge pada sambungan yang mungkin tidak rata atau pada posisi yang sulit dijangkau dapat

menyebabkan ketidakakuratan dalam pengukuran. Ketidakpastian lebih tinggi dapat terjadi jika alat tidak ditempatkan dengan presisi atau pada permukaan yang tidak sejajar.

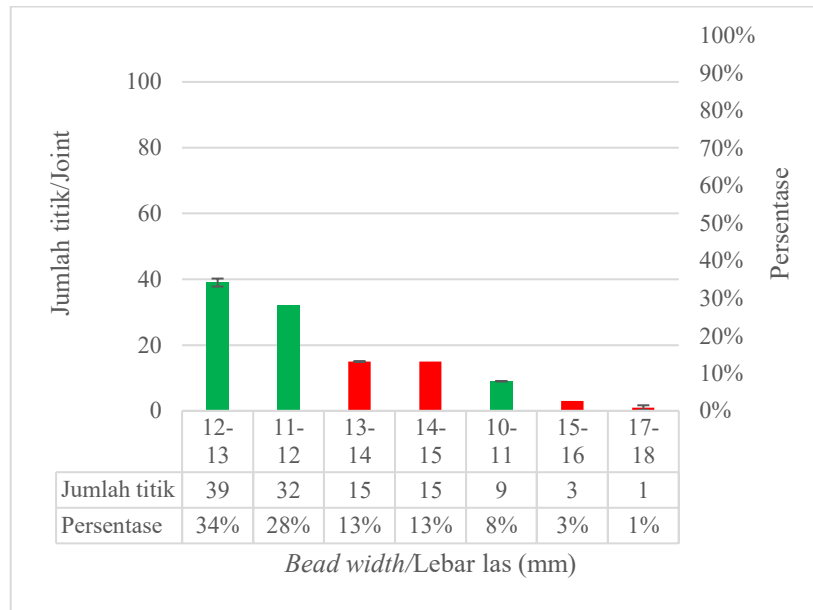
- Ketidakakuratan Pembacaan Alat: Meskipun welding gauge adalah alat yang tepat, ketidakpastian bisa muncul jika pembacaan hasil dilakukan dengan tidak hati-hati atau jika ada kesalahan dalam membaca skala pengukuran, terutama ketika pengukuran dilakukan di area yang terbatas.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Welding gauge memiliki batas resolusi tertentu, yang bisa menyebabkan ketidakpastian, terutama jika perbedaan ukuran berada dalam rentang yang sangat kecil. Alat yang kurang presisi mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil dalam ukuran capping dengan cukup akurat.
- Faktor Lingkungan: Perubahan kondisi lingkungan seperti suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi alat pengukur atau bahan yang diukur. Misalnya, suhu yang tinggi dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi pada material, yang akhirnya berdampak pada pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 7%, meskipun sebagian besar pengukuran (93%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang melebihi batas toleransi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keakuratan hasil pengukuran, penting untuk mengkalibrasi alat secara berkala dan memastikan pengukuran dilakukan dengan teknik yang lebih tepat dan konsisten.

Hasil ini mengindikasikan bahwa secara umum kualitas tinggi capping pada sambungan las telah memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan, dengan lebih dari 93% titik berada dalam rentang standar. Meskipun demikian, keberadaan 16 titik atau sekitar 7% yang tidak memenuhi standar perlu menjadi perhatian khusus, guna dilakukan evaluasi dan perbaikan agar kualitas hasil lasan tetap terjaga sesuai spesifikasi dan tidak menimbulkan potensi kegagalan pada sambungan selama masa operasi.

Penurunan ketidakpastian yang lebih signifikan dalam pengukuran sangat bergantung pada penerapan prosedur yang lebih terstandarisasi dan penggunaan alat yang lebih canggih. Selain itu, dengan adanya evaluasi rutin terhadap pengukuran yang telah dilakukan, diharapkan setiap ketidakpastian yang muncul dapat diidentifikasi dan diminimalkan. Dengan demikian, meskipun terdapat variasi dalam hasil pengukuran, langkah-langkah perbaikan yang tepat akan mampu meningkatkan presisi dan akurasi secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan metode pengukuran yang lebih baik dan lebih efisien di masa mendatang.

e. Hasil data pengukuran *bead width*



Gambar 30. Diagram pengukuran *bead width* pada sisi *inside*

Berdasarkan Gambar 30, distribusi hasil pengukuran *bead width* pada sisi *inside* sambungan las menunjukkan bahwa sebagian besar hasil berada dalam rentang standar yang telah ditetapkan, yaitu antara 10 hingga 13 mm. Dari total 114 titik pengamatan, terdapat 39 titik (34%) dengan lebar 12–13 mm, 32 titik (28%) pada rentang 11–12 mm, serta 9 titik (8%) pada 10–11 mm. Secara keseluruhan, sebanyak 80 titik atau sekitar 70% dari total pengukuran berada dalam batas toleransi yang sesuai dengan dokumen pengadaan dan WPS yang mengacu pada ASME Section IX. Sisanya, sebanyak 34 titik atau 30%, berada di luar batas yang diizinkan. Pengukuran yang melebihi batas atas, yaitu lebih dari 13 mm, terdiri dari rentang 13–14 mm dan 14–15 mm masing-masing sebanyak 15 titik (13%), serta 15–16 mm sebanyak 3 titik (3%) dan 17–18 mm sebanyak 1 titik (1%). Semua titik tersebut ditandai dengan warna merah dalam grafik karena tidak memenuhi kriteria yang ditetapkan. Hasil analisis ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar sambungan telah memenuhi persyaratan teknis, diperlukan pengawasan tambahan dan evaluasi kualitas pada sambungan dengan lebar las yang berada di luar rentang standar agar integritas sambungan tetap terjaga dan sesuai dengan kebutuhan operasional *boiler*.

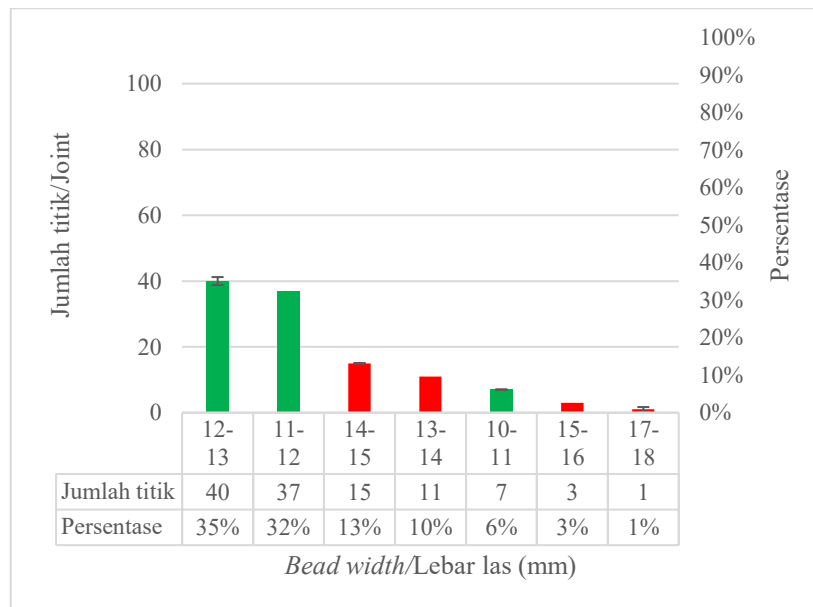
Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 1%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakakuratan Pembacaan Digital: Meskipun menggunakan vernier caliper digital, ketidakpastian dapat timbul jika pembacaan angka tidak dilakukan dengan

hati-hati atau jika ada gangguan pada layar digital yang menyebabkan pembacaan tidak tepat.

- Kesalahan Posisi Pengukuran: Vernier caliper digital memiliki batas presisi tertentu, dan jika alat tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini bisa menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, terutama jika sambungan las tidak sejajar atau memiliki bentuk yang tidak rata.
- Pengaruh Kondisi Alat: Vernier caliper digital yang sudah digunakan dalam waktu lama tanpa kalibrasi atau dalam kondisi buruk (misalnya baterai lemah atau layar rusak) bisa meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi bahan dan alat pengukur, misalnya perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi material, yang akhirnya memengaruhi ketepatan pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 1%, meskipun sebagian besar pengukuran (70%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah seperti kalibrasi lebih lanjut, penggunaan alat dengan resolusi lebih tinggi, serta perbaikan dalam teknik pengukuran dapat membantu mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.



Gambar 31. Diagram pengukuran *bead width* pada sisi *outside*

Berdasarkan data pengukuran pada Gambar 31, total terdapat 114 titik pengamatan pada sisi *outside*. Hasil distribusi menunjukkan bahwa rentang 12–13 mm mencakup 40 titik (35%), 11–12 mm sebanyak 37 titik (32%), dan 10–11 mm sebanyak 7 titik (6%).

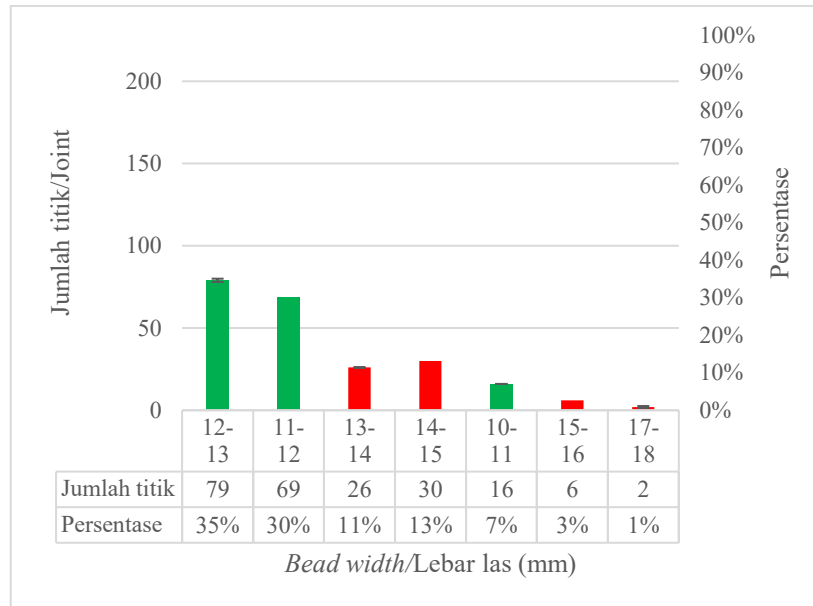
Ketiga rentang ini merupakan rentang yang sesuai dengan standar spesifikasi pengadaan dan WPS yang merujuk pada ASME Section IX, sehingga secara total terdapat 84 titik atau 74% dari pengamatan yang tergolong sesuai standar.

Sementara itu, pengukuran yang berada di luar rentang yang diizinkan, yakni lebih dari 13 mm, mencakup: 13–14 mm sebanyak 11 titik (10%), 14–15 mm sebanyak 15 titik (13%), 15–16 mm sebanyak 3 titik (3%), dan 17–18 mm sebanyak 1 titik (1%). Total titik yang tidak sesuai adalah 30 titik, atau 26%, yang dalam grafik ditandai dengan warna merah karena tidak memenuhi spesifikasi teknis. Hasil ini mencerminkan bahwa meskipun sebagian besar lasan telah sesuai standar, perlu diwaspadai penyimpangan kelebihan pengisian pada sisi luar yang dapat memengaruhi keseragaman kualitas sambungan.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 1%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakakuratan Pembacaan Digital: Meskipun menggunakan vernier caliper digital, ketidakpastian dapat timbul jika pembacaan angka tidak dilakukan dengan hati-hati atau jika ada gangguan pada layar digital yang menyebabkan pembacaan tidak tepat.
- Kesalahan Posisi Pengukuran: Vernier caliper digital memiliki batas presisi tertentu, dan jika alat tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini bisa menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, terutama jika sambungan las tidak sejajar atau memiliki bentuk yang tidak rata.
- Pengaruh Kondisi Alat: Vernier caliper digital yang sudah digunakan dalam waktu lama tanpa kalibrasi atau dalam kondisi buruk (misalnya baterai lemah atau layar rusak) bisa meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi bahan dan alat pengukur, misalnya perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi material, yang akhirnya memengaruhi ketepatan pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 1%, meskipun sebagian besar pengukuran (74%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah seperti kalibrasi lebih lanjut, penggunaan alat dengan resolusi lebih tinggi, serta perbaikan dalam teknik pengukuran dapat membantu mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.



Gambar 32. Diagram pengukuran keseluruhan *bead width*

Gambar 32 merupakan akumulasi dari hasil pengukuran sisi *inside* dan *outside*, dengan total 228 titik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rentang 12–13 mm mencakup 79 titik (35%), rentang 11–12 mm mencakup 69 titik (30%), dan rentang 10–11 mm sebanyak 16 titik (7%). Ketiga rentang ini merupakan rentang yang sesuai dengan ketentuan yang ditetapkan dalam dokumen pengadaan dan ASME Section IX, sehingga total pengukuran yang sesuai standar adalah 164 titik, atau 72%. Sebaliknya, titik-titik yang berada di luar batas toleransi, yaitu lebih dari 13 mm, terdiri dari 13–14 mm sebanyak 26 titik (11%), 14–15 mm sebanyak 30 titik (13%), 15–16 mm sebanyak 6 titik (3%), dan 17–18 mm sebanyak 2 titik (1%). Total terdapat 64 titik, atau 28%, yang dinyatakan tidak sesuai standar dan ditandai dengan warna merah dalam grafik.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 1%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakakuratan Pembacaan Digital: Meskipun menggunakan vernier caliper digital, ketidakpastian dapat timbul jika pembacaan angka tidak dilakukan dengan hati-hati atau jika ada gangguan pada layar digital yang menyebabkan pembacaan tidak tepat.
- Kesalahan Posisi Pengukuran: Vernier caliper digital memiliki batas presisi tertentu, dan jika alat tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini bisa

menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, terutama jika sambungan las tidak sejajar atau memiliki bentuk yang tidak rata.

- Pengaruh Kondisi Alat: Vernier caliper digital yang sudah digunakan dalam waktu lama tanpa kalibrasi atau dalam kondisi buruk (misalnya baterai lemah atau layar rusak) bisa meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi bahan dan alat pengukur, misalnya perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi material, yang akhirnya memengaruhi ketepatan pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 1%, meskipun sebagian besar pengukuran (72%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah seperti kalibrasi lebih lanjut, penggunaan alat dengan resolusi lebih tinggi, serta perbaikan dalam teknik pengukuran dapat membantu mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.

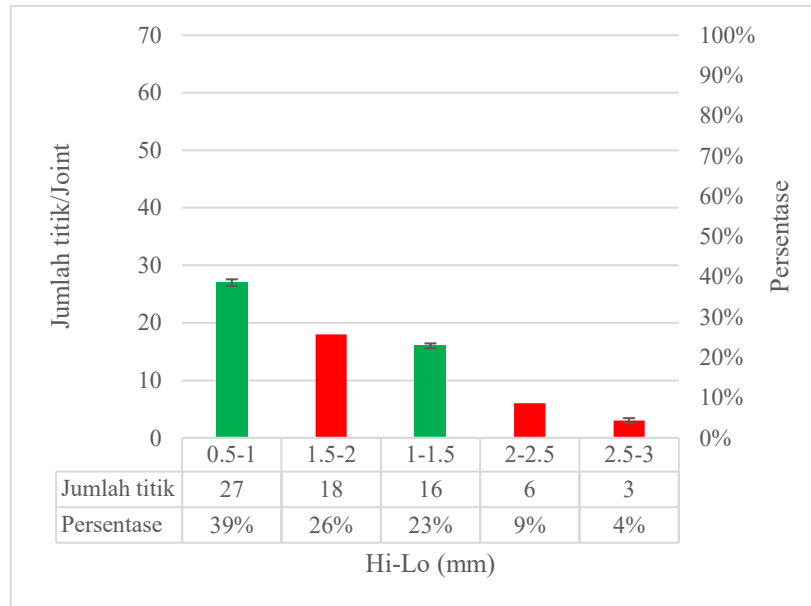
Hasil pengamatan keseluruhan ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar pengukuran *bead width* memenuhi spesifikasi, masih terdapat lebih dari seperempat sambungan yang perlu dievaluasi ulang untuk memastikan konsistensi kualitas dan kesesuaian dengan standar teknis. Evaluasi lebih lanjut disarankan terhadap titik-titik yang mengalami deviasi melebihi batas atas untuk mencegah dampak negatif pada integritas struktural sambungan las.

F. Data hasil *retubing* pada sisi *right wall*

Selanjutnya untuk diagram di bawah ini menyajikan diagram data yang diperoleh dari hasil pengukuran pada sisi dinding kanan (*right wall*). Pengukuran tersebut mencakup beberapa parameter yaitu pengukuran *Hi-Lo*, *gap*, *v-groove*, *capping*, dan *bead width*. Berikut merupakan diagram datanya:

a. Data pengukuran *Hi-Lo*

Pada pengukuran *Hi-Lo*, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa sebagian besar nilai pengukuran berada dalam rentang 0,5–1 mm, yang mencerminkan konsistensi pengukuran yang baik dan sesuai dengan standar toleransi yang telah ditetapkan. Dengan distribusi nilai pengukuran yang tersebar pada rentang ini, dapat disimpulkan bahwa kualitas sambungan secara umum memenuhi spesifikasi yang disyaratkan.



Gambar 33. Diagram pengukuran *Hi-Lo* pada Sudut 0°

Berdasarkan hasil pengukuran *Hi-Lo* pada Gambar 33, diperoleh total 70 titik pengamatan yang tersebar pada beberapa rentang nilai. Sebagian besar pengukuran berada dalam rentang 0,5–1 mm, yaitu sebanyak 27 titik, yang berarti sekitar 38,6% dari total keseluruhan. Rentang ini termasuk ke dalam kategori sesuai standar berdasarkan acuan toleransi maksimum *Hi-Lo* yang direkomendasikan oleh ASME Section IX QW-191, di mana batas maksimal *Hi-Lo* misalignment yang dapat diterima umumnya berada di bawah 1,5 mm. Kemudian, sebanyak 16 titik (22,9%) berada pada rentang 1–1,5 mm, yang juga masih tergolong memenuhi standar. Dengan demikian, jumlah total titik yang berada dalam rentang toleransi adalah 43 titik, atau setara dengan 61,4% dari keseluruhan pengukuran.

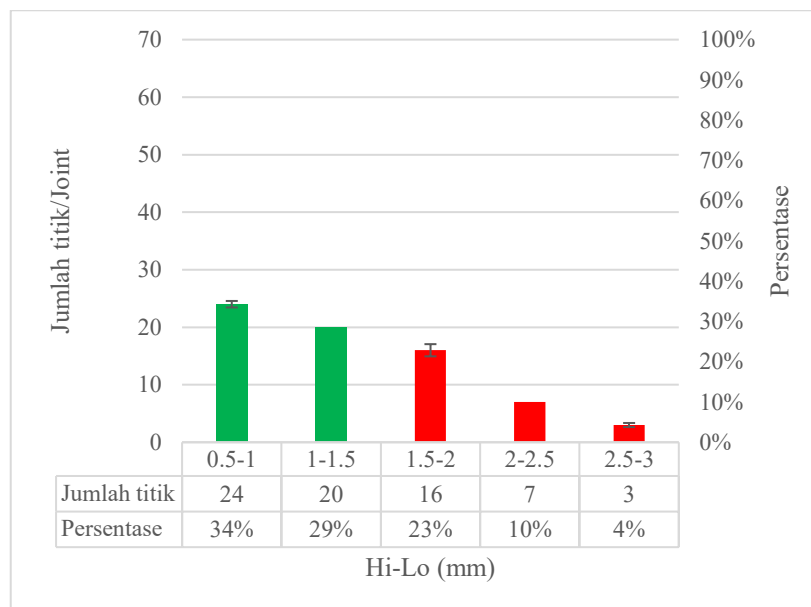
Sementara itu, terdapat 18 titik (25,7%) pada rentang 1,5–2 mm, 6 titik (8,6%) pada rentang 2–2,5 mm, dan 3 titik (4,3%) pada rentang 2,5–3 mm. Rentang ini dikategorikan sebagai tidak sesuai standar karena telah melebihi ambang batas maksimum 1,5 mm. Secara keseluruhan, terdapat 27 titik atau 38,6% dari total pengukuran yang tidak memenuhi batas toleransi yang dipersyaratkan.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 9%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan *Hi-Lo gauge* bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakkuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.

- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 9%, meskipun mayoritas pengukuran (61%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 34. Diagram Pengukuran *Hi-Lo* pada Sudut 90°

Hasil pengukuran pada Gambar 34 menunjukkan distribusi nilai yang identik dengan pengukuran pada sudut 0°, yakni total 70 titik pengamatan dengan sebaran yang sama. Rentang yang paling banyak ditemukan adalah 0,5–1 mm dengan jumlah 27 titik

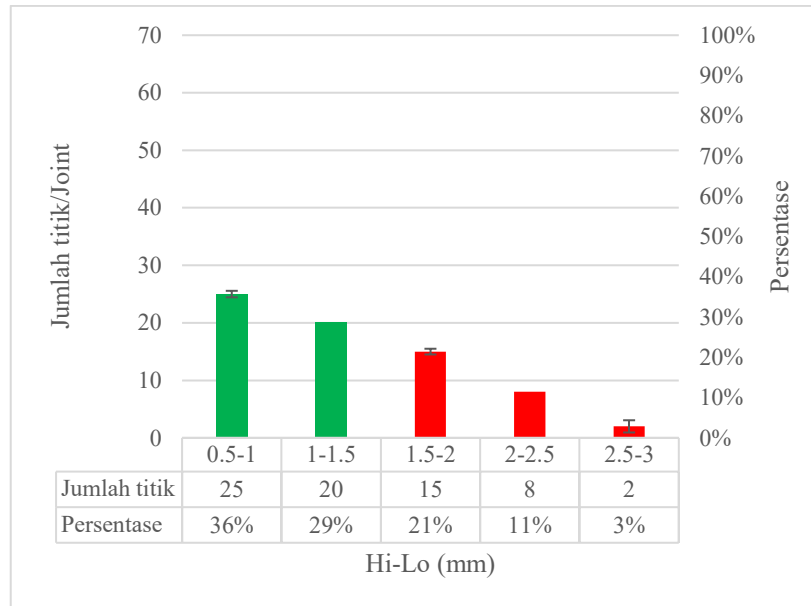
(38,6%), diikuti oleh rentang 1–1,5 mm sebanyak 16 titik (22,9%), keduanya masih tergolong sesuai standar ASME.

Jika digabungkan, total pengukuran yang memenuhi standar adalah 43 titik (61,4%). Di sisi lain, sebanyak 18 titik (25,7%) berada pada rentang 1,5–2 mm, kemudian 6 titik (8,6%) pada rentang 2–2,5 mm, dan 3 titik (4,3%) pada rentang 2,5–3 mm. Seluruh nilai di atas 1,5 mm termasuk dalam kategori tidak sesuai standar, sehingga total titik yang tidak memenuhi spesifikasi berjumlah 27 titik (38,6%).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 9%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Taper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 9%, meskipun mayoritas pengukuran (61%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 35. Diagram Pengukuran *Hi-Lo* pada Sudut 180°

Pada Gambar 35, diperoleh total 70 titik pengamatan dengan distribusi yang cukup beragam. Rentang nilai terbanyak berada pada 0,5–1 mm, dengan jumlah 25 titik, disusul oleh rentang 1–1,5 mm sebanyak 20 titik. Kedua rentang ini termasuk ke dalam kategori sesuai dengan standar toleransi ASME Section IX, karena masih berada di bawah batas maksimum *Hi-Lo* misalignment yang diperbolehkan yaitu 1,5 mm. Total jumlah titik yang memenuhi standar adalah 45 titik, atau setara dengan 64,3% dari keseluruhan pengukuran. Sementara itu, terdapat 15 titik (21,4%) yang berada dalam rentang 1,5–2 mm, kemudian 8 titik (11,4%) pada rentang 2–2,5 mm, dan 2 titik (2,9%) pada rentang 2,5–3 mm. Ketiga kelompok ini tergolong sebagai tidak sesuai standar karena melebihi ambang batas 1,5 mm. Sehingga, jumlah total titik yang tidak sesuai adalah 25 titik, atau sekitar 35,7% dari keseluruhan titik pengukuran.

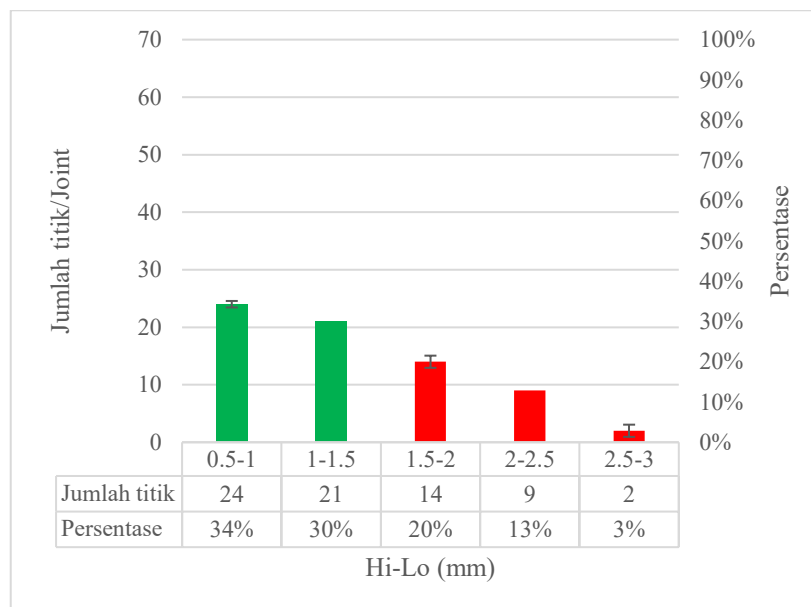
Secara keseluruhan, distribusi pengukuran pada sudut 180° menunjukkan bahwa mayoritas hasil inspeksi masih berada dalam rentang yang aman dan diterima, meskipun masih terdapat sejumlah titik yang memerlukan perhatian lebih lanjut.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 9%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan tapper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakkuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.

- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 9%, meskipun mayoritas pengukuran (64%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 36. Diagram Pengukuran *Hi-Lo* pada Sudut 270°

Pada Gambar 36, pola distribusi hasil pengukuran *Hi-Lo* tidak jauh berbeda dengan sudut sebelumnya. Total terdapat 70 titik pengamatan, di mana sebanyak 24 titik (34,3%) berada pada rentang 0,5–1 mm dan 21 titik (30%) berada pada rentang 1–1,5 mm. Dengan

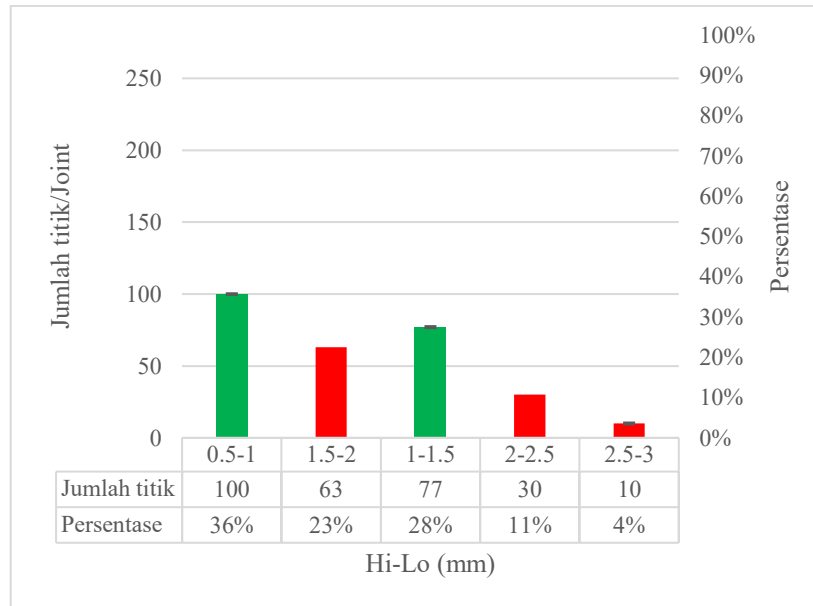
demikian, total pengukuran yang berada dalam rentang yang sesuai dengan standar ASME Section IX mencapai 45 titik, atau 64,3% dari keseluruhan pengukuran.

Adapun sisanya, sebanyak 14 titik (20%) berada pada rentang 1,5–2 mm, 9 titik (12,9%) pada rentang 2–2,5 mm, dan 2 titik (2,9%) pada rentang 2,5–3 mm. Semua rentang ini termasuk dalam kategori tidak sesuai standar, dengan total 25 titik (35,7%) yang melebihi ambang batas yang ditentukan.

Distribusi data pada sudut 270° memperkuat temuan sebelumnya bahwa meskipun sebagian besar sambungan masih dalam batas toleransi, namun potensi ketidaksesuaian tetap perlu menjadi fokus perhatian untuk peningkatan kualitas proses penyambungan. Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 9%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan tapper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 9%, meskipun mayoritas pengukuran (64%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 37. Diagram Pengukuran Keseluruhan *Hi-Lo*

Gambar 37 menampilkan data akumulatif dari seluruh hasil pengukuran *Hi-Lo* yang dilakukan pada berbagai sudut pengamatan, yakni sudut 0° , 90° , 180° , dan 270° , dengan total keseluruhan sebanyak 280 titik pengukuran. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk mengevaluasi kesesuaian hasil sambungan las terhadap standar teknis yang tercantum dalam dokumen acuan, yaitu ASME Section IX pasal QW-191. Dalam standar tersebut dinyatakan bahwa batas toleransi maksimal untuk ketidaksesuaian (misalignment) akar sambungan atau *Hi-Lo* adalah 1,5 mm untuk sambungan las jenis butt joint tanpa backing. Hal ini sangat penting karena *Hi-Lo* yang berlebihan dapat mengakibatkan konsentrasi tegangan, gangguan aliran fluida, serta menurunkan kekuatan dan integritas sambungan secara keseluruhan.

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan, nilai pengukuran terbanyak berada pada rentang 0,5–1 mm sebanyak 100 titik, yang mencerminkan 35,7% dari total pengamatan. Rentang ini merupakan kondisi ideal dalam proses penyambungan, karena memperlihatkan adanya kesejajaran yang baik antara pipa satu dengan lainnya sebelum proses pengelasan dilakukan. Diikuti oleh rentang 1–1,5 mm yang mencatat 77 titik atau 27,5% dari jumlah total, nilai ini juga masih termasuk dalam kategori sesuai standar karena tidak melebihi batas maksimum yang diizinkan. Jika kedua kelompok nilai ini digabungkan, maka diperoleh total 177 titik (63,2%) yang memenuhi spesifikasi standar ASME, menandakan bahwa sebagian besar proses penyambungan telah dilakukan dengan kontrol kualitas yang cukup baik.

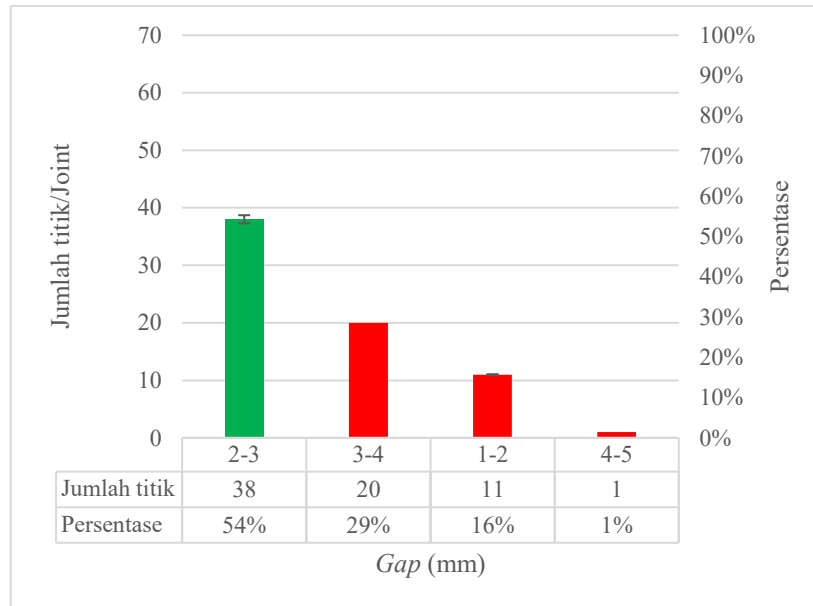
Namun demikian, masih terdapat sejumlah nilai pengukuran yang berada di atas batas toleransi. Rentang 1,5–2 mm mencatat 63 titik (22,5%), disusul oleh 30 titik (10,7%) pada rentang 2–2,5 mm, dan 10 titik (3,6%) pada rentang 2,5–3 mm. Secara total, terdapat 103 titik atau 36,8% dari seluruh data yang tidak memenuhi standar kualitas. Jumlah ini cukup signifikan dan tidak bisa diabaikan, karena nilai *Hi-Lo* yang melebihi ambang batas dapat menyebabkan masalah serius dalam jangka panjang, seperti terjadinya hot spot, penurunan efisiensi perpindahan panas, hingga potensi retak akibat tegangan sisa yang tidak terdistribusi secara merata.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 9%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Taper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 9%, meskipun mayoritas pengukuran (63%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

b. Data Pengukuran *Gap*



Gambar 38. Diagram Pengukuran *Gap* pada Sudut 0°

Gambar 38 menyajikan distribusi data hasil pengukuran gap atau celah akar sambungan las pada posisi sudut 0°. Parameter gap ini merupakan salah satu aspek krusial dalam proses pengelasan, khususnya untuk sambungan jenis butt joint tanpa backing, karena secara langsung memengaruhi penetrasi logam las, kestabilan busur, dan kualitas fusi antar logam induk. Dalam pekerjaan ini, standar yang digunakan sebagai acuan adalah nilai yang tercantum pada Welding Procedure Specification (WPS) dalam dokumen pengadaan, di mana ditetapkan bahwa rentang gap yang diperbolehkan adalah antara 2 hingga 3 mm.

Dari hasil pengukuran yang ditampilkan pada grafik, terlihat bahwa mayoritas titik pengukuran berada dalam rentang 2–3 mm, yakni sebanyak 38 titik, yang secara persentase mencerminkan 52,8% dari total pengamatan. Nilai ini menunjukkan bahwa lebih dari setengah sambungan telah disiapkan dengan celah akar yang sesuai dengan spesifikasi WPS, yang secara teknis menandakan adanya kontrol yang cukup baik pada tahapan fit-up atau penyetelan awal sambungan sebelum proses pengelasan dilakukan. Dengan celah yang berada dalam kisaran ideal ini, penetrasi logam las kemungkinan besar akan merata dan kuat, serta meminimalisir potensi cacat las seperti lack of fusion maupun incomplete penetration.

Namun demikian, data juga menunjukkan bahwa terdapat sejumlah titik pengukuran yang berada di luar batas toleransi. Rentang 3–4 mm mencatat 20 titik (27,8%), yang berarti nilai celahnya melebihi batas atas standar. Celah yang terlalu besar ini dapat

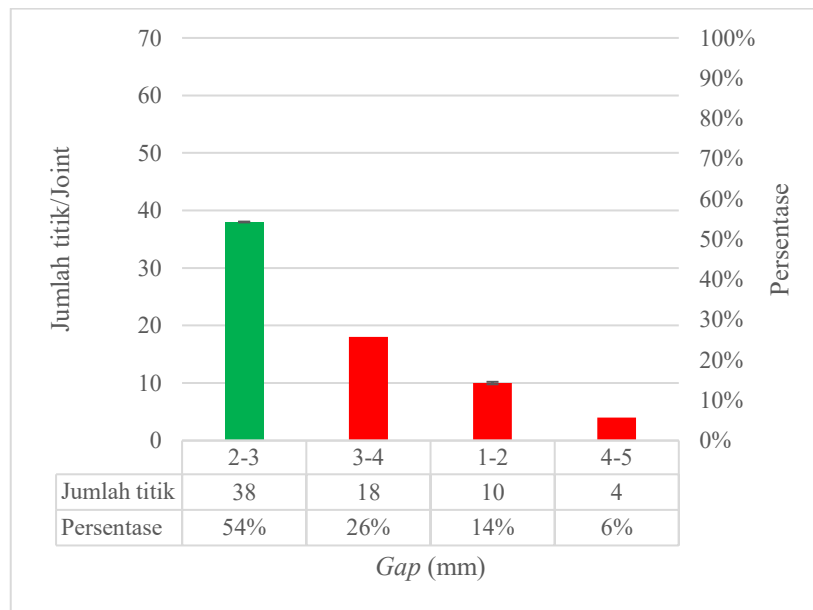
menyebabkan perlunya penambahan volume logam las secara berlebihan, meningkatkan risiko burn through serta menyebabkan distorsi termal yang tidak diinginkan. Sementara itu, 11 titik (15,3%) tercatat berada pada rentang 1–2 mm, dan 1 titik (1,4%) pada rentang 4–5 mm. Gap yang terlalu kecil (<2 mm) berisiko menyebabkan penetrasi yang tidak sempurna karena terbatasnya ruang antar ujung pipa, sedangkan gap yang terlalu besar (>3 mm) cenderung menyebabkan pemborosan filler metal dan ketidakkonsistenan fusi jika tidak dikompensasi dengan teknik pengelasan yang tepat.

Dari analisis tersebut dapat disimpulkan bahwa walaupun sebagian besar sambungan sudah memenuhi standar WPS, masih terdapat sekitar 47,2% titik pengukuran yang belum sesuai dengan nilai celah akar yang direkomendasikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap metode penyetulan sambungan (fit-up method), penggunaan alat bantu seperti gap tool atau pipe alignment clamp, serta kompetensi operator dalam mengatur keseragaman celah sebelum pengelasan dilakukan. Upaya ini penting untuk menjaga konsistensi kualitas pengelasan, efisiensi waktu pengerjaan, serta menghindari rework yang bisa berdampak pada keterlambatan proyek maupun peningkatan biaya produksi.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidaktepatan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Taper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (52,8%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 39. Diagram Pengukuran *Gap* pada Sudut 90°

Pada Gambar 39, total terdapat 70 titik pengukuran. Dari jumlah tersebut, 38 titik (54,3%) menunjukkan nilai gap berada dalam rentang standar 2–3 mm, sesuai dengan ketentuan WPS. Ini mengindikasikan bahwa lebih dari separuh sambungan pada posisi ini telah memenuhi kriteria fit-up yang baik. Namun, terdapat 18 titik (25,7%) yang memiliki gap sebesar 3–4 mm, yang melebihi batas toleransi maksimal, sehingga dapat berisiko menyebabkan burn-through atau kurang penetrasi saat pengelasan. Selain itu, 10 titik (14,3%) berada di rentang 1–2 mm, yang terlalu sempit dan dapat menyebabkan cacat seperti lack of fusion. Terdapat pula 4 titik (5,7%) dengan gap antara 4–5 mm, yang sudah jauh di luar batas aman dan dapat menurunkan kekuatan sambungan.

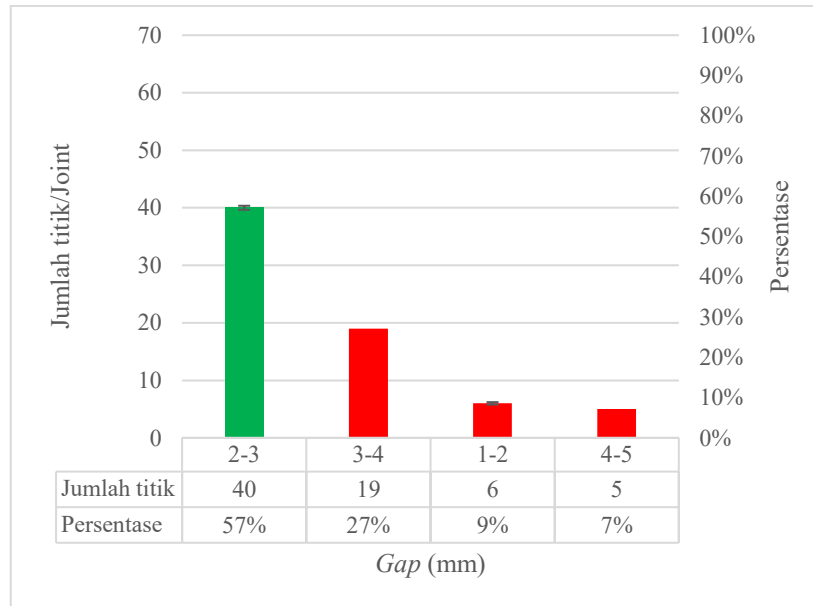
Dengan demikian, 32 titik (45,7%) berada di luar spesifikasi standar, menunjukkan bahwa pengawasan di sudut 90° masih perlu ditingkatkan.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Taper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (54,3%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

Walaupun ketidakpastian dalam pengukuran masih berada dalam batas toleransi yang diterima, penting untuk mencatat bahwa sebagian besar pengukuran memenuhi standar yang telah ditetapkan. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun ada faktor-faktor yang dapat mempengaruhi variabilitas hasil, pengukuran yang dilakukan dengan prosedur yang tepat tetap menghasilkan data yang cukup akurat. Oleh karena itu, langkah-langkah perbaikan yang terus-menerus diperlukan untuk mengurangi potensi kesalahan lebih lanjut, seperti pemilihan alat yang lebih tepat, pengaturan posisi pengukuran yang lebih konsisten, serta pengawasan yang lebih ketat terhadap faktor lingkungan yang dapat memengaruhi hasil. Dengan demikian, meskipun variasi pengukuran tetap ada, pengukuran yang dilakukan sudah menunjukkan hasil yang dapat diterima dengan presisi yang memadai.



Gambar 40. Diagram Pengukuran *Gap* pada Sudut 180°

Pada Gambar 40, dilakukan pengukuran pada 70 titik. Sebanyak 40 titik (57,1%) berhasil memenuhi standar dengan gap berada di antara 2–3 mm. Ini menunjukkan performa yang cukup baik pada posisi ini karena sebagian besar sambungan sudah sesuai dengan kriteria WPS.

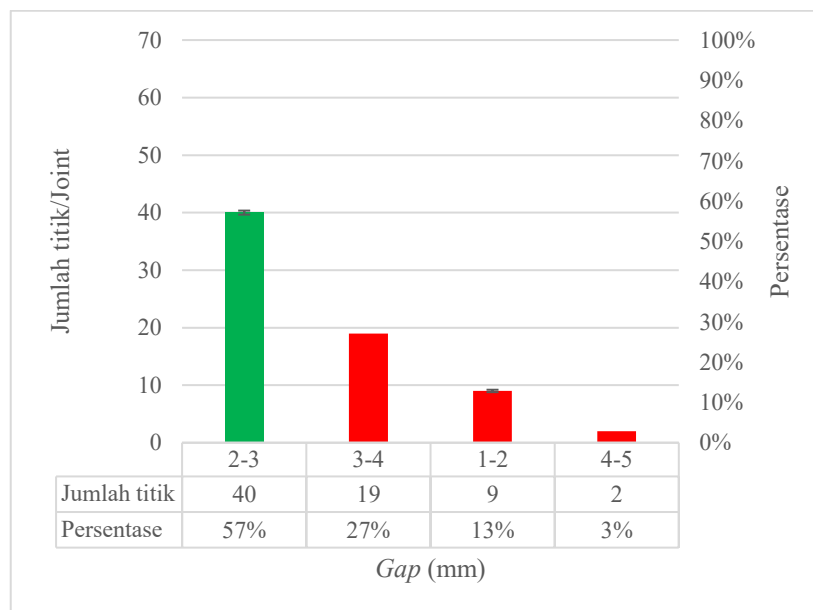
Namun demikian, 19 titik (27,1%) menunjukkan nilai gap sebesar 3–4 mm, yang berada di atas nilai maksimum toleransi. Sementara itu, 6 titik (8,6%) berada di kisaran 1–2 mm dan 5 titik (7,1%) mencapai 4–5 mm, keduanya juga termasuk di luar batasan WPS. Secara total, terdapat 30 titik (42,9%) yang tidak memenuhi spesifikasi, yang menunjukkan adanya inkonsistensi dalam kontrol kualitas pemasangan pipa pada sudut ini.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan taper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.

- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (57,1%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 41. Diagram Pengukuran *Gap* pada Sudut 270°

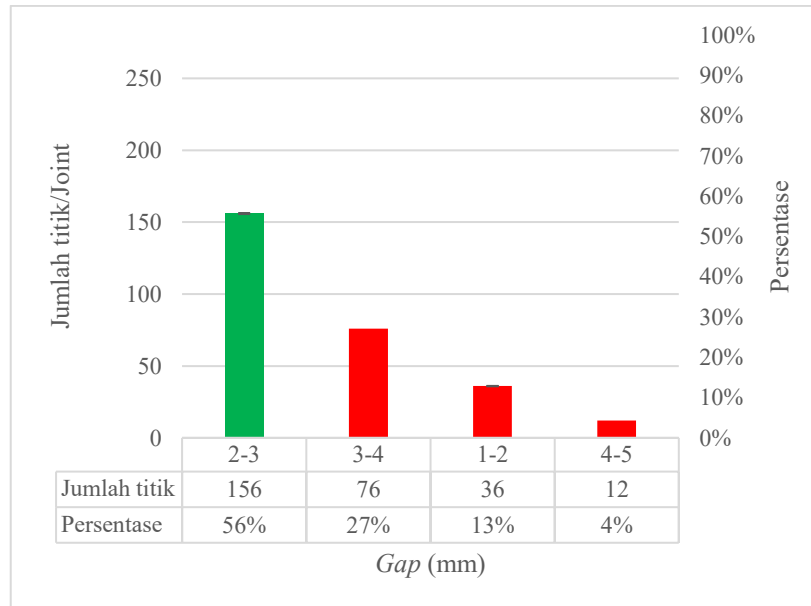
Pada Gambar 41 sudut 270°, hasil pengukuran gap menunjukkan bahwa dari total 70 titik yang diamati, sebanyak 40 titik atau sekitar 57,14% memiliki nilai gap dalam rentang 2–3 mm, yang merupakan rentang standar sesuai dengan spesifikasi Welding Procedure Specification (WPS) pada dokumen pengadaan. Angka ini menunjukkan bahwa mayoritas sambungan pada sudut ini telah memenuhi persyaratan kualitas sambungan dari segi bukaan celah awal (*root gap*) sebelum pengelasan. Namun demikian, terdapat juga 19 titik atau sekitar 27,14% yang menunjukkan nilai gap sebesar 3–4 mm, yang sudah di luar

standar dan berpotensi menyebabkan over penetration atau pemborosan filler metal. Selain itu, 9 titik atau 12,86% berada dalam rentang gap 1–2 mm, yang terlalu sempit dan berisiko menimbulkan lack of fusion atau kesulitan penetrasi saat pengelasan. Terdapat juga 2 titik atau 2,86% yang menunjukkan nilai gap ekstrem pada kisaran 4–5 mm, yang seharusnya tidak boleh dilanjutkan ke tahap pengelasan tanpa koreksi karena dapat menimbulkan cacat struktural jangka panjang. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa walaupun sebagian besar sambungan pada sudut 270° tergolong memenuhi standar, masih ditemukan sejumlah titik yang perlu diperhatikan secara serius dalam kontrol kualitas untuk mencegah potensi kegagalan las di kemudian hari.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan tapper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (57,14%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 42. Diagram Pengukuran Keseluruhan *Gap*

Pada Gambar 42, Total titik/joint yang diukur dalam keseluruhan proses adalah 280 titik. Dari jumlah tersebut, sebanyak 156 titik (55,7%) memiliki nilai gap dalam rentang 2–3 mm, yang merupakan rentang standar berdasarkan WPS (Welding Procedure Specification) dalam dokumen pengadaan. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar sambungan telah memenuhi persyaratan kualitas penyambungan dan telah dipersiapkan dengan baik sebelum proses pengelasan dilakukan.

Namun demikian, masih terdapat 124 titik (44,3%) yang berada di luar standar, yang terdiri dari:

- 76 titik (27,1%) dengan gap sebesar 3–4 mm, yang berisiko menyebabkan cacat berupa burn-through atau over penetration jika tidak dikontrol dengan baik.
- 36 titik (12,9%) berada di kisaran 1–2 mm, yang terlalu sempit dan dapat menyebabkan lack of fusion atau tidak terlas secara sempurna.
- 12 titik (4,3%) bahkan menunjukkan gap sebesar 4–5 mm, yang sudah jauh melampaui batas toleransi dan sangat tidak disarankan untuk dilanjutkan ke tahap pengelasan tanpa perbaikan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun mayoritas sambungan memenuhi standar, tingkat ketidaksesuaian yang mencapai 44,3% masih tergolong tinggi dan memerlukan evaluasi lebih lanjut. Peningkatan pengawasan selama tahap fit-up dan penyesuaian ulang pada titik-titik dengan gap di luar standar sangat penting untuk memastikan integritas sambungan dan menghindari potensi cacat las pada saat inspeksi lebih lanjut seperti NDT (Non-Destructive Test).

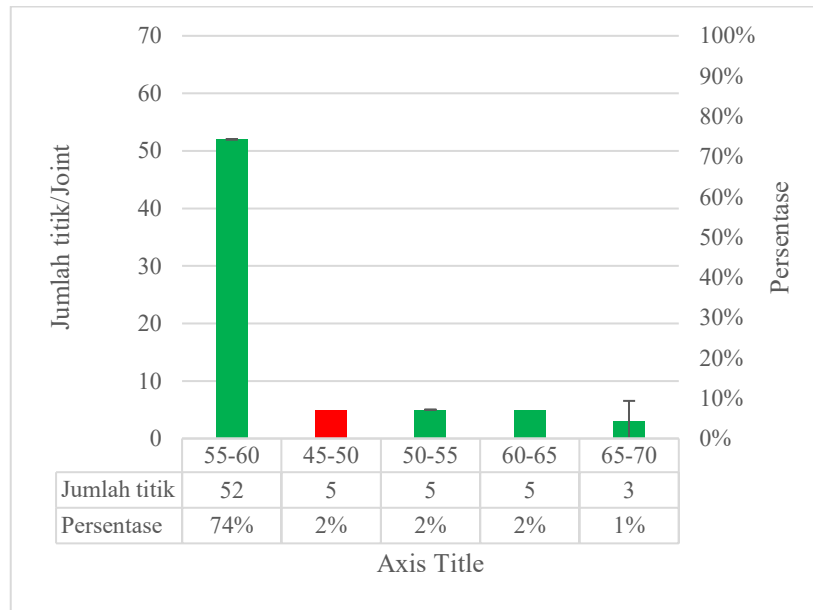
Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 5%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran gap ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan tapper gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: Tapper gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada gap yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 5%, meskipun mayoritas pengukuran (55,7%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

Meskipun ketidakpastian pengukuran masih berada dalam batas yang diterima, penting untuk mencatat bahwa variasi yang terjadi dalam hasil pengukuran memerlukan perhatian lebih lanjut. Oleh karena itu, untuk meningkatkan presisi pengukuran, langkah-langkah perbaikan pada prosedur pengukuran, pemilihan alat yang lebih akurat, serta pengaturan posisi pengukuran yang lebih stabil sangat diperlukan. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi hasil, seperti kondisi alat, posisi pengukuran, dan faktor lingkungan, diharapkan kedepannya akan tercapai hasil pengukuran yang lebih akurat dan dapat diandalkan, serta mengurangi kemungkinan kesalahan di masa yang akan datang.

c. Data Pengukuran *V-Groove*



Gambar 43. Diagram Pengukuran *V-Groove*

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Gambar 43, hasil pengukuran sudut *V-Groove* menunjukkan bahwa dari total 70 titik sambungan yang diamati, sebanyak 65 titik atau sekitar 92,9% berada dalam rentang standar yang ditetapkan oleh dokumen WPS, yaitu $60^\circ \pm 10^\circ$ atau dengan kata lain antara 50° hingga 70° . Titik-titik ini terbagi ke dalam rentang $50-55^\circ$, $55-60^\circ$, $60-65^\circ$, dan $65-70^\circ$ yang semuanya masih dikategorikan memenuhi standar dan dapat dilanjutkan ke proses pengelasan sesuai prosedur.

Sementara itu, terdapat 5 titik sambungan atau sekitar 7,1% yang tercatat berada di bawah batas bawah standar, yaitu pada rentang $45^\circ-50^\circ$. Titik-titik ini tidak sesuai standar karena memiliki sudut bevel yang terlalu sempit, yang secara teknis dapat menyebabkan kendala pada proses pengelasan seperti penetrasi yang kurang dalam (*incomplete penetration*) atau risiko cacat sambungan lainnya. Oleh karena itu, titik-titik dengan sudut di bawah 50° tersebut idealnya harus dikoreksi terlebih dahulu sebelum dilanjutkan ke tahap pengelasan.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran *v-groove* ini antara lain:

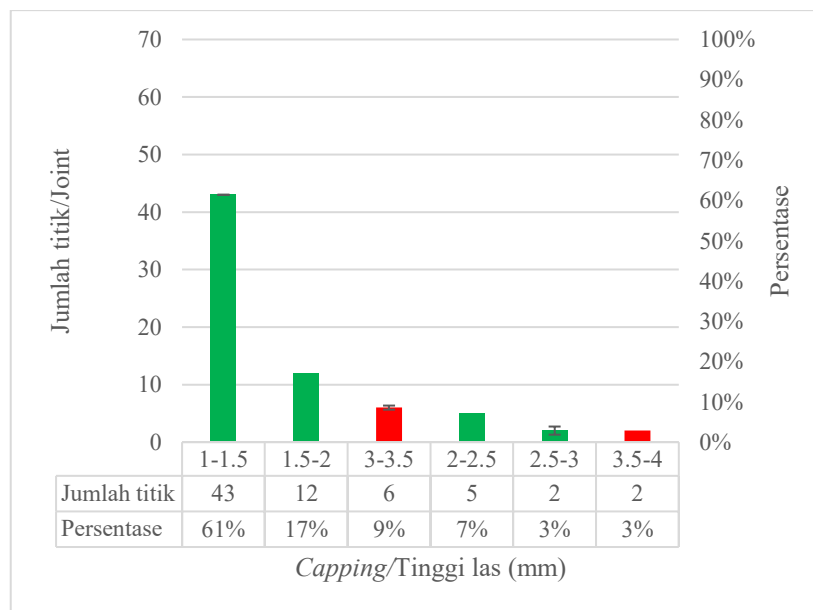
- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan vernier caliper digital bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak

ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.

- **Posisi Pengukuran:** Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- **Keterbatasan Instrumen:** vernier caliper digital mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- **Faktor Lingkungan:** Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada v-groove yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun mayoritas pengukuran (92,9%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

d. Data Pengukuran *Capping*



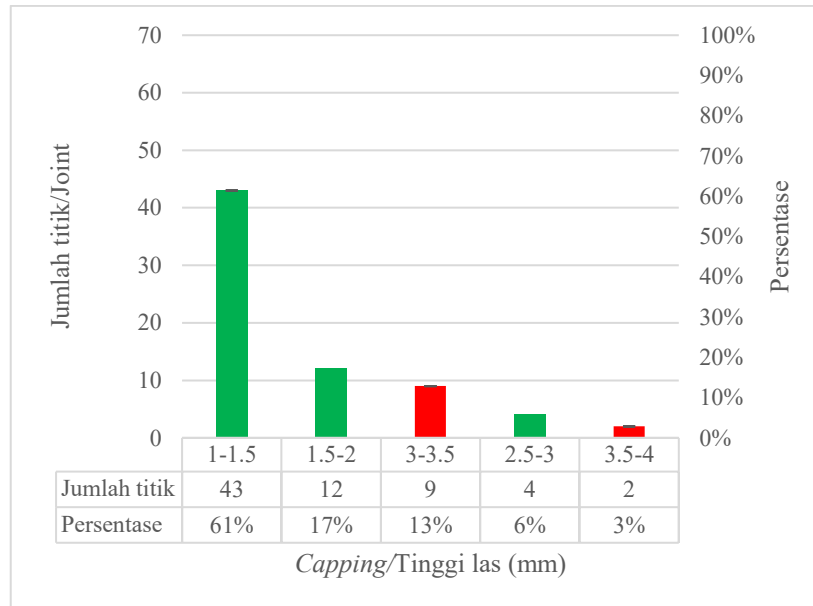
Gambar 44. Diagram Pengukuran *Capping* pada Sisi *Inside*

Berdasarkan Gambar 44 yang menunjukkan hasil pengukuran tinggi capping pada sisi inside, terlihat bahwa sebagian besar sambungan las memiliki tinggi capping dalam rentang yang sesuai dengan standar. Dari total 70 titik sambungan, sebanyak 62 titik berada pada rentang tinggi maksimal ≤ 3 mm, yang artinya telah memenuhi standar WPS dan ASME BPVC Section IX, yaitu tinggi capping tidak melebihi 3 mm. Jika dihitung secara persentase, maka sekitar 88,57% sambungan las pada sisi inside termasuk kategori sesuai standar. Sementara itu, masih terdapat 9 titik sambungan atau 11,43% yang melebihi batas tinggi tersebut. Tingginya capping yang berlebih ini perlu mendapat perhatian karena dapat menjadi sumber tegangan sisa atau gangguan aliran fluida di dalam pipa.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 6%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran capping ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan welding gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: welding gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada capping yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 6%, meskipun mayoritas pengukuran (88,57%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 45. Diagram Pengukuran *Capping* pada Sisi *Outside*

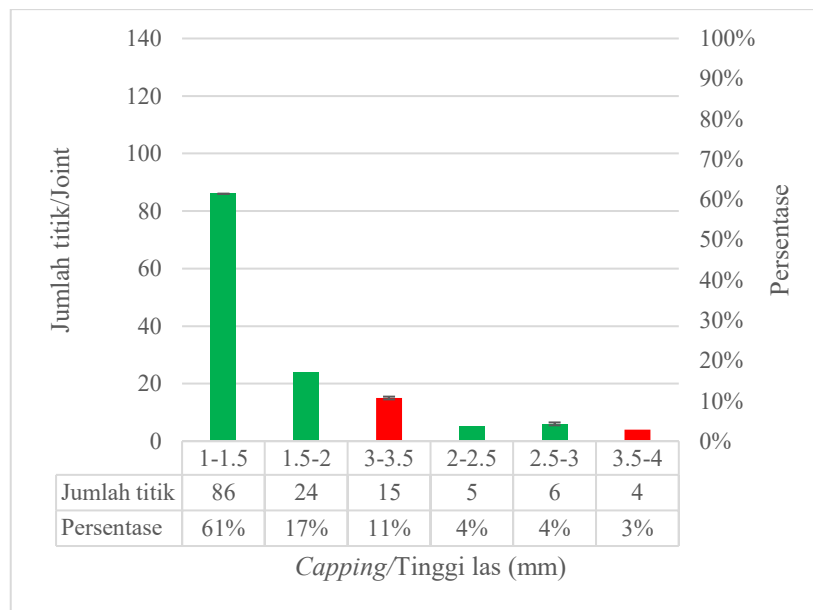
Selanjutnya pada Gambar 45, yaitu pengukuran *capping* sisi *outside*, tren data menunjukkan hasil yang lebih baik. Dari total pengukuran yang sama, yaitu 70 titik, sebanyak 59 titik sambungan atau sekitar 84,29% berada dalam batas toleransi tinggi *capping* maksimal 3 mm. Hanya 11 titik sambungan atau 15,71% yang tidak sesuai karena melebihi batas maksimum. Hasil ini menunjukkan bahwa proses pengelasan pada sisi luar cenderung lebih konsisten dibandingkan sisi dalam.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 6%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran *capping* ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan *welding gauge* bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: *welding gauge* mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan *gap* yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.

- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada capping yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkendali.

Dengan ketidakpastian sebesar 6%, meskipun mayoritas pengukuran (84,29%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.



Gambar 46. Diagram Pengukuran Keseluruhan *Capping*

Gambar 46 menyajikan data gabungan dari pengukuran tinggi *capping* pada sisi inside dan outside, dengan total jumlah titik/joint sebanyak 140 titik. Tujuan dari analisis ini adalah untuk mengetahui seberapa besar kualitas hasil pengelasan dalam memenuhi standar tinggi *capping* maksimal yang diizinkan, yaitu maksimal 3 mm, mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam WPS dan juga ASME BPVC Section IX.

Dari total 140 titik pengukuran:

- Sebanyak 121 titik atau sekitar 86,43% telah memenuhi standar tinggi *capping* maksimal 3 mm.
- Sedangkan 19 titik lainnya, atau sebesar 13,57%, teridentifikasi melebihi batas standar yang ditentukan.

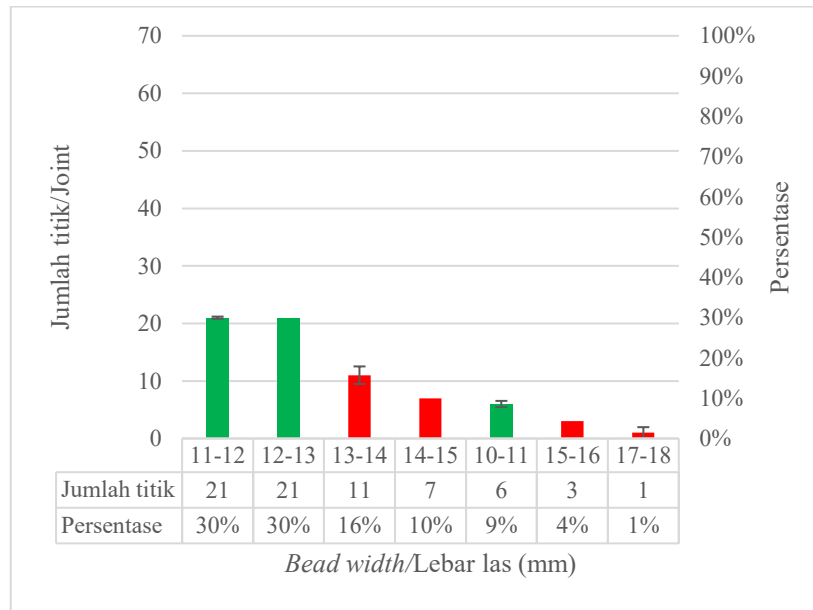
Capaian 86,43% ini menunjukkan bahwa sebagian besar sambungan las sudah dilakukan dengan kualitas tinggi dan sesuai spesifikasi teknis. Hasil ini mencerminkan bahwa pengelasan pada *boiler* telah dikontrol dengan baik, khususnya dalam hal pembentukan capping agar tidak berlebih yang bisa memicu cacat visual atau menyebabkan gangguan saat inspeksi non-destruktif seperti radiografi (RT).

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 6%, yang mengindikasikan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang bisa mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian pada pengukuran capping ini antara lain:

- Kesalahan Pembacaan Alat: Penggunaan welding gauge bisa menyebabkan ketidakpastian jika tidak dibaca dengan hati-hati atau jika posisi pengukuran tidak ideal. Ketidakakuratan pembacaan skala atau tidak konsistennya tekanan pada alat bisa meningkatkan variasi hasil pengukuran.
- Posisi Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada sambungan yang mungkin memiliki permukaan tidak rata atau berada pada lokasi yang sulit dijangkau. Hal ini dapat menyebabkan alat tidak terpasang dengan sempurna, menghasilkan pengukuran yang kurang tepat.
- Keterbatasan Instrumen: welding gauge mungkin memiliki batas ketelitian yang dapat memengaruhi hasil pengukuran terutama di area dengan perbedaan gap yang sangat kecil. Alat yang memiliki presisi terbatas mungkin tidak dapat mendeteksi perbedaan kecil di antar titik pengukuran dengan akurat.
- Faktor Lingkungan: Faktor eksternal seperti suhu atau kelembapan dapat memengaruhi bentuk atau ekspansi material yang diukur. Hal ini bisa berpengaruh pada capping yang diukur, terutama jika pengukuran dilakukan dalam kondisi lingkungan yang tidak terkontrol.

Dengan ketidakpastian sebesar 6%, meskipun mayoritas pengukuran (86,43%) memenuhi standar, penting untuk mempertimbangkan variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Langkah-langkah untuk mengurangi ketidakpastian, seperti perbaikan teknik pengukuran, memastikan kondisi alat dan lingkungan yang lebih stabil, serta pengukuran yang lebih hati-hati, sangat disarankan untuk mencapai hasil yang lebih presisi.

e. Data Pengukuran *Bead Widht*



Gambar 47. Diagram Pengukuran *Bead Widht* pada Sisi *Inside*

Berdasarkan Gambar 47, pengukuran bead width pada sisi inside dilakukan pada 70 titik sambungan. Dari jumlah tersebut, sebanyak 48 titik atau 69% dinyatakan sesuai standar, yakni berada dalam rentang 10–13 mm sesuai dengan spesifikasi yang tercantum dalam dokumen WPS dan ketentuan ASME BPVC Section IX QW-194.2, yang menyatakan bahwa ukuran kelebihan las (weld reinforcement) perlu dikontrol agar tidak mengganggu integritas sambungan. Rincian distribusi titik sesuai standar adalah: 6 titik (9%) pada rentang 10–11 mm, 21 titik (30%) pada rentang 11–12 mm, dan 21 titik (30%) pada rentang 12–13 mm. Sementara itu, terdapat 22 titik atau 31% yang tidak sesuai standar karena melebihi batas atas toleransi, dengan sebaran: 11 titik (15,7%) pada rentang 13–14 mm, 7 titik (10%) pada 14–15 mm, 3 titik (4,3%) pada 15–16 mm, dan 1 titik (1,4%) pada 17–18 mm. Hasil ini menunjukkan adanya kecenderungan *overweld* pada sebagian titik di sisi inside, yang dapat disebabkan oleh kesulitan akses area kerja atau ketidakkonsistenan parameter pengelasan. Oleh karena itu, pengendalian proses dan pelatihan operator sangat diperlukan untuk menjaga kualitas geometri hasil las.

