

ANALISIS PARAMETER PROSES INJEKSI 3D PRINTED VEROWHITE PLUS RAPID TOOLING DENGAN METODE DESIGN OF EXPERIMENTS

Riona Ihsan Media

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Perancangan Manufaktur
rio_sanmed@polman-bandung.ac.id

Ismet P. Ilyas

Tenaga Pengajar (Dosen)
Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Perancangan Manufaktur
ismetpi@de.polman-bandung.ac.id

Mohammad Qomarudin

Mahasiswa Program Sarjana Terapan
Politeknik Manufaktur Bandung
Dept. Teknik Perancangan Manufaktur
mohammadqomarudin23@gmail.com

The insert cavity and core produced by the previous research were made using the polymer rapid tools (PRT) technique and will be used for the experimental production process. PRT is a technique for making tools with polymer materials using Additive Manufacturing (AM) technology. In this research, the polymer material used is *VeroWhite Plus*. The insert cavity and core will be tested to produce ± 100 key chain products. The adjustment of the injection process parameters is sought through the simulation process to obtain low insert cavity and core temperature values so that the mold is not damaged at the beginning of the injection process. There are 5 parameters of the injection process that affect the optimal mold durability, namely: mold temperature, injection speed, injection pressure, hold pressure and cooling time. The analysis was carried out using the design of experiments (DOE) method to obtain the optimal combination of injection process parameters. Analysis of the DOE method based on software simulation obtained the optimal combination of injection process parameters with details (injection speed: 5 mm / s, injection pressure: 15 Mpa, holding pressure: 10 Mpa and cooling time: 100 seconds). The durability of the insert cavity and core produced by PRT is able to produce products as desired by 100 products or even more.

Keywords : Polymer Rapid Tools, Injection Parameter Process, Design of Experiments, Simulation, Additive Manufacturing (AM) Technology, *VeroWhite Plus*

1. PENDAHULUAN

Rapid Tooling adalah suatu teknik dalam menghasilkan alat perkakas seperti cetakan atau produk baru untuk memperkenalkan kepada pasar dengan waktu yang relatif lebih cepat dan murah [1][2]. Salah satu contoh aplikasi dari teknologi RT tersebut adalah dengan menggunakan *Layer Manufacturing* (LM) yaitu dengan menghasilkan suatu produk lapisan dengan lapisan menggunakan bantuan mesin *rapid prototyping machine* atau umumnya dikenal sebagai *3D Printing*. Teknologi tersebut menghasilkan produk yang dapat digunakan secara langsung dan dengan konfigurasi yang dapat di kustomisasi [3].

Umumnya, material yang digunakan dalam teknologi LM adalah *metal* dan *polymer*. Masing-masing material mempunyai keunggulan dan kelemahan diantaranya adalah waktu pembuatan dan biaya material yang digunakan. Berbagai metode digunakan untuk mendapatkan parameter yang optimal dalam proses menghasilkan produk secara cepat dan murah dengan menggunakan metode FDM (*Fused Deposition Modelling*) dengan material PLA (*Polylactic acid*) [4].

Namun teknologi FDM yang digunakan dalam penelitian tersebut hanya sebatas untuk pengujian tanpa disertai dengan parameter dalam perancangan. Selain material PLA, material yang dapat digunakan untuk 3D printer adalah ABS (*acrylonitrile-butadiene-styrene*) yang mempunyai struktur *amorphous*. Percobaan yang dilakukan dalam penelitiannya adalah dengan memodifikasi dan mengubah parameter proses pembuatan material dengan menggunakan XRD (*X-ray diffraction*) sehingga dapat meningkatkan nilai *kejut/impact* dari properti materialnya [5][6][7]. Walaupun dengan PLA yang telah dimodifikasi tersebut lebih unggul dari ABS, namun material tersebut belum tersedia luas dipasar dikarenakan masih dalam tahap pengembangan.

Karakterisasi material untuk 3D printer yang menggunakan metode FDM juga dilakukan untuk meningkatkan ketahanan permukaan produk terhadap zat kimia, terhadap perubahan temperature berdasarkan MFI (*Melt Flow Index*), meningkatkan kekuatan tarik, serta mudah untuk didaur ulang tanpa merusak lingkungan [8][9][10][11]. Disamping itu, pengembangan material agar mudah untuk difabrikasi juga menggunakan metode ekstrusi FFF (*Fused Filament Fabrication*) [12].

Beberapa upaya dalam proses optimalisasi metode fabrikasi juga dilakukan agar proses *trial and error* dapat di minimalisir pada proses simulasi dengan menggunakan metode FES (*Finite Element Simulation*) [13]. Metode tersebut diaplikasikan untuk mencangkok saluran arteri coroner dalam mengobati penyakit arteri koroner, namun metode simulasi tersebut sering kali menemui kegagalan karena tidak sesuai dengan parameter standar. Pengembangan pembuatan produk dengan cepat dapat dikategorikan menjadi 2, yaitu; (1) metode pembuatannya dengan *additive manufacturing*; dan (2) material yang digunakan antara lain, *metal* dan *polymer*.

Berdasarkan tinjauan dari beberapa penelitian sebelumnya, *polymer* dapat digunakan sebagai material utama dalam pembuatan *tooling*. *Polymer Rapid Tooling* (PRT) merupakan teknik pembuatan alat perkakas (*tools*) dengan material polimer dengan menggunakan teknologi *Additive Manufacturing* (AM). Teknologi AM tersebut adalah suatu proses pengambilan data dan informasi dari data CAD yang dikonversi menjadi data file STL (*Stereolithography*) [14]. PRT dapat menjadi alternatif bagi pelaku industri manufaktur yang menginginkan pembuatan cetakan dalam waktu yang cepat, biaya yang relatif murah dan untuk permintaan jumlah produksi sedikit atau *volume* rendah [15]. Teknologi PRT memungkinkan pelaku industri manufaktur untuk memenuhi kebutuhan tersebut, bila di bandingkan dengan teknologi pembuatan konvensional.

