

**ANALISIS PENGARUH DIMENSI RUNNER INGATE DAN RISER TERHADAP
NILAI CACAT POROSITAS PRODUK DUDUKAN POMPA PADA
PENGECORAN INVESTMENT MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI**

Irgifa Cahyono¹, Widya Emilia Primaningtyas^{1*}, Dian Asa Utari¹

¹Program Studi Teknik Desain dan Manufaktur, Jurusan Teknik Permesinan Kapal,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

*Email: widyaemilia@ppns.ac.id

Abstrak

Investment casting atau pengecoran logam investasi merupakan salah satu metode pengecoran logam yang banyak digunakan dalam industri manufaktur karena kemampuannya menghasilkan produk dengan bentuk kompleks dan ketelitian tinggi. Meski demikian, proses ini memiliki tantangan tersendiri dalam tahapan proses produksinya, salah satunya adalah potensi terbentuknya cacat porositas yang dapat menurunkan kualitas maupun kekuatan mekanis produk. Cacat porositas umumnya terjadi akibat aliran logam cair yang turbulen, gas yang terperangkap dalam cetakan, Penyusutan saat pembekuan, serta desain *gating system* dan *riser* yang kurang optimal. Desain *gating system* yang meliputi *runner* dan *ingate*, serta penempatan dan ukuran *riser*, sangat memengaruhi kelancaran aliran logam dan proses pengisian cetakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi dimensi *runner*, *ingate*, dan *riser* terhadap cacat porositas pada produk hasil *investment casting*. Pendekatan yang digunakan meliputi simulasi pengecoran untuk memvisualisasikan pembentukan porositas, serta metode Taguchi sebagai alat optimasi untuk menentukan kombinasi parameter desain yang menghasilkan kualitas pengecoran terbaik. Dengan menerapkan desain eksperimen Taguchi dan pendekatan *Smaller is Better*, penelitian ini diharapkan mampu memberikan rekomendasi desain sistem pengecoran yang lebih efisien dan efektif, serta menjadi referensi bagi industri maupun mahasiswa untuk belajar dalam mengurangi jumlah produk cacat dan meningkatkan mutu hasil pengecoran.

Kata kunci: *gating system*, *investment casting*, porositas, simulasi pengecoran, taguchi

Abstract

Investment casting is one of the most widely used metal casting methods in the manufacturing industry due to its ability to produce products with complex shapes and high precision. However, this process has its own challenges in the production stage, one of which is the potential for porosity defects that can reduce the quality and mechanical strength of the product. Porosity generally occurs due to turbulent flow of molten metal, trapped gas in the mold, shrinkage during solidification, and suboptimal gating system and riser design. The design of the gating system, which includes the runner and ingate, as well as the placement and size of the riser, greatly affects the smooth flow of metal and the mold filling process. This study aims to analyze the effect of variations in the dimensions of the runner, ingate, and riser on porosity defects in investment casting products. The approaches used include casting simulation to visualize porosity formation and the Taguchi method as an optimization tool to determine the combination of design parameters that produce the best casting quality. By applying Taguchi experimental design and the Smaller is Better approach, this study is expected to provide recommendations for a more efficient and effective casting system design, and serve as a reference for industry and students to learn how to reduce the number of defective products and improve the quality of casting results.

Keywords: *casting simulation*, *gating system*, *investment casting*, *porosity*, *taguchi*

PENDAHULUAN

Proses pengecoran atau *casting* merupakan salah satu teknik pembuatan produk dimana logam dicairkan dalam tungku peleburan kemudian dituangkan kedalam rongga cetakan yang serupa dengan bentuk asli dari produk cor yang akan dibuat. Salah satu metode pengecoran logam yang digunakan pada industri pengecoran logam yaitu metode *investment casting*.

Investment casting merupakan salah satu metode pengecoran logam yang dimana menggunakan lilin sebagai pembentukan pola dan melapisinya dengan keramik berupa beberapa lapisan *mullite sand* dan *slurry sand*. Proses *investment casting* memiliki kelebihan yaitu cocok untuk memproduksi produk dengan desain yang kompleks, tidak ada *flash* atau garis perpisahan pada hasil corannya. Namun, *casting* investasi memiliki kelemahan yang dimana dalam prosesnya membutuhkan waktu siklus produksi yang lebih lama daripada proses lainnya (Prakoso, 2021).

