

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Dalam melakukan penelitian, observasi sangat dibutuhkan sebagai referensi untuk mencari sumber yang berkaitan dengan judul yang diambil. Berikut adalah beberapa referensi yang diambil sebagai sumber referensi dalam penelitian ini.

Tabel 2.1 Sumber Referensi

No	Judul-Penulis-Tahun	Bahan (Komposit)	Metode, Hasil dan Pembahasan
1	<p>Judul: Optimasi Parameter Proses 3D Printing FDM Terhadap Akurasi Dimensi Menggunakan Filament Eflex</p> <p>Penulis: Pristiansyah, Hasdiansyah, dan Sugiyarto</p> <p>Tahun: 2019</p>	<i>Flexible Filament</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode penelitian Taguchi L₂₇ • Hasil penelitian optimasi parameter proses pada mesin 3D Printing FDM model Prusa adalah nilai parameter proses optimal untuk mendapatkan keakuratan dimensi X adalah flowrate 110 %, layer thickness 0,10 mm, nozzle temperature 210 °C, print speed 40 mm/s, overlap 75 %, dan fan speed 50%. Untuk nilai parameter proses dimensi Y adalah flowrate 120 %, layer thickness 0,20 mm, nozzle temperature 230 °C, print speed 30 mm/s, overlap 75 %, dan fan speed 100%. 3, dan untuk nilai parameter proses dimensi Z adalah flowrate 120 %, layer thickness 0,30 mm, nozzle temperature 210 °C, print speed 30 mm/s, overlap 50 %, dan fan speed 100%.
2	<p>Judul: <i>Shrinkage compensation of holes via shrinkage of interior structure in FDM process</i></p> <p>Penulis: Ulas Yaman</p> <p>Tahun: 2017</p>	<i>Polylactic Acid (PLA) Filament</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode penelitian pengukuran koordinat dan analisis numerik • <i>Shrinkage</i> konvensional hanya mengukur skala input geometri sebelum fabrikasi sesuai dengan model yang dikembangkan. Setelah pembuatan, model CAD berskala ini akan menyusut dan akurasi dimensionalnya akan ditingkatkan sehubungan dengan pencetakan fabrikasi konvensional. Berbeda dengan jenis metodologi dalam literature ini, struktur interior

No	Judul-Penulis-Tahun	Bahan (Komposit)	Metode, Hasil dan Pembahasan
			<p>di gunakan untuk meningkatkan akurasi dimensi dalam studi ini. Lubang bundar tunggal dipertimbangkan dan kesalahan dimensionalnya berkurang 80%.</p>
3	<p>Judul: Optimasi Parameter Pada Proses Pembuatan Objek 3D Printing Dengan Teknologi FDM Terhadap Akurasi Geometri Penulis: Dicky Seprianto, Romi Wilza & Iskandar Tahun: 2017</p>	<p><i>Polysmooth Filament</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode penelitian ANOVA • Dari persamaan regresi linier terhadap respon length, width dan height yang dihasilkan menggunakan ANOVA dan telah dilakukan uji konfirmasi dapat ditentukan kondisi optimal kombinasi faktor yaitu layer height=0.14 mm, print speed=51.73 mm/s, perimeter shells=3 mm dan waktu polishing=20 menit. Dengan perkembangan bahan baku material maju untuk pembuatan objek 3D printing, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pengaruh material ditinjau dari akurasi geometri maupun mechanical properties yang sesuai dengan aplikasi.
4	<p>Judul: Optimasi Parameter 3D Printing Terhadap Keakuratan Dimensi dan Kekasaran Permukaan Produk Menggunakan Metode Taguchi Grey Relational Analysis Penulis: Andik Aris Setiawan, Bayu Wiro Karuniawan, Nurvita Arumsari Tahun: 2018</p>	<p><i>Polylactic Acid (PLA) Filament</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode penelitian desain eksperimen Taguchi dan <i>Grey Relational Analysis</i> • Nilai parameter terbaik yang didapatkan yaitu print speed 20 mm/s, printing temperature 210°C, dan layer height 0,1 mm. Nilai kekasaran yang didapat adalah 8,55 µm dari eksperimen konfirmasi percobaan pertama sisi ke 4. Dan rata-rata kekasaran yang didapat pada setiap sisinya adalah 11 µm. Nilai terakurat didapat adalah 29,945 mm dari eksperimen konfirmasi pertama, dikatakan akurat karena nilainya mendekati angka 30 mm. dengan keakuratan 99.81% atau bisa dikatan hampir semua percobaan memiliki keakuratan 99%.

No	Judul-Penulis-Tahun	Bahan (Komposit)	Metode, Hasil dan Pembahasan
5	<p>Judul: Pengaruh Parameter Proses 3D Printing Tipe FDM (Fused Deposition Modeling) Terhadap Kualitas Hasil Produk</p> <p>Penulis: Herda Agus Pamasaria, Herianto & Tri Hananto Saputra</p> <p>Tahun: 2019</p>	<i>Polylactic Acid (PLA) Filament</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode penelitian komparatif • Perubahan parameter suhu nozzle dan kecepatan cetak cukup berpengaruh pada dimensi produk dan kekasaran permukaan produk, sedangkan penyimpangan geometri tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan suhu nozzle dan kecepatan cetak yang terjadi. Parameter yang menghasilkan kualitas produk paling baik dilakukan pada suhu nozzle 215 °C dan kecepatan 50 mm/s
6	<p>Judul: Pengaruh Parameter Proses Ektrusi 3D Printer Terhadap Sifat Mekanis Cetak Komponen Berbahan Filament PLA (<i>Poly Lactide Acid</i>)</p> <p>Penulis: Agris Setiawan</p> <p>Tahun: 2017</p>	<i>Polylactic Acid (PLA) Filament</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Metode design <i>Spesimen Tensile Test</i> ASTM D 638 tipe IV • Parameter proses mesin 3D Printer pada setting A yaitu Print speed 80 mm/s, layer height 0,15 mm dan temperatur ekstruder 220°C menghasilkan angka uji tarik spesimen tertinggi. Nilai rerata yang tertinggi didapat pada rerata spesimen B dengan nilai sebesar 27,96 MPa. Spesimen C mempunyai nilai rerata kekuatan tarik (σ) sebesar 27,81 MPa. Nilai rerata persentase <i>Shrinkage</i> (%), Spesimen yang mengalami penyusutan paling besar adalah Spesimen B sedangkan spesimen A sebesar 0,6% kemudian spesimen C sebesar 0,3%.