Pada penelitian kali ini cetakan yang digunakan merupakan cetakan hasil PRT yang mana material polimer yang digunakan adalah *VeroWhite Plus*. Penyesuaian parameter proses injeksi bisa diatur dan disesuaikan bergantung pada material cetakan yang digunakan. Tujuan dari penyesuaian parameter proses injeksi adalah agar daya tahan cetakan hasil PRT bisa optimal. Daya tahan yang optimal bisa dilihat dari kemampuan cetakan menghasilkan produk dengan kualitas yang diinginkan. Pada umumnya penentuan parameter proses injeksi dilakukan berdasarkan *trial and error* di lapangan dan pengalaman dari operator mesin injeksi. Pada penelitian ini berbeda, karena material cetakan yang digunakan adalah polimer *VeroWhite Plus*, sehingga proses *trial and error* di lapangan tidak bisa dilakukan. Karena, akan menurunkan sifat dari cetakan yang berpengaruh terhadap daya tahan dan bahkan bisa merusak cetakan secara cepat. Untuk menghindari penurunan sifat dan kerusakan cetakan secara cepat, proses *trial and error* dilapangan digantikan dengan proses simulasi pada *software*.



Gambar 1: *Insert core dan cavity* hasil PRT

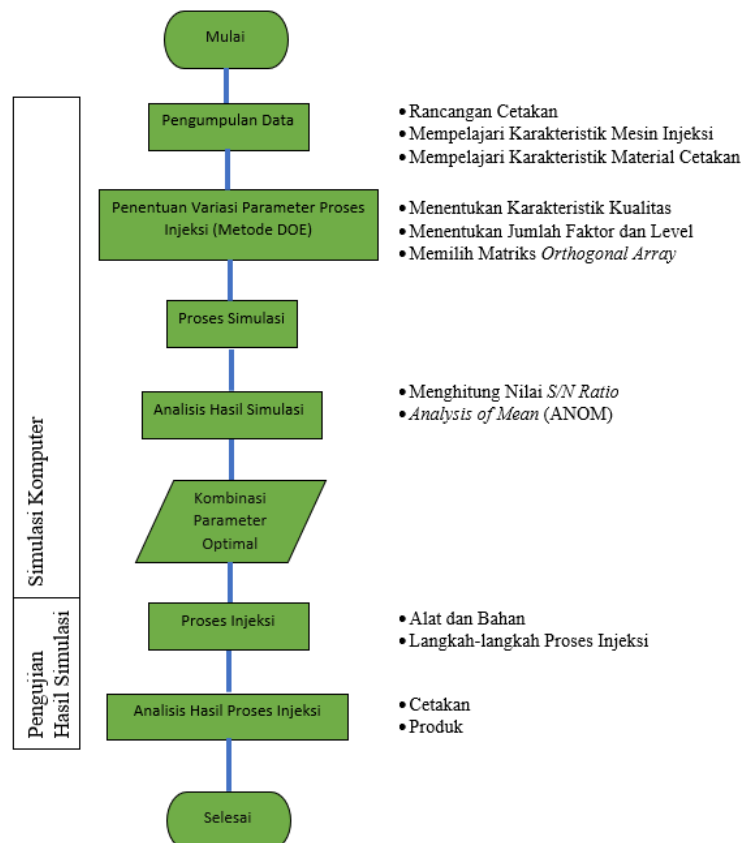
Dari penelitian yang dilakukan oleh Bagalkot, A. *et al*, 2019 [16] serta karakterisasi material yang dilakukan oleh Tanoto, Yopi, 2020 [17], dijelaskan bahwa beberapa parameter proses injeksi yang berpengaruh terhadap daya tahan cetakan hasil PRT, yaitu *Mold Temperature*, *Injection Pressure*, *Injection Speed*, *Holding Pressure*, dan *Cooling Time*. Sementara itu, untuk penentuan nilai dari masing-masing parameter, penulis mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Mendible, G. A. *et al*. 2017 dan Balgaktot, A. *et al*, 2019 [1][18]. Dari 5 parameter dan nilai yang didapatkan akan dilakukan analisis dengan metode *Design of Experiment* (DOE). Tujuan penggunaan metode DOE adalah untuk mendapatkan kombinasi parameter optimal dimana parameter ini akan diterapkan atau diaplikasikan pada proses eksperimen. Metode DOE digunakan karena bersifat preventif/pencegahan. Kombinasi parameter proses injeksi yang optimal hasil simulasi akan digunakan sebagai parameter proses injeksi cetakan hasil PRT berbahan *VeroWhite Plus* untuk memproduksi produk gantungan kunci *volume* rendah (± 100 produk), akan dilihat daya tahan cetakan selama dilakukan proses injeksi.



Gambar 2: Produk gantungan kunci logo HMTP

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini dibagi menjadi 2 bahasan utama yaitu simulasi komputer dan pengujian hasil simulasi. Pada tahap simulasi komputer, kegiatan yang akan dilakukan di mulai dengan pengumpulan data (cetakan hasil PRT, mempelajari karakterisasi mesin injeksi, mempelajari karakterisasi material cetakan (*VeroWhite Plus*)), penentuan variasi parameter proses injeksi (metode DOE) rinciannya berupa (memilih karakteristik kualitas, penentuan jumlah faktor dan level, memilih matriks *orthogonal array*), proses simulasi, analisis hasil simulasi (menghitung nilai *S/N ratio*, *analysis of mean* (ANOM)), setelah dilakukan analisis hasil simulasi dihasilkan data kombinasi parameter optimal untuk dilanjutkan pada proses berikutnya yaitu pengujian hasil simulasi. Tujuan dari dilakukannya proses simulasi komputer ialah penyesuaian parameter proses yang akan digunakan berdasarkan data-data yang diterima dari penelitian sebelumnya. Luaran dari simulasi ini adalah kombinasi parameter proses yang optimal dimana, nanti akan diuji pada proses eksperimen. Sedangkan pada pengujian hasil simulasi, kegiatan yang dilakukan ialah proses injeksi/eksperimen dan kesimpulan hasil eksperimen. Tujuan dari pengujian hasil simulasi/eksperimen adalah menguji kinerja cetakan apakah mampu menghasilkan produk sesuai dengan jumlah yang sudah ditentukan. Pada pengujian kinerja *mold* kegiatan yang akan dilakukan yaitu proses injeksi

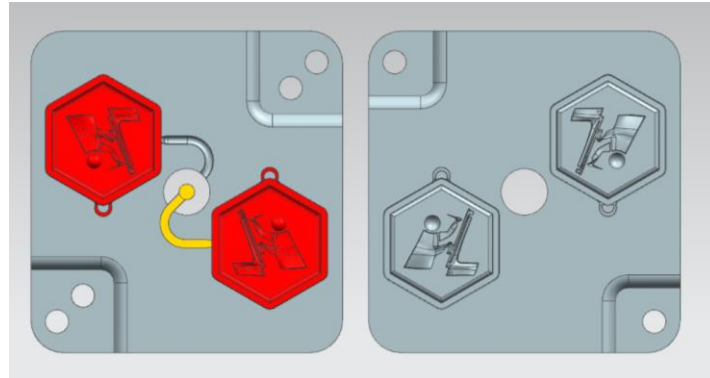


Gambar 3: Diagram alir penelitian

2.1 Pengumpulan Data

Rancangan cetakan

Pada tahap ini, rancangan cetakan, material cetakan dan material produk yang akan digunakan sudah dibuat dan ditentukan Gambar 4.



