

Optimasi Parameter *Plastic Injection Molding* pada *Mold ID Card Holder Landscape* untuk Menurunkan Cacat *Sink Mark*

Vinsensius Herdani Agung Nugroho^{1,2,3}, Herry Syaifullah², Budi Wahyu Utomo², Baju Bawono³, Paulus Wisnu Anggoro^{3*}

¹Mahasiswa Magister Teknik Industri, Program Pascasarjana, Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,

Jl. Babarsari No. 44, Kalurahan Caturtunggal, Kepanewon Depok, Kab. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

²Program Studi Pembuatan Peralatan dan Perkakas Produksi, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Politeknik Astra,

Jl. Gaharu, Blok F3, K. Industri Delta Silicon 2, Kel. Cibatu, Kec. Cikarang Selatan, Kab. Bekasi, Jawa Barat 17532

³Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,

Jalan Babarsari No. 44, Kalurahan Caturtunggal, Kepanewon Depok, Kab. Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

*E-mail: pauluswisnuanggoro@gmail.com

Diajukan: 19-06-2024; Diterima: 26-08-2024; Dipublikasi: 31-08-2024

Abstrak

Masifnya industri pengolahan plastik mendorong perguruan tinggi vokasi untuk memberikan kompetensi kepada lulusannya menjadi *mold maker*. Sebagai perwujudan kompetensi tersebut, mahasiswa Program Studi Pembuatan Peralatan dan Perkakas Produksi di Politeknik Astra membuat *project mold ID card holder* dengan format *landscape* berbahan *Polypropylene*. Tujuan pembuatan *mold* ini adalah sebagai alat peraga praktikum dan adanya permintaan produk yang dapat dijadikan sebagai souvenir resmi Politeknik Astra. Seiring berjalannya waktu, *ID card holder* yang dihasilkan memiliki cacat *sink mark*, deformasi dan mengalami penyusutan material sehingga *ID card* sangat sulit untuk masuk dan secara visual tidak layak untuk dijadikan souvenir. Penelusuran yang dilakukan menghasilkan temuan adanya kesalahan prosedur berupa *trial dan error* dalam proses cetak dan tidak digunakannya CAE dalam proses pembuatannya. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan kembali kombinasi parameter optimal pada *mold ID card holder landscape* dengan menggunakan kombinasi Metode Taguchi dengan pendekatan *GRA-PCA* dan *software Autodesk Moldflow Adviser Ultimate 2024* serta mendapatkan perbandingan biaya sebelum menggunakan CAE dan sesudahnya. Parameter *mold temperature*, *melt temperature* dan *injection time* menjadi variabel bebas dalam penelitian ini. Sedangkan *sink mark estimate*, *volumetric shrinkage* dan *warpage* menjadi variabel terikatnya. Kombinasi parameter *mold temperature* 30 °C, *melt temperature* 200 °C dan *injection time* 3,5 s memberikan respon optimal sehingga cacat *sink mark* maksimalnya 0,02 mm dan selisih biaya Rp8.250.000,00 lebih rendah dengan memanfaatkan CAE.

Kata kunci: *mold, sink mark, GRA-PCA, CAE, parameter.*

Abstract

The significant growth of the plastic processing industry has driven vocational colleges to equip their graduates with competencies in mold making. As a manifestation of this competency, students in the Production Equipment and Tooling Program at Polytechnic Astra have undertaken a project to create a landscape-format ID card holder made from Polypropylene. The purpose of creating this mold is twofold: as a practical training aid and to fulfil demand for a product that can serve as an official souvenir of Polytechnic Astra. Over time, the produced ID card holders have exhibited defects such as sink marks, deformation, and material shrinkage, making it difficult for ID cards to fit and visually unsuitable as a souvenir. Investigation revealed procedural errors involving trial and error in the molding process and the absence of CAE (Computer-Aided Engineering) utilization during production. This study aims to rediscover the optimal parameter combinations for the ID card holder landscape mold using a Taguchi Method combined with GRA-PCA approach and Autodesk Moldflow Adviser Ultimate 2024 software. Additionally, it seeks to compare process costs before and after CAE implementation. Mold temperature, melt temperature, and injection time are the independent variables in this research. Sink mark estimate, volumetric shrinkage, and warpage are the dependent variables. The combination of mold temperature 30 °C, melt temperature 200 °C, and injection time 3,5 s provides optimal responses, minimizing sink marks to a maximum of 0.02 mm and lower cost difference of Rp8.250.000,00 when utilizing CAE.

Keywords: *mold, sink mark, GRA-PCA, CAE, parameter.*

1. Latar belakang

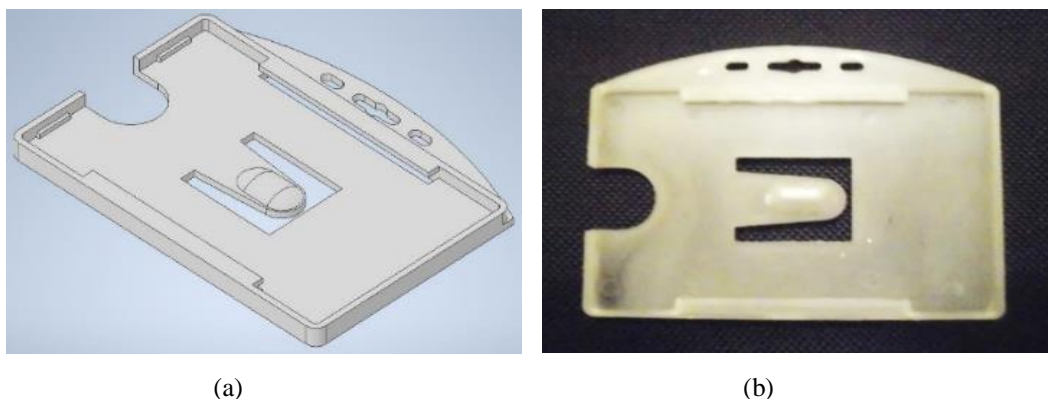
Dunia industri yang berjalan saat ini tidak lepas dari pengolahan plastik di dalamnya, baik itu sebagai bahan baku atau bahan pendukung dalam proses produksinya. Hal ini dikarenakan sifat plastik yang mudah dibentuk atau dicetak,

stabilitas bentuk yang baik pada suhu ruangan, kualitas permukaan yang baik dan biaya produksi yang relatif rendah [1]. Salah satu proses dalam pengolahan plastik yang umum dikenal adalah plastik injeksi, hal ini juga karena kemampuan produksinya yang masal, murah, mudah dan cepat [1, 2].

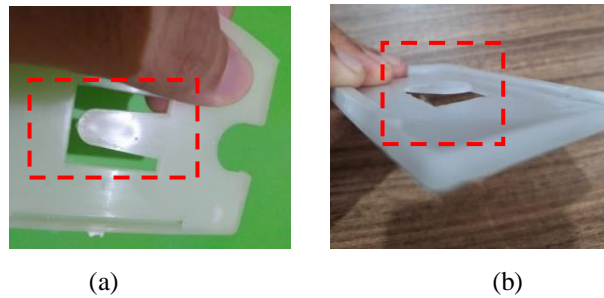
Masifnya industri ini, mendorong perguruan tinggi vokasi dan akademik yang memiliki program studi dalam rumpun ilmu teknik mesin dan teknik industri untuk terlibat dalam praktik nyata pada plastik injeksi. Politeknik Astra yang berlokasi di Kabupaten Bekasi saat ini memiliki 9 program studi, satu diantaranya adalah Pembuatan Peralatan dan Perkakas Produksi (P4). Program studi ini menghasilkan lulusan berupa lulusan dengan 4 kompetensi keahlian, yaitu: *jig & fixture maker*, *dies maker*, *mold maker* dan *special purpose machine maker*. Sebagai perwujudan dari kompetensi tersebut, secara rutin setiap tahunnya para mahasiswa dalam kelompok membuat *project* sebagai aktualisasi dari perkuliahan yang mereka ikuti. Salah satu *project* yang telah dibuat adalah *mold ID card holder* dengan format *landscape*. *Project* ini dipilih atas dasar beberapa kondisi, antara lain: kebutuhan alat peraga pendukung mata kuliah teori Perancangan *Mold* untuk Program Studi P4 & mata kuliah praktik *Plastic Injection* untuk mahasiswa program studi lain, adanya mesin *plastic injection* yang selama ini hanya digunakan untuk simulasi sederhana dan juga kebutuhan akan souvenir “*home made*” untuk mahasiswa baru & tamu yang berkunjung ke kampus. Setiap lulusannya akan diberikan kemampuan untuk menjadi seorang *mold maker*. Hanya saja banyak yang masih memiliki kendala karena piranti dan fasilitas yang dimiliki masih terbatas untuk dapat menyetarakan kualitas dengan industri.