Dalam praktiknya, pengecoran logam menghadapi berbagai tantangan teknis, terutama terkait dengan kualitas produk akhir yang dihasilkan. Salah satu cacat paling umum terjadi adalah porositas. Cacat porositas dapat terjadi karena berbagai faktor, seperti temperatur tuang yang terlalu rendah, keberadaan *slag* pada permukaan logam cair, serta kontrol yang tidak sempurna terhadap gas yang terperangkap dalam logam. Salah satu penyebab utama porositas adalah desain *gating system* dan *riser* yang tidak optimal, yang menyebabkan aliran fluida logam menjadi turbulen dan memerangkap gas dalam rongga cetakan produk (Arianti, 2023).

Salah satu faktor penting dalam proses pengecoran yang memengaruhi kualitas hasil adalah desain sistem saluran (*gating system*), karena berperan dalam mengalirkan logam cair dari *sprue* menuju rongga cetakan. *Gating system* terdiri dari beberapa bagian, seperti *sprue*, *runner*, *ingate*, dan *riser*. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi dimensi dari komponen-komponen tersebut dengan melakukan simulasi pengecoran menggunakan perangkat lunak dan optimasi parameter, dalam hal ini optimasi parameter yang akan dijadikan penelitian adalah bagian *runner*, *ingate*, dan *riser* (Surdia & Chijiwa, 1996).

Pada penelitian ini metode optimasi yang digunakan adalah metode Taguchi. Metode Taguchi digunakan untuk menentukan kombinasi parameter proses terbaik yang dapat menghasilkan kualitas produk optimal, meskipun terdapat variabilitas lingkungan dan proses produksi (Putra, 2019).

Dengan melakukan desain eksperimen Taguchi ini, diharapkan dapat mengetahui parameter yang tepat untuk mendapatkan hasil produk dengan tingkat nilai cacat porositas optimal dengan karakteristik *Smaller the Better* (STB). Berdasarkan uraian tersebut maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian tentang “Analisa Pengaruh Dimensi *Runner Ingate* dan *Riser* Terhadap Nilai Cacat Porositas Produk Dudukan Pompa Pada Pengecoran Invesment Menggunakan Metode Taguchi”.

TINJAUAN PUSTAKA

(A) Metode Taguchi

Menurut Soejanto (2009), metode Taguchi merupakan metodologi baru dalam bidang teknik yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses dalam waktu yang bersamaan menekan biaya dan sumber daya seminimal mungkin. Untuk

mencapai hal itu, metode Taguchi berupaya mencapai sasaran itu dengan menjadikan produk atau proses “tidak sensitif” terhadap berbagai parameter seperti material, perlengkapan manufaktur, kondisi operasional. Pada penelitian ini menggunakan metode Taguchi karena memiliki keunggulan seperti :

- (1) Metode Taguchi menghasilkan kesimpulan mengenai respon faktor-faktor dan level dari faktor-faktor kontrol yang menghasilkan respon optimum.
- (2) Desain eksperimen Taguchi lebih efisien karena memungkinkan untuk melaksanakan penelitian yang melibatkan banyak faktor dan jumlah.
- (3) Desain eksperimen Taguchi memungkinkan diperolehnya suatu proses yang menghasilkan produk yang konsisten dan kokoh terhadap faktor yang tidak dapat dikontrol (faktor gangguan).

Metode Taguchi menggunakan seperangkat matriks khusus yang disebut dengan matriks *orthogonal*. Matriks *orthogonal* merupakan langkah untuk menentukan jumlah eksperimen minimal yang dapat memberikan informasi sebanyak mungkin semua faktor yang memengaruhi parameter. Terdapat bagian terpenting dari metode ini adalah terletak pada pemilihan kombinasi level variabel-variabel input untuk tiap eksperimen (Soejanto, 2009).