2.2 Rapid Prototyping

Menurut Rinanto dan Sutopo (2017), *Rapid Prototyping* (RP) 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 dan CNC). 3D Printing atau *Additive Manufacturing* adalah istilah umum bagi teknologi yang didasarkan pada representasi geometri

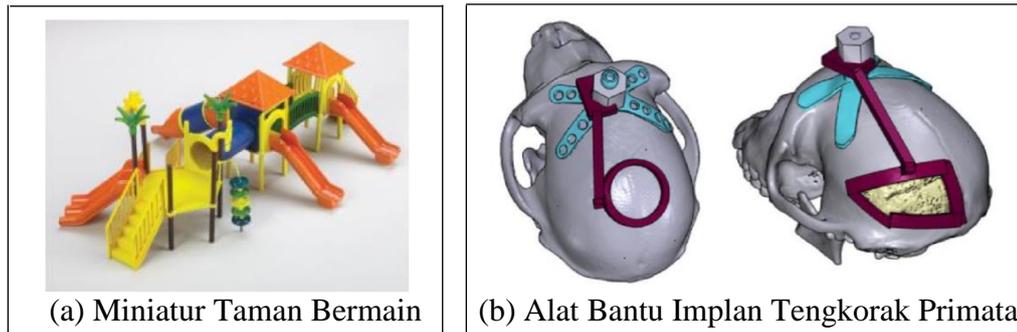
untuk menciptakan benda-benda fisik dengan metode penambahan material secara berturut-turut pada proses pembuatannya.

Dalam perkembangannya, dikenal pula istilah *Rapid Tooling* dan *Rapid Manufacturing* sebagai pengembangan *Rapid Prototyping*, sehingga disebut juga *Rapid Prototyping and Tooling* (RP/T) dan *Rapid Prototyping and Manufacturing* (RP/M). *Rapid Tooling* adalah penggunaan teknik *Rapid Prototyping* untuk memproduksi *Tooling* untuk proses semacam *Moulding* injeksi plastik. *Rapid Manufacturing* adalah penggunaan sistem *Rapid Prototyping* untuk memproduksi *Parts* dalam jumlah tertentu. Prinsip dasar *Rapid Prototyping* adalah menggunakan gambar rancangan CAD tiga dimensi dalam format *STL* (*Stereolithography*) yang dikirim ke mesin *Rapid Prototyping*. Di mesin *Rapid Prototyping*, gambar tersebut diiris (*Slice*) menjadi *Layer-Layer* dengan ketebalan tertentu sesuai spesifikasi mesin. (Punakawan, 2017).

Rapid Prototyping memungkinkan visualisasi suatu gambar tiga dimensi menjadi benda tiga dimensi asli yang mempunyai *Volume* (Maryadi, 2010). Perkembangan *Rapid Prototyping* juga tidak terlepas dari perkembangan komputer khususnya teknologi CAD/CAM yang sudah muncul lebih dulu di tahun 1960an (Lu dkk, 2015).

Kemudahan dan keunggulan teknologi *Rapid Prototyping* membawa dampak pada tren penelitiannya. Salah satunya adalah penelitian tentang dampaknya pada harga produksi. Menggunakan metode *Rapid Prototyping* untuk mengurangi waktu mendesain pada *Comercial High-Level Synthesis Tools* (Mori dkk, 2016).

Teknologi *Rapid Prototyping* sudah banyak diintegrasikan dengan bidang kehidupan manusia hal ini bisa dilihat pada Gambar 2.1. Tidak heran jika teknologi ini bisa dengan cepat dan luas merambah bidang-bidang strategis seperti militer, kesehatan, bisnis, seni, manufaktur, otomotif, pendidikan (Ichida, 2016).



Gambar 2.1 Contoh aplikasi teknologi rapid prototyping di bidang arsitektur (a) dan bidang kesehatan (b) [17]

2.3 3D Printing

3D *Printing* atau *Additive Manufacturing* (AM) adalah proses yang digunakan untuk membuat objek tiga dimensi. Teknologi 3D *Printing* terkenal karena menghasilkan produksi suku cadang dengan kompleksitas geometris ekstrem. Sistem 3D *Printing* multimaterial dapat memperluas kemampuan lebih jauh, dengan memvariasikan bahan dalam volume bagian *layer-by-layer*, atau *voxel-by-voxel* (Setiawan dkk, 2018). Penggunaan umum dari sistem multimaterial adalah untuk produksi suku cadang dengan warna yang bervariasi, *Opacity*, elastisitas, fungsi biologis, sifat mekanik, termal dan listrik (Surange dkk, 2016).

Seperti namanya 3D *Printing* merupakan sebuah teknik mencetak untuk menghasilkan sesuatu yang telah didesign dalam bentuk tiga dimensi. Ada beberapa jenis 3D *Printing* yang berkembang dan digunakan secara luas, baik dalam dunia industri, otomotif, arsitektur, ataupun medis (Putra dan Sari, 2018).

