

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Subbab tinjauan pustaka ini akan membahas sejumlah jurnal penelitian terdahulu yang relevan dengan kata kunci utama, yaitu "Optimization 3D *Printing* Parameters," "Quality," "Surface Quality," dan "Fused Deposition Modeling 3D *Printing*." Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk menyajikan pemahaman mendalam mengenai upaya penelitian terkini dalam mengoptimalkan parameter pencetakan 3D, memperbaiki kualitas hasil cetakan, dan fokus pada kualitas permukaan dalam konteks FDM 3D *Printing*.

Dengan menggunakan kata kunci tersebut, penulis mencari literatur-literatur yang membahas berbagai aspek terkait, termasuk metode optimasi, evaluasi kualitas hasil cetakan, dan perkembangan terbaru dalam teknologi pencetakan 3D. Dengan menyajikan tinjauan pustaka ini, diharapkan dapat memberikan gambaran yang komprehensif tentang penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian ini, serta kemajuan dan tantangan yang dihadapi dalam domain pencetakan 3D, khususnya pada aspek optimalisasi parameter dan kualitas permukaan hasil cetakan.

Penelitian oleh Nobuyuki Umetani dan Ryan Schmidt bertujuan untuk mengoptimalkan orientasi model dalam pencetakan 3D menggunakan metode Fused Deposition Modeling (FDM) dengan fokus pada peningkatan kekuatan mekanis. Mereka mengidentifikasi masalah utama dalam proses ini, yaitu kelemahan ikatan vertikal antar lapisan, yang menyebabkan ketidakoptimalan kekuatan struktural.

Hasil penelitian mencakup penemuan penting terkait optimasi arah pencetakan 3D. Evaluasi kelemahan struktural dilakukan dengan mempertimbangkan dua faktor: besarnya gaya yang diperlukan untuk mematahkan suatu bagian dan luas area di mana gaya tersebut didistribusikan. Penelitian ini menggunakan metode analisis struktural potongan lintang untuk mengoptimalkan orientasi objek selama pencetakan 3D.

Metodologi penelitian melibatkan penerapan beberapa konsep kritis. Pertama, *Euler Bernoulli assumption* adalah suatu asumsi dasar dalam analisis struktural yang menjadi dasar perhitungan gaya dan momen. Selanjutnya, konsep virtual

cross-section digunakan untuk merepresentasikan struktur objek pada setiap titik tertentu selama proses pencetakan. *External bending moment* dan *internal bending moment* merinci bagaimana gaya luar dan gaya internal bekerja pada objek. *Moment equilibrium* adalah prinsip dasar yang digunakan untuk memastikan keseimbangan momen di seluruh struktur. Selain itu, *clustering cross-sections* dan *clustering computation* adalah konsep lanjutan yang melibatkan pengelompokan potongan lintang virtual untuk efisiensi analisis (Umetani & Schmidt, n.d.).

Penelitian yang dilakukan oleh W. M. Wang, C. Zanni, dan L. Kobbelt bertujuan untuk meningkatkan kualitas permukaan hasil cetakan 3D dengan mengoptimalkan arah pencetakan. Mereka mengembangkan suatu rangkaian algoritma yang menghasilkan serangkaian bagian dari model *input*, di mana setiap bagian dapat dicetak dalam orientasi di mana normal permukaan terpisah dengan aman dari arah pencetakan. Hal ini dilakukan untuk menghindari artefak tangga serta struktur penyangga yang melekat pada permukaan luar. Dalam penelitian ini, mereka mengusulkan algoritma segmentasi berbasis arah pencetakan untuk membagi model 3D menjadi beberapa bagian, masing-masing memiliki arah pencetakan optimalnya sendiri.

Penelitian ini menyoroti beberapa hasil yang signifikan yaitu berhasil mengembangkan metode segmentasi berbasis arah pencetakan yang memungkinkan pencetakan setiap bagian dengan sedikit kesalahan pada arah pencetakannya sendiri. Untuk memudahkan perakitan, mereka juga menghitung urutan dan arah perakitan, serta merancang konektor yang memastikan bagian-bagian tersebut tidak terpisah dan sesuai di batasannya ketika digabungkan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa algoritma yang ditemukan dapat mengurangi kesalahan pencetakan dan/atau waktu pencetakan dibandingkan dengan metode sebelumnya.

Metode penelitian melibatkan pemahaman mendalam tentang kualitas permukaan dalam pencetakan 3D, segmentasi permukaan, pembentukan awal bagian (regulasi), penyempurnaan bagian, urutan perakitan (kerucut perakitan, pengurutan bagian), dan desain konektor. Selain itu, studi literatur mencakup bidang seperti pencetakan 3D, dekomposisi volume untuk manufaktur, desain konektor, urutan perakitan, dan optimasi arah pencetakan (Wang et al., 2016).

Penelitian yang dilakukan oleh Fanli Yang, Min Zhang, Bhesh Bhandari, dan Yaping Liu fokus pada eksplorasi peluang pencetakan 3D dengan menggunakan

gel lemon juice. *Gel* lemon dapat dianggap sebagai jenis *fudge* berbasis gel yang bersifat transparan, fleksibel, dan kenyal. Pada penelitian ini, pati kentang dipilih sebagai agen penggumpal karena memiliki kapasitas retensi air yang baik, transparansi, dan sifat ketahanan penuaan.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan struktur pangan baru berbasis sistem *gel lemon juice* melalui teknologi pencetakan 3D. Beberapa parameter ukuran pencetakan seperti diameter *nozzle*, tinggi *nozzle*, kecepatan gerakan *nozzle*, laju ekstrusi, dan properti material (properti reologi, orientasi kelembaban, dan properti tekstur) diinvestigasi untuk memahami pengaruhnya terhadap kualitas akhir konstruksi 3D.

Hasil dari penelitian ini mencakup analisis *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR) untuk mengetahui distribusi air dalam *gel lemon juice*, perilaku reologi gel, analisis tekstur gel, dan proses pencetakan yang dioptimalkan. Ditemukan bahwa perilaku reologi dan sifat mekanik dari *gel lemon juice* dengan penambahan 15 g/100g pati kentang cocok untuk pencetakan 3D. Selain properti material, hasil optimasi proses pencetakan 3D menunjukkan bahwa diameter *nozzle*, kecepatan gerakan *nozzle*, dan laju ekstrusi mempengaruhi kualitas produk 3D. Tinggi *nozzle* tidak dianggap sebagai faktor yang memengaruhi kualitas cetakan. Metode penelitian mencakup pengujian properti material menggunakan analisis NMR, pengukuran properti reologi, analisis profil tekstur, proses pencetakan, dan analisis statistik (Yang et al., 2018).

Penelitian yang dilakukan oleh Namsoo Peter Kim, Diana Cho, dan Matthew Zielewski bertujuan untuk mengoptimalkan parameter pencetakan 3D menggunakan metode ekstrusi berupa *Screw Type Extrusion* (STE) untuk keramik, dengan menerapkan Metode Taguchi.

