

**Rancang bangun perangkat kendali pada mesin
pemindai 3D tipe cincin orbital dan analisis
pengaruh parameter teknis terhadap kualitas
model 3D**

*Design and development of a control device for a 3D scanning
machine with an orbital ring mechanism and analysis of the effects
of technical parameters on 3D model quality*

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Wylsen Wijaya
NPM : 223030012



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2026**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Wylsen Wijaya

Nomor Pokok Mahasiswa : 223030012

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

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

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apa pun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 28 Februari 2026

Penulis,



Wylsen Wijaya

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

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

N a m a : Wylsen Wijaya
NPM : 223030012
Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS
Jenis Karya : Skripsi

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

“Rancang bangun perangkat kendali pada mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dan analisis pengaruh parameter teknis terhadap kualitas model 3D.”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan yang sebenarnya.

Bandung, 28 Februari 2026

Yang menyatakan,



Wylsen Wijaya

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Rancang bangun perangkat kendali pada mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dan analisis pengaruh parameter teknis terhadap kualitas model 3D



Nama: Wylsen Wijaya
NPM : 223030012

Pembimbing Utama

Dr. Ir. H. Rachmad Hartono, M.T.

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Ade Bagdja, MME.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Rancang bangun perangkat kendali pada mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dan analisis pengaruh parameter teknis terhadap kualitas model 3D



Nama: Wylsen Wijaya
NPM : 223030012

Tanggal sidang skripsi: 29 Juni 2026

Ketua : Dr. Ir. H. Rachmad Hartono, M.T.

Sekretaris : Dr. Ir. Ade Bagdja, MME.

Anggota : Ir. Bukti Tarigan, M.T.

Anggota : Dr. Ir. Sugiharto, M.T.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul "Rancang bangun perangkat kendali pada mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dan analisis pengaruh parameter teknis terhadap kualitas model 3D" ini dengan baik.

Laporan skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan. Penyusunan laporan ini dilatarbelakangi oleh pesatnya perkembangan teknologi pemindaian 3D yang masih menghadapi kendala tingginya biaya investasi dan keterbatasan metode manual, sehingga penulis berupaya merancang perangkat kendali otomatis berbasis mikrokontroler dan fotogrametri yang lebih ekonomis serta aplikatif.

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh banyak bimbingan, arahan, dan dukungan dari berbagai pihak institusional. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Ir. H. Rachmad Hartono, M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama atas waktu, bimbingan teknis, motivasi, serta arahan teoretis yang sangat berharga. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Ade Bagdja, MME. selaku Dosen Pendamping atas waktu, bimbingan teknis, arahan teoretis, kritikan yang membangun, dan motivasi selama penelitian. Penulis turut menyampaikan terima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan beserta para dosen penguji atas ilmu dan masukan konstruktifnya, serta kepada seluruh dosen dan staf Fakultas Teknik Universitas Pasundan atas bekal ilmu dan pelayanan akademis yang diberikan.

Apresiasi dan terima kasih yang mendalam juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan yang berkontribusi langsung dalam pengerjaan skripsi ini. Secara khusus, ucapan terima kasih disampaikan kepada Herry Rohana selaku rekan seperjuangan skripsi atas kolaborasi yang solid dalam perancangan alat, diskusi teknis yang intens, serta saling mendukung selama pengerjaan mesin pemindai 3D ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Anjar Prananda dan Zidan Nurfadilah yang telah bersedia meluangkan waktu menjadi model uji coba pemindaian manusia (*human scanning*), sehingga proses akuisisi data dan pengujian parameter dimensi maksimum dapat berjalan lancar. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa, khususnya di Laboratorium

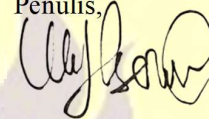
PEOTRO (Pesantren Otomasi dan Robotika), atas bantuan dalam diskusi teknis dan persiapan peralatan penelitian di laboratorium.

Ucapan terima kasih yang tulus dan mendalam penulis persembahkan kepada kedua orang tua serta saudara-saudara tercinta. Doa yang tiada henti, kasih sayang, dorongan semangat, serta dukungan moral dan materiil dari keluarga menjadi fondasi kekuatan utama bagi penulis hingga naskah skripsi ini dapat terselesaikan.

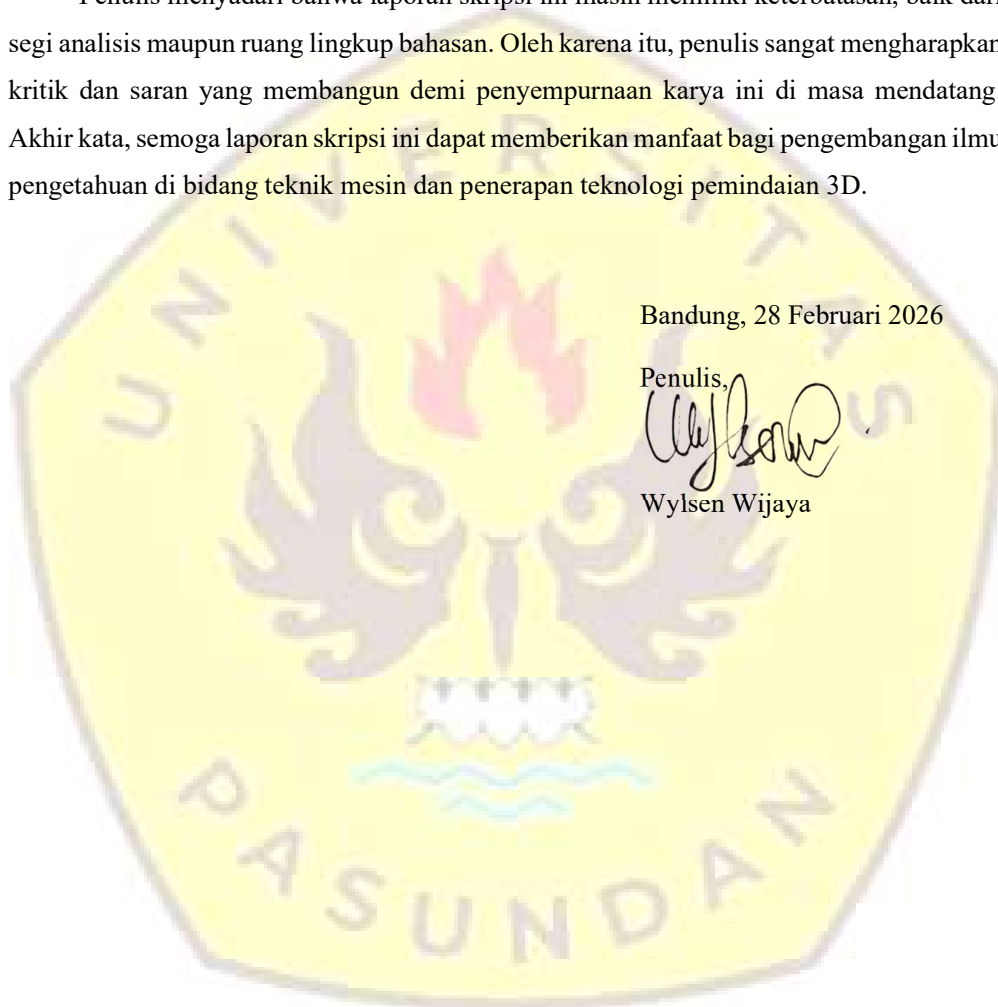
Penulis menyadari bahwa laporan skripsi ini masih memiliki keterbatasan, baik dari segi analisis maupun ruang lingkup bahasan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan karya ini di masa mendatang. Akhir kata, semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin dan penerapan teknologi pemindaian 3D.

Bandung, 28 Februari 2026

Penulis,



Wylsen Wijaya



DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VII
DAFTAR GAMBAR.....	IX
DAFTAR TABEL	X
ABSTRAK	XI
ABSTRACT.....	XII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	2
3. Tujuan.....	2
4. Manfaat.....	3
5. Lingkup masalah.....	3
6. Sistematika penulisan	4
BAB II STUDI LITERATUR	6
1. Kajian pustaka	6
2. Pemindaian 3D	10
3. Fotogrametri	12
4. Faktor-faktor eksternal yang memengaruhi aktivitas pemindaian 3D.....	13
5. Perangkat kendali mesin pemindai 3D	15

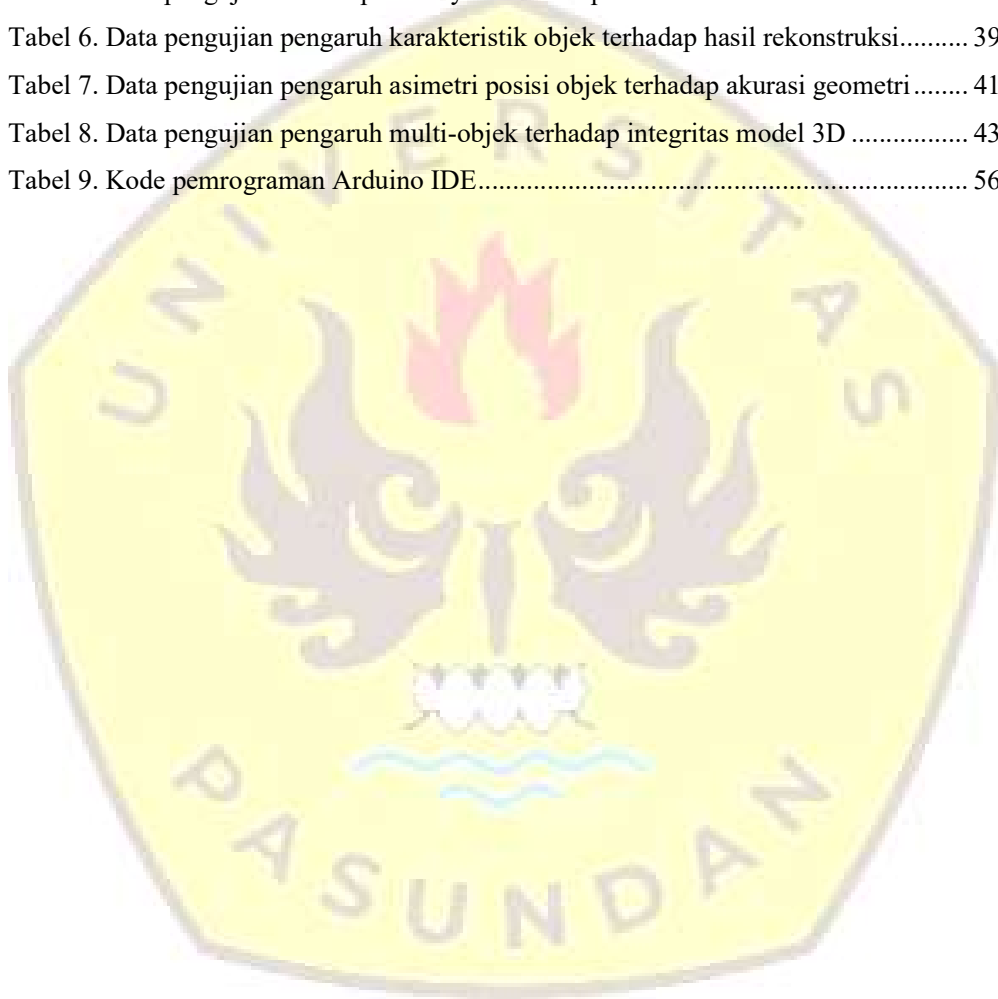
BAB III METODOLOGI.....	24
1. Tahapan penelitian.....	24
2. Tempat penelitian	26
3. Mesin pemindai 3D tipe cincin orbital	27
4. Perancangan dan perakitan perangkat kendali mesin pemindai 3D.....	27
5. Kalkulasi spesifikasi teknis mesin pemindai 3D	29
6. Skenario dan prosedur pengujian.....	31
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL PENGUJIAN	32
1. Pengujian perangkat kendali mesin pemindai 3D.....	32
2. Pengujian mesin pemindai 3D	33
3. Analisis hasil pengujian.....	44
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	49
1. Kesimpulan.....	49
2. Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51
LAMPIRAN.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Konfigurasi perangkat keras pada prototipe alat pemindai 3D	6
Gambar 2. Perbandingan hasil kinerja pada keempat aplikasi pemindaian 3D	7
Gambar 3. Perbandingan fotogrametri ponsel dan Creaform Go!SCAN 50,.....	8
Gambar 4. Hasil rancang bangun mesin pemindai 3D.....	9
Gambar 5. Gambar ilustrasi proses pembentukan model 3D berbasis fotogrametri.....	13
Gambar 6. Ilustrasi proses pemindaian dengan objek patung wajah manusia.....	14
Gambar 7. Ilustrasi pemindaian multi-objek dengan konfigurasi teratur.....	15
Gambar 8. Ilustrasi pemindaian multi-objek dengan konfigurasi tidak teratur.....	15
Gambar 9. Papan Arduino R3	16
Gambar 10. Motor DC <i>gearbox</i> 12V 12 RPM tipe JGB37-520	18
Gambar 11. Relay Module.....	19
Gambar 12. <i>Inductive proximity sensor</i> tipe Lj8A3-2-ZBX.....	20
Gambar 13. <i>Power supply</i> 12V 10A	20
Gambar 14. Tampilan antarmuka Arduino IDE.....	22
Gambar 15. Diagram alir tahapan penelitian	24
Gambar 16. Tempat penelitian.....	26
Gambar 17. Prototipe mesin pemindai 3D tipe cincin orbital.....	27
Gambar 18. Gambar perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital	29
Gambar 19. Diagram skematis perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital.....	29
Gambar 20. Tampilan serial monitor Arduino Uno	32
Gambar 21. Posisi awal (spidol hitam) dan posisi akhir (spidol biru) kamera	33
Gambar 22. Objek uji (pion catur).....	36
Gambar 23. Objek uji multi-objek	42
Gambar 24. Konfigurasi pencahayaan dengan empat buah lampu plafon.....	54
Gambar 25. Konfigurasi pencahayaan dengan dua buah lampu plafon.....	55

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komponen perangkat kendali mesin pemindai 3D	28
Tabel 2. Kalkulasi spesifikasi teknis mesin pemindai 3D.....	30
Tabel 3. Data pengujian pengaruh dimensi objek terhadap kapabilitas pemindaian	34
Tabel 4. Data pengujian pengaruh interval waktu terhadap.....	37
Tabel 5. Data pengujian variasi pencahayaan terhadap kualitas model 3D	38
Tabel 6. Data pengujian pengaruh karakteristik objek terhadap hasil rekonstruksi.....	39
Tabel 7. Data pengujian pengaruh asimetri posisi objek terhadap akurasi geometri	41
Tabel 8. Data pengujian pengaruh multi-objek terhadap integritas model 3D	43
Tabel 9. Kode pemrograman Arduino IDE.....	56



ABSTRAK

Metode pemindaian 3D manual rentan terhadap kegagalan rekonstruksi model 3D akibat ketidakstabilan pergerakan selama akuisisi data. Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun perangkat kendali pada mesin pemindai 3D agar pemindaian dapat berlangsung secara otomatis. Tujuan berikutnya adalah menganalisis bagaimana pengaruh variasi dimensi objek, interval waktu pemindaian, intensitas cahaya ruang pemindaian, karakteristik objek, posisi asimetri, dan kuantitas objek terhadap visual model 3D. Perangkat kendali dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat kendali. Prosedur akuisisi citra dijalankan melalui aplikasi KIRI Engine dengan mode *photoscan*, dan lensa *ultrawide* (120°). Analisis dilakukan dengan mengkorelasikan data empiris lapangan dengan hukum-hukum dasar mekanika, elektronika dan fotogrametri. Secara keseluruhan, perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital telah berhasil dirancang bangun dengan biaya yang ekonomis. Hasil pengujian menunjukkan: terjadi deviasi *overshoot* mekanis sejauh 14.13° pada mesin pemindai 3D; Pengujian dengan variasi dimensi objek menunjukkan penetapan rasio okupansi sebesar 13% dan zona efektif sebesar 55% terbukti valid dalam menentukan batas dimensi minimum dan maksimum objek; Pengujian dengan interval waktu pemindaian 1 detik menghasilkan visual model 3D paling optimal dengan perolehan 67 *frame* foto dan persentase tumpang tindih 95.35%; Pengujian dengan variasi pencahayaan menunjukkan semakin rendah intensitas cahaya suatu ruang pemindaian (8493.76 *lumens*), pengaruh terhadap model 3D adalah terjadi degradasi warna dan berpotensi gagal diproses; Pengujian dengan meletakkan objek berjarak 30 mm, 60 mm, dan 90 mm dari pusat rotasi menunjukkan visual model 3D menjadi asimetris, di mana arah kemiringan condong ke arah menjauhi pusat rotasi; Pengujian dengan variasi karakteristik warna dan tekstur objek menunjukkan warna hitam pekat berpotensi menyebabkan model 3D mengalami cacat lubang, sedangkan warna putih menyebabkan pantulan warna, hasil pengujian terbaik ditunjukkan pada objek yang kaya akan gradasi warna dan tekstur; Pengujian dengan satu objek hingga empat objek secara bersamaan terbukti dapat dilakukan dengan konfigurasi objek yang disusun secara sistematis dan tidak terdapat titik buta. Studi lanjutan direkomendasikan mengevaluasi aplikasi alternatif selain KIRI Engine serta mengembangkan desain mekanik dengan sistem *knocked-down*.

Kata kunci: Arduino Uno, fotogrametri, KIRI Engine, pemindai 3D, rekayasa balik.

ABSTRACT

Manual 3D scanning methods are prone to 3D model reconstruction failures due to movement instability during data acquisition. This research aims to design and construct a control device for a 3D scanning machine to enable automated scanning. The subsequent objective is to analyze the effects of variations in object dimensions, scanning time intervals, scanning room light intensity, object characteristics, asymmetrical positions, and object quantity on the visuals of the 3D model. The control device is designed using an Arduino Uno microcontroller as the control center. The image acquisition procedure is executed through the KIRI Engine application using the photoscan mode and an ultrawide lens (120°). The analysis was conducted by correlating empirical field data with the fundamental laws of mechanics, electronics, and photogrammetry. Overall, the control device for the orbital ring-type 3D scanning machine has been successfully designed and constructed at an economical cost. The test results indicate: a mechanical overshoot deviation of 14.13° occurred in the 3D scanning machine; Testing with object dimension variations shows that setting an occupancy ratio of 13% and an effective zone of 55% proved valid in determining the minimum and maximum dimension limits of the object; Testing with a 1-second scanning time interval produced the most optimal 3D model visuals, yielding 67 photo frames and an overlap percentage of 95.35%; Testing with lighting variations shows that the lower the light intensity of the scanning room (8493.76 lumens), the effect on the 3D model is color degradation and a potential failure to process; Testing by placing the object at distances of 30 mm, 60 mm, and 90 mm from the center of rotation indicates that the 3D model visuals become asymmetrical, where the tilt inclines away from the center of rotation; Testing with variations in object color and texture characteristics shows that solid black colors have the potential to cause hole defects in the 3D model, while white colors cause color reflections, with the best test results demonstrated on objects rich in color gradations and textures; Testing with one to four objects simultaneously proved feasible with a systematically arranged object configuration and no blind spots. Further studies are recommended to evaluate alternative applications besides the KIRI Engine and to develop a mechanical design with a knock-down system.

