

Karakterisasi Wire Sweep Material Copper Wire Pada Proses Safe Launch Molding IC Packaging

Erik Bragi Putra¹, Ir.Budi Baharudin,S.T.,M.T²

Politeknik Negeri Batam
Program Studi Teknik Mesin
Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam29461, Indonesia
¹E-mail: erikbragiputra@gmail.com

Abstrak

Industri *semiconductor packaging* tengah beralih dari *gold wire* ke *copper wire* untuk efisiensi biaya. Meski lebih murah, memiliki sifat listrik dan termal yang baik, *copper wire* lebih kaku dibandingkan *gold wire*, secara teori lebih tahan terhadap defleksi tetapi tetap berisiko mengalami *wire sweep* atau bahkan putusnya sambungan *wire* jika faktor proses tidak dikendalikan. Penelitian ini dilakukan untuk mengkarakterisasi faktor yang berpengaruh menyebabkan *wire sweep* dan perilaku material pada material *copper wire* selama proses safe launch molding, metode yang digunakan adalah *fishbone diagram* untuk mengidentifikasi akar penyebab *wire sweep* serta pendekatan *Design of Experiment* full factorial. Data diperoleh dari faktor parameter mesin molding yaitu *mold temperature*, *transfer time*, *transfer pressure*, dan hasil inspeksi menggunakan mesin x-ray. Hasil menunjukkan bahwa *wire sweep* pada material *copper wire* berada dibawah batas spesifikasi 10% dengan rentang nilai 2,14–3,92%, data menunjukkan bahwa efek utama (*main effect*) *mold temperature* berpengaruh dominan dibanding *transfer time* dan *transfer pressure*, selain itu semua panel grafik interaksi plot pengaruh antar faktor menunjukkan garis yang bersilangan mengindikasikan kemungkinan adanya interaksi pada semua faktor proses. Dengan memahami profil perilaku ini, proses safe launch dapat dikendalikan dengan lebih baik dan memudahkan pada tahap optimasi selanjutnya.

Kata kunci: *Semiconductor packaging, copper wire, wire sweep, Fishbone diagram, Design of Experiment.*

Abstract

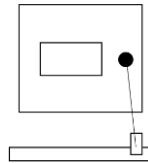
The semiconductor packaging industry is currently transitioning from gold wire to copper wire for cost efficiency. Although cheaper and possessing good electrical and thermal properties, copper wire is stiffer than gold wire; whilst theoretically more resistant to deflection, it remains at risk of wire sweep or even wire breakage if process factors are not properly controlled. This study was conducted to characterise the factors influencing wire sweep and the behaviour of copper wire during the safe launch moulding process. The methods used were a fishbone diagram to identify the root causes of wire sweep and a full factorial Design of Experiments approach. Data were obtained from moulding machine parameters—namely mould temperature, transfer time, transfer pressure—and inspection results using an X-ray machine. The results show that wire sweep in copper wire material is below the specification limit of 10%, with a range of 2.14–3.92 per cent. The data indicate that the main effect of mould temperature is dominant compared to transfer time and transfer pressure; furthermore, all interaction plots showing the influence between factors display intersecting lines, indicating the possibility of interactions among all process factors. By understanding this behavioural profile, the safe launch process can be better controlled, facilitating the subsequent optimisation stage.

Keywords: *Semiconductor packaging, copper wire, wire sweep, Fishbone diagram, Design of Experiment.*

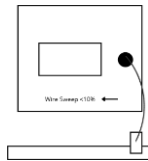
1 Pendahuluan

Pesatnya perkembangan teknologi *semiconductor* packaging menuntut industri manufaktur untuk terus melakukan inovasi dan efisiensi biaya produksi tanpa harus mengurangi kualitas produk, salah satu langkah strategis yang diambil adalah transisi penggunaan material *wire* dari *gold wire* ke *copper wire*, karena harganya lebih murah serta memiliki sifat listrik dan termal yang baik [1]. Namun, penggunaan *copper wire* memiliki tantangan teknis karena karakteristik materialnya lebih kaku dibandingkan *gold wire* [1]. Kekakuan suatu material dapat ditinjau dari nilai *modulus young*-Nya, yaitu besaran yang menunjukkan kemampuan suatu material menahan deformasi akibat gaya eksternal [2], *copper wire* memiliki nilai *modulus young* sebesar ~ 130 [1], sehingga secara teori *copper wire* memiliki ketahanan struktural yang lebih baik saat menerima beban eksternal.