(B) Gating System

Menurut Surdia & Chijiwa (1986), sistem saluran (*gating system*) adalah jalan masuk bagi cairan logam yang dituang ke dalam rongga cetakan. Dimana di dalam suatu sistem saluran terdapat beberapa bagian yaitu cawan tuang (*pouring basin*), saluran turun (*sprue*), pengalir (*runner*), saluran masuk (*ingate*) dan saluran penambah (*riser*). Fungsi sistem saluran turun *gating system*:

- (1) Mengurangi turbulensi pada aliran logam cair ketika melalui sistem saluran dan menuju ke rongga cetakan.
- (2) Menghilangkan udara dan gas yang terjebak di dalam logam.
- (3) Mengurangi kecepatan aliran logam ketika melalui sistem saluran dan masuk ke rongga cetakan.
- (4) Mengikuti cetakan agar diisi secara cepat dan mencegah pembekuan terlalu dini dan menghasilkan cacat coran.
- (5) Berperan dalam membentuk gradien temperatur yang tepat untuk menghasilkan pembekuan langsung di dalam pengecoran.

METODE

Langkah awal yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah dengan melakukan perencanaan eksperimen yang terdiri dari pengumpulan data, menentukan faktor-faktor eksperimen, menentukan level faktor, dan membuat *orthogonal array*. Taguchi membedakan faktor kedalam dua golongan yaitu faktor kontrol dan faktor *noise*. Faktor kontrol adalah parameter-parameter yang nilainya ditentukan oleh ahli teknik sedangkan faktor *noise* adalah suatu parameter yang dapat memengaruhi produk memiliki suatu penyimpangan karakteristik kualitas dari nilai targetnya (Setyanto & Lukodono, 2017). Level faktor digunakan untuk menentukan jumlah derajat kebebasan yang akan digunakan dalam pemilihan *orthogonal array*. Ketentuan dalam memilih *orthogonal array* yang cocok atau sesuai dengan eksperimen adalah derajat kebebasan

pada *orthogonal array* standar harus lebih besar atau sama dengan derajat kebebasan faktor dan level eksperimen. Derajat kebebasan dihitung menggunakan Persamaan 1 berikut:

Derajat Kebebasan = (Banyaknya *factor*) (Banyaknya level-1).....(1)

Langkah selanjutnya yang dilakukan pada penelitian adalah membuat desain yang sesuai dengan variasi ukuran yang telah ditentukan menggunakan matriks *orthogonal array*. Kemudian hasil desain akan dilakukan simulasi untuk mengetahui nilai persentase cacat porositas yang ada pada *gating system* untuk nantinya di lakukan pengolahan data.

Tahap selanjutnya merupakan tahap pengolahan data hasil eksperimen yang dilakukan. Pengolahan data yang meliputi penghitungan *Signal to Noise Ratio* (SNR) dengan karakteristik kualitas *smaller is better* karena respon eksperimen adalah jumlah persentase cacat porositas terendah. Rumus untuk menghitung *Signal to Noise Ratio* (SNR) *smaller the better* dapat dilihat pada Persamaan 2 berikut:

Di mana:

n : jumlah eksperimen

yi : data pengalaman ke-i

Setelah mendapatkan nilai rata rata dan *Signal to Noise Ratio* (SNR) dilanjutkan dengan *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk masing-masing faktor tersebut. Setelah melakukan perhitungan ANOVA terhadap nilai rata-rata dan SNR, maka dapat ditetapkan level yang optimal untuk meningkatkan kualitas produk. Setelah dilakukan pengolahan data, maka tahapan selanjutnya adalah analisis data. Analisis data dilakukan untuk mengetahui faktor-faktor mana saja yang memiliki kontribusi paling banyak untuk menurunkan nilai cacat porositas sehingga dapat dibuat desain *gating system* dari rancangan kombinasi yang baru untuk menurunkan persentase nilai porositas pada produk.

