BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Bagian tinjauan pustaka ini menjelaskan penelitian terdahulu yang berfungsi memberikan dasar konseptual dan referensi. Tinjauan pustaka berfungsi membantu penulis dalam memahami posisi penelitian terhadap topik yang sejenis serta memperkuat argumentasi teoretis dalam penerapan metode.

2.1.1 Pustaka

Penelitian terkait *reverse engineering* dan teknologi pengukuran digital banyak dilakukan untuk meningkatkan efisiensi desain ulang dan akurasi produk. Rajesh et al. (2021) dalam tulisannya menjelaskan bahwa *reverse engineering* merupakan proses memperoleh data geometrik dari model fisik untuk dikonversi menjadi model digital tiga dimensi. Metode *reverse engineering* penting dalam kegiatan berbagai industri manufaktur karena bentuk produk yang kompleks dapat didokumentasikan secara akurat.

Anggoro, et al. (2021) dalam penelitiannya mengenai *reverse engineering* dalam produk *Miranda Kerr Tea for One Teapot* di PT Doulton Indonesia menjelaskan bahwa proses *reverse engineering* berperan penting dalam mempercepat digitalisasi desain produk keramik. Studi tersebut menggunakan data hasil pemindaian 3D *mesh* untuk mengembangkan kembali desain *teapot* yang sudah ada dengan mempertahankan karakteristik desain produknya. Penelitian tersebut menegaskan bahwa pendekatan digital mampu mempertahankan karakteristik bentuk produk asli sekaligus mempercepat proses desain ulang dibandingkan metode konvensional.

Tan Wijaya (2017) yang melakukan penelitian terdahulu, mendapatkan permasalahan dalam mendapatkan data 3D CAD/CAM dari produk sampel yang dikirim agar sesuai permintaan konsumen. Kemajuan teknologi 3D Scanner dalam beberapa tahun terakhir juga memperkuat peran *reverse engineering* dalam konteks digitalisasi industri kerajinan dan manufaktur presisi. Onyia et al. (2025) menyatakan bahwa inovasi sensor optik beresolusi tinggi dan algoritma *surface reconstruction* modern menjadikan hasil pemindaian 3D memiliki deviasi pengukuran yang sangat kecil, rata-rata di bawah ±0,1 mm. Hal ini membuka peluang bagi penerapan *reverse engineering* pada produk dengan desain rumit seperti keramik hias yang setiap detail estetika perlu dijaga. Hasil serupa juga diperoleh oleh Diz-Mellado et al. (2024) dalam penelitian mereka tentang pemanfaatan *3D scanning* untuk restorasi model keramik arsitektural. Mereka

menemukan bahwa 3D *scanner* memberikan hasil yang lebih presisi dan tidak merusak material dibandingkan metode pengukuran yang berkontak langsung dengan produk. Temuan ini membuktikan bahwa teknologi 3D *Scanner* dapat diadaptasi tidak hanya untuk industri berat tetapi juga untuk material yang sensitif seperti tanah liat dan porselen, yang memiliki tekstur dan bentuk kompleks dalam tulisan Mallis et al. (2023).

Sementara itu, integrasi dengan CMM sebagai alat ukur presisi tinggi memungkinkan verifikasi dimensi yang lebih dapat diandalkan untuk komponen dengan geometri rumit Gabštur et al. (2025). Sebagai bukti tambahan, studi benchmarking sensor 3D menunjukkan bahwa deviasi terhadap pengukuran CMM dapat ditekan hingga < 0,1 mm Cuesta et al. (2022). Hal ini menjadi dasar teknis yang kuat untuk menerapkan metode digitalisasi bentuk produk keramik dalam proyek produk transfer di PT Doulton.

Di sisi lain, perkembangan perangkat lunak dan algoritma pemrosesan *point cloud* turut memperluas kapabilitas *reverse engineering*. Cuesta et al. (2022) dalam kajiannya mengenai *metrology benchmarking* menyebutkan bahwa performa perangkat lunak *post-processing* menentukan akurasi akhir model digital yang dihasilkan. Penyaringan *noise*, *alignment*, dan *merging* antar hasil pemindaian menjadi tahapan penting untuk memastikan konsistensi data sebelum proses konversi ke CAD dilakukan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kualitas hasil *reverse engineering* sangat bergantung pada ketepatan alur kerja digital. 3D *scanning* kini dipandang sebagai bagian integral dari sistem kontrol kualitas (*quality inspection*) karena data pemindaian dapat dibandingkan langsung dengan model CAD acuan untuk mendeteksi penyimpangan bentuk sejak tahap awal produksi.

