

Hardness Analysis of Hard Facing in Shield Metal Arc Welding (SMAW) Welding Process for Manufacturing Excavators Bucket Teeth Using Hot Rolled Plate Ks 440 Material

Fransiskus Sapar¹, Antonius Pangalinan², Satria Rahman³, Oktovianus Dharma Rerung^{4*}

¹Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Kupang

Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang Nusa Tenggara Timur P.O Box 139

²Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Kupang

Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang Nusa Tenggara Timur P.O Box 139

³Program Studi D4 Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Kupang

Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang Nusa Tenggara Timur P.O Box 139

⁴Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Kupang

Jl. Adi Sucipto Penfui Kupang Nusa Tenggara Timur P.O Box 139

*Corresponding author: dharmarerung@gmail.com

Abstract

In the context of increasing development across regions, the demand for adequate heavy equipment to support construction has become crucial. Wheel loaders and excavators are commonly used heavy equipment for various tasks, including excavation, material handling, and mining operations. The bucket, a crucial component responsible for digging and lifting materials in these machines, often experiences wear and breakage during operation, particularly in the bucket teeth – the claw-like structures at the bucket's end. This study focuses on the design and improvement of bucket teeth using the hard facing technique, a welding process utilizing wear-resistant electrodes. The choice of material, Hot Rolled Plate Ks 440, combined with proper hard facing electrode selection, aims to enhance wear resistance and prolong the lifespan of bucket teeth. The research incorporates Shield Metal Arc Welding (SMAW) for its simplicity and effectiveness. Experimental results, analyzed using Analysis of Variance (ANOVA), reveal significant influences of cooling and electrode factors on hardness (measured in HRC) of the bucket teeth. The combination of welding electric current, electrode type, and cooling method impacts hardness significantly. The best-performing bucket teeth, with a mean hardness of 49.459 HRC to 50.778 HRC, meet or exceed the standards set by AISI 4130 steel. The study aligns with heat treatment theories for surface hardness improvement in steel, showcasing the effectiveness of the proposed design and hard facing approach.

Keywords: bucket teeth, SMAW, hard facing, hardness, ANOVA

Abstrak

Dalam konteks pembangunan yang semakin meningkat di berbagai daerah, kebutuhan akan alat berat yang memadai untuk mendukung pembangunan menjadi hal yang krusial. *Excavator* biasanya digunakan sebagai alat berat untuk berbagai tugas, termasuk penggalian, penanganan material, dan operasi penambangan. *Bucket*, yang merupakan komponen penting untuk menggali dan mengangkat material pada mesin ini, sering kali mengalami keausan dan kerusakan selama pengoperasian, terutama pada *bucket teeth* – struktur seperti cakar di ujung *bucket*. Penelitian ini fokus pada *design* dan penyempurnaan *bucket teeth* dengan teknik *hard facing*, yaitu proses pengelasan menggunakan elektroda tahan aus. Pemilihan material, Hot Rolled Plate Ks 440, dipadukan dengan pemilihan elektroda permukaan keras yang tepat, bertujuan untuk meningkatkan ketahanan aus dan memperpanjang umur bucket teeth. Penelitian ini menggunakan *Shield Metal Arc Welding (SMAW)* karena kesederhanaan dan efektivitasnya. Hasil eksperimen, dianalisis menggunakan *Analysis of Variance (ANOVA)*, mengungkapkan pengaruh signifikan faktor pendinginan dan elektroda terhadap *hardness* diukur dalam HRC Kombinasi arus listrik pengelasan, jenis elektroda, dan metode pendinginan berpengaruh signifikan terhadap kekerasan. *Bucket teeth* berperforma terbaik, dengan kekerasan rata-rata 49.459 HRC hingga 50.778 HRC, memenuhi atau melampaui standar yang ditetapkan oleh baja AISI 4130. Studi ini sejalan dengan teori *heat treatment* untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja, disebut *case hardening*.

Kata kunci: bucket teeth, SMAW, hard facing, hardness, ANOVA

1. Pendahuluan

Semakin meningkatnya pembangunan yang ada di setiap daerah saat ini, dibutuhkan alat-alat berat (*heavy equipment*) yang memadai guna menyokong pembangunan yang ada. Contoh alat berat yang sering digunakan adalah *wheel loader* dan *excavator*. Alat berat ini sering digunakan mendorong, mengambil, memindahkan, membongkar, menggali tanah dan juga digunakan di dunia pertambangan sebagai alat utama[1]. Pada *excavator*, bagian yang digunakan sebagai alat penggali dan pengangkat material disebut *bucket*. Bagian ujung dari *bucket* ini yang berperan seperti cakar-cakar disebut *bucket teeth*, merupakan bagian yang paling mungkin mengalami gagal, aus maupun patah ketika *excavator* dioperasikan [2]. Beberapa penelitian mengontrol prosedur keausan, yaitu penting memahami mekanisme keausan dan mengidentifikasi bentuk keausan dalam kondisi kerja yang bervariasi[3]. Terdapat beberapa jenis *bucket teeth* yaitu, *sharp tip*, *long tip*, *heavy duty long tip*, *abrasion tip* dan *wide tip*. Paling banyak dijumpai untuk berbagai jenis pekerjaan adalah jenis *long tip*. Bentuk *bucket teeth* dan komposisi material *bucket teeth* yang tidak sesuai akan menyebabkan proses penggalian yang buruk, selain itu juga menyebabkan keausan yang tinggi pada *bucket teeth*, kerugian pada waktu dan biaya serta produktivitas akan berkurang. Gigi bucket excavator harus mempunyai dukungan geometris bentuknya untuk menembus dan menahan proses penggalian pada tanah, kerikil, batu, atau bidang abrasif lainnya[4].

