

**DESAIN EKSPERIMEN *FULL FACTORIAL* GUNA MENGURANGI
PENYUSUTAN PADA KAWAT PEGAS BONNELL DI
PT PANCA GRAHA PRATAMA**

TUGAS AKHIR



CENDANA ANGGUN SASMITHA

NIM : 412110002

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNOLOGI DAN DESAIN
UNIVERSITAS MA CHUNG
MALANG
2025**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**DESAIN EKSPERIMEN *FULL FACTORIAL DESIGN* UNTUK
MENGURANGI PENYUSUTAN PADA KAWAT PEGAS BONNELL
DI PT PANCA GRAHA PRATAMA**

Oleh:
CENDANA ANGGUN SASMITHA
NIM. 412110002

dari
**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNOLOGI DAN DESAIN
UNIVERSITAS MA CHUNG**

Telah dinyatakan lulus dalam melaksanakan Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan
dan berhak mendapatkan gelar Sarjana Teknik

Dosen Pembimbing 1,

Dosen Pembimbing 2,



Dr. Yurida Ekawati, S.T., M.Com.
NIP. 20080017



Novenda Kartika Putrianto, S.T., M.Sc.
NIP. 20190011

Dekan Fakultas Teknologi dan Desain,



Prof. Dr. Eng. Romy Budhi Widodo
NIP. 20070035

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Skripsi saya dengan “Desain Eksperimen Full Factorial Guna Mengurangi Penyusutan pada Kawat Pegas Bonnell di PT Panca Graha Pratama” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 30 Juli 2025



Cendana Anggun Sasmitha
NIM. 412110013

UNIVERSITAS
MA CHUNG

**DESAIN EKSPERIMEN *FULL FACTORIAL* GUNA MENGURANGI
PENYUSUTAN PADA KAWAT PEGAS BONNELL DI
PT PANCA GRAHA PRATAMA**

**Cendana Anggun Sasmitha, Yurida Ekawati, Novenda Kartika Putrianto
Universitas Ma Chung**

ABSTRAK

PT Panca Graha Pratama mengalami permasalahan pada kualitas kawat pegas Bonnell yang ditandai dengan tingkat penyusutan melebihi standar perusahaan, yaitu lebih dari 1 cm. Rata-rata penyusutan mencapai 1,26 cm dengan persentase cacat sebesar 38,14%. Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi penyusutan tersebut melalui pendekatan desain eksperimen menggunakan metode *Full Factorial*. Empat faktor diuji dalam penelitian ini, yaitu suhu pemanas, kandungan karbon pada kawat baja, proses pendinginan, dan jumlah lilitan pegas, masing-masing pada tiga level berbeda. Analisis dilakukan menggunakan ANOVA dan uji lanjut LSD serta HSD untuk mengidentifikasi pengaruh signifikan dari faktor-faktor tersebut terhadap nilai penyusutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi suhu pemanas sebesar 280°C, kandungan karbon 0,73% C, pendinginan alami selama 5 menit, dan jumlah lilitan 6 menghasilkan nilai penyusutan paling rendah dan memenuhi standar perusahaan. Temuan ini memberikan dasar pengambilan keputusan bagi perusahaan dalam menetapkan parameter produksi yang optimal untuk meningkatkan kualitas pegas Bonnell dan efisiensi proses manufaktur.

Kata Kunci : Desain Eksperimen, *Full Factorial*, Penyusutan Pegas, Kandungan Karbon, Suhu Pemanas

**FULL FACTORIAL DESIGN OF EXPERIMENTS TO REDUCE
SHRINKAGE OF BONNELL SPRING WIRE
AT PT PANCA GRAHA PRATAMA**

**Cendana Anggun Sasmitha, Yurida Ekawati, Novenda Kartika Putrianto
Universitas Ma Chung**

ABSTRAK

PT Panca Graha Pratama is experiencing problems with the quality of Bonnell spring wire which is characterized by a shrinkage rate exceeding the company standard, which is more than 1 cm. The average shrinkage reached 1.26 cm with a defect percentage of 38.14%. This study aims to reduce the shrinkage through an experimental design approach using the Full Factorial method. Four factors were tested in this study, namely heating temperature, carbon content of the steel wire, cooling process, and number of spring turns, each at three different levels. Analysis was conducted using ANOVA and LSD and HSD tests to identify the significant effects of these factors on shrinkage values. The results showed that the combination of heating temperature of 280°C, carbon content of 0.73% C, natural cooling for 5 minutes, and number of turns of 6 produced the lowest shrinkage value and met the company's standard. The findings provide a decision-making basis for the company in setting optimal production parameters to improve the quality of Bonnell springs and the efficiency of the manufacturing process.

Keywords: Design of Experiment, Full Factorial, Spring Shrinkage, Carbon Content, Heating Temperature

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas penyertaan dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul: “Desain Eksperimen *Full Factorial* Guna Mengurangi Penyusutan pada Kawat Pegas Bonnell di PT Panca Graha Pratama” dengan baik. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Program Studi Teknik Industri di Fakultas Teknologi dan Desain Universitas Ma Chung. Penulis pun menyadari bahwa laporan ini disusun dengan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis hendak menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan sebagai berikut:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah menyertai dan membimbing penulis selama menyelesaikan penelitian Tugas Akhir.
2. Bapak Yanto Djutawan, selaku pembimbing lapangan yang telah memberikan arahan dan bantuan dalam membimbing di lapangan.
3. Bapak Muiswan, selaku pembimbing lapangan yang telah memberikan arahan dan bantuan dalam membimbing penulis di lapangan.
4. Ibu Dr. Yurida Ekawati, S.T., M.Com., selaku dosen pembimbing 1 yang telah memberikan arahan serta kritik dan saran selama penelitian Tugas Akhir berlangsung.
5. Ibu Novenda Kartika Putrianto, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing 2 yang telah memberikan arahan selama penelitian Tugas Akhir berlangsung.
6. Bapak Yuswono Hadi, S.T., M.T., selaku dosen penguji sidang Tugas Akhir.
7. Seluruh karyawan Departemen Kawat yang membantu dalam memberikan informasi, proses pengambilan data, dan implementasi.
8. Keluarga dan teman-teman yang memberikan dukungan dan motivasi untuk menyelesaikan penelitian Tugas Akhir ini.
9. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknik Industri angkatan 2021 seperjuangan atas dukungan dan motivasi yang diberikan selama proses pembuatan Tugas Akhir berlangsung.

10. Pihak-pihak lain yang mendukung dan membantu dalam pengerjaan laporan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna sehingga diharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dalam penyempurnaan laporan ini. Penulis mengucapkan mohon maaf apabila terdapat kesalahan penyampaian kata dan penulisan dalam hasil Tugas Akhir ini. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan ilmu pengetahuan Teknik Industri dan bermanfaat bagi pembaca.



Malang, 27 Juli 2025



Penulis

UNIVERSITAS
MA CHUNG

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
Bab I.....	1
Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Perumusan Masalah	5
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian	6
1.7 Sistematika Penulisan	6
Bab II.....	8
Tinjauan Pustaka	8
2.1 <i>Spring Bed</i>	8
2.2 Pegas Bonnell (<i>Bonnell Spring</i>)	9
2.3 Suhu	9
2.4 Kandungan Karbon pada Kawat	10
2.5 Penyusutan Kawat Pegas.....	12
2.6 Desain Eksperimen.....	12
2.7 Rancangan Acak Lengkap (RAL)	13
2.8 <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA)	14
2.9 <i>Full Factorial</i>	16
2.10 Uji Lanjutan (<i>Post-Hoc Test</i>)	17
2.10.1 Uji LSD (<i>Least Significant Difference</i>).....	18
2.10.2 Uji HSD (<i>Honestly Significant Difference</i>).....	19
2.11 Penelitian Terdahulu.....	19

Bab III	21
Metode Penelitian.....	21
3.1 Diagram Alur Penelitian.....	21
3.2 Studi Lapangan.....	21
3.3 Identifikasi dan Perumusan Masalah	22
3.4 Penentuan Tujuan Penelitian	22
3.5 Studi Literatur	22
3.6 Teknik Pengumpulan Data	22
3.7 Perencanaan Eksperimen	23
3.7.1 Penentuan Faktor Eksperimen.....	23
3.7.2 Penentuan Level Faktor Eksperimen	24
3.7.3 Penentuan Waktu Eksperimen.....	24
3.8 Pelaksanaan Eksperimen.....	24
3.9 Teknik Pengolahan Data Hasil Eksperimen	24
3.10 Analisis Hasil Eksperimen	25
3.11 Kesimpulan dan Saran.....	25
Bab IV	26
Pengolahan Data dan Analisis Hasil	26
4.1 Proses Produksi <i>Springbed</i>	26
4.2 Uji Penyusutan	27
4.3 Perencanaan Eksperimen	27
4.4 Penentuan Faktor Eksperimen.....	28
4.4.1 Faktor Suhu	28
4.4.2 Faktor Kandungan Karbon.....	29
4.4.3 Faktor Proses Pendinginan.....	29
4.4.4 Faktor Jumlah Lilitan Pegas.....	30
4.5 Penentuan Level Faktor Eksperimen	31
4.5.1 Level dari Faktor Suhu.....	31
4.5.2 Level dari Faktor Kandungan Karbon.....	31
4.6 Penentuan Waktu Eksperimen.....	32
4.7 Pelaksanaan Eksperimen	32
4.8 Data Hasil Eksperimen.....	33

4.9	Pengolahan Data Hasil Eksperimen	36
4.9.1	Hipotesis Penelitian.....	36
4.9.2	Perhitungan ANOVA.....	37
4.9.3	Analisis Uji Lanjutan LSD dan HSD	40
4.10	Analisis Hasil Eksperimen	45
4.11	Analisis Material Baja Karbon.....	46
4.12	Pemilihan Kombinasi Optimal Oleh Perusahaan	52
Bab V		55
	Kesimpulan dan Saran.....	55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran.....	56
	Daftar Pustaka	57
	Lampiran A.....	60
	Lampiran B.....	61
	Lampiran C.....	62

UNIVERSITAS
MA CHUNG

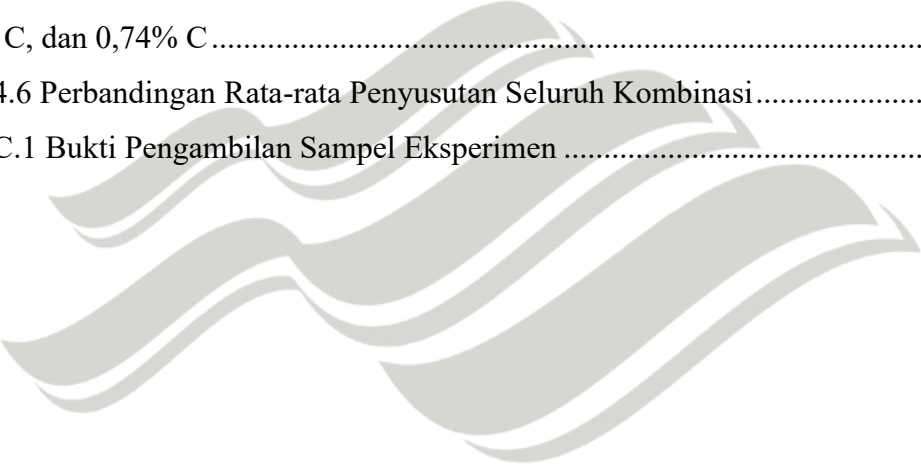
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bentuk Pegas Bonnell	9
Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian.....	21
Gambar 4.1 Main Effect Plot dari Respon Selisih Penyusutan.....	39
Gambar 4.2 Interaction Plot dari Faktor Suhu dan Kandungan Karbon	39
Gambar 4.3 Uji HSD pada Faktor Kandungan Karbon	42
Gambar 4.4 Uji LSD pada Faktor Kandungan Karbon.....	42
Gambar 4.5 Uji HSD pada Faktor Suhu.....	44
Gambar 4.6 Uji LSD pada Faktor Suhu	44
Gambar 4.7 Hasil Kombinasi Level Faktor Optimal	Error! Bookmark not defined.
Gambar A.1 Hasil Perhitungan ANOVA Menggunakan Minitab 21	60
Gambar B.1 Hasil Uji XRF Kandungan Karbon 0,72% C	61
Gambar B.2 Hasil Uji XRF Kandungan Karbon 0,73% C	61
Gambar B.3 Hasil Uji XRF Kandungan Karbon 0,74% C	61

UNIVERSITAS
MA CHUNG

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data QC Pengecekan Penyusutan Kawat Pegas Bonnell.....	2
Tabel 1.2 Data Rata-rata Penyusutan Kawat Pegas Bonnell.....	2
Tabel 4.1 Kombinasi Eksperimen Penyusutan Pegas Bonnell.....	32
Tabel 4.2 Data Hasil Ekperimen	34
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan ANOVA	37
Tabel 4.4 Hasil Kombinasi Level Faktor Optimal	45
Tabel 4.5 Perbandingan Kandungan Unsur pada Kawat Baja Karbon 0,72% C, 0,73% C, dan 0,74% C	50
Tabel 4.6 Perbandingan Rata-rata Penyusutan Seluruh Kombinasi.....	53
Tabel C.1 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen	62



UNIVERSITAS
MA CHUNG

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Persaingan dalam dunia industri mendorong setiap perusahaan untuk terus meningkatkan kualitas produk demi memperoleh keuntungan maksimal. Kualitas produk yang baik akan meningkatkan kepuasan dan kepercayaan pelanggan, yang pada akhirnya berkontribusi pada keberlangsungan bisnis. Kualitas produk merupakan bagian yang krusial dalam menentukan minat pelanggan terhadap produk yang dibeli. Produk yang diakui memiliki kualitas baik apabila dapat memenuhi kebutuhan pelanggan (Aresta, 2010). Kebutuhan pelanggan yang telah terpenuhi dapat memuaskan pelanggan terhadap produk yang digunakan sehingga meningkatkan kepercayaan pelanggan terhadap penggunaan produk untuk terus-menerus. Dengan ini, perusahaan harus memproduksi produk yang dapat memenuhi karakteristik kualitas yang dibutuhkan pelanggan (Suryaningsih, 2010). Oleh karena itu, semua perusahaan akan bersaing demi memproduksi produk yang berkualitas untuk pelanggan.

PT Panca Graha Pratama adalah perusahaan manufaktur multinasional dari Olympic Grup yang bergerak di bidang industri *furniture* sejak tahun 2002. PT Panca Graha Pratama memproduksi dua jenis produk berdasarkan tingkatan kalangan masyarakat, yaitu Olympic Springbed untuk kalangan menengah ke bawah dan Procela untuk kalangan menengah ke atas. *Springbed* yang diproduksi memiliki berbagai macam lapisan yang terdiri dari kawat pegas (*coil*), busa (*foam*), dan kain (*quilting*). Dengan adanya susunan lapisan tersebut, kasur *springbed* dapat bertahan dalam jangka waktu lama, karena tinggi kasurnya cenderung tidak menyusut atau turun lebih besar. Salah satu dari penentu penyusutan *springbed* adalah pada bagian kawat pegas. Tentunya, tidak semua kawat pegas bonnell yang diproduksi memiliki hasil yang tidak sesuai standar perusahaan. Perusahaan menetapkan standar maksimal penyusutan kawat pegas bonnell sebesar $\leq 1\text{cm}$. Namun, perusahaan menemukan masih adanya penyusutan pada pegas bonnell yang melebihi standar kualitas perusahaan.

Uji penyusutan kawat pegas bonnell dilakukan sebanyak tiga kali di waktu yang berbeda oleh *Quality Control* (QC). Pengecekan tersebut dilakukan pada pukul 08.30 WIB, 10.00 WIB, dan 14.00 WIB. QC melakukan pengecekan penyusutan kawat pegas bonnell menggunakan mesin uji penyusutan. Cara kerja dari mesin tersebut adalah dengan menekan kawat pegas bonnell sebanyak 100 kali untuk menentukan selisih panjang kawat pegas antara sebelum dan sesudah kawat pegas ditekan oleh mesin. Pertama, QC akan mengukur panjang kawat pegas bonnell sebelum dimasukkan ke dalam mesin uji penyusutan dari setiap mesin. Kemudian, kawat pegas bonnell dimasukkan ke dalam mesin tersebut untuk ditekan sebanyak 100 kali. Setelah itu, kawat pegas dikeluarkan dari mesin dan dihitung jumlah panjangnya sesudah ditekan 100 kali. Namun, mesin ini hanya dapat digunakan untuk satu kawat pegas saja dalam satu waktu sehingga membutuhkan waktu yang lama bila dilakukan pengecekan penyusutan pada semua kawat pegas bonnell yang diproduksi. Untuk itu, dilakukan pengambilan sampel sebanyak 5 buah kawat pegas bonnell untuk setiap mesinnya dalam satu kali pengecekan. Data pengecekan QC dan rata-rata penyusutan kawat pegas bonnell pada Agustus 2024 sampai Februari 2025 dapat dilihat pada Tabel 1.1 dan Tabel 1.2.

Tabel 1.1 Data QC Pengecekan Penyusutan Kawat Pegas Bonnell

Bulan	Jumlah Cacat (Pegas)	Jumlah Sampel (Pegas)	Persentase Cacat (%)
Agustus'24	196	520	37,69%
September'24	198	520	38,08%
Oktober'24	197	515	38,25%
November'24	206	530	38,87%
Desember'24	202	525	38,48%
Januari'25	196	525	37,33%
Februari'25	199	520	38,27%
Rata-rata	1394	3655	38,14%

Tabel 1.2 Data Rata-rata Penyusutan Kawat Pegas Bonnell

Bulan	Jumlah Cacat (Pegas)	Jumlah Sampel (Pegas)	Rata-rata Penyusutan (cm)
Agustus'24	196	520	1,23
September'24	198	520	1,30
Oktober'24	197	515	1,08
November'24	206	530	1,14
Desember'24	202	525	1,22
Januari'25	196	525	1,17
Februari'25	199	520	1,05
Rata-rata	1394	3655	1,26

Berdasarkan data hasil pengecekan penyusutan pada pegas bonnell ditemukan terdapat cacat pegas bonnell sebesar 38,14% yang menyusut atau turun lebih dari 1cm dengan rata-rata penyusutan sebesar 1,26 cm pada Agustus 2024 hingga Februari 2025. Hal ini menyebabkan kawat pegas tersebut yang dinyatakan cacat sehingga dipisahkan dan tidak disusun dalam kerangka *springbed*. Untuk mengurangi jumlah kawat pegas cacat yang dibuang, perusahaan menggunakan ulang kawat pegas tersebut untuk memperbaiki bentuk kerangka *springbed* yang miring di proses ramper/perakitan. Langkah selanjutnya, pihak produksi akan mematikan sementara mesin yang memproduksi kawat pegas yang cacat untuk diperbaiki. Hal ini menyebabkan jumlah produksi kawat pegas berkurang dan mengganggu jalannya produksi akibat jumlah mesin yang memproduksi kawat pegas berkurang. Masalah utama dari hasil penyusutan pada kawat pegas bonnell mengakibatkan kualitas produk *springbed* dari PT Panca Graha Pratama menurun. Dengan adanya penyusutan pegas ini dapat menyebabkan variasi pada rakitan *springbed* sehingga permukaan tidak merata saat digunakan. Dengan ini, perusahaan menginginkan hasil penyusutan dari kawat pegas yang diproduksi berkurang.