Karakteristik yang diinginkan dari *ID card holder* (**Gambar 1.a.**) sangat sederhana, yakni hanya membutuhkan sifat material plastik yang ulet supaya tidak merusak *ID card* jika digunakan dalam jangka panjang dan terjangkau dari segi material dan biaya pembuatan. Oleh karenanya dipilih material *Polypropylene (PP)* [3, 4] untuk menjadi material produk *ID card*. Selanjutnya untuk menyesuaikan dengan karakteristik produk yang diinginkan maka dipilih material untuk *mold base* dengan spesifikasi minimum yang diperuntukkan dalam pembuatan *mold* yaitu S50C [5, 6].

Kondisi yang terjadi saat ini, *mold* mengalami penurunan kualitas hasil injeksi dan tidak lagi dapat digunakan untuk mencetak produk karena intensitas yang berlebih saat digunakan praktik *Plastic Injection* mahasiswa program studi lain. Intensitas berlebih tersebut disebabkan oleh metode injeksinya masih *trial and error* pada parameter *plastic injection molding* [7] selama dua tahun terakhir. Hal tersebut mengakibatkan timbulnya cacat berupa *sink mark* yang menyebabkan deformasi yang seharusnya tidak terjadi (**Gambar 2.a.** dan **Gambar 2.b.**) pada bagian tumpuan belakang produk *ID card holder* setiap dikembalikan ke parameter semula sehingga membuat *ID card holder* tersebut tidak layak untuk dijadikan souvenir. Cacat *sink mark* menjadi salah satu jenis cacat yang sering ditemukan dalam proses plastik injeksi, cacat tersebut membuat material membentuk cekungan (**Gambar 2.a.**) sebagai akibat dari perbedaan temperatur *core* dan *cavity* atau *loading* material yang terlalu cepat [8, 9].



Gambar 1. Produk *ID card holder*: (a) Desain 3D model, (b) Hasil cetakan awal



Gambar 2. Cacat pada produk *ID card holder*: (a) *Sink mark*, (b) *Deformasi pada ID card holder*

Penelusuran lanjutan dilakukan untuk mengetahui apakah ada tahapan yang tidak dilalui atau memiliki kesalahan prosedur dan hasilnya ditemukan belum adanya implementasi secara maksimal dari teknologi *Computer Aided Engineering (CAE)* dalam penentuan parameter sehingga masih digunakannya metode *trial & error* dalam proses *input parameter* [10, 11]. Proses pembuatan *mold* berbasis *Computer Aided Engineering (CAE)* pada industri manufaktur saat ini menjadi teknologi modern yang digunakan secara luas. Hal ini disebabkan karena potensi hasil produk yang tidak sesuai atau cacat yang bisa mengakibatkan kerugian secara finansial dapat diprediksi. *CAE* memegang peranan penting dalam proses rekayasa *engineering* mulai dari desain awal, optimasi hingga analisis hasil produk. *CAE* juga dapat memberikan keuntungan dalam tahapan-tahapan tersebut karena mampu meminimasi biaya simulasi yang berlebihan sehingga pengeluaran dapat ditekan [12]. Penelitian yang pernah dilakukan oleh [13] dan [14], menghasilkan temuan bahwa terjadi cacat *shrinkage* dan *sink mark* yang dapat diprediksi melalui *CAE* sehingga dapat dilakukan pencegahan dengan menghitung ulang prediksi volume penyusutan. Analisis dan optimasi yang lebih terukur juga dilakukan oleh [14, 15] menggunakan *CAE* dan Metode Taguchi sehingga urutan parameter yang paling dominan dapat ditemukan, hanya saja tidak ada simulasi ulang terhadap parameter tersebut karena tidak ada nilai terukur temuan parameternya, sehingga hanya sebatas pada temuan penyebab.

Metode Taguchi pada dasarnya tidak dapat digunakan langsung untuk mengoptimalkan masalah multi respon atau mendefinisikan besaran respon yang sesuai. Namun, data yang ada dapat diamati menggunakan desain Taguchi dan dapat dianalisis dengan pendekatan umum dengan menggabungkan multi respon menjadi satu statistik (respon) dan kemudian didapat level optimalnya. Dalam pendekatan *Grey Relational Analysis* sebuah nilai relasi abu-abu diperoleh untuk menganalisis tingkat relasional dari respon-respon tersebut, selanjutnya dengan pendekatan *Principal Component Analysis*, nilai relasi tersebut dikelompokkan ke dalam variabel menjadi faktor-faktor yang mendasari *input* dari variabel tersebut hingga menjadi kumpulan kombinasi tidak berkorelasi yang baru [16].

Paper ini menjelaskan tentang upaya peneliti menggunakan pendekatan Metode Taguchi dengan dua metode analisis (*Principal Component Analysis* dan *Grey Relational Analysis*) untuk mendapatkan parameter injeksi yang optimum secara simulasi berbasis *CAE* untuk pengerjaan *mold ID card holder* format *landscape* seperti yang pernah dilakukan peneliti sebelumnya [18]. Aplikasi teknologi *CAE* dalam *paper* ini bertujuan untuk mengendalikan biaya yang tidak terkontrol apabila simulasi dilakukan secara *trial & error*.

2. Material dan metodologi

2.1. Polypropylene

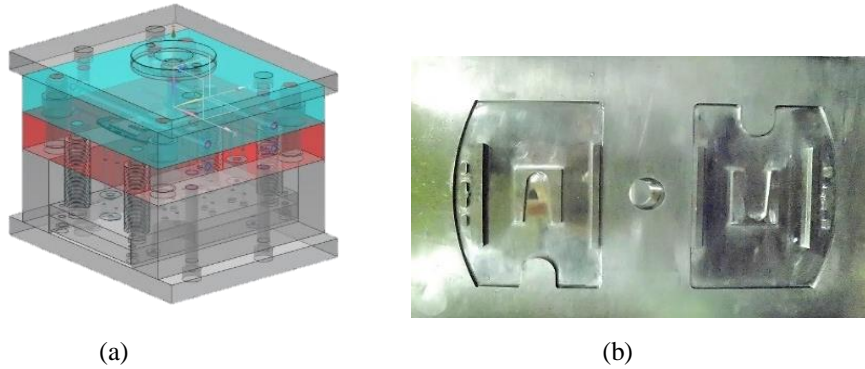
Polypropylene (PP) merupakan material yang berasal dari monomer *Propylene* dan salah satu material plastik yang paling banyak digunakan di seluruh dunia. Selain karena aman untuk kemasan makanan dan minuman, *PP* memiliki fleksibilitas yang membuatnya mudah diolah menjadi berbagai bentuk produk seperti yang dipaparkan oleh [19].