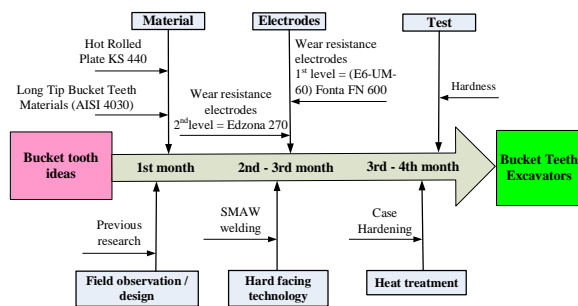
Bucket teeth memiliki dua karakteristik yang penting yaitu performa maksimal dan umur keausan. Performa yang maksimal dipengaruhi oleh desain dari *bucket teeth* sedangkan umur keausan dipengaruhi oleh kekuatan material *bucket teeth*. Untuk kekuatan *bucket teeth* didapat dari perpaduan komposisi material dan juga

perlakuan pada saat proses pembuatan[5]. Salah satu cara untuk mengatasi keausan material *bucket teeth* adalah dengan pengelasan kembali dengan lajur layer secara berulang menggunakan elektroda tahan aus dan lasim disebut dengan teknologi *hard facing*. *Hard facing* adalah proses perbaikan pada permukaan logam, menggunakan proses pengelasan dengan material baru yang lebih keras untuk menambah ketahanan aus dan memperpanjang umur[6][7]. Dua penelitian awal sebelumnya dapat dipakai sebagai pedoman dalam perancangan *bucket teeth* ini. Rangkuman penelitian ini adalah *hard facing* dengan proses pengelasan *Shield Metal Arc Welding (SMAW)* atau las busur listrik merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan karena sangat mudah untuk diterapkan[8]. Pada proses *hard facing* inilah peneliti mencoba untuk merancang *bucket teeth* dari bahan baja karbon, yaitu *Hot Rolled Plate Ks 440* berdiameter minimal 10 mm dan dipadu dengan penyambungan dengan pengelasan *SMAW hard facing* menggunakan elektroda *hard facing*. Material *Hot Rolled Plate Ks 440* adalah material yang cukup tangguh dengan minimal tegangan tarik minimal 440 N/mm²[9]. Elektroda tersebut cukup banyak jenisnya sesuai dengan kekerasan dan ketahanan yang diinginkan dan menyesuaikan penggunaannya. Baja yang dipilih adalah baja standar *AISI* sesuai kekerasannya. Klasifikasi baja ini termasuk dalam *AISI (American Iron and Steel Institute)* 1010, 1016, 1018, 1019, 1020, dst[10]. Produk *bucket teeth excavators* yang dihasilkan adalah bucket teeth standar long tip biasanya menggunakan baja *AISI* 4000, baja *AISI* 4130 atau *AISI* 4140. Disain dari plat yang dirancang adalah baja *Ks 440* dengan teknologi *hard facing*. Diharapkan dengan pemilihan material plat yang baik ditambah dengan penggunaan elektroda *hard facing* yang sesuai akan menghasilkan *bucket teeth* yang sesuai harapan yang tahan gesek dan tangguh

terhadap impakan benda keras.[11]. Pengujian kekerasan material *bucket teeth* diukur dengan pengujian *hardness* dengan skala Rockwell. Selanjutnya pengelolaan data dari eksperimen yang telah dilakukan menggunakan metode Rancang Acak Kelompok dengan *Analysis of Varians (ANOVA)* dan menguji secara factorial dari beberapa treatment yang dipakai baik secara individu, kombinasi maupun interaksi hasil.