Langkah terakhir yang dilakukan pada penelitian ini adalah eksperimen konfirmasi yang merupakan eksperimen yang dilakukan dengan tujuan untuk melakukan validasi terhadap kesimpulan yang didapatkan dari perhitungan sebelumnya. Eksperimen konfirmasi menggunakan desain yang sama dengan eksperimen sebelumnya. Setelah mendapatkan level yang optimal, maka perlu untuk dilakukan perhitungan selang kepercayaan terhadap kondisi optimal tersebut. Adapun perhitungan ini dilakukan untuk dapat membandingkan antara kondisi optimal dengan eksperimen konfirmasi. Eksperimen konfirmasi merupakan eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan desain kombinasi ukuran *runner*, *ingate*, dan *riser* yang optimal. Selang kepercayaan untuk rata-rata dihitung menggunakan Persamaan 3 sebagai berikut:

Tahap ini dilakukan dengan tujuan untuk melakukan pengendalian terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara banyaknya output produk cacat yang telah ada saat ini dengan output produk cacat hasil eksperimen untuk mengetahui penurunan tingkat produk cacat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

(A) Pengujian Eksperimen

Pada penelitian ini terdapat 2 variabel yang digunakan yaitu variabel bebas dan variabel respon, dimana variabel bebas merupakan variabel yang dapat dikendalikan dan nilainya dapat ditentukan. Variabel respon ada 3 variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini yaitu dimensi *runner*, *ingate*, dan *riser*. Ukuran yang akan digunakan untuk ke 3 variabel tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini:

Tabel 1. Variabel Bebas dan Level Kendali

Variabel Bebas	Variasi		
	1	2	3
Dimensi <i>Runner</i> (mm)	30 x 30	30 x 35	35 x 35
Dimensi <i>Ingate</i> (mm)	40 x 20	30 x 30	40 x 25
Dimensi <i>Riser</i> (mm)	Ø30	Ø35	Ø40

Dari Tabel 1 di atas didapatkan ukuran yang digunakan pada penelitian ini untuk selanjutnya dilanjutkan untuk menentukan matriks *orthogonal array*. *Orthogonal array* atau matriks ortogonal digunakan untuk mendesain rancangan eksperimen dengan keluaran dapat mengetahui berapa jumlah minimal eksperimen yang harus dilakukan namun mendapatkan informasi yang cukup dimana pada penelitian digunakan matriks *orthogonal array* dengan kombinasi L9 (3³), hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini:

Tabel 2. Orthogonal Array L9 (3³)

Design	Runner	Ingate	Riser
1	30 x 30	40 x 20	Ø30
2	30 x 30	30 x 30	Ø35
3	30 x 30	40 x 25	Ø40
4	30 x 35	40 x 20	Ø35
5	30 x 35	30 x 30	Ø40
6	30 x 35	40 x 25	Ø30
7	35 x 35	40 x 20	Ø40
8	35 x 35	30 x 30	Ø30
9	35 x 35	40 x 25	Ø35

Dari hasil kombinasi *orthogonal array* yang telah didapatkan, lalu selanjutnya dibuatkan desain 3D menggunakan kombinasi ukuran pada Tabel 2 di atas, kemudian dilakukan simulasi desain *gating system* menggunakan *software* Procast untuk mendapatkan nilai porositas yang kemudian akan dianalisis. Hasil nilai simulasi dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Hasil Simulasi Nilai Porositas

Design	Runner	Ingate	Riser	Porositas	Macro Porositas	Micro Porositas
1	30 x 30	40 x 20	Ø30	9,007798	2,630018	6,457907
2	30 x 30	30 x 30	Ø35	9,100339	2,541168	6,635181
3	30 x 30	40 x 25	Ø40	8,858003	2,638607	6,284868
4	30 x 35	40 x 20	Ø35	8,505057	2,565560	6,012638

5	30 x 35	30 x 30	Ø40	8,849486	2,677753	6,171733
6	30 x 35	40 x 25	Ø30	8,839795	2,583708	6,332702
7	35 x 35	40 x 20	Ø40	9,318520	2,789471	6,600825
8	35 x 35	30 x 30	Ø30	9,918610	3,097215	6,896239
9	35 x 35	40 x 25	Ø35	8,980843	2,862518	6,915345