3D *Printing* 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 *printing* yaitu:

1. *Selective Binding* membuat objek 3D *Printing* 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.

Jenis 3D *Printing* yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM) Anet A8, salah satu teknik yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan objek atau *Part* di bidang 3D *Printing*. 3D *Printing* FDM umumnya menggunakan bahan plastik termoplastik seperti *Polylactic Acid* (PLA) dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) material (Nazan dkk, 2017). Metode FDM telah digunakan secara luas pada proses 3D *Printing* karena penggunaannya yang mudah, biayanya lebih rendah, ramah lingkungan serta lebih mudah dalam proses pengembangan produk, *Prototyping* dan manufaktur (Putra dan Sari, 2018).

2.4 Filament

Sejauh ini, polimer yang paling umum digunakan untuk proses 3D *Printing* FDM adalah filamen *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) dan *Polylactid Acid* (PLA). Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah filamen yang berbahan dasar polimer-termoplastik. Hal ini terkait dengan teknik *Fused Deposition Modeling* (FDM) yang termasuk ke dalam kategori material *Extrusion* (Rosehan dan Christofer. 2017).

Filamen PLA menunjukkan lebih banyak prospek yang menjanjikan bila dibandingkan dengan ABS. Sebagai contoh, (Gaal dkk, 2017) pembuatan perangkat mikrofluida dengan filamen PLA melalui 3D *Printing* FDM. (Wang

dkk, 2016) menggunakan filamen PLA untuk cetak perancah jaringan tulang dalam atmosfer plasma dingin. (Melocchi dkk, 2016) mengeksplorasi kelayakan 3D Printing FDM dalam pembuatan perangkat model kapsul untuk *Oral Pulsatile Release* dengan filamen PLA. (Li dkk, 2016) memproduksi serat karbon yang diperkuat komposit PLA dengan pendekatan *Prototyping 3D Printing*. (Tiersch dkk, 2016) mengeksplorasi filamen PLA untuk mencetak alat *Cryobiology*.

Adapun material filamen yang digunakan dalam penelitian ini adalah PLA+, dapat dilihat pada Gambar 2.2. Dalam penelitian ini filament PLA+ akan diuji dalam menerima aspek penyusutan dan mengukur nilai kekerasannya pada produk 3D Printing, yang mana akan menggunakan alat bantu *Vernier Caliper* dan *Hardness Tester*. Untuk data dari *Filament* yang akan digunakan dapat dilihat dari Tabel 2.2.



Gambar 2.2 ePLA+ Filament [43]

Tabel 2.2 Data Sheet of PLA+ Filament [43]

<i>Name</i>	PLA+ (<i>Polylactic Acid</i>)
<i>Print Temperature</i>	205 - 225 °C
<i>First Layer Temperature</i>	215 °C
<i>Density</i>	1.24 kg/m ³
<i>Diameter Filament</i>	1.75 mm (<i>Accuracy: 1.7 – 1.8 mm</i>)
<i>Tensile Yield Strength</i>	65 Mpa
<i>Flexural Strength</i>	75 Mpa
<i>Flexural Modulus</i>	3642 Mpa
<i>Impact Strength</i>	7 kJ/m ²

Filamen 3D Printing *Polylactic Acid* atau *Poly lactide* (PLA, Poly) yang merupakan *Biodegradable Thermoplastic Aliphatic Polyester* yang terbuat dari sumber daya terbarukan, seperti tepung jagung (di Amerika Serikat). Akar tapioka, keripik atau tepung (sebagian besar di Asia), atau tebu (di seluruh dunia). Pada tahun 2010, PLA peringkat tertinggi kedua dalam volume penggunaan dari

setiap bioplastik dunia (Surange dan Gharat, 2016). Nama "*Polylactid Acid*" tidak sesuai dengan IUPAC nomenklatur standar, dan berpotensi ambigu atau membingungkan, karena PLA bukan *Polyacid (Polyelectrolyte)*, melainkan *Polyester* (S Kolhe, 2014).

2.5 Cacat Penyusutan

Salah satu masalah dalam proses Pencetakan 3D *Fused Deposition Modeling* (FDM) adalah bahwa filamen plastik yang diekstrusi cenderung menyusut dan melengkung dari platform pencetakan (Nazan dkk, 2017). Karena penyusutan menjadi masalah yang tidak dapat dihindari untuk proses FDM, sulit untuk mendapatkan bagian yang sangat akurat dengan pengulangan yang memuaskan. Ketika parameter fabrikasi dioptimalkan, efek penyusutan dapat dikurangi (Gurralla dan Regalla, 2014).

Penyusutan material biasa terjadi pada termoset dan muncul selama transisi dari cairan ke kondisi padat setelah pencetakan. Ketika bahan PLA menyusut secara seragam, itu hanya akan menjadi sedikit lebih kecil. Namun, ketika hanya bagian dari model yang menyusut, itu akan menjadi masalah besar karena model tersebut akan bengkok. Model yang bengkok akan menekuk dari pelat penahan printer, retak atau berubah bentuk. Beberapa faktor berkontribusi terhadap kelengkungan model tetapi pendinginan yang tidak tepat adalah masalah yang paling umum. Itu terjadi setelah bahan cetak menjadi dingin dengan cepat atau ketika suhu di sekitar model cetak tidak rata. Sebuah AC di dalam ruangan lebih cenderung menyebabkan masalah ini (Vanhoose dkk, 2015).

Secara khusus, untuk mengurangi kesalahan bentuk akibat penyusutan panas pada pembuatan komponen PLA dengan pencetakan 3D berbasis FDM, pengaturan suhu untuk alas dan bagian dalam dan luar ruang sangat penting. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan pengaturan parameter terbaik dan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan parameter dalam kesalahan penyusutan bagian 3D *Printing*.