Tabel 1. *Process technical data material Polypropylene [19]*

<i>Material properties</i>	<i>Polypropylene</i>
<i>Melting flow (gr./10 min.)</i>	0,6-100
<i>Melting temperature (°C)</i>	150-175
<i>Processing temperature range (°C)</i>	375-550
<i>Molding pressure range (MPa)</i>	69-138
<i>Compression ratio</i>	2-2,4
<i>Mold shrinkage (mm)</i>	0,254-0,635

2.2. *Mold ID card holder landscape*

Untuk mencetak produk *ID card holder* ini, tipe *mold* yang digunakan adalah *standard two plate mold* (**Gambar 3.a.**) dengan 2 *cavity* (**Gambar 3.b.**). Hal ini karena karakteristik dari produk yang sederhana sehingga tidak memerlukan adanya tambahan komponen seperti *slider* atau *lifter*.



Gambar 3. *Mold ID card holder landscape: (a) Desain 3D, (b) Jumlah cavity*

Tabel 2. *Spesifikasi mold ID card holder landscape*

<i>Spesifikasi</i>	<i>Nilai</i>
<i>Dimensi (mm)</i>	300 × 250 × 251
<i>Tipe mold</i>	<i>Two plate</i>
<i>Tipe runner</i>	<i>Trapezoid</i>
<i>Tipe gate</i>	<i>Side gate</i>
<i>Ejection system</i>	<i>Ejector pin</i>
<i>Jumlah cavity</i>	2

2.3. *Mesin plastik injeksi Hwa Chin 160 SE*

Mesin yang digunakan dalam *paper* ini merupakan mesin plastik injeksi Hwa Chin 160 SE (**Gambar 4.a.**) dan dilengkapi dengan saluran pendinginan yang temperaturnya dapat disesuaikan. Pengaturan parameter pada mesin ini dilakukan menggunakan panel kontrol yang ada pada layar (**Gambar 4.b.**).



Gambar 4. *Mesin plastik injeksi: (a) Hwa Chin 160 SE, (b) Panel kontrol pada layar*

Tabel 3. *Technical data* mesin plastik injeksi Hwa Chin 160 SE [2]

Spesifikasi	Nilai
<i>Clamping Force (ton)</i>	160
<i>Screw Diameter (mm)</i>	42
<i>Injection Pressure (MPa)</i>	141
<i>Injection Rate (cm³/s)</i>	180
<i>Shot Weight (g)</i>	248
<i>Clamping Stroke (mm)</i>	500
<i>Screw Revolving Speed (r/min)</i>	0-276
<i>Space Between Tie Bars (mm)</i>	459-460
<i>Mold Plate Dimensions (mm)</i>	660
<i>Range of Mold Height (mm)</i>	150-500
<i>Hydraulic Ejector Stroke (mm)</i>	130
<i>Machine Size (m)</i>	4,5 × 1,2 × 1,8

2.4. Metode *Grey Relational Analysis* dan *Principal Component Analysis*

Salah satu metode optimasi yaitu *Grey Relational Analysis (GRA)* yang dikombinasikan dengan *Principal Component Analysis (PCA)* berdasar dari *Orthogonal Array* desain Taguchi. *GRA* dapat menangani permasalahan optimasi multirespon dengan adanya informasi yang tidak lengkap dan tidak jelas. Melalui *GRA*, nilai *Grey Relational Grade (GRG)* yang diperoleh dalam eksperimen pada *paper* ini digunakan untuk mengevaluasi beberapa respon (multirespon), sehingga optimasi dari multirespon yang kompleks dapat dikonversi menjadi optimasi dari respon tunggal dengan *GRG* sebagai fungsi objektifnya.

Sedangkan *PCA* digunakan untuk mengatasi adanya korelasi yang terjadi antar respon hasil eksperimen. Apabila korelasi antar respon tersebut diabaikan, maka kombinasi level faktor yang terpilih belum tentu merupakan kombinasi level yang optimum secara simultan. Selain itu, *PCA* digunakan untuk menentukan nilai pembobot yang sesuai sehingga kepentingan relatif bagi setiap respon dapat dijelaskan secara tepat dan objektif [17].

2.5. Rancangan *Orthogonal Array*

Orthogonal Array (OA) adalah matriks fraksional faktorial yang memiliki perbandingan taraf dari faktor yang seimbang. Elemen-elemen matriks ortogonal disusun menurut baris dan kolom. Kolom merupakan faktor dalam percobaan. Baris merupakan kombinasi dari taraf faktor dalam percobaan. Matriks disebut ortogonal karena semua kolom dapat dievaluasi secara independen satu sama lain [17].

OA digunakan untuk merancang eksperimen yang efisien sehingga dapat menentukan jumlah eksperimen minimal tanpa kehilangan informasi dari eksperimen yang dilakukan tersebut. Pemilihan jenis *OA* yang digunakan pada eksperimen tergantung pada jumlah derajat bebas [20]. Perumusan derajat bebas yaitu sebagai berikut:

$$L_p(q_r) \dots\dots\dots (1)$$

- Keterangan: *L* = Notasi matriks *Orthogonal Array*
p = Jumlah percobaan yang dilakukan
q = Jumlah taraf tiap faktor
r = Jumlah faktor

2.6. Perhitungan *Signal to Noise Ratio*

Perhitungan *Signal to Noise Ratio (S/N Ratio)* bergantung pada karakteristik respon yang diamati. Di dalamnya terdapat tiga jenis karakteristik respon yang digunakan: *nominal is the best*, *smaller is better*, dan *larger is better*. Dalam *paper* ini fokus yang dipilih adalah pada karakteristik *smaller is better*, dimana nilai *sink mark* yang lebih kecil atau

mendekati nol menunjukkan kualitas yang lebih tinggi. Artinya, semakin kecil nilai *sink mark*, semakin baik kualitasnya. Untuk respon yang memiliki karakteristik *smaller is better*, nilai *S/N ratio* dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$SN_{ij} = -10 \log \left(\frac{1}{y_{ij}^2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan: $i = 1, 2, \dots, n$; n merupakan banyaknya percobaan yang dilakukan
 $j = 1, 2, \dots, m$; m merupakan banyaknya respon yang diamati
 SN_{ij} = Nilai *S/N ratio* untuk eksperimen ke-i dan respon ke-j
 y_{ij}^2 = Nilai respon ke-j pada eksperimen ke-i

2.7. Perhitungan nilai normalisasi *S/N Ratio*

Nilai *S/N Ratio* yang telah dihitung selanjutnya dinormalisasi untuk menjadi nilai dalam rentang 0 sampai 1 sesuai dengan karakteristik responsnya. Perhitungan normalisasinya adalah sebagai berikut:

$$Z_{ij} = \frac{\max \forall_j SN_{ij} - SN_{ij}}{\max \forall_j SN_{ij} - \min \forall_j SN_{ij}} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan: Z_{ij} = Nilai normalisasi *S/N ratio* pada eksperimen ke-i dan respon ke-j
 SN_{ij} = Nilai *S/N ratio* pada eksperimen ke-i dan respon ke-j
 $\max \forall_j SN_{ij}$ = Nilai *S/N ratio* maksimum respon ke-j
 $\min \forall_j SN_{ij}$ = Nilai *S/N ratio* minimum respon ke-j

2.8. Perhitungan *Deviation Sequence*

Deviation sequence merupakan selisih antara nilai maksimum normalisasi dengan data yang telah dinormalisasi. Rumus untuk menentukan *deviation sequence* adalah:

$$\Delta_{0ij} = |Z_{0j} - Z_{ij}| \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan: Δ_{0ij} = Nilai *deviation sequence* pada eksperimen ke-i dan respon ke-j
 Z_{0j} = Nilai maksimum normalisasi *S/N ratio* (bernilai 1)
 Z_{ij} = Nilai normalisasi *S/N ratio* pada eksperimen ke-i dan respon ke-j

2.9. Perhitungan *Grey Relational Coefficient*

Grey Relational Coefficient (GRC) menggambarkan seberapa dekat hubungan antara kondisi yang terbaik dengan kondisi aktual dari respon yang telah dinormalisasi. Persamaan untuk memperoleh *GRC*, yaitu:

$$\gamma_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \alpha \Delta_{max}}{\Delta_{0ij} + \alpha \Delta_{max}} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan: Δ_{min} = Nilai minimum dari *deviation sequence*
 Δ_{max} = Nilai maksimum dari *deviation sequence*
 α = *Distinguishing coefficient* ; nilai *distinguishing coefficient* yang digunakan yaitu = 0,5

2.10. Perhitungan nilai bobot menggunakan *Principal Component Analysis*

Dalam optimasi multirespon, bobot diterapkan untuk menilai tingkat kepentingan masing-masing respon. Dalam paper ini digunakan *software* Minitab dengan nilai *GRC* dimasukkan ke *cell* selanjutnya dipilih pada *toolbar* Analisis Statistik => Multivariat => *Principal Component Analysis (PCA)*.