(B) Perhitungan S/N Ratio

Rasio S/N digunakan untuk memilih faktor-faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan variansi suatu respon. Rasio S/N pada penelitian ini adalah semakin kecil, semakin baik (*Smaller is Better*) dengan contoh perhitungan S/N rasio pada variasi desain 1 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 S/N &= -10 \log y_i^2 \\
 &= -10 \log 9,007982 \\
 &= -10 \log 81,1437 \\
 &= -19,0924
 \end{aligned}$$

Secara umum hasil perhitungan S/N persentase porositas disajikan pada Tabel 4 berikut ini:

Tabel 4. Data Hasil Perhitungan Nilai S/N Rasio Porositas

Variasi Desain	Parameter Dimensi			Hasil	
	Runner	Ingate	Riser	Porositas	S/N Rasio
1	30x30	40x20	Ø30	9,007798	-19,0924
2	30x30	30x30	Ø35	9,100339	-19,1812
3	30x30	40x25	Ø40	8,858003	-18,9467
4	30x35	40x20	Ø35	8,505057	-18,5935
5	30x35	30x30	Ø40	8,849486	-18,9384
6	30x35	40x25	Ø30	8,839795	-18,9288
7	35x35	40x20	Ø40	9,318520	-19,3869
8	35x35	30x30	Ø30	9,918610	-19,9290
9	35x35	40x25	Ø35	8,980843	-19,0663
Jumlah				-172,0633	
Rata - Rata				-19,1181	

(C) Pengujian ANOVA

Langkah selanjutnya yaitu melakukan pengujian ANOVA untuk mengetahui signifikansi pengaruh setiap parameter yang digunakan pada penelitian ini yang dapat dilihat pada Tabel 5 berikut:

Tabel 5. Data Hasil Uji ANOVA

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F	P
Runner	2	0,62439	56,26%	0,62439	0,31220	18,78	0,051
Ingate	2	0,24375	21,96%	0,24375	0,12187	7,33	0,120
Riser	2	0,20845	18,78%	0,20845	0,10422	6,27	0,138
Eror	2	0,03324	3,00%	0,01662	0,01662		
Total	8	1,10983	100,00%				

Berdasarkan Tabel 5 di atas menunjukkan hasil bahwa secara statistik *runner*, *ingate*, dan *riser* kurang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap cacat porositas yang terjadi pada produk dudukan pompa, hal ini dapat dilihat dari masing-masing nilai P-value masing-masing faktor sebesar 0,051, 0,120 dan 0,138 dimana nilai P-value dari *runner*, *ingate*, dan *riser* lebih dari α (0,05).

(D) Perhitungan Respon S/N Ratio

Selanjutnya mencari variabilitas nilai S/N rasio dihitung nilai rata-rata S/N rasio pada setiap faktor dalam satu level. Dengan mengetahui pengaruh level terhadap faktor akan didapatkan level kombinasi optimal. Berikut ini perhitungan faktor dimensi *runner*, *ingate*, dan *riser* pada level 1, 2 dan 3 :

(1) Dimensi *Runner*

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 1 terdapat di eksperimen pertama, kedua dan ketiga. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 1} &= \frac{((-19,0924)+(-19,1812)+(-1,9467))}{3} \\ &= -19,07341 \end{aligned}$$

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 2 terdapat di eksperimen keempat, kelima dan keenam. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 2} &= \frac{((-18,5935)+(-18,9384)+(-18,9288))}{3} \\ &= -18,82025 \end{aligned}$$

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 3 terdapat di eksperimen ketujuh, kedelapan dan kesembilan. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 3} &= \frac{((-19,3869)+(-19,9290)+(-19,0663))}{3} \\ &= -19,4608 \end{aligned}$$

(2) Dimensi *Ingate*

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 1 terdapat di eksperimen pertama, kedua dan ketiga. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 1} &= \frac{((-19,0924)+(-18,5935)+(-19,3869))}{3} \\ &= -19,02429 \end{aligned}$$

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 2 terdapat di eksperimen keempat, kelima dan keenam. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 2} &= \frac{((-19,1812)+(-18,9384)+(-19,9290))}{3} \\ &= -19,02429 \end{aligned}$$