2. Metode Penelitian

Roadmap teknologi diterapkan sebagai alat pandang ke depan secara strategis suatu perencanaan, pengembangan skenario dan hubungan sebab-akibat. Pada saat yang sama, peta jalan teknologi hanyalah sebuah produk perencanaan, tetapi bukan merupakan elemen manajemen strategis[12]. Dalam proses perancangan dan pembuatan teeth bucket, disusun suatu proses yang menghubungkan keseluruhan tahapan penelitian dan juga waktu hingga menghasilkan sebuah produk *bucket teeth*. Urut-urutan proses *roadmap*, seperti tersebut gambar 1 di bawah ini:



Gambar1. Roadmap penelitian Perancangan bucket teeth excavators

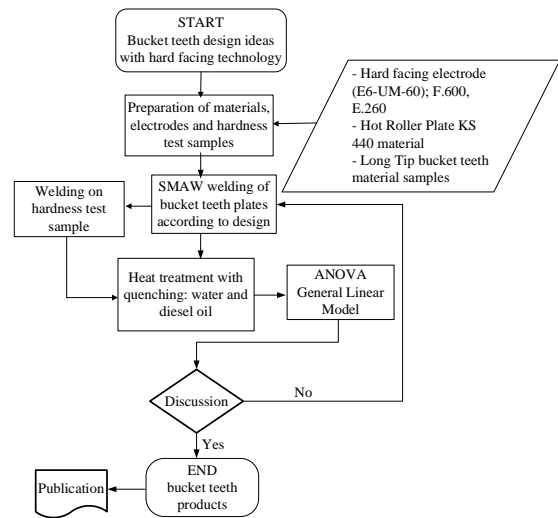
Roadmap tersebut di atas mempunyai kemiripan dengan Analisis sebab dan akibat dan disebut analisis tulang ikan. Diagram tulang ikan biasanya mengevaluasi penyebab dan sub-penyebab *Critical To Quality*[13].

Selain itu diagram tulang ikan juga dapat menggambarkan proses atau jalannya penelitian dari awal hingga akhir. *Cause*

and effect diagram tersebut di bawah ini yang menganalisis akar penyebab masalah dan bagaimana proses perancangan berlangsung dengan baik sampai menjadi produk *bucket teeth* sesuai yang diharapkan.

2.1 Flow Chart Diagram

Rancangan penelitian mulai dari perancangan dan pembuatan *bucket teeth* seperti tersebut pada gambar 3.

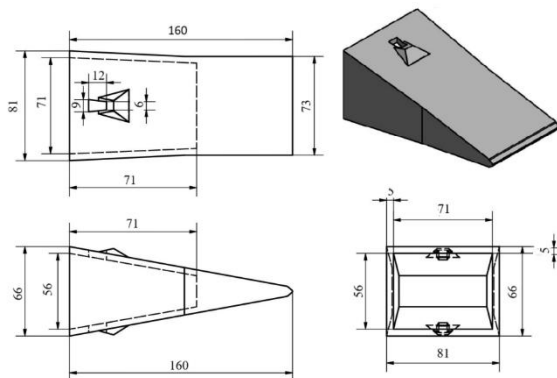


Gambar2. Flow Chart Penelitian

2.2 Disain Bucket Teeth

Saat ini *hydraulic excavator* banyak digunakan dalam aplikasi konstruksi, pertambangan, penggalian dan kehutanan. Mekanisme ekskavator harus bekerja dengan andal dalam kondisi kerja yang tidak terduga. Sifat kekuatan yang buruk dari bagian ekskavator seperti boom, lengan, ember, dan gigi membatasi masa pakai ekskavator. Oleh karena itu, bagian ekskavator harus cukup kuat untuk mengatasi kondisi kerja ekskavator yang kaustik. *Bucket* ekskavator adalah alat tambahan untuk alat berat yang dirancang untuk digunakan dalam penggalian situs. *Bucket excavator* terbuat dari baja padat dan menampilkan gigi yang menonjol dari ujung tombak, untuk mengganggu material keras dan menghindari keausan *bucket*. Gigi *bucket excavator* harus menanggung beban material yang berat seperti tanah basah dan batu dan juga mengalami keausan abrasi karena sifat abrasif partikel

tanah ketika gigi bekerja untuk memecah material umumnya baja paduan digunakan untuk membuat gigi *excavator* dan permukaan yang keras[14]. Beberapa material tahan aus dapat diaplikasikan pada material gigi bucket, sehingga umurnya akan meningkat terhadap keausan abrasif. Material yang digunakan adalah AISI 4130 yang menunjukkan komposisi kimia bahan 0,42% C; 1,11% Si; 1,13% Cr; 1,07% Mn dan 0.08 % Mo[15]. Berikut gambar disain *bucket teeth*.