Keywords: 3D scanner, Arduino Uno, KIRI Engine, photogrammetry, reverse engineering.

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Perubahan dalam industri telah melalui banyak proses hingga saat ini. Perubahan ini dapat disebut sebagai fase transisi industri yang telah berlangsung selama bertahun-tahun. Saat ini revolusi industri 4.0 telah mendorong perkembangan teknologi digital untuk memudahkan pekerjaan manusia. Dalam industri 4.0, teknologi pemindai 3D memiliki peran penting dalam kemudahan merekayasa balik suatu komponen maupun menilai fitur detail dari bentuk geometri produk yang kompleks [1]. Teknologi pemindai 3D telah digunakan dalam berbagai sektor industri, termasuk industri manufaktur, medis, ataupun industri kreatif [2],[3],[4]. Meskipun pemindaian 3D telah mengalami perkembangan sejak tahun 1960-an, tantangan utama dalam mendigitalisasikan objek fisik bukan terletak pada perangkat lunaknya. Tantangan tersebut justru berada pada efisiensi proses akuisisi data pemindaian itu sendiri.

Mayoritas penelitian terdahulu melakukan proses akuisisi data pemindaian 3D dengan cara metode manual dan metode meja putar. Metode manual sangat rentan mengalami kegagalan akibat kesalahan manusia yang dapat memengaruhi kualitas citra [5]. Sebagai solusinya, penelitian untuk merancang bangun mesin pemindai 3D otomatis dengan metode meja putar pun mulai dilakukan. Mesin pemindai 3D yang dimaksud merupakan sebuah alat bantu pemindaian 3D menggunakan ponsel pintar [6]. Pembuatan mesin pemindai 3D dengan sistem terotomatisasi terbukti mampu menghasilkan model 3D yang akurat dan presisi dengan waktu pemindaian yang lebih ringkas dibandingkan metode manual [7]. Namun, meskipun penelitian rancang bangun mesin pemindai 3D tersebut telah berhasil mengatasi masalah yang ada pada metode manual, penggunaan metode *turntable* pada mesin tersebut menjadikannya terbatas pada kapasitas ruang kerja dan massa objek.

Di sisi lain, mesin pemindai 3D komersial yang tersedia di pasaran saat ini umumnya memiliki harga yang relatif tinggi, sehingga menghambat aksesibilitas para pengguna [8]. Mesin pemindai 3D komersial umumnya mengandalkan teknologi laser canggih dengan tingkat presisi yang tinggi, sehingga mengorbankan keterjangkauan harga dan kesederhanaan sistem. Padahal, saat ini telah tersedia berbagai aplikasi pemindaian 3D bebas biaya dan telah digunakan dalam berbagai penelitian terkait pemindaian 3D, salah satunya adalah KIRI Engine [9]. Penelitian yang dilakukan oleh Saniman dkk, (2023) juga telah mengungkapkan bahwa penggunaan ponsel pintar sebagai aplikasi pemindaian 3D

berbasis fotogrametri terbukti mampu bersaing dengan alat pemindai 3D kelas industri [10]. Selain itu, penelitian Ahmed dkk, (2025) turut mengungkapkan sistem pemindaian 3D berbasis Arduino dapat menekan biaya produksi [11]. Dengan demikian, agar pelaku industri maupun pelajar dapat melakukan aktivitas pemindaian 3D, perlu dibuat alat bantu pemindaian 3D yang terotomatis, ekonomis, berkapasitas masif, dan tentunya mudah dioperasikan.

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada paragraf dua dan tiga, muncul gagasan untuk merancang bangun mesin pemindai 3D otomatis dengan kapasitas ruang kerja pemindaian yang lebih besar dari penelitian terdahulu dan dengan harga yang lebih terjangkau daripada produk komersial. Penelitian ini menawarkan konsep baru dalam pembuatan mesin pemindai 3D, yaitu dengan mekanisme cincin orbital berdiameter masif. Mesin ini bekerja dengan cara menggerakkan kamera mengorbit mengelilingi objek, sementara objek dibiarkan statis. Dengan mekanisme cincin orbital, transmisi penggerak tidak dipengaruhi oleh massa objek. Perancangan dan pembuatan mesin pemindai 3D ini dilakukan oleh dua peserta skripsi. Masalah struktur mekanik mesin pemindai 3D diselesaikan oleh peneliti yang lain. Fokus penelitian ini adalah membuat perangkat kendali mesin pemindai 3D tersebut dan menganalisis kualitas model 3D yang dihasilkan. Dengan demikian, diharapkan mesin pemindai 3D yang dirancang bangun ini dapat dimanfaatkan sebagai solusi alternatif untuk aktivitas pemindaian 3D yang presisi, berkapasitas besar, dan ekonomis.

2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana merancang bangun perangkat kendali otomatis pada mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dengan kapasitas ruang kerja berdiameter 700 mm, dan tinggi 600 mm yang ekonomis; dan
- b. Bagaimana pengaruh parameter teknis (dimensi, waktu, cahaya, tekstur, asimetri, dan kuantitas objek) terhadap kualitas model 3D yang dihasilkan.

3. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah dikemukakan, tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Merancang bangun perangkat kendali otomatis pada mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dengan kapasitas ruang kerja berdiameter 700 mm dan tinggi 600 mm yang ekonomis; dan
- b. Menganalisis pengaruh parameter teknis (dimensi, waktu, cahaya, tekstur, asimetri, dan kuantitas objek) terhadap kualitas model 3D yang dihasilkan.

4. Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis yang signifikan dalam pengembangan mesin pemindai 3D, khususnya terkait integrasi perangkat kendali mikrokontroler dengan algoritma fotogrametri pada *platform* pemindaian berbasis komputasi awan. Selain itu, temuan eksperimental mengenai kualitas model 3D terhadap berbagai parameter teknis juga diharapkan dapat memberikan landasan teoretis bagi peneliti selanjutnya dalam mengoptimalkan performa mesin pemindai 3D di masa depan.

Secara praktis, hasil penelitian ini menawarkan solusi inovatif bagi berbagai sektor industri, seperti manufaktur dan medis, dalam menjalankan kebutuhan *reverse engineering* serta inspeksi komponen secara non-kontak dengan biaya yang jauh lebih terjangkau. Di sektor pendidikan, mesin ini berperan sebagai media edukasi teknologi yang aplikatif sehingga dapat menurunkan hambatan akses bagi pelajar dalam mempelajari digitalisasi objek. Selain itu, implementasi mesin pemindai 3D ini juga dapat mendukung upaya pelestarian warisan budaya melalui digitalisasi artefak museum secara efisien. Dengan beralih dari metode manual ke sistem otomatisasi ini, risiko kegagalan akuisisi data akibat *human error* dapat dimitigasi secara efektif, sehingga konsistensi dan kualitas visual model 3D yang dihasilkan lebih terjamin di setiap sesi pemindaian.

5. Lingkup masalah

Agar pembahasan tetap fokus dan terarah, batasan masalah penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

- a. Pembuatan perangkat kendali dibatasi pada penggunaan mikrokontroler Arduino Uno R3 sebagai pusat pemrosesan logika otomatisasi dan motor DC *gearbox* 12V 12 rpm tipe JGB37-520 sebagai aktuator penggerak mekanis;
- b. Akuisisi data objek dilakukan menggunakan Iphone 12 Pro dengan spesifikasi kamera resolusi 12 MP dengan sudut bidang pandang 120°;
- c. Seluruh pemrosesan data citra objek fisik dibatasi pada penggunaan KIRI Engine dengan metode pemindaian fotogrametri;

- d. Objek uji merupakan benda padat dengan dimensi maksimum berdiameter 665 mm dan tinggi 600 mm, serta dimensi minimum berdiameter 144 mm dan tinggi 144 mm;
- e. Seluruh rangkaian pengujian pengambilan data dilakukan di dalam ruangan (*indoor*) dengan kondisi lingkungan terkontrol;
- f. Analisis hasil pengujian terbatas pada pengamatan kualitas visual model 3D yang dihasilkan KIRI Engine.

6. Sistematika penulisan

Laporan penelitian ini terdiri atas lima bab. Kelima bab tersebut yaitu pendahuluan, studi literatur, metodologi penelitian, pengujian dan analisis hasil pengujian, serta kesimpulan dan saran.

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Pada bab ini dijelaskan kajian pustaka, pemindaian 3D, fotogrametri, faktor-faktor eksternal yang memengaruhi aktivitas pemindaian 3D, dan perangkat kendali mesin pemindai 3D.

BAB III METODOLOGI

Pada bab ini dijelaskan tentang tahapan penelitian dan tempat penelitian. Tahapan penelitian dapat berupa diagram alir atau yang sejenisnya. Selain itu, bab ini juga menjelaskan mesin pemindai 3D yang dirancang bangun, perancangan dan perakitan perangkat kendali mesin pemindai 3D, kalkulasi spesifikasi teknis mesin pemindai 3D, dan skenario dan prosedur pengujian.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL PENGUJIAN

Pada bab ini dijelaskan tentang pengujian dan analisis hasil model 3D dari mesin pemindai 3D yang dirancang bangun,

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dijelaskan tentang kesimpulan dan saran yang terkait dengan perancangan dan pembuatan perangkat kendali mesin pemindai 3D.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini dimuat sumber-sumber acuan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian. Daftar pustaka memuat referensi berupa buku, jurnal ilmiah, artikel, maupun sumber *daring*.

LAMPIRAN

Pada bab ini dimuat dokumen pendukung yang berkaitan dengan hasil penelitian namun tidak dimuat secara rinci dalam isi utama laporan. Lampiran berfungsi sebagai pelengkap agar pembaca dapat melihat bukti teknis, data, atau informasi tambahan pada penelitian.



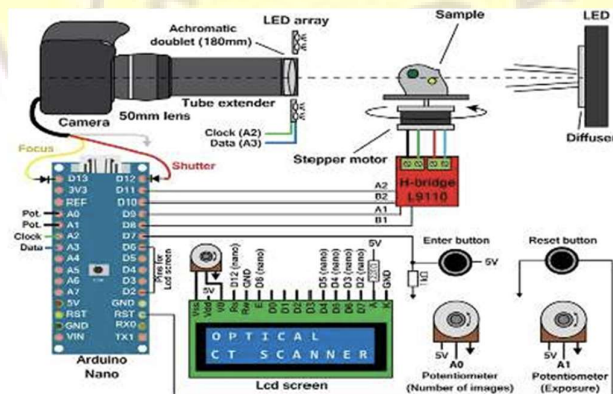
BAB II STUDI LITERATUR

1. Kajian pustaka

Penelitian ini dilakukan berlandaskan pada hasil penelitian terdahulu, baik dari segi metode maupun teori yang digunakan. Kajian terhadap penelitian terdahulu yang relevan dengan laporan skripsi ini dilakukan untuk memetakan posisi kontribusi penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai referensi utama dalam penelitian ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Ahmed dkk, (2025); penelitian oleh Kocsis dkk, (2025); penelitian oleh Saniman dkk, (2023); dan penelitian oleh Sofyandi dkk, (2022).

Penelitian 1, Shaik Iftekhar Ahmed, Taskeen Begum, Mohd Sufiyan, Ms. Arjumand Jamal (2025)

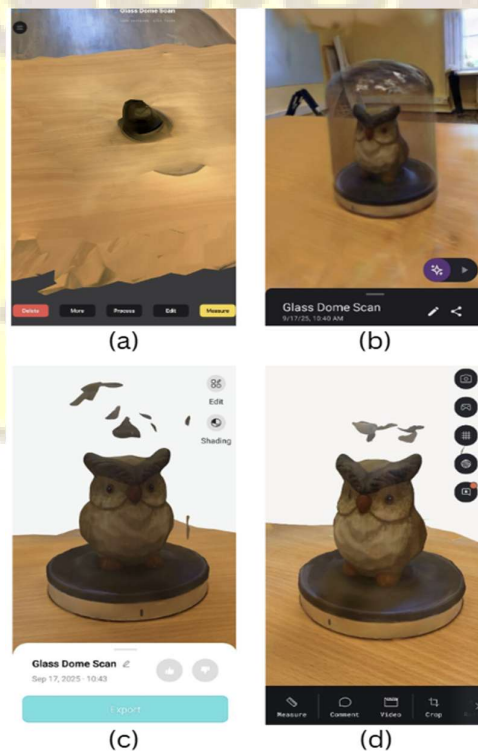
Penelitian yang dilakukan oleh Ahmed dkk, (2025) berjudul “3D Scanner Using Arduino”. Pada penelitian tersebut, dilakukan desain dan pengembangan sistem pemindaian 3D yang hemat biaya dan bersifat *open-source*. Prototipe yang dibuat cukup sederhana, karena perangkat keras utamanya terdiri dari papan Arduino Uno, motor *stepper*, sensor jarak, *power supply*, dan meja putar. Sementara itu, untuk pemrosesan data objek digunakan perangkat lunak Arduino, Python, dan MeshLab. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan berhasil mengatasi keterbatasan alat pemindai 3D komersial yang mahal. Walaupun sistem ini mampu mencapai akurasi pengukuran $\pm 2\text{mm}$ yang presisi pada objek kecil (diameter 50 hingga 120 mm), masih terdapat tantangan dalam pemindaian objek dengan detail permukaan yang halus dan berbentuk cekung. Meskipun demikian, penelitian ini menjadi dasar penting bagi peneliti selanjutnya dalam mewujudkan mesin pemindai 3D yang ekonomis [11]. Konfigurasi perangkat keras pada prototipe alat pemindai 3D dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi perangkat keras pada prototipe alat pemindai 3D

Penelitian 2, Mgr. Gergely Kocsis, Ing. Ondrej Takac, PhD., Paed Dr. Bence Pasztor, dan Mgr. Laszlo Halasz (2025)

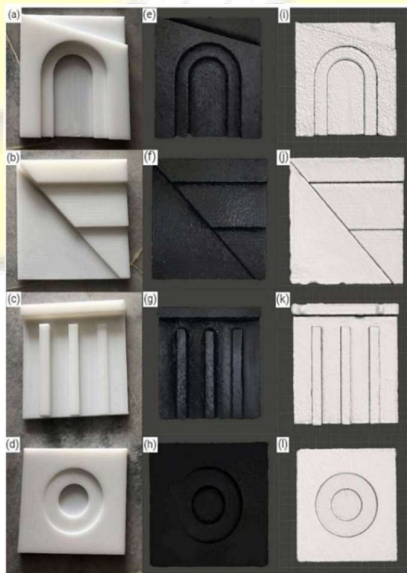
Penelitian yang dilakukan oleh Kocsis dkk, (2025) berjudul “*Exploring the Educational Usability of Popular 3D Scanning Applications*”. Studi ini mengeksplorasi kegunaan aplikasi pemindaian 3D populer untuk dunia pendidikan dengan membandingkan kinerja, pengalaman pengguna, dan potensi integrasinya ke dalam konteks pengajaran dan pembelajaran. Aplikasi pemindaian 3D populer tersebut adalah 3D Scanner App, Luma AI, KIRI Engine, dan Polycam. Hasil penelitian menunjukkan aplikasi Luma AI dan Polycam memiliki kinerja keseluruhan yang paling kuat. Namun, aplikasi KIRI Engine juga direkomendasikan untuk digunakan. Hal itu karena model 3D yang dihasilkan oleh aplikasi KIRI Engine menunjukkan tingkat kualitas dan detail yang tinggi [9]. Meskipun demikian, pada penelitian ini proses pengambilan data objek mengharuskan pengguna bergerak memutar objek, sehingga rentan mengalami kegagalan komputasional akibat faktor kesalahan manusia. Temuan keterbatasan tersebut memberikan dasar penting bagi penelitian lanjutan dalam berupaya mengatasi permasalahan yang ada melalui pendekatan pemindaian 3D menggunakan ponsel yang terotomatisasi. Hasil perbandingan kinerja pada keempat aplikasi pemindai 3D populer tersebut dapat dilihat pada Gambar 2, di mana (a) 3D Scanner App, (b) Luma AI, (c) KIRI Engine, dan (d) Polycam.



Gambar 2. Perbandingan hasil kinerja pada keempat aplikasi pemindaian 3D

Penelitian 3, Muhammad Nur Farhan Saniman, Hariz Syahmi Zulkifli, Muhammad Izhar Ishak, Khairul Anuar Abd Wahid, Amzari Zhahir, dan Wan Mansor Wan Muhamad (2023)

Penelitian yang dilakukan oleh Saniman dkk, (2023) berjudul “*Performance of Photogrammetry-Based Makeshift 3D Scanning System for Geometrical Object in Reverse Engineering*”. Pada penelitian tersebut, dilakukan evaluasi kinerja sistem pemindaian 3D darurat (*makeshift*) berbasis fotogrametri ponsel, kemudian hasilnya dibandingkan dengan alat pemindai 3D industri kelas atas. Teknologi pemindaian yang dibandingkan yaitu fotogrametri menggunakan ponsel dan alat pemindai 3D yaitu Creaform Go!SCAN 50. Hasil penelitian menunjukkan metode fotogrametri menggunakan ponsel memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pemindai 3D dengan resolusi yang memadai. Hal itu dikarenakan dalam pemindaian objek geometris dengan dimensi antara 5 hingga 175 mm, hasil pengujian menunjukkan rata-rata akurasi mencapai 97,2%. Lebih lanjut lagi, ditemukan bahwa analisis ANOVA dua arah juga menunjukkan tidak adanya perbedaan akurasi yang signifikan antara fotogrametri ponsel dan alat pemindai 3D industri kelas atas [10]. Meskipun proses akuisisi data objek masih dilakukan secara manual, temuan penelitian ini telah menjadi dasar penting bagi penelitian selanjutnya dalam menentukan metode pemindaian 3D yang memadai dalam pembuatan mesin pemindai 3D. Hasil perbandingan antara fotogrametri ponsel dengan alat pemindai 3D industri kelas atas (Creaform Go!SCAN 50) dapat dilihat pada Gambar 3, di mana (a)-(d) benda uji asli; (e)-(h) model 3D hasil rekonstruksi fotogrametri ponsel; (i)-(l) model 3D hasil rekonstruksi Creaform Go!SCAN 5.