Tinjauan pustaka menunjukkan kesepakatan bahwa kombinasi 3D *Scanner*, CMM, CAD, dan CAM merupakan fondasi utama dalam penerapan *reverse engineering* modern. Penerapan RE memanfaatkan teknologi *3D Scanner* untuk memperoleh data bentuk menyeluruh serta CMM untuk validasi titik-titik kritis, proses desain digital dapat dilakukan secara cepat tanpa kehilangan presisi. Penerapan CAD dan CAM kemudian memastikan bahwa model digital tersebut siap digunakan pada proses pembuatan cetakan dan produksi massal dengan tingkat kesesuaian tinggi terhadap desain aslinya.

Tabel 2.1 Sajian tinjauan pustaka

No.	Penulis	Objek	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil/Temuan
1	Onyia, Ajao Olarinoye, & Jimoh (2025)	3D *Scanning* pada komponen mekanis	Ketidakakuratan hasil pemindaian pada geometri kompleks	Meningkatkan akurasi menggunakan algoritma *surface reconstruction* modern	Studi literatur dan analisis perbandingan hasil *scan*	3D *Scanner* optik beresolusi tinggi	Deviasi pengukuran < ±0,1 mm dan peningkatan akurasi model digital
2	Gabštur et al. (2025)	Komponen dengan geometri kompleks	Deviasi data 3D *scan* terhadap bentuk asli	Mengintegrasikan CMM untuk verifikasi hasil 3D *scanning*	Eksperimen verifikasi dimensi	*3D Scanner + CMM*	Deviasi menurun hingga 70 % dibanding metode tunggal
3	Diz-Mellado et al. (2024)	Model keramik restorasi arsitektural	Ketidaksesuaian bentuk pada objek keramik kompleks	Menggunakan 3D *Scanning* non-kontak berbasis cahaya terstruktur	Studi eksperimen	3D *Scanner*	Pemindaian presisi tanpa merusak material rapuh
4	Mallis et al. (2023)	Pemulihan model CAD dari 3D *Scan*	Kesulitan rekonstruksi model parametrik dari *point cloud*	Pengembangan algoritma *CAD History Recovery*	Studi kompetisi industri (*SHARP Challenge 2023*)	CAD *software* dan 3D *Scan dataset*	Algoritma baru mempercepat rekonstruksi CAD berbasis data *mesh*
5	Haleem & Javaid (2022)	Teknologi Industri 4.0	Integrasi CAD, CAM, dan 3D *Scan* belum optimal	Pemanfaatan 3D *Scanning* sebagai pilar digitalisasi manufaktur	Studi konseptual dan literatur	CAD/CAM *software* & 3D *Scanner*	Meningkatkan efisiensi dan sinkronisasi data desain-produksi
6	Cuesta (2022)	Benchmarking 3D *Scanner*	Kualitas hasil pemindaian bervariasi antar alat	Analisis perbandingan metrologi sensor 3D	Eksperimen pengujian alat ukur	Sensor 3D *Scanner* berbeda merek	Standar GD&T digunakan untuk menilai akurasi *scanner*
7	P.W Anggoro et al. (2021)	Produk keramik (*Tea for One Teapot*, PT Doulton Indonesia)	Kesulitan pembuatan produk transfer karena tidak ada data CAD asli	Penerapan *Reverse Engineering* berbasis 3D *Scanner* dan CAD	Studi kasus industri	3D *Scanner*, CAD	Efisiensi desain ulang meningkat , akurasi lebih tinggi

