

Kontrol kualitas pekerjaan retubing, metal coating, dan ceramic coating di sisi kiri boiler CFB Pada PLTU 112 MW

Quality control of retubing, metal coating, and ceramic coating works on the left side of the CFB at the 112 MW power plant

SKRIPSI

Oleh:

Nama : Rifky Fauzan Nurhidayat

NPM : 213030016



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2025**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini,

N a m a : Rifky Fauzan Nurhidayat

Nomor Pokok Mahasiswa : 213030016

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini mentakan 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 disebutkan dalam referensi.
3. Naskah laporan skripsi yang diltulis bukan 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, 7 April 2025

Penulis,

Materai 10.000

Rifky Fauzan Nurhidayat

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda-tangan dibawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

Nama : Rifky Fauzan Nurhidayat

NPM : 213030016

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi

Menyatakan bahwasannya 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, ceramic coating di sisi kiri boiler CFB pada 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 (*data base*), 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, 7 April 2025

Yang menyatakan,

Materai 10.000

Rifky Fauzan Nurhidayat

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Kontrol kualitas pekerjaan retubing, metal coating, ceramic coating di sisi kiri *boiler* CFB pada PLTU 112 MW



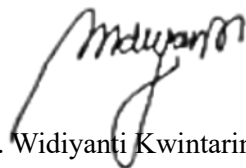
Nama : Rifky Fauzan Nurhidayat

NPM : 213030016

Pembimbing Utama

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

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Widiyanti Kwintarini, M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Kontrol kualitas pekerjaan retubing, metal coating, ceramic coating di sisi kiri *boiler* CFB pada PLTU 112 MW



Nama : Rifky Fauzan Nurhidayat

NPM : 213030016

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.

.....

Handwritten signatures and dates:
Widiyanti Kwintarini
Priyono Soetikno 9/7/25
M. Reza Hermawan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala dengan rahmat dan karunia-Nya, sehingga Penulis dapat membuat, menyusun, dan menyelesaikan laporan skripsi ini.

Laporan skripsi ini tidak terselesaikan tanpa bantuan, dukungan dan bimbingan dari orang-orang di sekitar Penulis, Penulis menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya pada:

1. Orang Tua yang telah mendukung dan telah memberikan do'a, support, dan memberikan motivasi kepada Penulis hingga dapat menyelesaikan laporan ini.
2. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T., Sebagai Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T., Sebagai pembimbing utama.
4. Ibu Dr. Ir. Widiyanti Kwintarini, M.T., Sebagai pembimbing pendamping.
5. Seluruh dosen Teknik Mesin Universitas Pasundan beserta staff dan jajarannya, yang telah memberikan ilmu dan dukungan selama ini.
6. Bapak Lutfi Nur Hakim, manager unit IP Teluk Sirih beserta jajarannya, yang telah memberikan ilmu dan dukungan selama ini.
7. Team Lapi Ganeshatama Consulting, atas bantuan dan kesempatan yang diberikan.
8. Rekan-rekan Teknik Mesin Angkatan 2021.
9. Maurra Gianni Rashelia yang telah mensupport, mendorong, dan membantu dengan do'a, khususnya dalam penyusunan skripsi.

Akhir kata, semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat dan memberikan sumbangsih pemikiran untuk perkembangan pengetahuan bagi penulis dan pembaca.

Bandung, 7 April 2025

Penulis,

Rifky Fauzan Nurhidayat

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	viii
DAFTAR TABEL	x
ABSTRAK	xii
ABSTRCT.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang.....	1
2. Rumusan masalah.....	3
3. Tujuan.....	3
4. Manfaat	3
5. Lingkup masalah	4
6. Sistematika penulisan.....	4
BAB II STUDI LITERATUR.....	5
1. Pembangkit listrik	5
2. <i>Boiler</i>	6
3. <i>Steam turbin</i>	10
4. Kondensor	12
5. Generator.....	13
6. Siklus rankine.....	13

7. <i>Rewelding</i>	15
8. <i>Sandblasting</i>	16
9. <i>Metal coating</i>	16
10. <i>Ceramic coating</i>	17
11. Penelitian terdahulu.....	17
BAB III METODE PENELITIAN	25
1. Tahapan penelitian	25
2. Tempat penelitian	26
3. Keberhasilan pengukuran.....	26
4. Ketidakesuaian pengukuran.....	27
5. Ketidakpastian pengukuran.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
1. Alat dan bahan.....	28
2. Proses dan hasil data pengukuran <i>retubing</i>	49
3. Proses dan hasil data <i>metal coating</i>	60
4. Proses dan hasil data <i>ceramic coating</i>	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	81
1. Kesimpulan	81
DAFTAR PUSTAKA.....	83
LAMPIRAN.....	87
1. Data hasil <i>retubing</i>	87
2. Data hasil <i>metal coating</i>	91
3. Data hasil <i>ceramic coating</i>	124

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. PLTU Teluk Sirih 112 MW [9].....	5
Gambar 2 Sikuls PLTU [9]	5
Gambar 3 <i>Boiler</i> CFB PLTU Teluk Sirih[9].	6
Gambar 4. Skema aliran batubara pada <i>boiler</i> circulating fluidize bed [12]	8
Gambar 5. Susunan peralatan <i>boiler</i> pulverized coal [13].....	9
Gambar 6. Sistematis stoker <i>boiler</i> [14].....	10
Gambar 7. <i>Steam turbin</i> [16].....	10
Gambar 8. Prinsip kerja turbin [18]	11
Gambar 9. Kondensor [9]	12
Gambar 10. Generator[21]	13
Gambar 11. Siklus rankine ideal [23]	14
Gambar 12. Diagram alir tahapan penelitian	25
Gambar 13. Tempat penelitian PLTU Teluk Sirih (2 x 112 MW)	26
Gambar 14. Tube baru.....	28
Gambar 15. Spesifikasi mesin cutting grinding[38]	29
Gambar 16. Mesin <i>angle grinder</i> [38]	30
Gambar 17. Mesin <i>beveling</i>	31
Gambar 18. <i>locking C-Clamp vise grip</i> [39].....	32
Gambar 19. <i>Hi-lo gauge</i> [40].....	33
Gambar 20. <i>Taper gauge</i> [40]	34
Gambar 21. Mesin welding GTAW.....	35
Gambar 22. <i>Comsumable</i> GTAW.....	36
Gambar 23. Mesin welding GMAW	37
Gambar 24. <i>Comsumable</i> HTW-50.....	38
Gambar 25. <i>Welding gauge</i> [40]	39
Gambar 26. <i>Digital vernier caliper</i> [40]	40
Gambar 27. Mesin <i>sandblasting</i> [41].....	41
Gambar 28. Elcometer 124	42
Gambar 29. Replica tape.....	43
Gambar 30. <i>Comsumable sandblasting</i>	44
Gambar 31. Mesin <i>metal coating</i>	45
Gambar 32. <i>Comsumable metal coating</i>	46
Gambar 33. Elcometer 456	47

Gambar 34. <i>Consumable ceramic coating</i>	48
Gambar 35. <i>Cutting tube exiting</i>	49
Gambar 36. <i>Cutting tube baru</i>	50
Gambar 37. <i>Beveling</i>	50
Gambar 38. <i>Baby grinding</i>	50
Gambar 39. <i>Proses fit-up tube</i>	51
Gambar 40. <i>Proses pengukuran hi-lo</i>	52
Gambar 41. <i>Proses tack welding</i>	52
Gambar 42. <i>Proses pengukuran GAP</i>	53
Gambar 43. <i>Proses pelding tube GTAW</i>	53
Gambar 44. <i>Grafik GAP</i>	55
Gambar 45. <i>Grafik bead width</i>	56
Gambar 46. <i>Grafik capping</i>	57
Gambar 47. <i>Grafik joint angle</i>	58
Gambar 48. <i>Grafik hi-lo</i>	59
Gambar 49. <i>Consumable grit blasting</i>	60
Gambar 50. <i>Proses sanblasting</i>	61
Gambar 51. <i>Consumable sandblasting</i>	61
Gambar 52. <i>Proses metal coating</i>	62
Gambar 53. <i>Consumable metal Coating</i>	62
Gambar 54. <i>Grafik metal coating elevasi 16-18</i>	66
Gambar 55. <i>Grafik metal coating elevasi 23-25</i>	67
Gambar 56. <i>Grafik metal coating keseluruhan</i>	70
Gambar 57. <i>Proses ceramic coating</i>	72
Gambar 58. <i>Grafik ceramic coating elevasi 16-18</i>	75
Gambar 59. <i>Grafik ceramic coating elevasi 23-25</i>	76
Gambar 60. <i>Grafik ceramic coating keseluruhan</i>	79
Gambar 61. <i>Lokasi Penelitian PLTU Teluk Sirih 2x112 Mw Team LAPI Ganesha</i>	158
Gambar 62. <i>Mengukur Capping</i>	158
Gambar 63. <i>Mengukur V-Grove</i>	159
Gambar 64. <i>Mengukur Hi-Lo</i>	159
Gambar 65. <i>Mengukur GAP</i>	159

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Spesifikasi <i>boiler circulating fluidized bed</i> [9]	6
Tabel 2. Spesifikasi <i>boiler circulating fluidized bed</i> [9]	7
Tabel 3. Spesifikasi <i>steam turbin</i>	11
Tabel 4. Spesifikasi <i>kondensor</i> [9].....	12
Tabel 5. Spesifikasi <i>tube</i>	28
Tabel 6. Spesifikasi mesin <i>cutting grinding</i>	29
Tabel 7. Spesifikasi mesin <i>angle grinder</i>	30
Tabel 8. Spesifikasi mesin <i>beveling</i>	31
Tabel 9. Spesifikasi <i>locking C-Clamp vise grip</i>	32
Tabel 10. Spesifikasi <i>hi-lo gauge</i>	33
Tabel 11. Spesifikasi <i>taper gauge</i>	34
Tabel 12. Spesifikasi mesin <i>welding GTAW</i>	35
Tabel 13. Spesifikasi <i>consumable GTAW</i>	36
Tabel 14 Spesifikasi mesin <i>welding GMAW</i>	37
Tabel 15. Spesifikasi <i>consumable GMAW</i>	38
Tabel 16. Spesifikasi <i>welding gauge</i>	39
Tabel 17. Spesifikasi <i>digital vernier caliper</i>	40
Tabel 18. Spesifikasi mesin <i>sandblasting</i>	41
Tabel 19. Spesifikasi elcometer 124	42
Tabel 20. Spesifikasi <i>replica tape</i>	43
Tabel 21. Spesifikasi <i>consumable sandblasting</i>	44
Tabel 22. Spesifikasi mesin <i>metal coating</i>	45
Tabel 23. Spesifikasi consumable metal coating	46
Tabel 24. Spesifikasi elcometer 456	47
Tabel 25. Spesifikasi consumable ceramic coating.....	48
Tabel 26. Tabel hasil data <i>retubing</i>	55
Tabel 27. Parameter <i>metal coating</i>	63
Tabel 28. Pengukuran ketebalan <i>metal coating</i> elevasi 16-18	64
Tabel 29 Pengukuran ketebalan <i>metal coating</i> elevasi 23-25	65
Tabel 30. Pengukuran ketebalan <i>metal coating</i> keseluruhan	67
Tabel 31. Parameter utama <i>ceramic coating</i>	71
Tabel 32. Pengukuran ketebalan <i>ceramic coating</i> elevasi 16-18	73

Tabel 33. Pengukuran ketebalan <i>ceramic coating</i> elevasi 23-25	74
Tabel 34. Pengukuran ketebalan <i>ceramic coating</i>	77
Tabel 35. Data pengukuran <i>gap, capping, dan beadwiht</i>	87
Tabel 36. Data pengukuran <i>joint angle, dan hi-lo</i>	89
Tabel 37. Tabel hasil <i>metal coating</i> elevasi 16-18	91
Tabel 38. Tabel hasil <i>metal coating</i> elevasi 23-25	99
Tabel 39. Tabel hasil <i>metal coating</i> keseluruhan	108
Tabel 40. Tabel pengukuran <i>ceramic coating</i> elevasi 16-18.....	124
Tabel 41. Data <i>ceramic coating elevasi 23-25</i>	133
Tabel 42. Tabel hasil <i>ceramic coating</i> keseluruhan	141

ABSTRAK

Pekerjaan pemeliharaan pada sistem perpipaan *boiler* Circulating Fluidized Bed (CFB) di PLTU 2×112 MW Teluk Sirih mencakup retubing, metal coating, dan ceramic coating yang dilakukan khususnya pada sisi kiri *boiler*. Tujuan utama dari ketiga kegiatan ini adalah untuk memperpanjang umur pakai pipa serta meningkatkan ketahanan terhadap korosi, abrasi, dan suhu tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas hasil pekerjaan dengan mengacu pada standar dalam dokumen pengadaan, Welding Procedure Specification (WPS), serta pedoman internasional ASME Section XI. Metode penelitian meliputi observasi langsung di lapangan dan pengukuran berbagai parameter teknis seperti HI-LO, capping, bead width, gap, dan joint angle. Evaluasi ketebalan pelapisan metal dan keramik dilakukan menggunakan alat ukur terkalibrasi seperti welding gauge, taper gauge, jangka sorong digital, dan Elcometer. Data yang dikumpulkan dari 64 titik retubing dan 640 titik coating dianalisis secara statistik dan ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa mayoritas parameter telah memenuhi kriteria standar, meskipun ditemukan ketidaksesuaian minor dengan tingkat ketidakpastian pengukuran antara 6% hingga 17%. Beberapa titik pengelasan melebihi batas toleransi HI-LO sebesar 1,5 mm, ketebalan metal coating berada di luar rentang ideal 600–700 mikron, dan ketebalan ceramic coating berada di luar rentang ideal 150–250 mikron. Ketidaksesuaian ini sebagian besar disebabkan oleh variasi metode aplikasi, kondisi permukaan, dan keterampilan operator. Penelitian ini menekankan pentingnya penerapan kontrol kualitas yang ketat, penggunaan alat ukur yang tepat, serta kompetensi tenaga kerja dalam menjamin keberhasilan pemeliharaan *boiler* dan keandalan operasional pembangkit listrik. Selain itu, dibutuhkan peningkatan pelatihan teknis secara berkelanjutan, pembakuan prosedur pelapisan di lapangan, dan pemantauan terintegrasi untuk meminimalkan ketidaksesuaian hasil kerja.

Kata Kunci: *ASME section XI, boiler CFB, ceramic coating, kontrol kualitas, metal coating, PLTU, kontrol kualitas, retubing.*

ABSTRACT

Maintenance activities on the piping system of the Circulating Fluidized Bed (CFB) *boiler* at the 2×112 MW Teluk Sirih power plant, particularly on the left side of the *boiler*, include retubing, metal coating, and ceramic coating. The main objective of these three processes is to extend the service life of the tubes and to enhance their resistance to corrosion, abrasion, and high temperatures. This study aims to evaluate the quality of these maintenance works based on the standards outlined in procurement documents, Welding Procedure Specification (WPS), and international codes such as ASME Section XI. The research methodology involved direct field observations and measurements of technical parameters including HI-LO, capping, bead width, root gap, and joint angle. The thickness of metal and ceramic coatings was evaluated using calibrated instruments such as welding gauges, taper gauges, digital calipers, and Elcometers. A total of 64 measurement points for retubing and 640 points for coating applications were analyzed statistically and presented in graphs and tables. The evaluation results indicate that most parameters met the required standards, although some minor deviations were found, with measurement uncertainty ranging from 6% to 17%. Several weld joints exceeded the HI-LO tolerance limit of 1.5 mm, while the thickness of metal coatings fell outside the optimal range of 600–700 microns, and ceramic coatings deviated from the ideal thickness of 150–250 microns. These discrepancies were largely caused by variations in application methods, surface conditions, and operator skills. This study emphasizes the importance of strict quality control implementation, the use of precise measuring instruments, and standardized workforce competency in ensuring the success of *boiler* maintenance and the operational reliability of the power plant. In addition, continuous technical training, standardized field coating procedures, and integrated monitoring systems are necessary to minimize quality deviations and optimize the durability of maintenance outcomes.

Keywords: *ASME section XI, CFB boiler, ceramic coating, quality control, metal coating, steam power plant (PLTU), retubing.*

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Pembangkit listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang banyak digunakan untuk menghasilkan energi listrik dalam skala besar. PLTU bekerja dengan memanfaatkan energi panas yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar fosil, seperti batu bara, untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik melalui generator. Keunggulan utama PLTU adalah kemampuannya dalam menghasilkan listrik dengan efisiensi tinggi dan biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan dengan sumber energi lainnya [1]. *Boiler* merupakan komponen utama dalam PLTU yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap dengan memanfaatkan panas hasil pembakaran bahan bakar. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan dan temperatur tinggi, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin. Komponen utama dalam *boiler* terdiri dari sistem pemanas, sistem bahan bakar, dan sistem pengubah air menjadi uap. Efisiensi *boiler* sangat berpengaruh terhadap kinerja keseluruhan PLTU karena merupakan sumber utama energi panas dalam siklus pembangkitan listrik [2]. Dalam operasionalnya, *boiler* sering mengalami berbagai permasalahan teknis, salah satunya adalah overheating akibat kerusakan pada permukaan *tube*. Hal ini dapat menyebabkan kebocoran pada pipa, yang berdampak pada efisiensi sistem secara keseluruhan. Kebocoran *tube* juga berpengaruh terhadap efisiensi Heat Recovery Steam Generator (HRSG), yang bertugas untuk memanfaatkan kembali panas dari gas buang untuk meningkatkan efisiensi pembangkitan listrik [3].

Sistem *boiler* pada PLTU mencakup beberapa komponen utama, seperti sistem bahan bakar, sistem uap untuk kebutuhan produksi, serta pengaturan tekanan steam sesuai dengan kebutuhan operasional. Oleh karena itu, pengelolaan dan pemeliharaan *boiler* menjadi aspek yang sangat penting guna memastikan kelangsungan operasional pembangkit listrik. Salah satu metode yang umum digunakan untuk meningkatkan efisiensi *boiler* adalah metode input-output, yang memungkinkan pengukuran efisiensi secara lebih akurat [4].

Salah satu jenis *boiler* yang banyak digunakan pada PLTU adalah *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*. *Boiler* CFB memiliki keunggulan dalam hal efisiensi pembakaran serta fleksibilitas dalam menangani berbagai jenis batubara. Dalam *boiler* CFB, partikel batubara yang belum terbakar sepenuhnya akan dikembalikan ke *furnace* untuk pembakaran ulang, sehingga meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. *Boiler*

CFB terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *furnace*, cyclone, dan backpass. *Furnace* merupakan tempat utama pembakaran batubara, di mana panas yang dihasilkan digunakan untuk menghasilkan uap. *Cyclone* berfungsi sebagai pemisah partikel batubara yang belum terbakar sempurna dari residu pembakaran, sebelum partikel tersebut diarahkan kembali ke *furnace* untuk pembakaran ulang. Sementara itu, backpass merupakan area pemanfaatan energi termal dari gas buang yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dalam sistem *boiler* [5]. Selain *boiler CFB*, terdapat juga jenis *boiler* lainnya seperti *Pulverized Coal (PC) Boiler* dan *Stoker Boiler*. *Boiler PC* menggunakan batubara yang digiling halus sebelum dibakar dalam *furnace*, menghasilkan pembakaran yang lebih efisien dan suhu yang lebih tinggi. Sementara itu, *Stoker Boiler* menggunakan sistem grate untuk pembakaran batubara, yang umumnya digunakan untuk kapasitas kecil

Dalam proses operasional *boiler*, *retubing* menjadi salah satu proses pemeliharaan yang sangat penting untuk menjaga kinerja dan keamanan sistem. *Retubing* dilakukan guna mengganti pipa *boiler* yang mengalami kerusakan atau penurunan kualitas akibat paparan suhu tinggi dan tekanan uap yang terus-menerus. Proses ini memerlukan pengawasan ketat dan kontrol kualitas yang melibatkan beberapa tahapan, seperti pemilihan material, pengujian *non-destruktif* (NDT), pengujian tekanan, serta proses pengelasan sesuai dengan standar internasional seperti *ASME Boiler and Pressure Vessel Code* [6].

PLTU Teluk Sirih merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap yang dimiliki oleh PT PLN (Persero) dan berlokasi di Sumatera Barat. Pembangkit ini menggunakan batubara sebagai bahan bakar utama dalam proses pembangkitan listrik. Dengan kapasitas terpasang sebesar 2 x 112 MW, PLTU Teluk Sirih berperan penting dalam mendukung pasokan listrik di wilayah tersebut [7]. PLTU Teluk Sirih juga memanfaatkan air laut sebagai sumber air demineralisasi yang digunakan dalam siklus termal untuk menghasilkan uap. Penggunaan air laut ini menjadi salah satu strategi dalam mengurangi ketergantungan pada sumber daya air tawar yang semakin terbatas. Sistem pengolahan air demineralisasi memastikan bahwa air yang digunakan dalam *boiler* memiliki kualitas yang sesuai untuk mencegah terjadinya korosi dan penumpukan kerak pada komponen *boiler* [8]. Selain aspek teknis, faktor keselamatan dan kesehatan kerja (K3) juga menjadi perhatian utama dalam pengoperasian *boiler* di PLTU Teluk Sirih. Risiko kecelakaan kerja dapat meningkat akibat kondisi operasional yang melibatkan tekanan tinggi, suhu ekstrem, serta bahan bakar yang mudah terbakar. Oleh karena itu, diperlukan sistem manajemen keselamatan kerja yang ketat guna mengurangi potensi risiko dan memastikan keselamatan pekerja [8].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis berbagai faktor yang mempengaruhi efisiensi *boiler* serta mencari solusi terbaik untuk meningkatkan kinerja PLTU Teluk Sirih. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi *boiler* yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi industri pembangkitan listrik dalam menerapkan strategi perawatan dan optimasi *boiler* guna mencapai efisiensi yang lebih tinggi serta mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh pembangkit listrik tenaga uap.

2. Rumusan masalah

Dalam penyusunan laporan skripsi ini proses *retubing* yang merupakan tindakan yang pemeliharaan yang kritis guna menjaga keberlanjutan operasi pembangkit listrik. Kontrol kualitas menjadi penentu keberhasilan *retubing* ini. Adapun rumusan masalah yaitu:

- Bagaimana penerapan kualitas mutu pada proses *retubing* dan *metal coating* sisi kiri *Boiler* unit 2 di PLTU Teluk Sirih.
- Apa saja metode dan standar yang digunakan guna memastikan kualitas dalam *retubing boiler* unit 2 di PLTU Teluk Sirih, seperti ASME dan dokumen pengadaan berupa WPS.

3. Tujuan

Penelitian ini bertujuan guna memastikan kualitas material bahwasanya pipa-pipa yang digunakan dalam proses *retubing* memenuhi spesifikasi teknis dan standar industri *ASME*, sehingga dapat beroperasi dengan kondisi optimal, dan temperatur tinggi. Adapun tujuan penelitian yaitu:

- Memastikan kualitas produk *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* sesuai dengan dokumen pengadaan.
- Menganalisis proses *retubing boiler* unit 2 di PLTU Teluk Sirih.

4. Manfaat

Adapun manfaatnya bagi penulis ialah menambah wawasan dan pemahaman mendalam mengenai *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* dan sangat pentingnya kontrol kualitas *boiler* dalam sistem pembangkit listrik. Penelitian ini sangat memberikan panduan bagi industri guna menerapkan kontrol kualitas yang tepat dalam proses *retubing*.

5. Lingkup masalah

Guna permasalahan tak meluas ketika pengerjaan tugas akhir ini, maka didapati batasan masalah berupa:

- Penelitian ini difokuskan pada *boiler Circulating Fluidized Bed (CFB)* dengan kapasitas 112 MW.
- Analisis dibatasi pada kegiatan perbaikan dan pemeliharaan yang mencakup pekerjaan *retubing*, *metal coating*, dan *ceramic coating* yang hanya dilakukan pada sisi kiri *boiler CFB*.
- Parameter yang dianalisis dalam kontrol kualitas terbatas pada pemeriksaan *visual inspection*, *gap inspection*, *hi-lo inspection*, *bead width inspection*, *v-groove inspection*, *capping inspection*, serta pengukuran *thickness measurement*.
- Penelitian ini mencakup jumlah *tube* pada setiap *wall boiler* , yaitu 80 *tube* di *left wall*, 172 *tube* di *front wall*, 80 *tube* di *right wall*, dan 172 *tube* di *fornt wall*. Selain itu, spesifikasi *tube* yang digunakan memiliki diameter 60 mm dengan lebar fin 18 mm.

6. Sistematika penulisan

BAB 1 PENDAHULUAN

Merincikan dengan jelas mengenai latar belakangnya, rumusan masalahnya, batasan masalahnya, tujuannya, manfaatnya, dan sistematika penulisannya.

BAB II STUDI LITERATUR

Menjelaskan tentang pembangkit listrik, *boiler* , turbin, kondensor, generator, siklus rankine, dan penelitian terdahulu.

BAB III METODELOGI PENELITIAN

Menjelaskan rancangan seperti, tahapan penelitian, jadwal penelitian, tempat penelitian, serta rancangan anggaran biaya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil dan pembahasan analisis.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Menjelaskan kesimpulan dan saran

LAMPIRAN

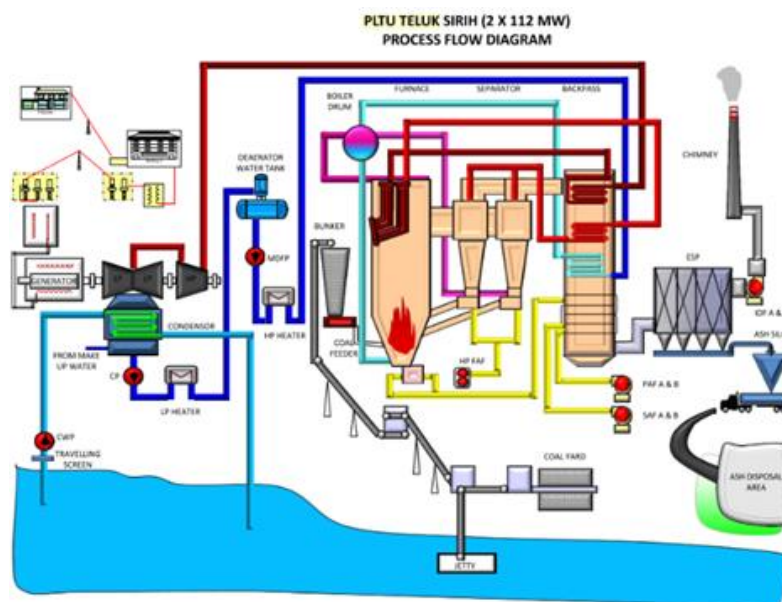
BAB II STUDI LITERATUR

1. Pembangkit listrik



Gambar 1. PLTU Teluk Sirih 112 MW [9]

Pada Gambar 1 Pembangkit listrik merupakan serangkaian peralatan yang menghasilkan energi listrik melalui konversi energi kinetik. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) ialah menggunakan energi kinetik atas uap guna memproduksi listrik. Pembangkit ini memproduksi listrik dengan dimanfaatkannya uap panas yang dihasilkan *boiler* yang berasal dari pemanasan air[1].



Gambar 2 Siklus PLTU [9]

2. Boiler

Boiler merupakan perangkat pembangkit yang fungsinya merubah air menjadikan uap. Didalam *boiler* terdapat pipa-pipa yang berisi air. Hasil dari uap yang pada *boiler* yakni uap *superheat* yang tinggi tekanan dan temperatur. Uap inilah guna menggerakkan kerja turbin. Komponen yang penting ada dua yaitu system pemanas guna menghasilkan panas dari pembakaran bahan bakar dan system yang menrubah air menjadi uap [10].



Gambar 3 *Boiler* CFB PLTU Teluk Sirih[9].