Masalah utama yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah upaya untuk memproduksi bentuk-bentuk 3D menggunakan program *opensource* yang ekonomis dan untuk melakukan standardisasi proses pencetakan 3D STE sesuai dengan berbagai viskositas menggunakan *G-code*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode pencetakan 3D STE memiliki keunggulan dalam penggunaan berbagai material, termasuk material berkepadatan tinggi, dalam kapasitas besar dalam waktu singkat. Namun, metode ini masih memiliki batasan dalam presisi, terutama ketika menangani bentuk-bentuk kompleks. Meskipun demikian, metode STE dapat mencetak bahan

dengan viskositas ultra-tinggi, seperti keramik, tanpa memerlukan langkah-langkah tambahan yang tidak perlu.

Penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih baik tentang metode STE dan potensinya dalam pencetakan 3D di berbagai industri, termasuk biomedis, biomaterial, dan pangan. Penggunaan teknologi pencetakan 3D telah memicu perkembangan bahan dalam waktu singkat, dan penelitian ini membuktikan bahwa dasar-dasar keramik dapat diterapkan mulai dari aksesoris gigi hingga tulang buatan. Metode penelitian mencakup kontrol STE, Taguchi 1.9 OA, persiapan material, pengaruh kecepatan pembuangan terhadap ekspansi material, dan produksi bahan 3D aktual dalam kondisi yang dioptimalkan (Kim et al., 2019).

Penelitian ini dilakukan oleh Dr. M Sumalatha, J N Malleswara Rao, dan B Supraja Reddy dengan tujuan utama untuk mengoptimalkan parameter proses dalam pencetakan 3D Fused Deposition Modeling (FDM) dengan menggunakan metode Taguchi.

Pada penelitian ini, pendekatan Taguchi dalam desain eksperimen (DOE) digunakan untuk menghemat biaya dan waktu eksperimen. Signifikansi statistik dari parameter proses dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA). Hasil dari penelitian ini mencakup identifikasi parameter yang signifikan untuk hasil optimum dan saran pengaturan parameter optimal menggunakan perbandingan S/N (*Signal-to-Noise*) ratio.

Hasil eksperimen mencakup penemuan kombinasi parameter optimal untuk mencapai performa tertinggi pada tiga parameter kinerja yang diuji, yaitu kekuatan benturan, ketebalan permukaan, dan waktu produksi. Contohnya, eksperimen tertentu dengan kecepatan deposisi 40 mm/s, ketebalan lapisan 0.4 mm, dan kepadatan *infill* 33.33% memberikan S/N ratio tertinggi untuk kekuatan benturan.

Metode penelitian mencakup desain eksperimen menggunakan metode Taguchi untuk mengurangi variasi proses melalui desain eksperimen yang kuat. Tujuan dari metode ini adalah untuk menghasilkan produk berkualitas tinggi dengan biaya minimum bagi produsen. Pengujian dilakukan untuk mengukur kekuatan benturan, ketebalan permukaan, dan waktu pembangunan, dengan analisis statistik yang dilakukan pada akhir eksperimen (Sumalatha et al., 2021).

Judul jurnal yang berjudul "*Optimization Parameter Effects on The Quality Surface Finish of 3D Printing Process using Taguchi Method*" menggambarkan penelitian

yang dilakukan oleh H Radhwan, Z Shayfull, S M Nasir, Abdellah El-Hadj Abdellah, dan A R Irfan. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi hubungan antara pengaturan parameter variabel dan karakteristik kualitas hasil cetakan dalam proses pencetakan 3D menggunakan metode Taguchi. Penelitian menyoroti pentingnya parameter proses seperti *layer height*, *outline speed*, dan *extruder temperature* terhadap kualitas cetakan.

Dalam hasil penelitian, ditemukan bahwa *layer height* memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas permukaan dan akurasi bagian cetakan, sementara *outline speed* dan *extruder temperature* memiliki dampak yang lebih kecil. Analisis menggunakan ANOVA memperkuat bahwa interaksi antara *outline speed* dan *extruder temperature* tidak signifikan terhadap sifat permukaan, khususnya kekasaran. Metode Taguchi digunakan sebagai pendekatan untuk mengidentifikasi parameter penting yang dapat beroperasi secara konsisten dan optimal, dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan dan kualitas permukaan hasil cetakan.

Penekanan pada *layer height* sebagai variabel proses yang paling signifikan memberikan wawasan tentang faktor utama yang memengaruhi hasil cetakan. Demikian pula, uji dampak, pengukuran kekasaran permukaan, dan waktu pembangunan digunakan sebagai alat untuk menganalisis parameter proses (Radhwan et al., 2020).

Tabel 2.1. Hasil Tinjauan Pustaka

No	Pustaka	Objek	Permasalahan	Tujuan	Solusi	Metode	Hasil
1	Nobuyuki Umetani dan Ryan L. Schmidt	Optimasi orientasi model dalam pencetakan 3D menggunakan FDM	Kelemahan ikatan vertikal antar lapisan	Meningkatkan kekuatan mekanis	Optimasi arah pencetakan	Analisis struktural potongan lintang, Euler-Bernoulli assumption, virtual cross-section	Optimasi orientasi objek, keseimbangan momen di seluruh struktur
2	W. M. Wang, C. Zanni, dan L. Kobbelt	Kualitas permukaan hasil cetakan 3D	Artefak tangga dan struktur penyangga yang melekat pada permukaan luar	Mengoptimalkan arah pencetakan	Algoritma segmentasi berbasis arah pencetakan	Segmentasi berbasis arah pencetakan, urutan dan arah perakitan, desain konektor	Mengurangi kesalahan pencetakan dan waktu pencetakan
3	Fanli Yang, Min Zhang, Bhesh Bhandari, dan Yaping Liu	Pencetakan 3D dengan gel lemon juice	Menemukan parameter pencetakan yang optimal	Mengembangkan struktur pangan baru berbasis gel lemon juice	Optimasi parameter pencetakan dan properti material	Analisis NMR, pengukuran properti reologi, analisis profil tekstur, proses pencetakan	Gel lemon juice dengan penambahan pati kentang cocok untuk pencetakan 3D
4	Namsu Peter Kim, Diana Cho, dan Matthew Zielewski	Pencetakan 3D menggunakan Screw Type Extrusion (STE) untuk keramik	Standardisasi proses pencetakan 3D STE	Mengoptimalkan parameter pencetakan 3D STE	Metode Taguchi	Kontrol STE, Taguchi 1.9 OA, persiapan material	Metode STE dapat mencetak bahan berkepadatan tinggi dengan presisi terbatas
5	Dr. M. Sumalatha, J. N. Malleswara Rao, dan B. Supraja Reddy	Pencetakan 3D FDM	Mengoptimalkan parameter proses	Mengoptimalkan parameter proses dalam pencetakan 3D FDM	Metode Taguchi	Desain eksperimen (DOE), analisis ragam (ANOVA), perbandingan S/N ratio	Identifikasi parameter optimal untuk kekuatan benturan, ketebalan permukaan, dan waktu produksi
6	H. Radhwan, Z. Shayfull, S. M. Nasir, Abdellah El-Hadj Abdellah, dan A. R. Irfan	Pengaruh parameter pada kualitas permukaan hasil cetakan 3D	Mengoptimalkan pengaturan parameter variabel	Mengoptimalkan parameter proses	Metode Taguchi	Pengujian layer height, outline speed, extruder temperature, ANOVA	Layer height paling signifikan mempengaruhi kualitas permukaan dan akurasi bagian cetakan

2.2. Dasar Teori

2.2.1. 3D Printing

3D *printing* adalah teknologi yang mampu menghasilkan objek fisik melalui proses penambahan material secara berturut-turut berdasarkan representasi geometris. Teknologi pencetakan 3D telah mengalami perkembangan pesat dalam beberapa tahun terakhir. Pada tahun 1980, teknologi pencetakan 3D pertama kali diperkenalkan secara komersial oleh Charles Hull. Kini, 3D *printing* digunakan secara luas untuk menciptakan berbagai jenis produk, mulai dari pompa jantung buatan, koleksi perhiasan, hingga kornea buatan dalam bentuk 3D, mesin roket PGA, jembatan baja di Amsterdam, dan produk-produk terkait industri penerbangan serta industri makanan.