Gambar3. *Bucket Teeth*

Pada gambar 3. Menunjukkan disain *bucket teeth* yang akan dibuat dalam bentuk *plat Hot Rolled Plate Ks 440* minimal 10 mm. Penelitian sebelumnya juga mencatat *Baja Hot Rolled Plate Ks 440* merupakan baja yang tergolong dalam baja paduan karbon sedang yang banyak digunakan sebagai bahan utama pada mesin sehingga harus memiliki sifat mekanis yang baik seperti kekerasan, ketahanan aus. Selanjutnya mendapat pengelasan *SMAW* dengan teknologi *hard facing*. Teknologi *hard facing* dipakai pada semua sambungan dan bagian-bagian yang mendapat benturan dan gesekan paling sering dengan menggunakan elektroda dengan spesifikasi yang relative sama dengan material *bucket teeth* adalah *Deutsches Institut für Normung e.V (DIN) 8555 : E 6 - UM – 60* dengan *Chemical Analysis (%)*: C: 0,45; Mn: 0,4; Si: 0,6; Cr: 7,3; Mo: 0,4; V: 0,6. Penelitian sebelumnya menggunakan adalah baja *Hot Rolled Plate Ks 440* yang

diberikan perlakuan panas *hardening* dengan variasi temperatur sebesar 800°C, 850°C, 900°C dengan *holding time* 60 menit, disusul pendinginan cepat dengan menggunakan air. setelah itu spesimen akan di uji keausan dengan menggunakan standar *Pin On Disc*. hasil dari penelitian menunjukkan bahwa nilai keausan pada temperatur 800°C mempunyai nilai rata-rata keausan 15,0762 mg/cm². karakter dari hasil uji tersebut menunjukkan makin tinggi temperatur *case hardening* akan semakin kecil tingkat keausannya[16]. Untuk perlakuan panas yang tepat, perlu diketahui komposisi kimia baja. Sebagai contoh penelitian sebelumnya baja diberikan perlakuan panas pada suhu 950°C diberi waktu tahan 30 menit dengan media pendingin air, oli SAE 40, coolant radiator dan udara sebelum diuji kekerasan dan struktur mikro[17]

2.3 Metode

Metode yang digunakan adalah metode eksperimen sungguhan dan eksperimen tindakan. Landasan teoritis, konsep konkrit dan teoritis, desain abstrak, operasi, dan interpretasi hasil semuanya merupakan bagian dari program penelitian eksperimental. Ketertarikan eksperimenter pada efek perubahan lingkungan, yang disebut sebagai "perlakuan", menuntut desain menggunakan prosedur standar untuk menjaga semua kondisi konstan kecuali variabel independen (eksperimental). Standarisasi ini memastikan validitas internal yang tinggi (kontrol eksperimental) dalam membandingkan kelompok eksperimen dengan kelompok kontrol pada variabel dependen[18].

Metode eksperimen sungguhan (*true experiment design*) dan tindakan dilakukan dengan pengujian kekerasan pada sample uji hasil pengelasan *SMAW hard facing*. Rancangan penelitian eksperimental ini merupakan penelitian tentang kemungkinan sebab akibat antara

kelompok yang diberi perlakuan dengan kelompok kontrol (tidak diberi perlakuan) lalu membandingkan antara keduanya. Metode tindakan adalah dengan mendisain dan membuat *bucket teeth excavators* sesuai dengan ukuran dan spesifikasi pengukuran langsung di lapangan.

Metode eksperimen Rancangan Acak Kelompok Percobaan Faktorial merupakan eksperimen yang mengkombinasikan atau menyilangkan semua faktor tertentu terhadap tiap level dari faktor lainnya yang ada dalam eksperimen. Untuk menguji signifikansi pengaruh faktor dan interaksinya salah satunya adalah dengan menggunakan metode ANOVA[19]. Setelah pelaksanaan eksperimen dan diperoleh data yang diperlukan selanjutnya dilakukan penentuan hipotesis dan uji ANOVA. Uji ANOVA dilakukan menggunakan one way ANOVA dengan taraf signifikansi (α) = 5%. Apabila $F_{hitung} < F_{tabel}$ maka hipotesis nol diterima dan hipotesis satu ditolak, dan apabila $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka hipotesis nol ditolak dan menerima hipotesis satu.

Rancangan penelitian didisain sedemikian berupa hubungan sebab akibat proses pengelasan SMAW dalam pembuatan produk. Produk dibuat sesuai rancangan dan sampel pengelasan juga dibuat untuk kepentingan pengambilan data kekerasan. Rancangan Acak Kelompok penelitian dengan variabel-variabel sebagai berikut.

Variabel Bebas :

Pemilihan *hard facing electrode* (E6-UM-60), yaitu Font 600 (E1) dan Edz. 260 (E2) pada pengelasan SMAW.

Media *cooling treatment* yang digunakan adalah *diesel fuel* dan *water*.