Spesifikasi *Boiler Circulating Fluidized Bed (CFB)* PLTU Teluk Sirih yaitu:

Tabel 1. Spesifikasi *boiler circulating fluidized bed* [9]

Spesifikasi <i>Boiler</i>	
Nama	Satuan
Rated Output	434t/h
Rated Steam Temperature	540°C
Rated Steam Pressure	9.8Mpa
Feedwater temperature	234°C
<i>Boiler</i> flue gas discharge temperature	141°C
Blowdown Rasio	≤1%

Tabel 2. Spesifikasi *boiler* circulating fluidized bed [9]

Spesifikasi <i>Boiler</i>	
Nama	Satuan
Air Intake Temperature of Air Preheater	30°C
Calculated <i>Boiler</i> Heat Efficiency	92.26%
Fuel Consumption	77.033t/h
Limestone Consumption	6.805t/h
Hot Primary Air Temperature	215°C
Hot Secondary Air Temperature	215°C
Ratio of Primary and Secondary Air	60/40
Circulation Coefficient	25-30
<i>Boiler</i> Fly Ash ratio	67%
Desulphurization efficiency (Ca (mol)/S (mol) =2.0)	≥90%

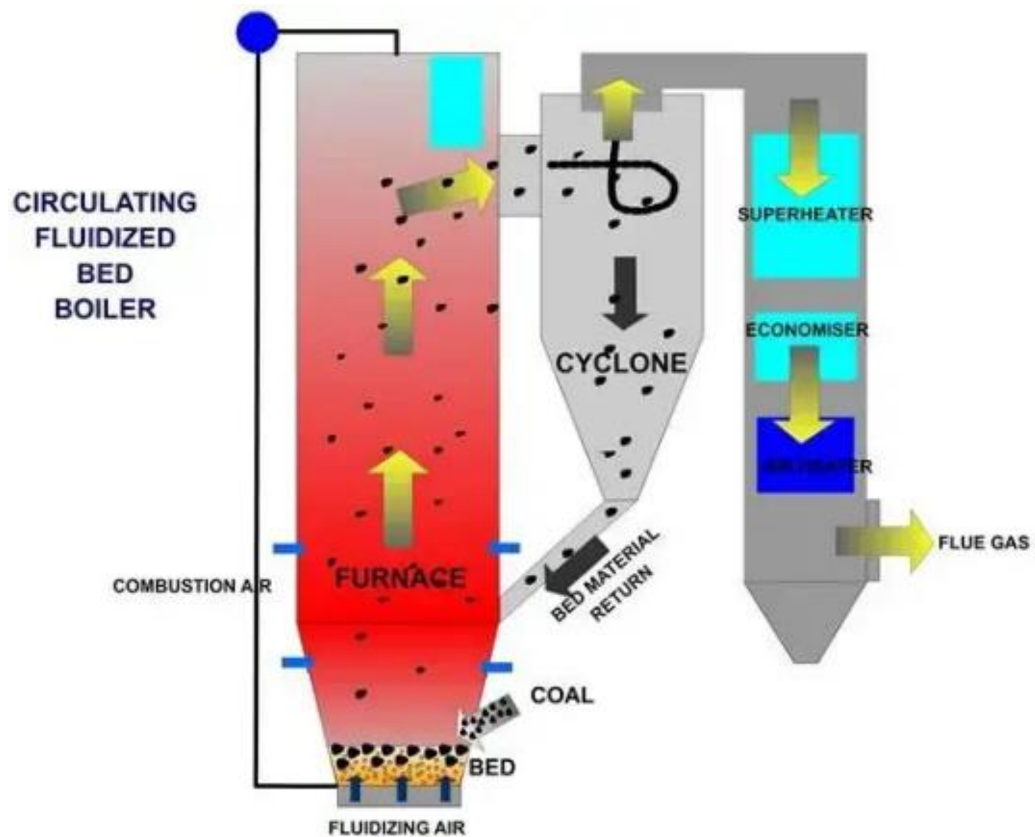
Pada Gambar 3 dan tabel 1 dan 2 *boiler* hadir dalam berbagai tipe, dengan *circulating fluidized bed* (CFB) menjadi salah satu yang paling umum diterapkan pada PLTU. Istilah *circulating* menggambarkan mekanisme sirkulasi partikel batubara yang belum sepenuhnya terbakar, yang berpindah dari *furnace* menuju *cyclone*, kemudian ke *seal pot*, dan akhirnya kembali ke *furnace* guna menyempurnakan proses pembakaran. Di sisi lain, konsep *fluidized* merujuk pada injeksi udara primer yang mempertahankan partikel *bed* dan batubara dalam kondisi melayang stabil di dalam *furnace*. Material *bed*, yang umumnya berupa pasir kuarsa, berfungsi sebagai medium awal guna mentransfer energi panas dari pembakaran *high-speed diesel* (HSD) ke batubara, sehingga mengoptimalkan efisiensi pembakaran secara keseluruhan[11].

Sebagaimana teknologi proses pembakaran secara umum *boiler* terbagi menjadi tiga jenis yakni, *CFB*, *Pulverized Coal (PC)*, dan *Stroker*.

a. *Boiler* berjenis *Circulating Fluidzed Bed (CFB)*

Batubara yang yang dipergunakan di jenis *boiler Circulating Fluidzed Bed (CFB)* berukuran ± 10 mm, aliran dalam *CFB* diketahui pada Gambar 4[11] batubara ditempatkan maupun dimasukkan ke ruang bakar yang mana di atas *material bed* ini yang terletak dibagian *boiler*. Material *bed* ini terdiri dari pasir kuarsa, yang berfungsi sebagai pemanas udara di ruangan bakar. Udara yang berkecepatan tinggi ditiupkan melalui *nozzle* dibagian bawah, sehingga batubara yang ada di atas pasir tersebut terangkat dan terbakar di ruang bakar, Material *bed* bergerak dalam sistem ini berfungsi menyerap panas

dari pembakaran batubara. Panas yang terserap tersebut lalu dialirkan ke dinding *water wall boiler* guna pemanasan air. *Circulating Fluidized Bed (CFB)* dilengkapi dengan pemisah jenis *cyclone* yang menggunakan gaya *sentrifugal* guna memisahkan material *bed* dari *fly ash*, yang kemudian material tersebut Kembali ke ruang *boiler*.

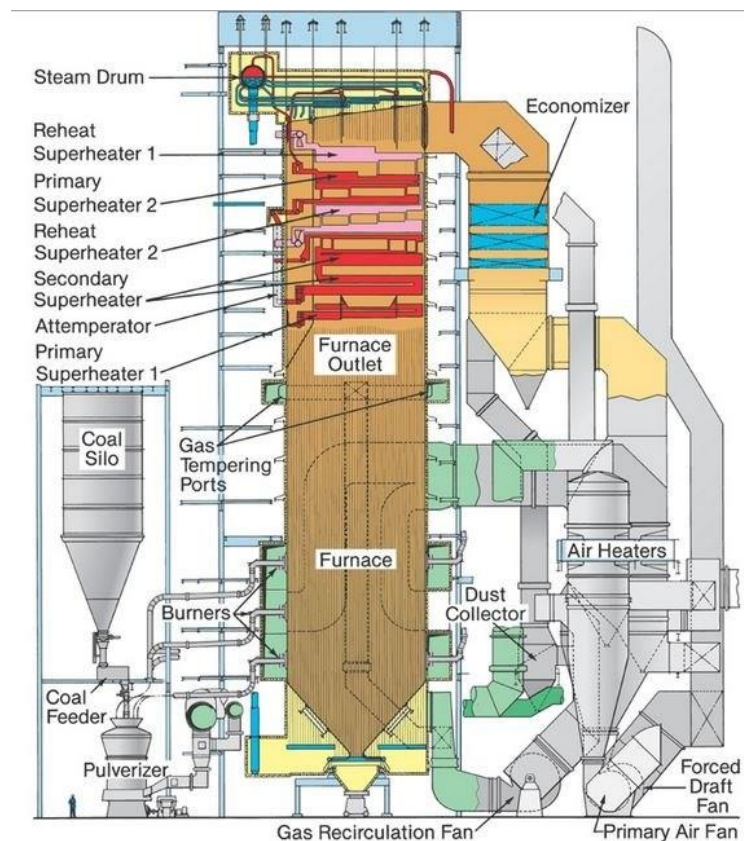


Gambar 4. Skema aliran batubara pada boiler circulating fluidize bed [11]

b. Boiler berjenis *Pulverized Coal (PC)*

Boiler jenis *pulverized coal* (PC) menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya, dengan ukuran partikel yakni 30-40 μm . adapun efisiensi pembakarannya ini tinggi, sehingga cocok digunakan pembangkit listrik tenaga uap dengan kapasitas di atas 100 MW. *Boiler pulverized coal* (PC) dikenal karena kemampuannya menghasilkan pembakaran yang optimal dan efisiensi pada skala besar, seperti di gambar 5[12] terdapat peralatan *pulverizer* yang berfungsi sebagai menggiling batubara menjadi serbuk sebelum disalurkan ke ruang bakar. Biasanya, *burner* ditempatkan di empat sudut *boiler*, menciptakan pembakaran turbulen didalam ruang bakar. Serbuk batubara dilakukan dengan menggunakan udara yang panas yang di sebut primary air, yang mempunyai peranan krusial meliputi:

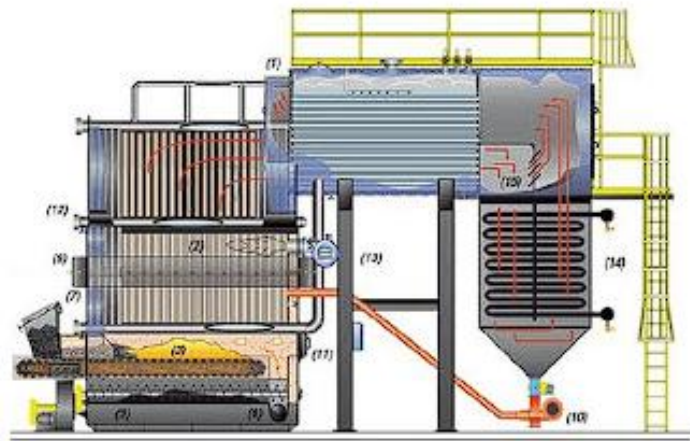
- Mengtransportasikan pasir kuarsa batubara dari *pulverizer* menuju ruang bakar.
- Menurunkan kadar air pada pasir kuarsa batubara agar pembakaran didalam *furnance boiler* agar lebih efisien.
- Mensirkulasikan batubara dalam *pulverizer* di pisahkan batubara dari material asing.



Gambar 5. Susunan peralatan *boiler pulverized coal* [12]

c. *Boiler jenis Stoker*

Boiler Stoker; batubara dipanaskan diatas rantai besi bergerak perlahan. Ukuran ialah 32 mm, dan maksimal 25% dari campuran ukuran 6 mm. *Boiler* ini dikenal mempunyai efisiensi pembakaran lebih rendah dibandingkan dengan *boiler* yang lainnya. *Boiler stoker* umumnya digunakan pada pembangkit listrik dengan kapasitas daya <10 MW[13]. *Boiler stoker* karakteristik perlihatkan di Gambar 6 yakni memasukan batubara ke dalam ruang bakar dandisimpan diatas *traveling grate*. Udara ke pembakaran ditiupkan dengan *fan* di bawah ke ruang bakar, melalui celah ke *traveling grate*. Proses ini menyebabkan abu hasil pembakaran, berupa *fly ash*, terbawa hingga menuju cerobong asap dan dilepaskan ke atmosfer.



Gambar 6. Sistematis stoker boiler [13].

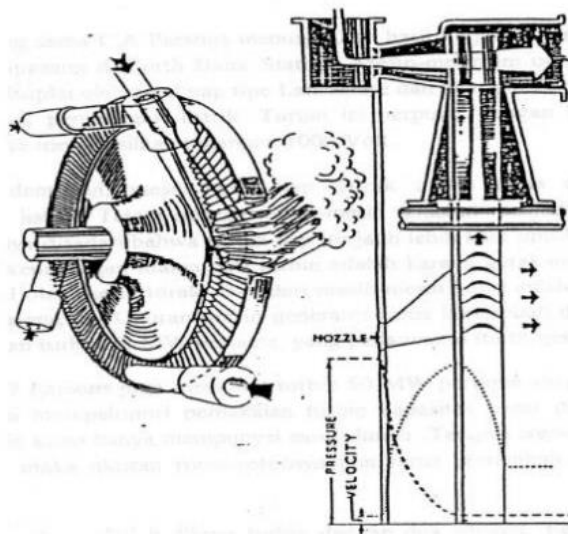
3. *Steam turbin*

Steam Turbine digunakan berjenis turbin kondensasi (*condensing turbin*) melalui pemanfaatan uap kering bertekanan tinggi guna dikonversi menjadi uap rendah (*vacuum*) dengan bantuan kondensor.



Gambar 7. *Steam turbin* [14]

Kondisi uap keluar turbin akan menjadi kondisi uap jenuh menjadi sebagian uap dengan fraksi cair (kondensat), model turbin ini akan diperoleh selisih entalpi yang tinggi guna menghasilkan tenaga turbin guna penggerak generator listrik terlihat pada Gambar 7[15].



Gambar 8. Prinsip kerja *turbin* [16]

Pada Gambar 8 Prinsip kerja *steam turbin* prinsip kerja *steam turbin*:

- Tekanan uap yang memasuki *nozzle* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan uap yang keluar, sehingga menghasilkan dorongan yang memutar sudu-sudu turbin melalui impak uap yang terpancar dari *nozzle* tersebut [16].
- Turbin dilengkapi dengan beberapa sudu tetap maupun gerak yang disusun sejajar. Sudu turbin berfungsi guna memanfaatkan kembali energi kinetik yang tersisa setelah uap melewati sudu turbin. Fungsi utama sudu tetap ialah mengubah arah kecepatan uap, sehingga uap memasuki sudu gerak dengan arah yang tepat [17].
- Meningkatkan efisien turbin, perlu diupayakan agar kecepatan uap saat meninggalkan sudu gerak turbin terakhir serendah mungkin, guna memaksimalkan pemanfaatan energi kinetik dan meminimalkan kehilangan energi[17].

Tabel 3. Spesifikasi *steam turbin*

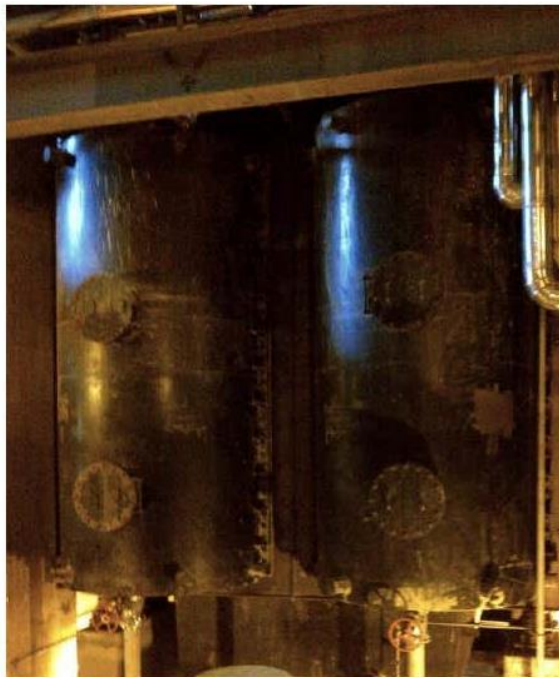
Spesifikasi <i>Steam Turbin</i>	
Nama	
Rate Output	110 MW
Rated Speed	3000 r/mih
Main Steam Temp	535°C
Main Steam Pers	8.83 Mpa(a)
End Pres	8 kPa(a)
Cooling Water Temp	30

4. Kondensor

Gambar 9 ialah Kondensor ialah komponen yang merupakan bagian penting dalam siklus rankine. Prinsip kerja sistem ini melibatkan proses kondensasi uap yang telah dimanfaatkan guna memutar turbin, mengubahnya kembali menjadi air. Selanjutnya, air tersebut dipompa kembali menuju *boiler* guna dipanaskan ulang hingga mencapai fase uap, memungkinkan siklus energi berulang secara berkesinambungan. Spesifikasi Kondensor pada tabel 4 [18].

Tabel 4. Spesifikasi kondensor[9]

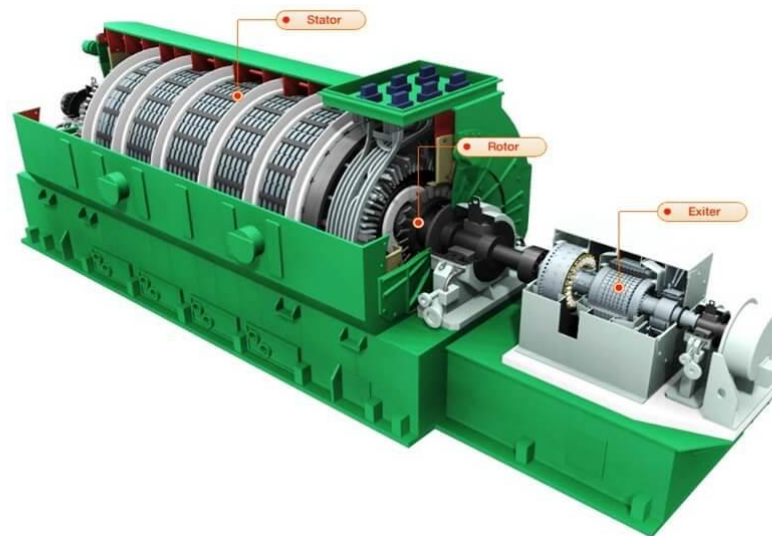
Spesifikasi kondensor	
Nama	
Type	Single-housing dual flow
Cooling area	7500 m ²
Cooling Water Quantity	about 22100t/h
Cooling Water Temperature	30 °C – 33 °C
Cooling Water Temperature	0.11 Mpa
Condensor backpressure	8.0 Kpa(a) – 8.7 kPa(a)
Maximum allowable backpressure	18.6 kPa(a)
Condensate Water Temperature	41.54



Gambar 9. Kondensor [9]

5. Generator

Gambar 10 ialah Generator listrik yakni perangkat yang mengonvert energi mekanik menjadikan energi listrik, umumnya melalui proses induksi elektromagnetik yang dikenal sebagai pembangkit listrik. Meski serupa, generator berada dengan motor. Motor merubah energi listrik menjadi energi mekanik. Generator memindahkan muatan listrik melalui sirkuit eksternal tetapi tak menghasilkan listrik didalam lilitan kumparannya sendiri. Sumber energi mekanik bisa berasal dari berbagai hal, seperti angin, sinar matahari, aliran air melalui turbin atau kincir air, serta turbin uap [19].



Gambar 10. Generator[19]

Prinsip Kerja Generator

Menurut hukum Faraday, prinsip kerjanya ialah Ketika suatu penghantar diputar dalam medan magnet, penghantar tersebut akan memotong garis-garis gaya magnet. Hal ini menghasilkan gaya elektromotif pada ujung penghantar yang mengarah pada timbulnya tegangan listrik yang di ukur dalam satuan volt[20].

6. Siklus Rankine

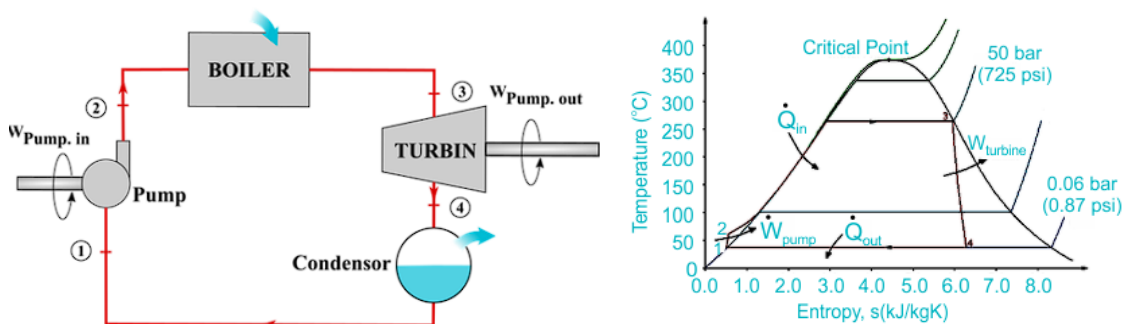
Siklus Rankine mengubah energi panas menjadi kerja atau energi bergerak. Siklus Rankine panas menyediakan sistem kerja ke aliran tertutup, yang biasanya mempergunakan udara sebagai fluida bergerak. Adanya masuk panas dari luar dan perubahan tekanan menyebabkan penggunaan fluida yang mengalir secara konstan. Siklus Rankine memiliki efisiensi ideal sebesar 42% dan dapat masuk dalam berbagai aplikasi. Termasuk pembangkit listrik, proses energi termal, atau kombinasi keduanya. Siklus Rankine ialah pengembangan siklus *Carnot*, dimana proses pembakaran dan pendinginan terjadi tekanan yang konstan, siklus Rankine menggunakan bertekanan.

Cara kerja Siklus Rankine

Siklus rankine melibatkan empat komponen utama, *boiler* , turbin, kondensor, generator, pompa. *Boiler* mengubah air menjadi uap kerja, turbin mengkonvert uap kerja menjadi energi mekanik, kondensor mendinginkan uap bekas menjadi air, dan pompa memindahkan air tersebut kembali ke *boiler* guna pemanasan lagi. Setiap komponen ini memainkan peran krusial dalam menyelesaikan siklus rankine secara efisien[21].

Dalam siklus rankine, pompa pengisi *boiler* bertugas memompa air ke dalam *boiler* . Pompa ini dikenal sebagai *feed water pump*. Idealnya, pompa beroperasi sesuai dengan presisi isentropic (*adiabatic reversible*), namun pada kenyataannya, pompa bekerja menurut proses adiabatic yang tidak *reversible*[21].

Uap bertekanan rendah yang keluar dari turbin dialirkan menuju kondensor, tempat uap ini mengalami pendinginan melalui kontak dengan media seperti udara. Proses ini menyebabkan perubahan fase dari uap menjadi cair. Cairan hasil kondensasi ini kemudian dikumpulkan dalam tangka pisah dari gas residu. Pompa pengisi *boiler* memompa cairan tersebut kembali kedalam boiler guna dipanaskan dan diubah menjadi uap, melanjutkan siklus. Diagram Ts menggambarkan siklus rankine ini secara grafis, dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Siklus rankine ideal [21]

Diperlihatkan pada gambar 11 terjadinya beberapa prosekondisi, yang berubah, seperti:

- proses 1 ke 2 yakni prosesr kompresi isentropik oleh pompa, Dimana kerja dimasukan kedalam system pompa. (W_{Pompa}).

$$W_{pompa} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

- b) Proses 2 ke 3 yakni proses yang terjadi pada tekanan konstan di dalam *boiler* , dimana panas masuk dalam sistem. (Q_{in}).

$$W_{pompa} = h_3 - h_2 \quad (2)$$

- c) Proses 3 ke 4 yakni proses ekspansi *isentropis* (adiabatis reversibel) yang terjadi didalam turbin uap. Selama proses ini, sistem menghasilkan kerja luar. (W_{out}).

$$W_{turbin} = h_3 - h_4 \quad (3)$$

- d) Proses 4 ke 1 yakni proses yang terjadi pada tekanan konstan dalam kondensor. Dimana kalor ini keluar ke sistem (Q_{out}).

$$Q_{out} = h_4 - h_1 \quad (4)$$

Keterangan:

W_{pompa} = Kinerja pompa (KW)

W_{turbin} = Kinerja turbin (KW)

Q_{in} = Energi panas (kalor) *boiler* (kg/jam)

Q_{out} = Energi panas (kalor) kondensor (kg/jam)

h_1 = Entalphy air keluar kondensor (kj/kg)

h_2 = Entalphy air masuk *boiler* (kj/kg)

h_3 = Entalphy air keluar *boiler* (kj/kg)

h_4 = Entalphy air keluar turbin (kj/kg)

7. Rewelding

Proses *Rewelding* ialah proses pengantian *tube* pada bolier CFB untuk pemeliharaan yang fundamental dalam menjaga kendala sistem pembangkit. Proses *retubing* diawali dengan penghentian operasi unit *boiler* secara terkontrol untuk memastikan keamanan, dilanjutkan pemotongan *tube* lama (Exiting) yang sudah rusak atau penurunan kualitas pemotongan ini menggunakan teknik pemotongan yang presisi, pemasangan *tube* baru dipasangkan dengan metode pengelasan yang sesuai dengan standar ASME. Kualitas pengelasan harus diperiksa dan divalidasi.

Untuk memvalidasi harus dengan pengujian kualitas dilakukan uji *non-deskrutif* seperti radiografi, uji penetrasi, dan uji tekanan hidrostatik untuk memastikan keandalan *tube* baru. Metode pengujian memiliki fungsi spesifikasi dalam memverifikasi integritas sambungan las dan kemampuan *tube* dalam menahan tekanan. Pengoperasian kembali setelah pemasangan, sistem pemanasan secara bertahap dan di uji performanya sebelum kembali beroperasi[22].

8. Sandblasting

Sandblasting ialah proses untuk pembersihan permukaan logam dengan menggunakan aliran partikel abrasif bertekanan tinggi. Tujuan *sandblasting* untuk menghilangkan karat, kerak, dan kotoran. Kegagalan atau keberhasilan pengecatan sangat bergantung pada kebersihan dan perekatan antara cat dan permukaan, serta kepadatan dan peralatan cat itu sendiri. *Sandblasting* itu juga mempunyai dua jenis, yaitu:

a. Dry Sandblasting

Dry Sandblasting proses pembersihan permukaan material menggunakan media abrasif kering yang disemprotkan dengan tekanan tinggi. Proses ini sering digunakan untuk menghilangkan karat, cat lama, dan kotoran pada permukaan logam. Media abrasif yang digunakan bisa berupa pasir, grit baja, atau bahan abrasif lainnya [23].

b. Wet Sandblasting

Wet sandblasting, atau *slurry blasting* ialah teknik pembersihan yang menggunakan campuran air dan media abrasif. Proses ini menghasilkan lebih sedikit debu dibandingkan *dry sandblasting*, sehingga lebih ramah lingkungan. *Wet sandblasting* juga lebih efektif untuk mengurangi panas yang dihasilkan selama proses pembersihan dan memberikan hasil akhir yang lebih halus pada permukaan yang dibersihkan [24].

9. Metal coating

Metal coating adalah proses pelapisan permukaan logam dengan lapisan logam lain untuk melindungi dari korosi, erosi, dan suhu tinggi. Proses ini biasanya menggunakan metode thermal spray atau galvanisasi. Tahapan proses *metal coating* persiapan permukaan *Sandblasting* dilakukan untuk memastikan adhesi yang baik. Pemilihan jenis lapisan bisa berupa *zinc*, *aluminium*, atau paduan logam lain sesuai kebutuhan operasional aplikasi *coating*. Pelapisan dilakukan dengan teknik penyemprotan termal atau pencelupan. Pemeriksaan Kualitas Lapisan diuji ketebalannya dan ketahanannya terhadap kondisi operasional[25].

10. *Ceramic coating*

Ceramic coating adalah proses pelapisan permukaan dengan material keramik untuk meningkatkan ketahanan terhadap suhu tinggi dan keausan. Proses ini digunakan pada komponen yang bekerja dalam kondisi ekstrem, seperti *boiler* dan turbin. Langkah-langkahnya. Persiapan Permukaan Dilakukan *sandblasting* agar *coating* dapat menempel dengan baik. Aplikasi Lapisan Keramik Lapisan diterapkan menggunakan metode plasma spray atau thermal spray. Pemeriksaan Kualitas Diuji menggunakan metode uji adhesi dan ketahanan panas sebelum komponen digunakan kembali.

11. Penelitian terdahulu

Penelitian terdahulu yang dimaksud guna mencari kajian-kajian yang berhubungan dengan objek penelitian saat ini sehingga dapat membantu penulis dalam penelitian. Adapun referensi yang digunakan penelitian terdahulu dalam penelitian ini.

- a. Penelitian yang dilakukan oleh Marcin Winnicki (2021), “*Advanced Functional Metal-Ceramic and Ceramic Coatings Deposited by Low-Pressure Cold Spraying: A Review*” [26].

Penelitian ini Tujuan utama dari tinjauan ini adalah untuk menyajikan perkembangan terkini dalam teknologi pelapisan logam-keramik dan keramik murni menggunakan metode *Low-Pressure Cold Spraying* (LPCS). Artikel ini mengeksplorasi bagaimana parameter proses LPCS dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi deposisi, memahami mekanisme pengikatan antara partikel logam dan keramik, serta mengevaluasi potensi aplikasi fungsional dari pelapis komposit berbasis logam dan keramik. Dengan menyoroti berbagai teknik persiapan bubuk dan strategi inovatif, tinjauan ini bertujuan untuk menjadi referensi komprehensif bagi para peneliti dan praktisi industri yang tertarik dalam solusi pelapisan ramah energi dan multifungsi. Dan kesimpulan dari penelitian ini *Low-Pressure Cold Spraying* (LPCS) telah muncul sebagai metode pelapisan yang menjanjikan untuk membentuk lapisan fungsional logam-keramik dan keramik murni tanpa melibatkan suhu tinggi dengan 50-200 μm dan 230-280 μm . Melalui optimalisasi parameter semprotan dan pemilihan metode persiapan bubuk yang tepat, LPCS mampu menghasilkan lapisan dengan sifat mekanik, elektrik, dan termal yang unggul. Meskipun efisiensi deposisi LPCS masih terbatas dibandingkan metode tekanan tinggi, pendekatan ini menawarkan keunggulan dalam hal biaya, mobilitas, dan kompatibilitas dengan substrat sensitif panas. Penelitian lanjutan difokuskan pada peningkatan efisiensi deposisi dan stabilitas struktural lapisan melalui rekayasa mikrostruktur serta inovasi dalam material bubuk.

LPCS memiliki potensi besar untuk aplikasi industri luas, dari pelapisan anti-korosi hingga peningkatan konduktivitas termal dan listrik [26].

- b. Penelitian yang dilakukan oleh T Akatsu, T Kato, Y Shinoda, and F Wakai (2011) ” *Ceramic Coating on a Metal with Plasma Electrolytic Oxidation*”[27].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pelapisan keramik berbasis *zirconia* (ZrO_2) pada paduan *superalloy* berbasis nikel dengan menggunakan teknik *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO). Metode ini dipilih karena menawarkan biaya yang lebih rendah dan fleksibilitas dalam pelapisan permukaan yang kompleks, dibandingkan metode pelapisan konvensional seperti *Electron Beam Physical Vapor Deposition* dan *Air Plasma Spray*. Dalam studi ini, tim peneliti berusaha untuk mengintegrasikan elemen logam dari larutan elektrolit ke dalam lapisan pelindung secara langsung melalui proses PEO dua tahap, serta mengevaluasi struktur mikro dan kekuatan adhesi antara lapisan dan substrat. Dan kesimpulan dari penelitian ini yaitu Struktur Kristal Beragam: Lapisan *thermal barrier coating* (TBC) menunjukkan keberadaan kristal ZrO_2 dalam bentuk monoklinik, tetragonal, dan kubik. Keberadaan *kristal tetragonal* dan kubik yang biasanya tidak stabil pada suhu ruang menjadi mungkin karena struktur butir ultra-halus berukuran sekitar 200–300 μm , Distribusi Pori yang Strategis: Ditemukan porositas tinggi dan pori-pori besar pada area antarmuka antara lapisan penghalang oksigen (OBC) dan TBC, akibat loncatan listrik berenergi tinggi pada awal proses PEO. Hal ini dapat memberikan keuntungan fungsional dalam menghambat konduktivitas termal dan difusi oksigen [27].