Gambar 3. Perbandingan fotogrametri ponsel dan Creaform Go!SCAN 50,

Penelitian 4, Muhammad Ridho Sofyandi, Eddy Kurniawan, dan Romanio Aldrian Wicaksono (2022)

Penelitian yang dilakukan oleh Sofyandi dkk, (2022) berjudul “Rancang Bangun 3D Scanner Sebagai 3D Metrologi Dengan Metode Fotogrametri Rentang Dekat”. Penelitian tersebut bertujuan untuk merancang bangun 3D scanner dengan memanfaatkan kamera *smartphone* dan fotogrametri rentang dekat sebagai metode pemindaian. Perancangan 3D scanner dibangun menggunakan 2 sumbu (*tilt angle* dan *rotation angle*) yang digerakkan oleh motor *stepper*, dan Arduino Uno sebagai pusat kendalinya. Pada mesin pemindai 3D ini proses pengambilan data pemindaian dilakukan secara otomatis, di mana objek akan diletakkan di atas meja putar (*turntable*) dan meja tersebut akan digerakkan oleh motor *stepper*. Sementara itu, kamera yang diatur statis akan menangkap setiap segmen dari objek yang berputar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin pemindai 3D yang dirancang bangun dapat memindai objek tiga dimensi secara presisi, baik dengan objek yang berbentuk cembung maupun cekung [6]. Meskipun penelitian ini telah berhasil mengatasi permasalahan pada metode manual, penggunaan tiga buah motor stepper beserta modul *driver*-nya menjadikan perangkat kendali pada mesin pemindai 3D ini mahal dan rumit. Selain itu, penggunaan metode meja putar juga kurang efektif untuk diterapkan. Karena selain dimensi objek, massa objek juga memengaruhi kinerja mesin pemindai 3D itu sendiri. Meskipun demikian, temuan tersebut menjadi dasar penting bagi penelitian selanjutnya dalam meninjau perangkat keras yang efisien untuk menekan biaya pembuatan perangkat kendali pada mesin pemindai 3D. Hasil rancang bangun mesin pemindai 3D dan hasil pemindaian objek tiga dimensi dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil rancang bangun mesin pemindai 3D

Secara keseluruhan, keempat penelitian terdahulu telah berhasil menunjukkan potensi besar pengembangan teknologi pemindaian 3D yang ekonomis dan otomatis. Penelitian oleh Ahmed dkk, (2025) dan Sofyandi dkk, (2022) menjadi dasar penelitian ini

dalam penggunaan Arduino sebagai pusat kendali untuk perangkat kendali mesin pemindai 3D yang ekonomis. Penelitian oleh Kocsis dkk, (2025) menjadi dasar penelitian ini dalam penggunaan aplikasi KIRI Engine sebagai aplikasi pemindaian, sekaligus memproses data pemindaian untuk menghasilkan model 3D. Terakhir, penelitian oleh Saniman dkk, (2023) menjadi dasar penting penelitian ini dalam menggunakan teknologi pemindaian berbasis fotogrametri ponsel dengan resolusi yang memadai.

Meskipun demikian, uraian pada keempat penelitian tersebut juga mengungkapkan adanya keterbatasan. Berdasarkan keterbatasan-keterbatasan tersebut, muncul rumusan masalah yang perlu diselesaikan, yaitu bagaimana merancang bangun perangkat kendali yang lebih ekonomis pada mesin pemindai 3D untuk pemindaian objek berkapasitas kecil hingga besar. Selain itu, mesin pemindai 3D yang dirancang bangun juga perlu ditinjau untuk menelaah parameter teknis yang memengaruhi kualitas visual model 3D.

2. Pemindaian 3D

Pemindaian 3D merupakan suatu proses pengambilan data geometris dari sebuah objek fisik. Data yang diperoleh dapat digunakan untuk direkonstruksi menjadi pemodelan tiga dimensi digital. Dalam praktiknya, metode pemindaian ini secara umum diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu pemindaian kontak (*contact scanning*) dan pemindaian tanpa kontak (*contactless scanning*).

Pemindaian kontak (*contact scanning*)

Pemindaian kontak adalah sebuah metode akuisisi data geometri objek fisik dengan menggunakan alat ukur mekanis berupa sensor seperti *probe* atau *stylus*. Akuisisi data objek pada pemindaian kontak melibatkan sentuhan langsung antara *probe* dengan permukaan objek untuk merekam koordinat spasial objek (X, Y, Z). Secara historis, teknologi pemindaian kontak pertama kali dikembangkan oleh Ferranti Company pada tahun 1950-an di Skotlandia, yaitu *Coordinate Measuring Machine* (CMM). Mesin CMM yang dikembangkan saat itu hanya memiliki dua sumbu gerak (X dan Y), sehingga mengharuskan operator untuk menggerakkan *probe* secara manual di atas permukaan objek.

Keterbatasan mesin tersebut pun menjadi pemicu perkembangannya yang terus berlanjut hingga saat ini. Seiring perkembangan komputer yang terus meningkat, teknologi pemindaian kontak kini memasuki era digitalisasi, di mana telah dikembangkan sebuah sistem lengan robotik artikulasi 6-DoF *open-loop* untuk mewujudkan pemindaian 3D secara otomatis [12]. Akan tetapi, perkembangan pemindaian 3D dengan metode kontak

pada dasarnya kurang efektif untuk diterapkan di segala bidang industri. Hal itu disebabkan oleh laju pemindaianya yang lambat, tidak dapat merekonstruksi warna dan tekstur objek, sentuhan *probe* pada objek yang lunak juga berpotensi merusak bentuk daripada objek tersebut. Namun, karena keunggulannya yang memiliki akurasi dan tingkat presisi yang tinggi [13], pemindaian kontak lebih umum digunakan pada pengembangan mesin manufaktur sebagai alat pengukuran untuk inspeksi kualitas produk [14].

Pemindaian tanpa kontak (*contactless scanning*)

Pemindaian tanpa kontak merupakan metode akuisisi data geometri objek fisik yang dilakukan tanpa adanya interaksi fisik antara sensor dan objek yang dipindai. Proses pengukuran maupun digitalisasi objek dengan metode ini dapat dilakukan secara lebih fleksibel. Oleh karena itu, pemindaian tanpa kontak berkembang menjadi pendekatan yang lebih beragam dibandingkan pemindaian kontak. Secara historis, salah satu akar awalnya ditunjukkan oleh Aimé Laussedat pada tahun 1861 melalui konsep pengukuran objek berbasis citra yang disebut *metrophotography* [15]. Dalam pendekatan tersebut, ilmu perspektif digunakan sebagai dasar untuk mengukur objek melalui citranya. Temuan tersebut kemudian menjadi fondasi bagi perkembangan teknologi pemindaian tanpa kontak berbasis citra/foto, yang saat ini dikenal sebagai fotogrametri (*photogrammetry*).

Di samping metode pemindaian 3D berbasis citra, perkembangan pemindaian tanpa kontak juga diarahkan pada metode pemindaian berbasis cahaya terstruktur dan laser. Beberapa teknologi pemindaian yang umum dimanfaatkan dalam penelitian maupun produk komersial dengan basis tersebut adalah *structured light scanning*, *laser triangulation scanning*, dan *Light Detection and Ranging* (LiDAR). Keberagaman metode pemindaian yang tersedia menjadikan pemindaian tanpa kontak lebih fleksibel untuk digunakan pada berbagai bidang industri. Pada sektor manufaktur dan medis, teknologi pemindaian tanpa kontak dimanfaatkan untuk mendukung proses rekayasa balik (*reverse engineering*) yang membantu analisis peralatan dan duplikasi peralatan [2], [3]. Di samping itu, industri kreatif juga memanfaatkannya untuk mempercepat produksi aset digital, termasuk dalam pelestarian artefak museum bersejarah melalui pembuatan arsip digital [4]. Pemanfaatan lain yang tidak kalah penting, metode pemindaian tanpa kontak juga dapat diterapkan untuk inspeksi kualitas komponen dan mendeteksi kecacatan hasil produksi komponen secara presisi [16].

3. Fotogrametri

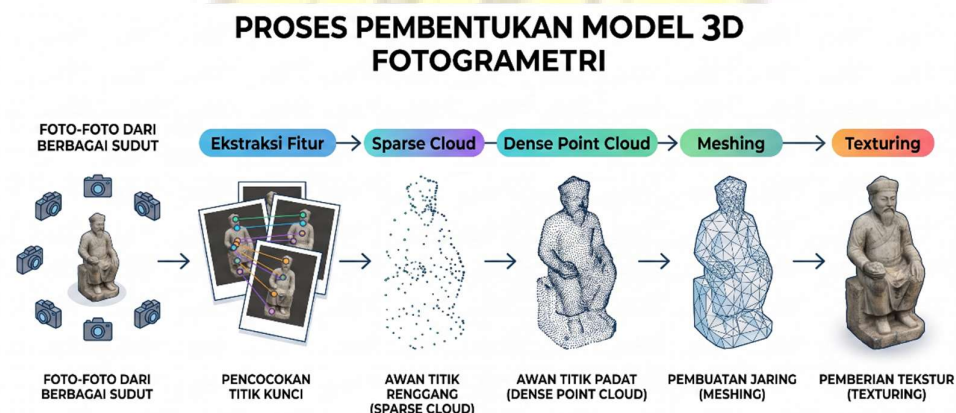
Fotogrametri merupakan metode pemindaian berbasis citra/foto, di mana kumpulan citra yang diperoleh digunakan untuk memperoleh informasi geometris objek fisik tersebut ataupun dikonversi menjadi model 3D. Berdasarkan parameter rentang jarak akuisisi data, fotogrametri diklasifikasikan menjadi dua pendekatan utama, yaitu fotogrametri udara dan fotogrametri terestrial. Fotogrametri udara diaplikasikan secara khusus untuk pemetaan topografi wilayah berskala makro melalui perekaman citra dari wahana udara. Sebaliknya, pada pendekatan terestrial, citra objek direkam dari jarak dekat untuk menyajikan informasi dimensional objek yang lebih rinci. Sebagaimana yang dilakukan pada penelitian ini, mesin pemindai 3D yang dirancang bangun menggunakan pendekatan fotogrametri jarak dekat, di mana jarak pusat objek terhadap kamera bernilai 320 mm.

Berdasarkan kajian terhadap keunggulan dan keterbatasan masing-masing metode pemindaian tanpa kontak, fotogrametri dipilih untuk mendukung tujuan penelitian ini. Meskipun tingkat akurasi fotogrametri tidak sebesar *structured light scanning* maupun *laser triangulation scanning* untuk kebutuhan metrologi presisi tinggi, fotogrametri mampu menghasilkan kualitas visual dan tekstur yang lebih baik [17]. Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa fotogrametri merupakan alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan metode pemindaian 3D seperti *structured light scanning* maupun LiDAR [18], [19]. Dengan demikian, fotogrametri adalah metode pemindaian 3D yang paling tepat untuk mendukung penelitian yang memperhatikan aspek ekonomi, namun juga mampu menghasilkan kualitas visual model 3D yang memadai [10].

Secara garis besar, proses pembentukan model tiga dimensi berbasis fotogrametri melibatkan serangkaian tahapan komputasi yang berkesinambungan. Pada tahap awal, fitur unik (*keypoints*) dari sekumpulan citra yang diperoleh akan diidentifikasi dan diekstraksi. Proses penyelarasan visual ini secara umum menerapkan algoritma ekstraksi fitur berbasis analisis gradien citra, seperti *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT). Tahapan berikutnya difokuskan untuk memperkirakan hubungan spasial dan orientasi posisi relatif kamera di dalam ruang tiga dimensi. Estimasi posisi kamera dan koordinat titik objek dari foto yang saling tumpang tindih tersebut umumnya memanfaatkan prinsip triangulasi optik, salah satunya melalui metode *Structure from Motion* (SfM). Hasil kalkulasi tahapan ini berwujud representasi geometri awal berupa awan titik renggang (*sparse point cloud*).

Tahapan komputasi kemudian dilanjutkan pada proses densifikasi atau peningkatan kerapatan titik koordinat spasial dalam jumlah yang jauh lebih besar. Sistem pemrosesan gambar secara umum menggunakan pendekatan stereoskopis multi-sudut, seperti algoritma

Multi-View Stereo (MVS), untuk meningkatkan kerapatan representasi geometri objek berdasarkan informasi visual yang tersedia pada seluruh citra. Hasil dari proses ini berwujud awan titik dengan kepadatan tinggi (*dense point cloud*). Selanjutnya, jutaan koordinat padat tersebut dihubungkan secara geometris melalui proses pembuatan jaring permukaan (*meshing*). Proses ini membentuk representasi permukaan objek yang kontinu dalam ruang tiga dimensi. Sebagai langkah final, pemetaan tekstur (*texture mapping*) dilakukan dengan memproyeksikan kembali elemen piksel warna asli dari sekumpulan citra. Rangkaian proses tersebut pada akhirnya akan menghasilkan model tiga dimensi digital yang memuat informasi geometri dan visual objek secara utuh. Gambar ilustrasi proses pembentukan model 3D dapat dilihat pada gambar 5.



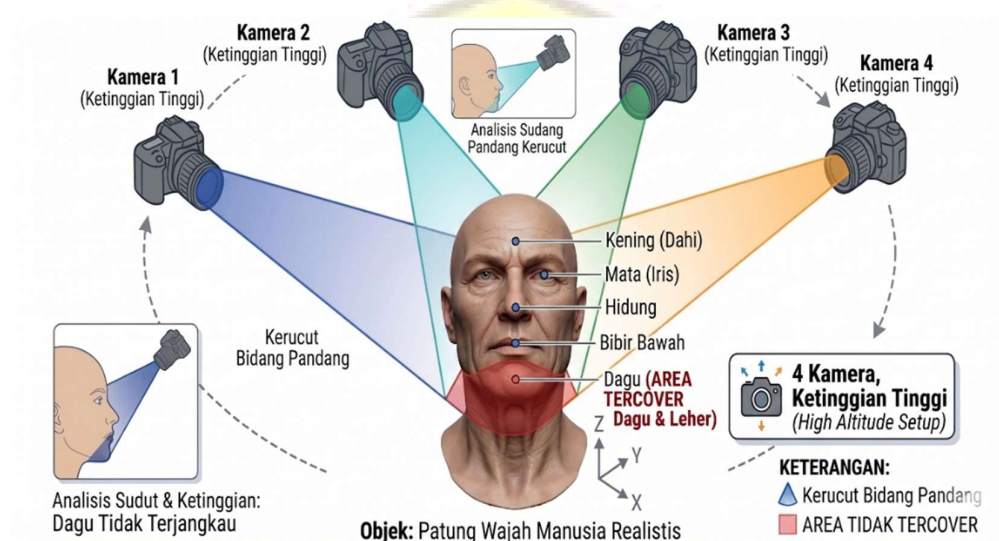
Gambar 5. Gambar ilustrasi proses pembentukan model 3D berbasis fotogrametri

4. Faktor-faktor eksternal yang memengaruhi aktivitas pemindaian 3D

Meskipun sebagian besar aplikasi fotogrametri modern mampu menjalankan seluruh tahapan rekonstruksi secara otomatis, kualitas model tiga dimensi yang dihasilkan tetap bergantung pada kualitas data citra dan tingkat tumpang tindih antar citra. Berdasarkan parameter eksperimental evaluasi posisi kamera, rekonstruksi model 3D terbukti mencapai tingkat akurasi geometris paling optimal ketika rasio tumpang tindih dipertahankan pada nilai minimum 80% [20]. Selain kedua faktor tersebut, kondisi lingkungan pemindaian, karakteristik objek, maupun faktor eksternal lainnya juga dapat memengaruhi kualitas model yang dihasilkan [21]. Oleh karena itu, identifikasi dan analisis terhadap faktor-faktor tersebut menjadi penting untuk dilakukan untuk kemudian diuji kebenarannya.

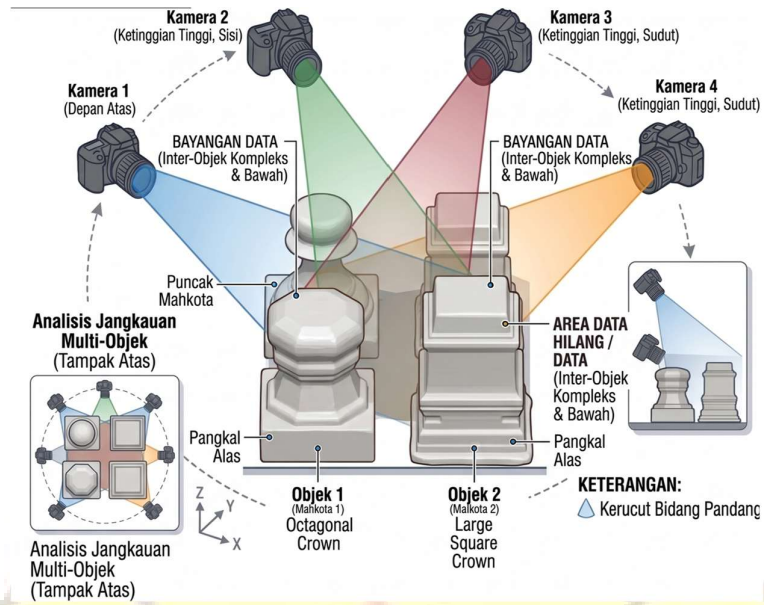
Dalam proses akuisisi data objek, faktor eksternal lainnya yang penting diperhatikan adalah masalah oklusi dan batasan bidang pandang kamera. Oklusi (*occlusion*) secara teknis dikenal sebagai titik buta (*blind spot*) atau fenomena di mana segmen objek yang

tidak terjangkau oleh kamera. Faktor pertama dalam fenomena ini adalah konfigurasi sudut elevasi kamera yang terhalang oleh struktur geometri objek itu sendiri. Sebagai ilustrasi, posisi kamera yang diletakkan terlalu tinggi akan memblokir bidang pandang lensa, sehingga area bawah objek (lekukan dagu pada wajah) gagal terekam kamera. Gambar ilustrasi tersebut dapat dilihat pada gambar 6. Faktor kedua adalah dimensi objek yang melampaui batas jangkauan pandang kamera. Segmen objek yang melewati batas jangkauan pandang kamera secara teoretis dipastikan tidak akan terekonstruksi atau tidak terbentuk dalam model 3D.