Meskipun memiliki keunggulan mekanis tersebut, penggunaan material *copper wire* pada proses *safe launch molding* IC packaging tetap menghadirkan tantangan teknis, yaitu fenomena *wire sweep*, yaitu pergeseran *wire* penghubung dari posisi rancangan awal akibat adanya gaya seret (*drag force*) yang timbul oleh aliran *epoxy mold compound* saat proses enkapsulasi [3, The International Journal halaman 3294]. *Epoxy mold compound* merupakan aliran termoset yang perilaku alirannya dipengaruhi oleh viskositas, saat viskositas rendah, gaya seret yang diterima *wire* relatif lebih kecil dibandingkan saat viskositas yang tinggi [4] [5]. Apabila nilai *wire sweep* melampaui spesifikasi, hal tersebut berisiko menyebabkan *reject* berupa *short circuit* atau bahkan putusya sambungan *wire* [3] [6].



Gambar 1. Ilustrasi Before Wire Sweep



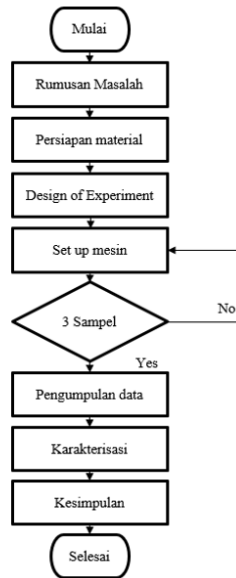
Gambar 2. Ilustrasi After Wire Sweep

Besarnya nilai *wire sweep* bergantung pada pengendalian kondisi termal dan kinetik pada mesin molding, kondisi suhu pada fase *curing* menjadi variabel yang mengubah material *epoxy mold compound* dari fase cair ke padat [6]. Interaksi antara suhu, waktu, dan tekanan yang diberikan oleh mesin menciptakan lingkungan proses yang sensitif bagi *wire* berdiameter sangat halus.

Guna mendalami fenomena tersebut secara sistematis, penelitian ini menerapkan metode *root cause analysis* dengan instrumen *fishbone diagram* untuk mengidentifikasi dan memetakan variabel penyebab *wire sweep* pada proses *safe launch molding* IC packaging, faktor-faktor dikelompokkan ke dalam 5M+1E, yaitu *method*, *material*, *machine*, *measurement*, *man*, dan *environment*. Setelah *root cause* terpetakan dan mendapat variabel uji, dilakukan pendekatan *Design of Experiment* full factorial [9] yang bertujuan untuk mengkarakterisasi pengaruh variabel proses.

Dengan menggunakan desain factorial yang melibatkan variabel tiga faktor proses *mold temperature*, *transfer time*, *transfer pressure* juga dua level *min* dan *max*, penelitian ini difokuskan untuk mengkarakterisasi pengaruh faktor proses berdasarkan narasi deskriptif dengan sifat ortogonal (orthogonal) *Design of Experiment* full factorial [10] terhadap respons *wire sweep*. Karakterisasi ini diharapkan dapat memudahkan proses *safe launch molding* IC packaging serta tahap optimasi selanjutnya.

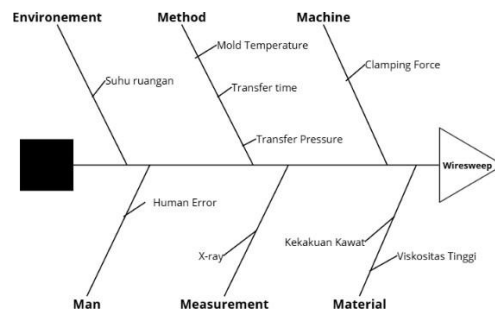
2 Metodologi Penelitian



Gambar 3. Flowchart Penelitian

2.1 Rumusan Masalah

Fenomena *wire sweep* material *copper wire* pada proses *safe launch molding* IC packaging menjadi salah satu kendala, karena berisiko *reject* berupa *short circuit* atau bahkan putusnya sambungan *wire*, jika melebihi batas spesifikasi tempat penulis melakukan kegiatan praktik magang yaitu 10%, untuk mengidentifikasi penyebabnya, penelitian ini menggunakan metode *root cause analys* dengan instrumen *fishbone diagram*, faktor-faktor dikelompokkan kedalam 5M+1E yaitu *method*, *material*, *machine*, *measurement*, *man*, dan *environment*.

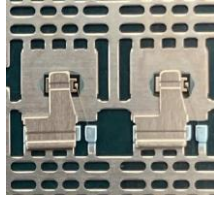


Gambar 4. Fishbone Diagram

Dari seluruh faktor pada *fishbone diagram*, ketiga parameter mesin yaitu *mold temperature*, *transfer time*, *transfer pressure*, dipilih sebagai variabel uji karena merupakan faktor yang dapat dikendalikan secara langsung oleh operator melalui pengaturan mesin, sedangkan faktor lain dijaga tetap konstan selama pengujian untuk meminimalkan variabel pengganggu.