Tabel 2.1 Sajian tinjauan pustaka lanjutan

No.	Penulis	Objek	Permasalahan	Solusi	Metode	*Tools*	Hasil/Temuan
8	Rajesh et al. (2021)	*Casing* pompa industri	Ketidakefektifan metode pengukuran konvensional dan inspeksi manual pada komponen dengan permukaan yang rumit dan bentuk bebas, serta ketiadaan dokumen desain asli	Menerapkan *Reverse Engineering* menggunakan teknologi *scanning*	Akuisisi data 3D *scan,* penggabungan data hasil *scan.*	3D *scan portable*, *software CAD.*	Penggunaan pemindai 3D memberikan pengukuran yang cepat, akurasi yang tinggi (presisi hingga 0,020 mm pada SIMSCAN dan 0,025 mm pada FARO), data yang jelas, serta kemudahan penggunaan untuk memfasilitasi peningkatan desain.
9	Tan Wijaya (2017)	*Miranda Kerr Tea for One Teapot*	Mendapatkan data 3D dari produk sampel yang dikirim, dan direkonstruksi agar sesuai permintaan	*Reverse engineering,* CAD/CAM,	Akuisisi data 3D *scan,* CMM	*Powershape, Powermill, NextEngine, CMM Manager*	Penerapan *reverse engineering* yang dijalankan dengan metode CAD/CAM dapat memenuhi ekspektasi konsumen.

2.2 Dasar Teori

Subbab ini membahas teori-teori dasar yang menjadi landasan dalam penelitian mengenai penerapan *reverse engineering* dalam pembuatan desain produk transfer di PT Doulton yang menggunakan teknologi 3D *scanner* dan *Coordinate Measuring Machine* (CMM). Dasar teori ini meliputi pemahaman terhadap teknologi digitalisasi desain, *Computer-Aided Design* (CAD), *Computer-Aided Machining* (CAM), dan juga metodologi yang digunakan dalam perancangan pengembangan desain produk berbasis *reverse engineering*.

2.2.1 *Reverse Engineering*

Buku Raja & J. Fernandes (2019) menjelaskan proses *designing*, *manufacturing, assembling,* dan *maintaining* product dan *systems.* Terdapat dua tipe *engineering, forward engineering* dan *reverse engineering. Forward engineering* merupakan proses tradisional yang bergerak dari abstrak tingkat tinggi dan desain logika ke implementasi secara langsung dalam suatu sistem. Sedangkan *Reverse engineering* didefinisikan sebagai proses memperoleh geometri model CAD dari titik-titik 3D yang diperoleh melalui pemindaian/digitalisasi komponen atau produk yang sudah ada . Menurut Rešetar et al. (2024)*, reverse engineering* juga dapat berguna untuk melakukan analisis produk kompetitor, mengevaluasi desain, dan juga melakukan replikasi dari produk yang sudah dibuat sebelumnya. Menurut López dan Vila (2021), *reverse engineering* juga dapat diartikan sebagai metode untuk dapat membuat produk baru, melakukan penggandaan produk untuk menambah performa, dan mendapatkan ide dalam pengembangan produk baru. *Reverse engineering* ini berguna untuk mendapatkan detail bentuk produk secara akurat menggunakan bantuan alat-alat canggih. Alat yang digunakan untuk *reverse engineering* seperti 3D *scanner*, *Coordinate Measuring Machine* (CMM), dan beberapa alat lain. Menurut Buonamici et al. (2018), alur kerja umum yang dilakukan dalam *reverse engineering* ada lima tahap, dimulai dari proses pengambilan data melalui *scanning*, lalu dilanjutkan dengan segmentasi *point cloud* atau *mesh*, lalu melakukan klasifikasi segmen, dilanjutkan dengan pembuatan model 3D digitalisasi sebuah produk, dan terakhir adalah rekonstruksi CAD. Proses *reverse engineering* menjadi krusial ketika data digital atau gambar teknik dari sebuah produk tidak tersedia.

2.2.2 3D *Scanner*

3D *Scanner* merupakan teknologi yang digunakan untuk menangkap permukaan geometri suatu objek dalam bentuk data digital tiga dimensi. Alat 3D *Scanner* memanfaatkan sensor pemindaian triangulasi laser, cahaya terstruktur, atau teknik *time-of-flight* untuk menghasilkan *point cloud* yang padat dan beresolusi tinggi Curless dan

Levoy, (1996). Diz-Mellado et al. (2024) dalam penelitiannya menyatakan bahwa perkembangan teknologi pada 10 tahun terakhir mampu menangkap fitur kompleks, lekukan halus, maupun sudut kecil pada benda keramik tanpa kontak fisik, sehingga aman untuk material rapuh. *Reverse engineering*, 3D scanner menjadi alat penting karena mampu mempercepat proses akuisisi bentuk, meningkatkan akurasi desain model ulang, serta meminimalkan kesalahan ketika model fisik harus direplikasi atau ditransfer ke proses desain CAD.