Teknologi pencetakan 3D berasal dari konsep fabrikasi berlapis-lapis struktur tiga dimensi secara langsung dari gambar desain berbantuan komputer (CAD). Teknologi pencetakan 3D merupakan terobosan nyata dan telah menjadi platform teknologi yang sangat serbaguna. Ini membuka peluang baru dan memberikan harapan akan banyak kemungkinan bagi perusahaan yang ingin meningkatkan efisiensi manufaktur. Material-material seperti termoplastik konvensional, keramik, material berbasis graphene, dan logam saat ini dapat dicetak dengan menggunakan teknologi pencetakan 3D. Adopsi teknologi pencetakan 3D berpotensi mengubah berbagai industri dan mengubah jalur produksi. Penerapan teknologi ini akan meningkatkan kecepatan produksi sambil mengurangi biaya. Konsumen juga akan memiliki peran yang lebih besar dalam produk akhir dan dapat meminta produk sesuai dengan spesifikasi mereka. Fasilitas teknologi pencetakan 3D yang berlokasi lebih dekat dengan konsumen akan memungkinkan proses manufaktur yang lebih fleksibel dan responsif, serta kontrol kualitas yang lebih baik. Lebih lanjut, penggunaan teknologi pencetakan 3D akan mengurangi kebutuhan akan transportasi global. Hal ini terjadi karena pabrik-pabrik yang terletak lebih dekat dengan tujuan akhir dapat melakukan distribusi menggunakan teknologi pelacakan armada yang menghemat energi dan waktu. Selain itu, adopsi teknologi pencetakan 3D dapat mengubah logistik perusahaan, memungkinkan pengelolaan seluruh proses dan menawarkan layanan yang lebih lengkap.

Saat ini, 3D *printing* telah digunakan secara luas di seluruh dunia. Teknologi pencetakan 3D semakin digunakan untuk kustomisasi massal, produksi berbagai jenis desain sumber terbuka di bidang pertanian, perawatan kesehatan, industri

otomotif, dan aerospace. Namun, adopsi teknologi pencetakan 3D dalam industri manufaktur juga memiliki beberapa kelemahan. Salah satunya adalah pengurangan penggunaan tenaga kerja dalam manufaktur, yang dapat berdampak pada negara-negara yang bergantung pada banyak pekerjaan berketerampilan rendah. Selain itu, penggunaan teknologi pencetakan 3D juga membawa risiko pencetakan objek berbahaya seperti senjata. Oleh karena itu, perlu pembatasan akses agar tidak disalahgunakan oleh individu yang tidak bertanggung jawab. Penggunaan teknologi pencetakan 3D juga memungkinkan pemalsuan produk dengan mudah karena sifatnya yang sederhana, di mana objek 3D dapat dihasilkan hanya dengan menggambar dan mengatur data dalam mesin pencetakan (Shahrubudin et al., 2019).

2.2.2. Materials

Dalam dunia 3D *printing*, pilihan material memainkan peran penting dalam menentukan hasil akhir dari objek yang dicetak. Terdapat beragam jenis material yang dapat digunakan dalam proses 3D *printing*, masing-masing material memiliki karakteristik uniknya. Pemilihan material dapat memengaruhi aspek seperti kekuatan, tahan lama, tampilan, dan bahkan kemampuan untuk mencetak objek tertentu. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang jenis material 3D *print* yang tersedia adalah langkah awal yang penting dalam menciptakan hasil cetakan yang sesuai dengan kebutuhan dan tujuan. Berikut merupakan beberapa material yang dapat digunakan pada manufaktur 3D *printing*.

a. Metals

Teknologi pencetakan logam dalam dunia 3D *printing* telah menarik banyak perhatian, terutama di industri aerospace, otomotif, aplikasi medis, dan manufaktur. Hal ini disebabkan oleh keunggulan yang dimiliki oleh proses ini. Material logam memiliki sifat fisik yang sangat baik, sehingga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi yang mencakup pembuatan organ manusia hingga komponen aerospace. Beberapa contoh material logam yang digunakan dalam 3D *printing* mencakup paduan aluminium, paduan berbasis kobalt, paduan berbasis nikel, baja tahan karat, dan paduan titanium. Misalnya, paduan berbasis kobalt sangat cocok digunakan dalam aplikasi pencetakan 3D di bidang kedokteran gigi. Hal ini disebabkan oleh sifat khususnya yang mencakup kekakuan spesifik tinggi, keuletan, kapasitas pemulihan yang baik, elastisitas, dan kemampuan tahan panas setelah perlakuan khusus.

Selain itu, teknologi 3D *printing* juga memiliki kemampuan untuk mencetak komponen aerospace menggunakan paduan berbasis nikel. Komponen yang dihasilkan menggunakan paduan berbasis nikel ini dapat digunakan dalam lingkungan berbahaya, karena memiliki ketahanan korosi yang tinggi dan dapat menahan suhu panas hingga 1200°C. Terakhir, teknologi 3D *printing* juga dapat mencetak objek menggunakan paduan titanium. Paduan titanium memiliki sifat yang sangat istimewa, seperti kemampuan untuk mengalami deformasi, ketahanan korosi dan oksidasi yang baik, serta kerapatan rendah. Oleh karena itu, paduan ini digunakan dalam situasi yang melibatkan tekanan tinggi, suhu operasional yang tinggi, seperti dalam komponen aerospace, dan juga dalam industri biomedis.

b. *Polymers*

Teknologi pencetakan 3D banyak digunakan dalam produksi komponen polimer, mulai dari prototipe hingga struktur fungsional dengan geometri yang rumit. Salah satu metode yang digunakan dalam pencetakan 3D adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM), yang memungkinkan pembentukan objek 3D melalui penumpukan lapisan-lapisan berikutnya dari filamen termoplastik yang diekstrusi, seperti *polylactic acid* (PLA), *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *polypropylene* (PP), atau *polyethylene* (PE). Baru-baru ini, filamen termoplastik dengan titik lebur yang lebih tinggi, seperti PEEK dan PMMA, juga dapat digunakan sebagai bahan dalam teknologi pencetakan 3D.

Bahan-bahan polimer dalam bentuk cair atau dengan titik leleh rendah banyak digunakan dalam industri pencetakan 3D karena biaya yang rendah, bobot yang ringan, dan fleksibilitas dalam prosesnya. Terutama, material polimer memainkan peran penting dalam produk biomaterial dan perangkat medis, seringkali sebagai bahan inert yang berkontribusi pada fungsi efisien perangkat medis serta memberikan dukungan mekanis pada berbagai implan ortopedi. Secara lebih detail, berikut merupakan parameter dan komposisi dari biomaterial.