Terdapat berbagai faktor yang dapat memengaruhi hasil penyusutan pada kawat pegas bonnell, khususnya pada material baja karbon. Faktor-faktor tersebut adalah suhu pemanas (Callister & Rethwisch, 2018), kandungan karbon dalam baja (Howes & Totten, 2007), jumlah lilitan pada pegas (Suresh, 1998), dan pendinginan (Totten, 1996). Oleh karena itu, untuk mengurangi penyusutan kawat pegas dan meningkatkan kualitas produk *springbed*, penelitian ini mempertimbangkan faktor-faktor tersebut menggunakan desain eksperimen. Dengan menganalisis pengaruh faktor tersebut, diharapkan diperoleh kombinasi optimum yang menghasilkan tingkat penyusutan paling minimal.

Desain eksperimen merupakan metode percobaan yang digunakan untuk menganalisis pengaruh kombinasi dari suatu faktor terhadap objek yang diteliti dan mengamati respon dari perlakuan percobaan tersebut. Menurut Montgomery (2017), desain eksperimen adalah pendekatan disiplin untuk pemecahan masalah dan peningkatan produk/proses dengan melibatkan perencanaan, pelaksanaan, analisis, dan interpretasi tes terkontrol untuk mengevaluasi faktor-faktor yang dapat

memengaruhi variabel respons. Untuk memecahkan permasalahan ini, metode desain eksperimen yang akan digunakan adalah metode *full factorial design*. *Full Factorial Design* merupakan metode percobaan yang menguji semua kemungkinan kombinasi level dari dua atau lebih faktor independen diuji secara bersamaan yang mana setiap level dari satu faktor dipadukan dengan semua level dari faktor lainnya (Sudjana sebagaimana dikutip dalam Wahyudi, 2008). Metode *Full Factorial* menganalisa tidak hanya efek utama dari masing-masing faktor, tetapi dari efek interaksi antar faktor. Dengan menguji semua kombinasi, gambaran respon yang diperoleh lebih lengkap dan lebih akurat. Oleh karena itu, diharapkan metode *full factorial design* dapat mengurangi cacat penyusutan pada pegas bonnell di PT Panca Graha Pratama.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan hasil pengecekan penyusutan kawat pegas bonnell ditemukan terdapat 38,14% yang menyusut atau turun lebih dari 1 cm. Masalah ini menyebabkan kawat pegas yang tidak sesuai standar tidak dilanjutkan ke dalam proses perakitan pegas. Jika jumlah produksi kawat pegas berkurang, pihak produksi terpaksa memasukkan kawat pegas yang cacat tersebut ke dalam kerangka pegas. Hal ini mengakibatkan kualitas dari *springbed* yang diproduksi menurun, karena tidak sesuai standar kualitas produk dari perusahaan. Untuk mengatasi hal ini, mesin yang memproduksi kawat pegas yang cacat akan dimatikan dan memengaruhi jumlah pegas yang harus diproduksi setiap harinya sehingga mengganggu proses produksi *springbed*. Kawat pegas yang dinyatakan cacat tidak dapat dilanjutkan untuk disusun dalam *springbed* sehingga memperbesar kerugian biaya produksi dan tenaga kerja.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Laporan ini hanya berfokus pada penyusutan pada Pegas Bonnell dengan diameter kawat 2,4 mm. Pemilihan diameter ini didasarkan pada pertimbangan bahwa pegas Bonnell diameter 2,4 mm merupakan jenis yang paling sering diproduksi setiap hari di PT Panca Graha Pratama

sehingga data produksi dan penyusutannya tersedia secara konsisten. Sementara itu, kawat pegas bonnell dengan diameter 2.24 mm, 2,2 mm dan 2,0 mm tidak diproduksi secara rutin setiap hari sehingga tidak menjadi fokus dalam penelitian ini.

2. Waktu penelitian dimulai dari bulan Agustus 2024 sampai dengan Juni 2025.
3. Tidak menghitung biaya implementasi perbaikan.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang ada, berikut merupakan perumusan masalah dari penelitian ini:

1. Apa saja faktor dan level yang memengaruhi penyusutan pada kawat pegas bonnell?
2. Apakah terdapat pengaruh dari faktor dan level yang ditentukan terhadap penyusutan pada pegas bonnell?
3. Bagaimana hasil optimasi kombinasi level optimal dari faktor yang telah dianalisis dalam mengurangi penyusutan pada kawat pegas bonnell?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah, berikut merupakan tujuan penelitian yang akan dicapai dari penelitian ini:

1. Menentukan faktor dan level yang memengaruhi penyusutan pada kawat pegas bonnell.
2. Menganalisis pengaruh dari faktor yang ditentukan dalam mengurangi penyusutan pada kawat pegas bonnell.
3. Optimasi hasil kombinasi level optimal dari faktor yang telah dianalisis dalam mengurangi penyusutan pada kawat pegas bonnell.

1.6 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mengurangi cacat penyusutan pegas bonnell lebih dari 1 cm.
2. Mengurangi kerugian dari terbuangnya produk pegas bonnell yang dinyatakan cacat.
3. Meningkatkan kualitas produk *springbed* di PT Panca Graha Pratama.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun penyusunan laporan tugas akhir ini menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab I: Pendahuluan

Bab I berisi tentang penjelasan latar belakang permasalahan yang terjadi di PT Panca Graha Pratama yang berhubungan dengan Pengendalian Kualitas Produksi. Penjelasan tersebut dijabarkan dalam latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

Bab II: Tinjauan Pustaka

Bab II berisi tentang tinjauan pustaka dari penelitian terdahulu dan semua teori yang mendukung dalam penelitian yang dilakukan. Teori dalam penelitian ini berisi tentang kualitas produksi, pegas/coil, desain ekpegasiman, dan penelitian terdahulu.

Bab III: Metode Penelitian

Bab III berisi mengenai langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan penelitian secara sistematis untuk memecahkan masalah dalam penelitian. Pada bab ini disajikan *flowchart* sebagai panduan dalam memahami alur penelitian.

Bab IV: Pengolahan Data dan Analisis Hasil

Bab IV berisi tentang pengolahan data dan analisis hasil penelitian. Pengolahan data diperoleh dari data primer dan data sekunder yang diolah dengan metode *full factorial design*. Kemudian, hasil analisa

tersebut akan dirancang implementasi solusi perbaikannya serta akan dibandingkan sebelum dan sesudah implementasi.

Bab V: Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan, dan memberikan rekomendasi berupa saran dan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.



UNIVERSITAS
MA CHUNG

Bab II

Tinjauan Pustaka

2.1 *Spring Bed*

Spring bed adalah kasur dengan susunan yang terdiri dari pegas atau *spring*, *foam* (busa), dan *quilting* (kain) di dalam kerangkanya untuk menopang tubuh manusia. *Spring bed* dirancang untuk menopang tubuh secara merata, menjaga tulang belakang tetap sejajar, dan menghindari ketidaknyamanan saat bangun tidur (Weenas, 2013). Menurut Primus (2022), *spring bed* ditemukan oleh Heinrich Westphal pada tahun 1871 dengan sebutan "*inner spring mattress*". Meskipun sudah lama telah ditemukan, *spring bed* tidak langsung populer dan membutuhkan waktu yang lama untuk diterima masyarakat. Seiring bertambahnya zaman, teknologi pembuatan springbed terus berkembang dan inovasi pada busa dan sistem pegas untuk meningkatkan kenyamanan tidur. *Spring bed* saat ini dilengkapi dengan berbagai jenis pegas, bahan pelapis, dan fitur tambahan sehingga semakin nyaman digunakan sesuai dengan kebutuhan pelanggan. Menurut (Ardani dkk., 2014), bentuk *spring* atau pegas dari *spring bed* dibedakan menjadi 5 jenis, yaitu:

1. *Bonnell Spring*

Bonnell spring merupakan jenis pegas tradisional yang sering dipakai dalam pembuatan *spring bed*. Jenis pegas ini berbentuk jam pasir ini saling terhubung dengan kawat spiral.

2. *Pocket Spring*

Pocket spring adalah jenis pegas yang dibungkus secara individual dalam kantong kain, memungkinkan pegas bergerak secara independen.

3. *Continuous Coil*

Continuous Coil ialah jenis pegas yang terbuat dari satu kawat panjang yang dibentuk menjadi serangkaian pegas yang saling terhubung.

4. *Offset Coil*

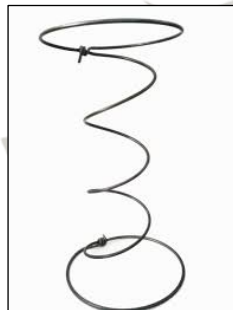
Offset coil adalah jenis pegas berbentuk *S* yang lebih efektif menyesuaikan dengan lekuk tubuh dan mengurangi adanya beberapa tekanan.

5. *Hybrid Spring Bed*

Hybrid springbed merupakan susunan pegas gabungan pegas dengan material lain seperti busa atau lateks.

2.2 Pegas Bonnell (*Bonnell Spring*)

Kawat pegas atau *spring* merupakan komponen utama pada *springbed* yang saling terhubung dan membentuk suatu sistem pegas yang fleksibel (Oktavianus & Megawati, 2022). Kawat pegas memiliki berbagai jenis bentuk yang digunakan pada susunan *spring bed*, salah satunya adalah pegas bonnell. Pegas bonnell atau *Bonnell Spring* adalah salah satu jenis pegas atau *coil* tradisional yang paling umum digunakan dalam susunan *springbed*. Jenis pegas ini berbentuk seperti jam pasir spiral dengan bagian pinggul atau badan tengah yang mengecil. Pegas bonnell sangat sering ditemukan dalam setiap jenis *springbed* karena tahan lama dan kokoh. Jenis pegas ini dapat memberikan tekanan yang merata untuk seluruh tubuh saat tidur. Selain itu, pegas bonnell memiliki harga yang terjangkau sehingga sering digunakan oleh setiap kalangan masyarakat.



Gambar 2.1 Bentuk Pegas Bonnell

2.3 Suhu

Suhu atau temperatur adalah salah parameter yang paling banyak dijumpai dalam ilmu fisika, kimia, teknik, dan sebagainya. Umumnya, konsep suhu berkaitan pada ukuran panas atau dingin yang dihasilkan suatu benda (Saoqibillah & Malik, 2024). Perubahan suhu dapat menyebabkan perubahan dimensi, sifat mekanik, dan sifat fisik lainnya dari suatu material. Kenaikan suhu umumnya menyebabkan pemuaian pada material, termasuk pegas. Pemuaian ini akan mengurangi gaya yang

diperlukan untuk meregangkan pegas sehingga konstanta pegas akan berkurang. Fenomena ini disebut sebagai penyusutan termal.

Penyusutan termal pada pegas memiliki implikasi yang signifikan terhadap kinerja komponen yang menggunakan pegas (Sumadi & Sutisna, 2019). Menurut Hasibuan (2024) menunjukkan bahwa tingkat penyusutan termal pada pegas dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis material pegas, geometri pegas (diameter kawat, jumlah lilitan), dan laju perubahan suhu. Baja karbon, yang merupakan material yang umum digunakan untuk membuat pegas, cenderung mengalami pemuaian termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa jenis baja paduan. Selain itu, pegas dengan diameter kawat yang lebih kecil dan jumlah lilitan yang lebih banyak umumnya akan mengalami penyusutan termal yang lebih besar.

2.4 Kandungan Karbon pada Kawat

Kandungan karbon merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi sifat mekanik kawat, seperti kekuatan tarik, elastisitas, dan keuletan. Dalam proses produksi kawat, kadar karbon yang terkandung dalam material kawat sangat menentukan kualitas akhir produk. Kawat dengan kadar karbon yang rendah cenderung memiliki sifat yang lebih lunak dan mudah dibentuk, tetapi daya tahan terhadap beban menjadi lebih rendah (Purbonugroho dkk., 2023). Sebaliknya, kawat dengan kadar karbon tinggi akan memiliki kekuatan tarik yang lebih besar, tetapi sifatnya menjadi lebih rapuh dan kurang fleksibel. Oleh karena itu, pengendalian kandungan karbon pada kawat perlu dilakukan secara presisi untuk memenuhi spesifikasi produk yang diinginkan.

Hubungan antara kandungan karbon dan penyusutan kawat menjadi faktor penting dalam penentuan kualitas produksi. Kandungan karbon yang tidak sesuai dapat menyebabkan deformasi atau penyusutan yang signifikan selama proses perlakuan panas dan pendinginan (Hartawan, 2018). Hal ini disebabkan oleh perubahan struktur mikro pada kawat, seperti transformasi fasa dari austenit menjadi martensit atau perlit, yang sangat dipengaruhi oleh kadar karbon. Kawat dengan kandungan karbon optimal dapat meminimalkan penyusutan sekaligus meningkatkan efisiensi produksi (Tarigan & Sentana, 2012). Oleh karena itu,

pemilihan bahan baku dengan kandungan karbon yang sesuai menjadi langkah awal yang krusial dalam pengendalian kualitas.

Baja karbon adalah jenis baja yang kandungan utamanya terdiri dari unsur besi (Fe) dan karbon (C), dengan kadar karbon antara 0,02% hingga 2,11%. Baja karbon banyak digunakan dalam industri manufaktur karena memiliki sifat mekanik yang dapat disesuaikan berdasarkan kandungan karbon dan perlakuan panas yang diterapkan (Callister & Rethwisch, 2018). Baja karbon diklasifikasikan menjadi tiga jenis berdasarkan kadar karbonnya (Totten, 1996):

a. Baja karbon rendah (*Low carbon steel*)

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0,3% C. Baja karbon ini bersifat lunak, mudah dibentuk, dan ulet, tetapi kekuatannya rendah.

b. Baja karbon sedang (*Medium carbon steel*)

Baja karbon sedang memiliki kandungan karbon diantara 0,3% hingga 0,6 % C. Baja karbon ini memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang baik, cocok untuk komponen struktural dan kawat pegas.

c. Baja karbon tinggi (*High carbon steel*)

Baja karbon tinggi memiliki kandungan karbon diantara 0,6 % hingga 1,0% C. Baja karbon ini bersifat sangat keras dan kuat, tetapi getas. Jenis kandungan baja ini digunakan untuk pegas, pisau, dan alat pemotong.

Penggunaan baja karbon dalam kawat pegas bonnell umumnya berada pada kategori karbon sedang hingga tinggi karena membutuhkan kekuatan tarik dan daya lentur yang baik. Jika kandungan karbon terlalu rendah, pegas menjadi lunak dan cenderung menyusut saat ditekan berulang. Sebaliknya, kandungan karbon yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pegas menjadi getas dan mudah patah (Howes & Totten, 2007). Selain kandungan karbon, sifat mekanik baja karbon juga dipengaruhi oleh perlakuan panas seperti annealing, quenching, dan tempering. Proses ini mengubah struktur mikro baja (misalnya menjadi martensit, ferrit, atau pearlit), yang kemudian menentukan ketahanan pegas terhadap deformasi permanen. Oleh karena itu, pengendalian kadar karbon dan proses perlakuan panas yang tepat sangat penting untuk menghasilkan kawat pegas yang memenuhi standar penyusutan. Dalam standar industri, kawat baja karbon untuk pegas biasanya

mengikuti spesifikasi, seperti ASTM A229 untuk kawat baja karbon berkekuatan tinggi yang digunakan pada aplikasi pegas keras dan tahan lama (ASTM, 2021).

2.5 Penyusutan Kawat Pegas

Dalam bidang sains, penyusutan ialah fenomena atau kejadian yang menyebabkan suatu objek mengalami pengurangan ukuran atau volume. Menurut (Gui dkk., 2022), penyusutan adalah perubahan dimensi atau ukuran suatu material seiring waktu akibat pengaruh faktor-faktor eksternal tertentu. Umumnya, penyusutan dapat terjadi di berbagai benda mekanik dengan berbahan besi, salah satunya adalah kawat pegas atau pegas. Penyusutan pada kawat terjadi akibat adanya perubahan kondisi eksternal yang mana disebut sebagai kondisi termal (Lupita, 2018).

Penyusutan pada kawat pegas ditandai dengan berkurangnya panjang kawat keseluruhan dan tinggi pegas. Hal ini terjadi akibat adanya tekanan yang diberikan pada pegas tersebut selama berkala. Proses pembuatan kawat pegas dapat memengaruhi penyusutan pada pegas apabila diberikan tekanan. Kualitas dari pegas ditentukan dari bahan baku kawat dan temperatur/suhu pemanas pembuatannya. Temperatur pemanas yang digunakan saat proses produksi perlu disesuaikan dengan jenis kawatnya sehingga dapat menghasilkan kawat pegas yang berkualitas.

2.6 Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan suatu metode yang mengorganisasi dan merencanakan percobaan secara terstruktur sehingga memungkinkan peneliti memperoleh data yang valid dan dapat dipercaya. Secara umum, desain eksperimen melibatkan pengendalian variabel, pengacakan (randomisasi), serta pengulangan untuk mengurangi bias dan variabilitas yang tidak diinginkan selama proses pengumpulan data (Dantes, 2017). Montgomery (2017) menyatakan bahwa desain eksperimen memiliki peranan penting dalam mengetahui hubungan sebab-akibat antar variabel independen dan dependen. Metode ini sering digunakan dalam berbagai bidang ilmu, seperti teknik, sains, psikologi, dan ekonomi untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif dan efisien.

Desain eksperimen mencakup beberapa elemen penting, yaitu pemilihan faktor, tingkat (*level*), dan respons yang akan diamati. Menurut Malau (2023), terdapat berbagai jenis desain eksperimen yang digunakan, yaitu *full factorial*, rancangan acak lengkap, rancangan acak kelompok, desain *split-plot*, dan lain-lain. Pada *full factorial* biasanya digunakan eksplorasi pengaruh interaksi antar faktor. Sementara itu, rancangan acak lengkap digunakan untuk mengontrol variabilitas yang berasal dari faktor-faktor tertentu yang sulit dikendalikan. Pemilihan desain yang tepat harus disesuaikan dengan tujuan penelitian serta sumber daya yang tersedia. Misalnya, desain eksperimen diaplikasikan untuk mengoptimalkan proses produksi, seperti menentukan parameter *level* yang ideal untuk meningkatkan kualitas hasil produksi.

