

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Referensi Awal

Pada saat melakukan penelitian, sangat diperlukan observasi sebagai referensi untuk mencari sumber yang berkaitan dengan judul yang diambil dalam penelitian. Berikut adalah beberapa referensi yang diambil dalam penelitian ini, yaitu :

Tabel 2.1 Sumber Referensi

No.	Judul	Peneliti (Tahun)	Sumber	Kesimpulan
1.	Optimasi Parameter pada Proses Pembuatan Objek 3D <i>Printing</i> dengan Teknologi FDM terhadap Akurasi Geometri	Dicky Seprianto, Romi Wilza, Iskandar (2017)	Seminar Nasional Teknik Industri Universitas Gadjah Mada 2017	Berdasarkan penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa desain eksperimen tipe 2 <i>level factorial</i> dengan model 4 <i>factorial interaction</i> (4FI) berbantuan perangkat lunak <i>design-expert</i> telah berhasil dibuat untuk memprediksi pengaruh faktor-faktor terhadap akurasi geometri objek 3D <i>printing</i> dengan teknologi FDM. Dari persamaan regresi linier terhadap respon <i>length</i> , <i>width</i> dan <i>height</i> yang dihasilkan menggunakan ANOVA dan telah dilakukan uji konfirmasi dapat ditentukan kondisi optimal kombinasi factor yaitu <i>layer height</i> =0.14
2.	<i>Influence of Internal Fill Pattern, Polishing Time and Z-Axis Orientation on the Tensile Strength of the 3D Printed Part</i>	Dicky Seprianto, Iskandar, Romi Wilza, EYT Adesta (2019)	<i>International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)</i>	<i>Based on statistical analysis using Design-Expert® software with design type 2 level factorial known interaction between internal fill pattern with Z-axis orientation contribute 52% to the tensile strength of specimens.</i>

No.	Judul	Peneliti (Tahun)	Sumber	Kesimpulan
3.	Monitoring dan Analisis Mesin 3D Printing Berbasis Sensor Getaran Untuk Mengoptimalkan Kualitas Hasil.	Ikhwan Taufik, Herianto, dan M. K. Herliansyah (2017)	Jurnal E-KOMTEK Vol. 1 No.1	Dari hasil penelitian tentang pengukuran getaran pada mesin 3D printer dan juga pengukuran tingkat kekasaran permukaan pada hasil printing, ternyata tidak terlihat adanya pengaruh yang cukup signifikan.
4.	Optimasi Parameter 3D Printing Terhadap Keakuratan Dimensi dan Kekasaran Permukaan Produk Menggunakan Metode <i>Taguchi Grey Relational Analysis</i> .	Andik Aris Setiawan, Bayu Wiro Karuniawan, dan Nurvita Arumsari (2018)	<i>Proceedings Conference on Design Manufacture Engineering and its Application</i> , Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya	Nilai kekasaran yang didapat dari hasil terbaik yang didapatkan adalah 8,55 μm dari percobaan pertama sisi ke 4. Dan rata-rata kekasaran yang didapat pada setiap sisinya adalah 11 μm .
5.	Desain Alat Bantu Press Tool untuk Meningkatkan Produktivitas UKM Metal Furniture	Muchtar Ginting, Dicky Seprianto, dan Romi Wilza (2017)	Jurnal Austenit Teknik Mesin Politeknik Negeri Sriwijaya (ISSN 2085-1286)	Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas dan waktu produksi Alat Press Tool penelitian tahun ke dua lebih baik, seragam dan cepat bila dibandingkan dengan tahun pertama.
6.	<i>Low Cost Printer for DLP Stereolithography</i>	Joško Valentinčič et. al. (2017)	<i>Journal of Mechanical Engineering</i> 63(2017)10, 559-566	<i>The optimal printing parameters for the custom build 3D printer with applied software mask and photopolymer Deep Black were obtained: exposure time 16.5 s, layer thickness 0.06 mm, time between two consecutive exposures 4 s. Using these parameters, the deviation of the actual dimensions from the nominal dimensions in x and y direction is 30 μm and 10 μm respectively, and 80 μm in z direction.</i>

No.	Judul	Peneliti (Tahun)	Sumber	Kesimpulan
7.	<i>Digital Light Processing (DLP): Anisotropic Tensile Considerations</i>	E. Aznarte, C. Ayranci, dan A.J. Qureshi (2017)	<i>Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International</i>	<i>Considering the results from this study, a more detailed study is being carried out to design and manufacturing parameter optimization for the mechanical properties. This includes an extended design of experiments study to establish the correlation and interaction between different factors.</i>
8.	Analisis Dimensi Tebal Gigi pada Roda Gigi Lurus Modul 2 dengan Z=27 dan Z=29 Hasil Proses Hobbing terhadap Standar ISO No. 1328	Antonius Adi Soetopo, dan Asri Renggani (2018)	Seminar Nasional – XVII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri Kampus ITENAS – Bandung, 21-22 November 2018	Toleransi standar tebal gigi ISO no.1328 dinyatakan notasi angka dan huruf. Kualitas roda gigi lurus modul 2 pada z=27 dan z=29 hasil proses hobbing berada pada kisaran kualitas angka 6 – 10 dengan huruf C – S. Tahapan proses pembuatan bakalan roda gigi dibuat dengan ketentuan toleransi sebagai berikut : diameter bakalan = 0,036–0,100mm, silindrisitas bakalan = 0,011 –0,028mm
9.	Pengukuran Ketelitian Komponen Mesin Bubut Dengan Standar ISO 1708	Gugun Sundara, dan Slamet Riyadi (2017)	Al Jazari <i>Journal of Mechanical Engineering</i> ISSN: 2527-3426	Prosedur pengujian dengan standar iso ISO 1708 yang dikembangkan oleh Schelsinger dapat dikembangkan melakukan pengukuran ketelitian geometric pada mesin perkakas lainnya sehingga penyimpangan mesin perkakas dapat diketahui

2.2 Computer Aided Design (CAD)

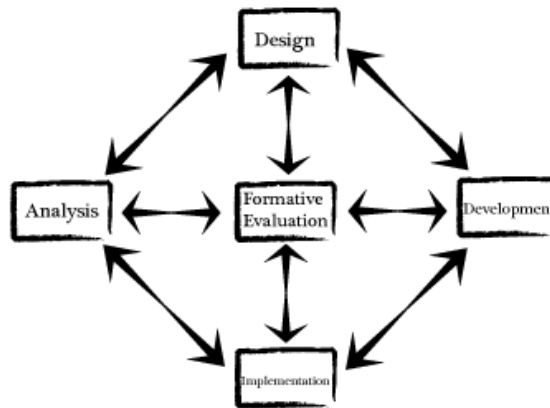
Computer Aided Design adalah suatu perangkat lunak komputer untuk menggambar suatu produk atau bagian dari suatu produk. Produk yang ingin digambarkan bisa diwakili oleh garis-garis maupun simbol-simbol yang memiliki makna tertentu. CAD bisa berupa gambar 2 dimensi, 3 dimensi dan solid

modeling. Berawal dari menggantikan fungsi meja gambar kini perangkat lunak CAD telah berevolusi dan terintegrasi dengan perangkat lunak CAE (*Computer Aided Engineering*) dan CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Integrasi itu dimungkinkan karena perangkat lunak CAD saat ini merupakan aplikasi desain produk/komponen dalam bentuk solid dan/atau *surface modelling*. Solid model memungkinkan kita untuk memvisualisasikan komponen dan rakitan yang kita buat secara realistis. Selain itu model mempunyai properti seperti massa, volume, pusat gravitasi, luas permukaan dan sebagainya. Beberapa perangkat lunak CAD yang digunakan di Indonesia yaitu: Alias, CATIA, Autodesk® Inventor®, Pro/ENGINEER®, Parasolid®, SolidWorks™ dan Power Shape dan UGS NX. (Dicky Seprianto dkk, 2017)

2.3 Rapid Prototyping

Rapid Prototyping adalah teknik membentuk dan merakit sebuah produk dengan cara yang cepat dengan integrasi antara sistem CAD (*Computer Aided Design*) dan mesin dengan sistem *rapid prototyping* (3D printing, CNC). Pembentukannya dengan menambahkan *layer by layer* sesuai irisan yang diolah dengan CAD (Rinanti dan Sutopo, 2017).