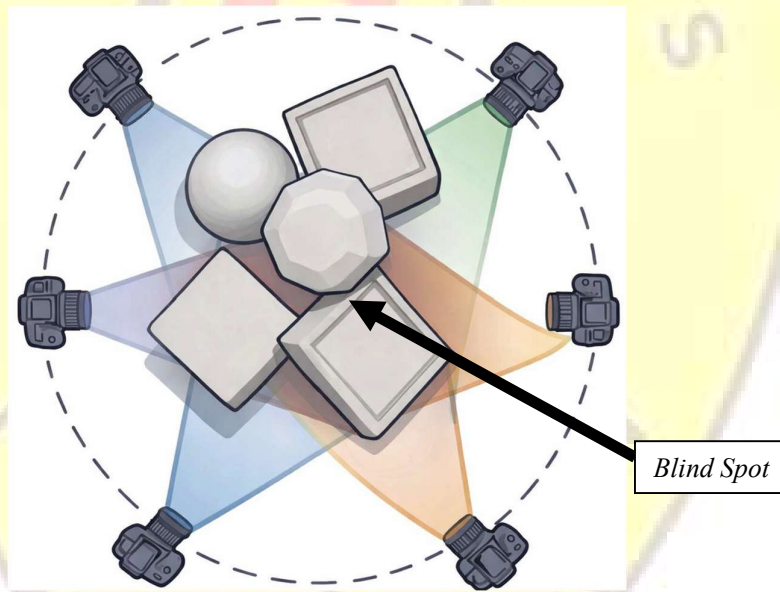


Gambar 6. Ilustrasi proses pemindaian dengan objek patung wajah manusia

Faktor eksternal ketiga adalah posisi objek yang asimetris. Jika posisi objek diletakkan secara sembarang terhadap pusat meja kerja, maka perubahan jarak objek yang tidak beraturan ini juga dapat menyebabkan bentuk model 3D yang tidak beraturan. Faktor keempat adalah konfigurasi pemindaian objek jamak (*multi-objek*), di mana fenomena titik buta akan menjadi lebih kompleks. Jika dalam satu siklus pemindaian, objek yang dipindai berjumlah empat buah, maka akan terjadi di mana setiap objek saling menghalangi. Apabila konfigurasi keempat objek diatur secara sistematis, kamera yang berputar 360° terhadap objek masih mampu mengompensasi segmen objek yang terhalang. Namun, jika konfigurasi keempat objek tersebut tidak beraturan, maka akan ada segmen objek yang tidak dapat dikompensasi meskipun kamera berputar 360°. Segmen objek yang tidak terkompensasi atau tidak terekam oleh kamera tersebut pada akhirnya tidak akan diproses lebih lanjut, sehingga memicu terbentuknya lubang pada model 3D. Gambar ilustrasi pemindaian *multi-objek* dengan konfigurasi teratur dapat dilihat pada gambar 7 dan konfigurasi tidak teratur dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 7. Ilustrasi pemindaian multi-objek dengan konfigurasi teratur



Gambar 8. Ilustrasi pemindaian multi-objek dengan konfigurasi tidak teratur

5. Perangkat kendali mesin pemindai 3D

Perangkat kendali pada mesin pemindai 3D merupakan perangkat yang dirancang untuk mengatur jalannya proses pemindaian agar proses pemindaian berlangsung secara otomatis, stabil, dan konsisten. Secara garis besar, perangkat kendali tersebut terbagi menjadi dua bagian utama, yaitu perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak

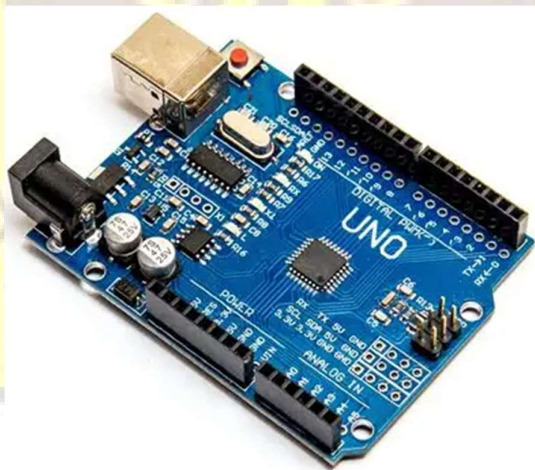
(*software*). Sinergi antara perangkat lunak dan perangkat keras ini bertujuan untuk menggerakkan struktur mekanik mesin pemindai 3D secara terukur dan sistematis. Oleh karena itu, koordinasi yang selaras antara instruksi logika dan eksekusi fisik tersebut menjadi kunci utama dalam mewujudkan perangkat pemindaian yang andal.

A. Perangkat keras (*hardware*)

Perangkat keras merupakan komponen fisik dari instrumen elektronik yang mengeksekusi perintah dari perangkat lunak. Pada penelitian ini, perangkat keras yang digunakan adalah papan Arduino Uno, motor DC *gearbox*, modul relai, *Inductive proximity sensor* dan *power supply*.

a) Papan Arduino Uno

Papan Arduino Uno merupakan sebuah perangkat elektronik berbasis ATmega328P yang dirancang untuk kebutuhan purwarupa dan pengembangan perangkat kendali sederhana. Perangkat ini bersifat *open-source* sehingga dapat diakses luas oleh peneliti maupun praktisi. Pada penelitian ini, papan Arduino Uno berperan sebagai pusat kendali mesin. Papan Arduino Uno yang digunakan adalah varian R3 (Revisi 3) yang berbasis ATmega328P. Pada papan Arduino ini, terdapat beberapa komponen penting di dalamnya, yaitu mikrokontroler, pin, dan konektor. Gambar papan Arduino Uno dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Papan Arduino R3

Mikrokontroler ATmega328P merupakan *chip* yang berfungsi sebagai pusat pengolahan data pada papan Arduino Uno. *Chip* ini memungkinkan pengguna untuk memprogram instruksi dan memproses *output* berdasarkan input yang diberikan. Umumnya, pemrograman papan Arduino Uno dapat dilakukan pada perangkat lunak

Arduino IDE yang menggunakan bahasa pemrograman C/C++. Papan Arduino menggunakan antarmuka pin digital untuk saling berkomunikasi dengan komponen elektronik eksternal. Antarmuka komunikasi digital ini bekerja berdasarkan prinsip logika biner yang sangat sederhana. Mikrokontroler akan memproses dan mengirimkan sinyal kendali dalam bentuk tegangan tinggi (*HIGH*) atau tegangan rendah (*LOW*). Instruksi sinyal logika inilah yang dimanfaatkan untuk mengeksekusi operasi otomatis.

Pin dalam papan Arduino Uno digunakan untuk menghubungkan papan Arduino Uno dengan berbagai komponen elektronik yang akan digunakan. Papan Arduino Uno mempunyai dua jenis pin, yaitu pin digital dan pin analog. Pin digital dapat menerima atau mengirim sinyal digital. Sinyal digital berarti sinyal akan bernilai 1 atau 0 alias *HIGH* atau *LOW*. Pada umumnya papan Arduino Uno memiliki 14 pin input output digital. Pin analog adalah pin yang digunakan untuk menerima input analog. Pin analog dapat menerima tegangan analog dari 0V sampai dengan 5V.

Papan Arduino Uno memiliki dua jenis konektor, yaitu konektor daya dan konektor serial. Konektor daya digunakan sebagai penyalur daya untuk mengaktifkan papan Arduino Uno dan juga perangkat lain yang terhubung dengannya, seperti sensor maupun layar *monitoring*. Konektor serial biasanya digunakan untuk menghubungkan papan Arduino Uno dengan perangkat lain seperti komputer atau laptop. Konektor serial ini menggunakan *port* USB standar pada papan Arduino Uno yang dapat menyalurkan tegangan sampai 5V dan arus ± 500 mA. Berbeda dengan konektor daya yang menggunakan *barrel jack* untuk dapat menyalurkan tegangan sampai 12V dan arus sesuai kebutuhan.

b) Motor DC

Motor DC merupakan perangkat elektronik yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi kinetik. Seperti namanya, motor DC (*Direct Current*) merupakan motor listrik dengan arus listrik yang mengalir secara konstan dalam satu arah saja untuk dapat digerakkan. Motor DC memiliki keunggulan dalam kemudahan pengendalian kecepatan maupun arah putaran menggunakan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) dari Arduino. Namun, untuk menggerakkan motor DC, diperlukan *driver* tambahan karena arus yang dibutuhkan lebih besar daripada kemampuan keluaran langsung Arduino.

Motor DC yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Electric DC Gearbox Motor High Torque* JGB37-520 dengan tegangan kerja 12V dan kecepatan putar 12 RPM. Motor ini dilengkapi *gearbox* reduksi yang berfungsi untuk menurunkan kecepatan putaran motor asli menjadi lebih rendah, sekaligus meningkatkan torsi sehingga motor mampu menggerakkan beban berat dengan stabil. Seperti motor DC pada umumnya, komponen

utama motor terdiri dari stator sebagai bagian statis dan rotor sebagai bagian berputar. Prinsip kerjanya didasarkan pada fenomena elektromagnetik, di mana arus listrik yang dialirkan ke kumparan menyebabkan perubahan kutub secara bergantian sehingga menghasilkan gerakan rotasi berulang. Dengan adanya *gearbox*, motor DC dapat lebih sesuai untuk perangkat mekanik yang membutuhkan putaran lambat namun bertenaga. Motor DC *gearbox* 12V 12 RPM tipe JGB37-520 dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Motor DC *gearbox* 12V 12 RPM tipe JGB37-520

c) Modul relai

Modul relai merupakan sakelar yang dioperasikan secara elektrik yang berfungsi untuk mengontrol perangkat elektronik eksternal seperti motor DC, lampu, ataupun peralatan rumah tangga lainnya. Modul relai dapat dikontrol menggunakan Arduino untuk mengeksekusi perintah tertentu. Modul ini terdiri dari relai dan beberapa komponen pendukung lainnya yang terintegrasi dengan papan sirkuit terpadu (PCB). Pada penelitian ini, digunakan Relay Module 5V dengan 2 *channel module* yang mampu untuk mengalirkan arus AC hingga 10A pada tegangan 230V.

Modul relai bekerja berdasarkan prinsip pengendalian elektromagnetik. Ketika pin kontrol relai menerima sinyal dari papan Arduino, koil di dalam relai akan teraktivasi sehingga kontak berpindah dari posisi terbuka (NO) ke posisi tertutup (NC). Posisi terbuka menandakan tidak ada arus listrik yang mengalir melalui rangkaian, sedangkan posisi tertutup memungkinkan arus listrik mengalir. Secara teknis, saat pin kontrol menerima sinyal *HIGH*, koil relai aktif dan kontak beralih ke posisi tertutup sehingga arus dapat mengalir melalui *output* relai. Sebaliknya, ketika pin kontrol menerima sinyal *LOW*, koil relai tidak aktif dan kontak kembali ke posisi terbuka. Modul relai dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Relay Module

d) *Inductive proximity sensor*

Inductive proximity sensor merupakan perangkat elektronik yang mengandalkan induksi elektromagnetik untuk mendeteksi keberadaan objek di dekatnya. Jenis sensor ini memiliki keterbatasan pada jenis objek yang dapat dideteksi, yaitu objek logam, baik logam *ferrous* maupun logam *non-ferrous*. Sensor ini tidak menggunakan elemen mekanis yang bergerak untuk mendeteksi keberadaan objek di sekitarnya. Sensor ini bekerja dengan menghasilkan medan elektromagnetik AC (arus bolak-balik) pada ujungnya. Ketika benda logam mendekati medan elektromagnetik sensor, akan terjadi perubahan pada medan magnet dan menyebabkan perubahan dalam induktansi (kapasitansi) pada sensor. Perubahan ini kemudian diubah menjadi sinyal keluaran yang menunjukkan kehadiran objek.

Sensor proksimitas yang digunakan dalam penelitian ini adalah *inductive proximity sensor* varian Lj8A3-2-Z/BX NPN NO yang beroperasi pada tegangan 6-36V. Sensor ini tersusun atas osilator, koil berinti ferit, rangkaian detektor, rangkaian output, serta konektor yang bekerja secara terintegrasi. Sensor proksimitas induktif bekerja dengan menginduksi arus Eddy dalam material yang diindikasikan. Prinsip kerja sensor ini dimulai dari osilator yang akan membangkitkan sinyal sinusoidal berfrekuensi tetap untuk menginduksi koil, sehingga terbentuk medan elektromagnetik. Ketika objek logam mendekati sensor, arus Eddy terinduksi pada material tersebut dan menyebabkan penurunan tegangan osilator. Perubahan tegangan ini diproses oleh rangkaian detektor dan diteruskan sebagai sinyal *output*. Sinyal *output* tersebut dapat berupa analog dalam bentuk tegangan atau arus, maupun digital dengan konfigurasi *Normally Open* atau *Normally Closed*. *Inductive proximity sensor* tipe Lj8A3-2-ZBX dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. *Inductive proximity sensor* tipe Lj8A3-2-ZBX

e) *Power supply*

Power supply (catu daya) merupakan perangkat elektronik yang memodifikasi arus listrik bolak-balik (AC) dari stopkontak menjadi arus searah (DC). Selain sebagai konversi tegangan, *power supply* juga dapat berfungsi untuk menyaring *noise* dan gangguan dari arus listrik untuk memastikan aliran daya yang stabil dan aman. *Power supply* biasanya memiliki fitur perlindungan untuk mencegah kerusakan pada perangkat elektronik akibat korsleting, lonjakan tegangan, dan *overheating*. Oleh karena itu, *power supply* digunakan pada perangkat kendali mesin pemindai 3D ini. Faktor utama lainnya juga terletak pada kebutuhan arus dan tegangan yang diluar kapasitas Arduino. Motor DC dan sensor proksimitas membutuhkan arus dan tegangan yang lebih besar dari *output* Arduino. Motor DC dan sensor proksimitas dapat bekerja pada tegangan 12V. Dengan demikian, *Power supply* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *power supply* 12V 10A. *Power supply* 12V 10A dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. *Power supply* 12V 10A

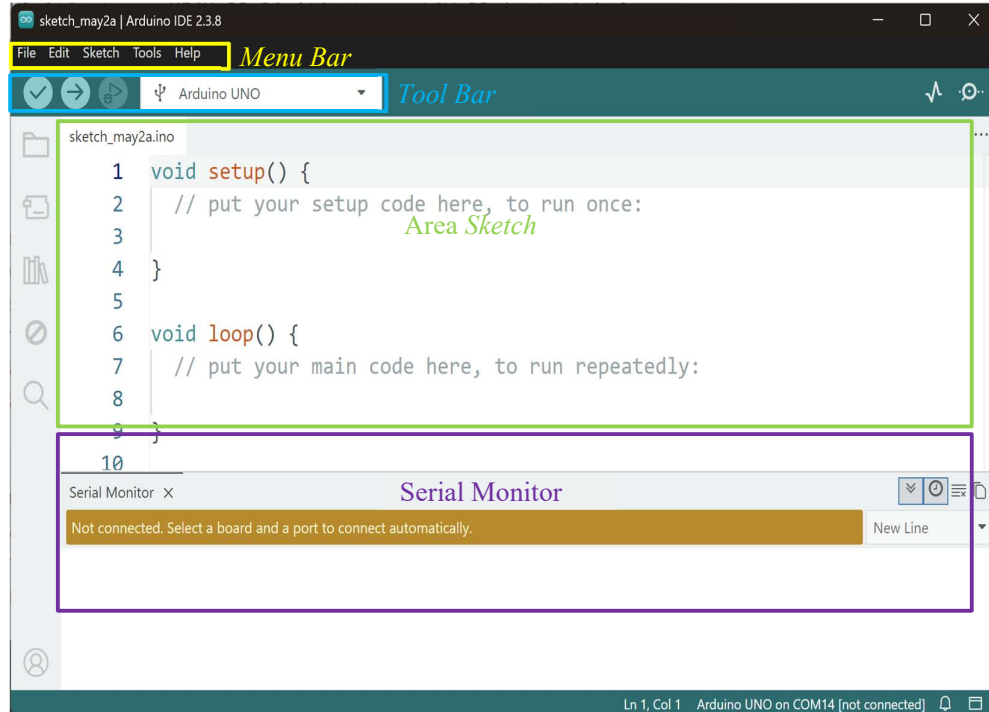
B. Perangkat lunak (*software*)

Perangkat lunak adalah serangkaian instruksi komputer atau kode pemrograman yang dirancang untuk memberikan perintah terstruktur kepada komponen perangkat keras. Pada rancang bangun perangkat kendali mesin pemindai 3D ini, perangkat lunak memegang peranan krusial dalam mengatur siklus kerja yang presisi, otomatis, dan stabil. Implementasi perangkat lunak pada penelitian ini fokus pada penggunaan Arduino IDE untuk membangun struktur algoritma kendali penggerak mekanik, serta aplikasi ponsel KIRI Engine untuk menjalankan proses komputasi ruang visual berbasis fotogrametri.

a) Arduino IDE (*Integrated Development Environment*)

Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) merupakan perangkat lunak yang secara khusus digunakan untuk menyusun, mengompilasi, dan menanamkan kode instruksi logika ke dalam *chip* mikrokontroler. Perangkat lunak ini sering digunakan oleh para pengembang, pemula maupun pelajar untuk melakukan berbagai macam proyek berbasis Arduino. Hal itu karena *Software* ini mendukung bahasa pemrograman C/C++, yang tergolong mudah untuk dipelajari. Melalui perangkat lunak ini, pengguna dapat merancang logika kendali sesuai kebutuhan perangkat mekanik. Seperti pada penelitian ini, Arduino IDE diimplementasikan secara spesifik untuk mengirimkan kode instruksi pengendalian motor serta pembacaan data sensor proksimitas. Kode instruksi akan memerintahkan mikrokontroler untuk mengaktifkan motor DC melalui modul relai, sehingga struktur mekanik rel kamera dapat berputar.