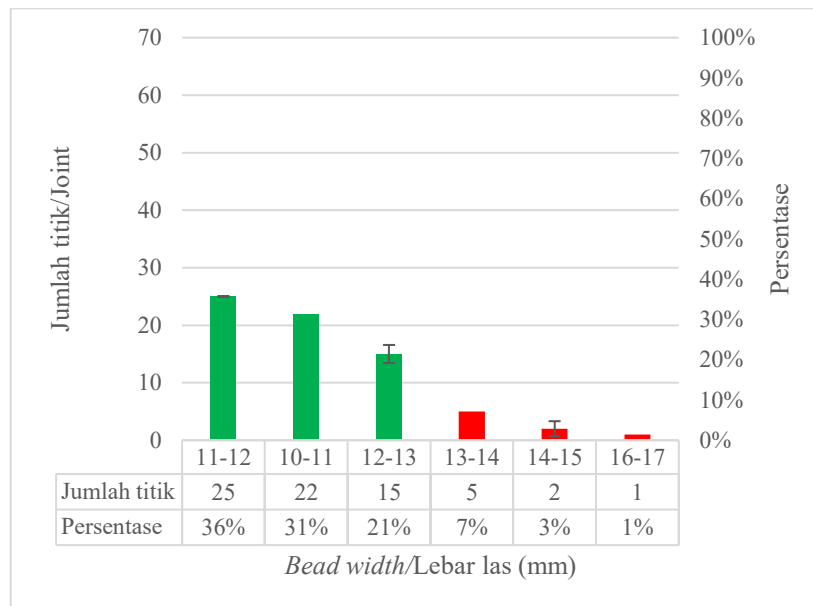
Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakakuratan Pembacaan Digital: Meskipun menggunakan vernier caliper digital, ketidakpastian dapat timbul jika pembacaan angka tidak dilakukan dengan

hati-hati atau jika ada gangguan pada layar digital yang menyebabkan pembacaan tidak tepat.

- Kesalahan Posisi Pengukuran: Vernier caliper digital memiliki batas presisi tertentu, dan jika alat tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini bisa menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, terutama jika sambungan las tidak sejajar atau memiliki bentuk yang tidak rata.
- Pengaruh Kondisi Alat: Vernier caliper digital yang sudah digunakan dalam waktu lama tanpa kalibrasi atau dalam kondisi buruk (misalnya baterai lemah atau layar rusak) bisa meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi bahan dan alat pengukur, misalnya perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi material, yang akhirnya memengaruhi ketepatan pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun sebagian besar pengukuran (69%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah seperti kalibrasi lebih lanjut, penggunaan alat dengan resolusi lebih tinggi, serta perbaikan dalam teknik pengukuran dapat membantu mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.



Gambar 48. Diagram Pengukuran *Bead Widht* pada Sisi *Outside*

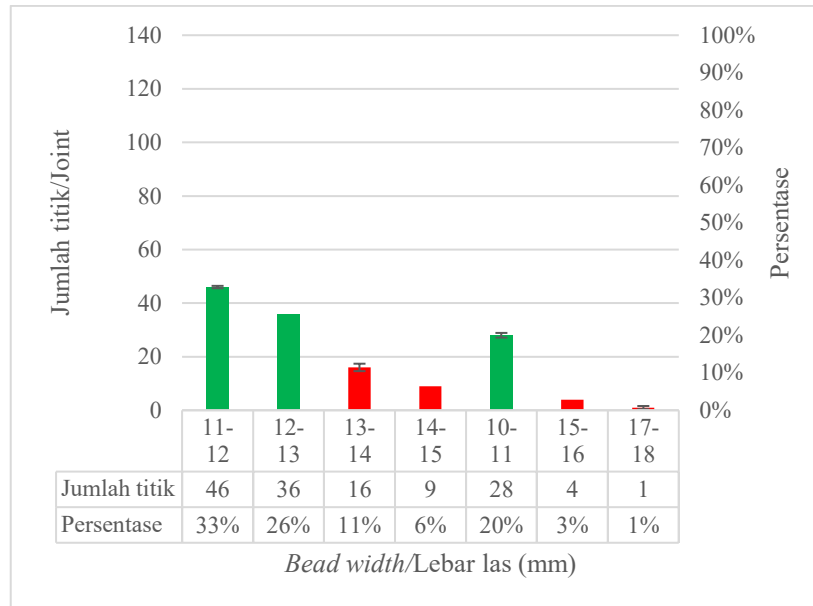
Sementara itu, Gambar 48 menunjukkan hasil pengukuran bead width pada sisi outside yang cenderung lebih baik dan konsisten. Dari total 70 titik, sebanyak 62 titik atau 88,6% tercatat memenuhi standar (10–13 mm), sedangkan 8 titik atau 11,4% tercatat tidak

sesuai standar. Distribusi titik yang sesuai meliputi: 22 titik (31,4%) pada rentang 10–11 mm, 25 titik (35,7%) pada 11–12 mm, dan 15 titik (21,4%) pada 12–13 mm. Adapun sebaran titik yang tidak sesuai adalah: 5 titik (7,1%) pada rentang 13–14 mm, 2 titik (2,9%) pada 14–15 mm, dan 1 titik (1,4%) pada 15–16 mm. Hasil ini memperlihatkan bahwa proses pengelasan pada sisi outside cenderung lebih terkontrol, yang mungkin dipengaruhi oleh ruang kerja yang lebih luas dan visibilitas operator yang lebih baik. Meskipun jumlah ketidaksesuaian relatif kecil, setiap deviasi tetap penting untuk dicermati agar tidak berdampak terhadap performa jangka panjang sambungan.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakakuratan Pembacaan Digital: Meskipun menggunakan vernier caliper digital, ketidakpastian dapat timbul jika pembacaan angka tidak dilakukan dengan hati-hati atau jika ada gangguan pada layar digital yang menyebabkan pembacaan tidak tepat.
- Kesalahan Posisi Pengukuran: Vernier caliper digital memiliki batas presisi tertentu, dan jika alat tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini bisa menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, terutama jika sambungan las tidak sejajar atau memiliki bentuk yang tidak rata.
- Pengaruh Kondisi Alat: Vernier caliper digital yang sudah digunakan dalam waktu lama tanpa kalibrasi atau dalam kondisi buruk (misalnya baterai lemah atau layar rusak) bisa meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi bahan dan alat pengukur, misalnya perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi material, yang akhirnya memengaruhi ketepatan pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun sebagian besar pengukuran (88,6%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah seperti kalibrasi lebih lanjut, penggunaan alat dengan resolusi lebih tinggi, serta perbaikan dalam teknik pengukuran dapat membantu mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.



Gambar 49. Diagram Pengukuran Keseluruhan *Bead Width*

Gambar 49 menggambarkan hasil pengukuran keseluruhan bead width yang mencakup gabungan dari sisi inside dan outside, dengan total sebanyak 140 titik pengukuran. Berdasarkan grafik tersebut, pengukuran menunjukkan bahwa sebagian besar nilai lebar las (bead width) berada dalam rentang standar yang telah ditentukan, yaitu antara 10 hingga 13 mm, sebagaimana tercantum dalam dokumen Welding Procedure Specification (WPS) serta merujuk pada ketentuan ASME BPVC Section IX pasal QW-194.2 mengenai kontrol dimensi kelebihan las.

Sebanyak 110 titik atau 78,6% dari total keseluruhan pengukuran tercatat sesuai dengan spesifikasi standar. Rincian distribusi titik yang berada dalam rentang standar adalah sebagai berikut:

- Sebanyak 46 titik (32,9%) berada pada rentang 11–12 mm,
- 36 titik (25,7%) pada rentang 12–13 mm,
- dan 28 titik (20%) pada rentang 10–11 mm.

Seluruh nilai ini ditampilkan dengan warna hijau pada grafik karena mencerminkan kesesuaian terhadap standar kualitas geometrik hasil las.

Sementara itu, terdapat 30 titik atau 21,4% yang tidak memenuhi kriteria, karena nilai bead width-nya melebihi batas atas toleransi standar (di atas 13 mm). Distribusi dari titik-titik yang tidak sesuai tersebut adalah:

- 16 titik (11,4%) berada pada rentang 13–14 mm,
- 9 titik (6,4%) pada rentang 14–15 mm,
- 4 titik (2,9%) pada rentang 15–16 mm,

- dan 1 titik (0,7%) pada rentang 17–18 mm.

Seluruh rentang ini ditandai dengan warna merah karena menunjukkan indikasi *overweld* atau pelebaran las yang melebihi spesifikasi, yang berpotensi menyebabkan gangguan pada integritas sambungan atau aliran fluida.

Namun, pengukuran ini memiliki ketidakpastian sebesar 2%, yang menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran yang dapat mempengaruhi akurasi. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakakuratan Pembacaan Digital: Meskipun menggunakan vernier caliper digital, ketidakpastian dapat timbul jika pembacaan angka tidak dilakukan dengan hati-hati atau jika ada gangguan pada layar digital yang menyebabkan pembacaan tidak tepat.
- Kesalahan Posisi Pengukuran: Vernier caliper digital memiliki batas presisi tertentu, dan jika alat tidak diposisikan dengan benar pada sambungan, hal ini bisa menyebabkan kesalahan dalam pengukuran, terutama jika sambungan las tidak sejajar atau memiliki bentuk yang tidak rata.
- Pengaruh Kondisi Alat: Vernier caliper digital yang sudah digunakan dalam waktu lama tanpa kalibrasi atau dalam kondisi buruk (misalnya baterai lemah atau layar rusak) bisa meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran.
- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu atau kelembapan dapat mempengaruhi bahan dan alat pengukur, misalnya perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi material, yang akhirnya memengaruhi ketepatan pengukuran.

Dengan ketidakpastian sebesar 2%, meskipun sebagian besar pengukuran (78,6%) berada dalam batas toleransi, penting untuk mempertimbangkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang berada di luar batas toleransi. Oleh karena itu, langkah-langkah seperti kalibrasi lebih lanjut, penggunaan alat dengan resolusi lebih tinggi, serta perbaikan dalam teknik pengukuran dapat membantu mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran.

Dengan demikian, grafik ini memperlihatkan bahwa mayoritas hasil pengelasan telah memenuhi standar yang ditetapkan, namun masih terdapat proporsi deviasi yang signifikan pada titik-titik tertentu. Ketidaksesuaian ini kemungkinan besar disebabkan oleh faktor teknis seperti variasi kecepatan pengelasan, fluktuasi arus atau tegangan las, serta keterbatasan akses visual dan ergonomi pada saat proses pengelasan berlangsung, terutama pada posisi yang sulit dijangkau.

G. Analisis total tingkat keberhasilan pekerjaan *retubing* pada dua sisi (*Front wall* dan *right wall*) boiler CFB

Pekerjaan *retubing* pada boiler CFB sisi *front wall* dan *right wall* merupakan langkah strategis dalam upaya menjaga efisiensi termal serta memperpanjang usia operasional boiler. Keberhasilan pekerjaan ini sangat ditentukan oleh kualitas penyambungan pipa, yang secara sistematis dievaluasi berdasarkan lima parameter pengukuran utama, yakni *Hi-Lo alignment*, Gap sambungan, Sudut V-Groove, Tinggi Capping, dan Lebar Bead Width. Evaluasi dilakukan dengan mengacu pada standar ASME Section IX dan dokumen Welding Procedure Specification (WPS) dokumen pengadaan.

a. Rekapitulasi Data Keberhasilan *Retubing* per Sisi

Berikut adalah rekapitulasi persentase keberhasilan dari tiap parameter pada kedua sisi boiler:

Tabel 1. Rekapitulasi Data Keberhasilan *Retubing* per Sisi

Metode Pengukuran	Keberhasilan Front Wall (%)	Keberhasilan Right Wall (%)	Ketidakpastian Front Wall (%)	Ketidakpastian Right Wall (%)
Hi-Lo	79	63	5	9
Gap	70	56	2	5
V-Groove	97	93	1	2
Capping	93	86,4	7	6
Bead Width	72	78,6	1	2

b. Analisis komparatif dan temuan utama

- *Hi-Lo*

Front wall menunjukkan tingkat keberhasilan lebih tinggi (81,42%) dibandingkan *Right wall* (63,21%), mengindikasikan kontrol penyalarsan pipa yang lebih baik di sisi depan. Deviasi pada *Right wall* menunjukkan bahwa aspek fit-up awal masih perlu perbaikan agar kualitas penyambungan lebih konsisten. Pengukuran *Hi-Lo* memiliki ketidakpastian sebesar 5% untuk sisi *front wall* 9% untuk sisi *right wall*, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar, penting untuk mempertimbangkan adanya variabilitas dalam pengukuran yang perlu diperbaiki.

- Gap Sambungan

Keberhasilan pada *Front wall* mencapai 70,13%, sedangkan *Right wall* hanya 55,71%, menunjukkan adanya tantangan dalam menjaga celah sambungan yang ideal. Penyesuaian awal yang tidak presisi dapat memengaruhi penetrasi las dan integritas sambungan, sehingga penting adanya pembenahan pada teknik pemasangan dan penggunaan alat bantu pengatur gap. Ketidakpastian pengukuran gap tercatat sebesar 2% untuk sisi *front wall* dan

5% untuk sisi *right wall*, yang menunjukkan ketidaksesuaian dalam pengukuran celah sambungan yang dapat mempengaruhi kualitas pengelasan.

- V-Groove

Kedua sisi menunjukkan kinerja yang sangat baik dengan keberhasilan di atas 90%: *Front wall* 97,35% dan *Right wall* 92,86%. Hal ini menandakan bahwa beveling dilakukan dengan ketelitian tinggi dan kualitas persiapan las sangat terjaga. Ketidakpastian pengukuran pada V-Groove tercatat sebesar 1% untuk sisi *front wall* dan 2% untuk sisi *right wall*, yang disebabkan oleh posisi pengukuran yang sulit dijangkau dan ketidakakuratan dalam pengukuran sudut.

- Capping

Front wall memiliki tingkat keberhasilan 92,92%, sedikit lebih tinggi dibanding *Right wall* 86,43%. Ini menunjukkan bahwa operator mampu mengontrol pengisian las akhir dengan baik, namun tetap perlu perbaikan kecil di area yang lebih sempit atau sulit dijangkau. Pengukuran capping menunjukkan ketidakpastian sebesar 7% untuk sisi *front wall* dan 6% untuk sisi *right wall*, yang menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran tinggi las, terutama pada posisi yang lebih sulit dijangkau.

- Bead Width

Bead Width di *Right wall* sedikit lebih unggul (78,57%) dibanding *Front wall* (71,68%). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi posisi pengelasan dan keterbatasan akses saat proses las, namun masih berada dalam kisaran yang cukup baik. Ketidakpastian pada pengukuran bead width tercatat sebesar 1% untuk sisi *front wall* dan 2% untuk sisi *right wall*, yang disebabkan oleh posisi pengelasan yang bervariasi dan keterbatasan akses selama proses las.

c. Tingkat Keberhasilan Pekerjaan *Retubing*

Berdasarkan seluruh parameter teknis yang telah dianalisis, tingkat keberhasilan total pekerjaan *retubing* pada sisi *Front wall* dan *Right wall* adalah sebesar 75,48%, yang menandakan bahwa lebih dari tiga perempat dari seluruh sambungan telah sesuai dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan.

Namun demikian, sebanyak 24,52% sambungan masih menunjukkan deviasi dari standar, terutama pada parameter *Hi-Lo* dan *Gap*, yang merupakan tahap awal dan sangat krusial dalam menjamin kualitas akhir pengelasan. Oleh karena itu, perbaikan prosedur pada tahap *fit-up*, penambahan alat bantu alignment, serta pengawasan visual lebih intensif menjadi langkah strategis untuk meningkatkan keberhasilan *retubing* di masa mendatang.

2. Mengukur Hasil *Metal Coating*

Pengukuran ketebalan lapisan metal coating dilakukan sebagai langkah penting dalam evaluasi kualitas pelapisan permukaan *tube boiler* setelah proses thermal spray diselesaikan. Ketebalan lapisan yang terbentuk berpengaruh langsung terhadap daya tahan permukaan *tube* terhadap korosi dan keausan di lingkungan kerja ekstrem seperti pada *boiler* bertekanan tinggi.

Proses pengukuran dilakukan menggunakan alat ukur ketebalan lapisan tipe coating thickness gauge Elcometer 456, yang bekerja berdasarkan prinsip induksi magnetik untuk substrat logam ferromagnetik seperti pipa *boiler*. Alat ini mampu memberikan pembacaan non-destruktif secara cepat dan akurat terhadap ketebalan lapisan metal coating, sehingga sangat cocok digunakan untuk aplikasi di lapangan.

Metode pengukuran dilakukan secara sistematis pada *tube boiler* dengan panjang 2.000 mm yang telah dilapisi. Setiap *tube* dibagi menjadi empat zona pengukuran vertikal dengan jarak antar zona sebesar 500 mm. Pada masing-masing zona, dilakukan tiga titik pengukuran secara horizontal, yaitu di sisi kiri (titik A), tengah (titik B), dan kanan (titik C). Dengan demikian, setiap *tube* memiliki total 12 titik pengukuran, yang mencerminkan distribusi ketebalan lapisan secara menyeluruh, baik secara vertikal maupun lateral. Skema pengukuran ini ditunjukkan pada Gambar X.

Untuk memastikan akurasi dan validitas hasil pengukuran, tahap-tahap persiapan spesimen sebelum pelapisan juga menjadi aspek krusial yang tidak dapat diabaikan. Oleh karena itu, proses ini diawali dengan persiapan permukaan *tube* secara menyeluruh sebagaimana dijelaskan pada subbab berikut.

A. Persiapan Spesimen

Sebelum dilakukan proses pelapisan metal coating, permukaan *tube boiler* wajib dibersihkan secara menyeluruh untuk menghilangkan kotoran, minyak, dan oksida yang dapat mengganggu daya rekat lapisan. Sesuai standar pelapisan logam, tahap pembersihan dilakukan dengan metode grit blasting menggunakan material abrasif berupa white aluminium oxide ukuran mesh 24. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan kontaminan serta membentuk profil kekasaran mikro pada permukaan logam, sehingga dapat mendukung pembentukan ikatan mekanis yang optimal antara lapisan coating dan substrat. Persiapan permukaan ini merupakan tahapan krusial dalam sistem pelapisan karena berpengaruh langsung terhadap kualitas adhesi dan daya tahan lapisan terhadap lingkungan kerja ekstrem pada *boiler*.

B. Proses *Sandblasting*

Proses *sandblasting* dilakukan untuk menciptakan permukaan yang bersih dan memiliki kekasaran mikro yang optimal, guna meningkatkan daya lekat (*adhesion*) dari lapisan metal coating. Material abrasif yang digunakan dalam proses ini adalah white aluminium oxide berukuran mesh 24, yang memiliki kekerasan tinggi dan mampu menghasilkan tekstur permukaan yang ideal untuk aplikasi pelapisan termal.

Tekanan udara yang digunakan dalam proses blasting berkisar antara 75–80 psi, dengan jarak penyemprotan sekitar 6–8 inci (10–15 cm) dari permukaan kerja. Berdasarkan pengukuran lapangan, profil kekasaran yang dihasilkan berada dalam kisaran 50–100 μm , yang sesuai untuk standar pelapisan logam.

Proses ini mengacu pada standar visual pembersihan permukaan berdasarkan Swedish Standard SIS 05 59 00 – Sa 2.5, yang mengharuskan permukaan logam bebas dari kotoran, minyak, oksida, karat, dan partikel asing lain hingga tampak sebagai logam putih keabu-abuan, tanpa kilap. Tingkat kebersihan ini dianggap optimal sebelum proses thermal spray coating dilakukan, karena memberikan daya ikat yang maksimal antara lapisan coating dan substrat logam. Seluruh proses dilakukan dengan memperhatikan keselamatan kerja dan lingkungan sesuai standar operasional, termasuk penggunaan perlengkapan pelindung diri (*blast suit*, CPF air filter, dan *blast helmet*) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 50.



Gambar 50. Proses *Sandblasting*

C. Proses metal coating (*Thermal arc spray coating*)

Setelah permukaan *tube* dibersihkan melalui proses *sandblasting*, langkah selanjutnya adalah pelapisan logam menggunakan metode *Thermal Arc Spray Coating*, khususnya jenis *Twin Wire Arc Spray* (TWAS). Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan lapisan

pelindung logam dengan ketahanan aus dan korosi yang sangat tinggi, sehingga sesuai dengan kebutuhan operasi *boiler* CFB yang ekstrem. Spesifikasi Teknis Pelapisan Berdasarkan Dokumen Pengadaan Pelapisan metal coating dilakukan dengan mengacu pada spesifikasi teknis dari dokumen pengadaan rehabilitasi *boiler* PLTU, dengan ketentuan sebagai berikut:

- Ketebalan lapisan berada pada rentang 600–700 mikron, untuk memastikan perlindungan optimal tanpa mengganggu efisiensi perpindahan panas.
- Kekerasan mikro (microhardness) berada dalam kisaran 863–1300 HV, menunjukkan ketahanan aus yang sangat tinggi.
- Kekuatan ikat (bond strength) minimum adalah 9.500 psi, yang menjamin kuatnya adhesi antara lapisan pelindung dan substrat logam dasar.
- Suhu operasi (temperature service) dari lapisan berkisar antara 850–1100 °C, sehingga tetap stabil dalam kondisi pembakaran ekstrem.

Dalam proses ini, digunakan kawat pelapis jenis Ni-Cr-B-Si-Mo sebagai material penyemprot. Paduan ini dipilih karena mengandung elemen penguat seperti kromium (Cr) dan boron (B) yang berfungsi membentuk fase keras, serta molibdenum (Mo) yang meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi dan abrasi. Ketika kedua kawat dialiri arus listrik, akan terbentuk busur listrik (*arc*) yang melelehkan ujung kawat, kemudian logam cair ini ditiup oleh tekanan udara menuju permukaan substrat, membentuk lapisan pelindung yang merata.

Parameter proses pelapisan yang digunakan mengacu pada standar AWS C2.18-93 (R2003): *Guide for Thermal Spray Operator Qualification* dan ISO 14919:2015 – *Thermal spraying — Wires, rods and cords for flame and arc spraying — Classification and technical supply conditions*. Parameter utama dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 2. Parameter proses *metal coating*

Parameter	Satuan	Nilai
Diameter Kawat	inch / mm	1/16" (1.6 mm)
Tegangan (Voltage)	Volt (V)	30–32
Arus (Amperage)	Ampere (A)	175–250
Tekanan Udara	psi	75–80
Jarak Penyemprotan	inci / cm	6–8 inci (10–15 cm)
Kecepatan Semprot	m/s	30–60
Sudut Semprot	derajat	70–90°
Kebersihan Permukaan	Standar Visual	Sa 2.5 (SIS 05 59 00)

Lapisan hasil pelapisan menunjukkan struktur mikro yang kaya akan fase keras (hard phases) seperti borida, silisida, dan karbida, yang tertanam dalam matriks nikel. Kombinasi ini menghasilkan ketahanan tinggi terhadap abrasi dan korosi suhu tinggi, serta memperpanjang umur pakai pipa-pipa *boiler*.

Dalam praktik di lapangan, ditemukan adanya variasi ketebalan, baik di bawah maupun melebihi spesifikasi. Ketebalan di bawah 600 μm dapat menyebabkan kegagalan dini akibat penetrasi korosi erosif, sedangkan ketebalan di atas 700 μm , meskipun sering dianggap sebagai nilai tambah, tetap memiliki risiko teknis seperti peningkatan tegangan termal antar lapisan (thermal mismatch), delaminasi, dan penurunan efisiensi perpindahan panas. Oleh karena itu, pengendalian ketebalan menjadi faktor kritis, dan dilakukan secara berkala menggunakan alat coating thickness gauge untuk memastikan kesesuaian dengan standar.



Gambar 51. Proses *metal coating*

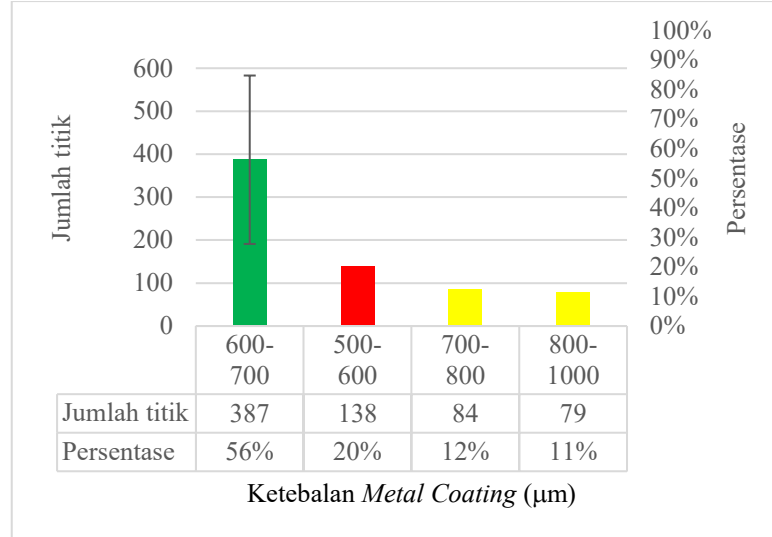
Dapat dilihat pada Gambar 51, seluruh proses hanya dilakukan di bagian dalam *boiler* yang telah dilengkapi sistem ventilasi dan filtrasi debu, sesuai standar OSHA 1910.94 dan rekomendasi dari NIOSH mengenai pengendalian paparan partikel halus dan logam berat. Operator wajib menggunakan APD lengkap, termasuk blast suit, air-fed respirator, sarung tangan tahan panas, dan pelindung wajah. Hal ini menjadi bagian penting dalam menjamin kesehatan kerja selama pelaksanaan pelapisan thermal spray.

D. Hasil data metal coating pada sisi *front wall*

Data ini dianalisis untuk menilai kesesuaian hasil *metal coating* terhadap ketentuan yang tercantum dalam dokumen pengadaan. Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa proses pelapisan telah memenuhi standar yang ditetapkan. Berikut merupakan data hasil

metal coating pada setiap sambungan *tube*, yang menunjukkan jumlah total *tube* yang telah dilapisi.

a. Data *metal coating* pada sisi *front wall* elevasi 16-18 m



Gambar 52. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik A

Pada titik A, jumlah titik pengukuran mencapai 688 titik, dengan distribusi ketebalan sebagai berikut:

- 387 titik (56,3%) berada pada kisaran 600–700 μm dan ditandai dengan warna hijau, yang menunjukkan bahwa lebih dari setengah hasil pengukuran telah memenuhi standar ketebalan sesuai dokumen pengadaan.
- 138 titik (20,1%) berada pada rentang 500–600 μm (warna merah), yang berarti ketebalan pada titik-titik ini masih di bawah spesifikasi minimum, sehingga memiliki potensi risiko terhadap ketahanan korosi atau umur pelapisan.

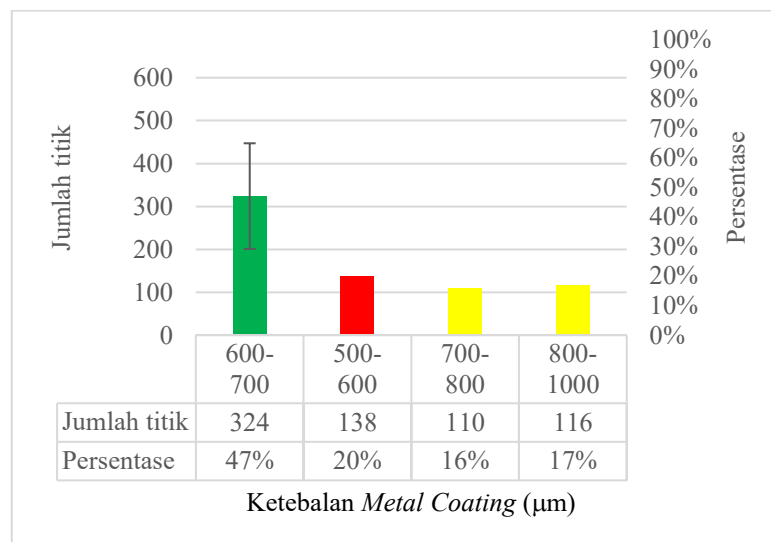
Sementara itu, terdapat 84 titik (12,2%) dalam rentang 700–800 μm , 51 titik (7,4%) dalam rentang 800–900 μm , dan 28 titik (4,0%) pada rentang 900–1000 μm , yang seluruhnya diberi warna kuning sebagai indikator ketebalan melebihi standar. Meski over-thickness dapat meningkatkan perlindungan, hal ini juga dapat menimbulkan risiko seperti retak karena thermal stress atau efisiensi perpindahan panas yang menurun.

Secara keseluruhan, 56,3% dari titik pengukuran di titik A sudah sesuai dengan ketentuan, sedangkan 43,7% sisanya memerlukan perhatian khusus, yakni 20,1% di bawah standar yang perlu dilakukan perbaikan atau re-coating, dan 23,6% melebihi standar yang harus diperiksa kembali kualitas adhesinya dan dampak termalnya sebelum disetujui sebagai final coating.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan coating menggunakan Elcometer 456 memiliki ketidakpastian sebesar 37%. Faktor penyebab ketidakpastian ini meliputi:

- Ketidakpastian alat: Meskipun alat memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, variasi kecil pada ketebalan lapisan dapat meningkatkan ketidakpastian.
- Faktor lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam boiler CFB dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
- Human error: Kesalahan operator dalam membaca alat atau penempatan alat yang kurang tepat juga dapat meningkatkan ketidakpastian.

Dengan ketidakpastian sebesar 37%, meskipun sebagian besar hasil pengukuran berada dalam standar, variabilitas hasil perlu diperhatikan, terutama pada titik yang berada di luar toleransi. Oleh karena itu, perlu perbaikan prosedur pengukuran untuk mengurangi ketidakpastian.



Gambar 53. Diagram hasil pengukuran metal coating titik B

Berdasarkan Gambar 53 pengukuran pada titik B, distribusi hasil pengukuran ketebalan metal coating terdiri dari 688 titik dengan rincian sebagai berikut:

- 324 titik (47,1%) berada pada rentang 600–700 μm (warna hijau), menunjukkan kepatuhan terhadap spesifikasi dokumen pengadaan.
- 138 titik (20,1%) berada pada rentang 500–600 μm (warna merah), mengindikasikan ketebalan di bawah standar yang berisiko menurunkan efektivitas perlindungan korosi.
- 110 titik (16,0%) pada rentang 700–800 μm , 72 titik (10,5%) pada 800–900 μm , dan 44 titik (6,4%) pada 900–1000 μm —semua diwarnai kuning sebagai penanda

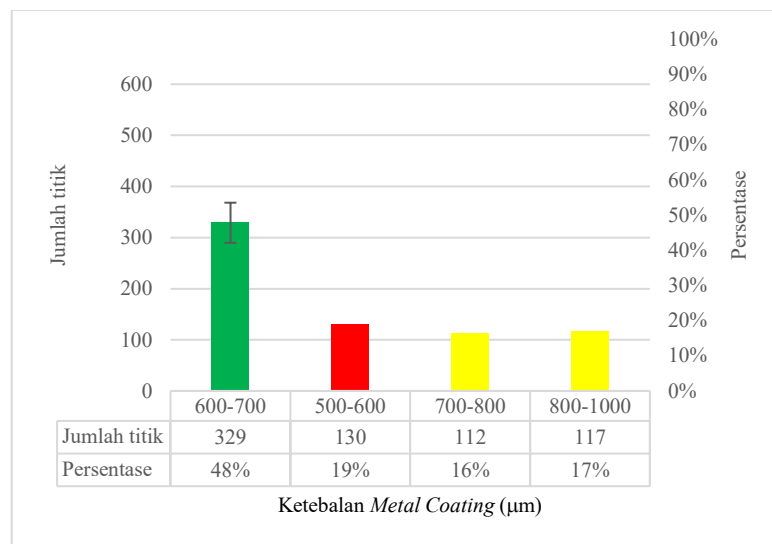
over-thickness yang perlu mendapat tinjauan teknis lebih lanjut sebelum dianggap “kelebihan proteksi” yang boleh diterima.

Secara keseluruhan, 47,1% pelapisan pada titik B memenuhi spesifikasi, sementara 52,9% lainnya (20,1% di bawah, 32,8% di atas) memerlukan evaluasi dan perbaikan—baik dengan penambahan material pada titik kurang tebal maupun penyesuaian proses di titik yang berlebih.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan menggunakan Elcometer 456 memiliki ketidakpastian sebesar 34%. Faktor penyebab ketidakpastian ini meliputi:

- Ketidakpastian Alat: Resolusi alat yang tinggi (1 mikron) dan ketelitian $\pm 1\%$ tetap menghasilkan variasi yang cukup besar, terutama pada titik yang dekat dengan batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Pengaruh suhu dan kelembapan di dalam boiler CFB dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan pembacaan atau penempatan alat dapat berkontribusi pada ketidakpastian pengukuran.

Dengan ketidakpastian 34%, meskipun sebagian besar pengukuran memenuhi standar, titik yang di luar toleransi membutuhkan perhatian lebih, baik yang terlalu tipis maupun terlalu tebal. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan pada prosedur pengukuran dan kontrol kualitas yang lebih ketat.



Gambar 54. Diagram hasil pengukuran metal coating titik C

Berdasarkan Gambar 54 hasil pengukuran pada titik C juga terdapat 688 titik pengukuran dengan sebaran:

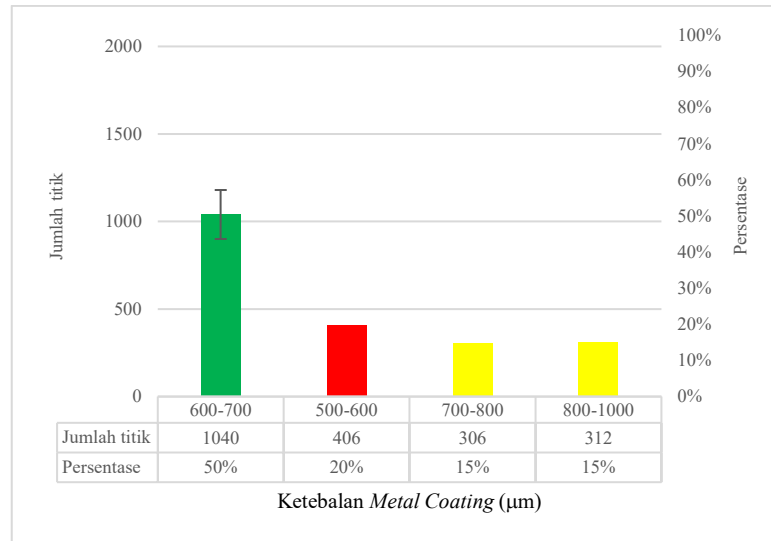
- 329 titik (47,8%) dalam kisaran 600–700 μm (warna hijau), artinya hampir setengah pelapisan sudah sesuai standar.
- 130 titik (18,9%) berada di bawah spesifikasi, yaitu 500–600 μm (warna merah), yang memerlukan re-work atau peningkatan ketebalan.
- 112 titik (16,3%) pada rentang 700–800 μm , 76 titik (11,0%) pada 800–900 μm , dan 41 titik (6,0%) pada 900–1000 μm (semua berwarna kuning), yang menandakan over-thickness dan sebaiknya dikaji ulang dari sisi tegangan termal dan efisiensi perpindahan panas sebelum finalisasi.

Dengan demikian, 47,8% titik C memenuhi ketebalan ideal, sedangkan 52,2% lainnya perlu intervensi: 18,9% di antaranya harus ditambah tebalnya, dan 33,3% perlu diuji ulang untuk menilai dampak penambahan lapisan berlebih.

Pengukuran ketebalan metal coating pada titik C menggunakan Elcometer 456 memiliki ketidakpastian sebesar 36%, yang disebabkan oleh beberapa faktor berikut:

- Ketidakpastian Alat: Meskipun alat memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, variasi kecil pada ketebalan coating dapat meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang dekat dengan batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat memengaruhi ketebalan lapisan, karena perubahan suhu dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi lapisan, yang berpengaruh pada hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan atau penempatan alat pengukur bisa menambah ketidakpastian, terutama pada titik-titik yang memiliki ketebalan dekat dengan batas standar.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat memiliki resolusi tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil mungkin sulit terdeteksi dengan akurat, menambah variasi hasil pengukuran.

Dengan ketidakpastian 36%, meskipun sebagian besar hasil pengukuran sesuai standar, titik yang berada di luar toleransi memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat dan peningkatan teknik pengukuran sangat disarankan untuk memastikan hasil yang lebih akurat.



Gambar 55. Diagram hasil pengukuran metal coating keseluruhan

Gambar 55 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan metal coating secara keseluruhan pada elevasi 16–18 meter. Ketebalan terbanyak berada pada rentang 600–700 μm sebanyak 1.040 titik atau 50,39% (ditandai warna hijau), yang sesuai dengan standar spesifikasi. Sebanyak 406 titik (19,67%) memiliki ketebalan di bawah standar yaitu pada rentang 500–600 μm (warna merah), yang menunjukkan adanya indikasi kekurangan proteksi permukaan pada area tersebut.

Sementara itu, ketebalan yang melebihi standar (*over coating*) dengan rentang 700–1000 μm berjumlah 618 titik atau 29,95% (warna kuning), terdiri dari:

- 700–800 μm : 306 titik (14,83%)
- 800–900 μm : 199 titik (9,64%)
- 900–1000 μm : 113 titik (5,48%)

Hasil ini menunjukkan bahwa distribusi ketebalan masih didominasi oleh lapisan sesuai spesifikasi, namun sebaran *under coating* dan *over coating* cukup signifikan dan perlu menjadi perhatian dalam evaluasi kontrol kualitas proses pelapisan ke depan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating secara keseluruhan pada elevasi 16–18 m menggunakan Elcometer 456 coating thickness gauge memiliki ketidakpastian sebesar 36%. Faktor-faktor yang berkontribusi terhadap ketidakpastian ini antara lain:

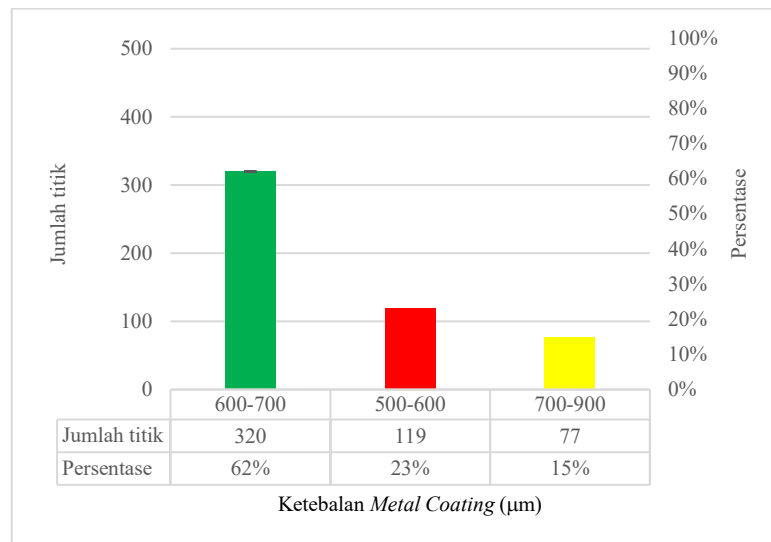
- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, yang cukup akurat untuk mengukur ketebalan lapisan. Namun, ketidakpastian sebesar 36% mengindikasikan bahwa terdapat variasi dalam

pengukuran yang cukup besar, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi. Ini bisa mempengaruhi konsistensi hasil pengukuran.

- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB dapat memengaruhi ketebalan lapisan yang terukur. Perubahan suhu dalam *boiler* dapat menyebabkan lapisan coating mengalami ekspansi atau kontraksi, yang akhirnya memengaruhi ketebalan lapisan yang terukur.
- Human Error: Faktor human error juga berperan dalam ketidakpastian ini. Kesalahan dalam pembacaan atau penempatan alat pengukur yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur dapat menambah ketidakpastian pada hasil pengukuran.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan mungkin sulit terdeteksi dengan akurat, menambah variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik-titik yang berada di batas atas atau bawah standar.

Dengan ketidakpastian 36%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam rentang standar ketebalan (50,39%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut. Oleh karena itu, diperlukan perbaikan prosedur pengukuran dan kontrol kualitas yang lebih ketat untuk memastikan hasil yang lebih akurat dan konsisten di masa mendatang.

b. Data *metal coating* pada sisi *front wall* elevasi 18-19 m



Gambar 56. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik A

Gambar 56 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik A di sisi *Front wall boiler* pada elevasi 18–19 meter. Ketebalan terbanyak berada pada rentang 600–

700 μm sebanyak 320 titik atau 58,18%, yang sesuai dengan spesifikasi standar (ditandai warna hijau). Sementara itu, ketebalan yang berada di bawah standar (under coating) pada rentang 500–600 μm ditemukan sebanyak 119 titik atau 21,63%, ditandai dengan warna merah, yang menunjukkan kurangnya ketebalan pelindung pada area tersebut.

Ketebalan yang melebihi standar (over coating) ditandai dengan warna kuning, dengan jumlah total 77 titik atau 14,00%, terdiri dari:

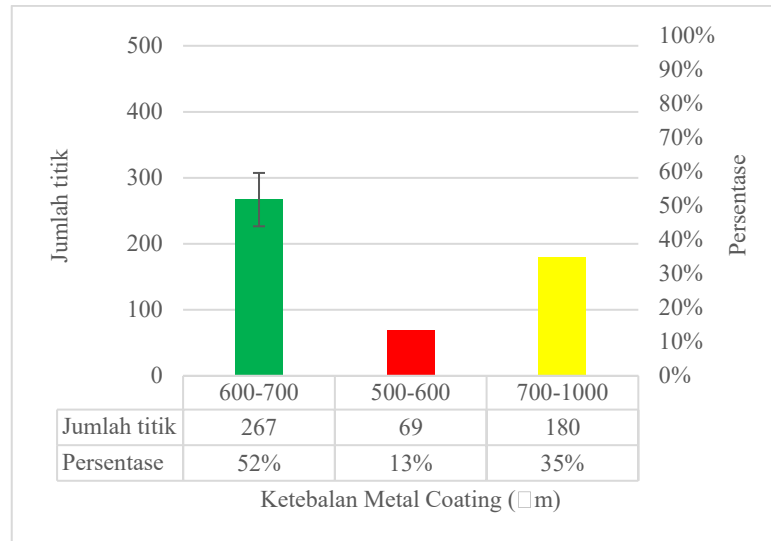
- 700–800 μm : 44 titik (8,00%)
- 800–900 μm : 33 titik (6,00%)

Hasil ini menunjukkan bahwa distribusi ketebalan pada titik A masih didominasi oleh nilai yang sesuai spesifikasi. Namun demikian, area under coating dan over coating tetap perlu diperhatikan untuk menjamin keandalan lapisan protektif secara merata.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 30%, yang disebabkan oleh:

- Ketidakpastian Alat: Alat Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun variasi kecil pada ketebalan dapat menyebabkan ketidakpastian, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana fluktuasi suhu dan kelembapan dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating, meningkatkan ketidakpastian hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur juga berperan dalam ketidakpastian ini.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau variasi kecil dalam ketebalan dapat sulit terdeteksi secara akurat, menyebabkan ketidakpastian.

Dengan ketidakpastian 30%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar, titik yang berada di luar toleransi memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan lebih ketat dan peningkatan prosedur pengukuran sangat disarankan untuk memastikan hasil yang lebih akurat.



Gambar 57. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik B

Gambar 57 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik B di sisi *Front wall* pada elevasi 18–19 meter. Ketebalan terbanyak berada pada rentang 600–700 μm sebanyak 267 titik atau 55,73%, yang sesuai dengan spesifikasi standar (warna hijau).

Ketebalan di bawah standar (500–600 μm) ditemukan sebanyak 69 titik atau 14,40%, ditandai dengan warna merah, yang berpotensi mengurangi efektivitas perlindungan permukaan. Sementara itu, over coating ditemukan dalam jumlah cukup signifikan, dengan total 180 titik atau 37,87% (warna kuning), terdiri dari:

- 700–800 μm : 95 titik (19,83%)
- 800–900 μm : 59 titik (12,31%)
- 900–1000 μm : 26 titik (5,43%)

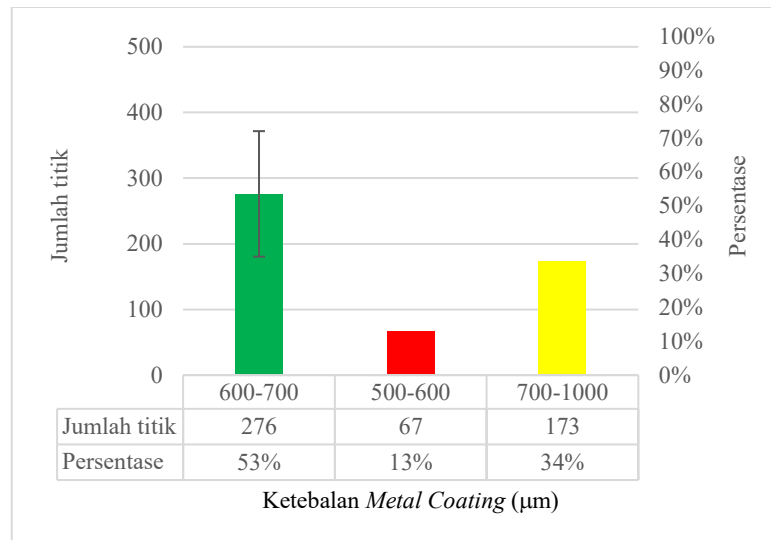
Distribusi ketebalan pada titik B menunjukkan peningkatan signifikan pada kategori over coating. Meskipun nilai ini secara teknis masih dapat diterima, kelebihan lapisan dapat berisiko terhadap terkelupasnya permukaan (delamination) akibat tegangan termal. Oleh karena itu, diperlukan pengawasan ekstra pada parameter proses pelapisan agar tetap dalam rentang ideal.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun variasi kecil dalam ketebalan bisa menyebabkan ketidakpastian, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.

- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi lapisan.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten dapat meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi tinggi, perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan bisa sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian pada titik yang dekat dengan batas standar.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran sesuai standar ketebalan (55,73%), titik yang berada di luar toleransi memerlukan perhatian lebih lanjut.



Gambar 58. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik C

Gambar 58 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik C di elevasi 18–19 meter. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketebalan terbanyak berada pada rentang 600–700 μm sebanyak 276 titik (54,13%), yang sesuai dengan standar spesifikasi ketebalan dan ditandai dengan warna hijau. Hal ini menunjukkan bahwa mayoritas area di titik C telah terlapsi dengan baik.

Sementara itu, terdapat 67 titik (13,14%) yang berada dalam kategori under coating (warna merah) dengan ketebalan 500–600 μm , yang mengindikasikan potensi kekurangan lapisan pelindung pada beberapa area.

Selain itu, sebanyak 173 titik (33,92%) tergolong over coating (warna kuning) dengan distribusi sebagai berikut:

- 700–800 μm : 95 titik (18,63%)

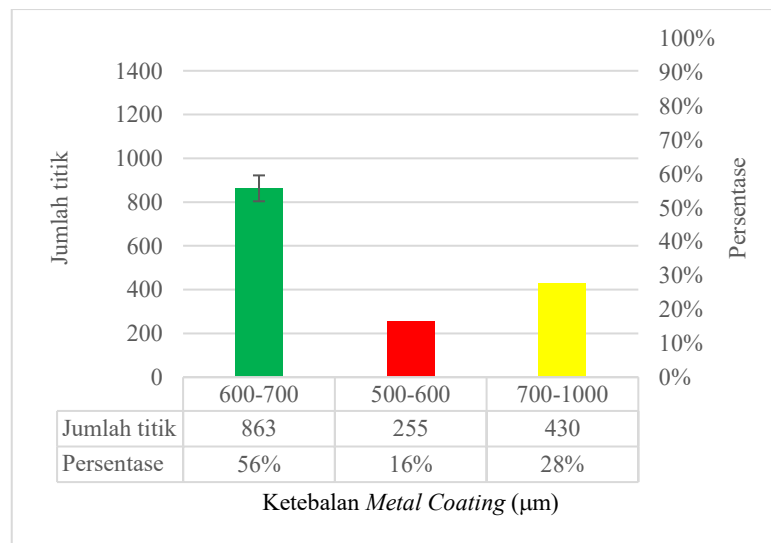
- 800–900 μm : 52 titik (10,20%)
- 900–1000 μm : 26 titik (5,10%)

Meskipun ketebalan dominan berada pada rentang yang sesuai standar, sebaran under coating dan over coating tetap signifikan dan perlu menjadi perhatian dalam pengendalian proses pelapisan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Beberapa faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian yang cukup tinggi menunjukkan adanya variasi, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam boiler CFB dapat memengaruhi ketebalan lapisan coating karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi lapisan.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan atau penempatan alat pengukur yang tidak konsisten dapat meningkatkan ketidakpastian pengukuran.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil mungkin sulit terdeteksi dengan akurat, yang meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik pengukuran yang mendekati atau berada di luar standar.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran sesuai standar ketebalan (54,13%), titik di luar toleransi membutuhkan perhatian lebih lanjut. Pengawasan lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran sangat diperlukan untuk memastikan hasil yang lebih akurat.



Gambar 59. Diagram hasil pengukuran metal coating keseluruhan

Gambar 59 memperlihatkan hasil pengukuran ketebalan metal coating secara keseluruhan pada elevasi 18–19 meter dari gabungan titik A, B, dan C. Ketebalan yang paling banyak ditemukan berada pada rentang 600–700 μm sebanyak 863 titik atau 53,20% (warna hijau), yang menunjukkan bahwa lebih dari separuh area telah memenuhi standar spesifikasi ketebalan.

Namun demikian, terdapat 255 titik (15,72%) dengan ketebalan di bawah standar (500–600 μm , warna merah), yang mengindikasikan kemungkinan area-area dengan proteksi yang kurang optimal.

Selain itu, jumlah over coating sebesar 430 titik atau 26,48%, dengan rincian sebagai berikut:

- 700–800 μm : 234 titik (14,43%).
- 800–900 μm : 144 titik (8,87%).
- 900–1000 μm : 52 titik (3,20%).

Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun pelapisan secara umum sudah cukup baik, distribusi lapisan yang tidak merata masih terjadi. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut terhadap proses metal coating agar pencapaian ketebalan sesuai spesifikasi dapat lebih merata dan konsisten di seluruh area permukaan *tube*.

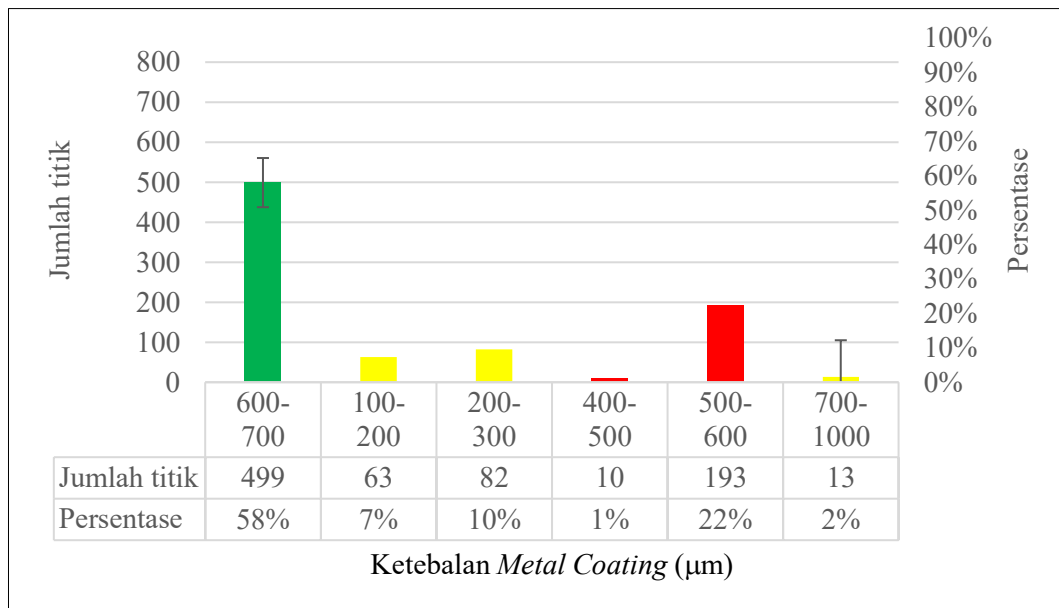
Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating secara keseluruhan pada titik A, B, dan C memiliki ketidakpastian sebesar 32%. Faktor penyebab ketidakpastian ini meliputi:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 32% menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi ketebalan. Variasi kecil dalam ketebalan lapisan dapat mempengaruhi hasil pengukuran, khususnya saat mendekati batas standar.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan dapat mempengaruhi ketebalan lapisan yang diukur. Suhu tinggi dalam *boiler* dapat menyebabkan lapisan mengalami ekspansi atau kontraksi, yang mengarah pada ketebalan yang lebih besar atau lebih kecil dari yang terukur.
- Human Error: Human error seperti kesalahan pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur dapat meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran. Pengalaman operator dalam mengoperasikan alat pengukur juga mempengaruhi akurasi hasil pengukuran.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan mungkin

sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian pada titik pengukuran yang mendekati atau berada di luar batas standar.

Dengan ketidakpastian 32%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (53,20%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut.

c. Data metal coating pada sisi *front wall* elevasi 23-25 m



Gambar 60. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik A

Gambar 60 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik A. Ketebalan terbanyak berada pada rentang 600–700 μm sebanyak 499 titik (58,02%), yang masuk dalam kategori sesuai standar (ditandai warna hijau). Terdapat juga sebaran ketebalan yang di bawah standar (under coating) dengan total 348 titik (40,46%), ditandai warna merah, dengan rincian:

- 500–600 μm : 193 titik (22,45%)
- 200–300 μm : 82 titik (9,53%)
- 100–200 μm : 63 titik (7,33%)
- 400–500 μm : 10 titik (1,16%)

Sementara itu, terdapat juga over coating yaitu ketebalan di atas 700 μm (ditandai warna kuning) sebanyak 4 titik (0,47%), terdiri dari:

- 700–800 μm : 2 titik (0,23%)
- 800–900 μm : 1 titik (0,12%)
- 900–1000 μm : 1 titik (0,12%)

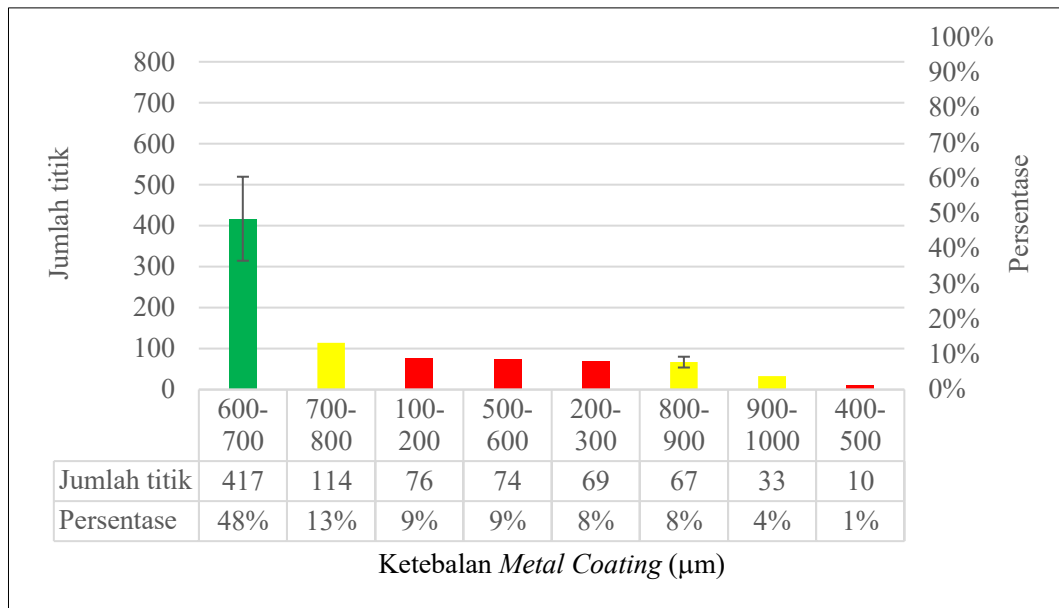
Distribusi ini menunjukkan bahwa sebagian besar area sudah sesuai spesifikasi, tetapi adanya titik-titik dengan under coating cukup signifikan harus menjadi perhatian. Selain itu, meskipun jumlah over coating masih kecil, tetap perlu dimonitor agar tidak menyebabkan risiko pengelupasan atau cacat pelapisan di kemudian hari.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 75%. Faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetapi ketidakpastian yang sangat tinggi mengindikasikan adanya variasi besar dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat memengaruhi ketebalan lapisan coating karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan ekspansi atau kontraksi lapisan yang diukur.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau ketidaktepatan penempatan alat pengukur juga meningkatkan ketidakpastian, khususnya pada titik yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini presisi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian pada titik pengukuran yang dekat dengan batas standar.

Dengan ketidakpastian 75%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (58,02%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat serta peningkatan prosedur pengukuran sangat disarankan untuk memastikan hasil yang lebih akurat dan konsisten.

Secara keseluruhan, meskipun sebagian besar pengukuran menunjukkan hasil yang berada dalam batas toleransi, terdapat titik-titik yang menunjukkan variasi yang cukup signifikan, yang dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keandalan dan presisi pengukuran, penting untuk memperhatikan dengan seksama faktor-faktor yang mempengaruhi hasil, seperti ketelitian alat ukur, kondisi lingkungan, serta prosedur pengukuran yang diterapkan. Langkah-langkah perbaikan yang lebih hati-hati dalam pengaturan posisi alat dan pemilihan instrumen yang lebih tepat dapat membantu memperkecil kesalahan dan meningkatkan akurasi pengukuran secara keseluruhan.



Gambar 61. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik B

Gambar 61 menampilkan hasil pengukuran pada titik B. Jumlah titik dengan ketebalan 600–700 µm sebanyak 417 titik (48,27%), masuk kategori sesuai standar (warna hijau).

Namun, terdapat over coating (warna kuning) sebanyak 147 titik (17,02%), yang terdiri dari:

- 700–800 µm: 114 titik (13,20%)
- 800–900 µm: 33 titik (3,82%)

Jumlah titik dengan under coating (warna merah) tercatat sebanyak 299 titik (34,61%), dengan distribusi sebagai berikut:

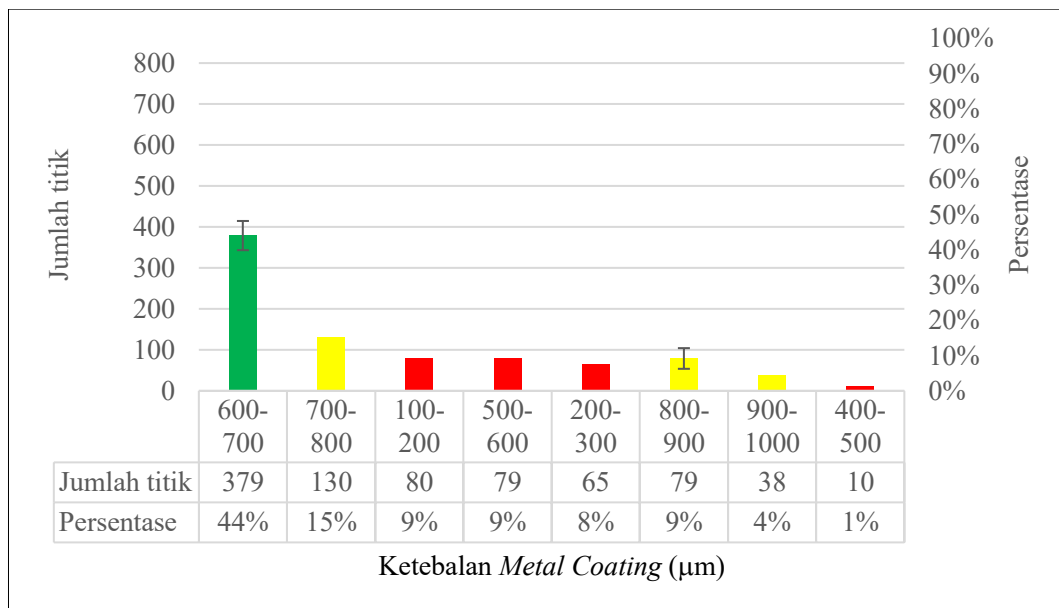
- 500–600 µm: 76 titik (8,80%)
- 100–200 µm: 74 titik (8,56%)
- 200–300 µm: 69 titik (7,99%)
- 400–500 µm: 10 titik (1,16%)
- <100 µm: tidak terdeteksi secara eksplisit namun perlu dicermati jika ada indikasi lokal

Distribusi ketebalan di titik B menunjukkan variasi yang lebih tinggi dibanding titik A. Selain jumlah over coating yang meningkat, sebaran under coating juga cukup merata. Ini mengindikasikan ketidakkonsistenan proses pelapisan yang memerlukan evaluasi menyeluruh, baik dari segi teknik semprot, jarak aplikator, hingga kondisi permukaan sebelum pelapisan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 72%, yang disebabkan oleh beberapa faktor berikut:

- Ketidakpastian Alat: Meskipun Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, variasi dalam pengukuran bisa sangat tinggi, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut.
- Human Error: Kesalahan operator dalam pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten juga berperan besar dalam ketidakpastian ini.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini presisi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau variasi kecil dapat sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik yang mendekati atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 72%, meskipun sebagian besar pengukuran sesuai standar (48,27%), titik di luar toleransi memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran sangat diperlukan untuk meningkatkan akurasi.



Gambar 62. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik C

Gambar 62 menunjukkan hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik C di elevasi 23–25 meter dengan total 860 titik pengukuran. Ketebalan dominan berada pada rentang 600–700 μm sebanyak 379 titik atau 44,07%, yang sesuai dengan standar spesifikasi dan ditandai warna hijau.

Terdapat under coating (di bawah standar $<600 \mu\text{m}$) sebanyak 234 titik atau 27,21%, ditandai warna merah, yang terdiri dari:

- 500–600 μm : 79 titik (9,19%)
- 400–500 μm : 10 titik (1,16%)
- 200–300 μm : 65 titik (7,56%)
- 100–200 μm : 80 titik (9,30%)

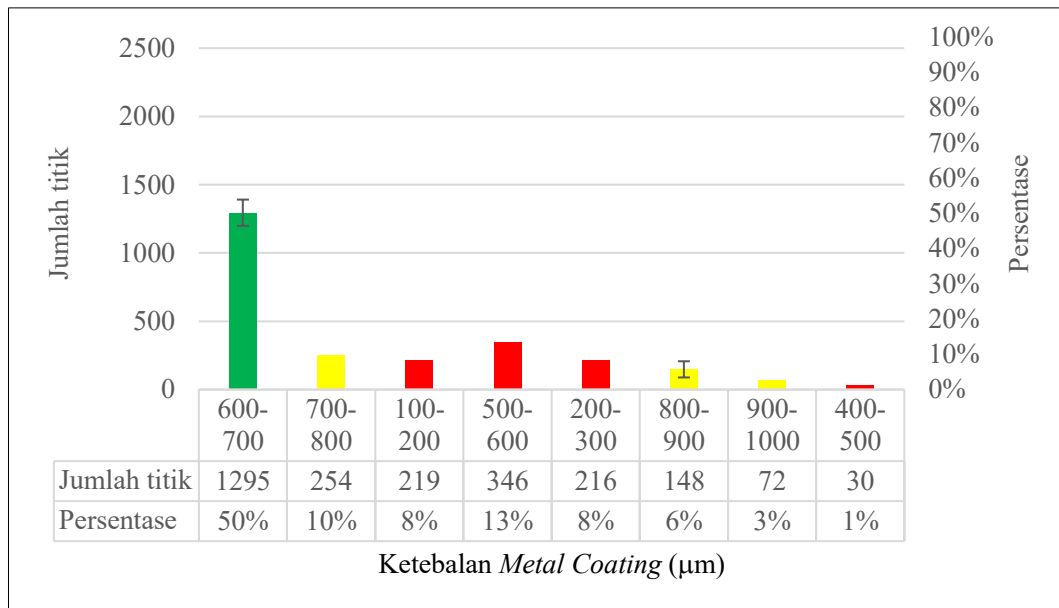
Sementara itu, ketebalan over coating (di atas 700 μm) mencapai 247 titik atau 28,72%, ditandai warna kuning, yang terdiri dari:

- 700–800 μm : 130 titik (15,12%)
- 800–900 μm : 79 titik (9,19%)
- 900–1000 μm : 38 titik (4,42%)

Distribusi ini memperlihatkan bahwa meskipun sebagian besar area telah memenuhi standar, proporsi under coating dan over coating relatif seimbang, sehingga memerlukan perhatian dalam proses kontrol kualitas untuk menjaga kestabilan proteksi. Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 71%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetapi ketidakpastian yang sangat tinggi menunjukkan variasi besar dalam pengukuran, terutama pada titik mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan, mengingat perubahan suhu dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang memengaruhi hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur juga berkontribusi pada ketidakpastian.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini presisi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan bisa sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian.