2.11. Perhitungan *Grey Relational Grade*

Nilai *Grey Relational Grade (GRG)* akan digunakan sebagai indeks performansi untuk menentukan kombinasi level faktor yang menghasilkan respon optimal [20].

$$G_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \gamma_{ij} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan: G_i = Nilai *Grey Relational Grade* pada eksperimen ke-i

ω_j = Nilai bobot untuk respon ke-j

γ_{ij} = Nilai *Grey Relational Coefficient* respon ke-j pada eksperimen ke-i

2.12. Penentuan Kombinasi Level Faktor Optimal

Dalam mendapatkan kombinasi level faktor yang optimal, langkah pertama yang perlu dilakukan adalah menentukan rata-rata nilai *Grey Relational Grade (GRG)* dari setiap level faktor untuk setiap respon. Pilihan level faktor adalah yang memberikan nilai rata-rata GRG tertinggi. Nilai rata-rata *GRG* diperoleh dengan persamaan berikut:

$$A_{pg} = \frac{\sum G_{pg}}{n_{pg}} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan: A_{pg} = Nilai rata-rata *Grey Relational Grade* yang dikelompokkan berdasarkan faktor ke-p dan level ke-g

G_{pg} = Nilai *Grey Relational Grade* dari faktor ke-p dan level ke-g

n_{pg} = Banyaknya percobaan faktor ke-p level ke-g

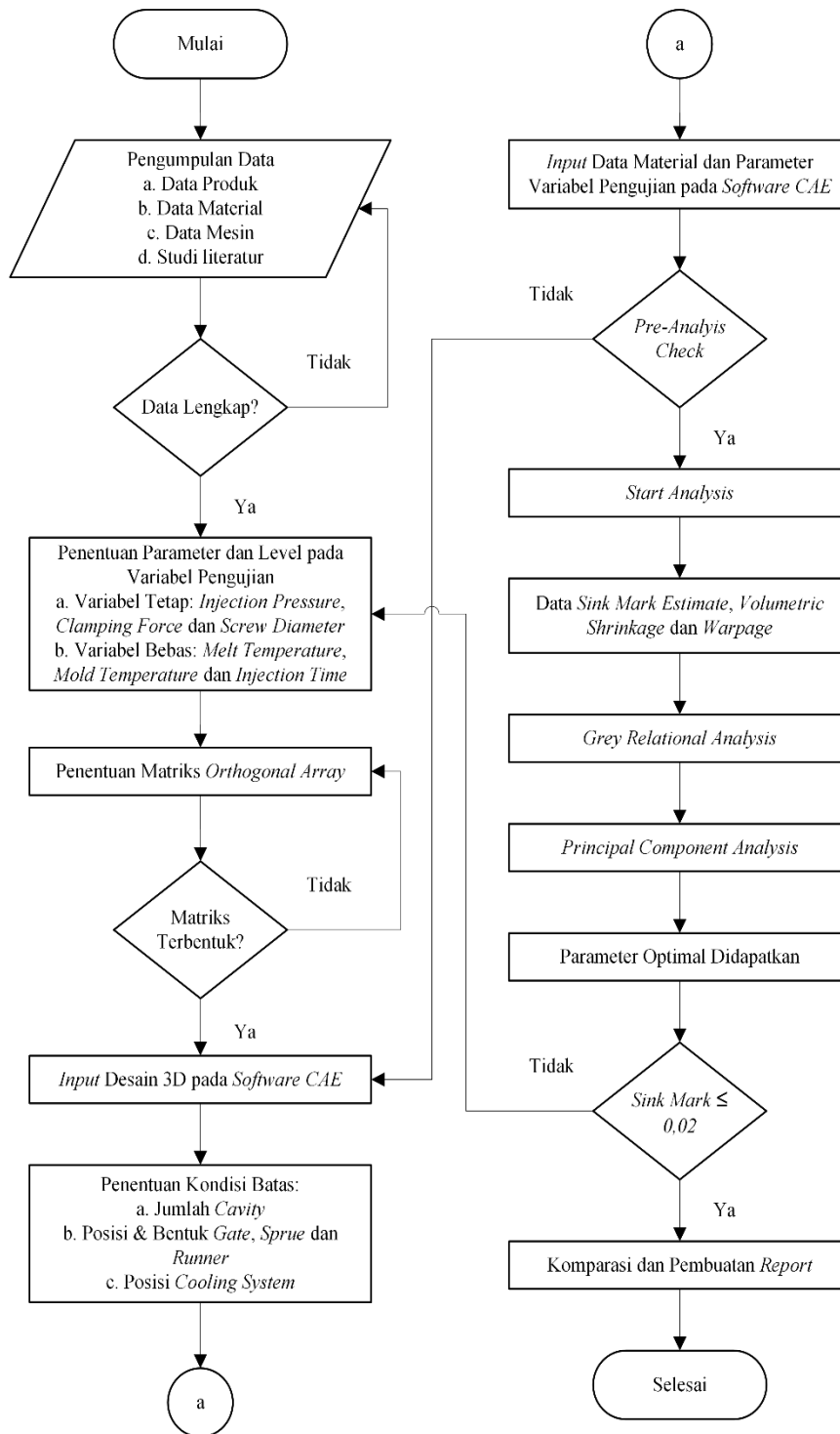
2.13. Perhitungan biaya

Dalam *paper* ini metode perhitungan biaya menggunakan tabulasi yang disediakan oleh Departemen *Marketing* Politeknik Astra. Detail proses atau barang yang dikerjakan, dijabarkan untuk selanjutnya dipilah berdasarkan dimensi untuk mendapatkan biaya material, estimasi untuk mendapatkan durasi pengerjaan dan biaya proses untuk mendapatkan kisaran harga. Hasil kalkulasi keseluruhan ditambahkan dengan *profit* menjadi harga final.

Tabel 4. Tabulasi perhitungan biaya

Nama Barang/ Proses	Satuan	Estimasi			Biaya			Biaya Proses	Profit	Total Harga
		Proses	D & P	Overhead	Proses	D & P	Overhead			
Design										
Redraw										
Desain mold										
Drafting										
PPIC										
Capacity calculation										
Material calculation										
Process breakdown										
Manufacturing										
Turning manual										
Milling CNC										
Surface grinding										
EDM										
Wire cut										
Polishing										
Assembling										
Quality control										
Part & mold checking										
Product checking										
Production										
Trial										
Massal Production										
Material										
Tool										
Total										

2.14. Diagram alir penelitian



Gambar 5. Diagram alir penelitian

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Variabel penelitian

Dalam *paper* ini terdapat 3 variabel yang digunakan yaitu: variabel tetap yang didapat dari data mesin, variabel bebas didapat dari karakteristik material dan variabel terikat yang merupakan variabel yang dicari.