Antarmuka Arduino IDE terdiri dari beberapa komponen utama yang saling melengkapi. *Menu bar* menyediakan akses ke menu seperti *File*, *Edit*, *Sketch*, *Tools*, dan *Help* untuk membuka, menyimpan, atau mengatur konfigurasi *board* dan *port*. *Tool bar* berada tepat di bawahnya yang berisi tombol cepat seperti *Verify* untuk memeriksa kode, dan *Upload* untuk mengirim program ke papan Arduino. Area *sketch* adalah ruang utama tempat pengguna menulis dan mengedit kode pemrograman. Secara *default*, tampilan area *sketch* pada Arduino IDE menampilkan dua fungsi utama pemrograman, yaitu *setup()* dan *loop()*. Fungsi *setup()* digunakan untuk melakukan inisialisasi awal sedangkan fungsi *loop()* digunakan untuk memberikan instruksi yang dijalankan secara berulang. Sementara itu, serial monitor berfungsi sebagai jendela komunikasi antara komputer dan papan Arduino. Melalui serial monitor, pengguna dapat melihat data keluaran dari papan Arduino, mengirim perintah, dan melakukan *debugging*. Tampilan antarmuka Arduino IDE dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Tampilan antarmuka Arduino IDE

b) KIRI Engine

KIRI Engine merupakan aplikasi pemindaian tiga dimensi berbasis perangkat seluler dan web yang memanfaatkan layanan komputasi awan (*cloud computing*) untuk mengonversi data visual (citra) menjadi model tiga dimensi digital. Berbeda dengan perangkat lunak fotogrametri konvensional yang umumnya memerlukan komputer dengan spesifikasi tinggi, sebagian besar proses pemrosesan data pada KIRI Engine dieksekusi pada server penyedia layanan, sehingga pengguna hanya perlu menyediakan perangkat seluler untuk akuisisi data citra. Karakteristik tersebut menjadikan KIRI Engine sebagai salah satu aplikasi pemindaian yang mudah diakses dan ekonomis untuk mendigitalisasi objek fisik. Selain itu, aplikasi ini juga mendukung berbagai metode pemindaian, seperti *Photogrammetry*, *Featureless Object Scan*, *LiDAR Scan*, dan *3D Gaussian Splatting* (3DGS), sehingga dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan pemodelan tiga dimensi.

Pada penelitian ini, metode pemindaian yang digunakan adalah *Photogrammetry* dengan mode akuisisi data *photoscan*. Pada mode ini, model tiga dimensi dibentuk dari sekumpulan citra yang direkam dari berbagai sudut pandang objek. Selain *photoscan*, KIRI Engine juga menyediakan mode *Videoscan*, yaitu metode akuisisi data melalui perekaman video yang kemudian dikonversi menjadi sejumlah citra untuk proses rekonstruksi. Data

citra dapat diperoleh secara langsung menggunakan kamera pada aplikasi maupun diimpor dari galeri perangkat seluler. Untuk membantu pengguna memperoleh data visual yang lebih konsisten, KIRI Engine juga menyediakan berbagai pengaturan dalam pengambilan citra objek, seperti pengaturan parameter kamera, pengaturan interval waktu pemindaian, serta panduan visual selama proses pemindaian.

Selain menyediakan fasilitas pemindaian objek, KIRI Engine juga dilengkapi dengan berbagai fitur pendukung yang dirancang untuk menyederhanakan proses rekonstruksi. Salah satu fitur yang banyak dimanfaatkan adalah *Auto Object Masking*, yaitu sistem segmentasi berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* atau AI) yang digunakan untuk memisahkan objek utama dari latar belakang secara otomatis. Aplikasi ini juga menyediakan fitur penyuntingan model, seperti pemotongan area yang tidak diinginkan (*cropping*), pengurangan jumlah poligon (*mesh decimation*), pembuatan material *Physically Based Rendering* (PBR), serta *auto-rigging* untuk kebutuhan animasi. Kehadiran fitur-fitur tersebut memungkinkan proses pembuatan model tiga dimensi dilakukan secara lebih praktis tanpa memerlukan perangkat lunak tambahan.

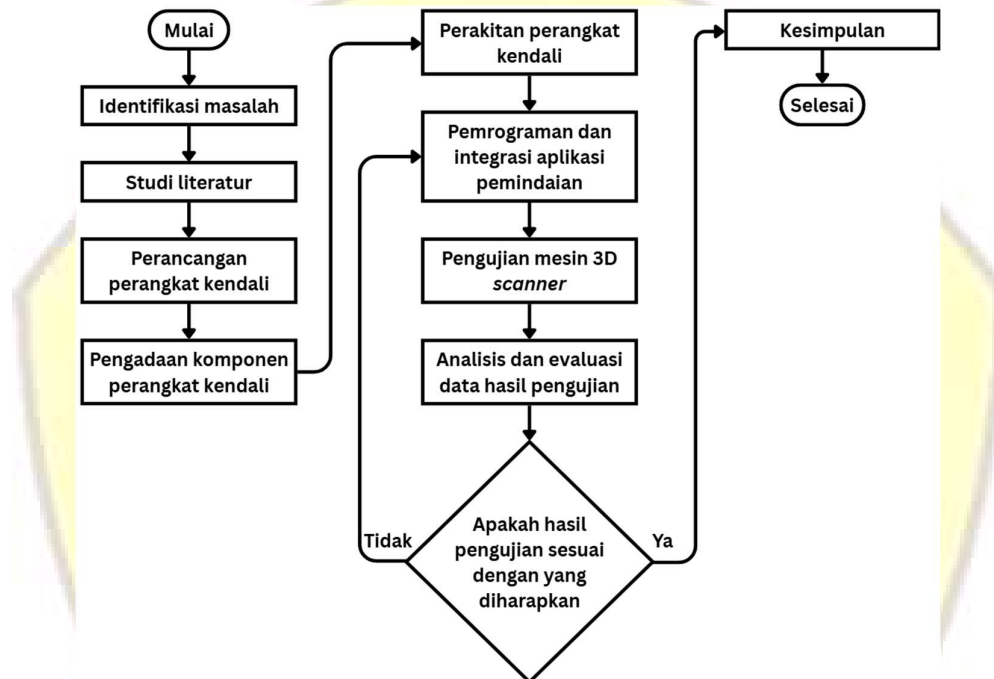
Meskipun KIRI Engine mengintegrasikan beberapa fitur berbasis AI, detail implementasi algoritma internal yang digunakan untuk rekonstruksi model tiga dimensi tidak dipublikasikan secara terbuka oleh pengembang. Oleh karena itu, proses komputasi yang berlangsung di dalam server diperlakukan sebagai suatu sistem tertutup (*black box*), di mana pengguna hanya dapat mengendalikan data masukan dan mengevaluasi model tiga dimensi yang dihasilkan. Namun, pengguna dapat meminimalisasi kegagalan rekonstruksi pada model 3D dengan memperhatikan faktor-faktor eksternal yang memengaruhi aktivitas pemindaian 3D. Dengan demikian, meskipun proses rekonstruksi telah diotomatisasi, keberhasilan pembentukan model tiga dimensi secara utuh tetap bergantung pada faktor-faktor eksternal tersebut.

Model tiga dimensi yang dihasilkan oleh KIRI Engine dapat diekspor ke berbagai format standar, seperti OBJ, STL, FBX, GLTF, GLB, PLY, maupun USDZ. Fleksibilitas format tersebut memungkinkan model dapat digunakan pada berbagai bidang aplikasi, mulai dari visualisasi produk, dokumentasi digital, *reverse engineering*, *Computer-Aided Design* (CAD), *Computer-Aided Manufacturing* (CAM), hingga manufaktur aditif (*additive manufacturing*) dan pencetakan tiga dimensi (*3D printing*). Oleh karena itu, KIRI Engine dipilih pada penelitian ini karena mampu menyediakan proses rekonstruksi tiga dimensi yang mudah diakses, ekonomis, serta kompatibel dengan kebutuhan analisis kualitas visual model tiga dimensi yang menjadi fokus penelitian.

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Dalam penelitian ini, tahapan pembuatan perangkat kendali mesin pemindai 3D dan analisis kualitas model 3D yang dihasilkan oleh mesin pemindai 3D dimodelkan dalam bentuk diagram alir. Diagram alir digunakan agar setiap proses dapat dilaksanakan secara terstruktur, logis dan sistematis, sehingga mendukung keberhasilan penelitian. Diagram alir tersebut dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Diagram alir tahapan penelitian

Uraian tahapan penelitian yang dimodelkan menggunakan diagram alir pada Gambar 15 adalah sebagai berikut:

- A. Identifikasi masalah merupakan suatu proses yang bertujuan untuk mengenali, menguraikan, dan merumuskan permasalahan yang muncul terkait kebutuhan perangkat kendali pada mesin pemindai 3D; Tahap ini penting dilakukan agar penelitian memiliki arah yang jelas serta dapat ditemukan solusi yang tepat untuk mendukung mesin pemindaian 3D otomatis;
- B. Studi literatur merupakan suatu proses yang dilakukan untuk memperoleh teori dasar dan referensi yang relevan mengenai perangkat kendali mesin pemindai 3D, seperti

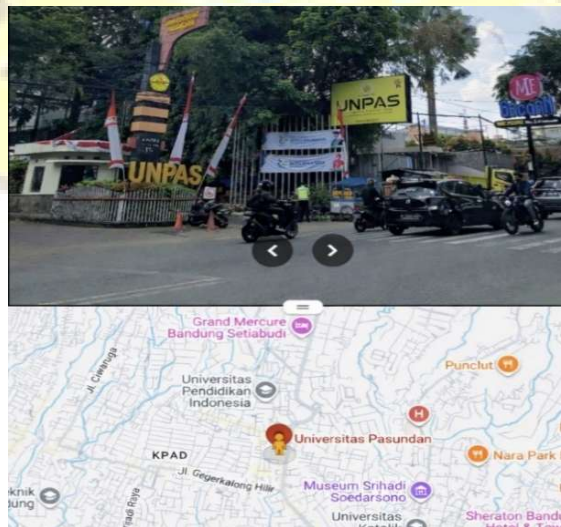
papan Arduino Uno, motor DC, *power supply*, serta integrasi dengan aplikasi pemindaian; Literatur dapat berupa teori yang telah teruji, hasil penelitian terdahulu, karya ilmiah, maupun sumber dari internet yang mendukung perancangan perangkat kendali;

- C. Perancangan perangkat kendali merupakan suatu proses yang bertujuan untuk merancang perangkat kendali sesuai kebutuhan mesin pemindai 3D; Perancangan ini mencakup pemilihan komponen utama seperti *papan* Arduino Uno, motor DC, modul relai, *inductive proximity sensor* dan *power supply* 12V 10A, dengan mempertimbangkan kesesuaian spesifikasi dan fungsi agar mesin dapat bekerja secara efektif dan stabil;
- D. Pengadaan komponen perangkat kendali merupakan langkah untuk menyiapkan komponen sesuai rancangan; Komponen yang dipilih harus memenuhi standar kualitas dan kompatibilitas, sehingga dapat mendukung proses pembuatan perangkat kendali secara optimal;
- E. Perakitan perangkat kendali merupakan suatu proses merakit komponen menjadi satu perangkat kendali yang utuh; Perakitan dilakukan dengan memperhatikan ketelitian dalam pemasangan dan penyambungan agar perangkat dapat berfungsi sesuai rancangan yang telah ditetapkan;
- F. Pemrograman dan integrasi aplikasi pemindaian merupakan suatu proses yang bertujuan untuk mendeteksi jumlah putaran motor serta memastikan sinkronisasi dengan aplikasi pemindaian; Tahap ini dilakukan agar gerakan mekanik dapat terhubung dengan proses akuisisi data pemindaian 3D secara otomatis;
- G. Pengujian akurasi mesin pemindai 3D merupakan suatu langkah untuk mengetahui sejauh mana perangkat kendali dapat mendukung proses pemindaian otomatis; Pengujian dilakukan menggunakan *smartphone* dan aplikasi pemindaian, dengan fokus pada kualitas hasil pemindaian yang dihasilkan;
- H. Analisis dan evaluasi data hasil pengujian merupakan suatu proses komprehensif untuk menilai, menginterpretasi, dan memvalidasi data yang diperoleh dari pengujian mesin pemindai 3D; Analisis dilakukan secara kuantitatif dengan menghitung persentase selisih dimensi antara objek fisik dengan model digital (metode komparasi dimensi); Sementara itu, evaluasi dilakukan secara kualitatif untuk menilai kualitas visual permukaan model; Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa perangkat pemindaian dan perangkat kendali berjalan secara sinkron;

- I. Keputusan hasil pengujian merupakan suatu tahap penentuan apakah model 3D yang dihasilkan telah memenuhi standar kualitas dan spesifikasi yang diharapkan; Jika hasil pengujian dinyatakan sesuai harapan, maka penelitian dilanjutkan ke tahap Kesimpulan; Namun, jika hasil pengujian tidak sesuai atau mengalami kecacatan struktural, maka proses penelitian akan dikembalikan ke tahapan pemrograman dan integrasi aplikasi pemindaian; Fokus perbaikan pada tahap pengulangan ini adalah meninjau kembali kalibrasi logika hitungan sensor *proximity* pada program Arduino agar tepat merespons 12 kali deteksi rotasi *timing pulley*; Dengan demikian sinkronisasi antara motor DC, *relay*, dan *timer* pemotretan pada kamera *smartphone* dapat berjalan secara presisi;
- J. Kesimpulan merupakan tahap sintesis untuk merangkum hasil akhir penelitian secara menyeluruh; Langkah ini ditujukan untuk memberikan jawaban ringkas dan konkret atas rumusan masalah dan tujuan penelitian; Selain itu, tahap ini juga memuat saran berupa rekomendasi konstruktif untuk pengembangan rancang bangun alat di masa mendatang.

2. Tempat penelitian

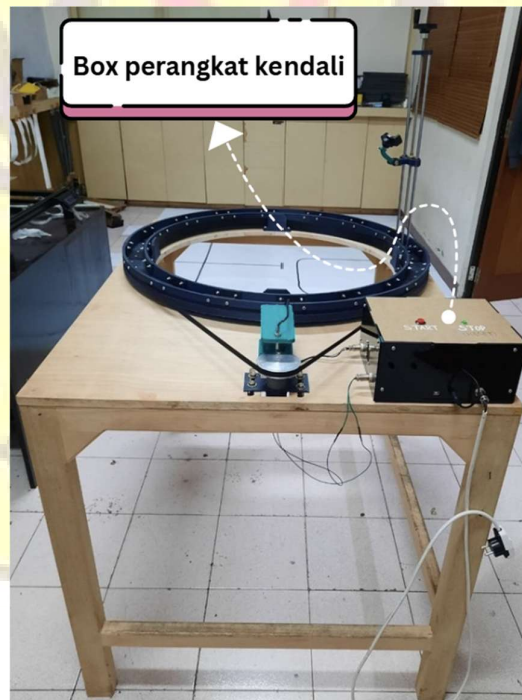
Tempat penelitian merupakan lokasi di mana seluruh rangkaian kegiatan penelitian dilaksanakan. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan, yang beralamat di Jalan Dr. Setiabudi No. 193, Gegerkalong, Kecamatan Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40153. Laboratorium ini dipilih karena memiliki fasilitas yang mendukung proses perancangan, pembuatan, serta pengujian perangkat kendali mesin pemindai 3D. Tempat penelitian dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Tempat penelitian

3. Mesin pemindai 3D tipe cincin orbital

Mesin pemindai tiga dimensi tipe cincin orbital merupakan inovasi terbaru dalam hal alat bantu perangkat pemindaian 3D. Mesin ini dirancang khusus dengan mengintegrasikan struktur penopang perangkat pemindai pada mekanisme putar berbentuk cincin yang mengorbit mengelilingi objek. Aktuator penggerak hanya menanggung beban komponen yang terdapat pada struktur cincin orbital, sehingga beban objek tidak memengaruhi komponen transmisi. Desain yang sederhana namun berkapasitas ruang kerja yang masif ini memungkinkan pengguna untuk memindai objek berukuran kecil, sedang, maupun besar, dan menariknya memungkinkan untuk memindai manusia. Keunggulan lain dari mesin ini adalah aktivitas pemindaian yang praktis, karena untuk memulai cukup menekan tombol pada kotak kendali, lalu pada akhirnya mesin akan berhenti secara otomatis. Dengan demikian, Mesin Pemindai Tiga Dimensi Otomatis Dengan Mekanisme Cincin Orbital ini diharapkan dapat menjadi solusi yang tepat dan efektif terhadap kebutuhan alat bantu aktivitas pemindaian pada berbagai sektor industri. Gambar prototipe mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Prototipe mesin pemindai 3D tipe cincin orbital

4. Perancangan dan perakitan perangkat kendali mesin pemindai 3D

Perancangan dan perakitan perangkat kendali bertujuan untuk mengintegrasikan instruksi logika perangkat kendali pada perangkat mekanik agar proses pemindaian dapat

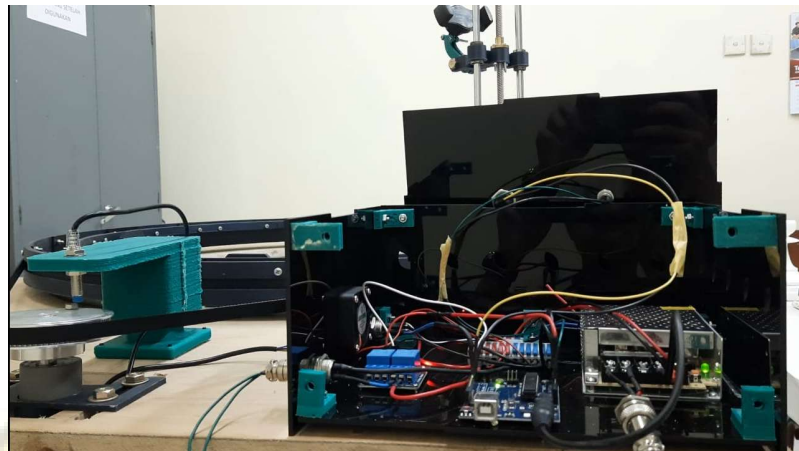
berlangsung secara otomatis dan presisi. Tahapan ini mencakup penentuan komponen perangkat kendali hingga proses pengemasan seluruh komponen tersebut ke dalam *control box* berbahan akrilik. Fokus utama pada tahap ini adalah untuk memastikan koordinasi yang selaras antara perangkat kendali dengan pergerakan *orbital* kamera secara stabil dan berulang. Seluruh komponen yang digunakan dalam perangkat kendali mesin pemindai 3D, beserta harganya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen perangkat kendali mesin pemindai 3D

