



**PENGARUH VARIASI PARAMETER 3D PRINTING  
TERHADAP HASIL PRODUK SHIN GUARD DENGAN  
FILAMEN TPU + PETG**

**SKRIPSI**

**Oleh**

**Agit Yoga Yulio  
181910101039**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JEMBER  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
JEMBER  
2023**



**PENGARUH VARIASI PARAMETER 3D PRINTING  
TERHADAP HASIL PRODUK SHIN GUARD DENGAN  
FILAMEN TPU + PETG**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada  
program studi S1 Teknik Mesin*

**SKRIPSI**

Oleh

**Agit Yoga Yulio  
181910101039**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS JEMBER  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN  
JEMBER  
2023**

## PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena nikmat dan karunianya kepada saya, dengan kerendahan hati saya mempersembahkan skripsi ini kepada:

1. Allah SWT karena hikmahnya saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu dan menikmati prosesnya.
2. Bapak saya Gimam dan Ibu saya Tatik Yulianti yang selalu saya sayangi. Tidak ada kata yang mampu melampiasikan rasa kasih dan bersyukur saya, tidak ada harta yang mampu membayar pengorbanan orang tua, tidak ada buku yang mampu mendidik sebaik didikan orang tua.
3. Kepada diri saya sendiri Agit Yoga Yulio yang pantang menyerah, yang menemukan kekuatan dalam kesulitan. Penghargaan ini kusuguhkan untukmu, sebagai penghargaan atas segala perjuangan dan rintangan untuk melawan rasa malas yang telah kau taklukkan.
4. Kepada anggota keluarga besar saya terutama kakak perempuan saya Yesi Warisman yang turut mensupport, memotivasi dan memberi arahan serta doa untuk menyelesaikan skripsi ini.
5. Kepada Bapak Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph. D dan Bapak Ir. Sumarji, S.T., M.T. sebagai pendamping skripsi saya yang telah meluangkan waktu untuk membimbing saya dan membagikan pengalaman yang banyak kepada saya untuk menjadi mahasiswa sekaligus manusia yang lebih baik.
6. Kepada Ir. Ahmad Syuhri, M.T. dan Ir. Mochamad Edward Ramadhan, S.T., M.T. sebagai dosen penguji skripsi saya yang telah memberikan saran dan masukan yang membuat skripsi ini menjadi lebih baik dari sebelumnya.
7. Kepada Tim anggota penelitian riset *3D printing* yang telah bekerja keras dan kerja cerdas dalam membantu menyelesaikan skripsi ini.

**MOTTO**

“Seringkali pilihan Tuhan untuk kita tidak seperti yang kita inginkan, baru belakangan kita ketahui bahwa pilihan-Nya yang terbaik”

(Gus Mus)

“Apabila anda berbuat kebaikan kepada orang lain maka anda telah berbuat baik terhadap diri sendiri”

(Benyamin Franklin)



**PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Agit Yoga Yulio

NIM : 181910101039

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: (*PENGARUH VARIASI PARAMETER 3D PRINTING TERHADAP HASIL PRODUK SHIN GUARD DENGAN FILAMEN TPU + PETG*) adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan skripsi ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, (17 Juni 2023)

Yang menyatakan,

(Agit Yoga Yulio)

NIM 181910101039

**HALAMAN PERSETUJUAN**

Skripsi berjudul *(PENGARUH VARIASI PARAMETER 3D PRINTING TERHADAP HASIL PRODUK SHIN GUARD DENGAN FILAMEN TPU + PETG)* telah diuji dan disahkan oleh Fakultas Teknik Mesin Universitas Jember pada:

Hari : Selasa

Tanggal : 4 juli 2023

Tempat : Fakultas Teknik Mesin Universitas Jember

**Pembimbing**

1. Pembimbing Utama

Nama : Ir.Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D

NIP : 197003221995011001

2. Pembimbing Anggota

Nama : Ir.Sumarji, S.T., M.T

NIP : 196802021997021001

**Tanda Tangan**

(.....)

(.....)

**Penguji**

1. Penguji Utama

Nama : Ir.Ahmad Syuhri, M.T

NIP : 196701231997021001

2. Penguji Anggota

Nama : Ir.Mochamad Edoward Ramadhan, S.T., M.T.

NIP : 198704302014041001

(.....)

(.....)

## ABSTRAK

Teknologi percetakan *3D* telah menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Di Indonesia sendiri *3D printing* mulai banyak diminati. Berbagai pengembangan dan penelitian banyak dilakukan misalnya pada penelitian ini mesin juga ikut di variasikan serta filamen juga ikut dikombinasikan antara TPU dan PETG menjadi inovasi terbaru sebagai bahan baku pencetakan produk berbahan polimer menggunakan mesin *3D Printing*. Proses pencetakan paduan dua filamen tersebut dengan memvariasikan level parameter *layer height*, *nozzle temperature*, *printing speed*, dan *bed temperature*. Selanjutnya akan dilakukan uji impak untuk mengetahui variasi parameter optimal pada mesin *3D printing* yang diharapkan dapat menjadi acuan untuk pencetakan produk yang berkualitas.

Penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan matriks orthogonal  $L_9(3)^4$  dan juga dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali untuk setiap percobaan. Setelah itu dilakukan *analysis of varians*. Metode Taguchi memungkinkan perancangan untuk melakukan eksperimen dengan jumlah uji yang relatif kecil namun tetap menghasilkan informasi yang berharga. Dengan menggunakan pendekatan ini, perancang dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang signifikan dalam mempengaruhi mereka terhadap kualitas produk. Kombinasi faktor yang dapat menghasilkan uji impak optimal adalah *layer height* level 2 (0.2 mm), *nozzle temperature* level 1 (220°C), *printing speed* level 3 (50 mm/s) dan *bed temperature* level 2 (75°C) dengan nilai kekuatan impak tertinggi 27.20 dan terendah 11.07. Kombinasi faktor yang berpengaruh paling signifikan terhadap nilai kekuatan uji impak yaitu: *layer height* 63.97%, *nozzle temperature* 6.19%, *printing speed* 2.07% dan *bed temperature* 4.74%.

Kata kunci: *3D Printing*, paduan TPU dan PETG, Uji impak

**ABSTRACT**

*3D printing technology has shown very rapid development in recent years. In Indonesia, 3D printing is starting to be in great demand. Various developments and researches have been carried out, for example in this study the machine was also varied and the filament was also combined between TPU and PETG to become the latest innovation as a raw material for printing polymer products using a 3D printing machine. The printing process of the two-filament alloy is done by varying the parameters of the layer height level, nozzle temperature, print speed, and bed temperature. Next, an impact test will be carried out to find out the optimal parameter variation on the 3D printing machine which is expected to be a reference for printing quality products*

*This study used the Taguchi method with the orthogonal matrix  $L9(3)^4$  and also repeated three times for each experiment. After that, an analysis of variance was carried out. The Taguchi method allows the designer to conduct experiments with a relatively small number of tests but still produces valuable information. By using this approach, designers can identify factors that are significant in their influence on product quality. The combination of factors that can produce an optimal impact test is layer height level 2 (0.2 mm), nozzle temperature level 1 (220°C), printing speed level 3 (50 mm/s) and bed temperature level 2 (75°C) with an impact strength value the highest was 27.20 and the lowest was 11.07. The combination of factors that have the most significant effect on the impact test strength values are: layer height 63.97%, nozzle temperature 6.19%, printing speed 2.07% and bed temperature 4.74%.*

*Keywords : 3D Printing, TPU and PETG alloys, impact test*

## RINGKASAN

**PENGARUH VARIASI PARAMETER 3D PRINTING TERHADAP HASIL PRODUK SHIN GUARD DENGAN FILAMEN TPU + PETG;** Agit Yoga Yulio, 181910101039; 2023; 75 halaman; Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.

Teknologi pencetakan 3D telah menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Di Indonesia sendiri 3D printing mulai banyak diminati. Berbagai pengembangan dan penelitian banyak dilakukan misalnya pada penelitian ini mesin juga ikut di variasikan serta filamen juga ikut dikombinasikan antara TPU dan PETG menjadi inovasi terbaru sebagai bahan baku pencetakan produk berbahan polimer menggunakan mesin 3D Printing. Proses pencetakan paduan dua filamen tersebut dengan memvariasikan level parameter *layer height*, *nozzle temperature*, *printing speed*, dan *bed temperature*. Selanjutnya akan dilakukan uji impact untuk mengetahui variasi parameter optimal pada mesin 3D printing yang diharapkan dapat menjadi acuan untuk pencetakan produk yang berkualitas.

Penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan matriks orthogonal  $L_9(3)^4$  dan juga dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali untuk setiap percobaan. Setelah itu dilakukan *analysis of varians*. Metode Taguchi memungkinkan perancangan untuk melakukan eksperimen dengan jumlah uji yang relatif kecil namun tetap menghasilkan informasi yang berharga. Dengan menggunakan pendekatan ini, perancang dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang signifikan dalam mempengaruhi mereka terhadap kualitas produk.

Kombinasi faktor yang dapat menghasilkan uji impact optimal adalah *layer height* level 2 (0.2 mm), *nozzle temperature* level 1 (220°C), *printing speed* level 3 (50 mm/s) dan *bed temperature* level 2 (75°C) dengan nilai kekuatan impact tertinggi 27.20 dan terendah 11.07. Kombinasi faktor yang berpengaruh paling signifikan terhadap nilai kekuatan uji impact yaitu: *layer height* 63.97%, *nozzle temperature* 6.19%, *printing speed* 2.07% dan *bed temperature* 4.74%.

## PRAKATA

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan karunianya, sehingga skripsi dengan judul “*PENGARUH VARIASI PARAMETER 3D PRINTING TERHADAP HASIL PRODUK SHIN GUARD DENGAN FILAMEN TPU + PETG*” ini dapat terselesaikan sesuai dengan waktu yang di rencanakan. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Univeritas Jember.

Terima kasih penulis ucapkan kepada semua pihak yang telah mendukung penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dan telah memberikan banyak dukungan kepada penulis, khususnya kepada:

1. Bapak Hari Arbiantara Basuki, S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah banyak membantu proses terselesaikannya penulisan skripsi.
2. Bapak Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D dan selaku pembimbing utama dan bapak Ir. Sumarji, S.T., M.T. selaku pembimbing anggota yang tidak ada lelahnya membimbing saya, baik memberikan motivasi, serta arahan selama riset dan penulisan skripsi ini hingga selesai.
3. Kepada Ir. Ahmad Syuhri, M.T. selaku Dosen Penguji Utama dan bapak Ir. Mochamad Edoward Ramadhan, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan kritik dan saran untuk perbaikan skripsi.
4. Bapak Ir. Mahros Darsin, S.T., M.Sc., Ph.D selaku pembimbing tim riset *3D printing* yang tidak ada lelahnya membimbing saya, baik memberikan motivasi, serta arahan selama riset dan penulisan skripsi ini hingga selesai.
5. Mas Made Ivan selaku pembimbing lapangan saya yang tidak ada lelahnya membimbing saya, baik memberikan motivasi, serta arahan selama riset dan penulisan skripsi ini hingga selesai.
6. Bapak Dr. Ir Andi Sanata, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah mendampingi dan membimbing saya selama 4 tahun menjadi mahasiswa Universitas Jember.

7. Dosen dan seluruh karyawan Teknik Mesin Universitas Jember.
8. Bapak saya Gimana dan Ibu saya Tatik Yulianti, serta seluruh keluarga besar saya yang telah memberikan dukungan sehingga skripsi ini dapat selesai pada waktunya.
10. Teman dekat saya yang sudah mau meluangkan waktunya untuk membantu dan mengajari saya dalam proses pengerjaan penelitian saya yaitu Atras, Udin, Guzali, Sulung, Marcel dan Daru.
11. Grup Riset *3D Printing Dual Ekstruder* dan *Metal 3D Printing*.
12. Teman-teman Teknik Mesin Angkatan 2018.
13. Kepada pihak yang telah banyak membantu dan memberi masukan dalam penyelesaian skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Semoga hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat dan wawasan bagi semua pembaca.

Jember, 17 Juni 2023

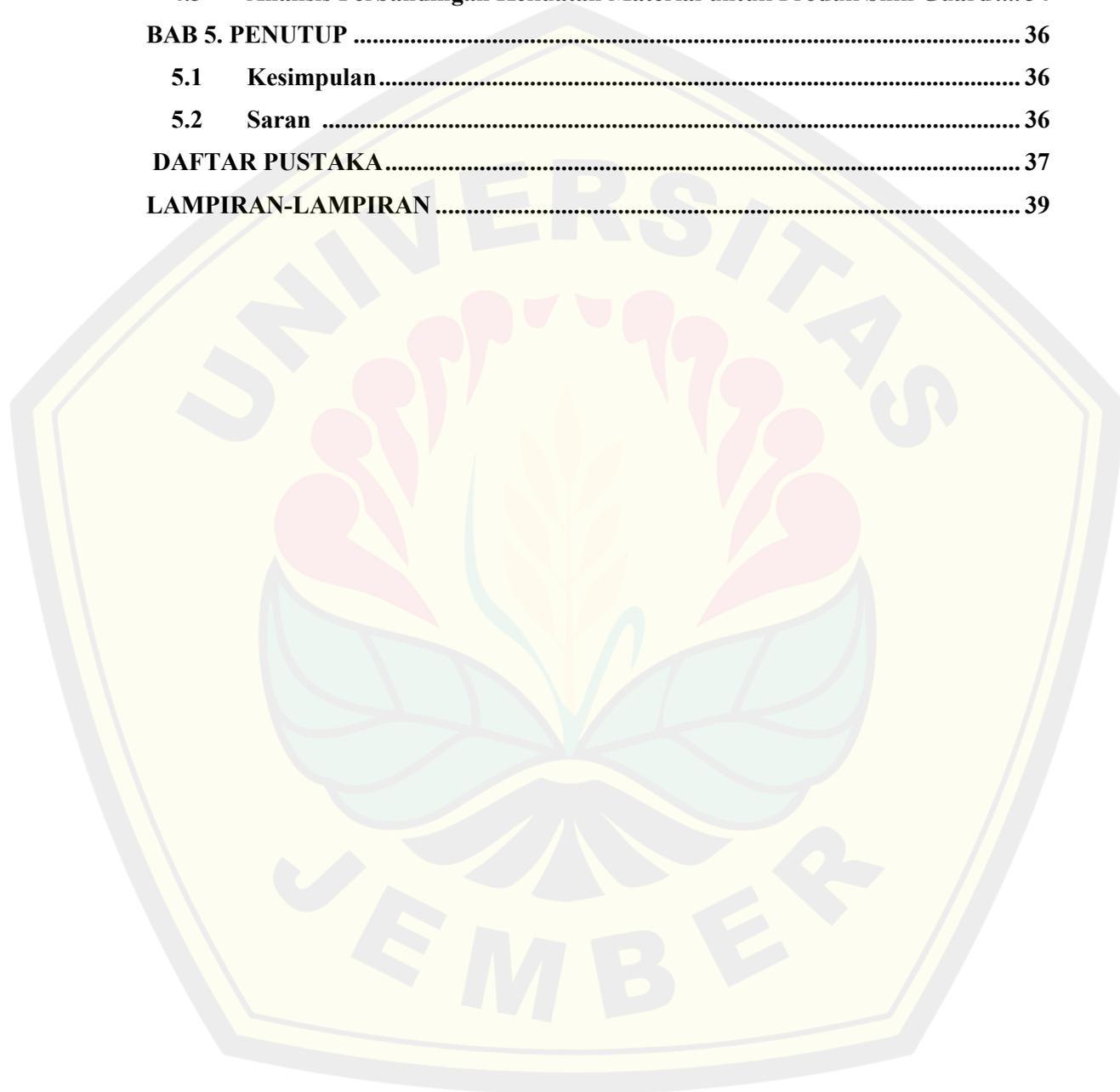
Penulis

DAFTAR ISI

PERSEMBAHAN .....	iii
MOTTO .....	iv
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN .....	vi
ABSTRAK .....	vii
RINGKASAN .....	ix
PRAKATA.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvii
DAFTAR NOTASI.....	xviii
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN .....	xix
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Tujuan Penelitian.....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Manfaat Penelitian.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 Batasan Masalah .....</b>	<b>4</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN TEORI.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Mesin 3D Printing .....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Jenis-Jenis Mesin 3D Printing .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Mekanisme Proses 3D Printing.....</b>	<b>6</b>
2.3.1 Modelling Object 3D .....	6
2.3.2 Proses Pencetakan.....	6
2.3.3 Proses <i>Finishing</i> .....	7
<b>2.4 Parameter pada Mesin 3D Printing.....</b>	<b>7</b>
<b>2.5 Uji Impak.....</b>	<b>7</b>
<b>2.6 Filamen TPU (Thermoplastic Polyurethane) dan PETG (Polyethylene Terephthalate).....</b>	<b>7</b>

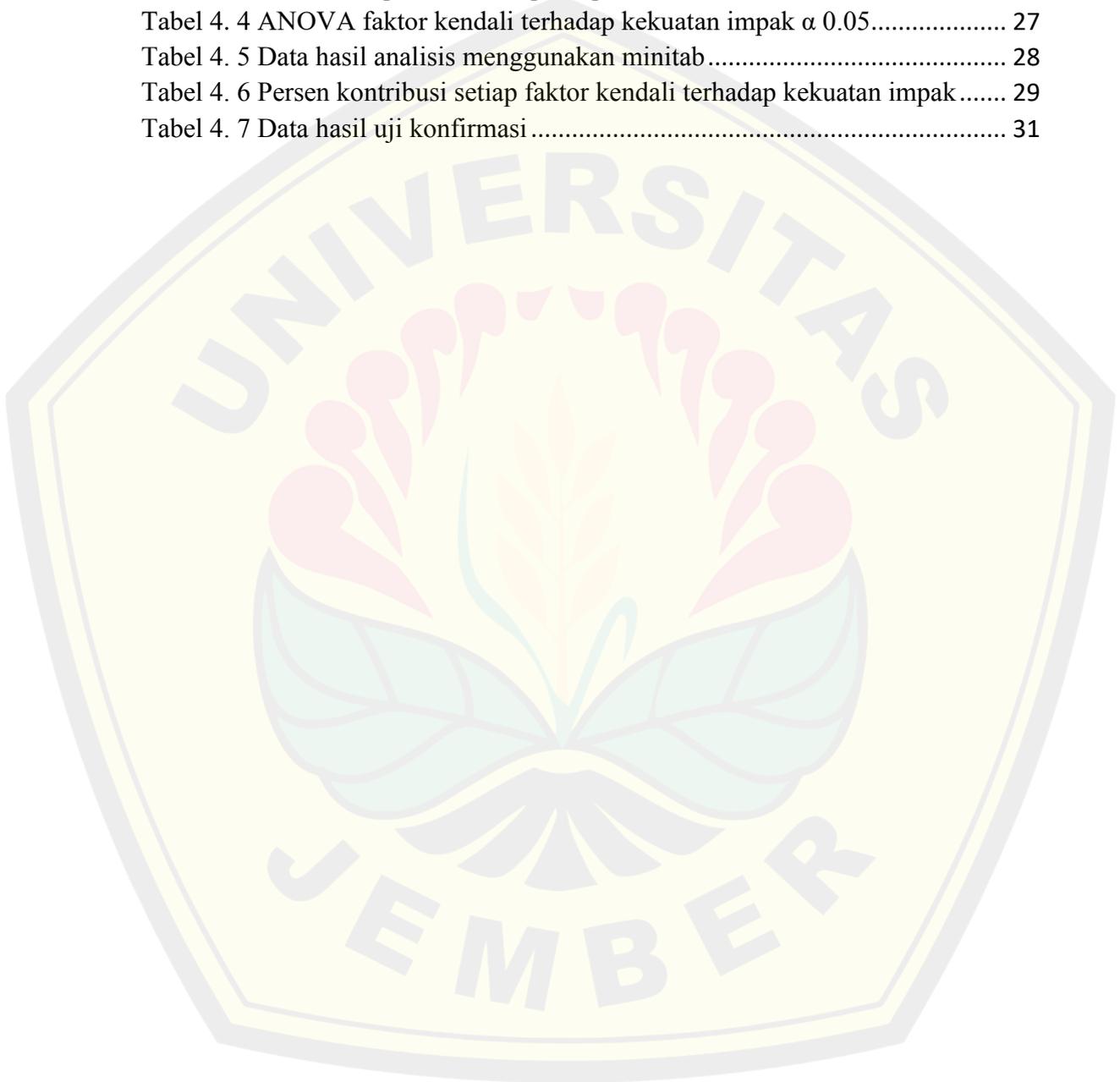
2.7	<b><i>Shin Guard</i></b> .....	8
2.8	<b>Metode Taguchi</b> .....	9
2.8.1	Langkah-langkah Metode Taguchi .....	9
2.8.2	Tahap Perencanaan Eksperimen .....	10
2.9	<b>Pelaksanaan Eksperimen</b> .....	11
2.9.1	Tahap Analisis.....	12
2.9.2	Analisis Variansi (ANOVA).....	12
2.10	<b>Hipotesis</b> .....	13
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....		15
3.1	<b>Metodologi Penelitian</b> .....	15
3.2	<b>Waktu dan Tempat Penelitian</b> .....	16
3.3	<b>Alat dan Bahan</b> .....	16
3.3.1	Alat.....	16
3.3.2	Bahan .....	16
3.4	<b>Rancangan Penelitian</b> .....	16
3.4.1	Variabel Bebas .....	16
3.4.2	Variabel Kontrol .....	17
3.4.3	Variabel Terikat .....	17
3.5	<b>Pelaksanaan Penelitian</b> .....	17
3.5.1	Software Slicer Creality .....	17
3.5.2	Pembuatan Model Spesimen .....	17
3.5.3	<i>Slicing</i> Data dan Pencetakan .....	18
3.5.4	Pengujian Impak Metode Charpy .....	18
3.6	<b>Analisis Data</b> .....	18
3.7	<b>Diagram Alir</b> .....	19
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		20
4.1	<b>Hasil dan Analisis terhadap Kekuatan Impak</b> .....	20
4.1.1	Hasil Pengujian Impak .....	20
4.1.2	Perhitungan <i>Ratio</i> S/N terhadap Kekuatan Impak .....	22
4.1.3	Kombinasi Level Faktor Optimal Uji Impak .....	23
4.1.4	Perhitungan ANOVA terhadap Kekuatan Impak.....	25
4.1.5	Persen Kontribusi terhadap Kekuatan Impak.....	28
4.1.6	Prediksi Respon terhadap Nilai Kekuatan Impak .....	29
4.1.7	Eksperimen Konfirmasi terhadap Kekuatan Impak .....	30