Author	Material	Compositions	Parameters
Ferri et al. [71]	PLA	PLA	Hardness
		PLA-10HA	Tensile strength
		PLA-20HA	Tensile modulus
		PLA-30HA	Elongation at break
			Flexural strength
			Flexural strength
Wu et al. [72]	PLA	PLA and 5 wt% HA	Compressive strength
		PLA and 10 wt% HA	Elastic modulus
		PLA and 15 wt% HA	Pullout load
Diez-Escudero et al. [73]	PLA	PLA	Thermal characterization
		PLAcHA	Physicochemical characterization
		PLA15H	Biological characterization
Bernardo et al. [74]	PLA	PLA	Physical-chemical characterization
		80%PLA: 20%HA	Thermal analysis
		75%PLA: 25%HA	Wettability
		70%PLA: 30%HA	

Gambar 2.1. Parameter dan Komposisi Material PLA

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

Wang et al. [75]	PLA	PLA	Characterization of PLA/n-HA
		10% n-HA/PLA	In vitro experiment
		20% n-HA/PLA	In vivo experiment
		30% n-HA/PLA	
		40% n-HA/PLA	
		50% n-HA/PLA	
Corcione, Gervaso, and Scalera [76]	PLA	PLA	Compressive strength
		PLA/sdHA	Stiffnes
			Morphology
			Porosity
			Glass transition temperature.
Xu et al. [79]	PCL		Melting temperature
		PCL	Porosity
		70%PCL:30%HA	Compressive Strength
			Elastic Modulus
Kim et al. [80]	PCL		In vitro experiment
		PCL/HA 5 wt.%	Morphology
		PCL/HA 10 wt.%	Tensile Strength
		PCL/HA 15 wt.%	Fracture Strain
		PCL/HA 20 wt.%	
Pierantozzi et al. [81]	PCL	PCL/HA 25 wt.%	
		100% PCL	Porosity
		90% PCL:10% HA	Compressive stress
		90% PCL: 10% SrHA	Elastic Modulus
		80% PCL: 20% HA	In vitro experiment
		80% PCL: 20% SrHA	

Gambar 2.2. Parameter dan Komposisi Material PCL

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

Jiao et al. [82]	PCL	PCL	Microstructures
		20% micro-HA/PCL	Crystallization temperature
		20% nano-HA/PCL	Micropore structure
			Porosity
			Tensile strength
			Flexural strength

Gambar 2.3. Parameter dan Komposisi Material PCL 2

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

Fard et al. [61]	PCL	PCL	Compressive strength
		P-nHA1%	Apparent modulus
		P-nHA2%	TGA results
		P-nHA3%	FTIR results
		P-CNW1%	Cell viability results
		P-CNW2%	Biodegradation rate
		P-CNW3%	
		P-nHA1.5%-CNW1.5%	
		P-nHA1%-CNW2%	
		P-nHA2%-CNW%	
Momeni et.al [83]	PCL	PCL	XRD result
		PCL/10nFA	FTIR result
		PCL/20nFA	SEM image
		PCL/30nFA	Yield strength
			Young modulus
			Tensile strength
			Elongation

Gambar 2.4. Parameter dan Komposisi Material PCL 3

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

c. Ceramics

Saat ini, teknologi pencetakan 3D mampu menghasilkan objek yang dicetak dalam bentuk keramik dan beton tanpa pori-pori besar atau retakan melalui optimasi parameter dan pengaturan properti mekanik yang baik. Keramik merupakan material yang kuat, tahan lama, dan tahan terhadap panas. Karena berada dalam keadaan cair sebelum mengeras, keramik dapat diterapkan dalam hampir semua geometri dan bentuk, sangat cocok untuk konstruksi dan bangunan masa depan.

Selain itu, keramik juga memiliki banyak aplikasi dalam bidang kedokteran gigi dan *aerospace*. Contoh dari material keramik ini termasuk alumina, *bioactive glasses*, dan zirkonia. Alumina, misalnya, memiliki potensi untuk diproses melalui teknologi pencetakan 3D. Alumina adalah oksida keramik yang sangat baik dengan beragam aplikasi, termasuk katalis, adsorben, mikroelektronika, kimia, industri *aerospace*, dan industri teknologi tinggi lainnya. Melalui teknologi pencetakan 3D, dapat dicetak bagian-bagian alumina dengan bentuk yang kompleks dan memiliki kerapatan tinggi setelah disintering.

Selanjutnya, dalam eksperimen yang berkelanjutan, mesin *Stereolithographic* (SLA) digunakan untuk memproses kaca-keramik dan *bioactive glass* menjadi bagian-bagian yang lebih kuat. Peningkatan kekuatan mekanik ini membuka potensi penggunaan *bioactive glass* dalam struktur klinis yang relevan, seperti bingkai dan tulang. Dengan menggunakan *Stereolithographic Ceramic Manufacturing* (SLCM), mungkin untuk memproduksi keramik padat dengan kerapatan tinggi, struktur mikro yang sangat homogen, kekuatan tekan dan kekuatan lentur yang tinggi.

Sementara itu, *zirkonia* adalah bahan konstruksi utama dalam sektor energi nuklir, digunakan untuk elemen tabung. Zirkonium bebas hafnium sangat cocok untuk aplikasi ini karena memiliki tingkat kerentanannya rendah terhadap radiasi dan penyerapan neutron termal yang rendah.

d. *Composites*

Material komposit dengan fleksibilitas yang luar biasa, bobot ringan, dan sifat yang dapat disesuaikan telah merevolusi industri berkinerja tinggi. Contoh-contoh material komposit ini adalah komposit polimer yang diperkuat serat karbon dan komposit polimer yang diperkuat serat kaca. Struktur komposit polimer yang diperkuat serat karbon banyak digunakan dalam industri aerospace karena memiliki kekakuan khusus yang tinggi, kekuatan, ketahanan korosi yang baik, dan kinerja kelelahan yang baik.

Di sisi lain, komposit polimer yang diperkuat serat kaca banyak digunakan dalam berbagai aplikasi dalam teknologi pencetakan 3D dan memiliki potensi besar karena efisiensi biaya dan kinerjanya yang tinggi. Serat kaca memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan koefisien perluasan termal yang relatif rendah. Selain itu, serat kaca tidak dapat terbakar dan tidak terpengaruh oleh suhu pengerasan yang digunakan dalam proses manufaktur, sehingga sangat cocok untuk digunakan dalam aplikasi pencetakan 3D.

e. *Smart Materials*

Material pintar didefinisikan sebagai material yang memiliki potensi untuk mengubah geometri dan bentuk objek, dipengaruhi oleh kondisi eksternal seperti panas dan air. Contoh dari objek yang diproduksi dengan teknologi pencetakan 3D menggunakan material pintar adalah struktur yang dapat berevolusi sendiri dan sistem robotik lunak. Material pintar juga dapat diklasifikasikan sebagai material pencetakan 4D. Contoh kelompok material pintar termasuk paduan memori

bentuk dan polimer memori bentuk. Beberapa paduan memori bentuk seperti nikel-titanium dapat digunakan dalam implantasi biomedis hingga aplikasi perangkat mikro-elektromekanik.