2.2 Persiapan Material

Tahap awal penelitian dimulai dengan menyiapkan material utama, yaitu leadframe package SON berukuran 19,2 cm x 6,8 cm yang sudah dibonding menggunakan material *copper wire* dengan diameter 30µm, dan pellet *epoxy mold compound* untuk proses enkapsulasi.



Gambar 5. Package SON Setelah Bonding Copper Wire



Gambar 6. Epoxy Mold Compound

2.3 Design of Experiment (Full Factorial)

Penelitian melibatkan 2 level dan 3 faktor sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Faktor	Minimum level	Maximum level
Mold temperature	170°C	180°C
Transfer time	8 Sekon	14 Sekon
Transfer pressure	8 Mpa	11 Mpa

Tabel 1. Faktor dan Level Experiment

Matriks *experiment* terdiri dari 8 pattern dengan tiga replikasi setiap *pattern*, menghasilkan total 24 data. Respons variabel adalah rata-rata nilai *wire sweep* (%) yang diukur menggunakan mesin x-ray, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Pattern	Mold temperature (°C)	Transfer time (Sekon)	Transfer Pressure (Mpa)	Sample	Wiresweep(%)
---	170	8	8	wiresweep	-
---	170	8	8	wiresweep 2	-
---	170	8	8	wiresweep 3	-
--+	170	8	11	wiresweep	-
--+	170	8	11	wiresweep 2	-
--+	170	8	11	wiresweep 3	-
-+-	170	14	8	wiresweep	-
-+-	170	14	8	wiresweep 2	-
-+-	170	14	8	wiresweep 3	-
-++	170	14	11	wiresweep	-
-++	170	14	11	wiresweep 2	-
-++	170	14	11	wiresweep 3	-
+++	180	8	8	wiresweep	-
+++	180	8	8	wiresweep 2	-
+++	180	8	8	wiresweep 3	-
+++	180	8	11	wiresweep	-
+++	180	8	11	wiresweep 2	-
+++	180	8	11	wiresweep 3	-
+++	180	14	8	wiresweep	-
+++	180	14	8	wiresweep 2	-
+++	180	14	8	wiresweep 3	-
+++	180	14	11	wiresweep	-
+++	180	14	11	wiresweep 2	-
+++	180	14	11	wiresweep 3	-

Tabel 2. Matriks DoE Full Factorial

2.4 Setup Mesin

Mesin molding yang digunakan adalah mesin MECO, mesin disiapkan sesuai dengan faktor dan level yang sudah ditentukan dalam rancangan *Design of Experiment*, proses ini meliputi pengaturan tiga faktor, yaitu *mold temperature*, *transfer time*, dan *transfer pressure* sesuai dengan pattern yang telah ditetapkan, kemudian dilakukan *running material* seperti ditunjukkan Gambar 7.



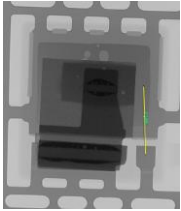
Gambar 7. Flowchart Running Material

2.5 Tiga Sampel

Setiap pattern dijalankan dengan 3 replikasi untuk memastikan konsistensi data. Apabila jumlah sampel belum terpenuhi, proses diulang kembali ke tahap set up mesin hingga jumlah sampel terpenuhi.

2.6 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan melalui inspeksi menggunakan mesin x-ray. Metode ini memungkinkan visualisasi *wire* hasil molding tanpa merusak sampel, sehingga *wire* dapat diamati secara akurat, dengan inspeksi x-ray, pergeseran *wire* akibat fenomena *wire sweep* dapat diukur secara kuantitatif dalam bentuk persentase, termasuk mendeteksi adanya putus sambungan *wire*.



Gambar 8. Hasil Inspeksi X-ray

2.7 Karakterisasi

Karakterisasi disini fokus pada narasi deskriptif pengaruh faktor efek utama (*main effect*) dan interaksi plot tiga faktor, yaitu *mold temperature*, *transfer time*, *transfer pressure*, terhadap fenomena *wire sweep* disertai grafik.

3 Hasil dan Pembahasan

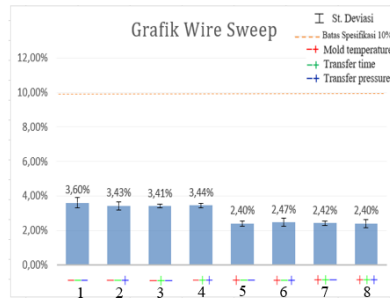
3.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan mesin x-ray terhadap seluruh sample hasil proses safe launch molding. Terdapat delapan pattern dilakukan tiga replikasi, sehingga diperoleh total 24 data pengukuran *wire sweep*. Nilai *wire sweep* dinyatakan dalam persentase (%), dan batas spesifikasi industri yang digunakan adalah 10% sesuai dengan SOP perusahaan dan berlaku . Data hasil inspeksi x-ray ditampilkan pada Tabel 3.