<b>4.2</b>	<b>Pembahasan Pengaruh Parameter .....</b>	<b>31</b>
4.2.1	Pengaruh <i>Layer Height</i> terhadap Kekuatan Impak .....	31
4.2.2	Pengaruh <i>Nozzle Temperature</i> terhadap Kekuatan Impak .....	31
4.2.3	Pengaruh <i>Printing Speed</i> terhadap Kekuatan Impak .....	32
4.2.4	Pengaruh <i>Bed Temperature</i> terhadap Kekuatan Impak.....	33
<b>4.3</b>	<b>Analisis Perbandingan Kekuatan Material untuk Produk Shin Guard ....</b>	<b>34</b>
<b>BAB 5. PENUTUP .....</b>	<b>.....</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Kesimpulan.....</b>	<b>36</b>
<b>5.2</b>	<b>Saran .....</b>	<b>36</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>.....</b>	<b>37</b>
<b>LAMPIRAN-LAMPIRAN .....</b>	<b>.....</b>	<b>39</b>



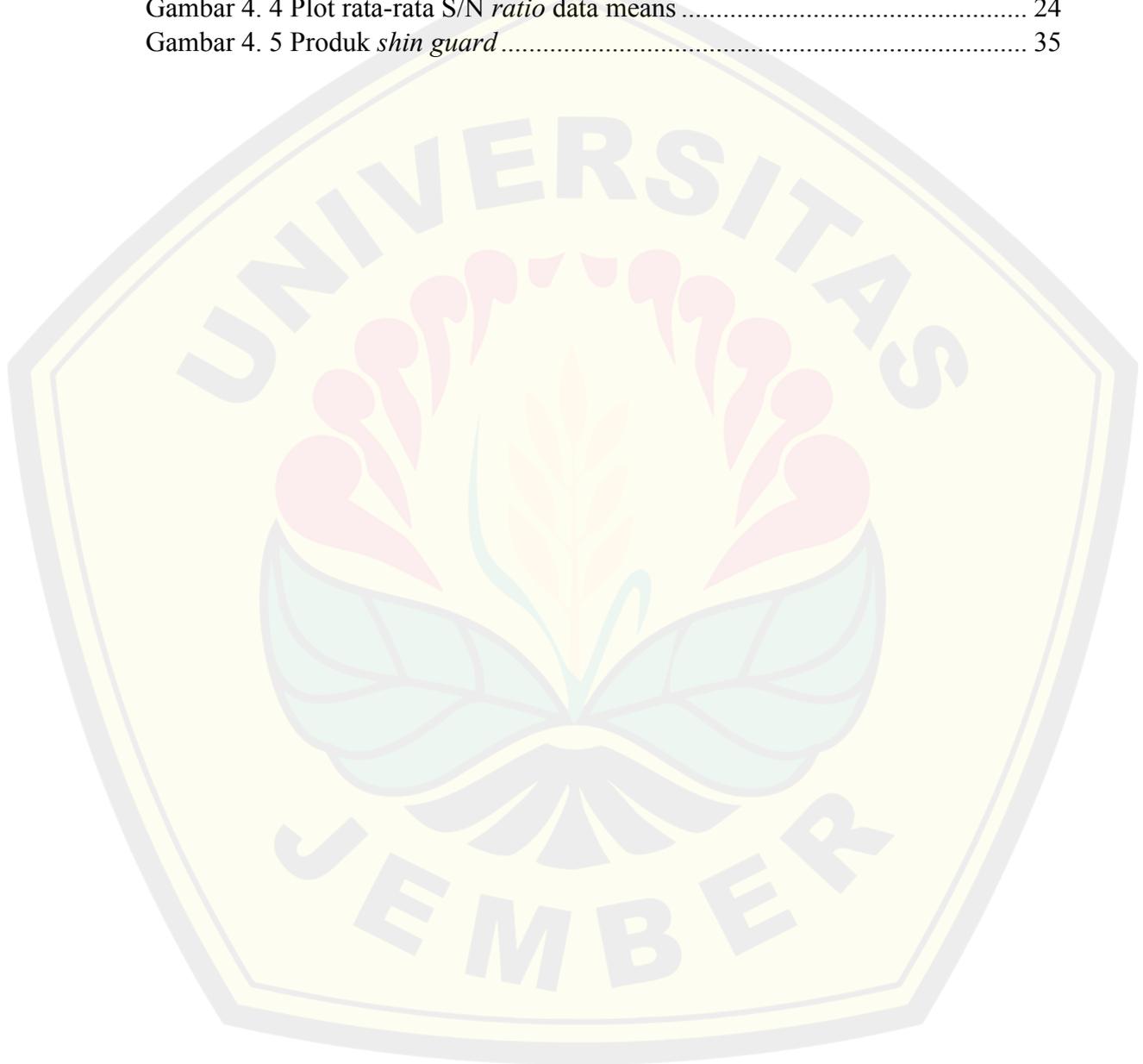
**DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Matriks orthogonal.....	11
Tabel 4. 1 Data hasil pengujian dampak.....	22
Tabel 4. 2 Data hasil perhitungan S/N <i>ratio</i> .....	24
Tabel 4. 3 Kombinasi parameter respon optimal .....	25
Tabel 4. 4 ANOVA faktor kendali terhadap kekuatan dampak $\alpha$ 0.05.....	27
Tabel 4. 5 Data hasil analisis menggunakan minitab.....	28
Tabel 4. 6 Persen kontribusi setiap faktor kendali terhadap kekuatan dampak .....	29
Tabel 4. 7 Data hasil uji konfirmasi .....	31



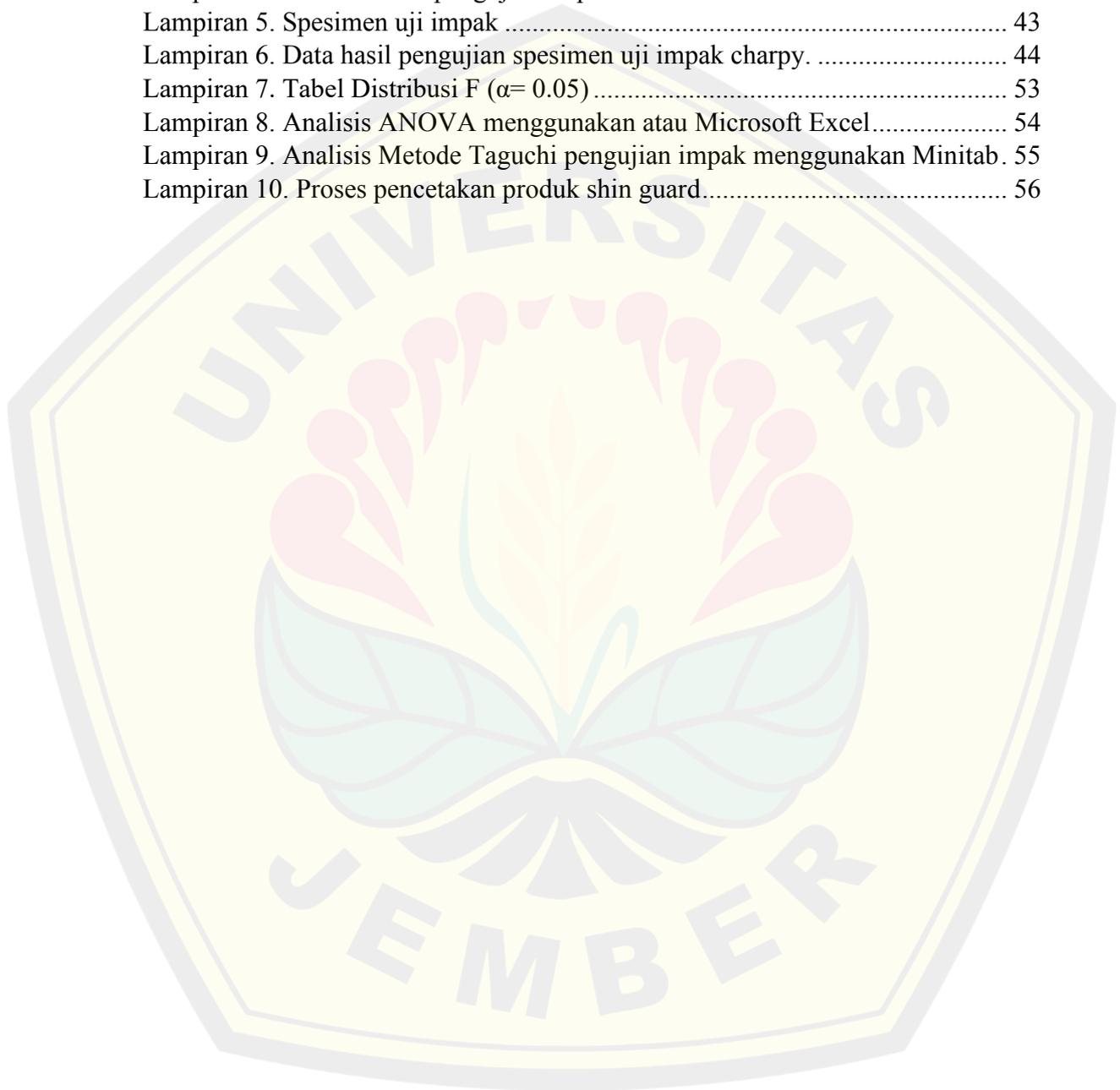
**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1 Skema proses FDM .....	5
Gambar 3. 1 Spesimen uji impak ISO 179-1 .....	18
Gambar 4. 1 Spesimen uji impak .....	20
Gambar 4. 2 Validasi (a) suhu bed temperature dan (b) suhu nozzel .....	21
Gambar 4. 3 Spesimen setelah diuji impak .....	21
Gambar 4. 4 Plot rata-rata S/N <i>ratio</i> data means .....	24
Gambar 4. 5 Produk <i>shin guard</i> .....	35



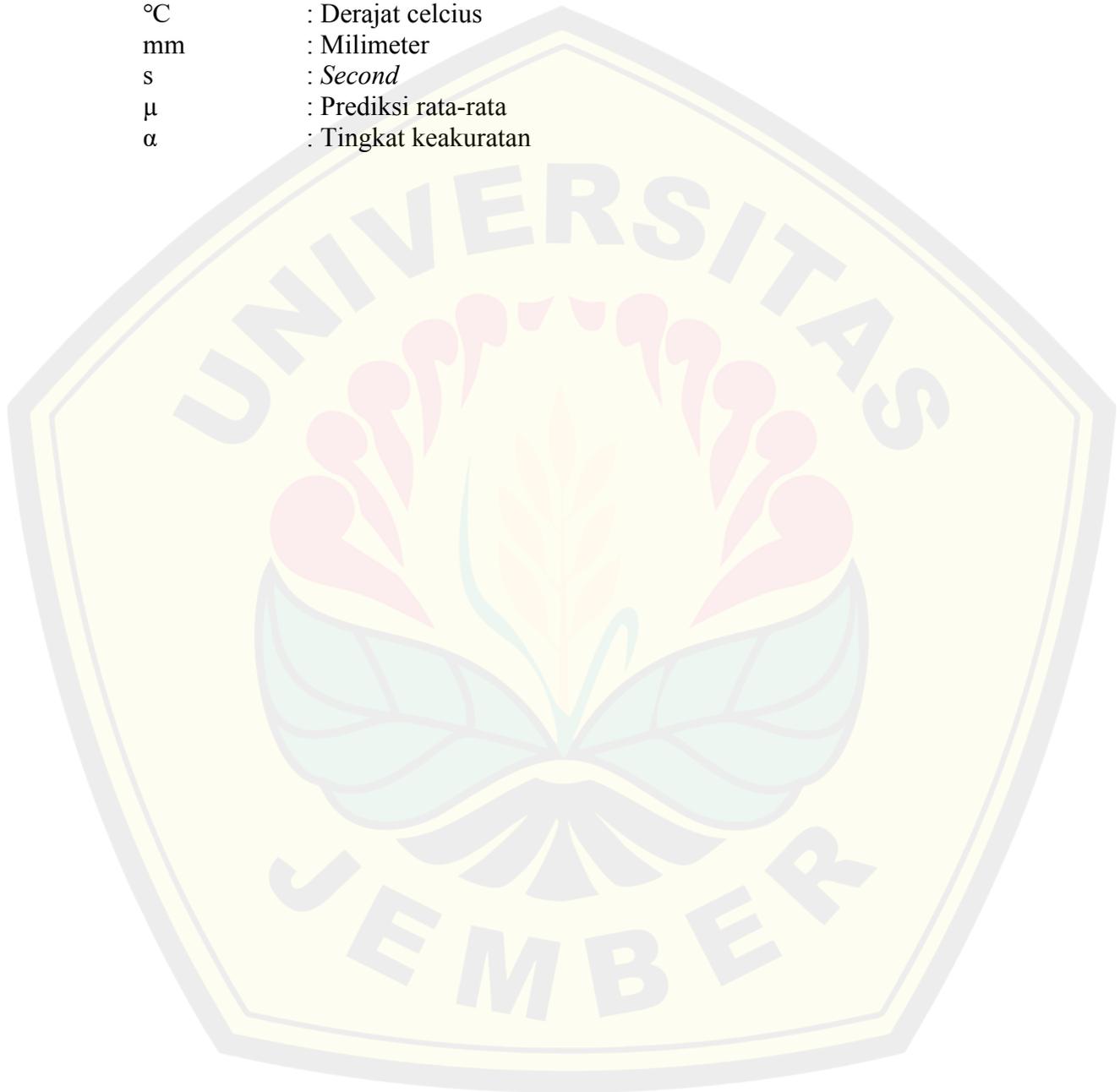
**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1. Rumus anova .....	39
Lampiran 2. Alat pengujian impact charpy dan rumus uji impact.....	40
Lampiran 3. Diagram Alir.....	40
Lampiran 4. Dokumentasi pengujian impact .....	42
Lampiran 5. Spesimen uji impact .....	43
Lampiran 6. Data hasil pengujian spesimen uji impact charpy. ....	44
Lampiran 7. Tabel Distribusi F ( $\alpha= 0.05$ ) .....	53
Lampiran 8. Analisis ANOVA menggunakan atau Microsoft Excel.....	54
Lampiran 9. Analisis Metode Taguchi pengujian impact menggunakan Minitab .	55
Lampiran 10. Proses pencetakan produk shin guard.....	56



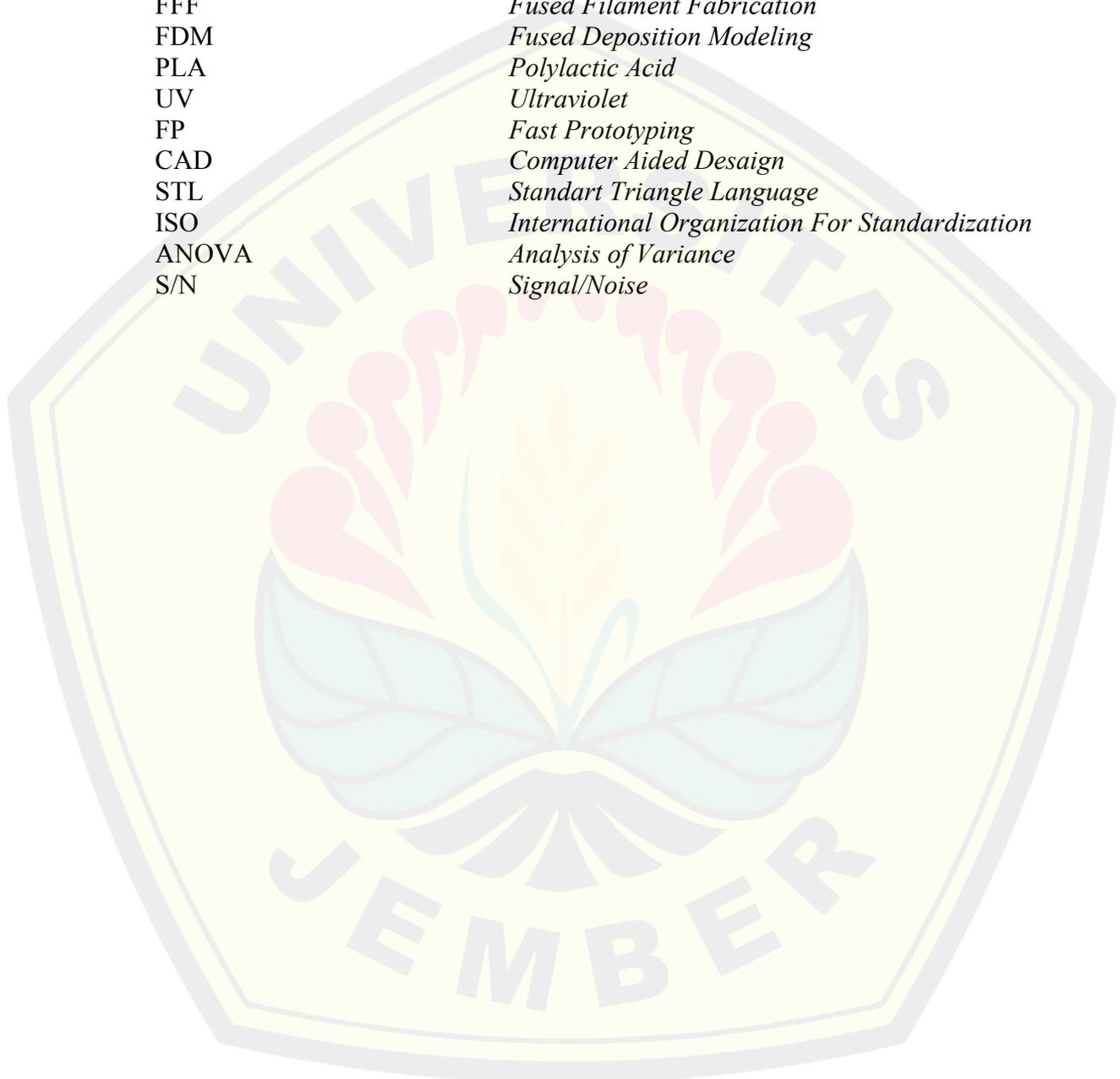
**DAFTAR NOTASI**

L	: Rancangan bujur sangkar latin
$S_T$	: Jumlah kuadrat total
$S_n$	: Jumlah kuadrat percobaan
$S_e$	: Jumlah kuadrat <i>error</i>
$^{\circ}\text{C}$	: Derajat celcius
mm	: Milimeter
s	: <i>Second</i>
$\mu$	: Prediksi rata-rata
$\alpha$	: Tingkat keakuratan



**DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN**

Singkatan/Istilah	Arti dan keterangan
PETG	<i>Polyethylene terephthalate</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
UV	<i>Ultraviolet</i>
FP	<i>Fast Prototyping</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
ISO	<i>International Organization For Standardization</i>
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
S/N	<i>Signal/Noise</i>



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Proses manufaktur pencetakan *3D* merupakan salah satu teknologi penggerak revolusi industri 4.0 yang memiliki potensi besar dan risiko investasi yang sangat rendah. Teknologi percetakan *3D* telah menunjukkan perkembangan yang sangat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Di Indonesia sendiri *3D printing* mulai banyak diminati. Menurut (Ismianti, 2018) berbagai sektor yang sudah mengaplikasikan penggunaan *3D printing* yaitu sektor manufaktur, kesehatan, industri dan olahraga sehingga dengan seiring berjalannya waktu dengan mengikuti kebutuhan berbagai sektor yang semakin beragam tipe dan jenis *3D printing* juga turut berkembang.