Gambar 2.1 3D *Scanner*
(Sumber: https://www.javelin-tech.com/3d/3d-scanners/high-definition-3d-scanning/)

Menurut Cuesta et al. (2022), jarak sensor, kondisi permukaan benda, dan akuisisi data memengaruhi kualitas *scanning*. Proses lanjutan seperti *noise filtering, registration,* dan *surface reconstruction* perlu dilakukan dalam peningkatan kualitas *mesh*. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah *structured-light scanning*. Metode ini dilakukan dengan memproyeksikan pola cahaya terstruktur ke permukaan objek dan kamera menangkap deformasi pola tersebut untuk dihitung menjadi data 3D. Penelitian Rocchini et al. (2001) mengenai *low-cost structured light scanner* menunjukkan bahwa metode ini mampu menghasilkan akurasi tinggi dengan biaya yang relatif rendah, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi industri dan rekayasa produk.

Polo dan Felicísimo (2012), dalam studinya melakukan uji coba teknologi lainnya yaitu *Laser Triangulation Scanner* yang diuji pada sistem *NextEngine*. Dalam kajiannya mengenai ketidakpastian dan *repeatability* pemindaian menemukan bahwa meskipun spesifikasi menyatakan akurasi sekitar ±0, 13 mm, nilai aktual sangat bergantung pada orientasi objek, kondisi permukaan, dan metode kalibrasi. Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan *noise* atau *holes* pada hasil *mesh* seperti reflektivitas tinggi, geometri cekung, dan permukaan mengkilap pada produk keramik.

Data hasil 3D *scanning* harus melalui proses lanjutan seperti *noise removal*, *hole filling*, *registration*, dan *mesh editing* sebelum dapat digunakan pada perangkat lunak CAD. Studi *reverse engineering* yang dilakukan Anggoro et al. (2021) pada produk keramik PT Doulton, misalnya, data *mesh* dari pemindai 3D masih memerlukan *cleaning* dan *alignment* agar dapat dibangun ulang menjadi model *solid* yang akurat. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan pemanfaatan scanner tidak hanya bergantung pada perangkat keras, tetapi juga pada kemampuan pengolahan data dan pemilihan parameter pemindaian yang tepat.

Secara keseluruhan, 3D *scanner* berperan sebagai fondasi utama dalam proses *reverse engineering* di industri keramik. Dengan kemampuan menangkap bentuk produk secara presisi, teknologi ini mempercepat proses pembuatan desain CAD, mendukung validasi geometri, serta memastikan bahwa produk transfer seperti dari *brand* Wedgwood yang diproduksi ulang oleh PT Doulton dapat direplikasi dengan konsisten. Untuk aplikasi industri seperti ini, pemahaman mengenai jenis *scanner,* metode akuisisi data, dan faktor-faktor yang memengaruhi akurasi menjadi aspek penting dalam mencapai kualitas desain yang optimal.

2.2.3 *Coordinate Measuring Machine* (CMM)

Coordinate Measuring Machine (CMM) merupakan sistem pengukuran dimensi tiga dimensi yang bekerja dengan merekam koordinat titik pada permukaan benda kerja melalui pergerakan *probe* terhadap sistem koordinat mesin. Dibandingkan alat ukur konvensional seperti jangka sorong, mikrometer, atau jig khusus, CMM menawarkan fleksibilitas yang jauh lebih tinggi karena satu mesin dapat digunakan untuk mengukur berbagai jenis geometri hanya dengan memodifikasi program pengukuran dan konfigurasi *probe*. Di industri otomotif, dirgantara, medis, hingga *mold and dies*, CMM telah menjadi tulang punggung kontrol kualitas karena mampu memberikan kombinasi ketelitian, kecepatan, dan kemudahan integrasi dengan CAD/CAM serta otomasi sel produksi.