- c. Penelitian yang dilakukan oleh Eko Setiono (2023) ” *Boiler Reliability Analysis With Weibull To Measure The Impact Of Metal Coating On The Wall Tube Boiler CFB UPK TARAHAH*”. [28]

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penerapan teknologi *metal coating* pada pipa *wall tube boiler* dengan tipe *Circulating Fluidized Bed* (CFB) di PLTU UPK Tarahan. Fokus utama dari kajian ini adalah untuk mengetahui sejauh mana *metal coating* dapat mengurangi laju erosi dan meningkatkan keandalan (*reliability*) sistem *boiler*, khususnya pada area *furnace* yang paling rentan terhadap kerusakan akibat aliran *bed* material dan gas buang panas. Penelitian ini juga menggambarkan proses perencanaan, pelaksanaan, hingga evaluasi hasil aplikasi *metal coating*, serta membandingkan nilai keandalan *boiler* sebelum dan sesudah implementasi menggunakan analisis distribusi *Weibull*. Dan kesimpulan dari penelitian ini Berdasarkan hasil inspeksi visual serta data analisa keandalan, penerapan teknologi *metal coating* dengan 300-500 μm terbukti mampu menahan

hingga 98% tingkat erosi pada pipa *boiler* CFB PLTU UPK Tarahan. Meskipun masih terdapat beberapa titik dengan keausan tinggi yang memerlukan peningkatan jenis *coating*, secara keseluruhan performa sistem menunjukkan peningkatan yang signifikan. Nilai keandalan unit *boiler* meningkat dari 8,2% menjadi 11,2% setelah *coating* diterapkan, dengan penurunan *Probability of Failure* (POF) dari 95,1% menjadi 88,5%. Hasil ini mengindikasikan bahwa *metal coating* merupakan solusi efektif dan efisien dalam memperpanjang umur pakai pipa *boiler* serta mengurangi potensi gangguan operasi akibat kebocoran [28].

- d. Penelitian yang dilakukan oleh Teguh Widjajanto, Djarot B. Darmadi, Yudy S. Irawan, Femiana Gapsari (2024). ”*Failures Analysis of Tube Coating in Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*”[29].

Penelitian ini bertujuan guna menganalisis kegagalan lapisan pelindung pada pipa *boiler Circulating Fluidized Bed (CFB)* yang sering mengalami kobocoran akibat abrasi. Analisis ini melibatkan evaluasi lapisan pelindung *Crome Clad Tube Armor (CTA)* yang diaplikasikan pada pipa, baik pada kondisi baru maupun setelah ketahanan, termal dan lapisan ini didalam menghadapi kondisi operasi *boiler Circulating Fluidized Bed (CFB)*. Dan hasil penelitian ini menunjukkan bahwasanya lapisan *Crome Clad Tube Armor (CTA)* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap panas di bandingkan dengan pipa lapisan WT. nilai kekerasan pada subtract lapisan *Crome Clad Tube Armor (CTA)* tetap lebih tinggi dibandingkan dengan WT, dan analisis ini menunjukkan bahwasanya lapisan *Crome Clad Tube Armor (CTA)* mengurangi laju erosi secara signifikan. Kegagalan pada lapisan pelindung pipa terutama disebabkan oleh suhu operasi tinggi dan akurasi antara pipa dan partikel fluida. Lapisan *Crome Clad Tube Armor (CTA)* memberikan perlindungan tambahan yang dapat memperpanjang masa pakai pipa *boiler Circulating Fluidized bed (CFB)*, namun peningkatan lebih lanjut pada komposisi lapisan diperlukan guna optimalisasi ketahanan terhadap erosi dan abrasi[29].

- e. Penelitian yang dilakukan oleh Alias Mohd Noor, Fadzlun Nadrah Sharuddin, Uday M. Basheer (2018) ” *Coating Characterizations and Evaluation of Ceramic-Metal Mixture Slurry Based Thermal Barrier Coating for Automotive TurbochargerTurbine Application*” [30].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi sistem pelapisan pelindung termal (*thermal barrier coating/TBC*) berbasis campuran *slurry* keramik-logam menggunakan material alternatif yang lebih ekonomis dan ringan, yaitu kombinasi serbuk nikel dan serat *basalt*. Fokus utama penelitian adalah meningkatkan

performa dan ketahanan panas pada *casing volute turbin turbocharger* otomotif yang beroperasi pada suhu ekstrem, dengan menekan laju perpindahan panas serta memperpanjang umur pakai komponen mesin. Selain itu, metode pelapisan yang digunakan diharapkan lebih sederhana dan hemat biaya dibandingkan teknik pelapisan konvensional seperti *plasma spray* atau *electron beam deposition*. Dan kesimpulan penelitian ini sistem pelapisan keramik berbahan dasar campuran serat *basalt* dan nikel dengan 30-500 μm berhasil dikembangkan sebagai alternatif dari material pelapis konvensional seperti *Yttria Stabilized Zirconia* (YSZ). Material baru ini menunjukkan potensi yang sangat baik dalam mengurangi transfer panas pada *casing volute turbin turbocharger*, serta menawarkan keunggulan dalam hal biaya, ketahanan terhadap korosi, dan daya tahan termal. Dengan mempertimbangkan berbagai kriteria penting dalam pemilihan material, sistem pelapisan ini dinilai cocok untuk diaplikasikan pada komponen mesin otomotif yang bekerja dalam lingkungan bersuhu tinggi. Pendekatan ini memberikan solusi praktis, berbiaya rendah, dan ramah lingkungan untuk peningkatan efisiensi mesin kendaraan modern[30].

- f. Penelitian yang dilakukan oleh Chen Zhao (2021). “*Ceramic Coatings on Non-Valve Metals Deposited by Plasma Electrolysis*” [31].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis proses pelapisan keramik pada logam *non-valve*, khususnya besi (Fe) dan tembaga (Cu), dengan menggunakan metode *Plasma Electrolytic Aluminating* (PEA). Untuk mencapai tujuan tersebut, dilakukan studi eksperimental dengan pendekatan *Taguchi* dan analisis *ANOVA* guna mengidentifikasi pengaruh parameter proses terhadap kualitas pelapisan, seperti konsentrasi elektrolit, frekuensi, dan siklus kerja daya. Selain itu, penelitian ini juga mengeksplorasi mekanisme pembentukan lapisan keramik pada besi cor serta mengevaluasi sifat ketahanan aus dan korosinya. Aspek termal dari pelapisan *PEA*, termasuk konduktivitas termal dan ketahanan terhadap kejutan termal, juga menjadi fokus penting dalam studi ini. Untuk meningkatkan performa lapisan, dilakukan pula perawatan pasca-proses berupa pelapisan nikel tanpa listrik dan pelapisan sol-gel berbasis silika sebagai metode penyegelan pori. Terakhir, penelitian ini juga mengevaluasi penerapan metode *PEA* pada logam tembaga dan karakteristik lapisan yang terbentuk, baik dari segi mikrostruktur maupun performa mekanik dan termal. Dan kesimpulan penelitian ini Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa metode *Plasma Electrolytic Aluminating* (PEA) berhasil dikembangkan sebagai solusi pelapisan keramik yang efektif dan ramah lingkungan untuk logam *non-valve* seperti besi dan tembaga. Proses ini menghasilkan lapisan dengan kekerasan

tinggi, ketahanan terhadap korosi dan aus yang baik, serta konduktivitas termal yang dapat disesuaikan. Melalui analisis parameter proses, diketahui bahwa konsentrasi *sodium aluminate* dalam elektrolit memberikan pengaruh paling signifikan terhadap sifat lapisan, sementara frekuensi dan siklus kerja juga berkontribusi terhadap kepadatan dan ketebalan pelapisan. Penelitian ini juga menemukan perbedaan mekanisme pembentukan lapisan antara substrat besi dan tembaga, di mana substrat besi ikut bereaksi membentuk senyawa FeAl_2O_4 , sedangkan pada tembaga hanya terbentuk lapisan $\text{Al}(\text{OH})_3$ tanpa partisipasi substrat secara langsung. Penerapan perawatan pasca-proses seperti pelapisan nikel dan silika terbukti mampu menutup pori-pori dan retakan, serta meningkatkan ketahanan korosi dalam jangka panjang. Untuk tembaga, pelapisan *PEA* membentuk struktur komposit yang mengandung partikel Cu dan keramik, memberikan performa unggul dalam ketahanan aus dan konduktivitas termal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan potensi besar dari teknologi *PEA* sebagai metode pelapisan multifungsi yang aplikatif untuk kebutuhan industri modern[31].

- g. Penelitian yang dilakukan oleh Minh Dat Nguyen, Jung Wong Bang, Young Hee Kim, An Su Bin, Kyu Hong Hwang, Vuong-Hung Pham, Woo- Teck Kwon (2018) “*Anti-Fouling Ceramic Coating for Improving the Energy Efficiency of Steel Boiler Systems*” [32].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengaplikasikan lapisan keramik *anti-fouling* yang mampu mencegah penumpukan abu terbang pada permukaan luar pipa *boiler* berbahan baja karbon. Permasalahan *fouling* yang sering terjadi di fasilitas *waste-to-energy* (WTE) menyebabkan penurunan efisiensi transfer panas, peningkatan konsumsi bahan bakar, serta biaya operasional tambahan untuk pembersihan. Oleh karena itu, solusi berupa pelapis keramik berbiaya rendah namun berkinerja tinggi diperlukan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dalam penelitian ini, pengujian menyeluruh dilakukan untuk menilai efektivitas pelapis dalam meningkatkan efisiensi energi melalui pengujian adhesi, ketahanan kejutan termal, resistansi *fouling*, dan konduktivitas termal. Dan kesimpulan dari penelitian ini Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa lapisan keramik *anti-fouling* yang dikembangkan berhasil diaplikasikan secara efektif pada permukaan baja karbon dengan ketebalan sekitar 150–160 μm melalui metode penyemprotan *slurry*. Lapisan ini memiliki struktur padat, daya rekat tinggi, dan menunjukkan ketahanan yang sangat baik terhadap *fouling* akibat abu terbang yang mengandung natrium dan klorin tinggi. Pengujian menunjukkan bahwa pelapis ini mampu mencegah penempelan abu secara signifikan,

berbeda dengan permukaan baja tanpa pelapis yang mengalami *fouling* berat. Selain itu, lapisan keramik ini juga terbukti mampu meningkatkan konduktivitas termal pada suhu tinggi (800 °C), yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan efisiensi perpindahan panas. Aplikasi nyata pada sistem *boiler* di fasilitas *waste-to-energy* menunjukkan peningkatan efisiensi termal hingga 62,34% setelah tiga bulan penggunaan, sehingga pelapis ini sangat potensial untuk diterapkan secara luas dalam sistem *boiler* industri sebagai solusi peningkat efisiensi energi yang ramah lingkungan [32].

- h. Penelitian yang dilakukan oleh Muhamad Walid, Eddy Agus Basuki, Budi Prawara, Erie Martides, Endro Juniarto (2023). “ Kajian Thermal Spray *Coating* dengan Teknologi High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) serta Perlakuan Pasca Prosesnya sebagai Pelindung *Boiler Tubes* Pembangkit Listrik Tenaga Uap” [33].

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan teknologi pelapisan Thermal Spray *Coating* (TSC) dengan metode High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) sebagai perlindungan permukaan pipa *boiler* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Fokus utamanya adalah mengevaluasi keunggulan teknologi ini dalam menghadapi lingkungan operasi bersuhu tinggi dan bersifat korosif, serta menelaah berbagai perlakuan pasca pelapisan (post-spray treatment) yang dapat meningkatkan keandalan dan performa lapisan dalam jangka panjang. Dan kesimpulan dari penelitian ini Teknologi pelapisan TSC dengan metode HVOF terbukti menjadi solusi efektif dalam melindungi permukaan logam dari korosi dan erosi, khususnya pada komponen-komponen yang bekerja pada temperatur tinggi seperti pipa *boiler* . Keunggulan teknologi ini terletak pada kekuatan daya lekat tinggi, porositas rendah, dan kemampuan untuk membentuk lapisan padat dengan ketahanan aus dan oksidasi yang baik. Performa lapisan TSC dapat lebih dioptimalkan melalui perlakuan pasca pelapisan, seperti *heat treatment*, laser *heat treatment*, maupun proses sealing. Di antara metode tersebut, sealing dengan bahan inorganik seperti $AlPO_4$ dianggap paling efektif dan efisien karena mampu menutup pori-pori lapisan dan meningkatkan ketahanan terhadap korosi suhu tinggi, tanpa kompleksitas proses yang tinggi[33].

- i. Penelitian yang dilakukan oleh Yuuzou Kawahara (2016) “ *Overview on Corrosion-Resistant Coating Technologies in Biomass/Waste-to-Energy Plants in Recent Decades* “ [34].

Penelitian ini bertujuan Pembangkitan listrik yang sangat efisien dari biomassa dan bahan bakar limbah menjadi isu penting di seluruh dunia dalam upaya mencegah pemanasan global. Namun, pada pembangkit jenis ini, kerusakan akibat korosi suhu

tinggi serta erosi-korosi pada pipa *boiler* sering terjadi. Hal ini disebabkan oleh gas-gas seperti HCl, SO_x, dan kandungan klorida yang terdapat dalam bahan bakar sebagai kontaminan. Teknologi pelapisan menjadi solusi penting untuk mengatasi kerusakan tersebut karena memiliki keunggulan dalam hal kemudahan perawatan, efisiensi biaya, dan fleksibilitas penerapan pada berbagai jenis material. Dalam kondisi *boiler* yang sangat korosif, pembentukan lapisan pelapis yang padat, homogen, dan kuat, serta terbentuknya lapisan oksida pelindung dari material tahan korosi, menjadi faktor utama untuk ketahanan jangka panjang. Selama 30 tahun terakhir, material dan metode pelapisan—baik yang dilakukan di bengkel (*shop*) maupun langsung di lokasi (*on site*)—telah berkembang pesat. Perkembangan ini didasarkan pada berbagai pengamatan lapangan dan pemahaman terhadap mekanisme kerusakan material guna memperpanjang umur operasional komponen dalam pembangkit. Saat ini, pelapisan inovatif terus dikembangkan dengan memanfaatkan teknologi presisi tinggi dan nanoteknologi. Makalah ini membahas tren terbaru dalam pengembangan dan penerapan pelapisan canggih, seperti *weld overlay*, *cladding*, pelapisan semprot termal (*thermal spray coating*) dengan 150-800 µm, dan pelapisan lumpur (*slurry coating*) pada *boiler* biomassa dan limbah. Selain itu, disajikan pula hasil evaluasi terkait mekanisme kerusakan, umur pakai pelapis, serta tantangan dan arah pengembangan pelapisan inovatif di masa mendatang[34].

- j. Penelitian yang dilakukan oleh Zengzhi Wei, Lijun Wu , and Xingyuan Liang (2022) “ *Properties of Ceramic Coating on Heating Surface of Waste Incineration Boiler Prepared by Slurry Method* “ [35].

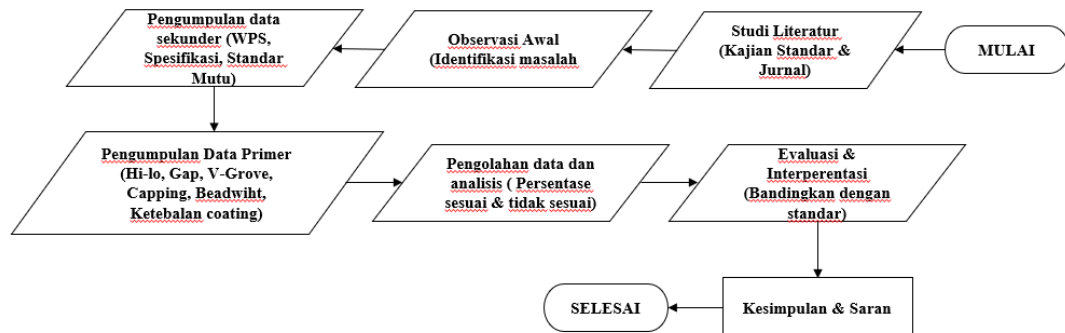
Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi pelapis keramik yang dapat diaplikasikan langsung pada permukaan pemanas *boiler* insinerator limbah dengan metode *slurry*. Tujuan utama dari penggunaan pelapis ini adalah untuk mengatasi masalah korosi dan pengotoran pada suhu tinggi yang sering terjadi akibat abu terbang dan senyawa korosif lainnya dalam proses pembakaran limbah. Fokus penelitian mencakup pembuatan pelapis pada suhu sintering rendah, analisis morfologi, sifat mekanik, serta kemampuan antiskala dan kemungkinan efek pembersihan sendiri (*self-cleaning*) dari pelapis. Dan kesimpulan dari penelitian ini Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa pelapis keramik yang dibuat dengan metode *slurry* mampu disinter pada suhu rendah 750 °C dan menghasilkan permukaan yang padat dengan porositas kurang dari 1% serta kekuatan adhesi sebesar $25,14 \pm 2,21$ MPa. Pelapis ini menunjukkan ketahanan termal yang baik, dengan hanya mengalami pengelupasan sekitar 5% setelah 60 siklus kejutan termal pada suhu 700

°C, dan kerusakan yang terjadi bersifat *cohesive* tanpa terlepas dari substrat. Selain itu, hasil uji wettability menunjukkan bahwa pelapis memiliki sifat *lyophobic* terhadap fouling cair korosif (MCF), dengan luas adhesi yang kecil dan waktu siklus pengotoran yang singkat, sehingga berpotensi memiliki efek pembersihan sendiri (*self-cleaning*). Temuan ini menunjukkan bahwa pelapis keramik tersebut memiliki performa antiskala yang unggul dan dapat diterapkan secara efektif pada permukaan pemanas *boiler* insinerator limbah. Lebih lanjut, konsep hidrofobisitas pada suhu ruang terbukti relevan dalam memahami sifat *lyophobic* pelapis pada suhu tinggi[35].

BAB III METODE PENELITIAN

1. Tahapan penelitian

Berikut merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan ketika melakukan penelitian ini, dapat dilihat pada Gambar *flow chart* di bawah ini:



Gambar 12. Diagram alir tahapan penelitian

Penejelasan *flowchart* diatas sebagai berikut

a. Studi literatur

Sebelum melakukan penelitian, dilakukan pembelajaran terhadap *retubing boiler* , *metal coating*, *ceramic coating*, dan mempelajari *boiler* CFB.

b. Identifikasi masalah

Menjelaskan masalah pada boile CFB seperti *tube leak* dan erosi

c. Pengumpulan Data Sekunder

Faktor – faktor penyebab terjadinya kebocoran pada *tube boiler* CFB

d. Pengumpulan Data Primer

Pengumpulan data lapangan seperti visual inspeksi, inspeksi thicknes, inpeksi Vgrup, inspeksi Gap, inspeksi *Hi-Lo*, Welding Inspecstion, surface profil.

e. Pengolahan Data dan Analisis

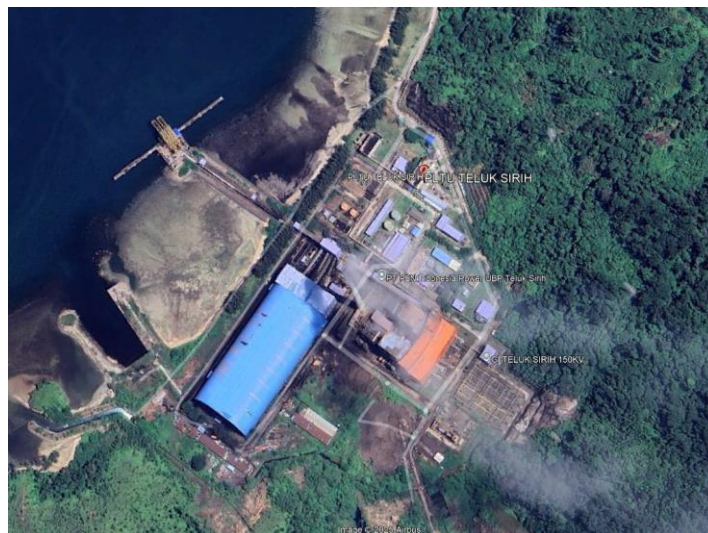
Dimana data yang diperoleh guna mendapatkan data aktual dan dilakukan Analisa data tersebut “ *Retubing, Metal Coating, Ceramic Coating* ”

f. Kesimpulan dan saran

Dari Analisa yang dilakukan diperoleh kesimpulan dan saran bahwasanya semakin teliti dan akurat pada saat proses *Retubing, Metal Coating, Ceramic Coating* maka hasil akan semakin baik dan dapat mengurangi keboran dari *tube boiler* CFB tersebut.

2. Tempat penelitian

Penelitian ini dilakukan di PLTU Teluk Sirih (2 x 112 MW) berlokasi di desa Teluk Sirih RT 01/RW 04, kelurahan Teluk Kabung Tengah, kecamatan Bungus Teluk Kabung, Kota Padang, Sumatera Barat.



Gambar 13. Tempat penelitian PLTU Teluk Sirih (2 x 112 MW)

3. Keberhasilan pengukuran

Keberhasilan pengukuran merujuk pada sejauh mana hasil pengukuran berada dalam batas toleransi yang telah ditentukan sesuai standar atau nilai yang diharapkan. Sebuah pengukuran dikatakan berhasil apabila hasilnya masuk dalam rentang nilai yang dapat diterima secara teknis.

Keberhasilan pengukuran biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase, dengan membandingkan jumlah titik pengukuran yang memenuhi standar terhadap total titik pengukuran yang dilakukan. Semakin tinggi persentasenya, semakin baik tingkat keberhasilannya.

$$\text{Keberhasilan pengukuran (\%)} = \left(\frac{\text{jumlah titik yang memenuhi standar}}{\text{jumlah total titik pengukuran}} \right) \times 100\%$$

4. Ketidaksesuaian pengukuran

Ketidaksesuaian pengukuran menunjukkan adanya deviasi antara hasil pengukuran dengan nilai spesifikasi teknis yang ditetapkan. Ketidaksesuaian terjadi apabila hasil pengukuran berada di luar batas toleransi, baik karena melebihi (over measurement) maupun kurang dari (under measurement) nilai standar.

Ketidaksesuaian bisa disebabkan oleh faktor teknis seperti ketidaktelitian pengukuran, alat ukur yang tidak dikalibrasi dengan baik, atau kesalahan prosedur. Evaluasi dilakukan dengan menghitung seberapa besar jumlah titik yang tidak sesuai terhadap total pengukuran.

$$\text{Ketidaksesuaian pengukuran (\%)} = \left(\frac{\text{jumlah titik di luar toleransi}}{\text{jumlah total titik pengukuran}} \right) \times 100\%$$

5. Ketidakpastian pengukuran

Ketidakpastian pengukuran adalah besaran atau rentang nilai yang menunjukkan seberapa jauh hasil pengukuran mungkin menyimpang dari nilai sebenarnya. Ketidakpastian ini mencerminkan tingkat kepercayaan terhadap hasil pengukuran dan mencakup faktor-faktor seperti kesalahan alat ukur, kondisi lingkungan, metode, serta operator. seperti deviasi standar dari hasil pengukuran yang dilakukan secara berulang. Tujuannya adalah untuk mengetahui seberapa besar variabilitas data pengukuran dan sejauh mana hasil tersebut dapat dipercaya.

$$\sigma = (X_{max} - X_{min})/2$$

Keterangan:

- σ = deviasi standar (ketidakpastian)
- X_{max} = nilai maksimum dari nilai pengukuran
- X_{min} = nilai minimum dari nilai pengukuran

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Alat dan bahan

a) *Tube ASTM A210/ ASME SA210.*

Tabel 5. Spesifikasi *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

Pada Tabel 5, disajikan sebagai parameter serta spesifikasi material *tube* yang digunakan dalam proses *retubing*, mencakup karakteristik teknis seperti komposisi material, ketebalan, diameter, serta ketahanan terhadap suhu dan tekanan.



Gambar 14. *Tube* baru

Sementara itu, pada gambar 14. Ditampilkan representasi visual dari material *tube* tersebut, yang memberikan Gambaran lebih jelas mengenai bentuk fisik, struktur, serta aspek geometrisnya. Penyajian data dalam bentuk tabel dan Gambar diatas bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehesif terkait dengan kualitas, ketahanan, serta kesesuaian material *tube* terhadap kondisi operasional yang akan dihadapi dalam proses *retubing*.

b) Mesin *Cutting Grinding*

Tabel 6. Spesifikasi 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

Pada tabel 6, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari mesin *cutting grinding* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, kecepatan putaran, jenis mata potong, serta pemotongan dan penggerindaan. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 15. Spesifikasi mesin *cutting grinding*[36]

Pada gambar 15 ditampilkan representasi visual dari mesin *cutting grinding* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 7 dan Gambar 16 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian mesin *cutting grinding* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

c) Mesin *Angle Grinder*

Tabel 7. Spesifikasi mesin *angle grinder*

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

Pada tabel 7, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari mesin *angle grinder* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, kecepatan putaran, jenis mata potong, serta pemotongan dan penggerindaan. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 16. Mesin angle grinder[36]

Pada gambar 16 ditampilkan representasi visual dari mesin *angle grinder* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 6 dan Gambar 17 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian mesin *angle grinder* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

d) Mesin *Beleving*

Tabel 8. Spesifikasi 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 control	Elektromik untuk pengaturan kecepatan
Fitur keamanan	Pelindung termal dan sistem anti-vibrasi
Berat	5,8 kg

Pada tabel 8, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari mesin *Beveling* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, kecepatan putaran, jenis mata potong, serta pemotongan dan penggerindaan. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 17. Mesin *beveling*

Pada gambar 18 ditampilkan representasi visual dari mesin *Beveling* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 7 dan Gambar 18 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian mesin *Beveling* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

e) *C-Clam grip*

Tabel 9. Spesifikasi *locking C-Clamp vise grip*

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 slpi
Panjang total	250-300 mm
Torsi Maksimum	320 Nm
Pegangan	Ergonomis dengan lapisan karet
Keunggulan	Operasi satu tangan, cengkraman kuat

Pada tabel 9, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Klem *Tube* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, dan pencekraman pada *tube*. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 18. *locking C-Clamp vise grip* [37]

Pada gambar 18 ditampilkan representasi visual dari Klem jepit tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 8 dan Gambar 19 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Klem Jepit terhadap kebutuhan proses *retubing*.

f) *Hi-Lo Gauge*

Tabel 10. Spesifikasi *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

Pada tabel 10, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *Hi-Lo Gauge* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti pengukuran yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 19. *Hi-lo gauge*[38]

Pada gambar 19 ditampilkan representasi visual dari *Hi-Lo Gauge* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 9 dan Gambar 20 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *Hi-Lo Gauge* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

g) *Taper Gauge*

Tabel 11. Spesifikasi *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)

Pada tabel 11, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *Taper Gauge* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti pengukuran yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 20. *Taper gauge*[38]

Pada gambar 20 ditampilkan representasi visual dari *Taper Gauge* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 10 dan Gambar 21 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *Taper Gauge* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

h) Mesin *Welding GTAW*

Tabel 12. Spesifikasi mesin *welding GTAW*

Parameter	Spesifikasi
Tegangan input	220V $\pm$ 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

Pada tabel 12, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Mesin Welding GTAW yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, kecepatan, serta pengelasan yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 21. Mesin welding GTAW

Pada gambar 21 ditampilkan representasi visual dari mesin welding GTAW tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 11 dan Gambar 22 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian mesin welding GTAW terhadap kebutuhan proses *retubing*.

i) *Consumable GTAW*

Tabel 13. Spesifikasi *consumable 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 <i>boiler</i>
Posisi las	Semua posisi

Pada tabel 13, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *Consumable GTAW* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti Ketahanan dan komposisi yang baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 22. Consumable GTAW

Pada gambar 22 ditampilkan representasi visual dari Consumable GTAW tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 12 dan Gambar 22 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *Consumable GTAW* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

j) Mesin *Welding GMAW*

Tabel 14 Spesifikasi mesin *welding GMAW*

Parameter	Spesifikasi
Tegangan input	3 fase, 380V $\pm$ 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

Pada tabel 14, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Mesin *welding GMAW* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti seperti daya, kecepatan, serta pengelasan yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 23. Mesin *welding GMAW*

Pada gambar 23 ditampilkan representasi visual dari mesin *welding GMAW* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 13 dan Gambar 24 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian mesin *welding GMAW* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

k) *Consumable GMAW*

Tabel 15. Spesifikasi *consumable 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 <i>boiler</i>
Gas pelindung	CO ₂ atau campuran Ar/CO ₂
Diameter	0,8 - 1,2 mm

Pada tabel 15, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *Consumable GMAW* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti Ketahanan dan komposisi yang baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 24. Consumable HTW-50