Gambar 4: Rancangan produk, *insert core & cavity* dan *runner*

Mempelajari karakterisasi mesin injeksi

Mesin injeksi yang digunakan adalah FANUC ROBOSHOT α -S15iA. Tujuan mempelajari karakterisasi mesin injeksi adalah untuk mengetahui parameter proses yang dapat di atur agar cetakan mampu berfungsi secara optimal.

Tabel 1: Spesifikasi mekanis mesin injeksi FANUC ROBOSHOT α -S15iA .

Clamping unit		
SPEKIFIKASI	DIMENSION	UNIT
Tonnage	15	tonforce (tonf)
Max. and min. Mold height	260 – 130	millimeter (mm)
Tie bar spacing, HxV	260 x 235	millimeter (mm)
Platen size, HxV	355 x 340	millimeter (mm)
Min. mold size, HxV	150 x 135	millimeter (mm)
Injection unit		
SPEKIFIKASI	DIMENSION	UNIT
Screw diameter	18	millimeter (mm)
Injection stroke	75	millimeter (mm)
Max. injection volume	19	centimeters kubik (cm ³)
Max. injection speed	525	Millimeter per detik (mm/s)
Max. injection pressure	260	megapaskal
Max. pack pressure	190	megapaskal
Max. injection rate	450	centimeters kubik (cm ³)
Max. screw rotation speed	133	Putaran per menit (min ⁻¹)

Mempelajari karakterisasi material cetakan

Tabel 2: Spesifikasi material verowhite plus

Thermal properties – temperature resistance		
SPESIFIKASI	DIMENSION	UNIT
Heat deflectin temperature (@0.45 Mpa)	45 – 50	derajat celcius (°C)
Glass transition temperature (Tg)	52 – 54	derajat celcius (°C)

Heat Deflection Temperature (HDT) mengindikasikan temperatur dimana polimer berubah bentuk karena beban tertentu. *Glass transition temperature* (Tg) merupakan fenomena perubahan fase suatu material diantara fase cair dan padat. Ketika temperatur di bawah Tg maka polimer bersifat *glassy* (kaca), dan ketika temperatur di atas Tg maka polimer bersifat *rubbery* (karet). Pada penelitian ini, material *VeroWhite Plus* akan dicoba digunakan sebagai material cetakan, cocok atau tidaknya material ini di jadikan cetakan akan dilihat setelah dilakukan proses pengujian.

2.2 Penentuan Variasi Parameter Proses Injeksi (Metode DOE)

Pada tahapan ini, akan didapatkan parameter proses injeksi yang optimal setelah dilakukan analisis metode DOE menggunakan salah satu *software engineering*. Ada tahapan-tahapan yang dilakukan sehingga mendapatkan parameter yang diinginkan. Yaitu, memilih karakteristik kualitas, menentukan jumlah faktor dan level kemudian memilih matriks *orthogonal array*.

Pemilihan Karakteristik Kualitas Untuk Cetakan

Setiap produk dirancang untuk menghasilkan fungsi tertentu. Beberapa karakteristik pengukuran, biasanya menunjukan karakteristik kualitas yang digunakan untuk mengekspresikan sejauh mana sebuah produk menjalankan fungsinya. Pada penelitian kali ini karakteristik kualitas yang dipilih adalah *small is better*, karena hasil yang diinginkan dari penelitian ini adalah temperatur yang kecil tujuannya adalah untuk menjaga temperatur cetakan dibawah temperatur transisi gelas agar umur cetakan lebih panjang

Penentuan Jumlah Faktor Dan Level

Pemilihan jumlah level penting artinya untuk ketelitian hasil percobaan dan biaya pelaksanaan percobaan. Semakin banyak level yang diteliti maka hasil percobaan akan lebih teliti karena data yang diperoleh akan lebih banyak, tetapi banyaknya level juga akan meningkatkan biaya percobaan. Jumlah faktor yang dipilih pada penelitian kali ini ada 4 dengan masing-masing 3 level. Penentuan nilai-nilai pada setiap level merujuk pada penelitian Mendible, G. A. *et al.* 2017

Tabel 3: Jumlah faktor dan level

PARAMETER/FAKTOR	LEVEL			UNIT
	1	2	3	
Injection speed	10	15	20	millimeter per detik (mm/s)
Injection pressure	15	20	25	megapaskal (Mpa)
Holding pressure	8	10	12	megapaskal (Mpa)
Cooling time	40	45	50	detik (s)

Memilih Matriks *Orthogonal Array*

Pemilihan matriks *orthogonal array* ini berdasarkan jumlah level dan faktor yang telah ditentukan. Matriks *Orthogonal Array* yang dipilih pada penelitian kali ini yaitu $L_9(3^4)$ dengan jumlah percobaan sebanyak 9 kali.