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 3 terdapat di eksperimen ketujuh, kedelapan dan kesembilan. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 3} &= \frac{((-18,9467)+(-18,9288)+(-19,0663))}{3} \\ &= -18,98063 \end{aligned}$$

(3) Dimensi *Riser*

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 1 terdapat di eksperimen pertama, kedua dan ketiga. Sehingga :

$$\begin{aligned} \text{Level 1} &= \frac{((-19,0924)+(-18,9288)+(-19,9290))}{3} \\ &= -19,31674 \end{aligned}$$

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 2 terdapat di eksperimen keempat, kelima dan keenam. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 2} &= \frac{((-1,1812)+(-18,5935)+(-19,0663))}{3} \\ &= -18,94701 \end{aligned}$$

Pada eksperimen, parameter yang berada pada level 3 terdapat di eksperimen ketujuh, kedelapan dan kesembilan. Sehingga:

$$\begin{aligned} \text{Level 3} &= \frac{((-1,9467)+(-18,9384)+(-19,3869))}{3} \\ &= -19,09067 \end{aligned}$$

Respon S/N rasio optimasi persentase porositas dari pengecekan level parameter proses menunjukkan *noise* terbesar pada parameter setiap prosesnya. Semakin besar nilai rata-rata (*mean*) S/N rasio maka semakin besar pula kontribusinya terhadap suatu pengerjaan. Berikut adalah hasil respon S/N rasio yang dirangkum dalam Tabel 6 sebagai berikut:

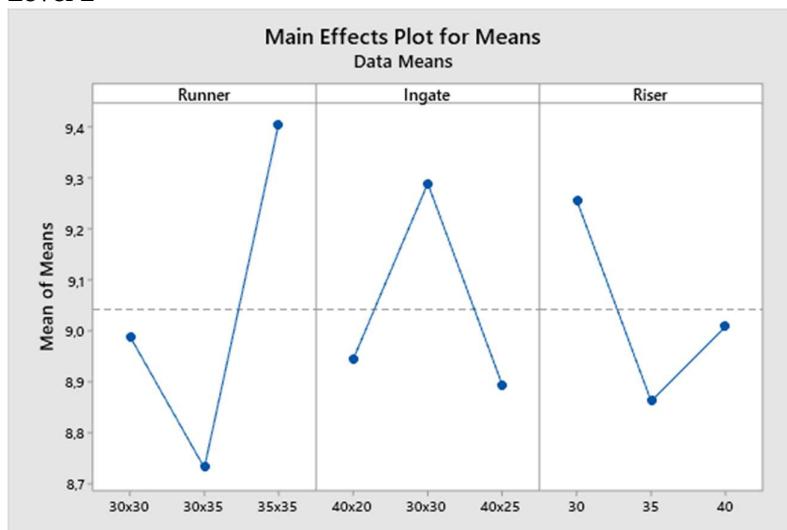
Tabel 6. Respon *Signal to Noise* Rasio

Level	Dimensi Runner	Dimensi Ingate	Dimensi Riser
1	-19,0734	-19,0243	-19,3167
2	-18,8202	-19,3495	-18,9470
3	-19,4608	-18,9806	-19,0907
Delta	0,64	0,37	0,37
Rank	1	3	2

Sumber: Hasil Uji

Dari ketiga parameter proses didapatkan perengkingan sesuai Tabel 6 di atas, dari 3 parameter proses yang digunakan parameter yang paling optimal adalah dimensi *runner*. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 6 hasil yang paling optimal adalah:

- (1) *Runner* Level 2
- (2) *Ingate* Level 3
- (3) *Riser* Level 2



Sumber: Hasil Uji

Gambar 1. Main Effects Plot for S/N Ratio

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil optimasi parameter dimensi *runner*, *ingate*, dan *riser* pada hasil uji simulasi pengecoran (*investment*) menggunakan *software* dengan metode Taguchi dengan kriteria *smaller is better* didapatkan hasil yaitu ukuran dimensi *runner* yang paling berpengaruh yaitu *runner* ukuran 30 x 35 mm, *ingate* ukuran 40 x 25, dan *riser* ukuran diameter 35 mm.