Pada dua level, yaitu: *welding electric current 110 amperes* (A1) dan *welding electric current 120 amperes* (A2). Variabel bergantung :

Nilai kekerasan (*hardness*) dengan *Hardness Rockwell* dalam skala HRC

Variabel kontrol atau variabel yang dituju :

Bucket teeth standart long tip menggunakan baja AISI 4130 dengan *Hardness* 468 BHN atau ~ 49 HRC.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Pembuatan Produk

Proses pengelasan SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) yang juga disebut Las Busur Listrik adalah proses pengelasan yang menggunakan panas untuk mencairkan material dasar atau logam induk dan elektroda[20]. Panas tersebut dihasilkan oleh lonjakan ion listrik yang terjadi antara katoda dan anoda (ujung elektroda dan permukaan plat yang akan dilas). Banyak hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan bucket teeth, baik ukuran dan terutama keterampilan dalam pengelasan. Pengelasan dilakukan dengan mengikat bagian-bagian sambungan dengan elektroda kekuatan tinggi E7018 dengan kode LB. Selanjutnya hasil ikatan layer dengan elektroda hard facing, yaitu layer antara dengan spesifikasi E7-UM - 200KP. Layer hard facing yang keras dan tahan gesek dan dengan spesifikasi (E6-UM-60). Penelitian ini menggunakan dua jenis elektroda hard facing yaitu Fonta 600 dan Edzona 260. Layer-layer keras dan tangguh yang terbentuk dari pengelasan bucket teeth diharapkan mampu melakukan kerja berat dari excavators. Proses dan produk seperti pada gambar 4.



Gambar 4. Pengelasan dan produk *bucket teeth*

Disamping membuat produk *bucket teeth*, juga dibuat sampel uji kekerasan. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil dari perlakuan panas mencakup: suhu atau temperatur saat perlakuan panas (*heat treatment*), waktu penahanan (*holding time*)[21]. Produk yang telah dihasilkan selanjutnya di *heat treatment* sampai pada temperature *austenite* ditahan selama 30 menit di celup cepat. Untuk sampel uji menggunakan pendingin solar dan air tawar.

Dengan demikian diharapkan perlakuan *heat treatment* dapat menambah kekerasan pada permukaan *bucket teeth* yang disebut *case hardening*[22].

3.2 Tabel Hasil Pengujian

Pengujian model dengan rancang acak Variabel-variabel penelitian adalah Pemilihan *hard facing electrode* dengan standart E6-UM-60, yaitu Font 600 (E1) dan Edz 260 (E2) pada pengelasan *Shield Metal Arc Welding (SMAW)*. Media *cooling treatment* untuk pencelupan cepat yang digunakan adalah *diesel oil* (c1) dan *water* (c2). Penentuan level, yaitu: *welding electric current 110 amperes* (A1) dan *welding electric current 120 amperes* (A2). Respons yang ingin dicapai dalam pengujian adalah nilai kekerasan (*hardness*) dengan Hardness Rockwell dalam skala HRC. Tabel hasil uji kekerasan pada baja karbon perlakuan dalam bentuk matriks. Tabel 1. Rancangan Acak Kelompok dan *table* hasil *factor information* adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan

Description	Hardness (HRC)			
	Font 600 (E1)		Edz 260 (E2)	
<i>Hard facing elect.</i>				
<i>Cooling treatment</i>	<i>diesel oil (c1)</i>	<i>water (c2)</i>	<i>diesel oil (c1)</i>	<i>water (c2)</i>
	E1c1	E1c2	E2c1	E2c1
<i>Welding elect. current 110 amperes (A1)</i>	1	44,60	48,80	45,88
	2	43,90	46,72	46,60
	3	45,33	50,02	45,67
	4	44,01	49,55	45,44
	5	43,29	48,39	44,34
<i>Welding elect. current 120 amperes (A2)</i>	1	45,70	49,88	45,79
	2	43,29	48,70	46,00
	3	44,82	50,55	44,77
	4	45,16	48,93	45,00
	5	43,45	46,00	44,49

Table 2. Factor Information

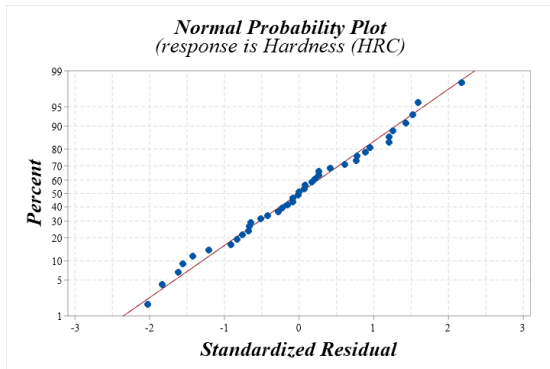
Factor	Type	Levels	Values
<i>Weld-elect-curr factors (A1; A2)</i>	Fixed	2	A1; A2
<i>Electrode factors (E1; E2)</i>	Fixed	2	E1; E2
<i>Cooling factors (c1; c2)</i>	Fixed	2	c1; c2
<i>Repeat</i>	Fixed	5	1; 2; 3; 4; 5