Tabel 4: Matriks orthogonal array $L_9(3^4)$

PERCOBAAN	FAKTOR			
	Injection speed (mm/s)	Injection pressure (Mpa)	Holding pressure (Mpa)	Cooling time (s)
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

Tabel 5: Kombinasi parameter proses

PERCOBAAN	FAKTOR			
	Injection speed (mm/s)	Injection pressure (Mpa)	Holding pressure (Mpa)	Cooling time (s)
1	10	15	8	40
2	10	20	10	45
3	10	25	12	50
4	15	15	10	50
5	15	20	12	40
6	15	25	8	45
7	20	15	12	45
8	20	20	8	50
9	20	25	10	40

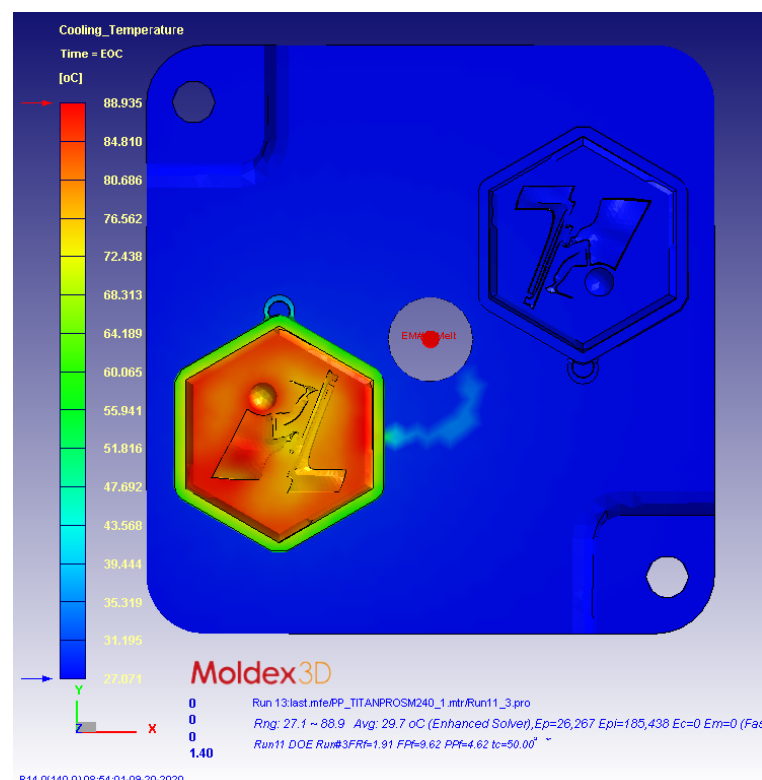
2.3 Proses Simulasi

Pada saat proses simulasi, data-data yang dipilih pada *software* akan disesuaikan dengan data yang digunakan. Seperti material produk menggunakan *Polypropylene* (PP) dengan merk TitanPro, material *insert* cetakan menggunakan polimer *VeroWhite Plus* dan mesin injeksi yang akan digunakan adalah FANUC ROBOSHOT α -S15tA.

Setelah data-data yang akan digunakan sudah sesuai, berikutnya dilakukan pengaturan kombinasi parameter proses injeksi sesuai dengan data pada tabel 5. Ada 9 kombinasi parameter yang disimulasikan. Kombinasi setiap parameter proses injeksi plastik disimulasikan dengan *software* simulasi injeksi plastik moldex3D R14 mode *expert run* (*DOE analysis*) sehingga didapatkan nilai temperatur cetakan. Kombinasi level setiap parameter proses dan nilai temperatur hasil simulasi dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6: Kombinasi parameter proses

PERCOBAAN	FAKTOR				RESPON
	Injection speed (mm/s)	Injection pressure (Mpa)	Holding pressure (Mpa)	Cooling time (s)	Temperatur (°C)
1	10	15	8	40	97,80
2	10	20	10	45	92,98
3	10	25	12	50	88,93
4	15	15	10	50	90,81
5	15	20	12	40	100,11
6	15	25	8	45	95,77
7	20	15	12	45	97,21
8	20	20	8	50	92,94
9	20	25	10	40	102,07

**Gambar 5:** Temperatur cetakan hasil simulasi

Gambar 5 merupakan temperatur cetakan paling rendah dari hasil 9 percobaan yang disimulasikan. Data lengkap temperatur cetakan tiap percobaan pada simulasi ditampilkan pada tabel 5. Temperatur yang didapat dari kombinasi parameter optimal 88,30 °C masih terlalu tinggi dari temperatur yang diharapkan yaitu 52 – 54 °C. Namun, tetap digunakan sebagai kombinasi parameter proses untuk proses pengujian karena penelitian ini mencoba menguji penggunaan polimer *VeroWhite Plus* sebagai material cetakan. Apakah cocok atau tidak akan dilihat dari daya tahan cetakan dan produk yang dihasilkan.

2.4 Analisis Hasil Simulasi

Setelah dilakukan simulasi dengan kombinasi *orthogonal array* maka didapatkan 9 nilai temperatur. Pada analisis hasil simulasi akan dihitung nilai *S/N Ratio* dan akan dilakukan analisis rata-rata (ANOM) dari nilai temperatur yang didapatkan

Menghitung nilai S/N ratio

Nilai *S/N Ratio* dihitung dengan persamaan *S/N Ratio smaller is better* karena nilai temperatur yang diinginkan semakin kecil semakin baik. Dengan rumus

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \times \log(y_i^2) \quad (1)$$

Tabel 6: Nilai S/N ratio

PERCOBAAN	FAKTOR				RESPON	S/N RATIO
	Injection speed (mm/s)	Injection pressure (Mpa)	Holding pressure (Mpa)	Cooling time (s)	Temperatur (°C)	
1	10	15	8	40	97,80	-39,8067
2	10	20	10	45	92,98	-39,3678
3	10	25	12	50	88,93	-38,9809
4	15	15	10	50	90,81	-39,1626
5	15	20	12	40	100,11	-40,0095
6	15	25	8	45	95,77	-39,6245
7	20	15	12	45	97,21	-39,7542
8	20	20	8	50	92,94	-39,3640
9	20	25	10	40	102,07	-40,1779

Analysis of Mean (ANOM)

ANOM dilakukan untuk mendapat hasil rata-rata S/N setiap level dari parameter. Level optimum pada setiap parameter dapat diketahui dari level yang memiliki rata-rata nilai *S/N Ratio* terkecil pada setiap parameter.