Salah satu kelebihan utama desain eksperimen adalah informasi yang didapatkan lebih akurat dengan jumlah percobaan yang relatif sedikit sehingga dapat menghemat waktu dan biaya. Namun, penerapan desain eksperimen membutuhkan pemahaman mendalam terkait ilmu statistik. Kesalahan dalam merancang atau menganalisis eksperimen dapat menyebabkan kesimpulan yang keliru. Oleh karena itu, diperlukan validasi yang cermat serta pemilihan alat analisis yang sesuai, seperti ANOVA (*Analysis of Variance*) atau analisis regresi. Penelitian yang menggunakan desain eksperimen membuktikan bahwa pendekatan ini sangat penting untuk menghasilkan hasil yang terpercaya dan relevan dalam berbagai konteks penerapan di dunia nyata.

2.7 Rancangan Acak Lengkap (RAL)

Rancangan Acak Lengkap (RAL) merupakan salah satu metode dari desain eksperimen yang sederhana untuk penelitian dengan perlakuan yang bersifat homogen (Rahmawati & Erina, 2020). Dalam RAL, unit percobaan diberikan perlakuan secara acak tanpa batasan tertentu sehingga setiap unit memiliki peluang yang sama untuk menerima perlakuan. Metode ini membantu peneliti mengontrol variasi antar unit percobaan yang mungkin disebabkan oleh faktor-faktor yang tidak diketahui, dengan asumsi bahwa faktor-faktor tersebut terdistribusi secara acak. Menurut (Gomez & Gomez (1984), keunggulan utama RAL adalah kemudahan

dalam penerapannya, fleksibilitas untuk berbagai jenis penelitian, serta efisiensi dalam pemanfaatan sumber daya.

Komponen penting dalam RAL terdiri atas faktor perlakuan, jumlah ulangan, dan unit percobaan (Gaspersz, 1991). Proses pengacakan dilakukan untuk memastikan hasil percobaan bebas dari bias sistematis. RAL efektif digunakan dalam kondisi lingkungan percobaan relatif seragam atau homogen, seperti dalam laboratorium atau area percobaan dengan kontrol lingkungan yang baik. Berikut merupakan model linear dan analisis ragam untuk RAL:

$$Y_{ij} = u + T_i + \epsilon_{ij} \dots\dots\dots(3.1)$$

Keterangan:

- i : Jumlah perlakuan atau *level*
- j : Jumlah replikasi
- u : Nilai tengah populasi
- T_i : Pengaruh aditif dari perlakuan ke-i
- ϵ_{ij} : Galat percobaan dari perlakuan ke-I dan replikasi ke-j

Meskipun RAL memiliki banyak keunggulan, metode ini juga memiliki keterbatasan, khususnya apabila terdapat variabilitas yang tinggi antar percobaan. Ketidakhomogenan pada unit percobaan dapat meningkatkan galat dan mengurangi keakuratan hasil penelitian (Ridho, 2022). Dengan ini, sangat penting untuk memastikan unit percobaan memiliki data yang seragam sebelum menggunakan metode RAL. Untuk analisis data yang diperoleh dari RAL, metode statistik seperti ANOVA (*Analysis of Variance*) biasanya digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan. Dengan keunggulannya, RAL tetap menjadi salah satu desain eksperimen dasar yang esensial, terutama untuk penelitian sederhana di lingkungan yang terkontrol.

2.8 *Analysis of Variance* (ANOVA)

Analysis of Variance (ANOVA) adalah salah satu ilmu statistik yang membandingkan rata-rata dari tiga atau lebih kelompok guna menentukan adanya perbedaan antar kelompok (Fajrin dkk., 2016). Teknik ini dikembangkan oleh Ronald A. Fisher dan telah menjadi alat analisis statistik yang diaplikasikan di

berbagai bidang ilmu. ANOVA memungkinkan dalam mengevaluasi pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen dengan mempertimbangkan variasi dalam data. Salah satu keunggulan utama ANOVA adalah kemampuannya dalam mendeteksi perbedaan rata-rata antar kelompok dengan tetap memperhatikan variabilitas dalam data secara keseluruhan. Berikut merupakan rumus dari ANOVA:

1. Faktor Korelasi (FK)

$$FK = \frac{Y^2}{rt} = \frac{(Total\ jendral)^2}{Total\ banyaknya\ pengamatan} \dots\dots\dots(3.2)$$

2. Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$JKT = \sum_{ij} Y_{ij}^2 - FK \dots\dots\dots(3.3)$$

3. Jumlah Kuadrat Perlakuan (JKP)

$$JKP = \left(\frac{y_1^2 + \dots + y_t^2}{r} \right) - FK \dots\dots\dots(3.4)$$

4. Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKP \dots\dots\dots(3.5)$$

5. Derajat Bebas Total (db total)

$$db\ total = rt - 1 \dots\dots\dots(3.6)$$

6. Derajat Bebas Perlakuan (db perlakuan)

$$db\ perlakuan = t - 1 \dots\dots\dots(3.7)$$

7. Derajat Bebas Galat (db galat)

$$db\ galat = db\ total - db\ perlakuan \dots\dots\dots(3.8)$$

$$db\ galat = t(r - 1) \dots\dots\dots(3.9)$$

8. Kuadrat Tengah Perlakuan (KTP)

$$KTP = \frac{JKP}{t-1} \dots\dots\dots(3.10)$$

9. Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$KTG = \frac{JKG}{t(r-1)} \dots\dots\dots(3.11)$$

10. F_{hitung}

$$F_{hitung} = \frac{KTP}{KTG} \dots\dots\dots(3.12)$$

Secara umum, ANOVA memecah variasi total dalam data menjadi dua bagian, yaitu variasi antar kelompok (antara perlakuan) dan variasi dalam kelompok (galat atau residu). Variasi antar kelompok menggambarkan pengaruh perlakuan yang

diuji, sedangkan variasi dalam kelompok merepresentasikan variabilitas acak dalam data. Hasil analisis ANOVA biasanya disajikan dalam bentuk tabel yang mencakup nilai F yang mana digunakan untuk menguji signifikansi statistik. Jika nilai F lebih besar dari nilai kritis pada distribusi F , maka hipotesis nol (tidak ada perbedaan signifikan antar kelompok) ditolak. Untuk mengetahui kelompok mana yang memiliki perbedaan signifikan, analisis tambahan seperti uji *Tukey's HSD* atau *LSD* sering dilakukan.

ANOVA memiliki berbagai variasi, termasuk ANOVA satu arah, dua arah, dan dengan pengukuran berulang, yang dirancang untuk berbagai kebutuhan penelitian (Dewi dkk., 2023). ANOVA satu arah digunakan untuk menguji pengaruh satu faktor independen, sementara ANOVA dua arah mempertimbangkan dua faktor independen sekaligus dengan interaksinya. Sementara itu, ANOVA dengan pengukuran berulang diterapkan pada eksperimen yang melibatkan pengamatan berulang pada subjek yang sama. Meskipun ANOVA sangat bermanfaat, penggunaannya memerlukan pemenuhan asumsi tertentu, seperti normalitas distribusi data, homogenitas varians, dan independensi antar pengamatan. Jika asumsi tersebut tidak terpenuhi, alternatif seperti uji *Kruskal-Wallis* atau transformasi data dapat dipertimbangkan. Dengan kemampuannya yang luas dan fleksibel, ANOVA tetap menjadi salah satu alat utama dalam analisis statistik modern.

2.9 *Full Factorial*

Full factorial adalah salah satu metode desain eksperimen yang digunakan untuk mempelajari pengaruh semua kombinasi kemungkinan dari faktor-faktor yang diteliti terhadap suatu respons (Rahmawati, 2020). Dalam desain ini, setiap tingkat dari satu faktor dikombinasikan dengan semua tingkat faktor lainnya sehingga memungkinkan dalam mengevaluasi efek utama setiap faktor serta interaksinya. Menurut Montgomery (2017), *full factorial design* sangat efektif untuk mendapatkan wawasan mendalam mengenai interaksi antar faktor, meskipun metode ini membutuhkan jumlah percobaan yang meningkat secara eksponensial seiring bertambahnya faktor dan tingkat. Oleh karena itu, desain ini ideal untuk

penelitian dengan jumlah faktor yang relatif sedikit atau di mana evaluasi komprehensif diperlukan.

Salah satu keunggulan utama *full factorial design* adalah kemampuannya menghasilkan informasi yang detail dan menyeluruh mengenai hubungan antara variabel independen dan dependen. Pendekatan ini sering diterapkan dalam berbagai bidang, seperti teknik, manufaktur, dan sains, untuk mengoptimalkan proses atau produk. Dalam industri manufaktur, *full factorial design* dapat digunakan untuk menentukan pengaturan optimal dari suhu, tekanan, dan kecepatan mesin untuk meningkatkan kualitas produk. Selain itu, metode ini juga banyak digunakan dalam penelitian laboratorium untuk memahami interaksi kimia atau proses biologis yang kompleks.

Namun, salah satu tantangan utama dari *full factorial design* adalah meningkatnya jumlah percobaan yang dibutuhkan seiring bertambahnya jumlah faktor dan tingkat. Untuk mengatasi hal ini, *fractional factorial design* dapat digunakan untuk mengurangi jumlah percobaan dengan tetap mempertahankan kemampuan untuk mengevaluasi efek utama dan interaksi tertentu. Selain itu, analisis data dari *full factorial design* biasanya dilakukan menggunakan ANOVA (*Analysis of Variance*) untuk menentukan signifikansi statistik dari efek faktor dan interaksinya. Dengan fleksibilitas dan kekayaan informasi yang dihasilkan, *full factorial design* tetap menjadi salah satu metode desain eksperimen yang penting untuk penelitian yang memerlukan analisis mendalam dan detail.

2.10 Uji Lanjutan (*Post-Hoc Test*)

Uji lanjutan atau *post-hoc test* merupakan serangkaian analisis statistik yang dilakukan setelah uji ANOVA menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan di antara rata-rata kelompok perlakuan. Meskipun ANOVA dapat menunjukkan adanya perbedaan secara umum, namun tidak dapat mengidentifikasi secara spesifik kelompok mana yang berbeda satu sama lain. Oleh karena itu, diperlukan uji lanjutan untuk membandingkan rata-rata antar pasangan perlakuan guna menemukan pasangan mana yang memiliki perbedaan signifikan. Uji lanjutan sangat penting dalam penelitian eksperimental agar kesimpulan yang diambil lebih tepat dan informatif (Gomez & Gomez, 1984).

Terdapat berbagai jenis uji lanjutan yang dapat digunakan, seperti LSD (*Least Significant Difference*), Tukey HSD (*Honestly Significant Difference*), Duncan, Scheffé, dan Bonferroni. Pemilihan jenis uji lanjutan tergantung pada jumlah perlakuan, jumlah perbandingan yang dilakukan, serta tingkat ketelitian yang diinginkan. Uji LSD tergolong liberal karena cenderung lebih mudah menemukan perbedaan, sementara uji Tukey HSD dan Scheffé lebih konservatif karena memberikan perlindungan lebih besar terhadap kesalahan tipe I. Dengan demikian, pemahaman yang baik mengenai karakteristik masing-masing uji lanjutan berperan penting dalam analisis data menjadi lebih valid dan reliabel (Steel & Torrie, 1991).

2.10.1 Uji LSD (*Least Significant Difference*)

Uji LSD (*Least Significant Difference*) adalah metode uji lanjut (*post-hoc test*) yang digunakan setelah analisis variasi (ANOVA) menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan. Tujuan utama dari uji LSD adalah untuk membandingkan rata-rata antar pasangan perlakuan secara langsung guna mengetahui pasangan mana yang berbeda secara signifikan. Metode ini bekerja dengan menghitung selisih terkecil yang signifikan antara dua rata-rata, berdasarkan nilai t pada distribusi t -Student, serta varians galat dari ANOVA. Uji LSD termasuk dalam kategori uji yang cukup liberal, karena cenderung lebih mudah mendeteksi perbedaan meskipun dengan risiko meningkatkan peluang kesalahan tipe 1 (*false positive*) jika jumlah kelompok yang dibandingkan cukup banyak (Gaspersz, 1991).

Secara teknis, uji LSD menggunakan nilai galat baku (standard error) dari analisis ANOVA sebagai dasar penghitungan batas signifikansi antar rata-rata perlakuan. Jika selisih rata-rata dua perlakuan melebihi nilai LSD yang dihitung, maka kedua perlakuan tersebut dinyatakan berbeda secara signifikan. Kelebihan uji LSD terletak pada kesederhanaannya dan kekuatannya dalam mengidentifikasi perbedaan antar perlakuan, terutama bila jumlah perlakuan relatif sedikit dan asumsi normalitas terpenuhi. Namun, jika jumlah perlakuan besar, maka uji LSD berpotensi menghasilkan kesimpulan yang menyesatkan karena akumulasi kesalahan tipe 1. Oleh karena itu, dalam praktiknya, pemilihan metode uji lanjut harus mempertimbangkan konteks eksperimen dan jumlah perlakuan yang diuji.

2.10.2 Uji HSD (*Honestly Significant Difference*)

Uji HSD (*Honestly Significant Difference*) atau sering dikenal sebagai uji *Tukey's HSD* adalah salah satu metode uji lanjut yang digunakan setelah analisis varians (ANOVA) menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar perlakuan. Uji ini dikembangkan oleh John Tukey dan dirancang untuk mengontrol tingkat kesalahan tipe 1 secara keseluruhan saat melakukan perbandingan ganda antar rata-rata perlakuan. HSD termasuk dalam kategori uji konservatif karena menjaga peluang kesalahan tipe 1 tetap rendah meskipun jumlah perbandingan yang dilakukan cukup banyak. Metode ini menggunakan distribusi studentized range dalam menentukan selisih minimum yang harus dicapai agar dua rata-rata dianggap berbeda secara signifikan (Torrie & Steel, 1991).

Dalam pelaksanaannya, uji HSD menghitung selisih terkecil yang signifikan berdasarkan variasi galat dari ANOVA dan jumlah replikasi setiap perlakuan. Jika selisih rata-rata antar dua perlakuan melebihi nilai HSD yang diperoleh, maka perbedaan tersebut dianggap signifikan. Uji ini sangat cocok digunakan pada eksperimen dengan jumlah perlakuan yang besar karena mampu mengontrol akumulasi kesalahan akibat banyaknya perbandingan yang dilakukan. Oleh karena itu, uji Tukey HSD sering menjadi pilihan utama dalam eksperimen agronomi, biologi, dan ilmu sosial untuk membandingkan perlakuan secara menyeluruh dan komprehensif (Gomez & Gomez, 1984).

2.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu adalah proses pengumpulan dan analisis dari penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dalam topik yang sama atau terkait. Tujuan dari adanya penelitian terdahulu adalah untuk memahami perkembangan penelitian, menemukan kesenjangan pengetahuan, dan merumuskan pertanyaan penelitian yang relevan. Penelitian terdahulu yang pertama adalah "Analisis Pengaruh Suhu terhadap Konstanta Pegas dengan Variasi Jumlah Lilitan dan Diameter Pegas Baja" yang diteliti oleh Ikhtiardi (2015). Penelitian ini membahas tentang pengaruh berbagai media pendingin dalam proses perlakuan panas baja, salah satunya adalah faktor suhu. Penelitian ini menunjukkan bahwa proses pengerasan pada pemanasan pegas hingga suhu tertentu, diikuti dengan pendinginan cepat. Suhu pemanasan

yang tepat menyebabkan perubahan dalam kekerasan dan sifat lainnya dari material baja. Oleh karena itu, pengerasan pada pegas dapat menyebabkan penyusutan pada pegas berkurang.

Penelitian terdahulu selanjutnya adalah “Pengaruh Pemanasan dan *Quenching* dengan Air Laut Terhadap Struktur Mikro Baja Karbon Sedang” yang diteliti oleh Lelawati (2022). Kandungan karbon dalam baja memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitasnya. Semakin tinggi kadar karbon, semakin tinggi pula kekuatan dan kekerasan baja tersebut. Namun, peningkatan kadar karbon juga dapat menyebabkan baja menjadi rapuh dan sulit untuk dibentuk. Baja karbon rendah memiliki sifat yang lebih mudah dibentuk dan dilas, sedangkan baja karbon tinggi cenderung lebih sulit untuk dilas dan memiliki kekuatan yang lebih tinggi.

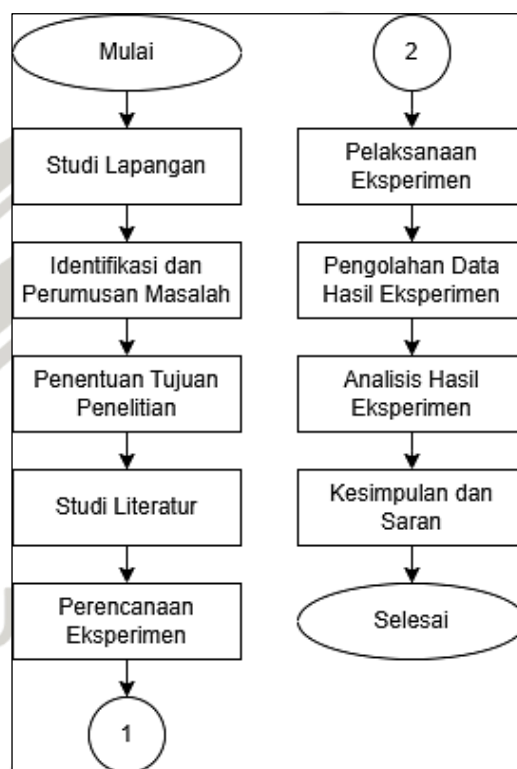
Kedua penelitian ini sama-sama meneliti pengaruh suhu terhadap sifat fisis atau mekanis baja. Kedua penelitian ini menggunakan material baja sebagai objek utama dan memanfaatkan proses pemanasan sebagai perlakuan utama dalam metode eksperimen mereka. Meskipun memiliki kesamaan dalam pendekatan umum, kedua penelitian ini memiliki fokus dan tujuan yang berbeda. Penelitian Lelawati lebih menitikberatkan pada analisis struktur mikro baja karbon sedang setelah mengalami perlakuan panas dan *quenching* menggunakan media air laut. Di sisi lain, penelitian Ikhtiardi berfokus pada pengaruh suhu terhadap konstanta pegas yang terbuat dari baja dengan variasi jumlah lilitan dan diameter. Perbedaan lainnya terletak pada jenis material yang digunakan. Penelitian pertama menggunakan plat baja karbon sedang, sedangkan penelitian kedua menggunakan pegas baja daun. Selain itu, metode pengujian dalam penelitian Lelawati menggunakan mikroskop elektron dan teknik metalografi, sedangkan Ikhtiardi menggunakan metode pengukuran gaya dan panjang pegas secara mekanik sederhana. Penelitian ini memanfaatkan hasil penelitian dari Ikhtiardi (2015) dan Lelawati (2022) dalam menentukan faktor untuk desain eksperimen. Penelitian oleh Ikhtiardi menggunakan pengaruh kandungan karbon dalam menganalisis kekerasan pada baja. Sedangkan, penelitian oleh Lelawati menggunakan pengaruh suhu dalam menganalisis kekerasan pada pegas baja daun.