Pada gambar 24 ditampilkan representasi visual dari *Consumable GMAW* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 14 dan Gambar 25 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *Consumable GMAW* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

l) *Welding Gauge*

Tabel 16. Spesifikasi *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)

Pada tabel 16, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *welding Gauge* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti pengukuran yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 25. *Welding gauge*[38]

Pada gambar 25 ditampilkan representasi visual dari *welding Gauge* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 15 dan Gambar 26 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *welding Gauge* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

m) *Digital Vernier Caliper*

Tabel 17. Spesifikasi *digital vernier caliper*

Parameter	Spesifikasi
Rentang pengukuran	0 - 150 mm / 0 - 6 inci
Resolusi	0,01 mm / 0,0005 inci
Akurasi	$\pm 0,02$ 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)

Pada tabel 17, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Digital vernier Caliper yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti pengukuran yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 26. *Digital vernier caliper*[38]

Pada gambar 26 ditampilkan representasi visual dari Digital vernier Caliper tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 16 dan Gambar 27 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Digital vernier Caliper terhadap kebutuhan proses *retubing*.

n) Mesin *Sandblasting*

Tabel 18. Spesifikasi 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

Pada tabel 18, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Mesin *Sandblasting* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti seperti daya, kecepatan, serta penyemprotan yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 27. Mesin *sandblasting* [39]

Pada gambar 27 ditampilkan representasi visual dari Mesin *Sandblasting* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 17 dan Gambar 28 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Mesin *Sandblasting* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

o) *Elcometer 124*

Tabel 19. Spesifikasi *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

Pada tabel 19 disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Elcometer 124 yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek pengukuran yang lebih baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 28 Elcometer 124

Pada gambar 28 ditampilkan representasi visual dari Elcometer 124 tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 18 dan Gambar 29 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Elcometer 124 terhadap kebutuhan proses *retubing*.

p) *Replica Tape*

Tabel 20. Spesifikasi *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)

Pada tabel 20, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Replica Tape yang digunakan dalam proses *retubing*, pengukuran yang lebih baik dan detail. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 29. *Replica tape*

Pada gambar 29 ditampilkan representasi visual dari Replica Tape tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 19 dan Gambar 30 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Replica Tape terhadap kebutuhan proses *retubing*.

q) *Consumable Sandblasting*

Tabel 21. Spesifikasi *consumable 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 <i>coating</i> , dan penghilangan karat
Standar	Memenuhi ISO 11126-7 dan SSPC-AB 1

Pada tabel 21, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *Consumable Sandblasting* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti Ketahanan dan komposisi yang baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 30. Consumable *sandblasting*

Pada gambar 30 ditampilkan representasi visual dari *Consumable Sandblasting* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 20 dan Gambar 31 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *Consumable Sandblasting* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

r) Mesin *Metal Coating*

Tabel 22. Spesifikasi 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

Pada tabel 22, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Mesin *Metal Coating* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, kecepatan putaran, jenis mata potong, serta pemotongan dan penggerindaan. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 31. Mesin *metal coating*

Pada gambar 31 ditampilkan representasi visual dari Mesin *Metal Coating* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 22 dan Gambar 32 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Mesin *Metal Coating* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

s) *Consumable Metal Coating*

Tabel 23. Spesifikasi *consumable 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, <i>boiler tubes</i> , dan vessel yang terpapar lingkungan korosif

Pada tabel 23, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Consumable Metal Coating yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti Ketahanan dan komposisi yang baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 32. Consumable metal coating

Pada gambar 32 ditampilkan representasi visual dari Consumable Metal Coating tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 22 dan Gambar 34 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Consumable Metal Coating terhadap kebutuhan proses *retubing*.

t) *Elcometer 456*

Tabel 24. Spesifikasi *elcometer 456*

Parameter	Spesifikasi
Tipe	Elcometer 456
Rentang Pengukuran	0-1500 μm
Akurasi	$\pm 1\%$ atau $\pm 1 \mu\text{m}$
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

Pada tabel 24, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari Elcometer 456 yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti daya, kecepatan putaran, jenis mata potong, serta pemotongan dan penggerindaan. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 33. Elcometer 456

Pada gambar 33 ditampilkan representasi visual dari Elcometer 456 tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 23 dan Gambar 34 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian Elcometer 456 terhadap kebutuhan proses *retubing*.

u) *Consumable Ceramic Coating*

Tabel 25. Spesifikasi *consumable ceramic coating*

Parameter	Spesifikasi
Merk dan Tipe	Emisshield M-1 <i>Metal</i> Lot # M-1240529A
Basis Material	<i>Ceramic</i> 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

Pada tabel 25, disajikan sebagai parameter dan spesifikasi teknis dari *consumable ceramic coating* yang digunakan dalam proses *retubing*, aspek seperti Ketahanan dan komposisi yang baik. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kemampuan serta perapian material *tube*.



Gambar 34. *Consumable ceramic coating*

Pada gambar 34 ditampilkan representasi visual dari *consumable ceramic coating* tersebut, sehingga memungkinkan pengamatan lebih jelas terhadap desain, struktur, yang berperan dalam mekanisme kerja alat. Penyajian data dalam tabel 24 dan Gambar 35 bertujuan untuk memberikan Gambaran komprehensif mengenai karakteristik, serta kesesuaian *Consumable Ceramic Coating* terhadap kebutuhan proses *retubing*.

2. Proses dan hasil data pengukuran *retubing*

a) Proses *cutting tube exiting*

Tahap utama dalam proses *retubing* dilakukang dengan cara pemotongan *tube* lama yang telah mengalami kerusakan material dan penurunan performa. Indentifikasi *tube* yang perlu diganti dilakukan berdasarkan hasil inspeksi menggunakan metode non-deskruktif (NDT) seperti ultrasonic thickness gauging dan radiographic testing. Inpeksi ini menunjukkan untuk mendeteksi adanya korosi, penipisan dinding akibat erosi, kebocoran, atau penurunan efisiensi perpindahan panas.



Gambar 35. *Cutting tube exiting*

Pada gambar 35 proses *Cutting Tube Exiting* dilakukan menggunakan mesin potong berteknologi tinggi yang presisi guna memastikan akurasi pemotongan dan menghindari kerusakan pada header serta komponen pendukung lainnya. Selama proses ini, parameter-parameter seperti kecepatan potong, kedalaman, serta teknik pemotongan dicatat dan dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas metode yang digunakan.

b) Fabrikasi *tube* baru

Setelah *tube* lama dilepaskan, fabrikasi *tube* pengganti dilakukan dengan pemilihan material yang sesuai material dengan standar operasional PLTU. Material *tube* yang digunakan yaitu ASTM A210/ASME SA210 yang memiliki ketahanan tinggi terhadap temperatur dan tekanan ekstrem. Proses fabrikasi meliputi:



Gambar 36. *Cutting tube baru*

Pada gambar 36 pemotongan material menggunakan gerinda duduk dengan toleransi $\pm 0,5$ mm untuk memastikan kesesuaian dimensi.



Gambar 37. *Beveling*

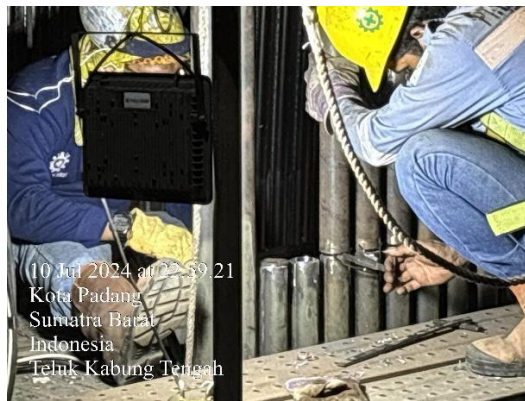
Pada gambar 37 proses pembentukan ujung dengan metode beveling menggunakan *Joint angle* 30° sesuai dokumen *Welding Prosedure Specification* (WPS), guna memastikan penetrasi las yang optimal.



Gambar 38. *Baby grinding*

Pada gambar 38 proses pembersihan permukaan dengan metode baby grinding guna menghilangkan partikel yang dapat mempengaruhi kualitas pengelasan. Setelah fabrikasi selesai, dilakukan proses inspeksi metaerial dengan proses *Fit-up tube* yang meliputi pengukuran *Hi-Lo* dan pengukuran *gap*. Kedua parameter tersebut merupakan parameter krusial dalam menentukan kualitas dan penempatan antara komponen yang akan dipadukan dalam proses penyambungan.

c) *Fit-Up Tube*



Gambar 39. Proses fit-up tube

Pada gambar 39 proses *Fit-Up Tube* Merupakan tahapan kritis dalam pabriaksi yang bertujuan untuk memastikan keselarasan antara *tube* yang disambung. Prosedur ini mencakup pengukuran *hi-Lo* (perbedaan ketinggian) dan *gap* (celah) anantara kedua *tube* yang akan disambungkan, untuk penggunaan alat ukur presisi untuk memverifikasi bahwa parameter-parameter tersebut berada dalam batas toleransi yang diizinkan sesuai standar berlaku. Dalam proses *Fit-Up tube* ini sangat menentukan kualiotas sambungan las yang dihasilkan dan mencegah terjadinya cacat pengelasan seperti contoh incomplete fusion atau misalignment yang dapat turunya intergritas struktur secara keseluruhan.

- Pengukuran *Hi-Lo* (perbedaan ketinggian permukaan)



Gambar 40. Proses pengukuran *hi-lo*

Pada gambar 40 proses *hi-lo* merupakan perbedaan ketinggian antara dua ujung *tube* yang akan di las, pengukuran ini dilakukan dengan alat ukur presisi untuk memastikan deviasi tidak melebihi batas toleransi yang ditetapkan dalam standar *ASME*.

- Pengukuran *Tack Welding*



Gambar 41. Proses tack welding

Pada gambar 41 proses pengelasan dimulai dengan *tack welding*, yaitu proses perekatan yang bertujuan untuk menjaga kestabilan posisi *tube* sebelum dilakukan pengelasan penuh. *Tack welding* dilakukan guna menghindari pergeseran atau distorsi selama tahap penyambungan utama. Selama proses ini, dilakukan verifikasi awal terhadap parameter geometris, seperti pengukuran *hi-lo* (perbedaan ketinggian permukaan *tube*) dan pengukuran *gap* (celah antara *tube*). parameter ini dikontrol ketat agar tetap berada dalam batas toleransi yang telah ditentukan dalam standar pengelasan yang berlaku, seperti *ASME Section IX* atau standar lain yang relevan.

- Pengukuran *Gap* (celah sambungan)



Gambar 42. Proses Pengukuran GAP

Pada gambar 42 *gap* merupakan celah *tube* yang diukur untuk memastikan penetrasi las yang optimal dan mencegah cacat seperti *incomplete fusion*, pengukuran dilakukan sebelum *tack welding* terlihat di Gambar 41 untuk menghindari pergeseran selama proses pengelasan.

d) *Welding Tube*



Gambar 43. Proses Welding *Tube* GTAW

Pada gambar 43 proses pengelasan merupakan tahapan krusial dalam kegiatan *retubing*, dimana kualitas dan keandalan sambungan sangat menentukan performa serta umur layanan dari sistem *Tube* pada *boiler*. Pada metode pengelasan ini menggunakan metode pengelasan yang digunakan yaitu metode *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan mesin las *Jasic TIG200P*, serta menggunakan elektroda tipe *CHG-56 Atlantic* yang memiliki karakteristik stabilitas busur yang tinggi serta penetrasi yang optimal. Pemilihan

metode GTAW didasarkan pada kemampuan menghasilkan sambungan dengan kualitas tinggi, minim percikan (*spatter*), serta kontrol presisi terhadap parameter pengelasan.

Setelah *tack welding* selesai dan memenuhi standar spesifikasi, proses pengelasan dilanjutkan dengan *Root pass*. Tahapan *root pass* bertujuan untuk membentuk akat sambungan las yang kuat dan homogen. *Root pass* juga berperan dalam memastikan penetrasi las yang optimal sehingga menghasilkan ikatan yang kokoh antara material *tube* yang disambungkan.

Setelah *root pass*, proses pengelasan berlanjut ketahapan *hot pass*, yang berfungsi untuk memperbaiki serta menyempurnakan penetrasi las pada lapisan akar yang telah dibuat sebelumnya. *Hot pass* membantu dalam menghilangkan oksida yang mungkin terbentuk selama proses *root pass*, sekaligus memastikan pengisian celah dengan logam las yang lebih padat dan bebas dari cacat seperti *slag inclusion*.

Langkah berikutnya setelah *Hot pass*, *Fill pass* Dimana sambungan las mulai diisi dengan logam tambahan hingga mencapai tinggian yang hampir mendekati permukaan *tube* asli. pengelasan pada tahap ini dilakukan secara bertahap dengan mengatur parameter arus listrik (*Amperage*), Tegangan (*Voltage*), serta kecepatan pengelasan agar diperoleh lapisan yang seragam dan bebas cacat.

Tahapan terakhir yaitu *capping*, yaitu proses pelapisan terakhir yang bertujuan untuk memberikan perlindungan tambahan pada sambungan las sekaligus meningkatkan estetika serta integritas mekanik sambungan. *Capping* harus dilakukan dengan pola pengelasan yang konsisten dan tumpang tindih yang merata guna memastikan hasil akhir yang optimal.

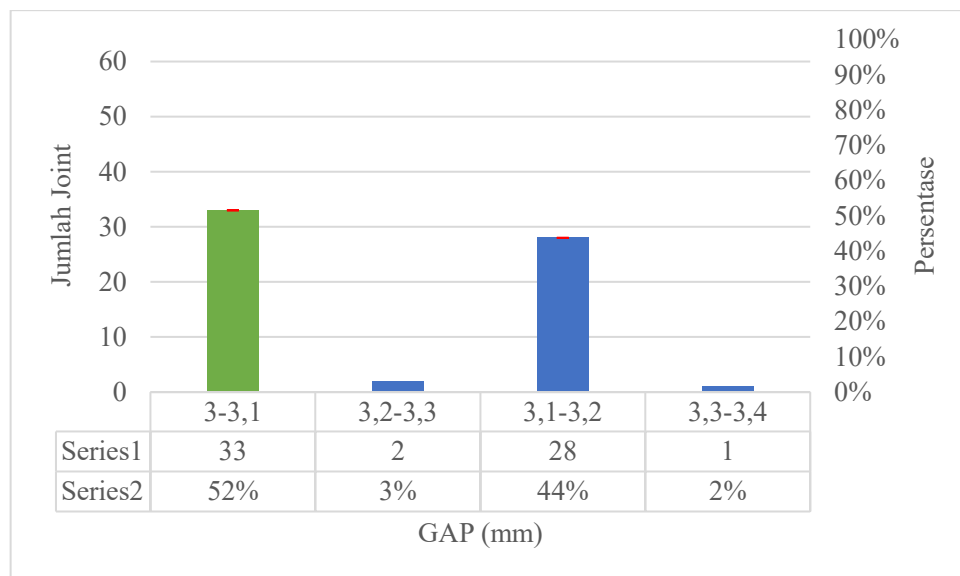
e) Hasil Data *Retubing*

Berikut ini merupakan data hasil *retubing* sambungan *tube*, yang menunjukkan jumlah total sambungan *tube* yang memenuhi ketentuan sesuai dengan dokumen *Welding Prosedure Specification (WPS)* Yang berada di dokumen pengadaan serta jumlah sambungan yang tidak memenuhi ketentuan sesuai dengan dokumen tersebut, berikut data hasil *Retubing* tabel 25, dan grafik pada Gambar 45,46,47,48,49

Tabel 26. Tabel hasil data *retubing*

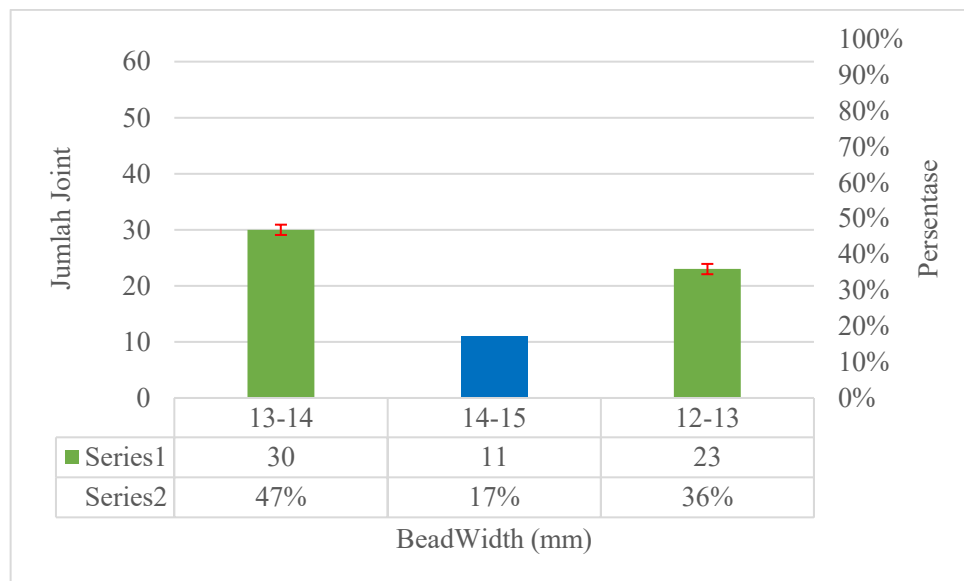
GAP (mm)	Deviasi	Joint Angle		Deviasi	HI-LO (mm)					CAPPING (mm)	Deviasi	BEAD WIDTH (mm)	Deviasi
		A	B		0°	90°	180°	270°	Deviasi				
3.2	0.000	31°	30°	0.71	1	1	2.6	1	0.80	1	0.14	13.8	0.92
3.2		29°	30°	0.71	0.9	1.5	1	2	0.51	1.2		12.5	
3	0.000	30°	30°	0.00	0.7	1	1.5	2.6	0.83	2.6	0.14	12.5	0.92
3		30°	30°	0.00	1	1.3	1.9	2	0.48	2.4		13.8	
3.2	0.141	31°	30°	0.71	2	2	0.8	2.9	0.86	1	0.42	14	1.06
3		31°	30°	0.71	1.5	1	0.9	2	0.51	1.6		12.5	
3.2	0.141	30°	30°	0.00	0.6	1.3	2	1	0.59	1.3	0.42	13.5	0.49
3		30°	30°	0.00	0.9	0.9	0.9	1.6	0.35	1.9		12.8	
3	0.141	28°	30°	1.41	1.6	2.6	1	1.8	0.66	1	1.06	13.9	0.21
3.2		30°	30°	0.00	1.5	1.5	2.5	1	0.63	2.5		14.2	

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)

Gambar 44. Grafik *GAP*

Gambar 44, Pekerjaan penyambungan pipa pada sisi kiri *boiler tipe circulating fluidized bed* (CFB) di PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menuntut ketepatan dalam setiap tahap pengelasan, termasuk dalam pengaturan gap atau jarak antar ujung pipa sebelum dilakukan proses pengelasan. Parameter ini sangat penting karena mempengaruhi penetrasi las, kontrol celah fusi, serta kemungkinan munculnya cacat seperti incomplete fusion dan lack of penetration. Pengukuran gap dilakukan pada 64 sambungan pipa, menggunakan alat ukur taper gauge yang telah dikalibrasi, sesuai dengan ketentuan dalam dokumen pengadaan proyek. Rentang celah sambungan yang disarankan umumnya berada pada 3,0 mm, untuk memastikan konsistensi pembentukan akar las (root pass) yang optimal. Hasil pengukuran, sebagaimana ditampilkan dalam grafik, sebanyak 33 join (52%) yang sesuai dengan dokumen pengadaan, dan yang tidak sesuai memiliki 31 (43%). Namun demikian, hasil pengukuran menunjukkan adanya tingkat ketidakpastian sebesar 6%, yang dapat

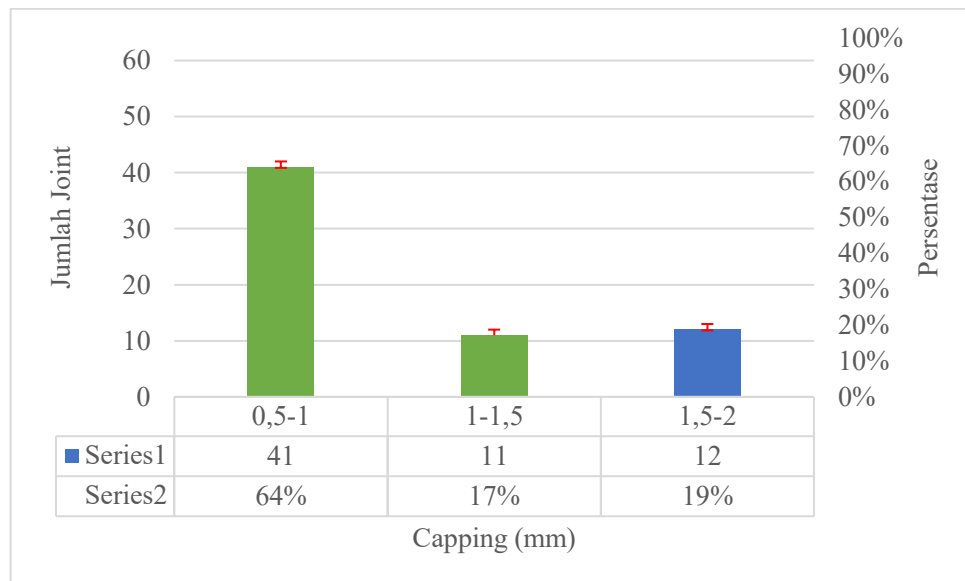
disebabkan oleh variabilitas pengukuran manual, penekanan pipa yang tidak merata saat *fit-up*, atau penyimpangan dimensi ujung pipa. Jika tidak dikendalikan, variasi *root gap* ini berpotensi menimbulkan inkonsistensi penetrasi las, porositas, serta retak akibat tegangan konsentrasi. Oleh karena itu, diperlukan pengawasan ketat dengan standar yang mengacu pada *welding procedure specification* (WPS), serta penggunaan *tapper gauge* yang akurat untuk memastikan celah tetap sesuai spesifikasi selama proses *fit-up*.



Gambar 45. Grafik *bead width*

Pada Gambar 45, Pekerjaan penyambungan pipa pada sisi kiri *boiler* tipe circulating fluidized bed (CFB) di PLTU 2×112 MW Teluk Sirih merupakan bagian penting dalam sistem perpipaan tekanan tinggi, yang membutuhkan kualitas sambungan las yang optimal. Salah satu parameter yang dievaluasi adalah *bead width* (lebar jalur las), karena dimensi ini berperan dalam distribusi panas, kekuatan sambungan, dan pengendalian deformasi selama proses pengelasan. Pengukuran lebar las dilakukan pada 64 sambungan pipa menggunakan jangka sorong digital yang telah dikalibrasi, sesuai dengan prosedur dalam dokumen pengadaan proyek dan standar teknik dari ASME Section XI. Meskipun standar ini tidak menentukan secara eksplisit nilai *bead width*, penyimpangan lebar yang terlalu besar dari batas desain dapat berpengaruh negatif terhadap integritas sambungan. Oleh karena itu, rentang *bead width* 10–13 mm secara umum masih dapat diterima untuk aplikasi tekanan tinggi. Hasil pengukuran, sebagaimana ditampilkan dalam grafik, sebanyak 53 join (83%) yang sesuai dengan *ASME section XI*, dan yang tidak sesuai memiliki 11 (17%). Seluruh nilai masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima, namun analisis ini

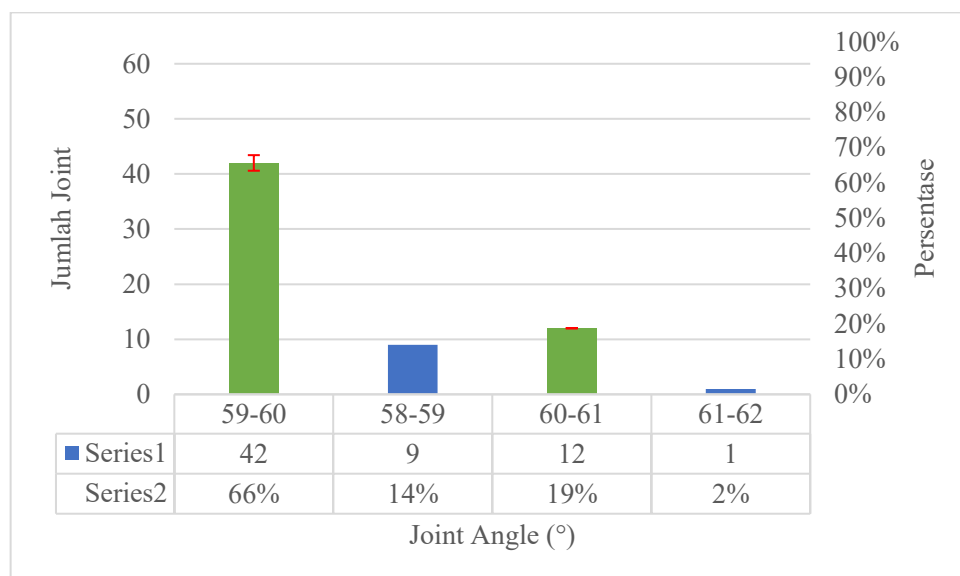
menunjukkan adanya tingkat ketidakpastian sebesar 11% terhadap konsistensi lebar las. Ketidakpastian ini kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor seperti kecepatan pengelasan yang tidak seragam, fluktuasi parameter las (ampere/volt), serta perbedaan keterampilan antar juru las. Bead width yang tidak konsisten dapat memicu ketidakseimbangan distribusi panas, distorsi sambungan, atau retak akibat tegangan sisa, yang berisiko mengganggu keandalan sistem jangka panjang. Oleh karena itu, pengendalian kualitas melalui standarisasi teknik pengelasan, pelatihan personel, serta penggunaan alat ukur digital yang presisi perlu dijaga untuk memastikan bahwa sambungan memenuhi persyaratan dari ASME Section XI.



Gambar 46. Grafik *capping*

Pada Gambar 46, Pekerjaan penyambungan pipa pada sisi kiri *boiler* tipe circulating fluidized bed (CFB) di PLTU 2×112 MW Teluk Sirih merupakan salah satu aspek kritis dalam sistem perpipaan, mengingat komponen ini beroperasi dalam kondisi tekanan dan suhu tinggi. Salah satu parameter penting yang turut dievaluasi dalam pengujian visual dan dimensi adalah ketebalan capping atau tinggi permukaan las penutup. Parameter ini berperan penting dalam menentukan kekuatan sambungan, kehalusan profil las, serta meminimalkan potensi cacat akibat tegangan sisa. Pengukuran capping dilakukan pada 64 joint tube menggunakan welding gauge yang telah dikalibrasi, mengacu pada prosedur dalam dokumen pengadaan proyek dan Welding Procedure Specification (WPS) yang menetapkan batas toleransi maksimal sebesar 3 mm. Hasil pengukuran, sebagaimana ditampilkan dalam grafik, sebanyak 52 join (81%) yang sesuai dengan dokumen pengadaan, dan yang tidak sesuai memiliki 12 (19%). Seluruh hasil pengukuran masih berada dalam batas toleransi yang ditetapkan oleh WPS. Namun, terdapat tingkat

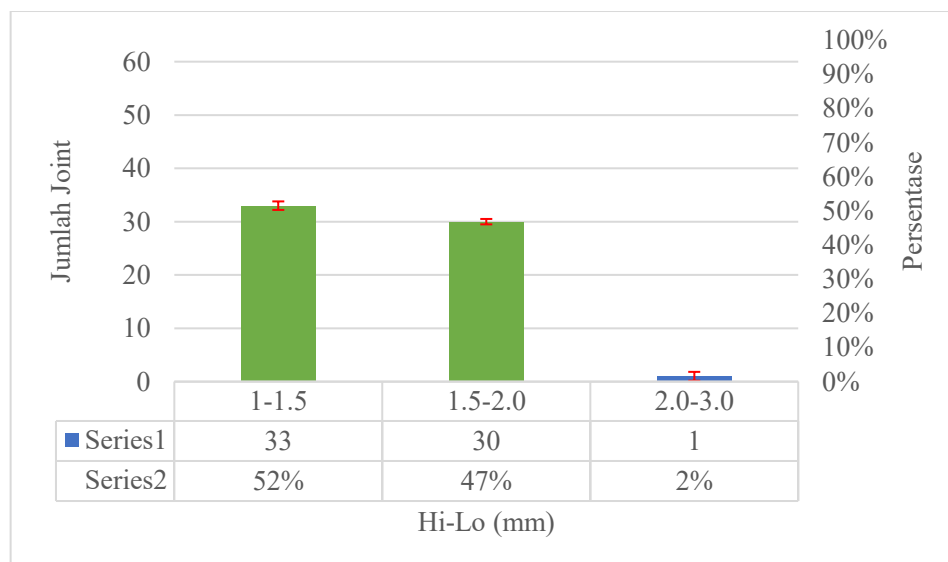
ketidakpastian sebesar 14% terhadap konsistensi kualitas sambungan capping. Ketidakpastian ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti variasi keterampilan welder, fluktuasi arus listrik selama proses pengelasan, serta potensi perbedaan dalam teknik pengisian logam las. Ketebalan capping yang terlalu tinggi dapat menimbulkan undercut, porositas, atau tegangan sisa berlebih, sementara capping yang terlalu tipis dapat menyebabkan kurangnya fusi atau ketidakterpenuhinya pengisian las secara optimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya peningkatan kualitas melalui standarisasi teknik pengelasan, kalibrasi peralatan secara berkala, serta penerapan inspeksi berkala guna menjamin bahwa sambungan pipa memenuhi standar mutu dan keselamatan yang berlaku dalam lingkungan *boiler*.