Tabel 7: Tabel ANOM injection speed

PERCOBAAN	S/N RATIO	INJECTION SPEED (mm/s)		
		A1	A2	A3
1	-39,8067	-39,8067		
2	-39,3678	-39,3678		
3	-38,9809	-38,9809		
4	-39,1626		-39,1626	
5	-40,0095		-40,0095	
6	-39,6245		-39,6245	
7	-39,7542			-39,7542
8	-39,3640			-39,3640
9	-40,1779			-40,1779
Jumlah		-118,156	-118,797	-119,296
Rata-rata		-39,3852	-39,5989	-39,7654

Tabel 8: Tabel ANOM injection pressure

PERCOBAAN	S/N RATIO	INJECTION PRESSURE (Mpa)		
		B1	B2	B3
1	-39,8067	-39,8067		
2	-39,3678		-39,3678	
3	-38,9809			-38,9809
4	-39,1626	-39,1626		
5	-40,0095		-40,0095	
6	-39,6245			-39,6245
7	-39,7542	-39,7542		
8	-39,3640		-39,3640	
9	-40,1779			-40,1779
Jumlah		-118,724	-118,741	-118,784
Rata-rata		-39,5746	-39,5805	-39,5945

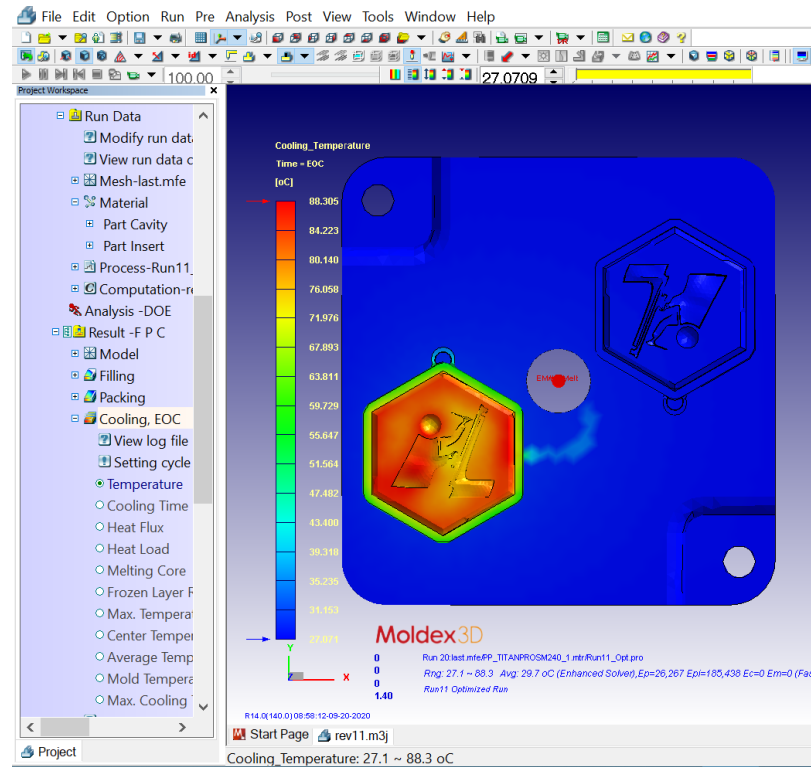
Tabel 9: Tabel ANOM holding pressure

PERCOBAAN	S/N RATIO	HOLDING PRESSURE (Mpa)		
		C1	C2	C3
1	-39,8067	-39,8067		
2	-39,3678		-39,3678	
3	-38,9809			-38,9809
4	-39,1626		-39,1626	
5	-40,0095			-40,0095
6	-39,6245	-39,6245		
7	-39,7542			-39,7542
8	-39,3640	-39,3640		
9	-40,1779		-40,1779	
Jumlah		-118,795	-118,708	-118,745
Rata-rata		-39,5985	-39,5695	-39,5816

Tabel 10: Tabel ANOM cooling time

PERCOBAAN	S/N RATIO	COOLING TIME (s)		
		D1	D2	D3
1	-39,8067	-39,8067		
2	-39,3678		-39,3678	
3	-38,9809			-38,9809
4	-39,1626			-39,1626
5	-40,0095	-40,0095		
6	-39,6245		-39,6245	
7	-39,7542		-39,7542	
8	-39,3640			-39,3640
9	-40,1779	-40,1779		
Jumlah		-119,994	-118,747	-117,508
Rata-rata		-39,9981	-39,5822	-39,1692

Kombinasi parameter proses yang paling optimal menurut *analysis of mean* optimalisasi taguchi adalah A1 (10 mm/s), B1 (15 Mpa), C2 (10 Mpa), dan D3 (50 s). Simulasi yang dilakukan dengan kombinasi parameter proses yang paling optimal hasil *software* CAE fitur analisis DOE nilai temperatur yang dihasilkan adalah 88,30 °C Gambar 6.



Gambar 6: Temperatur cetakan optimal

2.5 Proses Injeksi

Pada proses injeksi, penulis akan melakukan eksperimen menggunakan parameter yang didapat dari hasil simulasi. Sebelum melakukan proses injeksi persiapkan alat dan bahan, berikutnya kan dibahas langkah-langkah eksperimen.

Alat dan Bahan

- Kipas angin ; Kipas angin digunakan untuk mendinginkan atau menurunkan temperatur cetakan, karena pada kasus *mold* penulis tidak terdapat saluran pendingin/ *cooling*,
- Thermogun* ; *thermogun* berfungsi untuk mengecek temperatur cetakan setelah dilakukan proses injeksi,
- Jangka sorong ; digunakan untuk mengecek ukuran cetakan setiap selesai 1 *batch* dan produk hasil injeksi,
- Timbangan digital : menimbang produk hasil injeksi,
- Marker/ spidol* ; *marker* ini digunakan untuk menandai produk hasil injeksi, dan
- Alat tulis dan kertas ; untuk mencatat hasil ukuran temperatur cetakan dan kejadian yang terjadi selama proses eksperimen.