Ada beberapa metodologi pencetakan *3D* seperti *stereolithography* (SLA), *selective laser sintering* (SLS), *fused filament fabrication* (FFF) atau *fused deposition modeling* (FDM). Menurut (Aris Setiawan et al., 2018), teknologi FDM adalah salah satu teknologi paling populer. Cara kerja dari mesin FDM yaitu dengan cara melelehkan filamen *thermoplastic* dengan proses ekstrusi melalui *nozzle* yang panas pada *melting temperature* selanjutnya pembuatan dibuat lapis per lapis sampai membentuk sebuah produk. Teknologi FDM memiliki kekurangan karena teknologi ini menggunakan proses *building* perlayer sehingga mengakibatkan permukaan yang didapat terlihat memiliki garis yang menunjukkan batas antar *layer*.

Namun dengan teknologi FDM tersebut saat ini teknologi *3D printing* telah diaplikasikan di berbagai macam bidang. Misalnya di bidang manufaktur, mesin *3D printing* sangat berguna untuk mencetak sebuah produk ataupun *prototype*. Untuk bidang kesehatan mesin *3D printing* dimanfaatkan untuk menciptakan sebuah organ tiruan yang berasal dari sel pasien sebagai contohnya untuk mencetak kaki palsu atau tangan robot. Untuk bidang industri otomotif mesin *3D printing* dimanfaatkan untuk membuat sebuah *sparepart* kendaraan. Sedangkan untuk bidang olahraga mesin *3D printing* dipergunakan untuk

mencetak sebuah produk yang berguna untuk menunjang dalam aktivitas saat olahraga misalnya untuk membuat sebuah pelindung kaki seperti *shin guard*.

*Shin guard* (pelindung tulang kering) adalah perlengkapan pelindung yang digunakan untuk mencegah luka pada bagian bawah kaki selama pertandingan olahraga. *Shin guard* juga harus memberikan kekuatan dan kenyamanan saat digunakan. Namun, perlu diingat bahwa *shin guard* hanya melindungi bagian depan dan dalam kaki. Banyak kasus di mana penggunaan *shin guard* menghasilkan ketidaknyamanan dan cedera pada tulang kering. Saat ini, *shin guard* masih diproduksi dengan metode *injection molding*. Namun, banyak pengguna *shin guard* yang menginginkan bentuk yang khusus atau disesuaikan dengan ukuran kaki mereka. Salah satu solusi yang tepat selain menggunakan proses *injection molding* adalah *3D printing*. Kelebihan dari proses *3D printing*, serta berbagai pilihan yang tersedia, membuat permintaan akan *shin guard custom* dengan *3D printing* semakin meningkat. Beberapa jenis filamen yang cocok untuk pembuatan *shin guard* ini antara lain *thermoplastic polyurethane* (TPU) dan *polyethylene terephthalate* (PETG), karena keduanya memiliki sifat yang sesuai dengan kebutuhan *shin guard*, yaitu tahan benturan.

PETG adalah bahan yang sangat kokoh serta serbaguna dengan ketahanan panas yang besar. PETG merupakan bahan yang bagus untuk mencetak komponen mekanis. PETG umumnya digunakan untuk mencetak objek besar, sebab sifatnya tidak mudah bengkok serta memiliki ketahanan kimia dan ketahanan benturan yang tinggi. Filamen tersebut mempunyai berat jenis  $1.27 \text{ gram/cm}^3$  memerlukan temperatur antara  $220 - 240^\circ\text{C}$  supaya dapat mencair, serta  $60-70^\circ\text{C}$  untuk *bed temperature* (Devsingh et al., 2018). Menurut (Lee et al., 2019), TPU adalah bahan cetak *3D* yang umum. Rantai polimer liniernya menciptakan garis lurus, dengan rantai fleksibel. Oleh karena itu, bahan ini memiliki sifat fleksibilitas, elastisitas dan ketahanan guncangan yang tinggi seperti karet serta termoplastisitas. TPU memiliki ketahanan abrasi dan sobek yang sangat baik serta kekerasan yang tinggi. Selain itu, TPU lebih mudah mengalami deformasi dibandingkan PLA karena elastisitasnya yang tinggi.

Diketahui bahwa filamen TPU dan PETG cukup potensial untuk dijadikan produk *shin guard* berdasarkan penelitian (Prayoga & Puspitasari, 2021). Filamen PETG mempunyai nilai kekuatan uji dampak terbesar pada *layer* 0.3 mm yaitu 1.20 kJ/m<sup>2</sup>. Berdasarkan penelitian (Lee et al., 2019), filamen TPU menunjukkan bahwa, dengan pengisi 100%, tegangan pada sampel TPU kira-kira 10 MPa saat diregangkan hingga 200 mm, terlepas dari ketebalannya. Sifat dari PETG sendiri tahan terhadap benturan, ketahanan terhadap kondisi cuaca, tidak mudah rusak atau warnanya tidak cepat hilang saat terkena sinar UV, tidak berbau saat proses pencetakan, memiliki sifat *adhesive* yang unik sehingga mampu melekat dimeja pemanas dengan baik. Sedangkan TPU memiliki sifat fleksibilitas, elastisitas dan ketahanan guncangan yang tinggi seperti karet serta termoplastisitas. Selain itu, TPU memiliki ketahanan abrasi dan sobek yang sangat baik serta kekerasan yang tinggi sehingga sangat potensial untuk dijadikan produk *shin guard*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dalam proses manufaktur *3D printing* banyak digunakan dalam pembuatan suatu produk sehingga perlu diperhatikan dalam menentukan kombinasi parameter yang tepat untuk memperbaiki suatu kualitas produk. Maka dari itu diperlukan parameter seperti *layer height*, *nozzle temperature*, *printing speed* dan *bed temperature* juga bagaimana hasil pengujian kekuatan dampak bahan TPU + PETG terhadap hasil cetak produk *shin guard*.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian serta pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh *layer height*, *nozzle temperature*, *printing speed* dan *bed temperature* terhadap tingkat kekuatan dampak produk *shin guard 3D printing* dengan filamen TPU + PETG.
2. Mengidentifikasi kombinasi parameter yang menghasilkan nilai kekuatan dampak optimal.

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang bisa diambil dari dilakukanya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memahami pengaruh parameter *layer height*, *nozzle temperature*, *printing speed* dan *bed temperature* terhadap nilai kekuatan impak.
2. Mampu memaksimalkan parameter pada kualitas kekuatan impak spesimen TPU + PETG sebagai produk *3D printing*.

#### 1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah diperlukan untuk menghindari pengkajian atau pembahasan yang tidak perlu agar penyelesaian masalah dapat mudah diatasi. Kemudian penulis akan membatasi masalah yang terkait sebagai berikut:

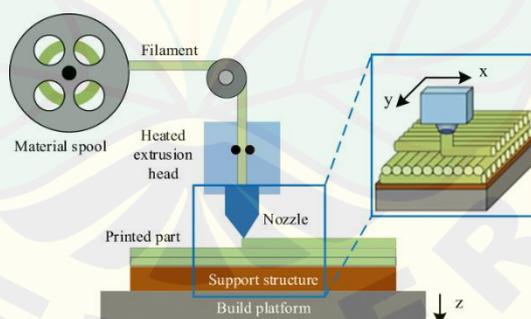
1. Tidak membahas ikatan kimia yang terjadi pada material paduan TPU dan PETG,
2. Menggunakan mesin *3D Printing* Ender-3 V2,
3. Tidak membahas biaya pembuatan produk.

## BAB 2. TINJAUAN TEORI

### 2.1 Mesin 3D Printing

Mesin *3D printing* merupakan inovasi *fast prototyping* (FP) yang dibuat oleh Dr. Kodama dimulai dari Jepang pada tahun 1980. *Prototyping* cepat adalah peralatan yang dapat mencetak *model item* dalam jangka waktu yang sangat singkat cepat. Sistem pencetakan ini disinggung sebagai pencetakan *3D* atau sistem pencetakan menambahkan substansi lapisan fabrikasi yang merupakan metode yang terlibat dengan pembuatan objek dari dokumen tingkat lanjut menjadi objek 3 lapis. Cara kerja pencetakan *3D* adalah dengan proses *layer by layer* yang kemudian ditimpa lagi dengan *layer* hingga menghasilkan objek yang ideal (Kiswanto & Panuju, 2010).

Sampai saat ini, teknik FDM telah banyak digunakan dalam siklus *3D printing* mengingat kenyamanannya, biaya lebih rendah, keramahan iklim dan lebih mudah selama waktu yang dihabiskan untuk perbaikan barang, pembuatan prototipe, terlebih lagi, manufaktur. Dalam jangka panjang, kemajuan inovasi FDM ini tidak hanya sebatas membuat model. Sekarang ada banyak bagian dibuat secara lugas memanfaatkan inovasi FDM ini. Skema proses FDM disajikan pada Gambar 2.1 sebagai berikut:



Gambar 2. 1 Skema proses FDM

### 2.2 Jenis-Jenis Mesin 3D Printing

*3D printing* telah banyak dikembangkan untuk berbagai fungsi dan kebutuhan. Jadi ada banyak jenis mesin dengan prinsip kerja yang berbeda.

Menurut (Putra, 2021) berdasarkan standar *3D printing* diklasifikasikan kedalam 7 kategori, yaitu *directed energy deposition*, *binder jetting*, *material jetting*, *material extrusion*, *sheet lamination*, *powder bed diffusion*, dan *vat photopolymerization*.

### 2.3 Mekanisme Proses 3D Printing

Mekanisme merupakan suatu langkah-langkah yang diperlukan untuk proses pencetakan *3D printing*. Menurut (Pristiansyah & Rollastin, 2021) ada 3 langkah yaitu *modelling object 3D*, proses pencetakan, proses *finishing* sebagai berikut:

#### 2.3.1 Modelling Object 3D

Proses perancangan desain *3D printing* ini dapat menggunakan *software* khusus desain *3D*. Agar benda kerja *3D* bisa dicetak dengan mesin *3D printing* format dari desain benda kerja harus disamakan dengan format yang ada pada mesin *3D printing* agar memudahkan dalam proses pencetakan nantinya. Biasanya *software* CAD disimpan dalam bentuk format STL dan selanjutnya akan dikonversi dari format STL ke *G-code* dengan menggunakan *software creality slicer* sehingga dapat memudahkan untuk mengatur parameter-parameter yang diperlukan dalam proses pencetakan benda kerja *3D printing*.

#### 2.3.2 Proses Pencetakan

Proses pencetakan benda kerja dilakukan menggunakan *3D printing*. Tahapanya dimulai dengan mesin *3D printing menscanning* desain *3D*, selanjutnya mesin akan secara otomatis bergerak, sehingga menjadi model virtual yang akan membentuk sebuah objek benda kerja yang sesuai dengan desain tadi (Bari et al., 2021).

### 2.3.3 Proses *Finishing*

Pada proses *finishing* ini benda kerja dapat diangkat menggunakan kapi agar benda kerja tidak rusak. Selanjutnya dilakukan pembersihan bahan dari sisa-sisa filamen yang tidak diperlukan.

## 2.4 Parameter pada Mesin *3D Printing*

Parameter adalah referensi yang digunakan untuk menetapkan nilai pada mesin sehingga hasil yang diinginkan dapat dicapai. Berikut ini parameter yang ada pada mesin *3D printing nozzle temperature, temperature base plate, layer thickness, print speed, infill pattern, infill density, perimeter, feed, brim width, bed, raft layers, layer*.

## 2.5 Uji Impak

Uji impak ialah sesuatu pengujian yang dicoba untuk menguji ketangguhan sesuatu spesimen apabila diberikan beban secara seketika lewat tumbukan (Susanti, D.N., 2018). Uji impak yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan pada standar ISO 179-1 untuk kekuatan impak plastik material dengan tipe pengujian metode *charpy* serta spesimen diberi takikan di bagian tengah sedalam 0.2 mm V notch A sebagai standar dalam pengujian. Pada uji impak spesimen ini memakai metode *Charpy*. Sesuai standar ISO 179-1, ukuran spesimen uji impak memiliki panjang 80 mm, lebar 10 mm dan ketebalan 4 mm.

## 2.6 Filamen TPU (Thermoplastic Polyurethane) dan PETG (Polyethylene Terephthalate)

*Thermoplastic polyurethane* (TPU) adalah polimer tersegmentasi yang mengandung segmen keras yang tidak larut (HS) dalam segmen lunak (SS) karena ketidakcocokan termodinamikanya. TPU menunjukkan banyak sifat yang sangat baik dalam hal perpanjangan, kekuatan tarik, ketahanan abrasi, ketahanan sobek, dan ketahanan terhadap minyak, bahan bakar, pelarut, dan bahan kimia lainnya (Hu et al., 2020). Untuk mencetak filamen TPU dibutuhkan suhu *extruder* sebesar 190–210°C serta suhu *bed* sebesar 50-80°C.

PETG (*polyethylene terephthalate*) adalah salah satu polimer, yang paling sering digunakan saat ini adalah adaptasi PET dengan perubahan ekspansi *glycol* ke dalam struktur material selama polimerisasi. Hasilnya adalah serat yang lebih jernih, kurang lemah, dan lebih sederhana untuk digunakan, dengan suhu kemajuan gelas 88°C (190°F). Mencetak filamen PETG membutuhkan suhu ekstruder 220-240°C dan suhu *bed* pemanas 50-80°C. Tidak seperti filamen ABS, PETG hampir tidak melengkung. Selain itu, proses pencetakan tidak menimbulkan bau atau asap saat mencetak. Filamen PETG tidak dapat terurai secara hayati, tetapi 100% dapat didaur ulang (Devsingh et al., 2018).

## 2.7 *Shin Guard*

*Shin guard* (pelindung tulang kering) adalah perlengkapan yang dikenakan di bagian depan tulang kering atlet guna melindunginya dari benturan luka. Ini umumnya digunakan dalam berolahraga termasuk sepak bola, bisbol, hoki es, hoki lapangan, *lacrosse*, kriket, uji coba sepeda gunung, serta berolahraga yang lain. Menurut (Amri, 2021), untuk memilih desain *shin guard* agar efektif ketika dipakai dan tidak mengganggu penggunaannya dibutuhkan kriteria desain menjadi acuan desain. Jika ingin mendapatkan ukuran *shin guard* yang proporsional dengan cara mengukur kaki penggunaannya. Menurut (Yasar, 2014), gaya maksimum yang diukur oleh sensor yang dipasang didepan tibia dibawah pelindung tulang kering adalah rata rata 26.49 – 79.36 N dan posisi yang harus terlindungi oleh *shin guard*, yaitu 50 mm di bawah lutut sampai lekukan pergelangan kaki. Spesifikasi mekanik *shin guard* dapat meliputi beberapa hal berikut:

1. Kekuatan *shin guard* harus memiliki kekuatan yang cukup untuk melindungi kaki dan tulang kering dari benturan atau tumbukan yang keras.
2. Fleksibilitas *shin guard* juga harus cukup fleksibel untuk memungkinkan gerakan bebas pada kaki dan tidak mengganggu pergerakan pemain.
3. Ringan *shin guard* harus cukup ringan untuk memudahkan pemain dalam bergerak.
4. Kestabilan dimensi *shin guard* harus tetap mempertahankan dimensinya dan tidak mengalami deformasi saat terkena tekanan atau benturan.

5. Resistansi terhadap abrasi *shin guard* harus tahan terhadap aus dan robekan yang terjadi selama pemakaian.
6. Keringat dan air *shin guard* harus mampu menyerap keringat dan tidak mudah rusak oleh paparan air atau kelembapan.
7. Sifat antibakteri *shin guard* harus memiliki sifat antibakteri untuk mencegah pertumbuhan bakteri dan jamur pada permukaannya.

Namun, spesifikasi mekanik *shin guard* dapat bervariasi tergantung pada kebutuhan aplikasi dan kondisi penggunaannya. Oleh karena itu, diperlukan pengujian dan analisis terhadap *shin guard* untuk memastikan spesifikasi mekanik yang tepat dan memenuhi kebutuhan penggunaannya.

## 2.8 Metode Taguchi

Metode Taguchi dalam bidang *engineering* berperan untuk memperbaiki proses, karakteristik benda kerja, dapat menekan biaya dan resourcesesemaksimal mungkin. Dengan menggunakan metode ini diharapkan bisa kurangi *noise* yang biasa ditemui pada metode - metode konvensional. Alasan dipilihnya metode Taguchi selaku metode pengambilan informasi disebabkan keunggulan yang ditawarkan oleh metode ini misal lebih efisien karena dapat melaksanakan penelitian dengan melibatkan banyak faktor dan level, dapat mendapatkan proses yang menghasilkan benda kerja secara konsisten dan kokoh terhadap parameter yang tidak dapat dikontrol dan menghasilkan kesimpulan dalam hal level dari parameter kontrol yang menghasilkan respon optimum.

### 2.8.1 Langkah-langkah Metode Taguchi

Adapun langkah-langkah metode Taguchi dalam sebuah eksperimen adalah menentukan tujuan dari proses atau lebih khususnya lagi target *value* untuk pengukuran performansi dari suatu proses, menentukan parameter desain yang memberikan efek terhadap proses, membuat *orthogonal arrays* untuk desain parameter yang mengindikasikan jumlah dan kondisi dari masing-masing eksperimen, menghubungkan eksperimen yang diindikasikan pada *array* yang sudah selesai untuk mengumpulkan data pada efek dari pengukuran performansi,

melengkapi data analisis untuk menentukan efek dari berbagai parameter berbeda pada pengukuran performansi.

### 2.8.2 Tahap Perencanaan Eksperimen

#### a. Perumusan masalah

Langkah pertama adalah merumuskan atau mendefinisikan masalah atau fokus yang akan diselidiki dalam eksperimen.

#### b. Tujuan eksperimen

Tujuan eksperimen harus dapat menjawab apa yang telah dinyatakan pada perumusan masalah yaitu mencari sebab yang menjadi akibat pada masalah yang kita amati.

#### c. Penentuan respon

Respon memiliki nilai yang tergantung pada parameter-parameter lain yang disebut variabel bebas.

#### d. Pengidentifikasian parameter bebas

Parameter bebas adalah variabel yang perubahannya tidak tergantung pada variabel lain.

#### e. Pemisahan parameter kontrol dan parameter gangguan

Parameter-parameter yang akan diamati dapat dibagi menjadi parameter kontrol dan parameter gangguan, keduanya perlu diidentifikasi dengan jelas sebab pengaruh antar kedua parameter tersebut berbeda. Parameter kontrol adalah parameter yang nilainya dapat dikendalikan sedangkan parameter gangguan adalah parameter yang nilainya tidak dapat dikendalikan.

#### f. Penentuan jumlah dan nilai level parameter

Pemilihan jumlah level artinya akan mempengaruhi ketelitian hasil dan biaya pelaksanaan eksperimen. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil eksperimen yang diperoleh akan semakin akurat, tetapi biaya yang harus dikeluarkan akan semakin besar.

#### g. Perhitungan derajat kebebasan

Perhitungan derajat kebebasan dilakukan untuk menentukan jumlah percobaan yang akan dilakukan untuk menyelidiki parameter yang diamati. Derajat kebebasan dari matriks orthogonal ( $v_{mo}$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan. Derajat kebebasan dari parameter dan level ( $v_{fl}$ ) dapat menggunakan persamaan

h. Pemilihan matriks orthogonal

Pemilihan matriks orthogonal yang sesuai ditentukan oleh jumlah derajat kebebasan dari jumlah parameter dan jumlah level parameter. Pemilihan matriks *orthogonal* digunakan untuk menentukan jumlah eksperimen yang akan dilakukan. Matrik *orthogonal* memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah parameter dengan jumlah percobaan minimum “ $L_a(b^c)$ ” keteranganya adalah L yaitu rancangan bujur sangkar latin, a yaitu banyak baris atau eksperimen yaitu banyak level, c yaitu banyak kolom atau faktor. Berikut matriks orthogonal disajikan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Matriks orthogonal

<b>Matriks Orthogonal <math>L_9 (3^4)</math></b>				
<b>Faktor</b>				
Faktor	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

## 2.9 Pelaksanaan Eksperimen

Menurut (Soejanto, 2009) menerangkan bahwa tahap eksperimen dibagi jadi dua perihal ialah penetapan replikasi dan randomisasi dalam penerapan eksperimen.

1. Pengulangan ialah wujud perlakuan yang sama di dalam keadaan yang sama pada percobaan untuk menggapai tingkatan akurasi yang lebih besar.

Perihal tersebut dicoba untuk kurangi tingkatan kesalahan dan memperoleh perkiraan harga untuk kesalahan tersebut.

2. Randomisasi dicoba guna membandingkan pengaruh parameter tidak terkontrol di seluruh satuan percobaan serta mengaplikasikan peluang serta keadaan yang sama untuk seluruh eksperimen yang dicoba. Bila tujuan replikasi merupakan untuk membolehkan uji signifikansi dicoba, pengacakan dengan tujuan untuk membenarkan uji signifikansi tidak ada terdapatnya bias.