Gambar 47. Grafik *joint angle*

Pada Gambar 47, Pekerjaan penyambungan pipa pada sisi kiri *boiler* tipe *circulating fluidized bed* (CFB) di PLTU 2×112 MW Teluk Sirih merupakan salah satu aspek vital dalam sistem perpipaan, karena komponen ini beroperasi di lingkungan dengan tekanan dan suhu tinggi. Selain parameter HI-LO, salah satu aspek penting yang turut dievaluasi adalah sudut sambungan pipa (Joint Angle). Parameter ini berperan dalam menentukan kualitas bevel, kelancaran penetrasi logam las, serta simetri fusi antar logam dasar selama proses pengelasan. Pengukuran sudut sambungan dilakukan menggunakan alat ukur welding gauge sesuai dengan ketentuan dalam dokumen pengadaan proyek dan Welding Procedure Specification (WPS) yang berlaku. Akurasi sudut sambungan sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proses las, karena sudut yang tidak sesuai dapat menyebabkan cacat seperti lack of fusion atau porositas, yang berdampak negatif terhadap integritas sambungan jangka panjang. Pengukuran dilakukan pada 64 joint tube dengan

menggunakan alat ukur welding gauge. Berdasarkan standar keteknikan yang berlaku dan praktik terbaik dalam industri perpipaan, sudut ideal sambungan biasanya berada pada 60° untuk memastikan hasil pengelasan yang optimal. Hasil pengukuran sudut sambungan ditampilkan dalam grafik, 54 join (85%) yang sesuai dengan dokumen pengadaan (WPS) dan yang tidak sesuai 10 join (15%). Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat tingkat ketidakpastian sebesar 7% terhadap pencapaian kualitas sambungan yang sesuai standar. Ketidaksesuaian tersebut kemungkinan besar dipengaruhi oleh variasi pemotongan bevel ujung pipa, kesalahan saat fit-up, serta ketidakkonsistenan dalam penggunaan welding gauge saat pemeriksaan sudut. Faktor-faktor ini, apabila tidak dikendalikan dengan baik, dapat memengaruhi integritas struktural sambungan, serta menimbulkan cacat las seperti incomplete fusion atau misalignment.



Gambar 48. Grafik *hi-lo*

Pada Gambar 48, Pekerjaan penyambungan pipa pada sisi kiri *boiler* tipe *circulating fluidized bed* (CFB) di PLTU 2×112 MW Teluk Sirih merupakan salah satu aspek kritis dalam sistem perpipaan karena komponen ini beroperasi dalam lingkungan dengan suhu dan tekanan tinggi. Salah satu parameter penting yang dievaluasi untuk menjamin kualitas sambungan adalah nilai HI-LO (High-Low mismatch), yaitu ketidakselarasan permukaan antara dua ujung pipa pada saat proses fit-up. Ketidaksesuaian ini dapat menyebabkan tegangan lokal berlebih, cacat las, serta menurunkan umur pakai sambungan secara signifikan. Pengukuran nilai HI-LO dilakukan pada 64 joint tube, menggunakan alat ukur Hi-Lo Gauge yang telah dikalibrasi, dengan mengacu pada standar teknik dari ASME Section XI, yang menetapkan batas toleransi maksimum sebesar 1,5 mm untuk sambungan pipa bertekanan tinggi. Berdasarkan hasil pengukuran yang direpresentasikan dalam

bentuk grafik diperoleh 33 join (52%) dan 30 join (47%) dan yang tidak sesuai standar 1 join (2%). hasil ini menunjukkan bahwa terdapat tingkat ketidakpastian sebesar 17% terhadap pencapaian kualitas sambungan yang sesuai standar. Ketidaksesuaian ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor, seperti ketidaktepatan dalam proses penjajaran pipa (fit-up), variasi dimensi ujung pipa, atau kesalahan penggunaan alat ukur HI-LO Gauge. Akumulasi dari faktor-faktor tersebut berpotensi menimbulkan cacat las seperti incomplete fusion, undercut, atau bahkan retak akibat tegangan sisa setelah pengelasan.

3. Proses dan hasil data *metal coating*

a) Persiapan Spesimen

Sebelum melakukan proses pelapisan *metal coating*, permukaan spesimen dibersihkan secara menyeluruh dari kotoran dan oksidasi. Proses ini sangat penting untuk memperpanjang umur komponen, khususnya yang digunakan dalam kondisi ekstrem, seperti dilingkungan paparan suhu tinggi atau zat kimia korosif, proses pembersihan dilakukan melalui metode *grit Blasting* menggunakan aluminium oksida berukuran 18-24 mesh untuk menghilangkan kontaminasi pada permukaan dan meningkatkan kekasaran guna mendukung adhesi optimal. *Comsumble grit blasting* pada Gambar 49.



Gambar 49. *Comsumble grit blasting*

b) Proses *Sand Blasting*



Gambar 50. Proses *sanblasting*

Pada gambar 50 dilakukan proses *Sand Blasting* yang bertujuan untuk menciptakan profil kekasaran optimal pada permukaan spesimen. Tekanan udara yang digunakan selama proses ini berkisar 75-80 psi, dengan jarak penyemprotan 10-15 cm (6-8 inc) dari permukaan spesimen. Proses *sand blasnting* menghasilkan permukaan dengan tingkat kekasaran dalam rentang 50-100 μm , yang sesuai dengan standar industri untuk aplikasi pelapisan logam, sekaligus memberikan ketahanan mekanis yang baik. Dan *Comsumble Sand Blasting* pada Gambar 51.



Gambar 51. *Comsumble sandblasting*

c) Proses *Metal Coating (Thermal Arc Spray Coating)*



Gambar 52. Proses *metal coating*

Pada gambar 52 proses *metal coating* setelah proses *sand blasting*, spesimen dilapisi dengan metode Twin Wire Arc Spray (TWAS). Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan lapisan pelindung yang homogen, memiliki daya rekat tinggi terhadap substrat, serta mampu memberikan ketahanan terhadap korosi dan abrasi. Material yang digunakan dalam proses ini yaitu dengan kawat inti dengan komposisi Ni-Cr-B-Si-Mau, yang memiliki sifat ketahanan tinggi terhadap faktor-faktor degradasi lingkungan. Pemilihan material ini disesuaikan dengan aplikasi spesifik spesimen agar mampu bertahan dalam kondisi operasional yang ekstrem. Dan *Consumable Metal Coating* pada Gambar 53 dan tabel 27.



Gambar 53. *Consumable Metal Coating*

Tabel 27. Parameter *Metal Coating*

Parameter	Satuan	Nilai
Diameter Kawat	inch / mm	1/16" (1.6 mm)
Tegangan (Voltage)	V	30-32
Arus (Amperage)	A	175-250
Tekanan Udara	psi	75-80
Jarak Penyemprotan	inci/cm	6-8 inci (10–15 cm)

Pada gambar 53 dan tabel 27 lapisan yang dihasilkan mempunyai ketahanan yang sangat baik karena pembentukan fase keras dalam *matriks nikel* korosif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa lapisan memiliki kekuatan ikat (*bond strength*) sebesar 10.200 psi, dengan Tingkat kekerasan 65-68 HRC. Efisiensi deposisi pelapisan mencapai <80%, sementara laju deposisi adalah 10 lbs/jam/100 ampere, sehingga memastikan ketebalan lapisan yang seragam dan sesuai dengan standar.

d) Hasil Data *Metal Coating (Thermal Arc Spray Coating)*

Data hasil pelapisan logam (*metal coating*) dianalisis untuk menilai kesesuaian proses terhadap spesifikasi teknis yang tercantum dalam dokumen pengadaan proyek. Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh tahapan pelapisan telah dilaksanakan sesuai dengan standar mutu yang telah ditetapkan, sehingga mampu menjamin kinerja optimal dari sistem perpipaan pada *boiler circulating fluidized bed* (CFB). Data yang disajikan mencakup jumlah total sambungan tube yang telah melalui proses pelapisan, serta parameter teknis dari hasil akhir pelapisan tersebut. Pelapisan logam dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter teknis utama, yang dirancang untuk memberikan perlindungan maksimal terhadap abrasi, korosi, dan suhu tinggi. Ketebalan lapisan berada dalam rentang 600–700 mikron, memastikan perlindungan yang memadai tanpa mengganggu efisiensi perpindahan panas pada dinding pipa. Kekerasan mikro (*microhardness*) lapisan berkisar antara 863 hingga 1300 HV, menunjukkan tingkat ketahanan aus yang sangat tinggi terhadap gesekan dan partikel abrasif. Selain itu, kekuatan ikat minimum sebesar 9.500 psi menunjukkan adanya adhesi yang kuat antara lapisan pelindung dan substrat logam, yang krusial untuk mencegah kegagalan pelapisan seperti delaminasi selama masa operasi. Lapisan ini juga memiliki kemampuan untuk tetap stabil pada suhu operasi antara 850 hingga 1100 °C, sehingga mampu menjaga integritas strukturalnya di bawah kondisi pembakaran ekstrem yang lazim terjadi dalam *furnace boiler* CFB.

Tabel 28. Pengukuran ketebalan *metal coating* elevasi 16-18

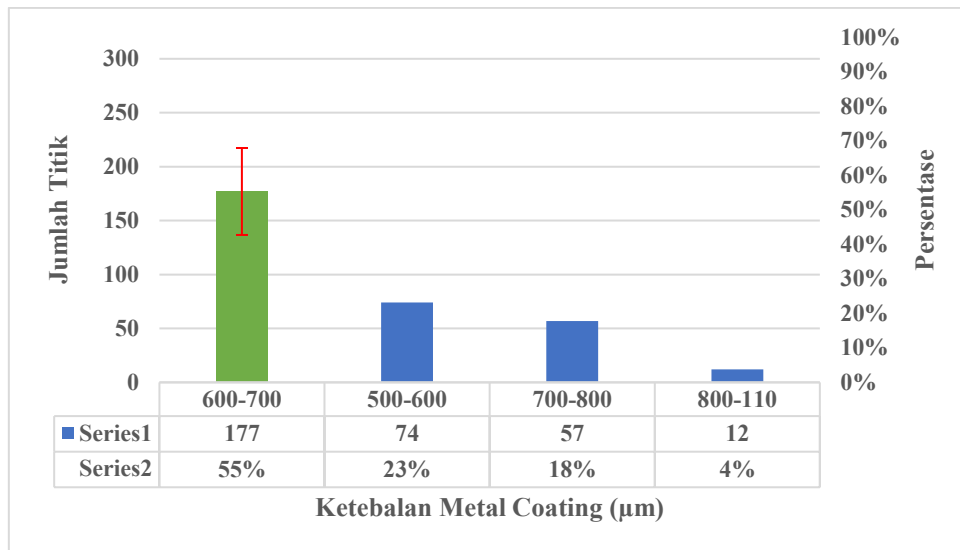
Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	882	827	174.9
	B	831		
	C	1006		
	D	589		
2	A	784	688	86.5
	B	730		
	C	588		
	D	650		
3	A	650	725	186.9
	B	1004		
	C	635		
	D	610		
4	A	660	747	190.2
	B	690		
	C	1028		
	D	610		
5	A	737	668	68.3
	B	604		
	C	715		
	D	614		
6	A	698	697	86.9
	B	817		
	C	658		
	D	615		
7	A	780	688	71.4
	B	610		
	C	663		
	D	698		
8	A	612	675	60.9
	B	669		
	C	758		
	D	660		
9	A	638	627	12.4
	B	634		
	C	610		
	D	625		
10	A	700	669	42.0
	B	669		
	C	610		
	D	698		

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)

Tabel 29 Pengukuran ketebalan *metal coating* elevasi 23-25

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	554	564	18.84
	B	546		
	C	568		
	D	589		
2	A	558	625	51.52
	B	610		
	C	670		
	D	660		
3	A	604	582	14.71
	B	578		
	C	572		
	D	575		
4	A	550	551	3.77
	B	546		
	C	552		
	D	555		
5	A	600	574	18.93
	B	558		
	C	574		
	D	562		
6	A	594	550	31.85
	B	550		
	C	522		
	D	532		
7	A	528	541	13.74
	B	542		
	C	560		
	D	535		
8	A	540	553	27.25
	B	592		
	C	530		
	D	550		
9	A	578	590	38.62
	B	636		
	C	544		
	D	600		
10	A	556	596	27.83
	B	614		
	C	616		
	D	596		

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)



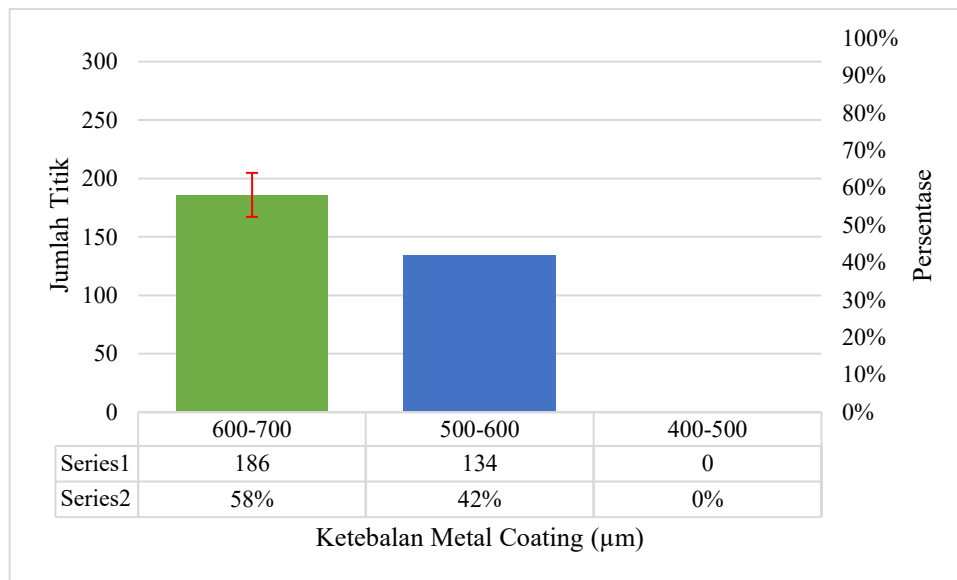
Gambar 54. Grafik *metal coating* elevasi 16-18

Pada gambar 54, Pekerjaan metal coating pada sisi kiri *boiler* CFB PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menggunakan material thermal spray wire tipe DM Chemshield-B TWAS dengan metode *Twin Wire Arc Spray* (TWAS). Sesuai dokumen pengadaan dan WPS, standar ketebalan pelapisan yang ditetapkan adalah 600–700 mikron. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk meningkatkan ketahanan korosi dan abrasi pada pipa *boiler* yang bekerja dalam suhu tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran pada 320 titik, diketahui bahwa sebanyak 234 titik (73%) memenuhi ketebalan sesuai standar, sedangkan 86 titik (27%) berada di luar batas yang ditentukan, yang menunjukkan sebagian besar area pelapisan sudah mendekati target, namun masih terdapat ketidakkonsistenan kualitas.

Meskipun secara umum proses pelapisan logam menunjukkan tren yang positif dalam memenuhi spesifikasi teknis, nilai ketidakpastian pengukuran yang masih tinggi, yaitu sebesar 40%, mengindikasikan perlunya perbaikan dalam pengendalian proses dan sistem pengawasan mutu. Ketidakpastian ini mencerminkan variabilitas hasil pengukuran ketebalan pelapisan yang cukup signifikan, sehingga dapat memengaruhi validitas evaluasi kualitas. Beberapa faktor utama yang menyebabkan tingginya ketidakpastian antara lain adalah keterbatasan alat ukur, seperti *Elcometer*, yang meskipun memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetap dapat mengalami deviasi akibat variasi kecil pada permukaan lapisan. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan tinggi di dalam area *boiler* CFB turut memengaruhi akurasi pembacaan alat ukur. Tidak kalah penting, kesalahan manusia (*human error*) dalam membaca data atau menempatkan alat ukur secara tidak presisi juga menjadi penyebab meningkatnya ketidakpastian. Dengan nilai

ketidakpastian sebesar ini, meskipun sebagian besar hasil pengukuran masih berada dalam rentang standar, keberagaman nilai pada titik-titik tertentu yang berada di luar toleransi perlu menjadi perhatian serius. Oleh karena itu, perbaikan menyeluruh terhadap prosedur pengukuran sangat disarankan, termasuk peningkatan pelatihan operator, pengulangan pengukuran untuk mengurangi deviasi data, serta pelaksanaan kalibrasi alat ukur secara berkala guna meningkatkan akurasi dan konsistensi pengukuran di lapangan.



Gambar 55. Grafik *metal coating* elevasi 23-25

Pada gambar 55, Pekerjaan metal coating pada sisi kiri *boiler* CFB PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menggunakan material thermal spray wire tipe DM *Chemshield-B* TWAS dengan metode *Twin Wire Arc Spray* (TWAS). Sesuai dokumen pengadaan dan WPS, standar ketebalan pelapisan yang ditetapkan adalah 600–700 mikron. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk meningkatkan ketahanan korosi dan abrasi pada pipa *boiler* yang bekerja dalam suhu tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran pada 320 titik, diketahui bahwa sebanyak 186 titik (58%) memenuhi ketebalan sesuai standar, sedangkan 134 titik (42%) berada di luar batas yang ditentukan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar area pelapisan telah berada dalam target spesifikasi, namun masih terdapat sedikit ketidak konsistenan kualitas di beberapa titik.

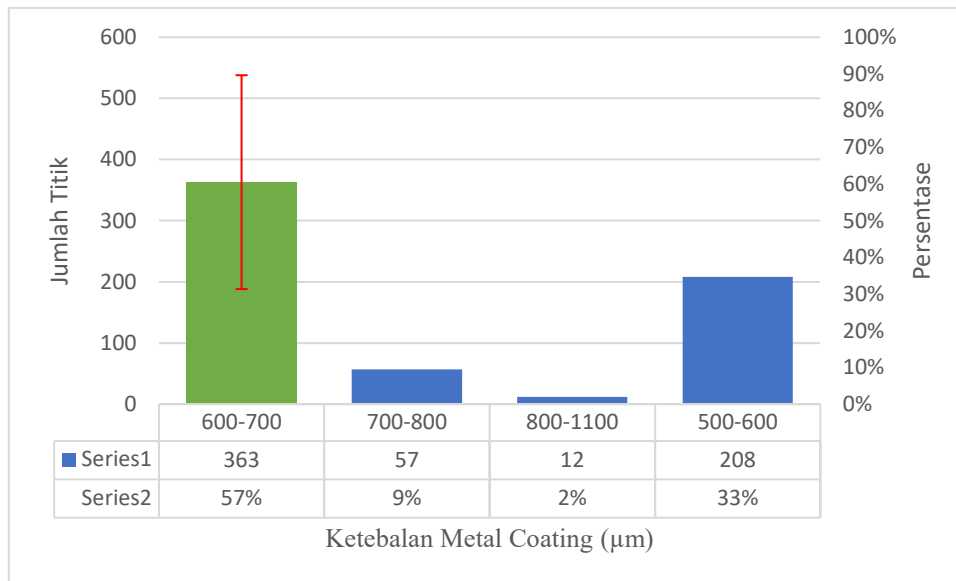
Meskipun secara umum proses pelapisan logam menunjukkan kecenderungan yang positif dalam memenuhi spesifikasi teknis, nilai ketidakpastian pengukuran yang masih berada pada angka 11% menunjukkan perlunya peningkatan dalam pengendalian proses serta pengawasan mutu secara menyeluruh. Ketidakpastian ini mencerminkan adanya

variabilitas dalam hasil pengukuran ketebalan pelapisan, yang dapat berdampak pada evaluasi kualitas secara keseluruhan. Beberapa faktor yang berkontribusi terhadap ketidakpastian tersebut antara lain keterbatasan alat ukur, seperti Elcometer, yang meskipun memiliki tingkat ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetap rentan terhadap deviasi akibat ketidakrataan permukaan pelapisan. Selain itu, kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan tinggi di dalam area *boiler* CFB dapat memengaruhi kestabilan pembacaan alat ukur. Faktor lain yang tidak kalah penting adalah *human error*, yang terjadi akibat ketidaktepatan dalam penempatan atau pembacaan alat oleh operator. Dengan nilai ketidakpastian sebesar 11%, sebagian besar hasil pengukuran memang masih berada dalam batas spesifikasi yang ditetapkan, namun variasi yang muncul di beberapa titik tetap perlu menjadi perhatian. Oleh karena itu, disarankan dilakukan perbaikan terhadap prosedur pengukuran, peningkatan kompetensi operator, pengukuran berulang di titik-titik kritis, serta kalibrasi alat ukur secara berkala untuk menjaga akurasi dan konsistensi hasil pengukuran di lapangan.

Tabel 30. Pengukuran ketebalan *metal coating* keseluruhan

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	882	827	175
	B	831		
	C	1006		
	D	589		
2	A	784	917	86
	B	730		
	C	588		
	D	650		
3	A	650	966	187
	B	1004		
	C	635		
	D	610		
4	A	660	996	190
	B	690		
	C	1028		
	D	610		
5	A	737	890	68
	B	604		
	C	715		
	D	614		
6	A	698	929	87
	B	817		
	C	658		
	D	615		
7	A	780	917	71
	B	610		
	C	663		
	D	698		
8	A	612	900	61
	B	669		
	C	758		
	D	660		
9	A	638	836	12
	B	634		
	C	610		
	D	625		
10	A	700	892	42
	B	669		
	C	610		
	D	698		

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)



Gambar 56. Grafik *metal coating* keseluruhan

Pada Gambar 56, Pekerjaan metal coating pada sisi kiri *boiler* CFB PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menggunakan material thermal spray wire tipe DM Chemshield-B TWAS dengan metode *Twin Wire Arc Spray* (TWAS). Sesuai dokumen pengadaan dan WPS, standar ketebalan pelapisan yang ditetapkan adalah 600–700 mikron. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk meningkatkan ketahanan korosi dan abrasi pada pipa *boiler* yang bekerja dalam suhu tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran pada 640 titik, diketahui bahwa sebanyak 705 titik (67%) memenuhi ketebalan sesuai standar, sedangkan 208 titik (33%) berada di luar batas yang ditentukan, yang menunjukkan bahwa sebagian besar area pelapisan telah berada dalam target spesifikasi, namun masih terdapat sedikit ketidak konsistenan kualitas di beberapa titik.

Meskipun secara umum proses pelapisan logam telah menunjukkan kesesuaian terhadap spesifikasi teknis, tingkat ketidakpastian pengukuran yang mencapai 39% mengindikasikan perlunya peningkatan dalam pengendalian proses dan sistem pengawasan mutu. Nilai ketidakpastian ini mencerminkan adanya fluktuasi yang cukup signifikan dalam hasil pengukuran ketebalan lapisan, yang dapat memengaruhi keakuratan evaluasi kualitas pelapisan secara keseluruhan. Beberapa faktor utama yang berkontribusi terhadap tingginya ketidakpastian ini meliputi keterbatasan alat ukur, seperti Elcometer, yang meskipun memiliki tingkat ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetap rentan terhadap deviasi akibat permukaan lapisan yang tidak seragam. Selain itu, kondisi lingkungan di dalam area *boiler* CFB, seperti suhu dan kelembapan tinggi, turut memengaruhi stabilitas

dan akurasi pembacaan alat ukur. Kesalahan manusia (*human error*), terutama dalam penempatan probe dan interpretasi hasil pengukuran, juga menjadi faktor yang berpengaruh. Dengan ketidakpastian sebesar 36%, meskipun sebagian besar hasil pengukuran berada dalam rentang standar spesifikasi, variasi data di beberapa titik kritis yang berada di luar batas toleransi tetap harus menjadi perhatian. Oleh karena itu, perbaikan terhadap prosedur pengukuran sangat diperlukan, termasuk di antaranya peningkatan pelatihan operator, pengulangan pengukuran pada area kritis, serta pelaksanaan kalibrasi alat ukur secara berkala guna meningkatkan akurasi, konsistensi, dan keandalan hasil pengukuran di lapangan.

4. Proses dan hasil data *ceramic coating*

a) Proses Pelapisan *Ceramic Coating*

Proses Pelapisan *Ceramic Coating* merupakan salah satu metode perlindungan material yang umum digunakan dalam industri pembangkit listrik, khususnya pada *Tube Boiler* yang beroperasi dalam lingkungan dengan temperatur tinggi. Teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi, serta abrasi akibat kontak langsung dengan gas buang dan partikel pada sistem *Circulating Fluidized Bed (CFB) Boiler*. Material yang digunakan *Emisshield* MB-1, yaitu material dengan tingkat emisivitas tinggi yang dirancang khusus untuk aplikasi pada *boiler*. Material ini memiliki keunggulan dalam mempertahankan distribusi panas merata, termal pada sistem *boiler*. Selain itu, pelapisan *ceramic coating* ini juga berperan dalam memperpanjang umur operasional *tube boiler* dengan mengurangi laju kausan permukaan akibat paparan lingkungan yang ekstrem. Parameter utama dalam proses ini dapat dilihat pada tabel 29.

Tabel 31. Parameter utama *ceramic coating*

Parameter	Satuan	Nilai
Ketebalan Lapisan	μm	30–150
Daya Rekat (Bond Strength)	psi / Mpa	> 5200 / > 35,85
Emisivitas	-	0,88–0,95
Densitas	g/cc	2,2–2,5
Konduktivitas Termal	W/mK	1,1–1,3
Suhu Operasi Maksimum	°C / °F	1200 / 2192

Proses pelapisan *ceramic coating* dilakukan secara sistematis guna memastikan adhesi yang optimal serta ketebalan lapisan seragam. Langkah awal melibatkan persiapan permukaan, dimana permukaan *tube boiler* dibersihkan menggunakan *grit blasting* untuk menghilangkan kontaminan dan menciptakan profil kekarasan yang sesuai, *Emisishield MB-1* diaplikasikan menggunakan teknik penyemprotan dengan parameter yang telah disesuaikan pada tabel 31 untuk menghasilkan lapisan pelindung yang aktif dan untuk prosesnya di Gambar 57.



Gambar 57. Proses *ceramic coating*

b) Hasil Data *Ceramic Coating*

Berikut merupakan hasil *ceramic Coating* dilakukan dengan mengalisa ketebalan lapisan pada setiap *tube*, khususnya untuk *tube* yang memiliki *thickness* dibawah ini batas standar yang ditentukan. Analisis ini bertujuan untuk menilai kesesuaian hasil pelapisan dengan spesifikasi teknis yang tercantum dalam dokumen pengadaan. Dengan penerapan yang tepat, lapisan ini diharapkan mampu meminimalkan risiko korosi dan erosi, sekaligus meningkatkan efisiensi termal pada *tube boiler CFB*. Rincian lengkap hasil pelapisan disajikan dalam tabel 30 dan tabel 31, dan untuk grafiknya dalam Gambar 56 dan Gambar 57.