Bab III

Metode Penelitian

3.1 Diagram Alur Penelitian

Alur penelitian merupakan penjelasan dari tahapan dan proses yang dilakukan saat penelitian. Alur penelitian juga dijadikan sebagai panduan dalam perancangan penelitian dan dalam menghasilkan suatu luaran. Diagram alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alur Penelitian

3.2 Studi Lapangan

Studi lapangan dari penelitian ini dilakukan secara langsung di Departemen Kawat di PT Panca Graha Pratama. Studi lapangan yang dilakukan adalah observasi lapangan dan wawancara dengan pihak produksi. Pertama, dilakukan observasi kegiatan produksi kawat pegas Bonnell dan proses pemeriksaan kualitas. Selanjutnya, dilakukan wawancara dengan staf *Quality Control*, supervisor, dan operator untuk mendukung hasil observasi lapangan.

3.3 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Berdasarkan hasil observasi lapangan dan wawancara, ditemukan adanya cacat produksi sebesar 38,14% pada kawat pegas bonnell 2.4mm dengan tinggi 17 cm. Hal ini ditandai dengan panjang kawat pegas yang menyusut atau turun lebih dari 1cm dari hasil pengecekan kualitas. Mesin yang memproduksi kawat pegas yang cacat akan dimatikan dan memengaruhi jumlah pegas yang harus diproduksi setiap harinya sehingga mengganggu proses produksi *springbed*. Selain itu, kawat pegas yang dinyatakan cacat tidak dapat dilanjutkan untuk disusun dalam *springbed* sehingga memperbesar kerugian biaya produksi dan tenaga kerja. Dampak yang paling dirasakan oleh perusahaan adalah penurunan kualitas *springbed* dengan adanya penyusutan pada kawat pegas. Oleh karena itu, perusahaan menginginkan penyusutan pada kawat pegas bonnell dapat ditekan.

3.4 Penentuan Tujuan Penelitian

Penetapan tujuan penelitian dilakukan setelah mengidentifikasi masalah yang ada di lapangan. Berdasarkan hasil identifikasi masalah, penelitian ini berfokus pada mengurangi penyusutan pada kawat pegas bonnell. Untuk mengurangi penyusutan tersebut diperlukan adanya kombinasi level optimal dari faktor suhu dan kandungan karbon..

3.5 Studi Literatur

Studi literatur adalah pendekatan penelitian yang dilakukan dengan cara mencari referensi atas landasan teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Referensi dari studi literatur diambil dari buku, jurnal artikel, dan situs berita online. Literatur yang digunakan terdiri dari wawasan terkait *springbed*, kawat pegas atau pegas baja, suhu, kandungan karbon, desain eksperimen, ANOVA, uji lanjutan, dan penelitian terdahulu.

3.6 Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, teknik pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang relevan guna menjawab rumusan masalah dan mencapai tujuan

penelitian. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder, yang masing-masing diperoleh dengan pendekatan berbeda sesuai kebutuhan eksperimen.

1. Data Primer

Data primer diperoleh secara langsung di lapangan. Pengambilan data primer dilakukan dengan observasi lapangan, eksperimen, dan wawancara dengan pihak produksi. Observasi lapangan ini dilakukan dengan pengamatan langsung pada proses produksi di Departemen Kawat. Wawancara dilakukan pada pihak produksi. Pihak produksi ini terdiri dari Kepala Produksi, QC, Supervisor, dan Operator dari Departemen Kawat. Observasi dan wawancara tersebut dilakukan untuk melengkapi informasi data yang tersedia. Data yang diperoleh ialah kegiatan proses produksi, proses pengecekan kualitas, dan data hasil eksperimen.

2. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari dokumen hasil pengecekan penyusutan kawat pegas bonnell dari QC Departemen Kawat. Dokumen tersebut berperan sebagai patokan dalam jumlah penyusutan kawat pegas bonnell.

3.7 Perencanaan Eksperimen

Perencanaan eksperimen merupakan langkah selanjutnya dalam merancang eksperimen yang akan dilaksanakan. Perencanaan eksperimen ini diperlukan untuk mematangkan persiapan agar eksperimen berjalan dengan lancar dan maksimal. Berikut merupakan tahap-tahap yang diperlukan dalam perencanaan eksperimen:

3.7.1 Penentuan Faktor Eksperimen

Faktor eksperimen yang digunakan adalah faktor yang memengaruhi hasil penyusutan pada kawat pegas bonnell. Faktor-faktor tersebut ditentukan berdasarkan hasil diskusi dan wawancara dengan pihak produksi dan *Quality Control* (QC) perusahaan. Selain itu, penentuan faktor eksperimen juga diperoleh melalui studi literatur sehingga didapatkan faktor yang tepat dalam mengurangi penyusutan pada kawat pegas bonnell. Hal ini dapat memengaruhi keberhasilan eksperimen sehingga mencapai tujuan penelitian.

3.7.2 Penentuan Level Faktor Eksperimen

Setelah menentukan faktor eksperimen, maka ditetapkan level dari faktor-faktor tersebut. Level dari faktor eksperimen tersebut ditentukan dengan studi lapangan dan hasil diskusi dengan pihak produksi dan QC perusahaan. Adapun replikasi dari setiap percobaan ditentukan berdasarkan standar pengecekan kualitas produksi dari QC Departemen Kawat. Selain itu, level faktor tersebut juga didasarkan oleh studi literatur sehingga hasil eksperimen yang didapat mendekati kenyataan.

3.7.3 Penentuan Waktu Eksperimen

Waktu eksperimen ditentukan dengan menyesuaikan jadwal kerja operator sehingga tidak mengganggu proses produksi yang berlangsung. Penentuan waktu eksperimen ini dirundingkan bersama dengan Kepala Produksi dan Supervisor Departemen Kawat. Eksperimen dilaksanakan di jam istirahat operator shift pagi pada pukul 10.00 – 10.30 WIB selama dua hari.

3.8 Pelaksanaan Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen dilakukan berdasarkan perencanaan eksperimen. Tahap pelaksanaan eksperimen dilakukan terhadap kombinasi level dari faktor yang telah dirancang sebelumnya. Banyaknya eksperimen atau percobaan ditentukan dengan metode Rancangan Acak Lengkap dan *Full Factorial Design*. Replikasi dari setiap eksperimen dibuat berdasarkan standar pengecekan kualitas produksi Departemen Kawat. Hasil eksperimen tercatat dalam bentuk selisih penyusutan dari panjang kawat pegas sebelum dan sesudah pengecekan penyusutan dengan menggunakan mesin uji penyusutan milik perusahaan.

3.9 Teknik Pengolahan Data Hasil Eksperimen

Setelah pelaksanaan eksperimen, tahap selanjutnya adalah melakukan pengolahan data hasil eksperimen. Tujuan dari pengolahan data ini adalah untuk mengetahui pengaruh signifikan dari faktor-faktor yang diteliti. Pengolahan data dilakukan menggunakan metode statistik, yaitu ANOVA yang sesuai untuk desain eksperimen faktorial. Analisis ANOVA dilakukan untuk menguji hipotesis apakah

terdapat interaksi antar faktor dan pengaruh faktor yang signifikan terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell. Jika hasil uji ANOVA menunjukkan terdapat pengaruh signifikan, maka akan dilanjutkan dengan uji lanjut (*post-hoc test*) guna mengetahui pasangan perlakuan mana yang berbeda nyata. Uji lanjut yang digunakan adalah uji LSD dan uji HSD. Kedua uji lanjut tersebut membantu dalam mengidentifikasi kombinasi perlakuan suhu dan kandungan karbon mana yang memberikan pengaruh paling optimal dalam menekan nilai penyusutan kawat. Uji ANOVA dan uji lanjut ini dilakukan menggunakan Minitab 21. Selain itu, data hasil eksperimen tersebut digunakan untuk optimasi dari level faktor eksperimen.

3.10 Analisis Hasil Eksperimen

Tahap ini dilakukan setelah data hasil eksperimen diolah. Analisis hasil eksperimen berguna dalam mengetahui apakah masing-masing faktor terdapat interaksi dan pengaruh yang signifikan terhadap penyusutan kawat pegas bonnell. Selain itu, hasil eksperimen ini juga dianalisis terhadap karakterisasi material baja yang digunakan. Berdasarkan hasil analisis tersebut akan ditentukan kombinasi perlakuan terbaik yang menghasilkan selisih penyusutan terkecil dan sesuai standar perusahaan. Kombinasi tersebut akan menjadi dasar untuk memberikan usulan perbaikan pada proses produksi kawat pegas bonnell. Saran yang diberikan berupa rekomendasi penerapan pengaturan parameter optimal di proses produksi agar kualitas produk meningkat dan penyusutan pada kawat pegas bonnell dapat ditekan.

3.11 Kesimpulan dan Saran

Pada bagian ini, dirumuskan kesimpulan dari hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan sebelumnya. Kesimpulan tersebut berfungsi untuk menjawab rumusan masalah dan menunjukkan kombinasi optimal dalam menekan penyusutan kawat pegas bonnell. Selain itu, peneliti juga memberikan saran yang ditujukan kepada peneliti selanjutnya. Peneliti juga dapat menyarankan pengembangan penelitian lebih lanjut untuk menambah variasi faktor atau menggunakan metode analisis lain.

Bab IV

Pengolahan Data dan Analisis Hasil

4.1 Proses Produksi *Springbed*

Departemen kawat merupakan salah satu departemen produksi yang memproduksi kawat pegas dan perakitan rangka pegas sebelum dilanjutkan ke pembuatan *springbed*. Pegas yang diproduksi oleh Departemen Kawat sendiri terdiri dari pegas bonnell, lastik, *pocket*, *M guard*, dan kawat lis. Terdapat berbagai macam proses produksi di dalam Departemen Kawat, yaitu proses pembuatan pegas, perakitan pegas, dan pemasangan kerangka kasur/Rehab.

Pada proses pembuatan pegas bonnell, kawat mentah akan dipanaskan dan dibentuk menjadi pegas bonnell dengan mesin Spull. Proses ini diawasi oleh satu operator untuk mengecek bentuk pegas bonnell yang sudah jadi sebelum diteruskan ke proses perakitan. Pegas bonnell jadi yang sudah keluar dari mesin Spull akan didinginkan selama kurang dari 5 menit di ruangan terbuka sebelum dirakit ke dalam mesin ramper. Pada proses perakitan, kumpulan pegas bonnell yang sudah jadi akan dirakit ke dalam mesin ramper. Mesin ini bersifat semi-manual yang membutuhkan bantuan operator untuk menata pegas ke dalam mesin. Operator bertugas dalam memasukkan pegas bonnell ke dalam mesin ramper. Kemudian, operator mengatur Pada pemasangan kerangka kasur atau Rehab, hasil rakitan pegas akan dipasang kawat lis dan pegas M untuk membentuk rakitan tetap berbentuk kotak dan erat. Proses ini dilakukan dengan tenaga manusia dan alat tembak CL untuk merekatkan hasil rakitan.

Setelah proses rehab, rakitan kawat pegas akan dipindahkan ke Departemen Matras untuk perakitan final *springbed* atau matras. Departemen Matras adalah departemen produksi yang berfokus pada proses pembentukan akhir *springbed*. Setelah itu, produksi dilanjutkan ke bagian busa (*foam*). Busa yang telah diproduksi dipotong dan dibentuk mengikuti dimensi produk *springbed*. Lapisan terluar *springbed* disiapkan melalui proses *quilting*, yaitu menjahit beberapa lapisan seperti kain, dakron, dan busa tipis menggunakan mesin *quilting*. Kain *quilting* yang telah terbentuk lalu dipotong sesuai ukuran permukaan kasur. Komponen-komponen tersebut kemudian dirakit dalam proses perakitan matras, dimulai dari peletakan

rangka pegas di bagian tengah, penambahan lapisan busa di atas dan bawahnya, serta pembungkusan menggunakan kain *quilting*. Seluruh unit *springbed* disatukan menggunakan perekat khusus dan dijahit di bagian tepi.

Tahap selanjutnya adalah proses *finishing* dan *quality control*. Produk *springbed* yang telah selesai dirakit diperiksa secara menyeluruh oleh tim QC, meliputi pengecekan dimensi, kesesuaian bentuk, kekuatan struktur, dan estetika produk. Jika ditemukan cacat, produk akan dipisahkan untuk dilakukan perbaikan atau dibuang jika tidak dapat diperbaiki. Setelah lolos QC, *springbed* akan dikemas menggunakan plastik dan disegel untuk distribusi.

4.2 Uji Penyusutan

Uji penyusutan kawat pegas bonnell dilakukan sebanyak tiga kali di waktu yang berbeda oleh *Quality Control* (QC). Pengecekan tersebut dilakukan pada pukul 08.30 WIB, 10.00 WIB, dan 14.00 WIB. QC melakukan pengecekan penyusutan kawat pegas bonnell menggunakan mesin uji penyusutan. Cara kerja dari mesin tersebut ialah dengan menekan kawat pegas bonnell sebanyak 100 kali untuk menentukan selisih panjang kawat pegas antara sebelum dan sesudah kawat pegas ditekan oleh mesin. Pertama, QC akan mengukur panjang kawat pegas bonnell sebelum dimasukkan ke dalam mesin uji penyusutan dari setiap mesin. Kemudian, kawat pegas bonnell dimasukkan ke dalam mesin tersebut untuk ditekan sebanyak 100 kali. Setelah itu, kawat pegas dikeluarkan dari mesin dan dihitung jumlah panjangnya sesudah ditekan 100 kali. Kemudian jumlah panjang sebelum dan sesudah dari pegas bonnell yang dilakukan uji penyusutan tersebut dituliskan dalam form pengecekan QC uji penyusutan.

4.3 Perencanaan Eksperimen

Pada tahap perencanaan eksperimen, dilakukan berbagai tahapan sebelum melaksanakan eksperimen. Tahapan ini terdiri dari menentukan faktor eksperimen, menentukan level faktor eksperimen, dan menentukan waktu pelaksanaan eksperimen. Penentuan faktor serta level faktor diperoleh dari hasil diskusi dan wawancara dengan pihak produksi perusahaan dan *Quality Control* (QC) yang

didukung oleh kajian literatur. Penentuan pelaksanaan waktu eksperimen ditentukan dengan menyesuaikan waktu kegiatan produksi perusahaan.

4.4 Penentuan Faktor Eksperimen

Penentuan faktor eksperimen merupakan langkah penting dalam perancangan percobaan untuk mengetahui faktor-faktor apa saja yang paling berpengaruh terhadap penyusutan kawat pegas bonnell. Dalam penelitian ini, penentuan faktor eksperimen dilakukan berdasarkan hasil observasi proses produksi di Departemen Kawat PT Panca Graha Pratama, wawancara dengan pihak produksi dan QC, serta didukung oleh referensi ilmiah dari penelitian terdahulu. Dari hasil diskusi dan pengamatan, diketahui bahwa terdapat beberapa faktor berpengaruh terhadap tingkat penyusutan pegas, yaitu suhu pemanas, kandungan karbon pada kawat baja, proses pendinginan, serta jumlah lilitan pegas. Dalam desain eksperimen, faktor-faktor yang diuji disebut sebagai faktor kontrol, yaitu variabel yang nilainya dapat ditentukan dan diatur secara sistematis oleh peneliti untuk melihat pengaruhnya terhadap respons. Faktor kontrol ini berbeda dengan faktor gangguan (*noise*) yang nilainya tidak dapat dikendalikan dan biasanya berasal dari variasi lingkungan atau kondisi operasional yang tidak stabil. Faktor kontrol yang ada di eksperimen ini adalah faktor suhu dan kandungan karbon, sedangkan faktor gangguan terdiri dari faktor suhu ruangan departemen kawat. Faktor gangguan ini dikendalikan dengan melakukan eksperimen di waktu yang sama. Sementara itu, faktor sinyal (*signal*) merupakan variabel yang berperan sebagai pemicu atau penggerak perubahan pada proses dan secara langsung memengaruhi performa produk dalam kondisi operasional yang sebenarnya. Faktor sinyal pada eksperimen ini adalah faktor proses pendinginan dan jumlah lilitan pegas.

4.4.1 Faktor Suhu

Suhu pemanas berperan dalam mengubah struktur mikro kawat baja saat proses heat treatment. Callister & Rethwisch (2018) menyatakan bahwa suhu yang tidak optimal dapat menyebabkan kawat menjadi terlalu lunak atau terlalu rapuh, sehingga memengaruhi kemampuan kawat mempertahankan bentuknya setelah menerima tekanan. Berdasarkan data lapangan, suhu yang digunakan selama ini

bervariasi, sehingga perlu diuji pengaruhnya secara sistematis terhadap penyusutan. Umumnya, perusahaan menggunakan suhu pemanas sebesar 250°C selama proses pembuatan kawat pegas bonnell. Apabila pegas yang digunakan terjadi penyusutan selama uji penyusutan, maka perusahaan menaikkan tingkat suhu pemanas pada mesin Spull atau mesin produksi pegas bonnell. Saat ini, perusahaan menaikkan tingkat suhu dari 260°C hingga 300°C. Dengan ini, diperlukan tingkat suhu yang sesuai untuk mengurangi penyusutan pada pegas bonnell.

4.4.2 Faktor Kandungan Karbon

Kandungan karbon merupakan karakteristik bahan baku yang menentukan sifat mekanik kawat, seperti kekerasan dan keuletan. Variasi kandungan karbon dapat menyebabkan perbedaan tingkat penyusutan. Baja dengan kadar karbon tinggi cenderung keras namun rapuh, sedangkan kadar karbon rendah terlalu lunak dan mudah berubah bentuk (Totten, 1996). Saat ini, perusahaan menggunakan kandungan karbon dalam baja pegas sebesar 0.72% C. Jumlah kandungan ini termasuk dalam kategori kandungan karbon tinggi yang umumnya digunakan dalam pegas dan sesuai dengan standar ASTM A229 dan ASTM A229m mengenai spesifikasi standar untuk kawat baja, karbon tinggi, untuk pegas mekanis (ASTM, 2021). Standar ASTM A229 ini membahas terkait standar penggunaan kadar kandungan karbon dalam pegas baja di industri *furniture*, yaitu sebesar 0,60% C hingga 0,85% C. Namun, masih ditemukan adanya penyusutan pada pegas bonnell yang diproduksi sehingga diperlukan kandungan karbon yang tepat untuk mengurangi penyusutan.

4.4.3 Faktor Proses Pendinginan

Proses pendinginan atau *quenching* merupakan tahap penting setelah pemanasan kawat baja dalam proses *heat treatment*. Pendinginan yang terlalu cepat atau tidak merata dapat menyebabkan tegangan sisa (*residual stress*) dalam material, yang membuat kawat cenderung mengalami deformasi atau penyusutan saat diberi beban (ASM, 1991). Jenis media pendingin (air, udara, minyak) dan suhu lingkungan pendinginan turut menentukan perubahan struktur mikro baja, seperti pembentukan martensit atau perlit, yang memengaruhi kekuatan dan stabilitas

kawat (Totten, 2006). Proses pendinginan yang digunakan oleh PT Panca Graha Pratama masih dalam bentuk sederhana. Setelah pegas bonnell telah selesai dibentuk dan dipanaskan, pegas bonnell yang sudah jadi akan didiamkan selama 3-5 menit hingga dingin. Kemudian, pegas bonnell yang sudah dingin dapat dilanjutkan ke proses perakitan kerangka pegas.