Gregorian dkk (2011) Telah menyarankan bahwa parameter seperti suhu bed dan faktor penyusutan perlu dipertimbangkan untuk mendapatkan hasil yang akurat. Dapat dilihat bahwa masing-masing parameter dapat menghasilkan nilai

yang berbeda dari penyusutan (Marwah dkk, 2018). Namun, selama proses pembuatan, berbagai jenis produk biasanya menghadapi masalah dengan ketebalan yang tidak rata atau desain struktur tertentu, sehingga penyusutan produk tidak merata (Wang dkk, 2019). Wang dkk (2019), mengatakan untuk menghitung penyusutan atau *Linear Shrinkage* (L_s) dari setiap dimensi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$L_s = \frac{\text{Design Part} - \text{Actual Part}}{\text{Actual Part}} \times 100 \% \quad (2.1)$$

2.6 Pengujian Kekerasan (*Hardness Test*)

Pada umumnya, kekerasan menyatakan ketahanan terhadap deformasi dan merupakan ukuran ketahanan logam terhadap deformasi plastik atau deformasi permanen (Dieter, 1988). Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami pergesekan (*Frictional Force*), dalam hal ini bidang keilmuan yang berperan penting mempelajarinya adalah Ilmu Bahan Teknik (*Metallurgy Engineering*).

Untuk para insinyur perancang, kekerasan sering diartikan sebagai ukuran kemudahan dan kuantitas khusus yang menunjukkan sesuatu mengenai kekuatan dan perlakuan panas dari suatu logam. Terdapat tiga jenis ukuran kekerasan, tergantung pada cara melakukan pengujian, yaitu: (1) Kekerasan goresan (*Scratch Hardness*); (2) Kekerasan lekukan (*Indentation Hardness*); dan (3) Kekerasan pantulan (*Rebound*). Untuk logam, hanya kekerasan lekukan yang banyak menarik perhatian dalam kaitannya dengan bidang rekayasa (Staffnew, 2009).. Alat uji kekerasan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Albert Gnehm Horgen*

Kekerasan suatu bahan (baja) dapat diketahui dengan pengujian kekerasan memakai mesin uji kekerasan (*Hardness Tester*) menggunakan tiga metode atau teknik yang umum dilakukan yaitu metode Brinell, Rockwell dan Vickers (Callister, 2000; Dieter, 1996)

1. Metode Brinell

Metode uji kekerasan yang diajukan oleh J.A. Brinell pada tahun 1900 ini merupakan uji kekerasan lekukan yang pertama kali banyak digunakan serta disusun pembakuannya (Dieter, 1988). Uji kekerasan ini berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam memakai bola baja yang dikeraskan yang ditekan dengan beban tertentu. Beban diterapkan selama waktu tertentu, biasanya 30 detik, dan diameter lekukan diukur dengan mikroskop, setelah beban tersebut dihilangkan. Permukaan yang akan dibuat lekukan harus relatif halus, rata dan bersih dari debu atau kerak.

Angka kekerasan brinell (BHN) dinyatakan sebagai beban P dibagi luas permukaan lekukan. Pada prakteknya, luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diameter jejak. Dieter (1988), mengatakan nilai BHN dapat ditentukan dari persamaan (2.2) berikut:

$$\text{BHN} = \frac{P}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.2)$$

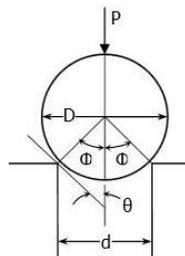
dengan: P = beban yang digunakan (kg)

D = diameter bola baja (mm)

d = diameter lekukan (mm)

Dari Gambar 2.4, tampak bahwa $d = D \sin \Phi$. Dengan memasukkan harga ini ke dalam persamaan (2.2) akan dihasilkan bentuk persamaan kekerasan brinell yang lain, yaitu:

$$\text{BHN} = \frac{P}{\left(\frac{\pi}{2}\right)D^2(1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$



Gambar 2.4 Parameter-parameter dasar pada pengujian Brinell [10]

Jejak penekanan yang relatif besar pada uji kekerasan brinell memberikan keuntungan dalam membagikan secara pukul rata ketidak seragaman lokal. Selain itu, uji brinell tidak begitu dipengaruhi oleh goresan dan kekasaran permukaan dibandingkan uji kekerasan yang lain. Di sisi lain, jejak penekanan yang besar ukurannya, dapat menghalangi pemakaian uji ini untuk benda uji yang kecil atau tipis, atau pada bagian yang kritis terhadap tegangan sehingga lekukan yang terjadi dapat menyebabkan kegagalan (failure).

2. Metode Rockwell

Pengujian *Rockwell* mirip dengan pengujian brinell, yakni angka kekerasan yang diperoleh merupakan fungsi derajat indentasi. Beban dan indenter yang digunakan bervariasi tergantung pada kondisi pengujian. Berbeda dengan pengujian brinell, indenter dan beban yang digunakan lebih kecil sehingga menghasilkan indentasi yang lebih kecil dan lebih halus. Banyak digunakan di industri karena prosedurnya lebih cepat (Davis dkk, 1955).

Indenter atau “penetrator” dapat berupa bola baja atau kerucut intan dengan ujung yang agak membulat (biasa disebut “brale”). Diameter bola baja umumnya $\frac{1}{16}$ inchi, tetapi terdapat juga indenter dengan diameter lebih besar, yaitu $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, atau $\frac{1}{2}$ inchi untuk bahan-bahan yang lunak. Pengujian dilakukan dengan terlebih dahulu memberikan beban minor 10 kg, dan kemudian beban mayor diaplikasikan. Beban mayor biasanya 60 atau 100 kg untuk indenter bola baja dan 150 kg untuk indenter brale. Meskipun demikian, dapat digunakan beban dan indenter sesuai kondisi pengujian.