Gambar 2.2 *Coordinate Measuring Machine* (CMM)
(sumber : https://www.rapiddirect.com/blog/what-is-cmm-machine/)

Secara umum CMM terdiri atas empat subsistem utama: (1) struktur mekanik yang menyediakan tiga sumbu gerak ortogonal (misalnya tipe *bridge*, *gantry*, atau horizontal *arm*), (2) sistem *probing* yang dapat berupa *probe* sentuh titik-per-titik (*touch trigger*), probe pemindaian kontinu (*scanning*/*analog probe*), maupun sensor non-kontak optik, (3) sistem aktuator dan kontrol gerak yang mengatur posisi dan kecepatan pergerakan sumbu, serta (4) perangkat lunak metrologi yang melakukan perencanaan jalur, pengambilan data, dan evaluasi geometrik (misalnya *fitting* lingkaran, bidang, GD&T). Kombinasi keempat subsistem inilah yang pada akhirnya menentukan kinerja metrologi CMM, bukan hanya spesifikasi mekaniknya saja.

2.2.4 *Computer-Aided Design* (CAD)

Sistem desain yang berbasis komputer yang dikenal sebagai *Computer-Aided Design* (CAD) memungkinkan pembuatan, perubahan, analisis, dan optimalisasi model digital sebelum proses *machining.* Dengan teknologi CAD, pengguna teknologi ini atau desainer dapat melihat objek dalam dua dimensi dan tiga dimensi. Teknik ini sendiri memungkinkan desain yang lebih tepat, sehingga kualitas desain dapat ditingkatkan dan kesalahan produksi dapat diminimalkan. Selain itu, CAD berfungsi sebagai dasar untuk pembuatan *database* produk. Proses CAM, simulasi, dan analisis rekayasa, seperti *Metode Finite Element* (FEM), atau *Computational Fluid Dynamics* (CFD), dapat mengikutinya Sadrehaghighi (2022).

a. Konsep Dasar dan Perkembangan CAD

Secara dasar, CAD dibuat untuk menggantikan metode *drafting* manual yang menghabiskan waktu dan rentan terhadap kesalahan. Geometri *modeling* kernel seperti *boundary representation* (B-Rep) dan *Non-Uniform Rational B-Spline* (NURBS) digunakan dalam sistem CAD modern untuk menampilkan bentuk objek secara matematis dan akurat. Berkembangnya teknologi pemrograman berbasis objek, CAD sekarang dapat menawarkan fitur parametrik, desain berbasis fitur, dan desain berbasis batas, yang mempermudah proses perubahan desain Sadrehaghighi (2022).

Dalam industri manufaktur, CAD tidak hanya berfungsi sebagai alat gambar, tetapi telah menjadi platform integratif yang menghubungkan berbagai proses desain mulai dari visualisasi, simulasi, optimisasi, hingga proses produksi digital seperti CAM dan *additive manufacturing* Sun et al., (2022).

b. Peran CAD dalam Pemodelan 3D dan *Reverse Engineer*ing

Teknologi CAD menjadi sangat penting dalam *reverse engineering* karena prosesnya dilakukan dengan membangun kembali model 3D dari model fisik melalui teknologi *scanning* dan pengolahan *point cloud*. Hal tersebut digunakan untuk menghasilkan representasi permukaan menggunakan NURBS, rekonstruksi bentuk kompleks, dan integrasi dengan model ideal untuk meningkatkan presisi Fan et al. (2022).

Industri presisi seperti mobil dan ruang angkasa banyak menggunakan metode ini, terutama ketika diperlukan *redesign* komponen, inspeksi deformasi, atau pembuatan replika digital dari produk asli. Menurut Fan et al. (2022), penggabungan model CAD dengan data pemindaian meningkatkan akurasi rekonstruksi hingga 0,04 mm. Ini menunjukkan kemanjuran CAD sebagai alat rekayasa digital kontemporer.

c. CAD untuk Analisis Geometris dan Simulasi

Penggunaan CAD tidak hanya terbatas pada desain bentuk, Misalnya, dalam penelitian termal pada pakaian, CAD digunakan untuk membuat model geometri tubuh dan pakaian yang tepat untuk mengukur dampak perubahan geometri terhadap perpindahan panas (Špelić, 2021). Simulasi digital model dapat dilakukan tanpa memerlukan prototipe fisik, mengurangi biaya dan waktu pengembangan dengan desain CAD.

d. CAD dalam Industri Kreatif dan Keramik 3D

Industri kreatif seperti desain keramik, seni digital, dan model estetika 3D juga menggunakan CAD dengan cepat, selain di dunia teknik dan manufaktur berat. Menggabungkan CAD dengan *printer* 3D memungkinkan desainer membuat bentuk yang kompleks yang sulit atau bahkan tidak mungkin dibuat dengan metode tradisional.