Menurut Bourell (2009), definisi dari *rapid prototyping* sebagai proses pembentukan benda dari data 3D berupa *layer/lapisan*, sebagai kebalikan dari proses manufaktur yaitu mengurangi bagian – bagian yang tidak diperlukan. Teknik *rapid prototyping* ini pertama kali dipublikasikan oleh ilmuwan Jepang bernama Hideo Kodama pada tahun 1981. Kodama memperkenalkan teknik mencetak/membentuk benda tiga dimensi dari bahan plastic *polymer* menggunakan metode menyinari *polymer* cair dengan sinar UV (*Ultraviolet*). Setelah Kodama mempublikasikan penelitiannya, berkembang penelitian tentang pembentukan objek 3D yang lebih cepat dan efisien.



Gambar 2.1 *Rapid Prototyping Model*
(Sumber : en.wikiversity.org, 2018)

1) *Rapid Prototyping* dalam Dunia Industri

Rapid prototyping sangat berguna dan diperlukan dalam dunia industri, yaitu sebagai berikut :

- a) Meningkatkan efektifitas komunikasi di lingkungan industri atau dengan konsumen.
- b) Mengurangi kesalahan-kesalahan produksi yang mengakibatkan membengkaknya biaya produksi.
- c) Mengurangi waktu pengembangan produk.
- d) Meminimalisasi perubahan-perubahan mendasar.
- e) Memperpanjang jangka pakai produk misalnya dengan menambahkan beberapa komponen fitur atau mengurangi fitur-fitur yang tidak diperlukan dalam desain.

2) Kelebihan dan Kekurangan

a) Kelebihan *Rapid Prototyping* :

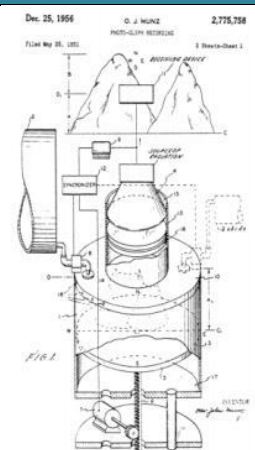
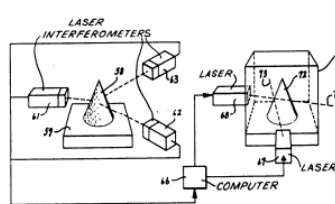
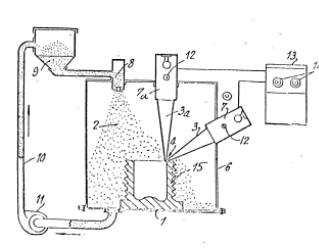
- Mengurangi waktu pengembangan produk.
- Meminimalisasi perubahan-perubahan mendasar.
- Meningkatkan efektifitas komunikasi di lingkungan industri atau dengan konsumen.
- Memperpanjang jangka pakai produk, misalnya dengan menambahkan beberapa komponen fitur atau mengurangi fitur-fitur yang tidak diperlukan dalam desain.

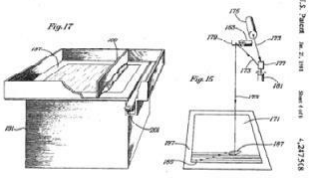
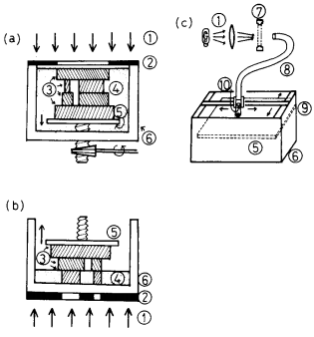
b) Kekurangan *Rapid Prototyping*:

- Memerlukan sumber daya yang cukup besar, terutama untuk proyek dengan skala besar.
- Resiko teknis yang tinggi.
- Sistem yang tidak bisa dimodularisasi.
- Memerlukan kerja keras dalam pengembangan.

Pada table 2.2 menunjukkan rangkuman perkembangan teknologi *rapid prototyping* beserta penemunya (Rinanto, A., Sutopo, W., 2017).

Tabel 2.2 Perkembangan Penelitian Metode *Rapid Prototyping*

Tahun	Penemu	Nama Metode	Prinsip	Ilustrasi
1951	Munz	<i>Photo-glyph recording</i>	Menggunakan teknik scanning pada sebuah obyek, dari hasil scanning permukaan obyek, layer demi layer polymer ditambahkan hingga terbentuk obyek yang sama.	
1968	Swainson	<i>Photocemia I SFF System</i>	Menggunakan 2 sinar laser sebagai pembentuk obyek berbahan <i>polymer</i> , dengan menggunakan integrasi komputer dan laser sebagai peminda/ <i>scan</i> .	
1971	Ciraud	<i>Powder SFF</i>	Menggunakan media berupa serbuk/ <i>powder</i> , kemudian dengan menggunakan laser memanaskan <i>powder</i> sesuai desain sehingga <i>powder</i> yang terkena panas	

Tahun	Penemu	Nama Metode	Prinsip	Ilustrasi
1979	Housholder	<i>Powder laser sintering</i>	Solidifikasi menggunakan proses sintering terhadap material yang berbentuk serbuk. Pembentukan dengan cara memanaskan bagian yang dipilih lapis demi lapis hingga terbentuk produk.	
1981	Kodama	<i>Stereolithography system</i>	Produk padat dibuat dengan cara menyinari polimer pengerasan foto cair dengan <i>ultraviolet</i> , dan menumpuk lapisan padat penampang melintang.	

2.4 3D Printer

3D *Printer* merupakan teknologi yang pertama kali dipublikasikan secara ilmiah oleh Kodama (1982) yang berdampak besar pada teknologi *rapid prototyping*, banyaknya penelitian mengenai metode atau teknik yang digunakan untuk membentuk model 3 dimensi dengan lebih cepat. Hampir semua teknologi yang digunakan pada mesin 3D *printer* saat ini menggunakan salah satu dari beberapa metode dari berbagai peneliti sebelumnya dan menggabungkan dengan teknologi zaman sekarang. Teknologi 3D *printing* merupakan proses pembuatan benda padat dengan 3D *Printer* dengan perintah berupa *file* program. Proses pencetakan objek tiga dimensi ini dikenal sebagai *additive Manufacturing* (Mahamood dkk., 2016).

Pada saat ini Sering kali dibutuhkan produk *single part* dimana hanya membutuhkan satu atau beberapa produk yang digunakan tanpa perlu produksi

masal dan bersifat *custom design*, produk yang bersifat *custom design* hanya dapat dibuat dengan mesin 3D *printer* (Andik Aris dkk., 2018).

3D *printer* merupakan konsep langsung dimana suatu objek dibuat yang diawali dari hal kosong dan menambah material satu lapisan tiap waktu hingga mendapat objek akhir. Ada banyak contohnya, salah satunya yang telah dilakukan bertahun-tahun pembuatan dinding batu bata (Billy, 2019). Menurut Billy, secara umum terdapat 3 kategori dalam 3D *printer* yaitu:

1. *Selective binding* membuat objek 3D *print* dari bubuk (metal dan gipsum) dengan mengaplikasikan zat penempel atau panas untuk menyatukan tiap lapisan tiap waktu. Lapisan pertama direkatkan ke dasar dan lapisan berikutnya ditambahkan diatas lapisan sebelumnya dan seterusnya hingga modelnya tersebut terbentuk.
2. *Selective solidification* membuat objek dari kumpulan cairan dengan mengirimkan energi secara selektif untuk memadatkan cairan tersebut lapisan per lapisan (di beberapa *printer* dasar *printer* bergerak keatas keluar dari cairan). Salah satu contohnya adalah *stereolithography* (SLA), yang menggunakan sinar UV untuk memadatkan cairan resin dengan laser atau terkadang *Digital Light Projection* (DLP) untuk memadatkan lapisan per lapisan.
3. *Selective deposition* membuat objek dengan meletakkan material dimana diinginkan. *Printer* ini bekerja dengan melelehkan filamen dan meletakkan lelehan tersebut untuk membuat objek secara presisi. Ada juga jenis 3D *printer* yang mengeluarkan cairan resin yang kemudian dipadatkan dengan sinar UV.