Pattern	Mold temperature (°C)	Transfer time (Sekon)	Transfer Pressure (Mpa)	Sample	Wiresweep(%)
---	170	8	8	wiresweep	3,55
---	170	8	8	wiresweep 2	3,34
---	170	8	8	wiresweep 3	3,92
---+	170	8	11	wiresweep	3,39
---+	170	8	11	wiresweep 2	3,68
---+	170	8	11	wiresweep 3	3,21
---+	170	14	8	wiresweep	3,51
---+	170	14	8	wiresweep 2	3,32
---+	170	14	8	wiresweep 3	3,41
---+	170	14	11	wiresweep	3,41
---+	170	14	11	wiresweep 2	3,34
---+	170	14	11	wiresweep 3	3,58
++--	180	8	8	wiresweep	2,57
++--	180	8	8	wiresweep 2	2,36
++--	180	8	8	wiresweep 3	2,28
++--	180	8	11	wiresweep	2,72
++--	180	8	11	wiresweep 2	2,38
++--	180	8	11	wiresweep 3	2,31
++--	180	14	8	wiresweep	2,48
++--	180	14	8	wiresweep 2	2,51
++--	180	14	8	wiresweep 3	2,27
++--	180	14	11	wiresweep	2,14
++--	180	14	11	wiresweep 2	2,45
++--	180	14	11	wiresweep 3	2,61

Tabel 3. Data Hasil Inspeksi X-ray

Berdasarkan Tabel 3, seluruh data hasil pengukuran *wire sweep* berada dibawah batas spesifikasi industri yaitu 10%, dengan rentang nilai antara 2,14% hingga 3,92%. Hal ini menunjukkan bahwa secara umum proses safe launch molding IC packaging dengan material *copper wire* dalam kondisi terkendali. Grafik persentase rata-rata *wire sweep* dengan 8 pattern ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Grafik Persentase Rata-rata Wire Sweep

Grafik pada gambar 9 menampilkan rata-rata persentase *wire sweep* untuk 8 pattern dari hasil merata-ratakan 24 data sesuai pattern-nya, grafik dari 8 pattern menunjukkan nilai *wire sweep* yang bervariasi. Error bar pada setiap grafik batang adalah standar deviasi yang dihitung dari tiga replikasi pada masing-masing pattern menggunakan rumus standar deviasi sampel pada gambar 10, standar deviasi kecil menunjukkan data replikasi pada setiap pattern berdekatan, artinya hasilnya konsisten, meskipun terdapat beberapa pattern yang memiliki sedikit noise.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

- s = standar deviasi sampel
- n = jumlah elemen dalam sampel
- x_i = nilai data ke- i
- $\bar{x}$ = rata-rata dari sampel

Gambar 10. Rumus Standar Deviasi Sampel. [7] [8]

3.2 Karakterisasi Faktor Efek Utama (*Main Effect*)

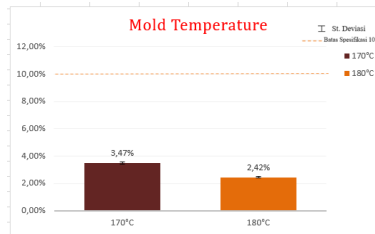
Karakterisasi faktor efek utama (*main effect*) dilakukan untuk melihat efek dominan dari ketiga faktor proses, yaitu *mold temperature*, *transfer time*, dan *transfer pressure* dengan membandingkan selisih rata-rata antar faktor [10, Montgomery, 2017, halaman 180].

Grafik diperoleh dengan merata-ratakan seluruh kombinasi level suatu faktor dengan meniadakan efek dari faktor lainnya, bukan dengan membandingkan pattern secara langsung satu per satu, karena dua pola yang berbeda pada lebih dari satu faktor sekaligus tidak dapat dibandingkan secara langsung akibat efek yang tercampur (*confounded*). Pendekatan ini valid karena sifat ortogonal pada desain full factorial, yaitu setiap level suatu faktor selalu dipasangkan secara merata dan seimbang dengan seluruh kombinasi level faktor lainnya, sehingga pengaruh faktor lain saling meniadakan (*cancel out*), jadi pengaruh efek utama tiap faktor dapat dihitung secara independen tanpa tercampur satu sama lain [10, Montgomery, 2017, halaman 95, 3.5.5 Orthogonal cont], juga standar deviasi yang didapat menggunakan rumus standar deviasi sampel pada gambar 10.