Dengan ketidakpastian 71%, meskipun sebagian besar pengukuran sesuai standar (44,07%), titik yang berada di luar toleransi memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran sangat diperlukan untuk meningkatkan keakuratan hasil.



Gambar 63. diagram hasil pengukuran metal coating keseluruhan

Gambar 63 merangkum hasil pengukuran ketebalan metal coating secara keseluruhan pada sisi *Front wall* elevasi 23–25 meter dengan total 2.580 titik. Ketebalan terbanyak berada pada rentang 600–700 µm sebanyak 1.295 titik atau 50,19% (warna hijau), yang sesuai dengan spesifikasi dan menandakan performa pelapisan yang dominan stabil.

Ketebalan di bawah standar (under coating) mencapai 791 titik atau 30,62%, yang terdiri dari:

- 500–600 µm: 346 titik (13,40%)
- 400–500 µm: 30 titik (1,16%)
- 200–300 µm: 216 titik (8,37%)
- 100–200 µm: 219 titik (8,49%)

Adapun ketebalan yang melebihi spesifikasi (over coating) sebanyak 474 titik atau 18,37%, terdiri dari:

- 700–800 µm: 254 titik (9,84%)
- 800–900 µm: 148 titik (5,74%)
- 900–1000 µm: 72 titik (2,79%)

Analisis ini menunjukkan bahwa meskipun separuh distribusi ketebalan sudah sesuai standar, masih terdapat akumulasi ketebalan yang tidak ideal (baik under maupun over) sebesar hampir 50%. Ini menunjukkan pentingnya pengawasan dan evaluasi

parameter proses pelapisan, seperti jarak penyemprotan, tekanan, dan kondisi permukaan, agar kualitas pelapisan lebih konsisten pada ketinggian ini.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik A, B, dan C memiliki ketidakpastian sebesar 71%. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini adalah:

Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 71% menunjukkan adanya variasi besar dalam pengukuran, terutama pada titik pengukuran yang mendekati batas toleransi ketebalan.

Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB mempengaruhi ketebalan lapisan, karena perubahan suhu dapat menyebabkan lapisan coating mengembang atau menyusut, yang memengaruhi hasil pengukuran.

Human Error: Human error dalam pembacaan alat atau ketidakakuratan penempatan alat pengukur pada permukaan yang diukur berperan dalam meningkatkan ketidakpastian pengukuran, terutama di titik yang lebih sulit dijangkau.

Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini presisi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik pengukuran yang dekat dengan atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 71%, meskipun sebagian besar pengukuran sesuai standar ketebalan (50,19%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran sangat diperlukan untuk memastikan hasil yang lebih akurat dan konsisten.

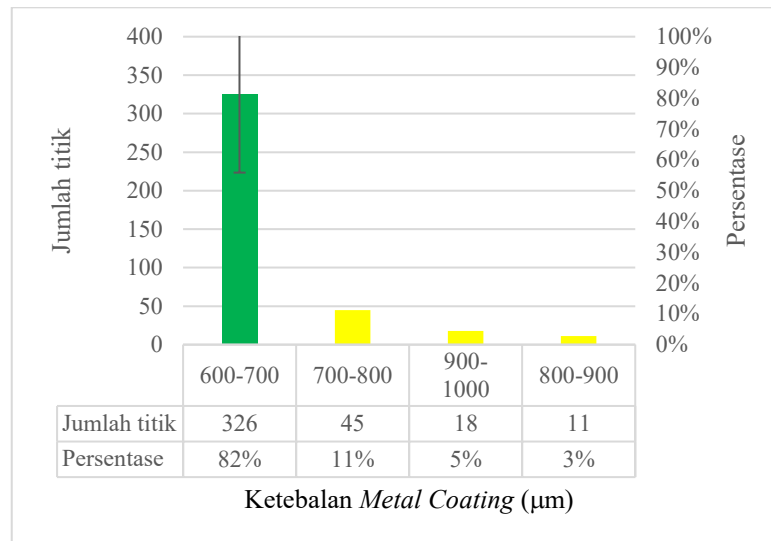
d. Hasil Data Metal Coating pada Sisi *Right wall*

Setelah dilakukan analisis terhadap distribusi ketebalan metal coating pada sisi *Front wall*, langkah selanjutnya adalah mengevaluasi hasil pengukuran pada sisi *Right wall*, khususnya pada elevasi 16–18 meter. Evaluasi ini dilakukan untuk memperoleh gambaran menyeluruh terhadap konsistensi proses pelapisan di berbagai area permukaan *boiler*.

Sama seperti pada pengukuran sebelumnya, metode dan titik pengukuran yang digunakan tetap mengacu pada standar yang telah dijelaskan, yaitu dengan membagi permukaan *tube* sepanjang 2 meter menjadi empat zona vertikal, masing-masing terdiri dari tiga titik horizontal (A, B, dan C). Pendekatan ini memastikan representasi yang komprehensif terhadap distribusi lapisan metal coating secara spasial, baik vertikal maupun horizontal.

Berikut ini disajikan hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik A sisi *Right wall* elevasi 16–18 meter yang divisualisasikan dalam bentuk diagram batang untuk memudahkan interpretasi dan analisis data.

e. Data *Metal Coating* pada Sisi *Right wall* Elevasi 16-18 m



Gambar 64. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik A

Pada Gambar 64, hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik A (elevasi 16–18 m) menunjukkan bahwa sebagian besar lapisan berada dalam rentang standar 600–700 μm sebanyak 326 titik (81,5%), yang ditandai dengan warna hijau. Ketebalan yang melebihi standar ditandai warna kuning, meliputi:

- 700–800 μm sebanyak 45 titik (11,25%)
- 800–900 μm sebanyak 11 titik (2,75%)
- 900–1000 μm sebanyak 18 titik (4,5%)

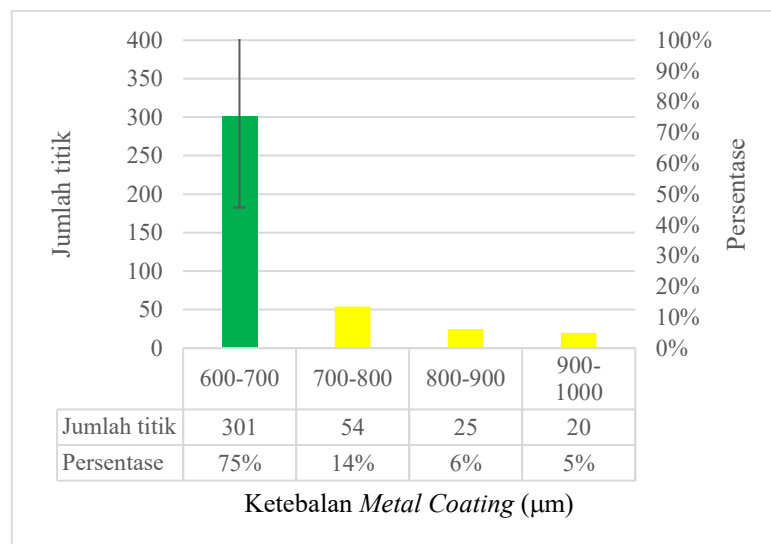
Distribusi ini menunjukkan bahwa proses pelapisan pada titik A telah dilakukan dengan tingkat presisi yang tinggi, karena sebagian besar hasil pengukuran berada dalam batas spesifikasi yang diinginkan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 24%. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 24% menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, khususnya pada titik yang dekat dengan batas toleransi.

- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan, karena perubahan suhu dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang mempengaruhi hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur berperan dalam meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan bisa sulit terdeteksi secara akurat, menambah ketidakpastian, terutama pada titik yang mendekati atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 24%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (81,5%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran diperlukan untuk memastikan hasil yang lebih akurat.



Gambar 65. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik B

Pada Gambar 65, hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik B (elevasi 16–18 m), ketebalan pelapisan juga didominasi oleh nilai sesuai standar, yaitu 301 titik (75,25%) dalam rentang 600–700 μm (warna hijau). Ketebalan berlebih (*over coating*) ditandai dengan warna kuning meliputi:

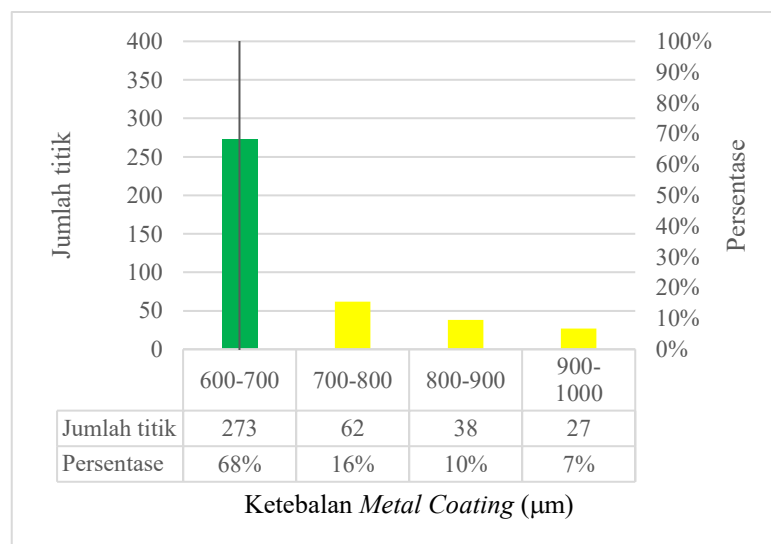
- 700–800 μm sebanyak 54 titik (13,5%)
- 800–900 μm sebanyak 25 titik (6,25%)
- 900–1000 μm sebanyak 20 titik (5%)

Meskipun masih ada lapisan yang melebihi standar, proporsi over coating relatif terkendali dan dapat diterima sesuai spesifikasi teknis yang telah ditentukan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 26%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun variasi dalam pengukuran dapat terjadi, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan karena perubahan suhu yang menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut.
- Human Error: Human error, seperti kesalahan pembacaan atau penempatan alat, berperan dalam ketidakpastian ini, terutama pada titik yang sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan mungkin sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian.

Dengan ketidakpastian 26%, meskipun sebagian besar pengukuran sesuai standar ketebalan (75,25%), titik yang berada di luar toleransi membutuhkan perhatian lebih lanjut. Pengawasan dan perbaikan prosedur pengukuran sangat disarankan untuk memastikan hasil yang lebih akurat dan konsisten.



Gambar 66. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik C

Pada Gambar 65, hasil pengukuran ketebalan metal coating pada titik C (elevasi 16–18 m), ditemukan 273 titik (68,25%) berada dalam standar 600–700 μm (warna hijau). Sisanya merupakan ketebalan over coating yang ditandai dengan warna kuning, yakni:

- 700–800 μm sebanyak 62 titik (15,5%)
- 800–900 μm sebanyak 38 titik (9,5%)
- 900–1000 μm sebanyak 27 titik (6,75%)

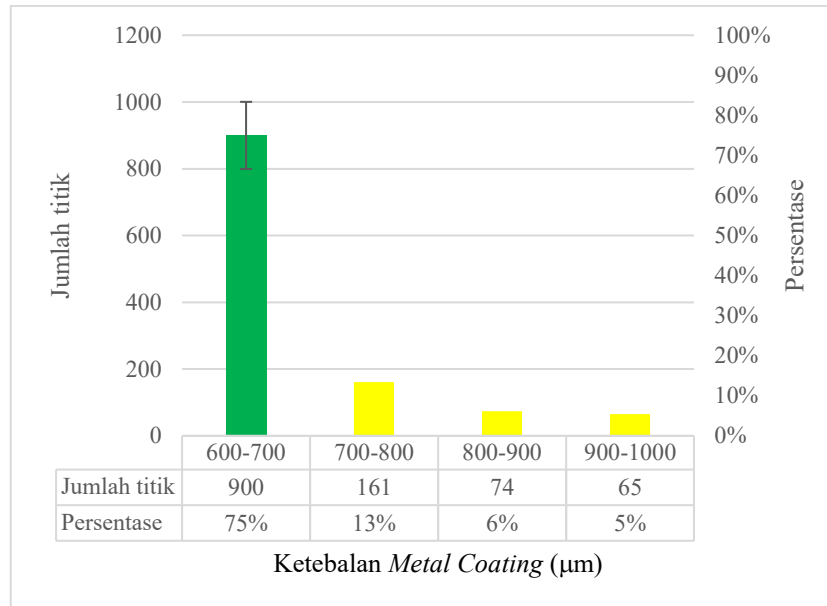
Distribusi ini menunjukkan adanya peningkatan jumlah titik over coating dibandingkan titik A dan B, yang menandakan perlunya perhatian khusus terhadap pengendalian proses di area ini untuk menghindari lapisan berlebih yang berpotensi menyebabkan retak akibat tegangan termal.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 25%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian yang tercatat menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB memengaruhi ketebalan lapisan karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang mempengaruhi hasil pengukuran.
- Human Error: Human error seperti kesalahan pembacaan alat atau ketidaktepatan penempatan alat pengukur pada permukaan yang diukur dapat meningkatkan ketidakpastian pengukuran, terutama di titik yang sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini presisi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan mungkin sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang dekat dengan batas standar atau melebihi standar.

Dengan ketidakpastian 25%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (68,25%), titik yang berada di luar toleransi memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat serta perbaikan prosedur pengukuran sangat diperlukan untuk memastikan hasil yang lebih akurat dan konsisten.

Walaupun ketidakpastian dalam pengukuran mencapai 25%, sebagian besar titik pengukuran masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima. Variasi ini lebih banyak dipengaruhi oleh faktor eksternal, seperti kelembapan udara dan kondisi lingkungan, yang dapat mempengaruhi ketepatan pengukuran secara keseluruhan. Oleh karena itu, untuk meminimalkan potensi kesalahan dan meningkatkan keandalan hasil pengukuran, penting untuk terus meningkatkan teknik dan prosedur pengukuran yang ada. Penerapan metode yang lebih tepat, seperti penggunaan alat ukur yang lebih presisi dan pengaturan lingkungan yang stabil, sangat disarankan untuk memperoleh hasil yang lebih konsisten dan akurat.



Gambar 67. Diagram hasil pengukuran metal coating keseluruhan

Pada Gambar 67, merupakan penggabungan keseluruhan data dari titik A, B, dan C (elevasi 16–18 m) menghasilkan total 1.200 titik pengukuran. Hasil analisis menunjukkan:

- 600–700 μm : 900 titik (75%) [warna hijau]
- 700–800 μm : 161 titik (13,42%) [warna kuning]
- 800–900 μm : 74 titik (6,17%) [warna kuning]
- 900–1000 μm : 65 titik (5,42%) [warna kuning]

Komposisi ini menunjukkan bahwa mayoritas pelapisan metal coating telah memenuhi standar ketebalan yang ditetapkan dalam dokumen pengadaan (600–700 μm). Namun, akumulasi over coating sebesar 25% tetap perlu mendapat perhatian karena berpotensi memengaruhi efisiensi termal serta struktur lapisan pelindung apabila tidak dikendalikan dengan baik.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik A, B, dan C memiliki ketidakpastian sebesar 25%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

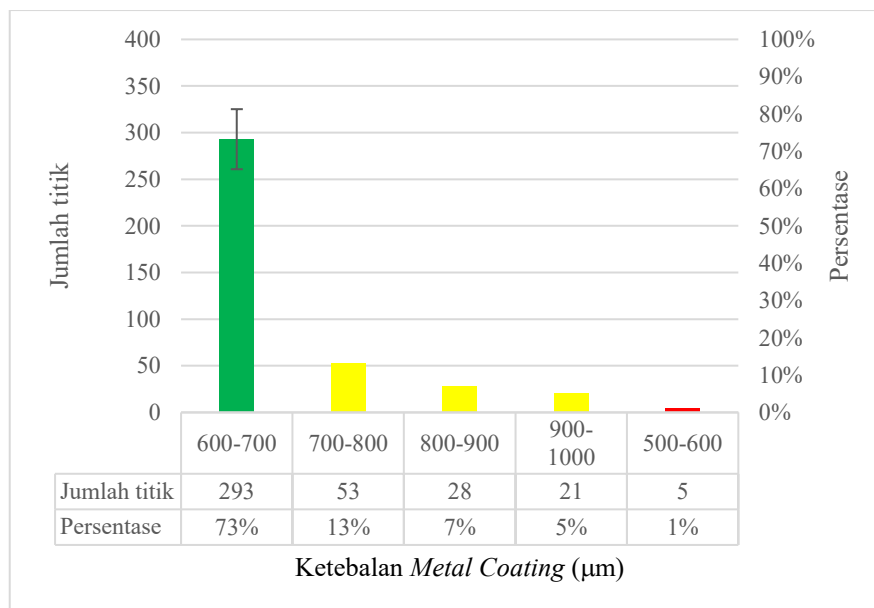
- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron. Meskipun alat ini sangat presisi, ketidakpastian sebesar 25% menunjukkan adanya variasi yang cukup besar, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi standar ketebalan.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi hasil pengukuran. Perubahan suhu yang cepat dapat menyebabkan lapisan coating

mengembang atau menyusut, sehingga berpotensi mempengaruhi ketebalan yang diukur.

- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau penempatan alat yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur berperan dalam meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini presisi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan mungkin sulit terdeteksi dengan akurat, menambah ketidakpastian, terutama pada titik yang mendekati atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 25%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (75%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran diperlukan untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran.

f. Data *Metal Coating* pada Sisi *Right wall* Elevasi 23-25 m



Gambar 68. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik A

Pada Gambar 68, pengukuran ketebalan metal coating pada titik A (elevasi 23–25 m) menunjukkan bahwa mayoritas titik berada dalam rentang standar 600–700 µm sebanyak 293 titik (73,25%), ditandai dengan warna hijau. Ketebalan yang melebihi standar (*over coating*, warna kuning) terdiri atas:

- 700–800 µm: 53 titik (13,25%)
- 800–900 µm: 28 titik (7%)

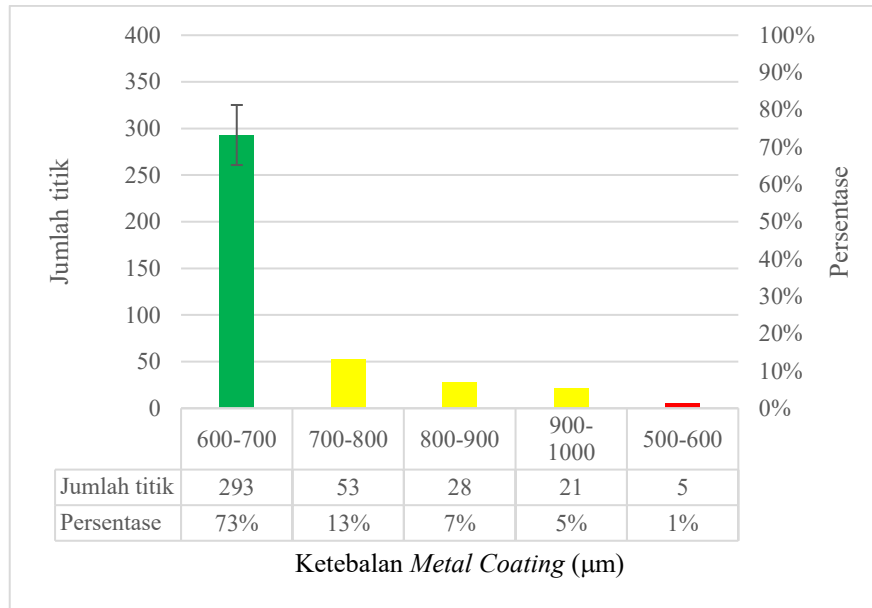
- 900–1000 μm : 21 titik (5,25%)

Sementara itu, terdapat 5 titik (1,25%) dengan ketebalan di bawah standar (500–600 μm), yang dikategorikan sebagai under coating dan ditandai dengan warna merah. Distribusi ini menunjukkan hasil pelapisan yang cukup baik, dengan dominasi ketebalan sesuai spesifikasi dan proporsi over coating serta under coating yang masih terkendali.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron. Meskipun alat ini presisi, ketidakpastian sebesar 33% menunjukkan adanya variasi yang cukup besar dalam pengukuran, terutama pada titik pengukuran yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan yang tinggi dapat mempengaruhi ketebalan lapisan. Perubahan suhu dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang mengubah hasil pengukuran ketebalan.
- Human Error: Human error, seperti kesalahan dalam pembacaan atau ketidaktepatan dalam penempatan alat pengukur, dapat meningkatkan ketidakpastian dalam pengukuran, khususnya pada titik yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi yang baik, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian pengukuran, terutama pada titik yang dekat dengan atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (73,25%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut. Pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran diperlukan untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran.



Gambar 69. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik B

Pada Gambar 69, pengukuran ketebalan metal coating pada titik B (elevasi 23–25 m) memperlihatkan kecenderungan yang serupa dengan titik A. Ketebalan terbanyak berada dalam rentang 600–700 μm sebanyak 293 titik atau 73,25% dari total 400 titik, yang ditandai dengan warna hijau sebagai indikator bahwa pelapisan berada dalam rentang spesifikasi yang telah ditetapkan.

Sementara itu, lapisan yang melebihi spesifikasi (*over coating*, warna kuning) ditemukan pada:

- Rentang 700–800 μm : 53 titik (13,25%)
- Rentang 800–900 μm : 28 titik (7%)
- Rentang 900–1000 μm : 21 titik (5,25%)

Adapun ketebalan di bawah spesifikasi (*under coating*, warna merah) tercatat sebanyak 5 titik atau 1,25% pada rentang 500–600 μm .

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian kecil area mengalami ketebalan yang melebihi spesifikasi (total 24,5%), distribusi metal coating secara umum tetap terkonsentrasi pada rentang ketebalan yang sesuai. Artinya, pelaksanaan proses pelapisan pada titik ini masih tergolong optimal, dengan konsistensi yang baik terhadap standar.

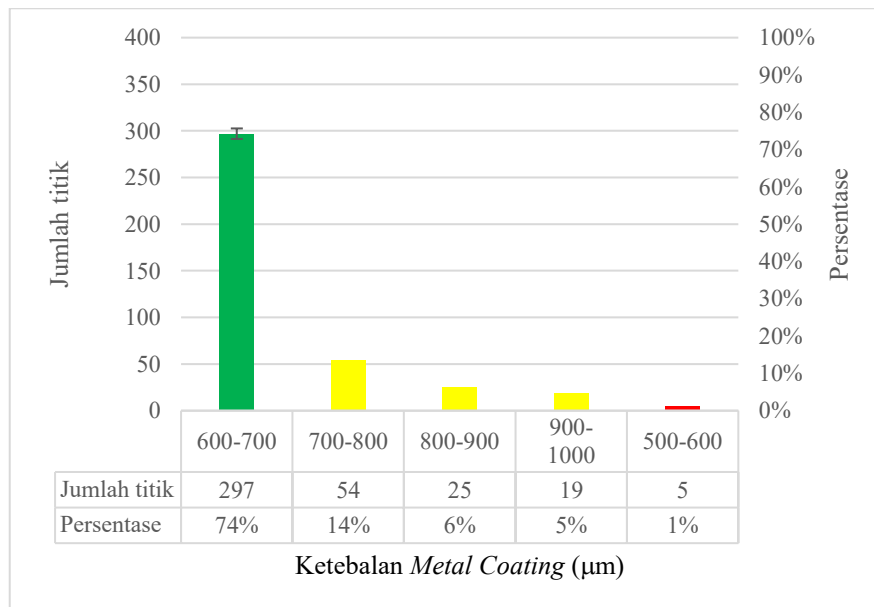
Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 33% menunjukkan adanya variasi dalam

pengukuran, terutama pada titik yang mendekati atau berada di luar batas toleransi standar.

- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan yang tinggi dapat mempengaruhi ketebalan lapisan. Perubahan suhu dalam *boiler* dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, memengaruhi hasil pengukuran ketebalan.
- Human Error: Human error, seperti kesalahan pembacaan atau ketidaktepatan penempatan alat pengukur pada permukaan yang diukur, dapat meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi yang tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik yang dekat dengan atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (73,25%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut. Oleh karena itu, pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran diperlukan untuk memastikan hasil pengukuran yang lebih akurat dan konsisten.



Gambar 70. Diagram hasil pengukuran *metal coating* titik C

Pada Gambar 70, pengukuran ketebalan metal coating pada titik C di elevasi 23–25 m, sebaran ketebalan metal coating juga menunjukkan performa yang positif. Sebagian besar pengukuran jatuh dalam rentang 600–700 μm sebanyak 297 titik atau 74,25%,

ditandai warna hijau, menandakan bahwa ketebalan pelapisan pada titik ini dominan berada dalam batas spesifikasi.

Ketebalan yang melebihi spesifikasi (over coating, warna kuning) ditemukan pada:

- 700–800 μm : 54 titik (13,5%)
- 800–900 μm : 25 titik (6,25%)
- 900–1000 μm : 19 titik (4,75%)

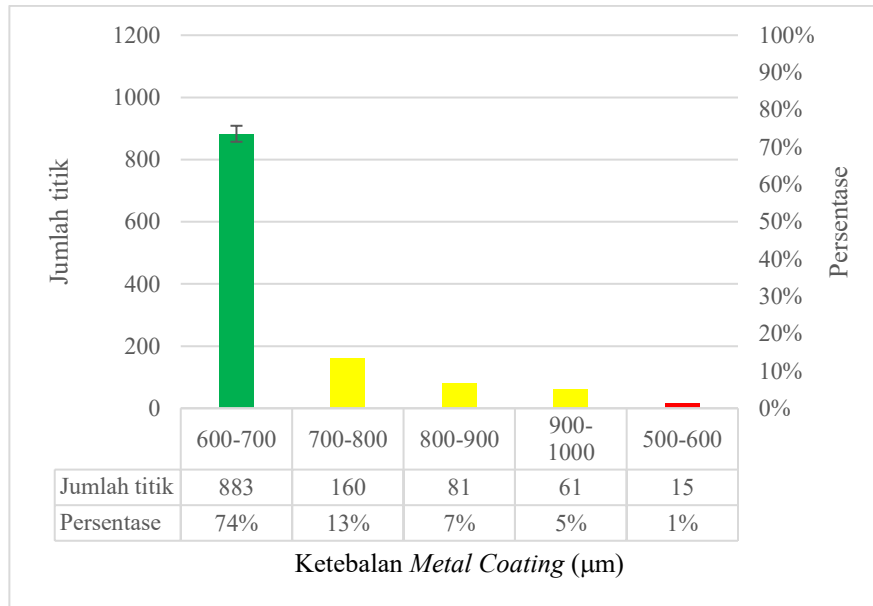
Sedangkan ketebalan di bawah spesifikasi (under coating, warna merah) berjumlah 5 titik (1,25%).

Komposisi ini menunjukkan tren positif, dengan persentase over coating dan under coating relatif rendah dan terkendali. Kinerja pelapisan pada titik ini dapat dikatakan sangat baik dan menunjukkan tingkat keberhasilan yang serupa dengan titik A dan B, mencerminkan stabilitas proses pelapisan di elevasi ini.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 33% menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, terutama pada titik yang mendekati atau berada di luar batas toleransi standar.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan yang tinggi dapat mempengaruhi ketebalan lapisan. Perubahan suhu dalam *boiler* dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, memengaruhi hasil pengukuran ketebalan.
- Human Error: Human error, seperti kesalahan pembacaan atau ketidaktepatan penempatan alat pengukur pada permukaan yang diukur, dapat meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi yang tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik yang dekat dengan atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (74,25%), titik yang berada di luar toleransi—baik yang di bawah maupun melebihi standar—memerlukan perhatian lebih lanjut. Oleh karena itu, pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran diperlukan untuk memastikan hasil pengukuran yang lebih akurat dan konsisten.



Gambar 71. Diagram hasil pengukuran metal coating keseluruhan

Pada Gambar 71, Gambar ini menunjukkan akumulasi pengukuran ketebalan metal coating dari titik A, B, dan C di elevasi 23–25 m, dengan total 1.200 titik pengamatan. Sebagian besar titik, yakni 883 titik (73,58%), berada dalam rentang 600–700 μm (warna hijau), menunjukkan bahwa pelapisan logam secara dominan telah memenuhi spesifikasi ketebalan yang ditetapkan.

Distribusi ketebalan lainnya yang termasuk dalam kategori over coating (warna kuning) meliputi:

- 700–800 μm : 160 titik (13,33%)
- 800–900 μm : 81 titik (6,75%)
- 900–1000 μm : 61 titik (5,08%)

Sedangkan under coating (warna merah) ditemukan sebanyak 15 titik (1,25%) pada rentang 500–600 μm .

Secara keseluruhan, performa pelapisan di elevasi 23–25 m pada area *Right wall* menunjukkan kualitas yang sangat baik, dengan lebih dari 73% ketebalan berada dalam batas standar. Total deviasi dari spesifikasi (over coating dan under coating) berada pada angka 26,41%, dengan dominasi pada kategori over coating. Hal ini mencerminkan bahwa proses pelapisan telah dilakukan dengan cukup presisi, meskipun evaluasi lanjutan tetap diperlukan untuk meminimalkan potensi pemborosan material akibat lapisan berlebih (over coating).

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan metal coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Faktor-faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 33% menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, terutama pada titik yang mendekati atau berada di luar batas toleransi standar.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan yang tinggi dapat mempengaruhi ketebalan lapisan. Perubahan suhu dalam *boiler* dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, memengaruhi hasil pengukuran ketebalan.
- Human Error: Human error, seperti kesalahan pembacaan atau ketidaktepatan penempatan alat pengukur pada permukaan yang diukur, dapat meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi yang tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan lapisan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik yang dekat dengan atau melebihi batas standar.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (73%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut. Oleh karena itu, pengawasan yang lebih ketat dan perbaikan prosedur pengukuran diperlukan untuk memastikan hasil pengukuran yang lebih akurat dan konsisten.

g. Analisis total keberhasilan pekerjaan *ceramic coating* dari dua sisi (*front wall* dan *right wall boiler*)

Berdasarkan hasil rekapitulasi pengukuran ketebalan metal coating pada area *front wall* dan *right wall boiler*, total keseluruhan titik pengukuran mencapai 6.744 titik, yang terdiri atas 4.344 titik dari area *front wall* dan 2.400 titik dari area *right wall*. Seluruh titik ini kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga kategori mutu lapisan, yaitu ketebalan sesuai spesifikasi standar (600–700 μm), under coating (di bawah 600 μm), dan over coating (di atas 700 μm).

h. Ketebalan Sesuai Spesifikasi (600–700 μm)

Sebaran ketebalan coating yang masuk dalam kategori in-spec atau sesuai spesifikasi merupakan indikator utama keberhasilan pekerjaan pelapisan. Dari dua sisi *boiler*,

didapatkan sebanyak 4.118 titik atau 61,06% dari total pengukuran yang berada dalam rentang ideal 600–700 μm . Capaian ini menunjukkan bahwa mayoritas permukaan pipa telah dilapisi dengan ketebalan yang optimal sesuai standar spesifikasi teknis yang ditetapkan dalam dokumen pengadaan.

- *Front wall*: 2.335 titik (53,74%)
- *Right wall*: 1.783 titik (74,29%)

Tingkat keberhasilan pada *right wall* terlihat lebih tinggi dari sisi *front wall*. Hal ini mencerminkan adanya peningkatan pengendalian proses aplikasi coating pada area tersebut.

i. Under coating (ketebalan < 600 μm)

Ketebalan lapisan yang berada di bawah standar minimum merupakan area yang perlu mendapatkan perhatian khusus, karena berpotensi menurunkan efektivitas perlindungan terhadap korosi dan abrasi pada permukaan tabung *boiler*. Dari total keseluruhan pengukuran, ditemukan sebanyak 1.242 titik atau 18,42% yang masuk kategori under coating. Sebagian besar under coating terjadi di sisi *front wall* dengan total 1.227 titik atau 28,24%, sementara pada *right wall* hanya ditemukan 15 titik atau 0,63%.

Proporsi under coating yang jauh lebih rendah pada *right wall* menunjukkan bahwa proses pelapisan di sisi tersebut berhasil meminimalkan risiko kekurangan ketebalan, yang dapat menjadi indikator positif terhadap pengendalian kualitas saat proses aplikasi.

j. Over coating (ketebalan > 700 μm)

Distribusi ketebalan yang melebihi batas atas spesifikasi disebut over coating. Meskipun over coating umumnya masih dapat ditoleransi dari sisi perlindungan, namun kelebihan ini dapat menyebabkan pemborosan material dan potensi gangguan terhadap karakteristik termal tabung. Total over coating dari dua sisi mencapai 1.384 titik atau 20,52%, dengan rincian sebagai berikut:

- *Front wall*: 782 titik (17,99%)
- *Right wall*: 602 titik (25,08%)

Over coating di sisi *right wall* sedikit lebih tinggi, kemungkinan disebabkan oleh teknik aplikasi yang menghasilkan penumpukan material di beberapa area.

k. Tingkat Keberhasilan Total Pekerjaan Metal Coating

Jika keberhasilan didefinisikan sebagai jumlah titik yang berada dalam rentang ketebalan sesuai spesifikasi (in-spec), maka tingkat keberhasilan pekerjaan metal coating secara keseluruhan dari dua sisi mencapai:

- 61,06% dari total 6.744 titik pengukuran

Tingkat keberhasilan ini menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan telah dilapisi dengan kualitas yang memenuhi standar. Dengan catatan bahwa under coating berhasil ditekan secara signifikan terutama di sisi *right wall* (hanya 0,63%), sedangkan over coating berada dalam batas yang masih dapat ditoleransi dari segi teknis.

1. Analisis Ketidakpastian

Pengukuran ketebalan metal coating pada kedua sisi *boiler* menunjukkan adanya ketidakpastian yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi keseluruhan keberhasilan pelapisan. Ketidakpastian pengukuran di kedua sisi *boiler* disebabkan oleh beberapa faktor, yang di antaranya adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron. Meskipun alat ini cukup presisi, ketidakpastian yang tercatat di kedua sisi *boiler* menunjukkan adanya variasi yang cukup signifikan, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi ketebalan (baik di bawah maupun melebihi standar).
Ketidakpastian untuk *Front wall*: 50%
Ketidakpastian untuk *Right wall*: 29%
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan yang tinggi dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating yang terukur. Fluktuasi suhu dalam *boiler* menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang memengaruhi hasil pengukuran ketebalan. Kondisi lingkungan ini meningkatkan ketidakpastian pada hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau ketidaktepatan dalam penempatan alat pada permukaan yang diukur dapat menyebabkan ketidakpastian dalam hasil. Pengalaman operator dan konsistensi dalam pengoperasian alat pengukur juga mempengaruhi akurasi pengukuran. Ketidaktepatan teknik pengukuran terutama pada titik yang lebih sulit dijangkau dapat memperburuk ketidakpastian.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun Elcometer 456 memiliki resolusi tinggi dan mampu mendeteksi ketebalan lapisan hingga 1 mikron, variasi kecil dalam ketebalan lapisan atau perbedaan lapisan yang sangat tipis dapat sulit terdeteksi secara akurat, yang menambah ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang mendekati atau melebihi batas standar.

Pencapaian ini mencerminkan pelaksanaan pekerjaan yang secara umum telah berjalan sesuai dengan standar mutu, meskipun tetap diperlukan tindak lanjut dalam bentuk perbaikan pada titik-titik under coating, serta evaluasi terhadap efisiensi penggunaan material pada area dengan kecenderungan over coating.

3. Mengukur Hasil *Ceramic Coating*

Pengukuran ketebalan ceramic coating dilakukan untuk memastikan kesesuaian pelapisan terhadap standar teknis yang telah ditetapkan, khususnya dalam aspek perlindungan termal dan ketahanan terhadap kondisi kerja ekstrem pada *boiler* tipe CFB. Metode pengukuran dilakukan menggunakan alat Elcometer 456, yaitu alat pengukur ketebalan non-destruktif yang mampu memberikan hasil akurat pada lapisan pelapis non-logam seperti keramik. Metodologi pengukuran mengikuti pendekatan yang seragam dengan proses pengukuran metal coating, dengan tujuan menjaga konsistensi dan keterbandingan antar data.

Dengan metode ini, hasil pengukuran dapat dianalisis lebih mendalam untuk menilai keseragaman pelapisan serta mendeteksi potensi penyimpangan seperti area under coating maupun over coating, yang dapat mempengaruhi performa lapisan keramik terhadap panas dan lingkungan korosif di dalam *boiler*.

A. Proses Pelapisan *Ceramic Coating*

Proses pelapisan dilakukan menggunakan Emisshield MB-11, yaitu coating dengan emisivitas tinggi yang dirancang khusus untuk aplikasi pada *tube boiler* di pembangkit listrik tenaga batubara (CFB *Boiler*). Parameter utama dalam proses ini dapat dilihat pada tabel berikut:

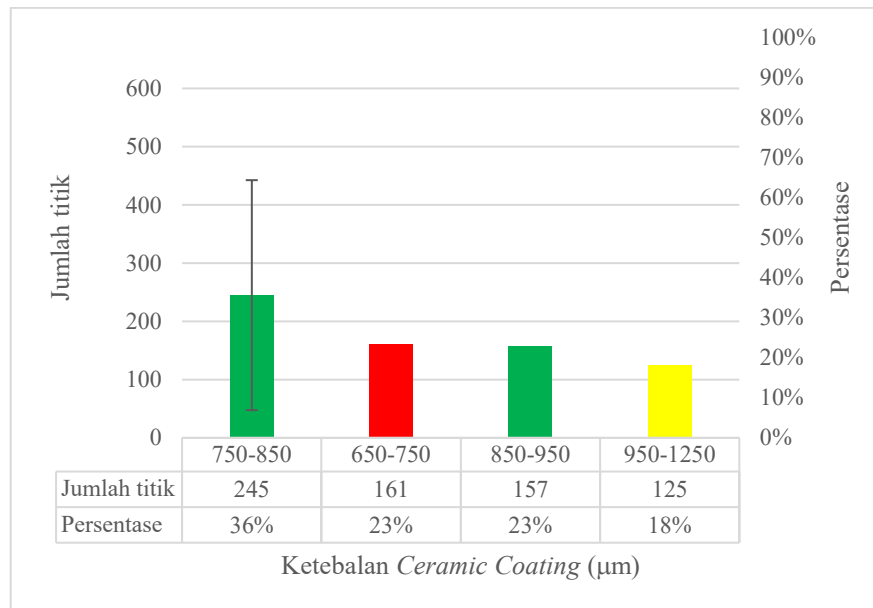
Tabel 3. Parameter proses *ceramic coating*

Parameter	Satuan	Nilai
Ketebalan Lapisan	μm	150–250
Daya Rekat (Bond Strength)	psi / MPa	> 9.500 / > 65,50
Emisivitas	-	0,88–0,95
Densitas	g/cc	2,2–2,5
Konduktivitas Termal	W/mK	1,1–1,3
Suhu Operasi Maksimum	$^{\circ}\text{C}$ / $^{\circ}\text{F}$	850-1100 / 1562-2012

B. Hasil Data *Ceramic Coating* pada Sisi *Front wall*

Data ini dianalisis untuk menilai apakah hasil pelapisan telah sesuai dengan spesifikasi yang tercantum dalam dokumen pengadaan. Evaluasi ini dilakukan guna memastikan bahwa proses aplikasi *Ceramic Coating* telah dilaksanakan sesuai dengan standar yang ditetapkan, Sehingga mampu memberikan perlindungan maksimal terhadap korosi dan erosi serta meningkatkan efisiensi termal pada *tube boiler* CFB.

a. Data *Ceramic Coating* pada Sisi *Front wall* Elevasi 16-18 m



Gambar 72. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik A

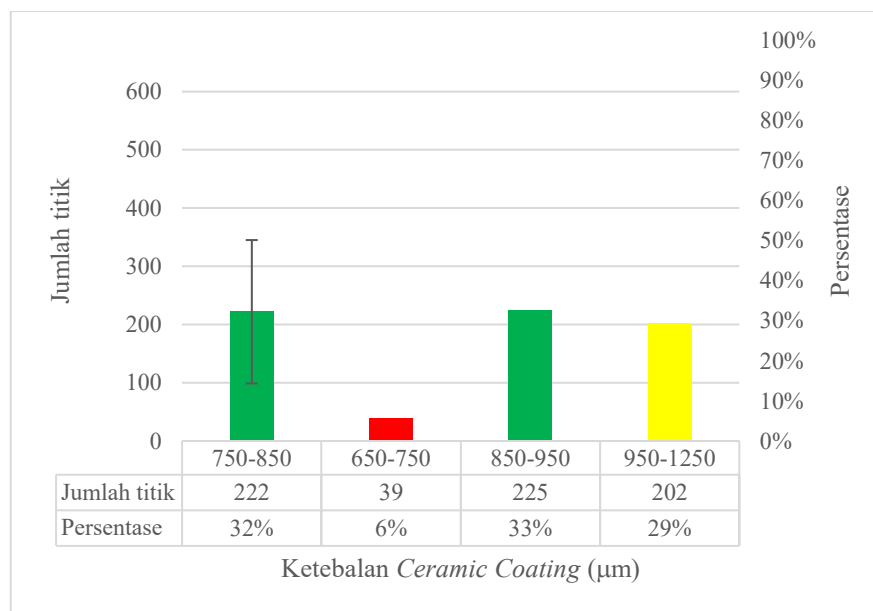
Pada Gambar 72 ditampilkan hasil pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada titik A dengan total pengukuran sebanyak 688 titik. Hasil distribusi ketebalan menunjukkan bahwa sebanyak 245 titik (35,62%) berada pada rentang 750–850 μm , dan 157 titik (22,82%) berada pada rentang 850–950 μm , yang keduanya tergolong ke dalam kategori sesuai spesifikasi atau in-spec dan ditandai dengan warna hijau pada diagram. Dengan demikian, total titik yang memenuhi standar ketebalan mencapai 58,44%. Sementara itu, sebanyak 161 titik (23,39%) terdeteksi berada dalam kategori under coating dengan ketebalan 650–750 μm , yang ditandai dengan warna merah. Sisanya, sebanyak 68 titik (9,88%), 38 titik (5,52%), dan 19 titik (2,76%) berturut-turut berada pada ketebalan 950–1050 μm , 1050–1150 μm , dan 1150–1250 μm , yang tergolong ke dalam kategori over coating (warna kuning), dengan total persentase sebesar 18,17%. Berdasarkan data ini, dapat disimpulkan bahwa titik A memiliki proporsi ketebalan sesuai standar yang dominan, meskipun masih terdapat potensi ketidaksesuaian terutama pada sisi under coating.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 33%. Faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 digunakan untuk pengukuran dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron. Meskipun alat ini cukup presisi, ketidakpastian ini menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, terutama di titik yang mendekati batas toleransi.

- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB mempengaruhi ketebalan lapisan karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang mempengaruhi hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam pembacaan alat atau ketidaktepatan dalam penempatan alat pengukur berkontribusi terhadap ketidakpastian.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (58,44%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.



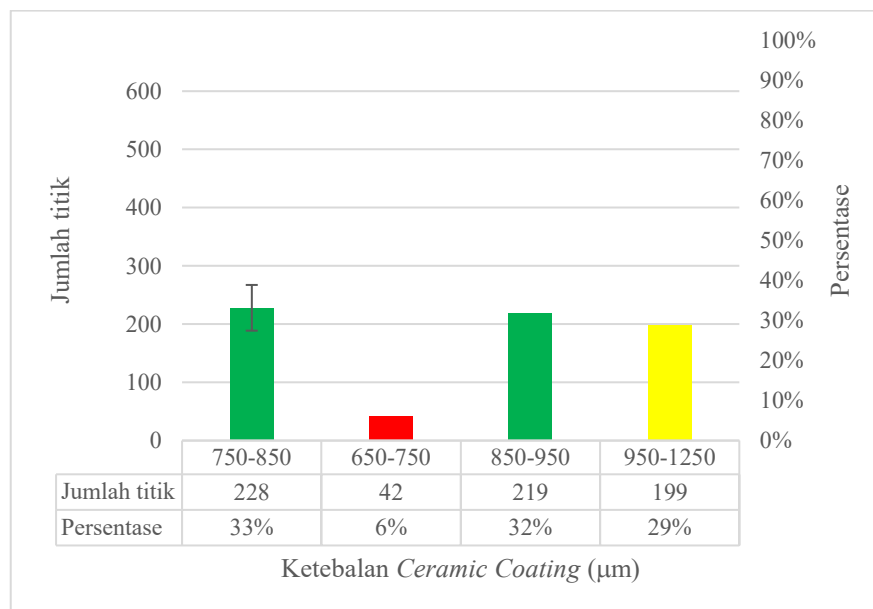
Gambar 73. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik B

Selanjutnya, pada Gambar 73 diperlihatkan hasil pengukuran pada titik B yang juga mencakup 688 titik. Hasilnya menunjukkan bahwa 225 titik (32,70%) berada dalam rentang 850–950 μm , dan 222 titik (32,27%) berada pada rentang 750–850 μm , yang keduanya masuk dalam kategori in-spec dengan warna hijau, sehingga totalnya mencapai 64,97% dari seluruh titik. Pada sisi lain, hanya 39 titik (5,67%) yang berada pada kategori under coating di rentang 650–750 μm (warna merah), sementara sisanya terdiri atas 124 titik (18,02%), 50 titik (7,27%), dan 28 titik (4,07%) yang berada di rentang 950–1050 μm , 1050–1150 μm , dan 1150–1250 μm secara berurutan dan ditandai warna kuning, dengan total 29,36% masuk kategori over coating. Berdasarkan sebaran ini, dapat dikatakan bahwa titik B memiliki tingkat kesesuaian terhadap standar ketebalan yang cukup baik, walaupun terdapat indikasi kelebihan pelapisan yang cukup signifikan.

Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 31%, dengan faktor penyebab sebagai berikut:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian yang tercatat menunjukkan variasi yang cukup besar, terutama pada titik pengukuran dekat batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di *boiler* CFB, di mana fluktuasi suhu dan kelembapan menyebabkan perubahan pada ketebalan lapisan coating, meningkatkan ketidakpastian hasil pengukuran.
- Human Error: Pengalaman operator juga berperan dalam ketidakpastian ini. Kesalahan dalam pembacaan atau ketidaktepatan dalam penempatan alat pada permukaan yang diukur mempengaruhi hasil pengukuran.

Dengan ketidakpastian 31%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (64,97%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.



Gambar 74. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik C

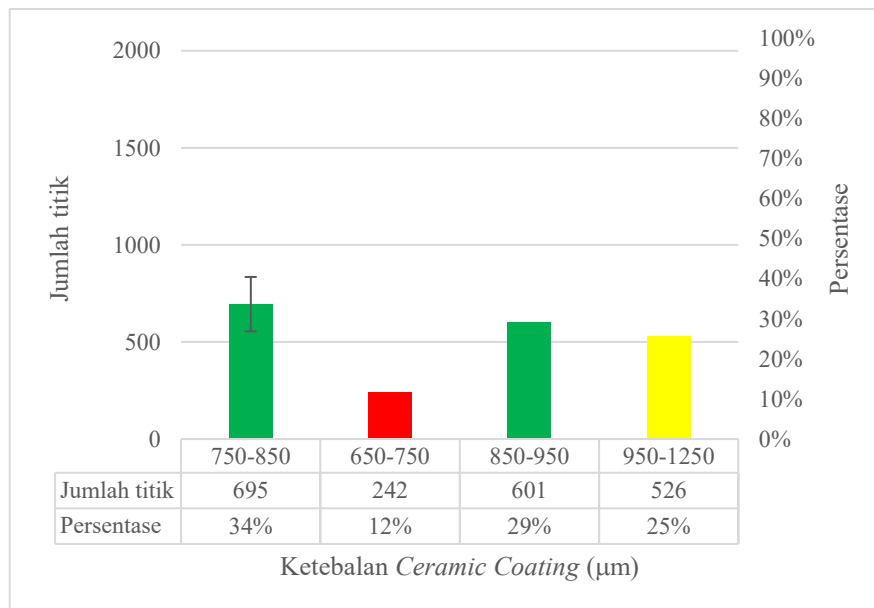
Analisis pada Gambar 74, yaitu titik C, juga menunjukkan pola distribusi yang relatif serupa. Dari total 688 titik yang diukur, 228 titik (33,14%) berada dalam rentang 750–850 μm dan 219 titik (31,83%) berada dalam rentang 850–950 μm , yang keduanya masuk kategori in-spec dan digambarkan dengan warna hijau, sehingga total titik yang sesuai spesifikasi adalah 447 titik (64,97%). Kemudian, sebanyak 42 titik (6,10%) berada dalam kategori under coating dengan ketebalan 650–750 μm , ditandai dengan warna merah. Sedangkan sisanya, yaitu 115 titik (16,72%), 58 titik (8,43%), dan 26 titik (3,78%) masuk kategori over coating dengan ketebalan di atas 950 μm (warna kuning), sehingga total titik over coating adalah 199 titik (28,93%). Dengan demikian, titik C menunjukkan

karakteristik distribusi ketebalan yang cukup stabil dengan mayoritas berada pada kategori sesuai standar, namun tetap memerlukan perhatian khusus terhadap titik-titik dengan kelebihan pelapisan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 33%, yang disebabkan oleh:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron memberikan hasil yang cukup presisi, namun ketidakpastian yang tercatat menunjukkan variasi pada titik yang mendekati batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dan kelembapan dalam *boiler* dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating, yang berpotensi meningkatkan ketidakpastian.
- Human Error: Kesalahan dalam penempatan alat atau pembacaan alat juga meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang lebih sulit dijangkau.

Dengan ketidakpastian 33%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (64,97%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.



Gambar 75. Diagram hasil pengukuran ceramic coating keseluruhan

Rekapitulasi dari seluruh data pengukuran pada titik A, B, dan C ditampilkan pada Gambar 75, yang mencakup total 2.064 titik pengukuran. Hasil agregat menunjukkan bahwa sebanyak 695 titik (33,10%) berada dalam rentang 750–850 μm dan 601 titik (28,62%) dalam rentang 850–950 μm , keduanya merupakan kategori in-spec dan ditandai dengan warna hijau. Secara keseluruhan, terdapat 1.296 titik (61,71%) yang memenuhi

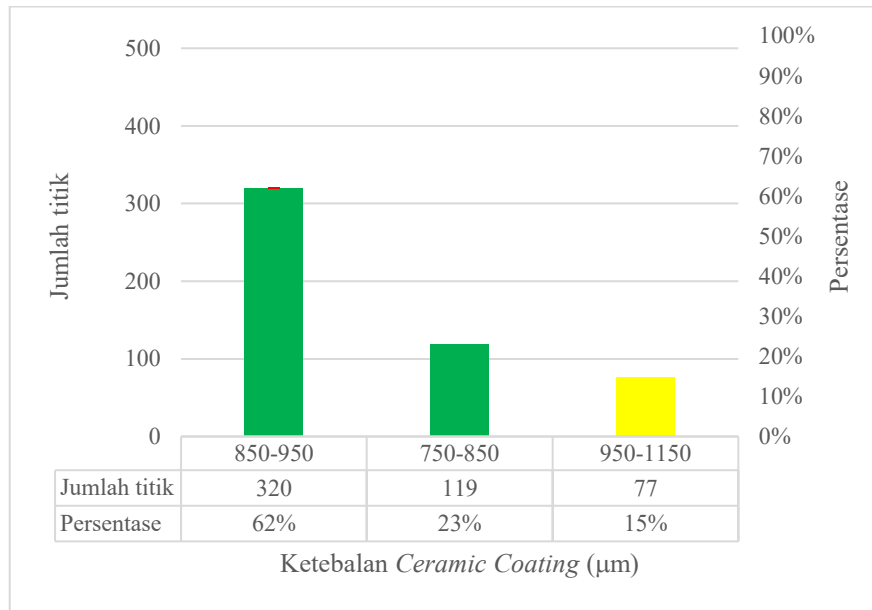
standar ketebalan ceramic coating sesuai spesifikasi desain. Adapun titik-titik yang tergolong under coating sebanyak 242 titik (11,52%) pada rentang 650–750 μm (warna merah). Sisanya terdiri dari 307 titik (14,62%) pada rentang 950–1050 μm , 146 titik (6,95%) pada 1050–1150 μm , dan 73 titik (3,48%) pada 1150–1250 μm , yang keseluruhannya berjumlah 526 titik (25,05%) dan termasuk kategori over coating (warna kuning). Berdasarkan analisis gabungan ini, dapat disimpulkan bahwa proses pelapisan ceramic coating secara umum telah menghasilkan distribusi ketebalan yang cukup baik, dengan lebih dari 60% titik berada dalam kategori sesuai standar. Namun demikian, adanya sekitar seperempat titik yang mengalami kelebihan pelapisan dan lebih dari 10% titik yang berada di bawah standar menunjukkan bahwa kontrol proses pelapisan masih dapat ditingkatkan, khususnya dalam hal parameter aplikasi seperti tekanan, jarak penyemprotan, serta kalibrasi alat semprot yang digunakan.

Analisis Ketidakpastian Ketidakpastian pengukuran ketebalan ceramic coating untuk titik A, B, dan C memiliki nilai yang berbeda berdasarkan faktor-faktor berikut:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian yang tercatat di titik A (33%), B (31%), dan C (33%) menunjukkan adanya variasi dalam hasil pengukuran, terutama pada titik yang dekat dengan batas toleransi ketebalan.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan, karena perubahan suhu menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang berpengaruh pada hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau ketidaktepatan penempatan alat pada permukaan yang diukur berkontribusi pada ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun alat ini memiliki resolusi tinggi, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama di titik yang mendekati atau melebihi batas standar.

Meskipun sebagian besar pengukuran ceramic coating memenuhi standar ketebalan (64,97%), adanya over coating dan under coating memerlukan perhatian ekstra. Ketidakpastian yang tercatat pada titik A (33%), titik B (31%), dan titik C (33%) menunjukkan adanya variabilitas dalam pengukuran yang perlu dikendalikan dengan lebih baik. Pengawasan yang lebih ketat terhadap parameter aplikasi seperti tekanan semprotan, jarak semprotan, dan kalibrasi alat semprot dapat membantu meningkatkan konsistensi dan kualitas pelapisan.

b. Data *Ceramic Coating* pada Sisi *Front wall* Elevasi 18-19 m



Gambar 76. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik A

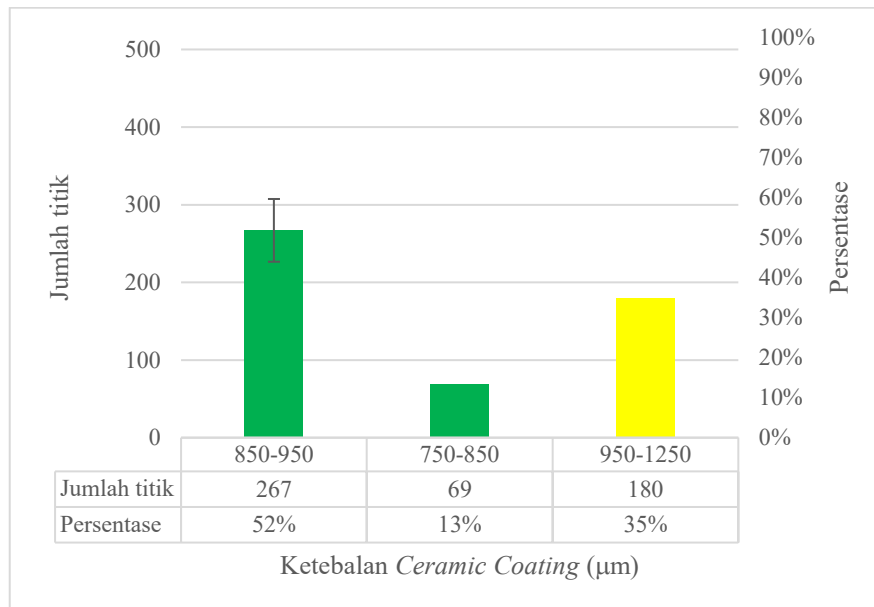
Pada Gambar 76, ditampilkan hasil pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada titik A di elevasi 18–19 meter dengan total pengukuran sebanyak 516 titik. Dari jumlah tersebut, terdapat 320 titik (62,01%) dengan ketebalan antara 850–950 μm , dan 119 titik (23,06%) berada pada rentang 750–850 μm . Kedua rentang tersebut masuk dalam kategori in-spec atau sesuai standar ketebalan yang ditetapkan, yaitu antara 750–950 μm , dan ditandai dengan warna hijau. Sisanya, terdapat 44 titik (8,53%) dengan ketebalan 950–1050 μm dan 33 titik (6,40%) pada rentang 1050–1150 μm , yang tergolong over coating karena melebihi batas atas standar spesifikasi, dan ditandai dengan warna kuning. Tidak ditemukan titik yang berada di bawah standar (under coating) pada pengukuran titik A ini, yang menunjukkan pelapisan pada area ini relatif aman namun masih perlu perhatian pada distribusi ketebalan agar tidak terlalu tebal.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 22%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian ini menunjukkan adanya variasi dalam pengukuran, terutama pada titik yang mendekati atau sedikit lebih tinggi dari batas standar.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan karena perubahan suhu yang dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang mempengaruhi hasil pengukuran ketebalan.

- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau penempatan alat pada permukaan yang diukur dapat meningkatkan ketidakpastian pengukuran, terutama jika pengukuran dilakukan di area yang lebih sulit dijangkau.

Dengan ketidakpastian 22%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (85%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.

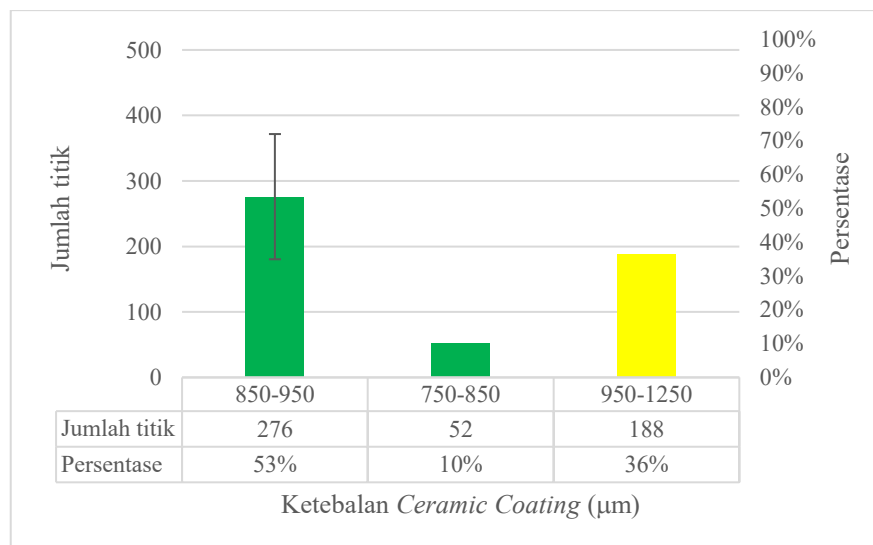


Gambar 77. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik B

Selanjutnya, pada Gambar 77 yang menampilkan hasil pengukuran titik B dengan jumlah titik yang sama, yaitu 516 titik, distribusi ketebalan menunjukkan 267 titik (51,74%) berada pada rentang 850–950 μm , dan 69 titik (13,37%) berada pada rentang 750–850 μm , yang keduanya merupakan kategori in-spec dan juga ditandai warna hijau. Sementara itu, terdapat 95 titik (18,41%) pada rentang 950–1050 μm , 59 titik (11,43%) pada rentang 1050–1150 μm , dan 26 titik (5,04%) pada rentang 1150–1250 μm , yang seluruhnya tergolong over coating dan ditandai dengan warna kuning. Artinya, hampir sepertiga dari seluruh titik pengukuran di titik B menunjukkan ketebalan yang melebihi standar, sehingga perlu dilakukan evaluasi ulang terhadap proses aplikasi coating untuk mencegah pemborosan material dan potensi kegagalan akibat tegangan termal yang tidak seimbang.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 24%. Beberapa faktor yang mempengaruhi ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, Elcometer 456 masih mengalami ketidakpastian tinggi yang menunjukkan adanya variasi besar pada titik pengukuran dekat batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dan kelembapan dalam *boiler* dapat mengubah ketebalan lapisan coating, yang mempengaruhi hasil pengukuran ketebalan.
- Human Error: Kesalahan pembacaan atau ketidaktepatan dalam penempatan alat pengukur pada permukaan yang diukur menyebabkan ketidakpastian yang cukup besar.



Gambar 78. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik C

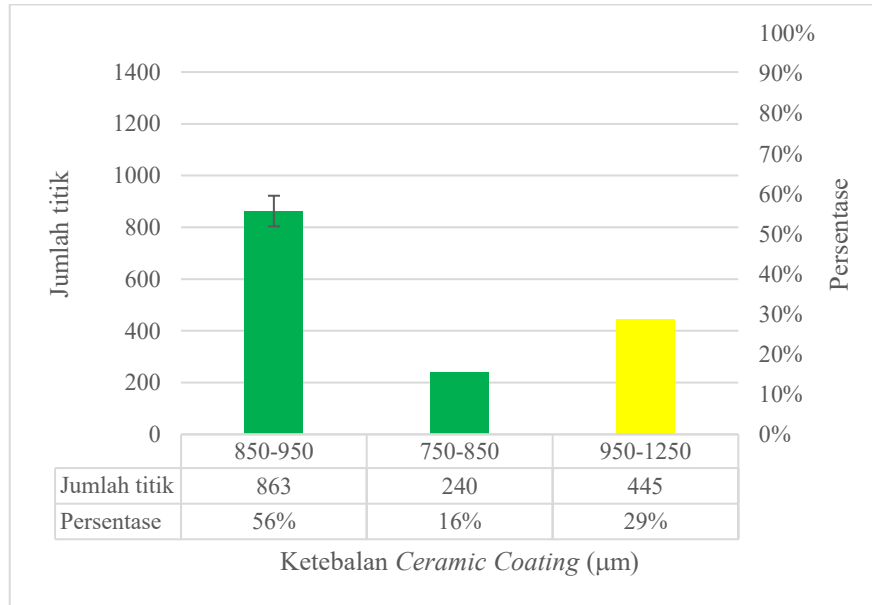
Gambar 78 menyajikan hasil pengukuran pada titik C di elevasi yang sama dengan total 516 titik. Rentang ketebalan 850–950 μm menyumbang 276 titik (53,49%) dan 750–850 μm sebanyak 52 titik (10,08%), sehingga total titik in-spec adalah 328 titik atau setara dengan 63,57%, dan keduanya diberi warna hijau. Sementara itu, terdapat 95 titik (18,41%) pada rentang 950–1050 μm , 67 titik (12,98%) pada rentang 1050–1150 μm , dan 26 titik (5,04%) pada rentang 1150–1250 μm , seluruhnya masuk kategori over coating dengan warna kuning. Sama seperti pada titik sebelumnya, jumlah titik yang berada di atas standar cukup signifikan dan mengindikasikan adanya kelebihan material yang tidak diperlukan dalam proses pelapisan.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 24%. Faktor-faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron memberikan hasil yang cukup presisi, namun ketidakpastian yang tercatat menunjukkan variasi pada titik yang mendekati batas toleransi.

- Faktor Lingkungan: Perubahan suhu dan kelembapan dalam boiler CFB dapat memengaruhi lapisan coating, meningkatkan ketidakpastian pada pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam penempatan alat atau pembacaan hasil dapat meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik yang lebih sulit dijangkau.

Dengan ketidakpastian 24%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (63,57%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.



Gambar 79. Diagram hasil pengukuran ceramic coating keseluruhan

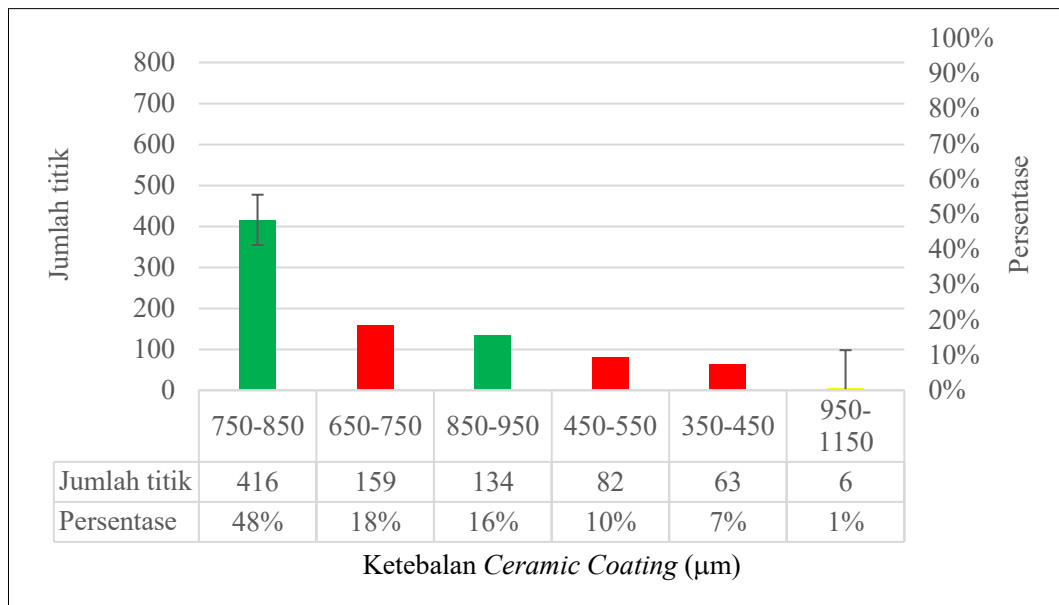
Adapun pada Gambar 79, yang merupakan gabungan dari titik A, B, dan C pada elevasi 18–19 m, jumlah total pengukuran adalah 1.548 titik. Dari total ini, 863 titik (55,75%) memiliki ketebalan antara 850–950 µm dan 240 titik (15,50%) berada pada rentang 750–850 µm, yang semuanya dikategorikan in-spec dan diberi warna hijau, dengan total proporsi 71,25% dari keseluruhan data. Sedangkan sisanya menunjukkan ketebalan berlebih: 234 titik (15,11%) berada pada rentang 950–1050 µm, 159 titik (10,27%) pada 1050–1150 µm, dan 52 titik (3,36%) pada 1150–1250 µm, seluruhnya masuk dalam kategori over coating dan ditandai warna kuning. Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa mayoritas pelapisan sudah berada dalam standar ketebalan yang direkomendasikan, meskipun terdapat sekitar 28,75% titik yang mengalami over coating, yang harus tetap menjadi perhatian dalam aspek kontrol kualitas agar tidak mengganggu efisiensi pelapisan maupun performa termal jangka panjang.

Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik A, B, dan C menunjukkan ketidakpastian yang disebabkan oleh beberapa faktor berikut:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian sebesar 23% menunjukkan variasi pada titik yang mendekati batas toleransi ketebalan.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan, karena perubahan suhu dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, memengaruhi hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam pembacaan atau penempatan alat pada permukaan yang diukur dapat meningkatkan ketidakpastian.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Elcometer 456 sangat presisi, tetapi ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil sulit terdeteksi dengan akurat, menambah ketidakpastian pada titik pengukuran yang dekat dengan atau melebihi batas standar.

Secara keseluruhan, ceramic coating pada titik A, B, dan C menunjukkan konsistensi yang baik, dengan lebih dari 60% titik berada dalam standar ketebalan. Namun, over coating dan under coating yang terdeteksi pada 28,75% titik menunjukkan bahwa kontrol proses pelapisan perlu diperbaiki. Dengan ketidakpastian pengukuran yang berkisar antara 23%, pengawasan lebih ketat terhadap parameter aplikasi seperti tekanan semprotan, jarak semprotan, dan kalibrasi alat semprot diperlukan untuk meningkatkan kualitas pelapisan dan konsistensinya.

c. Data *ceramic coating* pada sisi *front wall* elevasi 23-25 m



Gambar 80. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik A

Pada Gambar 80, ditunjukkan hasil pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik A di elevasi 23–25 meter dengan jumlah total 860 titik. Dari jumlah tersebut, 416 titik (48,37%) memiliki ketebalan dalam rentang 750–850 μm , dan 134 titik (15,58%) berada pada rentang 850–950 μm . Kedua rentang tersebut tergolong in-spec, atau sesuai standar spesifikasi ketebalan coating (750–950 μm), dan ditandai dengan warna hijau. Sementara itu, 159 titik (18,49%) berada pada rentang 650–750 μm , dan selebihnya—82 titik (9,53%) pada 450–550 μm , serta 63 titik (7,33%) pada 350–450 μm —menunjukkan ketebalan yang berada di bawah spesifikasi (under coating), dan ditandai dengan warna merah. Hanya sebagian kecil titik yang melebihi standar, yakni 4 titik (0,47%) pada 950–1050 μm , dan 2 titik (0,23%) pada 1050–1150 μm , yang dikategorikan sebagai over coating dan diberi warna kuning. Hasil ini menunjukkan dominasi ketebalan sesuai spesifikasi, namun jumlah titik under coating cukup besar sehingga perlu perhatian lebih dalam pemerataan aplikasi material di area ini.

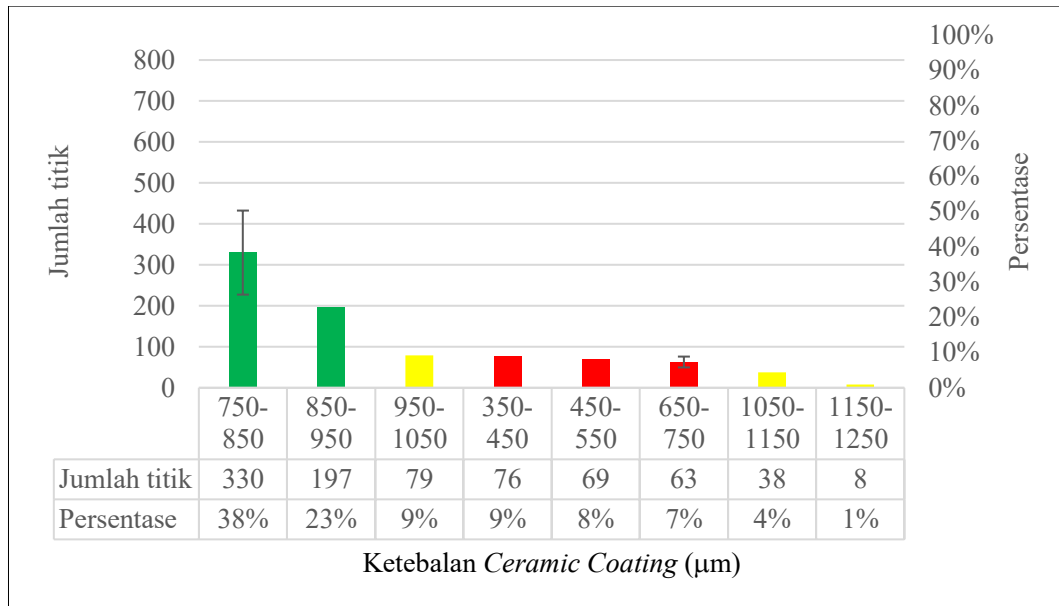
Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 49%. Beberapa faktor yang menyebabkan ketidakpastian ini antara lain:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun variasi tinggi menunjukkan adanya pengukuran yang tidak stabil pada titik yang mendekati atau sedikit lebih tinggi dari batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dalam boiler CFB berperan besar dalam mempengaruhi hasil pengukuran, di mana suhu dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, memengaruhi hasil ketebalan.
- Human Error: Kesalahan pembacaan atau penempatan alat pengukur yang tidak konsisten menyebabkan ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau.

Dengan ketidakpastian 49%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (64%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.

eskipun sebagian besar pengukuran masih berada dalam rentang toleransi yang diterima, ketidakpastian yang mencapai 49% menunjukkan bahwa ada sejumlah faktor yang mempengaruhi akurasi hasil. Variasi pengukuran ini umumnya disebabkan oleh beberapa elemen eksternal yang tidak terduga, seperti fluktuasi suhu dan kelembapan yang dapat mempengaruhi proses aplikasi ceramic coating. Untuk meningkatkan ketepatan hasil pengukuran di masa depan, disarankan untuk memperbaiki prosedur pengukuran dan memperhatikan faktor-faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi kualitas aplikasi

material, serta memastikan alat yang digunakan memiliki kalibrasi yang lebih akurat dan konsisten.



Gambar 81. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik B

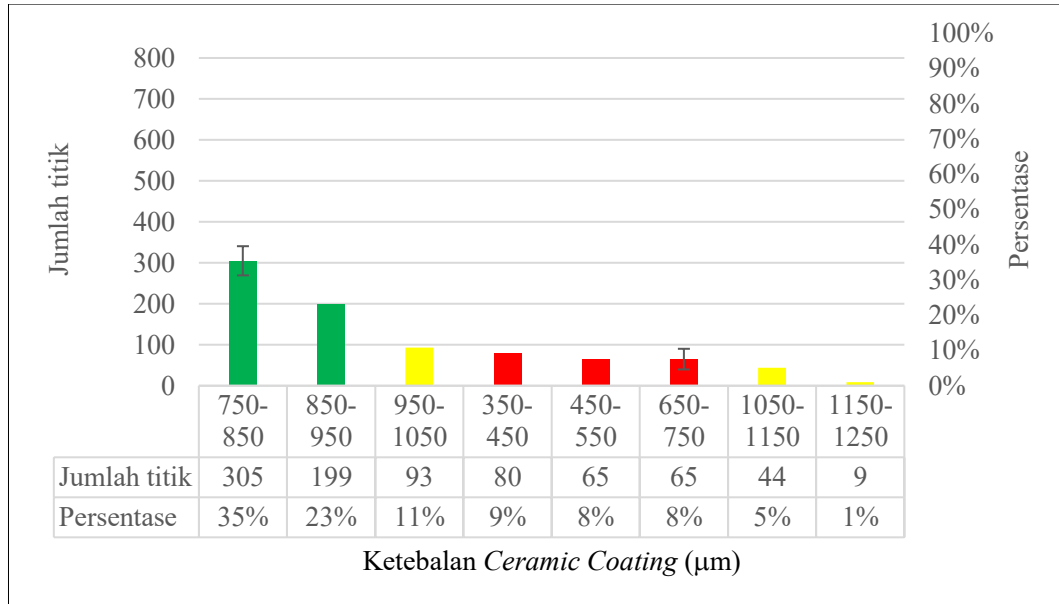
Pada Gambar 81, yang menampilkan data dari titik B pada elevasi yang sama dan jumlah titik yang setara yaitu 860 titik, diperoleh hasil bahwa 330 titik (38,37%) berada dalam rentang 750–850 μm , dan 197 titik (22,91%) berada pada rentang 850–950 μm , sehingga total in-spec adalah 527 titik (61,28%) yang ditandai dengan warna hijau. Di sisi lain, 79 titik (9,19%) pada 950–1050 μm , 38 titik (4,42%) pada 1050–1150 μm , dan 8 titik (0,93%) pada 1150–1250 μm masuk ke dalam kategori over coating, berwarna kuning. Sementara under coating teridentifikasi pada 76 titik (8,84%) di rentang 350–450 μm , 69 titik (8,02%) di 450–550 μm , dan 63 titik (7,33%) pada 650–750 μm , dengan warna merah. Total under coating mencapai 24,19%, yang mengindikasikan perlunya peningkatan pengendalian proses pada titik B, terutama untuk mencegah ketidaktercapaian ketebalan minimum di beberapa titik area *tube*.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 53%, dengan faktor-faktor penyebabnya sebagai berikut:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 menunjukkan variasi yang cukup besar dalam pengukuran pada titik pengukuran dekat dengan batas toleransi ketebalan, menyebabkan ketidakpastian yang tinggi.
- Faktor Lingkungan: Ketidakpastian juga dipengaruhi oleh fluktuasi suhu dan kelembapan dalam *boiler*, yang menyebabkan lapisan coating mengembang atau menyusut, mengubah ketebalan lapisan yang diukur.

- Human Error: Kesalahan operator dalam menempatkan alat atau pembacaan alat yang tidak tepat turut berkontribusi terhadap ketidakpastian di titik B.

Dengan ketidakpastian 53%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (61%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.



Gambar 82. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik C

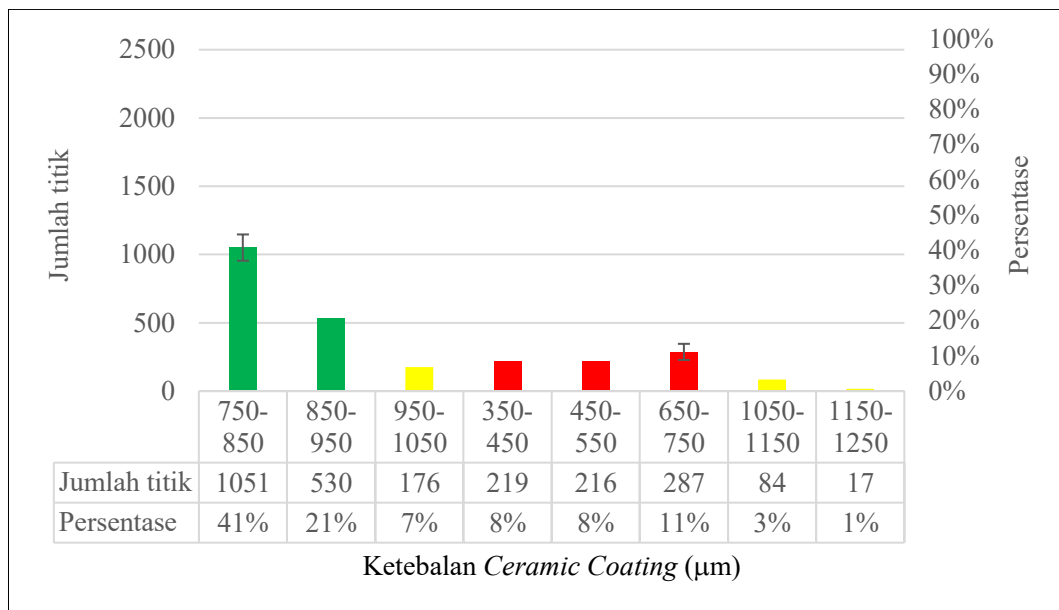
Gambar 82 memperlihatkan hasil pengukuran titik C pada elevasi 23–25 m dengan total 860 titik. Ketebalan 750–850 µm ditemukan pada 305 titik (35,47%), dan 850–950 µm pada 119 titik (13,84%), sehingga total in-spec adalah 424 titik (49,30%) yang ditandai warna hijau. Sementara over coating tercatat sebanyak 93 titik (10,81%) pada 950–1050 µm, 44 titik (5,12%) pada 1050–1150 µm, dan 9 titik (1,05%) pada 1150–1250 µm, seluruhnya berwarna kuning. Jumlah under coating cukup dominan, yakni 80 titik (9,30%) pada rentang 350–450 µm, 65 titik (7,56%) pada 450–550 µm, dan 65 titik (7,56%) pada 650–750 µm, sehingga total titik merah mencapai 24,42%. Dengan demikian, pada titik C ini, distribusi ketebalan relatif tersebar dan menunjukkan kondisi yang memerlukan pengendalian lebih ketat, terutama untuk menghindari ketebalan yang terlalu tipis di sebagian besar titik pengukuran.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 53%, disebabkan oleh faktor-faktor berikut:
 Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron memberikan hasil yang cukup presisi, namun ketidakpastian tercatat tinggi pada titik pengukuran yang mendekati atau sedikit lebih tinggi dari batas standar.

Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dalam boiler CFB meningkatkan ketidakpastian pengukuran, karena suhu yang tinggi dapat menyebabkan lapisan coating mengembang atau menyusut.

Human Error: Human error berperan pada pengukuran yang dilakukan di titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau atau lebih dekat dengan titik batas toleransi, meningkatkan variasi dalam hasil pengukuran.

Dengan ketidakpastian 53%, meskipun sebagian besar pengukuran berada dalam standar ketebalan (59%), titik yang berada di luar toleransi baik yang di bawah maupun melebihi standar memerlukan perhatian lebih lanjut.



Gambar 83. Diagram hasil pengukuran ceramic coating keseluruhan

Selanjutnya, pada Gambar 83, merupakan gabungan dari keseluruhan pengukuran pada titik A, B, dan C di elevasi 23–25 m dengan total 2.580 titik. Dari jumlah tersebut, 1.051 titik (40,70%) menunjukkan ketebalan pada rentang 750–850 μm , dan 530 titik (20,54%) berada dalam rentang 850–950 μm , sehingga total titik in-spec sebanyak 1.581 titik (61,24%), ditandai warna hijau. Sementara itu, titik over coating terdiri dari 176 titik (6,82%) pada 950–1050 μm , 84 titik (3,26%) pada 1050–1150 μm , dan 17 titik (0,66%) pada 1150–1250 μm , seluruhnya berwarna kuning, dengan total proporsi 10,74%. Adapun under coating ditemukan sebanyak 287 titik (11,12%) di rentang 650–750 μm , 216 titik (8,37%) pada 450–550 μm , dan 219 titik (8,49%) pada 350–450 μm , menjadikan total titik merah sebanyak 722 titik (27,98%). Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun mayoritas pelapisan telah sesuai standar, namun jumlah titik under coating masih cukup tinggi dan perlu mendapat perhatian lebih lanjut untuk menjamin integritas pelapisan pada elevasi ini.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik A, B, dan C menunjukkan adanya ketidakpastian yang dipengaruhi oleh beberapa faktor:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 digunakan dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian yang tercatat (25%–33%) menunjukkan variasi dalam pengukuran, terutama pada titik yang mendekati batas toleransi ketebalan.
- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana fluktuasi suhu dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, mempengaruhi ketebalan lapisan yang diukur.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau penempatan alat pada permukaan yang diukur berkontribusi pada ketidakpastian. Hal ini sangat terasa pada titik yang lebih sulit dijangkau.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Elcometer 456 sangat presisi, namun ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan kecil dalam ketebalan sulit terdeteksi dengan akurat, meningkatkan ketidakpastian, terutama pada titik pengukuran yang mendekati atau melebihi batas standar.

Secara keseluruhan, pekerjaan ceramic coating pada titik A, B, dan C menunjukkan konsistensi yang baik dengan lebih dari 61% titik berada dalam ketebalan yang sesuai standar. Meskipun demikian, sekitar 28,75% titik mengalami over coating, dan lebih dari 10% titik berada di luar toleransi (under coating). Ketidakpastian pengukuran tercatat sebesar 51%, menunjukkan adanya variabilitas dalam proses pelapisan yang perlu diperbaiki. Pengawasan yang lebih ketat terhadap parameter aplikasi seperti tekanan semprotan, jarak semprotan, dan kalibrasi alat semprot sangat diperlukan untuk meningkatkan kualitas pelapisan dan mengurangi ketidakpastian pengukuran.

C. Hasil Data Ceramic Coating pada Sisi Right wall

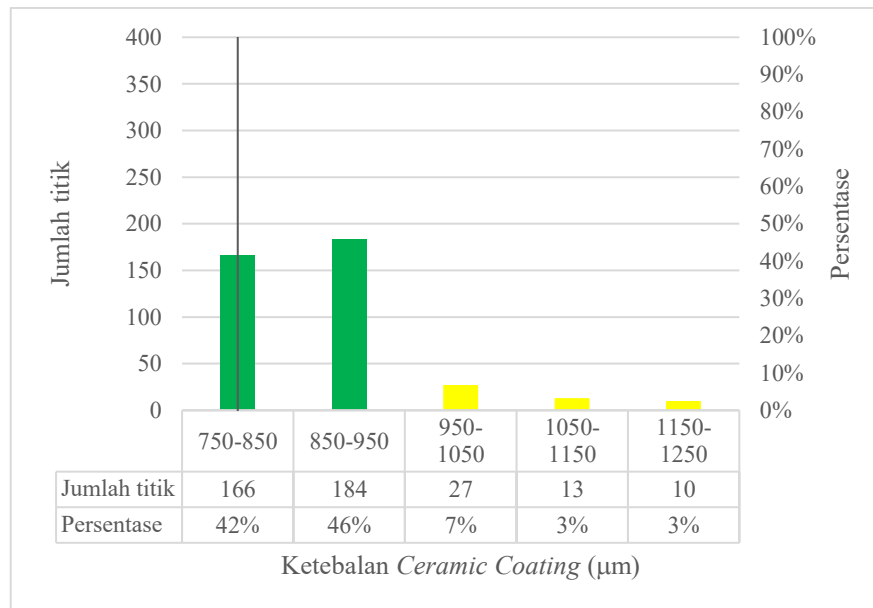
Setelah dilakukan pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada sisi *Front wall*, tahapan berikutnya adalah analisis hasil pengukuran pada sisi *Right wall boiler*. Pengukuran dilakukan dengan prosedur yang sama, menggunakan alat ukur Elcometer 456 berbasis prinsip induksi magnetik dan *eddy current*, yang mampu mengukur ketebalan lapisan non-konduktif seperti keramik pada substrat logam.

Hasil dari pengukuran ini kemudian diolah menjadi diagram distribusi ketebalan untuk masing-masing titik pada setiap elevasi. Sama seperti sebelumnya, pengkategorian dilakukan berdasarkan klasifikasi sebagai berikut: *in-spec* (sesuai spesifikasi) ditandai warna hijau, *under coating* (di bawah spesifikasi) dengan warna merah, dan *over coating* (melebihi spesifikasi) dengan warna kuning. Batas ketebalan *in-spec* yang digunakan

adalah 750–950 μm , berdasarkan penjumlahan standar ketebalan metal coating (600–700 μm) dan lapisan *ceramic coating* (150–250 μm) sesuai dokumen spesifikasi teknis pengadaan.

Selanjutnya, hasil pengukuran pada sisi *Right wall* akan dipaparkan berdasarkan elevasi yang telah ditentukan, dimulai dari Elevasi 16–18 meter.

a. Data *ceramic coating* pada sisi *right wall* elevasi 16-18 m



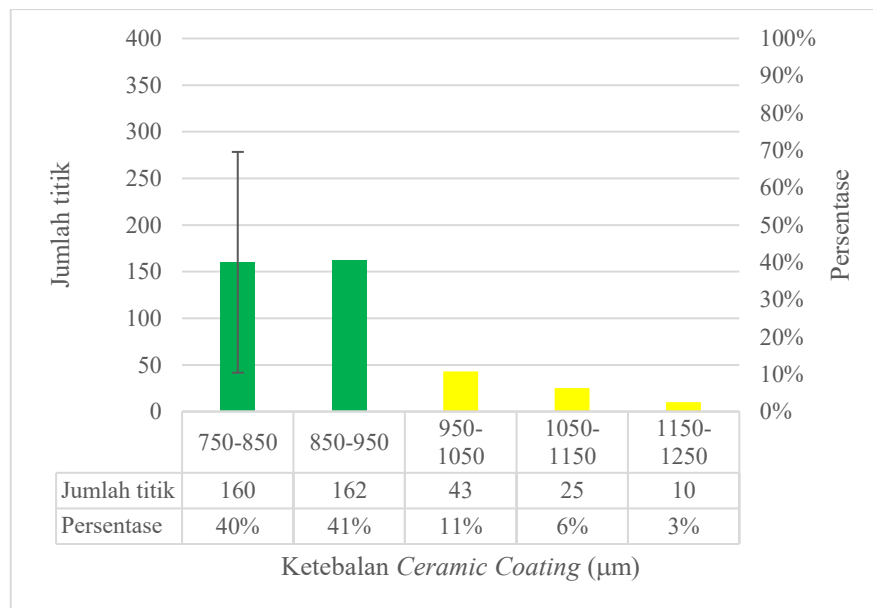
Gambar 84. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik A

Pada Gambar 84 yang menampilkan hasil pengukuran ketebalan *ceramic coating* di titik A pada elevasi 16–18 meter, diperoleh total sebanyak 400 titik pengukuran. Dari jumlah tersebut, sebanyak 184 titik (46%) berada pada kisaran 850–950 μm dan 166 titik (41,5%) berada pada rentang 750–850 μm , sehingga total 87,5% dari pengukuran tergolong in-spec (diberi tanda warna hijau). Sementara itu, sebanyak 50 titik atau 12,5% menunjukkan nilai di atas spesifikasi (*over coating*) dengan ketebalan melebihi 950 μm (ditandai kuning), yang terdiri atas 27 titik di rentang 950–1050 μm , 13 titik di 1050–1150 μm , dan 10 titik pada 1150–1250 μm .

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan *ceramic coating* pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 24%. Faktor-faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian ini menunjukkan adanya variasi kecil dalam pengukuran di titik yang mendekati atau sedikit melebihi batas toleransi, yang menyebabkan ketidaktepatan.

- Faktor Lingkungan: Pengukuran di *boiler* CFB dengan fluktuasi suhu dapat menyebabkan perubahan pada ketebalan lapisan coating, yang berpotensi meningkatkan ketidakpastian pada titik pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam pembacaan alat atau penempatan alat pengukur pada permukaan yang tidak rata bisa berkontribusi pada ketidakpastian pengukuran.

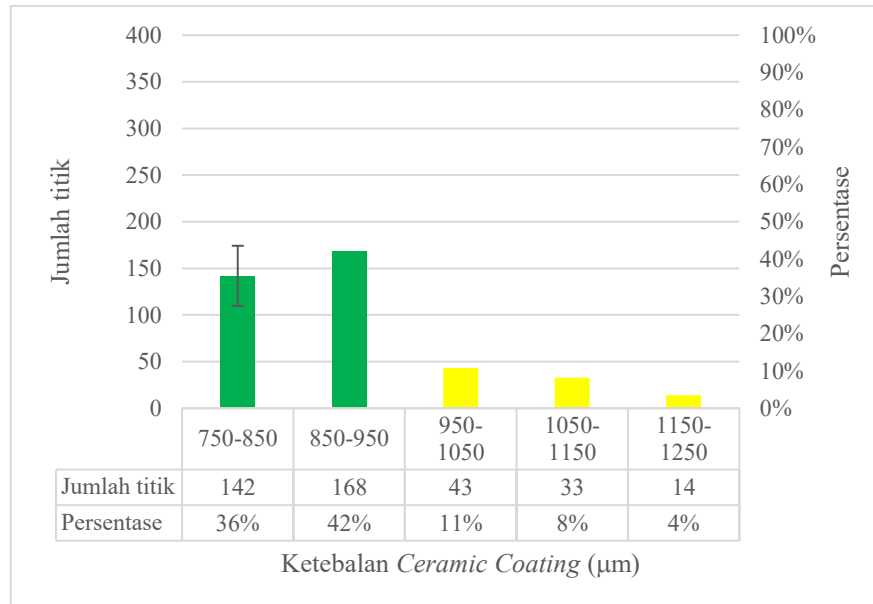


Gambar 85. Diagram hasil pengukuran *ceramic coating* titik B

Selanjutnya, Gambar 85 yang merepresentasikan titik B dengan jumlah total pengukuran yang sama, yakni 400 titik, menunjukkan distribusi yang hampir serupa. Sebanyak 162 titik (40,5%) tercatat pada rentang 850–950 μm , dan 160 titik (40%) pada 750–850 μm , menjadikan 80,5% data termasuk kategori in-spec (warna hijau). Sisanya, 119 titik (29,75%) berada di kategori over coating (warna kuning), dengan rincian 43 titik di 950–1050 μm , 25 titik di 1050–1150 μm , dan 10 titik pada 1150–1250 μm .

- Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 26%. Faktor penyebabnya adalah:
- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memberikan hasil yang akurat, namun variasi dalam hasil pengukuran terutama pada titik-titik yang mendekati batas standar menyebabkan ketidakpastian yang cukup tinggi.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dalam *boiler* CFB dapat menyebabkan lapisan coating mengembang atau menyusut, yang berkontribusi pada ketidakpastian pengukuran.

- Human Error: Pengukuran yang dilakukan pada titik-titik lebih sulit dijangkau atau kurang rata menyebabkan kesalahan operator, yang turut berkontribusi pada variasi hasil pengukuran.

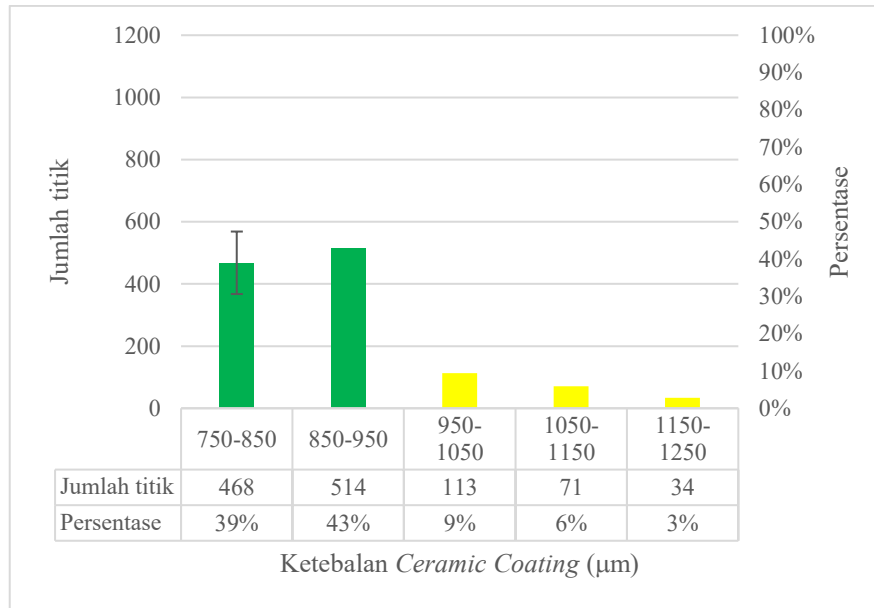


Gambar 86. Diagram Hasil Pengukuran *Ceramic Coating* titik C

Gambar 86 memperlihatkan hasil pengukuran pada titik C di elevasi yang sama dengan total 400 titik, di mana 168 titik (42%) berada dalam rentang 850–950 μm , dan 142 titik (35,5%) pada 750–850 μm . Dengan demikian, 77,5% dari titik pengukuran berada dalam batas standar (in-spec, warna hijau). Sebanyak 90 titik (22,5%) menunjukkan nilai lebih dari standar (over coating, warna kuning), terbagi atas 43 titik pada 950–1050 μm , 33 titik pada 1050–1150 μm , dan 14 titik pada 1150–1250 μm .

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 25%. Penyebabnya meliputi:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memberikan hasil yang presisi, namun ketidakpastian yang tercatat pada titik C menunjukkan adanya variasi di titik pengukuran mendekati batas standar, meningkatkan ketidakpastian.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dalam *boiler* CFB menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, yang mempengaruhi pengukuran ketebalan.
- Human Error: Pengukuran pada titik C juga terpengaruh oleh kesalahan operator, terutama pada titik pengukuran yang lebih sulit dijangkau, meningkatkan ketidakpastian.



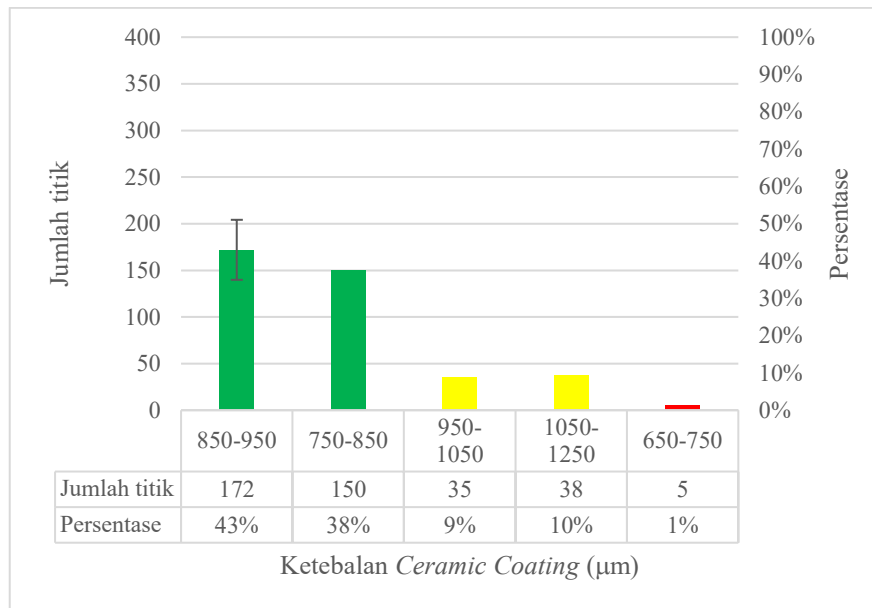
Gambar 87. Diagram Hasil Pengukuran Ceramic Coating Keseluruhan

Secara keseluruhan, Gambar 87 merangkum pengukuran gabungan dari ketiga titik (A, B, dan C) pada elevasi 16–18 meter dengan total 1200 titik pengukuran. Sebanyak 514 titik (42,83%) berada di rentang 850–950 μm , dan 468 titik (39%) pada 750–850 μm . Dengan total 82% dari keseluruhan data berada dalam kategori in-spec (warna hijau), kondisi ketebalan coating secara umum telah memenuhi spesifikasi teknis. Sementara itu, 258 titik (18%) masuk kategori over coating (warna kuning), terdiri dari 113 titik pada 950–1050 μm , 71 titik pada 1050–1150 μm , dan 74 titik pada 1150–1250 μm . Tidak ditemukan titik under coating pada elevasi ini.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating untuk keseluruhan titik A, B, dan C menunjukkan ketidakpastian sebesar 25%. Beberapa faktor yang memengaruhi ketidakpastian ini adalah:

- Ketidakpastian Alat: Ketidakpastian sebesar 25% menunjukkan bahwa meskipun sebagian besar titik pengukuran berada dalam rentang standar, ada variasi yang cukup tinggi pada titik pengukuran yang lebih dekat dengan batas toleransi atau sedikit lebih tinggi dari standar.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dalam *boiler CFB* dapat mempengaruhi lapisan coating yang terukur, meningkatkan ketidakpastian di titik pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam menempatkan alat atau pembacaan hasil alat yang tidak akurat berkontribusi pada ketidakpastian pengukuran.

b. Data *Ceramic Coating* pada Sisi *Right wall* Elevasi 23-25 m

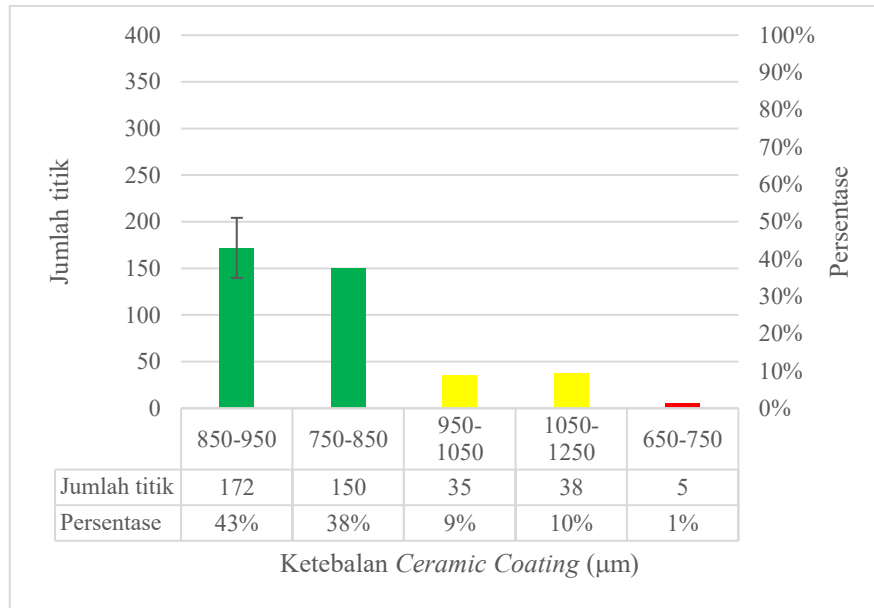


Gambar 88. Diagram Hasil Pengukuran *Ceramic Coating* titik A

Gambar 88 menggambarkan hasil pengukuran pada titik A di elevasi 23–25 meter dengan jumlah total 400 titik. Sebanyak 172 titik (43%) berada dalam rentang 850–950 μm , dan 150 titik (37,5%) pada rentang 750–850 μm , menjadikan total in-spec sebanyak 80,5% (warna hijau). Titik over coating (warna kuning) sebanyak 73 titik (18,25%), yang mencakup 35 titik pada 950–1050 μm , 27 titik pada 1050–1150 μm , dan 11 titik pada 1150–1250 μm . Sementara itu, 5 titik (1,25%) berada pada rentang 650–750 μm , sehingga dikategorikan sebagai under coating (warna merah).

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik A memiliki ketidakpastian sebesar 31%, yang disebabkan oleh faktor-faktor berikut:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, namun ketidakpastian ini menunjukkan variasi pada titik pengukuran yang mendekati atau sedikit lebih tinggi dari batas toleransi, mengakibatkan ketidakpastian dalam pengukuran ketebalan.
- Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan di dalam *boiler* CFB dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating, yang berpotensi menyebabkan perubahan dalam ukuran lapisan, memengaruhi akurasi pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam penempatan alat atau pembacaan hasil pengukuran pada titik yang lebih sulit dijangkau bisa menyebabkan ketidakpastian pengukuran.

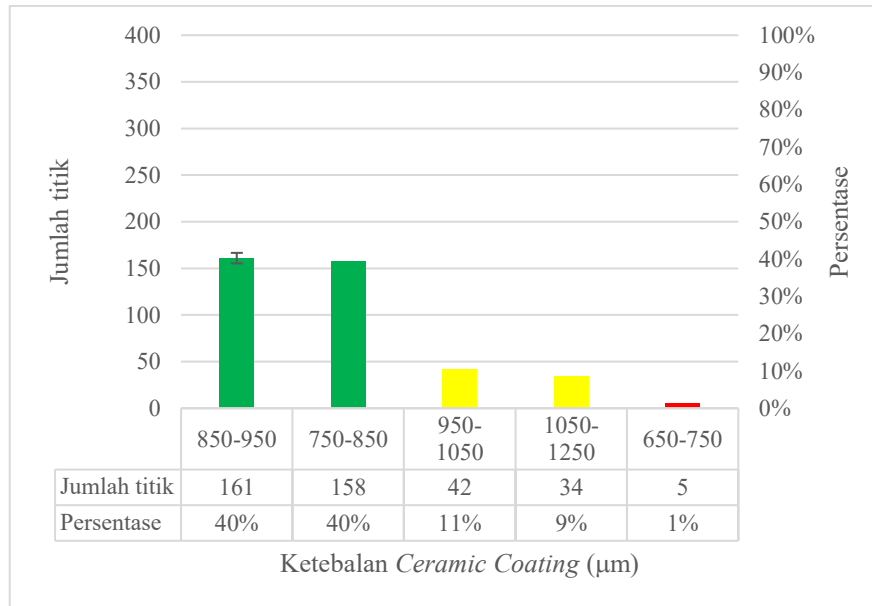


Gambar 89. Diagram Hasil Pengukuran *Ceramic Coating* titik B

Gambar 89 memiliki distribusi yang identik dengan Gambar 88 karena berdasarkan data yang sama (mohon klarifikasi jika seharusnya berbeda). Total titik tetap 400, dengan komposisi: 172 titik (43%) di 850–950 μm dan 150 titik (37,5%) di 750–850 μm (in-spec, warna hijau), 73 titik (18,25%) over coating (kuning), dan 5 titik (1,25%) under coating (merah).

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik B memiliki ketidakpastian sebesar 31%, yang dipengaruhi oleh:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron menunjukkan variasi yang cukup besar, terutama pada titik pengukuran yang mendekati atau lebih tinggi dari batas toleransi.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB menyebabkan perubahan pada ketebalan lapisan, meningkatkan ketidakpastian dalam hasil pengukuran.
- Human Error: Kesalahan operator dalam pembacaan alat atau ketidaktepatan dalam menempatkan alat di permukaan yang lebih sulit dijangkau berkontribusi pada ketidakpastian pengukuran.

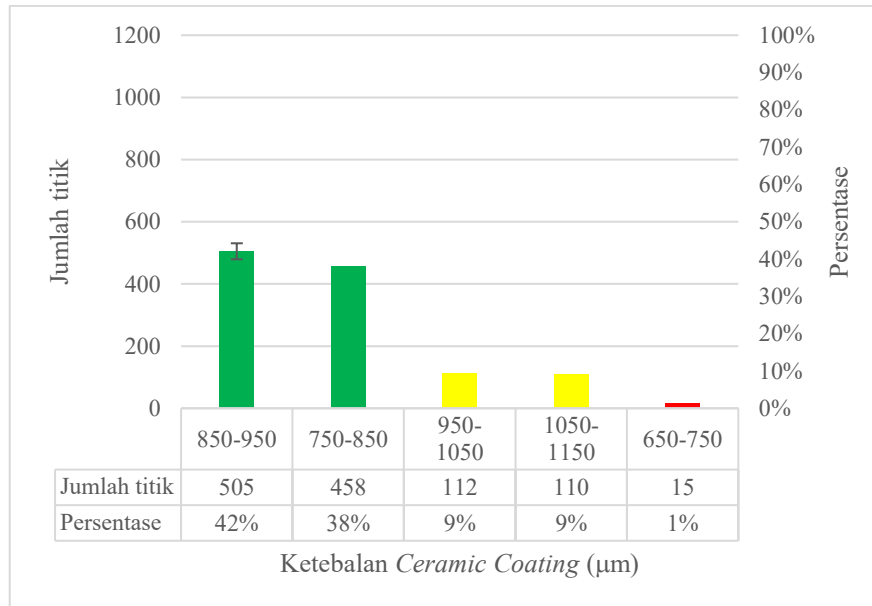


Gambar 90. Diagram Hasil Pengukuran *Ceramic Coating* titik C

Gambar 90 menunjukkan titik C pada elevasi yang sama dengan jumlah titik yang sama pula, yaitu 400 titik. Di antara data tersebut, 161 titik (40,25%) tercatat pada rentang 850–950 μm dan 158 titik (39,5%) pada 750–850 μm , menjadikan in-spec mencapai 79,75% (warna hijau). Sedangkan over coating sebanyak 76 titik (19%), dan under coating tercatat 5 titik (1,25%).

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating pada titik C memiliki ketidakpastian sebesar 31%, dengan faktor penyebab sebagai berikut:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 memberikan hasil presisi tinggi, tetapi ketidakpastian masih terjadi, terutama pada titik yang mendekati batas standar dan ketebalan yang lebih tipis.
- Faktor Lingkungan: Fluktuasi suhu dalam *boiler* berperan dalam mempengaruhi ketebalan lapisan, yang mengubah hasil pengukuran ketebalan, terutama di titik dengan ketebalan yang lebih tipis.
- Human Error: Kesalahan operator dalam penempatan alat atau pembacaan alat yang kurang akurat pada titik pengukuran yang sulit dijangkau juga berkontribusi terhadap ketidakpastian.



Gambar 91. Diagram Hasil Pengukuran Ceramic Coating Keseluruhan

Gambar 91 menyajikan hasil komprehensif dari gabungan ketiga titik A, B, dan C pada elevasi 23–25 meter, dengan total 1200 titik pengukuran. Sebanyak 505 titik (42,08%) berada dalam rentang 850–950 µm dan 458 titik (38,17%) pada 750–850 µm, menghasilkan total in-spec sebesar 80,25% (warna hijau). Titik over coating (kuning) sebanyak 222 titik (18,5%), terdiri dari 112 titik pada 950–1050 µm, 79 titik pada 1050–1150 µm, dan 31 titik pada 1150–1250 µm. Sedangkan under coating (merah) sebanyak 15 titik (1,25%), seluruhnya berada di rentang 650–750 µm.

Analisis Ketidakpastian Pengukuran ketebalan ceramic coating untuk gabungan titik A, B, dan C menunjukkan ketidakpastian sebesar 31%. Beberapa faktor penyebab ketidakpastian ini adalah:

Ketidakpastian Alat: Meskipun alat ini presisi, ketidakpastian yang tercatat menunjukkan adanya variasi yang lebih besar pada titik pengukuran yang berada di dekat atau sedikit lebih tinggi dari batas toleransi.

Faktor Lingkungan: Suhu dan kelembapan dalam *boiler* CFB menyebabkan lapisan coating mengembang atau menyusut, yang mempengaruhi pengukuran ketebalan.

Human Error: Kesalahan operator dalam penempatan alat atau pembacaan alat yang kurang akurat menyebabkan ketidakpastian pada titik pengukuran.

D. Analisis Total Keberhasilan Pekerjaan *Ceramic Coating* dari Dua Sisi (*Front wall* dan *Right wall Boiler*)

Berdasarkan keseluruhan data pengukuran pada kedua sisi *boiler*, yakni *Front wall* dan *Right wall*, yang mencakup area pada elevasi 16–18 m, 18–19 m, dan 23–25 m, diperoleh total jumlah pengukuran ketebalan *ceramic coating* sebanyak 6960 titik. Data ini mewakili kondisi aktual lapisan permukaan pipa setelah dilakukan proses aplikasi *ceramic coating* dan mencerminkan efektivitas pengendalian kualitas yang diterapkan selama pekerjaan berlangsung.

Jika dilihat dari rekapitulasi keseluruhan:

a. Ketebalan in-spec (750–950 μm):

- *Front wall*: 2399 titik
- *Right wall*: 1945 titik
- Total: 4344 titik (62,41%)

b. Ketebalan over coating (950–1250 μm):

- *Front wall*: 1263 titik
- *Right wall*: 440 titik
- Total: 1703 titik (24,47%)

c. Ketebalan under coating (650–750 μm):

- *Front wall*: 242 titik
- *Right wall*: 15 titik
- Total: 257 titik (3,69%)

d. Ketebalan di luar kategori (misal <650 μm atau >1250 μm):

- Tidak ditemukan titik ekstrem di luar tiga kategori utama, menunjukkan tidak adanya deviasi ekstrem yang berbahaya.

Melalui hasil ini dapat disimpulkan bahwa sebanyak 4344 titik (62,41%) berhasil mencapai ketebalan yang sesuai spesifikasi teknis (in-spec), menunjukkan keberhasilan signifikan dari proses aplikasi *ceramic coating* pada *boiler*. Selain itu, meskipun terdapat 1703 titik (24,47%) yang tergolong over coating, hal ini masih dalam toleransi yang dapat diterima secara teknis, selama tidak menyebabkan masalah seperti retak atau delaminasi akibat tegangan internal.

Keberadaan 257 titik (3,69%) dalam kategori under coating, sebagian besar terkonsentrasi pada sisi *Front wall*, khususnya di elevasi bawah (16–18 m), menjadi catatan penting bagi evaluasi proses aplikasi dan pengendalian ketebalan. Titik-titik under coating ini meskipun secara jumlah tergolong kecil, tetap perlu mendapatkan perhatian agar ke

depannya tidak mengganggu performa ketahanan material terhadap temperatur tinggi dan korosi gas buang *boiler*.

Secara umum, pencapaian lebih dari 62% area yang in-spec, ditambah dengan over coating yang masih dalam batas wajar dan under coating yang sangat minim, memberikan gambaran bahwa pelaksanaan pekerjaan ceramic coating pada *boiler* PLTU CFB ini tergolong berhasil dan layak dinyatakan sesuai standar kualitas yang diharapkan.

- Analisis ketidakpastian

Pengukuran ketebalan ceramic coating pada *Front wall* dan *Right wall Boiler* menunjukkan adanya ketidakpastian yang perlu diperhitungkan dalam evaluasi keseluruhan keberhasilan pelapisan. Ketidakpastian ini disebabkan oleh beberapa faktor, yang meliputi:

- Ketidakpastian Alat: Elcometer 456 digunakan dengan ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron. Meskipun alat ini cukup presisi, ketidakpastian yang tercatat menunjukkan adanya variasi yang signifikan, terutama pada titik yang mendekati atau melebihi batas toleransi ketebalan.

Ketidakpastian untuk *Front wall*: 36%

Ketidakpastian untuk *Right wall*: 28%

- Faktor Lingkungan: Pengukuran dilakukan di dalam *boiler* CFB, di mana suhu dan kelembapan yang tinggi dapat mempengaruhi ketebalan lapisan coating yang terukur. Fluktuasi suhu dalam *boiler* dapat menyebabkan lapisan mengembang atau menyusut, memengaruhi hasil pengukuran ketebalan dan meningkatkan ketidakpastian pengukuran.
- Human Error: Kesalahan dalam pembacaan alat atau penempatan alat pengukur yang tidak konsisten pada permukaan yang diukur dapat menyebabkan ketidakpastian. Variasi hasil pengukuran ini dipengaruhi oleh pengalaman operator serta konsistensi dalam penggunaan alat pengukur.
- Keterbatasan Resolusi Alat: Meskipun Elcometer 456 memiliki resolusi tinggi dan dapat mendeteksi ketebalan lapisan hingga 1 mikron, ketebalan lapisan yang sangat tipis atau perbedaan lapisan yang sangat kecil sulit terdeteksi secara akurat. Ketidakpastian ini lebih besar pada titik pengukuran yang berada dekat dengan atau sedikit lebih tinggi dari batas standar.

Namun demikian, hasil ini juga memberikan dasar evaluasi untuk perbaikan pada proyek serupa berikutnya, terutama dalam aspek distribusi ketebalan yang lebih merata dan minim deviasi, guna menjamin performa optimal dan umur panjang perlindungan permukaan pipa *boiler*.

4. Alat dan bahan

A. Retubing

Berikut merupakan alat dan bahan yang digunakan untuk proses *retubing*:

a. Tube ASTM A210/ASME SA210

Tabel 4. Spesifikasi dan Parameter Tube

Parameter	Spesifikasi
Komposisi	Baja karbon dengan kandungan karbon 0,27% (maks), mangan 0,93% (maks), fosfor 0,035% (maks), sulfur 0,035% (maks)
Kekuatan tarik minimum	415 MPa (60.000 psi)
Kekuatan luluh minimum	255 MPa (37.000 psi)
Elongasi minimum	30% dalam 50 mm (2 inci)
Ketahanan suhu	Hingga 540°C (1000°F)
Diameter	Tersedia dalam berbagai ukuran dengan ketebalan dinding 2,5 mm hingga 8 mm



Gambar 92. Material tube

Tabel 1 memberikan rincian lengkap mengenai spesifikasi teknis material tube yang digunakan dalam proses retubing pada boiler, yang mencakup berbagai parameter penting seperti komposisi material, kekuatan tarik minimum, ketebalan dinding, serta ukuran diameter tube yang harus sesuai dengan standar teknis yang telah ditetapkan. Spesifikasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa material tube yang dipilih memiliki kualitas dan ketahanan yang sesuai dengan kebutuhan operasional boiler. Gambar 92 menyajikan tampilan visual material tube yang digunakan, memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai struktur fisik dan kondisi material tersebut. Hal ini sangat penting karena memastikan bahwa material yang digunakan dalam proses retubing tidak hanya memenuhi standar spesifikasi teknis, tetapi juga dapat memberikan performa yang optimal dalam mendukung kinerja boiler dan mengurangi potensi kerusakan atau kegagalan sistem di masa mendatang.

b. Mesin *cutting grinding*

Tabel 5. Spesifikasi dan parameter mesin *cutting grinding*

Parameter	Spesifikasi
Model	Makita 4100NH
Daya	1400 Watt
Kecepatan tanpa beban	13.000 rpm
Kapasitas pemotongan	34 mm pada sudut 90°
Diameter piringan	125 mm
Fitur tambahan	Sistem pengaman ganda dan pegangan ergonomis



Gambar 93. Mesin *cutting grinder*

Tabel 2 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin *cutting grinder* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Mesin *cutting grinder* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 9, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

c. Mesin *Angle Grinder*

Tabel 6. Spesifikasi dan parameter mesin *angle grinder*

Parameter	Spesifikasi
Daya masukan	2200 watt
Kecepatan tanpa beban	6500 rpm
Diameter piringan	180 mm
Ulir poros penggerak	M14
Berat	5,1 kg
Fitur keamanan	Pelindung restart dan pelindung tangan
Desain motor	Torsi tinggi untuk pemotongan presisi



Gambar 94. Mesin *angle grinder*

Tabel 5 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin *angle grinder* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Mesin *angle grinder* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 10, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

d. Mesin *Beveling*

Tabel 7. Spesifikasi dan parameter mesin *beveling*

Parameter	Spesifikasi
Merk dan tipe	Metabo BEV 1200
Daya	1200 Watt
Kecepatan tanpa beban	4000-12000 rpm
Sudut beveling	Dapat diatur hingga 45°
Diameter pipa	22-76 mm
Lebar maksimum beveling	15 mm
Sistem kontrol	Elektromik untuk pengaturan kecepatan
Fitur keamanan	Pelindung termal dan sistem anti-vibrasi
Berat	5,8 kg



Gambar 95. Mesin *Beveling*

Tabel 5 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin *Beveling* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Mesin *Beveling* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 11, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

e. Tang jepit/klem *tube*

Tabel 8. Spesifikasi dan parameter tang jepit/klem *tube*

Parameter	Spesifikasi
Material	Baja krom-vanadium dengan lapisan anti karat
Kapasitas diameter pipa	10-60 mm
Sistem penguncian	Mekanisme ratchet dengan penguncian cepat
Rahang	Dilapisi bahan anti slip
Panjang total	250-300 mm
Torsi Maksimum	320 Nm
Pegangan	Ergonomis dengan lapisan karet
Keunggulan	Operasi satu tangan, cengkraman kuat



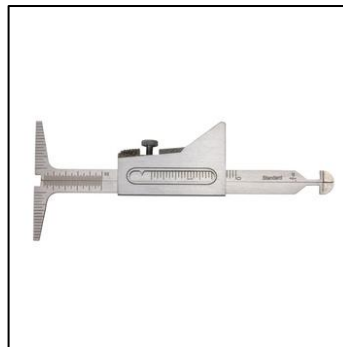
Gambar 96. Tang jepit/klem *tube*

Tabel 5 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Tang Jepit/Klem Tube yang digunakan dalam proses *retubing* pada boiler, mencakup berbagai aspek penting seperti dimensi fisik alat, kapasitas pengukuran yang dapat dilakukan, serta tingkat presisi yang mampu dicapai oleh alat tersebut. Spesifikasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa alat yang digunakan dapat bekerja secara efektif dan akurat dalam mengukur dimensi dan kondisi tube selama proses *retubing*. Adapun bentuk fisik dari Tang Jepit/Klem Tube yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 12, yang secara jelas memperlihatkan struktur dan komponen utama dari alat tersebut, memberikan gambaran visual yang lebih komprehensif sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

f. *Hi-Lo Gauge*

Tabel 9. Spesifikasi dan parameter *Hi-Lo gauge*

Parameter	Spesifikasi
Fungsi	Mengukur ketidaksesuaian (misalignment) antara dua permukaan yang akan dilas
Material	Stainless steel berkualitas tinggi
Skala pengukuran	0 - 5 mm dengan ketelitian 0,1 mm
Rentang pengukuran	Internal dan eksternal joint misalignment
Desain	Compact, portable, dan tahan korosi
Aplikasi	Pengukuran high-low pada sambungan pipa
Fitur tambahan	Terdapat skala metrik dan imperial
Ketahanan	Tahan panas dan tahan korosi



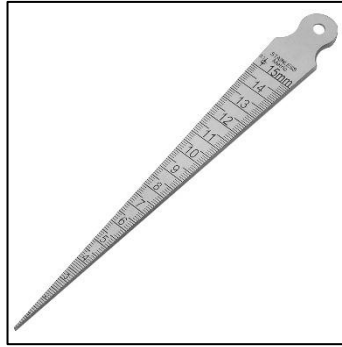
Gambar 97. *Hi-lo gauge*

Tabel 6 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Hi-Lo gauge* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Hi-Lo gauge* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 13, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

g. *Taper gauge*

Tabel 10. Spesifikasi dan parameter *taper gauge*

Parameter	Spesifikasi
Fungsi	Mengukur celah atau jarak antara permukaan sambungan
Material	Baja paduan presisi
Rentang pengukuran	0,5 - 15 mm
Ketelitian	0,1 mm
Bentuk	Desain baji yang tipis pada satu ujung dan tebal di ujung lainnya
Skala	Memiliki skala pengukuran yang terukir pada permukaan
Aplikasi	Pengukuran root gap pada sambungan las
Dimensi	Panjang 150 mm × lebar 25 mm (standar)



Gambar 98. *Taper gauge*

Tabel 7 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Taper Gauge* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Taper Gauge* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 14, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

h. Mesin Las GTAW

Tabel 11. Spesifikasi dan parameter mesin Las GTAW

Parameter	Spesifikasi
Tegangan input	220V ± 15%
Frekuensi	50/60 Hz
Daya input	6,2 kVA
Rentang arus	5 - 200 A
Duty cycle	60% pada 200 A
Metode pendinginan	Kipas
Diameter kawat	0,8 - 2,4 mm
Efisiensi	> 85%
Kelas proteksi	IP23
Berat	15 kg



Gambar 99. Mesin Las GTAW

Tabel 8 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin Las GTAW yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Mesin Las GTAW yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 15, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

i. Kawat Las GTAW

Tabel 12. Spesifikasi dan parameter kawat las GTAW

Parameter	Spesifikasi
Tipe	CHG-56
Ukuran	2,4 × 1000 mm
Material	ER70S-6 Baja karbon
Kekuatan tarik	560 MPa
Perpanjangan	> 22%
Komposisi	C: 0,06-0,15%, Si: 0,75-1,1%, Mn: 1,4-1,85%
Aplikasi	Pengelasan baja karbon untuk boiler
Posisi las	Semua posisi



Gambar 100. Kawat Las GTAW

Tabel 9 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Kawat Las GTAW yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Kawat Las GTAW yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 16, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

j. Mesin Las GMAW

Tabel 13. Spesifikasi dan Parameter Mesin Las GMAW

Parameter	Spesifikasi
Tegangan input	3 fase, 380V ± 15%
Frekuensi	50/60 Hz
Daya input	8,6 kVA
Rentang arus	30 - 250 A
Duty cycle	60% pada 250 A
Diameter kawat	0,8 - 1,2 mm
Kecepatan kawat	2 - 15 m/min
Kelas proteksi	IP21S
Berat	19 kg



Gambar 101. Mesin Las GMAW

Tabel 10 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin Las GMAW yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Mesin Las GMAW yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 17, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

k. Kawat Las GMAW

Tabel 14. Spesifikasi dan Parameter Kawat Las GMAW

Parameter	Spesifikasi
Tipe	HTW-50
Material	ER70S-6 Baja karbon
Kekuatan tarik	550 MPa
Perpanjangan	> 22%
Komposisi	C: 0,06-0,15%, Si: 0,8-1,15%, Mn: 1,4-1,85%
Aplikasi	Pengelasan MIG untuk konstruksi boiler
Gas pelindung	CO ₂ atau campuran Ar/CO ₂
Diameter	0,8 - 1,2 mm



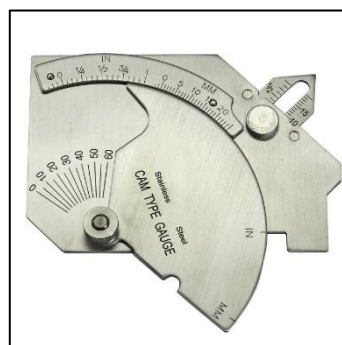
Gambar 102. Kawat Las GMAW

Tabel 11 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Kawat Las GMAW yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari Kawat Las GMAW yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 18, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

1. Welding Gauge

Tabel 15. Spesifikasi dan Parameter Welding Gauge

Parameter	Spesifikasi
Fungsi	Mengukur berbagai parameter las (tinggi, lebar, sudut)
Material	Stainless steel tahan aus
Jenis pengukuran	Fillet weld, butt weld, undercut, throat thickness
Skala	Metrik dan imperial
Ketelitian	0,1 mm / 1/64 inci
Rentang sudut	0° - 60°
Fitur tambahan	Radius gauge dan skala pengukuran terintegrasi
Tipe	Kaliber las multi-fungsi
Dimensi	100 × 60 × 1,5 mm (standar)



Gambar 103. *Welding Gauge*

Tabel 12 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Welding Gauge* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Welding Gauge* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 19, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

m. Digital Vernier Caliper

Tabel 16. Spesifikasi dan Parameter *Digital Vernier Caliper*

Parameter	Spesifikasi
Rentang pengukuran	0 - 150 mm / 0 - 6 inci
Resolusi	0,01 mm / 0,0005 inci
Akurasi	±0,02 mm
Layar	LCD digital dengan 5 digit
Material	Stainless steel hardened
Baterai	SR44 (1,5V)
Fitur tambahan	Konversi metrik/imperial, zero setting di semua posisi
Durasi baterai	Sekitar 5000 jam
Sistem pengukuran	Linear capacitance
Rating IP	IP54 (tahan debu dan percikan air)



Gambar 104. *Digital Vernier Caliper*

Tabel 13 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Digital Vernier Caliper* yang digunakan dalam proses *retubing* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Digital Vernier Caliper* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 20, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

B. Sandblasting

a. Mesin Sandblasting

Tabel 17. Spesifikasi dan Parameter Mesin Sandblasting

Parameter	Spesifikasi
Merk	Sand Blasco
Model	SB-3000
Tekanan operasi	6-8 bar
Kapasitas tangki	200 liter
Konsumsi udara	350-500 l/min
Daya	5,5 kW
Diameter selang	32 mm
Material tangki	Baja karbon dengan lapisan anti-abrasif
Sistem kontrol	Tekanan pneumatik dengan katup pengaman
Jarak semprotan efektif	15-45 cm
Kecepatan blasting	15-25 m ² /jam



Gambar 105. Mesin Sandblasting

Tabel 14 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin Sandblasting yang digunakan dalam proses metal coating pada boiler, yang mencakup berbagai aspek penting seperti dimensi alat, kapasitas pengukuran yang dapat dicapai, serta tingkat presisi yang dihasilkan oleh alat tersebut. Spesifikasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa Mesin Sandblasting yang digunakan memiliki kinerja yang optimal dalam membersihkan permukaan sebelum proses pelapisan logam, serta memberikan hasil yang akurat dan konsisten. Adapun bentuk fisik dari Mesin Sandblasting yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 21, yang secara jelas memperlihatkan struktur dan komponen utama dari alat tersebut, memberikan gambaran visual yang lebih lengkap dan terperinci sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya. Gambar ini memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai desain dan fungsionalitas

alat, sehingga mempermudah dalam memahami cara kerja Mesin Sandblasting dalam proses metal coating yang sangat krusial bagi kelancaran operasional boiler.

b. Alat Ukur Elcometer 124

Tabel 18. Spesifikasi dan Parameter Elcometer 124

Parameter	Spesifikasi
Model	124 Thickness Gauge
Rentang pengukuran	0-1000 μm
Akurasi	$\pm 5\%$ atau $\pm 1 \mu\text{m}$
Resolusi	1 μm
Metode pengukuran	Non-destruktif dengan induksi magnetik
Kalibrasi	Auto-kalibrasi dengan standar referensi
Memori	Penyimpanan hingga 1500 pengukuran
Baterai	Lithium-ion, masa pakai 20 jam
Layar	Digital LCD dengan backlight
Sertifikasi	ISO 2808 dan ASTM D1186



Gambar 106. Mesin Sandblasting

Tabel 15 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin Sandblasting yang digunakan dalam proses metal coating pada boiler, meliputi berbagai aspek penting seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi yang dihasilkan oleh alat tersebut. Spesifikasi ini sangat krusial untuk memastikan bahwa Mesin Sandblasting dapat beroperasi dengan efisien dan efektif, menjaga konsistensi kualitas hasil coating dan memastikan permukaan boiler siap untuk proses pelapisan lebih lanjut. Adapun bentuk fisik dari Mesin Sandblasting yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 22, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat tersebut secara visual, memberikan gambaran yang lebih jelas tentang desain dan fungsionalitasnya sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya. Gambar ini memberikan pemahaman lebih mendalam tentang bagaimana alat ini diterapkan dalam operasional boiler, serta bagaimana komponen-komponen utama alat bekerja secara sinergis untuk mendukung proses metal coating dengan hasil yang optimal.

c. Replica Tape

Tabel 19. Spesifikasi dan Parameter *Replica Tape*

Parameter	Spesifikasi
Jenis	Testex Press-O-Film Replica Tape
Rentang pengukuran	20-115 μm
Tipe	X-Coarse dengan rentang 38-115 μm
Material	Film mylar dengan lapisan compressible foam
Standar	Memenuhi NACE RP0287 dan ASTM D4417-B
Warna	Merah untuk mempermudah identifikasi
Ukuran	50 mm \times 50 mm per lembar
Ketebalan dasar	50 μm
Akurasi	$\pm 5 \mu\text{m}$
Penggunaan	Sekali pakai (single-use)



Gambar 107. *Replica Tape*

Tabel 16 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Replica Tape yang digunakan dalam proses metal coating pada boiler, meliputi berbagai aspek penting seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta ketelitian alat tersebut. Spesifikasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa Replica Tape dapat menghasilkan pengukuran yang akurat dan sesuai dengan standar yang ditetapkan untuk kualitas coating pada permukaan boiler. Adapun bentuk fisik dari Replica Tape yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 23, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat tersebut secara visual. Gambar ini memberikan gambaran lebih jelas tentang desain dan fungsionalitas alat, serta memberikan konfirmasi tambahan mengenai kesesuaian antara data spesifikasi dan alat yang digunakan dalam proses pengukuran, sehingga memastikan hasil pengukuran yang optimal dalam mendukung proses metal coating.

d. Material *Sandblasting*

Tabel 20. Spesifikasi dan Parameter Material *Sandblasting*

Parameter	Spesifikasi
Material	Aluminium Oxide
Ukuran	#24 (710-850 μm)
Kekerasan	9 Mohs / 2100 Knoop
Bentuk partikel	Angular (bersudut tajam)
Densitas	3,95 g/cm ³
Kemurnian	95.5% minimum Al ₂ O ₃
Profil kekasaran	75-100 μm pada permukaan baja
Recycling rate	Dapat digunakan kembali 3-5 kali
Warna	Coklat keputihan
Aplikasi	Pembersihan permukaan logam, persiapan coating, dan penghilangan karat
Standar	Memenuhi ISO 11126-7 dan SSPC-AB 1



Gambar 108. Material *Sandblasting*



Gambar 109. Partikel Material *Sandblasting*

Tabel 17 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Material Sandblasting* yang digunakan dalam proses *metal coating* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun

bentuk fisik dari *Material Sandblasting* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 24 dan 25, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

C. Metal Coating

a. Mesin Metal Coating

Tabel 21. Spesifikasi dan Parameter Mesin *Metal Coating*

Parameter	Spesifikasi
Merk dan Tipe	Arcspray 528E
Tegangan Input	220V/380V/415V 50-60Hz
Daya	5,5 kW
Kapasitas Deposition	8,5 - 35 kg/jam
Ukuran Wire	1,6 mm - 2,5 mm
Jarak Semprot	100 - 300 mm
Sistem Kontrol	Microprocessor dengan display digital
Fitur Keamanan	Sistem shutdown otomatis dan perlindungan suhu berlebih
Berat	147 kg
Aplikasi	Ideal untuk anti-korosi dan reklamasi permukaan



Gambar 110. Mesin *Metal Coating*

Tabel 18 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur Mesin Metal Coating yang digunakan dalam proses metal coating pada boiler, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Spesifikasi ini sangat krusial untuk memastikan bahwa Mesin Metal Coating dapat bekerja dengan optimal dalam memberikan hasil yang sesuai dengan standar teknis yang ditetapkan. Adapun bentuk fisik dari Mesin Metal Coating yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 26, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya. Gambar ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai desain dan fungsi alat tersebut, serta memperlihatkan

secara detail bagaimana alat ini diterapkan dalam proses metal coating untuk memastikan kualitas dan keandalan hasil akhir pada boiler.

b. Konsumable *Metal Coating*

Tabel 22. Spesifikasi dan Parameter Konsumable *Metal Coating*

Parameter	Spesifikasi
Merk dan Grade	Dura Metal DM Chemshield-B TWAS
Komposisi	71% Nikel, 17% Krom, 8,5% Besi, 2,5% Silikon, 1% Boron
Ketahanan Korosi	Excellent pada lingkungan asam dan basa
Hardness	52-55 HRC
Ketahanan Temperatur	Hingga 900°C
Ketebalan Aplikasi	150-500 µm
Bond Strength	>70 MPa
Porositas	<2%
Aplikasi	Heat exchanger, boiler tubes, dan vessel yang terpapar lingkungan korosif



Gambar 111. Konsumable *Metal Coating*

Tabel 19 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Konsumable Metal Coating* yang digunakan dalam proses *metal coating* pada boiler, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Konsumable Metal Coating* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 27, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

c. Alat Ukur Elcometer 456

Tabel 23. Spesifikasi dan Parameter Elcometer 456

Parameter	Spesifikasi
Tipe	Elcometer 456
Rentang Pengukuran	0-1500 µm
Akurasi	±1% atau ±1 µm
Resolusi	0,1 µm
Memori	Hingga 150.000 pengukuran dalam 2500 batch
Display	LCD berwarna dengan kemampuan grafis
Konektivitas	USB dan Bluetooth 4.0
Kalibrasi	Otomatis dengan pilihan 1, 2, atau 3 titik
Sertifikasi	ISO 19840, SSPC-PA2, IMO PSPC, ISO 2808
Fitur Tambahan	GPS, statistik real-time, alarm batas pengukuran



Gambar 112. Elcometer 456

Tabel 20 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Elcometer 456* yang digunakan dalam proses *metal coating* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Elcometer 456* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 28 yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

D. Ceramic Coating

a. Konsumable Ceramic Coating

Tabel 24. Spesifikasi dan Parameter *Ceramic Coating*

Parameter	Spesifikasi
Merk dan Tipe	Emisshield M-1 Metal Lot # M-1240529A
Basis Material	Ceramic high-emissivity nanokomposit
Emisivitas	>0,90 pada suhu operasional
Ketahanan Suhu	Hingga 1093°C (2000°F)
Ketebalan Aplikasi	50-75 µm
Ketahanan Korosi	Excellent pada lingkungan termal tinggi
Metode Aplikasi	Spray, brush, atau roller
Waktu Pengeringan	24 jam pada suhu ruang, 1 jam pada 200°C
Keunggulan	Meningkatkan efisiensi termal 5-15%, mengurangi konsumsi bahan bakar



Gambar 113. Konsumable *Ceramic Coating*

Tabel 21 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Konsumable Ceramic Coating* yang digunakan dalam proses *ceramic coating* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Konsumable Ceramic Coating* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 29, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

b. Alat *Spray Gun*

Tabel 25. Tabel Spesifikasi dan Parameter *Spray Gun*

Parameter	Spesifikasi
Tipe	HVLP (High Volume Low Pressure)
Material	Bodi logam (kemungkinan aluminium)
Jenis Cup	Gravity feed (cup atas) / Siphon feed (cup bawah)
Kapasitas Cup	±700-1000 ml
Warna	Silver metalik
Tipe Nozzle	Standar (kemungkinan 1.3-1.8 mm)
Kontrol Pola Semprot	Ya
Kontrol Aliran Cat	Ya
Kontrol Tekanan	Ya
Koneksi Selang	Standard quick-connect



Gambar 114. *Spray Gun*

Tabel 22 menyajikan secara rinci parameter teknis dan spesifikasi dari alat ukur *Spray Gun* yang digunakan dalam proses *ceramic coating* pada *boiler*, meliputi aspek seperti dimensi, kapasitas pengukuran, serta tingkat presisi alat tersebut. Adapun bentuk fisik dari *Spray Gun* yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 30, yang memperlihatkan struktur dan komponen utama alat secara visual sebagai pendukung data spesifikasi yang telah disajikan sebelumnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kontrol kualitas pada pekerjaan *retubing*, metal coating, dan ceramic coating di sisi *front wall* dan *right wall boiler* CFB PLTU Teluk Sirih, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

a. Pekerjaan *retubing*

Tabel 26. Hasil persentase keberhasilan *retubing*

No	Metode Pengukuran	Sisi Boiler	Jumlah Titik Sesuai	Total Titik	Persentase Keberhasilan (%)	Persentase Ketidaksesuaian (%)	Persentase Ketidakpastian (%)
1	Hi-Lo	Front Wall	360	456	79%	21%	5%
		Right Wall	177	280	63%	37%	9%
2	Gap	Front Wall	320	456	70%	30%	2%
		Right Wall	156	280	56%	44%	5%
3	V-Groove	Front Wall	111	114	97%	3%	1%
		Right Wall	65	70	93%	7%	2%
4	Capping	Front Wall	212	228	93%	7%	7%
		Right Wall	121	140	86%	14%	6%
5	Bead Width	Front Wall	164	228	72%	28%	1%
		Right Wall	110	140	79%	21%	2%
Rata-rata Total		-			78.8%	21.2%	4.0%

Secara keseluruhan, proses *retubing* menunjukkan keberhasilan yang cukup baik.