Selain adanya berbagai istilah tentang teknologi 3D *printing*, metode atau teknik yang digunakan juga cukup banyak. *American Society for Testing and Materials* (ASTM) telah menerbitkan standar klasifikasi proses *Additive Manufacturing* menjadi 7 kategori. Standar klasifikasi ini bertujuan untuk memperjelas dan membedakan antara satu jenis teknik pemrosesan dengan jenis lainnya. Berikut ketujuh kategori standar klasifikasi proses *Additive Manufacturing* yang diterbitkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) :

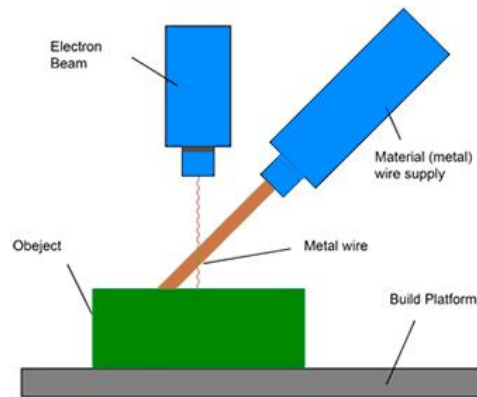
1. *Binder Jetting*

3D *Binder Jetting* atau *Powder bed* adalah *high-end* 3DP yang digunakan oleh industri dan kalangan profesional. Tekniknya adalah menyemprotkan lem ke permukaan tumpukan serbuk (*powder bed*). Wadah tumpukan serbuk sedikit demi sedikit turun kebawah, sehingga selapis demi selapis obyek dicetak dari bawah keatas. Selama proses cetak, tidak dapat melihat obyek karena diselubungi gundukan serbuk. Pasca cetak, setelah diangkat dari gundukan serbuk, obyek dibersihkan dengan mudah dari serbuk dengan *vacuum cleaner*, kemudian merendam/melapisi dengan cairan pengikat. Pada 3D *printer* Z650 tersedia *vacuum chamber* disamping mesin seperti pada gambar 2.3 (Deny W., 2014), sehingga mudah membersihkannya dan sisa bubuk tersebut dapat kembali digunakan. Kandungan serbuk ini mengandung selulosa, larutan penggumpal hingga pati kentang, dan terdapat kandungan lain yang tetap dirahasiakan oleh produsennya.

2. *Directed Energy Deposition*

Directed Energy Deposition (DED) adalah teknologi pencetakan 3D yang khusus digunakan untuk membuat model 3D dari logam dan paduan. Teknik ini dapat diterapkan untuk membuat bagian atau benda 3D dari polimer, gelas atau keramik tetapi tidak populer untuk itu. Teknik ini cukup umum digunakan untuk perbaikan model 3D yang ada menggunakan logam atau paduan. Teknik ini dapat digunakan untuk menambahkan ekstensi ke model logam yang ada.

Peralatan khas untuk pencetakan 3D *directed energy deposition* terdiri dari kepala untuk pasokan kawat material yang dapat bergerak di sepanjang beberapa sumbu dan *electron beam projector* atau *high power laser beam projector* yang melelehkan kawat pengisi dengan mengarahkan radiasi daya tinggi. Karena penggunaan sinar laser, *directed energy deposition* juga dikenal dengan nama *laser engineered net shaping*, *3D laser cladding* dan *directed light fabrication*. Penggunaan kawat logam atau bubuk sebagai suplai makanan, teknologi ini terkadang juga disebut dengan istilah *direct metal deposition* yang proses kerjanya ditunjukkan pada gambar 2.2 (Nikhil A., 2019).



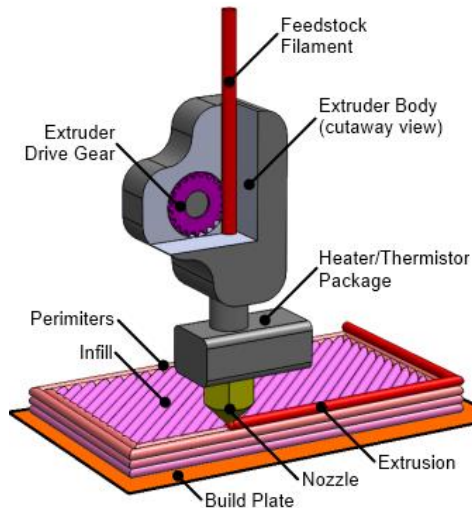
Gambar 2.2 Proses *Directed Energy Deposition*

3. *Material Extrusion*

Proses *Extrusion Material* adalah proses *Additive Manufacturing* yang membangun sebuah produk dari lapisan tipis filamen yang diekstrusi dari semi bahan yang meleleh seperti termoplastik. Dalam komersial sistem, perangkat lunak secara otomatis menghasilkan jalur alat untuk baik model dan dukungan yang diperlukan, berdasarkan kurva geometri dan parameter bangunan yang ditentukan. Isi interior berputar 90° diantara setiap lapisan. Kekosongan dan diskontinuitas telah diamati, setelahnya mengevaluasi spesimen uji yang dikembangkan untuk mengeksplorasi mekanis karakteristik.

- *Fused Filament Fabrication (FFF)*

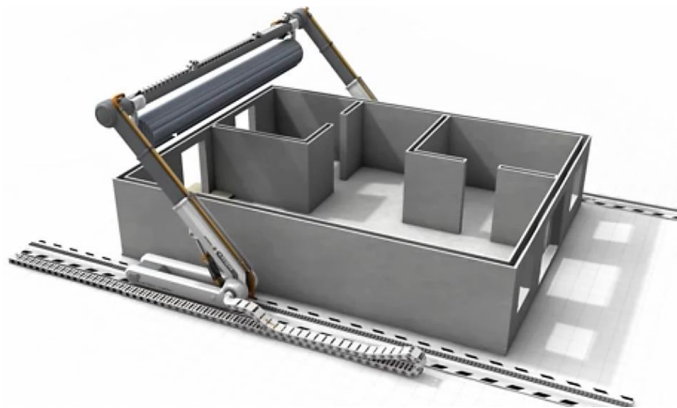
Menurut John Steuben (2015), teknologi ini menggunakan sistem gerak tiga sumbu untuk memindahkan ekstruder dalam koordinat x-y-z, sementara mengekstrusi sejumlah materi. Extruder menerima poly-bahan baku dalam bentuk filamen, biasanya berdiameter satu hingga tiga milimeter dan diambil dari gulungan. *Drive gear* menambah mengukur filamen, dan memaksanya melalui thermistor-regulated blok pemanas dan *nozzle*. Ini menghasilkan seuntai plastik cair yang disimpan dan kemudian menjadi dingin untuk membentuk bagian FFF. Endapan ini diproduksi berlapis-lapis di atas lapisan berikutnya. Jarak relatif antara *nozzle ekstruder* dan *build plate* disesuaikan dengan selisih tetap antara *layer*, dimana komponen-komponen 3D FFF ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Komponen FFF 3D printer

- *Contour Crafting*

Contour Crafting adalah teknologi baru dalam industri konstruksi berbasis pada pencetakan 3D yang menggunakan robotika untuk membangun struktur bangunan bentuk bebas dengan berulang kali meletakkan lapisan bahan seperti beton. Ini sebenarnya merupakan pendekatan untuk meningkatkan fabrikasi otomatis dari membangun komponen industri kecil hingga membangun bangunan. *Contour crafting* (CC) yang digunakan saat ini, bertujuan untuk menggambarkan langkah-langkah operasional untuk menciptakan seluruh bangunan dengan mesin meninjau literatur yang relevan, dalam hal ini ditunjukkan pada gambar 2.4 (Mohammad Reza Khorramshahi, 2017). Selain itu, ini akan mewakili keunggulan penggunaan CC dibandingkan dengan metode konstruksi tradisional, serta penerapannya dalam industri konstruksi.