3.3 Uji ANOVA

Dasar dari uji coba eksperimen adalah desain matriks dengan desain faktorial. Pengembangan model regresi signifikan parameter proses untuk memprediksi karakteristik kualitas dengan *Design Of Experiment (DOE)*. Tes ANOVA adalah kelas analisis statistik yang digunakan untuk mengevaluasi apakah dua atau lebih banyak kumpulan data yang signifikan secara statistik. Memeriksa perbedaan rata-rata memanfaatkan varians. Langkah pertama adalah melakukan uji Normalitas sebelum melakukan uji ANOVA. Uji normalitas bertujuan untuk mengetahui: “Apakah data yang disajikan berdistribusi normal atau tidak?”. Hasil pengujian menunjukkan p-value > 0,1 atau lebih besar dari taraf signifikansi 0,05, maka data tersebut dapat menjadi kunci distribusi normal. Hasil pengujian ANOVA pada tabel ANOVA memberikan informasi tentang tiga variabel sebagai sumber variasi dan interaksinya yang mempengaruhi kekerasan baja. Penjelasan lebih mendalam dengan bilangan ANOVA adalah derajat kebebasan (df), jumlah kuadrat (SS), kuadrat rata-rata (MS), F-hitung, dan F-tabel.

Pada gambar 5 *Normal Probability Plot* menunjukkan angka standarized residuals yang berkisar dari ~ -2 hingga 2 pada skala rentang -3 s/d 3, tidak menjadi masalah besar, karena standarized residuals pada rentang tersebut dianggap cukup normal. Dari data tersebut mengindikasikan bahwa tidak ada data yang terlalu menyimpang

dengan treatment yang dilakukan. Tes ini lebih menarik dengan mengintegrasikan desain eksperimen dan pengujian rancangan acak kelompok percobaan faktorial yang secara ilmiah dapat menghasilkan nilai-nilai yang berpengaruh nyata atau sangat nyata terhadap response. Selanjutnya akan dilengkapi dengan data dan pembahasan yang lebih detail dan lengkap.



Gambar 5. Normal Probability Plot

Tabel 3. ANOVA test

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
weld-elect-curr factors (A1=110 Amp; A2=1 20 Amp Elect factors (E1=F.600 ; Edz 260 (E2) cooling factors (c1=die oil; c2=water	1	0,977	0,9766	0,41	0,527
weld-elect-curr fact. (A1=110* Electrode fact. (E1=F.600 ; Edz 260 (E2)	1	7,859	7,8588	3,29	0,079
weld-elect-curr fact. (A1=110* Electrode fact. (E1=F.600 ; Edz 260 (E2) cooling fact. (c1=die; c2=wat	1	43,119	43,1185	18,03	0,000
weld-elect-curr factors (A1=110*c ooling fact. (c1=die; c2=wat	1	17,57	17,5695	7,35	0,011
weld-elect-curr factors (A1=110*c ooling fact. (c1=die; c2=wat	1	1,644	1,6443	0,69	0,413

Electrode factors (E1=F.600 ; Edz 260 (E2)*cooling factors (c1=die.oil ; c2=water	1	2,28	2,2801	0,95	0,336
weld-elect-curr factors (A1=110* Electrode fact. (E1=F.600 ; E2*cooling factors (c1=die.ol; c2=water	1	5,235	5,2345	2,19	0,149
Error	32	76,528	2,3915		
Total	39	155,21			

Tabel ANOVA menyajikan hasil analisis ragam untuk suatu percobaan faktorial dengan faktor-faktor yang terkait dengan pengelasan (*welding*) *hard facing* dalam pembuatan bucket teeth excavators. Hasil-hasil yang paling relevan dalam konteks ini dijelaskan sebagai berikut:

Source of Variation (Sumber Variasi): *Weld-elect-curr factors* (A1=110): Pengaruh arus pengelasan; *Electrode factors* (E1=F.600; E2): Pengaruh elektroda.; *Cooling factors* (c1=die; c2=wat): Pengaruh pendinginan.

DF (Degrees of Freedom): Degree of Freedom mencerminkan jumlah pengukuran bebas yang dapat dilakukan. Pada percobaan ini, terdapat 7 faktor dengan derajat kebebasan 1.

Adj SS (Adjusted Sum of Squares): Jumlah kuadrat yang disesuaikan. Ini menggambarkan beberapa variasi yang dijelaskan oleh setiap faktor setelah mempertimbangkan efek faktor-faktor lainnya.

Adj MS (Adjusted Mean Square): Rata-rata kuadrat yang disesuaikan. Ini adalah hasil bagi dari Jumlah Kuadrat yang Disesuaikan dengan Derajat Kebebasan yang sesuai. Menunjukkan

variasi rata-rata untuk setiap faktor.

F-Value (F-statistic): Statistik F yang mengukur perbedaan variasi antara kelompok dengan variasi dalam kelompok. Semakin besar nilai F, semakin signifikan pengaruh faktor tersebut.

P-Value (P-Value): Nilai P yang menyatakan signifikansi statistik. *P-Value* yang lebih kecil menunjukkan bahwa faktor tersebut memiliki pengaruh yang lebih signifikan.

Faktor *Cooling* (pendinginan) memiliki nilai F yang tinggi (18,03) dan *P-Value* yang sangat rendah (0,000), menunjukkan bahwa faktor ini memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap hasil percobaan atau berpengaruh sangat nyata.