Tabel 32. Pengukuran ketebalan *ceramic coating* elevasi 16-18

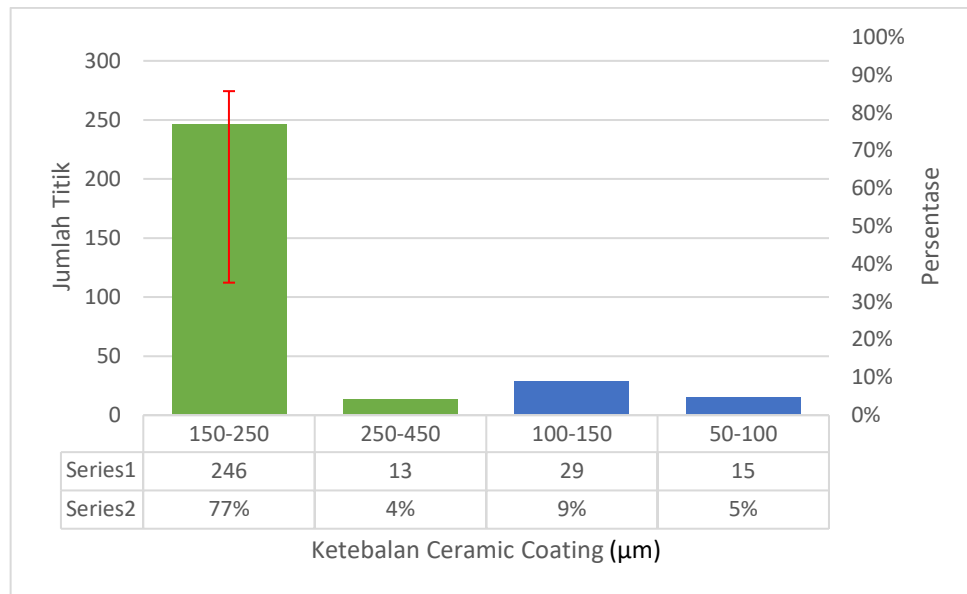
Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	940	805	134
	B	890		
	C	740		
	D	650		
2	A	650	695	70
	B	620		
	C	750		
	D	760		
3	A	630	833	156
	B	1000		
	C	810		
	D	890		
4	A	920	873	95
	B	910		
	C	930		
	D	730		
5	A	900	803	118
	B	880		
	C	790		
	D	640		
6	A	640	755	90
	B	750		
	C	770		
	D	860		
7	A	860	790	148
	B	960		
	C	710		
	D	630		
8	A	800	783	71
	B	870		
	C	760		
	D	700		
9	A	930	848	133
	B	890		
	C	650		
	D	920		
10	A	810	808	46
	B	760		
	C	870		
	D	790		

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)

Tabel 33. Pengukuran ketebalan *ceramic coating* elevasi 23-25

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	750	713	35
	B	670		
	C	700		
	D	730		
2	A	660	685	44
	B	700		
	C	640		
	D	740		
3	A	660	685	57
	B	620		
	C	710		
	D	750		
4	A	720	680	49
	B	720		
	C	620		
	D	660		
5	A	690	725	25
	B	730		
	C	750		
	D	730		
6	A	730	658	52
	B	620		
	C	660		
	D	620		
7	A	650	665	44
	B	630		
	C	730		
	D	650		
8	A	720	698	40
	B	680		
	C	740		
	D	650		
9	A	750	713	39
	B	730		
	C	710		
	D	660		
10	A	740	680	47
	B	660		
	C	690		
	D	630		

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)



Gambar 58. Grafik *ceramic coating* elevasi 16-18

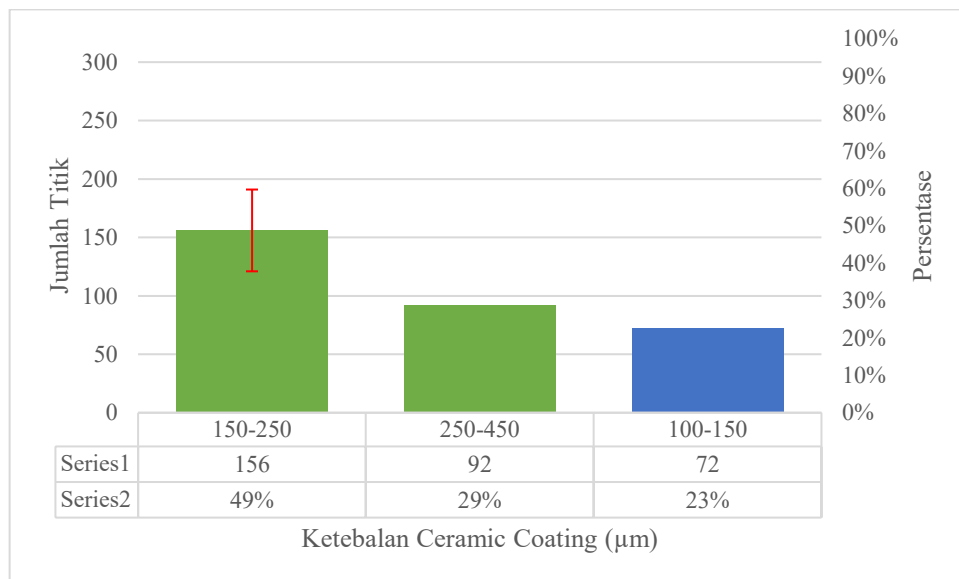
Pada gambar 58, Pekerjaan *cetal coating* pada sisi kiri *boiler* CFB PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menggunakan material *Emisshield M-1*, yaitu jenis coating berbasis logam dengan teknologi pelapisan suhu tinggi. Proses aplikasi dilakukan dengan *Atmospheric Plasma Spray (APS)*. Berdasarkan dokumen pengadaan dan spesifikasi teknis dalam *Welding Procedure Specification (WPS)*, standar ketebalan yang ditetapkan untuk pelapisan ini berada pada rentang 150–250 mikron (μm). Tujuan utama dari pelapisan ini adalah untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, abrasi, dan radiasi termal pada permukaan pipa *boiler* yang beroperasi dalam kondisi suhu tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran pada 320 titik, diketahui bahwa sebanyak 259 titik (81%) memenuhi ketebalan sesuai standar, sedangkan 44 titik (14%) berada di luar batas spesifikasi yang ditentukan. Data ini mengindikasikan bahwa sebagian besar pelapisan memiliki kecenderungan *overcoating*, atau melebihi batas atas ketentuan, yang berpotensi memengaruhi fleksibilitas dan daya lekat coating terhadap substrat logam.

Meskipun pelapisan menggunakan *Emisshield M-1* telah menunjukkan ketahanan suhu tinggi yang baik, Meskipun secara umum proses pelapisan logam menunjukkan tren yang positif dalam memenuhi spesifikasi teknis, nilai ketidakpastian pengukuran yang masih tinggi, yaitu sebesar 25%, mengindikasikan perlunya perbaikan dalam pengendalian proses dan sistem pengawasan mutu. Ketidakpastian ini mencerminkan variabilitas hasil pengukuran ketebalan pelapisan yang cukup signifikan, sehingga dapat memengaruhi validitas evaluasi kualitas.

Beberapa faktor utama yang menyebabkan tingginya ketidakpastian antara lain adalah keterbatasan alat ukur, seperti *Elcometer*, yang meskipun memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetap dapat mengalami deviasi akibat variasi kecil pada permukaan lapisan. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan tinggi di dalam area *boiler* CFB turut memengaruhi akurasi pembacaan alat ukur. Tidak kalah penting, kesalahan manusia (*human error*) dalam membaca data atau menempatkan alat ukur secara tidak presisi juga menjadi penyebab meningkatnya ketidakpastian. Menariknya, nilai ketidakpastian sebesar 25% pada beberapa titik menunjukkan bahwa kontrol kualitas di lapangan masih perlu ditingkatkan. Hal ini mencerminkan bahwa meskipun sebagian besar hasil pengukuran berada dalam rentang standar spesifikasi (misalnya ketebalan 150–250 μm), terdapat titik-titik tertentu yang menyimpang dari toleransi yang diizinkan, yang dapat berdampak langsung terhadap performa dan umur pakai lapisan pelindung logam.

Oleh karena itu, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi terhadap parameter aplikasi pelapisan, kalibrasi alat ukur (seperti *Elcometer*) secara berkala. Langkah ini penting agar pekerjaan *ceramic coating* berbasis *Emisshield M-1* dapat mencapai tingkat keberhasilan yang lebih konsisten dan memenuhi standar mutu pada industri pembangkitan listrik.



Gambar 59. Grafik *ceramic coating* elevasi 23-25

Pada gambar 59, pekerjaan *ceramic coating* pada sisi kiri *boiler* CFB PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menggunakan material *Emisshield M-1*, yaitu jenis *coating* berbasis logam dengan teknologi pelapisan suhu tinggi. Proses aplikasi dilakukan dengan metode *Atmospheric Plasma Spray (APS)*. Berdasarkan dokumen pengadaan dan spesifikasi teknis dalam *Welding Procedure Specification (WPS)*, standar ketebalan yang ditetapkan untuk

pelapisan ini berada pada rentang 150–250 mikron (μm). Tujuan utama dari pelapisan ini adalah untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, abrasi, dan radiasi termal pada permukaan pipa *boiler* yang beroperasi dalam kondisi suhu tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran pada 320 titik, diketahui bahwa sebanyak 248 titik (77%) memenuhi ketebalan sesuai standar, sedangkan 72 titik (23%) berada di luar batas spesifikasi yang ditentukan. Data ini mengindikasikan bahwa sebagian besar pelapisan memiliki kecenderungan *overcoating*, atau melebihi batas atas ketentuan, yang berpotensi memengaruhi fleksibilitas dan daya lekat coating terhadap substrat logam.

Meskipun pelapisan menggunakan Emisshield M-1 telah menunjukkan ketahanan suhu tinggi yang baik, Meskipun pelapisan menggunakan Emisshield M-1 telah menunjukkan ketahanan suhu tinggi yang baik, Meskipun secara umum proses pelapisan logam menunjukkan tren yang positif dalam memenuhi spesifikasi teknis, nilai ketidakpastian pengukuran yang masih tinggi, yaitu sebesar 18%, mengindikasikan perlunya perbaikan dalam pengendalian proses dan sistem pengawasan mutu. Ketidakpastian ini mencerminkan variabilitas hasil pengukuran ketebalan pelapisan yang cukup signifikan, sehingga dapat memengaruhi validitas evaluasi kualitas.

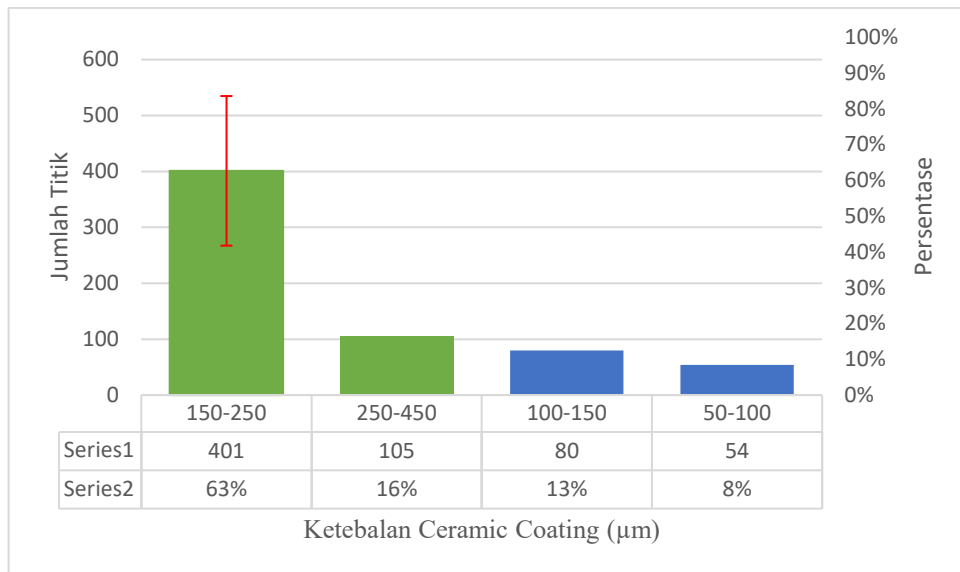
Beberapa faktor utama yang menyebabkan tingginya ketidakpastian antara lain adalah keterbatasan alat ukur, seperti Elcometer, yang meskipun memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetap dapat mengalami deviasi akibat variasi kecil pada permukaan lapisan. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan tinggi di dalam area *boiler* CFB turut memengaruhi akurasi pembacaan alat ukur. Tidak kalah penting, kesalahan manusia (*human error*) dalam membaca data atau menempatkan alat ukur secara tidak presisi juga menjadi penyebab meningkatnya ketidakpastian. Menariknya, nilai ketidakpastian sebesar 18% pada beberapa titik menunjukkan bahwa kontrol kualitas di lapangan masih perlu ditingkatkan. Hal ini mencerminkan bahwa meskipun sebagian besar hasil pengukuran berada dalam rentang standar spesifikasi (misalnya ketebalan 150–250 μm), terdapat titik-titik tertentu yang menyimpang dari toleransi yang diizinkan, yang dapat berdampak langsung terhadap performa dan umur pakai lapisan pelindung logam.

Oleh karena itu, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi terhadap parameter aplikasi pelapisan, kalibrasi alat ukur (seperti *Elcometer*) secara berkala. Langkah ini penting agar pekerjaan *ceramic coating* berbasis *Emisshield M-1* dapat mencapai tingkat keberhasilan yang lebih konsisten dan memenuhi standar mutu pada industri pembangkitan listrik.

Tabel 34. Pengukuran ketebalan ceramic coating

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	940	805	134
	B	890		
	C	740		
	D	650		
2	A	650	695	70
	B	620		
	C	750		
	D	760		
3	A	630	833	156
	B	1000		
	C	810		
	D	890		
4	A	920	873	95
	B	910		
	C	930		
	D	730		
5	A	900	803	118
	B	880		
	C	790		
	D	640		
6	A	640	755	90
	B	750		
	C	770		
	D	860		
7	A	860	790	148
	B	960		
	C	710		
	D	630		
8	A	800	783	71
	B	870		
	C	760		
	D	700		
9	A	930	848	133
	B	890		
	C	650		
	D	920		
10	A	810	808	46
	B	760		
	C	870		
	D	790		

(Tabel hanya menampilkan sebagian data, data lengkap pada lampiran)



Gambar 60. Grafik *ceramic coating* keseluruhan

Pada gambar 60, Pekerjaan metal coating pada sisi kiri *boiler* CFB PLTU 2×112 MW Teluk Sirih menggunakan material Emisshield M-1, yaitu jenis coating berbasis logam dengan teknologi pelapisan suhu tinggi. Proses aplikasi dilakukan dengan metode *Atmospheric Plasma Spray (APS)*. Berdasarkan dokumen pengadaan dan spesifikasi teknis dalam *Welding Procedure Specification (WPS)*, standar ketebalan yang ditetapkan untuk pelapisan ini berada pada rentang 150–250 mikron (μm). Tujuan utama dari pelapisan ini adalah untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, abrasi, dan radiasi termal pada permukaan pipa *boiler* yang beroperasi dalam kondisi suhu tinggi.

Berdasarkan hasil pengukuran pada 640 titik, diketahui bahwa sebanyak 506 titik (79%) memenuhi ketebalan sesuai standar, sedangkan 134 titik (21%) berada di luar batas spesifikasi yang ditentukan. Data ini mengindikasikan bahwa sebagian besar pelapisan memiliki kecenderungan *overcoating*, atau melebihi batas atas ketentuan, yang berpotensi memengaruhi fleksibilitas dan daya lekat coating terhadap substrat logam.

Meskipun pelapisan menggunakan Emisshield M-1 telah menunjukkan ketahanan suhu tinggi yang baik Meskipun pelapisan menggunakan Emisshield M-1 telah menunjukkan ketahanan suhu tinggi yang baik, Meskipun secara umum proses pelapisan logam menunjukkan tren yang positif dalam memenuhi spesifikasi teknis, nilai ketidakpastian pengukuran yang masih tinggi, yaitu sebesar 39%, mengindikasikan perlunya perbaikan dalam pengendalian proses dan sistem pengawasan mutu. Ketidakpastian ini mencerminkan variabilitas hasil pengukuran ketebalan pelapisan yang cukup signifikan, sehingga dapat memengaruhi validitas evaluasi kualitas.

Beberapa faktor utama yang menyebabkan tingginya ketidakpastian antara lain adalah keterbatasan alat ukur, seperti *Elcometer*, yang meskipun memiliki ketelitian $\pm 1\%$ dan resolusi 1 mikron, tetap dapat mengalami deviasi akibat variasi kecil pada permukaan lapisan. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan tinggi di dalam area *boiler* CFB turut memengaruhi akurasi pembacaan alat ukur. Tidak kalah penting, kesalahan manusia (*human error*) dalam membaca data atau menempatkan alat ukur secara tidak presisi juga menjadi penyebab meningkatnya ketidakpastian. Menariknya, nilai ketidakpastian sebesar 39% pada beberapa titik menunjukkan bahwa kontrol kualitas di lapangan masih perlu ditingkatkan. Hal ini mencerminkan bahwa meskipun sebagian besar hasil pengukuran berada dalam rentang standar spesifikasi (misalnya ketebalan 150–250 μm), terdapat titik-titik tertentu yang menyimpang dari toleransi yang diizinkan, yang dapat berdampak langsung terhadap performa dan umur pakai lapisan pelindung logam.

Oleh karena itu, direkomendasikan untuk melakukan evaluasi terhadap parameter aplikasi pelapisan, kalibrasi alat ukur (seperti *Elcometer*) secara berkala. Langkah ini penting agar pekerjaan *ceramic coating* berbasis *Emisshield M-1* dapat mencapai tingkat keberhasilan yang lebih konsisten dan memenuhi standar mutu pada industri pembangkitan listrik.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

- a. Pekerjaan *rewelding* telah menunjukkan tingkat keberhasilan yang sangat baik, dengan rata-rata tingkat keberhasilan 92%, yang berarti mayoritas pengelasan telah sesuai dengan spesifikasi teknis yang ditentukan dalam dokumen pengadaan dan standar internasional seperti ASME Section XI. Rinciannya adalah sebagai berikut:
 - *Gap* sesuai standar dokumen pengadaan (WPS), nilai celah sambungan (*Gap*) yang baik adalah 3 mm, dengan tingkat keberhasilan 95% dan ketidakpastian 6%. Hal ini menunjukkan pengendalian celah pengelasan telah dilakukan dengan akurat.
 - *Beadwidth* berdasarkan standar ASME Section XI, rentang lebar las (*beadwidth*) yang baik adalah 10–13 mm, dengan tingkat keberhasilan 83% dan ketidakpastian 11%, yang masih memerlukan peningkatan kontrol presisi.
 - *Capping* ketebalan *capping* yang ideal adalah 3 mm sesuai dokumen pengadaan standar WPS, dengan tingkat keberhasilan 95% dan ketidakpastian 14%. Ini menunjukkan sebagian besar pekerjaan akhir las dilakukan dengan mutu yang tinggi.
 - *Joint Angle* sudut sambungan (*joint angle*) sebesar 60°, sesuai dokumen pengadaan, menunjukkan tingkat keberhasilan 95% dan ketidakpastian 7%, yang berarti sudut sambungan dapat dipertahankan dengan baik sesuai desain.
 - *Hi-Lo* perbedaan ketinggian antar permukaan pipa (*Hi-Lo*) maksimal 1,5 mm, sesuai *ASME Section XI*, dengan tingkat keberhasilan 92% dan ketidakpastian 17%. Nilai ini menunjukkan kontrol *fit-up* perlu ditingkatkan untuk menurunkan deviasi.

Secara keseluruhan, kontrol kualitas pada proses *Rewelding* menunjukkan mutu pekerjaan yang tinggi dan sesuai standar, baik dalam aspek dimensi, geometri sambungan, maupun visual integritas las.

b. Pekerjaan pelapisan (*coating*) masih menunjukkan ketidakkonsistenan kualitas di lapangan, dengan rata-rata tingkat keberhasilan sebesar 73%, yang berarti kurang dari separuh hasil pelapisan memenuhi spesifikasi ketebalan yang ditetapkan. Adapun hasil kontrol kualitas pelapisan berdasarkan elevasi adalah sebagai berikut:

- *Metal coating* elevasi 16–18 m standar ketebalan 600–700 μm tercapai dengan tingkat keberhasilan 77%, namun ketidakpastian tinggi yaitu 40%.
- *Metal coating* elevasi 23–25 m standar ketebalan 600–700 μm tercapai dengan tingkat keberhasilan 58% dengan ketidakpastian 11%, menunjukkan peningkatan konsistensi.
- *Metal coating* keseluruhan elevasi standar ketebalan 600–700 μm tercapai dengan tingkat keberhasilan 68% dan ketidakpastian 36%, mengindikasikan adanya fluktuasi distribusi pelapisan secara vertikal.
- *Ceramic coating* elevasi 16–18 m standar ketebalan 150–250 μm tercapai dengan tingkat keberhasilan 81%, ketidakpastian 25%.
- *Ceramic coating* elevasi 23–25 m standar ketebalan 150–250 μm tercapai dengan tingkat keberhasilan 78%, ketidakpastian 18%.
- *Ceramic coating* keseluruhan elevasi standar ketebalan 150–250 μm tercapai dengan menunjukkan tingkat keberhasilan yang lebih tinggi yaitu 79%, namun disertai ketidakpastian tinggi sebesar 39%, yang mencerminkan ketidakkonsistenan signifikan dalam mutu pekerjaan secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. W. Irawan, S. Pratama, and C. Insani, "Analisis termodinamika siklus pembangkit listrik tenaga uap kapasitas 1500 kw," *jtm-iti (jurnal tek. Mesin iti)*, vol. 5, no. 3, p. 109, dec. 2021, doi: 10.31543/jtm.v5i3.579.
- [2] S. Sukadi and N. Novarini, "Analisa kegagalan pipa superheater pada boiler tipe pipa air," *tek. J. Tek.*, vol. 4, no. 2, p. 112, jan. 2018, doi: 10.35449/teknika.v4i2.65.
- [3] Hendri, R. Nurhasanah, and B. Amiadi, "Analisis pengaruh penurunan temperatur lmtd terhadap unjuk kerja hrsg pada pltgu," *j. Powerpl.*, vol. 6, no. 2, pp. 74–85, nov. 2018, doi: 10.33322/powerplant.v6i2.393.
- [4] I. Muzaki and A. Mursadin, "Analisis efisiensi boiler dengan metode input–output di pt. Japfa comfeed indonesia tbk. Unit banjarmasin," *sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 4, no. 1, pp. 37–46, 2019, doi: 10.20527/sjme kinematika.v4i1.50.
- [5] B. Kurnianto, "Buku ii pemeliharaan boiler cfb & auxiliary," 2011, [online]. Available: https://www.academia.edu/44064110/pemeliharaan_boiler_cfb
- [6] D. T. Peters, K. Subramanian, and M. Sarzynski, "Overview of revisions to the asme boiler and pressure vessel code section viii division 3 for the 2023 edition and near future," in *american society of mechanical engineers, pressure vessels and piping division (publication) pvp*, american society of mechanical engineers digital collection, nov. 2023. Doi: 10.1115/pvp2023-106304.
- [7] V. Antono, W. Alfalah, and R. Windani, "Analisa kegagalan platen tube superheater pltu teluk sirih," *j. Powerpl.*, vol. 6, no. 1, pp. 6–18, nov. 2018, doi: 10.33322/powerplant.v6i1.67.
- [8] A. Ardiningrum, F. Fitriyani, and A. Gusti, "Analisis risiko keselamatan dan kesehatan kerja (k3) pada bagian boiler di pltu teluk sirih," *j. Keselam. Kesehat. Kerja dan lingkung.*, vol. 4, no. 2, pp. 151–169, nov. 2023, doi: 10.25077/jk3l.4.2.151-169.2023.
- [9] D. Putra, "Pengenalan pltu teluk sirih," 2020, [online]. Available: <https://www.scribd.com/document/449720685/pengenalan-pltu-teluk-sirih-pdf>
- [10] Y. Pravitasari *et al.*, "Analisis efisiensi boiler menggunakan metode langsung," *prism. Fis.*, vol. 5, no. 1, pp. 9–12, jan. 2017, accessed: oct. 15, 2024. [online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jpfu/article/view/18086>
- [11] P. Basu, "Circulating fluidized bed boilers: design, operation and maintenance". Springer international publishing, 2015. Doi: 10.1007/978-3-319-06173-3.

- [12] K. Radhakrishnan and J. S. Park, "Flow and heat transfer characteristics of superheater tube of a pulverized coal-fired boiler using conjugate heat transfer modeling," *energies*, vol. 17, no. 5, mar. 2024, doi: 10.3390/en17051161.
- [13] G. F. Gilman, G. Jerry, "Boiler control systems engineering". google buku. Accessed: oct. 16, 2024. [online]. Available: https://books.google.co.id/books?hl=id&lr=&id=n2whndqrb7sc&oi=fnd&pg=pa1&dq=asme+section+vii,+part+13.+boiler+auxiliary&ots=vwhhyq3xno&sig=nw4gpvautztuv-djkd-lfapch7ik&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [14] K. Kolmetz, "Steam turbine systems selection, sizing and troubleshooting". 2015. [online]. Available: <https://www.klmtechgroup.com/pdf/edg-equ/engineering-design-guidelines-steam-turbine-systems-rev1.3web.pdf>
- [15] A. S. Leyzerovich, "Steam turbines for modern fossil-fuel power plants," *j. Cell biol.*, vol. 148, no. 4, pp. 635–51, feb. 2007.
- [16] B. A. Mustofa, Sunarwo, and Supriyo, "Analisa heat rate pada turbin uap berdasarkan performance test pltu tanjung jati b unit 3," *eksergi j. Tek. Energi*, vol. 10, no. 3, may 2016, doi: 10.32497/eksergi.v10i3.250.
- [17] R. Apriandi and A. Mursadin, "Analisis kinerja turbin uap berdasarkan performance test pltu pt. Indocement p-12 tarjun," *sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 1, no. 1, pp. 37–46, 2016, doi: 10.20527/sjmekinematika.v1i1.26.
- [18] Masrufaiyah and T. Joko Sulistiono, "Analisa pengaruh jumlah plugpada kondenserterhadap efisiensi dan heat transfer yang hilangdi pltu unit 3 dan 4 pt. Pjb up. Gresik," *j. Keilmuan dan terap. Tek.*, vol. 07, no. Nomor 1, pp. 1–15, 2018.
- [19] Rakhman "generator." Accessed: oct. 21, 2024. [online]. Available: <https://rakhman.net/electrical-id/generator/>
- [20] A. R. Lubis, "Laporan hasil kerja praktek pt lentera bumi nusantara tasikmalaya jawa barat simulasi pengaruh perubahan geometri jumlah lilitan coil generator permanen magnet 12 slot 8 pole 1/4 bagian terhadap tegangan yang dihasilkan dengan menggunakan software magnet," 2018, [online]. Available: [https://repository.uma.ac.id/jspui/bitstream/123456789/15267/1/abdulrahmanlubis-simulasi pengaruh perubahan geometri.pdf](https://repository.uma.ac.id/jspui/bitstream/123456789/15267/1/abdulrahmanlubis-simulasi%20pengaruh%20perubahan%20geometri.pdf)
- [21] A. Dwi Putra, I. Yusuf, U. A. Gani, "Studi potensi limbah biomassa kelapa sawit sebagai pembangkit listrik tenaga uap (pltu) di pt. Pekerbunan nusantara xiii pks parindu," *j. Electr. Eng. Energy, inf. Technol.*, vol. 5, no. 3, sep. 2017, doi: 10.26418/j3eit.v5i3.21947.
- [22] K. Rao, "Companion guide to the asme boiler & pressure vessel code". 2012. Doi: 10.1115/1.859872.

- [23] R. M. Evans and D. J. Foster, “*Surface preparation and coating applications: dry and wet sandblasting*,” vol. 45, no. 3, pp. 123–134, 2015, doi: 10.1016/j.jic.2015.03.001.
- [24] A. P. Smith, “*Wet and dry sandblasting: a comparative review of the methods*,” vol. 62, no. 4, pp. 210–217, 2018, [online]. Available: <https://www.surfacetreatmenttech.com/articles/wet-dry-sandblasting-comparison>
- [25] B. Fotovvati, N. Namdari, and A. Dehghanghadikolaei, “*On coating techniques for surface protection: a review*,” *j. Manuf. Mater. Process.* 2019, vol. 3, page 28, vol. 3, no. 1, p. 28, mar. 2019, doi: 10.3390/jmmp3010028.
- [26] M. Winnicki, “*Advanced functional metal-ceramic and ceramic coatings deposited by low-pressure cold spraying: a review*,” *coatings* 2021, vol. 11, page 1044, vol. 11, no. 9, p. 1044, aug. 2021, doi: 10.3390/coatings11091044.
- [27] T. Akatsu, Y. Shinoda, and F. Wakai, “*Zirconia based ceramic coating on a metal with plasma electrolytic oxidation*,” *iop conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 20, p. 202005, oct. 2011, doi: 10.1088/1757-899x/18/20/202005.
- [28] E. Setiono, “*Boiler reliability analysis with weibull to measure the impact of metal coating on the wall tube boiler cfb upk tarahan*,” *traksi*, vol. 23, no. 1, pp. 41–59, may 2023, accessed: apr. 14, 2025. [online]. Available: <https://jurnal.unimus.ac.id/index.php/jtm/article/view/10762>
- [29] T. Femiana Gapsari, *et all*, “*Failures analysis of tube coating in circulating fluidized bed (cfb) boiler*,” 2024, [online]. Available: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)02165-0](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)02165-0)
- [30] Alias M. N, F. Nadrah, “*Coating characterizations and evaluation of ceramic metal mixture slurry based thermal barrier coating for automotive turbocharger turbine application*,” pp. 14–22, aug. 2018, doi: 10.15224/978-1-63248-159-7-16.
- [31] Chen Zhao, “*ceramic coatings on non-valve metals deposited*,” *univ. Wind.*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, apr. 2021, doi: 10.2/jquery.min.js.
- [32] M. D. Nguyen *et al.*, “*Anti-fouling ceramic coating for improving the energy efficiency of steel boiler systems*,” *coatings* 2018, vol. 8, page 353, vol. 8, no. 10, p. 353, oct. 2018, doi: 10.3390/coatings8100353.
- [33] m. Walidi, e. *et all* “*Kajian thermal spray coating dengan teknologi high velocity oxy-fuel (hvof) serta perlakuan pasca prosesnya sebagai pelindung boiler tubes pembangkit listrik tenaga uap*,” *j. Penelit. Inov.*, vol. 3, no. 1, pp. 41–60, feb. 2023, doi: 10.54082/jupin.124.
- [34] Y. Kawahara, “*An overview on corrosion-resistant coating technologies in biomass/waste-to-energy plants in recent decades*,” *coatings* 2016, vol. 6, page 34, vol. 6, no. 3, p. 34, aug. 2016, doi: 10.3390/coatings6030034.

- [35] Z. Wei, I. Wu, and X. Liang, “Properties of ceramic coating on heating surface of waste incineration boiler prepared by slurry method,” *materials (basel)*, vol. 15, no. 13, jul. 2022, doi: 10.3390/ma15134574.
- [36] S. B. Choi and J. Y. Park, “A study of the effects of handedness on portable angle grinder risk,” *buildings*, vol. 13, no. 11, 2023, doi: 10.3390/buildings13112811.
- [37] Irwin “vise-grip fast release 6sp locking c-clamp with swivel pads” Accessed: jun. 29, 2025. [online]. Available: <https://www.irwintools.com/product/irht82587/vise-grip-fast-release-6sp-locking-c-clamp-swivel-pads>
- [38] M. S. Ummah, “Pemeriksaan hasil las,” *sustain.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–14, 2019, [online]. Available: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/red2017-eng-8ene.pdf?sequence=12&isallowed=y%0ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciu rbeco.2008.06.005%0ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_sistem_pembetulan_terpusat_strategi_melestari
- [39] B. Waghmare, *et al* “Design of sand blasting machine,” *int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 2589–2592, 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.41649.