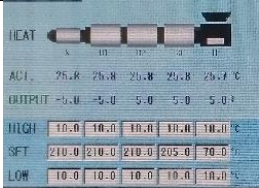


Gambar 7: Alat dan bahan

Langkah-langkah proses injeksi

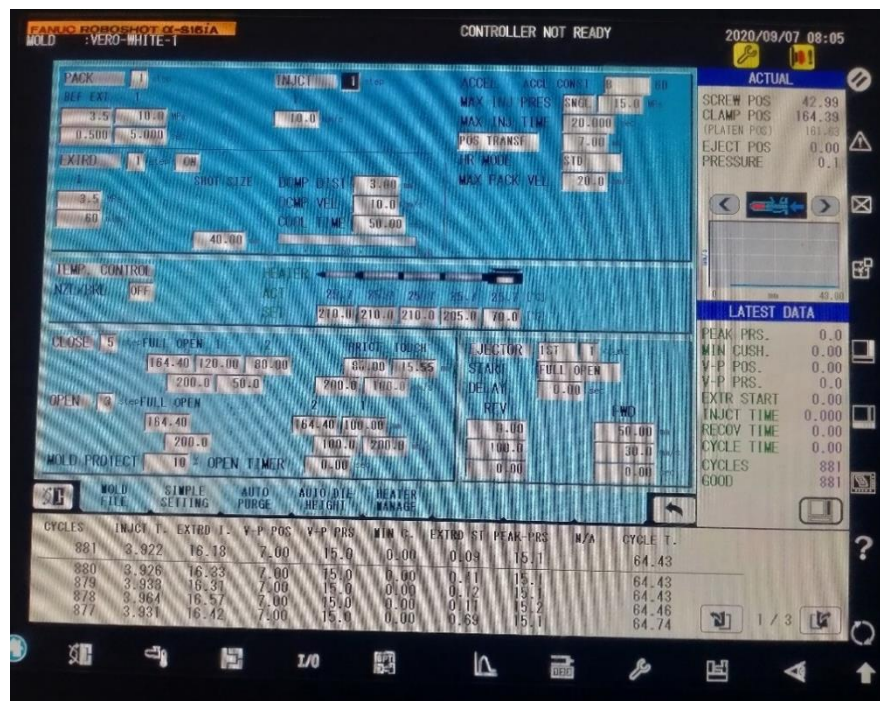
Setelah alat dan bahan sudah terpenuhi berikutnya akan dilakukan proses injeksi. Adapun langkah-langkah proses injeksi yang dilakukan bisa dilihat pada tabel 11.

Tabel 11: Langkah-langkah proses injeksi

NO	PROSES	VISUAL	KETERANGAN
1	Nyalakan mesin injeksi		Tekan tombol ON (I)
2	Atur temperatur leleh pada <i>nozzle</i>		Setiap area pada <i>nozzle</i> bisa diatur temperaturnya, namun pada <i>software</i> simulasi yang diatur hanya temperatur ujung <i>nozzle</i> saja. Kita set pada temperatur 210°C
3	Atur tekanan injeksi		Tekanan injeksi adalah 15 Mpa, sesuai simulasi
4	Atur tekanan pemadatan		Tekanan pemadatan adalah 10 Mpa, sesuai simulasi
5	Atur kecepatan injeksi		Kecepatan injeksi adalah 10 mm/s, sesuai simulasi
6	Atur waktu pemadatan		Waktu pemadatan adalah 5 mm/s, sesuai simulasi
7	Atur waktu pendinginan		Waktu pendinginan adalah 50 s, sesuai simulasi
8	Atur volume injeksi		Sesuaikan dengan produk.
9	<i>Clamping force, screw rotation speed, back pressure, mold open time, mold open stroke, ejector stroke</i>		Parameter proses lain yang disebutkan, diatur sesuai dengan penggunaan normal (cetakan baja).
10	<i>Purging</i>		Setelah semua parameter proses injeksi sudah diatur, selanjutnya mesin akan meminta untuk dilakukan proses <i>purging</i> / membersihkan. Selain membersihkan, <i>purging</i> dilakukan untuk mengecek volume injeksi. Sudah sesuai atau belum.
11	<i>Set zero datum</i>		Sentuhkan <i>nozzle</i> dengan <i>sprue</i> yang berada di cetakan, dan pastikan <i>mold</i> dalam kondisi tertutup.

12	Proses injeksi		<i>Mold</i> dalam kondisi terbuka, pastikan posisi <i>screw</i> sesuai dengan yang diinginkan (volume injeksi), tekan tombol <i>semi-auto</i> kemudian tekan tombol <i>start</i> untuk memulai injeksi. <i>Semi-auto</i> adalah satu siklus injeksi yang dilakukan secara otomatis dan akan berhenti ketika satu siklus itu selesai. (<i>mold</i> menutup, pengisian, pemadatan, pendinginan & pengisian <i>screw</i>, <i>mold</i> terbuka, ejsksi)
13	Pengukuran temperatur		Proses pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui apakah setelah <i>mold</i> terbuka suhu ejsksi sudah terpenuhi. Hasil ukuran temperaturnya masih diatas suhu ejsksinya (60 - 100°C)
14	Proses pendinginan 1		Pada fase ini, pendinginan difokuskan pada produk. Tujuannya agar produk mencapai suhu ejsksinya.
15	Proses ejsksi		Setelah temperatur ejsksi tercapai, produk dilepas secara manual.

16	Proses pendinginan 2		Pada fase ini, pendinginan kali difokuskan pada cetakan. Tujuannya agar temperatur cetakan dibawah 52-54°C.
17	Proses injeksi berikutnya (mulai lagi dari langkah 12-16)		Pastikan temperatur cetakan dibawah temperatur glass transition nya. Tujuannya agar umur cetakan lebih lama, karena T_g ini sangat berpengaruh pada sifat material cetakan.



Gambar 8: Tampilan parameter proses injeksi pada mesin injeksi FANUC ROBOSHOT α -S15iA.

Catatan:

- ❖ Proses injeksi berikutnya baru bisa dilakukan apabila temperatur cetakan sudah lebih kecil dari T_g .
- ❖ Proses injeksi dilakukan per batch, 1 batch dilakukan sebanyak 10 shot. Setiap selesai 1 batch dilakukan pengukuran pada cetakan terlebih dahulu.



Gambar 9: Hasil produk 1 batch injeksi

3. HASIL DAN DISKUSI

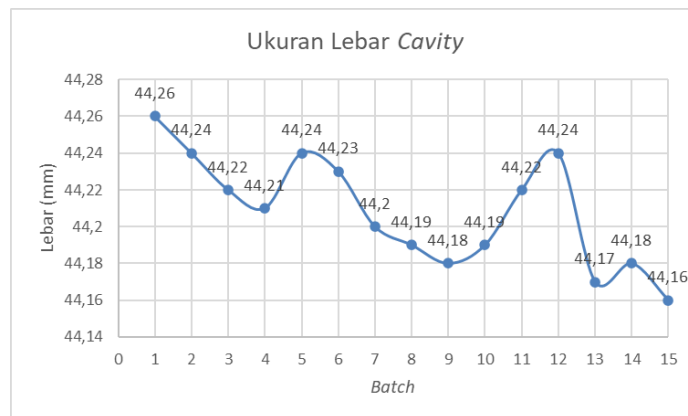
Pada bagian ini akan didiskuaikan analisis hasil dari pengujian/eksperimen yang telah dilakukan. Ada 2 hasil pengujian yang akan dijelaskan yaitu di lihat dari *mold*/cetakan dan dari produk yang dihasilkan.