Faktor *Electrode* (elektroda) juga memiliki nilai F yang cukup tinggi (3,29) dan *P-Value* yang cukup rendah (0,079), menunjukkan pengaruh yang signifikan atau berpengaruh nyata.

Faktor *Weld-elect-curr* (arus pengelasan) memiliki nilai F yang rendah (0,41) dan *P-Value* yang tinggi (0,527), menunjukkan bahwa faktor ini mungkin tidak memiliki pengaruh yang signifikan atau tidak berpengaruh nyata.

Signifikansi Rancangan Acak Kelompok dalam percobaan faktorial memberikan keleluasaan untuk mengatur kelompok-kelompok pengamatan secara acak. Ini membantu mengurangi variabilitas yang mungkin disebabkan oleh faktor-faktor lain yang tidak diukur atau tidak dikontrol. Dengan rancangan acak kelompok, hasil percobaan dapat dianggap lebih representatif karena setiap kelompok dapat dianggap sebagai sampel acak dari populasi. Analisis ragam (*ANOVA*) kemudian dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil percobaan. Dalam konteks ini, signifikansi rancangan acak kelompok menunjukkan

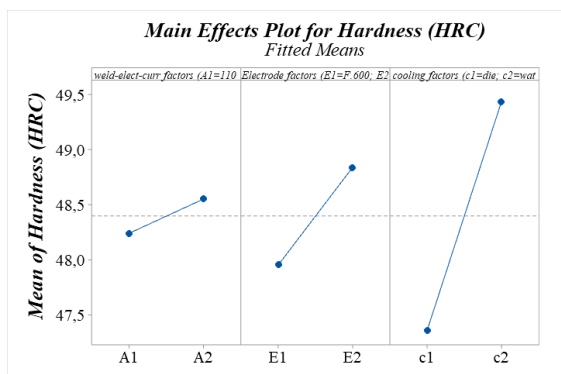
bahwa hasil percobaan dapat diandalkan dan variabilitas hasil dapat diatribusikan kepada faktor-faktor yang diukur.

Selanjutnya jika memahami perbedaan yang signifikan antara berbagai kombinasi faktor arus pengelasan, faktor elektroda, dan faktor pendinginan berdasarkan metode Tukey dengan tingkat kepercayaan 95%. Pengelompokan memungkinkan mengidentifikasi dan membandingkan rata-rata yang berbeda secara statistik satu sama lain. Hasil analisa kombinasi factor sebagai berikut:

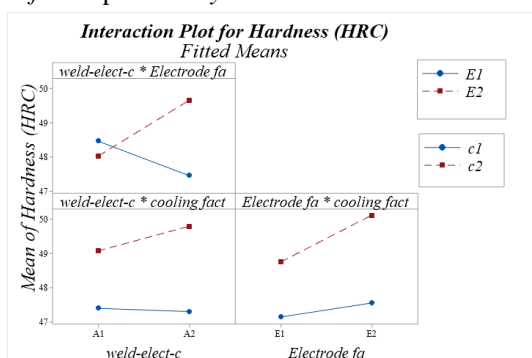
Tabel 4. *Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence*

weld-elect-curr factors (A1=110 Amp)*Electrode factors (E1=F.600; E2=Edz)*cooling factors (c1=diesel oil; c2=water)	N	Mean	Grouping		
A2 E2 c2	5	50,778	A		
A1 E2 c2	5	49,458	A	B	
A2 E1 c2	5	48,812	A	B	C
A1 E1 c2	5	48,696	A	B	C
A2 E2 c1	5	48,542	A	B	C
A1 E1 c1	5	48,226	A	B	C
A1 E2 c1	5	46,586	B		C
A2 E1 c1	5	46,084	C		

Terlihat pada tabel 4 bahwa hasil terbaik dari kombinasi perlakuan adalah factor A2 E2 c2 yaitu kombinasi dari faktor *Welding electric current 120 amperes (A2)*, faktor jenis elektroda *hard facing Edz 260 (E2)* dan faktor pendingin *water (C2)*. Faktor kombinasi terbaik kedua adalah kombinasi A1 E2 c2 dan seterusnya seperti terlihat pada gambar 6 dan gambar 7 tersebut di bawah ini:



Gambar 6. Nilai rata-rata respon *hardness* tiap factor pada Tukey Simultaneous 95 % CIs.



Gambar 7. Nilai factor interaksi pada Tukey Simultaneous 95 % CIs.

Selain pengujian dengan kombinasi factor untuk mendapatkan kombinasi factor terbaik juga dilakukan pengujian Plot faktorial pada gambar 6 juga dikenal sebagai plot efek utama dan plot interaksi, dibuat untuk merepresentasikan hasil ANOVA secara visual. Dalam plot faktorial, pengaruh utama dan interaksi berbagai factor pada variabel respons *Hardness* (HRC). Hasil visual grafik pengujian Tukey Simultaneous 95 % CIs pada gambar 6 dan gambar 7 menunjukkan bahwa *cooling factor* adalah factor yang sangat berpengaruh nyata secara independen sedangkan factor interaksi terjadi pada *Welding electric current factors* $A1=110$ **Electrode factors*, yang berarti ada hubungan nyata antara Arus listrik dan pemilihan elektroda yang digunakan.