4.4.4 Faktor Jumlah Lilitan Pegas

Jumlah lilitan pada kawat per bonnell juga menjadi faktor mekanis yang memengaruhi elastisitas dan kekuatan pegas. Lilitan yang terlalu sedikit dapat membuat pegas menjadi terlalu kaku dan rentan mengalami deformasi permanen, sedangkan lilitan yang terlalu banyak justru dapat menyebabkan kawat kehilangan gaya tekan yang cukup untuk mempertahankan bentuknya. Menurut Suresh (1998), jumlah lilitan memengaruhi distribusi tegangan dalam pegas saat menerima tekanan, sehingga secara langsung berpengaruh terhadap kemampuan pegas untuk kembali ke bentuk awal setelah digunakan. Oleh karena itu, variasi jumlah lilitan dapat memicu perbedaan penyusutan, terutama jika tidak disesuaikan dengan diameter kawat dan tinggi pegas. Di PT Panca Graha Pratama, jumlah lilitan pegas yang digunakan saat ini terdapat dua jenis. Pegas bonnell dengan tinggi 15 cm menggunakan lima lilitan, sedangkan pegas bonnell dengan tinggi 17 cm menggunakan enam lilitan.

Berdasarkan empat faktor yang telah dianalisis, terdapat halangan pada situasi perusahaan selama penentuan faktor eksperimen. Hal ini menyebabkan penelitian ini hanya menggunakan dua faktor eksperimen, yaitu suhu pemanas dan kandungan karbon dalam baja. Kedua faktor ini dipilih dengan pertimbangan memiliki karakteristik yang sesuai dalam percobaan dan kondisi lapangan. Faktor proses pendinginan tidak digunakan, karena proses pendinginan pegas bonnell di PT Panca Graha Pratama tidak menggunakan metode khusus dan hanya didiamkan selama beberapa menit. Pada faktor jumlah lilitan pegas tidak digunakan sebab mempengaruhi hasil dari produk yang sudah jadi. Hal ini dikarenakan jumlah lilitan dapat mempengaruhi ketinggian pada pegas bonnell tinggi 17 cm. Oleh karena itu, proses pendinginan dan jumlah lilitan pegas tidak digunakan sebagai faktor eksperimen.

4.5 Penentuan Level Faktor Eksperimen

Level faktor eksperimen ditentukan dari faktor eksperimen yang telah ditentukan. Level faktor ini diperoleh dari observasi lapangan dan hasil diskusi dengan pihak produksi dan QC perusahaan.

4.5.1 Level dari Faktor Suhu

Penentuan level faktor suhu ditentukan dari hasil diskusi dengan pihak produksi serta menyesuaikan dengan kondisi mesin Spull. Level suhu pemanas yang digunakan oleh perusahaan saat ini adalah 250°C. Berdasarkan kajian literatur dan kondisi lapangan menunjukkan semakin besar tingkat suhu pemanas, maka semakin mengurangi nilai penyusutan pada pegas bonnell. Perusahaan meningkatkan suhu pemanas mulai dari 260°C hingga 300°C. Dengan ini, tingkat suhu 260°C dan tingkat suhu 270°C ditentukan sebagai level eksperimen. Peningkatan level-level faktor ini disesuaikan dengan kondisi mesin Spull yang hanya dapat dinaikkan setiap 10°C. Namun, mesin Spull memiliki kendala apabila suhu pemanas dinaikkan pada 280°C hingga 300°C. Hal ini menyebabkan pengatur temperatur pada mesin Spull terbakar mengeluarkan percikan api karena terlalu panas. Oleh karena itu, tingkat suhu 280°C hingga 300°C tidak digunakan sebagai level faktor.

4.5.2 Level dari Faktor Kandungan Karbon

Penentuan level faktor kandungan karbon ditentukan dengan hasil diskusi dengan pihak produksi dan kajian literatur. Tingkat kandungan karbon yang digunakan dalam pegas bonnell di PT Panca Graha Pratama sebesar 0,72%. Kadar karbon 0,72% yang digunakan oleh perusahaan dipasok dari tiga supplier dengan spesifikasi yang sama. Kajian literatur menunjukkan bahwa nilai kandungan karbon yang besar dapat meningkatkan kekerasan pada baja sehingga dapat mengurangi adanya penyusutan pada pegas (Totten, 2006). Dari hasil kajian literatur tersebut, tingkat kandungan karbon sebesar 0.73% dan tingkat kandungan karbon sebesar 0.74% ditentukan sebagai level eksperimen. Penentuan level tersebut dipertimbangkan dengan tersedianya kadar kandungan karbon yang diproduksi oleh *supplier*.

4.6 Penentuan Waktu Eksperimen

Waktu eksperimen ditentukan dengan mempertimbangkan kegiatan produksi yang berlangsung di Departemen Kawat. Waktu eksperimen ini ditentukan melalui diskusi dengan *Supervisor*, Operator mesin Spull, dan QC Departemen Kawat dengan pertimbangan jam kerja dan jam istirahat operator. Eksperimen ini dilaksanakan pada jam istirahat operator *shift* pagi atau *shift* 1 di pukul 10.00 – 10.30 WIB selama dua hari. Waktu pelaksanaan eksperimen ini telah disesuaikan dengan jadwal operasional pabrik agar tidak mengganggu proses produksi.

4.7 Pelaksanaan Eksperimen

Pelaksanaan eksperimen dilakukan berdasarkan rancangan *full factorial* dan Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan dua faktor, yaitu suhu pemanas dan kandungan karbon, masing-masing terdiri atas tiga level. RAL digunakan karena kondisi lingkungan eksperimen homogen dan tanpa pembagian blok, sehingga setiap perlakuan dapat diacak secara bebas untuk meminimalkan bias. Jumlah eksperimen yang dilaksanakan terdapat sembilan eksperimen. Setiap kombinasi dilakukan dalam lima kali pengulangan (replikasi) yang disesuaikan dengan standar pengecekan uji penyusutan pegas dari QC Departemen Kawat. Kombinasi eksperimen penyusutan pegas bonnell di PT Panca Graha Pratama dapat dilihat di tabel 4.1.

Tabel 4.1 Kombinasi Eksperimen Penyusutan Pegas Bonnell

Eksperimen	Faktor	
	Suhu (A)	Kandungan Karbon (B)
1	1	1
2	2	1
3	3	1
4	3	3
5	2	3
6	1	3
7	2	2
8	1	2
9	3	2

Keterangan:

Faktor Suhu (A):

1. 250°C

2. 260°C
3. 270°C

Faktor Kandungan Karbon (B):

1. 0,72%
2. 0,73%
3. 0,74%

Eksperimen ini dilaksanakan berdasarkan urutan percobaan yang telah dilakukan pengacakan pada Tabel 4.1. Eksperimen dijalankan sesuai dengan kombinasi yang ditampilkan pada tabel tersebut. Apabila akan menjalankan eksperimen pertama, maka level yang digunakan adalah suhu pemanas 250°C dan kandungan karbon sebesar 0,72%. Pelaksanaan eksperimen diawali dengan pengaturan suhu pemanas dari mesin Spull sesuai level perlakuan yang telah ditentukan, kemudian digunakan kawat baja dengan kadar karbon yang sesuai pada kombinasi tersebut.

Setelah kawat dipanaskan hingga suhu tertentu, dilakukan pembentukan pegas bonnell sesuai prosedur standar produksi. Untuk setiap kombinasi perlakuan, dilakukan lima kali pengulangan (replikasi) secara berurutan di waktu yang sama. Pegas hasil perlakuan kemudian diuji menggunakan mesin uji penyusutan dengan metode penekanan sebanyak 100 kali. Panjang kawat diukur sebelum dan sesudah pengujian, lalu dicatat nilai selisih panjang sebelum dan sesudah pegas diuji sebagai nilai penyusutan. Penelitian ini menggunakan lima kali replikasi untuk setiap kombinasi perlakuan guna meningkatkan keakuratan data dan memastikan konsistensi hasil, serta disesuaikan dengan standar pengecekan kualitas perusahaan.

4.8 Data Hasil Eksperimen

Setelah seluruh eksperimen dilaksanakan, diperoleh hasil berupa nilai penyusutan kawat pegas bonnell dari setiap kombinasi perlakuan. Data ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut dalam menentukan pengaruh faktor suhu dan kandungan karbon terhadap penyusutan. Data hasil nilai selisih penyusutan pegas bonnell diameter 2,4 mm tinggi 17 cm setiap kombinasi eksperimen dapat dilihat di Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Hasil Ekperimen

Tanggal	Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)	Nilai Selisih Panjang (cm)
2 Mei 2025	R1 A1 B1	17,0	15,8	1,2
2 Mei 2025	R2 A1 B1	17,0	15,9	1,1
2 Mei 2025	R3 A1 B1	17,2	16,3	0,9
2 Mei 2025	R4 A1 B1	17,0	15,8	1,2
2 Mei 2025	R5 A1 B1	17,1	15,8	1,3
2 Mei 2025	R1 A2 B1	17,2	16,3	0,9
2 Mei 2025	R2 A2 B1	17,3	16,1	1,2
2 Mei 2025	R3 A2 B1	17,0	15,8	1,2
2 Mei 2025	R4 A2 B1	17,1	16,0	1,1
2 Mei 2025	R5 A2 B1	17,0	16,2	0,8
2 Mei 2025	R1 A3 B1	17,0	16,2	0,8
2 Mei 2025	R2 A3 B1	17,0	16,1	0,9
2 Mei 2025	R3 A3 B1	17,0	15,9	1,1
2 Mei 2025	R4 A3 B1	17,1	15,9	1,2
2 Mei 2025	R5 A3 B1	17,1	16,3	0,8
2 Mei 2025	R1 A3 B3	17,3	16,8	0,5
2 Mei 2025	R2 A3 B3	17,4	16,8	0,6
2 Mei 2025	R3 A3 B3	17,0	16,3	0,7
2 Mei 2025	R4 A3 B3	17,1	16,5	0,6
2 Mei 2025	R5 A3 B3	17,0	16,3	0,7
2 Mei 2025	R1 A2 B3	17,1	16,2	0,9
2 Mei 2025	R2 A2 B3	17,2	16,1	1,1
2 Mei 2025	R3 A2 B3	17,3	16,6	0,7
2 Mei 2025	R4 A2 B3	17,0	16,3	0,7

Tabel 4.2 Data Hasil Ekperimen (Lanjutan)

Tanggal	Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)	Nilai Selisih Panjang (cm)
2 Mei 2025	R5 A2 B3	17,1	16,3	0,8
2 Mei 2025	R1 A1 B3	17,5	16,7	0,8
2 Mei 2025	R2 A1 B3	17,0	16,5	0,8
2 Mei 2025	R3 A1 B3	17,1	16,4	0,7
2 Mei 2025	R4 A1 B3	17,2	16,0	1,2
2 Mei 2025	R5 A1 B3	17,0	15,9	1,1
3 Mei 2025	R1 A2 B2	17,0	16,2	0,8
3 Mei 2025	R2 A2 B2	17,3	16,2	1,1
3 Mei 2025	R3 A2 B2	17,0	16,3	0,7
3 Mei 2025	R4 A2 B2	17,1	16,3	0,8
3 Mei 2025	R5 A2 B2	17,2	16,0	1,2
3 Mei 2025	R1 A1 B2	17,2	16,1	1,1
3 Mei 2025	R2 A1 B2	17,3	16,5	0,9
3 Mei 2025	R3 A1 B2	17,4	16,2	1,2
3 Mei 2025	R4 A1 B2	17,1	16,1	1,0
3 Mei 2025	R5 A1 B2	17,2	16,1	1,1
3 Mei 2025	R1 A3 B2	17,2	16,5	0,7
3 Mei 2025	R2 A3 B2	17,3	16,2	1,1
3 Mei 2025	R3 A3 B2	17,0	16,3	0,7
3 Mei 2025	R4 A3 B2	17,1	16,7	0,9
3 Mei 2025	R5 A3 B2	17,1	16,0	1,1

4.9 Pengolahan Data Hasil Eksperimen

Berdasarkan data hasil eksperimen yang diperoleh, data tersebut akan diolah untuk menganalisis pengaruh dan interaksi dari faktor eksperimen. Nilai pengaruh dan interaksi setiap faktor terhadap penyusutan pegas bonnell dianalisis dan dihitung menggunakan uji ANOVA. Kemudian, uji lanjutan atau *post-hoc test* dilakukan apabila hasil analisis ANOVA menunjukkan adanya pengaruh signifikan dari setiap faktor terhadap penyusutan pada pegas bonnell. Uji lanjutan yang digunakan adalah uji LSD dan *Tukey's HSD*. Perhitungan ANOVA dan uji lanjutan dilakukan menggunakan bantuan *software* Minitab 21.

4.9.1 Hipotesis Penelitian

Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini terdiri atas:

1. Hipotesis untuk interaksi faktor suhu dan kandungan karbon ($A \times B$) terhadap penyusutan pegas bonnell

H_{0AB} : Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara suhu dan kandungan karbon terhadap nilai penyusutan.

$$H_{0AB}: \alpha\beta_{11} = \alpha\beta_{12} = \alpha\beta_{13} = \alpha\beta_{21} = \alpha\beta_{22} = \alpha\beta_{23} = \alpha\beta_{31} = \alpha\beta_{32} = \alpha\beta_{33} = 0.$$

H_{1AB} : Terdapat interaksi yang signifikan antara suhu dan kandungan karbon terhadap nilai penyusutan.

$$H_{1AB}: \alpha\beta_{11} \neq \alpha\beta_{12} \neq \alpha\beta_{13} \neq \alpha\beta_{21} \neq \alpha\beta_{22} \neq \alpha\beta_{23} \neq \alpha\beta_{31} \neq \alpha\beta_{32} \neq \alpha\beta_{33} \neq 0.$$

2. Hipotesis untuk pengaruh faktor suhu (A) terhadap penyusutan pegas bonnell

H_{0A} : Tidak terdapat pengaruh yang signifikan dari suhu pemanas terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell.

$$H_{0A}: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.$$

H_{1A} : Terdapat pengaruh yang signifikan dari suhu pemanas terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell.

$$H_{1A}: \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq 0.$$

3. Hipotesis untuk pengaruh faktor kandungan karbon (B) terhadap penyusutan pegas bonnell

H_{0B} : Tidak terdapat pengaruh yang signifikan dari kandungan karbon terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell.

$H_0B: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0.$

H_1B : Terdapat pengaruh yang signifikan dari kandungan karbon terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell.

$H_1B: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq 0.$

4.9.2 Perhitungan ANOVA

Analisis ragam (ANOVA) digunakan untuk menguji signifikansi pengaruh dan interaksi masing-masing faktor terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell. Pengujian dilakukan dengan *confidence interval* 95% ($\alpha = 0,05$), dan keputusan diambil berdasarkan nilai *p-value* dari masing-masing faktor dan interaksi faktor eksperimen. Data hasil eksperimen ini diasumsikan terdistribusi normal.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan ANOVA

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Karbon	2	0.49733	25.12%	0.49733	0.24867	8.26	0.001
Suhu	2	0.34133	17.24%	0.34133	0.17067	5.67	0.007
Karbon*Suhu	4	0.05733	2.90%	0.05733	0.01433	0.48	0.753
Error	36	1.08400	54.75%	1.08400	0.03011		
Total	44	1.98000	100,00%				

Interpretasi hasil ANOVA dilakukan dengan melanjutkan ke tahap uji hipotesis. Dalam menafsirkan hasil perhitungan ANOVA, dilakukan uji hipotesis untuk mengetahui signifikansi pengaruh setiap faktor dalam eksperimen. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah dengan membandingkan *p-value* dari hasil ANOVA terhadap taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ dengan *confidence interval* 95%. Nilai *p-value* dalam perhitungan ANOVA diperoleh secara langsung dari *output* perangkat lunak statistik Minitab.

Apabila nilai *p-value* lebih kecil dari α , maka hipotesis nol (H_0) ditolak, yang berarti bahwa faktor tersebut memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respons. Sebaliknya, jika *p-value* lebih besar dari α , maka hipotesis nol gagal ditolak, yang mengindikasikan bahwa faktor tersebut tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Berdasarkan hasil perhitungan ANOVA yang didapatkan, berikut merupakan uji hipotesis pada masing-masing faktor:

1. Interaksi Faktor Suhu dan Kandungan Karbon

$$H_{0AB}: \alpha\beta_{11} = \alpha\beta_{12} = \alpha\beta_{13} = \alpha\beta_{21} = \alpha\beta_{22} = \alpha\beta_{23} = \alpha\beta_{31} = \alpha\beta_{32} = \alpha\beta_{33} = 0.$$

$$H_{1AB}: \alpha\beta_{11} \neq \alpha\beta_{12} \neq \alpha\beta_{13} \neq \alpha\beta_{21} \neq \alpha\beta_{22} \neq \alpha\beta_{23} \neq \alpha\beta_{31} \neq \alpha\beta_{32} \neq \alpha\beta_{33} \neq 0.$$

$$\alpha : 0,05$$

$$p\text{-value} : 0,753$$

CR : Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$

Keputusan: Terima H_0 , karena $p\text{-value} > \alpha$ atau $0,753 > 0,05$

Kesimpulan: Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara suhu dan kandungan karbon terhadap penyusutan kawat pegas bonnell. Faktor suhu dan kandungan karbon berjalan secara independen.

2. Suhu

$$H_{0A}: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0.$$

$$H_{1A}: \alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \neq 0.$$

$$\alpha : 0,05$$

$$p\text{-value} : 0,007$$

CR : Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$

Keputusan: Tolak H_0 , karena $p\text{-value} < \alpha$ atau $0,007 < 0,05$

Kesimpulan: Terdapat pengaruh yang signifikan dari faktor suhu terhadap penyusutan kawat pegas bonnell.