Gambar 2.4 Pemasangan langit-langit dengan mesin CC

- *Fused Deposition Modeling (FDM)*

Berdasarkan standar klasifikasi teknik atau proses *Additive Manufacturing* yang diterbitkan oleh ASTM, *Fused Deposition Modeling (FDM)* termasuk dalam kategori *Material Extrusion*. Material yang digunakan berupa filament (berbahan polimer – termoplastik ataupun logam). Filament tersebut dilelehkan dengan cara dipanasi, lalu dikeluarkan secara paksa melalui *extruder* dengan diameter yang lebih kecil. Selanjutnya, *filament* tersebut dibentuk dan diendapkan selapis diatas *platform* atau meja kerja mesin 3D *printing* (Ikhwan, 2017).

4. *Material Jetting*

Material jetting menciptakan objek dengan metode yang mirip dengan *printer ink jet* dua dimensi. Material disemprotkan ke *platform build* menggunakan pendekatan berkelanjutan atau *Drop on Demand (DOD)*. Bahan disemprotkan ke permukaan bangunan atau *platform*, dimana bahan membeku dan model dibangun lapis demi lapis. Material diendapkan dari nosel yang bergerak secara horizontal melintasi *platform build*. Mesin bervariasi dalam kompleksitas dan dalam metode mereka mengendalikan pengendapan material. Lapisan material kemudian disembuhkan atau dikeraskan menggunakan sinar ultraviolet (UV). Karena bahan harus disimpan dalam tetes, jumlah bahan yang tersedia untuk digunakan terbatas. Polimer dan lilin adalah bahan yang cocok dan umum digunakan, karena sifatnya yang kental dan kemampuan untuk membentuk tetesan (Yee Ling Yap, 2017).

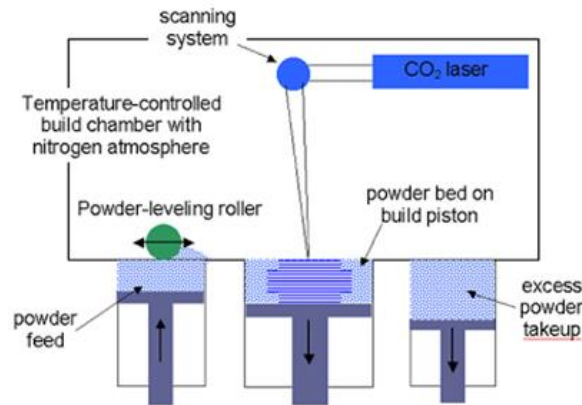
5. *Powder Bed Fusion*

Powder bed fusion (PBF) adalah subset dari *Additive Manufacturing (AM)* dimana sumber panas (misalnya, laser, kepala cetak termal) digunakan untuk mengkonsolidasikan bahan dalam bentuk bubuk untuk membentuk objek tiga dimensi (3D). Sumber panas diterapkan pada partikel yang terkandung dalam bedak bubuk, yang secara bertahap indeks turun karena setiap lapisan selesai dan bubuk baru tersebar di area *build*.

- *Selective Laser Sintering (SLS)*

Mirip dengan teknologi SLA, SLS menggunakan laser bertenaga tinggi untuk memadukan partikel kecil dari plastik, logam, keramik atau kaca.

Selama siklus membangun, platform yang membangun adalah reposisi, menurunkan oleh ketebalan lapisan tunggal. Proses berulang sampai model selesai. Skema kerja teknologi SLS ditunjukkan pada gambar 2.5 (Dicky S., 2019).



Gambar 2.5 Cara Kerja *Selective Laser Sintering* (SLS)

- *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS)

Direct metal laser sintering (DMLS) atau *selective laser melting* (SLM) mulai meningkat sebagai teknik ekonomis untuk pembuatan near-net-shape, bagian kompleks dari banyak bahan. Teknik ini menggunakan *file* CAD dari bagian tersebut diiris menjadi beberapa lapisan sebagai input data untuk membuat bagian. Kompleks bagian berbentuk diproduksi dengan memaparkan lapisan serbuk ke energi tinggi laser berdasarkan input data dari CAD. Karakteristik serbuk yang digunakan sebagai bahan baku awal memainkan peran penting dalam keberhasilan pembuatan suku cadang tanpa cacat oleh Teknik DMLS atau SLM. Bubuk dengan ukuran rata-rata kurang dari 50 μm menunjukkan karakteristik aliran yang baik digunakan sebagai bahan baku awal (Ravi K. Enneti dkk., 2017).

6. *Sheet Lamination*

Proses laminasi lembar meliputi *ultrasonic additive manufacturing* (UAM) dan *laminated object manufacturing* (LOM). Proses *ultrasonic additive manufacturing* menggunakan lembaran atau pita logam, yang diikat bersama menggunakan pengelasan ultrasonik. Proses ini memang membutuhkan mesin cnc tambahan dan menghilangkan logam tidak terikat, sering selama proses pengelasan. *Laminated object manufacturing* (LOM) menggunakan pendekatan lapisan demi lapisan yang serupa tetapi menggunakan kertas sebagai bahan dan

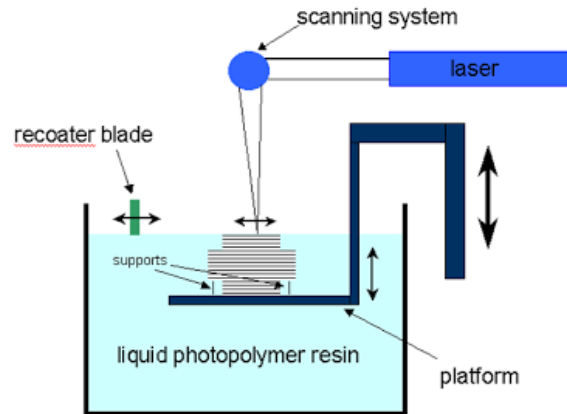
perekat alih-alih pengelasan. Proses LOM menggunakan metode penetasan silang selama proses pencetakan untuk memudahkan pembuatan postingan penghapusan. Benda yang dilaminasi sering digunakan untuk model estetika dan visual serta tidak cocok untuk penggunaan struktural. UAM menggunakan logam dan termasuk aluminium, tembaga, *stainless steel* dan titanium (*Ultrasonic Additive Manufacturing Overview*, 2014).

7. Vat Photopolymerization

Vat photopolymerization additive manufacturing menciptakan struktur kompleks dengan resolusi tinggi akurasi yang sangat baik untuk memenuhi permintaan. Namun, pemilihan material untuk *vat photopolymerization* terbatas. Banyak bahan tidak memiliki biokompatibilitas dan rangsangan-responsif properti untuk fungsi biomaterial di lingkungan fisiologis. Dalam hal ini, sebuah *vat photopolymerization additive manufacturing* memproses *photocured acid-labile crosslinker* dalam metakrilat mengakhiri jaringan polimer poli (etilen glikol) untuk menghasilkan struktur 3D yang biokompatibel dengan beragam arsitektur (Don Aduba dkk., 2019).

- *Stereo Lithography (SLA)*

Menggunakan sinar ultraviolet untuk membekukan permukaan *photopolymer* dengan petunjuk format STL. Proses berlanjut lapisan demi lapisan hingga part terbentuk (Andhy, 2017). Menurut Dicky S. (2019), SLA adalah teknologi *high end* yang memanfaatkan teknologi laser dengan material resin *photopolymer* (polimer yang berubah sifat bila terkena cahaya). Dalam teknik SLA, sebuah prototipe dibuat dengan cara menembakkan sinar laser ke permukaan sebuah wadah yang berisi cairan *photopolymer* (resin). Cairan ini akan langsung mengeras saat laser mengenai permukaannya. Setelah satu *layer* selesai dikerjakan, sebuah *platform* digerakkan turun beberapa milimeter, sebuah penyapu (*recoater blade*) membersihkan sisa-sisa resin di permukaan, dan layer berikutnya dikerjakan di atas *layer* yang telah diselesaikan. Skema kerja teknologi SLA ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Cara Kerja *Stereolithography* (SLA)

- *Continuous Liquid Interface Production* (CLIP)

Continuous liquid interface production (CLIP) adalah teknologi pengembangan 3D printer tetapi memanfaatkan proses fotokimia yang memungkinkan pencetakan cepat objek 3D, seperti benda injeksi dengan mekanik yang sangat baik. Sinar UV dikirim ke reservoir resin vulkanisir dengan *interface* cair (dikenal sebagai *dead zone*) yang mengandung 20-30 μm oksigen dalam *window*. Melalui *window* resin yang dapat disembuhkan UV reservoir melalui *window* permeabel oksigen, pengerasan resin diatas *dead zone* (Dilan Ezgi dan Krzysztof, 2018).