Tabel 5. Variabel penelitian

Variabel Tetap	Variabel Bebas	Variabel Terikat
<i>Injection Pressure</i>	<i>Melt Temperature (A)</i>	<i>Sink Mark Estimate (X)</i>
<i>Clamping Force</i>	<i>Mold Temperature (B)</i>	<i>Volumetric Shrinkage (Y)</i>
<i>Screw Diameter</i>	<i>Injection Time (C)</i>	<i>Warpage (Z)</i>

Tabel 6. Variabel bebas penelitian [19]

Variabel Bebas			
<i>Melt Temperature (A)</i>	200	220	240
<i>Mold Temperature (B)</i>	30	35	40
<i>Injection Time (C)</i>	0,5	2	3,5

Oleh karena menggunakan *software* Autodesk Moldflow Adviser Ultimate 2024 dengan lisensi pendidikan maka terdapat keterbatasan *input parameter* untuk masing masing variabel. Pada variabel tetap nilai *clamping force* dan *screw diameter* menggunakan bawaan dari *software* tersebut, sedangkan *injection pressure* dapat ditentukan parameternya. Kemudian pada variabel bebas hanya *melt temperature*, *mold temperature* dan *injection time* yang dapat ditentukan untuk setiap pengujian. Variabel terikat juga disesuaikan dengan kemampuan *software* dalam menganalisis cacat yang berkaitan dengan *sink mark* yaitu: *sink mark estimate*, *volumetric shrinkage* dan *warpage*. *Sink mark estimate* menunjukkan estimasi dari potensi *sink mark* yang dapat terjadi pada produk *ID card holder* dalam mm, *volumetric shrinkage* menunjukkan persentase potensi penyusutan pada keseluruhan dimensi produk *ID card holder* dan *warpage* menunjukkan potensi defleksi dari produk ini dalam mm.

3.2. Matriks Orthogonal Array

Tabel 7. di bawah ini merupakan rancangan matriks *Orthogonal Array* dengan 3 faktor dan 3 level di dalamnya sesuai dengan variabel bebas dan variabel terikat *paper* ini.

Tabel 7. Rancangan matriks *Orthogonal Array* $L_9 (3^3)$

Run	Variabel Bebas			<i>Sink Mark Estimate</i>	<i>Volumetric Shrinkage</i>	<i>Warpage</i>
	A (°C)	B (°C)	C (s)			
1	1	1	1	X ₁	Y ₁	Z ₁
2	1	2	2	X ₂	Y ₂	Z ₂
3	1	3	3	X ₃	Y ₃	Z ₃
4	2	1	2	X ₄	Y ₄	Z ₄
5	2	2	3	X ₅	Y ₅	Z ₅
6	2	3	1	X ₆	Y ₆	Z ₆
7	3	1	3	X ₇	Y ₇	Z ₇
8	3	2	1	X ₈	Y ₈	Z ₈
9	3	3	2	X ₉	Y ₉	Z ₉

Tabel 8. Matriks analisis *Orthogonal Array L₉* (3³)

Run	Variabel Bebas			Sink Mark Estimate	Volumetric Shrinkage	Warpage
	A (°C)	B (°C)	C (s)			
1	30	200	0,5	X ₁	Y ₁	Z ₁
2	30	220	2	X ₂	Y ₂	Z ₂
3	30	240	3,5	X ₃	Y ₃	Z ₃
4	35	200	2	X ₄	Y ₄	Z ₄
5	35	220	3,5	X ₅	Y ₅	Z ₅
6	35	240	0,5	X ₆	Y ₆	Z ₆
7	40	200	3,5	X ₇	Y ₇	Z ₇
8	40	220	0,5	X ₈	Y ₈	Z ₈
9	40	240	2	X ₉	Y ₉	Z ₉

3.3. Hasil pengujian

Matriks analisis selanjutnya diuji dan dilakukan perhitungan *S/N Ratio* dan normalisasinya sesuai dengan persamaan (2) dan (3). *Smaller is better* dipilih dalam *paper* ini karena nominal yang mendekati nilai nol adalah hasil yang diharapkan untuk mengurangi cacat yang ada [20].

Tabel 9. Matriks hasil pengujian menggunakan *software* Autodesk Moldflow Adviser Ultimate 2024

Run	Variabel Bebas			Sink Mark Estimate	Volumetric Shrinkage	Warpage
	A (°C)	B (°C)	C (s)			
1	30	200	0,5	0,047	10,730	1,070
2	30	220	2	0,047	9,910	1,036
3	30	240	3,5	0,039	7,647	1,036
4	35	200	2	0,041	9,049	1,022
5	35	220	3,5	0,037	6,782	1,030
6	35	240	0,5	0,060	12,330	1,061
7	40	200	3,5	0,029	6,197	1,032
8	40	220	0,5	0,054	11,370	1,049
9	40	240	2	0,054	10,320	0,998

Tabel 10. Hasil normalisasi *S/N Ratio*

Run	<i>S/N Ratio</i>			Normalisasi <i>S/N Ratio</i>		
	Sink Mark Estimate	Volumetric Shrinkage	Warpage	Sink Mark Estimate	Volumetric Shrinkage	Warpage
1	26,521	-20,612	-0,588	0,672	0,798	1,000
2	26,521	-19,921	-0,307	0,672	0,682	0,536
3	28,090	-17,670	-0,307	0,415	0,306	0,536
4	27,702	-19,132	-0,189	0,479	0,550	0,341
5	28,707	-16,627	-0,257	0,315	0,131	0,453

6	24,510	-21,819	-0,514	1,000	1,000	0,879
7	30,633	-15,844	-0,274	0,000	0,000	0,481
8	25,368	-21,115	-0,416	0,860	0,882	0,715
9	25,384	-20,274	0,017	0,857	0,741	0,000

Tahapan untuk mendapatkan nilai *deviation sequence* dan *GRC* ditentukan menggunakan persamaan (4) dan (5). Hasil dari perhitungannya adalah sebagai berikut:

Tabel 11. Hasil perhitungan nilai *deviation sequence* dan *GRC*

Run	Deviation Sequence			GRC		
	Sink Mark Estimate	Volumetric Shrinkage	Warpage	Sink Mark Estimate	Volumetric Shrinkage	Warpage
1	0,328	0,202	0,000	0,604	0,71	1,00
2	0,328	0,318	0,464	0,604	0,61	0,52
3	0,585	0,694	0,464	0,461	0,42	0,52
4	0,521	0,450	0,659	0,490	0,53	0,43
5	0,685	0,869	0,547	0,422	0,37	0,48
6	0,000	0,000	0,121	1,000	1,00	0,80
7	1,000	1,000	0,519	0,333	0,33	0,49
8	0,140	0,118	0,285	0,781	0,81	0,64
9	0,143	0,259	1,000	0,778	0,66	0,33

Nilai dari bobot ditentukan menggunakan *PCA* dan setelah diolah menggunakan *software* Minitab menghasilkan nilai *eigen value* untuk PC1 sebesar 2,108 yang memenuhi syarat pemilihan komponen utama > 1 . Selanjutnya nilai variabel respon ditentukan dari nilai *eigenvectors* pada *PC1*.

Tabel 12. Nilai *eigen value*, *proportion* dan *cumulative*

Principal Component	Eigen Value	Proportion	Cumulative
PC1	2,108	0,702	0,702
PC2	0,864	0,288	0,990
PC3	0,029	0,010	1,000

Tabel 13. Nilai *eigenvectors*

Variable	Eigenvectors		
	PC1	PC2	PC3
Sink Mark Estimate	0,653	-0,319	0,687
Volumetric Shrinkage	0,675	-0,165	-0,719
Warpage	0,343	0,933	0,108

Tabel 14. Nilai variabel respon berdasarkan nilai *PCI*

<i>Variabel Respon</i>	
<i>Sink Mark Estimate</i>	0,43
<i>Volumetric Shrinkage</i>	0,46
<i>Warpage</i>	0,12

Perhitungan untuk kombinasi level faktor respon yang optimal dihitung menggunakan *GRG* dengan persamaan (6). Nilai *GRG* disajikan pada **Tabel 14.** berikut ini:

Tabel 15. Nilai *GRG*

<i>Run</i>	<i>Variabel Bebas</i>			<i>GRG</i>			<i>Total GRG</i>
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Sink Mark Estimate</i>	<i>Volumetric Shrinkage</i>	<i>Warpage</i>	
	(°C)	(°C)	(s)				
1	1	1	1	0,286	0,364	0,118	0,768
2	1	2	2	0,286	0,311	0,063	0,660
3	1	3	3	0,177	0,139	0,063	0,379
4	2	1	2	0,204	0,251	0,040	0,495
5	2	2	3	0,134	0,060	0,053	0,247
6	2	3	1	0,426	0,456	0,103	0,985
7	3	1	3	0,000	0,000	0,057	0,057
8	3	2	1	0,367	0,402	0,084	0,853
9	3	3	2	0,365	0,338	0,000	0,703

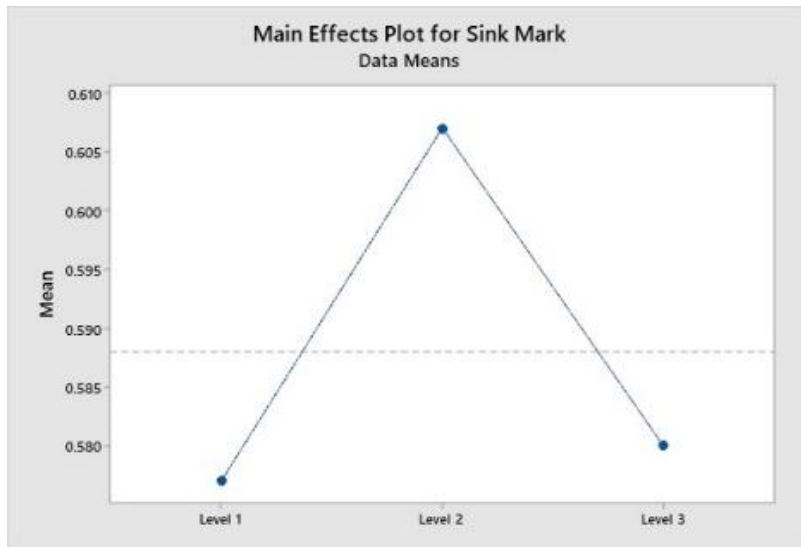
Kombinasi level faktor optimal ditentukan dengan persamaan (7) dari nilai *GRG* yang didapat. Karena adanya tuntutan untuk mengurangi *sink mark* menjadi $\leq 0,02$ mm, maka level faktor optimal yang dipilih adalah dari nilai *GRG* setiap level faktor yang paling kecil.

Tabel 16. Nilai *GRG* setiap level faktor

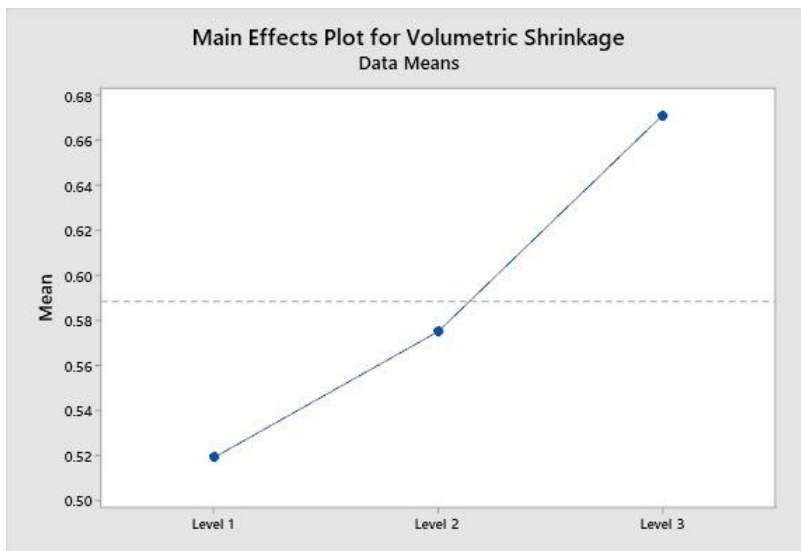
	<i>Factor</i>		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Level 1	0,582	0,517	0,818
Level 2	0,626	0,592	0,589
Level 3	0,600	0,699	0,401
<i>Max.-Min.</i>	0,045	0,182	0,417

Tabel 17. Parameter optimal berdasarkan nilai *GRG* setiap level faktor

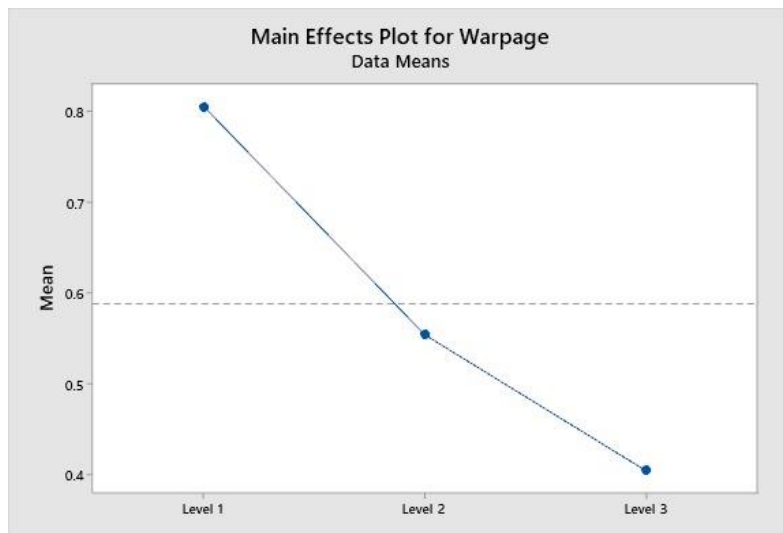
	<i>Parameter Uji</i>		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
Level 1	30	200	0,5
Level 2	35	220	2
Level 3	40	240	3,5



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. a. Main effect plot diagram 1, b. Main effect plot diagram 2, c. Main effect plot diagram 3

Selanjutnya dalam perhitungan biaya pembuatan, dasar dari perhitungan biaya yang dilakukan adalah untuk pelaporan anggaran dalam penyelesaian *project*. Berikut adalah penjelasan terkait perhitungan biaya pembuatan *project* ini: biaya material sudah dikalkulasi menjadi satu kesatuan pada biaya *mold base & standart part*, biaya peralatan juga sudah dikalkulasikan menjadi satu pada biaya *tools & peralatan pendukung*, biaya proses hanya dihitung dari biaya penggunaan mesin atau laboratorium dan biaya *deburring*, *profit* dan biaya *overhead (manpower & listrik)* tidak disertakan karena *project* ini dikerjakan oleh mahasiswa dan untuk kebutuhan internal.

Dengan dilakukannya optimasi, maka terdapat 2 perhitungan biaya yang dilakukan yaitu biaya pembuatan sebelum dilakukan optimasi pada **Tabel 18**. dan biaya pembuatan sesudah dilakukan optimasi pada **Tabel 19**., hasilnya terdapat penghematan biaya pembuatan sebesar Rp8.250.000,00.