### 2.9.1 Tahap Analisis

Menurut (Soejanto, 2009), tahap analisis meliputi proses pengumpulan informasi, pengolahan, dan perhitungan informasi serta ulasan informasi dalam sesuatu tampilan tertentu. Tidak hanya langkah tersebut, dicoba pula pengujian statistik selaku berikut:

1. ANOVA Taguchi ialah metode yang diaplikasikan buat menganalisa informasi yang sudah didapatkan dalam perencanaan eksperimen secara statistik. Analisa ini ialah metode teknik untuk merepresentasikan parameter yang diuji.
2. *Ratio Signal to Noise* ataupun biasa disingkat *ratio S/N*, digunakan selaku metode untuk menunjang mengurangi variabilitas dalam reaksi. Pemanfaatan *ratio S/N* digunakan untuk menguasai berapa besar pengaruh aspek terhadap reaksi wujud ciri *ratio signal to noise large is better* ataupun semakin besar *index* hasil, semakin baik. Dimana semakin besar nilai *index* yang dihasilkan dari suatu pengujian, maka semakin baik hasil spesimen tersebut.

### 2.9.2 Analisis Variansi (ANOVA)

Dalam menganalisa hasil eksperimen dari Taguchi ini menggunakan Analisis Variansi yaitu perhitungan jumlah kuadrat ( $S_T$ ) S terhadap rata-rata ( $S_n$ ), S faktor atau S *error* ( $S_e$ ). Interpretasi yang dilakukan adalah menentukan persen kontribusi. Dalam metode Taguchi, ANOVA dimanfaatkan selaku pengukuran

statistik untuk merepresentasikan informasi yang ditemui dalam eksperimen. Analisis varian memungkinkan untuk melaksanakan kalkulasi secara kualitatif dan mengestimasi donasi dari masing-masing aspek pada pengukuran reaksi yang sudah diseleksi (Soejanto, 2009).

1). Persen Kontribusi

Merupakan porsi masing-masing faktor atau interaksi faktor yang signifikan terhadap total variansi yang diamati. Persen kontribusi merupakan fungsi dari jumlah kuadrat ( $SS$ ) dari masing-masing faktor yang signifikan. Yang merupakan indikasi kekuatan relatif dalam mereduksi variansi. Berikut adalah Langkah-langkah mencari persen kontribusi dan Lampiran 1.

- a)  $ST$ - jumlah kuadrat total
- b)  $S_{Faktor}$ - jumlah kuadrat faktor jumlah kuadrat faktor A
- c)  $Se$ - jumlah kuadrat *error* jumlah kuadrat *error*
- d)  $SA'$ -Jumlah kuadrat sesungguhnya dari faktor A
- e)  $Mq$ - rata-rata kuadrat tiap faktor

2). Uji F

Hasil analisis varian tidak membuktikan adanya perbedaan perlakuan dan pengaruh faktor dalam percobaan, pembuktian ini dilakukan dengan uji hipotesa F. Uji F dilakukan dengan mencari nilai  $F_{ratio}$  dan membandingkannya dengan nilai  $F$  tabel.

### 2.10 Hipotesis

Penelitian ini membahas analisis parameter optimal untuk meningkatkan kekuatan impak dalam hasil cetakan menggunakan mesin *3D printing* dengan filamen campuran TPU dan PETG sebagai bahan dasar produk. Parameter diamati meliputi *layer height*, *nozzle temperature*, *printing speed* dan *bed temperature*. Sehingga dapat diketahui yaitu:

- a. *Layer height* dengan ukuran standar memberikan hasil yang optimal
- b. Pemilihan *nozzle temperature* dengan suhu yang sesuai akan menghasilkan nilai kekuatan nilai yang optimal

- c. Semakin tinggi *printing speed* maka akan menghasilkan kekuatan yang optimal
- d. Pemilihan *bed temperature* dengan suhu yang sesuai akan menghasilkan nilai yang baik dan memiliki kekuatan yang optimal.
- e. Paduan kedua material menghasilkan produk dengan kekuatan yang lebih baik.
- f. Parameter optimal dapat dimaksimalkan untuk menunjang kualitas produk *shin guard*.



## BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metodologi Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah jenis ekperimental dan analisis yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi parameter pada proses pencetakan *3D printing* terhadap sifat bentur spesimen uji impak dengan filamen TPU + PETG. Spesimen uji impak yang akan di cetak menggunakan standar ISO 179-1. Berikut adalah proses pembuatan *shin guard 3D printing* dari order hingga pembuatan, serta mengapa perlu data pengujian dan analisis Taguchi:

1. Pemesanan pelanggan melakukan pemesanan dengan memberikan spesifikasi produk yang diinginkan, seperti ukuran, bentuk, desain dan kekuatan impak.
2. Desain tim desain menggunakan perangkat lunak CAD (*Computer-Aided Design*) untuk membuat model *3D* dari *shin guard* sesuai dengan spesifikasi pelanggan.
3. Pemilihan material berdasarkan spesifikasi dari pelanggan, dipilih material yang sesuai untuk mencetak *shin guard*, seperti TPU dan PETG.
4. *3D printing* proses pencetakan *shin guard* dilakukan dengan menggunakan *3D printing*. Setelah mencetak, *shin guard* kemudian dipotong dan dibersihkan untuk menghasilkan produk yang selesai.
5. Pengujian impak produk *shin guard* kemudian diuji untuk mengetahui seberapa tahan terhadap benturan. Hal ini dilakukan untuk mengevaluasi kualitas produk dan menentukan apakah perlu dilakukan peningkatan atau perbaikan pada desain dan material.
6. Analisis Taguchi hasil dari pengujian impak kemudian dianalisis menggunakan metode Taguchi untuk mengoptimalkan kualitas produk. Hal ini meliputi identifikasi faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kekuatan impak, penentuan kombinasi parameter yang optimal dan verifikasi hasil yang telah diperoleh.

Dengan demikian, melalui pengujian impak dan analisis Taguchi, dapat dihasilkan *shin guard 3D printing* yang memiliki kualitas yang optimal dan memenuhi standar yang diinginkan oleh pelanggan.

### **3.2 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini mulai pada Oktober 2022 sampai juni 2023 dilaksanakan di Gedung Laboratorium Perancangan Mekanik Isdb, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik mesin, Universitas Jember.

### **3.3 Alat dan Bahan**

Alat dan bahan pada penelitian ini tidak jauh dari penelitian-penelitian tentang *3D printing* sebagai berikut:

#### **3.3.1 Alat**

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian seperti laptop, autodesk inventor 2020 (*student version*), *software* creality slicer, mesin uji impak, mesin *3D printing*, jangka sorong digital, kapi, tang potong, peralatan reparasi, *usb card reader*, penggaris, *feller gauge*, *software* minitab 19.1.1.0.

#### **3.3.2 Bahan**

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah filamen TPU + PETG digunakan sebagai bahan dalam pembuatan spesimen.

### **3.4 Rancangan Penelitian**

Dalam rancangan penelitian berisi tentang variabel bebas, variabel kontrol, variabel terikat yang akan dibawah dibawah ini.

#### **3.4.1 Variabel Bebas**

Variabel bebas, ataupun diketahui sebagai koefisien kontrol ialah variabel yang sanggup dikontrol dan mempunyai nilai yang bisa di tetapkan sesuai dengan studi dan pertimbangan. Faktor bebas yang diseleksi dalam studi ini diantara lain

*layer height* 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, *nozzle temperature* 220 °C ,225 °C ,230 °C, *printing speed* 40 mm/s, 45 mm/s, 50 mm/s, *bed temperature* 70 °C, 75 °C, 80 °C.

#### 3.4.2 Variabel Kontrol

Variabel kontrol ialah variabel yang dibuat sama dalam satu studi, pada penelitian ini penulis memastikan sebagian variabel kontrol sebagai berikut:

*Infill density* 100%, *fan Speed* 100%, filamen diameter 1.75 ( $\pm 0.05$ ), *outer perimeter* 2, *nozzle diameter* 0.4 mm, *pattern line*.

#### 3.4.3 Variabel Terikat

Variabel terikat ialah variabel yang tidak bisa dikalkulasi dan nilainya terpengaruh oleh proses yang diberikan dan hasilnya mengalami setelah melaksanakan eksperimen. Variabel terikat yang ditetapkan dalam studi ini merupakan uji impak.

### 3.5 Pelaksanaan Penelitian

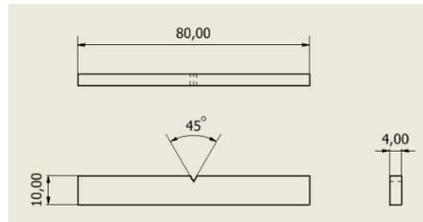
Adapun pelaksanaan penelitian meliputi beberapa hal, yaitu dari awal proses desan spesimen uji impak hingga analisis data. Berikut merupakan tahapan pelaksanaan yaitu.

#### 3.5.1 Software Slicer Creality

Software slicer creality ini digunakan untuk memasukkan parameter dan untuk mendapatkan G-code serta menjalankan mesin *3D printing*.

#### 3.5.2 Pembuatan Model Spesimen

Pembuatan model spesimen uji dengan menggunakan aplikasi autodesk inventor. Adapun jenis spesimen yang digunakan dalam pengujian impak ini adalah sesuai standar ISO 179-1, ukuran spesimen uji impak memiliki panjang 80 mm, lebar 10 mm dan ketebalan 4 mm disajikan pada Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Spesimen uji impak ISO 179-1

### 3.5.3 *Slicing* Data dan Pencetakan

*Slicing* data dilakukan dengan aplikasi slicer creality, guna untuk mengubah file model (STL) menjadi file (*G-code*) untuk pencetakan. Setelah mendapatkan *G-code* selanjutnya, proses pencetakan spesimen dengan filamen TPU + PETG dengan parameter proses yang sudah ditentukan.

### 3.5.4 Pengujian Impak Metode Charpy

Pengujian impak spesimen ini berdasarkan standar ISO 179-1, dengan takik membelakangi pendulum yang akan menumbuk spesimen. Gambar dan rumus terdapat pada Lampiran 2.

## 3.6 Analisis Data

Metode analisis yang digunakan adalah *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tahapan analisis sebagai berikut:

1. Studi literatur jurnal dan penelitian sebelumnya yang digunakan untuk referensi terkait Pengaruh Variasi Parameter *3D Printing* Terhadap Hasil Produk *Shin Guard* Dengan Filamen TPU + PETG,
2. Pengambilan data nilai kekuatan impak dapat diketahui dengan cara mencari nilai tertinggi terhadap nilai rata-rata nilai impak dengan menggunakan alat uji impak. Data diambil dari desain orthogonal array L9(4<sup>3</sup>) yang telah disajikan pada tabel diatas,
3. Tahap analisis
  - a. Menentukan *Ratio S/N*

*Ratio S/N* merupakan analisa untuk mengetahui level faktor yang berpengaruh pada hasil eksperimen.

b. *Analysis of Variance* (ANOVA)

Merupakan Analisa yang bertujuan untuk mengetahui beberapa faktor yang berpengaruh signifikan pada kinerja produk menggunakan *ratio S/N* yang mewakili keseluruhan.

c. Uji F

Uji F dilakukan untuk menentukan adanya pengaruh dari faktor terhadap respon.

d. Menentukan persen kontribusi

Persen kontribusi berfungsi menentukan perbandingan pengaruh tiap-tiap faktor dalam percobaan penelitian.

### 3.7 Diagram Alir

Diagram alir adalah gambaran sebuah proses dalam sebuah penelitian untuk memudahkan dalam pemaparan penelitian. Diagram alir dapat dilihat pada Lampiran 3.

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil dan Analisis terhadap Kekuatan Impak

#### 4.1.1 Hasil Pengujian Impak

Proses pengambilan data pada penelitian ini adalah dengan melakukan pengujian untuk mendapatkan hasil kekuatan impak pada spesimen hasil dari pencetakan *3D printing* dengan filamen campuran antara TPU + PETG. Pengujian impak dilakukan di Laboratorium PUTP, Politeknik ATMI Surakarta, jln Mojo no 1, Karangasem, Kecamatan Laweyan, Kota Surakarta, Jawa Tengah. Alat uji yang digunakan pada penelitian ini adalah mesin uji impak Zwick/Roell. Pengujian dilakukan dengan metode uji impak *charpy* satu titik di belakang takikan sehingga spesimen mengalami benturan pada bagian tengah hingga mengalami patahan. Hal ini terjadi karena pembebanan yang diberikan adalah pada titik tengah spesimen dapat dilihat pada Lampiran 4. Gambar spesimen uji impak menggunakan ISO 179-1 sebelum dilakukakan pengujian impak charpy dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan Lampiran 5.



Gambar 4.1 Spesimen uji impak

Terlihat pada Gambar 4.1 menunjukkan spesimen belum diuji. Spesimen mempunyai panjang total 80 mm, lebar 10 mm dan tebal 4 mm. Jumlah yang dicetak adalah 9 variasi parameter dan dalam tiap variasinya dilakukan 3 kali replikasi sehingga spesimen yang dihasilkan sebanyak 27 spesimen. Parameter yang digunakan dalam proses pencetakan *3D printing layer height, nozzle temperature, printing speed, bed temperature*. Dalam proses pencetakan menggunakan variasi *layer height* 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm, *nozzle temperature* 220°C, 225°C, 230°C,

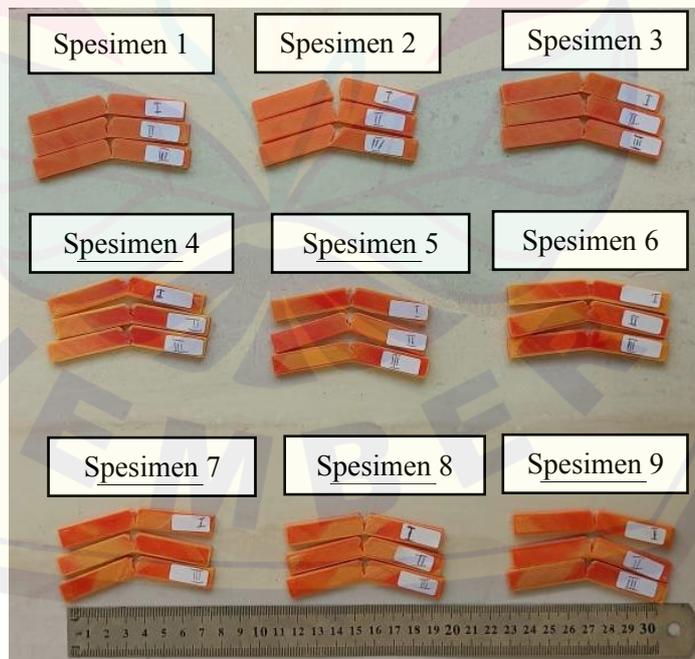
*printing speed* 40 mm/s, 45 mm/s, 50 mm/s, *bed temperature* 70°C, 75°C, 80°C.

Berikut yang ditampilkan pada Gambar 4.2 merupakan foto validasi suhu nozzle.



Gambar 4. 2 Validasi (a) suhu *bed temperature* dan (b) suhu nozzle

Hasil pengujian impak yang diterima dari Laboratorium PUTP, Politeknik ATMI Surakarta merupakan data yang sudah siap diolah. Gambar 4.3 merupakan spesimen uji impak yang telah diuji serta Lampiran 4 terdapat gambar spesimen uji impak sebelum diuji. Tabel 4.1 merupakan data hasil pengujian impak charpy dan pada Lampiran 4 hasil resmi pengujian impak.



Gambar 4. 3 Spesimen setelah diuji impak

Tabel 4. 1 Data hasil pengujian dampak

No	Faktor Kendali				Hasil Uji Impak (kJ/m <sup>2</sup> )			Rata-Rata	S/N Ratio
	Layer Heigt	Nozzle Temperature	Printing Speed	Bed Temperature	1	2	3		
1	0.1	220	40	70	11.64	14.64	10.53	12.27	21.53
2	0.1	225	45	75	10.42	10.22	15.87	12.17	21.20
3	0.1	230	50	80	12.08	11.6	9.53	11.07	20.74
4	0.2	220	45	80	25.52	28.7	27.39	27.20	28.66
5	0.2	225	50	70	18.83	26.53	29.64	25.00	27.46
6	0.2	230	40	75	15.41	35.87	27.89	26.39	26.79
7	0.3	220	50	75	22.09	23.81	25.17	23.69	27.45
8	0.3	225	40	80	10.03	14.58	15.98	13.53	22.08
9	0.3	230	45	70	16.28	14.37	14.19	14.95	23.44
<b>Total</b>								<b>18.47</b>	

Dapat dilihat pada Tabel 4.1 data pengujian dampak terdapat nilai tertinggi rata-rata kekuatan dampak adalah 27.20 kJ/m<sup>2</sup> oleh kombinasi parameter 4 sedangkan kekuatan dampak terendah didapatkan nilai 11.07 kJ/m<sup>2</sup> oleh kombinasi parameter 3 dan untuk rata-rata total 18.47 kJ/m<sup>2</sup>.

#### 4.1.2 Perhitungan *Ratio* S/N terhadap Kekuatan Dampak

*Ratio* S/N (Signal to Noise) adalah perbandingan antara sinyal (yang dapat dikendalikan) dengan derau (yang tidak dapat dikendalikan). *Ratio* ini mengukur tingkat kinerja dibandingkan dengan tingkat gangguan pada kinerja. *Ratio* S/N menilai stabilitas karakteristik output yang dihasilkan. Kinerja dapat diukur berdasarkan tingkat *ratio* S/N. Ada beberapa karakteristik yang dapat dihitung menggunakan metode *ratio* S/N, antara lain semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik, atau terfokus pada nilai normal.

Dalam penelitian ini, metode *ratio* S/N dengan karakteristik semakin besar semakin baik dipilih. Alasannya adalah karena semakin besar nilai kekuatan dampak yang dihasilkan, semakin baik pula kualitas produknya. Contoh perhitungan *ratio*

S/N dengan nilai kekuatan impak menggunakan rumus *larger is better* pada hasil kombinasi parameter pertama dapat diberikan sebagai berikut.

$$\frac{S}{N} \text{ Ratio}/1 = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right]$$

$$\frac{S}{N} \text{ Ratio}/1 = -10 \log \left[ \frac{1}{3} \left( \frac{1}{(11.64)^2} + \frac{1}{(14.64)^2} + \frac{1}{(10.53)^2} \right) \right]$$

$$S/N \text{ Ratio} = 21.53$$

Hasil perhitungan S/N *ratio* terhadap nilai hasil kekuatan impak secara lengkap mengenai semua kombinasi parameter dan replikasi dapat dilihat dari Tabel 4.1 diatas dan pada Lampiran 7.

#### 4.1.3 Kombinasi Level Faktor Optimal Uji Impak

Pada perancangan percobaan menggunakan metode Taguchi dalam sebuah penelitian bertujuan untuk mendapatkan kombinasi faktor yang optimal. Faktor dan level yang paling optimal didapatkan dari perhitungan nilai *ratio* S/N dari parameter *layer height* level 1 sebagai berikut:

$$\bar{A}_1 = \frac{21.53 + 21.20 + 20.74}{3}$$

$$\bar{A}_1 = \frac{63.47}{3}$$

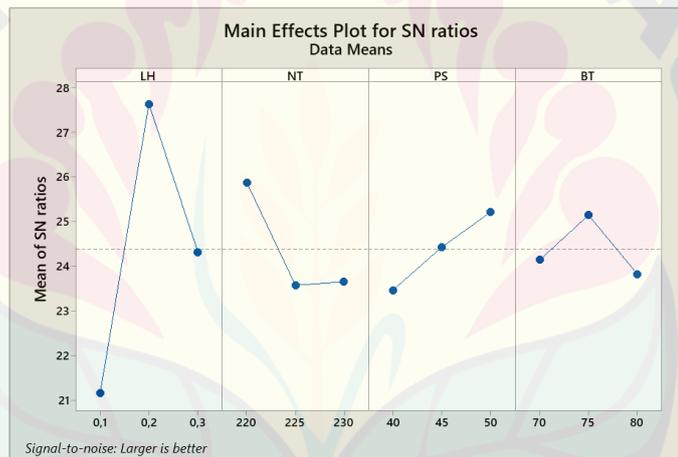
$$\bar{A}_1 = 21.16$$

Hasil perhitungan *ratio* S/N terhadap nilai kekuatan impak dari masing-masing faktor dengan *delta* merupakan selisih hasil S/N *ratio* tertinggi dan terendah dengan *delta* tertinggi 6.48 pada parameter *layer height* yang menempati *rank* 1 dan *delta* terendah 1.32 pada *bed temperature* dengan menempati *rank* 4. disajikan pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Data hasil perhitungan S/N *ratio*

Level	<i>Layer Height</i> (LH)	<i>Nozzle Temperature</i> (NT)	<i>Printing Speed</i> (PS)	<i>Bed Temperature</i> (BT)
1	21.16	25.88	23.47	24.15
2	27.64	23.58	24.43	25.15
3	24.33	23.66	25.22	23.83
Delta	6.48	2.30	1.75	1.32
Rank	1	2	3	4

Plot rata-rata *ratio* S/N pada masing -masing level dari variasi parameter yang digunakan pada penelitian kali ini *layer height, nozzle temperature, bed temperature, printing speed, bed temperature* ditunjukkan pada Gambar 4.4 di bawah ini.