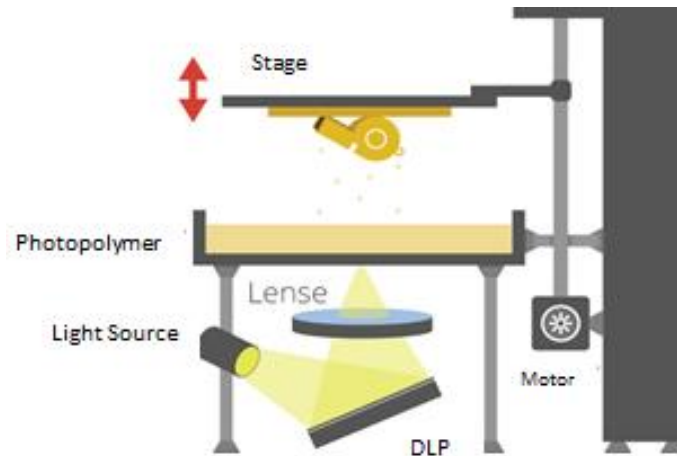
- *Digital Light Processing* (DLP)

Penelitian ini mengangkat salah satu dari proses 3D printer, yaitu teknik *Digital Light Processing* (DLP). Pada proses pembentukan resin teknik DLP ini menggunakan sinar UV sama halnya seperti teknik pada SLA.

2.5 *Digital Light Processing* 3D Printer

Menurut Shiwpursad dan Xue (2018), *Digital Light Processing* (DLP) adalah proses yang mirip dengan *Stereolithografi*. Perbedaan utama antara kedua metode ini adalah sumber cahaya. SLA menggunakan laser sedangkan DLP menggunakan sumber cahaya konvensional untuk membentuk resin polimer sensitif foto. Seperti *Stereolithografi*, DLP juga menghasilkan bagian dengan akurasi tinggi, resolusi tinggi dan presisi tinggi. Namun satu keuntungan yang dimiliki DLP dibandingkan SLA adalah membutuhkan resin dangkal untuk

memfasilitasi proses. Ini umumnya menghasilkan lebih sedikit pemborosan dan biaya operasional yang lebih rendah. DLP juga bisa menjadi proses yang lebih cepat daripada SLA karena sumber cahaya diterapkan ke seluruh permukaan tong resin polimer pada sekali lintasan.



Gambar 2.7 DLP Process

Printer berbasis DLP menggunakan plastik resin fotosensitif yang cocok untuk membuat prototipe nonfungsional, karya seni yang sangat terperinci, pola cetakan injeksi, dan lain-lain. Bagian yang dicetak dengan metode ini memiliki sifat kekuatan yang baik. Gambar 2.8 menunjukkan beberapa prototipe yang telah dicetak menggunakan DLP (Shiwpursad dan Xue, 2018).



Gambar 2.8 Hasil Cetak DLP

2.6 Parameter Proses

Terdapat beberapa parameter yang harus diatur ketika akan melakukan pencetakan dengan menggunakan DLP 3D *printer*. Parameter terdiri dari *layer thickness*, *bottom exposure*, *exposure time*, *bottom layer*, dan *build direction*. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah *layer thickness* dan *exposure time*.

1. *Layer Thickness*

Ketebalan lapisan (*Layer Thickness*) dalam pencetakan 3D adalah ukuran ketinggian lapisan setiap penambahan bahan berturut-turut dalam pembuatan aditif atau proses pencetakan 3D dimana lapisan ditumpuk. Ini adalah salah satu karakteristik teknis penting dari setiap *printer* 3D, ketinggian lapisan pada dasarnya adalah resolusi vertikal sumbu z (Sandy. 2019).

Secara umum, ketebalan lapisan minimum *printer* 3D adalah 16 μm ketinggian lapisan dan maks adalah 150 μm ketinggian lapisan. Berikut ini adalah tabel ringkasan ketebalan lapisan maks dan min untuk berbagai *printer* 3D (Sculpteo, 2019).

Tabel 2.3 Ketebalan Lapisan

Printer / Teknologi	Ketebalan lapisan
Pemodelan deposisi berpadu profesional untuk produksi (Stratasys, dll.)	0,17 mm hingga 0,33 mm (0,007 "hingga 0,013")
Pemodelan deposisi menyatu kantor atau fablab (Makerbot, Ultimaker, dll.)	0,10 mm hingga 0,33 mm (0,004 "hingga 0,013")
Sintering laser selektif (SLS) - (EOS, Sistem 3D)	0,060mm hingga 0,150 mm
Deposit resin (Stratasys Polyjet)	0,016mm hingga 0,028 mm
Pengikatan materi (Sistem 3D ZPrinter)	0,1 mm
Stereolithography, DLP, pengerasan resin oleh cahaya atau laser	0,05 mm hingga 0,15 mm
Deposisi lilin oleh kepala piezoelektrik (SolidScape)	0,005 mm hingga 0,10 mm

2. *Exposure Time*

Exposure time adalah waktu pencahayaan atau pemaparan satu lapisan dari objek yang akan dicetak. Istilah ini berlaku untuk *printer* 3D berbasis DLP dan LED / LCD, karena dengan peralatan seperti itu seluruh lapisan dapat terpapar secara merata. Paparan yang salah adalah salah satu alasan utama mengapa

cetakan resin gagal. Terlepas dari alasan seperti hilangnya detail rumit dan akurasi dimensi, pengaturan eksposur yang salah akan menghasilkan masalah berbeda lainnya.

2.7 *Liquid Photopolymer Resin*

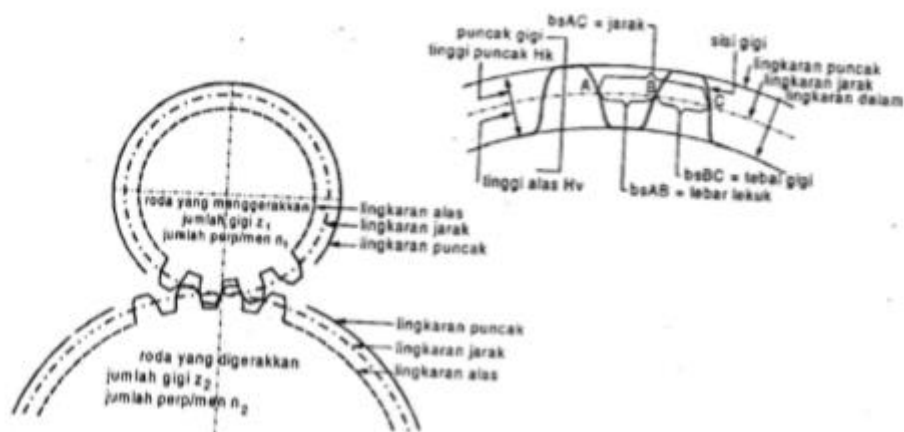
Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah fluida resin. Resin adalah *eksudat* (getah) yang dikeluarkan oleh banyak jenis tetumbuhan, terutama oleh jenis-jenis pohon runjung (*konifer*). Getah ini biasanya membeku, lambat atau segera, dan membentuk massa yang keras dan, sedikit banyak, transparan. Resin dipakai orang terutama sebagai bahan pernis, perekat, pelapis makanan (agar mengilat), bahan campuran dupa dan parfum, serta sebagai sumber bahan mentah bagi bahan-bahan organik olahan. Dalam penelitian ini cairan resin yang digunakan yaitu resin merk *e-sun*. Gambar resin merk *e-sun* DLP 3D Printer seperti pada Gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9 Resin *e-sun*

2.8 Roda Gigi (*Gear*)

Roda gigi atau *gear* adalah roda yang berguna untuk mentransmisikan daya besar atau putaran yang cepat. Rodanya dibuat bergerigi dan berbentuk silinder atau kerucut yang saling bersinggungan pada kelilingnya agar jika salah satu diputar maka yang lain akan ikut berputar (Foley, Vernard et al,1982). Gambar 2.10 menunjukkan nama-nama dan istilah dalam *gear* (Hantoro & Tiwan, 2006).