Sementara itu, polimer memori bentuk (SMP) adalah jenis material fungsional yang merespons stimulus seperti cahaya, panas, listrik, beberapa jenis bahan kimia, dan sebagainya. Dengan menggunakan teknologi pencetakan 3D, bentuk yang rumit dari polimer memori bentuk dapat diproduksi dengan mudah dan nyaman. Evaluasi kualitas material ini dilakukan berdasarkan akurasi dimensional, kerapian permukaan, dan kepadatan komponen. Penggunaan material pintar dalam pencetakan 3D membuka peluang untuk menciptakan objek yang dapat merespons kondisi eksternal dan mengubah bentuk atau fungsi mereka sesuai kebutuhan. Hal ini memiliki berbagai aplikasi dalam berbagai bidang, termasuk teknologi biomedis dan mikro-elektromekanik.

f. *Specials Materials*

Contoh-contoh material khusus material yang termasuk dalam specials materials meliputi:

i. Makanan

Teknologi pencetakan 3D dapat memproses dan menghasilkan bentuk dan geometri yang diinginkan dengan menggunakan bahan makanan seperti coklat, daging, permen, pizza, spaghetti, saus, dan sebagainya. Pencetakan makanan 3D dapat menghasilkan makanan sehat karena proses ini memungkinkan pelanggan untuk mengatur bahan tanpa mengurangi nutrisi dan rasa dari bahan tersebut.

ii. Tekstil

Dengan teknologi pencetakan 3D, industri perhiasan dan pakaian akan bersinar dengan perkembangan pencetakan tekstil 3D. Beberapa keuntungan dari teknologi pencetakan 3D dalam industri fashion adalah waktu pengolahan yang singkat untuk membuat produk, biaya yang lebih rendah terkait dengan kemasan, dan pengurangan biaya rantai pasokan. Teknologi ini memungkinkan pencetakan pakaian dan aksesoris dengan desain yang lebih kompleks dan personalisasi yang lebih besar (Shahrubudin et al., 2019).

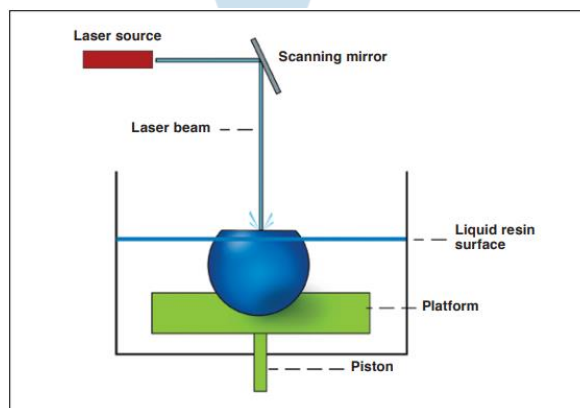
2.2.3. Jenis Mesin 3D *Printing*

Terdapat beberapa jenis mesin 3D *printing* yang dibedakan berdasarkan wujud bahan baku serta cara kerja mesin tersebut.

a. *Stereolithography Apparatus (SLA)*

Meskipun 3D Systems masih mendominasi sebagai produsen utama *printer* SLA, saat ini tersedia berbagai model lainnya. Mesin SLA menggunakan prinsip di mana *build tray* yang digunakan terendam dalam resin cair yang bisa mengeras berkat eksposur terhadap sinar laser ultraviolet yang terkonsentrasi (lihat Gambar 1). Laser ini digunakan untuk membentuk potongan lintasan objek pada setiap lapisan. Setelah lapisan tersebut mengeras, *build tray* turun sejauh ketebalan lapisan, sehingga lapisan selanjutnya dapat tertutupi oleh resin yang belum mengeras. Proses ini diulang berkali-kali hingga objek yang sedang dicetak terbentuk. *Printer* SLA umumnya memiliki kecepatan cetak yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis *printer* lainnya karena laser hanya mampu mengerasi area yang kecil pada setiap tahapnya.

Selain informasi tersebut, ada beberapa hal penting yang perlu dicatat mengenai mesin SLA (*Stereolithography Apparatus*). Mesin SLA adalah salah satu jenis *printer* 3D yang menghasilkan objek dengan kualitas tinggi dan detail halus. Proses SLA melibatkan pemakaian cairan resin yang mengeras akibat paparan sinar UV yang diarahkan oleh laser. Keunggulan utama dari *printer* SLA adalah kemampuannya untuk mencetak objek dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi, menjadikannya pilihan populer dalam pembuatan prototipe dan produksi produk-produk yang membutuhkan detail yang sangat halus. Namun, seperti yang disebutkan dalam referensi, *printer* SLA cenderung memiliki kecepatan cetak yang lebih lambat dibandingkan dengan beberapa jenis *printer* 3D lainnya karena proses yang berbasis laser yang cermat namun perlahan. Meskipun begitu, mesin SLA tetap menjadi salah satu pilihan utama dalam industri yang menghargai kualitas dan akurasi tinggi dalam pencetakan 3D.



Gambar 2.5. Stereolithography Apparatus (SLA)

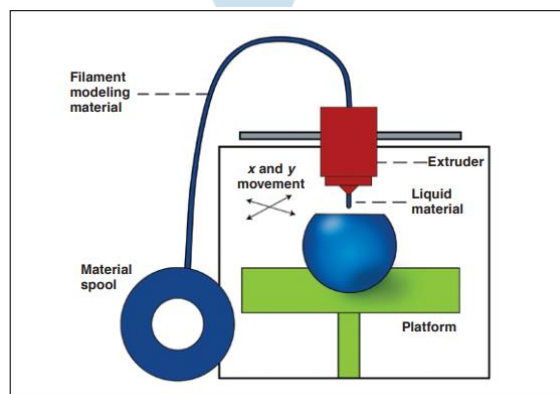
Sumber : Groth, Kravitz, Jones, Graham, & Redmond (2014)

b. *Fused Deposition Modeling* (FDM)

Meskipun paten-paten yang sebelumnya dimiliki oleh Stratasys telah kedaluwarsa, Perusahaan ini telah menghasilkan banyak merek *Fused Deposition Modeling* (FDM) yang tersedia untuk pasar konsumen. Namun, Stratasys masih tetap menjadi salah satu produsen utama mesin FDM. Berbeda dengan metode *Stereolithography Apparatus* (SLA) yang menggunakan pencahayaan proyeksi untuk mengerasi resin cair, mesin FDM bekerja dengan cara mengekstrusi resin yang telah dipanaskan hingga melebihi titik lelehnya, lalu menumpukkannya lapis demi lapis.

Proses ekstrusi ini memungkinkan material yang dikeluarkan untuk segera mengeras setelah dideposisikan, yang menghasilkan akurasi yang tinggi. Di antara berbagai jenis material yang dapat digunakan dalam mesin FDM, bahan-bahan umum yang digunakan termasuk *polylactic acid* (PLA) dan *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS). Material-material ini biasanya tersedia dalam bentuk gulungan yang dapat diganti dengan mudah sesuai kebutuhan.