Gambar 4. 4 Plot rata-rata S/N *ratio* data means

Pada Gambar 4.4 menunjukkan nilai level paling optimal dari setiap variasi faktor yang digunakan. Nilai yang optimal ditunjukkan pada gambar di atas grafik *ratio* S/N. Kombinasi variasi level dari setiap faktor yang paling optimasi dari proses *3D printing* ditunjukkan pada Tabel 4.3 di bawah ini:

Tabel 4. 3 Kombinasi parameter respon optimal

<b>Faktor kendali</b>	<b>Level</b>	<b>Nilai</b>
<i>Layer Height</i>	2	0.2 mm
<i>Nozzle Temperature</i>	1	220 °C
<i>Printing Speed</i>	3	50 mm/s
<i>Bed Temperature</i>	2	75 °C

#### 4.1.4 Perhitungan ANOVA terhadap Kekuatan Impak

Menurut (Soejanto, 2009) perhitungan ANOVA (*Analysis of Variance*) merupakan suatu metode perhitungan yang memungkinkan kita untuk mengestimasi besarnya kontribusi dari masing-masing faktor terhadap hasil pengukuran respon secara kuantitatif. Pada penelitian ini, dilakukan analisis varian dua arah yang terdiri dari dua faktor atau lebih dan dua level atau lebih. Tabel analisis varian dua arah terdiri dari derajat kebebasan, jumlah kuadrat, rata-rata jumlah kuadrat, dan *F-ratio*. Perlu dicatat bahwa dalam penghitungan ANOVA ini, digunakan data means. Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan ANOVA dua arah pada hasil pengujian impak.

- a. Derajat kebebasan total (*degree of freedom*)

$$\text{DoF total} = (n-1)$$

$$\text{DoF total} = (27-1)$$

$$\text{DoF total} = 26$$

- b. Derajat kebebasan *error*

$$\text{DoF total} = (n-j)$$

$$\text{DoF total} = (27-9)$$

$$\text{DoF total} = 18$$

- c. Derajat kebebasan tiap faktor (faktor A: *layer height*)

$$\text{DoF}_A \text{ total} = (n-1)$$

$$\text{DoF}_A \text{ total} = (3-1)$$

$$\text{DoF}_A \text{ total} = 2$$

- d. Jumlah kuadrat total (*sum of square*)

$$SS_T = \sum_{i=1}^N y^2$$

$$SS_T = (12.27 - 18.47)^2 + (12.17-18.47)^2 + (11.07-18.47)^2 + (27.20-18.47)^2 + (25.00-18.47)^2 + (26.39-18.47)^2 + (23.69-18.47)^2 + (13.53-18.47)^2 + (14.95-18.47)^2$$

$$SS_T = 1475.58$$

- e. Jumlah kuadrat tiap faktor (faktor A: *Layer height*)

$$SS_A = \left[ \sum_{i=1}^K \left( \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$$

$$SS_A = \left[ \frac{106.53^2}{9} + \frac{235.78^2}{9} + \frac{156.5^2}{9} \right] - \frac{498.81^2}{27}$$

$$SS_A = 944.00$$

Dengan cara yang sama diperoleh hasil  $SS_B$ ,  $SS_C$ ,  $SS_D$  masing -masing 91.32, 30.48, 69.99

- f. Rata-rata jumlah kuadrat *error*

$$SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D$$

$$SS_e = 1475.58 - 944.00 - 91.32 - 30.48 - 69.99$$

$$SS_e = 339.80$$

- g. Rata-rata kuadrat tiap faktor (Faktor A: *layer height*)

$$MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$$

$$MS_A = \frac{944}{2}$$

$$MS_A = 472.00$$

Dengan cara yang sama diperoleh hasil  $MS_B$ ,  $MS_C$ ,  $MS_D$  masing -masing 45.66, 15.24, 35.00

- h. Rata-rata kuadrat *error*

$$MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$$

$$MS_E = \frac{339.80}{18}$$

$$MS_E = 18.88$$

- i. *Ratio-F* (Faktor A: *layer height*)

$$F_{ratio} = \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$F_{ratio} = \frac{472}{18.88}$$

$$F_{ratio} = 25.00$$

Dengan cara yang sama diperoleh hasil  $F_{ratio}$  MS<sub>B</sub>,  $F_{ratio}$  MS<sub>C</sub>,  $F_{ratio}$  MS<sub>D</sub> masing-masing 2.42, 0.81, 1.85

Penghitungan ANOVA dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Untuk menghitung nilai F-Tabel, dapat merujuk pada Tabel Distribusi F yang terdapat pada Lampiran 7, di mana pada tingkat kepercayaan 95%, nilai tersebut adalah 2.82. Selain itu, hasil perhitungan ANOVA yang secara komprehensif menunjukkan pengaruh faktor kendali terhadap kekuatan impak disajikan pada Tabel 4.4 dan Lampiran 8.

Tabel 4. 4 ANOVA faktor kendali terhadap kekuatan impak  $\alpha$  0.05

<b>Faktor Kendali</b>	<b>DoF</b>	<b>SS</b>	<b>MSS</b>	<b>F</b>	<b>P</b>
<i>Layer Height</i>	2	944.00	472.00	25.00	<i>Significant</i>
<i>Nozzle Temperature</i>	2	91.32	45.66	2.42	<i>Not Significant</i>
<i>Printing speed</i>	2	30.48	15.24	0.81	<i>Not Significant</i>
<i>Bed Temperature</i>	2	69.99	35.00	1.85	<i>Not Significant</i>
<i>Error</i>	18	339.80	18.88		
<b>Total</b>	<b>26</b>				

Ditemukan bahwa hasil F hitung untuk parameter *layer height* lebih besar dari nilai F tabel yang digunakan, dengan toleransi kesalahan 5%. Oleh karena itu, P value menunjukkan hasil yang signifikan. Namun, untuk parameter *nozzle temperature*, *printing speed*, dan *bed temperature*, hasil perhitungan F lebih kecil dari nilai F tabel, sehingga hasilnya tidak signifikan. Dengan menggunakan taraf signifikans level  $\alpha$  0.05, hanya satu parameter yang dianggap signifikan. Selain itu, dalam penelitian ini juga dilakukan analisis varian menggunakan perangkat lunak Minitab dan menghasilkan nilai yang dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan Lampiran 9.

Tabel 4. 5 Data hasil analisis menggunakan minitab

Source	DF	Seq SS	Contribution	AdjSS	AdjMS	FValue	P-Value
<i>Layer Heigt</i>	2	944.00	63.97%	944.00	472.00	25.00	0.00
<i>Nozzle Temperature</i>	2	91.32	6.19%	91.32	45.66	2.42	0.18
<i>Printing Speed</i>	2	30.48	2.07%	30.48	15.24	0.81	0.46
<i>Bed Temperature</i>	2	69.99	4.74%	69.99	35.00	1.85	0.18
<i>Error</i>	18	339.80	23.03%	339.80	18.88		
Total	26	1475.58	100.00%				

Hasil pada tabel sama dengan perhitungan manual pada microsoft excel dimana pada level signifikasi  $\alpha$  0.05 parameter *layer height* menunjukkan taraf signifikan dan dapat dilihat pada Lampiran 8.

#### 4.1.5 Persen Kontribusi terhadap Kekuatan Impak

Persen kontribusi digunakan untuk menunjukkan presentase kontribusi dari masing-masing faktor terhadap variasi total. Dengan menggunakan persen kontribusi, dapat dinilai seberapa besar pengaruh setiap faktor terhadap respon yang diteliti. Contoh perhitungan persen kontribusi untuk parameter *layer height* dapat dilihat di bawah ini:

$$\rho_A = \frac{SS_A}{SS_T} \times 100\%$$

$$\rho_A = \frac{944}{1475.58} \times 100\%$$

$$\rho_A = 63.97\%$$

Dengan cara yang sama diperoleh hasil  $\rho_B, \rho_C, \rho_D, \rho_E$  masing -masing 6.19%, 2.07%, 4.74%, 23.03%.

Hasil perhitungan persen kontribusi terhadap nilai hasil kekuatan impak dapat dilihat pada Tabel 4.6 sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Persen kontribusi setiap faktor kendali terhadap kekuatan impact

<b>Faktor kendali</b>	<b>Level</b>
<i>Layer Height</i>	63.97%
<i>Nozzle Temperature</i>	6.19%
<i>Printing Speed</i>	2.07%
<i>Bed temperature</i>	4.74%
<i>Error</i>	23.03%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

#### 4.1.6 Prediksi Respon terhadap Nilai Kekuatan Impact

Sebelumnya, terdapat Tabel 4.7 yang menunjukkan kombinasi faktor yang dapat menghasilkan kekuatan impact yang optimum. Berdasarkan tabel tersebut, diketahui bahwa kombinasi faktor yang berpengaruh paling signifikan terhadap nilai kekuatan impact yang paling optimal adalah sebagai berikut:

- Layer height (mm)* pada level 2
- Nozzle temperature (°C)* pada level 1
- Printing speed (mm/s)* pada level 3
- Bed temperature (°C)* pada level 2

Dilakukan perhitungan nilai prediksi rata-rata hasil kekuatan impact dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\mu = \gamma_m + \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma_m)$$

$$\mu = 18.47 + (21.05-18.47) + (26.2-18.47) + (19.92-18.47) + (20.75-18.47)$$

$$\mu = 18.47 + (2.58) + (7.73) + (1.45) + (2.28)$$

$$\mu = 32.51 \text{ kJ/m}^2$$

Dari hasil perhitungan tersebut, diperoleh nilai prediksi kekuatan impact dari kombinasi faktor dengan level yang paling optimal sebesar 32.51 kJ/m<sup>2</sup>. Untuk menentukan interval kepercayaan rata-rata nilai pengujian impact prediksi, dapat dilakukan perhitungan menggunakan persamaan berikut:

$$N_{\text{eff}} = \frac{\text{jumlah total eksperimen}}{1 + \text{derajat kebebasan}}$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{9 \times 3}{1 + (2+2+2+2)}$$

$$N_{\text{eff}} = \frac{27}{9}$$

$$N_{\text{eff}} = 3$$

Berikut adalah hasil perhitungan interval kepercayaan prediksi hasil optimal:

Diketahui:  $F_{(0.05;4;18)} = 2.82$  dan  $MS_e = 18.88$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{F_{(\alpha,1,Ve)} MS_e}{N_{\text{eff}}}}$$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{2.82 \times 18.88}{3}}$$

$$CI = \pm \sqrt{\frac{53.2416}{3}}$$

$$CI = \pm 17.75$$

Dengan demikian, interval kepercayaan untuk rata-rata dampak pada tingkat kepercayaan 95% dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\mu_{\text{prediksi}} - CI \leq \mu_{\text{prediksi}} \leq \mu_{\text{prediksi}} + CI$$

$$32.51 - 17.75 \leq 32.51 \leq 32.51 + 17.75$$

$$14.76 \leq 32.51 \leq 50.26$$

#### 4.1.7 Eksperimen Konfirmasi terhadap Kekuatan Impak

Untuk memvalidasi hasil yang diperoleh selama tahap analisis, dilakukan eksperimen konfirmasi yang menguji kombinasi faktor dan level yang telah dievaluasi sebelumnya. Eksperimen konfirmasi dalam penelitian ini menggunakan faktor optimal yang tercantum dalam Tabel dengan tujuan untuk memastikan apakah hasil pengujian tersebut benar-benar optimal atau tidak. Pengujian ini dilakukan sebanyak 3 kali replikasi, dan hasil pengujian dampak untuk eksperimen konfirmasi dapat ditemukan dalam Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Data hasil uji konfirmasi

No	Faktor Kendali				Nilai Kekuatan Impak (kJ/m <sup>2</sup> ) Replikasi			Rata-rata
	<i>Layer Height</i>	<i>Nozzle Temperature</i>	<i>Printing Speed</i>	<i>Bed Temperature</i>	1	2	3	
1	0.2	220	50	75	28.89	31.53	29.60	30.01

## 4.2 Pembahasan Pengaruh Parameter

### 4.2.1 Pengaruh *Layer Height* terhadap Kekuatan Impak

*Layer height* merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap sifat kekuatan impak material hasil cetak *3D printing* pada penelitian ini. *Layer height* mempengaruhi kekuatan ikatan pada hasil cetakan. Semakin tinggi ketebalan lapisan misalnya pada *layer height* 0.3 mm akan menghasilkan struktur yang lebih kuat karena adhesi yang lebih baik antara lapisan. Namun, ketebalan lapisan tersebut dinilai terlalu besar yang dapat mengorbankan kualitas cetakan dan meningkatkan risiko cacat. Dalam hal ini, dengan ketebalan lapisan 0.2 mm akan mencapai kekuatan yang baik dengan keseimbangan yang lebih baik antara detail cetakan dan kualitas permukaan. Pada penelitian ini, layer 0.2 mm menghasilkan nilai kekuatan 27.20 kJ/m<sup>2</sup> yang merupakan nilai tertinggi dan merupakan layer yang sangat berpengaruh terhadap kekuatan impak yang memiliki presentase parameter dengan pengaruh dari parameter signifikan dan menyumbang kontribusi yang paling tinggi, yaitu sebesar 63.97% dari total perhitungan persen kontribusi parameter. Hal ini juga sesuai dengan penelitian (Taqdissillah et al., 2022) parameter *layer height* merupakan parameter yang sangat berpengaruh dengan kontribusi sebesar 82.3%, yang merupakan yang paling tinggi dari total perhitungan persen kontribusi parameter.

### 4.2.2 Pengaruh *Nozzle Temperature* terhadap Kekuatan Impak

*Nozzle temperature* pada proses *3D printing* juga mempengaruhi kekuatan uji impak dari hasil cetakan filamen campuran. Suhu nozzle memiliki pengaruh

terhadap sifat material dari bahan cetakan dalam hasil cetakan filamen campuran *3D printing*. Jika *nozzle temperature* terlalu rendah, hasil cetakan dapat menjadi kasar, tidak merata, dan rapuh. Sebaliknya, jika suhu *nozzle* terlalu tinggi, hasil cetakan dapat mudah patah dan retak. Selain itu, *nozzle temperature* juga memengaruhi kekuatan ikatan antara lapisan bahan cetakan pada filamen campuran. Oleh karena itu, *nozzle temperature* perlu diatur dengan baik untuk mencapai kekuatan ikatan yang optimal. Selain itu, suhu *nozzle* pada proses *3D printing* juga berpengaruh pada kualitas permukaan hasil cetakan filamen campuran *3D printing*. Oleh karena itu, *nozzle temperature* harus diatur sedemikian rupa untuk menghasilkan permukaan yang halus dan merata guna mencapai kekuatan uji impact yang optimal.

Meskipun pengaruh dari parameter tidak signifikan pada  $\alpha 0.05$  akan tetapi menyumbang sebesar 6.19% dari total perhitungan persen kontribusi parameter, *nozzle temperature* pada penelitian ini menggunakan 220°C, 225°C dan 230°C. *Nozzle temperature* 220°C merupakan suhu optimal. Hal ini sesuai dengan (Putra Bowo et al., 2021) yang melakukan penelitian tentang pengujian kekuatan impact filamen ST PLA mendapatkan kesimpulan bahwa dengan suhu *nozzle temperature* 220°C menghasilkan nilai kekuatan uji impact tertinggi.

#### **4.2.3 Pengaruh *Printing Speed* terhadap Kekuatan Impact**

*Printing speed* pada proses *3D printing* juga dapat mempengaruhi kekuatan uji impact dari hasil cetakan filamen campuran. dikarenakan beberapa faktor yang mempengaruhi pengaruh *printing speed* terhadap kekuatan uji impact pada hasil cetakan filamen campuran *3D printing*. *Printing speed* yang lebih tinggi 50 mm/s dapat meningkatkan kekuatan struktural objek cetakan saat menghadapi uji impact. Ketika *printing speed* meningkat, material yang terdeposisi antara lapisan-lapisan memiliki waktu yang lebih singkat untuk mendingin dan mengeras, sehingga menghasilkan ikatan yang lebih kuat antara lapisan. Ikatan yang lebih kuat antara lapisan-lapisan dapat meningkatkan kekuatan struktural seluruh objek cetakan, sehingga lebih tahan terhadap gaya impact serta dapat membantu mengurangi resiko deformasi atau distorsi pada objek cetakan dalam uji impact. Ketika bahan dicetak

pada kecepatan yang lebih rendah, risiko bahan terlalu lama terkena panas dan penyusutan bahan dapat meningkat.

Dengan meningkatkan *printing speed* cetak menjadi 50 mm/s, risiko deformasi dapat berkurang karena waktu kontak dengan panas lebih singkat. Hal ini dapat menghasilkan objek cetakan yang lebih akurat secara geometri dan menjaga dimensi yang lebih baik saat diuji dengan dampak beban. *Printing speed* yang lebih rendah, seperti 40 mm/s dan 45 mm/s, mungkin membutuhkan lebih banyak lapisan cetakan untuk mencapai hasil yang sama, yang dapat memengaruhi waktu pencetakan dan memperbesar risiko cacat cetakan. Meskipun pengaruh dari parameter tidak signifikan pada  $\alpha 0.05$  akan tetapi menyumbang sebesar 2.07% dari total perhitungan persen kontribusi parameter, *printing speed* pada penelitian ini menggunakan 40 mm/s, 45 mm/s dan 50 mm/s. *Printing speed* 50 mm/s memiliki pengaruh terhadap nilai kekuatan dampak tertinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan (Putra Bowo et al., 2021) yang melakukan penelitian tentang pengujian kekuatan dampak filamen ST PLA mendapatkan kesimpulan bahwa dengan kecepatan *printing speed* 50 mm/s menghasilkan nilai kekuatan uji dampak tertinggi.

#### 4.2.4 Pengaruh *Bed Temperature* terhadap Kekuatan Dampak

*Bed temperature* pada proses pencetakan *3D printing* juga dapat mempengaruhi kekuatan uji dampak pada hasil cetakan, terutama pada filamen campuran yang terdiri dari dua atau lebih jenis bahan pencetak. Beberapa faktor yang mempengaruhi pengaruh *bed temperature* terhadap kekuatan uji dampak pada hasil cetakan filamen campuran *3D printing* antara lain. *Bed temperature* yang terlalu rendah dapat menyebabkan *warping* pada cetakan. Ketika bahan mendingin terlalu cepat setelah dicetak, bagian yang lebih dekat dengan *bed temperature* mungkin menyusut lebih cepat dari bagian lainnya. Hal ini dapat menyebabkan *distorsi* pada cetakan dan membuatnya tidak datar. Namun, jika *bed temperature* terlalu tinggi, bahannya mungkin terlalu lembek dan dapat menyebabkan *deformasi* atau kesulitan melepaskan objek setelah pencetakan selesai. *Bed temperature* dengan suhu 75 °C merupakan suhu yang optimal membantu memastikan bahwa

cetakan menempel dengan kuat selama proses pencetakan dan menghindari *deformasi* yang tidak diinginkan.

Meskipun pengaruh dari parameter tidak signifikan pada  $\alpha$  0.05 karena menyumbang 4.74% dari total perhitungan persen kontribusi parameter, *bed temperature* pada penelitian ini menggunakan *bed temperature* dengan rentang 70°C, 75°C dan 80°C dengan suhu 75°C merupakan parameter optimal. Hal ini sesuai dengan penelitian (Saputra et al., 2023) dengan rentang *temperature bed* 40°C, 45°C, 50°C, *bed temperature* dengan suhu 45°C merupakan parameter optimal.

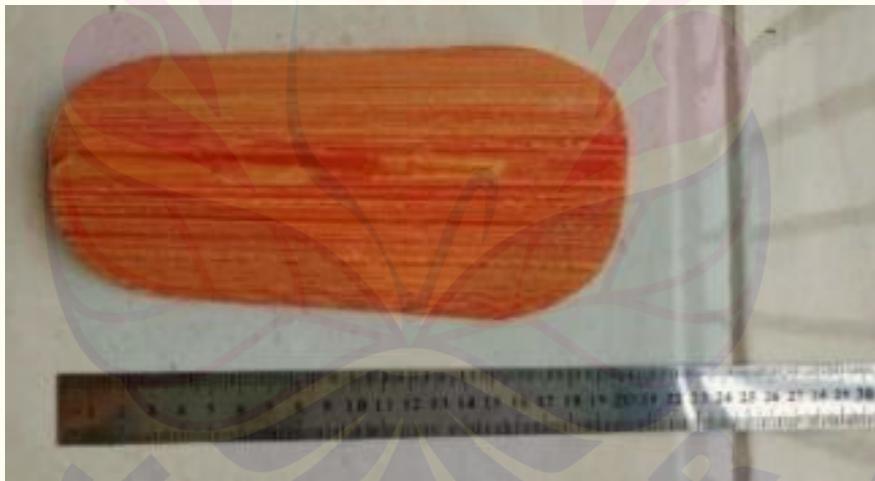
#### 4.3 Analisis Perbandingan Kekuatan Material untuk Produk Shin Guard

*Shin guard* merupakan sebuah produk yang berfungsi sebagai pelindung kaki tepatnya pada bagian tulang kering agar tidak mengalami cedera saat berolahraga. Dalam penelitian ini produk akan dibandingkan dengan produk pasaran. Dalam analisis perbandingan kekuatan impak material pelindung tulang kering yang tersedia di pasaran, terdapat dua material yang akan dibandingkan: material yang digunakan pada produk pasaran dengan bahan utama polimer *polypropylene* dengan kekuatan impak sebesar 7.00 kJ/m<sup>2</sup>, dan material TPU+PETG dengan kekuatan impak sebesar 27.20 kJ/m<sup>2</sup>. Perbedaan angka kekuatan dampak yang signifikan antara kedua material berikut akan dibahas dibawah ini.