Karena pada pengujian *Rockwell*, angka kekerasan yang ditunjukkan merupakan kombinasi antara beban dan indenter yang dipakai, maka perlu diberikan awalan huruf pada angka kekerasan yang menunjukkan kombinasi beban dan penumbuk tertentu untuk skala beban yang digunakan. Skala kekerasan Rockwell dan huruf awalnya dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Dial pada mesin terdiri atas warna merah dan hitam yang didesain untuk mengakomodir pengujian skala B dan C yang seringkali dipakai. Skala kekerasan B digunakan untuk pengujian dengan kekerasan medium seperti baja karbon rendah dan baja karbon medium dalam kondisi telah dianil (dilunakkan). Range kekerasannya dari 0–100. Bila indenter bola baja dipakai untuk menguji bahan

yang kekerasannya melebihi B 100, indenter dapat terdefomasi dan berubah bentuk. Selain itu, karena bentuknya, bola baja tidak sesensitif brale untuk membedakan kekerasan bahan-bahan yang keras. Tetapi jika indenter bola baja dipakai untuk menguji bahan yang lebih lunak dari B 0, dapat mengakibatkan pemegang indenter mengenai benda uji, sehingga hasil pengujian tidak benar dan pemegang indenter dapat rusak.

Tabel 2.3 Skala Kekerasan Rockwell dan Huruf Awalannya [9]

Simbol skala dan huruf awalan	Indenter	Beban penekanan (kg)	Warna dial
B C	Kelompok 1: Bola baja $\frac{1}{16}$ -inchi	100	Merah
	Brale	150	Hitam
A D E F G H K	Kelompok 2: Brale	60	Hitam
	Brale	100	Hitam
	Bola baja $\frac{1}{8}$ -inchi	100	Merah
	Bola baja $\frac{1}{16}$ -inchi	60	Merah
	Bola baja $\frac{1}{16}$ -inchi	150	Merah
	Bola baja $\frac{1}{8}$ -inchi	60	Merah
	Bola baja $\frac{1}{8}$ -inchi	150	Merah
L M P R S V	Kelompok 3: Bola baja $\frac{1}{4}$ -inchi	60	Merah
	Bola baja $\frac{1}{4}$ -inchi	100	Merah
	Bola baja $\frac{1}{4}$ -inchi	150	Merah
	Bola baja $\frac{1}{2}$ -inchi	60	Merah
	Bola baja $\frac{1}{2}$ -inchi	100	Merah
	Bola baja $\frac{1}{2}$ -inchi	150	Merah

3. Metode Vickers

Uji kekerasan *Vickers* menggunakan indenter piramida intan yang pada dasarnya berbentuk bujursangkar. Besar sudut antar permukaan-permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136°. Nilai ini dipilih karena mendekati sebagian besar nilai perbandingan yang diinginkan antara diameter lekukan dan diameter bola penumbuk pada uji kekerasan brinell (Dieter, 1988).

Angka kekerasan *Vickers* didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan. Pada prakteknya, luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. Dieter (1988), mengatakan VHN dapat ditentukan dari persamaan (2.4) berikut:

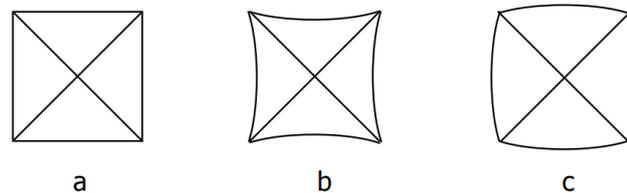
$$VHN = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{d^2} = \frac{(1,854)P}{d^2} \quad (2.4)$$

dengan: P = beban yang digunakan (kg)

d = panjang diagonal rata-rata (mm)

θ = sudut antara permukaan intan yang berhadapan = 1360

Karena jejak yang dibuat dengan penekan piramida serupa secara geometris dan tidak terdapat persoalan mengenai ukurannya, maka VHN tidak tergantung kepada beban. Pada umumnya hal ini dipenuhi, kecuali pada beban yang sangat ringan. Beban yang biasanya digunakan pada uji *Vickers* berkisar antara 1 hingga 120 kg. Tergantung pada kekerasan logam yang akan diuji. Tipe-tipe lekukan piramid intan dapat dilihat pada Gambar 2.5. Hal-hal yang menghalangi keuntungan pemakaian metode vickers adalah: (1) Uji ini tidak dapat digunakan untuk pengujian rutin karena pengujian ini sangat lamban, (2) Memerlukan persiapan permukaan benda uji yang hati-hati, dan (3) Terdapat pengaruh kesalahan manusia yang besar pada penentuan panjang diagonal



Gambar 2.5 Tipe-tipe lekukan piramid intan: (a) lekukan yang sempurna, (b) lekukan bantal jarum, (c) lekukan berbentuk tong [10]

Lekukan yang benar yang dibuat oleh penekan piramida intan harus berbentuk bujur sangkar (gambar 3a). Lekukan bantal jarum (gambar 3b) adalah akibat terjadinya penurunan logam di sekitar permukaan piramida yang datar. Keadaan demikian terjadi pada logam-logam yang dilunakkan dan mengakibatkan pengukuran panjang diagonal yang berlebihan. Lekukan berbentuk tong (gambar 3c) akibat penimbunan ke atas logam-logam di sekitar permukaan penekan terdapat pada logam-logam yang mengalami proses pengerjaan dingin.