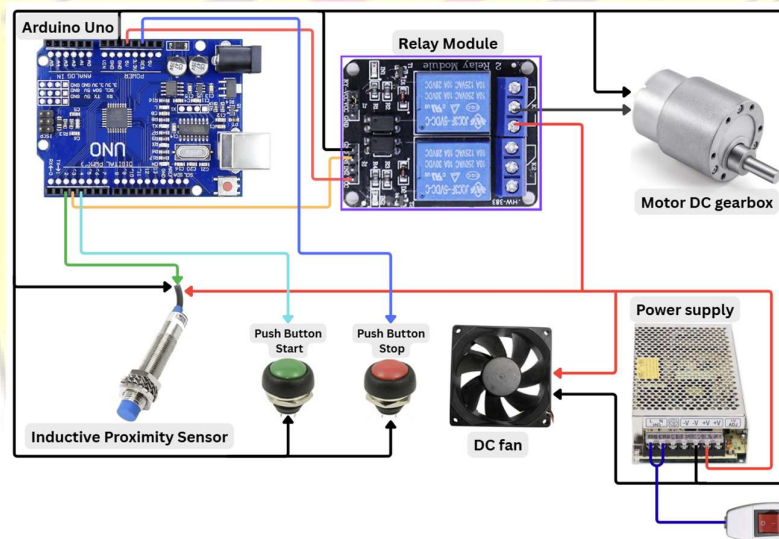
No	Nama Komponen	Jumlah Unit (pieces)	Harga satuan (Rp)	Harga Total (Rp)
1	Arduino Uno R3 ATMEGA328P 16U2	1	114.900	114.900
2	Relay Module 5V dual channel output 250VAC 30VDC	1	16.900	16.900
3	Inductive Proximity Sensor 3-wire 6-36V, LJ8A3-2-Z/BX NPN NO M8 type	1	56.025	56.025
4	Power Supply 12V 10A	1	83.100	83.100
5	Motor DC gearbox 12V 12 RPM tipe JGB37-520	1	80.000	80.000
6	Terminal cabang 2 ke 6 kabel konektor	1	10.000	10.000
7	Push button 16mm non-locking	1	3.200	3.200
8	Push button 10mm non-locking	1	1.700	1.700
9	Kabel NYHY	2	6.000	12.000
10	Steker saklar lampu 198N	1	8.500	8.500
11	Terminal cabang 2 ke 12 kabel konektor	1	18.900	18.900
12	Kabel USB Arduino 150cm	1	17.000	17.000
13	Aviation plug connector CB GX16-2 pin	2	8.000	16.000
14	Aviation plug connector CB GX16-4 pin	1	12.000	12.000
15	Mini fan DC brushless 12V 4x4x1cm	1	11.200	11.200
16	Baut Jp pan head M4	1	13.220	13.220
17	Kabel Jack DC Male	1	4.500	4.500
18	Kotak akrilik	-	Fasilitas Laboratorium	
			Jumlah Harga Total	479.145,00

Prinsip kerja perangkat kendali mesin pemindai 3D didasarkan pada logika kontrol sekuensial yang terpusat pada mikrokontroler Arduino Uno sebagai pusat kendali. Dalam implementasinya, seluruh kode instruksi operasional diunggah terlebih dahulu melalui perangkat laptop menuju mikrokontroler Arduino Uno. Mikrokontroler kemudian mengirimkan sinyal pemicu (*trigger*) menuju modul relai yang berfungsi sebagai sakelar elektronik untuk menghubungkan aliran arus dari *power supply* menuju motor DC. Putaran motor ini akan menggerakkan mekanik ring putar sehingga kamera dapat mengorbit objek sesuai dengan jalur yang telah ditetapkan. Untuk menjamin sinkronisasi gerakan, sensor proksimitas induktif diintegrasikan sebagai perangkat umpan balik (*feedback*). Sensor proksimitas diposisikan menghadap puli motor untuk mendeteksi referensi logam pada puli motor. Setiap data deteksi yang tertangkap oleh sensor akan dikirimkan kembali ke Arduino sebagai data masukan untuk menghitung jumlah putaran yang telah ditempuh secara *real-time*. Setelah sensor selesai menghitung jumlah putaran yang ditentukan terhadap referensi logam, sensor memberi *feedback* pada mikrokontroler Arduino Uno.

Selanjutnya, mikrokontroler memberi sinyal kepada modul relai untuk memutus aliran arus dari *power supply* untuk motor DC. Gambar perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital dapat dilihat pada Gambar 18, sedangkan diagram skematisnya dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 18. Gambar perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital



Gambar 19. Diagram skematis perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital

5. Kalkulasi spesifikasi teknis mesin pemindai 3D

Penetapan spesifikasi teknis mesin pemindai 3D dilakukan melalui simulasi matematis untuk memvalidasi kemampuan mesin dalam menghasilkan kerapatan data visual yang akurat. Proses kalkulasi setiap variabel pada perancangan ini dilakukan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel untuk menjamin kepresisian data serta memudahkan pelacakan korelasi antar-variabel. Hasil perhitungan yang mencakup data masukan

(*variable input*) serta data keluaran (*variable output*) dirangkum secara terstruktur dalam Tabel 2.

Tabel 2. Kalkulasi spesifikasi teknis mesin pemindai 3D

Kategori	Nama Variabel	Simbol	Nilai	satuan	Persamaan/keterangan
<i>Variabel input</i>	Diameter ring putar	D_r	866	mm	spesifikasi mekanik
	Diameter puli motor	D_p	75	mm	spesifikasi mekanik
	Target putaran puli	k	12	putaran	Target <i>trigger</i> sensor
	Bidang pandang lensa	FOV	120	°	spesifikasi kamera
	kecepatan putar motor	n	12	rpm	spesifikasi mekanik
	Interval pemotretan	t	1	detik	Pengaturan pada aplikasi
	Jarak kamera	r	320	mm	Posisi kamera dari pusat meja kerja
	Rasio okupansi	R_{occ}	13	%	Parameter dimensi minimum
	Zona efektif	Z_{eff}	55	%	Parameter dimensi maksimum
Kategori	Nama Variabel	Simbol	Nilai	satuan	Persamaan/keterangan
<i>Variabel output</i>	Rasio transmisi	i	11.55		$i = \frac{D_r}{D_p}$
	Total rotasi angular	θ	374.13	°	$\theta = \left(\frac{k}{i}\right) \times 360^\circ$
	Durasi satu putaran	T	60	detik	$T = \left(\frac{k}{n}\right) \times 60 s$
	Jumlah <i>frame</i> /satu putaran	N_f	60	<i>frame</i>	$N_f = \frac{T}{t}$
	Interval sudut antar-foto	$\Delta\theta$	6.24	°	$\Delta\theta = \frac{\theta}{N_f}$
	Tingkat tumpang tindih	$Overlap$	94.80	%	$Overlap = \left(1 - \frac{\Delta\theta}{FOV}\right) \times 100\%$
	Lebar pandang kamera	W	1108.513	mm	$W = 2 \cdot r \cdot \tan \frac{FOV}{2}$
	Dimensi minimal objek	D_{min}	144.107	mm	$D_{min} = W \cdot R_{occ}$
	Volume minimal objek	V_{min}	2,992.62	cm ³	$V_{min} = D_{min}^3$
	Dimensi maksimal objek	D_{max}	609.682	mm	$D_{max} = W \cdot Z_{eff}$
	Volume maksimal objek	V_{max}	226,626.07	cm ³	$V_{max} = D_{max}^3$

Kalkulasi ini memetakan kapasitas ruang kerja pemindaian. Lebar pandang aktual kamera (W) diturunkan dari prinsip trigonometri pada model kamera lubang jarum (*pinhole camera*). Persamaan tersebut memproyeksikan bentang visual lensa berdasarkan jarak operasional sejauh 320 mm dan sudut pandang 120 derajat. Hasil perhitungan dasar ini kemudian akan dijadikan acuan aktivitas pengujian dalam memvalidasi batas maksimum dan minimum objek pemindaian yang efektif. Batas dimensi maksimal objek (D_{max}) ditetapkan pada zona efektif sebesar 55% dari jangkauan total lebar bidang pandang untuk menghindari efek distorsi radial di area tepi lensa. Sementara itu, batas minimal objek (D_{min}) diatur pada rasio okupansi 13% untuk memastikan kecukupan kerapatan piksel untuk algoritma fotogrametri. Dimensi linear ini akhirnya dikonversikan menjadi kapasitas volume pemindaian minimum dan maksimum.

6. Skenario dan prosedur pengujian

Skenario pengujian dirancang sebagai pemetaan kegiatan eksperimental untuk mengidentifikasi faktor-faktor teknis maupun visual yang memengaruhi tingkat keberhasilan rekonstruksi model 3D. Pengujian diklasifikasikan ke dalam dua skenario utama, yaitu pengujian keandalan perangkat kendali otomatis dan pengujian kapabilitas mesin pemindai 3D. Skenario pertama difokuskan untuk mengevaluasi konsistensi mikrokontroler perangkat kendali. Sementara itu, skenario kedua ditujukan untuk menganalisis kualitas visual model 3D yang dihasilkan terhadap enam parameter independen yang memengaruhi kualitas visual pemodelan. Keenam parameter tersebut meliputi pengaruh dimensi objek, interval waktu pemotretan, variasi distribusi pencahayaan, karakteristik warna dan tekstur, asimetri posisi objek, serta jumlah multi-objek. Hasil dari seluruh rangkaian pengujian ini akan dianalisis menggunakan metode perbandingan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan dan menemukan solusi teknis yang kompatibel.

Prosedur pengujian diawali dengan tahap persiapan umum pada perangkat kendali. Kabel catu daya 12V dihubungkan ke sumber listrik, kemudian kode instruksi operasional diunggah dari laptop menuju mikrokontroler Arduino Uno untuk menginisialisasi aktuator penggerak dan umpan balik data. Setelah inisialisasi awal selesai, aplikasi KIRI Engine pada *smartphone* diaktifkan, kemudian diatur pada mode pemotretan otomatis dengan interval konstan setiap satu detik, serta lensa kamera diatur pada mode *ultrawide*. Pengoperasian mesin pemindai 3D selanjutnya dijalankan secara langsung melalui tombol tekan (*push button*) yang terintegrasi pada kotak kendali untuk memulai atau menghentikan pergerakan mekanis mesin pemindai 3D.

Proses akuisisi data visual dilakukan melalui dua prosedur yang berbeda sesuai dengan jenis objek yang diuji. Pada pengujian objek benda statis, sebuah meja kerja bundar dipasang di titik pusat struktur cincin orbital sebagai alas tumpuan benda uji. Setelah benda diposisikan di atas meja bundar, tombol mulai (*start*) ditekan sehingga penopang kamera berotasi secara otomatis mengelilingi benda hingga sensor mendeteksi dua belas putaran penuh dan menghentikan mesin. Sebaliknya, pada pengujian objek manusia, meja kerja bundar tersebut dilepas dan digantikan oleh sebuah kursi yang diletakkan tepat di tengah area orbit. Subjek manusia diinstruksikan untuk duduk diam pada kursi tersebut, kemudian siklus rotasi pemindaian dijalankan menggunakan prosedur penekanan tombol yang sama hingga mesin menyelesaikan lintasan penuhnya.

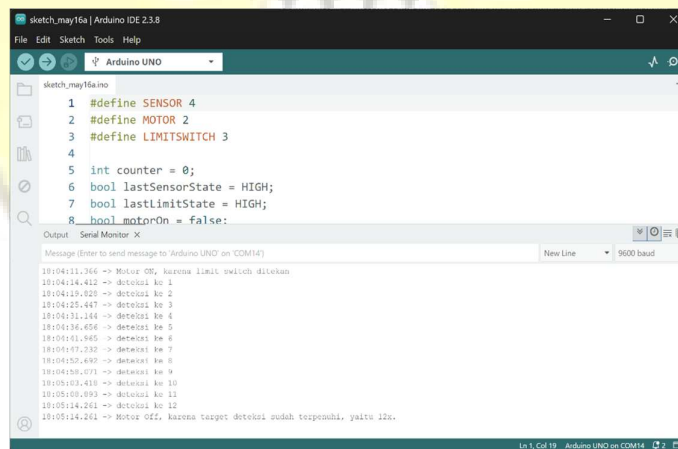
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISIS HASIL PENGUJIAN

1. Pengujian perangkat kendali mesin pemindai 3D

Tahap awal dari evaluasi hasil penelitian ini difokuskan pada keandalan operasional perangkat kendali terhadap perangkat mekanik yang dirancang bangun. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memvalidasi apakah integrasi antara perangkat lunak dan perangkat keras mampu menjalankan protokol pemindaian otomatis secara konsisten dan presisi. Penyajian hasil pengujian ini mencakup data observasi lapangan serta lampiran dokumentasi. Berdasarkan rangkaian pengujian yang telah dilaksanakan, diperoleh tiga temuan utama yang akan dianalisis.

A. Kinerja mikrokontroler dan sensor proksimitas

Pada pengujian ini, dilakukan observasi bagaimana kinerja antara mikrokontroler dan sensor proksimitas induktif. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui bagaimana respon mikrokontroler terhadap pembacaan data oleh sensor proksimitas. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan papan Arduino Uno ke laptop melalui kabel USB, kemudian mesin pemindai 3D diaktifkan. Respon dari mikrokontroler terhadap pembacaan data oleh sensor dapat dilihat melalui serial monitor pada perangkat lunak Arduino IDE. Selama proses operasional, sensor difungsikan untuk mendeteksi referensi logam pada puli motor sebanyak 12 kali. Respon dari mikrokontroler terhadap pembacaan sensor proksimitas dapat dilihat pada Gambar 20.

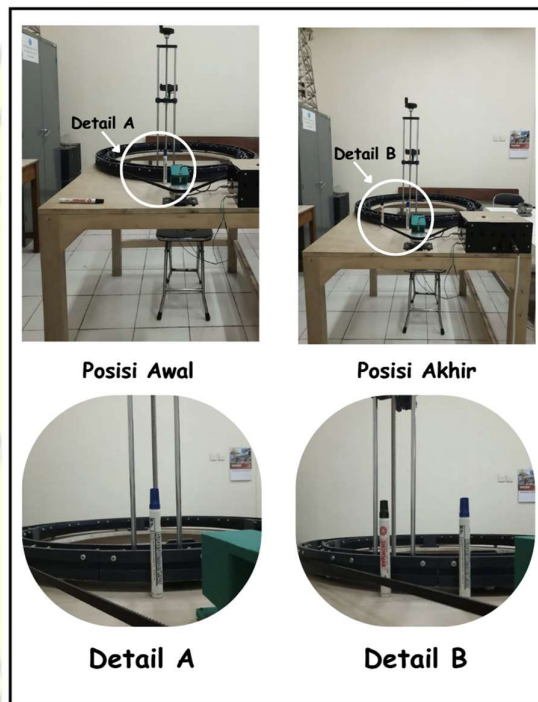


Gambar 20. Tampilan serial monitor Arduino Uno

Hasil pengujian ini menunjukkan respon mikrokontroler terhadap sensor proksimitas sangat bagus. Tidak ditemukan adanya malfungsi berupa *missed trigger* (sinyal terlewat) maupun *bounce signal* (pembacaan ganda).

B. Deviasi titik henti *ring* putar

Pada pengujian ini, dilakukan observasi terhadap ketepatan titik henti mekanis dan durasi operasional aktual ring putar. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah mesin pemindai 3D mampu berputar 1 putaran penuh (360°). Pengujian ini dilakukan dengan cara memberi tanda posisi awal tiang kamera menggunakan spidol berwarna biru kemudian mesin pemindai 3D diaktifkan, selanjutnya posisi akhir tiang kamera diberi tanda spidol berwarna hitam. Hasilnya, setelah mesin menyelesaikan target 12 kali putaran penuh, posisi akhir tiang kamera ditemukan mengalami pergeseran sudut melampaui posisi awalnya. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Posisi awal (spidol hitam) dan posisi akhir (spidol biru) kamera

2. Pengujian mesin pemindai 3D

Pengujian mesin pemindai 3D dirancang untuk mengidentifikasi kapabilitas mesin pemindai 3D dalam melakukan akuisisi data spasial. Aktivitas pengujian ini mencakup enam parameter independen yang diduga dapat memengaruhi kualitas model digital akhir. Ke-enam parameter tersebut meliputi pengaruh dimensi objek, interval waktu pemotretan, variasi distribusi pencahayaan, karakteristik warna dan tekstur objek, asimetri posisi objek, hingga jumlah multi-objek. Evaluasi kinerja komputasi fotogrametri difokuskan pada respons algoritma fotogrametri terhadap variasi karakteristik objek dan kondisi lingkungan fisik.

A. Pengaruh dimensi objek terhadap kapabilitas pemindaian

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi batas rentang ukuran fisik objek nyata yang mampu direkonstruksi secara utuh oleh perangkat lunak fotogrametri. Pengujian dilakukan dengan dua skenario, yaitu pengujian *scanning* objek minimum dan pengujian *scanning* objek maksimum. Pengujian *scanning* objek minimum melibatkan tiga benda uji, yaitu teh kotak, Tricks, dan balok *styrofoam*. Permukaan bagian atas objek Tricks dan balok *styrofoam* sengaja ditutup dengan pita perekat berwarna kuning, dengan tujuan untuk meredam pantulan cahaya. Sementara itu, pengujian *scanning* objek maksimum, digunakan tubuh manusia untuk mengatasi ketersediaan benda uji berdiameter masif di lingkungan laboratorium. Data pengujian pengaruh dimensi objek terhadap kapabilitas pemindaian dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data pengujian pengaruh dimensi objek terhadap kapabilitas pemindaian

No	Nama Objek	Dimensi (mm)	Visual Objek Nyata	Visual Model 3D
1	Teh kotak	60 x 40 x 125		
2	Tricks	100 x 90 x 115		
3	Balok <i>styrofoam</i>	150 x 150 x 135		

No	Nama Objek	Dimensi (mm)	Visual Objek Nyata
4	Anjar	Lebar bentang bahu: 500 mm	
5	Herry	Lebar bentang bahu: 550 mm	
6	Jidan	Lebar bentang bahu: 600 mm	

Berdasarkan data visual model 3D pada Tabel 3, diperoleh temuan bahwa tingkat keutuhan geometri pada model 3D akan berbanding lurus dengan besaran dimensi penampang alas objek. Pada pengujian batas minimum, model 3D Teh Kotak dan Tricks terlihat mengalami deformasi struktural. Sementara itu, model 3D balok *styrofoam* berhasil direkonstruksi dengan bentuk geometri yang presisi dan bersudut tegas. Pada pengujian batas maksimum, proses pemindaian berhasil memproses ketiga subjek manusia tanpa mengalami pemotongan gambar (*cropping*). Bahkan pada objek terbesar (Jidan, 600 mm), area bahu kiri hingga bahu kanan tetap terekam utuh.