Kelebihan mesin FDM adalah kesederhanaan prosesnya dan kemampuan untuk mencetak objek dengan biaya yang relatif rendah. Meskipun kecepatan cetaknya mungkin lebih lambat daripada beberapa teknologi pencetakan 3D lainnya, FDM tetap menjadi pilihan populer dalam pembuatan prototipe, pendidikan, dan berbagai aplikasi lainnya. Keunggulan lainnya adalah kemampuan untuk mencetak objek besar dengan ukuran yang sesuai dengan kebutuhan, serta tersedianya beragam material cetak yang memungkinkan eksperimen dalam pengembangan produk. Mesin FDM telah mendukung perkembangan inovasi di berbagai industri dan menjadi teknologi yang aksesibel bagi berbagai pengguna.



Gambar 2.6. *Fused Deposition Modeling* (FDM)

Sumber : Groth, Kravitz, Jones, Graham, & Redmond (2014)

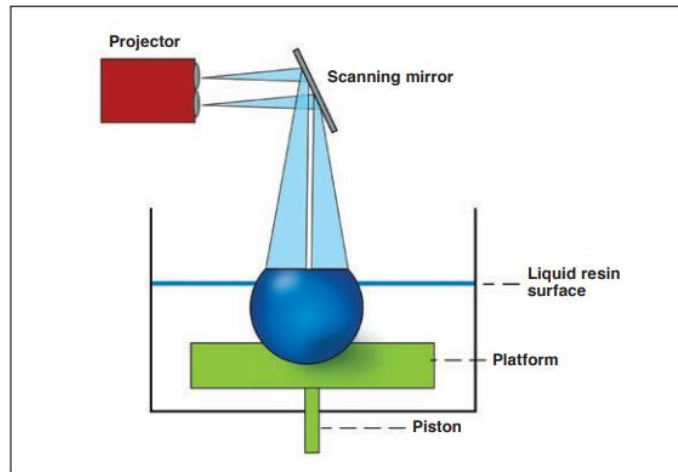
c. *Digital Light Processing (DLP)*

EnvisionTEC adalah salah satu pemimpin dalam produksi *printer Digital Light Processing (DLP)*. Teknologi DLP serupa dengan *Stereolithography Apparatus (SLA)*, tetapi perbedaan utamanya terletak pada sumber cahaya yang digunakan. Dalam DLP, proyektor digunakan untuk mengerasi seluruh lapisan objek sekaligus, berbeda dengan laser SLA yang harus menggambar lapisan demi lapisan untuk mengerasinya.

Salah satu inovasi utama dalam mesin DLP adalah penggunaan sebuah *chip* yang dikembangkan oleh Texas Instruments, yang dikenal sebagai perangkat mikro cermin digital. *Chip* ini mengandung ratusan ribu cermin kecil yang mampu bergerak dalam dua arah, yaitu menyala dan mati, ribuan kali per detik. Keunggulan dari teknologi DLP adalah kemampuannya untuk mencetak objek dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi, menghasilkan hasil cetakan yang halus dan berkualitas tinggi.

Selain kecepatan cetak yang lebih tinggi, keunggulan lain dari mesin DLP adalah hasil cetak yang bebas dari jejak tangga atau tampilan lapisan-lapisan seperti pada beberapa teknologi pencetakan 3D lainnya. Hal ini menjadikan DLP sebagai pilihan yang sangat baik untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi dan hasil cetakan berkualitas, seperti pembuatan perhiasan, prototipe presisi, dan banyak lagi. DLP juga memiliki beragam pilihan material cetak, termasuk plastik ABS, yang memungkinkan pemakaian dalam berbagai jenis proyek.

Dalam hal kemampuan mencetak dengan akurasi dan kecepatan tinggi, mesin DLP memiliki daya tarik khusus untuk industri yang menghargai kualitas dan efisiensi dalam pencetakan 3D. Meskipun masih ada tantangan teknis yang perlu diatasi, teknologi DLP terus berkembang dan memberikan solusi pencetakan yang lebih baik bagi berbagai aplikasi.



Gambar 2.7. Digital Light Processing (DLP)

Sumber : Groth, Kravitz, Jones, Graham, & Redmond (2014)

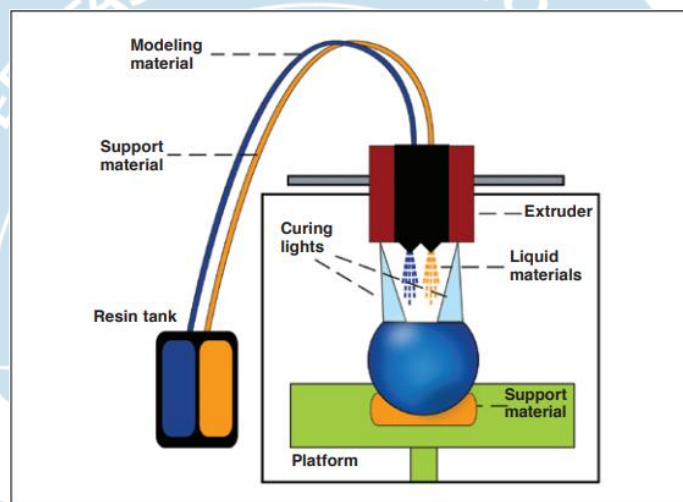
d. PolyJet Printing (PPP)

Stratasys dan *3D Systems* saat ini merupakan dua dari sedikit produsen *printer PolyJet Printing (PPP)*, yang mengadopsi teknologi dasar yang serupa dengan *printer* kantor tinta inkjet standar, hanya dalam tiga dimensi. Prosesnya melibatkan penyemprotan resin cair melalui ratusan nosel dan pengerasannya secara instan dengan sinar ultraviolet. *Platform* pembangunan bergerak secara vertikal untuk mengakomodasi lapisan berikutnya. Walaupun metode ini mungkin meninggalkan garis-garis strata pada model, ketebalan lapisan pembangunan bisa sangat tipis, seringkali hanya sekitar 16 mikron, sehingga kualitas permukaan pada model PPP seringkali sangat baik.

Printer PPP kelas atas memiliki keunggulan dalam kemampuan untuk mencetak dengan berbagai jenis material pada satu model. Terdapat beragam jenis media yang tersedia, mulai dari *komponen* mirip karet hingga material yang dirancang untuk beroperasi pada suhu tinggi. Salah satu kelemahan dari teknologi ini adalah adanya lebih banyak limbah dibandingkan dengan teknologi pencetakan lainnya. Hal ini dikarenakan penggunaan pisau penyeka sebelum setiap lapisan dieras dengan sinar UV untuk menghilangkan material berlebih dan memastikan akurasi dimensional. Selain itu, mekanisme pencetakan ini kadang-kadang perlu dibersihkan untuk mencegah penyumbatan (meskipun tetap diperlukan penggantian rutin). Ketika terjadi perubahan resin, semua jalur material harus dihilangkan, yang menghasilkan limbah resin yang tidak dapat digunakan kembali atau didaur ulang. Limbah ini biasanya dikumpulkan dalam sebuah tangki limbah

yang harus secara berkala dikosongkan. Meskipun volume limbah pada setiap tahap mungkin terlihat kecil, namun dapat mengakumulasi jika digunakan secara berkelanjutan.

Meskipun PPP memiliki sejumlah kelemahan dan tuntutan perawatan lebih lanjut, jenis *printer* ini tetap menjadi salah satu metode yang unggul dalam menciptakan model dengan kualitas permukaan yang tinggi serta kemampuan untuk menggunakan beragam jenis material dalam pencetakan 3D. Teknologi PPP memiliki potensi besar dalam berbagai aplikasi, dari pembuatan prototipe hingga manufaktur akhir yang membutuhkan kualitas cetakan yang tinggi (Jones & Graham, 2014).