2.7 Alat Uji Cacat Penyusutan

Alat uji penyusutan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Vernier Caliper* atau jangka sorong. Jangka sorong pertama kali ditemukan pada tahun 1631 oleh seorang berkebangsaan prancis bernama Pierre Vernier. Jangka sorong merupakan alat ukur panjang yang mempunyai batas ukur sampai 10 cm dengan ketelitiannya 0.1 mm atau 0.01 cm. (Agustiana dan Tika, 2013). Jangka sorong

memiliki berbagai ukuran dengan rentang pengukuran dari 100 mm hingga 3000 mm (4 inci sampai 120 inci). (Flack, 2014)

Jangka sorong tidak hanya digunakan untuk mengukur panjang tetapi jangka sorong juga dapat digunakan untuk mengukur diameter sebuah cincin, diameter bagian dalam pipa dan juga dapat digunakan untuk mengukur kedalaman sebuah benda serta dapat digunakan untuk mengukur luas benda. Untuk Gambar alat uji *Vernier Caliper* dapat dilihat pada Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Mitutoyo Vernier Caliper

Jangka sorong yang dapat digunakan untuk mengukur bagian dalam dan luas suatu benda terdiri dari bilah utama atau bilah yang dibagi dalam mm dan suatu bilah pembantu yang dibagi 100. Seratus garis pada bilah pembantu sama dengan 49 milimeter pada bilah utama sehingga setiap garis $= \frac{100}{49}$ mm. Bila suatu garis bilah pembantu berimpit dengan suatu tanda pada skala utama, maka harga ukurnya adalah jumlah skala dihitung dari angka 0×0.02 mm (Poerwanto dkk, 2012:79).



Gambar 2.7 Bagian-bagian Jangka Sorong [8]

Menurut (Claude dan Archambault, 2011) bagian-bagian Jangka Sorong (*Vernier Caliper*) yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 terdiri dari:

1. Skala utama

Skala utama merupakan pembagian vernier untuk memperoleh pengukuran yang baik.

2. Skala vernier (nonius)

Skala vernier (nonius) merupakan pembagian sama panjang pada jangka sorong yang ditandai dengan satuan pengukuran.

3. Rahang tetap

Rahang tetap merupakan bagian runcing di ujung penggaris yang menyokong benda yang diukur; benda diletakkan diantara dua rahang yang dirapatkan. Terdapat dua rahang tetap, yakni rahang tetap atas dan rahang tetap bawah

4. Rahang gerak

Rahang gerak merupakan bagian runcing yang dipasang di ujung vernier yang dapat bergeser sepanjang penggaris ke objek yang diukur. Terdapat dua rahang gerak, yakni rahang gerak atas dan rahang gerak bawah.

5. Kunci peluncur

Kunci peluncur berfungsi untuk menjaga pengukuran yang diperoleh.

6. Kunci penggerak halus

Kunci penggerak halus berfungsi untuk mengatur posisi rahang secara halus.

7. Ruler (ekor)

Peralatan berskala di ujung rahang untuk mengukur ketebalan atau kedalam sebuah benda.

Menurut (Flack, 2014) terdapat tiga jenis jangka sorong (*Vernier Caliper*)

yang umum digunakan yaitu:

1. Jangka Sorong Manual

Jangka sorong manual adalah alat ukur yang menggabungkan skala utama, skala vernier, rahang tetap dan rahang gerak. Jenis ini pada umumnya sering digunakan dalam praktek. Cara memakai alat ukur ini masih manual, sehingga memerlukan ketelitian yang lebih. Selain itu, untuk mengetahui hasil pengukurannya harus kita hitung terlebih dahulu.

2. Jangka Sorong Arloji

Yaitu jangka sorong yang pembacaannya menggunakan jarum ukuran analog yang ditempelkan pada bagian muka (dengan stopper). Jangka sorong arloji memakai jam ukur sebagai ganti skala nonius dalam menginterpolasikan posisi garis indeks relatif terhadap skala pada batang ukur. Gerakan translasi peluncur diubah menjadi gerakan putaran jarum

penunjuk dengan perantaraan roda gigi pada poros jam ukur dan batang bergigi yang dilekatkan di sepanjang batang ukur.

3. Jangka Sorong Digital

Jenis ini merupakan perkembangan dari jangka sorong manual. Umumnya model digital ini jarang ditemui dalam praktik. Jenis *Vernier Caliper* digital memiliki layar digital yang dapat muncul nilai dari benda yang diukur tanpa harus menghitung secara manual. Dengan menggunakan model jenis ini akan mempermudah dan mempercepat mengukur benda-benda. Namun, dari segi harga jangka sorong jenis digital ini lebih mahal daripada jenis manual.

2.8 Metode Taguchi

Metode *Taguchi* pertama kali dikenalkan oleh Dr. Genichi Taguchi (1949) yang merupakan metodologi baru untuk memperbaiki kualitas produk serta dapat menekan biaya dan sumberdaya seminimal mungkin. Sasaran metode *Taguchi* sendiri adalah mengoptimalkan fungsi tujuan yang secara berubah-ubah dan mengurangi sensitivitas terhadap faktor yang tak terkendali (Sunaryo, 2012)

Menurut Sidi dan Wahyudi (2013) Metode ini merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta dapat menekan biaya dan *Resources* seminimal mungkin. Sasaran metode *Taguchi* adalah menjadikan produk *Robust* terhadap *Noise*, karena itu sering disebut sebagai *Robust Design*.

Menurut Soejanto (2009), beberapa keunggulan dalam metode Taguchi adalah sebagai berikut:

1. Tingkat efisiensi rancangan percobaan lebih tinggi karena dapat melakukan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan level.
2. Memperoleh suatu proses yang menghasilkan produk yang konsisten dan kokoh terhadap gangguan yaitu faktor yang tidak dapat dikontrol.
3. Kesimpulan yang didapat dengan menggunakan metode Taguchi adalah respon yang optimum.