B. Pengaruh interval waktu terhadap kerapatan data visual

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak jeda waktu pengambilan gambar terhadap hasil rekonstruksi model 3D. Pengujian dilakukan dengan membandingkan tiga interval pemotretan, yaitu 1 detik, 2 detik, dan 3 detik. Objek yang digunakan adalah pion catur dengan dimensi keseluruhan 145 x 145 x 300 mm. Objek pengujian dapat dilihat pada Gambar 22, sementara data pengujian pengaruh interval waktu terhadap kerapatan visual dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 22. Objek uji (pion catur)

Berdasarkan data visual pada Tabel 4, diperoleh temuan bahwa keutuhan geometri model 3D berbanding lurus dengan jumlah *frame* foto. Jumlah *frame* foto ini dipengaruhi oleh interval waktu pemindaian. Pada pengujian dengan interval 1 detik (67 *frame*) dan 2 detik (33 *frame*), model 3D pion catur berhasil direkonstruksi secara utuh. Sementara itu, pada interval 3 detik (21 *frame*), model 3D mulai mengalami deformasi struktural. Kerusakan geometri ini terlihat jelas bahwa bentuk dari model 3D pion catur menjadi tidak simetris.

Tabel 4. Data pengujian pengaruh interval waktu terhadap

Interval Waktu (detik)	Jumlah <i>Frame</i>	Visual Model 3D
1	67	
2	33	
3	21	

C. Pengaruh Variasi Pencahayaan terhadap Kualitas Model 3D

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak variasi intensitas pencahayaan ruang pemindaian terhadap kualitas visual akhir model 3D. Pengujian dilakukan dengan membandingkan dua kondisi pencahayaan yang berbeda di dalam ruang laboratorium. Kondisi pertama menggunakan empat buah lampu plafon untuk menghasilkan sebaran cahaya yang merata. Kondisi kedua hanya menggunakan dua buah lampu plafon yang memicu pantulan cahaya terarah. Kuantitas cahaya yang dihasilkan dari kedua kondisi

tersebut kemudian diukur menggunakan aplikasi *smartphone* untuk memperoleh parameter yang jelas. Objek yang digunakan dalam pengujian ini sama seperti pengujian B, yaitu Gambar 22. Data pengujian variasi pencahayaan terhadap kualitas model 3D dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data pengujian variasi pencahayaan terhadap kualitas model 3D

No	Jumlah sumber cahaya	Nilai <i>Lumens</i>	Visual Model 3D
1	4	16164.96	
2	2	8693.76	

Berdasarkan visualisasi pada Tabel 5, diperoleh temuan bahwa kualitas tekstur permukaan objek sangat bergantung pada pemerataan distribusi cahaya. Pada pengujian dengan empat lampu, permukaan pion catur berhasil direkonstruksi dengan warna yang konsisten. Sebaliknya, pada pengujian dengan dua lampu, model 3D mengalami degradasi kualitas tekstur visual secara signifikan. Permukaan objek pada area sisi yang tidak terpapar cahaya langsung terlihat menjadi lebih gelap dan memudar. Selain penurunan kualitas tekstur, bentuk geometri model 3D pion catur juga mengalami cacat struktural pada bagian

tengah objek. Ketidakseimbangan intensitas cahaya ini bahkan menyebabkan orientasi model pion catur hasil rekonstruksi terlihat sedikit miring dari poros pusatnya.

D. Pengaruh karakteristik warna dan tekstur objek terhadap hasil rekonstruksi

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak karakteristik warna dan tekstur objek terhadap kualitas model 3D. Objek pemindaian difokuskan pada pengujian subjek manusia dengan tiga variasi pakaian yang memiliki karakteristik berbeda. Subjek uji tersebut memiliki lebar bentang bahu 550 mm, dan variasi pakaian meliputi baju berwarna hitam, baju berwarna putih, dan kardigan bercorak abstrak. Data pengujian pengaruh karakteristik warna dan tekstur objek terhadap hasil rekonstruksi dapat dilihat pada Tabel 6.

Berdasarkan data visualisasi pada Tabel 6, diperoleh temuan bahwa warna dan tekstur objek memengaruhi proses komputasi algoritma fotogrametri. Pemindaian pada subjek berbaju hitam menghasilkan deformasi geometri parah pada area dada dan punggung seperti berlubang. Fenomena lubang yang terbentuk pada area dada dan punggung tersebut disebabkan oleh kurangnya tekstur pada area tersebut. Sementara itu, rekonstruksi subjek berbaju putih menghasilkan struktur geometri badan yang jauh lebih baik, meskipun terdapat cacat rekonstruksi berupa bercak putih pada area dagu akibat pantulan cahaya dari baju. Hasil rekonstruksi terbaik diperoleh pada subjek berbaju kardigan, karena corak abstrak dan bahan rajutan tersebut kaya akan fitur unik yang memudahkan algoritma SIFT dalam melacak titik unik. Selain itu, temuan juga menunjukkan bahwa seluruh model 3D manusia juga mengalami kerusakan konsisten pada bagian rambut.

Tabel 6. Data pengujian pengaruh karakteristik objek terhadap hasil rekonstruksi

No	Karakteristik warna dan tekstur	Visual model 3D
1	Baju hitam	

No	Karakteristik warna dan tekstur	Visual model 3D
2	Baju putih	
3	Kardigan bercorak	

E. Pengaruh Asimetri Posisi Objek terhadap Akurasi Geometri

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak asimetri penempatan posisi objek terhadap akurasi geometri model 3D. Objek pemindaian difokuskan pada objek uji dengan variasi pergeseran posisi dari titik pusat meja kerja. Variasi pergeseran tersebut mencakup jarak sejauh tiga sentimeter, enam sentimeter, dan sembilan sentimeter dari pusat. Objek yang digunakan dalam pengujian ini sama seperti pengujian B dan C, yaitu pion catur seperti gambar 18. Data pengujian pengaruh asimetri posisi objek terhadap akurasi geometri dapat dilihat pada Tabel 7.

Berdasarkan data visualisasi pada Tabel 7, pergeseran asimetris terbukti memicu cacat struktural berupa kemiringan pada sumbu vertikal objek. Pada variasi pergeseran tiga sentimeter, model 3D masih tidak menunjukkan deformasi geometri. Namun, pada variasi

pergeseran enam dan sembilan sentimeter secara konsisten menghasilkan deformasi geometri parah pada bagian tengah pion. Selain itu, posisi bagian kepala pion pada kedua variasi tersebut menjadi sangat tidak beraturan.

Tabel 7. Data pengujian pengaruh asimetri posisi objek terhadap akurasi geometri

Variasi posisi objek dari meja kerja	Visual Model 3D
30 mm	
60 mm	
90 mm	

F. Pengaruh multi-objek terhadap Integritas model 3D

Pengujian ini bertujuan mengevaluasi dampak pemindaian objek berjumlah banyak terhadap integritas geometri model 3D akhir. Objek pemindaian difokuskan pada

penggunaan benda uji *styrofoam* dengan variasi bentuk berbeda-beda. Konfigurasi pengujian dilakukan dengan tiga level variabel, yaitu pemindaian dua objek secara bersamaan, pemindaian tiga objek secara bersamaan, dan pemindaian empat objek secara bersamaan. Ke-empat objek uji tersebut, dapat dilihat pada Gambar 23, sementara data pengujian pengaruh multi-objek terhadap integritas model 3D dapat dilihat pada Tabel 8.



Gambar 23. Objek uji multi-objek

Berdasarkan data visual model 3D pada Tabel 8, integritas geometri model menunjukkan penurunan seiring bertambahnya jumlah benda uji. Pemindaian dua dan tiga objek styrofoam berhasil direkonstruksi dengan jaring poligon yang terpisah satu sama lain.

Namun, pemindaian empat objek *styrofoam* secara bersamaan menghasilkan cacat fusi geometri di area alas benda. Alas dari ke-empat *styrofoam* tersebut terlihat menyatu menjadi satu blok geometri padahal aslinya terpisah renggang.

Tabel 8. Data pengujian pengaruh multi-objek terhadap integritas model 3D

No.	Jumlah Objek	Visual Model 3D
1	2	
2	3	
3	4	

3. Analisis hasil pengujian

Sub-bab ini memaparkan evaluasi teoretis secara komprehensif terhadap fenomena teknis yang ditemukan selama proses pengujian. Analisis dilakukan dengan mengkorelasikan data empiris lapangan dengan hukum-hukum dasar mekanika, elektronika, dan geometri spasial fotogrametri.

A. Analisis hasil pengujian perangkat kendali mesin pemindai 3D

Berdasarkan hasil pengujian pada gambar 16, dalam tampilan serial monitor Arduino IDE telah menunjukkan data hasil eksekusi program yang sesuai dengan kode instruksi yang diberikan. Namun, meskipun secara logika kelistrikan/sensor kinerjanya sempurna, secara fisika mekanik, hasil pengujian menunjukkan adanya deviasi mekanik antara posisi awal dan posisi akhir kamera berhenti. Berdasarkan kalkulasi pada Tabel 2, jika target putaran puli diatur 12 putaran, maka seharusnya rasio transmisi juga bernilai 12. Namun pada kalkulasi, rasio transmisi malah bernilai 11.55. Penyimpangan ini dianalisis dapat terjadi akibat adanya inkongruensi geometri antara diameter cincin orbital (866 mm) dengan diameter puli (75 mm). Akibatnya, mesin tidak berputar satu putaran penuh (360°), melainkan 374.13° . Dengan kata lain, mesin pemindai 3D ini mengalami *overshoot* mekanik sejauh 14.13° , sehingga mengakibatkan posisi henti mesin selalu mendahului posisi awal operasionalnya.

Kelebihan jarak angular (*overshoot*) tersebut secara linier memicu pertambahan durasi operasional aktual menjadi 67 detik, yang secara otomatis meningkatkan kuantitas pengambilan gambar hingga mencapai 67 *frame* foto. Walaupun terjadi peningkatan durasi pemindaian, temuan ini justru memberikan keuntungan bagi algoritma fotogrametri karena persentase tumpang tindih (*overlap*) citra juga ikut meningkat. Dalam komputasi fotogrametri, semakin tinggi persentase tumpang tindih, semakin banyak fitur unik yang dapat diidentifikasi. Dengan demikian, akurasi dan stabilitas rekonstruksi model 3D juga ikut meningkat.

B. Analisis pengaruh dimensi objek terhadap kapabilitas pemindaian

Berdasarkan pengujian pada Tabel 3, kegagalan rekonstruksi yang terjadi pada objek Teh Kotak dan Tricks dianalisis dapat terjadi karena dimensi objek tersebut terlalu kecil, sehingga jumlah piksel yang mempresentasikan objek tersebut menjadi terlalu sedikit (*pixelation*). Akibatnya, objek tersebut menjadi kehilangan informasi detail dan berpotensi dianggap sebagai *noise* dalam komputasi fotogrametri. Artinya, hasil rekonstruksi model 3D dapat terdeformasi dan berpotensi tidak terbentuk sama sekali. Sementara itu,

rekonstruksi sempurna terjadi pada model 3D balok *styrofoam*. Hal ini secara langsung memvalidasi kalkulasi spesifikasi teknis yang terdapat pada Tabel 2, di mana objek balok *styrofoam* yang berdimensi (150 x 150 x 135) mm telah memenuhi standar penetapan rasio okupansi sebesar 13%. Selain itu, pengujian batas maksimum objek juga memvalidasi kalkulasi spesifikasi teknis pada tabel 2. Hasil pengujian ketiga subjek dengan lebar bentang bahu 500 mm, 550 mm, dan 600 mm, tidak menunjukkan adanya cacat. Artinya penetapan zona efektif (Z_{eff}) sebesar 55%, di mana menghasilkan batas diameter maksimal (D_{max}) objek sebesar 609.682 mm, terbukti valid.

Sebagai langkah optimasi, mesin pemindai 3D ini sebenarnya mampu merekonstruksi objek berdiameter kecil (di bawah nilai rasio okupansi 13%) secara optimal, yaitu melalui pengaturan pada fitur optik kamera *smartphone*. Pengguna dapat memanfaatkan fitur pembesaran optik (*telephoto*) atau mengubah konfigurasi lensa dari tipe *ultrawide* 120° menjadi lensa *wide* 90°. Langkah ini efektif untuk meningkatkan rasio okupansi piksel objek secara signifikan sehingga detail tajam permukaan benda dapat lebih mudah diekstraksi oleh algoritma.

C. Analisis pengaruh interval waktu pemindaian

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4, pada variasi interval waktu 3 detik, model 3D tampak terdeformasi. Penyebab kegagalan ini dianalisis dapat terjadi karena interval pergeseran sudut antar-citra ($\Delta\theta$) yang ekstrem. Meskipun pada variasi interval 3 detik masih menghasilkan 21 *frame* dengan persentase tumpang tindih sebesar 85.15%, besaran interval pergeseran sudut antar-citra ($\Delta\theta$) mencapai 17.82°. Artinya, kamera harus bergeser ekstrem sejauh $\approx 17.82^\circ$ untuk setiap jepretan foto. Akibatnya dalam proses rekonstruksi model 3D, algoritma akan kesulitan dalam mengekstraksi titik ikat yang sama antar-citra. Selanjutnya algoritma akan melakukan estimasi posisi kamera secara paksa dan berujung pada penyusutan geometri model. Hasil pengujian ini menunjukkan meskipun persentase tumpang tindih telah melampaui rekomendasi penelitian terdahulu (80%), model 3D tetap belum optimal karena perolehan jumlah *frame* foto juga penting untuk diperhatikan.

Sementara itu, rekonstruksi model 3D yang utuh terjadi pada variasi interval 1 dan 2 detik. Pada interval 1 detik yang menghasilkan 67 *frame* dan 2 detik yang menghasilkan 33 *frame*, *tingkat* overlap yang dihasilkan mencapai 95.35% dan 90.55%. Selain itu, interval pergeseran sudut antar-citranya masing-masing mencapai 5.58° dan 11.34°. Berdasarkan hasil pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa variasi interval waktu pemindaian sangat memengaruhi rekonstruksi model 3D yang dihasilkan. Semakin cepat interval waktu pemindaian, semakin tinggi persentase tumpang tindih yang terjadi.

Semakin tinggi tingkat persentase tumpang tindih, semakin bagus pula model 3D yang dihasilkan. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa tingkat persentase tumpang tindih terbaik dicapai pada >90%.

D. Analisis pengaruh variasi pencahayaan

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 5, pengujian menggunakan konfigurasi 4 lampu plafon berhasil menghasilkan rekonstruksi geometri pion catur yang akurat dengan visualisasi warna tekstur yang konsisten. Namun, reduksi kuantitas pencahayaan menjadi 2 lampu mengakibatkan terjadinya degradasi mutu permukaan berupa area yang buram/gelap, serta memicu cacat struktural berupa kemiringan sumbu vertikal model dari poros pusatnya. Tingkat pencahayaan pada konfigurasi 4 lampu bernilai 119 lux, jika dikalikan dengan luas ruangan ($135,84 \text{ m}^2$), maka sebaran fluks cahaya di dalam ruangan tersebut bernilai 16164,96 *lumens*. Sementara itu, pada tingkat pencahayaan konfigurasi 2 lampu bernilai 64 lux, dengan luas ruangan yang sama maka menghasilkan sebaran fluks cahaya sebesar 8493,76 *lumens*. Berdasarkan kalkulasi tersebut, dapat dikatakan bahwa ketidakseimbangan sebaran fluks cahaya dan intensitas cahaya yang rendah akan memengaruhi kualitas model 3D yang dihasilkan. Dengan kata lain, variasi pencahayaan dalam ruang pemindaian terbukti memengaruhi rekonstruksi model 3D.

E. Analisis pengaruh karakteristik warna dan tekstur objek terhadap hasil rekonstruksi

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 6, pengujian subjek dengan baju cardigan bercorak abstrak menghasilkan rekonstruksi model 3D yang paling utuh. Berbeda dengan subjek dengan baju berwarna hitam pekat polos yang terdapat cacat lubang, dan baju berwarna putih polos yang terdapat bercak putih pada area dagu. Objek dengan warna hitam polos secara alami memiliki karakteristik menyerap gelombang cahaya, sehingga menyebabkan kamera hanya dapat menangkap tingkat kontras visual yang sangat rendah pada permukaan objek. Sementara itu, objek dengan warna putih polos memiliki karakteristik memantulkan cahaya, sehingga memicu pantulan difus (*diffuse reflection*) sekunder ke arah dagu. Di sisi lainnya, data pengujian secara konsisten juga menunjukkan kerusakan pada area rambut. Karakteristik rambut yang gelap dan kompleks, dikombinasikan dengan pergeseran posisi spasial akibat *micro-movements*, menyulitkan algoritma mengunci titik acuan yang tetap.

Akibat dari ketiadaan kontras pada baju berwarna hitam, efek pantulan cahaya dari baju berwarna putih, serta *micro-movements* pada rambut, algoritma SIFT mengalami defisit ekstrem dalam mendeteksi dan mengekstraksi titik unik (*keypoints*). Kegagalan penyelarasan fitur ini-pun kemudian memicu efek domino (*domino effect*), di mana

algoritma SfM menjadi tidak mampu menyelaraskan kalkulasi orientasi posisi kamera dan memicu kesalahan triangulasi pada ruang 3D. Dampak akhirnya, algoritma MVS menjadi kehilangan panduan koordinat spasial sehingga membiarkan beberapa area baju hitam kosong tanpa rajutan jaring poligon (*mesh*) dan merusak struktur area dagu serta rambut.

Sebagai langkah solusi, penempelan stiker referensi (*coded targets*) atau penyemprotan cat *doff* dapat digunakan untuk merekayasa pola kontras buatan, sehingga masalah cacat lubang atau efek pantulan difus dapat teratasi. Selain itu, masalah kompleksitas geometri rambut dapat diatasi dengan menggunakan penutup kepala. Pemanfaatan kamera dengan fitur *Optical Image Stabilization* (OIS) juga direkomendasikan untuk memitigasi masalah *micro-movement* subjek.