LAMPIRAN

1. Data hasil *retubing*

- Data *Retubing* memiliki 64 joint *Tube*
- *Hi-Lo* yang sesuai dengan dokumen pengadaan dan WPS yaitu 50 Joint dan yang tidak sesuai yaitu 14 Joint.
- *Capping* yang sesuai dengan dokumen pengadaan dan WPS yaitu 41 Joint dan yang tidak sesuai yaitu 33 Joint.
- *Bead Width* sesuai dengan dokumen pengadaan dan WPS
- *GAP* yang sesuai dengan dokumen pengadaan dan WPS yaitu 33 Joint dan yang tidak sesuai yaitu 31 Joint.
- *Joint Angle* yang sesuai dengan dokumen pengadaan dan WPS yaitu 54 Joint dan yang tidak sesuai yaitu 10 Joint.

Tabel 35. Data pengukuran *gap*, *capping*, dan *beadwidth*.

GAP (mm)	Deviasi	CAPPING (mm)	Deviasi	BEAD WIDTH (mm)	Deviasi
3.2	0.000	1	0.14	13.8	0.92
3.2		1.2		12.5	
3	0.000	2.6	0.14	12.5	0.92
3		2.4		13.8	
3.2	0.141	1	0.42	14	1.06
3		1.6		12.5	
3.2	0.141	1.3	0.42	13.5	0.49
3		1.9		12.8	
3	0.141	1	1.06	13.9	0.21
3.2		2.5		14.2	
3.2	0.141	3	0.42	13	1.13
3		2.4		14.6	
3.2	0.071	1.8	0.07	14.6	0.14
3.3		1.7		14.8	
3	0.141	1.9	0.64	13	0.00
3.2		1		13	
3	0.141	1.6	0.21	13	0.00

GAP (mm)	Deviasi	CAPPING (mm)	Deviasi	BEAD WIDTH (mm)	Deviasi
3.2		1.3		13	
3.2	0.141	1	0.92	13.5	0.07
3.4		2.3		13.6	
3.2	0.000	3	1.13	13.8	0.07
3.2		1.4		13.9	
3	0.141	2.3	0.92	13	0.00
3.2		1		13	
3.2	0.141	1.4	1.20	13	0.35
3		3.1		13.5	
3	0.141	0.7	0.21	14	0.28
3.2		1		14.4	
3	0.141	3.2	1.91	13.8	0.57
3.2		0.5		13	
3.2	0.000	1.5	0.07	13	0.35
3.2		1.6		13.5	
3	0.000	1.5	0.35	14.2	0.85
3		1		13	
3.1	0.071	0.7	0.21	12.5	0.64
3.2		1		13.4	
3	0.000	2.6	1.13	13.4	0.28
3		1		13	
3	0.141	3.1	0.78	12.2	0.92
3.2		2		13.5	
3	0.000	1.5	0.35	12	0.85
3		1		13.2	
3.2	0.071	1.5	0.35	14	0.00
3.1		1		14	
3.2	0.071	1.8	0.57	12.5	1.06
3.1		1		14	
3	0.000	2.5	0.92	13.8	0.71
3		1.2		12.8	
3.2	0.000	1.6	0.42	13.9	0.64
3.2		1		13	
3	0.000	2.8	0.92	14	0.57
3		1.5		14.8	
3.2	0.141	1	0.57	13.2	0.57
3		1.8		14	
3.2	0.141	1.5	0.35	14	0.00
3		1		14	
3	0.141	1.5	0.07	14.3	0.14

GAP (mm)	Deviasi	CAPPING (mm)	Deviasi	BEAD WIDTH (mm)	Deviasi
3.2		1.6		14.5	
3.3	0.212	2.9	0.42	13	0.14
3		2.3		13.2	
3	0.141	2	0.71	13.4	0.14
3.2		1		13.2	
3	0.000	1.8	0.64	14.6	0.28
3		0.9		15	

Tabel 36. Data pengukuran *joint angle* dan *hi-lo*

Joint Angle		Deviasi	HI-LO (mm)				
A	B		0°	90°	180°	270°	Deviasi
31°	30°	0.71	1	1	2.6	1	0.80
29°	30°	0.71	0.9	1.5	1	2	0.51
30°	30°	0.00	0.7	1	1.5	2.6	0.83
30°	30°	0.00	1	1.3	1.9	2	0.48
31°	30°	0.71	2	2	0.8	2.9	0.86
31°	30°	0.71	1.5	1	0.9	2	0.51
30°	30°	0.00	0.6	1.3	2	1	0.59
30°	30°	0.00	0.9	0.9	0.9	1.6	0.35
28°	30°	1.41	1.6	2.6	1	1.8	0.66
30°	30°	0.00	1.5	1.5	2.5	1	0.63
30°	30°	0.00	1.2	0.8	0.9	2	0.54
29°	30°	0.71	1.3	2.5	1	1.5	0.65
31°	30°	0.71	1.3	2.9	0.9	1	0.93
31°	30°	0.71	0.8	1	2	1.5	0.54
32°	30°	1.41	1	1.5	1	1.5	0.29
30°	30°	0.00	1	1.5	2	2	0.48
30°	30°	0.00	0.6	1	0.9	1	0.19
30°	30°	0.00	1.7	2	1	1.5	0.42
31°	30°	0.71	1	1.6	0.8	2	0.55
30°	30°	0.00	0.8	2	1.6	1	0.55
30°	30°	0.00	1	1.3	0.6	2	0.59
31°	30°	0.71	1.3	1.3	1	1	0.17
30°	30°	0.00	1.6	2	1.6	1.6	0.20
29°	30°	0.71	1.5	1.6	1.5	1.3	0.13
30°	30°	0.00	1.2	2	2	1.5	0.39
29°	30°	0.71	1.3	2	0.5	0.5	0.72
30°	30°	0.00	1.3	1.4	2.1	0.9	0.50
31°	30°	0.71	1	2	0.5	1.6	0.66

Joint Angle		Deviasi	HI-LO (mm)				
A	B		0°	90°	180°	270°	Deviasi
30°	30°	0.00	0.5	0.6	2.6	1	0.97
30°	30°	0.00	1	1.6	1	1.9	0.45
30°	30°	0.00	2.5	1.7	2	1	0.63
30°	30°	0.00	2	1.8	1	0.9	0.56
31°	30°	0.71	1.8	0.9	0.9	2.9	0.95
30°	30°	0.00	2	2.5	0.9	1	0.78
30°	30°	0.00	2.6	2	1	2.9	0.84
30°	30°	0.00	1.5	1	1.8	1	0.39
31°	30°	0.71	1.4	2	1.7	2.9	0.65
30°	30°	0.00	1	0.6	1	1	0.20
30°	30°	0.00	2	0.9	2	2	0.55
31°	30°	0.71	0.9	1	1.8	0.6	0.51
30°	30°	0.00	0.6	1.6	1.9	2.9	0.95
30°	30°	0.00	2.3	2	1.5	2.8	0.54
30°	30°	0.00	1	1	1.6	1	0.30
29°	30°	0.71	0.6	0.9	1	2.9	1.05
30°	30°	0.00	1.1	1	2.9	2	0.89
30°	30°	0.00	1.5	2	1	0.8	0.54
30°	30°	0.00	1.9	1.5	2	1	0.45
30°	30°	0.00	1.6	1.4	1.6	1.9	0.21
31°	30°	0.71	1	1.2	1.8	1	0.38
30°	30°	0.00	1.4	2	1.6	0.9	0.46
30°	30°	0.00	0.6	0.9	1	1.3	0.29
30°	30°	0.00	1.8	0.7	0.8	2.9	1.03
30°	30°	0.00	1.7	1.6	0.5	1	0.56
29°	30°	0.71	1.9	1.9	0.9	1.3	0.49
29°	30°	0.71	1.6	1.8	1.9	1.2	0.31
30°	30°	0.00	1	2	1	1.5	0.48
30°	30°	0.00	0.9	2.6	1.1	1.5	0.76
30°	30°	0.00	1.8	1.2	2	1.5	0.35
29°	30°	0.71	0.9	2	1.3	2.1	0.57
30°	30°	0.00	2	1.9	1.4	1	0.46
30°	30°	0.00	2.6	1	1.5	0.9	0.78
30°	30°	0.00	1.4	0.7	1	0.6	0.36
30°	30°	0.00	0.8	0.6	0.8	0.9	0.13
30°	30°	0.00	1.3	0.5	0.6	1	0.37

2. Data hasil *metal coating*

- *Metal coating* memiliki 80 *Tube* elevasi 16-18 yang sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 234 titik dan yang tidak sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 86 titik.

Tabel 37. Tabel hasil *metal coating* 16-18

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	882	827	174.9
	B	831		
	C	1006		
	D	589		
2	A	784	688	86.5
	B	730		
	C	588		
	D	650		
3	A	650	725	186.9
	B	1004		
	C	635		
	D	610		
4	A	660	747	190.2
	B	690		
	C	1028		
	D	610		
5	A	737	668	68.3
	B	604		
	C	715		
	D	614		
6	A	698	697	86.9
	B	817		
	C	658		
	D	615		
7	A	780	688	71.4
	B	610		
	C	663		
	D	698		
8	A	612	675	60.9
	B	669		
	C	758		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	660		
9	A	638	627	12.4
	B	634		
	C	610		
	D	625		
10	A	700	669	42.0
	B	669		
	C	610		
	D	698		
11	A	643	640	7.6
	B	640		
	C	630		
	D	648		
12	A	645	682	128.4
	B	869		
	C	634		
	D	578		
13	A	611	637	59.5
	B	625		
	C	723		
	D	588		
14	A	687	650	39.2
	B	596		
	C	649		
	D	668		
15	A	652	674	20.3
	B	696		
	C	662		
	D	685		
16	A	645	626	48.6
	B	588		
	C	686		
	D	585		
17	A	620	631	46.8
	B	693		
	C	580		
	D	630		
18	A	665	652	35.5
	B	680		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	663		
	D	600		
19	A	780	680	71.0
	B	612		
	C	663		
	D	665		
20	A	930	741	156.6
	B	626		
	C	808		
	D	599		
21	A	645	665	85.2
	B	655		
	C	782		
	D	578		
22	A	596	598	11.5
	B	612		
	C	584		
	D	598		
23	A	950	809	106.4
	B	780		
	C	811		
	D	694		
24	A	668	681	15.6
	B	670		
	C	682		
	D	702		
25	A	664	679	27.2
	B	685		
	C	652		
	D	714		
26	A	670	688	28.4
	B	705		
	C	658		
	D	718		
27	A	664	697	27.4
	B	711		
	C	726		
	D	686		
28	A	718	712	29.8

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	712		
	C	744		
	D	672		
29	A	700	689	22.2
	B	714		
	C	672		
	D	668		
30	A	740	719	27.2
	B	735		
	C	722		
	D	680		
31	A	734	718	24.7
	B	722		
	C	682		
	D	734		
32	A	682	694	21.8
	B	725		
	C	676		
	D	694		
33	A	674	690	18.1
	B	686		
	C	716		
	D	684		
34	A	702	711	15.5
	B	697		
	C	732		
	D	712		
35	A	726	725	21.4
	B	720		
	C	700		
	D	752		
36	A	706	712	11.4
	B	726		
	C	716		
	D	700		
37	A	716	705	10.0
	B	711		
	C	694		
	D	700		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
38	A	716	690	46.4
	B	712		
	C	710		
	D	620		
39	A	800	680	90.9
	B	700		
	C	600		
	D	620		
40	A	626	617	13.2
	B	610		
	C	630		
	D	602		
41	A	600	645	52.6
	B	700		
	C	680		
	D	600		
42	A	720	713	73.7
	B	620		
	C	800		
	D	710		
43	A	620	633	15.0
	B	620		
	C	640		
	D	650		
44	A	650	646	39.8
	B	620		
	C	700		
	D	612		
45	A	620	643	40.3
	B	610		
	C	700		
	D	640		
46	A	620	646	40.6
	B	653		
	C	610		
	D	700		
47	A	620	653	35.9
	B	660		
	C	630		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	700		
48	A	620	618	12.6
	B	630		
	C	620		
	D	600		
49	A	640	645	59.2
	B	730		
	C	610		
	D	600		
50	A	610	623	32.0
	B	610		
	C	600		
	D	670		
51	A	610	661	64.2
	B	602		
	C	730		
	D	700		
52	A	610	608	8.8
	B	602		
	C	601		
	D	620		
53	A	640	623	12.6
	B	620		
	C	610		
	D	620		
54	A	700	635	44.3
	B	620		
	C	600		
	D	620		
55	A	630	642	39.4
	B	616		
	C	620		
	D	700		
56	A	610	670	92.0
	B	670		
	C	600		
	D	800		
57	A	670	618	35.9
	B	590		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	600		
	D	610		
58	A	600	588	15.0
	B	580		
	C	600		
	D	570		
59	A	640	678	110.0
	B	830		
	C	670		
	D	570		
60	A	560	603	54.4
	B	600		
	C	680		
	D	570		
61	A	580	605	19.1
	B	620		
	C	620		
	D	600		
62	A	520	568	34.0
	B	600		
	C	580		
	D	570		
63	A	600	584	16.5
	B	596		
	C	570		
	D	569		
64	A	610	590	18.3
	B	600		
	C	580		
	D	570		
65	A	620	653	37.7
	B	680		
	C	620		
	D	690		
66	A	580	660	54.8
	B	700		
	C	690		
	D	670		
67	A	750	610	105.5

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	500		
	C	570		
	D	620		
68	A	750	650	96.3
	B	530		
	C	700		
	D	620		
69	A	710	613	70.9
	B	560		
	C	560		
	D	620		
70	A	700	620	84.9
	B	640		
	C	640		
	D	500		
71	A	580	605	68.1
	B	540		
	C	600		
	D	700		
72	A	570	615	58.0
	B	590		
	C	600		
	D	700		
73	A	640	623	79.3
	B	530		
	C	600		
	D	720		
74	A	730	655	79.4
	B	700		
	C	640		
	D	550		
75	A	550	600	70.7
	B	550		
	C	600		
	D	700		
76	A	720	680	67.3
	B	580		
	C	720		
	D	700		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
77	A	770	640	106.1
	B	520		
	C	600		
	D	670		
78	A	540	560	51.0
	B	510		
	C	630		
	D	560		
79	A	520	623	80.2
	B	600		
	C	700		
	D	670		
80	A	580	615	61.9
	B	620		
	C	700		
	D	560		

- *Metal coating* memiliki 80 *Tube* elevasi 23-25 yang sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 221 titik dan yang tidak sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 99 titik.

Tabel 38. Tabel hasil *metal coating* 23-25

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	554	564	18.84
	B	546		
	C	568		
	D	589		
2	A	558	625	51.52
	B	610		
	C	670		
	D	660		
3	A	604	582	14.71
	B	578		
	C	572		
	D	575		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
4	A	550	551	3.77
	B	546		
	C	552		
	D	555		
5	A	600	574	18.93
	B	558		
	C	574		
	D	562		
6	A	594	550	31.85
	B	550		
	C	522		
	D	532		
7	A	528	541	13.74
	B	542		
	C	560		
	D	535		
8	A	540	553	27.25
	B	592		
	C	530		
	D	550		
9	A	578	590	38.62
	B	636		
	C	544		
	D	600		
10	A	556	596	27.83
	B	614		
	C	616		
	D	596		
11	A	638	611	28.77
	B	576		
	C	630		
	D	598		
12	A	578	579	14.74
	B	598		
	C	562		
	D	578		
13	A	564	581	22.66
	B	562		
	C	610		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	588		
14	A	662	668	4.19
	B	669		
	C	672		
	D	668		
15	A	552	574	20.27
	B	596		
	C	562		
	D	585		
16	A	574	590	13.07
	B	596		
	C	604		
	D	585		
17	A	604	623	15.53
	B	618		
	C	640		
	D	630		
18	A	564	596	22.39
	B	604		
	C	616		
	D	600		
19	A	582	576	28.73
	B	612		
	C	544		
	D	565		
20	A	590	595	6.18
	B	602		
	C	590		
	D	599		
21	A	562	590	25.92
	B	622		
	C	598		
	D	578		
22	A	596	598	11.47
	B	612		
	C	584		
	D	598		
23	A	596	608	16.21
	B	628		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	594		
	D	615		
24	A	598	583	15.70
	B	594		
	C	568		
	D	570		
25	A	582	583	15.56
	B	602		
	C	564		
	D	585		
26	A	552	585	29.18
	B	614		
	C	570		
	D	605		
27	A	558	588	31.12
	B	618		
	C	564		
	D	611		
28	A	626	611	17.31
	B	586		
	C	618		
	D	612		
29	A	644	608	29.95
	B	572		
	C	600		
	D	614		
30	A	572	604	39.06
	B	568		
	C	640		
	D	635		
31	A	622	615	23.69
	B	580		
	C	634		
	D	622		
32	A	582	606	27.67
	B	634		
	C	582		
	D	625		
33	A	576	583	9.29

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	594		
	C	574		
	D	586		
34	A	616	600	13.23
	B	584		
	C	602		
	D	597		
35	A	632	623	8.54
	B	612		
	C	626		
	D	620		
36	A	600	621	23.47
	B	652		
	C	606		
	D	626		
37	A	616	611	7.54
	B	600		
	C	616		
	D	611		
38	A	594	606	10.25
	B	600		
	C	616		
	D	612		
39	A	630	658	37.75
	B	690		
	C	620		
	D	690		
40	A	680	663	30.96
	B	620		
	C	690		
	D	660		
41	A	670	660	21.60
	B	660		
	C	680		
	D	630		
42	A	700	663	35.00
	B	620		
	C	650		
	D	680		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
43	A	610	635	44.35
	B	650		
	C	590		
	D	690		
44	A	610	635	56.86
	B	570		
	C	660		
	D	700		
45	A	670	630	48.99
	B	670		
	C	570		
	D	610		
46	A	640	675	25.17
	B	680		
	C	700		
	D	680		
47	A	680	608	51.88
	B	570		
	C	610		
	D	570		
48	A	600	615	44.35
	B	580		
	C	680		
	D	600		
49	A	670	648	40.31
	B	630		
	C	690		
	D	600		
50	A	700	663	38.62
	B	680		
	C	660		
	D	610		
51	A	690	630	46.90
	B	610		
	C	640		
	D	580		
52	A	690	660	35.59
	B	690		
	C	620		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	640		
53	A	610	613	33.04
	B	650		
	C	570		
	D	620		
54	A	700	663	62.38
	B	680		
	C	700		
	D	570		
55	A	650	668	39.48
	B	700		
	C	700		
	D	620		
56	A	660	613	35.94
	B	590		
	C	620		
	D	580		
57	A	620	653	35.94
	B	630		
	C	660		
	D	700		
58	A	650	643	9.57
	B	630		
	C	640		
	D	650		
59	A	570	605	45.09
	B	580		
	C	670		
	D	600		
60	A	640	620	35.59
	B	590		
	C	590		
	D	660		
61	A	700	663	47.87
	B	650		
	C	600		
	D	700		
62	A	580	603	35.94
	B	570		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	610		
	D	650		
63	A	690	633	55.60
	B	670		
	C	590		
	D	580		
64	A	680	668	34.03
	B	620		
	C	700		
	D	670		
65	A	610	650	40.82
	B	690		
	C	680		
	D	620		
66	A	590	615	47.96
	B	570		
	C	620		
	D	680		
67	A	600	620	43.20
	B	620		
	C	580		
	D	680		
68	A	580	615	50.66
	B	680		
	C	630		
	D	570		
69	A	660	613	44.25
	B	640		
	C	580		
	D	570		
70	A	630	628	52.52
	B	580		
	C	700		
	D	600		
71	A	660	665	26.46
	B	680		
	C	690		
	D	630		
72	A	650	650	28.28

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	670		
	C	670		
	D	610		
73	A	670	648	60.76
	B	560		
	C	700		
	D	660		
74	A	660	643	35.00
	B	600		
	C	680		
	D	630		
75	A	640	673	27.54
	B	690		
	C	700		
	D	660		
76	A	570	613	43.49
	B	580		
	C	650		
	D	650		
77	A	700	633	53.77
	B	600		
	C	580		
	D	650		
78	A	680	663	30.96
	B	620		
	C	690		
	D	660		
79	A	670	660	21.60
	B	660		
	C	680		
	D	630		
80	A	630	658	37.75
	B	690		
	C	620		
	D	690		

- *Metal coating* keseluruhan yang sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 395 titik dan yang tidak sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 225 titik.

Tabel 39. Tabel hasil *metal coating* keseluruhan

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	882	827	175
	B	831		
	C	1006		
	D	589		
2	A	784	917	86
	B	730		
	C	588		
	D	650		
3	A	650	966	187
	B	1004		
	C	635		
	D	610		
4	A	660	996	190
	B	690		
	C	1028		
	D	610		
5	A	737	890	68
	B	604		
	C	715		
	D	614		
6	A	698	929	87
	B	817		
	C	658		
	D	615		
7	A	780	917	71
	B	610		
	C	663		
	D	698		
8	A	612	900	61
	B	669		
	C	758		
	D	660		
9	A	638	836	12
	B	634		
	C	610		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	625		
10	A	700	892	42
	B	669		
	C	610		
	D	698		
11	A	643	854	8
	B	640		
	C	630		
	D	648		
12	A	645	909	128
	B	869		
	C	634		
	D	578		
13	A	611	849	59
	B	625		
	C	723		
	D	588		
14	A	687	867	39
	B	596		
	C	649		
	D	668		
15	A	652	898	20
	B	696		
	C	662		
	D	685		
16	A	645	835	49
	B	588		
	C	686		
	D	585		
17	A	620	841	47
	B	693		
	C	580		
	D	630		
18	A	665	869	35
	B	680		
	C	663		
	D	600		
19	A	780	907	71
	B	612		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	663		
	D	665		
20	A	930	988	157
	B	626		
	C	808		
	D	599		
21	A	645	887	85
	B	655		
	C	782		
	D	578		
22	A	596	797	11
	B	612		
	C	584		
	D	598		
23	A	950	1078	106
	B	780		
	C	811		
	D	694		
24	A	668	907	16
	B	670		
	C	682		
	D	702		
25	A	664	905	27
	B	685		
	C	652		
	D	714		
26	A	670	917	28
	B	705		
	C	658		
	D	718		
27	A	664	929	27
	B	711		
	C	726		
	D	686		
28	A	718	949	30
	B	712		
	C	744		
	D	672		
29	A	700	918	22

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	714		
	C	672		
	D	668		
30	A	740	959	27
	B	735		
	C	722		
	D	680		
31	A	734	957	25
	B	722		
	C	682		
	D	734		
32	A	682	926	22
	B	725		
	C	676		
	D	694		
33	A	674	920	18
	B	686		
	C	716		
	D	684		
34	A	702	948	15
	B	697		
	C	732		
	D	712		
35	A	726	966	21
	B	720		
	C	700		
	D	752		
36	A	706	949	11
	B	726		
	C	716		
	D	700		
37	A	716	940	10
	B	711		
	C	694		
	D	700		
38	A	716	919	46
	B	712		
	C	710		
	D	620		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
39	A	800	907	91
	B	700		
	C	600		
	D	620		
40	A	626	823	13
	B	610		
	C	630		
	D	602		
41	A	600	860	53
	B	700		
	C	680		
	D	600		
42	A	720	950	74
	B	620		
	C	800		
	D	710		
43	A	620	843	15
	B	620		
	C	640		
	D	650		
44	A	650	861	40
	B	620		
	C	700		
	D	612		
45	A	620	857	40
	B	610		
	C	700		
	D	640		
46	A	620	861	41
	B	653		
	C	610		
	D	700		
47	A	620	870	36
	B	660		
	C	630		
	D	700		
48	A	620	823	13
	B	630		
	C	620		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	600		
49	A	640	860	59
	B	730		
	C	610		
	D	600		
50	A	610	830	32
	B	610		
	C	600		
	D	670		
51	A	610	881	64
	B	602		
	C	730		
	D	700		
52	A	610	811	9
	B	602		
	C	601		
	D	620		
53	A	640	830	13
	B	620		
	C	610		
	D	620		
54	A	700	847	44
	B	620		
	C	600		
	D	620		
55	A	630	855	39
	B	616		
	C	620		
	D	700		
56	A	610	893	92
	B	670		
	C	600		
	D	800		
57	A	670	823	36
	B	590		
	C	600		
	D	610		
58	A	600	783	15
	B	580		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	600		
	D	570		
59	A	640	903	110
	B	830		
	C	670		
	D	570		
60	A	560	803	54
	B	600		
	C	680		
	D	570		
61	A	580	807	19
	B	620		
	C	620		
	D	600		
62	A	520	757	34
	B	600		
	C	580		
	D	570		
63	A	600	778	17
	B	596		
	C	570		
	D	569		
64	A	610	787	18
	B	600		
	C	580		
	D	570		
65	A	620	870	38
	B	680		
	C	620		
	D	690		
66	A	580	880	55
	B	700		
	C	690		
	D	670		
67	A	750	813	106
	B	500		
	C	570		
	D	620		
68	A	750	867	96

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	530		
	C	700		
	D	620		
69	A	710	817	71
	B	560		
	C	560		
	D	620		
70	A	700	827	85
	B	640		
	C	640		
	D	500		
71	A	580	807	68
	B	540		
	C	600		
	D	700		
72	A	570	820	58
	B	590		
	C	600		
	D	700		
73	A	640	830	79
	B	530		
	C	600		
	D	720		
74	A	730	873	79
	B	700		
	C	640		
	D	550		
75	A	550	800	71
	B	550		
	C	600		
	D	700		
76	A	720	907	67
	B	580		
	C	720		
	D	700		
77	A	770	853	106
	B	520		
	C	600		
	D	670		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
78	A	540	747	51
	B	510		
	C	630		
	D	560		
79	A	520	830	80
	B	600		
	C	700		
	D	670		
80	A	580	820	62
	B	620		
	C	700		
	D	560		
81	A	554	564	19
	B	546		
	C	568		
	D	589		
82	A	558	625	52
	B	610		
	C	670		
	D	660		
83	A	604	582	15
	B	578		
	C	572		
	D	575		
84	A	550	551	4
	B	546		
	C	552		
	D	555		
85	A	600	574	19
	B	558		
	C	574		
	D	562		
86	A	594	550	32
	B	550		
	C	522		
	D	532		
87	A	528	541	14
	B	542		
	C	560		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	535		
88	A	540	553	27
	B	592		
	C	530		
	D	550		
89	A	578	590	39
	B	636		
	C	544		
	D	600		
90	A	556	596	28
	B	614		
	C	616		
	D	596		
91	A	638	611	29
	B	576		
	C	630		
	D	598		
92	A	578	579	15
	B	598		
	C	562		
	D	578		
93	A	564	581	23
	B	562		
	C	610		
	D	588		
94	A	662	668	4
	B	669		
	C	672		
	D	668		
95	A	552	574	20
	B	596		
	C	562		
	D	585		
96	A	574	590	13
	B	596		
	C	604		
	D	585		
97	A	604	623	16
	B	618		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	640		
	D	630		
98	A	564	596	22
	B	604		
	C	616		
	D	600		
99	A	582	576	29
	B	612		
	C	544		
	D	565		
100	A	590	595	6
	B	602		
	C	590		
	D	599		
101	A	562	590	26
	B	622		
	C	598		
	D	578		
102	A	596	598	11
	B	612		
	C	584		
	D	598		
103	A	596	608	16
	B	628		
	C	594		
	D	615		
104	A	598	583	16
	B	594		
	C	568		
	D	570		
105	A	582	583	16
	B	602		
	C	564		
	D	585		
106	A	552	585	29
	B	614		
	C	570		
	D	605		
107	A	558	588	31

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	618		
	C	564		
	D	611		
108	A	626	611	17
	B	586		
	C	618		
	D	612		
109	A	644	608	30
	B	572		
	C	600		
	D	614		
110	A	572	604	39
	B	568		
	C	640		
	D	635		
111	A	622	615	24
	B	580		
	C	634		
	D	622		
112	A	582	606	28
	B	634		
	C	582		
	D	625		
113	A	576	583	9
	B	594		
	C	574		
	D	586		
114	A	616	600	13
	B	584		
	C	602		
	D	597		
115	A	632	623	9
	B	612		
	C	626		
	D	620		
116	A	600	621	23
	B	652		
	C	606		
	D	626		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
117	A	616	611	8
	B	600		
	C	616		
	D	611		
118	A	594	606	10
	B	600		
	C	616		
	D	612		
119	A	630	658	38
	B	690		
	C	620		
	D	690		
120	A	680	663	31
	B	620		
	C	690		
	D	660		
121	A	670	660	22
	B	660		
	C	680		
	D	630		
122	A	700	663	35
	B	620		
	C	650		
	D	680		
123	A	610	635	44
	B	650		
	C	590		
	D	690		
124	A	610	635	57
	B	570		
	C	660		
	D	700		
125	A	670	630	49
	B	670		
	C	570		
	D	610		
126	A	640	675	25
	B	680		
	C	700		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	680		
127	A	680	608	52
	B	570		
	C	610		
	D	570		
128	A	600	615	44
	B	580		
	C	680		
	D	600		
129	A	670	648	40
	B	630		
	C	690		
	D	600		
130	A	700	663	39
	B	680		
	C	660		
	D	610		
131	A	690	630	47
	B	610		
	C	640		
	D	580		
132	A	690	660	36
	B	690		
	C	620		
	D	640		
133	A	610	613	33
	B	650		
	C	570		
	D	620		
134	A	700	663	62
	B	680		
	C	700		
	D	570		
135	A	650	668	39
	B	700		
	C	700		
	D	620		
136	A	660	613	36
	B	590		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	620		
	D	580		
137	A	620	653	36
	B	630		
	C	660		
	D	700		
138	A	650	643	10
	B	630		
	C	640		
	D	650		
139	A	570	605	45
	B	580		
	C	670		
	D	600		
140	A	640	620	36
	B	590		
	C	590		
	D	660		
141	A	700	663	48
	B	650		
	C	600		
	D	700		
142	A	580	603	36
	B	570		
	C	610		
	D	650		
143	A	690	633	56
	B	670		
	C	590		
	D	580		
144	A	680	668	34
	B	620		
	C	700		
	D	670		
145	A	610	650	41
	B	690		
	C	680		
	D	620		
146	A	590	615	48

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	570		
	C	620		
	D	680		
147	A	600	620	43
	B	620		
	C	580		
	D	680		
148	A	580	615	51
	B	680		
	C	630		
	D	570		
149	A	660	613	44
	B	640		
	C	580		
	D	570		
150	A	630	628	53
	B	580		
	C	700		
	D	600		
151	A	660	665	26
	B	680		
	C	690		
	D	630		
152	A	650	650	28
	B	670		
	C	670		
	D	610		
153	A	670	648	61
	B	560		
	C	700		
	D	660		
154	A	660	643	35
	B	600		
	C	680		
	D	630		
155	A	640	673	28
	B	690		
	C	700		
	D	660		

Measurement Wall Thickness After Metal Spray Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Metal Spray pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
156	A	570	613	43
	B	580		
	C	650		
	D	650		
157	A	700	633	54
	B	600		
	C	580		
	D	650		
158	A	680	663	31
	B	620		
	C	690		
	D	660		
159	A	670	660	22
	B	660		
	C	680		
	D	630		
160	A	630	658	38
	B	690		
	C	620		
	D	690		

3. Data hasil ceramic coating

- *Ceramic Coating* memiliki 80 *Tube* elevasi 16-18 yang sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 162 titik dan yang tidak sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 158 titik.