3. Kandungan Karbon

$$H_{0B}: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0.$$

$$H_{1B}: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq 0.$$

$$\alpha : 0,05$$

$$p\text{-value} : 0,001$$

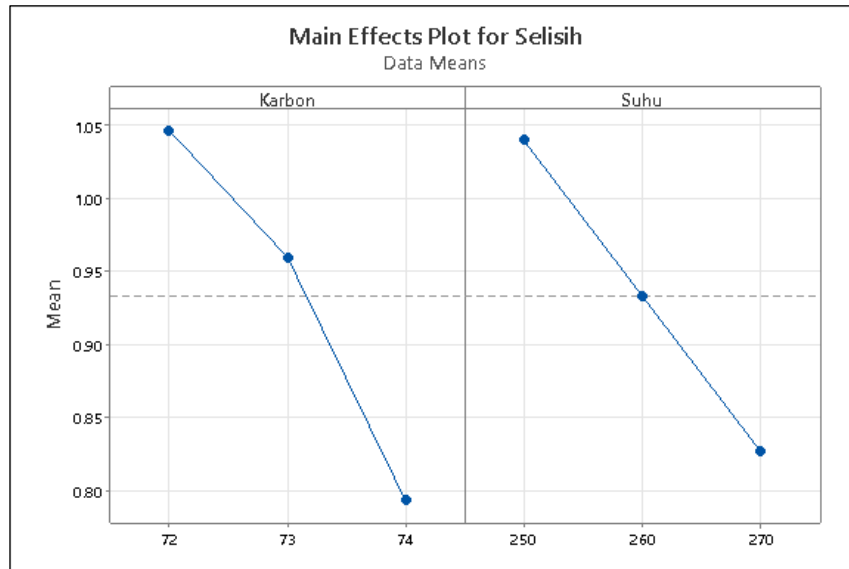
CR : Tolak H_0 jika $p\text{-value} < \alpha$.

Keputusan: Tolak H_0 , karena $p\text{-value} < \alpha$ atau $0,001 < 0,05$

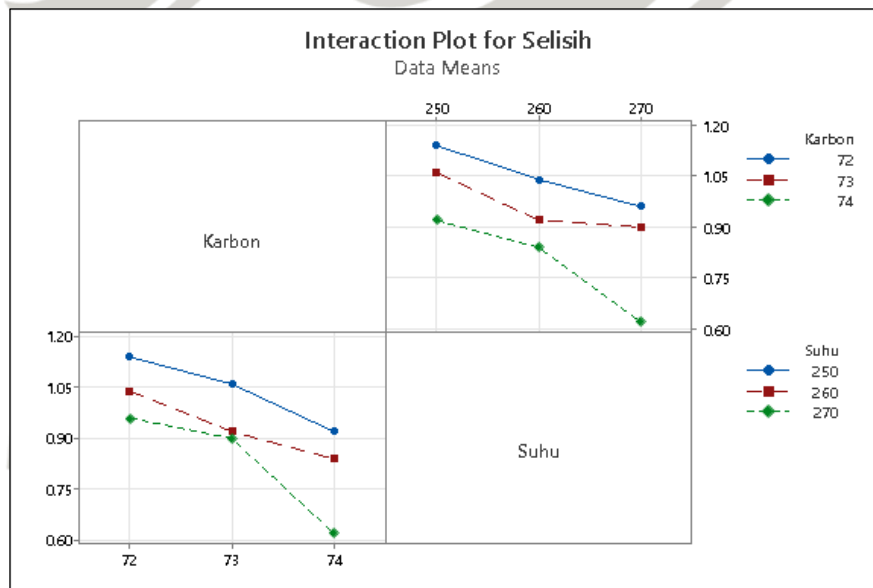
Kesimpulan: Kandungan karbon berpengaruh signifikan terhadap penyusutan kawat pegas bonnell.

Berdasarkan hasil uji hipotesis di atas menunjukkan bahwa masing-masing faktor memiliki pengaruh terhadap penyusutan kawat pegas bonnell. Hal ini ditandai dengan nilai $p\text{-value}$ dari masing-masing faktor lebih kecil dari nilai $\alpha =$

0,05. Selain itu, faktor suhu dan kandungan karbon berjalan secara independen dengan tidak ditemukan adanya interaksi dari kedua faktor tersebut.



Gambar 4.1 *Main Effect Plot* dari Respon Selisih Penyusutan



Gambar 4.2 *Interaction Plot* dari Faktor Suhu dan Kandungan Karbon

Hasil uji hipotesis menggunakan pendekatan *p-value* menunjukkan bahwa faktor suhu dan kandungan karbon berpengaruh signifikan terhadap penyusutan kawat pegas bonnell, sedangkan interaksi antar keduanya tidak signifikan. Temuan ini sejalan dengan pola yang tampak pada *main effect plot* pada Gambar 4.1 dan

interaction plot pada Gambar 4.2 terhadap variabel respon, yaitu nilai selisih panjang kawat pegas bonnell sebelum dan sesudah ditekan.

Pada *Main Effect Plot* menunjukkan kecenderungan perubahan rata-rata penyusutan terhadap perubahan level masing-masing faktor, yaitu suhu dan kandungan karbon. Grafik ini memperlihatkan bahwa faktor kandungan karbon menunjukkan penurunan rata-rata penyusutan dari karbon 0,72% menuju 0,74%. Artinya, semakin tinggi kandungan karbon, semakin rendah nilai penyusutan yang terjadi. Pola ini konsisten dan cenderung linier menurun, yang mengindikasikan bahwa karbon memiliki pengaruh yang jelas terhadap hasil penyusutan. Selain itu, faktor suhu juga menunjukkan penurunan, di mana rata-rata penyusutan tertinggi terjadi pada suhu 250°C, dan terendah pada suhu 270°C. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu pemanas berkontribusi pada menurunnya nilai penyusutan. Kedua pola penurunan tersebut sejalan dengan hasil uji hipotesis yang menunjukkan bahwa baik kandungan karbon maupun suhu berpengaruh signifikan secara statistik terhadap penyusutan kawat pegas bonnell, dengan *p-value* masing-masing sebesar 0,001 dan $0,007 < 0,05$.

Interaction Plot disusun untuk melihat apakah terdapat efek interaktif antara faktor suhu dan kandungan karbon terhadap penyusutan. Dalam grafik tersebut, terlihat bahwa garis-garis antar level perlakuan tidak saling berpotongan tajam. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi antara suhu dan karbon tidak signifikan, yang selaras dengan hasil uji ANOVA dan uji hipotesis yang menunjukkan nilai *p-value* sebesar 0,753 lebih besar dari α sebesar 0,05. Meskipun demikian, secara visual terlihat bahwa kombinasi karbon 0,74% dan suhu 270°C menghasilkan rata-rata penyusutan paling rendah dibandingkan kombinasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa masing-masing faktor bekerja secara independen dalam memengaruhi respons, dan kombinasi tersebut dapat dianggap sebagai perlakuan optimal dari segi performa hasil.

4.9.3 Analisis Uji Lanjutan LSD dan HSD

Pada perhitungan ANOVA, faktor suhu dan kandungan karbon memiliki pengaruh signifikan terhadap penyusutan kawat pegas bonnell secara independen. Oleh karena itu, dilakukan uji lanjut menggunakan uji *Fisher's LSD* dan *Tukey's*

HSD untuk mengetahui pasangan perlakuan mana yang memiliki perbedaan nyata secara statistik terhadap nilai penyusutan pegas bonnell. Dalam analisis statistik, uji lanjutan (*post-hoc test*) digunakan untuk mengetahui kelompok mana yang berbeda nyata setelah uji ANOVA menunjukkan adanya perbedaan secara keseluruhan.

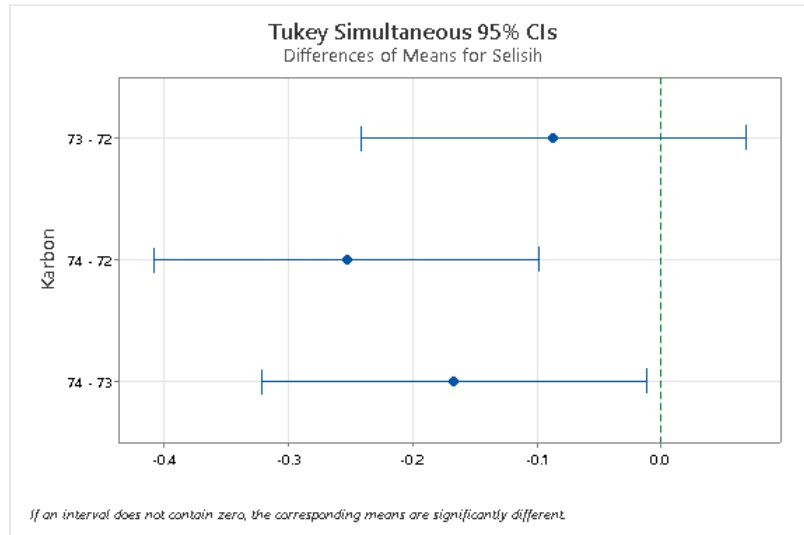
Uji LSD merupakan uji lanjut yang bersifat lebih liberal dan digunakan ketika peneliti sudah memiliki rencana perbandingan tertentu antar perlakuan. Oleh karena itu, uji LSD termasuk dalam kategori *planned comparisons* atau pengujian terencana, karena hanya membandingkan beberapa pasangan rata-rata yang telah ditentukan sebelumnya. Kelebihannya adalah sensitivitas tinggi dalam mendeteksi perbedaan signifikan. Namun, jika digunakan untuk membandingkan semua pasangan tanpa rencana, uji LSD berisiko tinggi terhadap kesalahan tipe I, yaitu menyatakan ada perbedaan padahal sebenarnya tidak ada.

Sebaliknya, uji HSD, atau sering disebut juga sebagai Uji Beda Nyata Jujur (BNJ), digunakan untuk membandingkan seluruh pasangan rata-rata perlakuan secara menyeluruh. Uji ini dirancang untuk mengontrol tingkat kesalahan tipe I secara keseluruhan saat melakukan banyak perbandingan. Uji ini cocok digunakan penguji yang tidak mengetahui pasangan perlakuan mana yang berbeda dan hendak membandingkan semua pasangan rata-rata perlakuan. Uji HSD termasuk dalam kategori *unplanned comparisons*, atau pengujian tanpa rencana sebelumnya. Meskipun lebih konservatif daripada LSD, uji ini sangat cocok digunakan ketika semua kombinasi perlakuan ingin dibandingkan dengan cara yang adil dan seimbang. Uji LSD cocok untuk perbandingan terbatas dan terarah, sedangkan uji Tukey cocok untuk eksplorasi semua pasangan perlakuan secara menyeluruh setelah ANOVA menyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan. Uji LSD dan HSD ini dilakukan menggunakan *software* Minitab 21. Data hasil uji lanjutan HSD dan LSD pada faktor suhu dan kandungan karbon dapat dilihat di Gambar 4.3 hingga Gambar 4.6.

Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence

Karbon	N	Mean	Grouping
72	15	1.04667	A
73	15	0.96000	A
74	15	0.79333	B

Means that do not share a letter are significantly different.

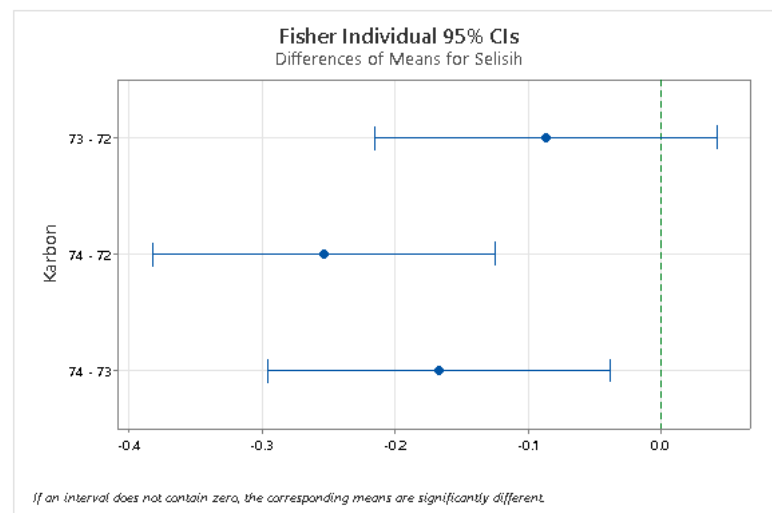


Gambar 4.3 Uji HSD pada Faktor Kandungan Karbon

Grouping Information Using Fisher LSD Method and 95% Confidence

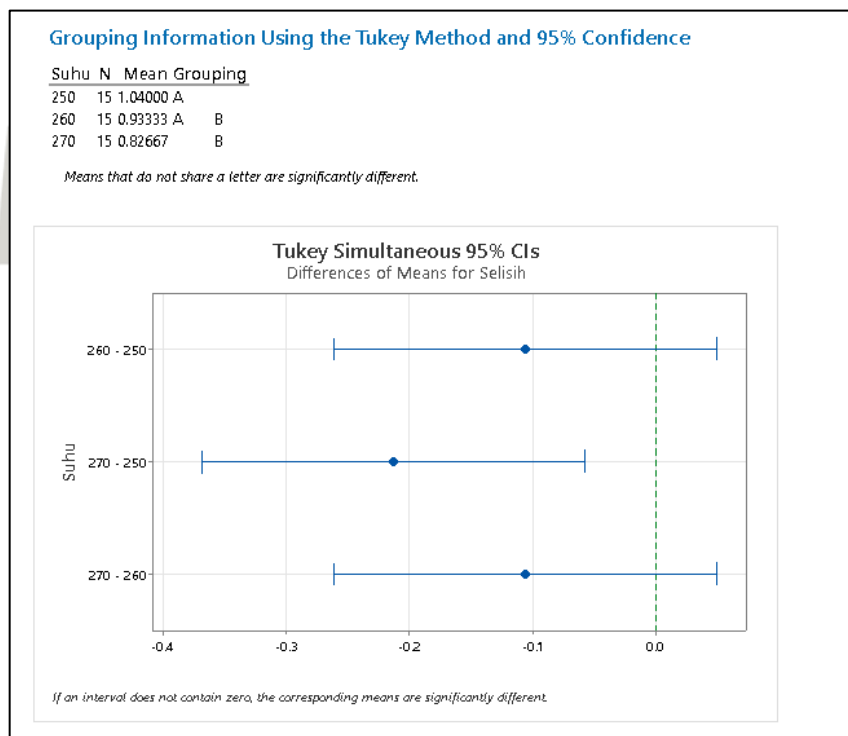
Karbon	N	Mean	Grouping
72	15	1.04667	A
73	15	0.96000	A
74	15	0.79333	B

Means that do not share a letter are significantly different.

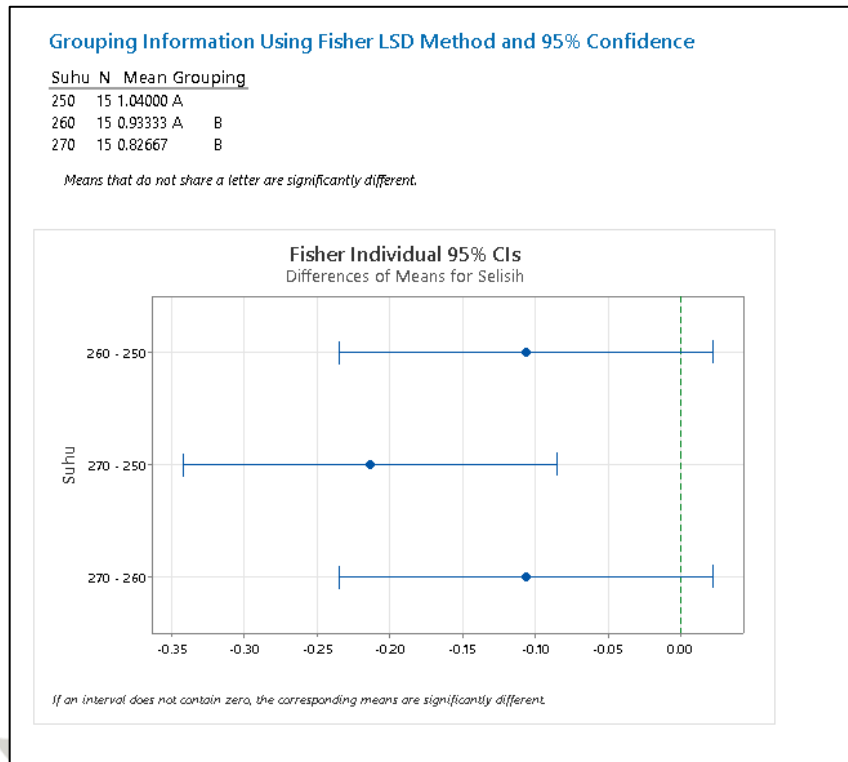


Gambar 4.4 Uji LSD pada Faktor Kandungan Karbon

Gambar 4.3 dan 4.4 menunjukkan grafik dari hasil perhitungan uji LSD dan HSD dari faktor kandungan karbon. Berdasarkan hasil analisis uji lanjut menggunakan metode HSD dan LSD, diperoleh bahwa perlakuan karbon 0,72% C memiliki perbedaan yang signifikan terhadap selisih penyusutan jika dibandingkan dengan karbon 0,74% C, namun tidak berbeda signifikan dengan karbon 0,73% C. Dari tabel *Tukey Grouping*, karbon 0,72% C dan 0,73% C termasuk dalam grup yang A, sementara karbon 0,74% C tergabung dalam grup B. Hal ini menunjukkan bahwa karbon 0,74% C memberikan hasil selisih penyusutan yang secara signifikan lebih rendah dibanding karbon 0,72% C, sedangkan karbon 0,73% C berada di antara keduanya dan tidak berbeda nyata terhadap keduanya. Hasil tersebut diperkuat oleh uji LSD, yang menunjukkan pola perbedaan yang konsisten. Karbon 0,74% C berbeda signifikan dengan karbon 0,72% C, namun tidak berbeda signifikan dengan karbon 0,73% C. Rentang selang kepercayaan pada grafik menunjukkan bahwa interval karbon 0,74% C – 0,72% C tidak mencakup nol, yang menandakan perbedaan signifikan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan kandungan karbon dari 0,72% C ke 0,74% C cenderung menurunkan nilai selisih penyusutan secara signifikan, sementara perbedaan nilai penyusutan antara karbon 0,72% C dan 0,73% C tidak terlalu mencolok secara statistik.



Gambar 4.5 Uji HSD pada Faktor Suhu



Gambar 4.6 Uji LSD pada Faktor Suhu

Gambar 4.5 dan 4.6 menunjukkan grafik dari hasil perhitungan uji LSD dan HSD dari faktor suhu. Berdasarkan hasil uji lanjut (*post-hoc*) menggunakan metode Tukey HSD dan Fisher LSD, diketahui bahwa terdapat perbedaan yang signifikan dalam nilai selisih penyusutan antar tingkat perlakuan faktor suhu. Dari hasil uji HSD, kelompok suhu 250°C dan 260°C tergabung dalam grup yang sama (Grup A), yang menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara keduanya ($p > 0,05$). Sama halnya dengan suhu 260°C dan 270°C tergabung dalam grup yang berbeda (Grup B), yang menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan antara kedua pasangan tersebut. Namun, suhu 250°C dan 270°C berada di grup berbeda, yang berarti nilai selisih penyusutan pada suhu 250°C berbeda secara signifikan dengan suhu 270°C ($p < 0,05$). Hasil ini didukung pula oleh uji LSD, yang menunjukkan pola perbedaan yang sama: tidak ada perbedaan signifikan antara pasangan suhu 250°C – 260°C dan pasangan suhu 260°C – 270°C. Akan tetapi, pasangan suhu 270°C – 250°C menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan keduanya. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa tingkat

suhu 270°C menghasilkan penyusutan paling rendah, berbeda signifikan dari Suhu 250°C. Sebaliknya, suhu 260°C berada di tengah, dan tidak berbeda signifikan dari keduanya.