- *Front wall* memiliki tingkat keberhasilan rata-rata 77,94%
- *Right wall* sedikit lebih rendah yakni 75,32%.

Nilai gabungan dari kedua sisi menghasilkan rata-rata 78,8%. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar sambungan telah sesuai spesifikasi, namun perlu perbaikan terutama pada aspek Gap dan *Hi-Lo* yang masih memiliki persentase ketidaksesuaian tinggi di kedua sisi.

b. Pekerjaan metal coating

Tabel 27. Hasil persentase keberhasilan *metal coating*

Sisi Boiler	Standar Ketebalan (µm)	Jumlah Titik Sesuai	Total Titik	Keberhasilan (%)	Ketidaksesuaian (%)	Ketidakpastian (%)
Front Wall	600 – 700	3198	6192	52%	48%	50%
Right Wall	600 – 700	1783	2400	74%	26%	29%
Total Gabungan		4981	8592	58%	42%	40%

Pekerjaan metal coating menghasilkan kualitas aplikasi pelapis logam yang cukup baik.

- Pada *Front wall*, keberhasilan mencapai 52%, ketidaksesuaian 48% dan ketidakpastian 50%.
- Sedangkan *Right wall* lebih tinggi keberhasilannya di 74%, ketidaksesuaian 26% dan ketidakpastian 29%.
- Nilai total dari kedua sisi menunjukkan tingkat keberhasilan 58%, ketidaksesuaian 42% dan ketidakpastian 40% menandakan pelapisan metal coating telah dilakukan dengan teknik yang cukup presisi namun perlu peningkatan pada area sulit jangkau terutama di sisi depan (*front wall*).

c. Pekerjaan ceramic coating

Tabel 28. Hasil persentase keberhasilan *ceramic coating*

Sisi Boiler	Standar Ketebalan (µm)	Jumlah Titik Sesuai	Total Titik	Keberhasilan (%)	Ketidaksesuaian (%)	Ketidakpastian (%)
Front Wall	150 – 250	3980	6192	64%	36%	36%
Right Wall	150 – 250	1945	2400	81%	19%	28%
Total Gabungan		5925	8592	69%	31%	32%

- Kualitas pekerjaan ceramic coating tergolong sangat baik, terutama pada *Right wall* yang mencapai keberhasilan 81%, ketidaksesuaian 19% dan ketidakpastian 28%.
- *Front wall* sedikit lebih rendah dengan keberhasilan 64%, ketidaksesuaian 36% dan ketidakpastian 36% namun masih dalam kategori baik.
- Nilai total keseluruhan menunjukkan keberhasilan 69%, ketidaksesuaian 31% dan ketidakpastian 32% yang menandakan bahwa pelapisan keramik dilakukan secara merata dan telah memenuhi standar ketebalan pelindung panas sesuai spesifikasi.

2. Saran

- a. Peningkatan kontrol pada tahap persiapan pengelasan (*fit-up*) sangat penting, khususnya untuk parameter *Hi-Lo* dan *Gap*, agar proses penyambungan pipa dapat mencapai kesejajaran yang optimal dan menghindari cacat struktural jangka panjang.
- b. Optimalkan teknik aplikasi coating (baik metal maupun ceramic) dengan menjaga kecepatan semprot dan sudut semprotan, serta melakukan koreksi segera pada titik-titik yang deviasi, untuk memastikan perlindungan maksimal terhadap erosi, korosi, dan gangguan termal.
- c. Selalu mengecek alat kerja bisa berfungsi dengan baik atau tidak agar pekerjaan *retubing*, metal coating dan ceramic coating hasilnya sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan oleh dokumen pengadaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Ghosh, H. Roy, A. Saha, and C. Subramanian, “*Failure analysis of boiler water wall tube a case study from thermal power plant,*” *J. Fail. Anal. Prev.*, pp. 1–6, 2021, doi: 10.1007/s11668-021-01271-y.
- [2] N. N. Aini and C. D. Widiawaty, “Analisis mekanisme kegagalan pada pipa boiler menggunakan metode *root cause failure analysis* (RCFA),” pp. 494–501, [Online]. Available: http://semnas.mesin.pnj.ac.id/prosiding/2018_pdf/A056.pdf
- [3] J. Ilmiah and W. Pendidikan, “Sistem pengendalian kualitas (*quality control*) pada proses fabrikasi *project refinery development master plan* (RDMP),” vol. 8, no. September, pp. 228–237, 2022, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7049124> p-ISSN:
- [4] R. Nurhasanah, J. T. Mesin, O. Firdaus, and J. T. Mesin, “Perbandingan efisiensi boiler awal operasi dan setelah *overhaul* terakhir di unit 5 PLTU Suralaya,” pp. 44–48, [Online]. Available: <https://jurnalitpln.id/powerplant/article/view/835>
- [5] A. Vizenza and J. Sarsetiyanto, “Analisis unjuk kerja siklus *rankine* sebelum dan sesudah *overhaul* pada PLTU unit 2 PT PJB UP,” 2017, [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/48180/>
- [6] P. Dinata, “Pengenalan PLTU Teluk Sirih”, [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/449720685/Pengenalan-PLTU-Teluk-Sirih-pdf>
- [7] Y. Gunawan *et al.*, “*Management analysis of boiler efficiency with a steam production capacity of 220 tons / hour at Barru power plant, South Sulawesi,*” vol. 01, no. 01, pp. 6–10, 2024, [Online]. Available: <https://ijdes.uho.ac.id/index.php/journal/article/view/1/1>
- [8] R. K. Shah and D. P. Sekulic, “*Fundamental of heat exchanger design.*” [Online]. Available: <https://www.academia.edu/4233792>
- [9] R. M. Wijayanto, B. Sudarmanta, and A. Syaifudin, “*CFD simulation of circulating fluidized bed boiler 30 MW effect of primary and secondary air distribution on fluidization behavior,*” no. July, 2018, doi: 10.1063/1.5046214.
- [10] R. Cai, X. Ke, and J. Lyu, “*Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China a review,*” no. November, pp. 1–14, 2017, doi: 10.1093/ce/zkx001.

- [11] Q. Zhu, “*Developments in circulating fluidised bed combustion*,” no. April. 2013. [Online]. Available: [https://usea.org/sites/default/files/042013_Developments in circulating fluidised bed combustion_ccc219.pdf](https://usea.org/sites/default/files/042013_Developments%20in%20circulating%20fluidised%20bed%20combustion_ccc219.pdf)
- [12] H. Yang, G. Yue, and H. Zhang, “*Updated design and operation experience of CFB boilers with energy saving process in China*,” no. December 2015, 2011, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/280901880>
- [13] J. Koornneef, M. Junginger, and A. Faaij, “*Development of fluidized bed combustion an overview of trends, performance and cost*,” vol. 33, pp. 19–55, 2007, doi: 10.1016/j.peccs.2006.07.001.
- [14] Z. Wang and X. Yang, “*Applied sciences NOx formation mechanism and emission prediction in turbulent combustion a review*,” 2024, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/382234272>
- [15] W. U. Prakarsa and K. Dewi, “*The effect of power plant characteristics on CO₂ emission factor development a case study of coal fired power plants in Indonesia*,” vol. 9, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.23969/jcbeem.v9i1.18935.
- [16] S. Tavoulareas, T. Boyd, and S. Babbar, “*The current state of atmospheric fluidized bed combustion technology*,” no. v. 23-107. in *Technical Papers*. World Bank, 1989. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=wMUIAQAAMAAJ>
- [17] B. Leckner, “*Fluidized bed combustion Mixing and pollutant limitation*,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 24, no. 1, pp. 31–61, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00021-X](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00021-X).
- [18] J. R. Grace, H. Bi, and M. Golriz, “*Circulating fluidized beds*,” *Chem. Ind. YORK-MARCEL DEKKER*-, pp. 485–544, 2003, doi: 10.1007/978-94-009-0095-0.
- [19] P. Basu, “*Combustion and gasification in fluidized beds*,” *CRC Press google Sch.*, vol. 2, pp. 20–29, 2006, doi: 10.1201/9781420005158.
- [20] A. Franco and A. Diaz Vazuquez, “*The future challenges for clean coal technologies joining efficiency increase and pollutant emission control*,” *Energy*, pp. 348–354, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.energy.2008.09.012.
- [21] D. N. French and D. N. French, “*Failures of boilers and related equipment*”, [Online]. Available: <https://www.academia.edu/35157015>
- [22] P. Basu and S. Fraser, “*Circulating fluidized bed boilers design and operations*,” p. 1423, [Online]. Available: <https://www.academia.edu/122369975>

- [23] D. K. BHATTACHARYA, “*Non destructive test techniques for boiler systems*”, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/297712838.pdf>
- [24] M. Brumovsky, B. Elliot, and C. Faigy, “*Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety PWR vessel internals*,” no. June, 2007, [Online]. Available: <https://www.iaea.org/publications/7740>
- [25] I. B. Rahardja, A. Mahfud, and A. Muhammad, “*The optimization of capacity boiler efficiency 26 tons/hours with fuel alumination and statistical product and service solutions (SPSS) analysis*,” vol. 2, no. 2, pp. 113–185, 2021, doi: <https://doi.org/10.34306/ajri.v2i2.70>.
- [26] S. A. J. Jahromi, S. Javadpour, and K. Gheisari, “*Failure analysis of welded joints in a power plant exhaust flue*,” no. June, 2006, doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.02.019.
- [27] A. A. H. Al-amiery and A. A. H. Kadhum, “*Advances in corrosion protection coatings a comprehensive review*,” no. June 2024, 2023, doi: 10.17675/2305-6894-2023-12-4-6.
- [28] C. Gachot, A. Rosenkranz, and S. M. Hsu, “*A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement*,” vol. 373, pp. 21–41, 2017, doi: 10.1016/j.wear.2016.11.020.
- [29] G. Chate, R. Kulkarni, and V. R. Chate, “*Ceramic material coatings emerging future applications*,” no. January, pp. 2–17, 2023, doi: 10.1016/B978-0-323-99624-2.00007-3.
- [30] E. V. V Ramanamurthy, N. Gaurav, and A. Paudel, “*Effect and optimization of performance of ceramic coated internal effect and optimization of performance of ceramic coated internal combustion engine*,” no. June, 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.766-767.546.
- [31] S. H. Zala and A. H. Rana, “*Performance analysis of industrial boiler performance analysis of industrial boiler*,” no. April 2019, 2023, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/376400321>
- [32] S. Cicero, F. Gutierrez Solana, and J. . Alvarez, “*Structural integrity assessment of different components of a power plant Structural integrity assessment of different components of a power plant*,” no. March, 2007, doi: 10.1016/j.engfailanal.2006.02.005.

- [33] M. Walidi, E. A. Basuki, B. Prawara, E. Martides, and E. Juniarto, “Kajian *thermal spray coating* dengan teknologi *high velocity oxy-fuel* (HVOF) serta perlakuan pasca prosesnya sebagai pelindung *boiler tubes* pembangkit listrik tenaga uap,” vol. 3, no. 1, pp. 41–60, 2023, doi: <https://doi.org/10.54082/jupin.124>.
- [34] I. D. Hasbi Risqullah¹, Kardiman², “Proses *sandblasting* dalam proses fabrikasi baja struktur pada proyek *refinery development master plan* (RDMP) di PT AJP,” vol. 8, no. September, pp. 264–275, 2022, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7049222>.
- [35] A. Bigwanto, D. Djumhariyanto, and S. Mulyadi, “Analisis proses *sandblasting* dengan variasi jarak, sudut dan waktu terhadap kekasaran permukaan dengan metode *respon surface*,” 2018, [Online]. Available: <https://www.academia.edu/104420320>

LAMPIRAN

1. Data Hasil *Retubing*

Ini merupakan data hasil pelaksanaan pekerjaan *retubing*, yang mencakup hasil pengukuran parameter penting seperti *Hi-Lo*, *gap*, *v-groove*, *capping*, dan *bead width*. Data ini diperoleh sebagai bagian dari proses inspeksi kualitas untuk memastikan bahwa setiap tahapan penyambungan pipa telah memenuhi standar teknis yang ditetapkan. Berikut tabel hasil pekerjaan *retubing*:

Tabel 29. Hasil Data Pengukuran *Hi-Lo* Sisi *Front wall*

NO <i>TUBE</i>	NO POINT	<i>Hi-Lo</i> (mm)			
		0°	90°	180°	270°
1	1	0.5	0.5	0.5	0.5
	2	0.7	0.8	0.7	0.8
2	3	1.2	1.2	1	1
	4	1.2	1.5	1.2	1.5
3	5	0.5	1	0.5	1
	6	0.9	0.9	0.9	0.9
4	7	1.2	1.5	1.5	1.5
	8	1.5	1.2	1.5	1.2
5	9	1	1.2	1	1.2
	10	2.1	2.2	2.2	2.3
6	11	1.2	1.2	1.2	1.2
	12	1.5	1	1	1
7	13	1	1	1.2	1
	14	0.5	1	0.5	1.2
8	15	0.9	1	0.8	1
	16	1	1	1	1
9	17	0.5	1	0.5	1
	18	1.2	2	1.2	2
10	19	2	1.8	2	1.9
	20	0.9	0.8	0.9	0.8
11	21	0.9	0.9	0.9	0.9
	22	1.4	1.4	1.4	1.4
12	23	0.9	0.9	0.9	0.8
	24	1	1	1	1
13	25	1	1.2	1	1.2
	26	1.5	1.5	1.5	1.5
14	27	1.3	1.2	1.3	1.2

	28	2.5	3	2.5	3
15	29	1.5	1.5	1.5	1.5
	30	1	1	1	1
16	31	2	2	2	2
	32	2.2	2.3	2.1	2.2
17	33	1.5	1.5	1.5	1.5
	34	1	1.2	0.8	1.2
18	35	1	1.2	1	1.2
	36	0.5	0.5	0.5	0.5
19	37	1	1	1	1
	38	1	1	1	1
20	39	1.5	1.5	1.5	1.5
	40	1.9	2	2	2.1
21	41	1.3	1.2	1.1	1.2
	42	1.8	2	1.9	2
22	43	1	1.2	0.8	1.2
	44	2	2.1	2	2
23	45	0.5	0.5	0.5	0.5
	46	1	1	1	1
24	47	1	1	1	1
	48	2	2.1	2.1	2
25	49	0.5	0.8	0.5	0.5
	50	0.5	1.5	1	0.5
26	51	0.5	1	1	0.5
	52	1.5	2	2	2
27	53	1.4	1.2	1.2	1.2
	54	0.5	0.5	0.5	0.5
28	55	2	1.2	2	2
	56	1.5	1.5	1.5	1.5
29	57	1.5	1.5	1.5	1.5
	58	1.5	1.5	1.5	1.5
30	59	1	1	1.5	2
	60	1	2	2	1
31	61	0.5	0.5	0.5	0.5
	62	0.5	0.5	0.5	0.5
32	63	3	2.9	3	2.9
	64	2.5	2.4	2.5	2.6
33	65	1	1.1	1.2	1
	66	1	1.5	1.2	1.3
34	67	1.1	1.2	1.1	1.3
	68	1.5	1.5	1.5	1.5
35	69	1.2	1.2	0.5	1.2
	70	2	2	1.2	1.2
36	71	2.3	2.6	2.3	2.5
	72	0.5	1	0.5	1.2

37	73	2	1	2	1
	74	1	1	1	1
38	75	0.9	0.8	0.9	0.8
	76	1.5	1.2	1.5	1.2
39	77	1.2	1.3	1.2	1.3
	78	1	1	1	1
40	79	1	0.9	0.8	0.9
	80	1.3	1.3	1.2	1.3
41	81	2	2.2	2.1	2.1
	82	1.5	1.4	1.5	1.4
42	83	1	1	1	1
	84	1.2	1.2	1.3	1.2
43	85	1	1.2	1	0.9
	86	1.2	1.2	0.5	1.2
44	87	0.6	0.5	0.5	0.5
	88	1	1	1.5	1
45	89	1	2	2	1
	90	0.5	0.5	0.5	0.5
46	91	1.3	1.2	1.1	1.2
	92	1.8	2	1.9	2
47	93	2.1	2.1	2.1	2.2
	94	1	2.5	0.8	1.2
48	95	2	2.1	2	2
	96	1.5	1.5	1.5	1.5
49	97	1.2	2	1.2	2
	98	1.8	2	1.9	2.2
50	99	2	2	1.2	1.2
	100	1.2	1.1	1.1	1.1
51	101	0.5	0.5	0.5	0.5
	102	0.5	0.5	0.5	1
52	103	1.5	1.5	1.5	1.5
	104	1.2	1.2	1.2	1.2
53	105	1.3	1.2	1.1	1.2
	106	1.2	1.3	1.2	1.3
54	107	1	1	1	1
	108	1	0.9	0.8	0.9
55	109	1.3	1.3	1.2	1.3
	110	2	2	2	2
56	111	0.8	0.9	1	0.9
	112	1.2	1.2	1.2	1.2
57	113	1	1	1	1
	114	1.2	2	1.2	2
Average		1.3	1.3	1.3	1.3
Maximum		3	2.9	3	2.9
Minimum		0.5	0.5	0.5	0.5

Unc	1.25	1.2	1.25	1.2
Percentage of Unc	5%	5%	5%	5%

Tabel 30. Nilai Deviasi *Hi-Lo* sisi *front wall*

<i>Hi-Lo (mm)</i>				
Deviation 0°	Deviation 90°	Deviation 180°	Deviation 240°	Deviation ALL
0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
0.0	0.2	0.1	0.4	0.2
0.3	0.1	0.3	0.1	0.2
0.2	0.2	0.0	0.2	0.2
0.8	0.7	0.8	0.8	0.6
0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
0.4	0.0	0.5	0.1	0.3
0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
0.5	0.7	0.5	0.7	0.6
0.8	0.7	0.8	0.8	0.6
0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.4	0.2	0.4	0.2	0.2
0.8	1.3	0.8	1.3	0.8
0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
0.4	0.2	0.5	0.2	0.3
0.4	0.5	0.4	0.5	0.3

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.3	0.4	0.4	0.4	0.3
0.4	0.6	0.6	0.6	0.4
0.7	0.6	0.8	0.6	0.5
0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
0.7	0.8	0.8	0.7	0.6
0.0	0.5	0.4	0.0	0.4
0.7	0.7	0.7	1.1	0.7
0.6	0.5	0.5	0.5	0.4
0.4	0.2	0.4	0.4	0.3
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.7	0.4	0.7	0.5
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4	0.4	0.4	0.2	0.2
0.0	0.3	0.0	0.2	0.2
0.3	0.2	0.3	0.1	0.2
0.6	0.6	0.5	0.0	0.5
1.3	1.1	1.3	0.9	0.9
0.7	0.0	0.7	0.0	0.5
0.4	0.3	0.4	0.3	0.3
0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
0.2	0.3	0.3	0.3	0.2

0.4	0.6	0.4	0.5	0.4
0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
0.1	0.0	0.4	0.2	0.2
0.3	0.4	0.7	0.4	0.4
0.4	1.1	1.1	0.4	0.7
0.4	0.6	0.6	0.6	0.4
0.8	0.3	0.9	0.7	0.6
0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
0.4	0.0	0.5	0.1	0.4
0.6	0.6	0.1	0.1	0.4
0.0	0.0	0.0	0.4	0.2
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
0.5	0.5	0.6	0.5	0.4
0.3	0.2	0.1	0.2	0.2
0.1	0.7	0.1	0.7	0.4

Tabel 31. Hasil Data Pengukuran Gap Sisi *Front wall*

NO <i>TUBE</i>	NO POINT	GAP (mm)			
		0°	90°	180°	270°
1	1	2.9	2.9	2.8	2.8
	2	3.8	4	4	4

2	3	3	3	3	3
	4	3	3	2.9	2
3	5	2.7	2.7	2.8	2.8
	6	3	3	3	3
4	7	2.8	2.2	2.5	2.5
	8	3	3	2.9	3
5	9	2.8	2.9	2.8	2.7
	10	2.1	2.2	2.2	2.3
6	11	2.5	2.5	2.5	2
	12	1.5	1.5	1.6	1.5
7	13	2.2	2.2	2.2	2.2
	14	2.8	2.9	2.9	2.8
8	15	2.8	2.9	2	2.8
	16	2.2	2.2	2.3	2.2
9	17	2.5	2.5	2.5	2.5
	18	3	3	2.9	3
10	19	2.5	2.6	2.5	2.4
	20	2.5	2.5	2.5	2.5
11	21	3	2.6	2.5	2.6
	22	3	2.8	2.9	2.6
12	23	3	2.8	2.9	2.9
	24	2.5	2.3	2.2	2.3
13	25	2.5	2.6	2.5	2.5
	26	3	3	3	3
14	27	2.2	2.2	2.2	2.2
	28	4	4.3	5	5
15	29	3	2	3	2.5
	30	2.5	2.5	2.4	2.4
16	31	4	4.2	4.2	4.5
	32	3	5	4	3.8
17	33	3	2.5	2.5	2.5
	34	2.9	2.9	2.8	3
18	35	3	2.6	2.4	2.5
	36	2.2	2.2	2.2	2.2
19	37	2.5	2.5	2.1	2.6
	38	3	3	3	3
20	39	3	3	3	3
	40	3	3	2	3
21	41	3	3.5	4	5
	42	4.8	4.8	4.9	4.8
22	43	3	3	3	3
	44	4	4	5	4
23	45	2.2	2.2	2	2.2
	46	3.5	4	5	4.5
24	47	3	3	3	3

	48	4	4	4	4
25	49	2	2	2	2
	50	2.4	2.3	2.3	2.4
26	51	2.8	2.8	2.8	2.8
	52	5	4	4.8	5
27	53	4.5	4	5	4.1
	54	3	3	3	3
28	55	4.8	4.7	4.5	4.8
	56	3	3	3	3
29	57	2	2.5	2.5	2.5
	58	2.5	2.5	2.5	2.5
30	59	4.2	5	4	4
	60	4	4.5	5	4.5
31	61	2.2	2.3	2.3	2.3
	62	3	3	2.8	2.5
32	63	2.5	2.6	2.5	2.7
	64	3	3	3	3
33	65	3	3	3	2
	66	2	2	2.2	2.2
34	67	2.6	2.5	2.5	2.5
	68	3	2.5	2.5	3
35	69	2	2.5	2.4	2
	70	3.4	4	3.4	3.5
36	71	2	3	3	3
	72	4	3.8	3.5	3.2
37	73	3	2.9	3	3
	74	3.8	3.2	3	3.5
38	75	3	3	3	2.2
	76	2.9	2.8	2.9	2.9
39	77	3	3	3	3
	78	2.8	2.2	2.5	2.5
40	79	3	3	3	3
	80	2.9	2.8	2.8	2.8
41	81	3	3	3.2	3
	82	2.6	2.6	2.6	2.7
42	83	4	3.5	3.5	3.2
	84	1.9	1.8	1.8	1.8
43	85	2.9	3	3	3
	86	2	1.9	2.4	2
44	87	3	3	2.9	2.9
	88	4.2	5	4	4
45	89	4	4.5	4	4.5
	90	2.2	2.2	2.2	2.2
46	91	2.5	2.5	2.5	2.5
	92	4.8	4.8	4.9	4.8

47	93	4	4	4.2	4.5
	94	3	3	3	3
48	95	4	4	5	4
	96	2	2	2	2
49	97	2.8	3	3.5	3.5
	98	2.8	3	3	3
50	99	3.4	4	3.4	3.5
	100	2	2.5	2.5	2.4
51	101	3	3	3	3
	102	3	3	3	3
52	103	3	3	2.9	3
	104	3	3	2.8	3
53	105	2.1	2.1	2.1	2.1
	106	3	3	3	3
54	107	2.2	2.2	2.5	2.5
	108	3	3	3	3
55	109	3	3	2	2
	110	2	3	3	3
56	111	2.2	2.1	2	2.3
	112	2.1	2.7	2.8	2.8
57	113	2.1	2.4	2.4	2.4
	114	2.8	3	3.5	3.5
Average		3.0	3.0	3.0	3.0
Maksimum		5	5	5	5
Minimum		1.9	1.8	1.8	1.8
Uncertainly		1.55	1.6	1.6	1.6
Percentage of unc		2%	2%	2%	2%

Tabel 32. Hasil data pengukuran *gap* sisi *right wall*

GAP (mm)				
Deviation 0°	Deviation 90°	Deviation 180°	Deviation 240°	Deviation ALL
0.6	0.8	0.8	0.8	0.6
0.0	0.0	0.1	0.7	0.4
0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
0.1	0.6	0.3	0.4	0.3
0.5	0.5	0.4	0.3	0.3

0.7	0.7	0.6	0.4	0.5
0.4	0.5	0.5	0.4	0.3
0.4	0.5	0.2	0.4	0.3
0.4	0.4	0.3	0.4	0.3
0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
0.0	0.1	0.3	0.0	0.2
0.4	0.4	0.5	0.4	0.3
0.4	0.3	0.4	0.4	0.3
1.3	1.5	2.0	2.0	1.3
0.4	0.4	0.4	0.1	0.3
0.7	0.6	0.1	0.5	0.6
0.1	0.3	0.2	0.4	0.2
0.6	0.3	0.1	0.2	0.3
0.4	0.4	0.6	0.3	0.3
0.0	0.0	0.7	0.0	0.4
1.3	0.9	0.6	0.1	0.8
0.7	0.7	1.4	0.7	0.7
0.9	1.3	2.1	1.6	1.2
0.7	0.7	0.7	0.7	0.5
0.3	0.2	0.2	0.3	0.2
1.6	0.8	1.4	1.6	1.1
1.1	0.7	1.4	0.8	0.8
1.3	1.2	1.1	1.3	0.9

0.4	0.0	0.0	0.0	0.2
0.1	0.4	0.7	0.4	0.4
0.6	0.5	0.4	0.1	0.3
0.4	0.3	0.4	0.2	0.2
0.7	0.7	0.6	0.1	0.5
0.3	0.0	0.0	0.4	0.2
1.0	1.1	0.7	1.1	0.8
1.4	0.6	0.4	0.1	0.6
0.6	0.2	0.0	0.4	0.3
0.1	0.1	0.1	0.5	0.3
0.1	0.6	0.4	0.4	0.3
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
0.3	0.3	0.4	0.2	0.2
1.5	1.2	1.2	1.0	0.9
0.6	0.8	0.4	0.7	0.5
0.8	1.4	0.8	0.8	0.8
1.3	1.6	1.3	1.6	1.1
1.6	1.6	1.7	1.6	1.2
0.7	0.7	0.8	1.1	0.6
1.4	1.4	2.1	1.4	1.2
0.0	0.0	0.4	0.4	0.3
1.0	1.1	0.6	0.8	0.7

0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
0.6	0.6	0.6	0.6	0.5
0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
0.7	0.0	0.7	0.7	0.5
0.1	0.4	0.6	0.4	0.3
0.5	0.4	0.8	0.8	0.5

Tabel 33. Hasil data pengukuran dan nilai deviasi V-Groove sisi *front wall*

NO <i>TUBE</i>	NO POINT	V-Groove (°)			Deviation ALL
		Top	Under	Sudut V Total	
1	1	30	30	60	0
	2	30	30	60	
2	3	30	30	60	4
	4	25	30	55	
3	5	30	30	60	0
	6	30	30	60	
4	7	30	30	60	4
	8	30	25	55	
5	9	30	30	60	11
	10	25	20	45	
6	11	30	30	60	4
	12	25	30	55	
7	13	30	30	60	0
	14	30	30	60	
8	15	30	30	60	0
	16	30	30	60	
9	17	30	30	60	0
	18	30	30	60	
10	19	30	30	60	7
	20	35	35	70	
11	21	35	35	70	7
	22	30	30	60	
12	23	30	30	60	0
	24	30	30	60	

13	25	30	30	60	0
	26	30	30	60	
14	27	30	30	60	7
	28	35	35	70	
15	29	30	30	60	0
	30	30	30	60	
16	31	30	30	60	0
	32	30	30	60	
17	33	30	30	60	4
	34	30	35	65	
18	35	30	30	60	0
	36	30	30	60	
19	37	30	30	60	0
	38	30	30	60	
20	39	30	30	60	0
	40	30	30	60	
21	41	35	35	70	4
	42	35	30	65	
22	43	30	30	60	0
	44	30	30	60	
23	45	30	30	60	7
	46	35	35	70	
24	47	30	30	60	0
	48	30	30	60	
25	49	30	30	60	0
	50	30	30	60	
26	51	30	30	60	0
	52	30	30	60	
27	53	35	35	70	7
	54	30	30	60	
28	55	35	35	70	7
	56	30	30	60	
29	57	30	30	60	0
	58	30	30	60	
30	59	30	30	60	0
	60	30	30	60	
31	61	30	30	60	0
	62	30	30	60	
32	63	30	30	60	4
	64	30	35	65	
33	65	30	30	60	0
	66	30	30	60	
34	67	35	35	70	7
	68	30	30	60	
35	69	30	30	60	0

	70	30	30	60	
36	71	25	30	55	4
	72	30	30	60	
37	73	35	30	65	4
	74	30	30	60	
38	75	30	30	60	0
	76	30	30	60	
39	77	30	30	60	0
	78	30	30	60	
40	79	30	30	60	0
	80	30	30	60	
41	81	30	30	60	0
	82	30	30	60	
42	83	30	30	60	0
	84	30	30	60	
43	85	30	30	60	4
	86	30	35	65	
44	87	30	30	60	0
	88	30	30	60	
45	89	25	25	50	7
	90	30	30	60	
46	91	30	30	60	11
	92	40	35	75	
47	93	30	30	60	0
	94	30	30	60	
48	95	30	30	60	0
	96	30	30	60	
49	97	35	35	70	7
	98	30	30	60	
50	99	30	35	65	4
	100	30	30	60	
51	101	31	31	62	2
	102	30	29	59	
52	103	29	30	59	1
	104	30	30	60	
53	105	30	29	59	1
	106	30	30	60	
54	107	30	30	60	1
	108	31	31	62	
55	109	30	30	60	0
	110	30	30	60	
56	111	31	30	61	1
	112	30	29	59	
57	113	30	29	59	1
	114	30	30	60	

Average	30.5	30.5	61.0
Maximum	40	35	75
Minimum	25	25	50
Unc	7.5	5	12.5
Percentage of Unc	1%	1%	1%

Tabel 34. Hasil data pengukuran dan nilai deviasi *capping* sisi *front wall*

NO <i>TUBE</i>	NO POINT	CAPPING (mm)				
		Inside	outside	Deviation Inside	Deviation Outside	Deviation ALL
1	1	1	1	0.0	0.0	0.0
	2	1	1			
2	3	1	1	0.0	0.1	0.1
	4	1	1.2			
3	5	1.5	1.5	0.4	0.4	0.3
	6	2	2			
4	7	2	2	0.6	0.6	0.5
	8	1.2	1.2			
5	9	1.5	1.5	1.0	1.0	0.8
	10	2.9	2.9			
6	11	1	1	0.4	0.4	0.3
	12	1.5	1.5			
7	13	1	1	1.8	1.8	1.4
	14	3.5	3.5			
8	15	1	1	0.4	0.4	0.3
	16	0.5	0.5			
9	17	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3
	18	1	1			
10	19	1	1	0.0	0.0	0.0
	20	1	1			
11	21	2.5	2.5	1.1	1.1	0.9
	22	1	1			
12	23	1.5	1.5	0.4	0.4	0.3
	24	1	1			
13	25	3	3	1.4	1.4	1.2
	26	1	1			
14	27	2	2	0.1	0.0	0.1
	28	2.2	2			
15	29	2	2	0.7	0.7	0.6
	30	1	1			
16	31	2	2	0.4	0.4	0.3
	32	2.5	2.5			
17	33	2	2	0.4	0.4	0.3

	34	1.5	1.5			
18	35	1.8	1.8	0.6	0.6	0.5
	36	1	1			
19	37	2.5	2	0.4	0.0	0.3
	38	2	2			
20	39	1.5	1.5	0.4	0.4	0.3
	40	1	1			
21	41	1	1	0.4	0.4	0.3
	42	1.5	1.5			
22	43	1.5	1.5	0.2	0.2	0.2
	44	1.8	1.8			
23	45	1	1	0.7	0.7	0.6
	46	2	2			
24	47	2	2	0.7	0.7	0.6
	48	1	1			
25	49	2.5	2.5	0.4	0.4	0.3
	50	2	2			
26	51	2	2	1.1	1.1	0.9
	52	3.5	3.5			
27	53	1	1	0.4	0.4	0.3
	54	1.5	1.5			
28	55	3.3	3.3	1.6	1.6	1.3
	56	1	1			
29	57	1	1	0.4	0.4	0.3
	58	1.5	1.5			
30	59	1	1	0.0	0.0	0.0
	60	1	1			
31	61	1.2	1	0.2	0.0	0.2
	62	1.5	1			
32	63	1	1	0.0	0.0	0.0
	64	1	1			
33	65	1.2	1.2	0.0	0.0	0.0
	66	1.2	1.2			
34	67	1	1	0.0	0.0	0.0
	68	1	1			
35	69	1	1	0.7	0.7	0.6
	70	2	2			
36	71	1	1	1.8	1.8	1.4
	72	3.5	3.5			
37	73	1	1	0.4	0.4	0.3
	74	0.5	0.5			
38	75	1	1	0.4	0.4	0.3
	76	1.5	1.5			
39	77	2	2	0.2	0.2	0.2
	78	1.7	1.7			

40	79	1	1	1.8	1.8	1.5
	80	3.6	3.6			
41	81	1	1	0.4	0.4	0.3
	82	1.5	1.5			
42	83	1	1	0.0	0.0	0.0
	84	1	1			
43	85	4	4	2.1	2.1	1.7
	86	1	1			
44	87	1.5	1.5	0.4	0.4	0.3
	88	1	1			
45	89	1	1	0.4	0.4	0.3
	90	1.5	1.5			
46	91	1	1	0.4	0.4	0.3
	92	1.5	1.5			
47	93	1	1	0.4	0.4	0.3
	94	1.5	1.5			
48	95	1.8	1.8	0.1	0.1	0.1
	96	2	2			
49	97	1	1	0.4	0.4	0.3
	98	1.5	1.5			
50	99	2	2	0.7	0.7	0.6
	100	1	1			
51	101	2	2.7	0.4	1.2	0.7
	102	1.5	1			
52	103	1	1.5	0.7	0.4	0.5
	104	2	1			
53	105	1.5	1	0.4	0.7	0.5
	106	1	2			
54	107	3.5	1.7	1.8	0.5	1.2
	108	1	1			
55	109	3.2	3.1	1.2	1.5	1.1
	110	1.5	1			
56	111	3	1	0.0	1.8	1.1
	112	3	3.5			
57	113	1	1	0.0	0.0	0.0
	114	1	1			
Average		1.6	1.5			
Maximum		4	4			
Minimum		0.5	0.5			
Unc		1.75	1.75			
Percentage of Unc		7%	7%			

Tabel 35. Hasil data pengukuran dan nilai deviasi *bead width* sisi *front wall*

NO <i>TUBE</i>	NO POINT	Bead Widht (mm)				
		Inside	outside	Deviation Inside	Deviation Outside	Deviation ALL
1	1	11	11	1.2	1.2	1.0
	2	13	13			
2	3	12	12	0.0	0.0	0.0
	4	12	12			
3	5	11	11	0.0	0.0	0.0
	6	11	11			
4	7	12	12	0.7	0.7	0.6
	8	11	11			
5	9	11	11	1.2	1.2	1.0
	10	13	13			
6	11	12	12	1.3	1.3	1.1
	12	14	14			
7	13	11	11	1.4	0.0	1.0
	14	13	11			
8	15	13	12	0.7	0.0	0.5
	16	12	12			
9	17	11	12	0.3	1.3	0.9
	18	10	10			
10	19	12	12	0.9	0.9	0.7
	20	11	11			
11	21	12	12	0.3	0.3	0.2
	22	12	12			
12	23	12	12	0.3	0.3	0.2
	24	12	12			
13	25	13	11	0.3	0.8	0.7
	26	12	12			
14	27	13	13	0.1	1.2	0.8
	28	13	11			
15	29	12	12	1.5	1.5	1.2
	30	10	10			
16	31	12	12	0.4	0.4	0.3
	32	12	12			
17	33	13	12	0.4	0.0	0.3
	34	12	12			
18	35	12	12	3.3	3.3	2.7
	36	17	17			
19	37	11	12	2.9	1.9	2.0
	38	15	15			
20	39	12	11	1.4	0.9	1.0
	40	10	10			

21	41	11	11	1.2	1.2	1.0
	42	13	13			
22	43	14	14	1.2	1.2	1.0
	44	12	12			
23	45	11	11	0.3	0.3	0.2
	46	11	11			
24	47	12	12	1.0	1.0	0.8
	48	13	13			
25	49	15	15	2.5	2.5	2.1
	50	11	11			
26	51	12	12	1.7	1.7	1.4
	52	14	14			
27	53	14	14	2.3	2.3	1.9
	54	11	11			
28	55	15	15	3.2	3.2	2.6
	56	11	11			
29	57	11	11	2.5	2.5	2.0
	58	14	14			
30	59	15	15	0.2	0.2	0.1
	60	14	14			
31	61	11	11	2.7	2.7	2.2
	62	15	15			
32	63	13	13	0.1	0.1	0.1
	64	13	13			
33	65	14	14	1.3	1.3	1.1
	66	12	12			
34	67	12	12	0.2	0.2	0.2
	68	12	12			
35	69	11	11	0.9	0.9	0.8
	70	12	12			
36	71	11	11	1.3	1.3	1.1
	72	13	13			
37	73	11	11	1.4	0.7	0.9
	74	13	12			
38	75	12	12	0.4	0.4	0.4
	76	11	11			
39	77	11	11	0.0	0.0	0.0
	78	11	11			
40	79	12	12	0.5	0.5	0.4
	80	13	13			
41	81	14	14	2.0	2.0	1.6
	82	11	11			
42	83	14	14	0.7	0.7	0.5
	84	13	13			
43	85	14	14	0.8	0.8	0.6

	86	13	13			
44	87	13	13	1.3	1.3	1.1
	88	15	15			
45	89	14	14	2.4	2.4	1.9
	90	11	11			
46	91	11	11	1.2	1.2	1.0
	92	13	13			
47	93	11	11	0.4	0.4	0.3
	94	12	12			
48	95	12	12	1.3	1.3	1.1
	96	10	10			
49	97	10	10	1.5	1.5	1.2
	98	12	12			
50	99	12	12	0.8	0.8	0.7
	100	11	11			
51	101	12	11	0.6	0.2	0.4
	102	11	11			
52	103	12	12	0.5	0.5	0.4
	104	11	11			
53	105	11	11	0.4	0.4	0.3
	106	12	12			
54	107	15	15	2.1	2.1	1.7
	108	12	12			
55	109	13	13	1.4	1.4	1.2
	110	11	11			
56	111	13	13	0.4	0.4	0.3
	112	13	13			
57	113	12	12	0.5	0.5	0.4
	114	11	11			
Average		12.4	12.3			
Maximum		15.48	15.48			
Minimum		10.05	10.05			
Unc		2.715	2.715			
Percentage of Unc		1%	1%			

Tabel 36. Hasil data pengukuran *Hi-Lo* sisi *right wall*

NO <i>TUBE</i>	NO JOINT	<i>Hi-Lo</i> (mm)			
		0°	90°	180°	270°
1	1	1.2	1.3	1.2	1.3
	2	2	0.5	2	0.5
2	3	1.5	0.5	1.5	0.5

	4	2.1	2	2.2	2
3	5	2.1	2	2	2
	6	1.5	1.5	0.5	0.5
4	7	2	2	2	2
	8	1.2	2	1.2	2
5	9	2	1.8	2	1.9
	10	2	1.9	2	2
6	11	1.5	1.2	1.5	1.2
	12	1.2	1.3	1.2	1.3
7	13	1	1	1	1
	14	1	0.9	0.8	0.9
8	15	1.3	1.3	1.2	1.3
	16	2	2	2	2
9	17	1.5	1.5	1.5	1.5
	18	1.2	2	1.2	2
10	19	1.8	2	1.9	2.2
	20	2	2	1.2	1.2
11	21	2.3	2.6	2.3	2.5
	22	0.5	1	0.5	1.2
12	23	2	1	2	1
	24	1	1	1	1
13	25	1.8	1.6	1.7	1.6
	26	1	0.5	1	0.5
14	27	1	0.5	1	0.5
	28	2.5	2.4	2.5	2.4
15	29	2.6	2.3	2.2	2.3
	30	0.5	0.5	0.5	0.5
16	31	0.5	0.5	0.5	0.5
	32	2	2	2	2.5
17	33	0.5	0.5	0.5	0.5
	34	0.5	0.5	0.5	1
18	35	1.5	1.5	1.5	1.5
	36	1.2	1.2	1.2	1.2
19	37	1.3	1.2	1.1	1.2
	38	1.8	2	1.9	2
20	39	2.1	2.1	2.1	2.2
	40	1	1.5	0.8	1.2
21	41	2	2.1	2	2
	42	0.5	0.5	0.5	0.5
22	43	1	1	1	1
	44	1	1	1	1
23	45	2	2.1	2.1	2
	46	2	2	2	2.1
24	47	1	1.1	1.1	1.2
	48	2	2.1	2.2	2.2

25	49	2.1	2.3	2.2	2.3
	50	1	1.2	1	1.1
26	51	1	1.5	1.2	1.3
	52	1.1	1.2	1.1	1.3
27	53	1.5	1.5	1.5	1.5
	54	1.2	1.2	0.5	1.2
28	55	0.6	0.5	0.5	0.5
	56	1	1	1.5	2
29	57	1	2	2	1
	58	0.5	0.5	0.5	0.5
30	59	3	3	3	3
	60	3	2.9	3	2.9
31	61	0.8	0.9	1	0.9
	62	1.2	1.2	1.2	1.2
32	63	1	1	1	1
	64	2	2	2	1.9
33	65	0.5	0.5	0.5	0.8
	66	0.5	1.4	0.5	1.4
34	67	1.5	1.5	1.5	1.5
	68	1.2	1.3	1.2	1.3
35	69	1	1	1	1
	70	1	0.9	0.8	0.9
Average		1.4	1.4	1.4	1.4
Maximum		3	3	3	3
Minimum		0.5	0.5	0.5	0.5
Unc		1.25	1.25	1.25	1.25
Percentage of Unc		9%	9%	9%	9%

Tabel 37. Nilai deviasi pengukuran *Hi-Lo* sisi *right wall*

<i>Hi-Lo</i> (mm)				
Uncertainly 0°	Uncertainly 90°	Uncertainly 180°	Uncertainly 240°	Uncertainly ALL
0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
0.4	1.1	0.5	1.1	0.7
0.4	0.4	1.1	1.1	0.7
0.6	0.0	0.6	0.0	0.4
0.0	0.1	0.0	0.1	0.1

0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
0.5	0.5	0.6	0.5	0.4
0.2	0.4	0.2	0.4	0.3
0.1	0.0	0.5	0.7	0.4
1.3	1.1	1.3	0.9	0.9
0.7	0.0	0.7	0.0	0.5
0.6	0.8	0.5	0.8	0.5
1.1	1.3	1.1	1.3	0.9
1.5	1.3	1.2	1.3	1.0
1.1	1.1	1.1	1.4	0.9
0.0	0.0	0.0	0.4	0.2
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
0.4	0.6	0.6	0.6	0.4
0.8	0.4	0.9	0.7	0.6
1.1	1.1	1.1	1.1	0.8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
0.7	0.7	0.8	0.7	0.6
0.8	0.8	0.8	0.8	0.6
0.1	0.2	0.1	0.0	0.2
0.2	0.2	0.7	0.2	0.3
0.3	0.4	0.7	1.1	0.6

0.4	1.1	1.1	0.4	0.7
0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
0.3	0.2	0.1	0.2	0.2
0.7	0.7	0.7	0.6	0.5
0.0	0.6	0.0	0.4	0.4
0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
0.0	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabel 38. Hasil data pengukuran *gap* sisi *right wall*

NO <i>TUBE</i>	NO JOINT	GAP (mm)			
		0°	90°	180°	270°
1	1	4	4	4	4
	2	3	3.9	3.5	3.5
2	3	2.9	2.9	2.9	2.9
	4	3	3.2	3.2	3.2
3	5	4	4	4	4
	6	2.1	2.1	2.1	2.1
4	7	2	2	2	2
	8	3	3	2.9	3
5	9	3	3	3	3
	10	3.4	4	3.4	3.5
6	11	2	3	3.1	3.1
	12	3	3	3	3
7	13	2.2	2.2	2.5	2.5
	14	3	3	3	3
8	15	3	3	2	2
	16	2	3	3	3
9	17	2	2	2	2
	18	3	3	3.5	3.5
10	19	3	3	3	3
	20	3.4	4	3.4	3.5
11	21	2	3	3	3
	22	4	3.8	3.5	3.2
12	23	3	2.9	3	3

	24	3.8	3.2	3	3.5
13	25	3	3	3	2
	26	2	2	2	2
14	27	2	2.1	2.1	2.1
	28	3	3.5	3	3.5
15	29	1.5	1.5	1.6	1.5
	30	2.9	3	3	3
16	31	3	3	3	3
	32	4	4.7	4	5
17	33	3	3	3	3
	34	3	3	3	3
18	35	3	3	2.9	3
	36	3	3	2.8	3
19	37	2.1	2.1	2.1	2.1
	38	4.8	4.8	4.9	4.8
20	39	4	4	4.2	4.5
	40	3	3	3	3
21	41	4	4	5	4
	42	2	2.5	2.5	2.5
22	43	2	2.2	2.2	2.3
	44	3	3	3	3
23	45	4	4	4	4
	46	3	3	3	3
24	47	2.1	2.5	2.5	2.5
	48	3	3	3	3
25	49	4.5	5	5	4
	50	3	3	3	3
26	51	3	3	4	4
	52	3	3.2	3.2	3.4
27	53	3	3.3	2.5	3
	54	2	1.9	2.4	2
28	55	3	3	2.9	2.9
	56	4.2	5	5.5	4
29	57	4	4.5	5	4.5
	58	2.1	2.1	2.2	2.1
30	59	3	3	2.8	3.1
	60	2.1	2.1	2.1	2.1
31	61	2.2	2.1	2	1.9
	62	2.1	2.7	2.8	2.8
32	63	2.1	2.4	2.4	2.4
	64	3	3	3.2	3.4
33	65	3	3	3	3
	66	3	2.8	3	2.8
34	67	3	2.5	3	3
	68	3	3	3	3

35	69	2.8	2.2	2.5	2.5
	70	3	3	3	3
Average		2.9	3.0	3.0	3.0
Maximum		4.8	5	5.5	5
Minimum		1.5	1.5	1.6	1.5
Unc		1.65	1.75	1.95	1.75
Percentage of Unc		5%	5%	5%	5%

Tabel 39. Nilai Deviasi Pengukuran *Gap* Sisi *Right wall*

GAP (mm)				
Uncertainly 0°	Uncertainly 90°	Uncertainly 180°	Uncertainly 240°	Uncertainly ALL
0.7	0.1	0.4	0.4	0.4
0.1	0.2	0.2	0.2	0.1
1.3	1.3	1.3	1.3	1.0
0.7	0.7	0.6	0.7	0.5
0.3	0.7	0.3	0.4	0.4
0.7	0.0	0.1	0.1	0.4
0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
0.7	0.0	0.7	0.7	0.5
0.7	0.7	1.1	1.1	0.7
0.3	0.7	0.3	0.4	0.4
1.4	0.6	0.4	0.1	0.6
0.6	0.2	0.0	0.4	0.3
0.7	0.7	0.7	0.0	0.5
0.7	1.0	0.6	1.0	0.7
1.0	1.1	1.0	1.1	0.8
0.7	1.2	0.7	1.4	0.8
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
1.9	1.9	2.0	1.9	1.5
0.7	0.7	0.8	1.1	0.6

1.4	1.1	1.8	1.1	1.1
0.7	0.6	0.6	0.5	0.4
0.7	0.7	0.7	0.7	0.5
0.6	0.4	0.4	0.4	0.3
1.1	1.4	1.4	0.7	0.9
0.0	0.1	0.6	0.4	0.4
0.7	1.0	0.1	0.7	0.5
0.8	1.4	1.8	0.8	1.0
1.3	1.7	2.0	1.7	1.3
0.6	0.6	0.5	0.7	0.5
0.1	0.4	0.6	0.6	0.4
0.6	0.4	0.6	0.7	0.5
0.0	0.1	0.0	0.1	0.1
0.0	0.4	0.0	0.0	0.2
0.1	0.6	0.4	0.4	0.3

Tabel 40. Hasil Data Pengukuran dan Nilai Deviasi *V-Groove* Sisi *Right wall*

NO <i>TUBE</i>	NO JOINT	V-Groove (°)			
		<i>Existing</i>	Baru	Sudut V Total	Uncertainly ALL
1	1	30	30	60	0.0
	2	30	30	60	
2	3	30	30	60	0.0
	4	30	30	60	
3	5	25	30	55	2.5
	6	30	30	60	
4	7	30	30	60	0.0

	8	30	30	60	
5	9	30	30	60	4.8
	10	25	20	45	
6	11	30	30	60	0.0
	12	30	30	60	
7	13	30	30	60	2.5
	14	35	30	65	
8	15	30	30	60	0.0
	16	30	30	60	
9	17	30	30	60	2.9
	18	25	25	50	
10	19	30	30	60	4.8
	20	25	20	45	
11	21	35	35	70	2.9
	22	30	30	60	
12	23	30	30	60	0.0
	24	30	30	60	
13	25	35	30	65	2.5
	26	30	30	60	
14	27	30	25	55	2.5
	28	30	30	60	
15	29	30	30	60	0.0
	30	30	30	60	
16	31	25	30	55	2.5
	32	30	30	60	
17	33	35	35	70	2.9
	34	30	30	60	
18	35	30	30	60	0.0
	36	30	30	60	
19	37	30	30	60	0.0
	38	30	30	60	
20	39	30	35	65	2.5
	40	30	30	60	
21	41	25	20	45	4.8
	42	30	30	60	
22	43	30	30	60	0.0
	44	30	30	60	
23	45	25	30	55	4.1
	46	25	20	45	
24	47	30	30	60	0.0
	48	30	30	60	
25	49	35	30	65	2.5
	50	30	30	60	
26	51	30	25	55	2.5
	52	30	30	60	

27	53	30	30	60	0.0
	54	30	30	60	
28	55	30	30	60	0.0
	56	30	30	60	
29	57	30	30	60	0.0
	58	30	30	60	
30	59	31	30	61	0.5
	60	30	30	60	
31	61	30	30	60	0.0
	62	30	30	60	
32	63	30	30	60	0.0
	64	30	30	60	
33	65	30	30	60	0.0
	66	30	30	60	
34	67	30	30	60	0.0
	68	30	30	60	
35	69	30	30	60	2.9
	70	35	35	70	
Average		29.9	29.5	59.4	
Maximum		35	35	70	
Minimum		25	20	45	
Unc		5	7.5	12.5	
Percentage of Unc		2%	3%	2%	

Tabel 41. Hasil Data Pengukuran dan Nilai Deviasi *Capping* Sisi *Right wall*

NO <i>TUBE</i>	NO <i>JOINT</i>	CAPPING (mm)				
		Inside	outside	Uncertainly Inside	Uncertainly Outside	Uncertainly ALL
1	1	1	1	0.0	0.0	0.0
	2	1	1			
2	3	2	1	0.4	0.0	0.5
	4	1.5	1			
3	5	2	1	0.7	0.0	0.5
	6	1	1			
4	7	1	4	0.1	2.1	1.5
	8	1.2	1			
5	9	1	1	1.5	1.6	1.3
	10	3.1	3.3			
6	11	1	1.5	0.0	0.4	0.5
	12	1	2			
7	13	3.5	1.7	1.8	0.5	1.2
	14	1	1			

8	15	3.2	3.1	1.2	1.5	1.1
	16	1.5	1			
9	17	2	2	0.4	0.7	0.5
	18	1.5	1			
10	19	1	1.5	0.4	0.4	0.4
	20	1.5	2			
11	21	1	1	0.7	1.4	1.0
	22	2	3			
12	23	1.5	3	0.2	0.7	1.3
	24	1.2	4			
13	25	1	1	0.4	1.3	0.9
	26	1.5	2.8			
14	27	1.5	1	0.0	0.7	0.4
	28	1.5	2			
15	29	1	1	0.4	0.4	0.3
	30	1.5	1.5			
16	31	1	1.2	0.0	0.1	0.1
	32	1	1			
17	33	2	2.7	0.4	1.2	0.7
	34	1.5	1			
18	35	1	1.5	0.7	0.4	0.5
	36	2	1			
19	37	1.5	1	0.2	0.4	0.2
	38	1.2	1.5			
20	39	4	1	1.1	0.4	1.3
	40	2.5	1.5			
21	41	2.5	1.8	0.7	0.6	0.6
	42	1.5	1			
22	43	2	2	0.0	0.0	0.0
	44	2	2			
23	45	4	1	0.6	1.6	1.3
	46	3.2	3.3			
24	47	1	1.2	0.0	0.1	0.1
	48	1	1			
25	49	2	2	0.4	0.0	0.3
	50	2.5	2			
26	51	1.5	1.2	0.0	0.1	0.2
	52	1.5	1			
27	53	1	3.2	1.1	1.6	1.1
	54	2.5	1			
28	55	2	1.5	0.1	0.4	0.4
	56	1.8	1			
29	57	2.2	3.1	0.8	0.1	1.0
	58	1	3.3			
30	59	1.2	1	0.1	0.0	0.1

	60	1	1			
31	61	3	1	0.0	1.8	1.1
	62	3	3.5			
32	63	1	1	0.7	1.6	1.1
	64	2	3.3			
33	65	1	1	0.0	0.0	0.0
	66	1	1			
34	67	3.5	3.2	1.8	0.8	1.2
	68	1	2			
35	69	3.5	1.7	1.8	0.5	1.2
	70	1	1			
Average		1.7	1.7			
Maximum		4	4			
Minimum		1	1			
Unc		1.5	1.5			
Percentage of Unc		6%	6%			

Tabel 42. Hasil Data Pengukuran dan Nilai Deviasi *Bead Width* Sisi *Right wall*

NO <i>TUBE</i>	NO <i>JOINT</i>	Bead Widht (mm)				
		Inside	outside	Uncertainly Inside	Uncertainly Outside	Uncertainly ALL
1	1	14	13	0.2	0.1	0.4
	2	14	13			
2	3	12	11	1.5	1.6	1.4
	4	14	13			
3	5	13	14	0.5	1.3	0.9
	6	12	12			
4	7	11	11	1.0	0.0	0.6
	8	12	11			
5	9	12	12	0.9	0.6	0.6
	10	11	11			
6	11	14	14	1.6	2.1	1.5
	12	12	11			
7	13	11	12	1.8	0.0	1.0
	14	14	12			
8	15	12	12	1.0	1.0	0.8
	16	11	11			
9	17	12	11	1.4	0.6	0.9
	18	10	10			
10	19	12	12	0.1	0.0	0.1
	20	12	12			
11	21	11	11	1.3	0.6	0.9

	22	13	12			
12	23	14	12	1.0	0.8	1.3
	24	13	11			
13	25	12	12	0.5	0.9	0.6
	26	12	11			
14	27	11	11	1.9	1.6	1.4
	28	14	13			
15	29	13	13	1.1	0.5	0.8
	30	11	12			
16	31	11	12	0.2	0.5	0.3
	32	11	11			
17	33	13	11	1.4	0.8	1.0
	34	11	12			
18	35	12	12	1.4	1.5	1.3
	36	10	10			
19	37	11	11	2.5	4.0	2.8
	38	15	17			
20	39	11	12	0.4	0.4	0.4
	40	12	11			
21	41	12	11	3.3	0.4	2.5
	42	17	12			
22	43	11	11	1.0	0.7	0.7
	44	12	12			
23	45	13	13	1.7	1.5	1.3
	46	11	11			
24	47	11	12	1.0	0.0	0.6
	48	12	12			
25	49	14	14	2.4	1.1	1.5
	50	11	12			
26	51	12	12	0.1	0.1	0.3
	52	12	12			
27	53	12	10	1.0	1.0	0.9
	54	11	12			
28	55	11	12	2.5	0.4	1.6
	56	15	12			
29	57	14	15	0.9	0.0	0.5
	58	16	15			
30	59	15	11	1.4	0.3	1.8
	60	13	11			
31	61	13	11	1.5	0.1	0.9
	62	11	12			
32	63	12	12	1.1	0.3	0.7
	64	11	11			
33	65	12	12	1.1	1.0	0.9
	66	11	10			

34	67	11	12	0.1	1.1	0.7
	68	11	11			
35	69	11	12	0.7	0.7	0.6
	70	12	11			
Average		12.2	11.9			
Maximum		16.83	17			
Minimum		9.68	10.15			
Unc		3.575	3.425			
Percentage of Unc		29%	29%			

2. Data Hasil Metal Coating

Pada bagian ini disajikan data hasil pengukuran pekerjaan metal coating yang dilaksanakan pada elevasi 16-18 m, 18-19 m, dan 23-25 m. Data yang disajikan dalam tabel berikut memuat hasil pengukuran berbagai parameter yang diperoleh selama proses pelapisan logam berlangsung. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil pekerjaan telah memenuhi standar kualitas dan spesifikasi teknis yang ditetapkan. Berikut merupakan tabelnya:

Tabel 43. Hasil Data Pengukuran MC dan Deviasi Sisi *Front wall* Elevasi 16-18 m

No tube	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	580	520	620	573	196	123	39	140
	2	661	645	714	673				
	3	972	609	650	744				
	4	942	814	666	807				
2	1	684	530	717	644	203	142	129	157
	2	590	524	936	683				
	3	995	586	651	744				
	4	867	825	685	792				
3	1	544	628	737	636	120	172	63	113
	2	618	529	699	615				
	3	653	929	642	741				
	4	784	745	791	773				
4	1	698	732	649	693	122	18	98	77
	2	622	753	695	690				
	3	866	718	784	789				
	4	673	712	870	752				
5	1	514	692	766	657	102	126	141	136
	2	538	680	854	691				
	3	718	912	602	744				

	4	654	628	930	737				
6	1	692	545	613	617	191	204	47	146
	2	622	537	724	628				
	3	983	767	644	798				
	4	602	965	646	738				
7	1	529	638	706	624	194	115	47	120
	2	680	907	614	734				
	3	642	787	602	677				
	4	917	708	622	749				
8	1	626	650	711	662	86	132	111	112
	2	568	666	501	578				
	3	640	717	715	691				
	4	740	936	546	741				
9	1	635	651	680	655	100	36	59	63
	2	633	685	802	707				
	3	601	737	692	677				
	4	801	699	680	727				
10	1	954	642	912	836	165	69	157	122
	2	645	791	628	688				
	3	625	649	552	609				
	4	648	695	752	698				
11	1	804	651	525	660	146	36	155	122
	2	814	685	573	691				
	3	512	737	577	609				
	4	539	699	864	701				
12	1	633	642	806	694	33	69	96	68
	2	623	791	667	694				
	3	611	649	613	624				
	4	676	695	593	655				
13	1	692	625	673	663	46	102	65	83
	2	736	784	640	720				
	3	644	870	706	740				
	4	689	766	555	670				
14	1	546	854	632	677	139	167	125	149
	2	537	602	925	688				
	3	815	930	711	819				
	4	546	613	786	648				
15	1	612	724	549	628	36	41	90	61
	2	684	644	738	689				
	3	632	646	546	608				
	4	635	706	614	652				
16	1	600	614	524	579	32	50	239	128
	2	648	602	518	589				
	3	654	622	507	594				