3.2.1 Mold Temperature (A)

Mold Temperature	Wire Sweep %			
170°C	1	2	3	4
	3,60%	3,43%	3,41%	3,44%
	$\div 4 = 3,47\%$			
180°C	5	6	7	8
	2,40%	2,47%	2,42%	2,40%
	$\div 4 = 2,42\%$			

Tabel 4. Rata-rata 2 Level Faktor Mold Temperature (A)



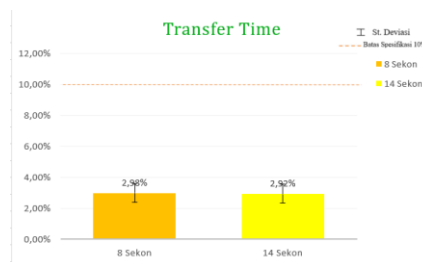
Gambar 11. Grafik 2 Level faktor *Mold Temperature* (A)

Tabel 4 dan Gambar 11 menunjukkan pengaruh antara 2 level faktor *mold temperature* terhadap nilai *wire sweep*, yang diperoleh dari merata-ratakan masing-masing level *mold temperature* dengan meniadakan seluruh kombinasi level *transfer time* dan *transfer pressure*. Peningkatan suhu *mold temperature* dari level min ke level maks menghasilkan penurunan rata-rata, pada level min 170°C diperoleh rata-rata sebesar 3,47% dengan standar deviasi $\pm 0,087$, sedangkan pada level maks 180°C diperoleh rata-rata sebesar 2,42% dengan standar deviasi $\pm 0,033$, selisih rata-rata antar kedua level sebesar 1,05%.

3.2.2 Transfer Time (B)

Transfer time	Wire Sweep %
8 S	$\frac{1}{3,60\%} + \frac{2}{3,43\%} + \frac{5}{2,40\%} + \frac{6}{2,47\%} \div 4 = 2,98\%$
14 S	$\frac{3}{3,41\%} + \frac{4}{3,44\%} + \frac{7}{2,42\%} + \frac{8}{2,40\%} \div 4 = 2,92\%$

Tabel 5. Rata-rata 2 Level Faktor *Transfer Time* (B)



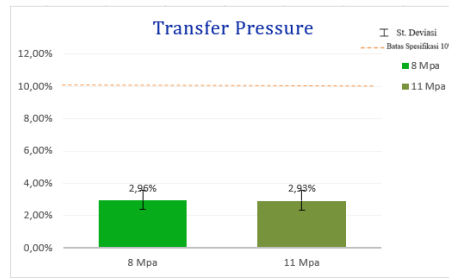
Gambar 12. Grafik 2 Level Faktor *Transfer Time* (B)

Tabel 5 dan Gambar 12 menunjukkan pengaruh antara 2 level faktor *transfer time* terhadap nilai *wire sweep*, yang diperoleh dari merata-ratakan masing-masing level *transfer time* dengan meniadakan seluruh kombinasi level *mold temperature* dan *transfer pressure*. Pada level min 8 sekon diperoleh rata-rata sebesar 2,98% dengan standar deviasi $\pm 0,628$, sedangkan pada level maks 14 sekon diperoleh rata-rata sebesar 2,92% dengan standar deviasi $\pm 0,586$, selisih rata-rata antar kedua level sebesar 0,06%.

3.2.3 Transfer Pressure (C)

Transfer Pressure	Wire Sweep %
8 Mpa	$\frac{1}{3,60\%} + \frac{3}{3,41\%} + \frac{5}{2,40\%} + \frac{7}{2,42\%} \div 4 = 2,96\%$
11 Mpa	$\frac{2}{3,43\%} + \frac{4}{3,44\%} + \frac{6}{2,47\%} + \frac{8}{2,40\%} \div 4 = 2,93\%$

Tabel 6. Rata-rata 2 Level Faktor *Transfer Pressure* (C)



Gambar 13. Grafik 2 Level Faktor *Transfer Pressure* (C)

Tabel 6 dan Gambar 13 menunjukkan pengaruh antara 2 level faktor *transfer pressure* terhadap nilai *wire sweep*, yang diperoleh dari merata-ratakan masing-masing level transfer pressure dengan meniadakan seluruh kombinasi *level mold temperature* dan *transfer time*. Pada level min 8 MPa diperoleh rata-rata sebesar 2,96% dengan standar deviasi $\pm 0,637$, sedangkan pada level maks 11 MPa diperoleh rata-rata sebesar 2,93% dengan standar deviasi $\pm 0,580$, selisih rata-rata antar kedua level sebesar 0,03%.