Tabel 40. Tabel Pengukuran *ceramic coating* elevasi 16-18

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	940	805	134
	B	890		
	C	740		
	D	650		
2	A	650	695	70
	B	620		
	C	750		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	760		
3	A	630	833	156
	B	1000		
	C	810		
	D	890		
4	A	920	873	95
	B	910		
	C	930		
	D	730		
5	A	900	803	118
	B	880		
	C	790		
	D	640		
6	A	640	755	90
	B	750		
	C	770		
	D	860		
7	A	860	790	148
	B	960		
	C	710		
	D	630		
8	A	800	783	71
	B	870		
	C	760		
	D	700		
9	A	930	848	133
	B	890		
	C	650		
	D	920		
10	A	810	808	46
	B	760		
	C	870		
	D	790		
11	A	750	863	148
	B	980		
	C	1000		
	D	720		
12	A	620	798	135
	B	810		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	810		
	D	950		
13	A	880	798	172
	B	650		
	C	660		
	D	1000		
14	A	700	788	144
	B	1000		
	C	700		
	D	750		
15	A	940	815	113
	B	880		
	C	710		
	D	730		
16	A	690	853	150
	B	980		
	C	980		
	D	760		
17	A	990	855	149
	B	670		
	C	800		
	D	960		
18	A	780	755	33
	B	750		
	C	710		
	D	780		
19	A	650	823	121
	B	840		
	C	930		
	D	870		
20	A	770	848	105
	B	790		
	C	1000		
	D	830		
21	A	930	848	97
	B	930		
	C	740		
	D	790		
22	A	740	720	67

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	760		
	C	620		
	D	760		
23	A	910	823	136
	B	620		
	C	880		
	D	880		
24	A	730	690	52
	B	680		
	C	620		
	D	730		
25	A	810	765	114
	B	740		
	C	620		
	D	890		
26	A	870	888	28
	B	905		
	C	858		
	D	918		
27	A	864	897	27
	B	911		
	C	926		
	D	886		
28	A	918	912	30
	B	912		
	C	944		
	D	872		
29	A	900	889	22
	B	914		
	C	872		
	D	868		
30	A	940	919	27
	B	935		
	C	922		
	D	880		
31	A	934	918	25
	B	922		
	C	882		
	D	934		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
32	A	882	894	22
	B	925		
	C	876		
	D	894		
33	A	874	890	18
	B	886		
	C	916		
	D	884		
34	A	902	911	15
	B	897		
	C	932		
	D	912		
35	A	926	925	21
	B	920		
	C	900		
	D	952		
36	A	906	912	11
	B	926		
	C	916		
	D	900		
37	A	916	905	10
	B	911		
	C	894		
	D	900		
38	A	916	890	46
	B	912		
	C	910		
	D	820		
39	A	1000	880	91
	B	900		
	C	800		
	D	820		
40	A	826	817	13
	B	810		
	C	830		
	D	802		
41	A	800	845	53
	B	900		
	C	880		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (µm)	Rata-rata	Deviasi
	D	800		
42	A	920	913	74
	B	820		
	C	1000		
	D	910		
43	A	820	833	15
	B	820		
	C	840		
	D	850		
44	A	850	846	40
	B	820		
	C	900		
	D	812		
45	A	820	843	40
	B	810		
	C	900		
	D	840		
46	A	820	846	41
	B	853		
	C	810		
	D	900		
47	A	820	853	36
	B	860		
	C	830		
	D	900		
48	A	820	818	13
	B	830		
	C	820		
	D	800		
49	A	840	845	59
	B	930		
	C	810		
	D	800		
50	A	810	823	32
	B	810		
	C	800		
	D	870		
51	A	810	861	64
	B	802		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	930		
	D	900		
52	A	810	808	9
	B	802		
	C	801		
	D	820		
53	A	840	823	13
	B	820		
	C	810		
	D	820		
54	A	900	835	44
	B	820		
	C	800		
	D	820		
55	A	830	842	39
	B	816		
	C	820		
	D	900		
56	A	810	870	92
	B	870		
	C	800		
	D	1000		
57	A	870	818	36
	B	790		
	C	800		
	D	810		
58	A	800	788	15
	B	780		
	C	800		
	D	770		
59	A	840	878	110
	B	1030		
	C	870		
	D	770		
60	A	760	803	54
	B	800		
	C	880		
	D	770		
61	A	780	805	19

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (µm)	Rata-rata	Deviasi
	B	820		
	C	820		
	D	800		
62	A	720	768	34
	B	800		
	C	780		
	D	770		
63	A	800	784	17
	B	796		
	C	770		
	D	769		
64	A	810	790	18
	B	800		
	C	780		
	D	770		
65	A	820	853	38
	B	880		
	C	820		
	D	890		
66	A	780	860	55
	B	900		
	C	890		
	D	870		
67	A	950	810	106
	B	700		
	C	770		
	D	820		
68	A	950	850	96
	B	730		
	C	900		
	D	820		
69	A	910	813	71
	B	760		
	C	760		
	D	820		
70	A	900	820	85
	B	840		
	C	840		
	D	700		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
71	A	780	805	68
	B	740		
	C	800		
	D	900		
72	A	770	815	58
	B	790		
	C	800		
	D	900		
73	A	840	823	79
	B	730		
	C	800		
	D	920		
74	A	930	855	79
	B	900		
	C	840		
	D	750		
75	A	750	800	71
	B	750		
	C	800		
	D	900		
76	A	920	880	67
	B	780		
	C	920		
	D	900		
77	A	970	840	106
	B	720		
	C	800		
	D	870		
78	A	740	760	51
	B	710		
	C	830		
	D	760		
79	A	720	823	80
	B	800		
	C	900		
	D	870		
80	A	780	815	62
	B	820		
	C	900		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 16-18				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	760		

- *Ceramic Coating* memiliki 80 *Tube* elevasi 23-25 yang sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 209 titik dan yang tidak sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 111 titik.

Tabel 41. Data *ceramic coating* elevasi 23-25

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	750	713	35
	B	670		
	C	700		
	D	730		
2	A	660	685	44
	B	700		
	C	640		
	D	740		
3	A	660	685	57
	B	620		
	C	710		
	D	750		
4	A	720	680	49
	B	720		
	C	620		
	D	660		
5	A	690	725	25
	B	730		
	C	750		
	D	730		
6	A	730	658	52
	B	620		
	C	660		
	D	620		
7	A	650	665	44
	B	630		
	C	730		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	650		
8	A	720	698	40
	B	680		
	C	740		
	D	650		
9	A	750	713	39
	B	730		
	C	710		
	D	660		
10	A	740	680	47
	B	660		
	C	690		
	D	630		
11	A	740	710	36
	B	740		
	C	670		
	D	690		
12	A	660	663	33
	B	700		
	C	620		
	D	670		
13	A	750	713	62
	B	730		
	C	750		
	D	620		
14	A	700	718	39
	B	750		
	C	750		
	D	670		
15	A	710	663	36
	B	640		
	C	670		
	D	630		
16	A	670	703	36
	B	680		
	C	710		
	D	750		
17	A	700	693	10
	B	680		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	690		
	D	700		
18	A	620	655	45
	B	630		
	C	720		
	D	650		
19	A	690	670	36
	B	640		
	C	640		
	D	710		
20	A	750	713	48
	B	700		
	C	650		
	D	750		
21	A	630	653	36
	B	620		
	C	660		
	D	700		
22	A	740	683	56
	B	720		
	C	640		
	D	630		
23	A	730	718	34
	B	670		
	C	750		
	D	720		
24	A	660	700	41
	B	740		
	C	730		
	D	670		
25	A	640	665	48
	B	620		
	C	670		
	D	730		
26	A	650	670	43
	B	670		
	C	630		
	D	730		
27	A	630	665	51

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	730		
	C	680		
	D	620		
28	A	710	663	44
	B	690		
	C	630		
	D	620		
29	A	680	678	53
	B	630		
	C	750		
	D	650		
30	A	710	715	26
	B	730		
	C	740		
	D	680		
31	A	700	700	28
	B	720		
	C	720		
	D	660		
32	A	720	698	61
	B	610		
	C	750		
	D	710		
33	A	710	693	35
	B	650		
	C	730		
	D	680		
34	A	690	723	28
	B	740		
	C	750		
	D	710		
35	A	620	663	43
	B	630		
	C	700		
	D	700		
36	A	750	683	54
	B	650		
	C	630		
	D	700		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
37	A	730	713	31
	B	670		
	C	740		
	D	710		
38	A	720	710	22
	B	710		
	C	730		
	D	680		
39	A	680	708	38
	B	740		
	C	670		
	D	740		
40	A	580	563	31
	B	520		
	C	590		
	D	560		
41	A	570	560	22
	B	560		
	C	580		
	D	530		
42	A	600	563	35
	B	520		
	C	550		
	D	580		
43	A	510	535	44
	B	550		
	C	490		
	D	590		
44	A	510	535	57
	B	470		
	C	560		
	D	600		
45	A	570	530	49
	B	570		
	C	470		
	D	510		
46	A	540	575	25
	B	580		
	C	600		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	580		
47	A	580	508	52
	B	470		
	C	510		
	D	470		
48	A	500	515	44
	B	480		
	C	580		
	D	500		
49	A	570	548	40
	B	530		
	C	590		
	D	500		
50	A	600	563	39
	B	580		
	C	560		
	D	510		
51	A	590	530	47
	B	510		
	C	540		
	D	480		
52	A	590	560	36
	B	590		
	C	520		
	D	540		
53	A	510	513	33
	B	550		
	C	470		
	D	520		
54	A	600	563	62
	B	580		
	C	600		
	D	470		
55	A	550	568	39
	B	600		
	C	600		
	D	520		
56	A	560	513	36
	B	490		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	520		
	D	480		
57	A	520	553	36
	B	530		
	C	560		
	D	600		
58	A	550	543	10
	B	530		
	C	540		
	D	550		
59	A	470	505	45
	B	480		
	C	570		
	D	500		
60	A	540	520	36
	B	490		
	C	490		
	D	560		
61	A	600	563	48
	B	550		
	C	500		
	D	600		
62	A	480	503	36
	B	470		
	C	510		
	D	550		
63	A	590	533	56
	B	570		
	C	490		
	D	480		
64	A	580	568	34
	B	520		
	C	600		
	D	570		
65	A	510	550	41
	B	590		
	C	580		
	D	520		
66	A	490	515	48

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	470		
	C	520		
	D	580		
67	A	500	520	43
	B	520		
	C	480		
	D	580		
68	A	480	515	51
	B	580		
	C	530		
	D	470		
69	A	560	513	44
	B	540		
	C	480		
	D	470		
70	A	530	528	53
	B	480		
	C	600		
	D	500		
71	A	560	565	26
	B	580		
	C	590		
	D	530		
72	A	550	550	28
	B	570		
	C	570		
	D	510		
73	A	570	548	61
	B	460		
	C	600		
	D	560		
74	A	560	543	35
	B	500		
	C	580		
	D	530		
75	A	540	573	28
	B	590		
	C	600		
	D	560		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall Elv 23-25				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
76	A	470	513	43
	B	480		
	C	550		
	D	550		
77	A	600	533	54
	B	500		
	C	480		
	D	550		
78	A	580	563	31
	B	520		
	C	590		
	D	560		
79	A	570	560	22
	B	560		
	C	580		
	D	530		
80	A	530	558	38
	B	590		
	C	520		
	D	590		

- *Ceramic Coating* keseluruhan yang sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 159 titik dan yang tidak sesuai dengan dokumen pengadaan yaitu 481 titik.

Tabel 42. Tabel hasil *ceramic coating* keseluruhan

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
1	A	940	805	134
	B	890		
	C	740		
	D	650		
2	A	650	695	70
	B	620		
	C	750		
	D	760		
3	A	630	833	156
	B	1000		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	810		
	D	890		
4	A	920	873	95
	B	910		
	C	930		
	D	730		
5	A	900	803	118
	B	880		
	C	790		
	D	640		
6	A	640	755	90
	B	750		
	C	770		
	D	860		
7	A	860	790	148
	B	960		
	C	710		
	D	630		
8	A	800	783	71
	B	870		
	C	760		
	D	700		
9	A	930	848	133
	B	890		
	C	650		
	D	920		
10	A	810	808	46
	B	760		
	C	870		
	D	790		
11	A	750	863	148
	B	980		
	C	1000		
	D	720		
12	A	620	798	135
	B	810		
	C	810		
	D	950		
13	A	880	798	172

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	650		
	C	660		
	D	1000		
14	A	700	788	144
	B	1000		
	C	700		
	D	750		
15	A	940	815	113
	B	880		
	C	710		
	D	730		
16	A	690	853	150
	B	980		
	C	980		
	D	760		
17	A	990	855	149
	B	670		
	C	800		
	D	960		
18	A	780	755	33
	B	750		
	C	710		
	D	780		
19	A	650	823	121
	B	840		
	C	930		
	D	870		
20	A	770	848	105
	B	790		
	C	1000		
	D	830		
21	A	930	848	97
	B	930		
	C	740		
	D	790		
22	A	740	720	67
	B	760		
	C	620		
	D	760		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
23	A	910	823	136
	B	620		
	C	880		
	D	880		
24	A	730	690	52
	B	680		
	C	620		
	D	730		
25	A	810	765	114
	B	740		
	C	620		
	D	890		
26	A	870	888	28
	B	905		
	C	858		
	D	918		
27	A	864	897	27
	B	911		
	C	926		
	D	886		
28	A	918	912	30
	B	912		
	C	944		
	D	872		
29	A	900	889	22
	B	914		
	C	872		
	D	868		
30	A	940	919	27
	B	935		
	C	922		
	D	880		
31	A	934	918	25
	B	922		
	C	882		
	D	934		
32	A	882	894	22
	B	925		
	C	876		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	894		
33	A	874	890	18
	B	886		
	C	916		
	D	884		
34	A	902	911	15
	B	897		
	C	932		
	D	912		
35	A	926	925	21
	B	920		
	C	900		
	D	952		
36	A	906	912	11
	B	926		
	C	916		
	D	900		
37	A	916	905	10
	B	911		
	C	894		
	D	900		
38	A	916	890	46
	B	912		
	C	910		
	D	820		
39	A	1000	880	91
	B	900		
	C	800		
	D	820		
40	A	826	817	13
	B	810		
	C	830		
	D	802		
41	A	800	845	53
	B	900		
	C	880		
	D	800		
42	A	920	913	74
	B	820		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	1000		
	D	910		
43	A	820	833	15
	B	820		
	C	840		
	D	850		
44	A	850	846	40
	B	820		
	C	900		
	D	812		
45	A	820	843	40
	B	810		
	C	900		
	D	840		
46	A	820	846	41
	B	853		
	C	810		
	D	900		
47	A	820	853	36
	B	860		
	C	830		
	D	900		
48	A	820	818	13
	B	830		
	C	820		
	D	800		
49	A	840	845	59
	B	930		
	C	810		
	D	800		
50	A	810	823	32
	B	810		
	C	800		
	D	870		
51	A	810	861	64
	B	802		
	C	930		
	D	900		
52	A	810	808	9

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	802		
	C	801		
	D	820		
53	A	840	823	13
	B	820		
	C	810		
	D	820		
54	A	900	835	44
	B	820		
	C	800		
	D	820		
55	A	830	842	39
	B	816		
	C	820		
	D	900		
56	A	810	870	92
	B	870		
	C	800		
	D	1000		
57	A	870	818	36
	B	790		
	C	800		
	D	810		
58	A	800	788	15
	B	780		
	C	800		
	D	770		
59	A	840	878	110
	B	1030		
	C	870		
	D	770		
60	A	760	803	54
	B	800		
	C	880		
	D	770		
61	A	780	805	19
	B	820		
	C	820		
	D	800		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
62	A	720	768	34
	B	800		
	C	780		
	D	770		
63	A	800	784	17
	B	796		
	C	770		
	D	769		
64	A	810	790	18
	B	800		
	C	780		
	D	770		
65	A	820	853	38
	B	880		
	C	820		
	D	890		
66	A	780	860	55
	B	900		
	C	890		
	D	870		
67	A	950	810	106
	B	700		
	C	770		
	D	820		
68	A	950	850	96
	B	730		
	C	900		
	D	820		
69	A	910	813	71
	B	760		
	C	760		
	D	820		
70	A	900	820	85
	B	840		
	C	840		
	D	700		
71	A	780	805	68
	B	740		
	C	800		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	900		
72	A	770	815	58
	B	790		
	C	800		
	D	900		
73	A	840	823	79
	B	730		
	C	800		
	D	920		
74	A	930	855	79
	B	900		
	C	840		
	D	750		
75	A	750	800	71
	B	750		
	C	800		
	D	900		
76	A	920	880	67
	B	780		
	C	920		
	D	900		
77	A	970	840	106
	B	720		
	C	800		
	D	870		
78	A	740	760	51
	B	710		
	C	830		
	D	760		
79	A	720	823	80
	B	800		
	C	900		
	D	870		
80	A	780	815	62
	B	820		
	C	900		
	D	760		
81	A	750	713	35
	B	670		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	700		
	D	730		
82	A	660	685	44
	B	700		
	C	640		
	D	740		
83	A	660	685	57
	B	620		
	C	710		
	D	750		
84	A	720	680	49
	B	720		
	C	620		
	D	660		
85	A	690	725	25
	B	730		
	C	750		
	D	730		
86	A	730	658	52
	B	620		
	C	660		
	D	620		
87	A	650	665	44
	B	630		
	C	730		
	D	650		
88	A	720	698	40
	B	680		
	C	740		
	D	650		
89	A	750	713	39
	B	730		
	C	710		
	D	660		
90	A	740	680	47
	B	660		
	C	690		
	D	630		
91	A	740	710	36

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	740		
	C	670		
	D	690		
92	A	660	663	33
	B	700		
	C	620		
	D	670		
93	A	750	713	62
	B	730		
	C	750		
	D	620		
94	A	700	718	39
	B	750		
	C	750		
	D	670		
95	A	710	663	36
	B	640		
	C	670		
	D	630		
96	A	670	703	36
	B	680		
	C	710		
	D	750		
97	A	700	693	10
	B	680		
	C	690		
	D	700		
98	A	620	655	45
	B	630		
	C	720		
	D	650		
99	A	690	670	36
	B	640		
	C	640		
	D	710		
100	A	750	713	48
	B	700		
	C	650		
	D	750		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
101	A	630	653	36
	B	620		
	C	660		
	D	700		
102	A	740	683	56
	B	720		
	C	640		
	D	630		
103	A	730	718	34
	B	670		
	C	750		
	D	720		
104	A	660	700	41
	B	740		
	C	730		
	D	670		
105	A	640	665	48
	B	620		
	C	670		
	D	730		
106	A	650	670	43
	B	670		
	C	630		
	D	730		
107	A	630	665	51
	B	730		
	C	680		
	D	620		
108	A	710	663	44
	B	690		
	C	630		
	D	620		
109	A	680	678	53
	B	630		
	C	750		
	D	650		
110	A	710	715	26
	B	730		
	C	740		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	680		
111	A	700	700	28
	B	720		
	C	720		
	D	660		
112	A	720	698	61
	B	610		
	C	750		
	D	710		
113	A	710	693	35
	B	650		
	C	730		
	D	680		
114	A	690	723	28
	B	740		
	C	750		
	D	710		
115	A	620	663	43
	B	630		
	C	700		
	D	700		
116	A	750	683	54
	B	650		
	C	630		
	D	700		
117	A	730	713	31
	B	670		
	C	740		
	D	710		
118	A	720	710	22
	B	710		
	C	730		
	D	680		
119	A	680	708	38
	B	740		
	C	670		
	D	740		
120	A	580	563	31
	B	520		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	590		
	D	560		
121	A	570	560	22
	B	560		
	C	580		
	D	530		
122	A	600	563	35
	B	520		
	C	550		
	D	580		
123	A	510	535	44
	B	550		
	C	490		
	D	590		
124	A	510	535	57
	B	470		
	C	560		
	D	600		
125	A	570	530	49
	B	570		
	C	470		
	D	510		
126	A	540	575	25
	B	580		
	C	600		
	D	580		
127	A	580	508	52
	B	470		
	C	510		
	D	470		
128	A	500	515	44
	B	480		
	C	580		
	D	500		
129	A	570	548	40
	B	530		
	C	590		
	D	500		
130	A	600	563	39

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	B	580		
	C	560		
	D	510		
131	A	590	530	47
	B	510		
	C	540		
	D	480		
132	A	590	560	36
	B	590		
	C	520		
	D	540		
133	A	510	513	33
	B	550		
	C	470		
	D	520		
134	A	600	563	62
	B	580		
	C	600		
	D	470		
135	A	550	568	39
	B	600		
	C	600		
	D	520		
136	A	560	513	36
	B	490		
	C	520		
	D	480		
137	A	520	553	36
	B	530		
	C	560		
	D	600		
138	A	550	543	10
	B	530		
	C	540		
	D	550		
139	A	470	505	45
	B	480		
	C	570		
	D	500		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
140	A	540	520	36
	B	490		
	C	490		
	D	560		
141	A	600	563	48
	B	550		
	C	500		
	D	600		
142	A	480	503	36
	B	470		
	C	510		
	D	550		
143	A	590	533	56
	B	570		
	C	490		
	D	480		
144	A	580	568	34
	B	520		
	C	600		
	D	570		
145	A	510	550	41
	B	590		
	C	580		
	D	520		
146	A	490	515	48
	B	470		
	C	520		
	D	580		
147	A	500	520	43
	B	520		
	C	480		
	D	580		
148	A	480	515	51
	B	580		
	C	530		
	D	470		
149	A	560	513	44
	B	540		
	C	480		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	D	470		
150	A	530	528	53
	B	480		
	C	600		
	D	500		
151	A	560	565	26
	B	580		
	C	590		
	D	530		
152	A	550	550	28
	B	570		
	C	570		
	D	510		
153	A	570	548	61
	B	460		
	C	600		
	D	560		
154	A	560	543	35
	B	500		
	C	580		
	D	530		
155	A	540	573	28
	B	590		
	C	600		
	D	560		
156	A	470	513	43
	B	480		
	C	550		
	D	550		
157	A	600	533	54
	B	500		
	C	480		
	D	550		
158	A	580	563	31
	B	520		
	C	590		
	D	560		
159	A	570	560	22
	B	560		

Measurement Wall Thickness After Ceramic Coating Left Wall				
No Tube	Position Point	Ketebalan Ceramic Coating pada Tube (μm)	Rata-rata	Deviasi
	C	580		
	D	530		
160	A	530	558	38
	B	590		
	C	520		
	D	590		

1. Foto Kegiatan

a) Lokasi Penelitian di PLTU Teluk Sirih 2x112 Mw Team LAPI Ganesha



Gambar 61. Lokasi penelitian PLTU Teluk Sirih 2x112 Mw team LAPI Ganesha

b) Mengukur Capping



Gambar 62. Mengukur capping

c) Mengukur V-Grove



Gambar 63. Mengukur V-grove

d) Mengukur *Hi-Lo*

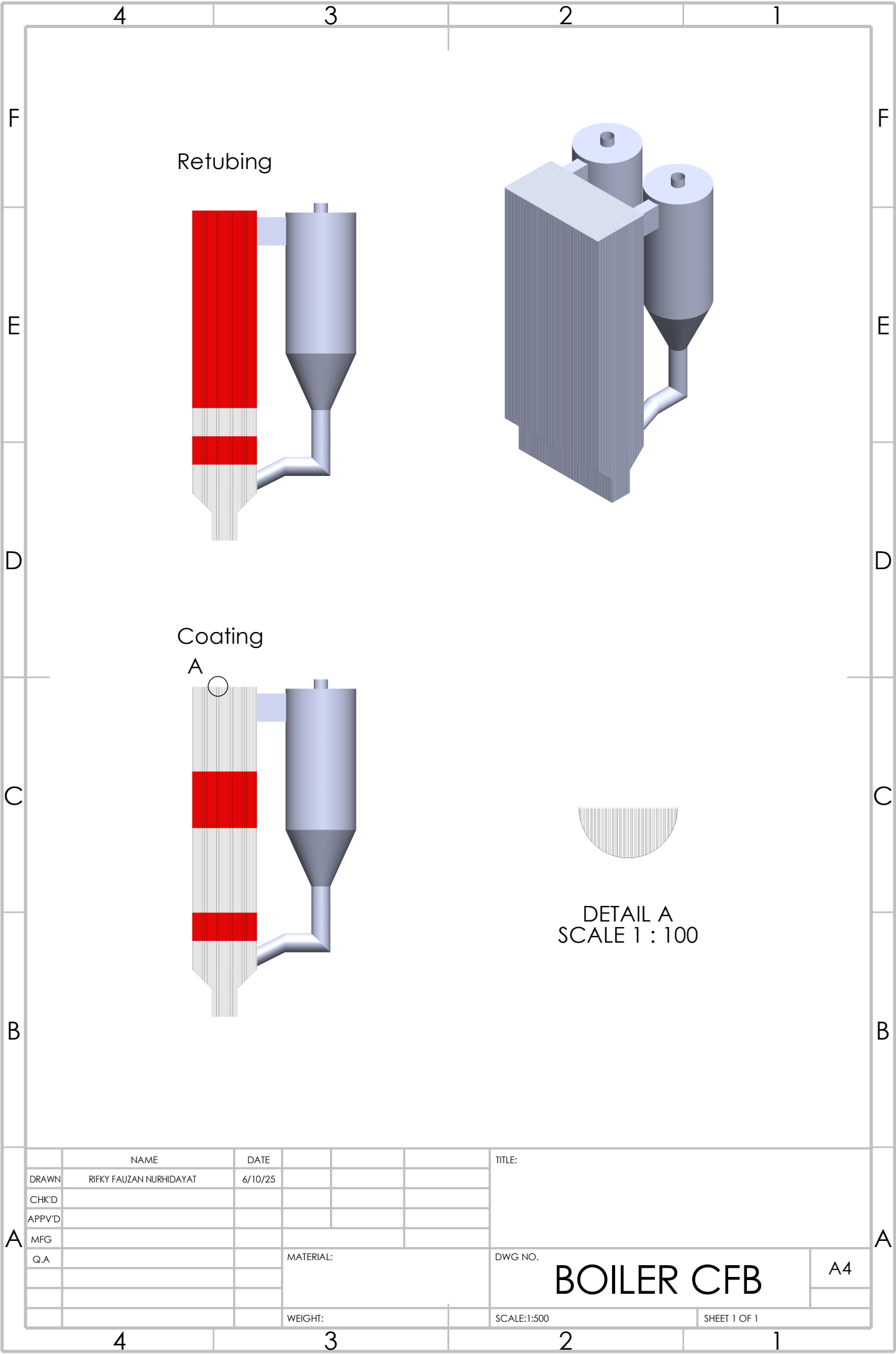


Gambar 64. Mengukur *hi-lo*

e) Mengukur GAP



Gambar 65. Mengukur GAP



	NAME	DATE			
DRAWN	RIFKY FAUZAN NURHIDAYAT	6/10/25			
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

DWG NO.

SCALE:1:500

SHEET 1 OF 1

DETAIL A
SCALE 1 : 100

BOILER CFB

A4