	4	663	711	994	789				
17	1	655	501	685	614	14	103	136	96
	2	659	715	562	645				
	3	682	546	632	620				
	4	662	680	878	740				
18	1	612	802	505	640	53	109	183	127
	2	635	692	663	663				
	3	612	680	899	730				
	4	718	912	860	830				
19	1	651	628	679	653	63	52	133	95
	2	617	587	524	576				
	3	540	536	645	574				
	4	525	512	847	628				
20	1	698	806	513	672	207	96	159	137
	2	675	667	589	644				
	3	983	613	797	798				
	4	570	593	840	668				
21	1	524	673	549	582	128	65	103	90
	2	545	640	625	603				
	3	662	706	749	706				
	4	780	555	519	618				
22	1	698	632	578	636	101	125	131	123
	2	626	925	541	697				
	3	816	711	533	687				
	4	615	786	809	737				
23	1	642	549	533	575	92	90	79	75
	2	697	738	602	679				
	3	514	546	725	595				
	4	644	614	626	628				
24	1	784	824	722	777	52	173	79	116
	2	870	904	609	794				
	3	766	519	680	655				
	4	854	650	797	767				
25	1	602	666	582	617	164	132	125	134
	2	930	717	606	751				
	3	613	936	803	784				
	4	724	651	511	629				
26	1	644	685	596	642	46	39	79	56
	2	646	737	627	670				
	3	706	699	574	660				
	4	614	642	751	669				
27	1	602	791	582	658	105	71	44	88
	2	622	649	588	620				
	3	711	695	506	637				

	4	501	632	513	549				
28	1	715	790	562	689	128	136	188	134
	2	546	631	655	611				
	3	680	838	930	816				
	4	802	547	508	619				
29	1	692	511	524	576	142	42	53	109
	2	680	518	584	594				
	3	912	600	633	715				
	4	628	563	639	610				
30	1	545	543	625	571	214	121	145	151
	2	537	550	630	572				
	3	767	751	920	813				
	4	965	761	812	846				
31	1	650	806	541	666	143	96	222	148
	2	666	667	578	637				
	3	717	613	997	776				
	4	936	593	866	798				
32	1	651	673	806	710	43	65	96	67
	2	685	640	667	664				
	3	737	706	613	685				
	4	699	555	593	616				
33	1	642	632	673	649	75	125	65	96
	2	791	925	640	785				
	3	649	711	706	689				
	4	695	786	555	679				
34	1	514	549	632	565	21	90	125	131
	2	503	738	925	722				
	3	537	546	711	598				
	4	544	614	786	648				
35	1	644	666	549	620	99	132	90	116
	2	842	717	738	766				
	3	778	936	546	753				
	4	765	651	614	677				
36	1	613	685	803	700	113	39	173	110
	2	760	737	799	765				
	3	839	699	520	686				
	4	776	642	929	782				
37	1	602	791	745	713	126	93	15	87
	2	554	649	732	645				
	3	806	695	753	751				
	4	667	856	718	747				
38	1	613	574	712	633	40	153	109	115
	2	593	580	692	622				
	3	673	525	680	626				
	4	640	862	912	805				

39	1	706	505	628	613	185	76	64	111
	2	555	621	739	638				
	3	632	687	766	695				
	4	925	623	757	768				
40	1	711	929	506	715	119	93	128	127
	2	786	745	518	683				
	3	549	732	603	628				
	4	738	753	784	758				
41	1	546	718	870	711	209	18	123	131
	2	614	712	766	697				
	3	537	692	854	694				
	4	955	680	602	746				
42	1	537	912	930	793	96	142	143	125
	2	657	628	613	633				
	3	633	644	724	667				
	4	729	842	644	738				
43	1	706	778	646	710	84	78	47	92
	2	869	765	706	780				
	3	701	613	614	643				
	4	868	760	602	743				
44	1	654	839	622	705	40	105	100	88
	2	601	776	711	696				
	3	680	602	501	594				
	4	650	679	715	681				
45	1	613	574	546	578	173	74	105	123
	2	609	530	680	606				
	3	650	688	802	713				
	4	954	534	692	727				
46	1	778	505	680	654	77	130	130	129
	2	897	724	912	844				
	3	744	754	628	709				
	4	825	526	657	669				
47	1	555	621	633	603	166	135	99	124
	2	881	744	729	785				
	3	742	829	706	759				
	4	549	523	869	647				
48	1	602	657	701	653	62	44	115	72
	2	662	633	868	721				
	3	726	729	654	703				
	4	715	706	601	674				
49	1	760	869	680	770	152	112	34	110
	2	773	701	650	708				
	3	529	868	613	670				
	4	833	654	609	699				
50	1	624	601	650	625	109	36	135	120

	2	644	680	954	759				
	3	842	650	778	757				
	4	778	613	897	763				
51	1	765	609	744	706	113	155	67	101
	2	613	650	825	696				
	3	760	954	764	826				
	4	839	778	663	760				
52	1	776	897	644	772	88	95	83	90
	2	602	744	842	729				
	3	635	825	778	746				
	4	778	680	765	741				
53	1	546	912	613	690	105	176	96	130
	2	544	628	760	644				
	3	754	545	839	713				
	4	616	537	776	643				
54	1	610	767	602	660	198	176	31	155
	2	610	965	537	704				
	3	571	643	567	594				
	4	966	559	538	688				
55	1	544	648	622	605	153	6	82	95
	2	558	654	643	618				
	3	849	663	769	760				
	4	802	655	579	679				
56	1	648	659	541	616	8	30	190	101
	2	654	682	598	645				
	3	663	662	600	642				
	4	655	612	955	741				
57	1	659	635	815	703	35	71	89	63
	2	682	612	646	647				
	3	662	671	612	648				
	4	612	772	684	689				
58	1	635	580	632	616	30	62	20	38
	2	612	657	635	635				
	3	671	633	600	635				
	4	613	729	648	663				
59	1	760	706	654	707	119	95	33	86
	2	839	869	663	790				
	3	776	701	718	732				
	4	602	868	712	727				
60	1	593	654	692	646	196	33	126	119
	2	526	601	680	602				
	3	917	680	912	836				
	4	612	650	628	630				
61	1	673	613	692	659	36	166	126	110
	2	692	609	680	660				

	3	744	650	912	769				
	4	705	954	628	762				
62	1	644	778	545	656	152	66	204	144
	2	928	897	537	787				
	3	663	744	767	725				
	4	625	825	965	805				
63	1	724	666	648	679	146	84	6	97
	2	910	784	654	783				
	3	622	870	663	718				
	4	619	766	655	680				
64	1	613	854	659	709	124	167	30	115
	2	616	602	682	633				
	3	740	930	662	777				
	4	860	613	612	695				
65	1	546	724	635	635	205	41	28	102
	2	612	644	612	623				
	3	625	646	671	647				
	4	955	706	613	758				
66	1	600	614	760	658	10	50	101	84
	2	610	602	839	684				
	3	620	622	776	673				
	4	620	711	602	644				
67	1	610	501	620	577	45	103	59	68
	2	620	715	660	665				
	3	700	546	520	589				
	4	620	680	610	637				
68	1	520	802	580	634	35	109	17	106
	2	610	692	620	641				
	3	611	680	610	634				
	4	680	912	610	734				
69	1	640	628	610	626	60	186	99	133
	2	520	537	520	526				
	3	600	767	613	660				
	4	520	965	760	748				
70	1	520	530	839	630	65	72	136	104
	2	620	550	776	649				
	3	650	690	602	647				
	4	520	570	554	548				
71	1	784	648	806	746	52	6	96	96
	2	870	654	667	730				
	3	766	663	613	681				
	4	854	655	593	701				
72	1	602	659	673	645	164	30	65	94
	2	930	682	640	751				
	3	613	662	706	660				

	4	724	612	555	630				
73	1	644	635	632	637	46	31	158	90
	2	646	612	925	728				
	3	706	671	600	659				
	4	614	600	600	605				
74	1	602	660	784	682	105	55	51	120
	2	622	623	870	705				
	3	711	530	766	669				
	4	501	600	854	652				
75	1	715	620	602	646	128	128	152	119
	2	546	692	930	723				
	3	680	680	613	658				
	4	802	912	724	813				
76	1	692	628	644	655	142	107	39	100
	2	680	545	646	624				
	3	912	537	706	718				
	4	628	767	614	670				
77	1	570	965	602	712	40	197	86	127
	2	650	610	622	627				
	3	620	520	711	617				
	4	580	784	501	622				
78	1	600	870	715	728	135	123	106	111
	2	784	766	546	699				
	3	870	854	680	801				
	4	766	602	802	723				
79	1	854	930	692	825	164	143	126	133
	2	602	613	680	632				
	3	930	724	912	855				
	4	613	644	628	628				
80	1	724	646	732	701	40	47	18	50
	2	644	706	753	701				
	3	646	614	718	659				
	4	706	602	712	673				
81	1	614	622	692	643	55	100	126	99
	2	602	711	680	664				
	3	622	501	912	678				
	4	711	715	628	685				
82	1	501	546	620	556	107	105	24	84
	2	715	680	600	665				
	3	546	802	657	668				
	4	680	692	633	668				
83	1	802	680	729	737	116	125	79	96
	2	692	912	706	770				
	3	680	628	869	726				
	4	912	776	701	796				

84	1	628	602	868	699	55	109	116	91
	2	620	554	654	609				
	3	610	806	601	672				
	4	720	667	680	689				
85	1	615	613	650	626	61	35	23	41
	2	510	593	613	572				
	3	621	673	609	634				
	4	631	640	650	640				
86	1	530	706	954	730	46	159	99	156
	2	530	555	778	621				
	3	622	632	897	717				
	4	570	925	744	746				
87	1	560	570	825	652	30	127	46	117
	2	610	784	784	726				
	3	620	870	870	787				
	4	611	766	766	714				
88	1	520	854	854	743	56	167	167	147
	2	612	602	602	605				
	3	622	930	930	827				
	4	631	613	613	619				
89	1	612	724	724	687	164	41	41	84
	2	621	644	644	636				
	3	570	646	646	621				
	4	897	706	706	770				
90	1	744	614	614	657	80	50	50	77
	2	825	602	602	676				
	3	666	622	622	637				
	4	784	711	711	735				
91	1	870	501	501	624	134	103	103	128
	2	766	715	715	732				
	3	854	546	546	649				
	4	602	680	680	654				
92	1	930	802	802	845	165	109	109	121
	2	600	692	692	661				
	3	640	680	680	667				
	4	613	912	912	812				
93	1	540	628	628	599	30	104	28	93
	2	580	644	590	605				
	3	570	842	657	690				
	4	520	778	633	644				
94	1	570	765	729	688	42	95	79	107
	2	540	613	706	620				
	3	624	760	869	751				
	4	580	839	701	707				
95	1	897	776	868	847	116	106	116	119

	2	744	602	654	667				
	3	825	540	601	655				
	4	666	570	680	639				
96	1	784	550	650	661	52	61	23	110
	2	870	540	613	674				
	3	766	650	609	675				
	4	854	650	650	718				
97	1	602	540	954	699	195	14	99	164
	2	930	560	778	756				
	3	540	570	897	669				
	4	560	570	744	625				
98	1	620	600	825	682	43	52	85	69
	2	560	600	648	603				
	3	600	700	654	651				
	4	645	590	663	633				
99	1	644	657	655	652	12	44	12	33
	2	642	633	659	645				
	3	621	729	682	677				
	4	622	706	662	663				
100	1	621	869	612	701	138	112	28	110
	2	897	701	635	744				
	3	744	868	612	741				
	4	825	654	671	717				
101	1	666	601	613	627	102	36	96	92
	2	784	680	760	741				
	3	870	650	839	786				
	4	766	613	776	718				
102	1	854	609	602	688	164	155	27	134
	2	602	650	662	638				
	3	930	954	612	832				
	4	611	778	635	675				
103	1	680	897	612	730	32	68	53	103
	2	622	744	671	679				
	3	685	825	560	690				
	4	659	767	560	662				
104	1	632	965	570	722	16	145	58	119
	2	611	610	580	600				
	3	600	800	670	690				
	4	600	800	680	693				
105	1	570	646	540	585	55	19	54	51
	2	540	679	670	630				
	3	650	684	630	655				
	4	600	653	620	624				
106	1	614	681	610	635	37	66	18	51
	2	540	580	620	580				

	3	540	590	640	590				
	4	540	520	650	570				
107	1	641	520	784	648	72	18	51	134
	2	663	510	870	681				
	3	520	550	766	612				
	4	624	540	854	673				
108	1	632	660	602	631	16	123	152	110
	2	610	630	930	723				
	3	622	580	613	605				
	4	641	860	724	742				
109	1	560	784	644	663	60	51	39	103
	2	570	870	646	695				
	3	646	766	706	706				
	4	679	854	614	716				
110	1	684	602	602	629	14	152	86	106
	2	653	930	622	735				
	3	681	613	711	668				
	4	570	724	501	598				
111	1	520	644	715	626	82	39	106	85
	2	520	646	546	571				
	3	612	706	680	666				
	4	684	614	802	700				
112	1	632	602	692	642	24	86	126	97
	2	635	622	680	646				
	3	600	711	912	741				
	4	648	501	628	592				
113	1	654	715	520	630	5	106	143	94
	2	663	546	613	607				
	3	655	680	760	698				
	4	659	802	839	767				
114	1	682	692	776	717	35	126	125	100
	2	662	680	602	648				
	3	612	912	554	693				
	4	635	628	806	690				
115	1	612	657	667	645	6	44	40	41
	2	622	633	613	623				
	3	621	729	593	648				
	4	623	706	673	667				
116	1	590	869	640	700	15	112	62	110
	2	580	701	706	662				
	3	570	868	555	664				
	4	560	654	632	615				
117	1	580	601	925	702	26	36	132	92

	2	612	680	657	650				
	3	612	650	633	632				
	4	631	613	729	658				
118	1	621	609	706	645	41	155	95	126
	2	622	650	869	714				
	3	631	954	701	762				
	4	550	778	868	732				
119	1	520	897	654	690	15	67	33	125
	2	530	744	601	625				
	3	540	825	680	682				
	4	550	776	650	659				
120	1	622	602	613	612	42	109	166	115
	2	621	554	609	595				
	3	540	806	650	665				
	4	623	667	954	748				
121	1	644	613	778	678	99	35	66	98
	2	842	593	897	777				
	3	778	673	744	732				
	4	765	640	825	743				
122	1	613	706	682	667	113	159	31	107
	2	760	555	662	659				
	3	839	632	612	694				
	4	776	925	635	779				
123	1	602	646	612	620	15	19	50	40
	2	631	679	671	660				
	3	612	684	560	619				
	4	612	653	570	612				
124	1	670	681	648	666	45	52	6	43
	2	650	760	654	688				
	3	600	648	663	637				
	4	580	654	655	630				
125	1	610	663	659	644	5	12	30	29
	2	620	655	682	652				
	3	610	659	662	644				
	4	611	682	612	635				
126	1	620	662	635	639	5	24	28	21
	2	610	612	612	611				
	3	620	635	671	642				
	4	610	612	613	612				
127	1	540	671	760	657	45	99	101	112
	2	520	613	839	657				
	3	610	760	776	715				
	4	610	839	602	684				
128	1	620	776	680	692	55	121	29	97

	2	520	602	622	581				
	3	630	897	685	737				
	4	622	744	659	675				
129	1	610	825	632	689	95	88	15	99
	2	800	666	611	692				
	3	650	784	600	678				
	4	650	870	600	707				
130	1	650	766	646	687	53	141	19	105
	2	675	854	679	736				
	3	570	602	684	619				
	4	620	930	653	734				
131	1	610	854	681	715	40	167	109	126
	2	630	602	766	666				
	3	550	930	854	778				
	4	610	613	602	608				
132	1	620	724	930	758	5	41	143	91
	2	610	644	613	622				
	3	620	646	724	663				
	4	620	706	644	657				
133	1	635	614	646	632	32	50	47	39
	2	685	602	706	664				
	3	633	622	614	623				
	4	621	711	602	645				
134	1	611	501	622	578	37	103	100	80
	2	680	715	711	702				
	3	622	546	501	556				
	4	685	680	715	693				
135	1	659	802	546	669	30	109	105	102
	2	632	692	680	668				
	3	611	680	802	698				
	4	600	912	692	735				
136	1	600	628	680	636	15	27	130	83
	2	610	620	912	714				
	3	620	680	628	643				
	4	630	650	657	646				
137	1	560	540	633	578	50	25	99	99
	2	620	570	729	640				
	3	610	600	706	639				
	4	520	560	869	650				
138	1	700	700	701	700	48	70	115	76
	2	657	700	868	742				
	3	633	560	654	616				
	4	729	700	601	677				
139	1	706	657	680	681	84	44	34	87
	2	869	633	650	717				

	3	701	729	613	681				
	4	868	706	609	728				
140	1	630	869	650	716	36	112	135	122
	2	612	701	954	756				
	3	684	868	778	777				
	4	632	654	897	728				
141	1	635	601	744	660	27	36	96	74
	2	600	680	825	702				
	3	648	650	776	691				
	4	654	613	602	623				
142	1	663	609	554	609	14	155	108	107
	2	655	650	806	704				
	3	659	954	667	760				
	4	682	778	613	691				
143	1	662	897	593	717	25	122	48	94
	2	612	744	673	676				
	3	635	825	640	700				
	4	612	612	706	643				
144	1	718	671	555	648	99	65	162	115
	2	520	530	632	561				
	3	520	648	925	698				
	4	540	654	650	615				
145	1	570	663	580	604	30	12	147	99
	2	560	655	600	605				
	3	540	659	897	699				
	4	600	682	744	675				
146	1	806	662	825	764	107	24	88	98
	2	667	612	666	648				
	3	613	635	784	677				
	4	593	612	870	692				
147	1	673	671	766	703	76	99	141	114
	2	640	613	854	702				
	3	706	760	602	689				
	4	555	839	930	775				
148	1	632	776	680	696	147	74	29	90
	2	925	602	622	716				
	3	711	646	685	681				
	4	786	679	659	708				
149	1	685	684	632	667	37	27	15	40
	2	633	653	611	632				
	3	621	681	600	634				
	4	611	720	600	644				
150	1	680	520	784	661	32	173	51	120
	2	622	550	870	681				
	3	685	784	766	745				

	4	659	870	854	794				
151	1	632	766	602	667	16	141	152	133
	2	611	854	930	798				
	3	600	602	613	605				
	4	600	930	724	751				
152	1	610	613	644	622	5	47	39	38
	2	620	724	646	663				
	3	610	644	706	653				
	4	610	646	614	623				
153	1	640	706	602	649	15	47	86	53
	2	640	614	622	625				
	3	620	602	711	644				
	4	610	622	501	578				
154	1	620	711	715	682	15	111	106	87
	2	640	501	546	562				
	3	630	715	680	675				
	4	610	546	802	653				
155	1	610	680	692	661	10	59	126	88
	2	620	802	680	701				
	3	630	692	912	745				
	4	620	680	628	643				
156	1	620	912	602	711	13	136	109	98
	2	640	628	554	607				
	3	630	700	806	712				
	4	645	620	667	644				
157	1	632	570	613	605	10	57	35	42
	2	612	570	593	592				
	3	632	520	673	605				
	4	612	657	640	636				
158	1	540	633	706	626	68	99	159	123
	2	560	729	555	615				
	3	560	706	632	633				
	4	675	869	925	823				
159	1	648	701	648	666	78	115	6	85
	2	695	868	654	739				
	3	540	654	663	619				
	4	540	601	655	599				
160	1	632	680	659	657	6	33	30	26
	2	625	650	682	652				
	3	624	613	662	633				
	4	621	610	612	614				
161	1	672	650	635	652	76	135	26	124
	2	520	954	612	695				
	3	632	778	671	694				
	4	634	897	657	729				

162	1	636	744	633	671	12	106	99	89
	2	626	825	729	727				
	3	612	620	706	646				
	4	632	600	869	700				
163	1	678	657	701	679	10	44	115	66
	2	695	633	868	732				
	3	684	729	654	689				
	4	675	706	601	661				
164	1	674	869	680	741	33	112	34	90
	2	684	701	650	678				
	3	619	868	613	700				
	4	621	654	609	628				
165	1	657	601	650	636	48	36	135	112
	2	633	680	954	756				
	3	729	650	778	719				
	4	706	613	897	739				
166	1	869	609	744	741	108	155	58	107
	2	701	650	825	725				
	3	868	954	870	897				
	4	654	778	760	731				
167	1	601	897	854	784	40	65	171	128
	2	680	744	600	675				
	3	650	825	930	802				
	4	613	854	600	689				
168	1	609	602	724	645	173	152	41	119
	2	650	930	644	741				
	3	954	613	646	738				
	4	778	724	706	736				
169	1	897	644	600	714	108	39	53	93
	2	744	646	600	663				
	3	825	706	622	718				
	4	682	614	711	669				
170	1	662	602	501	588	25	86	103	72
	2	612	622	715	650				
	3	635	711	546	631				
	4	612	501	680	598				
171	1	718	715	802	745	94	80	109	102
	2	630	610	692	610				
	3	620	680	680	660				
	4	530	802	912	748				
172	1	620	690	628	646	52	126	47	94
	2	623	680	657	653				
	3	624	912	633	723				
	4	520	628	729	626				
Average		662.4	690.5	687.6					

Maximum	995	965	997
Minimum	501	501	501
Unc	247	232	248
Percentage of Unc	37%	34%	36%

Tabel 44. Hasil Data Pengukuran MC dan Deviasi Sisi *Front wall* Elevasi 18-19 m

no <i>tube</i>	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	800	800	706	769	0	40	96	59
	2	800	800	869	823				
	3	800	870	701	790				
2	1	540	600	868	669	43	8	141	95
	2	570	600	654	608				
	3	625	613	601	613				
3	1	632	760	680	691	2	42	34	80
	2	636	839	650	708				
	3	632	776	613	674				
4	1	635	602	609	615	43	134	188	130
	2	634	554	650	613				
	3	560	806	954	773				
5	1	645	667	778	697	2	38	80	97
	2	641	613	897	717				
	3	643	593	744	660				
6	1	647	673	825	715	76	33	105	82
	2	634	640	659	644				
	3	510	706	632	616				
7	1	570	555	611	579	20	195	6	113
	2	570	632	600	601				
	3	605	925	600	710				
8	1	640	520	644	601	11	12	101	111
	2	620	540	842	667				
	3	623	520	778	640				
9	1	550	650	765	655	43	38	86	75
	2	625	590	613	609				
	3	623	580	760	654				
10	1	624	685	839	716	52	34	123	100
	2	520	633	776	643				
	3	570	621	602	598				
11	1	640	611	854	702	13	37	172	119
	2	645	680	602	642				

	3	620	622	930	724				
12	1	636	685	613	645	72	27	57	58
	2	632	659	724	672				
	3	510	632	644	595				
13	1	642	611	646	633	14	6	47	33
	2	624	600	706	643				
	3	615	600	614	610				
14	1	623	897	602	707	13	77	58	103
	2	642	744	622	669				
	3	648	825	711	728				
15	1	624	666	501	597	28	102	113	113
	2	646	784	715	715				
	3	679	870	546	698				
16	1	684	766	680	710	17	128	67	79
	2	653	854	802	770				
	3	681	602	692	658				
17	1	635	930	680	748	10	217	151	140
	2	642	520	912	691				
	3	623	600	628	617				
18	1	520	540	662	574	61	21	25	48
	2	642	570	612	608				
	3	580	580	635	598				
19	1	687	590	612	630	54	21	30	37
	2	648	600	671	640				
	3	580	630	640	617				
20	1	645	613	784	681	13	115	56	97
	2	625	760	870	752				
	3	650	839	766	752				
21	1	685	776	854	772	43	117	172	131
	2	605	602	602	603				
	3	620	554	930	701				
22	1	635	806	613	685	11	100	57	62
	2	645	667	724	679				
	3	657	613	644	638				
23	1	633	593	646	624	49	40	47	46
	2	729	673	706	703				
	3	700	640	614	651				
24	1	869	706	602	726	97	76	58	111
	2	700	555	622	626				
	3	868	632	711	737				
25	1	654	925	501	693	40	204	113	126
	2	601	600	715	639				
	3	680	550	546	592				
26	1	650	657	680	662	23	50	67	62

	2	613	633	802	683				
	3	609	729	692	677				
27	1	650	706	680	679	91	96	151	107
	2	601	869	912	794				
	3	778	701	628	702				
28	1	897	868	657	807	77	141	50	108
	2	744	654	633	677				
	3	825	601	729	718				
29	1	620	680	706	669	20	34	96	81
	2	644	650	869	721				
	3	605	613	701	640				
30	1	520	609	868	666	50	188	141	143
	2	620	650	654	641				
	3	570	954	601	708				
31	1	560	778	680	673	46	80	34	104
	2	651	897	650	733				
	3	602	744	613	653				
32	1	540	825	609	658	203	176	188	172
	2	550	520	650	573				
	3	897	520	954	790				
33	1	744	648	778	723	80	8	80	87
	2	825	654	897	792				
	3	666	663	744	691				
34	1	784	655	825	755	56	15	104	87
	2	870	659	644	724				
	3	766	682	646	698				
35	1	854	662	706	741	143	25	57	82
	2	602	612	614	609				
	3	610	635	602	616				
36	1	636	612	622	623	23	76	105	69
	2	625	671	711	669				
	3	670	520	501	564				
37	1	675	560	715	650	26	66	89	69
	2	645	510	546	567				
	3	623	640	680	648				
38	1	510	685	802	666	61	34	67	90
	2	520	633	692	615				
	3	620	621	680	640				
39	1	621	611	912	715	6	37	147	112
	2	626	680	628	645				
	3	615	622	839	692				
40	1	684	685	776	715	17	27	117	61
	2	656	659	602	639				
	3	652	632	554	613				

41	1	644	611	806	687	26	6	100	65
	2	653	600	667	640				
	3	605	600	613	606				
42	1	609	657	593	620	51	50	40	68
	2	520	633	673	609				
	3	520	729	640	630				
43	1	656	706	706	689	20	96	76	86
	2	662	869	555	695				
	3	625	701	632	653				
44	1	630	868	925	808	63	141	152	127
	2	645	654	646	648				
	3	530	601	679	603				
45	1	640	680	684	668	6	34	17	23
	2	650	650	653	651				
	3	640	613	681	645				
46	1	689	609	784	694	136	188	56	124
	2	647	650	870	722				
	3	900	954	766	873				
47	1	612	778	854	748	41	80	172	152
	2	560	897	602	686				
	3	530	744	930	735				
48	1	645	825	613	694	12	114	57	66
	2	663	633	724	673				
	3	668	621	644	644				
49	1	643	611	646	633	12	37	47	32
	2	644	680	706	677				
	3	623	622	614	620				
50	1	614	685	602	634	4	27	58	37
	2	613	659	622	631				
	3	621	632	711	655				
51	1	631	611	501	581	156	6	113	114
	2	623	600	715	646				
	3	897	600	546	681				
52	1	744	648	680	691	80	8	67	66
	2	825	654	802	760				
	3	666	663	692	674				
53	1	784	655	680	706	56	15	151	101
	2	870	659	912	814				
	3	766	682	628	692				
54	1	854	662	646	721	146	25	21	78
	2	602	612	679	631				
	3	600	635	684	640				
55	1	663	612	653	643	21	34	18	25
	2	624	671	681	659				
	3	656	613	648	639				

56	1	681	760	654	698	31	42	5	75
	2	624	839	663	709				
	3	632	776	655	688				
57	1	624	602	659	628	5	189	13	102
	2	622	602	682	635				
	3	631	930	662	741				
58	1	652	613	612	626	15	57	13	35
	2	623	724	635	661				
	3	645	644	612	634				
59	1	623	646	671	647	78	47	22	54
	2	685	706	700	697				
	3	530	614	657	600				
60	1	641	602	633	625	4	58	50	44
	2	643	622	729	665				
	3	649	711	706	689				
61	1	644	501	869	671	5	113	97	125
	2	651	715	701	689				
	3	653	546	868	689				
62	1	655	680	685	673	21	67	27	53
	2	658	802	659	706				
	3	621	692	632	648				
63	1	641	680	611	644	21	151	6	97
	2	674	912	600	729				
	3	681	628	600	636				
64	1	656	657	784	699	15	50	56	85
	2	635	633	870	713				
	3	628	729	766	708				
65	1	627	706	854	729	6	96	172	124
	2	623	869	602	698				
	3	634	701	930	755				
66	1	638	868	613	706	12	141	57	83
	2	639	654	724	672				
	3	618	601	644	621				
67	1	612	680	646	646	7	34	47	33
	2	621	650	706	659				
	3	626	613	614	618				
68	1	623	609	602	611	63	188	58	122
	2	633	650	622	635				
	3	520	954	711	728				
69	1	550	778	501	610	46	80	113	129
	2	623	897	715	745				
	3	635	744	546	642				
70	1	623	825	680	709	3	117	67	80
	2	624	635	802	687				
	3	629	612	692	644				

71	1	630	671	680	660	69	63	151	111
	2	520	550	912	661				
	3	647	640	628	638				
72	1	653	657	613	641	72	50	115	78
	2	623	633	760	672				
	3	760	729	839	776				
73	1	645	706	776	709	69	96	117	97
	2	686	869	602	719				
	3	780	701	554	678				
74	1	693	868	806	789	95	141	100	105
	2	675	654	667	665				
	3	520	601	613	578				
75	1	530	680	593	601	54	34	40	55
	2	623	650	673	649				
	3	530	613	640	594				
76	1	605	609	706	640	24	188	76	120
	2	615	650	555	607				
	3	570	954	632	719				
77	1	645	778	925	783	43	120	158	124
	2	645	897	648	730				
	3	570	657	654	627				
78	1	645	633	663	647	12	50	4	35
	2	635	729	655	673				
	3	622	706	659	662				
79	1	635	869	682	729	6	97	36	100
	2	638	701	662	667				
	3	627	868	612	702				
80	1	648	654	635	646	75	40	30	49
	2	653	601	612	622				
	3	520	680	671	624				
81	1	530	650	613	598	68	23	115	99
	2	540	613	760	638				
	3	653	609	839	700				
82	1	623	650	776	683	116	153	98	130
	2	760	954	602	772				
	3	530	778	612	640				
83	1	520	897	635	684	56	77	30	131
	2	510	744	612	622				
	3	612	825	671	703				
84	1	540	766	614	640	81	128	10	102
	2	560	854	602	672				
	3	690	602	622	638				
85	1	670	930	711	770	67	161	122	123
	2	660	613	501	591				
	3	550	724	715	663				

86	1	635	700	800	712	10	121	73	82
	2	655	750	750	718				
	3	648	520	657	608				
87	1	750	800	633	728	49	77	50	57
	2	780	740	729	750				
	3	685	648	706	680				
88	1	870	654	869	798	123	5	97	103
	2	680	663	701	681				
	3	640	655	868	721				
89	1	820	659	654	711	140	13	40	95
	2	890	682	601	724				
	3	620	662	680	654				
90	1	900	612	650	721	154	13	23	93
	2	642	635	613	630				
	3	625	612	609	615				
91	1	800	671	650	707	93	74	153	108
	2	760	613	954	776				
	3	623	760	778	720				
92	1	800	839	897	845	57	123	77	87
	2	770	776	744	763				
	3	689	602	825	705				
93	1	760	780	820	787	157	83	59	112
	2	800	800	780	793				
	3	510	648	897	685				
94	1	800	654	744	733	159	5	80	97
	2	790	663	825	759				
	3	520	655	666	614				
95	1	900	659	784	781	132	13	56	98
	2	830	682	870	794				
	3	645	662	766	691				
96	1	830	612	854	765	117	13	172	129
	2	600	635	602	612				
	3	675	612	930	739				
97	1	580	671	654	635	47	74	5	58
	2	560	613	663	612				
	3	650	760	655	688				
98	1	685	839	659	728	34	123	13	77
	2	633	776	682	697				
	3	621	602	662	628				
99	1	611	776	612	666	37	117	13	63
	2	680	602	635	639				
	3	622	554	612	596				
100	1	685	806	671	721	27	100	100	88
	2	659	667	784	703				
	3	632	613	870	705				

101	1	611	593	766	657	22	40	128	89
	2	645	673	854	724				
	3	605	640	602	616				
102	1	580	706	930	739	28	76	161	117
	2	570	555	613	579				
	3	622	632	724	659				
103	1	680	925	644	750	17	71	35	104
	2	680	784	646	703				
	3	650	870	706	742				
104	1	540	766	614	640	81	128	10	102
	2	560	854	602	672				
	3	690	602	622	638				
105	1	670	930	711	770	60	161	122	125
	2	600	613	501	571				
	3	550	724	715	663				
106	1	650	644	546	613	5	35	128	68
	2	640	646	680	655				
	3	648	706	802	719				
107	1	654	614	692	653	5	10	131	93
	2	663	602	680	648				
	3	655	622	912	730				
108	1	659	711	628	666	13	122	16	63
	2	682	501	657	613				
	3	662	715	633	670				
109	1	600	546	729	625	18	128	88	103
	2	635	680	706	674				
	3	612	802	869	761				
110	1	671	692	701	688	80	131	112	102
	2	600	680	868	716				
	3	760	912	654	775				
111	1	839	628	601	689	123	60	40	104
	2	776	550	680	669				
	3	602	510	650	587				
112	1	680	540	613	611	21	74	23	56
	2	640	520	609	590				
	3	670	657	650	659				
113	1	644	633	954	744	101	50	90	109
	2	842	729	778	783				
	3	778	706	897	794				
114	1	765	869	744	793	86	97	103	95
	2	613	701	825	713				
	3	760	868	621	750				
115	1	839	654	611	701	123	40	37	83
	2	776	601	680	686				
	3	602	680	622	635				

116	1	640	650	685	658	59	23	27	39
	2	550	613	659	607				
	3	660	609	632	634				
117	1	670	650	611	644	93	153	6	127
	2	520	954	600	691				
	3	690	778	600	689				
118	1	640	897	510	682	21	77	126	117
	2	650	744	613	669				
	3	680	825	760	755				
119	1	510	870	839	740	123	56	123	121
	2	680	766	776	741				
	3	750	854	602	735				
120	1	605	602	554	587	38	186	126	118
	2	650	930	806	795				
	3	680	613	667	653				
121	1	580	724	613	639	46	46	42	44
	2	670	644	593	636				
	3	640	646	673	653				
122	1	612	706	640	653	37	57	76	51
	2	684	614	706	668				
	3	632	602	555	596				
123	1	635	622	632	630	29	105	162	113
	2	690	711	925	775				
	3	648	501	657	602				
124	1	654	715	633	667	5	89	50	55
	2	663	546	729	646				
	3	655	680	706	680				
125	1	659	802	869	777	13	67	97	87
	2	682	692	701	692				
	3	662	680	868	737				
126	1	612	912	654	726	13	202	40	108
	2	635	628	601	621				
	3	612	520	680	604				
127	1	718	657	650	675	97	50	23	91
	2	897	633	613	714				
	3	744	729	609	694				
128	1	825	706	650	727	83	96	153	101
	2	666	869	954	830				
	3	784	701	778	754				
129	1	870	868	897	878	56	141	77	104
	2	766	654	744	721				
	3	854	601	825	760				
130	1	602	680	662	648	42	34	25	30
	2	620	650	612	627				
	3	682	613	635	643				

131	1	634	609	612	618	18	188	87	111
	2	654	650	671	658				
	3	670	954	784	803				
132	1	672	778	870	773	28	80	56	92
	2	635	897	766	766				
	3	689	744	854	762				
133	1	678	825	602	702	78	168	186	150
	2	647	602	930	726				
	3	530	930	613	691				
134	1	648	613	724	662	8	57	46	38
	2	654	724	644	674				
	3	663	644	646	651				
135	1	655	646	706	669	15	47	57	39
	2	659	706	614	660				
	3	682	614	602	633				
136	1	662	602	622	629	25	58	105	63
	2	612	622	711	648				
	3	635	711	501	616				
137	1	612	501	715	609	34	113	89	79
	2	671	715	546	644				
	3	613	546	680	613				
138	1	760	680	802	747	42	67	67	62
	2	839	802	692	778				
	3	776	692	680	716				
139	1	602	680	912	731	42	151	173	124
	2	685	912	628	742				
	3	659	628	600	629				
140	1	632	613	657	634	61	115	50	79
	2	604	760	633	666				
	3	720	839	729	763				
141	1	605	776	706	696	27	117	96	97
	2	648	602	869	706				
	3	654	554	701	636				
142	1	663	806	868	779	4	100	141	89
	2	655	667	654	659				
	3	659	613	601	624				
143	1	682	593	680	652	43	40	34	34
	2	662	673	650	662				
	3	600	640	613	618				
144	1	635	706	609	650	36	76	188	116
	2	600	555	650	602				
	3	671	632	954	752				
145	1	613	925	778	772	115	154	80	109
	2	760	654	897	770				
	3	839	663	744	749				

146	1	776	655	825	752	90	15	158	91
	2	602	659	510	590				
	3	650	682	670	667				
147	1	625	662	620	636	15	25	19	20
	2	628	612	630	623				
	3	600	635	657	631				
148	1	510	612	633	585	56	30	50	67
	2	570	671	729	657				
	3	621	644	706	657				
149	1	570	842	869	760	26	41	97	125
	2	560	778	701	680				
	3	610	765	868	748				
150	1	657	613	654	641	50	115	40	77
	2	633	760	601	665				
	3	729	839	680	749				
151	1	706	776	650	711	96	164	23	119
	2	869	602	613	695				
	3	701	930	609	747				
152	1	868	613	650	710	141	57	153	123
	2	654	724	954	777				
	3	601	644	778	674				
153	1	680	646	897	741	40	47	77	99
	2	650	706	744	700				
	3	600	614	825	680				
154	1	609	602	776	662	46	58	117	69
	2	650	622	602	625				
	3	700	711	554	655				
155	1	778	501	806	695	80	113	100	128
	2	897	715	667	760				
	3	744	546	613	634				
156	1	825	680	593	699	120	67	40	82
	2	632	802	673	702				
	3	605	692	640	646				
157	1	623	680	706	670	53	151	76	117
	2	550	912	555	672				
	3	520	628	632	593				
158	1	623	784	925	777	61	56	194	141
	2	628	870	580	693				
	3	520	766	600	629				
159	1	620	854	510	661	36	172	79	131
	2	624	602	657	628				
	3	684	930	633	749				

160	1	620	613	729	654	25	57	88	83
	2	614	724	706	681				
	3	660	644	869	724				
161	1	540	646	701	629	66	47	112	91
	2	671	706	868	748				
	3	605	614	654	624				
162	1	550	602	601	584	68	58	40	62
	2	510	622	680	604				
	3	642	711	650	668				
163	1	580	501	613	565	61	113	23	70
	2	662	715	609	662				
	3	699	546	650	632				
164	1	530	680	954	721	41	67	90	152
	2	530	802	778	703				
	3	601	692	897	730				
165	1	640	680	744	688	65	151	41	106
	2	570	912	825	769				
	3	700	628	770	699				
166	1	630	620	510	587	17	45	95	57
	2	631	530	600	587				
	3	601	570	700	624				
167	1	677	784	600	687	40	56	21	105
	2	600	870	610	693				
	3	620	766	570	652				
168	1	689	854	648	730	66	172	8	116
	2	698	602	654	651				
	3	580	930	663	724				
169	1	661	613	655	643	39	57	15	37
	2	673	724	659	685				
	3	600	644	682	642				
170	1	634	646	662	647	48	47	25	46
	2	540	706	612	619				
	3	600	614	635	616				
171	1	520	602	612	578	12	58	41	69
	2	540	622	671	611				
	3	540	711	690	647				
172	1	639	501	590	577	22	113	48	66
	2	600	715	685	667				
	3	601	546	633	593				
Average		651.9	687.8	695.0					
Maximum		900	954	954					
Minimum		510	501	501					
Unc		195	226.5	226.5					
Percentage of Unc		30%	33%	33%					

Tabel 45. Hasil data pengukuran MC dan deviasi sisi *front wall* elevasi 23-25 m

no tube	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	637	680	621	646	61	103	36	96
	2	540	802	611	651				
	3	604	692	680	659				
	4	520	680	622	607				
	5	663	912	685	753				
2	1	510	628	659	599	92	13	25	59
	2	520	648	632	600				
	3	510	654	611	592				
	4	678	663	600	647				
	5	684	655	600	646				
3	1	674	659	520	618	8	27	15	63
	2	668	682	540	630				
	3	682	662	550	631				
	4	674	612	540	609				
	5	689	635	560	628				
4	1	674	612	784	690	11	99	106	90
	2	663	671	870	735				
	3	659	613	766	679				
	4	687	760	854	767				
	5	678	839	602	706				
5	1	646	776	930	784	18	76	129	85
	2	679	602	613	631				
	3	684	667	724	692				
	4	653	613	644	637				
	5	681	593	646	640				
6	1	550	673	706	643	76	56	53	64
	2	540	640	614	598				
	3	684	706	602	664				
	4	662	555	622	613				
	5	520	632	711	621				
7	1	645	925	501	690	66	115	124	113
	2	540	657	715	637				
	3	653	633	546	611				
	4	634	729	680	681				
	5	510	706	802	673				
8	1	625	869	692	729	64	124	146	127
	2	644	701	680	675				

	3	510	868	912	763				
	4	623	654	628	635				
	5	520	601	510	544				
9	1	675	680	784	713	71	30	106	105
	2	623	650	870	714				
	3	649	613	766	676				
	4	540	609	854	668				
	5	510	650	602	587				
10	1	520	954	930	801	68	86	129	134
	2	686	778	613	692				
	3	628	897	724	750				
	4	637	744	644	675				
	5	550	825	646	674				
11	1	671	635	706	671	65	22	53	59
	2	530	612	614	585				
	3	540	671	602	604				
	4	610	648	622	627				
	5	520	654	711	628				
12	1	540	663	501	568	84	10	124	83
	2	680	655	715	683				
	3	670	659	546	625				
	4	510	682	680	624				
	5	680	662	802	715				
13	1	678	612	692	661	27	26	115	74
	2	629	635	680	648				
	3	682	612	912	735				
	4	647	671	628	649				
	5	623	613	644	627				
14	1	611	760	842	738	34	136	84	102
	2	632	839	778	750				
	3	580	776	765	707				
	4	652	602	613	622				
	5	666	510	760	645				
15	1	580	560	839	660	59	124	80	105
	2	697	784	776	752				
	3	550	870	646	689				
	4	645	766	679	697				
	5	651	854	684	730				
16	1	618	602	653	624	46	136	96	98
	2	630	930	681	747				
	3	678	613	839	710				
	4	580	724	776	693				
	5	694	644	602	647				
17	1	635	646	554	612	56	41	98	65

	2	635	706	806	716				
	3	530	614	667	604				
	4	684	602	613	633				
	5	633	622	593	616				
18	1	659	711	673	681	27	100	56	64
	2	645	501	640	595				
	3	689	715	706	703				
	4	625	546	555	575				
	5	623	680	632	645				
19	1	520	802	925	749	73	114	107	133
	2	540	692	897	710				
	3	689	680	744	704				
	4	560	912	825	766				
	5	645	628	666	646				
20	1	618	646	784	683	46	18	106	95
	2	671	679	870	740				
	3	580	684	766	677				
	4	550	653	854	686				
	5	620	681	602	634				
21	1	611	560	930	700	35	55	123	99
	2	550	510	648	569				
	3	580	540	654	591				
	4	640	570	663	624				
	5	570	657	655	627				
22	1	622	633	659	638	64	87	27	84
	2	600	729	682	670				
	3	672	706	662	680				
	4	530	869	612	670				
	5	520	701	635	619				
23	1	643	868	612	708	47	103	45	70
	2	691	654	671	672				
	3	560	601	657	606				
	4	621	680	633	645				
	5	623	650	729	667				
24	1	653	613	706	657	56	147	101	118
	2	590	609	869	689				
	3	530	650	701	627				
	4	656	954	868	826				
	5	653	778	654	695				
25	1	649	897	601	716	58	111	33	94
	2	619	744	680	681				
	3	510	825	650	662				
	4	639	657	613	636				
	5	645	633	609	629				

26	1	647	729	650	675	34	86	122	107
	2	677	706	954	779				
	3	614	869	778	754				
	4	625	701	897	741				
	5	694	868	744	769				
27	1	648	654	825	709	70	32	75	73
	2	682	601	657	647				
	3	560	680	633	624				
	4	632	650	729	670				
	5	510	613	706	610				
28	1	628	609	869	702	50	150	124	142
	2	530	650	701	627				
	3	510	954	868	777				
	4	570	778	654	667				
	5	610	897	601	703				
29	1	684	744	680	703	88	93	30	84
	2	540	825	650	672				
	3	687	706	613	669				
	4	530	614	609	584				
	5	510	602	650	587				
30	1	689	622	954	755	68	96	86	140
	2	560	711	778	683				
	3	617	501	897	672				
	4	510	715	744	656				
	5	560	546	825	644				
31	1	560	680	671	637	47	103	79	101
	2	648	802	784	745				
	3	679	692	870	747				
	4	663	680	766	703				
	5	621	912	854	796				
32	1	520	628	602	583	69	102	136	113
	2	590	760	930	760				
	3	550	839	613	667				
	4	645	776	724	715				
	5	689	602	644	645				
33	1	647	554	646	616	40	98	41	62
	2	628	806	706	713				
	3	641	667	614	641				
	4	632	613	602	616				
	5	550	593	622	588				
34	1	600	673	711	661	35	56	100	64
	2	659	640	501	600				
	3	648	706	715	690				
	4	684	555	546	595				
	5	610	632	680	641				

35	1	634	925	802	787	59	115	114	111
	2	520	657	692	623				
	3	681	633	680	665				
	4	610	729	912	750				
	5	610	706	628	648				
36	1	510	869	520	633	75	124	141	121
	2	697	701	784	727				
	3	685	868	870	808				
	4	655	654	766	692				
	5	647	601	854	701				
37	1	510	680	602	597	78	30	136	103
	2	530	650	930	703				
	3	694	613	613	640				
	4	580	609	724	638				
	5	510	650	644	601				
38	1	520	954	646	707	23	86	41	137
	2	570	778	706	685				
	3	530	897	614	680				
	4	540	744	602	629				
	5	570	825	622	672				
39	1	510	612	711	611	68	101	100	108
	2	645	671	501	606				
	3	622	784	715	707				
	4	510	870	546	642				
	5	635	766	680	694				
40	1	520	854	802	725	65	145	114	135
	2	510	602	692	601				
	3	635	930	680	748				
	4	540	613	912	688				
	5	645	724	628	666				
41	1	645	644	685	658	23	40	34	31
	2	658	646	633	646				
	3	645	706	621	657				
	4	600	614	611	608				
	5	623	602	680	635				
42	1	530	622	622	591	41	96	30	68
	2	550	711	685	649				
	3	630	501	659	597				
	4	570	715	632	639				
	5	530	546	611	562				
43	1	674	680	600	651	59	103	53	92
	2	645	802	600	682				
	3	629	692	657	659				
	4	638	680	633	650				
	5	520	912	729	720				

44	1	671	628	706	668	59	13	101	92
	2	510	648	869	676				
	3	610	654	701	655				
	4	621	663	868	717				
	5	625	655	654	645				
45	1	678	659	601	646	30	27	33	29
	2	613	682	680	658				
	3	610	662	650	641				
	4	663	612	613	629				
	5	636	635	609	627				
46	1	612	612	650	625	32	99	122	113
	2	684	671	954	770				
	3	632	613	778	674				
	4	635	760	897	764				
	5	600	839	744	728				
47	1	648	776	825	750	6	113	181	118
	2	654	602	600	619				
	3	663	766	510	646				
	4	655	854	510	673				
	5	659	602	897	719				
48	1	682	930	744	785	31	129	78	101
	2	662	613	825	700				
	3	612	724	666	667				
	4	635	644	784	688				
	5	612	646	870	709				
49	1	640	706	766	704	36	53	159	102
	2	600	614	854	689				
	3	687	602	602	630				
	4	682	622	930	745				
	5	664	711	560	645				
50	1	600	501	648	583	31	124	6	68
	2	660	715	654	676				
	3	645	546	663	618				
	4	685	680	655	673				
	5	640	802	659	700				
51	1	635	692	682	670	53	115	31	84
	2	560	680	662	634				
	3	656	912	612	727				
	4	623	628	635	629				
	5	530	648	612	597				
52	1	510	654	671	612	86	11	90	90
	2	678	663	613	651				
	3	520	655	760	645				
	4	684	659	839	727				
	5	550	682	776	669				

53	1	550	662	602	605	59	28	97	65
	2	600	612	554	589				
	3	550	635	806	664				
	4	685	612	667	655				
	5	644	671	613	643				
54	1	580	613	593	595	63	105	61	88
	2	510	760	673	648				
	3	645	839	640	708				
	4	657	776	706	713				
	5	652	602	555	603				
55	1	643	685	632	653	58	34	124	94
	2	611	633	925	723				
	3	619	621	657	632				
	4	520	611	633	588				
	5	520	680	729	643				
56	1	689	622	706	672	33	30	101	82
	2	674	685	869	743				
	3	610	659	701	657				
	4	645	632	868	715				
	5	623	611	654	629				
57	1	615	600	601	605	83	132	33	93
	2	674	600	680	651				
	3	685	580	650	638				
	4	510	784	613	636				
	5	520	870	609	666				
58	1	649	766	650	688	21	145	122	128
	2	642	854	954	817				
	3	600	602	778	660				
	4	623	930	897	817				
	5	610	613	744	656				
59	1	666	724	825	738	18	46	75	50
	2	632	644	654	643				
	3	652	646	663	654				
	4	678	706	655	680				
	5	668	614	659	647				
60	1	634	602	682	639	60	88	31	60
	2	646	622	662	643				
	3	649	711	612	657				
	4	510	501	635	549				
	5	649	715	612	659				
61	1	642	546	671	620	47	91	38	70
	2	600	680	657	646				
	3	623	802	633	686				
	4	610	692	729	677				
	5	520	680	706	635				

62	1	600	912	869	794	35	119	124	103
	2	659	628	701	663				
	3	648	657	868	724				
	4	684	633	654	657				
	5	610	729	601	647				
63	1	540	706	680	642	34	101	30	108
	2	570	869	650	696				
	3	510	701	613	608				
	4	590	868	609	689				
	5	520	654	650	608				
64	1	678	601	954	744	63	33	86	120
	2	520	680	778	659				
	3	600	650	897	716				
	4	660	613	744	672				
	5	645	609	825	693				
65	1	685	650	613	649	72	122	47	122
	2	640	954	724	773				
	3	560	778	644	661				
	4	520	897	646	688				
	5	530	744	706	660				
66	1	649	825	614	696	21	121	75	85
	2	642	602	602	615				
	3	600	554	622	592				
	4	623	806	711	713				
	5	610	667	501	593				
67	1	600	613	715	643	31	45	92	61
	2	660	593	546	600				
	3	645	673	680	666				
	4	685	640	802	709				
	5	640	706	692	679				
68	1	520	555	680	585	66	173	120	128
	2	510	632	912	685				
	3	649	925	628	734				
	4	642	510	656	603				
	5	600	520	630	583				
69	1	623	657	685	655	32	92	34	78
	2	610	633	633	625				
	3	550	729	621	633				
	4	560	706	611	626				
	5	600	869	680	716				
70	1	660	701	622	661	21	101	30	63
	2	645	868	685	733				
	3	685	654	659	666				
	4	640	601	632	624				
	5	685	680	611	659				

71	1	633	650	600	628	27	146	132	110
	2	621	613	600	611				
	3	611	609	580	600				
	4	680	650	784	705				
	5	622	954	870	815				
72	1	685	778	766	743	35	89	145	113
	2	659	897	854	803				
	3	632	744	602	659				
	4	611	825	930	789				
	5	600	659	613	624				
73	1	600	682	724	669	41	31	46	48
	2	570	662	644	625				
	3	550	612	646	603				
	4	600	635	706	647				
	5	659	612	614	628				
74	1	648	671	602	640	29	27	88	52
	2	685	649	622	652				
	3	633	642	711	662				
	4	621	600	501	574				
	5	611	623	715	650				
75	1	680	610	546	612	28	27	91	55
	2	622	666	680	656				
	3	685	632	802	706				
	4	659	652	692	668				
	5	632	678	680	663				
76	1	611	668	912	730	49	63	119	93
	2	600	634	628	621				
	3	600	646	724	657				
	4	640	649	644	644				
	5	510	510	646	555				
77	1	634	649	706	663	23	40	53	38
	2	653	642	614	636				
	3	660	600	602	621				
	4	697	623	622	647				
	5	658	706	711	692				
78	1	510	555	501	522	96	142	124	120
	2	520	632	715	622				
	3	510	925	546	660				
	4	689	649	680	673				
	5	688	642	802	711				
79	1	700	600	692	664	40	25	132	81
	2	630	623	680	644				
	3	631	610	912	718				
	4	600	666	628	631				
	5	677	632	560	623				

80	1	600	652	784	679	35	18	106	87
	2	659	678	870	736				
	3	648	668	766	694				
	4	684	634	854	724				
	5	610	646	602	619				
81	1	612	649	930	730	32	60	129	90
	2	684	510	613	602				
	3	632	649	724	668				
	4	635	642	644	640				
	5	600	600	646	615				
82	1	648	623	706	659	6	27	53	32
	2	654	622	614	630				
	3	663	685	602	650				
	4	655	659	622	645				
	5	659	632	711	667				
83	1	682	611	501	598	31	126	124	99
	2	662	600	715	659				
	3	612	600	546	586				
	4	635	784	680	700				
	5	612	870	802	761				
84	1	718	766	692	725	29	145	123	108
	2	653	854	680	729				
	3	660	602	912	725				
	4	697	930	628	752				
	5	658	613	602	624				
85	1	648	724	554	642	6	46	98	59
	2	654	644	806	701				
	3	663	646	667	659				
	4	655	706	613	658				
	5	659	614	593	622				
86	1	682	602	673	652	31	88	56	59
	2	662	622	640	641				
	3	612	711	706	676				
	4	635	501	555	564				
	5	612	715	632	653				
87	1	671	546	925	714	90	91	134	102
	2	613	680	649	647				
	3	760	802	642	735				
	4	839	692	600	710				
	5	776	680	623	693				
88	1	602	912	610	708	74	110	27	98
	2	786	628	666	693				
	3	685	784	632	700				
	4	633	870	652	718				
	5	621	766	678	688				

89	1	611	854	668	711	34	145	63	102
	2	680	602	634	639				
	3	622	930	646	733				
	4	685	613	649	649				
	5	659	724	510	631				
90	1	632	644	649	642	21	40	27	30
	2	611	646	642	633				
	3	600	706	600	635				
	4	600	614	623	612				
	5	648	602	671	640				
91	1	654	622	784	687	11	96	106	103
	2	663	711	870	748				
	3	655	501	766	641				
	4	659	715	854	743				
	5	682	546	602	610				
92	1	662	680	930	757	24	103	129	102
	2	612	802	613	676				
	3	635	692	724	684				
	4	612	680	644	645				
	5	658	912	646	739				
93	1	640	628	706	658	36	19	53	38
	2	600	649	614	621				
	3	687	642	602	644				
	4	682	600	622	635				
	5	664	623	711	666				
94	1	600	610	501	570	31	27	124	70
	2	660	666	715	680				
	3	645	632	546	608				
	4	685	652	680	672				
	5	640	678	802	707				
95	1	685	668	692	682	34	63	121	83
	2	633	634	680	649				
	3	621	646	912	726				
	4	611	649	628	629				
	5	680	510	611	600				
96	1	622	649	600	624	30	20	31	26
	2	685	642	600	642				
	3	659	600	648	636				
	4	632	623	654	636				
	5	611	644	663	639				
97	1	600	842	655	699	34	84	26	76
	2	600	778	659	679				

	3	631	765	682	693				
	4	600	613	662	625				
	5	677	760	612	683				
98	1	612	839	635	695	32	135	62	83
	2	684	776	612	691				
	3	632	602	671	635				
	4	635	510	613	586				
	5	600	613	760	658				
99	1	648	760	839	749	6	122	104	98
	2	654	839	776	756				
	3	663	776	602	680				
	4	655	602	870	709				
	5	659	554	766	660				
100	1	682	806	854	781	31	83	145	102
	2	662	667	602	644				
	3	612	613	930	718				
	4	635	593	613	614				
	5	612	673	724	670				
101	1	612	640	644	632	32	141	40	85
	2	684	706	646	679				
	3	632	555	706	631				
	4	635	632	614	627				
	5	600	925	602	709				
102	1	648	633	622	634	6	27	96	56
	2	654	621	711	662				
	3	663	611	501	592				
	4	655	680	715	683				
	5	659	622	546	609				
103	1	682	685	680	682	31	35	103	82
	2	662	659	802	708				
	3	612	632	692	645				
	4	635	611	680	642				
	5	612	600	912	708				
104	1	640	680	613	460	141	28	45	83
	2	706	622	593	443				
	3	555	685	673	470				
	4	632	659	640	450				
	5	925	632	706	460				
105	1	711	611	555	443	115	43	146	105
	2	786	600	632	460				
	3	550	600	925	477				
	4	510	580	610	423				
	5	599	690	620	460				
106	1	640	648	784	691	36	6	106	84
	2	600	654	870	708				

	3	687	663	766	705				
	4	682	655	854	730				
	5	664	659	602	642				
107	1	600	682	930	737	31	31	129	80
	2	660	662	613	645				
	3	645	612	724	660				
	4	685	635	644	655				
	5	640	612	646	633				
108	1	634	671	706	670	23	90	53	68
	2	653	613	614	627				
	3	660	760	602	674				
	4	697	839	622	719				
	5	658	776	711	715				
109	1	560	602	501	554	116	97	124	106
	2	774	554	715	681				
	3	689	806	546	680				
	4	510	667	680	619				
	5	520	613	802	645				
110	1	550	593	692	612	64	61	115	91
	2	688	673	680	680				
	3	649	640	912	734				
	4	540	706	628	625				
	5	590	555	648	598				
111	1	689	632	654	658	73	133	11	99
	2	550	925	663	713				
	3	540	649	655	615				
	4	510	642	659	604				
	5	520	600	682	601				
112	1	623	623	662	636	58	22	28	38
	2	642	610	612	621				
	3	550	666	635	617				
	4	689	632	612	644				
	5	560	652	671	628				
113	1	700	678	613	664	40	18	105	69
	2	630	668	760	686				
	3	631	634	839	701				
	4	600	646	776	674				
	5	677	649	602	643				
114	1	621	510	671	601	65	56	79	110
	2	623	649	784	685				
	3	530	642	870	681				
	4	540	600	766	635				
	5	686	623	854	721				
115	1	570	623	602	598	46	22	136	86
	2	580	610	930	707				

	3	612	666	613	630				
	4	684	632	724	680				
	5	632	652	644	643				
116	1	635	520	646	600	25	63	41	49
	2	600	530	706	612				
	3	648	623	614	628				
	4	654	610	602	622				
	5	663	666	622	650				
117	1	655	632	711	666	26	55	100	66
	2	659	652	501	604				
	3	682	510	715	636				
	4	662	623	546	610				
	5	612	610	680	634				
118	1	635	666	802	701	29	12	114	80
	2	612	632	692	645				
	3	612	652	680	648				
	4	684	648	912	748				
	5	632	654	628	638				
119	1	635	663	623	640	25	10	22	23
	2	600	655	610	622				
	3	648	659	666	658				
	4	654	682	632	656				
	5	663	662	652	659				
120	1	655	612	560	609	26	26	69	50
	2	659	635	560	618				
	3	682	612	510	601				
	4	662	671	685	673				
	5	612	613	633	619				
121	1	635	760	621	672	80	88	36	86
	2	612	839	611	687				
	3	718	776	680	725				
	4	510	602	622	578				
	5	685	766	685	712				
122	1	633	854	659	715	27	145	25	99
	2	621	602	632	618				
	3	611	930	611	717				
	4	680	613	600	631				
	5	622	724	600	649				
123	1	685	644	510	613	35	40	135	83
	2	659	646	613	639				
	3	632	706	760	699				
	4	611	614	839	688				
	5	600	602	776	659				
124	1	600	622	602	608	52	96	97	79
	2	696	711	554	654				

	3	659	501	806	655				
	4	629	715	667	670				
	5	560	546	613	573				
125	1	640	680	593	638	36	103	61	86
	2	600	802	673	692				
	3	687	692	640	673				
	4	682	680	706	689				
	5	664	912	555	710				
126	1	600	628	632	620	31	14	133	76
	2	660	654	925	746				
	3	645	663	649	652				
	4	685	655	642	661				
	5	640	659	600	633				
127	1	612	682	623	639	32	31	22	27
	2	684	662	610	652				
	3	632	612	666	637				
	4	635	635	632	634				
	5	600	612	652	621				
128	1	648	671	678	666	6	79	18	78
	2	654	784	668	702				
	3	663	870	634	722				
	4	655	766	646	689				
	5	659	854	649	721				
129	1	682	602	510	598	31	136	56	91
	2	662	930	649	747				
	3	612	613	642	622				
	4	635	724	600	653				
	5	612	644	623	626				
130	1	718	646	784	716	85	41	106	103
	2	580	706	870	719				
	3	695	614	766	692				
	4	638	602	854	698				
	5	510	622	602	578				
131	1	560	711	930	734	58	100	129	109
	2	644	501	613	586				
	3	628	715	724	689				
	4	540	546	644	577				
	5	510	680	646	612				
132	1	530	802	706	679	56	114	53	92
	2	685	692	614	664				
	3	633	680	602	638				
	4	621	912	622	718				
	5	611	628	711	650				
133	1	680	784	501	655	28	106	124	107
	2	622	870	715	736				

	3	685	766	546	666				
	4	659	854	680	731				
	5	632	602	802	679				
134	1	611	930	692	744	59	129	119	113
	2	600	613	680	631				
	3	600	724	912	745				
	4	674	644	628	649				
	5	510	646	620	592				
135	1	700	706	520	642	40	53	141	99
	2	630	614	784	676				
	3	631	602	870	701				
	4	600	622	766	663				
	5	677	711	854	747				
136	1	689	501	602	597	89	124	136	117
	2	685	715	930	777				
	3	510	546	613	556				
	4	510	680	724	638				
	5	623	802	644	690				
137	1	612	692	646	650	32	138	41	83
	2	684	680	706	690				
	3	632	912	614	719				
	4	635	628	602	622				
	5	600	540	622	587				
138	1	648	520	711	626	6	146	100	95
	2	654	510	501	555				
	3	663	613	715	664				
	4	655	760	546	654				
	5	659	839	680	726				
139	1	682	776	802	753	31	109	114	96
	2	662	602	692	652				
	3	612	554	680	615				
	4	635	806	912	784				
	5	612	667	628	636				
140	1	671	613	520	601	78	45	146	99
	2	510	593	510	538				
	3	520	673	613	602				
	4	635	640	760	678				
	5	510	706	839	685				
141	1	806	555	776	712	83	146	109	107
	2	667	632	602	634				
	3	613	925	554	697				
	4	593	621	806	673				
	5	673	611	667	650				
142	1	450	460	470	644	17	15	16	15
	2	430	440	460	640				

	3	470	480	460	638				
	4	470	450	430	644				
	5	450	460	470	754				
143	1	440	460	430	626	24	18	30	23
	2	450	460	470	673				
	3	470	460	500	692				
	4	420	420	430	567				
	5	480	460	440	636				
144	1	220	130	160	170	59	67	48	56
	2	120	160	110	130				
	3	270	290	190	250				
	4	170	260	240	223				
	5	150	190	190	177				
145	1	130	300	190	207	60	54	41	50
	2	220	260	190	223				
	3	280	220	210	237				
	4	200	270	230	233				
	5	270	160	290	240				
146	1	150	240	110	167	18	72	70	59
	2	150	290	160	200				
	3	180	120	190	163				
	4	160	140	300	200				
	5	130	230	210	190				
147	1	250	110	290	217	65	76	76	68
	2	250	190	100	180				
	3	130	300	260	230				
	4	190	200	230	207				
	5	300	280	270	283				
148	1	160	120	270	183	62	69	54	62
	2	260	190	260	237				
	3	120	150	150	140				
	4	190	210	290	230				
	5	260	300	240	267				
149	1	300	120	100	173	79	72	74	75
	2	240	170	260	223				
	3	270	280	160	237				
	4	300	140	130	190				
	5	110	260	260	210				
150	1	250	110	170	177	39	76	36	53
	2	210	200	130	180				
	3	240	180	220	213				
	4	220	300	140	220				
	5	150	120	180	150				
151	1	110	180	280	190	73	50	36	56
	2	300	120	220	213				