1. Material yang digunakan pada produk pasaran dengan bahan utama polimer *polipropylene* menunjukkan kekuatan impak sebesar 7.00 kJ/m<sup>2</sup>. Angka ini menunjukkan kemampuan material tersebut untuk menyerap dan menahan gaya benturan yang diterima oleh pelindung tulang kering sedangkan
2. Material TPU+PETG menunjukkan kekuatan impak yang jauh lebih tinggi, yaitu sebesar 27.20 kJ/m<sup>2</sup>. Angka ini menunjukkan kemampuan material ini untuk menyerap dan menahan energi benturan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan material yang digunakan pada produk pasaran. TPU (*Thermoplastic Polyurethane*) dan PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*) adalah bahan termoplastik yang sering digunakan dalam

perlindungan tubuh seperti pelindung tulang kering. Kekuatan impact yang tinggi pada material TPU+PETG mengindikasikan bahwa *shin guard* yang terbuat dari bahan ini mungkin memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap benturan keras dan gaya tekan yang terjadi saat bermain sepak bola.

Secara umum, berdasarkan perbandingan kekuatan impact antara material *polipropylena* dan TPU+PETG, dapat disimpulkan bahwa TPU+PETG memiliki kekuatan impact yang jauh lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa *shin guard* yang terbuat dari TPU+PETG mungkin dapat memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap benturan. Namun, penting juga untuk mempertimbangkan faktor lain seperti desain, kenyamanan, untuk *shin guard* di pasaran. Berikut adalah hasil pencetakan produk *shin guard* menggunakan mesin *3D printing*. Tahap awal proses pencetakan dan tahap *finishing* dapat dilihat pada Lampiran 10 serta dapat dilihat juga produk *shin guard* pada Gambar 4.5 sebagai berikut:



Gambar 4. 5 Produk *shin guard*

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian optimasi kekuatan impact hasil *3D printing* berbahan TPU + PETG dengan variasi parameter adalah sebagai berikut:

1. Parameter yang berpengaruh terhadap kekuatan impact hasil *3D printing* berbahan TPU + PETG adalah *layer height* sebesar 63.97%, *nozzle temperature* sebesar 6.19%, *printing speed* 2.07%, dan *bed temperature* 4.74%.
2. Kombinasi parameter yang dapat menghasilkan nilai kekuatan impact paling optimal berdasarkan perhitungan menggunakan metode Taguchi adalah menggunakan *layer height* 0.2 mm *nozzle temperature* 220°C, *printing speed* 50 mm/s, *bed temperature* 75°C. Dengan parameter optimal tersebut maka dibuat acuan untuk parameter pembuatan produk *shin guard*.

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan penulis setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya juga dapat melakukan penelitian dengan parameter yang sama dengan yang digunakan peneliti, namun dengan variasi level yang berbeda. Misalnya, pada penelitian kali ini menggunakan variasi *printing speed* 40 mm/s, 45 mm/s, dan 50 mm/s. Maka penelitian selanjutnya bisa mengambil variasi parameter diatas 50 mm/s dan berlaku juga untuk parameter lainnya
2. Penelitian selanjutnya juga dapat melakukan pencetakan untuk spesimen pengujian lain yang belum pernah dilakukan pengujian dengan filamen berbahan TPU + PETG.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amri, M. O. H. Y. (2021). Pemanfaatan Serat Eceng Gondok Untuk Pembuatan Shin Guards Customizable. <https://dspace.uji.ac.id/handle/123456789/36566>
- Aris Setiawan, A., Wiro Karuniawan, B., Arumsari, N. (2018) Optimasi Parameter *3D Printing* Terhadap Keakuratan Dimensi dan Kekasaran Permukaan Produk Menggunakan Metode Taguchi *Grey Relational Analysis*. *Journal and Proceedings Conference on Design Manufacture Engineering and its Application e- Program Studi D4 Teknik Desain dan Manufaktur – Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya* ISSN No.2654-8631.
- Susanti, D. N. (2018). Pengaruh Variasi Panjang Serat Nanas Terhadap Kekuatan Tarik Dan *Impact* Komposit Polyester-Serat Nanas (Doctoral Dissertation, Universitas Muhammadiyah Semarang).
- Bari, E., Scocozza, F., Perteghella, S., Sorlini, M., Auricchio, F., Torre, M. L., & Conti, M. (2021). 3D bioprinted scaffolds containing mesenchymal stem/stromal lyosecretome: next generation controlled release device for bone regenerative medicine. *Pharmaceutics*, 13(4), 515.
- Devsingh, D., Dev, A. D., Avala, B., Reddy, R., & Arjula, S. (2018). Characterization of Additive Manufactured PETG and Carbon Fiber-PETG. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*, 04, 2. <https://doi.org/10.18231/2454-9150.2018.0139>.
- Saputra R. W., Sirwansyah Suzen, Z., (2023). Pengaruh Parameter Proses terhadap Kuat Tarik Produk Hasil 3D Menggunakan Filamen ASA. *Teknik Mesin, J., & Manufaktur Negeri Bangka Belitung, P. Jurnal Kajian Ilmiah Dan Teknologi Teknik Mesin*, 7 (2), 2541–3562. <https://doi.org/10.32528/jp.v7i2.9285>
- Hu, S., Shou, T., Guo, M., Wang, R., Wang, J., Tian, H., Qin, X., Zhao, X., & Zhang, L. (2020). Fabrication of new thermoplastic polyurethane elastomers with high heat resistance for 3D printing derived from 3, 3-dimethyl-4, 4'-diphenyl diisocyanate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59(22), 10476–10482.
- Ismianti, H. N. D. (2018). *Framework* Prediksi Penggunaan *3D Printing* di Indonesia pada tahun 2030. *Seminar Nasional IENACO-2018*, ISSN 2337-4349.

- Kiswanto, G., & Panuju, A. Y. T. (2010). Development of Closed Bounded Volume (CBV) grouping method of complex faceted model through CBV boundaries identification. *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, 3, 378–382.
- Lee, H., Eom, R. I., & Lee, Y. (2019). Evaluation of the mechanical properties of porous thermoplastic polyurethane obtained by 3D printing for protective gear. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5838361>
- Prayoga, H. I., & Puspitasari, E. (2021). Pengaruh Parameter Produk Printer 3D Terhadap Penyusutan Dimensi Dan Kekuatan Pukul. *Seminar Nasional Rekayasa Teknologi Manufaktur*, 1, 56–63.
- Pristiansyah, P., & Rollastin, B. (2021). Optimasi Parameter Proses 3D Printing FDM Terhadap Kekuatan Tarik Filament Abs Cctree Menggunakan Metode Taguchi L9. *Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan*, 01, 223–229.
- Putra B, F., Sirwansyah S, Z., & Oktriadi, Y. (2021). Pengaruh Infill Geometry, Printing Speed dan Nozzle Temperature terhadap Kekuatan Impak Menggunakan Filamen ST PLA. *Jurnal Health Sains*, 2(7), 1257–1268. <https://doi.org/10.46799/jsa.v2i7.265>
- Putra, D. A. (2021). *Pengaruh Orientasi dan Densitas Infill terhadap Sifat Filamen Paduan Acrylonitrile Butadiene Styrene dan Poly Lactic Acid Hasil 3D Printing*. <https://repository.unej.ac.id/xmlui/handle/123456789/108710>
- Soejanto, I. (2009). *Experimental Design with the Taguchi Method*. Yogyakarta: Graha Science.
- Taqdissillah, D., Mutaqqin, A. Z., Darsin, M., Dwilaksana, D., & Ilminnafik, N. (2022). *The Effect of Nozzle Temperature, Infill Geometry, Layer Height and Fan Speed on Roughness Surface in PETG Filament*. *Journal Mechanical Engineering Science and Technology (JMEST)* Vol. 6, No. 2, November 2022, pp. 74-84

## LAMPIRAN-LAMPIRAN

Lampiran 1. Rumus anova

a.  $SS_T = \sum_{i=1}^N y^2$

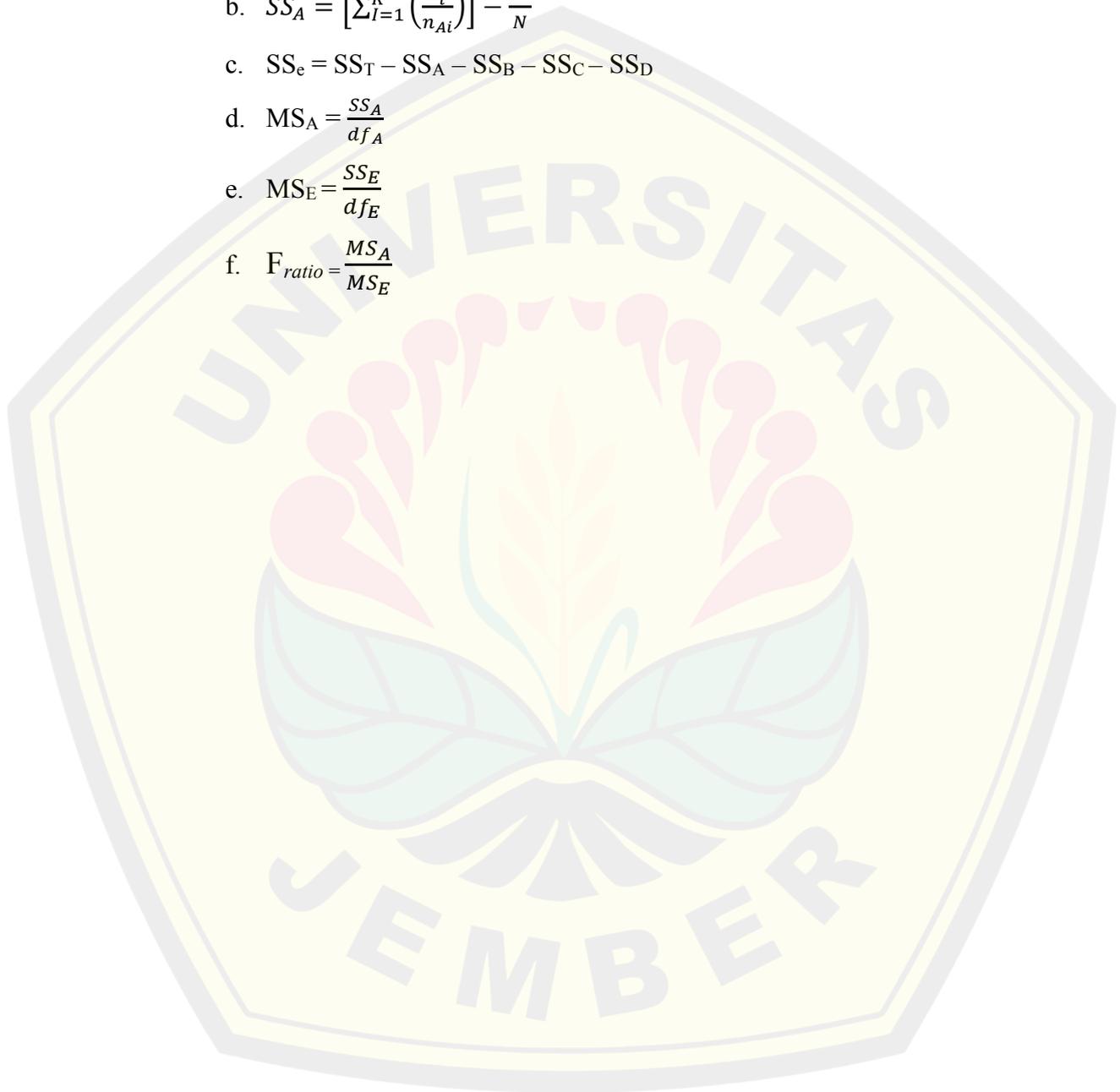
b.  $SS_A = \left[ \sum_{l=1}^K \left( \frac{A_l^2}{n_{Al}} \right) \right] - \frac{T^2}{N}$

c.  $SS_e = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_D$

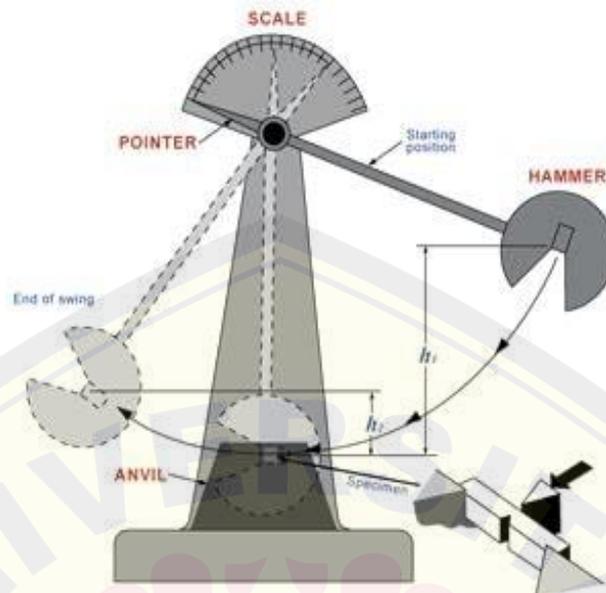
d.  $MS_A = \frac{SS_A}{df_A}$

e.  $MS_E = \frac{SS_E}{df_E}$

f.  $F_{ratio} = \frac{MS_A}{MS_E}$



Lampiran 2. Alat pengujian impact charpy dan rumus uji impact



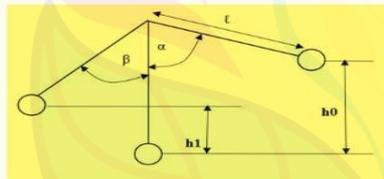
Gambar 2.1 Alat uji impact charpy

**Mencari nilai kekuatan Impact**

atp | PUSAT UNGGULAN TEKNOLOGI PLASTIK



Energi yang diserap  
 =  $E_p - E_m$   
 =  $m \cdot g (h_1 - h_2)$   
 =  $m \cdot g (\lambda (1 - \cos \alpha) - \lambda (\cos \beta - \cos \alpha))$   
 =  $m \cdot g \cdot \lambda (\cos \beta - \cos \alpha)$



- Energi yang diserap (Joule)  
 $E_p$  = Energi Potensial  
 $E_m$  = Energi Mekanik  
 $m$  = massa pendulum (kg)  
 $g$  = gravitasi ( $m/s^2$ )  
 $h_1$  = ketinggian mula-mula pendulum dengan spesimen (m)  
 $h_2$  = ketinggian akhir pendulum dengan spesimen (m)  
 $\lambda$  = jarak lengan pengayun (m)  
 $\alpha$  = sudut posisi awal pendulum  
 $\beta$  = sudut posisi akhir pendulum

Gambar 2.2 Rumus mencari nilai impact

**Mencari nilai kekuatan Impact**

atp | PUSAT UNGGULAN TEKNOLOGI PLASTIK

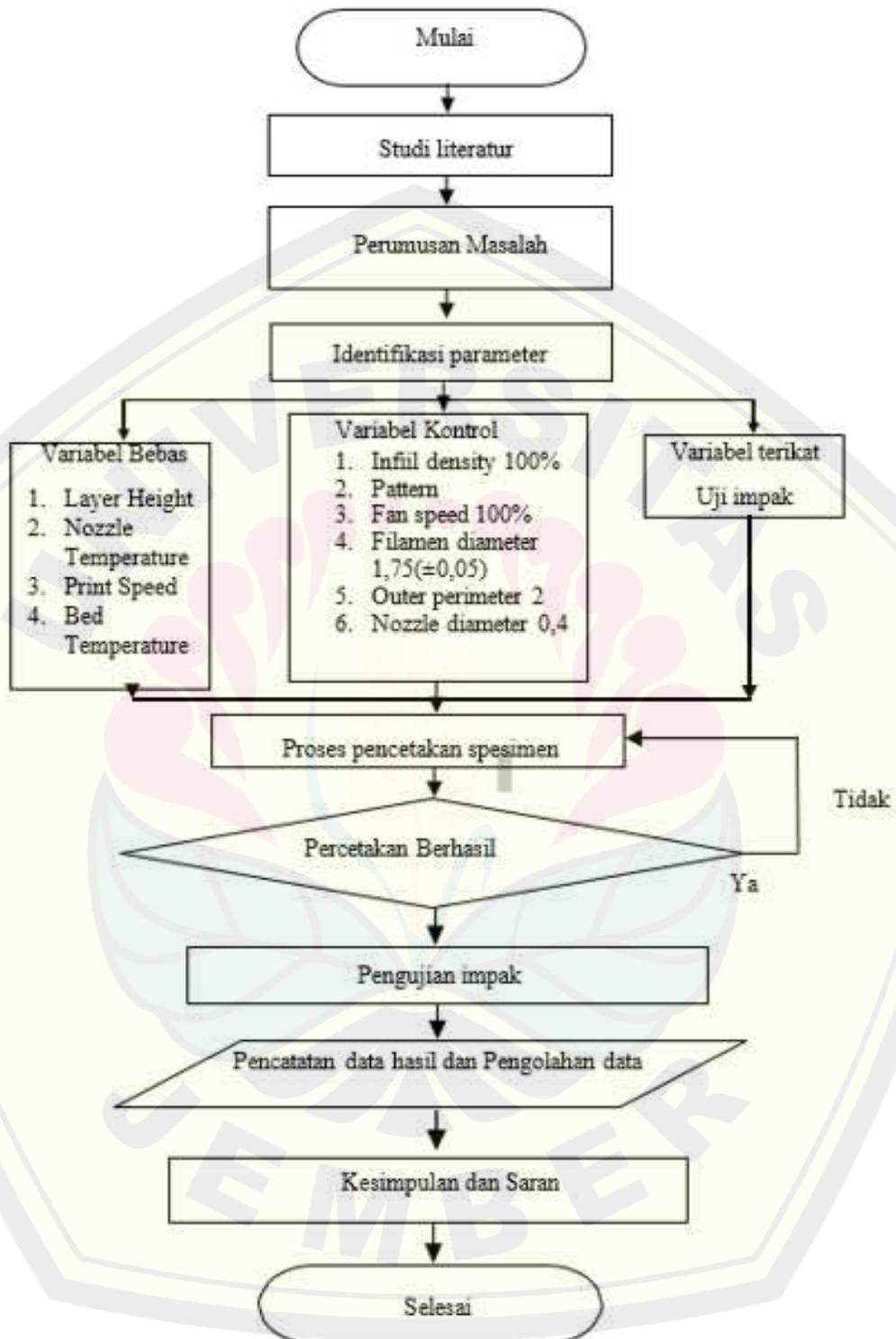


Impact Strength

$$K = \frac{W}{A}$$

- $K$  = kekuatan impact ( $Kg \cdot m/mm^2$ )  
 $w$  = usaha yang dilakukan untuk mematahkan benda uji ( $Kg \cdot m$ )  
 $A$  = luas penampang dibawah takikan ( $mm^2$ )

Gambar 2.3 Rumus mencari nilai impact

Lampiran 3. Diagram Alir

Gambar 3.1 Diagram Alir

Lampiran 4. Dokumentasi pengujian impak



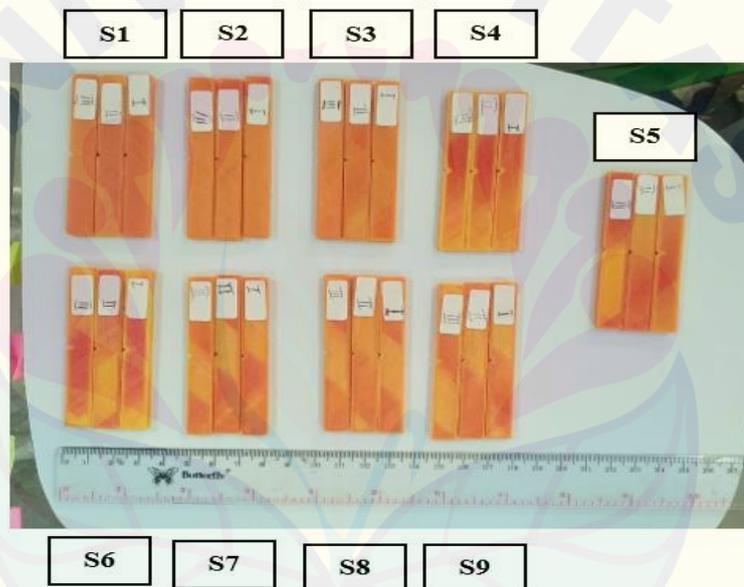
Gambar 4.1 Sebelum proses pengujian impak charpy