3.1 Mold/Cetakan

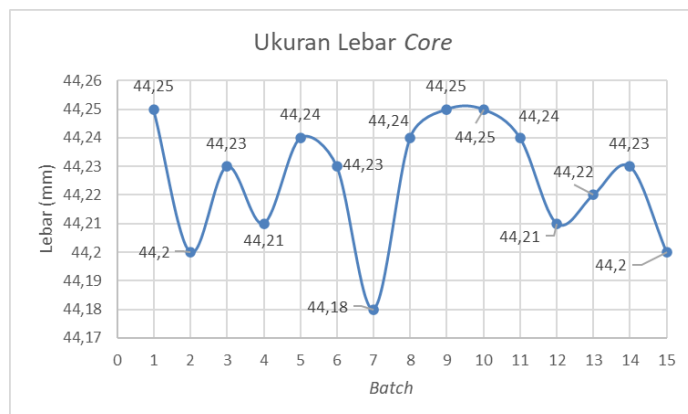
Akan didiskusikan perubahan yang terjadi pada cetakan selama proses eksperimen. Ada 2 perubahan yang bisa dilihat selama pengujian yaitu ukuran dari cetakan dan penampilan cetakan (visual).

Hasil pengukuran cetakan

Hasil pengukuran cetakan, dijadikan salah satu acuan apakah eksperimen bisa dilanjutkan atau tidak. Pengukuran dilakukan setelah proses injeksi akhir *batch* dikerjakan. Jadi, pada 1 *batch* injeksi terdapat 10 shot dan setelah setelah shot terakhir pada *batch* tersebut selesai, akan dilakukan proses pengukuran cetakan terlebih dahulu. Berikut merupakan data hasil pengukuran *mold* :



Gambar 10: Grafik ukuran lebar cavity



Gambar 11: Grafik ukuran lebar core

Pada kasus ini, cetakan hasil PRT mampu menghasilkan produk sesuai dengan jumlah yang diinginkan yaitu ± 100 produk. Bahkan bisa lebih, dilihat pada ukuran cetakan yang relatif aman.

Penampilan cetakan (visual)

Akan dilihat secara visual perubahan pada cetakan selama proses injeksi. Cetakan hasil PRT kemungkinan besar akan mengalami kerusakan pada saat proses injeksi, khusus nya rompal. Setiap penelitian akan mencoba mencari parameter proses injeksi yang cocok agar rompal bisa diperlambat. Kemungkinan penyebab terjadinya rompal ialah pembebanan yang diterima dan temperatur cetakan terlalu tinggi. Pada kasus eksperimen yang penulis kerjakan, beban yang diterima cetakan adalah ketika dilakukan proses ejeksi produk secara manual. Saat proses ejeksi manual dilakukan, pengambilan produk dengan posisi miring dan cenderung menekan ke bagian cetakan (Tabel 11, no.15). Selain itu, saat proses ejeksi temperatur cetakan masih terlalu tinggi (70-80°C). Dimana material *VeroWhite Plus* berada pada kondisi *rubbery*, kondisi dimana sifat cetakan sedang lentur atau elastis.



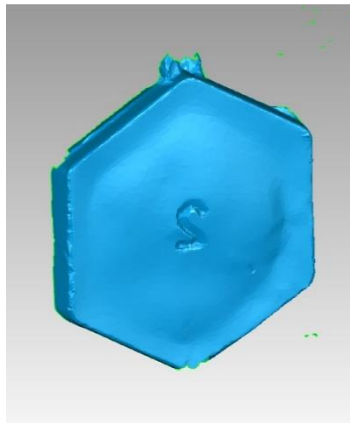
Gambar 11: Core mengalami rompal

Saat proses injeksi ke-19, cetakan rompal di salah satu bagian sudut (Gambar 12). Desain sudut yang tajam menyebabkan daerah itu jadi kritis, selain itu juga karena akumulasi beban yang diterima selama proses ejskasi manual. Proses injeksi terus dilanjutkan meski cetakan sudah mengalami rompal, alasannya adalah karena dimensi cetakan masih sesuai.

3.2 Produk

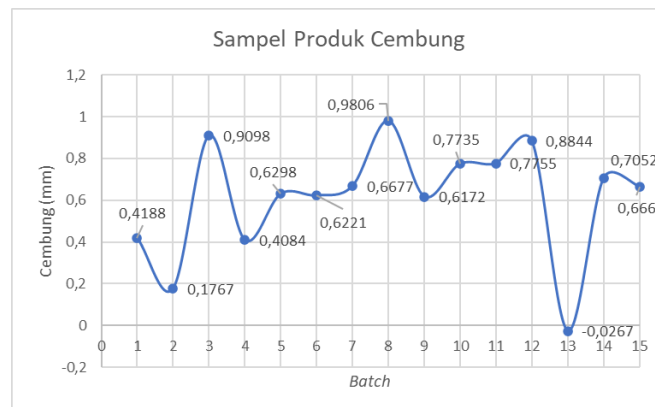
Saat proses injeksi, produk yang dihasilkan dari setiap injeksi terdapat kecacatan cembung, hanya produk hasil injeksi pertama yang permukaannya rata. Beberapa analisis penyebab produk mengalami cembung yaitu temperatur cetakan terlalu panas yang mungkin menyebabkan *cavity* terdeformasi dan tekanan terlalu besar.