4.10 Analisis Hasil Eksperimen

Analisis hasil eksperimen dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan suhu dan kandungan karbon terhadap penyusutan kawat pegas bonnell, serta menentukan kombinasi perlakuan yang paling optimal untuk meminimalkan nilai penyusutan. Penelitian ini menggunakan desain eksperimen *full factorial* dengan dua faktor utama, yaitu suhu pemanas (250°C, 260°C, dan 270°C) dan kandungan karbon (0,72%, 0,73%, dan 0,74%). Data hasil kombinasi level faktor eksperimen optimal dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.4 Hasil Kombinasi Level Faktor Optimal

Faktor	Kode	Level	Setting Level
Suhu	A	3	270°C
Kandungan Karbon	B	3	0,74% C

Berdasarkan hasil uji ANOVA yang telah dilakukan sebelumnya, baik faktor suhu maupun kandungan karbon menunjukkan pengaruh yang signifikan secara independen terhadap nilai penyusutan kawat pegas bonnell. Selanjutnya, analisis uji lanjut menggunakan metode HSD dan LSD menunjukkan bahwa perlakuan suhu 270°C menghasilkan nilai penyusutan paling rendah dan berbeda signifikan dibanding suhu 250°C. Perlakuan kandungan karbon 0,74% C menghasilkan nilai penyusutan secara signifikan lebih kecil dibanding kandungan karbon 0,72% dan 0,73% C. Dengan demikian, kombinasi optimal yang direkomendasikan dalam penelitian ini adalah suhu pemanas 270°C dan kandungan karbon 0,74% C, karena kombinasi ini menghasilkan nilai penyusutan rata-rata terendah, yaitu kurang dari 1 cm dan telah memenuhi standar perusahaan (≤ 1 cm).

Namun, terdapat kendala yang ditemukan selama pelaksanaan eksperimen ini. Mesin Spull yang memproduksi pegas bonnell memiliki kelemahan yang mana membutuhkan masa penyesuaian saat kawat mentah dimasukkan ke dalam mesin. Penyesuaian yang dimaksud adalah saat kawat dibentuk di dalam mesin dan pemasangan knot pada pegas sehingga menyebabkan tinggi pegas bonnell yang

dihasilkan melebihi dari 17 cm. Hal ini mengakibatkan adanya variasi pada panjang pegas bonnell hingga melebihi 17 cm pada data hasil eksperimen. Akan tetapi, variasi tinggi ini tidak menjadi permasalahan penting bagi perusahaan dan lolos untuk dilanjutkan ke proses produksi selanjutnya. Perusahaan menetapkan bahwa variasi tinggi tidak berpengaruh terhadap kualitas produk *springbed*, tetapi nilai penyusutan yang dihasilkan setiap pegas.

4.11 Analisis Material Baja Karbon

Kawat pegas bonnell yang digunakan di PT Panca Graha Pratama memakai material baja karbon dengan kategori berkarbon tinggi. Material pegas yang digunakan dalam proses produksi *springbed* di industri *furniture* umumnya berbahan dasar baja karbon. Standar kadar karbon baja yang digunakan pada pegas sebesar 0,60% hingga 0,85% C (ASM, 2021). Karakteristik fisik dan kimia dari baja karbon sangat memengaruhi performa pegas, khususnya dalam hal ketahanan terhadap deformasi serta kemampuan menahan beban dalam jangka waktu panjang. Oleh karena itu, dilakukan analisis komposisi kimia terhadap material baja karbon pada pegas bonnell, guna memastikan bahwa material memenuhi standar mutu yang disyaratkan. Analisis ini dilakukan dengan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang hasilnya dapat dilihat pada Lampiran B. Data yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi kandungan unsur-unsur yang terkandung dalam kawat baja karbon 0,72% C, 0,73% C, dan 0,74% C. Data perbandingan kandungan unsur pada kawat baja karbon 0,72% C, 0,73% C, dan 0,74% C dapat dilihat di Tabel 4.6.

Material pegas bonnell pada produk *springbed* yang dianalisis terdiri atas tiga sampel baja karbon, yaitu 0,72% C, 0,73% C, dan 0,74% C dengan komposisi kimia yang diperoleh melalui pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF). Hasil analisis menunjukkan bahwa unsur utama penyusun baja adalah besi (Fe), dengan kandungan mencapai 90–93%. Selain Fe, ditemukan pula unsur-unsur paduan dan jejak, seperti fosfor (P), mangan (Mn), kromium (Cr), seng (Zn), serta beberapa unsur tanah jarang dan kontaminan logam lain. Masing-masing unsur memiliki pengaruh yang berbeda terhadap performa material, khususnya dalam hal penyusutan pegas bonnell. Berikut adalah analisis pengaruh setiap unsur:

1. Besi (Fe)

Besi merupakan unsur utama penyusun baja karbon (90–93%). Kandungan besi yang tinggi penting untuk membentuk struktur logam yang konsisten dan kuat. Namun, jika disertai unsur pengotor seperti Fosfor (P) dan Seng (Zn), sifat mekanik baja tetap bisa menurun (Callister & Rethwisch, 2018).

2. Fosfor (P)

Fosfor ditemukan dalam kadar tinggi, yaitu 1.9–2.5%. Menurut Davis (1996), kandungan fosfor meningkatkan kerapuhan logam dan memperbesar risiko retak mikro akibat tegangan. Hal ini berkontribusi pada peningkatan penyusutan pegas.

3. Mangan (Mn)

Mangan dengan kadar 0.53–0.64% dapat memperkuat baja, meningkatkan ketahanan deformasi, dan menetralkan efek sulfur. Kandungan Mangan ideal untuk mengurangi penyusutan (MacKenzie & Totten, 2003).

4. Kromium (Cr)

Kromium dengan kandungan 0.12–0.16% meningkatkan kekerasan dan stabilitas struktur mikro baja karbon sehingga dapat membantu mengurangi penyusutan akibat deformasi yang berulang (Chatterjee & Ghosh, 2008).

5. Seng (Zn)

Kandungan seng yang tinggi, seperti kadar 2.22–4.14% yang dalam baja karbon eksperimen berisiko menyebabkan kelemahan struktural lokal dan segregasi (Hansen, 2001). Dalam baja karbon, Zn merupakan unsur kotor bagi sifat mekanis baja dan dapat memperbesar nilai penyusutan pada pegas.

6. Kalsium (Ca)

Menurut Chakraborty & Kumar (2015), Kalsium digunakan untuk memperbaiki inklusi dalam baja, namun pada kadar tinggi ($>0.5\%$) bisa menurunkan homogenitas. Efeknya terhadap penyusutan tergantung

kadarnya. Semakin tinggi kadar Ca dalam baja, dapat memperbesar nilai penyusutan.

7. Nikel (Ni)

Nikel (0.04–0.05%) meningkatkan ketangguhan pada temperatur rendah (Lippold & Kotecki, 2005). Pada kadar ini, tidak signifikan terhadap penyusutan sehingga tidak berkontribusi langsung terhadap nilai penyusutan.

8. Tembaga (Cu)

Tembaga membantu ketahanan korosi, namun efek terhadap penyusutan relatif (Davis, 2001). Dengan kadar 0.061–0.10% yang ada pada kawat baja karbon 0,72% C, 0,73% C, dan 0,74% C ini tidak berkontribusi dalam nilai penyusutan.

9. Rubidium (Rb)

Rubidium adalah unsur langka dalam baja, kemungkinan berasal dari kontaminasi. Kehadiran Rubidium (Rb) dalam baja karbon bersifat incidental dan pasif sehingga tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap penyusutan pegas (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Pada kadar rendah (seperti 0.43–0.64% di data XRF), tidak berdampak signifikan terhadap penyusutan pegas bonnel, namun bisa menjadi indikator ketidakmurnian proses metalurgi.

10. Lantanum (La)

Lantanum dapat meningkatkan kebersihan logam. Dalam kadar 0.02–0.50%, efeknya terhadap penyusutan tidak terlalu signifikan, karena dapat membantu membersihkan logam dari inklusi oksida dan sulfida (Evans, 1990). Namun, pada kadar 0.02–0.50%, seperti yang terdeteksi dalam sampel, tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap penyusutan pegas bonnel. Efeknya lebih ke peningkatan kebersihan mikrostruktur, bukan kekuatan atau elastisitas pegas secara langsung.

11. Europium (Eu)

Unsur tanah jarang, biasanya tidak aktif dalam sifat mekanik baja. Europium adalah unsur non-aktif secara mekanik dalam baja karbon. Pada kadar 0.6%–0.7%, unsur ini tidak memberikan efek signifikan

terhadap struktur mikro maupun sifat mekanik logam netral (Cotton, 2006). Oleh karena itu, pengaruhnya terhadap penyusutan pegas bonnel dianggap netral, dan lebih mencerminkan ketidakkonsistenan bahan baku daripada variabel desain material.

12. Ytterbium (Yb)

Ytterbium adalah unsur pasif dan tidak berfungsi dalam struktur baja pada kadar yang ditemukan. Kandungannya yang kecil ($\leq 0.06\%$) tidak berdampak nyata terhadap sifat mekanik baja, termasuk terhadap penyusutan pegas bonnel. Keberadaannya lebih mencerminkan kontaminasi trace element daripada elemen fungsional (Habashi, 1997).

13. Skandium (Sc)

Unsur minor (0.008%), umum dalam paduan aluminium, bukan dalam kategori baja. Skandium adalah unsur non-fungsional dalam baja karbon pada kadar 0.008%. Meskipun berguna dalam paduan aluminium, kehadirannya dalam baja dianggap sebagai kontaminasi minor, dan tidak berdampak terhadap penyusutan pegas bonnel (Gschneidner, 1984).

UNIVERSITAS
MA CHUNG

Tabel 4.5 Perbandingan Kandungan Unsur pada Kawat Baja Karbon 0,72% C, 0,73% C, dan 0,74% C

Karbon	Unsur													
	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Rb	La	Eu	Yb	Sc	Br
0.72% C	2.3%	0.25%	0.12%	0.64%	92.96%	0.05%	0.1%	2.22%	0.63%	0.02%	0.72%	-	-	-
0.73% C	1.9%	0.46%	0.16%	0.56%	92.65%	0.04%	0.061%	2.77%	0.64%	0.02%	0.63%	0.06%	0.008%	-
0.74% C	2.5%	0.63%	0.14%	0.53%	90.26%	0.04%	0.064%	4.14%	0.43%	0.50%	0.72%	0.00%	-	0.5%

14. Bromin (Br)

Bromin termasuk dalam kategori unsur non-logam. Bromin (Br) adalah unsur yang tidak seharusnya ada dalam baja struktural. Pada kadar 0.50%, Bromin berpotensi menurunkan ketahanan mekanik dan stabilitas mikrostruktur, sehingga dapat menyebabkan penyusutan pegas bonnel lebih cepat, terutama dalam penggunaan jangka panjang atau kondisi lingkungan ekstrem (Earnshaw & Greenwood, 2012).

Hasil analisis terhadap komposisi kimia material baja karbon yang digunakan dalam pembuatan pegas bonnel menunjukkan bahwa kandungan unsur-unsur tertentu berpengaruh signifikan terhadap kecenderungan penyusutan, terutama setelah mengalami siklus pemanasan (*thermal loading*). Unsur fosfor (P) dan seng (Zn) teridentifikasi sebagai faktor dominan penyebab peningkatan penyusutan, karena keduanya cenderung meningkatkan kerapuhan logam dan memicu retakan mikro. Pada kondisi penggunaan jangka panjang, siklus pemanasan berulang dapat memperbesar cacat ini, sehingga mengakibatkan deformasi permanen dan penurunan elastisitas pegas.

Sebaliknya, unsur seperti mangan (Mn) dan kromium (Cr) berperan penting dalam memperkuat mikrostruktur baja dengan menstabilkan batas butir dan meningkatkan ketahanan terhadap deformasi termal, sehingga mampu menurunkan risiko penyusutan. Unsur lainnya seperti nikel (Ni), tembaga (Cu), kalsium (Ca) dalam kadar rendah, serta unsur tanah jarang seperti lantanum (La), europium (Eu), ytterbium (Yb), dan skandium (Sc) menunjukkan pengaruh netral atau tidak signifikan dalam kadar yang terdeteksi. Besi (Fe) tetap menjadi komponen utama struktur baja karbon, namun kombinasi dan keseimbangan unsur minor sangat menentukan kualitas akhir pegas.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penyusutan paling rendah terjadi pada suhu pemanasan 270°C. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme relaksasi tegangan internal (*stress relaxation*) yang terjadi tanpa merusak mikrostruktur (Callister & Rethwisch, 2018). Pada suhu ini, baja karbon belum mengalami transformasi fasa, tapi cukup panas untuk melonggarkan dislokasi dan melepaskan tegangan sisa akibat proses mekanis sebelumnya. Hal ini membuat struktur logam menjadi lebih stabil secara dimensi, sehingga mampu

mempertahankan elastisitas dalam siklus beban berulang (Totten & MacKenzie, 2003).

Dengan demikian, pengendalian kadar P dan Zn, serta pengaturan suhu pemanasan yang tepat menjadi dua faktor penting dalam mengoptimalkan daya tahan pegas bonnel dan meminimalkan penyusutan selama masa pakai. Proses produksi pegas yang mempertimbangkan komposisi kimia dan perlakuan panas yang sesuai akan lebih mampu menjaga kestabilan dan durabilitas struktur pegas, terutama dalam menghadapi beban siklik jangka panjang pada produk *springbed*.

4.12 Pemilihan Kombinasi Optimal Oleh Perusahaan

Setelah ditemukan hasil kombinasi optimal dari level faktor eksperimen, maka kombinasi optimal tersebut direkomendasikan kepada perusahaan. Kombinasi level optimal tersebut adalah level faktor suhu 270°C dan level kandungan karbon 0,74% C. Namun, terdapat kelemahan dari pilihan kombinasi level optimal tersebut selama proses pembuatan pegas bonnel menggunakan mesin Spull. Ketika gulungan material kawat mentah kandungan karbon 0,74% C dimasukkan ke dalam mesin Spull, terjadi banyak cacat pegas bonnel yang diproduksi. Kandungan karbon yang tinggi dari kawat 0,74% C menyebabkan mesin spull kesulitan dalam membentuk dan memotong kawat mentah menjadi pegas. Bentuk cacat produksi yang dimaksud adalah bentuk pegas yang bengkok, bentuk knot pegas yang tidak sesuai standar perusahaan, dan ujung antar kedua knot bagian atas dan bawah tidak sejajar.

Berdasarkan kondisi tersebut, kombinasi level faktor suhu 270°C dan level kandungan karbon 0,74% C tidak dipilih oleh perusahaan. Apabila kombinasi tersebut diaplikasikan ke mesin Spull akan menyebabkan banyak pegas bonnel yang cacat produksi. Selain itu, kombinasi level 270°C dan level 0,74% C memiliki sifat material yang keras dan kaku untuk produk *springbed* sehingga kurang nyaman digunakan meskipun ditambah dengan busa/spons. Hal ini mengurangi kelenturan dan elastisitas dari *springbed* yang menggunakan kombinasi tersebut. Dengan ini, diperlukan kombinasi lain untuk mencapai tujuan penelitian dan tujuan perusahaan, yaitu mengurangi nilai penyusutan pada pegas bonnel. Dari seluruh hasil kombinasi eksperimen, perusahaan memilih kombinasi level kandungan karbon 0,73% C

dengan level suhu 250°C. Pemilihan kombinasi ini disebabkan oleh sifat material pegas yang dihasilkan tidak sekaku dari material pegas yang menggunakan kombinasi optimal. Rata-rata penyusutan pegas bonnell dari seluruh kombinasi dapat dilihat di tabel 4.7.

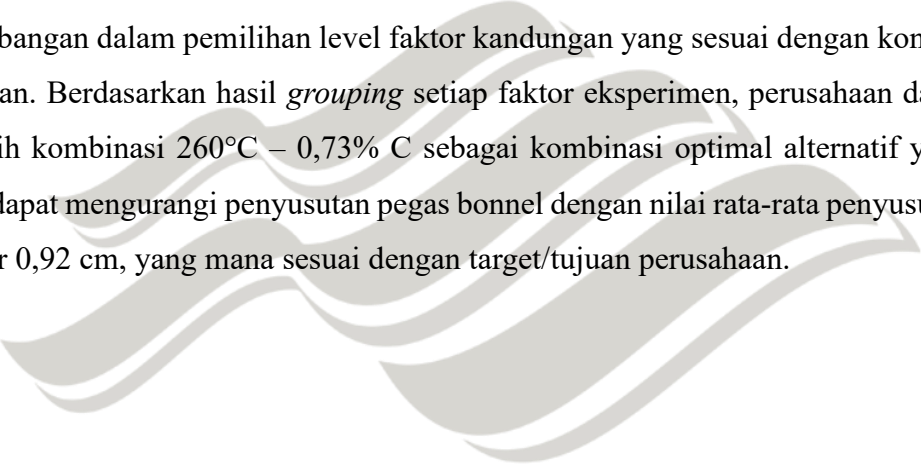
Tabel 4.6 Perbandingan Rata-rata Penyusutan Seluruh Kombinasi

No	Kombinasi	Rata-rata Penyusutan (cm)	Keterangan
1	250°C – 0,72% C	1,14	Standar Perusahaan
2	260°C – 0,72% C	1,04	
3	270°C – 0,72% C	0,96	
4	250°C – 0,73% C	1,06	Kombinasi Terpilih
5	260°C – 0,73% C	0,92	
6	270°C – 0,73% C	0,90	
7	250°C – 0,74% C	0,92	Kombinasi Optimal
8	260°C – 0,74% C	0,84	
9	270°C – 0,74% C	0,62	

Pada tabel 4.7, kombinasi 250°C – 0,72% C yang merupakan standar kombinasi pembuatan pegas bonnell perusahaan memiliki rata-rata penyusutan sebesar 1,14 cm. Sebaliknya, kombinasi 270°C – 0,74% C yang merupakan kombinasi optimal memiliki rata-rata penyusutan sebesar 0,62 cm. Kombinasi optimal ini berhasil menurunkan nilai penyusutan pada pegas bonnell dan sesuai dengan standar kualitas penyusutan pegas bonnell dari perusahaan, yaitu pegas yang menyusut kurang dari 1 cm. Akan tetapi, perusahaan memilih kombinasi 250°C – 0,73% C yang memiliki rata-rata penyusutan sebesar 1,06 cm, yang mana tidak sesuai standar penyusutan pegas bonnell perusahaan. Perusahaan mempertimbangkan kondisi mesin Spull yang kurang mampu menyesuaikan kondisi kawat baja karbon 0,74% C dan mengubah aturan suhu pada mesin pemanas diluar dari 250°C. Oleh karena itu, perusahaan disarankan untuk dapat memilih kombinasi 260°C – 0,73% C dan 270°C – 0,73% C yang mana rata-rata penyusutannya kurang dari 1 cm sehingga dapat sesuai dengan standar kualitas penyusutan pegas bonnell.