Gambar 2.8. PolyJet Printing (PPP)

Sumber : Groth, Kravitz, Jones, Graham, & Redmond (2014)

2.2.4. Optimasi Parameter

Tuning parameter dalam teknik *Fused Deposition Modeling* (FDM) untuk mencetak *scaffold* tulang melibatkan pemahaman yang mendalam. Hal ini disebabkan oleh banyak faktor yang mempengaruhi operasi pencetakan 3D. Parameter-proses FDM dikelompokkan menjadi tiga kategori, yaitu pengaturan pemotongan (*slicing*), orientasi pembangunan, dan kondisi suhu. Menurut Sheoran dan Kumar, parameter-proses pencetakan melibatkan berbagai aspek, seperti ketebalan lapisan, orientasi pembangunan, celah udara, sudut raster/orientasi raster, suhu ekstrusi, kecepatan pencetakan, pola *infill*, kepadatan *infill*, persentase *infill interior*, diameter nosel, lebar raster, jumlah kontur, lebar kontur, dan celah udara antara kontur.

- a. Ketebalan lapisan: Ketebalan lapisan mengacu pada jumlah bahan yang dideposisikan sepanjang sumbu vertikal pada mesin FDM dalam satu langkah. Tinggi lapisan selalu lebih kecil daripada diameter ujung nosel ekstruder. Diameter nosel ekstruder adalah yang menentukan parameter ini.
- b. Orientasi bangunan: Ini menjelaskan bagaimana komponen yang akan dicetak disesuaikan pada platform bangunan dalam hal tiga sumbu utama mesin (X, Y, dan Z). Struktur objek biasanya mempertimbangkan kelayakan bangunan, efisiensi bangunan, dan akurasi bangunan. Anisotropi kekuatan tarik dalam objek FDM diperkirakan berdasarkan orientasi konstruksi. Orientasi konstruksi juga memiliki dampak yang signifikan pada cacat permukaan dan perilaku mekanik objek FDM.
- c. Celah udara: Celah udara adalah ruang (atau celah) antara dua jalur alat yang berdekatan pada satu lapisan objek yang dibuat dengan FDM. Nilai celah udara bisa nol, positif, atau negatif. Jika elemen yang didepositkan berkontak langsung satu sama lain, maka tidak ada celah udara. Celah udara positif memisahkan proses deposisi material berikutnya, menghasilkan struktur yang longgar yang memerlukan pembuatan komponen yang cepat. Sementara itu, celah udara negatif menciptakan komponen yang lebih padat karena bead deposisi sebagian tumpang tindih.
- d. sudut Raster/orientasi raster: Sudut ini mengacu pada sudut sumbu X dari *platform* bangunan di mana materi ekstrusi didepositkan. Biasanya, sudut raster berkisar dari 0 hingga 90 derajat.
- e. Suhu ekstrusi: Suhu dalam nosel pemanasan FDM sebelum material diekstrusi dikenal sebagai suhu ekstrusi.
- f. Kecepatan Pencetakan: Ini adalah kecepatan di mana nosel pencetakan bergerak melintasi bidang XY saat material didepositkan pada platform bangunan.
- g. Pola *Infill*: Ini adalah proses pencetakan struktur internal suatu komponen. Contohnya adalah pola berbentuk heksagonal, *linear*, dan berlian.
- h. Kepadatan *Infill*/Persentase *Infill Interior*: Jumlah filamen yang dicetak di dalam objek dikenal sebagai kepadatan *infill*, dan ini berdampak pada kekuatan, berat, dan waktu pencetakan.
- i. Diameter nosel: Diameter ujung nosel ekstruder didefinisikan sebagai diameter nosel.

j. Lebar raster: Lebar raster ditentukan oleh diameter *bead* deposisi. Ini terkait dengan ukuran nosel ekstrusi.

k. Jumlah kontur: Jumlah kontur mengacu pada jumlah lapisan luar yang mengelilingi pola *infill* internal objek yang dihasilkan oleh FDM.

l. Lebar kontur: Lebar kontur terkait dengan ketebalan lapisan luar (kontur) yang melingkupi pola *infill interior*.

m. Celah udara kontur ke kontur: Ini merujuk pada celah udara antara dua lapisan luar padat (kontur) yang berdekatan (Winarso et al., 2022).

Berikut merupakan contoh parameter cetak dari material PLA dan PCL. Pada parameter di bawah terdapat parameter suhu, kecepatan *print*, dan sebagainya.

Author	Material	Printing Parameter	Mechanical Properties
Ariffin et al. [54]	PLA	Printing temperature = 190 °C	Compressive strength
		Bead temperatures = 50 °C	Porosities
		Printing speed = 60 mm/s	
Carlier et al. [55]	PLA	Printing temperature = 190 °C	Tensile strength
		Layer thickness = 0.1 mm	Elongation at break Elastic modulus
		Deposition rate = 88 mm/s	
Khosravani and Reinicke et al. [56]	PLA	Nozzle temperature = 215 °C	Tensile strength
		Layer thickness = 0.4 mm	Stiffnes
		Bed temperature = 55 °C	Elastic modulus
		Printing speeds = 20 mm/s	
		Raster orientations = 0°	

Gambar 2.9. *Printing* Parameter dan Komposisi Material PLA

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

Lyu et al. [57]	PLA	Layer thickness = 0.15 mm	Yield strength
		Printing speed = 50 mm/s	Elongation at break
		Nozzle temperature = 200 °C	Dimensional accuracy
		Platform temperature = 50 °C	
Deomore and Raykar [58]	PLA	Layer thickness = 0.3 mm	Time
		Speed = 100 mm/h	Weight of Product
		In fill percentage = 55%	Filament length
Samykan [59]	PLA	Layer height = 0.3 mm	Ultimate tensile strength
		Raster angle = 40 °C	Fracture strain
		Infill density = 80%	Elastic modulus
			Yield strength
			Toughness
Hikmat, Rostam, and Ahmed [60]	PLA	Build orientation = on-edge	Tensile strength
		Raster orientation = 30/-60°	
		Nozzle diameter = 0.5 mm	
		Extruder temperature = 220 °C	
		Infill density = 100%	
		Extruding speed = 20 mm/s	

Gambar 2.10. *Printing* Parameter dan Komposisi Material PLA 2

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

Fard et al. [61]	PCL	Nozzle temperature = 100 °C	Structural integrity
		Print speed = 15 mm/s	Compressive strength
		Build plate temperature = 30 °C	
		Fan speed = 100%	
Ariadna et al. [62]	PCL	Nozzle tip size = 0.45 mm	Visual screening
		Layer height = 0.3 mm	
		Extruding speed = 10 mm/s	

Gambar 2.11. *Printing* Parameter dan Komposisi Material PCL

Sumber : Winarso R., Anggoro P.W., Ismail R., Jamari J., & Bayuseno A.P. (2022)

2.2.5. Kualitas Hasil Cetakan

Peningkatan jumlah *printer* 3D yang lebih baik dan lebih terjangkau telah memicu pertumbuhan yang signifikan dalam pencetakan 3D di dunia medis dalam beberapa tahun terakhir. Sekarang, dengan biaya hanya beberapa ratus dolar, siapa pun dapat mulai membuat model 3D untuk tujuan diagnostik, pendidikan, dan penelitian. Namun, meskipun proses dari pemindaian CT hingga model 3D cetak terlihat sederhana, sejumlah langkah di sepanjang jalan tersebut bisa menjadi masalah. Proses pemindaian CT, segmentasi objek, penyuntingan model, dan akhirnya pencetakan model memiliki potensi masalah masing-masing yang dapat memengaruhi hasil akhir model 3D yang dicetak.