Peningkatan level *mold temperature* dari 170°C ke 180°C menurunkan rata-rata *wire sweep* dari 3,47% menjadi 2,42% dengan selisih 1,05%, hal ini menunjukkan bahwa efek utama (*main effect*) faktor *mold temperature* berpengaruh dominan dalam mempengaruhi *wire sweep* dibanding faktor *transfer time* juga *transfer pressure* pada level yang diuji, dengan masing-masing selisih 0,06% dan 0,03%.

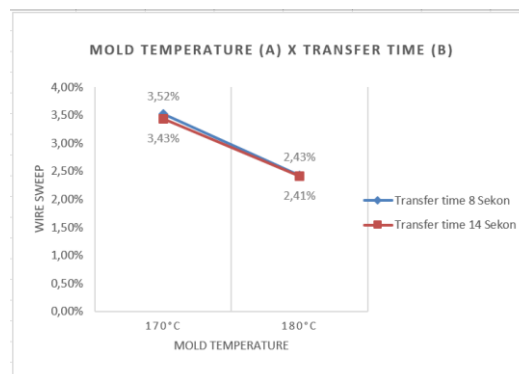
3.3 Karakterisasi Interaksi Antar Faktor

Karakterisasi interaksi antar faktor berfungsi untuk melihat apakah terdapat interaksi antar faktor, dilakukan dengan mengamati kesejajaran garis pada interaksi plot. Apabila garis pada kedua level suatu faktor sejajar walaupun level faktor pasangannya berubah, artinya kedua faktor tidak saling berinteraksi, sebaliknya jika garis pada kedua level faktor bersilangan artinya pengaruh suatu faktor berubah tergantung level faktor pasangannya, dan saling berinteraksi (Montgomery, 2017, halaman 181-182, dan 258) [10]. Ditegaskan penilaian kesejajaran dan kemiringan garis pada interaksi plot dalam penelitian bersifat deskriptif visual, oleh karena itu perlu validasi kuantitatif untuk klaim dominansi melalui uji statistik formal seperti ANOVA atau analisis persamaan regresi linear.

3.3.1 Interaksi Plot *Mold Temperature* x *Transfer Time* (AxB)

Mold Temperature	Transfer time 8 Sekon	Transfer time 14 Sekon
170°C	1 2 3,60%±3,43% ÷ 2 = 3,52%	3 4 3,41%±3,44% ÷ 2 = 3,43%
180°C	5 6 2,40%±2,47% ÷ 2 = 2,43%	7 8 2,42%±2,40% ÷ 2 = 2,41%

Tabel 7. Rata-rata Interaksi *Mold Temperature* x *Transfer Time* (AxB)



Gambar 14. Interaksi Plot *Mold Temperature* x *Transfer Time* (AxB)

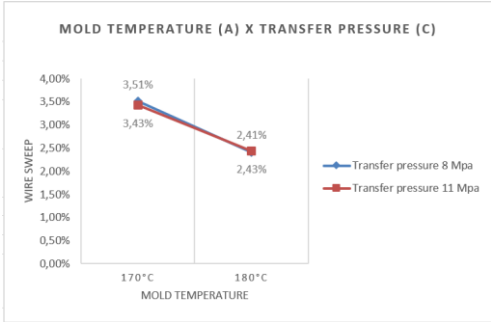
Interaksi plot Gambar 14 menunjukkan hubungan interaksi antara *mold temperature* dan *transfer time* terhadap *wire sweep*. Peningkatan level *mold temperature* dari level min 170°C ke level maks 180°C sama-

sama menurunkan nilai *wire sweep* pada kedua level transfer time 8 sekon dan 14 sekon, dengan arah dan pola tren penurunan yang sama, secara visual garis terlihat bersilangan pada level maks *mold temperature* (180°C), hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya interaksi antara *mold temperature* dan *transfer time*.

3.3.2 Interaksi Plot *Mold Temperature* x *Transfer Pressure* (AxC)

Mold Temperature	Transfer pressure 8 Mpa	Transfer Pressure 11 Mpa
170°C	1 3 3,60%+3,41% ÷ 2 = 3,51%	2 4 3,43%+3,44% ÷ 2 = 3,43%
180°C	5 7 2,40%+2,42% ÷ 2 = 2,41%	6 8 2,47%+2,40% ÷ 2 = 2,43%

Tabel 8. Rata-rata Interaksi *Mold Temperature* x *Transfer Pressure* (AxC)



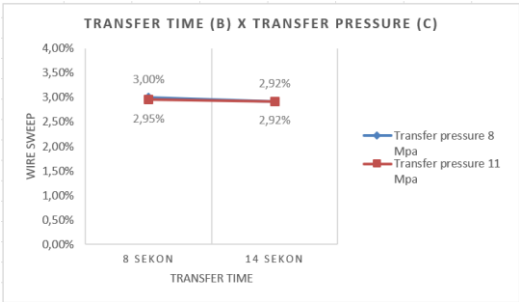
Gambar 15. Interaksi Plot *Mold Temperature* x *Transfer Pressure* (AxC)