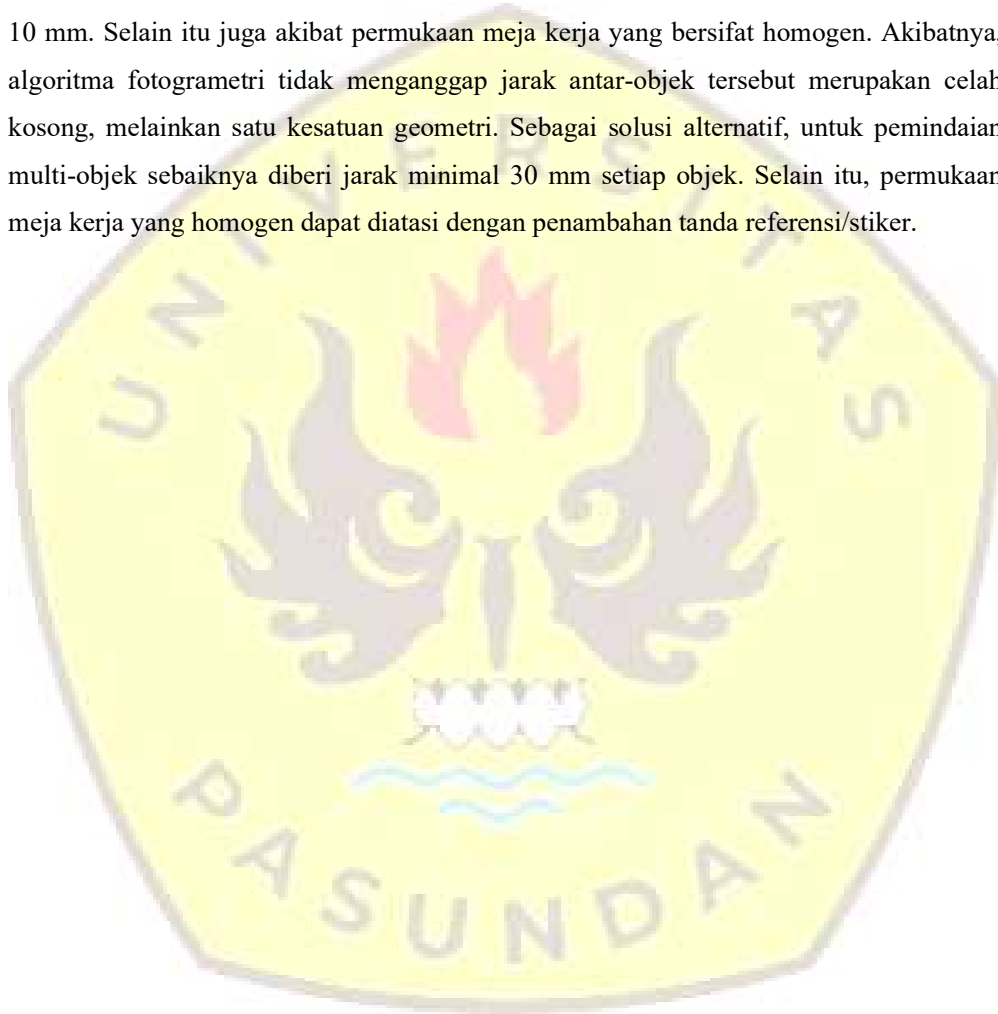
F. Analisis pengaruh asimetris posisi objek terhadap akurasi geometri

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 7, data visual model 3D menunjukkan terjadi deformasi struktural, di mana model tidak simetris pada variasi pergeseran posisi objek sejauh 30 mm, 60 mm dan 90 mm dari pusat meja kerja. Fenomena deformasi struktural berupa kemiringan objek yang condong ke arah yang menjauhi pusat meja kerja ini, dianalisis disebabkan oleh fluktuasi jarak operasional kamera dan efek distorsi radial non-linear lensa *ultrawide* (120°).

Pada mesin 3D *scanner* ini, kamera bergerak memutar dengan radius 320 mm terhadap pusat meja kerja. Ketika objek uji pion catur diletakkan sejauh 90 mm dari pusat meja kerja, jarak operasional riil antara lensa kamera dan permukaan terluar objek menjadi tidak konsisten. Saat kamera berada tepat di depan objek, jarak terdekat aktual ke permukaan terluar objek menyusut drastis menjadi hanya 157,5 mm. Sebaliknya, saat kamera berada di sisi seberangnya, jarak terjauh ke permukaan objek meningkat menjadi 337,5 mm. Fluktuasi jarak yang ekstrem ini memaksa objek keluar dari poros tengah dan masuk ke area tepi lensa pada rentang sudut tertentu. Selama proses akuisisi data, pada sudut tertentu pasti terjadi fenomena di mana kamera kehilangan informasi geometri pada sebagian area objek tertentu. Lebih lagi, penggunaan lensa *ultrawide* dengan bidang pandang 120° menghasilkan efek distorsi radial yang sangat masif pada area tepi lensa. Akibatnya, dalam proses rekonstruksi, wujud model 3D berpotensi mengalami kelengkungan dan peregangan ekstrem. Dengan demikian maka dapat disimpulkan posisi objek yang tidak pada pusat rotasi akan menyebabkan bentuk model 3D yang asimetris.

G. Analisis pengaruh multi-objek terhadap integritas model 3D

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 8, data visual model 3D menunjukkan pada variasi kuantitas 2 dan 3 objek masih menghasilkan bentuk model 3D yang terpisah secara akurat. Namun, pada variasi 4 objek secara bersamaan menunjukkan model 3D mengalami kegagalan rekonstruksi berupa fusi geometri pada seluruh penampang alas benda.. Fenomena cacat penyatuan geometri pada pengujian ini dianalisis disebabkan oleh penyempitan rasio jarak bebas antar-objek di atas permukaan alas meja kerja yang berjarak 10 mm. Selain itu juga akibat permukaan meja kerja yang bersifat homogen. Akibatnya, algoritma fotogrametri tidak menganggap jarak antar-objek tersebut merupakan celah kosong, melainkan satu kesatuan geometri. Sebagai solusi alternatif, untuk pemindaian multi-objek sebaiknya diberi jarak minimal 30 mm setiap objek. Selain itu, permukaan meja kerja yang homogen dapat diatasi dengan penambahan tanda referensi/stiker.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Pada penelitian ini, perangkat kendali mesin pemindai 3D otomatis berhasil dirancang bangun, sehingga mesin dapat beroperasi dengan stabil. Berdasarkan data hasil pengujian dan analisis hasil pengujian, ditarik dua kesimpulan pokok yang menjawab rumusan masalah dan tujuan penelitian.

A. Perangkat kendali mesin pemindai 3D yang dirancang bangun

Secara keseluruhan, perangkat kendali mesin pemindai 3D tipe cincin orbital telah berhasil dirancang bangun dengan biaya yang ekonomis, yaitu Rp479.145. Hasil pengujian menunjukkan terdapat inkongruensi mekanis antara dimensi cincin orbital dan puli memicu deviasi kelebihan putaran sejauh 14.13° . Akibatnya, durasi operasional meningkat dari 60 detik menjadi 67 detik. Hasil analisis menunjukkan bahwa temuan ini justru memberi keuntungan pada perangkat lunak dalam membentuk model 3D.

B. Pengaruh parameter teknis (dimensi, waktu, cahaya, tekstur, asimetri, dan kuantitas objek) terhadap kualitas model 3D yang dihasilkan

- Pengaruh dimensi objek

Dengan spesifikasi kamera resolusi 12 MP dan bidang pandang 120° , objek berukuran kecil yang berada di bawah batas ambang okupansi 13% yaitu 144,107 mm terbukti mengalami deformasi berupa sudut model 3D menjadi tumpul dan melengkung. Sementara itu, penetapan zona efektif sebesar 55% terbukti valid, di mana hasil pengujian menunjukkan keberhasilan merekonstruksi subjek dengan lebar bentang bahu 500 hingga 600 mm.

- Pengaruh interval waktu

Pemindaian objek dengan interval waktu 3 detik yang menghasilkan 21 *frame* dan *overlap* 85.15%, memaksa pergeseran sudut antar foto ekstrem sejauh 17.82° per *frame*. Akibatnya, model 3D yang dihasilkan mengalami deformasi penyusutan. Sementara itu, rekonstruksi model 3D yang utuh terjadi pada variasi interval 1 dan 2 detik. Pada interval 1 detik yang menghasilkan 67 *frame* dan 2 detik yang menghasilkan 33 *frame*, tingkat *overlap* yang dihasilkan mencapai 95.35% dan 90.55%. Selain itu, interval pergeseran sudut antar-citranya masing-masing mencapai 5.58° dan 11.34° .

- Pengaruh variasi pencahayaan

Pemindaian objek dengan menggunakan konfigurasi 4 lampu plafon, di mana menghasilkan sebaran fluks cahaya 16164,96 *lumens* menunjukkan keberhasilan rekonstruksi yang akurat dengan visualisasi warna tekstur yang konsisten. Sementara itu, pemindaian objek dengan menggunakan konfigurasi 2 lampu, yang menghasilkan sebaran fluks cahaya 8493,76 *lumens* memicu ketidakseimbangan sebaran fluks cahaya pada ruang pengujian, sehingga model 3D mengalami perubahan warna dan cacat struktural berupa kemiringan sumbu vertikal objek dari poros pusatnya.

- Pengaruh karakteristik visual

Pemindaian subjek pada karakteristik warna baju hitam polos bersifat menyerap cahaya, sehingga model 3D mengalami cacat lubang. Sementara itu, pada warna putih polos bersifat memantulkan cahaya, sehingga model 3D mengalami bercak putih pada area yang tidak berwarna putih. Hasil pengujian dengan kualitas model 3D yang paling utuh merujuk pada subjek dengan baju cardigan bercorak.

- Pengaruh asimetri posisi

Pemindaian objek pada variasi pergeseran posisi 60 mm dan 90 mm dari pusat meja kerja menunjukkan model 3D mengalami kegagalan rekonstruksi berupa deformasi struktural sumbu vertikal yang miring ke arah yang menjauhi pusat poros rotasi. Sementara itu, pemindaian objek pada variasi pergeseran posisi 30 mm dari pusat meja kerja masih menunjukkan kualitas model 3D yang utuh.

- Pengaruh kuantitas objek

Pemindaian objek pada variasi kuantitas 2 dan 3 objek masih menghasilkan bentuk model 3D yang terpisah secara akurat. Namun, pada variasi 4 Objek secara bersamaan menunjukkan model 3D mengalami kegagalan rekonstruksi berupa fusi geometri pada seluruh penampang alas benda. Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan rekonstruksi tersebut disebabkan oleh jarak antar objek yang minim.

2. Saran

Terdapat tiga saran utama untuk pengembangan mesin pemindai 3D selanjutnya. Pertama, disarankan melakukan pengujian menggunakan aplikasi pemindaian ataupun metode pemindaian yang lebih efektif selain KIRI Engine. Kedua, karena penelitian ini terbatas pada pengujian akurasi geometri aktual dengan geometri digital, penelitian selanjutnya disarankan meneliti hal tersebut. Ketiga, pengembangan desain mesin pemindai 3D ini juga sebaiknya dikembangkan dengan desain *knockdown*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Haleem *et al.*, “Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview,” *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 161–171, 2022, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>
- [2] A. J. Muminović *et al.*, “Enhancing furniture manufacturing with 3D scanning,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 10, p. 4112, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app14104112>
- [3] J. Beldame, R. Sacco, M.-A. Munoz, M. Masse, and M. Lalevée, “Assessment of the efficiency of measuring foot and ankle edema with a 3D portable scanner,” *Bioengineering*, vol. 10, no. 5, p. 549, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050549>
- [4] X. Zhou *et al.*, “A note on macroscopic optical coherence tomography imaging enabled 3D scanning for museum and cultural heritage applications,” *Journal of the American Institute for Conservation*, vol. 62, no. 3, pp. 178–187, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/01971360.2022.2093537>
- [5] M. Tamulionis *et al.*, “Finding the least motion-blurred image by reusing early features of object detection network,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, p. 1264, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app13031264>
- [6] M. R. Sofyandi, E. Kurniawan, and R. A. Wicaksono, “Rancang bangun 3D scanner sebagai 3D metrologi dengan metode fotogrametri rentang dekat,” *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (JTRAIN)*, vol. 3, no. 1, pp. 56–61, 2022, [Online]. Available: <https://portal.issn.org/resource/ISSN/2798-0421>
- [7] N. Liang, Y. P. Ang, K. Yeo, X. Wu, Y. Xie, and Y. Cai, “BIMBot for autonomous laser scanning in built environments,” *Robotics*, vol. 13, no. 2, p. 22, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/robotics13020022>
- [8] Ikhwan Taufik, Elvanes Betel Bangun, Raka Mahendra Sulistiyo, and El Vionna Laellyn Nurul Fatich, “Prototype of an arduino-based 3D scanner printed using 3D printing,” 2024, *Politeknik Piksi Ganesha Indonesia*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.37339/e-komtek.v8i1.1829>
- [9] G. Kocsis, O. Takáč, B. Pásztor, and L. Halász, “Exploring the educational usability

- of popular 3D scanning applications,” *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, vol. 9, no. 10, pp. 26–37, 2025, [Online]. Available: <https://as-proceeding.com/index.php/ijanser/article/view/2830>
- [10] M. N. F. Saniman, H. S. Zulkifli, M. I. Ishak, K. A. A. Wahid, A. Zhahir, and W. M. W. Muhamad, “Performance of photogrammetry-based makeshift 3D scanning system for geometrical object in reverse engineering,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 15, no. 7, pp. 47–56, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.30880/ijie.2023.15.07.005>
- [11] S. I. Ahmed, T. Begum, M. Sufiyan, and A. Jamal, “3D scanner using Arduino,” *International Journal of Information Technology & Computer Engineering*, vol. 13, no. 2s, pp. 239–245, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.62647/IJITCE2025V13I2sPP239-245>
- [12] S. T. Shahid, S. M. A. Siddique, and M. H. K. Bhuiyan, “Automatic contact-based 3D scanning using articulated robotic arm,” pp. 1–8, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.07047>
- [13] X. Y. Feng, R. Li, and P. Xu, “High sensitivity contact probe based on optical path amplification,” in *Tenth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, H. Xia, L. X. Yang, and L. Yu, Eds., SPIE, 2021, p. 120591N. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.2613407>
- [14] A. Bagdja, D. Lazuardi, Sugiharto, M. S. Permana, W. Kwintarini, and R. Hartono, “One Stop Machining’ toward integrated CNC machine in Industry 5.0,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2972, no. 1, pp. 0–9, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2972/1/012060>
- [15] L. Polidori, “On Laussedat’s contribution to the emergence of photogrammetry,” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, vol. 43, no. B2, pp. 893–899, 2020, [Online]. Available: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-893-2020>
- [16] P. Gabštur, M. Kočiško, J. Kaščák, and M. Pollák, “Methodology for verification of geometrically complex components through reverse engineering,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 7, p. 3963, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/app15073963>
- [17] A. Nazim, M. Kondrát, K. Zidek, and J. Pitel, “Methodology of object

reconstruction by photogrammetry and structured-light scanning for industrial 3D visualisation,” Sensors, vol. 25, no. 23, p. 7177, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s25237177>

- [18] M. M. J. Bauman *et al.*, “A comprehensive guide to high-fidelity 3D neuroanatomical modeling techniques: A quantitative comparison between photogrammetry and structured light scanning,” *Anatomical sciences education*, vol. 18, no. 7, pp. 697–708, Jul. 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/ase.70062>
- [19] J.-W. Park and D.-J. Yeom, “A comparative study on the cost efficiency of traditional surveying methods and 3D digital surveying technologies in road construction sites,” *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol. 27, no. 6, pp. 1683–1696, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.21289/KSIC.2024.27.6.1683>
- [20] T. Phojaem *et al.*, “Evaluating UAV flight parameters for high-accuracy in road accident scene documentation: A planimetric assessment under simulated roadway conditions,” *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 14, no. 9, p. 357, 2025, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/ijgi14090357>
- [21] A. Nazim, K. Zidek, P. Lazorik, and J. Pitel, “Assessment of photogrammetry techniques for 3D model acquisition: A comparative study on the accuracy and suitability of scanned models compared to CAD references,” *MM Science Journal*, vol. 2024, no. November, pp. 7746–7754, 2024, [Online]. Available: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2024_11_2024101

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi kondisi pencahayaan laboratorium

Dokumentasi ini menunjukkan perbandingan pengaturan sumber intensitas cahaya di dalam ruang uji. Kondisi pengujian dengan menggunakan empat buah lampu plafon dapat dilihat pada Gambar 23. Pengaturan ini menciptakan distribusi cahaya merata. Kondisi pengujian dengan menggunakan dua buah lampu plafon dapat dilihat pada Gambar 24. Pengaturan ini sengaja dibuat untuk memicu efek bayangan pekat pada objek uji.



Gambar 24. Konfigurasi pencahayaan dengan empat buah lampu plafon



Gambar 25. Konfigurasi pencahayaan dengan dua buah lampu plafon

Lampiran 2. Kode instruksi mikrokontroler

Lampiran ini memuat tabel kode instruksi bahasa C/C++ yang diunggah ke dalam mikrokontroler Arduino Uno. Baris program ini berperan sebagai pusat kendali logika. Fungsinya adalah untuk mengatur otomatisasi putaran motor DC *gearbox* dan mengolah data umpan balik dari sensor proksimitas induktif. Kode pemrograman secara lengkap disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Kode pemrograman Arduino IDE

```
#define SENSOR 2

#define MOTOR 3

#define LIMITSWITCH 4


int counter = 0;

bool lastSensorState = HIGH;

bool lastLimitState = HIGH;

bool motorOn = false;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(SENSOR, INPUT_PULLUP);
  pinMode(LIMITSWITCH, INPUT_PULLUP);
  pinMode(MOTOR, OUTPUT);

  digitalWrite(MOTOR, HIGH); // motor awalnya mati (relay OFF karena active low)
}

void loop() {
  int sensorState = digitalRead(SENSOR);
  int limitState = digitalRead(LIMITSWITCH);

  // deteksi transisi limit switch HIGH -> LOW
  if (lastLimitState == HIGH && limitState == LOW && !motorOn) {
    motorOn = true;
```

```
counter = 0;

digitalWrite(MOTOR, LOW); // motor nyala (relay ON)

Serial.println("Motor ON, karena limit switch ditekan");

}

if (motorOn) {

    // deteksi transisi sensor HIGH -> LOW

    if (lastSensorState == HIGH && sensorState == LOW) {

        counter++;

        Serial.print("deteksi ke ");

        Serial.println(counter);

    }

    if (counter >= 12) {

        digitalWrite(MOTOR, HIGH); // motor mati (relay OFF)

        motorOn = false;

        Serial.println("Motor Off, karena target deteksi sudah terpenuhi, yaitu 12x.");

    }

}

lastSensorState = sensorState;

lastLimitState = limitState;

delay(50);

}
```