Salah satu masalah potensial adalah kurangnya pemahaman orang yang membuat model tentang proses kontrol kualitas yang telah menjadi bagian dari industri manufaktur selama beberapa dekade. Di bidang medis, sangat penting agar model 3D yang dicetak merupakan representasi anatomi pasien yang akurat. *Food and Drug Administration* (FDA) Amerika Serikat telah menetapkan pedoman untuk pencetakan model untuk penggunaan medis. Ketika pengguna mulai beralih dari pencetakan model sebagai barang baru ke penggunaan medis, mereka harus menyadari bahwa FDA menganggap model untuk tujuan diagnostik sebagai perangkat medis Kelas II. Meskipun pembuat model pasien mungkin tidak menganggapnya digunakan untuk tujuan diagnostik, ketika model tersebut diberikan kepada penyedia layanan kesehatan, menjadi naif untuk berpikir bahwa orang tersebut tidak menggunakannya untuk tujuan diagnostik. Biasanya, penyedia akan menyentuh dan memeriksa model dari berbagai posisi, menggunakan model tersebut untuk mendukung atau memeriksa impresi mereka tentang anatomi pasien.

Artikel yang ditulis oleh Galvez dkk. merupakan sebuah pencapaian penting karena tidak ada perbedaan statistik dalam pengukuran antara serangkaian tulang belakang babi, gambar CT, dan model cetak 3D. Tulang-tulang ini dipindai dengan atau tanpa jaringan lunak terkait, dan hasilnya juga menunjukkan tidak ada perbedaan dalam model yang dihasilkan. Menarik untuk dicatat bahwa perbedaan antara pemindaian ini serupa dengan ketebalan lapisan CT, masing-masing sekitar 0,6 mm. Verifikasi bahwa pengukuran model 3D cetak cocok dengan pengukuran tulang adalah bagian signifikan dari proses kontrol kualitas. Pada setiap tahap dalam proses pembuatan model medis 3D yang akurat, langkah-langkah kontrol

kualitas harus diterapkan, mulai dari pemindai CT itu sendiri, yang harus menjalani proses rutin kontrol kualitas (Weadock, 2020).

2.2.6. Metode Eksperimen

Dalam dunia penelitian dan eksperimen, metode desain eksperimen adalah alat yang kuat untuk mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang memengaruhi hasil suatu percobaan dan bagaimana faktor-faktor tersebut berinteraksi. Metode desain eksperimen memungkinkan para peneliti untuk merancang percobaan yang terstruktur, sistematis, dan efisien untuk mengoptimalkan hasil yang diinginkan. Terdapat berbagai jenis metode desain eksperimen yang telah dikembangkan untuk berbagai aplikasi, termasuk Taguchi, *full factorial*, *fractional factorial*, *central composite*, *response surface*, dan lainnya. Setiap metode memiliki karakteristik dan kegunaan sendiri, sehingga pemilihan metode yang tepat sangat bergantung pada tujuan penelitian dan sifat percobaan yang dilakukan. Berikut merupakan contoh kasus yang sesuai dengan masing-masing metode.

a. *Full Factorial Design* (Faktorial Penuh):

Contoh: Sebuah laboratorium farmasi ingin mengkaji pengaruh tiga variabel pada kualitas tablet obat: jenis bahan baku, suhu pengeringan, dan tekanan pengempaan. Peneliti menggunakan faktorial penuh untuk menguji semua kemungkinan kombinasi ($2 \times 2 \times 2$) dari variabel-variabel ini (Rakić et al., 2014).

b. *Fractional Factorial Design* (Faktorial Parsial):

Contoh: Sebuah pabrik makanan menguji berbagai faktor yang mempengaruhi rasa dan tekstur produk makanan. Karena terdapat banyak faktor, peneliti menggunakan faktorial parsial (misalnya, 1/4 fraksional) untuk menguji sebagian faktor saja (Jaynes et al., 2013).

c. *One-Factor-at-a-Time* (OAT):

Contoh: Seorang peneliti ingin mengoptimalkan kecepatan reaksi kimia tertentu. Mereka memulai dengan mengubah satu variabel, seperti konsentrasi reagen, sementara faktor-faktor lainnya tetap konstan. Kemudian, peneliti melanjutkan dengan mengubah faktor lainnya satu per satu (Frey et al., 2003).

d. *Response Surface Methodology* (RSM):

Contoh: Sebuah perusahaan manufaktur ingin mengoptimalkan kekuatan dan ketahanan produk plastik. Peneliti menggunakan RSM untuk membangun model

matematika yang memprediksi pengaruh suhu cetak, tekanan injeksi, dan waktu pendinginan terhadap kualitas produk (Khuri & Mukhopadhyay, 2010).

e. *Taguchi Methods*:

Contoh: Sebuah produsen mobil ingin meminimalkan kebisingan mesin. Peneliti menerapkan metode Taguchi untuk mengidentifikasi pengaruh berbagai faktor produksi, seperti toleransi suku cadang, bahan baku, dan parameter perakitan (Kumar et al., n.d.).

f. *Central Composite Design (CCD)*:

Contoh: Seorang peneliti ingin mengoptimalkan suhu dan tekanan dalam reaktor kimia. Peneliti menggunakan CCD untuk mengeksplorasi efek faktor-faktor utama dan mencari kombinasi yang menghasilkan hasil terbaik (Rakić et al., 2014).

g. *Latin Square Design*:

Contoh: Seorang perusahaan makanan ingin mengevaluasi rasa empat jenis saus baru. Peneliti menggunakan desain kisi Latin untuk mengurangi efek urutan dan interaksi antara saus-saus tersebut (Richardson, 2018).

h. *Box-Behnken Design*:

Contoh: Sebuah laboratorium penelitian ingin memahami pengaruh pH, konsentrasi, dan waktu reaksi pada sintesis senyawa kimia tertentu. Peneliti menggunakan desain Box-Behnken untuk mengidentifikasi kondisi optimal (Rakić et al., 2014).

i. *Plackett-Burman Design*:

Contoh: Sebuah perusahaan minuman ingin mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi rasa minuman mereka. Peneliti menggunakan metode Plackett-Burman untuk mengidentifikasi faktor-faktor paling signifikan, seperti konsentrasi gula, asam, dan aroma (Vanaja & Rani, 2007).

j. *Cross-Validation*:

Meskipun bukan metode perancangan eksperimen, cross-validation digunakan dalam pengembangan model prediktif. Seorang peneliti memvalidasi model regresi logistiknya untuk memprediksi penyakit berdasarkan data medis dengan membagi data menjadi dua set, pelatihan dan pengujian, untuk mengukur sejauh mana model tersebut dapat digeneralisasi (Stone, 1978).