Dilakukan proses 3D scanning untuk mengetahui berapa nilai penyimpangan yang terjadi (cembung). Berikut merupakan data penyimpangan hasil perbandingan produk hasil injeksi dengan model 3D CAD produk:



Gambar 12: Permukaan produk hasil 3D scanning

Produk pada shot ke-5 di setiap *batch* nya yang akan dijadikan sampel pengukuran untuk dilihat nilai penyimpangan cembung nya. Akan ada 15 hasil pengukuran bisa dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13: Permukaan produk hasil 3D scanning

3.3 Optimasi parameter proses injeksi

Setelah menjalankan eksperimen dan mengetahui produk yang dihasilkan. Cetakan hasil PRT masih bisa lebih optimal kinerja nya jika beberapa parameter prosesnya diubah. Karena, temperatur yang dihasilkan simulasi sebelumnya di rasa masih terlalu tinggi dan jauh dari nilai T_g . Penulis mencoba untuk melakukan simulasi ulang untuk mendapatkan temperatur cetakan lebih rendah dari hasil simulasi sebelumnya dengan nilai temperatur mendekati nilai T_g atau bahkan lebih rendah. Parameter proses hasil simulasi yang dihasilkan ini digunakan untuk saran proses injeksi berikutnya apabila dilakukan. Didapat parameter proses sebagai berikut:

Tabel 12: Optimasi parameter proses injeksi

PARAMETER PROSES	PARAMETER AWAL	SIMULASI OPTIMASI	UNIT
Temperatur leleh	210	210	derajat celcius ($^{\circ}\text{C}$)
Tekanan injeksi	15	15	megapaskal (Mpa)
Kecepatan injeksi	10	5	millimeter per detik (mm/s)
Waktu pepadatan	5	5	detik (s)
Tekanan pepadatan	10	10	megapaskal (Mpa)
Waktu pendinginan	50	100	detik (s)
Temperatur cetakan	88,30	48,453	derajat celcius ($^{\circ}\text{C}$)

Didapat parameter proses seperti tabel diatas dengan nilai temperatur cetakan $48,453^{\circ}\text{C}$. hasilnya lebih rendah dari nilai T_g material *VeroWhite Plus* ($52-54^{\circ}\text{C}$).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Didapatkan kombinasi parameter proses yang optimal berdasarkan simulasi dan eksperimen (*injection speed*: 5 mm/s, *injection pressure*: 15 Mpa, *holding pressure*: 10 Mpa dan *cooling time*: 100 detik).
2. Proses *trial and error* dilakukan berbasis simulasi, tidak dilakukan secara langsung karena akan mengurangi umur cetakan (sifat dari material berkurang).
3. Kinerja cetakan hasil PRT **mampu** menghasilkan produk sesuai dengan yang diinginkan 100 produk, bahkan lebih dan ukuran dari cetakan masih stabil.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] MENDIBLE, G.A., RULANDER, J.A., and Johnston, S.P., "Comparative study of rapid and conventional tooling for plastics injection molding." *Rapid Prototyping Journal*, n. 20, Mar. 2017.
- [2] AFONSO, D., Pires, L., ALVES DE SOUSA, R., and TORCATO, R., "Direct rapid tooling for polymer processing using sheet metal tools." *Procedia Manufacturing*, v. 1, n. 13, pp. 102-108, Jan. 2017.
- [3] DERADJAT, D., MINSHALL, T., "Implementation of rapid manufacturing for mass customisation." *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 1, n. 6, Feb. 2017.
- [4] CHACÓN, J. M., CAMINERO, M.A., GARCÍA-PLAZA, E., NÚÑEZ, P.J., "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection." *Materials & Design*, n.124, pp. 143-157, Jun. 2017.
- [5] WANG, L., GRAMLICH, W.M., GARDNER, D.J. "Improving the impact strength of Poly (lactic acid)(PLA) in fused layer modeling (FLM)." *Polymer*, n.114, pp. 242-248, Apr. 2017.
- [6] LEVENHAGEN, N.P., DADMUN, M.D., "Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3D printed polymeric samples." *Polymer*, n. 122, pp. 232-241, Jul. 2017.
- [7] HART, K.R., DUNN, R.M., SIETINS, J.M., *et al.*, "Increased fracture toughness of additively manufactured amorphous thermoplastics via thermal annealing" *Polymer*, n. 144, pp. 192-204, May. 2018.
- [8] JASGURPREET S. C., SINGH R., BOPARAI K.S., "Thermal and surface characterization of ABS replicas made by FDM for rapid tooling applications" *Rapid Prototyping Journal*, n. 1, Jan. 2018.
- [9] SINGH, N., SINGH, R., AND AHUJA I. P. S. "Recycling of polymer waste with SiC/Al₂O₃ reinforcement for rapid tooling applications" *Materials Today Communications*, v. 1, n. 15, pp. 124-127, Jun. 2018.
- [10] DAVID, S., PICKERING, K., "Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene" *Composites Part B: Engineering*, n. 135, pp. 110-118, Feb. 2018.
- [11] ZHAO, P., RAO, C., GU, F., *et al.*, "Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment" *Journal of Cleaner Production*, v. 1, n. 197, pp. 1046-1055, Oct. 2018.
- [12] HART, K.R., JOLIE B.F., BROWN, J.R. "Recycling meal-ready-to-eat (MRE) pouches into polymer filament for material extrusion additive manufacturing" *Additive Manufacturing*, n. 21, pp. 536-543, May. 2018.
- [13] NIKAM, S.H., JAIN, N.K., "Modeling and prediction of residual stresses in additive layer manufacturing by microplasma transferred arc process using finite element simulation" *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 141, n. 6, 141, Jun. 2019.
- [14] DUC, P., DIMOV, S.S., *Rapid manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling*. Springer Science & Business Media, Dec. 2012.
- [15] GARDAN, J., "Additive manufacturing technologies: state of the art and trends" *Additive Manufacturing Handbook*, pp.149-168, May 2017.
- [16] BAGALKOT, A., PONS, D., CLUCAS, D., SYMONS, D., "A methodology for setting the injection moulding process parameters for polymer rapid tooling inserts" *Rapid Prototyping Journal*, n.14, Oct. 2019.
- [17] TANOTO, Y.Y., ANGGONO, J., BUDIMAN, W., PHILBERT, K.V., "Strength and Dimension Accuracy in Fused Deposition Modeling: A Comparative Study on Parts Making Using ABS and PLA Polymers" *Rekayasa Mesin*, v. 11, no. 1, pp. 69-76, May. 2020.
- [18] BAGALKOT, A., PONS, D., SYMONS, D., CLUCAS, D., "Categorization of failures in polymer rapid tools used for injection molding" *Processes* 7, no. 1, pp. 17, Jan. 2019.