Gambar 2.10 Nama-nama dan istilah dalam *gear*

- Lingkaran puncak, adalah lingkaran yang melalui puncak roda gigi. Diameter lingkaran puncak ini dinyatakan dengan D_k .
- Lingkaran alas, adalah lingkaran pada alas roda gigi. Diameter dari lingkaran ini dinyatakan dengan D_v .
- Lingkaran jarak, dua roda yang kerja sama dinamakan lingkaran-lingkaran khayal yang bersinggungan dengan kecepatan keliling yang sama. Diameter lingkaran jarak dinyatakan dengan huruf D . Garis sumbu melalui titik-titik tengah dari roda disebut juga pusat lingkaran.
- Jumlah gigi dari suatu roda gigi dinyatakan dengan huruf z , jumlah putaran tiap-tiap menit dengan n .
- Angka transmisi i adalah perbandingan jumlah putaran roda gigi yang berputar dan yang diputar.

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (2.1)$$

- Jarak antara t adalah jarak dua gigi berturut-turut, diukur pada lingkaran jarak. Jadi, jarak antara ialah busur A-C. Jarak antara adalah juga sama dengan lebar lekuk+ tebal gigi, diukur pada lingkaran jarak. Lebar lekuk ialah busur A-B, tebal gigi ialah busur B-C.
- Jari kutub m adalah bilangan yang diperbanyak dengan π menghasilkan jarak antara gigi-gigi.

$$t = m \times \pi \quad (2.2)$$

Banyaknya gigi-gigi kali jarak antara adalah sama dengan keliling lingkaran jarak :

$$Z \times t = \pi \times D \quad (2.3)$$

Maka :

$$Z \times m = D \quad (2.4)$$

h) Tinggi puncak H_k , adalah jarak dari lingkaran puncak sampai lingkaran jarak.

$$H_k = m \quad (2.5)$$

i) Tinggi alas H_v , adalah jarak dari lingkaran – jarak sampai lingkaran – alas.

j) Puncak gigi ialah bagian gigi diatas lingkaran jarak.

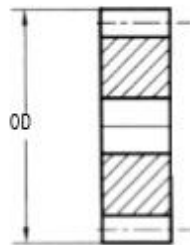
k) Alas gigi ialah bagian gigi antara lingkaran jarak dan lingkaran alas.

l) Profil gigi ialah bentuk penampang lintang tegak lurus dari gigi (Hantoro dan Tiwan, 2006).

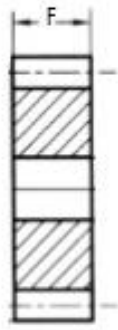
2.9 Pengukuran Dimensi

Ketelitian dimensi suatu komponen permesinan diuji secara umum sesuai dengan prinsip-prinsip umum yang dikembangkan oleh *Schelesinger* yang mendirikan sistem pengujian mesin perkakas dimana sekarang banyak dimasukkan didalam ISO.

Pengujian ketelitian dimensi diameter dan tebal *gear* menurut standar ANSI 1-125-120802, prinsip ukuran dimensi meliputi diameter kepala, diameter tusuk, lebar / tebal roda gigi, dan diameter dalam *gear*. Adapun prinsip pengukuran diambil dari standar ANSI 1-125-120802 yaitu, Diameter kepala dan lebar *gear* seperti pada Gambar 2.11 da Gambar 2.12.

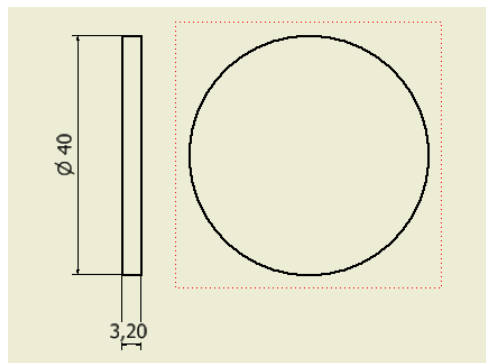


Gambar 2.11 Diameter Kepala *Gear*



Gambar 2.12 Lebar *Gear*

Sementara itu, untuk mempermudah penelitian maka proses pencetakan sampel menggunakan DLP 3D *printer* mengacu kepada pembuatan spesimen sesuai standar ASTM D955, ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Ukuran Spesimen ASTM D955

Semakin canggihnya teknologi sekarang pengukuran diameter kepala dan lebar *gear* suatu komponen permesinan dapat dilakukan dengan beragam cara, salah satunya :

1. Pengukuran dengan mikrometer sekrup

Alat ukur merupakan penentu utama kualitas geometris maupun dimensi produk yang dihasilkan, karena langsung berhubungan dengan proses, sehingga perlu dipelihara untuk mendapatkan umur (*life time*) yang panjang. Mikrometer sekrup memiliki skala terkecil, yaitu 0,01 mm yang artinya nilai antara dua gores yang berdekatan adalah 0,01 mm. Sehingga dapat dikatakan bahwa mikrometer sekrup dapat mengukur panjang suatu benda dengan ketelitian hingga 0,01 mm. Pelaporan hasil pengukuran tersebut dinyatakan sebagai $x = xx$, dengan x adalah

nilai pendekatan terhadap nilai kebenaran x_0 sedangkan x adalah ketidakpastian mutlaknya.

Pada penelitian ini penulis menggunakan dua tipe alat ukur mikrometer sekrup yang digunakan untuk mengukur diameter dan tebal spesimen. Untuk mengukur diameter spesimen penulis menggunakan *outside micrometer* tipe 25-50 mm dan untuk mengukur ketebalan spesimen penulis menggunakan *outside micrometer* tipe 0-25 mm seperti pada Gambar 2.14 dan Gambar 2.15 di bawah ini.



Gambar 2.14 Mikrometer Sekrup 25-50mm

Spesifikasi Alat :	Merk	: Insize
	Type	: 25-50mm
	Serial No	: 190694623
	Ketelitian	: 0,01 mm



Gambar 2.15 Mikrometer Sekrup 0-25mm

Spesifikasi Alat : Merk : Insize
 Type : 0-25mm
 Serial No : 170970707
 Ketelitian : 0,01 mm

2.10 Desain Eksperimen

Desain eksperimen dapat diartikan sebagai rancangan percobaan yang dilakukan melalui perubahan-perubahan terencana terhadap variabel input suatu proses atau system sehingga dapat ditelusuri penyebab dan faktor-faktor sehingga membawa perubahan pada output sebagai respon dari eksperimen yang telah dilakukan (Johan Trygg dan Svante Wold, 2002). Pada umumnya eksperimen digunakan untuk mempelajari performance proses atau sistem yang biasanya divisualisasikan seperti kombinasi mesin, metode, orang dan sumber daya lainnya. Karena itu perlu digunakan suatu pendekatan statistik yang diaplikasikan pada proses eksperimen. Desain eksperimen bertujuan untuk memperoleh atau mengumpulkan informasi/data sebanyak-banyaknya yang diperlukan dan berguna dalam melakukan penelitian persoalan yang akan dibahas (Dicky Seprianto, Romi Wilza, Iskandar, 2017). Penelitian hendaknya dilakukan dengan efisien mengingat waktu, biaya, dan tenaga yang digunakan.