Interaksi plot Gambar 15 menunjukkan hubungan interaksi antara *mold temperature* dan *transfer pressure* terhadap *wire sweep*. Peningkatan level *mold temperature* dari level min 170°C ke level maks 180°C sama-sama menurunkan nilai *wire sweep* pada kedua level *transfer pressure* 8 Mpa dan 11 Mpa, dengan arah dan pola tren penurunan yang sama, secara visual garis terlihat bersilangan pada level maks *mold temperature* (180°C), hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya interaksi antara *mold temperature* dan *transfer pressure*.

3.3.3 Interaksi Plot *Transfer Time* x *Transfer Pressure* (BxC)

Transfer time	Transfer pressure 8 Mpa	Transfer pressure 11 Mpa
8 Sekon	1 5 3,60%+2,40% ÷ 2 = 3,00%	2 6 3,43%+2,47% ÷ 2 = 2,95%
14 Sekon	3 7 3,41%+2,42% ÷ 2 = 2,92%	4 8 3,44%+2,40% ÷ 2 = 2,92%

Tabel 9. Rata-rata Interaksi *Transfer Time* x *Transfer Pressure* (BxC)



Gambar 16. Interaksi Plot *Transfer Time* x *Transfer Pressure* (BxC)

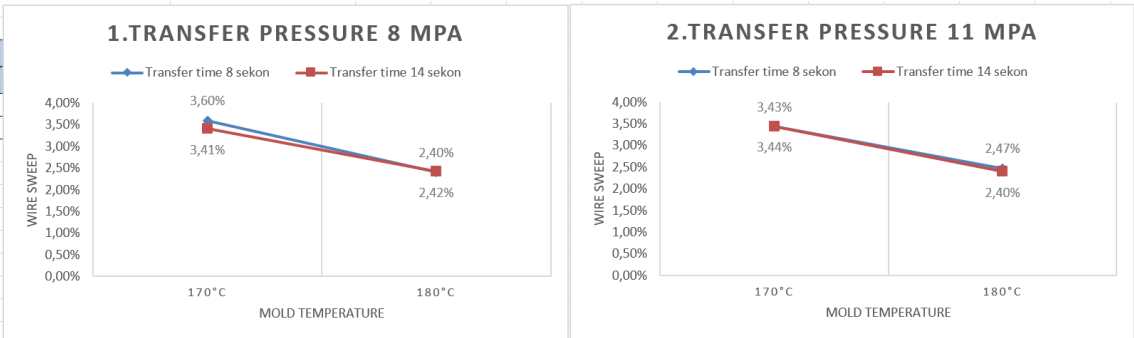
Interaksi plot Gambar 16 menunjukkan hubungan interaksi antara *transfer time* dan *transfer pressure* terhadap *wire sweep*. Peningkatan *transfer time* dari level min 8 sekon ke level maks 14 sekon, sama-sama menurunkan nilai *wire sweep* pada kedua level *transfer pressure* 8 Mpa dan 11 Mpa, dengan arah dan pola

tren penurunan yang sama, secara visual garis terlihat bersilangan pada level maks *transfer time* (14 sekon), hal ini mengindikasikan kemungkinan adanya interaksi antara *transfer time* dan *transfer pressure*.

3.3.4 Interaksi Plot *Mold Temperature* x *Transfer Time* x *Transfer Pressure* (AxBxC)

Mold Temperature	Transfer time 8 sekon	Transfer time 14 sekon
170°C	1 3,60%	3 3,41%
180°C	5 2,40%	7 2,42%
Mold Temperature	Transfer time 8 sekon	Transfer time 14 sekon
170°C	2 3,43%	4 3,44%
180°C	6 2,47%	8 2,40%

Tabel 10. Rata-rata Interaksi *Mold Temperature* x *Transfer Time* x *Transfer Pressure* (AxBxC)



Gambar 17. Interaksi Plot *Mold Temperature* x *Transfer Time* x *Transfer Pressure* (AxBxC)

Interaksi plot Gambar 17 menunjukkan interaksi 3 arah antara *mold temperature*, *transfer time*, dan *transfer pressure* terhadap *wire sweep*, yang divisualisasikan dalam dua panel berdasar level faktor C (*transfer pressure*), untuk melihat apakah interaksi faktor A (*mold temperature*) dan faktor B (*transfer time*) berubah tergantung level faktor C (*transfer pressure*). Dikedua panel *transfer pressure* 8 Mpa dan 11 MPa, peningkatan level *mold temperature* dari level min 170°C ke level maks 180°C sama-sama menurunkan nilai *wire sweep* pada kedua level *transfer time* 8 sekon dan 14 sekon, dengan arah dan pola tren penurunan yang sama, secara visual garis pada panel 1 terlihat bersilangan di level maks *mold temperature* (180°C), dan pada panel 2 garis terlihat bersilangan di level min *mold temperature* (170°C), sehingga pada kedua panel ini mengindikasikan kemungkinan adanya interaksi (AxBxC).