Tabel 18. Perhitungan biaya sebelum optimasi

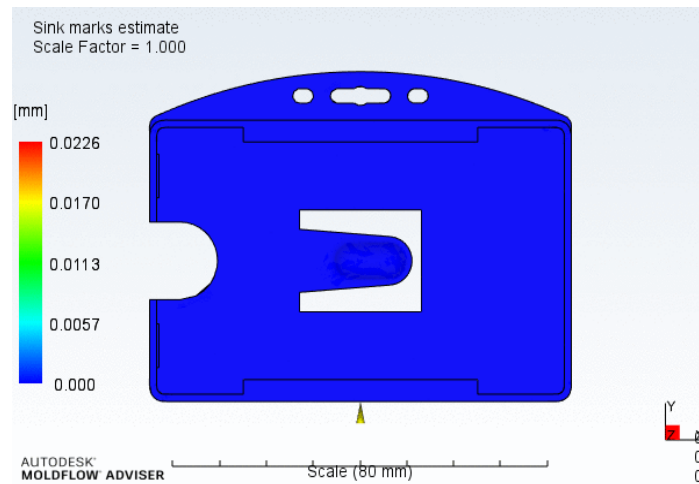
Nama Barang/ Proses	Satuan	Estimasi			Biaya			Biaya Proses	Profit	Total Harga
		Proses	D & P	Overhead	Proses	D & P	Overhead			
Design										
Redraw	hari	1			Rp150.000,00			Rp150.000,00	Rp0,00	Rp150.000,00
Desain mold	hari	2			Rp500.000,00			Rp1.000.000,00	Rp0,00	Rp1.000.000,00
Drafting	hari	3			Rp150.000,00			Rp450.000,00	Rp0,00	Rp450.000,00
PPIC										
Capacity calculation	hari	1			Rp0,00			Rp0,00	Rp0,00	Rp0,00
Material calculation	hari	1			Rp0,00			Rp0,00	Rp0,00	Rp0,00
Process breakdown	hari	2			Rp0,00			Rp0,00	Rp0,00	Rp0,00
Manufacturing										
Turning manual	jam	3	1		Rp125.000,00	Rp8.500,00		Rp383.501,00	Rp0,00	Rp383.501,00
Milling CNC	jam	96	4		Rp275.000,00	Rp8.500,00		Rp26.408.504,00	Rp0,00	Rp26.408.504,00
Surface grinding	jam	13	1		Rp200.000,00	Rp8.500,00		Rp2.608.501,00	Rp0,00	Rp2.608.501,00
EDM	jam	3			Rp200.000,00			Rp600.000,00	Rp0,00	Rp600.000,00
Wire cut	jam	4	1		Rp375.000,00	Rp8.500,00		Rp1.508.501,00	Rp0,00	Rp1.508.501,00
Polishing	jam	24			Rp100.000,00			Rp2.400.000,00	Rp0,00	Rp2.400.000,00
Assembling	jam	16		4	Rp50.000,00		Rp35.000,00	Rp940.000,00	Rp0,00	Rp940.000,00
Quality control										
Part & mold checkin	jam	5			Rp20.000,00			Rp100.000,00	Rp0,00	Rp100.000,00
Product checking	jam	2			Rp20.000,00			Rp40.000,00	Rp0,00	Rp40.000,00
Production										
Trial	jam	24			Rp350.000,00			Rp8.400.000,00	Rp0,00	Rp8.400.000,00
Mold base & standart part										Rp15.000.000,00
Polypropylene (50 kg)										Rp1.400.000,00
Tools dan peralatan pendukung										Rp4.800.000,00
Total										Rp66.189.007,00

Tabel 19. Perhitungan biaya setelah optimasi

Nama Barang/ Proses	Satuan	Estimasi			Biaya			Biaya Proses	Profit	Total Harga
		Proses	D & P	Overhead	Proses	D & P	Overhead			
Design										
Redraw	hari	1			Rp150.000,00			Rp150.000,00	Rp0,00	Rp150.000,00
Desain mold	hari	2			Rp150.000,00			Rp300.000,00	Rp0,00	Rp300.000,00
CAE analysis	hari	1			Rp150.000,00			Rp150.000,00	Rp0,00	Rp150.000,00
Drafting	hari	3			Rp150.000,00			Rp450.000,00	Rp0,00	Rp450.000,00
PPIC										
Capacity calculation	hari	1			Rp0,00			Rp0,00	Rp0,00	Rp0,00
Material calculation	hari	1			Rp0,00			Rp0,00	Rp0,00	Rp0,00
Process breakdown	hari	2			Rp0,00			Rp0,00	Rp0,00	Rp0,00
Manufacturing										
Turning manual	jam	3	1		Rp125.000,00	Rp8.500,00		Rp383.501,00	Rp0,00	Rp383.501,00
Milling CNC	jam	96	4		Rp275.000,00	Rp8.500,00		Rp26.408.504,00	Rp0,00	Rp26.408.504,00
Surface grinding	jam	13	1		Rp200.000,00	Rp8.500,00		Rp2.608.501,00	Rp0,00	Rp2.608.501,00
EDM	jam	3			Rp200.000,00			Rp600.000,00	Rp0,00	Rp600.000,00
Wire cut	jam	4	1		Rp375.000,00	Rp8.500,00		Rp1.508.501,00	Rp0,00	Rp1.508.501,00
Polishing	jam	24			Rp100.000,00			Rp2.400.000,00	Rp0,00	Rp2.400.000,00
Assembling	jam	16		4	Rp50.000,00		Rp35.000,00	Rp940.000,00	Rp0,00	Rp940.000,00
Quality control										
Part & mold checkin	jam	5			Rp20.000,00			Rp100.000,00	Rp0,00	Rp100.000,00
Product checking	jam	2			Rp20.000,00			Rp40.000,00	Rp0,00	Rp40.000,00
Production										
Trial	jam	2			Rp350.000,00			Rp700.000,00	Rp0,00	Rp700.000,00
Mold base & standart part										Rp15.000.000,00
Polypropylene (50 kg)										Rp1.400.000,00
Tools dan peralatan pendukung										Rp4.800.000,00
Total										Rp57.939.007,00

3.4. Pembahasan

Kombinasi parameter berdasarkan *smaller is better* dari **Tabel 17.** dan **Gambar 7.** Menghasilkan parameter optimal yaitu: A1; B1; C3 yang memiliki arti untuk faktor optimal A (*mold temperature*) berada pada level 1 dengan nilai 30 °C, untuk faktor optimal B (*melt temperature*) berada pada level 1 dengan nilai 200 °C dan faktor optimal C (*injection time*) berada pada level 3 dengan nilai 3,5 s. Selanjutnya dilakukan verifikasi dengan simulasi ulang pada *software* Autodesk Moldflow Adviser Ultimate 2024 dan hasilnya nilai *sink mark estimate* yang terprediksi maksimal sebesar 0,02 mm.



ID Card_Run_Final_1: Results Summary (General)

- Release version: 2024
- Study name: id_card_run_final_1.sdy
- Study location: C:\Users\agung\OneDrive\Documents\My AMA 2024 Projects\ID_Card_Holder\id_card_run_final_1.sdy
- Part name: ID Card
- Model suitability: The imported model is thick and chunky, and is appropriate for 3D analysis.
- Analysis resolution: Level 0 (Standard)
- Material manufacturer: ExxonMobil Chemical
- Material trade name: PP7555KNE2
- Material Resin identification code: 5
- Material Energy usage indicator: 2
- Melt temperature: 200.0 (C)
- Mold temperature: 30.0 (C)
- Injection locations: 1
- Max. machine injection pressure: 141.000 (MPa)
- Injection time selected: 3.50 (s) (Specified)
- Velocity/pressure switch-over: Automatic

Model warnings

None

- Actual filling time: 4.20 (s)
- Actual injection pressure: 136.972 (MPa)
- Clamp force area: 52.7838 (cm²)
- Max. clamp force during filling: 23.594 (tonne)
- Velocity/pressure switch-over at % volume: 97.92 (%)
- Velocity/pressure switch-over at time: 4.04 (s)
- Estimated cycle time: 13.23 (s)
- Total part weight: 7.869 (g)
- Shot volume: 8.8782 (cm³)

Clamp force estimate during packing using:
◦ 20% of the injection pressure: 14.740 (tonne)
◦ 80% of the injection pressure: 58.961 (tonne)
◦ 120% of the injection pressure: 88.442 (tonne)

Solver warnings

None

Less than 1% of your model has sink marks.

View the Sink mark estimate.

- Max sink depth: 0.02 (mm)
- Average sink mark depth: 0.01 (mm)
- Percentage of model prone to sink marks: 0.45 (%)

Solver warnings

None

Gambar 7. Hasil verifikasi dan report *sink mark estimate* dengan kombinasi parameter optimal

4. Kesimpulan

Penggunaan Metode Taguchi dan pendekatan *Grey Relational Analysis-Principal Component Analysis* yang berbasis pada *Computer Aided Engineering* dengan *software* Autodesk Moldflow Adviser Ultimate 2024 berhasil menurunkan cacat *sink mark* menjadi $\leq 0,02$ mm dan biaya pembuatan sebesar Rp8.250.000,00 dengan menggunakan parameter optimal *mold temperature* 30 °C, *melt temperature* 200 °C dan *injection time* 3,5 s.

Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan CAE yang menggunakan lisensi edukasi dapat memberikan kontribusi signifikan bagi pendidikan vokasi untuk membekali lulusannya sebagai *mold maker* dalam melakukan analisis sebelum mencetak produk, sehingga metode *trial and error* tidak perlu dilakukan kembali karena cacat yang berpotensi muncul dapat diprediksi, seperti menurunnya *sink mark*, *warpage* dan *volumetric shrinkage*.

Ke depannya perlu ditambahkan beberapa parameter lain seperti *packing pressure*, *packing time* dan *cooling time* untuk mendapatkan hasil yang lebih presisi dengan kombinasi metode statistik dalam penyelesaian respon data seperti *Response Surface Methodology (RSM)* atau *Fuzzy Logic*.

Ucapan terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Herry Syaifullah selaku Sekretaris Program Studi P4 atas izin dan dukungannya dalam menggunakan obyek dan fasilitas pada laboratorium dalam *paper* ini.

Daftar pustaka

- [1] Wibowo, Eko A., Perancangan Cetakan *Safety Glasses Frame* Menggunakan *Cetakan Pad Collar*. Indonesia: Politeknik Manufaktur Astra; 2015.
- [2] Kaswadi, A, Yoewono, S., Simulasi dan Studi Eksperimental Proses Injeksi Plastik Berpendingin Konvensional. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM)*; 7-8 Oktober 2015; Banjarmasin, Indonesia. XIV. p MAN-01. <https://repo-dosen.ulm.ac.id/handle/123456789/8790>
- [3] Alfian, Rina, Azri, Riki, Randa, Rancang Bangun *Molding* Souvenir Logo Politeknik Negeri Padang pada Mesin Cetak Injeksi Plastik Bertekanan 1960 kg/cm². *Jurnal Ilmiah Poli Rekayasa*. 2021 April; 16(2); p 93-100. <http://dx.doi.org/10.30630/jipr.16.2.197>

- [4] Koli, M., Gupta V., *Analysis of Injection Moulding Parameters*. Indian Journal of Scientific Research. 2019 Mei; 18(2); p 373-376. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3756929>
- [5] Sunaryo, F. H. N., *Perancangan Mold Base Yo-Yo Tipe 1A pada PT Yogyakarta Presisi Teknikatama Industri*. Indonesi: Universitas Atma Jaya Yogyakarta. 2015.
- [6] Chen, C. C. A., Lai, C. S., Yu, C. W., Wang, L. H., *Study on Liquid Crystal Polymer Molding for Off-Axial Aspherical Reflective Grating Optical Element by Injection Molding Process*. AIP Conference Proceedings; 21-25 Mei 2018; Taipei, Taiwan. AIP Publishing; 2019. 2065(1). p 030008. <https://doi.org/10.1063/1.5088266>
- [7] Pramestiani, I., Karunawan, B. W., Rachman, F., *Application of Taguchi Method in Optimizing Injection Molding Parameters to Netto of Bioring Cone Cup Products*. Jurnal of Industrial and Systems Optimization. 2023 Desember; 6(2); p 117-123. <https://doi.org/10.51804/jiso.v6i2.117-123>
- [8] Solanki, B., Sigh, H., Sheorey, T., *Experimental and Numerical Studies of Shrinkage and Sink Marks on Injection Molded Polymer Gears*. Research Square Journal. 2021 Mei; 1. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-421891/v1>
- [9] Wibowo, E. A., Hidayah, M. N. W., Setiawan, R., Wibowo, Y. T. J., Krisna, B. L., *Optimization of Plastic Injection Molding Process Parameters for Cowl B (L/R) Sink Mark Defects by Using Taguchi Methods and ANOVA*. Operations Excellence: Journal of Appiled Industrial Engineering. 2023 Maret; 15(1); p 21-28. <https://publikasi.mercubuana.ac.id/index.php/oe/article/view/18704>
- [10] Asri, M. F. A. M., *Simulation Analysis of Injection Moulding Process for Fidget Spinner*. Advanced and Sustainable Technologies Journal. 2023 Juni; 2(1); p 30-37. <https://ris.unimap.edu.my/bitstreams/8b23f977-cc03-4edc-b0f6-a1b80d4d0d19/download>
- [11] Hang, N. T. L., Chinh, N. D., *Improve Product Design and Injection Molding for Electrical Outlet Cover Plastic with the Help of CAE Software*. International Journal of Advanced Engineering and Management Research. 2023 Desember; 8(6); p 134-149. <http://dx.doi.org/10.51505/ijaemr.2023.8612>
- [12] Hutama, A. S., Widiasmara, N. A. R., *Minimasi Cacat Sink Mark pada Proses Injeksi Molding Produk T-Valve Female GeNose C19*. Jurnal Tekstil: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Bidang Tekstil dan Manajemen Industri. 2022 Desember; 5(2); p 69-76. <https://doi.org/10.59432/jute.v5i2.38>
- [13] Suhardoko, Anggono, A. D., *Prediksi Shrinkage untuk Menghindari Cacat Produk pada Plastic Injection*. Jurnal Media Mesin. 2005 Juli; 6(2); p 72-77. <http://hdl.handle.net/11617/792>
- [14] Anwarullah, S. P., Kumar, A., *Minimization of Sink Mark Defects in Injection Molding Process Optimization of a Composite Drive Shaft Used in Automobiles*. International Journal of Innovative Technologies and Exploring Engineering. 2019 Oktober; 8(12S2); p 292-294. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L1051.10812S219>
- [15] Hentati, F., Hadriche, I., Masmoudi, N., Bradai, C., *Optimization of the Injection Molding Process for the PC/ABS Parts by Integrating Taguchi Approach and CAE Simulation*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019 Oktober; 24(9&10). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04283-z>
- [16] Huang, W. T., Tasi, Z. Y., Ho, W. H., Chou J. H., *Integrating Taguchi Method and Grey Relational Analysis for Auto Locks by Using Multiobjective Design in Computer-Aided Engineering*. MDPI: Polymers Journal. 2022 Februari; 14(644); p 1-22. <https://doi.org/10.3390/polym14030644>
- [17] Krishnaiah, K., Shahabudeen, P., *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*. India: PHI Learning Private Limited; 2012, p 280-285.

- [18] Wulandari, A. A., Wuryandari, T., Ispriyanti, D., Penerapan Metode Taguchi untuk Kasus Multirespon Menggunakan Pendekatan *Grey Relational Analysis* dan *Principal Component Analysis* (Studi Kasus Proses Frais Komposit GFRP). *Jurnal Gaussian*. 2016 Oktober; 5(4); p 791-800. <https://doi.org/10.14710/j.gauss.5.4.791-800>
- [19] ExxonMobil Chemical. ExxonMobil. <https://shorturl.at/0D5bo>. ExxonMobil™ Polypropylene Quick Processing Reference. (Diakses pada tanggal 11 Juni 2024).
- [20] Devi, Winarni, S., Handoko, B., Penerapan Metode Grey Relational Analysis dan PCA pada Optimasi Multirespon Desain Taguchi. Seminar Pendidikan Matematika SPs UPI; 2016; Bandung, Indonesia. p 111-120. https://www.researchgate.net/publication/323414439_Penerapan_Metode_Grey_Relational_Analysis_dan_PCA_pada_Optimasi_Multirespon_Desain_Taguchi
- [21] Soedijatno, K., Manajemen, Kontroler dan Akuntansi Biaya (*Chapter 6. Sistem Perhitungan Biaya Berdasarkan Proses*). Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia; 2006. p 1-32.