2.11 Metode Analisis

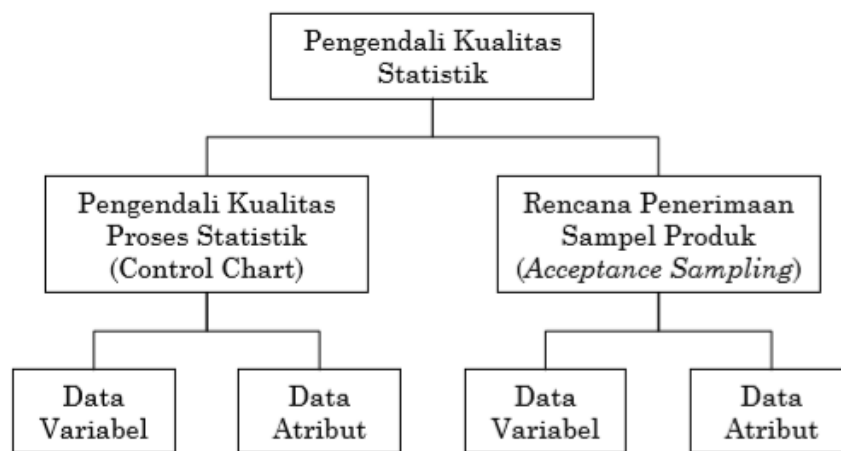
Dalam proses analisa data, terdapat dua tahapan proses pengolahan data yaitu dengan menggunakan metode *statistical quality control* (SQC) yang bertujuan untuk mengetahui penyimpangan dari data yang telah dikumpulkan dan metode *analysis of variance* ANOVA yang bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variable terhadap ukuran dimensi specimen uji dalam proses pencetakan 3D printer DLP .

2.11.1 *Statitistical Quality Control* (SQC)

Penulis menggunakan metode kontrol kualitas statistik atau yang sering disebut *statistical quality control* (SQC) untuk menemukan kualitas hasil produk dari penelitian. SQC merupakan teknik pengendalian mutu dengan dasar teori statistik yang diperkenalkan oleh Walter A. Shewhart dari *Bell Telephone*

Laboratories Amerika pada tanggal 16 Mei 1924. Sehingga teknik yang sering digunakan dalam pengontrolan kualitas disebut Diagram Kontrol Shewhart. Bentuk diagram kontrol ini terdiri dari tiga garis mendatar yaitu batas atas, rata-rata sebagai sentral dan batas bawah (Sudjana, 1986).

Statistic Qaulity Control (SQC) atau pengendalian kualitas statistik merupakan teknik penyelesaian masalah yang digunakan untuk memonitor, mengendalikan, menganalisis, mengelola dan memperbaiki produk dan proses menggunakan metode-metode statistik. Pengendalian kualitas statistik (*Statistic Quality Control*) sering disebut sebagai pengendalian proses statistik (*Statistical Process Control/SPC*). Pengendalian kualitas statistik dan pengendalian proses statistik memang merupakan dua istilah yang saling dipertukarkan, yang apabila dilakukan bersama-sama maka pengguna akan melihat gambaran kinerja proses masa kini dan masa mendatang (Cawley dan Harrold, 1999). Pengendalian kualitas statistik (*statistical quality control*) secara garis besar digolongkan menjadi dua ditunjukkan pada Gambar 2.16, sebagai berikut:



Gambar 2.16 Penggolongan Pengendalian Kualitas Statistik

Menurut Gryna (2001), terdapat beberapa langkah dalam menyusun peta pengendali proses atau control chart, yaitu:

1. Memilih karakteristik yang akan direncanakan.
2. Memilih jenis peta pengendali.
3. Menentukan garis pusat (*central line*) yang merupakan rata-rata masa lalu atau rata-rata yang dikehendaki.

4. Pemilihan sub kelompok.
5. Penyediaan sistem pengumpulan data.
6. Penghitungan batas pengendali dan penyediaan instruksi khusus dalam interpretasi terhadap hasil dan tindakan para karyawan.
7. Penempatan data dan membuat interpretasi terhadap hasilnya.

Untuk menganalisa hasil pengukuran dimensi pada spesimen diperlukan perhitungan penyimpangan rata-rata guna mendapatkan simpangan baku sebagai berikut :

- a) Menghitung jumlah hasil pengukuran diameter

$$\sum d = d_1 + d_2 + d_3 \dots d_n \quad (2.6)$$

- b) Menghitung jumlah hasil pengukuran tebal

$$\sum t = t_1 + t_2 + t_3 \dots t_n \quad (2.7)$$

- c) Menghitung rata-rata (μ) hasil pengukuran diameter

$$\mu_d = \sum d : n \quad (2.8)$$

- d) Menghitung rata-rata (μ) hasil pengukuran tebal

$$\mu_t = \sum t : n \quad (2.9)$$

dengan n, jumlah data

- e) Mempermudah perhitungan simpangan baku diameter spesimen diperlukan table dengan rumus ($X_i - X$) diganti dengan

$$d_i - \mu_d \quad (2.10)$$

- f) Mempermudah perhitungan simpangan baku tebal spesimen diperlukan table dengan rumus ($X_i - X$) diganti dengan

$$t_i - \mu_t \quad (2.11)$$

- g) Menghitung standar deviasi (σ)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2.12)$$

- h) Menghitung batas kontrol diameter (d)

- Rata-rata sentral (μ_d)
- Batas Kontrol Atas

$$(BKA) = \mu_d + \frac{3,10 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.13)$$

- Batas Peringatan Kontrol Atas

$$(BPKA) = \mu_d + \frac{1,96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.14)$$

- Batas Peringatan Kontrol Bawah

$$(BPKB) = \mu_d - \frac{1,96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.15)$$

- Batas Kontrol Bawah

$$(BKB) = \mu_d - \frac{3,10 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.16)$$

- i) Menghitung batas kontrol tebal (t)

- Rata-rata sentral (μ_t)
- Batas Kontrol Atas

$$(BKA) = \mu_t + \frac{3,10 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.17)$$

- Batas Peringatan Kontrol Atas

$$(BPKA) = \mu_t + \frac{1,96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.18)$$

- Batas Peringatan Kontrol Bawah

$$(BPKB) = \mu_t - \frac{1,96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.19)$$

- Batas Kontrol Bawah

$$(BKB) = \mu_t - \frac{3,10 \cdot \sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.20)$$

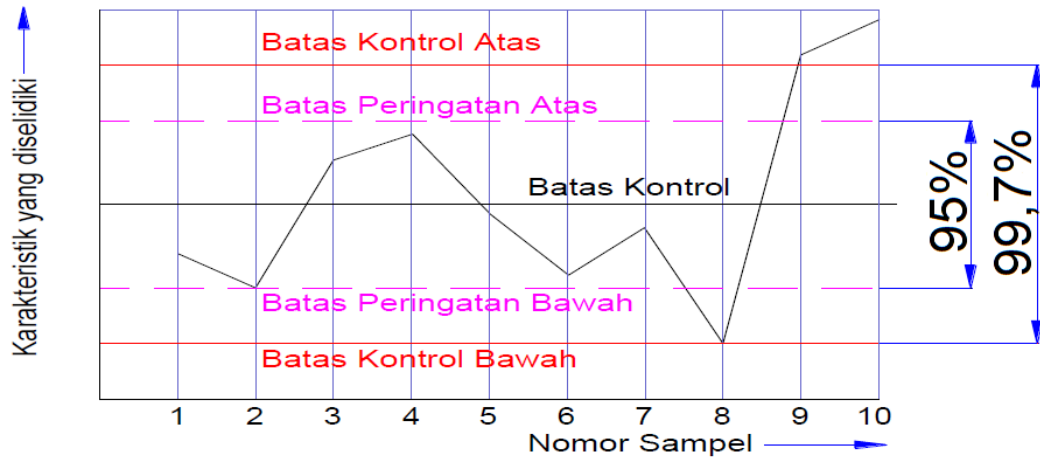
Seperti pada persamaan 2.13 sampai 2.20 yang bertujuan untuk mengetahui proses produksi berjalan normal atau terjadinya penyimpangan dengan mengacu pada standar DIN ISO 2859-1 yang ditunjukkan pada Tabel 2.4. berikut ini.

Tabel 2.4 Rumus Batas Kontrol

Batas selang Keyakinan rata-rata tiap sampel	TINGKAT KEYAKINAN	
	95,45 %	99,73 %
Batas Kontrol Bawah (BKB)	$Ra - \frac{1.96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$	$Ra - \frac{3.10 \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$
Rata-rata sebagai sentral	Ra	Ra
Batas Kontrol Atas (BKA)	$Ra + \frac{1.96 \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$	$Ra + \frac{3.10 \cdot \sigma}{\sqrt{n}}$

(Sumber : Ginting, 2017)

Setelah menghitung batas kontrol pada Tabel 2.3, dilanjutkan dengan membuat grafik batas kontrol seperti Gambar 2.16 dibawah ini.