Gambar 4.2 Spesimen setelah diuji

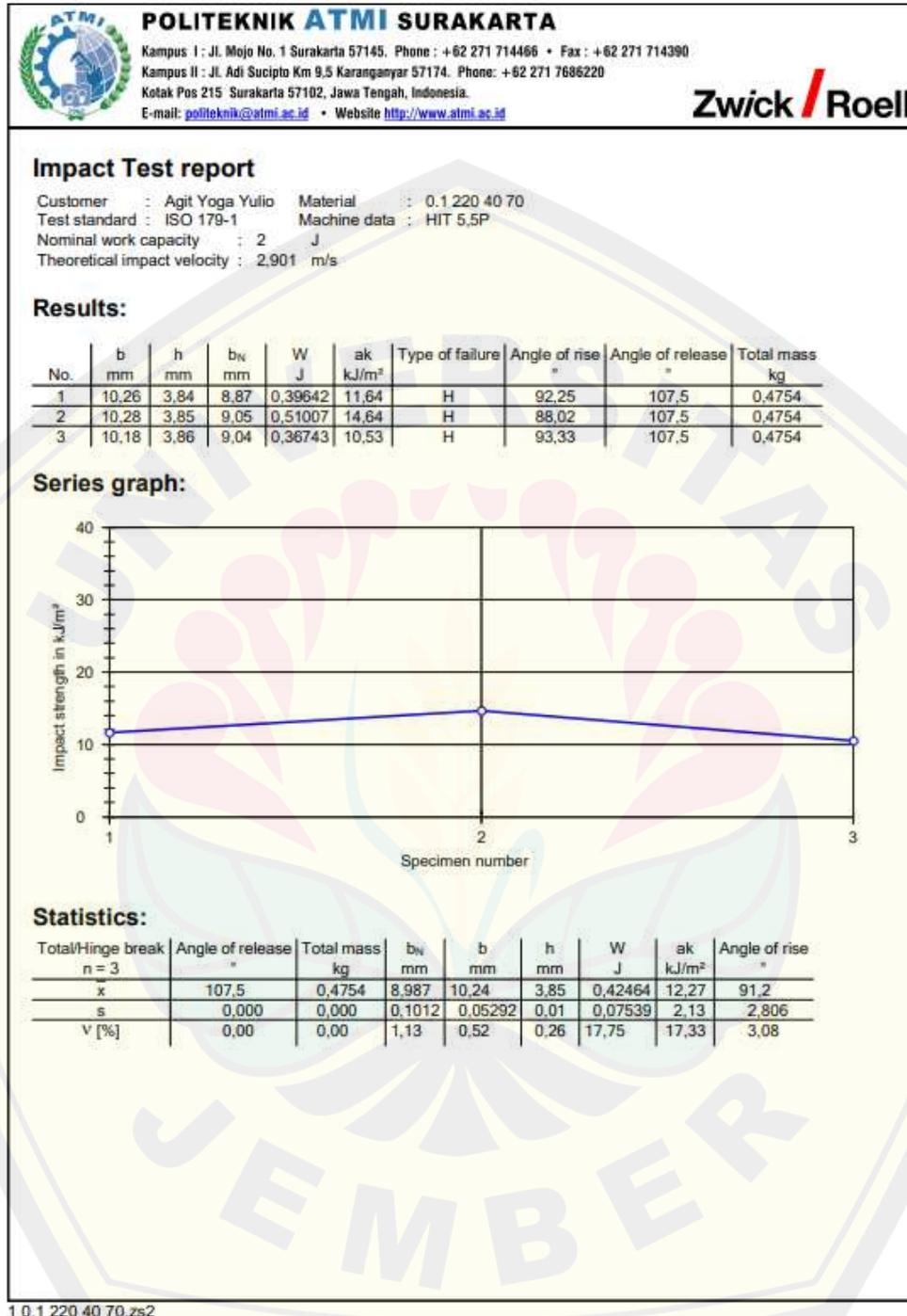
Lampiran 5. Spesimen uji impak

Gambar 5.1 spesimen uji impak charpy ISO-179

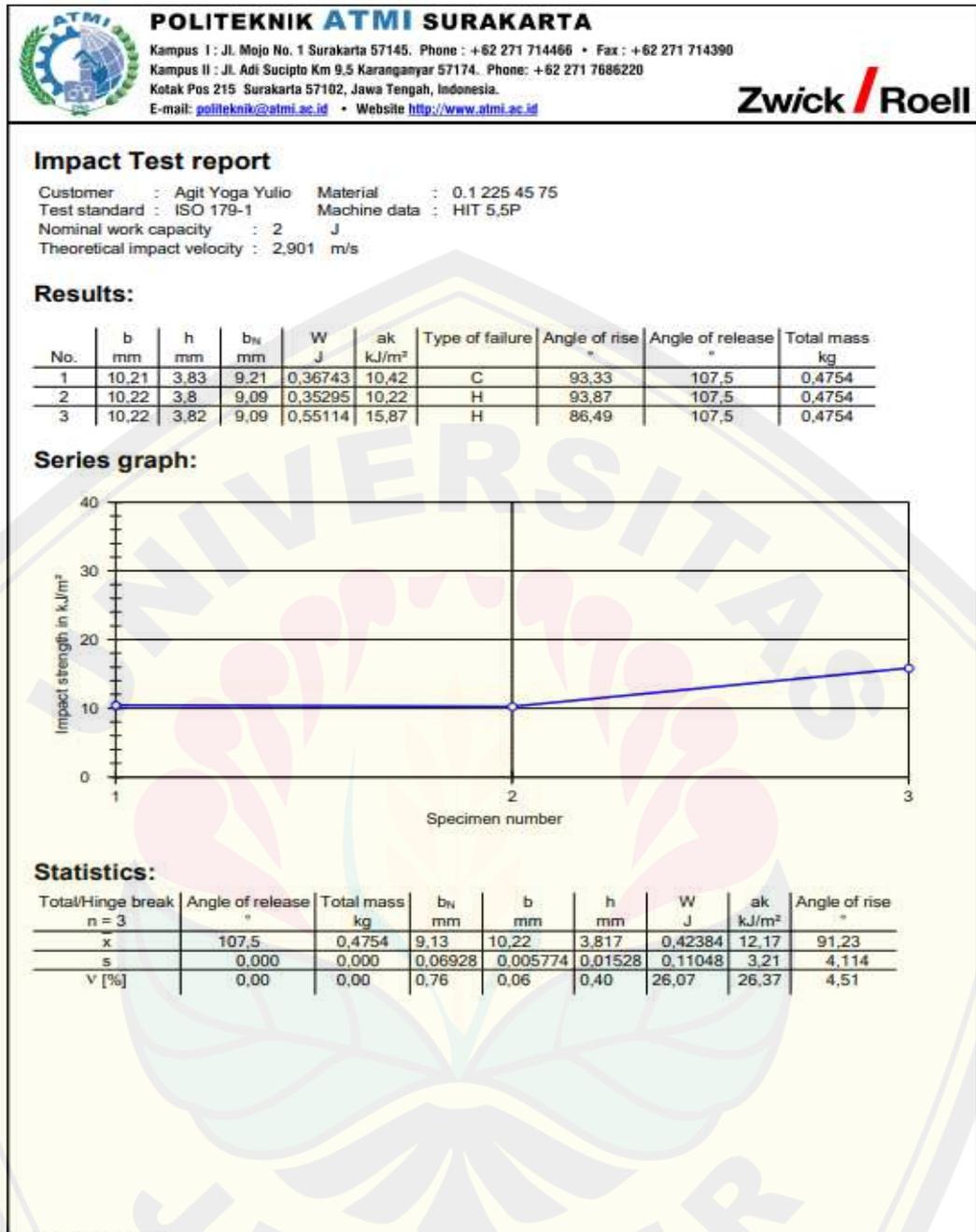


Gambar 5.2 Spesimen uji impak sebelum dilakukan pengujian

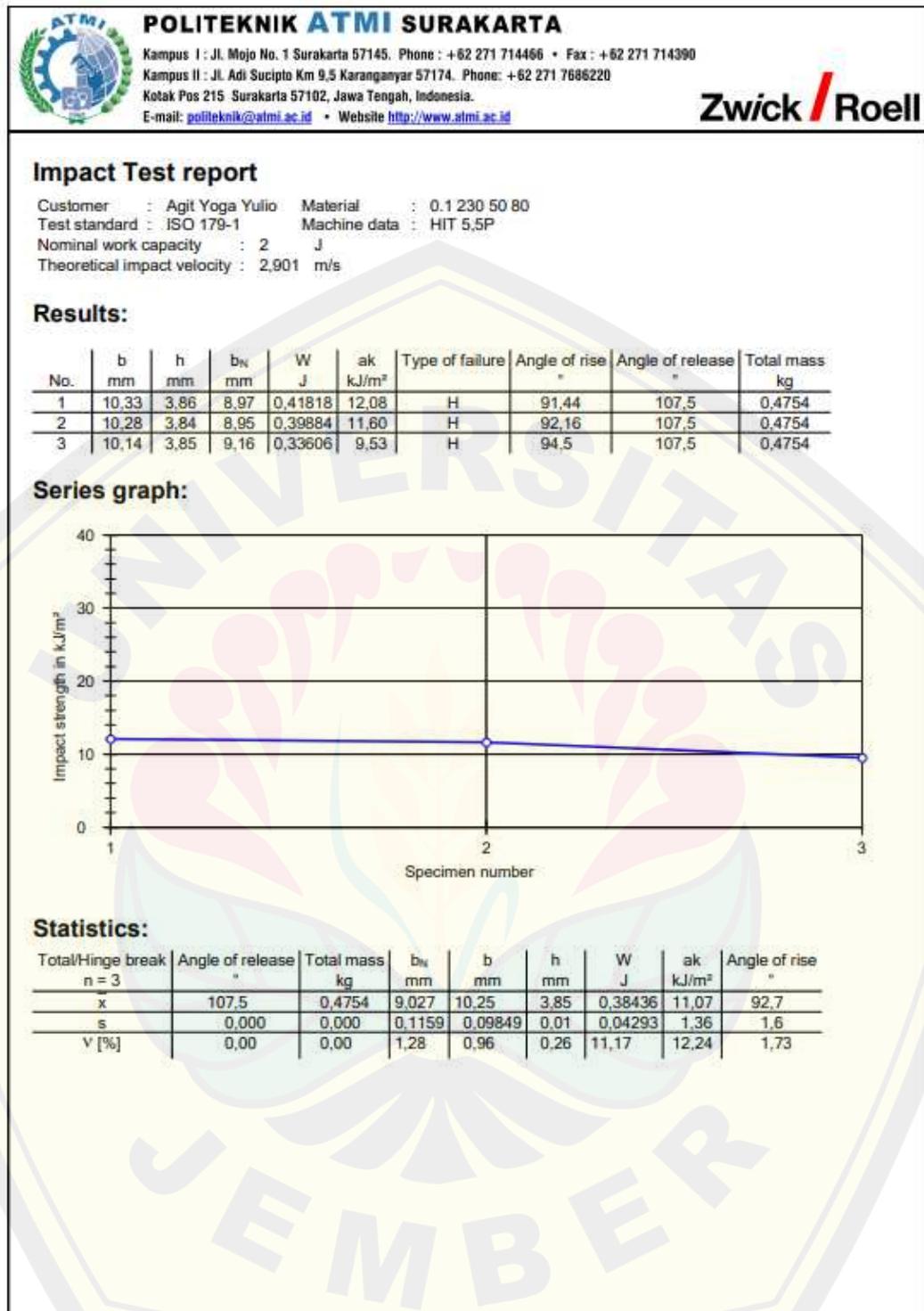
Lampiran 6. Data hasil pengujian spesimen uji impak charpy