Selain itu, pemilihan kombinasi optimal dapat didasarkan dengan uji lanjutan LSD dan HSD di Gambar 4.3 hingga Gambar 4.6. Pemilihan ini ditentukan berdasarkan hasil *grouping* dari faktor suhu dan kandungan karbon. Pada faktor

suhu, level faktor 270°C berada di grup yang sama dengan level faktor 260°C di grup B. Hal ini menunjukkan bahwa level faktor suhu 260°C dan 270°C tidak memiliki perbedaan signifikan. Level faktor suhu 260°C dapat menjadi pilihan alternatif untuk mengganti level suhu 270°C sebagai kombinasi optimal dalam mengurangi penyusutan pegas bonnell. Pada faktor kandungan karbon, level faktor 0,74% C menjadi satu-satunya level faktor kandungan karbon yang berada di grup B, sedangkan 0,72% C dan 0,73% C berada di grup A. Hal ini menyebabkan level 0,74% C tidak memiliki pilihan level faktor alternatif sebagai pengganti level optimal. Namun, level faktor 0,72% C dan 0,73% C dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam pemilihan level faktor kandungan yang sesuai dengan kondisi lapangan. Berdasarkan hasil *grouping* setiap faktor eksperimen, perusahaan dapat memilih kombinasi 260°C – 0,73% C sebagai kombinasi optimal alternatif yang mana dapat mengurangi penyusutan pegas bonnell dengan nilai rata-rata penyusutan sebesar 0,92 cm, yang mana sesuai dengan target/tujuan perusahaan.



UNIVERSITAS
MA CHUNG

Bab V

Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk mengurangi tingkat penyusutan kawat pegas bonnell di PT Panca Graha Pratama, yang sebelumnya memiliki rata-rata penyusutan sebesar 1,26 cm dengan persentase cacat mencapai 38,14%. Penyusutan ini menyebabkan banyak produk tidak memenuhi standar kualitas, sehingga berdampak pada efisiensi produksi dan kualitas springbed. Untuk itu, penelitian ini menggunakan metode *full factorial design* dengan dua faktor utama, yaitu suhu pemanas (250°C, 260°C, dan 270°C) dan kandungan karbon (0,72%, 0,73%, dan 0,74%). Melalui analisis ANOVA serta uji lanjut LSD dan HSD, diketahui bahwa baik suhu pemanas maupun kandungan karbon secara mandiri memberikan pengaruh yang signifikan terhadap besar kecilnya penyusutan pada kawat pegas. Meskipun interaksi antara kedua faktor tidak menunjukkan pengaruh signifikan, efek utama dari masing-masing faktor tetap berperan penting dalam menentukan hasil akhir proses produksi.

Dari keseluruhan kombinasi yang diuji, diperoleh hasil bahwa kombinasi suhu pemanas sebesar 270°C dan kandungan karbon sebesar 0,74% C menghasilkan nilai penyusutan paling kecil dibandingkan kombinasi lainnya. Nilai penyusutan pada kombinasi ini berada di bawah standar maksimum perusahaan, yaitu 0,62 cm, sehingga dianggap sebagai kombinasi optimal yang dapat diterapkan dalam proses produksi. Namun, adanya penyesuaian kondisi mesin Spull dan kenyamanan penggunaan produk *springbed*, perusahaan tidak dapat menerapkan kombinasi optimal. Sebaliknya, perusahaan memilih kombinasi 250°C dan 0,73% C kandungan karbon sebagai solusi terpilih, yang masih memberikan hasil lebih baik dibandingkan standar awal, yaitu dengan penyusutan rata-rata sebesar 1,06 cm, dibandingkan standar perusahaan sebelumnya yaitu 1,14 cm. Dengan demikian, penerapan kombinasi terpilih ini tetap mengurangi nilai penyusutan pada pegas bonnell meskipun tidak sesuai dengan standar perusahaan terkait penyusutan pegas bonnell.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan keterbatasan yang ditemui selama proses eksperimen, maka peneliti memberikan saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Untuk peneliti selanjutnya, disarankan untuk menambahkan faktor lain, seperti metode pendinginan dan jumlah lilitan dalam penelitian selanjutnya, yang mungkin juga memberikan kontribusi terhadap penyusutan.



Daftar Pustaka

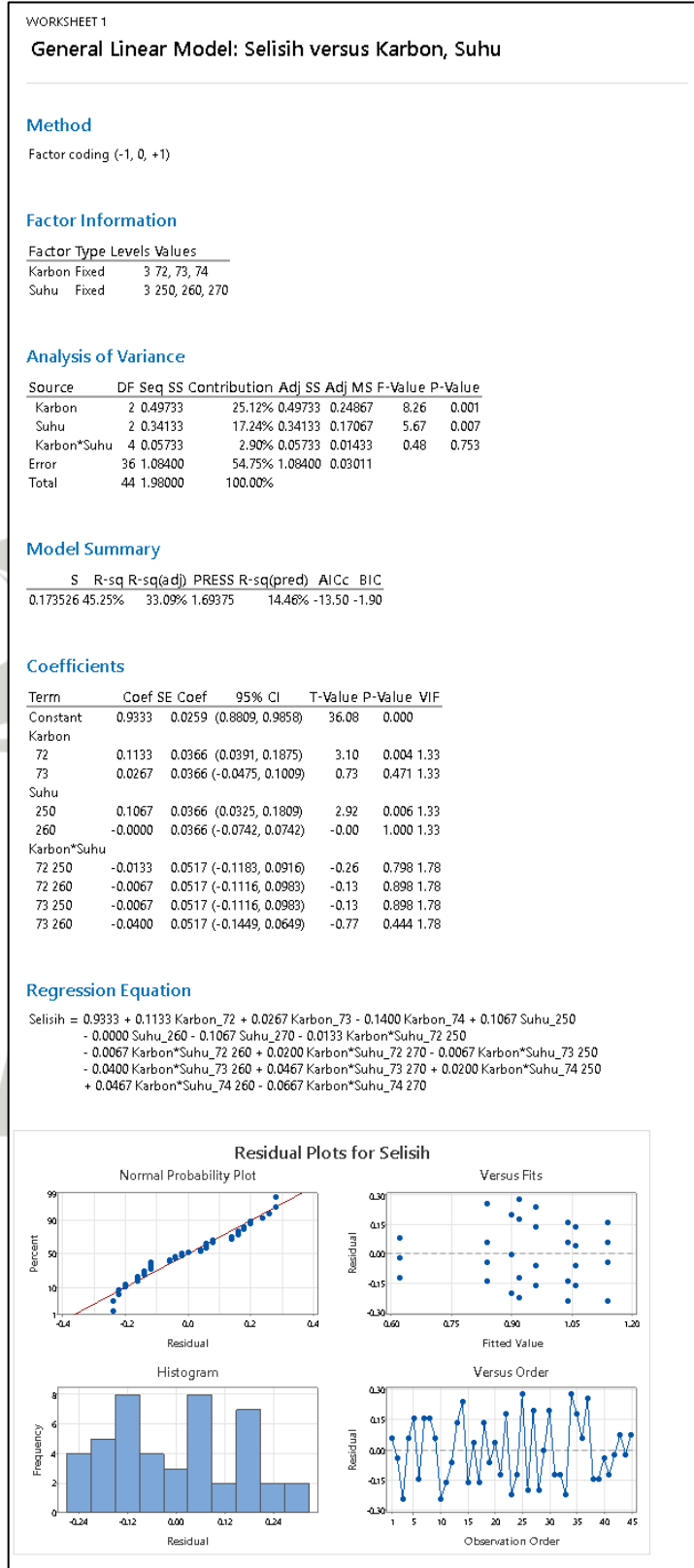
- Ardani, F., Ginting, R., & Ishak, A. (2014). Perancangan Desain Produk Spring Bed dengan Menggunakan Metode Quality Function Deployment. *e-Jurnal Teknik Industri FT USU*, 5(1), 1–6.
- Aresta, M. (2010). *Perancangan Eksperimen Taguchi dalam Menentukan Penyetelan yang Optimal pada Proses Pengemasan Untuk Mengurangi Variasi Berat Isi Kemasan Gula Pasir dan Creamer*. Universitas Indonesia.
- ASM. (1991). *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*.
- ASTM. (2021). *ASTM A229 / A229M – 20: Standard Specification for Steel Wire, High-Carbon, for Mechanical Springs*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10 ed.). Wiley.
- Chakraborty, S., & Kumar, S. (2015). Effect of Calcium Treatment on Inclusion Modification and Mechanical Properties of Steel. *Journal of Metallurgy and Materials Science*, 57(1), 25–32.
- Chatterjee, A., & Ghosh, A. (2008). *Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice*. Prentice-Hall of India.
- Cotton, S. (2006). *Lanthanide and Actinide Chemistry*. John Wiley & Sons.
- Dantes, N. (2017). *Desain Eksperimen dan Analisis Data* (1 ed.). Rajawali Pers.
- Davis, J. R. (1996). *ASM Specialty Handbook: Carbon and Alloy Steels*. ASM International.
- Davis, J. R. (2001). *Copper and Copper Alloys*. ASM International.
- Dewi, S., Ermina, R., Kasih, V., Hefiana, F., Sunarmo, A., & Widianingsih, R. (2023). Analisis Penerapan Metode One Way ANOVA Menggunakan Alat Statistik SPSS. *Jurnal Riset Akuntansi Soedirman*, 2(2), 121–132. <https://doi.org/10.32424/1.jras.2023.2.2.10815>
- Earnshaw, A., & Greenwood, N. N. (2012). *Chemistry of the elements* (2 ed.). Butterworth-Heinemann.
- Evans, R. D. (1990). Trace Elements in Steel and Their Effects. *Iron and Steel Engineer*, 67(11), 43–50.
- Fajrin, J., Pathurahman, P., & Pratama, L. G. (2016). Aplikasi Metode Analysis of Variance (ANOVA) untuk Mengkaji Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Sifat Fisik dan Mekanik Mortar. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 12(1), 11. <https://doi.org/10.25077/jrs.12.1.11-24.2016>
- Gaspersz, V. (1991). *Metode Perancangan Percobaan*. Armico.
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical Procedures for Agricultural Research* (2 ed.). John Wiley & Sons.
- Gschneidner, K. A. Jr. (1984). Scandium: Its Occurrence, chemistry, Physics, Metallurgy, Biology and Technology. *Journal of the Less Common Metals*, 100(1), 27–43. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-5088\(84\)90180-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0022-5088(84)90180-3)

- Gui, V. C., Jefferson, W., & Alifen, R. S. (2022). Faktor-faktor yang Mempengaruhi Performa Proyek Konstruksi di Masa Pandemi. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 11(1).
- Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press.
- Habashi, F. (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy* (Vol. 3). Wiley-VCH.
- Hansen, N. (2001). Zinc and zinc alloys. *Elsevier*, 9885–9890.
- Hartawan, B. (2018). *Analisis Pengaruh Perlakuan Panas Artificial Aging pada Aluminium Magnesium Silikon (Al-Mg-Si) yang Dicor Ulang Terhadap Sifat Mekanis*. Universitas Lampung.
- Hasibuan, H. B. (2024). *Investigasi Experimen Sambungan Butt Weld dengan Pengelasan Mig pada Material Baja Kandungan Carbon Berbeda*. Universitas Medan Area.
- Howes, M. A. H., & Totten, G. E. (2007). *Steel Heat Treatment Handbook*. CRC Press.
- Ikhtiardi, E. L. (2015). Analisis Pengaruh Suhu terhadap Konstanta Pegas dengan Variasi Jumlah Lilitan dan Diameter Pegas Baja. *Jurnal Pembelajaran Fisika*, 3(4).
- Lelawati, L. (2022). Pengaruh Pemanasan dan Quenching dengan Air Laut Terhadap Struktur Mikro Baja Karbon Sedang. *Jurnal Redoks*, 7(1), 62–72. <https://doi.org/10.31851/redoks.v7i1.8148>
- Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. John Wiley & Sons.
- Lupita, S. (2018). *Evaluasi Proses Bongkar Muat Avtur Untuk Mencegah Terjadinya Penyusutan Muatan di MT. Sinar Jogja*. Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang.
- MacKenzie, D. S., & Totten, G. E. (2003). *Handbook of Aluminum: Volume 1: Physical Metallurgy and Processes* (Vol. 1). CRC Press.
- Malau, S. (2023). *Perancangan Percobaan* (6 ed.). Universitas HKBP Nommensen. <https://repository.uhn.ac.id/handle/123456789/8815>
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9 ed.). John Wiley & Sons.
- Oktavianus, L., & Megawati. (2022). Pengaruh Kualitas Produk, Harga, Kualitas Pelayanan dan Customer Value Terhadap Kepuasan Pelanggan pada Springbed Procella di Palembang. *Jurnal Ilmiah Universitas Multi Data Palembang*, 11(2).
- Primus, J. (2022, Oktober 21). Kasur Spring Bed, Sejarah Manusia Cari Keamanan. *KOMPAS*.
- Purbonugroho, H. D. A., Suprihanto, A., & Haryadi, G. D. (2023). Analisis Metode Pengelasan SMAW Terhadap Laju Korosi dan Nilai Kekerasan pada Baja Karbon Rendah AISI 1020. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(4), 227–234.

- Rahmawati, A. S., & Erina, R. (2020). Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan Uji ANOVA Dua Jalur. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 4(1), 54–62. <https://doi.org/10.37478/optika.v4i1.333>
- Rahmawati, D. (2020). *Penentuan Kombinasi Level Optimal Dalam Peningkatan Kualitas Batako*. Universitas Islam Indonesia.
- Ridho, M. (2022). *Pendugaan Data Hilang dengan Metode Yates pada Rancangan Bujur Sangkar Latin dengan Menggunakan Analisis Kovarian*. Digital Repository UNILA.
- Saoqibillah, L., & Malik, A. (2024). Analisis Pengaruh Suhu Terhadap Nilai Konduktivitas pada Perpindahan Panas Secara Konduksi Menggunakan Virtual Lab Amrita. *Jurnal Penelitian dan Pembelajaran Fisika Indonesia*, 6(1). <https://doi.org/10.29303/jppfi.v6i1.256>
- Sumadi, S., & Sutisna, S. P. (2019). Perancangan Sistem Kontrol Mobil Menggunakan Compressed Air Engine Sebagai Penggerak Mula. *Jurnal Ilmiah Elektrokrisna*, 1(1).
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*. Cambridge University Press.
- Suryaningsih. (2010). *Desain Eksperimen Taguchi dalam Menentukan Penyetekan Mesin yang Optimal dalam Proses Pengemasan Creamer untuk Menghasilkan Kekuatan Seal yang Terbaik*. Universitas Indonesia.
- Tarigan, B., & Sentana, A. (2012). Pengaruh Waktu dan Temperatur Karbusasi Baja Karbon Rendah dengan Media Arang Batak Kelapa. *Prosiding Seminar Nasional Teknoin*, 61–72.
- Torrie, J. H., & Steel, R. G. D. (1991). *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach* (2 ed.). McGraw-Hill. .
- Totten, G. E. (1996). *Quenching and Control of Distortion*. ASM International.
- Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. CRC Press.
- Wahyudi, D. (2008). *Penentuan Faktor-faktor yang Berpengaruh Terhadap Proses Injeksi dengan Menggunakan Full Factorial Design dan Metode Taguchi*. Universitas Katolik Widya Mandala.
- Weenas, J. (2013). Kualitas Produk, Harga, Promosi dan Kualitas Pelayanan Pengaruhnya Terhadap Keputusan Pembelian Spring Bed Comforta. *Jurnal EMBA*, 1(4), 1–2. <https://doi.org/https://doi.org/10.35794/emba.1.4.2013.2741>

Lampiran A

Gambar A.1 Hasil Perhitungan ANOVA Menggunakan Minitab 21



Lampiran B

Gambar B.1 Hasil Uji XRF Kandungan Karbon 0,72% C

30-jun-2025 11:34:49

Sample results

Page 1

Sample ident												
XRF 436												

Application	<Standardless>
Sequence	1 of 1
Measurement time	30-jun-2025 11:26:56
Position	10

Compound	P	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Rb	La	Eu
Conc	2,3	0,25	0,12	0,64	92,96	0,05	0,10	2,22	0,63	0,02	0,72
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%

Lampiran C

Tabel C.1 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R1 A1 B1	17,0 	15,8 
R2 A1 B1	17,0 	15,9 
R3 A1 B1	17,2 	16,3 
R4 A1 B1	17,0 	15,8 
R5 A1 B1	17,1 	15,8 
R1 A2 B1	17,2 	16,3 

Tabel C.2 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R2 A2 B1	17,3 	16,1 
R3 A2 B1	17,0 	15,8 
R4 A2 B1	17,1 	16,0 
R5 A2 B1	17,0 	16,2 
R1 A3 B1	17,0 	16,2 
R2 A3 B1	17,0 	16,1 

Tabel C.3 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R3 A3 B1	17,0 	15,9 
R4 A3 B1	17,1 	15,9 
R5 A3 B1	17,1 	16,3 
R1 A3 B3	17,3 	16,8 
R2 A3 B3	17,4 	16,8 
R3 A3 B3	17,0 	16,3 

Tabel C.4 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R4 A3 B3	17,1 	16,5 
R5 A3 B3	17,0 	16,3 
R1 A2 B3	17,1 	16,2 
R2 A2 B3	17,2 	16,1 
R3 A2 B3	17,3 	16,6 
R4 A2 B3	17,0 	16,3 

Tabel C.5 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R5 A2 B3	17,1 	16,3 
R1 A1 B3	17,5 	16,7 
R2 A1 B3	17,0 	16,5 
R3 A1 B3	17,1 	16,4 
R4 A1 B3	17,2 	16,0 
R5 A1 B3	17,0 	15,9 

Tabel C.6 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R1 A2 B2	17,0 	16,2 
R2 A2 B2	17,3 	16,2 
R3 A2 B2	17,0 	16,3 
R4 A2 B2	17,1 	16,3 
R5 A2 B2	17,2 	16,0 
R1 A1 B2	17,2 	16,1 

Tabel C.7 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R2 A1 B2	17,3 	16,5 
R3 A1 B2	17,4 	16,2 
R4 A1 B2	17,1 	16,1 
R5 A1 B2	17,2 	16,1 
R1 A3 B2	17,2 	16,5 
R2 A3 B2	17,3 	16,2 

Tabel C.8 Bukti Pengambilan Sampel Eksperimen

Kombinasi	Tinggi Awal (cm)	Tinggi Akhir (cm)
R3 A3 B2	17,0 	16,3 
R4 A3 B2	17,1 	16,7 
R5 A3 B2	17,1 	16,0 

UNIVERSITAS
MA CHUNG