	3	210	230	300	247				
	4	260	230	220	237				
	5	260	240	240	247				
152	1	100	180	160	147	97	62	58	73
	2	240	280	260	260				
	3	300	290	130	240				
	4	290	180	160	210				
	5	110	160	110	127				
153	1	230	290	150	223	53	66	8	51
	2	290	130	160	193				
	3	180	200	170	183				
	4	210	140	160	170				
	5	150	150	150	150				
154	1	250	300	170	240	25	55	44	55
	2	250	230	230	237				
	3	220	270	170	220				
	4	190	280	110	193				
	5	240	160	140	180				
155	1	220	270	270	253	54	35	65	50
	2	280	210	200	230				
	3	250	240	110	200				
	4	190	200	260	217				
	5	140	180	180	167				
156	1	160	270	210	213	66	78	46	65
	2	290	110	140	180				
	3	150	240	170	187				
	4	260	120	170	183				
	5	270	110	260	213				
157	1	110	300	190	200	72	72	42	60
	2	300	200	280	260				
	3	250	260	200	237				
	4	250	240	260	250				
	5	260	110	270	213				
158	1	250	290	150	230	77	73	50	65
	2	240	180	220	213				
	3	290	300	140	243				
	4	140	210	250	200				
	5	110	130	150	130				
159	1	210	270	290	257	32	55	65	50
	2	200	280	210	230				
	3	190	180	150	173				
	4	200	190	120	170				
	5	270	160	200	210				
160	1	240	130	200	190	64	82	49	62
	2	250	150	170	190				

	3	110	300	240	217				
	4	140	130	260	177				
	5	230	270	140	213				
161	1	220	140	170	177	67	25	37	50
	2	160	200	250	203				
	3	260	170	190	207				
	4	290	140	250	227				
	5	130	150	190	157				
162	1	260	140	150	183	70	43	52	52
	2	110	150	220	160				
	3	110	210	230	183				
	4	230	230	110	190				
	5	210	140	210	187				
163	1	210	290	150	217	69	51	60	57
	2	110	210	140	153				
	3	250	170	240	220				
	4	240	220	190	217				
	5	110	160	280	183				
164	1	140	220	110	157	53	35	68	50
	2	240	130	280	217				
	3	230	200	140	190				
	4	130	160	180	157				
	5	150	170	130	150				
165	1	180	260	230	223	61	74	78	68
	2	190	200	130	173				
	3	170	110	300	193				
	4	300	300	110	237				
	5	280	260	170	237				
166	1	280	160	220	220	55	55	53	53
	2	190	230	290	237				
	3	250	240	250	247				
	4	240	140	170	183				
	5	140	270	300	237				
167	1	230	200	170	200	39	59	73	58
	2	270	120	110	167				
	3	280	240	160	227				
	4	240	270	250	253				
	5	180	250	290	240				
168	1	250	240	120	203	53	66	73	63
	2	290	230	220	247				
	3	260	270	160	230				
	4	230	130	300	220				
	5	150	130	140	140				
169	1	120	180	190	163	61	59	43	58
	2	160	280	280	240				

	3	130	230	220	193				
	4	110	160	170	147				
	5	260	130	240	210				
170	1	150	240	120	170	22	61	59	50
	2	150	210	190	183				
	3	180	100	250	177				
	4	190	120	260	190				
	5	140	130	160	143				
171	1	210	140	270	207	44	70	55	54
	2	210	210	250	223				
	3	150	130	240	173				
	4	160	280	160	200				
	5	260	270	150	227				
172	1	240	250	290	260	56	49	73	58
	2	280	140	110	177				
	3	160	260	240	220				
	4	300	190	200	230				
	5	210	220	140	190				
Average		553.1	597.1	601.8					
Maximum		925	954	954					
Minimum		100	100	100					
Unc		412.5	427	427					
Percentage of Unc		75%	72%	71%					

Tabel 46. Hasil data *metal coating* dan deviasi sisi *right wall* elv 16-18 m

no tube	position point	Tube Thickness (µm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	680	655	654	663	103	118	32	100
	2	802	632	601	678				
	3	692	925	680	766				
	4	680	711	650	680				
	5	912	786	613	770				
2	1	628	648	609	628	13	6	150	101
	2	648	654	650	651				
	3	654	663	954	757				
	4	663	655	778	699				
	5	655	659	897	737				
3	1	659	654	744	686	27	11	64	59
	2	682	663	825	723				
	3	662	655	680	666				
	4	612	659	802	691				
	5	635	682	692	670				

4	1	612	662	680	651	35	28	118	73
	2	671	612	912	732				
	3	640	635	628	634				
	4	706	612	648	655				
	5	655	671	654	660				
5	1	632	613	663	636	120	105	135	116
	2	925	760	655	780				
	3	711	839	954	835				
	4	786	776	778	780				
	5	648	602	897	716				
6	1	654	602	744	667	11	136	86	88
	2	663	930	825	806				
	3	655	613	612	627				
	4	659	724	671	685				
	5	682	644	640	655				
7	1	662	646	706	671	28	41	116	80
	2	612	706	655	658				
	3	635	614	632	627				
	4	612	602	925	713				
	5	671	622	711	668				
8	1	878	711	786	792	129	42	125	114
	2	766	620	648	678				
	3	854	715	654	741				
	4	602	641	954	732				
	5	930	680	778	796				
9	1	682	802	897	794	19	114	122	98
	2	634	692	744	690				
	3	654	680	825	720				
	4	670	912	612	731				
	5	672	628	635	645				
10	1	635	648	612	632	114	6	113	89
	2	689	654	671	671				
	3	678	663	878	740				
	4	647	655	654	652				
	5	912	659	601	724				
11	1	628	682	680	663	13	31	30	24
	2	648	662	650	653				
	3	654	612	613	626				
	4	663	635	609	636				
	5	655	612	650	639				
12	1	659	671	954	761	27	90	86	105
	2	682	613	778	691				
	3	662	760	897	773				
	4	612	839	744	732				
	5	635	776	825	745				

13	1	612	602	633	616	35	37	27	32
	2	671	667	621	653				
	3	640	613	611	621				
	4	706	682	680	689				
	5	655	673	622	650				
14	1	632	640	685	652	120	121	65	100
	2	925	706	659	763				
	3	711	776	632	706				
	4	786	632	680	699				
	5	648	925	802	792				
15	1	654	657	692	668	4	92	115	83
	2	663	633	680	659				
	3	655	729	912	765				
	4	659	706	628	664				
	5	663	869	648	727				
16	1	655	701	654	670	26	101	11	60
	2	659	868	663	730				
	3	682	654	655	664				
	4	662	601	659	641				
	5	612	680	682	658				
17	1	635	650	662	649	62	146	28	89
	2	612	613	612	612				
	3	671	609	635	638				
	4	613	650	612	625				
	5	760	954	671	795				
18	1	839	778	640	752	103	97	123	106
	2	776	897	706	793				
	3	602	744	655	667				
	4	650	825	632	702				
	5	625	635	925	728				
19	1	628	612	711	650	75	23	58	55
	2	610	671	786	689				
	3	680	648	648	659				
	4	802	654	654	703				
	5	692	663	663	673				
20	1	680	655	655	663	118	26	26	70
	2	912	659	659	743				
	3	628	682	682	664				
	4	648	662	662	657				
	5	654	612	612	626				
21	1	663	635	635	644	10	62	108	68
	2	655	612	612	626				
	3	659	671	671	667				
	4	682	613	878	724				
	5	662	760	648	690				

22	1	612	839	654	702	24	97	11	71
	2	635	776	663	691				
	3	612	602	655	623				
	4	671	680	659	670				
	5	640	802	682	708				
23	1	706	692	662	687	116	115	28	97
	2	655	680	612	649				
	3	632	912	635	726				
	4	925	628	612	722				
	5	711	648	671	677				
24	1	786	654	640	693	59	11	123	76
	2	648	663	706	672				
	3	654	655	655	655				
	4	663	659	632	651				
	5	655	682	925	754				
25	1	659	662	711	677	27	28	58	44
	2	682	612	786	693				
	3	662	635	648	648				
	4	612	612	654	626				
	5	635	671	663	656				
26	1	612	640	655	636	114	123	26	94
	2	671	706	659	679				
	3	878	655	682	738				
	4	620	632	662	638				
	5	614	925	612	717				
27	1	660	711	635	669	6	58	106	67
	2	648	786	612	682				
	3	654	648	671	658				
	4	663	654	878	732				
	5	655	663	706	675				
28	1	659	655	869	728	27	26	124	81
	2	682	659	701	681				
	3	662	682	868	737				
	4	612	662	654	643				
	5	635	612	601	616				
29	1	612	635	680	642	23	148	30	95
	2	671	612	650	644				
	3	648	671	613	644				
	4	654	878	609	714				
	5	663	930	650	748				
30	1	655	613	954	741	26	47	142	101
	2	659	724	778	720				
	3	682	644	897	741				
	4	662	646	657	655				
	5	612	706	633	650				

31	1	635	614	729	659	62	43	86	87
	2	612	602	706	640				
	3	671	622	869	721				
	4	613	711	701	675				
	5	760	644	868	757				
32	1	839	715	654	736	146	59	32	98
	2	776	646	601	674				
	3	602	680	680	654				
	4	602	802	650	685				
	5	930	692	613	745				
33	1	613	680	609	634	47	118	150	115
	2	724	912	650	762				
	3	644	628	954	742				
	4	646	648	778	691				
	5	706	654	897	752				
34	1	659	663	744	689	27	10	64	59
	2	682	655	825	721				
	3	662	659	680	667				
	4	612	682	802	699				
	5	635	662	692	663				
35	1	612	612	680	635	124	26	118	99
	2	671	635	912	739				
	3	912	612	628	717				
	4	628	671	648	649				
	5	648	613	654	638				
36	1	654	760	663	692	11	93	10	60
	2	663	839	655	719				
	3	655	776	659	697				
	4	659	602	682	648				
	5	682	671	662	672				
37	1	662	784	954	800	28	106	86	114
	2	612	870	778	753				
	3	635	766	897	766				
	4	612	854	744	737				
	5	671	602	825	699				
38	1	640	930	706	759	123	129	116	114
	2	706	613	655	658				
	3	655	724	632	670				
	4	632	644	925	734				
	5	925	646	711	761				
39	1	711	706	786	734	58	53	59	55
	2	786	614	648	683				
	3	648	602	654	635				
	4	654	622	663	646				
	5	663	711	655	676				

40	1	655	610	659	641	26	73	27	48
	2	659	715	682	685				
	3	682	646	662	663				
	4	662	680	612	651				
	5	612	802	635	683				
41	1	635	692	612	646	21	119	112	92
	2	612	680	671	654				
	3	671	912	878	820				
	4	644	628	612	628				
	5	648	623	635	635				
42	1	654	610	612	625	11	21	99	60
	2	663	666	671	667				
	3	655	632	613	633				
	4	659	652	760	690				
	5	682	648	839	723				
43	1	662	654	776	697	28	11	89	53
	2	612	663	602	626				
	3	635	655	776	689				
	4	612	659	602	624				
	5	671	682	648	667				
44	1	613	662	654	643	105	28	11	68
	2	760	612	663	678				
	3	839	635	655	710				
	4	776	612	659	682				
	5	602	671	682	652				
45	1	602	632	662	632	136	21	28	81
	2	930	611	612	718				
	3	613	648	635	632				
	4	724	654	612	663				
	5	644	663	671	659				
46	1	646	655	613	638	31	26	105	67
	2	706	659	760	708				
	3	678	682	839	733				
	4	629	662	776	689				
	5	682	612	602	632				
47	1	647	635	602	628	59	32	136	86
	2	680	612	930	741				
	3	802	671	613	695				
	4	692	613	724	676				
	5	680	680	644	668				
48	1	912	802	646	787	119	114	49	99
	2	628	692	706	675				
	3	648	680	602	643				
	4	654	912	622	729				
	5	663	628	711	667				

49	1	655	648	680	661	26	6	103	74
	2	659	654	802	705				
	3	682	663	692	679				
	4	662	655	680	666				
	5	612	659	912	728				
50	1	635	682	628	648	36	31	13	27
	2	612	662	648	641				
	3	671	612	654	646				
	4	640	635	663	646				
	5	706	612	655	658				
51	1	655	671	659	662	118	29	137	104
	2	632	640	682	651				
	3	925	706	662	764				
	4	711	655	612	659				
	5	786	632	954	791				
52	1	648	925	778	784	6	115	90	95
	2	654	711	897	754				
	3	663	786	744	731				
	4	655	648	825	709				
	5	659	654	655	656				
53	1	682	663	632	659	31	10	120	80
	2	662	655	925	747				
	3	612	659	711	661				
	4	635	682	786	701				
	5	612	662	648	641				
54	1	671	612	654	646	94	112	11	81
	2	878	635	663	725				
	3	659	612	655	642				
	4	682	671	659	671				
	5	662	878	682	741				
55	1	612	614	662	629	24	130	28	77
	2	635	602	612	616				
	3	612	622	635	623				
	4	671	711	612	665				
	5	640	912	671	741				
56	1	706	628	878	737	116	13	141	109
	2	655	648	930	744				
	3	632	654	613	633				
	4	925	663	724	771				
	5	711	655	644	670				
57	1	786	659	646	697	59	27	41	45
	2	648	682	706	679				
	3	654	662	614	643				
	4	663	612	602	626				
	5	655	635	622	637				

58	1	659	612	680	650	27	35	103	77
	2	682	671	802	718				
	3	662	640	692	665				
	4	612	706	680	666				
	5	635	655	912	734				
59	1	612	632	628	624	109	120	13	95
	2	671	925	648	748				
	3	878	711	654	748				
	4	677	786	663	709				
	5	614	648	655	639				
60	1	625	654	659	646	28	24	27	26
	2	694	663	682	680				
	3	648	655	662	655				
	4	682	659	612	651				
	5	648	711	635	665				
61	1	654	648	612	638	11	6	35	20
	2	663	654	671	663				
	3	655	663	640	653				
	4	659	655	706	673				
	5	682	659	655	665				
62	1	662	682	632	659	28	31	120	84
	2	612	662	925	733				
	3	635	612	711	653				
	4	612	635	786	678				
	5	671	612	648	644				
63	1	648	671	654	658	6	90	135	104
	2	654	613	663	643				
	3	663	760	954	792				
	4	655	839	778	757				
	5	659	776	897	777				
64	1	682	602	744	676	31	141	87	94
	2	662	602	825	696				
	3	612	930	635	726				
	4	635	613	612	620				
	5	612	724	671	669				
65	1	671	644	878	731	90	31	116	84
	2	613	646	706	655				
	3	760	706	614	693				
	4	839	706	602	716				
	5	776	680	622	693				
66	1	602	802	711	705	141	114	51	103
	2	602	692	680	658				
	3	930	680	802	804				
	4	613	912	692	739				
	5	724	628	680	677				

67	1	644	648	912	735	26	6	119	68
	2	646	654	628	643				
	3	706	663	648	672				
	4	659	655	654	656				
	5	648	659	663	657				
68	1	684	682	655	674	74	31	26	48
	2	610	662	659	644				
	3	634	612	682	643				
	4	680	635	662	659				
	5	802	612	612	675				
69	1	692	671	635	666	115	29	36	72
	2	680	640	612	644				
	3	912	706	671	763				
	4	628	655	640	641				
	5	648	632	706	662				
70	1	654	925	655	745	11	115	118	97
	2	663	711	632	669				
	3	655	786	925	789				
	4	659	648	711	673				
	5	682	654	786	707				
71	1	662	663	648	658	28	10	6	19
	2	612	655	654	640				
	3	635	659	663	652				
	4	612	682	655	650				
	5	671	662	659	664				
72	1	640	612	682	645	123	112	31	95
	2	706	635	662	668				
	3	655	612	612	626				
	4	632	671	635	646				
	5	925	878	612	805				
73	1	711	954	671	779	58	86	80	94
	2	786	778	878	814				
	3	648	897	842	796				
	4	654	744	778	725				
	5	663	825	765	751				
74	1	655	602	613	623	26	24	105	68
	2	659	648	760	689				
	3	682	654	839	725				
	4	662	663	776	700				
	5	612	655	602	623				
75	1	635	659	930	741	109	27	129	96
	2	612	682	613	636				
	3	671	662	724	686				
	4	878	612	644	711				
	5	760	635	646	680				

76	1	839	612	706	719	146	38	53	97
	2	776	718	614	703				
	3	602	648	602	617				
	4	602	654	622	626				
	5	930	663	711	768				
77	1	613	655	912	727	47	19	119	71
	2	724	659	628	670				
	3	644	682	648	658				
	4	646	662	654	654				
	5	706	701	663	690				
78	1	621	868	655	715	28	103	26	64
	2	625	654	659	646				
	3	678	601	682	654				
	4	613	680	662	652				
	5	610	650	612	624				
79	1	663	613	635	637	28	147	36	90
	2	636	609	612	619				
	3	612	650	671	644				
	4	684	954	640	759				
	5	632	778	706	705				
80	1	635	897	655	729	62	99	118	93
	2	680	744	632	685				
	3	802	825	925	851				
	4	692	659	711	687				
	5	680	682	786	716				
Average		677	685	700					
Maximum		930	954	954					
Minimum		602	601	601					
Unc		164.0	176.5	176.5					
Percentage of Unc		24%	26%	25%					

Tabel 47. Hasil data *metal coating* dan deviasi sisi *right wall* elv 23-25 m

no <i>tube</i>	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	654	654	648	652	32	32	6	26
	2	601	601	654	619				
	3	680	680	663	674				
	4	650	650	655	652				
	5	613	613	659	628				
2	1	609	609	654	624	150	150	11	127
	2	650	650	663	654				
	3	954	954	655	854				
	4	778	778	659	738				
	5	897	897	682	825				
3	1	744	744	662	717	64	64	28	74
	2	825	825	612	754				
	3	680	680	635	665				
	4	802	802	612	739				
	5	692	692	671	685				
4	1	680	680	613	658	118	118	105	105
	2	912	912	760	861				
	3	628	628	839	698				
	4	648	648	776	691				
	5	654	654	602	637				
5	1	663	663	602	643	10	10	136	75
	2	655	655	930	747				
	3	659	659	613	644				
	4	682	682	724	696				
	5	662	662	644	656				
6	1	612	612	646	623	24	24	41	29
	2	635	635	706	659				
	3	612	612	614	613				
	4	671	671	602	648				
	5	640	640	622	634				
7	1	706	706	711	708	116	116	42	94
	2	655	655	620	643				
	3	632	632	715	660				
	4	925	925	641	830				
	5	711	711	680	701				
8	1	786	786	802	791	59	59	114	81
	2	648	648	692	663				
	3	654	654	680	663				
	4	663	663	912	746				
	5	655	655	628	646				
9	1	659	659	648	655	27	27	6	21

	2	682	682	654	673				
	3	662	662	663	662				
	4	612	612	655	626				
	5	635	635	659	643				
10	1	612	612	682	635	113	113	31	89
	2	671	671	662	668				
	3	878	878	612	789				
	4	654	654	635	648				
	5	601	601	612	605				
11	1	680	680	671	677	30	30	90	69
	2	650	650	613	638				
	3	613	613	760	662				
	4	609	609	839	686				
	5	650	650	776	692				
12	1	954	954	602	837	86	86	37	116
	2	778	778	667	741				
	3	897	897	613	802				
	4	744	744	682	723				
	5	825	825	673	774				
13	1	633	633	640	635	27	27	121	84
	2	621	621	706	649				
	3	611	611	776	666				
	4	680	680	632	664				
	5	622	622	925	723				
14	1	685	685	657	676	65	65	92	71
	2	659	659	633	650				
	3	632	632	729	664				
	4	680	680	706	689				
	5	802	802	869	824				
15	1	692	692	701	695	115	115	101	102
	2	680	680	868	743				
	3	912	912	654	826				
	4	628	628	601	619				
	5	648	648	680	659				
16	1	654	654	650	653	11	11	146	80
	2	663	663	613	646				
	3	655	655	609	640				
	4	659	659	650	656				
	5	682	682	954	773				
17	1	662	662	778	701	28	28	97	87
	2	612	612	897	707				
	3	635	635	744	671				
	4	612	612	825	683				
	5	671	671	635	659				
18	1	640	640	612	631	123	123	23	98

	2	706	706	671	694				
	3	655	655	648	653				
	4	632	632	654	639				
	5	925	925	663	838				
19	1	711	711	655	692	58	58	26	50
	2	786	786	659	744				
	3	648	648	682	659				
	4	654	654	662	657				
	5	663	663	612	646				
20	1	655	655	635	648	26	26	62	38
	2	659	659	612	643				
	3	682	682	671	678				
	4	662	662	613	646				
	5	612	612	760	661				
21	1	635	635	839	703	108	108	97	100
	2	612	612	776	667				
	3	671	671	602	648				
	4	878	878	680	812				
	5	648	648	802	699				
22	1	654	654	692	667	11	11	115	66
	2	663	663	680	669				
	3	655	655	912	741				
	4	659	659	628	649				
	5	682	682	648	671				
23	1	662	662	654	659	28	28	11	25
	2	612	612	663	629				
	3	635	635	655	642				
	4	612	612	659	628				
	5	671	671	682	675				
24	1	640	640	662	647	123	123	28	100
	2	706	706	612	675				
	3	655	655	635	648				
	4	632	632	612	625				
	5	925	925	671	840				
25	1	711	711	640	687	58	58	123	79
	2	786	786	706	759				
	3	648	648	655	650				
	4	654	654	632	647				
	5	663	663	925	750				
26	1	655	655	711	674	26	26	58	41
	2	659	659	786	701				
	3	682	682	648	671				
	4	662	662	654	659				
	5	612	612	663	629				
27	1	635	635	655	642	106	106	26	84

	2	612	612	659	628				
	3	671	671	682	675				
	4	878	878	662	806				
	5	706	706	612	675				
28	1	869	869	635	791	124	124	148	122
	2	701	701	612	671				
	3	868	868	671	802				
	4	654	654	878	729				
	5	601	601	930	711				
29	1	680	680	613	658	30	30	47	36
	2	650	650	724	675				
	3	613	613	644	623				
	4	609	609	646	621				
	5	650	650	706	669				
30	1	954	954	614	841	142	142	43	131
	2	778	778	602	719				
	3	897	897	622	805				
	4	657	657	711	675				
	5	633	633	644	637				
31	1	729	729	715	724	86	86	59	80
	2	706	706	646	686				
	3	869	869	680	806				
	4	701	701	802	735				
	5	868	868	692	809				
32	1	654	654	680	663	32	32	118	74
	2	601	601	912	705				
	3	680	680	628	663				
	4	650	650	648	649				
	5	613	613	654	627				
33	1	609	609	663	627	150	150	10	126
	2	650	650	655	652				
	3	954	954	659	856				
	4	778	778	682	746				
	5	897	897	662	819				
34	1	744	744	612	700	64	64	26	77
	2	825	825	635	762				
	3	680	680	612	657				
	4	802	802	671	758				
	5	692	692	613	666				
35	1	680	680	760	707	118	118	93	103
	2	912	912	839	888				
	3	628	628	776	677				
	4	648	648	602	633				
	5	654	654	671	660				
36	1	663	663	784	703	10	10	106	79

	2	655	655	870	727				
	3	659	659	766	695				
	4	682	682	854	739				
	5	662	662	602	642				
37	1	612	612	930	718	24	24	129	81
	2	635	635	613	628				
	3	612	612	724	649				
	4	671	671	644	662				
	5	640	640	646	642				
38	1	706	706	706	706	116	116	53	99
	2	655	655	614	641				
	3	632	632	602	622				
	4	925	925	622	824				
	5	711	711	711	711				
39	1	786	786	610	727	59	59	73	60
	2	648	648	715	670				
	3	654	654	646	651				
	4	663	663	680	669				
	5	655	655	802	704				
40	1	659	659	692	670	27	27	119	72
	2	682	682	680	681				
	3	662	662	912	745				
	4	612	612	628	617				
	5	635	635	623	631				
41	1	612	612	610	611	112	112	21	88
	2	671	671	666	669				
	3	878	878	632	796				
	4	612	612	652	625				
	5	635	635	648	639				
42	1	612	612	654	626	99	99	11	77
	2	671	671	663	668				
	3	613	613	655	627				
	4	760	760	659	726				
	5	839	839	682	787				
43	1	776	776	662	738	89	89	28	72
	2	602	602	612	605				
	3	776	776	635	729				
	4	602	602	612	605				
	5	648	648	671	656				
44	1	654	654	632	647	11	11	21	17
	2	663	663	611	646				
	3	655	655	648	653				
	4	659	659	654	657				
	5	682	682	663	676				
45	1	662	662	655	660	28	28	26	26

	2	612	612	659	628				
	3	635	635	682	651				
	4	612	612	662	629				
	5	671	671	612	651				
46	1	613	613	635	620	105	105	32	89
	2	760	760	612	711				
	3	839	839	671	783				
	4	776	776	613	722				
	5	602	602	680	628				
47	1	602	602	802	669	136	136	114	121
	2	930	930	692	851				
	3	613	613	680	635				
	4	724	724	912	787				
	5	644	644	628	639				
48	1	646	646	648	647	49	49	6	37
	2	706	706	654	689				
	3	602	602	663	622				
	4	622	622	655	633				
	5	711	711	659	694				
49	1	680	680	682	681	103	103	31	96
	2	802	802	662	755				
	3	692	692	612	665				
	4	680	680	635	665				
	5	912	912	612	812				
50	1	628	628	671	642	13	13	29	19
	2	648	648	640	645				
	3	654	654	706	671				
	4	663	663	655	660				
	5	655	655	632	647				
51	1	659	659	925	748	27	27	115	80
	2	682	682	711	692				
	3	662	662	786	703				
	4	612	612	648	624				
	5	635	635	654	641				
52	1	612	612	663	629	35	35	10	27
	2	671	671	655	666				
	3	640	640	659	646				
	4	706	706	682	698				
	5	655	655	662	657				
53	1	632	632	612	625	120	120	112	112
	2	925	925	635	828				
	3	711	711	612	678				
	4	786	786	671	748				
	5	648	648	878	725				
54	1	654	654	614	641	11	11	130	72

	2	663	663	602	643				
	3	655	655	622	644				
	4	659	659	711	676				
	5	682	682	912	759				
55	1	662	662	628	651	28	28	13	23
	2	612	612	648	624				
	3	635	635	654	641				
	4	612	612	663	629				
	5	671	671	655	666				
56	1	878	878	659	805	141	141	27	120
	2	930	930	682	847				
	3	613	613	662	629				
	4	724	724	612	687				
	5	644	644	635	641				
57	1	646	646	612	635	41	41	35	38
	2	706	706	671	694				
	3	614	614	640	623				
	4	602	602	706	637				
	5	622	622	655	633				
58	1	680	680	632	664	103	103	120	101
	2	802	802	925	843				
	3	692	692	711	698				
	4	680	680	786	715				
	5	912	912	648	824				
59	1	628	628	654	637	13	13	24	19
	2	648	648	663	653				
	3	654	654	655	654				
	4	663	663	659	662				
	5	655	655	711	674				
60	1	659	659	648	655	27	27	6	21
	2	682	682	654	673				
	3	662	662	663	662				
	4	612	612	655	626				
	5	635	635	659	643				
61	1	612	612	682	635	35	35	31	32
	2	671	671	662	668				
	3	640	640	612	631				
	4	706	706	635	682				
	5	655	655	612	641				
62	1	632	632	671	645	120	120	90	102
	2	925	925	613	821				
	3	711	711	760	727				
	4	786	786	839	804				
	5	648	648	776	691				
63	1	654	654	602	637	11	11	141	78

	2	663	663	602	643				
	3	655	655	930	747				
	4	659	659	613	644				
	5	682	682	724	696				
64	1	662	662	644	656	28	28	31	32
	2	612	612	646	623				
	3	635	635	706	659				
	4	612	612	706	643				
	5	671	671	680	674				
65	1	878	878	802	853	116	116	114	110
	2	706	706	692	701				
	3	614	614	680	636				
	4	602	602	912	705				
	5	622	622	628	624				
66	1	711	711	648	690	51	51	6	48
	2	680	680	654	671				
	3	802	802	663	756				
	4	692	692	655	680				
	5	680	680	659	673				
67	1	912	912	682	835	119	119	31	96
	2	628	628	662	639				
	3	648	648	612	636				
	4	654	654	635	648				
	5	663	663	612	646				
68	1	655	655	671	660	26	26	29	25
	2	659	659	640	653				
	3	682	682	706	690				
	4	662	662	655	660				
	5	612	612	632	619				
69	1	635	635	925	732	36	36	115	81
	2	612	612	711	645				
	3	671	671	786	709				
	4	640	640	648	643				
	5	706	706	654	689				
70	1	655	655	663	658	118	118	10	97
	2	632	632	655	640				
	3	925	925	659	836				
	4	711	711	682	701				
	5	786	786	662	745				
71	1	648	648	612	636	6	6	112	62
	2	654	654	635	648				
	3	663	663	612	646				
	4	655	655	671	660				
	5	659	659	878	732				
72	1	682	682	954	773	31	31	86	110

	2	662	662	778	701				
	3	612	612	897	707				
	4	635	635	744	671				
	5	612	612	825	683				
73	1	671	671	602	648	80	80	24	93
	2	878	878	648	801				
	3	842	842	654	779				
	4	778	778	663	740				
	5	765	765	655	728				
74	1	613	613	659	628	105	105	27	87
	2	760	760	682	734				
	3	839	839	662	780				
	4	776	776	612	721				
	5	602	602	635	613				
75	1	930	930	612	824	129	129	38	103
	2	613	613	718	648				
	3	724	724	648	699				
	4	644	644	654	647				
	5	646	646	663	652				
76	1	706	706	655	689	53	53	19	43
	2	614	614	659	629				
	3	602	602	682	629				
	4	622	622	662	635				
	5	711	711	701	708				
77	1	912	912	868	897	119	119	103	105
	2	628	628	654	637				
	3	648	648	601	632				
	4	654	654	680	663				
	5	663	663	650	659				
78	1	655	655	613	641	26	26	147	87
	2	659	659	609	642				
	3	682	682	650	671				
	4	662	662	954	759				
	5	612	612	778	667				
79	1	635	635	897	722	36	36	99	80
	2	612	612	744	656				
	3	671	671	825	722				
	4	640	640	659	646				
	5	706	706	682	698				
80	1	500	560	570	543	35	30	30	30
	2	530	540	560	543				
	3	570	580	500	550				
	4	570	500	530	533				
	5	500	560	570	543				
Average		686	686	683					

Maximum	954	954	954
Minimum	500	500	500
Unc	227.0	227.0	227.0
Percentage of Unc	33%	33%	33%

3. Data Hasil *Ceramic Coating*

Pada bagian ini disajikan data hasil pengukuran pekerjaan metal coating yang dilaksanakan pada elevasi 16-18 m, 18-19 m, dan 23-25 m. Data yang disajikan dalam tabel berikut memuat hasil pengukuran berbagai parameter yang diperoleh selama proses pelapisan logam berlangsung. Pengukuran ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil pekerjaan telah memenuhi standar kualitas dan spesifikasi teknis yang ditetapkan. Berikut merupakan tabelnya:

Tabel 48. Hasil data pengukuran *CC* dan deviasi sisi *front wall* elevasi 16-18 m

No tube	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	830	770	870	823	197	123	39	140
	2	911	895	964					
	3	1222	859	900					
	4	1192	1064	916					
2	1	934	780	967	894	182	142	129	157
	2	840	774	1186					
	3	1245	836	901					
	4	1117	1075	935					
3	1	794	878	987	886	100	172	63	113
	2	868	779	949					
	3	903	1179	892					
	4	1034	995	1041					
4	1	948	982	899	943	106	18	98	77
	2	872	1003	945					
	3	1116	968	1034					
	4	923	962	1120					
5	1	764	942	1016	907	96	126	141	136
	2	788	930	1104					
	3	968	1162	852					
	4	904	878	1180					
6	1	942	795	863	867	176	204	47	146
	2	872	787	974					
	3	1233	1017	894					
	4	852	1215	896					

7	1	779	888	956	874	163	115	47	120
	2	930	1157	864	984				
	3	892	1037	852	927				
	4	1167	958	872	999				
8	1	876	900	961	912	71	132	111	112
	2	818	916	751	828				
	3	890	967	965	941				
	4	990	1186	796	991				
9	1	885	901	930	905	90	36	59	63
	2	883	935	1052	957				
	3	851	987	942	927				
	4	1051	949	930	977				
10	1	1204	892	1162	1086	158	69	157	122
	2	895	1041	878	938				
	3	875	899	802	859				
	4	898	945	1002	948				
11	1	1054	901	775	910	164	36	155	122
	2	1064	935	823	941				
	3	762	987	827	859				
	4	789	949	1114	951				
12	1	883	892	1056	944	28	69	96	68
	2	873	1041	917	944				
	3	861	899	863	874				
	4	926	945	843	905				
13	1	942	875	923	913	38	102	65	83
	2	986	1034	890	970				
	3	894	1120	956	990				
	4	939	1016	805	920				
14	1	796	1104	882	927	136	167	125	149
	2	787	852	1175	938				
	3	1065	1180	961	1069				
	4	796	863	1036	898				
15	1	862	974	799	878	31	41	90	61
	2	934	894	988	939				
	3	882	896	796	858				
	4	885	956	864	902				
16	1	850	864	774	829	28	50	239	128
	2	898	852	768	839				
	3	904	872	757	844				
	4	913	961	1244	1039				
17	1	905	751	935	864	12	103	136	96
	2	909	965	812	895				
	3	932	796	882	870				
	4	912	930	1128	990				

18	1	862	1052	755	890	50	109	183	127
	2	885	942	913	913				
	3	862	930	1149	980				
	4	968	1162	1110	1080				
19	1	901	878	929	903	89	52	133	103
	2	867	837	774	826				
	3	790	786	895	824				
	4	700	762	1097	853				
20	1	948	1056	763	922	177	96	159	137
	2	925	917	839	894				
	3	1233	863	1047	1048				
	4	820	843	1090	918				
21	1	774	923	799	832	118	65	103	90
	2	795	890	875	853				
	3	912	956	999	956				
	4	1030	805	769	868				
22	1	948	882	828	886	92	125	131	123
	2	876	1175	791	947				
	3	1066	961	783	937				
	4	865	1036	1059	987				
23	1	892	799	783	825	78	90	79	75
	2	947	988	852	929				
	3	764	796	975	845				
	4	894	864	876	878				
24	1	1034	1074	972	1027	51	173	79	116
	2	1120	1154	859	1044				
	3	1016	769	930	905				
	4	1104	900	1047	1017				
25	1	852	916	832	867	152	132	125	134
	2	1180	967	856	1001				
	3	863	1186	1053	1034				
	4	974	901	761	879				
26	1	894	935	846	892	39	39	79	56
	2	896	987	877	920				
	3	956	949	824	910				
	4	864	892	1001	919				
27	1	852	1041	832	908	86	71	44	88
	2	872	899	838	870				
	3	961	945	756	887				
	4	751	882	763	799				
28	1	965	1040	812	939	106	136	188	134
	2	796	881	905	861				
	3	930	1088	1180	1066				
	4	1052	797	758	869				

29	1	942	761	774	826	126	42	53	109
	2	930	768	834	844				
	3	1162	850	883	965				
	4	878	813	889	860				
30	1	795	793	875	821	204	121	145	151
	2	787	800	880	822				
	3	1017	1001	1170	1063				
	4	1215	1011	1062	1096				
31	1	900	1056	791	916	132	96	222	148
	2	916	917	828	887				
	3	967	863	1247	1026				
	4	1186	843	1116	1048				
32	1	901	923	1056	960	36	65	96	67
	2	935	890	917	914				
	3	987	956	863	935				
	4	949	805	843	866				
33	1	892	882	923	899	69	125	65	96
	2	1041	1175	890	1035				
	3	899	961	956	939				
	4	945	1036	805	929				
34	1	764	799	882	815	19	90	125	131
	2	753	988	1175	972				
	3	787	796	961	848				
	4	794	864	1036	898				
35	1	894	916	799	870	83	132	90	116
	2	1092	967	988	1016				
	3	1028	1186	796	1003				
	4	1015	901	864	927				
36	1	863	935	1053	950	96	39	173	110
	2	1010	987	1049	1015				
	3	1089	949	770	936				
	4	1026	892	1179	1032				
37	1	852	1041	995	963	109	93	15	87
	2	804	899	982	895				
	3	1056	945	1003	1001				
	4	917	1106	968	997				
38	1	863	824	962	883	35	153	109	115
	2	843	830	942	872				
	3	923	775	930	876				
	4	890	1112	1162	1055				
39	1	956	755	878	863	159	76	64	111
	2	805	871	989	888				
	3	882	937	1016	945				
	4	1175	873	1007	1018				
40	1	961	1179	756	965	103	93	128	127

	2	1036	995	768	933				
	3	799	982	853	878				
	4	988	1003	1034	1008				
41	1	796	968	1120	961	198	18	123	131
	2	864	962	1016	947				
	3	787	942	1104	944				
	4	1205	930	852	996				
42	1	787	1162	1180	1043	79	142	143	125
	2	907	878	863	883				
	3	883	894	974	917				
	4	979	1092	894	988				
43	1	956	1028	896	960	95	78	47	92
	2	1119	1015	956	1030				
	3	951	863	864	893				
	4	1118	1010	852	993				
44	1	904	1089	872	955	33	105	100	88
	2	851	1026	961	946				
	3	930	852	751	844				
	4	900	929	965	931				
45	1	863	824	796	828	166	74	105	123
	2	859	780	930	856				
	3	900	938	1052	963				
	4	1204	784	942	977				
46	1	1028	755	930	904	66	130	130	129
	2	1147	974	1162	1094				
	3	994	1004	878	959				
	4	1075	776	907	919				
47	1	805	871	883	853	160	135	99	124
	2	1131	994	979	1035				
	3	992	1079	956	1009				
	4	799	773	1119	897				
48	1	852	907	951	903	57	44	115	72
	2	912	883	1118	971				
	3	976	979	904	953				
	4	965	956	851	924				
49	1	1010	1119	930	1020	133	112	34	109
	2	1023	951	900	958				
	3	780	1118	863	920				
	4	1083	904	859	949				
50	1	874	851	900	875	105	36	135	120
	2	894	930	1204	1009				
	3	1092	900	1028	1007				
	4	1028	863	1147	1013				
51	1	1015	859	994	956	95	155	67	101
	2	863	900	1075	946				

	3	1010	1204	1014	1076				
	4	1089	1028	913	1010				
52	1	1026	1147	894	1022	93	95	83	90
	2	852	994	1092	979				
	3	885	1075	1028	996				
	4	1028	930	1015	991				
53	1	796	1162	863	940	99	176	96	130
	2	794	878	1010	894				
	3	1004	795	1089	963				
	4	866	787	1026	893				
54	1	860	1017	852	910	185	176	31	155
	2	860	1215	787	954				
	3	821	893	817	844				
	4	1216	809	788	938				
55	1	794	898	872	855	160	6	82	95
	2	808	904	893	868				
	3	1099	913	1019	1010				
	4	1052	905	829	929				
56	1	898	909	791	866	6	30	190	101
	2	904	932	848	895				
	3	913	912	850	892				
	4	905	862	1205	991				
57	1	909	885	1065	953	30	71	89	63
	2	932	862	896	897				
	3	912	921	862	898				
	4	862	1022	934	939				
58	1	885	830	882	866	28	62	20	38
	2	862	907	885	885				
	3	921	883	850	885				
	4	863	979	898	913				
59	1	1010	956	904	957	101	95	33	86
	2	1089	1119	913	1040				
	3	1026	951	968	982				
	4	852	1118	962	977				
60	1	843	904	942	896	181	33	126	123
	2	750	851	930	844				
	3	1167	930	1162	1086				
	4	862	900	878	880				
61	1	923	863	942	909	30	166	126	110
	2	942	859	930	910				
	3	994	900	1162	1019				
	4	955	1204	878	1012				
62	1	894	1028	795	906	143	66	204	144
	2	1178	1147	787	1037				
	3	913	994	1017	975				

	4	875	1075	1215	1055				
63	1	974	916	898	929	137	84	6	97
	2	1160	1034	904	1033				
	3	872	1120	913	968				
	4	869	1016	905	930				
64	1	863	1104	909	959	118	167	30	115
	2	866	852	932	883				
	3	990	1180	912	1027				
	4	1110	863	862	945				
65	1	750	974	885	870	196	41	28	108
	2	862	894	862	873				
	3	875	896	921	897				
	4	1205	956	863	1008				
66	1	850	864	1010	908	10	50	101	84
	2	860	852	1089	934				
	3	870	872	1026	923				
	4	870	961	852	894				
67	1	860	751	870	827	42	103	59	68
	2	870	965	910	915				
	3	950	796	770	839				
	4	870	930	860	887				
68	1	750	1052	830	877	74	109	17	108
	2	860	942	870	891				
	3	861	930	860	884				
	4	930	1162	860	984				
69	1	890	878	860	876	99	186	99	146
	2	700	787	770	752				
	3	850	1017	863	910				
	4	700	1215	1010	975				
70	1	700	780	1089	856	108	72	136	118
	2	870	800	1026	899				
	3	900	940	852	897				
	4	700	820	804	775				
71	1	1034	898	1056	996	51	6	96	96
	2	1120	904	917	980				
	3	1016	913	863	931				
	4	1104	905	843	951				
72	1	852	909	923	895	152	30	65	94
	2	1180	932	890	1001				
	3	863	912	956	910				
	4	974	862	805	880				
73	1	894	885	882	887	39	31	158	90
	2	896	862	1175	978				
	3	956	921	850	909				
	4	864	850	850	855				

74	1	852	910	1034	932	86	55	51	120
	2	872	873	1120	955				
	3	961	780	1016	919				
	4	751	850	1104	902				
75	1	965	870	852	896	106	128	152	119
	2	796	942	1180	973				
	3	930	930	863	908				
	4	1052	1162	974	1063				
76	1	942	878	894	905	126	107	39	100
	2	930	795	896	874				
	3	1162	787	956	968				
	4	878	1017	864	920				
77	1	820	1215	852	962	37	197	86	127
	2	900	860	872	877				
	3	870	770	961	867				
	4	830	1034	751	872				
78	1	850	1120	965	978	113	123	106	111
	2	1034	1016	796	949				
	3	1120	1104	930	1051				
	4	1016	852	1052	973				
79	1	1104	1180	942	1075	167	143	126	133
	2	852	863	930	882				
	3	1180	974	1162	1105				
	4	863	894	878	878				
80	1	974	896	982	951	41	47	18	50
	2	894	956	1003	951				
	3	896	864	968	909				
	4	956	852	962	923				
81	1	864	872	942	893	50	100	126	99
	2	852	961	930	914				
	3	872	751	1162	928				
	4	961	965	878	935				
82	1	751	796	870	806	103	105	24	84
	2	965	930	850	915				
	3	796	1052	907	918				
	4	930	942	883	918				
83	1	1052	930	979	987	109	125	79	96
	2	942	1162	956	1020				
	3	930	878	1119	976				
	4	1162	1026	951	1046				
84	1	878	852	1118	949	51	109	116	91
	2	870	804	904	859				
	3	860	1056	851	922				
	4	970	917	930	939				
85	1	865	863	900	876	57	35	23	41

	2	760	843	863	822				
	3	871	923	859	884				
	4	881	890	900	890				
86	1	780	956	1204	980	44	159	99	156
	2	780	805	1028	871				
	3	872	882	1147	967				
	4	820	1175	994	996				
87	1	810	820	1075	902	27	127	46	117
	2	860	1034	1034	976				
	3	870	1120	1120	1037				
	4	861	1016	1016	964				
88	1	750	1104	1104	986	61	167	167	150
	2	862	852	852	855				
	3	872	1180	1180	1077				
	4	881	863	863	869				
89	1	862	974	974	937	150	41	41	84
	2	871	894	894	886				
	3	820	896	896	871				
	4	1147	956	956	1020				
90	1	994	864	864	907	68	50	50	77
	2	1075	852	852	926				
	3	916	872	872	887				
	4	1034	961	961	985				
91	1	1120	751	751	874	123	103	103	128
	2	1016	965	965	982				
	3	1104	796	796	899				
	4	852	930	930	904				
92	1	1180	1052	1052	1095	157	109	109	121
	2	850	942	942	911				
	3	890	930	930	917				
	4	863	1162	1162	1062				
93	1	790	878	878	849	36	104	28	96
	2	830	894	840	855				
	3	820	1092	907	940				
	4	750	1028	883	887				
94	1	820	1015	979	938	35	95	79	107
	2	790	863	956	870				
	3	874	1010	1119	1001				
	4	830	1089	951	957				
95	1	1147	1026	1118	1097	100	106	116	119
	2	994	852	904	917				
	3	1075	790	851	905				
	4	916	820	930	889				
96	1	1034	800	900	911	51	61	23	110
	2	1120	790	863	924				

	3	1016	900	859	925				
	4	1104	900	900	968				
97	1	852	790	1204	949	183	14	99	164
	2	1180	810	1028	1006				
	3	790	820	1147	919				
	4	810	820	994	875				
98	1	870	850	1075	932	36	52	85	69
	2	810	850	898	853				
	3	850	950	904	901				
	4	895	840	913	883				
99	1	894	907	905	902	12	44	12	33
	2	892	883	909	895				
	3	871	979	932	927				
	4	872	956	912	913				
100	1	750	1019	762	844	127	112	28	112
	2	1047	851	785	894				
	3	894	1018	762	891				
	4	975	804	821	867				
101	1	816	751	763	777	84	36	96	92
	2	934	830	910	891				
	3	1020	800	989	936				
	4	916	763	926	868				
102	1	1004	759	752	838	168	155	27	134
	2	752	800	812	788				
	3	1080	1104	762	982				
	4	761	928	785	825				
103	1	830	1047	762	880	63	68	53	109
	2	700	894	821	805				
	3	835	975	710	840				
	4	809	917	710	812				
104	1	782	1115	720	872	15	145	58	119
	2	761	760	730	750				
	3	750	950	820	840				
	4	750	950	830	843				
105	1	720	796	690	735	47	19	54	51
	2	690	829	820	780				
	3	800	834	780	805				
	4	750	803	770	774				
106	1	764	831	760	785	37	66	18	51
	2	690	730	770	730				
	3	690	740	790	740				
	4	690	670	800	720				
107	1	791	670	934	798	69	18	51	137
	2	813	660	1020	831				
	3	670	700	916	762				

	4	700	690	1004	798				
108	1	782	810	752	781	41	123	152	115
	2	760	780	1080	873				
	3	700	730	763	731				
	4	791	1010	874	892				
109	1	710	934	794	813	58	51	39	103
	2	720	1020	796	845				
	3	796	916	856	856				
	4	829	1004	764	866				
110	1	834	752	752	779	53	152	86	106
	2	803	1080	772	885				
	3	831	763	861	818				
	4	720	874	651	748				
111	1	670	794	865	776	80	39	106	85
	2	670	796	696	721				
	3	762	856	830	816				
	4	834	764	952	850				
112	1	782	752	842	792	20	86	126	97
	2	785	772	830	796				
	3	750	861	1062	891				
	4	798	651	778	742				
113	1	804	865	670	780	4	106	143	94
	2	813	696	763	757				
	3	805	830	910	848				
	4	809	952	989	917				
114	1	832	842	926	867	31	126	125	100
	2	812	830	752	798				
	3	762	1062	704	843				
	4	785	778	956	840				
115	1	762	807	817	795	5	44	40	41
	2	772	783	763	773				
	3	771	879	743	798				
	4	773	856	823	817				
116	1	740	1019	790	850	13	112	62	110
	2	730	851	856	812				
	3	720	1018	705	814				
	4	710	804	782	765				
117	1	730	751	1075	852	21	36	132	92
	2	762	830	807	800				
	3	762	800	783	782				
	4	781	763	879	808				
118	1	745	759	856	787	33	155	95	130

	2	748	800	1019	856				
	3	781	1104	851	912				
	4	700	928	1018	882				
119	1	670	1047	804	840	13	67	33	125
	2	680	894	751	775				
	3	690	975	830	832				
	4	700	926	800	809				
120	1	750	752	763	755	29	109	166	117
	2	745	704	759	736				
	3	690	956	800	815				
	4	750	817	1104	890				
121	1	794	763	928	828	83	35	66	98
	2	992	743	1047	927				
	3	928	823	894	882				
	4	915	790	975	893				
122	1	763	856	832	817	96	159	31	107
	2	910	705	812	809				
	3	989	782	762	844				
	4	926	1075	785	929				
123	1	752	796	762	770	12	19	50	40
	2	781	829	821	810				
	3	762	834	710	769				
	4	762	803	720	762				
124	1	820	831	798	816	42	52	6	43
	2	800	910	804	838				
	3	750	798	813	787				
	4	730	804	805	780				
125	1	760	813	809	794	5	12	30	31
	2	750	805	832	796				
	3	760	809	812	794				
	4	761	832	762	785				
126	1	750	812	785	782	6	24	28	23
	2	760	762	762	761				
	3	750	785	821	785				
	4	760	762	763	762				
127	1	690	821	910	807	47	99	101	112
	2	670	763	989	807				
	3	760	910	926	865				
	4	760	989	752	834				
128	1	824	926	830	860	65	121	29	96
	2	670	752	772	731				
	3	780	1047	835	887				
	4	772	894	809	825				
129	1	760	975	782	839	84	88	15	99
	2	950	816	761	842				

	3	800	934	750	828				
	4	800	1020	750	857				
130	1	800	916	796	837	48	141	19	107
	2	825	1004	829	886				
	3	720	752	834	769				
	4	750	1080	803	878				
131	1	760	1004	831	865	35	167	109	126
	2	780	752	916	816				
	3	700	1080	1004	928				
	4	760	763	752	758				
132	1	754	874	1080	903	9	41	143	95
	2	760	794	763	772				
	3	740	796	874	803				
	4	755	856	794	802				
133	1	785	764	796	782	35	50	47	40
	2	835	752	856	814				
	3	783	772	764	773				
	4	750	861	752	788				
134	1	761	651	772	728	45	103	100	80
	2	830	865	861	852				
	3	750	696	651	699				
	4	835	830	865	843				
135	1	809	952	696	819	26	109	105	102
	2	782	842	830	818				
	3	761	830	952	848				
	4	750	1062	842	885				
136	1	750	778	830	786	14	27	130	85
	2	760	770	1062	864				
	3	750	830	778	786				
	4	780	800	807	796				
137	1	710	690	783	728	46	25	99	99
	2	770	720	879	790				
	3	760	750	856	789				
	4	670	710	1019	800				
138	1	850	850	851	850	43	70	115	76
	2	807	850	1018	892				
	3	783	710	804	766				
	4	879	850	751	827				
139	1	856	807	830	831	95	44	34	87
	2	1019	783	800	867				
	3	851	879	763	831				
	4	1018	856	759	878				
140	1	780	1019	800	866	31	112	135	122
	2	762	851	1104	906				
	3	834	1018	928	927				

	4	782	804	1047	878				
141	1	785	751	894	810	24	36	96	74
	2	750	830	975	852				
	3	798	800	926	841				
	4	804	763	752	773				
142	1	813	759	704	759	12	155	108	107
	2	805	800	956	854				
	3	809	1104	817	910				
	4	832	928	763	841				
143	1	812	1047	743	867	24	122	48	94
	2	762	894	823	826				
	3	785	975	790	850				
	4	762	762	856	793				
144	1	868	821	705	798	96	65	162	115
	2	670	680	782	711				
	3	670	798	1075	848				
	4	690	804	800	765				
145	1	720	813	730	754	25	12	147	99
	2	710	805	750	755				
	3	690	809	1047	849				
	4	750	832	894	825				
146	1	956	812	975	914	96	24	88	98
	2	817	762	816	798				
	3	763	785	934	827				
	4	743	762	1020	842				
147	1	823	821	916	853	65	99	141	114
	2	790	763	1004	852				
	3	856	910	752	839				
	4	705	989	1080	925				
148	1	782	926	830	846	125	74	29	90
	2	1075	752	772	866				
	3	861	796	835	831				
	4	936	829	809	858				
149	1	835	834	782	817	38	27	15	41
	2	783	803	761	782				
	3	750	831	750	777				
	4	761	870	750	794				
150	1	830	670	934	811	37	173	51	121
	2	755	700	1020	825				
	3	835	934	916	895				
	4	809	1020	1004	944				
151	1	782	916	752	817	15	141	152	133
	2	761	1004	1080	948				
	3	750	752	763	755				
	4	750	1080	874	901				

152	1	760	763	794	772	5	47	39	40
	2	750	874	796	807				
	3	760	794	856	803				
	4	760	796	764	773				
153	1	790	856	752	799	21	47	86	54
	2	790	764	772	775				
	3	750	752	861	788				
	4	760	772	651	728				
154	1	740	861	865	822	22	111	106	88
	2	790	651	696	712				
	3	780	865	830	825				
	4	760	696	952	803				
155	1	760	830	842	811	14	59	126	91
	2	750	952	830	844				
	3	780	842	1062	895				
	4	750	830	778	786				
156	1	755	1062	752	856	18	136	109	99
	2	790	778	704	757				
	3	780	850	956	862				
	4	795	770	817	794				
157	1	782	720	763	755	12	57	35	42
	2	762	720	743	742				
	3	782	670	823	758				
	4	762	807	790	786				
158	1	690	783	856	776	62	99	159	123
	2	710	879	705	765				
	3	710	856	782	783				
	4	825	1019	1075	973				
159	1	798	851	798	816	78	115	6	85
	2	845	1018	804	889				
	3	690	804	813	769				
	4	690	751	805	749				
160	1	782	830	809	807	20	33	30	31
	2	775	800	832	802				
	3	750	763	812	775				
	4	740	760	762	754				
161	1	822	800	785	802	66	135	26	124
	2	670	1104	762	845				
	3	782	928	821	844				
	4	784	1047	807	879				
162	1	786	894	783	821	11	106	99	89
	2	776	975	879	877				
	3	762	770	856	796				
	4	782	750	1019	850				
163	1	828	807	851	829	9	44	115	66

	2	845	783	1018	882				
	3	834	879	804	839				
	4	825	856	751	811				
164	1	824	1019	830	891	41	112	34	92
	2	834	851	800	828				
	3	769	1018	763	850				
	4	750	804	759	771				
165	1	807	751	800	786	44	36	135	112
	2	783	830	1104	906				
	3	879	800	928	869				
	4	856	763	1047	889				
166	1	1019	759	894	891	112	155	58	107
	2	851	800	975	875				
	3	1018	1104	1020	1047				
	4	804	928	910	881				
167	1	751	1047	1004	934	36	65	171	128
	2	830	894	750	825				
	3	800	975	1080	952				
	4	763	1004	750	839				
168	1	759	752	874	795	155	152	41	119
	2	800	1080	794	891				
	3	1104	763	796	888				
	4	928	874	856	886				
169	1	1047	794	750	864	94	39	53	93
	2	894	796	750	813				
	3	975	856	772	868				
	4	832	764	861	819				
170	1	812	752	651	738	24	86	103	72
	2	762	772	865	800				
	3	785	861	696	781				
	4	762	651	830	748				
171	1	868	865	952	895	78	80	109	104
	2	780	760	842	794				
	3	750	830	830	803				
	4	680	952	1062	898				
172	1	750	840	778	789	39	126	47	97
	2	750	830	807	796				
	3	740	1062	783	862				
	4	670	778	879	776				
Average		868.0	898.1	895.2					
Maximum		1245	1215	1247					
Minimum		670	651	651					
Unc		287.5	282	298					
Percentage of Unc		33%	31%	33%					

Tabel 49. Hasil data pengukuran *CC* dan deviasi sisi *front wall* elevasi 18-19 m

No <i>tube</i>	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	1050	1050	956	1019	0	40	96	59
	2	1050	1050	1119	1073				
	3	1050	1120	951	1040				
2	1	790	850	1118	919	43	8	141	95
	2	820	850	904	858				
	3	875	863	851	863				
3	1	882	1010	930	941	2	42	34	80
	2	886	1089	900	958				
	3	882	1026	863	924				
4	1	885	852	859	865	43	134	188	130
	2	884	804	900	863				
	3	810	1056	1204	1023				
5	1	895	917	1028	947	2	38	80	97
	2	891	863	1147	967				
	3	893	843	994	910				
6	1	897	923	1075	965	76	33	105	82
	2	884	890	909	894				
	3	760	956	882	866				
7	1	820	805	861	829	20	195	6	113
	2	820	882	850	851				
	3	855	1175	850	960				
8	1	890	770	894	851	11	12	101	111
	2	870	790	1092	917				
	3	873	770	1028	890				
9	1	800	900	1015	905	43	38	86	75
	2	875	840	863	859				
	3	873	830	1010	904				
10	1	874	935	1089	966	52	34	123	100
	2	770	883	1026	893				
	3	820	871	852	848				
11	1	890	861	1104	952	13	37	172	119
	2	895	930	852	892				
	3	870	872	1180	974				
12	1	886	935	863	895	72	27	57	58
	2	882	909	974	922				

	3	760	882	894	845				
13	1	892	861	896	883	14	6	47	33
	2	874	850	956	893				
	3	865	850	864	860				
14	1	873	1147	852	957	13	77	58	103
	2	892	994	872	919				
	3	898	1075	961	978				
15	1	874	916	751	847	28	102	113	113
	2	896	1034	965	965				
	3	929	1120	796	948				
16	1	934	1016	930	960	17	128	67	79
	2	903	1104	1052	1020				
	3	931	852	942	908				
17	1	885	1180	930	998	10	217	151	140
	2	892	770	1162	941				
	3	873	850	878	867				
18	1	770	790	912	824	61	21	25	48
	2	892	820	862	858				
	3	830	830	885	848				
19	1	937	840	862	880	54	21	30	37
	2	898	850	921	890				
	3	830	880	890	867				
20	1	895	863	1034	931	13	115	56	97
	2	875	1010	1120	1002				
	3	900	1089	1016	1002				
21	1	935	1026	1104	1022	43	117	172	131
	2	855	852	852	853				
	3	870	804	1180	951				
22	1	885	1056	863	935	11	100	57	62
	2	895	917	974	929				
	3	907	863	894	888				
23	1	883	843	896	874	49	40	47	46
	2	979	923	956	953				
	3	950	890	864	901				
24	1	1119	956	852	976	97	76	58	111
	2	950	805	872	876				
	3	1118	882	961	987				
25	1	904	1175	751	943	40	204	113	126
	2	851	850	965	889				
	3	930	800	796	842				
26	1	900	907	930	912	23	50	67	62
	2	863	883	1052	933				
	3	859	979	942	927				
27	1	900	956	930	929	91	96	151	107

	2	851	1119	1162	1044				
	3	1028	951	878	952				
28	1	1147	1118	907	1057	77	141	50	108
	2	994	904	883	927				
	3	1075	851	979	968				
29	1	870	930	956	919	20	34	96	81
	2	894	900	1119	971				
	3	855	863	951	890				
30	1	770	859	1118	916	50	188	141	143
	2	870	900	904	891				
	3	820	1204	851	958				
31	1	810	1028	930	923	46	80	34	104
	2	901	1147	900	983				
	3	852	994	863	903				
32	1	790	1075	859	908	203	176	188	172
	2	800	770	900	823				
	3	1147	770	1204	1040				
33	1	994	898	1028	973	80	8	80	87
	2	1075	904	1147	1042				
	3	916	913	994	941				
34	1	1034	905	1075	1005	56	15	104	87
	2	1120	909	894	974				
	3	1016	932	896	948				
35	1	1104	912	956	991	143	25	57	82
	2	852	862	864	859				
	3	860	885	852	866				
36	1	886	862	872	873	23	76	105	69
	2	875	921	961	919				
	3	920	770	751	814				
37	1	925	810	965	900	26	66	89	69
	2	895	760	796	817				
	3	873	890	930	898				
38	1	760	935	1052	916	61	34	67	90
	2	770	883	942	865				
	3	870	871	930	890				
39	1	871	861	1162	965	6	37	147	112
	2	876	930	878	895				
	3	865	872	1089	942				
40	1	934	935	1026	965	17	27	117	61
	2	906	909	852	889				
	3	902	882	804	863				
41	1	894	861	1056	937	26	6	100	65
	2	903	850	917	890				
	3	855	850	863	856				

42	1	859	907	843	870	51	50	40	68
	2	770	883	923	859				
	3	770	979	890	880				
43	1	906	956	956	939	20	96	76	86
	2	912	1119	805	945				
	3	875	951	882	903				
44	1	880	1118	1175	1058	63	141	152	127
	2	895	904	896	898				
	3	780	851	929	853				
45	1	890	930	934	918	6	34	17	23
	2	900	900	903	901				
	3	890	863	931	895				
46	1	939	859	1034	944	136	188	56	124
	2	897	900	1120	972				
	3	1150	1204	1016	1123				
47	1	862	1028	1104	998	41	80	172	152
	2	810	1147	852	936				
	3	780	994	1180	985				
48	1	895	1075	863	944	12	114	57	66
	2	913	883	974	923				
	3	918	871	894	894				
49	1	893	861	896	883	12	37	47	32
	2	894	930	956	927				
	3	873	872	864	870				
50	1	864	935	852	884	4	27	58	37
	2	863	909	872	881				
	3	871	882	961	905				
51	1	881	861	751	831	156	6	113	114
	2	873	850	965	896				
	3	1147	850	796	931				
52	1	994	898	930	941	80	8	67	66
	2	1075	904	1052	1010				
	3	916	913	942	924				
53	1	1034	905	930	956	56	15	151	101
	2	1120	909	1162	1064				
	3	1016	932	878	942				
54	1	1104	912	896	971	146	25	21	78
	2	852	862	929	881				
	3	850	885	934	890				
55	1	913	862	903	893	21	34	18	25
	2	874	921	931	909				
	3	906	863	898	889				
56	1	931	1010	904	948	31	42	5	75
	2	874	1089	913	959				
	3	882	1026	905	938				

57	1	874	852	909	878	5	189	13	102
	2	872	852	932	885				
	3	881	1180	912	991				
58	1	902	863	862	876	15	57	13	35
	2	873	974	885	911				
	3	895	894	862	884				
59	1	873	896	921	897	78	47	22	54
	2	935	956	950	947				
	3	780	864	907	850				
60	1	891	852	883	875	4	58	50	44
	2	893	872	979	915				
	3	899	961	956	939				
61	1	894	751	1119	921	5	113	97	125
	2	901	965	951	939				
	3	903	796	1118	939				
62	1	905	930	935	923	21	67	27	53
	2	908	1052	909	956				
	3	871	942	882	898				
63	1	891	930	861	894	21	151	6	97
	2	924	1162	850	979				
	3	931	878	850	886				
64	1	906	907	1034	949	15	50	56	85
	2	885	883	1120	963				
	3	878	979	1016	958				
65	1	877	956	1104	979	6	96	172	124
	2	873	1119	852	948				
	3	884	951	1180	1005				
66	1	888	1118	863	956	12	141	57	83
	2	889	904	974	922				
	3	868	851	894	871				
67	1	862	930	896	896	7	34	47	33
	2	871	900	956	909				
	3	876	863	864	868				
68	1	873	859	852	861	63	188	58	122
	2	883	900	872	885				
	3	770	1204	961	978				
69	1	800	1028	751	860	46	80	113	129
	2	873	1147	965	995				
	3	885	994	796	892				
70	1	873	1075	930	959	3	117	67	80
	2	874	885	1052	937				
	3	879	862	942	894				
71	1	880	921	930	910	69	63	151	111
	2	770	800	1162	911				
	3	897	890	878	888				

72	1	903	907	863	891	72	50	115	78
	2	873	883	1010	922				
	3	1010	979	1089	1026				
73	1	895	956	1026	959	69	96	117	97
	2	936	1119	852	969				
	3	1030	951	804	928				
74	1	943	1118	1056	1039	95	141	100	105
	2	925	904	917	915				
	3	770	851	863	828				
75	1	780	930	843	851	54	34	40	55
	2	873	900	923	899				
	3	780	863	890	844				
76	1	855	859	956	890	24	188	76	120
	2	865	900	805	857				
	3	820	1204	882	969				
77	1	895	1028	1175	1033	43	120	158	124
	2	895	1147	898	980				
	3	820	907	904	877				
78	1	895	883	913	897	12	50	4	35
	2	885	979	905	923				
	3	872	956	909	912				
79	1	885	1119	932	979	6	97	36	100
	2	888	951	912	917				
	3	877	1118	862	952				
80	1	898	904	885	896	75	40	30	49
	2	903	851	862	872				
	3	770	930	921	874				
81	1	780	900	863	848	68	23	115	99
	2	790	863	1010	888				
	3	903	859	1089	950				
82	1	873	900	1026	933	116	153	98	130
	2	1010	1204	852	1022				
	3	780	1028	862	890				
83	1	770	1147	885	934	56	77	30	131
	2	760	994	862	872				
	3	862	1075	921	953				
84	1	790	1016	864	890	81	128	10	102
	2	810	1104	852	922				
	3	940	852	872	888				
85	1	920	1180	961	1020	67	161	122	123
	2	910	863	751	841				
	3	800	974	965	913				
86	1	885	950	1050	962	10	121	73	82
	2	905	1000	1000	968				
	3	898	770	907	858				

87	1	1000	1050	883	978	49	77	50	57
	2	1030	990	979	1000				
	3	935	898	956	930				
88	1	1120	904	1119	1048	123	5	97	103
	2	930	913	951	931				
	3	890	905	1118	971				
89	1	1070	909	904	961	140	13	40	95
	2	1140	932	851	974				
	3	870	912	930	904				
90	1	1150	862	900	971	154	13	23	93
	2	892	885	863	880				
	3	875	862	859	865				
91	1	1050	921	900	957	93	74	153	108
	2	1010	863	1204	1026				
	3	873	1010	1028	970				
92	1	1050	1089	1147	1095	57	123	77	87
	2	1020	1026	994	1013				
	3	939	852	1075	955				
93	1	1010	1030	1070	1037	157	83	59	112
	2	1050	1050	1030	1043				
	3	760	898	1147	935				
94	1	1050	904	994	983	159	5	80	97
	2	1040	913	1075	1009				
	3	770	905	916	864				
95	1	1150	909	1034	1031	132	13	56	98
	2	1080	932	1120	1044				
	3	895	912	1016	941				
96	1	1080	862	1104	1015	117	13	172	129
	2	850	885	852	862				
	3	925	862	1180	989				
97	1	830	921	904	885	47	74	5	58
	2	810	863	913	862				
	3	900	1010	905	938				
98	1	935	1089	909	978	34	123	13	77
	2	883	1026	932	947				
	3	871	852	912	878				
99	1	861	1026	862	916	37	117	13	63
	2	930	852	885	889				
	3	872	804	862	846				
100	1	935	1056	921	971	27	100	100	88
	2	909	917	1034	953				
	3	882	863	1120	955				
101	1	861	843	1016	907	22	40	128	89
	2	895	923	1104	974				
	3	855	890	852	866				