Sedangkan saran untuk penelitian berikutnya, yaitu menggunakan jumlah eksperimen yang lebih banyak yaitu L27 (3⁴) atau menambahkan parameter lain untuk mendapatkan hasil lebih baik.

REFERENSI

- Arianti, S. (2023) Perancangan dan Pembuatan Gating System Pada Produk PS60 Dengan Proses Pengecoran Logam Invesment Casting. *7th Conference On Design and Manufacture and Its Application (CDMA)*, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Fawaid, M., Ismail, R., Jamari, & Nugroho, S. (2012). Karakteristik AISI 304 sebagai Material Friction Welding. *Prosiding Sains Nasional dan Teknologi (SNST FT)*. 1(1), 29-33. Doi:10.36499/psnst.v1i1.47 (Unwahas Scientific Publications).
- Nabilah, R., & Ceper, P. M. (2022). Pengembangan Pengecoran Logam Material Adc12 Menggunakan Metode Pippet Ladle Untuk Meminimalisasi Gas Pengotor. *Academia Edu*. 1-10. https://www.academia.edu/download/105844332/Jurnal_Ilmiah_Razan.pdf
- Prakoso, D. A. (2021). Studi Pengecoran Aluminium Dengan Metode Gravity Die Casting Dan Gravity Investment Casting Terhadap Density, Porositas, Struktur Mikro Dan Kekerasan. *Institutional Repository Universitas Muhammadiyah Surakarta*. 1–10.
- Putra, R. K. (2019). Simulasi dan Optimasi desain cetakan pasir pada Produk Idler menggunakan metode Taguchi. Tugas Akhir, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya Teknik Desain dan Manufaktur, Surabaya.
- Rachman, F., Wardani, L. A., Sidi, P., Setiawan, T. A., Hamzah, F., & Maulana, D. (2024). ANALYSIS OF LASER TUBE CUTTING MACHINE PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS OF SQUARE PIPE ST 37 USING TAGUCHI METHOD. *AUSTENIT*. 16(2), 111–117. Doi:10.53893/austenit.v16i2.9160
- Sandi, R. R. (2020). Analisis Struktur Mikro, Cacat Porositas Dan Ketahanan Aus Dengan Adanya Variasi Volume Saluran Penambah (Riser) Komponen Tutup Mesin Motor Listrik. Semarang: <http://lib.unnes.ac.id/>.
- Setyanto, N. W., & Lukodono, R. P. (2017). Teori dan aplikasi desain eksperimen Taguchi. Malang: UB Press.
- Simanjuntak, J. G., Sitindoan, P., Pardosi, H., & Kusumawaty, D. (2020). Perencanaan Sistem Saluran dan Penambah untuk Mengurangi Cacat Produk Coran Komponen Peralatan Pabrik. *Fungsi Perekayasa, Balai Riset dan Standarisasi Industri*. Medan.
- Soeharto, A. S. (2012). Studi Eksperimen pada Investment Casting dengan Komposisi Ceramic Shell yang Berbeda dalam Pembuatan Produk Toroidal Piston. *Jurnal Teknik ITS*. 1(1), ISSN: 2301-9271, 2.
- Soejanto, I. (2009). Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi. *Graha Ilmu*.

Yogyakarta, Indonesia.

Stefanescu, D. M. (1998). ASM Handbook, Vol. 15 Casting. ASM International Handbook Committee.

Surdia, T., & Chijiwa, K. (1996). *Teknik pengecoran logam* (Cet. ke-7). Jakarta: PT Pradnya Paramita.

Tirto, S. (2002). Pengaruh Modulus Cor Riser Terehadap Cacat Penyusutan pada Produk Paduan Al-Si. *Jurnal Universitas Kristen Petra*. 4(2), 69-74.

Yustisiabellah, R. (2015). Design Of Gating System On Piston Of Mobil Sinjai With Gravity Die Casting Method. Surabaya: <https://core.ac.uk/download/pdf/291472066>