Gambar 2.17 Grafik Batas Kontrol
(Sumber: Ginting, 2017)

2.11.2 Analysis of Variance (Two Way-ANOVA)

Setelah mendapatkan hasil penyimpangan dari data yang telah dikumpulkan dengan dijadikan grafik seperti pada Gambar 2.16, tahap selanjutnya yaitu mencari ada atau tidaknya pengaruh parameter proses terhadap ukuran dimensi hasil benda kerja yang dicetak dengan 3D printer DLP dengan menggunakan metode *analysis of variance* (ANOVA).

Menurut Dicky Seprianto dkk, ANOVA pada dasarnya bertujuan untuk menguji hipotesa (H_0) bahwa rata-rata dari dua atau lebih sebuah populasi adalah sama. Konsep analisis variansi didasarkan pada konsep distribusi F dan dapat diaplikasikan untuk analisis hubungan antara berbagai variabel yang diamati. Dalam perhitungan statistik, analisis variansi sangat dipengaruhi asumsi-asumsi yang digunakan seperti distribusi normal, identik (homogenitas variansi), independen (kebebasan dari kesalahan) dan linieritas model. Asumsi kenormalan distribusi memberi penjelasan terhadap karakteristik data dari tiap kelompok.

Asumsi tersebut dapat dilihat dengan membuat grafik berdasarkan residual dari selisih data hasil pengujian aktual dan data hasil prediksi, ditunjukkan pada persamaan 2.17 (DC Montgomery, 2012).

$$Residual = actual\ value - predicted\ value \quad (2.17)$$

Two-Way ANOVA (analysis of variance) pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh perbedaan beberapa variabel bebas (faktor) dengan variabel terikat (respon) dan masing-masing variabel memiliki dua taraf (*level*) dengan bantuan *software design expert* dalam proses pengolahan data. Untuk mengetahui pengaruh variabel terhadap respon, maka pada ANOVA perlu dihitung jumlah-jumlah kuadrat. Adapun langkah-langkah menghitung dengan *Two-Way ANOVA*, yaitu: (Sudjana, 1994 dan Philip J. Ross, 1989)

- a) Asumsikan bahwa data masing-masing dipilih secara acak.
- b) Asumsikan bahwa data masing-masing berdistribusi normal.
- c) Menentukan hipotesis:
 - $H_0 : b_1 = b_2 = b_3 = \dots = \mu_a$ (tidak ada efek terhadap perlakuan)
 - $H_1 : b_1 \neq b_j$ (terdapat efek terhadap perlakuan)
- d) Menentukan jumlah kuadrat total:

$$SS_T = [\sum_{i=1}^N y_i^2] - \frac{T^2}{N} \quad (2.18)$$

- e) Menentukan jumlah kuadrat faktor A:

$$SS_A = [\sum_{i=1}^{k_A} (A_i^2)] - \frac{T^2}{N} \quad (2.19)$$

- f) Menentukan Jumlah kuadrat faktor B:

$$SS_B = [\sum_{i=1}^{k_B} (B_i^2)] - \frac{T^2}{N} \quad (2.20)$$

- g) Menentukan jumlah kuadrat interaksi faktor A dan B:

$$SS_{AxB} = \left[\sum_{i=1}^b \left(\frac{(AxB)_i^2}{n_{AxB_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} - SS_A - SS_B \quad (2.21)$$

- h) Menentukan jumlah kuadrat kemungkinan kesalahan (*error*):

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AxB} \quad (2.22)$$

- i) Menentukan derajat kebebasan total:

$$v_T = N - 1 \quad (2.23)$$

- j) Menentukan derajat kebebasan faktor (*main Effect*) A:

$$v_A = k_A - 1 \quad (2.24)$$

- k) Menentukan derajat kebebasan faktor (*main Effect*) B

$$v_B = k_B - 1 \quad (2.25)$$

- l) Menentukan derajat kebebasan faktor interaksi A dan B:

$$v_{A \times B} = (v_A)(v_B) \quad (2.26)$$

- m) Menentukan derajat kebebasan kemungkinan kesalahan (*pure error*):

$$v_e = v_T - v_A - v_B - v_{A \times B} \quad (2.27)$$

- n) Melengkapi tabel hasil pengukuran dimensi untuk *analysis of variance* dari data yang didapat.
- o) Menentukan taraf signifikan (α).
- p) Jika $F_{\text{HITUNG}} (F_0) < F_{\text{TABEL}}$, maka hipotesis (H_0) dapat diterima.
- q) Menentukan persentase kontribusi faktor terhadap respon:

$$\% \text{ Kontribusi faktor} = \frac{(SS - SS_e)}{SS_T} \quad (2.28)$$

Tabel 2.5 ANOVA Table for Select Factorial Model

Source	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F ₀
Overall model	SS_{model}	(k_A.k_B)-1	SS_{model}/(k_A.k_B)-1	MS_{model}/MS_E
Main Effect of A	SS_A	v_A	SS_A / v_A	MS_A/MS_E
Main Effect of B	SS_B	v_B	SS_B / v_B	MS_B/MS_E
A x B interaction	SS_{AB}	v_{AxB}	SS_{AB}/ v_{AxB}	MS_{AB}/MS_E
Error	SS_E	v_e	SS_E / v_e	
Total	SS_{Total}	v_T		

2.11.3 Model Desain Eksperimen Faktorial

Sesuai dengan prinsip dasar desain eksperimen diberlakukan desain acak sempurna (randomisasi) yaitu desain dimana perlakuan dikenakan sepenuhnya secara acak kepada unit-unit eksperimen dan sebaliknya (Seprianto,2010). Persamaan model yang digunakan untuk 2 faktor dan 3 *level* yaitu berupa model linier seperti pada persamaan 2.29.

- a) Persamaan Model

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_1x_2 + b_2x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_1 + b_{12}x_2x_1 + b_{12}x_1x_2 + b_{12}x_2x_2 \quad (2.29)$$

Dimana ;

Y = variabel respon yang akan dianalisa

b_0 = rata-rata umum atau rata-rata sebenarnya

b_1 = efek dari faktor x_1

b_2 = efek dari faktor x_2

b_{12} = efek interaksi dari faktor x_1 dan faktor x_2

- b) Untuk mendapatkan persamaan model dalam bentuk aktual, kode pada persamaan 2.29, diganti dengan :

$$x_{coded} = \frac{x_{actual} - \bar{x}}{(x_{Hi} - x_{Low})/2} \quad (2.30)$$

Untuk mengetahui *main and interaction effect* dari 2^3 full factorial design dapat dijelaskan pada tabel 2.6 dan persamaan 2.31 sampai dengan 2.35 :

Tabel 2.6 *Main and interaction effects 2^3 full factorial design*

x_1 (main)	x_2 (main)	$x_1 x_2$ (interaction)	y (response)
-	-	+	y_1
+	-	-	y_2
-	+	-	y_3
+	+	+	y_4
-	+	-	y_5
+	-	-	y_6
-	-	+	y_7
+	-	-	y_8
-	+	-	y_9

- c) *Average Level*

$$b_0 = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9}{9} \quad (2.31)$$

- d) *Main Effect*

$$\text{Effect of } x_1 = \frac{y_8 + y_6 + y_4 + y_2 - y_9 - y_7 - y_5 - y_3 - y_1}{2} \quad (2.32)$$

$$\text{Effect of } x_2 = \frac{y_9 + y_5 + y_4 + y_3 - y_8 - y_7 - y_6 - y_2 - y_1}{2}$$

e) *Interaction Effect*

$$\text{Effect of } x_1 \text{ at high } x_2 = \frac{y_9 - y_8}{2} \quad (2.33)$$

$$\text{Effect of } x_1 \text{ at high } x_2 = \frac{y_9 - y_8}{2}$$

f) *Effect of x_1 x_2 = average difference*

$$\frac{(y_9 - y_8 - y_7 - y_6 - y_5 - y_4 - y_3 - y_2 - y_1)}{2} \quad (2.34)$$

g) *Coefficient*

$$b_1 = \frac{\text{effect of } x_1}{2} \quad (2.35)$$

$$b_2 = \frac{\text{effect of } x_2}{2}$$