102	1	830	956	1180	989	28	76	161	117
	2	820	805	863	829				
	3	872	882	974	909				
103	1	930	1175	894	1000	17	71	35	104
	2	930	1034	896	953				
	3	900	1120	956	992				
104	1	790	1016	864	890	81	128	10	102
	2	810	1104	852	922				
	3	940	852	872	888				
105	1	920	1180	961	1020	60	161	122	125
	2	850	863	751	821				
	3	800	974	965	913				
106	1	900	894	796	863	5	35	128	68
	2	890	896	930	905				
	3	898	956	1052	969				
107	1	904	864	942	903	5	10	131	93
	2	913	852	930	898				
	3	905	872	1162	980				
108	1	909	961	878	916	13	122	16	63
	2	932	751	907	863				
	3	912	965	883	920				
109	1	850	796	979	875	18	128	88	103
	2	885	930	956	924				
	3	862	1052	1119	1011				
110	1	921	942	951	938	80	131	112	102
	2	850	930	1118	966				
	3	1010	1162	904	1025				
111	1	1089	878	851	939	123	60	40	104
	2	1026	800	930	919				
	3	852	760	900	837				
112	1	930	790	863	861	21	74	23	56
	2	890	770	859	840				
	3	920	907	900	909				
113	1	894	883	1204	994	101	50	90	109
	2	1092	979	1028	1033				
	3	1028	956	1147	1044				
114	1	1015	1119	994	1043	86	97	103	95
	2	863	951	1075	963				
	3	1010	1118	871	1000				
115	1	1089	904	861	951	123	40	37	83
	2	1026	851	930	936				
	3	852	930	872	885				
116	1	890	900	935	908	59	23	27	39
	2	800	863	909	857				
	3	910	859	882	884				

117	1	920	900	861	894	93	153	6	127
	2	770	1204	850	941				
	3	940	1028	850	939				
118	1	890	1147	760	932	21	77	126	117
	2	900	994	863	919				
	3	930	1075	1010	1005				
119	1	760	1120	1089	990	123	56	123	121
	2	930	1016	1026	991				
	3	1000	1104	852	985				
120	1	855	852	804	837	38	186	126	118
	2	900	1180	1056	1045				
	3	930	863	917	903				
121	1	830	974	863	889	46	46	42	44
	2	920	894	843	886				
	3	890	896	923	903				
122	1	862	956	890	903	37	57	76	51
	2	934	864	956	918				
	3	882	852	805	846				
123	1	885	872	882	880	29	105	162	113
	2	940	961	1175	1025				
	3	898	751	907	852				
124	1	904	965	883	917	5	89	50	55
	2	913	796	979	896				
	3	905	930	956	930				
125	1	909	1052	1119	1027	13	67	97	87
	2	932	942	951	942				
	3	912	930	1118	987				
126	1	862	1162	904	976	13	202	40	108
	2	885	878	851	871				
	3	862	770	930	854				
127	1	968	907	900	925	97	50	23	91
	2	1147	883	863	964				
	3	994	979	859	944				
128	1	1075	956	900	977	83	96	153	101
	2	916	1119	1204	1080				
	3	1034	951	1028	1004				
129	1	1120	1118	1147	1128	56	141	77	104
	2	1016	904	994	971				
	3	1104	851	1075	1010				
130	1	852	930	912	898	42	34	25	30
	2	870	900	862	877				
	3	932	863	885	893				
131	1	884	859	862	868	18	188	87	111
	2	904	900	921	908				
	3	920	1204	1034	1053				

132	1	922	1028	1120	1023	28	80	56	92
	2	885	1147	1016	1016				
	3	939	994	1104	1012				
133	1	928	1075	852	952	78	168	186	150
	2	897	852	1180	976				
	3	780	1180	863	941				
134	1	898	863	974	912	8	57	46	38
	2	904	974	894	924				
	3	913	894	896	901				
135	1	905	896	956	919	15	47	57	39
	2	909	956	864	910				
	3	932	864	852	883				
136	1	912	852	872	879	25	58	105	63
	2	862	872	961	898				
	3	885	961	751	866				
137	1	862	751	965	859	34	113	89	79
	2	921	965	796	894				
	3	863	796	930	863				
138	1	1010	930	1052	997	42	67	67	62
	2	1089	1052	942	1028				
	3	1026	942	930	966				
139	1	852	930	1162	981	42	151	173	124
	2	935	1162	878	992				
	3	909	878	850	879				
140	1	882	863	907	884	61	115	50	79
	2	854	1010	883	916				
	3	970	1089	979	1013				
141	1	855	1026	956	946	27	117	96	97
	2	898	852	1119	956				
	3	904	804	951	886				
142	1	913	1056	1118	1029	4	100	141	89
	2	905	917	904	909				
	3	909	863	851	874				
143	1	932	843	930	902	43	40	34	34
	2	912	923	900	912				
	3	850	890	863	868				
144	1	885	956	859	900	36	76	188	116
	2	850	805	900	852				
	3	921	882	1204	1002				
145	1	863	1175	1028	1022	115	154	80	109
	2	1010	904	1147	1020				
	3	1089	913	994	999				
146	1	1026	905	1075	1002	90	15	158	91
	2	852	909	760	840				
	3	900	932	920	917				

147	1	875	912	870	886	15	25	19	20
	2	878	862	880	873				
	3	850	885	907	881				
148	1	760	862	883	835	56	30	50	67
	2	820	921	979	907				
	3	871	894	956	907				
149	1	820	1092	1119	1010	26	41	97	125
	2	810	1028	951	930				
	3	860	1015	1118	998				
150	1	907	863	904	891	50	115	40	77
	2	883	1010	851	915				
	3	979	1089	930	999				
151	1	956	1026	900	961	96	164	23	119
	2	1119	852	863	945				
	3	951	1180	859	997				
152	1	1118	863	900	960	141	57	153	123
	2	904	974	1204	1027				
	3	851	894	1028	924				
153	1	930	896	1147	991	40	47	77	99
	2	900	956	994	950				
	3	850	864	1075	930				
154	1	859	852	1026	912	46	58	117	69
	2	900	872	852	875				
	3	950	961	804	905				
155	1	1028	751	1056	945	80	113	100	128
	2	1147	965	917	1010				
	3	994	796	863	884				
156	1	1075	930	843	949	120	67	40	82
	2	882	1052	923	952				
	3	855	942	890	896				
157	1	873	930	956	920	53	151	76	117
	2	800	1162	805	922				
	3	770	878	882	843				
158	1	873	1034	1175	1027	61	56	194	141
	2	878	1120	830	943				
	3	770	1016	850	879				
159	1	870	1104	760	911	36	172	79	131
	2	874	852	907	878				
	3	934	1180	883	999				
160	1	870	863	979	904	25	57	88	83
	2	864	974	956	931				
	3	910	894	1119	974				

161	1	790	896	951	879	66	47	112	91
	2	921	956	1118	998				
	3	855	864	904	874				
162	1	800	852	851	834	68	58	40	62
	2	760	872	930	854				
	3	892	961	900	918				
163	1	830	751	863	815	61	113	23	70
	2	912	965	859	912				
	3	949	796	900	882				
164	1	780	930	1204	971	41	67	90	152
	2	780	1052	1028	953				
	3	851	942	1147	980				
165	1	890	930	994	938	65	151	41	106
	2	820	1162	1075	1019				
	3	950	878	1020	949				
166	1	880	870	760	837	17	45	95	57
	2	881	780	850	837				
	3	851	820	950	874				
167	1	927	1034	850	937	40	56	21	105
	2	850	1120	860	943				
	3	870	1016	820	902				
168	1	939	1104	898	980	66	172	8	116
	2	948	852	904	901				
	3	830	1180	913	974				
169	1	911	863	905	893	39	57	15	37
	2	923	974	909	935				
	3	850	894	932	892				
170	1	884	896	912	897	48	47	25	46
	2	790	956	862	869				
	3	850	864	885	866				
171	1	770	852	862	828	12	58	41	69
	2	790	872	921	861				
	3	790	961	940	897				
172	1	889	751	840	827	22	113	48	66
	2	850	965	935	917				
	3	851	796	883	843				
Average		901.9	937.8	945.0					
Maximum		1150	1204	1204					
Minimum		760	751	751					
Unc		195	226.5	226.5					
Percentage of Unc		22%	24%	24%					

Tabel 50. Hasil data pengukuran *CC* dan deviasi sisi *front wall* elevasi 23-25 m

No tube	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	787	830	771	796	61	103	36	96
	2	690	952	761	801				
	3	754	842	830	809				
	4	670	830	772	757				
	5	813	1062	835	903				
2	1	660	778	809	749	92	13	25	59
	2	670	798	782	750				
	3	660	804	761	742				
	4	828	813	750	797				
	5	834	805	750	796				
3	1	824	809	670	768	8	27	15	63
	2	818	832	690	780				
	3	832	812	700	781				
	4	824	762	690	759				
	5	839	785	710	778				
4	1	824	762	934	840	11	99	106	90
	2	813	821	1020	885				
	3	809	763	916	829				
	4	837	910	1004	917				
	5	828	989	752	856				
5	1	796	926	1080	934	18	76	129	85
	2	829	752	763	781				
	3	834	817	874	842				
	4	803	763	794	787				
	5	831	743	796	790				
6	1	700	823	856	793	76	56	53	64
	2	690	790	764	748				
	3	834	856	752	814				
	4	812	705	772	763				
	5	670	782	861	771				
7	1	795	1075	651	840	66	115	124	113
	2	690	807	865	787				
	3	803	783	696	761				
	4	784	879	830	831				
	5	660	856	952	823				
8	1	775	1019	842	879	64	124	146	127
	2	794	851	830	825				
	3	660	1018	1062	913				
	4	773	804	778	785				
	5	670	751	660	694				
9	1	825	830	934	863	71	30	106	105

	2	773	800	1020	864				
	3	799	763	916	826				
	4	690	759	1004	818				
	5	660	800	752	737				
10	1	670	1104	1080	951	68	86	129	134
	2	836	928	763	842				
	3	778	1047	874	900				
	4	787	894	794	825				
	5	700	975	796	824				
11	1	821	785	856	821	65	22	53	59
	2	680	762	764	735				
	3	690	821	752	754				
	4	760	798	772	777				
	5	670	804	861	778				
12	1	690	813	651	718	84	10	124	83
	2	830	805	865	833				
	3	820	809	696	775				
	4	660	832	830	774				
	5	830	812	952	865				
13	1	828	762	842	811	27	26	115	74
	2	779	785	830	798				
	3	832	762	1062	885				
	4	797	821	778	799				
	5	773	763	794	777				
14	1	761	910	992	888	34	136	84	102
	2	782	989	928	900				
	3	730	926	915	857				
	4	802	752	763	772				
	5	816	660	910	795				
15	1	730	710	989	810	59	124	80	105
	2	847	934	926	902				
	3	700	1020	796	839				
	4	795	916	829	847				
	5	801	1004	834	880				
16	1	768	752	803	774	46	136	96	98
	2	780	1080	831	897				
	3	828	763	989	860				
	4	730	874	926	843				
	5	844	794	752	797				
17	1	785	796	704	762	56	41	98	65
	2	785	856	956	866				
	3	680	764	817	754				
	4	834	752	763	783				
	5	783	772	743	766				

18	1	809	861	823	831	27	100	56	64
	2	795	651	790	745				
	3	839	865	856	853				
	4	775	696	705	725				
	5	773	830	782	795				
19	1	670	952	1075	899	73	114	107	133
	2	690	842	1047	860				
	3	839	830	894	854				
	4	710	1062	975	916				
	5	795	778	816	796				
20	1	768	796	934	833	46	18	106	95
	2	821	829	1020	890				
	3	730	834	916	827				
	4	700	803	1004	836				
	5	770	831	752	784				
21	1	761	710	1080	850	35	55	123	99
	2	700	660	798	719				
	3	730	690	804	741				
	4	790	720	813	774				
	5	720	807	805	777				
22	1	772	783	809	788	64	87	27	84
	2	750	879	832	820				
	3	822	856	812	830				
	4	680	1019	762	820				
	5	670	851	785	769				
23	1	793	1018	762	858	47	103	45	70
	2	841	804	821	822				
	3	710	751	807	756				
	4	771	830	783	795				
	5	773	800	879	817				
24	1	803	763	856	807	56	147	101	118
	2	740	759	1019	839				
	3	680	800	851	777				
	4	806	1104	1018	976				
	5	803	928	804	845				
25	1	799	1047	751	866	58	111	33	94
	2	769	894	830	831				
	3	660	975	800	812				
	4	789	807	763	786				
	5	795	783	759	779				
26	1	797	879	800	825	34	86	122	107
	2	827	856	1104	929				
	3	764	1019	928	904				
	4	775	851	1047	891				

	5	844	1018	894	919				
27	1	798	804	975	859	70	32	75	73
	2	832	751	807	797				
	3	710	830	783	774				
	4	782	800	879	820				
	5	660	763	856	760				
28	1	778	759	1019	852	50	150	124	142
	2	680	800	851	777				
	3	660	1104	1018	927				
	4	720	928	804	817				
	5	760	1047	751	853				
29	1	834	894	830	853	88	93	30	84
	2	690	975	800	822				
	3	837	856	763	819				
	4	680	764	759	734				
	5	660	752	800	737				
30	1	839	772	1104	905	68	96	86	140
	2	710	861	928	833				
	3	767	651	1047	822				
	4	660	865	894	806				
	5	710	696	975	794				
31	1	710	830	821	787	47	103	79	101
	2	798	952	934	895				
	3	829	842	1020	897				
	4	813	830	916	853				
	5	771	1062	1004	946				
32	1	670	778	752	733	69	102	136	113
	2	740	910	1080	910				
	3	700	989	763	817				
	4	795	926	874	865				
	5	839	752	794	795				
33	1	797	704	796	766	40	98	41	62
	2	778	956	856	863				
	3	791	817	764	791				
	4	782	763	752	766				
	5	700	743	772	738				
34	1	750	823	861	811	35	56	100	64
	2	809	790	651	750				
	3	798	856	865	840				
	4	834	705	696	745				
	5	760	782	830	791				
35	1	784	1075	952	937	59	115	114	111
	2	670	807	842	773				
	3	831	783	830	815				
	4	760	879	1062	900				

	5	760	856	778	798				
36	1	660	1019	670	783	75	124	141	121
	2	847	851	934	877				
	3	835	1018	1020	958				
	4	805	804	916	842				
	5	797	751	1004	851				
37	1	660	830	752	747	78	30	136	103
	2	680	800	1080	853				
	3	844	763	763	790				
	4	730	759	874	788				
	5	660	800	794	751				
38	1	670	1104	796	857	23	86	41	137
	2	720	928	856	835				
	3	680	1047	764	830				
	4	690	894	752	779				
	5	720	975	772	822				
39	1	660	762	861	761	68	101	100	108
	2	795	821	651	756				
	3	772	934	865	857				
	4	660	1020	696	792				
	5	785	916	830	844				
40	1	670	1004	952	875	65	145	114	135
	2	660	752	842	751				
	3	785	1080	830	898				
	4	690	763	1062	838				
	5	795	874	778	816				
41	1	795	794	835	808	23	40	34	31
	2	808	796	783	796				
	3	795	856	771	807				
	4	750	764	761	758				
	5	773	752	830	785				
42	1	680	772	772	741	41	96	30	68
	2	700	861	835	799				
	3	780	651	809	747				
	4	720	865	782	789				
	5	680	696	761	712				
43	1	824	830	750	801	59	103	53	92
	2	795	952	750	832				
	3	779	842	807	809				
	4	788	830	783	800				
	5	670	1062	879	870				
44	1	821	778	856	818	59	13	101	92
	2	660	798	1019	826				
	3	760	804	851	805				
	4	771	813	1018	867				

	5	775	805	804	795				
45	1	828	809	751	796	30	27	33	29
	2	763	832	830	808				
	3	760	812	800	791				
	4	813	762	763	779				
	5	786	785	759	777				
46	1	762	762	800	775	32	99	122	113
	2	834	821	1104	920				
	3	782	763	928	824				
	4	785	910	1047	914				
	5	750	989	894	878				
47	1	798	926	975	900	6	113	181	118
	2	804	752	750	769				
	3	813	916	660	796				
	4	805	1004	660	823				
	5	809	752	1047	869				
48	1	832	1080	894	935	31	129	78	101
	2	812	763	975	850				
	3	762	874	816	817				
	4	785	794	934	838				
	5	762	796	1020	859				
49	1	790	856	916	854	36	53	159	102
	2	750	764	1004	839				
	3	837	752	752	780				
	4	832	772	1080	895				
	5	814	861	710	795				
50	1	750	651	798	733	31	124	6	68
	2	810	865	804	826				
	3	795	696	813	768				
	4	835	830	805	823				
	5	790	952	809	850				
51	1	785	842	832	820	53	115	31	84
	2	710	830	812	784				
	3	806	1062	762	877				
	4	773	778	785	779				
	5	680	798	762	747				
52	1	660	804	821	762	86	11	90	90
	2	828	813	763	801				
	3	670	805	910	795				
	4	834	809	989	877				
	5	700	832	926	819				
53	1	700	812	752	755	59	28	97	65
	2	750	762	704	739				
	3	700	785	956	814				
	4	835	762	817	805				

	5	794	821	763	793				
54	1	730	763	743	745	63	105	61	88
	2	660	910	823	798				
	3	795	989	790	858				
	4	807	926	856	863				
	5	802	752	705	753				
55	1	793	835	782	803	58	34	124	94
	2	761	783	1075	873				
	3	769	771	807	782				
	4	670	761	783	738				
	5	670	830	879	793				
56	1	839	772	856	822	33	30	101	82
	2	824	835	1019	893				
	3	760	809	851	807				
	4	795	782	1018	865				
	5	773	761	804	779				
57	1	765	750	751	755	83	132	33	93
	2	824	750	830	801				
	3	835	730	800	788				
	4	660	934	763	786				
	5	670	1020	759	816				
58	1	799	916	800	838	21	145	122	128
	2	792	1004	1104	967				
	3	750	752	928	810				
	4	773	1080	1047	967				
	5	760	763	894	806				
59	1	816	874	975	888	18	46	75	50
	2	782	794	804	793				
	3	802	796	813	804				
	4	828	856	805	830				
	5	818	764	809	797				
60	1	784	752	832	789	60	88	31	60
	2	796	772	812	793				
	3	799	861	762	807				
	4	660	651	785	699				
	5	799	865	762	809				
61	1	792	696	821	770	47	91	38	70
	2	750	830	807	796				
	3	773	952	783	836				
	4	760	842	879	827				
	5	670	830	856	785				
62	1	750	1062	1019	944	35	119	124	103
	2	809	778	851	813				
	3	798	807	1018	874				
	4	834	783	804	807				

	5	760	879	751	797				
63	1	690	856	830	792	34	101	30	108
	2	720	1019	800	846				
	3	660	851	763	758				
	4	740	1018	759	839				
	5	670	804	800	758				
64	1	828	751	1104	894	63	33	86	120
	2	670	830	928	809				
	3	750	800	1047	866				
	4	810	763	894	822				
	5	795	759	975	843				
65	1	835	800	763	799	72	122	47	122
	2	790	1104	874	923				
	3	710	928	794	811				
	4	670	1047	796	838				
	5	680	894	856	810				
66	1	799	975	764	846	21	121	75	85
	2	792	752	752	765				
	3	750	704	772	742				
	4	773	956	861	863				
	5	760	817	651	743				
67	1	750	763	865	793	31	45	92	61
	2	810	743	696	750				
	3	795	823	830	816				
	4	835	790	952	859				
	5	790	856	842	829				
68	1	670	705	830	735	66	173	120	128
	2	660	782	1062	835				
	3	799	1075	778	884				
	4	792	660	806	753				
	5	750	670	780	733				
69	1	773	807	835	805	32	92	34	78
	2	760	783	783	775				
	3	700	879	771	783				
	4	710	856	761	776				
	5	750	1019	830	866				
70	1	810	851	772	811	21	101	30	63
	2	795	1018	835	883				
	3	835	804	809	816				
	4	790	751	782	774				
	5	835	830	761	809				
71	1	783	800	750	778	27	146	132	110
	2	771	763	750	761				
	3	761	759	730	750				
	4	830	800	934	855				

	5	772	1104	1020	965				
72	1	835	928	916	893	35	89	145	113
	2	809	1047	1004	953				
	3	782	894	752	809				
	4	761	975	1080	939				
	5	750	809	763	774				
73	1	750	832	874	819	41	31	46	48
	2	720	812	794	775				
	3	700	762	796	753				
	4	750	785	856	797				
	5	809	762	764	778				
74	1	798	821	752	790	29	27	88	52
	2	835	799	772	802				
	3	783	792	861	812				
	4	771	750	651	724				
	5	761	773	865	800				
75	1	830	760	696	762	28	27	91	55
	2	772	816	830	806				
	3	835	782	952	856				
	4	809	802	842	818				
	5	782	828	830	813				
76	1	761	818	1062	880	49	63	119	93
	2	750	784	778	771				
	3	750	796	874	807				
	4	790	799	794	794				
	5	660	660	796	705				
77	1	784	799	856	813	23	40	53	38
	2	803	792	764	786				
	3	810	750	752	771				
	4	847	773	772	797				
	5	808	856	861	842				
78	1	660	705	651	672	96	142	124	120
	2	670	782	865	772				
	3	660	1075	696	810				
	4	839	799	830	823				
	5	838	792	952	861				
79	1	850	750	842	814	40	25	132	81
	2	780	773	830	794				
	3	781	760	1062	868				
	4	750	816	778	781				
	5	827	782	710	773				
80	1	750	802	934	829	35	18	106	87
	2	809	828	1020	886				
	3	798	818	916	844				
	4	834	784	1004	874				

	5	760	796	752	769				
81	1	762	799	1080	880	32	60	129	90
	2	834	660	763	752				
	3	782	799	874	818				
	4	785	792	794	790				
	5	750	750	796	765				
82	1	798	773	856	809	6	27	53	32
	2	804	772	764	780				
	3	813	835	752	800				
	4	805	809	772	795				
	5	809	782	861	817				
83	1	832	761	651	748	31	126	124	99
	2	812	750	865	809				
	3	762	750	696	736				
	4	785	934	830	850				
	5	762	1020	952	911				
84	1	868	916	842	875	29	145	123	108
	2	803	1004	830	879				
	3	810	752	1062	875				
	4	847	1080	778	902				
	5	808	763	752	774				
85	1	798	874	704	792	6	46	98	59
	2	804	794	956	851				
	3	813	796	817	809				
	4	805	856	763	808				
	5	809	764	743	772				
86	1	832	752	823	802	31	88	56	59
	2	812	772	790	791				
	3	762	861	856	826				
	4	785	651	705	714				
	5	762	865	782	803				
87	1	821	696	1075	864	90	91	134	102
	2	763	830	799	797				
	3	910	952	792	885				
	4	989	842	750	860				
	5	926	830	773	843				
88	1	752	1062	760	858	74	110	27	98
	2	936	778	816	843				
	3	835	934	782	850				
	4	783	1020	802	868				
	5	771	916	828	838				
89	1	761	1004	818	861	34	145	63	102
	2	830	752	784	789				
	3	772	1080	796	883				

	4	835	763	799	799				
	5	809	874	660	781				
90	1	782	794	799	792	21	40	27	30
	2	761	796	792	783				
	3	750	856	750	785				
	4	750	764	773	762				
	5	798	752	821	790				
91	1	804	772	934	837	11	96	106	103
	2	813	861	1020	898				
	3	805	651	916	791				
	4	809	865	1004	893				
	5	832	696	752	760				
92	1	812	830	1080	907	24	103	129	102
	2	762	952	763	826				
	3	785	842	874	834				
	4	762	830	794	795				
	5	808	1062	796	889				
93	1	790	778	856	808	36	19	53	38
	2	750	799	764	771				
	3	837	792	752	794				
	4	832	750	772	785				
	5	814	773	861	816				
94	1	750	760	651	720	31	27	124	70
	2	810	816	865	830				
	3	795	782	696	758				
	4	835	802	830	822				
	5	790	828	952	857				
95	1	835	818	842	832	34	63	121	83
	2	783	784	830	799				
	3	771	796	1062	876				
	4	761	799	778	779				
	5	830	660	761	750				
96	1	772	799	750	774	30	20	31	26
	2	835	792	750	792				
	3	809	750	798	786				
	4	782	773	804	786				
	5	761	794	813	789				
97	1	750	992	805	849	34	84	26	76
	2	750	928	809	829				
	3	781	915	832	843				
	4	750	763	812	775				
	5	827	910	762	833				

98	1	762	989	785	845	32	135	62	83
	2	834	926	762	841				
	3	782	752	821	785				
	4	785	660	763	736				
	5	750	763	910	808				
99	1	798	910	989	899	6	122	104	98
	2	804	989	926	906				
	3	813	926	752	830				
	4	805	752	1020	859				
	5	809	704	916	810				
100	1	832	956	1004	931	31	83	145	102
	2	812	817	752	794				
	3	762	763	1080	868				
	4	785	743	763	764				
	5	762	823	874	820				
101	1	762	790	794	782	32	141	40	85
	2	834	856	796	829				
	3	782	705	856	781				
	4	785	782	764	777				
	5	750	1075	752	859				
102	1	798	783	772	784	6	27	96	56
	2	804	771	861	812				
	3	813	761	651	742				
	4	805	830	865	833				
	5	809	772	696	759				
103	1	832	835	830	832	31	35	103	82
	2	812	809	952	858				
	3	762	782	842	795				
	4	785	761	830	792				
	5	762	750	1062	858				
104	1	790	830	763	794	141	28	45	83
	2	856	772	743	790				
	3	705	835	823	788				
	4	782	809	790	794				
	5	1075	782	856	904				
105	1	861	761	705	776	115	43	146	105
	2	936	750	782	823				
	3	700	750	1075	842				
	4	660	730	760	717				
	5	749	840	770	786				
106	1	790	798	934	841	36	6	106	84
	2	750	804	1020	858				
	3	837	813	916	855				
	4	832	805	1004	880				
	5	814	809	752	792				

107	1	850	932	1180	987	31	31	129	80
	2	910	912	863	895				
	3	895	862	974	910				
	4	935	885	894	905				
	5	890	862	896	883				
108	1	884	921	956	920	23	90	53	68
	2	903	863	864	877				
	3	910	1010	852	924				
	4	947	1089	872	969				
	5	908	1026	961	965				
109	1	810	852	751	804	116	97	124	106
	2	1024	804	965	931				
	3	939	1056	796	930				
	4	760	917	930	869				
	5	770	863	1052	895				
110	1	800	843	942	862	64	61	115	91
	2	938	923	930	930				
	3	899	890	1162	984				
	4	790	956	878	875				
	5	840	805	898	848				
111	1	939	882	904	908	73	133	11	99
	2	800	1175	913	963				
	3	790	899	905	865				
	4	760	892	909	854				
	5	770	850	932	851				
112	1	873	873	912	886	58	22	28	38
	2	892	860	862	871				
	3	800	916	885	867				
	4	939	882	862	894				
	5	810	902	921	878				
113	1	950	928	863	914	40	18	105	69
	2	880	918	1010	936				
	3	881	884	1089	951				
	4	850	896	1026	924				
	5	927	899	852	893				
114	1	871	760	921	851	65	56	79	110
	2	873	899	1034	935				
	3	780	892	1120	931				
	4	790	850	1016	885				
	5	936	873	1104	971				
115	1	820	873	852	848	46	22	136	86
	2	830	860	1180	957				
	3	862	916	863	880				
	4	934	882	974	930				
	5	882	902	894	893				

116	1	885	770	896	850	25	63	41	49
	2	850	780	956	862				
	3	898	873	864	878				
	4	904	860	852	872				
	5	913	916	872	900				
117	1	905	882	961	916	26	55	100	66
	2	909	902	751	854				
	3	932	760	965	886				
	4	912	873	796	860				
	5	862	860	930	884				
118	1	885	916	1052	951	29	12	114	80
	2	862	882	942	895				
	3	862	902	930	898				
	4	934	898	1162	998				
	5	882	904	878	888				
119	1	885	913	873	890	25	10	22	23
	2	850	905	860	872				
	3	898	909	916	908				
	4	904	932	882	906				
	5	913	912	902	909				
120	1	905	862	810	859	26	26	69	50
	2	909	885	810	868				
	3	932	862	760	851				
	4	912	921	935	923				
	5	862	863	883	869				
121	1	885	1010	871	922	80	88	36	86
	2	862	1089	861	937				
	3	968	1026	930	975				
	4	760	852	872	828				
	5	935	1016	935	962				
122	1	883	1104	909	965	27	145	25	99
	2	871	852	882	868				
	3	861	1180	861	967				
	4	930	863	850	881				
	5	872	974	850	899				
123	1	935	894	760	863	35	40	135	83
	2	909	896	863	889				
	3	882	956	1010	949				
	4	861	864	1089	938				
	5	850	852	1026	909				
124	1	850	872	852	858	52	96	97	79
	2	946	961	804	904				
	3	909	751	1056	905				
	4	879	965	917	920				
	5	810	796	863	823				

125	1	890	930	843	888	36	103	61	86
	2	850	1052	923	942				
	3	937	942	890	923				
	4	932	930	956	939				
	5	914	1162	805	960				
126	1	850	878	882	870	31	14	133	76
	2	910	904	1175	996				
	3	895	913	899	902				
	4	935	905	892	911				
	5	890	909	850	883				
127	1	862	932	873	889	32	31	22	27
	2	934	912	860	902				
	3	882	862	916	887				
	4	885	885	882	884				
	5	850	862	902	871				
128	1	898	921	928	916	6	79	18	78
	2	904	1034	918	952				
	3	913	1120	884	972				
	4	905	1016	896	939				
	5	909	1104	899	971				
129	1	932	852	760	848	31	136	56	91
	2	912	1180	899	997				
	3	862	863	892	872				
	4	885	974	850	903				
	5	862	894	873	876				
130	1	968	896	1034	966	85	41	106	103
	2	830	956	1120	969				
	3	945	864	1016	942				
	4	888	852	1104	948				
	5	760	872	852	828				
131	1	810	961	1180	984	58	100	129	109
	2	894	751	863	836				
	3	878	965	974	939				
	4	790	796	894	827				
	5	760	930	896	862				
132	1	780	1052	956	929	56	114	53	92
	2	935	942	864	914				
	3	883	930	852	888				
	4	871	1162	872	968				
	5	861	878	961	900				
133	1	930	1034	751	905	28	106	124	107
	2	872	1120	965	986				
	3	935	1016	796	916				
	4	909	1104	930	981				
	5	882	852	1052	929				

134	1	861	1180	942	994	59	129	119	113
	2	850	863	930	881				
	3	850	974	1162	995				
	4	924	894	878	899				
	5	760	896	870	842				
135	1	950	956	770	892	40	53	141	99
	2	880	864	1034	926				
	3	881	852	1120	951				
	4	850	872	1016	913				
	5	927	961	1104	997				
136	1	939	751	852	847	89	124	136	117
	2	935	965	1180	1027				
	3	760	796	863	806				
	4	760	930	974	888				
	5	873	1052	894	940				
137	1	862	942	896	900	32	138	41	83
	2	934	930	956	940				
	3	882	1162	864	969				
	4	885	878	852	872				
	5	850	790	872	837				
138	1	898	770	961	876	6	146	100	95
	2	904	760	751	805				
	3	913	863	965	914				
	4	905	1010	796	904				
	5	909	1089	930	976				
139	1	932	1026	1052	1003	31	109	114	96
	2	912	852	942	902				
	3	862	804	930	865				
	4	885	1056	1162	1034				
	5	862	917	878	886				
140	1	921	863	770	851	78	45	146	99
	2	760	843	760	788				
	3	770	923	863	852				
	4	885	890	1010	928				
	5	760	956	1089	935				
141	1	1056	805	1026	962	83	146	109	107
	2	917	882	852	884				
	3	863	1175	804	947				
	4	843	871	1056	923				
	5	923	861	917	900				
142	1	700	710	720	710	17	15	16	15
	2	680	690	710	693				
	3	720	730	710	720				
	4	720	700	680	700				
	5	700	710	720	710				

143	1	690	710	680	693	24	18	30	23
	2	700	710	720	710				
	3	720	710	750	727				
	4	670	670	680	673				
	5	730	710	690	710				
144	1	470	380	410	420	59	67	48	56
	2	370	410	360	380				
	3	520	540	440	500				
	4	420	510	490	473				
	5	400	440	440	427				
145	1	380	550	440	457	60	54	41	50
	2	470	510	440	473				
	3	530	470	460	487				
	4	450	520	480	483				
	5	520	410	540	490				
146	1	400	490	360	417	18	72	70	59
	2	400	540	410	450				
	3	430	370	440	413				
	4	410	390	550	450				
	5	380	480	460	440				
147	1	500	360	540	467	65	76	76	68
	2	500	440	350	430				
	3	380	550	510	480				
	4	440	450	480	457				
	5	550	530	520	533				
148	1	410	370	520	433	62	69	54	62
	2	510	440	510	487				
	3	370	400	400	390				
	4	440	460	540	480				
	5	510	550	490	517				
149	1	550	370	350	423	79	72	74	75
	2	490	420	510	473				
	3	520	530	410	487				
	4	550	390	380	440				
	5	360	510	510	460				
150	1	500	360	420	427	39	76	36	53
	2	460	450	380	430				
	3	490	430	470	463				
	4	470	550	390	470				
	5	400	370	430	400				
151	1	360	430	530	440	73	50	36	56
	2	550	370	470	463				
	3	460	480	550	497				
	4	510	480	470	487				
	5	510	490	490	497				

152	1	350	430	410	397	97	62	58	73
	2	490	530	510	510				
	3	550	540	380	490				
	4	540	430	410	460				
	5	360	410	360	377				
153	1	480	540	400	473	53	66	8	51
	2	540	380	410	443				
	3	430	450	420	433				
	4	460	390	410	420				
	5	400	400	400	400				
154	1	500	550	420	490	25	55	44	55
	2	500	480	480	487				
	3	470	520	420	470				
	4	440	530	360	443				
	5	490	410	390	430				
155	1	470	520	520	503	54	35	65	50
	2	530	460	450	480				
	3	500	490	360	450				
	4	440	450	510	467				
	5	390	430	430	417				
156	1	410	520	460	463	66	78	46	65
	2	540	360	390	430				
	3	400	490	420	437				
	4	510	370	420	433				
	5	520	360	510	463				
157	1	360	550	440	450	72	72	42	60
	2	550	450	530	510				
	3	500	510	450	487				
	4	500	490	510	500				
	5	510	360	520	463				
158	1	500	540	400	480	77	73	50	65
	2	490	430	470	463				
	3	540	550	390	493				
	4	390	460	500	450				
	5	360	380	400	380				
159	1	460	520	540	507	32	55	65	50
	2	450	530	460	480				
	3	440	430	400	423				
	4	450	440	370	420				
	5	520	410	450	460				
160	1	490	380	450	440	64	82	49	62
	2	500	400	420	440				
	3	360	550	490	467				
	4	390	380	510	427				
	5	480	520	390	463				

161	1	470	390	420	427	67	25	37	50
	2	410	450	500	453				
	3	510	420	440	457				
	4	540	390	500	477				
	5	380	400	440	407				
162	1	510	390	400	433	70	43	52	52
	2	360	400	470	410				
	3	360	460	480	433				
	4	480	480	360	440				
	5	460	390	460	437				
163	1	460	540	400	467	69	51	60	57
	2	360	460	390	403				
	3	500	420	490	470				
	4	490	470	440	467				
	5	360	410	530	433				
164	1	390	470	360	407	53	35	68	50
	2	490	380	530	467				
	3	480	450	390	440				
	4	380	410	430	407				
	5	400	420	380	400				
165	1	430	510	480	473	61	74	78	68
	2	440	450	380	423				
	3	420	360	550	443				
	4	550	550	360	487				
	5	530	510	420	487				
166	1	530	410	470	470	55	55	53	53
	2	440	480	540	487				
	3	500	490	500	497				
	4	490	390	420	433				
	5	390	520	550	487				
167	1	480	450	420	450	39	59	73	58
	2	520	370	360	417				
	3	530	490	410	477				
	4	490	520	500	503				
	5	430	500	540	490				
168	1	500	490	370	453	53	66	73	63
	2	540	480	470	497				
	3	510	520	410	480				
	4	480	380	550	470				
	5	400	380	390	390				
169	1	370	430	440	413	61	59	43	58
	2	410	530	530	490				
	3	380	480	470	443				
	4	360	410	420	397				
	5	510	380	490	460				

170	1	400	490	370	420	22	61	59	50
	2	400	460	440	433				
	3	430	350	500	427				
	4	440	370	510	440				
	5	390	380	410	393				
171	1	460	390	520	457	44	70	55	54
	2	460	460	500	473				
	3	400	380	490	423				
	4	410	530	410	450				
	5	510	520	400	477				
172	1	490	500	540	510	56	49	73	58
	2	530	390	360	427				
	3	410	510	490	470				
	4	550	440	450	480				
	5	460	470	390	440				
Average		741.5	785.5	790.1					
Maximum		1075	1180	1180					
Minimum		350	350	350					
Unc		362.5	415	415					
Percentage of Unc		49%	53%	53%					

Tabel 51. Hasil data pengukuran CC dan deviasi sisi *right wall* elv 16-18 m

No tube	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	930	905	904	913	103	118	32	100
	2	1052	882	851	928				
	3	942	1175	930	1016				
	4	930	961	900	930				
	5	1162	1036	863	1020				
2	1	878	898	859	878	13	6	150	101
	2	898	904	900	901				
	3	904	913	1204	1007				
	4	913	905	1028	949				
	5	905	909	1147	987				
3	1	909	904	994	936	27	11	64	59
	2	932	913	1075	973				
	3	912	905	930	916				
	4	862	909	1052	941				
	5	885	932	942	920				
4	1	862	912	930	901	35	28	118	73
	2	921	862	1162	982				
	3	890	885	878	884				

	4	956	862	898	905				
	5	905	921	904	910				
5	1	882	863	913	886	120	105	135	116
	2	1175	1010	905	1030				
	3	961	1089	1204	1085				
	4	1036	1026	1028	1030				
	5	898	852	1147	966				
6	1	904	852	994	917	11	136	86	88
	2	913	1180	1075	1056				
	3	905	863	862	877				
	4	909	974	921	935				
	5	932	894	890	905				
7	1	912	896	956	921	28	41	116	80
	2	862	956	905	908				
	3	885	864	882	877				
	4	862	852	1175	963				
	5	921	872	961	918				
8	1	1128	961	1036	1042	129	42	125	114
	2	1016	870	898	928				
	3	1104	965	904	991				
	4	852	891	1204	982				
	5	1180	930	1028	1046				
9	1	932	1052	1147	1044	19	114	122	98
	2	884	942	994	940				
	3	904	930	1075	970				
	4	920	1162	862	981				
	5	922	878	885	895				
10	1	885	898	862	882	114	6	113	89
	2	939	904	921	921				
	3	928	913	1128	990				
	4	897	905	904	902				
	5	1162	909	851	974				
11	1	878	932	930	913	13	31	30	24
	2	898	912	900	903				
	3	904	862	863	876				
	4	913	885	859	886				
	5	905	862	900	889				
12	1	909	921	1204	1011	27	90	86	105
	2	932	863	1028	941				
	3	912	1010	1147	1023				
	4	862	1089	994	982				
	5	885	1026	1075	995				
13	1	862	852	883	866	35	37	27	32
	2	921	917	871	903				
	3	890	863	861	871				

	4	956	932	930	939				
	5	905	923	872	900				
14	1	882	890	935	902	120	121	65	100
	2	1175	956	909	1013				
	3	961	1026	882	956				
	4	1036	882	930	949				
	5	898	1175	1052	1042				
15	1	904	907	942	918	4	92	115	83
	2	913	883	930	909				
	3	905	979	1162	1015				
	4	909	956	878	914				
	5	913	1119	898	977				
16	1	905	951	904	920	26	101	11	60
	2	909	1118	913	980				
	3	932	904	905	914				
	4	912	851	909	891				
	5	862	930	932	908				
17	1	885	900	912	899	62	146	28	89
	2	862	863	862	862				
	3	921	859	885	888				
	4	863	900	862	875				
	5	1010	1204	921	1045				
18	1	1089	1028	890	1002	103	97	123	106
	2	1026	1147	956	1043				
	3	852	994	905	917				
	4	900	1075	882	952				
	5	875	885	1175	978				
19	1	878	862	961	900	75	23	58	55
	2	860	921	1036	939				
	3	930	898	898	909				
	4	1052	904	904	953				
	5	942	913	913	923				
20	1	930	905	905	913	118	26	26	70
	2	1162	909	909	993				
	3	878	932	932	914				
	4	898	912	912	907				
	5	904	862	862	876				
21	1	913	885	885	894	10	62	108	68
	2	905	862	862	876				
	3	909	921	921	917				
	4	932	863	1128	974				
	5	912	1010	898	940				
22	1	862	1089	904	952	24	97	11	71
	2	885	1026	913	941				
	3	862	852	905	873				

	4	921	930	909	920				
	5	890	1052	932	958				
23	1	956	942	912	937	116	115	28	97
	2	905	930	862	899				
	3	882	1162	885	976				
	4	1175	878	862	972				
	5	961	898	921	927				
24	1	1036	904	890	943	59	11	123	76
	2	898	913	956	922				
	3	904	905	905	905				
	4	913	909	882	901				
	5	905	932	1175	1004				
25	1	909	912	961	927	27	28	58	44
	2	932	862	1036	943				
	3	912	885	898	898				
	4	862	862	904	876				
	5	885	921	913	906				
26	1	862	890	905	886	114	123	26	94
	2	921	956	909	929				
	3	1128	905	932	988				
	4	870	882	912	888				
	5	864	1175	862	967				
27	1	910	961	885	919	6	58	106	67
	2	898	1036	862	932				
	3	904	898	921	908				
	4	913	904	1128	982				
	5	905	913	956	925				
28	1	909	905	1119	978	27	26	124	81
	2	932	909	951	931				
	3	912	932	1118	987				
	4	862	912	904	893				
	5	885	862	851	866				
29	1	862	885	930	892	23	148	30	95
	2	921	862	900	894				
	3	898	921	863	894				
	4	904	1128	859	964				
	5	913	1180	900	998				
30	1	905	863	1204	991	26	47	142	101
	2	909	974	1028	970				
	3	932	894	1147	991				
	4	912	896	907	905				
	5	862	956	883	900				
31	1	885	864	979	909	62	43	86	87
	2	862	852	956	890				
	3	921	872	1119	971				

	4	863	961	951	925				
	5	1010	894	1118	1007				
32	1	1089	965	904	986	146	59	32	98
	2	1026	896	851	924				
	3	852	930	930	904				
	4	852	1052	900	935				
	5	1180	942	863	995				
33	1	863	930	859	884	47	118	150	115
	2	974	1162	900	1012				
	3	894	878	1204	992				
	4	896	898	1028	941				
	5	956	904	1147	1002				
34	1	909	913	994	939	27	10	64	59
	2	932	905	1075	971				
	3	912	909	930	917				
	4	862	932	1052	949				
	5	885	912	942	913				
35	1	862	862	930	885	124	26	118	99
	2	921	885	1162	989				
	3	1162	862	878	967				
	4	878	921	898	899				
	5	898	863	904	888				
36	1	904	1010	913	942	11	93	10	60
	2	913	1089	905	969				
	3	905	1026	909	947				
	4	909	852	932	898				
	5	932	921	912	922				
37	1	912	1034	1204	1050	28	106	86	114
	2	862	1120	1028	1003				
	3	885	1016	1147	1016				
	4	862	1104	994	987				
	5	921	852	1075	949				
38	1	890	1180	956	1009	123	129	116	114
	2	956	863	905	908				
	3	905	974	882	920				
	4	882	894	1175	984				
	5	1175	896	961	1011				
39	1	961	956	1036	984	58	53	59	55
	2	1036	864	898	933				
	3	898	852	904	885				
	4	904	872	913	896				
	5	913	961	905	926				
40	1	905	860	909	891	26	73	27	48
	2	909	965	932	935				
	3	932	896	912	913				

	4	912	930	862	901				
	5	862	1052	885	933				
41	1	785	842	762	796	21	119	112	92
	2	762	830	821	804				
	3	821	1062	1028	970				
	4	794	778	762	778				
	5	798	773	785	785				
42	1	804	760	762	775	11	21	99	60
	2	813	816	821	817				
	3	805	782	763	783				
	4	809	802	910	840				
	5	832	798	989	873				
43	1	812	804	926	847	28	11	89	53
	2	762	813	752	776				
	3	785	805	926	839				
	4	762	809	752	774				
	5	821	832	798	817				
44	1	763	812	804	793	105	28	11	68
	2	910	762	813	828				
	3	989	785	805	860				
	4	926	762	809	832				
	5	752	821	832	802				
45	1	752	782	812	782	136	21	28	81
	2	1080	761	762	868				
	3	763	798	785	782				
	4	874	804	762	813				
	5	794	813	821	809				
46	1	796	805	763	788	31	26	105	67
	2	856	809	910	858				
	3	828	832	989	883				
	4	779	812	926	839				
	5	832	762	752	782				
47	1	797	785	752	778	59	32	136	86
	2	830	762	1080	891				
	3	952	821	763	845				
	4	842	763	874	826				
	5	830	830	794	818				
48	1	1062	952	796	937	119	114	49	99
	2	778	842	856	825				
	3	798	830	752	793				
	4	804	1062	772	879				
	5	813	778	861	817				
49	1	805	798	830	811	26	6	103	74
	2	809	804	952	855				
	3	832	813	842	829				

	4	812	805	830	816				
	5	762	809	1062	878				
50	1	785	832	778	798	36	31	13	27
	2	762	812	798	791				
	3	821	762	804	796				
	4	790	785	813	796				
	5	856	762	805	808				
51	1	805	821	809	812	118	29	137	104
	2	782	790	832	801				
	3	1075	856	812	914				
	4	861	805	762	809				
	5	936	782	1104	941				
52	1	798	1075	928	934	6	115	90	95
	2	804	861	1047	904				
	3	813	936	894	881				
	4	805	798	975	859				
	5	809	804	805	806				
53	1	832	813	782	809	31	10	120	80
	2	812	805	1075	897				
	3	762	809	861	811				
	4	785	832	936	851				
	5	762	812	798	791				
54	1	821	762	804	796	94	112	11	81
	2	1028	785	813	875				
	3	809	762	805	792				
	4	832	821	809	821				
	5	812	1028	832	891				
55	1	762	764	812	779	24	130	28	77
	2	785	752	762	766				
	3	762	772	785	773				
	4	821	861	762	815				
	5	790	1062	821	891				
56	1	856	778	1028	887	116	13	141	109
	2	805	798	1080	894				
	3	782	804	763	783				
	4	1075	813	874	921				
	5	861	805	794	820				
57	1	936	809	796	847	59	27	41	45
	2	798	832	856	829				
	3	804	812	764	793				
	4	813	762	752	776				
	5	805	785	772	787				
58	1	809	762	830	800	27	35	103	77
	2	832	821	952	868				
	3	812	790	842	815				

	4	762	856	830	816				
	5	785	805	1062	884				
59	1	762	782	778	774	109	120	13	95
	2	821	1075	798	898				
	3	1028	861	804	898				
	4	827	936	813	859				
	5	764	798	805	789				
60	1	775	804	809	796	28	24	27	26
	2	844	813	832	830				
	3	798	805	812	805				
	4	832	809	762	801				
	5	798	861	785	815				
61	1	804	798	762	788	11	6	35	20
	2	813	804	821	813				
	3	805	813	790	803				
	4	809	805	856	823				
	5	832	809	805	815				
62	1	812	832	782	809	28	31	120	84
	2	762	812	1075	883				
	3	785	762	861	803				
	4	762	785	936	828				
	5	821	762	798	794				
63	1	798	821	804	808	6	90	135	104
	2	804	763	813	793				
	3	813	910	1104	942				
	4	805	989	928	907				
	5	809	926	1047	927				
64	1	832	752	894	826	31	141	87	94
	2	812	752	975	846				
	3	762	1080	785	876				
	4	785	763	762	770				
	5	762	874	821	819				
65	1	821	794	1028	881	90	31	116	84
	2	763	796	856	805				
	3	910	856	764	843				
	4	989	856	752	866				
	5	926	830	772	843				
66	1	752	952	861	855	141	114	51	103
	2	752	842	830	808				
	3	1080	830	952	954				
	4	763	1062	842	889				
	5	874	778	830	827				
67	1	794	798	1062	885	26	6	119	68
	2	796	804	778	793				
	3	856	813	798	822				

	4	809	805	804	806				
	5	798	809	813	807				
68	1	834	832	805	824	74	31	26	48
	2	760	812	809	794				
	3	784	762	832	793				
	4	830	785	812	809				
	5	952	762	762	825				
69	1	842	821	785	816	115	29	36	72
	2	830	790	762	794				
	3	1062	856	821	913				
	4	778	805	790	791				
	5	798	782	856	812				
70	1	804	1075	805	895	11	115	118	97
	2	813	861	782	819				
	3	805	936	1075	939				
	4	809	798	861	823				
	5	832	804	936	857				
71	1	812	813	798	808	28	10	6	19
	2	762	805	804	790				
	3	785	809	813	802				
	4	762	832	805	800				
	5	821	812	809	814				
72	1	790	762	832	795	123	112	31	95
	2	856	785	812	818				
	3	805	762	762	776				
	4	782	821	785	796				
	5	1075	1028	762	955				
73	1	861	1104	821	929	58	86	80	94
	2	936	928	1028	964				
	3	798	1047	992	946				
	4	804	894	928	875				
	5	813	975	915	901				
74	1	805	752	763	773	26	24	105	68
	2	809	798	910	839				
	3	832	804	989	875				
	4	812	813	926	850				
	5	762	805	752	773				
75	1	785	809	1080	891	109	27	129	96
	2	762	832	763	786				
	3	821	812	874	836				
	4	1028	762	794	861				
	5	910	785	796	830				
76	1	989	762	856	869	146	38	53	97
	2	926	868	764	853				
	3	752	798	752	767				

	4	752	804	772	776				
	5	1080	813	861	918				
77	1	763	805	1062	877	47	19	119	71
	2	874	809	778	820				
	3	794	832	798	808				
	4	796	812	804	804				
	5	856	851	813	840				
78	1	771	1018	805	865	28	103	26	64
	2	775	804	809	796				
	3	828	751	832	804				
	4	763	830	812	802				
	5	760	800	762	774				
79	1	813	763	785	787	28	147	36	90
	2	786	759	762	769				
	3	762	800	821	794				
	4	834	1104	790	909				
	5	782	928	856	855				
80	1	785	1047	805	879	62	99	118	93
	2	830	894	782	835				
	3	952	975	1075	1001				
	4	842	809	861	837				
	5	830	832	936	866				
Average		877	885	900					
Maximum		1180	1204	1204					
Minimum		752	751	752					
Unc		214.0	226.5	226.0					
Percentage of Unc		24%	26%	25%					

Tabel 52. Hasil data pengukuran CC dan deviasi sisi *right wall* elv 23-25 m

no tube	position point	Tube Thickness (μm)			avg	Deviation A	Deviation B	Deviation C	Deviation ALL
		a	b	c					
1	1	904	904	898	902	32	32	6	26
	2	851	851	904	869				
	3	930	930	913	924				
	4	900	900	905	902				
	5	863	863	909	878				
2	1	859	859	904	874	150	150	11	127
	2	900	900	913	904				
	3	1204	1204	905	1104				
	4	1028	1028	909	988				
	5	1147	1147	932	1075				
3	1	994	994	912	967	64	64	28	74

	2	1075	1075	862	1004				
	3	930	930	885	915				
	4	1052	1052	862	989				
	5	942	942	921	935				
4	1	930	930	863	908	118	118	105	105
	2	1162	1162	1010	1111				
	3	878	878	1089	948				
	4	898	898	1026	941				
	5	904	904	852	887				
5	1	913	913	852	893	10	10	136	75
	2	905	905	1180	997				
	3	909	909	863	894				
	4	932	932	974	946				
	5	912	912	894	906				
6	1	862	862	896	873	24	24	41	29
	2	885	885	956	909				
	3	862	862	864	863				
	4	921	921	852	898				
	5	890	890	872	884				
7	1	956	956	961	958	116	116	42	94
	2	905	905	870	893				
	3	882	882	965	910				
	4	1175	1175	891	1080				
	5	961	961	930	951				
8	1	1036	1036	1052	1041	59	59	114	81
	2	898	898	942	913				
	3	904	904	930	913				
	4	913	913	1162	996				
	5	905	905	878	896				
9	1	909	909	898	905	27	27	6	21
	2	932	932	904	923				
	3	912	912	913	912				
	4	862	862	905	876				
	5	885	885	909	893				
10	1	862	862	932	885	113	113	31	89
	2	921	921	912	918				
	3	1128	1128	862	1039				
	4	904	904	885	898				
	5	851	851	862	855				
11	1	930	930	921	927	30	30	90	69
	2	900	900	863	888				
	3	863	863	1010	912				
	4	859	859	1089	936				
	5	900	900	1026	942				
12	1	1204	1204	852	1087	86	86	37	116

	2	1028	1028	917	991				
	3	1147	1147	863	1052				
	4	994	994	932	973				
	5	1075	1075	923	1024				
13	1	883	883	890	885	27	27	121	84
	2	871	871	956	899				
	3	861	861	1026	916				
	4	930	930	882	914				
	5	872	872	1175	973				
14	1	935	935	907	926	65	65	92	71
	2	909	909	883	900				
	3	882	882	979	914				
	4	930	930	956	939				
	5	1052	1052	1119	1074				
15	1	942	942	951	945	115	115	101	102
	2	930	930	1118	993				
	3	1162	1162	904	1076				
	4	878	878	851	869				
	5	898	898	930	909				
16	1	904	904	900	903	11	11	146	80
	2	913	913	863	896				
	3	905	905	859	890				
	4	909	909	900	906				
	5	932	932	1204	1023				
17	1	912	912	1028	951	28	28	97	87
	2	862	862	1147	957				
	3	885	885	994	921				
	4	862	862	1075	933				
	5	921	921	885	909				
18	1	890	890	862	881	123	123	23	98
	2	956	956	921	944				
	3	905	905	898	903				
	4	882	882	904	889				
	5	1175	1175	913	1088				
19	1	961	961	905	942	58	58	26	50
	2	1036	1036	909	994				
	3	898	898	932	909				
	4	904	904	912	907				
	5	913	913	862	896				
20	1	905	905	885	898	26	26	62	38
	2	909	909	862	893				
	3	932	932	921	928				
	4	912	912	863	896				
	5	862	862	1010	911				
21	1	885	885	1089	953	108	108	97	100

	2	862	862	1026	917				
	3	921	921	852	898				
	4	1128	1128	930	1062				
	5	898	898	1052	949				
22	1	904	904	942	917	11	11	115	66
	2	913	913	930	919				
	3	905	905	1162	991				
	4	909	909	878	899				
	5	932	932	898	921				
23	1	912	912	904	909	28	28	11	25
	2	862	862	913	879				
	3	885	885	905	892				
	4	862	862	909	878				
	5	921	921	932	925				
24	1	890	890	912	897	123	123	28	100
	2	956	956	862	925				
	3	905	905	885	898				
	4	882	882	862	875				
	5	1175	1175	921	1090				
25	1	961	961	890	937	58	58	123	79
	2	1036	1036	956	1009				
	3	898	898	905	900				
	4	904	904	882	897				
	5	913	913	1175	1000				
26	1	905	905	961	924	26	26	58	41
	2	909	909	1036	951				
	3	932	932	898	921				
	4	912	912	904	909				
	5	862	862	913	879				
27	1	885	885	905	892	106	106	26	84
	2	862	862	909	878				
	3	921	921	932	925				
	4	1128	1128	912	1056				
	5	956	956	862	925				
28	1	1119	1119	885	1041	124	124	148	122
	2	951	951	862	921				
	3	1118	1118	921	1052				
	4	904	904	1128	979				
	5	851	851	1180	961				
29	1	930	930	863	908	30	30	47	36
	2	900	900	974	925				
	3	863	863	894	873				
	4	859	859	896	871				
	5	900	900	956	919				
30	1	1204	1204	864	1091	142	142	43	131

	2	1028	1028	852	969				
	3	1147	1147	872	1055				
	4	907	907	961	925				
	5	883	883	894	887				
31	1	979	979	965	974	86	86	59	80
	2	956	956	896	936				
	3	1119	1119	930	1056				
	4	951	951	1052	985				
	5	1118	1118	942	1059				
32	1	904	904	930	913	32	32	118	74
	2	851	851	1162	955				
	3	930	930	878	913				
	4	900	900	898	899				
	5	863	863	904	877				
33	1	859	859	913	877	150	150	10	126
	2	900	900	905	902				
	3	1204	1204	909	1106				
	4	1028	1028	932	996				
	5	1147	1147	912	1069				
34	1	994	994	862	950	64	64	26	77
	2	1075	1075	885	1012				
	3	930	930	862	907				
	4	1052	1052	921	1008				
	5	942	942	863	916				
35	1	930	930	1010	957	118	118	93	103
	2	1162	1162	1089	1138				
	3	878	878	1026	927				
	4	898	898	852	883				
	5	904	904	921	910				
36	1	913	913	1034	953	10	10	106	79
	2	905	905	1120	977				
	3	909	909	1016	945				
	4	932	932	1104	989				
	5	912	912	852	892				
37	1	862	862	1180	968	24	24	129	81
	2	885	885	863	878				
	3	862	862	974	899				
	4	921	921	894	912				
	5	890	890	896	892				
38	1	956	956	956	956	116	116	53	99
	2	905	905	864	891				
	3	882	882	852	872				
	4	1175	1175	872	1074				
	5	961	961	961	961				
39	1	1036	1036	860	977	59	59	73	60

	2	898	898	965	920				
	3	904	904	896	901				
	4	913	913	930	919				
	5	905	905	1052	954				
40	1	809	809	842	820	27	27	119	72
	2	832	832	830	831				
	3	812	812	1062	895				
	4	762	762	778	767				
	5	785	785	773	781				
41	1	762	762	760	761	112	112	21	88
	2	821	821	816	819				
	3	1028	1028	782	946				
	4	762	762	802	775				
	5	785	785	798	789				
42	1	762	762	804	776	99	99	11	77
	2	821	821	813	818				
	3	763	763	805	777				
	4	910	910	809	876				
	5	989	989	832	937				
43	1	926	926	812	888	89	89	28	72
	2	752	752	762	755				
	3	926	926	785	879				
	4	752	752	762	755				
	5	798	798	821	806				
44	1	804	804	782	797	11	11	21	17
	2	813	813	761	796				
	3	805	805	798	803				
	4	809	809	804	807				
	5	832	832	813	826				
45	1	812	812	805	810	28	28	26	26
	2	762	762	809	778				
	3	785	785	832	801				
	4	762	762	812	779				
	5	821	821	762	801				
46	1	763	763	785	770	105	105	32	89
	2	910	910	762	861				
	3	989	989	821	933				
	4	926	926	763	872				
	5	752	752	830	778				
47	1	752	752	952	819	136	136	114	121
	2	1080	1080	842	1001				
	3	763	763	830	785				
	4	874	874	1062	937				
	5	794	794	778	789				
48	1	796	796	798	797	49	49	6	37

	2	856	856	804	839				
	3	752	752	813	772				
	4	772	772	805	783				
	5	861	861	809	844				
49	1	830	830	832	831	103	103	31	96
	2	952	952	812	905				
	3	842	842	762	815				
	4	830	830	785	815				
	5	1062	1062	762	962				
50	1	778	778	821	792	13	13	29	19
	2	798	798	790	795				
	3	804	804	856	821				
	4	813	813	805	810				
	5	805	805	782	797				
51	1	809	809	1075	898	27	27	115	80
	2	832	832	861	842				
	3	812	812	936	853				
	4	762	762	798	774				
	5	785	785	804	791				
52	1	762	762	813	779	35	35	10	27
	2	821	821	805	816				
	3	790	790	809	796				
	4	856	856	832	848				
	5	805	805	812	807				
53	1	782	782	762	775	120	120	112	112
	2	1075	1075	785	978				
	3	861	861	762	828				
	4	936	936	821	898				
	5	798	798	1028	875				
54	1	804	804	764	791	11	11	130	72
	2	813	813	752	793				
	3	805	805	772	794				
	4	809	809	861	826				
	5	832	832	1062	909				
55	1	812	812	778	801	28	28	13	23
	2	762	762	798	774				
	3	785	785	804	791				
	4	762	762	813	779				
	5	821	821	805	816				
56	1	1028	1028	809	955	141	141	27	120
	2	1080	1080	832	997				
	3	763	763	812	779				
	4	874	874	762	837				
	5	794	794	785	791				
57	1	796	796	762	785	41	41	35	38

	2	856	856	821	844				
	3	764	764	790	773				
	4	752	752	856	787				
	5	772	772	805	783				
58	1	830	830	782	814	103	103	120	101
	2	952	952	1075	993				
	3	842	842	861	848				
	4	830	830	936	865				
	5	1062	1062	798	974				
59	1	778	778	804	787	13	13	24	19
	2	798	798	813	803				
	3	804	804	805	804				
	4	813	813	809	812				
	5	805	805	861	824				
60	1	809	809	798	805	27	27	6	21
	2	832	832	804	823				
	3	812	812	813	812				
	4	762	762	805	776				
	5	785	785	809	793				
61	1	762	762	832	785	35	35	31	32
	2	821	821	812	818				
	3	790	790	762	781				
	4	856	856	785	832				
	5	805	805	762	791				
62	1	782	782	821	795	120	120	90	102
	2	1075	1075	763	971				
	3	861	861	910	877				
	4	936	936	989	954				
	5	798	798	926	841				
63	1	804	804	752	787	11	11	141	78
	2	813	813	752	793				
	3	805	805	1080	897				
	4	809	809	763	794				
	5	832	832	874	846				
64	1	812	812	794	806	28	28	31	32
	2	762	762	796	773				
	3	785	785	856	809				
	4	762	762	856	793				
	5	821	821	830	824				
65	1	1028	1028	952	1003	116	116	114	110
	2	856	856	842	851				
	3	764	764	830	786				
	4	752	752	1062	855				
	5	772	772	778	774				
66	1	861	861	798	840	51	51	6	48

	2	830	830	804	821				
	3	952	952	813	906				
	4	842	842	805	830				
	5	830	830	809	823				
67	1	1062	1062	832	985	119	119	31	96
	2	778	778	812	789				
	3	798	798	762	786				
	4	804	804	785	798				
	5	813	813	762	796				
68	1	805	805	821	810	26	26	29	25
	2	809	809	790	803				
	3	832	832	856	840				
	4	812	812	805	810				
	5	762	762	782	769				
69	1	785	785	1075	882	36	36	115	81
	2	762	762	861	795				
	3	821	821	936	859				
	4	790	790	798	793				
	5	856	856	804	839				
70	1	805	805	813	808	118	118	10	97
	2	782	782	805	790				
	3	1075	1075	809	986				
	4	861	861	832	851				
	5	936	936	812	895				
71	1	798	798	762	786	6	6	112	62
	2	804	804	785	798				
	3	813	813	762	796				
	4	805	805	821	810				
	5	809	809	1028	882				
72	1	832	832	1104	923	31	31	86	110
	2	812	812	928	851				
	3	762	762	1047	857				
	4	785	785	894	821				
	5	762	762	975	833				
73	1	821	821	752	798	80	80	24	93
	2	1028	1028	798	951				
	3	992	992	804	929				
	4	928	928	813	890				
	5	915	915	805	878				
74	1	763	763	809	778	105	105	27	87
	2	910	910	832	884				
	3	989	989	812	930				
	4	926	926	762	871				
	5	752	752	785	763				
75	1	1080	1080	762	974	129	129	38	103

	2	763	763	868	798				
	3	874	874	798	849				
	4	794	794	804	797				
	5	796	796	813	802				
76	1	856	856	805	839	53	53	19	43
	2	764	764	809	779				
	3	752	752	832	779				
	4	772	772	812	785				
	5	861	861	851	858				
77	1	1062	1062	1018	1047	119	119	103	105
	2	778	778	804	787				
	3	798	798	751	782				
	4	804	804	830	813				
	5	813	813	800	809				
78	1	805	805	763	791	26	26	147	87
	2	809	809	759	792				
	3	832	832	800	821				
	4	812	812	1104	909				
	5	762	762	928	817				
79	1	785	785	1047	872	36	36	99	80
	2	762	762	894	806				
	3	821	821	975	872				
	4	790	790	809	796				
	5	856	856	832	848				
80	1	650	710	720	693	35	30	30	30
	2	680	690	710	693				
	3	720	730	650	700				
	4	720	650	680	683				
	5	650	710	720	693				
Average		885	885	882					
Maximum		1204	1204	1204					
Minimum		650	650	650					
Unc		277.0	277.0	277.0					
Percentage of Unc		31%	31%	31%					