4 Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

1. Peningkatan level efek utama (*main effect*) *mold temperature* dari 170°C ke 180°C menurunkan rata-rata *wire sweep* dari 3,47% menjadi 2,42% dengan selisih 1,05% , hal ini menunjukkan bahwa faktor *mold temperature* berpengaruh dominan dalam mempengaruhi rata-rata *wire sweep* dibanding faktor *transfer time* (8 sekon ke 14 sekon) dan *transfer pressure* (8 Mpa ke 11 Mpa) pada level yang diuji, dengan masing-masing selisihnya 0,06% dan 0,03%.
2. Semua garis pada interaksi plot antar faktor (AxB, AxC, BxC, dan AxBxC) secara visual terlihat bersilangan, hal ini mengindikasikan kemungkinan terdapat interaksi antar ketiga faktor proses.

4.2 Saran

1. Adapun dari penelitian karakterisasi penulis dapat menentukan efek dominan dari interaksi plot antar faktor (AxB, AxC, BxC, dan AxBxC) melalui tahapan penelitian selanjutnya (Penelitian optimasi) dengan menggunakan uji statistik formal *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk memvalidasi pengaruh dominan interaksi antar faktor secara kuantitatif.

5 Daftar Pustaka

- [1] Lall, P., Deshpande, S., & Nguyen, L. (2018, October). Comparison of Reliability of Copper, Gold, Silver, and Pcc Wirebonds Under Sustained Operation at 200C. In *SMTA International* (Vol. 20, No. 1). Surface Mount Technology Association.
- [2] Pratiwi, U., & Cahyanto, W. T. (2023). The Elastic Properties of Objects by Determining Young's Modulus for the Characterization of Metal Raw Materials Using a Speed Sensor Encoder and a Load Cell Sensor. *SAGA: Journal of Technology and Information System*, 1(2), 22-30.
- [3] Othman, A. H., Aziz, M. S. A., Ishak, M. H. H., Nashrudin, M. N., & Azman, M. A. (2026). Epoxy molding compound encapsulation process in IC packaging: a review at wafer and component levels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-25.
- [4] Putri, M. K., Asshaumi, R. U., Rahmadani, N. F., Kurnia, S. I., Mayasari, S., Martatino, R., ... & Dewi, N. M. (2024). Analisis nilai kecepatan terhadap viskositas pada fluida. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 8(1), 89-96.
- [5] Ramdan, D., Umroh, B., Elapri, B. Y., & Munthe, I. S. (2022). *Optimalisasi Perancangan Paket Plastic Ball Grid Array (PBGA) Melalui Pengamatan Perilaku Fluid Structure Interaction (FSI) pada Proses Injections Molding*. Universitas Medan Area
- [6] Vogelwaid, J., Bayer, M., Walz, M., Hampel, F., Kutuzova, L., Lorenz, G., ... & Jacob, T. (2024). *Optimizing Epoxy Molding Compound Processing: A Multi-Sensor Approach to Enhance Material Characterization and Process Reliability*. *Polymers* 2024, 16, 1540.
- [7] Febriani, S. (2022). Analisis deskriptif standar deviasi. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 6(1), 910–913.
- [8] Wardhana, A. O., Mangestiyono, W., & Indartono, I. (2013). *PERANCANGAN INSTRUMENTASI UNTUK PERHITUNGAN STANDAR DEVIASI DAN STANDAR ERROR BAROMETER TABUNG BOURDON (DESIGN OF INSTRUMENTATION FOR THE CALCULATION OF STANDARD DEVIATION AND STANDARD ERROR BAROMETER BOURDON TUBE)* (Doctoral dissertation, D3 Teknik Mesin Fakultas Teknik).
- [9] Muttaqin, B. I. A. (2019). Telaah Kajian dan literature review design of experiment (DoE). *Journal of Advances in Information and Industrial Technology*, 1(1), 33-40.
- [10] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.
- [11] Pratiwi, N., Arief, D. R., Suseno, H., & Dhuha, A. D. Z. (2024). OPTIMIZATION OF CYCLE TIME AND REDUCTION OF TAILED ON TOP DEFECTS IN BOTTLE CAPS USING TAGUCHI METHOD. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, dan Produk Kulit*, 23(2), 313-323.