Metode Taguchi memiliki struktur yang kompleks, maka terdapat rancangan yang dikorbankan pengaruh interaksinya atau bahkan yang cukup signifikan. Oleh

karena itu, perlu dilakukan pemilihan rancangan percobaan secara hati-hati yang sesuai dengan penelitian (Soejanto, 2009). Liao (2003) mengatakan terdapat tiga tahapan dalam penerapan metode Taguchi untuk pengoptimalan suatu produk atau proses yaitu:

1. Rancangan sistem Rancangan sistem digunakan untuk menyeleksi metode produksi yang baik dalam menyelesaikan proses produksi. Penurunan biaya produksi dan penurunan noise adalah pertimbangan utama dalam memilih metode produksi yang baik.
2. Rancangan parameter Rancangan parameter digunakan untuk mencari faktor atau level yang dapat dikendalikan dan meminimalkan pengaruh dari faktor noise. Hal tersebut dikarenakan pengaturan parameter dengan tujuan untuk menjaga variasi di dalam karakteristik kualitas produk menjadi minimum dengan artian untuk mendekati target yang diinginkan.
3. Rancangan toleransi Rancangan toleransi adalah efek utama di dalam kualitas produk dalam hubungan kerugian kualitas dan efektifitas penjualan biaya produksi.

Metode taguchi biasa hanya dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah optimalisasi satu respon (Liao, 2003). Sedangkan untuk menyelesaikan kasus multirespon dapat digunakan metode taguchi dengan pendekatan metode lain yaitu *Grey Relational Analysis* dan *Principal Component Analysis*.

2.9 Orthogonal Array

Menurut Soejanto (2009), orthogonal array adalah matriks dari sejumlah baris dan kolom. Setiap kolom merepresentasikan faktor atau kondisi tertentu yang dapat berubah dari suatu percobaan ke percobaan lainnya, dan baris mewakili level dari faktor pada percobaan yang dilakukan. Orthogonal array (OA) digunakan untuk mengetahui jumlah percobaan minimum namun dapat tetap membantu menentukan efek faktor utama (Bagchi, 1993). OA merupakan suatu matriks faktor dan level yang tidak membawa pengaruh dari faktor yang lain atau level yang lain (Belavendram, 1995).

Jika faktor yang terlibat sebanyak 4 dan masing-masing faktor memiliki 3 level maka dapat digunakan OA dengan $L_9(3^4)$. Pada orthogonal array, untuk level

rendah dinotasikan dengan tanda “-“, untuk level sedang dinotasikan dengan tanda “0”, dan untuk level tinggi dinotasikan dengan tanda “+”. Suatu matriks dikatakan orthogonal jika penjumlahan satu kolom sama dengan nol dan penjumlahan kolom dari setiap baris sama dengan nol. Sebagai ilustrasi, contoh pada orthogonal array $L_9(3^4)$ dengan 4 faktor dan masing-masing memiliki 3 level pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Pembuktian Orthogonal pada Matriks $L_9(3^4)$ 4 Faktor 3 Level [3]

Run	Faktor				Σ
	A	B	C	D	
1	-	-	-	-	-4
2	-	0	0	0	-1
3	-	+	+	+	2
4	0	-	0	+	0
5	0	0	+	-	0
6	0	+	-	0	0
7	+	-	+	0	1
8	+	0	-	+	1
9	+	+	0	-	1
Σ	0	0	0	0	0

Terlihat bahwa jumlah pada 1 kolom sama dengan nol dan penjumlahan semua baris sama dengan nol.

2.10 Karakteristik Kualitas dan *Signal to Noise Ratio*

Karakteristik kualitas menurut Taguchi ada tiga, yaitu *Nominal is the best*, *Smaller is Better*, dan *Larger is Better*. Sedangkan cara melihat karakteristik suatu percobaan yaitu dengan menggunakan Signal to Noise Ratio (SN Ratio). SN Ratio adalah *Concurrent Statistic* yaitu cara untuk melihat karakteristik dari distribusi dan pengaruh karakteristik tersebut pada masing-masing percobaan (Bagachi, 1993). Mean Square Deviation (MSD) adalah pengukuran yang bergantung pada rata-rata dan standar deviasi data. Menurut Belavendram (1995) beberapa tipe karakteristik kualitas SN Ratio dari respon adalah sebagai berikut:

1. *Nominal is the best*

Nominal is the best adalah karakteristik kualitas dengan nilai target tidak nol dan terbatas sehingga nilai yang semakin mendekati target tersebut adalah nilai yang diinginkan. Untuk percobaan 4 faktor tanpa ulangan, SN Ratio untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan (2.5) berikut:

$$\begin{aligned} \text{SN Ratio} &= 10 \text{ Log } [MSDn] \\ &= 10 \text{ Log } [x_i(j) - m^2] \end{aligned} \quad (2.5)$$

dimana: $x_i(j)$ = nilai eksperimen ke-i pada respon ke-j

m = nilai target spesifikasi

2. *Smaller is Better*

Smaller is Better adalah karakteristik kualitas dengan batas nilai 0 dan non negatif sehingga nilai yang semakin kecil atau mendekati nol adalah nilai yang diinginkan. SN Ratio untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan (2.6) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{SN Ratio} &= -10 \text{ Log } [MSDn] \\ &= -10 \text{ Log } [x_i(j)^2] \end{aligned} \quad (2.6)$$

3. *Larger is Better*

Larger is Better adalah karakteristik kualitas dengan rentang nilai tak terbatas dan non negatif sehingga nilai yang semakin besar adalah nilai yang diinginkan. SN Ratio untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan (2.7) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{SN Ratio} &= -10 \text{ Log } [MSDn] \\ &= -10 \text{ Log } \left[\frac{1}{x_i(j)^2} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.11 *Grey Relational Analysis (GRA)*