Gambar 6.1 Data uji impak spesimen 1

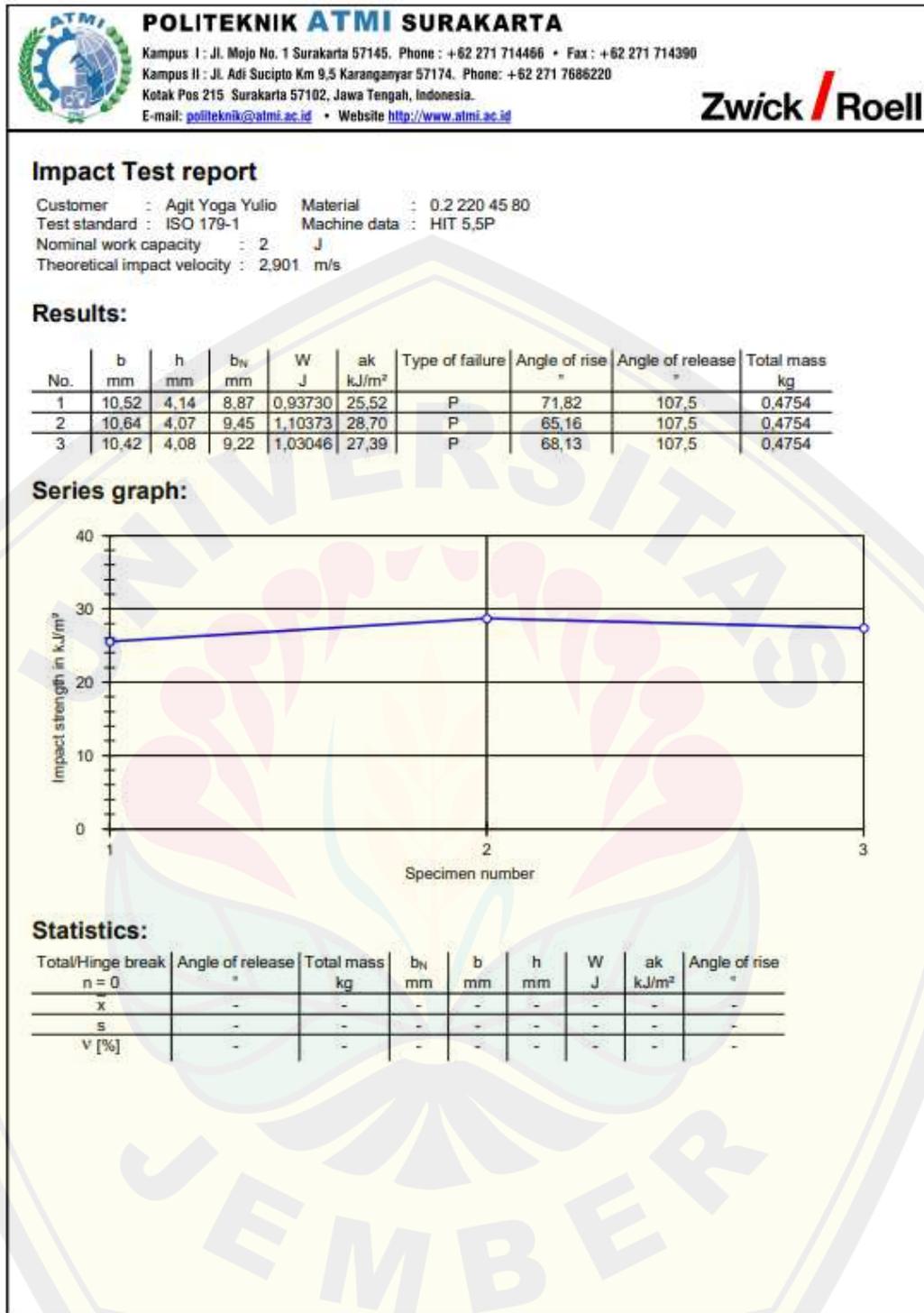


Gambar 6.2 Data uji impak spesimen 2

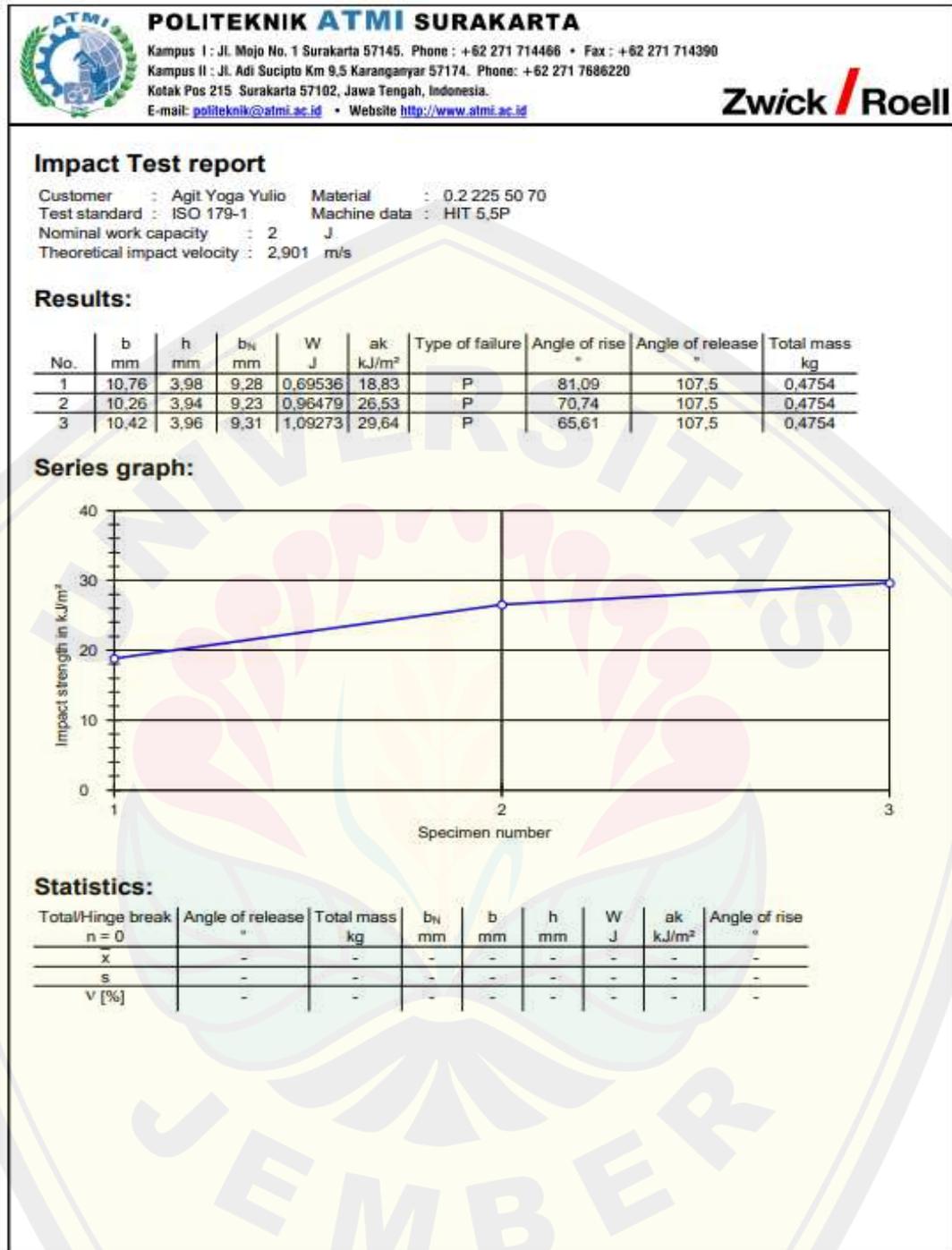


3 0,1 230 50 80.zs2

Gambar 6.3 Data uji impact spesimen 3

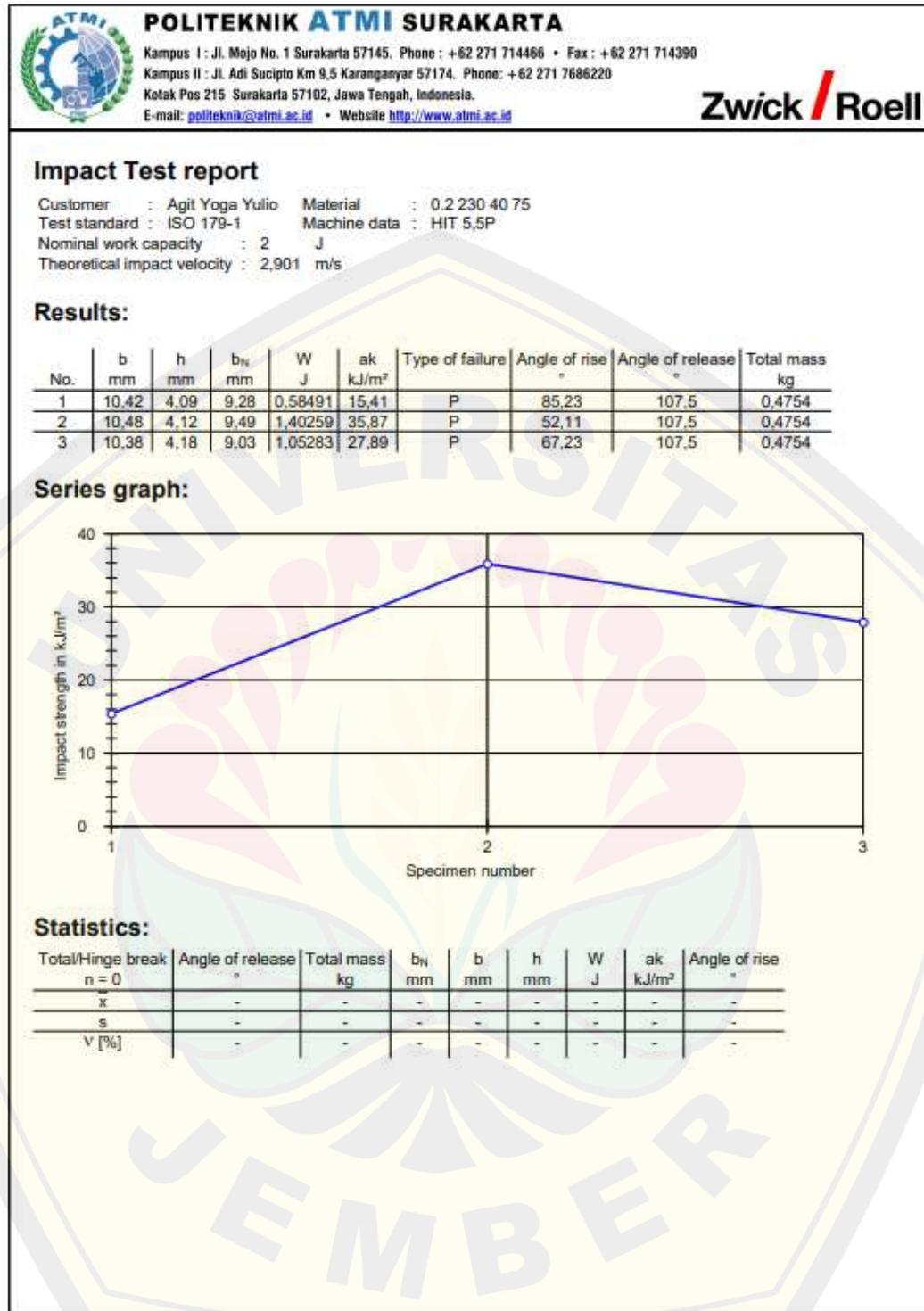


Gambar 6.4 Data uji impak spesimen 4



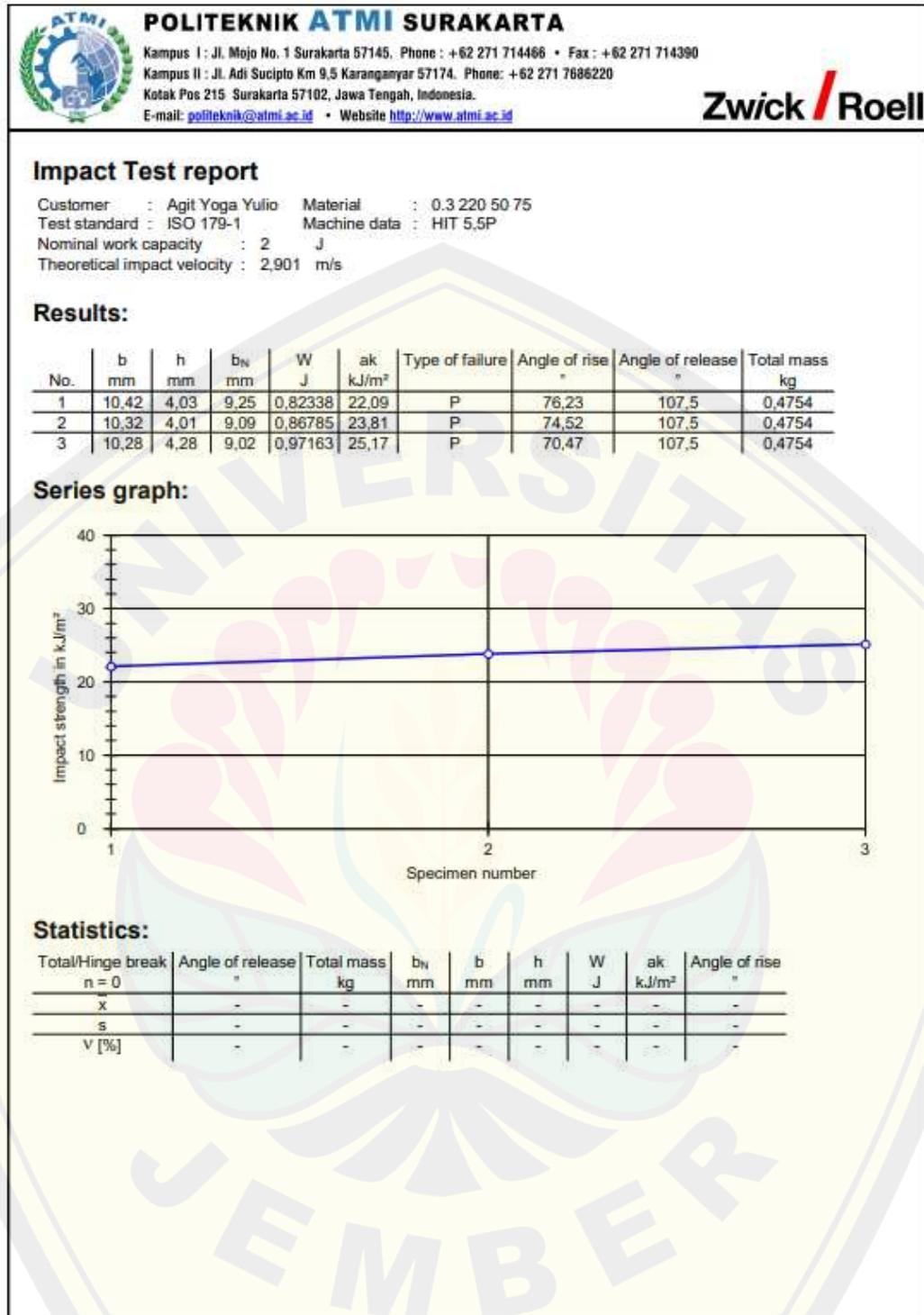
5 0,2 225 50 70.zs2

Gambar 6.5 Data uji impak spesimen 5

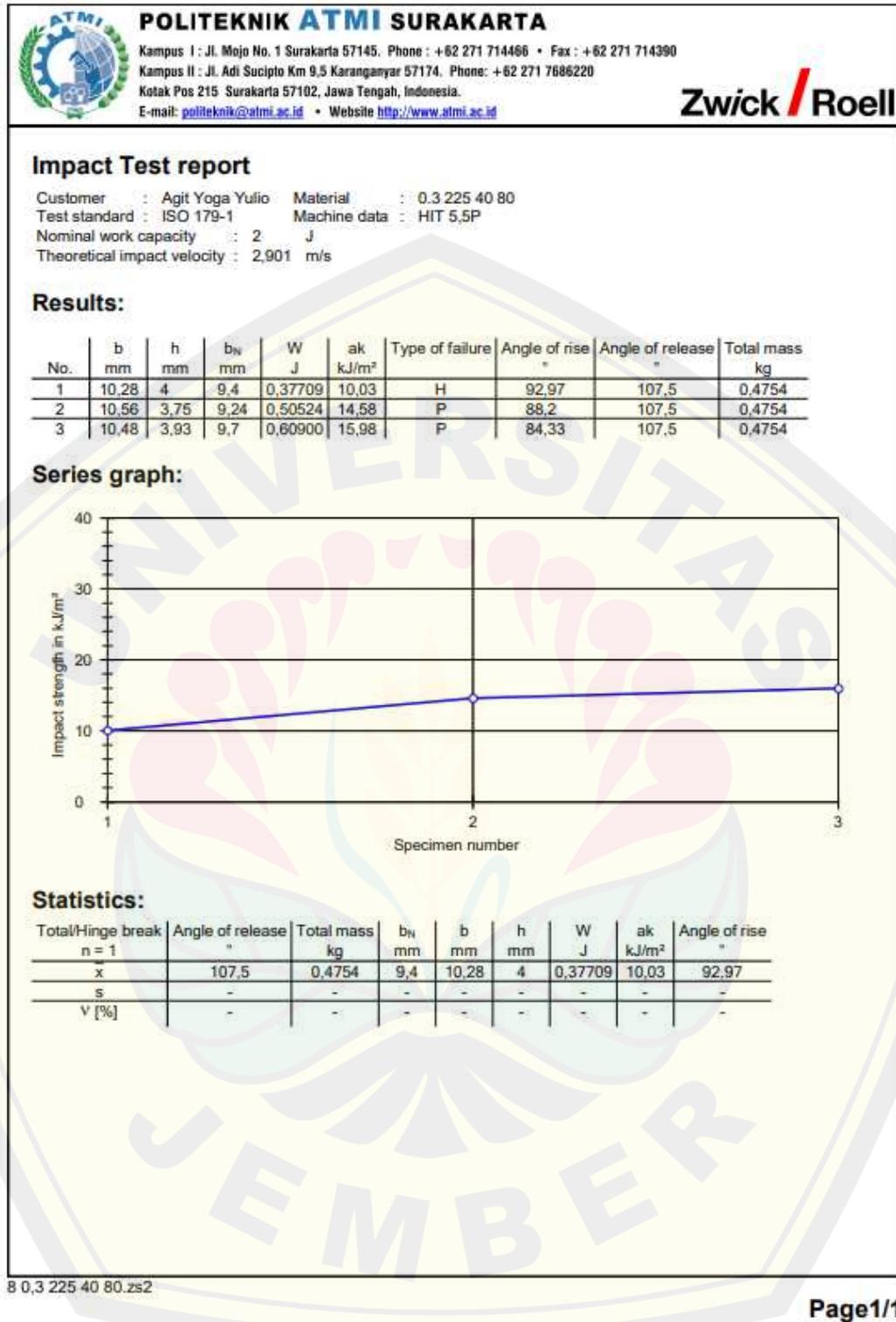


6 0.2 230 40 75.zs2

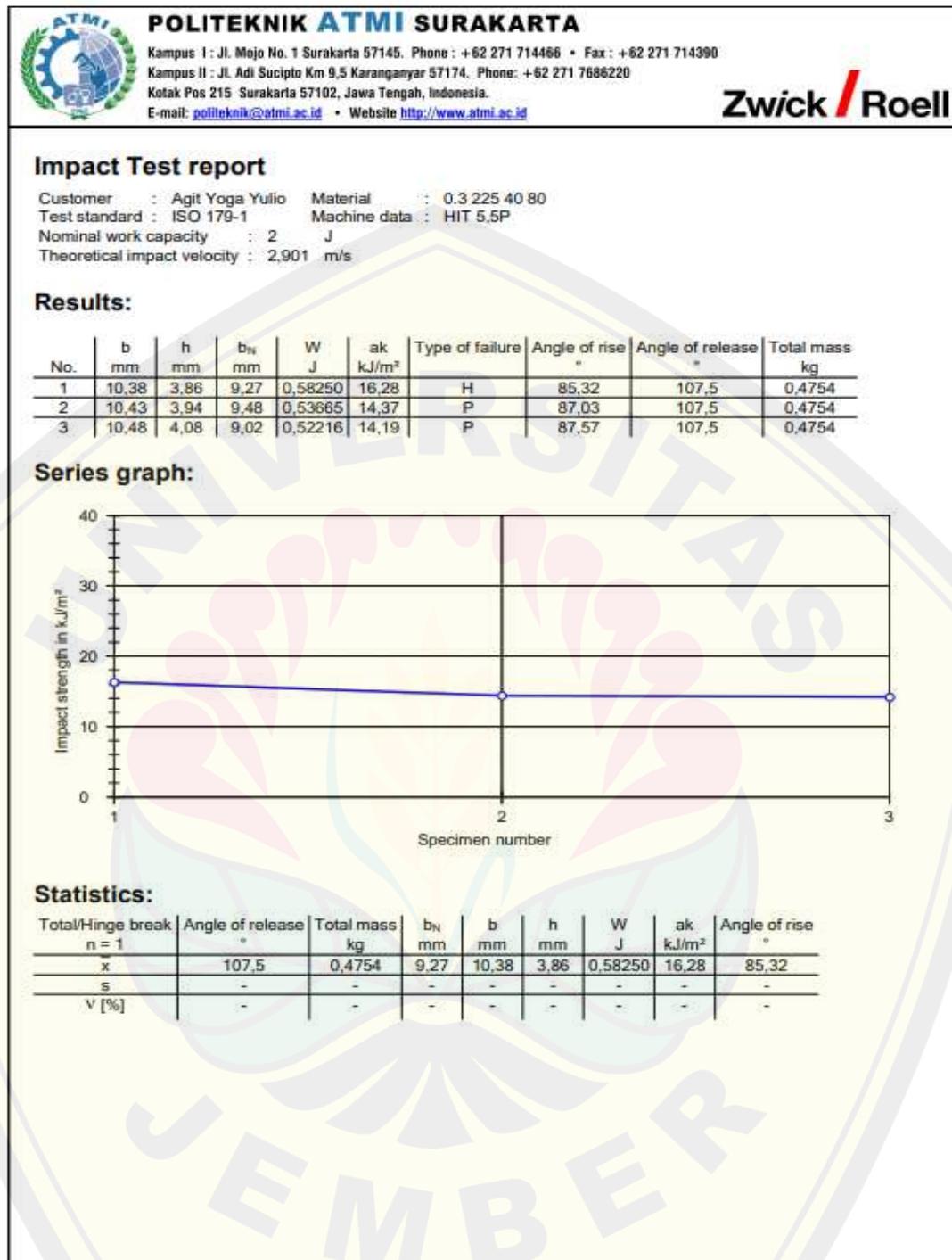
Gambar 6.6 Data uji impak spesimen 6



Gambar 6.7 Data uji impak spesimen 7



Gambar 6.8 Data uji impak spesimen 8



0,3 230 45 70.zs2

Gambar 6.9 Data uji impak spesimen 9

Lampiran 7. Tabel Distribusi F ( $\alpha= 0.05$ )

$df1 = k - 1 \longrightarrow$  Variabel bebas + variabel terikat  $- 1 \longrightarrow 5 - 1 = 4$

$df2 = n - k \longrightarrow$  Jumlah observasi atau sampel  $- 5 \longrightarrow 27-5= 22$

Titik Persentase Distribusi F untuk Probabilita = 0,05															
df untuk penyebut (N2)	df untuk pembilang (N1)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.42	19.43
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.13

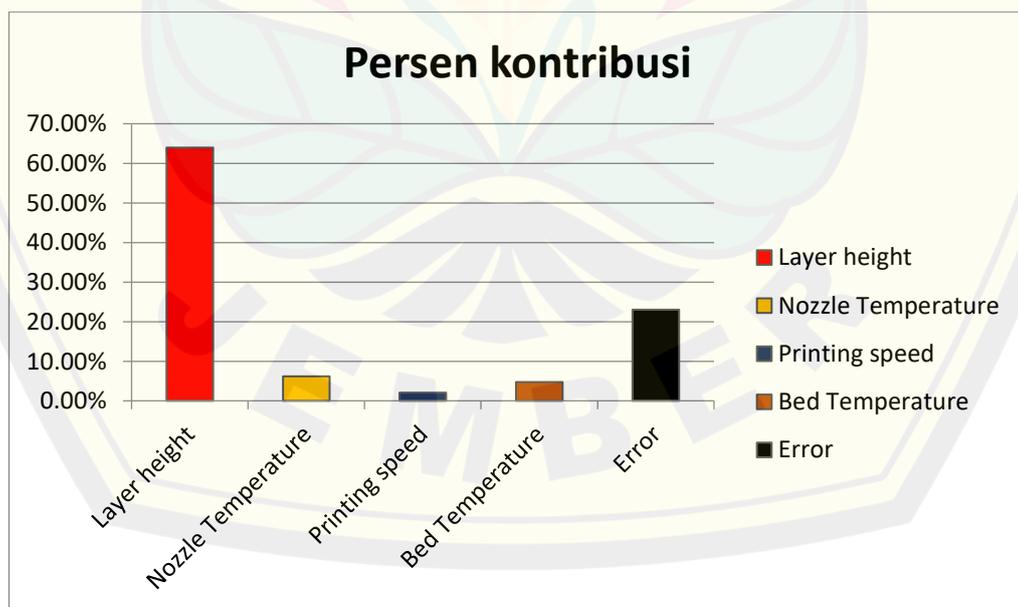
Gambar 7.1 Tabel distribusi uji F

Lampiran 8. Analisis ANOVA menggunakan atau Microsoft Excel

Faktor Kendali	Degree of	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Kontribusi
Layer height	2	944.00	944.00	472.00	25.00	Significant	63.97%
Nozzle Temperature	2	91.32	91.32	45.66	2.42	not Significant	6.19%
Printing speed	2	30.48	30.48	15.24	0.81	not Significant	2.07%
Bed Temperature	2	69.99	69.99	35.00	1.85	not Significant	4.74%
Error	18	339.80	339.80	18.88			23.03%
Total	26	1475.58					100.00%

Kombinasi	Faktor Kendali				Nilai Uji (MPa)			rata rata	#REF!	Colum	SS Para
	layer heigt	ppzle temperatu	Printing speed	bed temperatur	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3				
1	0.1	220	40	70	11.64	14.64	10.53	12.27		LH1	1260.9601
2	0.1	225	45	75	10.42	10.22	15.87	12.17		LH2	6176.91204
3	0.1	230	50	80	12.08	11.6	9.53	11.07		LH3	2721.36111
4	0.2	220	45	80	25.52	28.7	27.39	27.20		NT1	3989.60668
5	0.2	225	50	70	18.83	26.53	29.64	25.00		NT2	2570.49
6	0.2	230	40	75	15.41	35.87	27.89	26.39		NT3	2746.45871
7	0.3	220	50	75	22.09	23.81	25.17	23.69		PS1	2723.7961
8	0.3	225	40	80	10.03	14.58	15.98	13.53		PS2	2950.6624
9	0.3	230	45	70	16.28	14.37	14.19	14.95		PS3	3571.2576
								18.47		BT1	2726.58028
										BT2	3875.0625
										BT3	2683.58534
										T	498.81



Gambar 2. Perhitungan ANOVA kekuatan impact menggunakan Microsoft Excel

Lampiran 9. Analisis Metode Taguchi pengujian impact menggunakan Minitab

Minitab - Minitab GDFTYFYTF.mpx  
File Edit Data Calc Stat Graph View Help Assistant

Navigator  
Taguchi Design  
Taguchi Analysis: Replikasi 1, R...

Taguchi Analysis: Replikasi ...  
WORKSHEET 2  
Taguchi Analysis: Replikasi 1, Replikasi 2, Replikasi 3 versus LH, NT, PS, BT

	C1-T	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
	LH	NT	PS	BT	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3	SNRA1	MEAN1	
1	0,1	220	40	70	11.64	14.64	10.53	21.5356	12.2700	
2	0,1	225	45	75	10.42	10.22	15.87	21.2005	12.1700	
3	0,1	230	50	80	12.08	11.60	9.53	20.7409	11.0700	
4	0,2	220	45	80	25.52	28.70	27.39	28.6620	27.2033	
5	0,2	225	50	70	18.83	26.53	29.64	27.4639	25.0000	
6	0,2	230	40	75	15.41	35.87	27.89	26.7958	26.3900	
7	0,3	220	50	75	22.09	23.81	25.17	27.4540	23.6900	
8	0,3	225	40	80	10.03	14.58	15.98	22.0853	13.5300	
9	0,3	230	45	70	16.28	14.37	14.19	23.4416	14.9467	
10										

Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

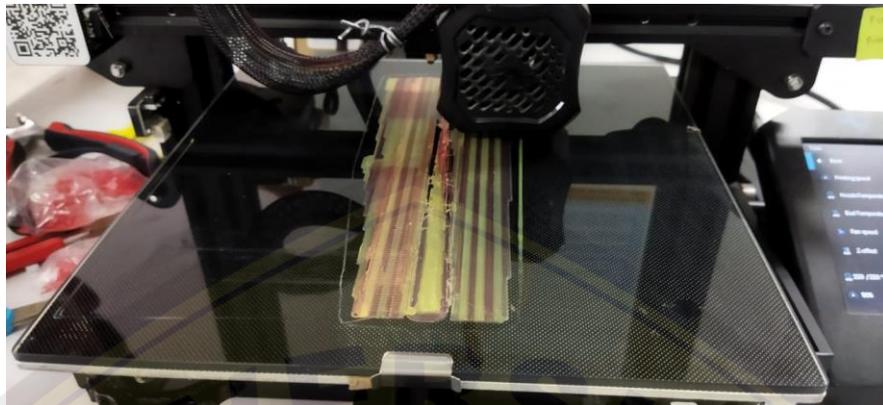
Level	LH	NT	PS	BT
1	21.16	25.88	23.47	24.15
2	27.64	23.58	24.43	25.15
3	24.33	23.66	25.22	23.83
Delta	6.48	2.30	1.75	1.32
Rank	1	2	3	4

Response Table for Means

Level	LH	NT	PS	BT
1	11.84	21.05	17.40	17.41
2	26.20	16.90	18.11	20.75
3	17.39	17.47	19.92	17.27
Delta	14.36	4.15	2.52	3.48
Rank	1	2	4	3

Gambar 9.1 Perhitungan menggunakan software minitab

Lampiran 10. Proses pencetakan produk shin guard



Gambar 6.1 Tahap awal proses pencetakan produk *shin guard*



Gambar 6.2 Tahap finishing produk yang telah selesai



Gambar 6.3 Pengaplikasian produk *shin guard*