Digitalisasi bentuk, parameterisasi desain, dan otomatisasi proses produksi membuat CAD menjadi alat penting untuk desain keramik 3D modern (Sun et al., 2022).

e. Keunggulan CAD dalam Industri Manufaktur

Beberapa keunggulan utama CAD dalam industri manufaktur meliputi:

1. Akurasi tinggi melalui pemodelan parametrik dan representasi geometri matematis.
2. Efisiensi desain karena perubahan atau optimisasi dapat dilakukan secara otomatis berkat fitur *constraint-based* dan *history-based modeling*.
3. Integrasi dengan simulasi fisik seperti analisis termal, struktural, dan aliran fluida.
4. Kemampuan visualisasi *real-time*, termasuk *rendering* dan evaluasi ergonomis.
5. Kolaborasi digital melalui *product data management* (PDM) dan digital *prototyping*.

Karena keunggulan ini, CAD menjadi teknologi penting untuk proses perancangan produk modern, mulai dari konstruksi, manufaktur, hingga pengembangan produk berbasis 3D.

2.2.5 *Computer-Aided Manufacturing* (CAM)

Menurut P. Groover dan Emory (1984), *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) merupakan pemanfaatan sistem komputer untuk melakukan perencanaan, pengelolaan, dan pengendalian operasi manufaktur. CAM digunakan untuk menerjemahkan desain yang sudah dibuat menggunakan *software* CAD untuk menjadi instruksi mesin. Teknologi yang menjadi inti dari CAM adalah *Numerical Control* (NC) yang saat ini sudah berkembang menjadi *Computer Numerical Control* (CNC) dan juga *Direct Numerical Control* (DNC) yang berguna untuk otomatisasi mesin. Tujuan dari penerapan CAM adalah untuk melakukan integrasi dengan CAD yang memungkinkan manufaktur secara otomatis. Integrasi yang terbentuk dari teknologi CAM ini seperti mesin CNC, *robotic*, dan masih banyak lagi. Pemanfaatan teknologi CAM ini juga dapat berguna untuk peningkatan kualitas permesinan, pengurangan tenaga kerja langsung dan tidak langsung, dan juga pengurangan waktu tunggu manufaktur.

2.3 Standar dan Kode Etik

Standar yang diterapkan pada tulisan ini mengacu pada standar akurasi dimensi dan bentuk yang ketat agar produk transfer yang dihasilkan dapat sesuai dengan produk yang sudah ada di pasaran. Maka dari itu, produk *Tea Story Cup Tall* yang dihasilkan harus dipastikan sama, tidak ada penambahan atau pengurangan desain dan spesifikasi produk secara signifikan. *Sample Tea Story Cup Tall* yang dikirim oleh *brand* Wedgwood harus dijadikan standar dalam proses *development* dan proses manufaktur yang dilakukan di PT Doulton. Selain itu, produk yang dihasilkan wajib memenuhi kriteria SNI

7275:2022 untuk keramik berglasir – alat makan dan minum sesuai aturan Kementerian Perindustrian (2025).

Penulis wajib mematuhi kode etik yang ditetapkan oleh perusahaan, khususnya tentang kerahasiaan data perusahaan. Objek yang digunakan dalam penulisan ini merupakan *live project* dari PT Doulton, segala bentuk data yang dihasilkan, hanya digunakan untuk kepentingan akademik (Tugas Akhir) dan internal perusahaan, serta data tersebut tidak disebarluaskan secara publik. Penulis juga menggunakan *software PowerShape*, *PowerMill*, *CMM Manager* dan *NextEngine ScanStudio* berlisensi yang sudah disediakan oleh perusahaan.