Grey relational Analysis (GRA), juga disebut *Deng's Grey Incidence Analysis Model*, dikembangkan oleh Profesor Cina JULONG deng dari Huazhong University of Science and Technology. Teori ini telah diterapkan di berbagai bidang teknik dan manajemen. Awalnya, metode *Grey* diadaptasi untuk secara efektif mempelajari polusi udara (Pai dkk, 2013) dan kemudian digunakan untuk menyelidiki model multi-dimensi nonlinear dari dampak kegiatan sosial-ekonomi

pada polusi udara kota (Xiaolu dkk, 2017). Ini juga telah digunakan untuk mempelajari hasil penelitian dan pertumbuhan negara (Javed dan Liu, 2018).

Metode Taguchi biasanya hanya dapat digunakan untuk mengoptimasi satu respon saja. Untuk optimasi beberapa respon dengan metode taguchi dapat digunakan pendekatan dengan Grey Relational Analysis (GRA). Teori GRA ditemukan oleh Deng pada periode 1980-an. Pada dasarnya metode GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon saja. Teori ini berhubungan dengan metode Taguchi yang menunjukkan sebuah pendekatan optimasi yang lebih baru. Pada awalnya, teori GRA mengadopsi teori Grey yang sudah lama ditemukan sebelumnya. Teori Grey berasal dari hasil pencampuran antara informasi yang jelas dan tidak jelas. Misalnya, hitam dilambangkan sebagai informasi yang tidak jelas, yang bisa diartikan sebagai informasi yang belum sempurna. Sedangkan putih sebaliknya dilambangkan informasi yang benar-benar jelas. Tetapi suatu saat informasi bisa berada di antara perpaduan hitam dan putih yang dikenal dengan abu-abu, informasi yang mempunyai beberapa hal yang jelas dan tidak jelas atau kurang sempurna (Balasubramanian dan Ganapathy, 2011)

2.12 *Principal Component Analysis (PCA)*

Principal Component Analysis atau analisis komponen utama adalah sebuah metode statistika multivariat yang memilih sejumlah kecil komponen untuk menjelaskan varian dari beberapa respon yang asli. Menurut Johnson dan Wichern (2007) *Principal Components Analysis (PCA)* merupakan suatu teknik statistika untuk mentransformasi variabel-variabel asli yang masih saling berkorelasi satu dengan yang lain menjadi satu set variabel baru yang tidak berkorelasi lagi. Komponen utama merupakan kombinasi linier dari k variabel random X_1, X_2, \dots, X_k dan tergantung pada matriks kovarian Σ atau matriks korelasi ρ . Misalkan vektor random $= [X_1, X_2, \dots, X_k]$ mempunyai matriks kovarian Σ dengan nilai eigen λ dan vektor eigen a dimana $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_k \geq 0$ maka bentuk kombinasi linier sebagai berikut:

$$PC_1 = a_1^T X = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1k}X_k$$

$$PC_2 = a_2^T X = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2k}X_k$$

⋮

$$PC_k = a_k^T X = a_{k1}X_1 + a_{k2}X_2 + \dots + a_{kk}X_k$$

dengan:

$$\text{Var}(PC_j) = a_j^T \Sigma a_j \quad j = 1, 2, \dots, k$$

Menurut Johnson dan Wichern (2007) komponen utama tidak berkorelasi dan memiliki varian sama dengan nilai eigen dari matriks kovarian Σ . Maka, nilai eigen yang terbesar menggambarkan nilai variansi yang terbesar.

Komponen utama pertama adalah kombinasi linier dari X_1, X_2, \dots, X_k yang dapat menerangkan variansi terbesar.

$$PC_1 = a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1k}X_k = a_1^T X$$

$$\text{Var}(PC_1) = a_1^T \Sigma a_1 \text{ dengan } a_1^T a_1 = 1$$

Sedangkan komponen utama kedua adalah kombinasi linier dari X_1, X_2, \dots, X_k yang tidak berkorelasi dengan komponen utama pertama, serta memaksimalkan sisa variansi setelah diterangkan oleh komponen utama pertama.

$$PC_2 = a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2k}X_k = a_2^T X$$

$$\text{Var}(PC_2) = a_2^T \Sigma a_2 \text{ dengan } a_2^T a_2 = 1 \text{ dan } \text{Cov}(PC_2, PC_1) = a_2^T \Sigma a_1 = 0$$

Selanjutnya cara yang sama untuk komponen utama ke- j ($j = 1, 2, \dots, k$) sebagai berikut:

$$PC_j = a_{j1}X_1 + a_{j2}X_2 + \dots + a_{jk}X_k = a_j^T X$$

$$\text{Var}(PC_j) = a_j^T \Sigma a_j \text{ dengan } a_j^T a_j = 1 \text{ dan } \text{Cov}(PC_j, PC_l) = a_j^T \Sigma a_l = 0 \text{ untuk } l < j$$

Menurut Jhonson dan Winchen (2007) ada tiga kriteria dalam pemilihan komponen utama yang digunakan yaitu:

1. Dipilih nilai *Eigen* yang lebih besar dari satu ($\lambda_i > 1$). Nilai *Eigen* yang mendekati nol dianggap tidak memberikan pengaruh yang penting.
2. Melihat sudut pada *Scree Plot*. *Scree Plot* merupakan plot yang menggambarkan nilai *Eigen* dan menunjukkan perubahan nilai *Eigen* yang besar.
3. Proporsi variansi yang dianggap cukup untuk mewakili total variansi data jika variansi kumulatif mencapai 70% sampai dengan 80%.