Memperhatikan hasil pengujian Anova tersebut diatas jika dihubungkan dengan hasil eksperimen sesungguhnya terhadap material *bucket teeth* excavator terhadap respon *Hardness* (HRC) menunjukkan:

Faktor *Cooling* (pendinginan)

memiliki nilai F yang tinggi (18,03) dan P-Value yang sangat rendah (0,000), menunjukkan bahwa factor ini memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap hasil percobaan atau berpengaruh sangat nyata terhadap respon *Hardness* (HRC). Sedangkan yang berpengaruh nyata adalah factor *electrode*.

Kombinasi perlakuan pada eksperimen adalah kombinasi factor A2 E2 c2 yaitu kombinasi dari factor *Welding electric current* 120 amperes (A2), factor jenis elektroda *hard facing* Edz 260 (E2) dan factor pendingin *water* (C2) pada 50,778 HRC disusul kombinasi factor A1 E2 c2 dimana A1 *Welding electric current* 110 amperes pada 49,458 HRC.

Hasil visual grafik pengujian Tukey Simultaneous 95 % CIs menunjukkan bahwa *cooling factor* adalah factor yang sangat berpengaruh nyata secara independen sedangkan factor interaksi terjadi pada *Welding electric current factors* $A1=110$ **Electrode factors*.

Kekerasan material dalam *Rockwell Hardness* Berskala C (HRC) pengujian terbaik tersebut di atas pada mean 49,459 HRC - 50,778 HRC terhadap *bucket teeth standart long tip* menggunakan baja AISI 4130 dengan *Hardness* 468 BHN atau ~ 49 HRC sebagai pembanding dapat dipenuhi. Hasil pengujian ini sejalan dengan teori *heat treatment* untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja dengan berbagai *treatment* termasuk *case hardening*.

4. Kesimpulan

Faktor *Cooling* (pendinginan) memiliki nilai F yang tinggi (18,03) dan P-Value yang sangat rendah (0,000), menunjukkan bahwa factor ini memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap hasil percobaan atau berpengaruh sangat nyata terhadap respon *Hardness* (HRC). Sedangkan

yang berpengaruh nyata adalah faktor electrode. Faktor Weld-elect-curr (arus pengelasan) memiliki nilai F yang rendah (0,41) dan *P-Value* yang tinggi (0,527), menunjukkan bahwa faktor ini mungkin tidak memiliki pengaruh yang signifikan atau tidak berpengaruh nyata.

Hasil terbaik dari kombinasi perlakuan adalah factor A2 E2 c2 yaitu kombinasi dari faktor *Welding electric current 120 amperes* (A2), faktor jenis elektroda *hard facing Edz 260* (E2) dan faktor pendingin water (C2). Faktor kombinasi terbaik kedua adalah kombinasi A1 E2 c2.

Gambar visual grafik pengujian Tukey Simultaneous 95 % Cls. menunjukkan bahwa cooling factor adalah factor yang sangat berpengaruh nyata secara independen sedangkan factor interaksi terjadi pada *Welding electric current factors* A1=110**Electrode factors*.

Kekerasan material dalam *Rockwell Hardness* Berskala C (HRC) pengujian terbaik tersebut di atas pada mean 49,459 HRC - 50,778 HRC terhadap *bucket teeth standart* long tip menggunakan baja *AISI 4130* dengan *Hardness* 468 BHN atau ~ 49 HRC sebagai pembanding dapat dipenuhi.

Hasil pengujian ini sejalan dengan teori heat treatment untuk meningkatkan kekerasan permukaan baja dengan berbagai treatment termasuk *case hardening*.

Referensi

- [1] S. H. Suryo, R. S. Sastra, and M. Muchammad, "Optimasi Desain Bucket Tooth Excavator Jenis Verona PC200 Menggunakan Optimasi Topologi dan Metode Elemen Hingga," *Rotasi*, vol. 21, no. 4, p. 237, 2019, doi: 10.14710/rotasi.21.4.237-243.
- [2] R. Ismail, Z. Muhammad, J. Jamari,

and A. P. Bayuseno, "Designing and wear testing of excavator bucket teeth for the need of Indonesian mining," *ARPJ. Eng. Appl. Sci.*, vol. 15, no. 1, pp. 21–26, 2020.

- [3] Z. Dong, F. Jiang, Y. Tan, F. Wang, R. Ma, and J. Liu, "Review of the Modeling Methods of Bucket Tooth Wear for Construction Machinery," *Lubricants*, vol. 11, no. 6, pp. 1–19, 2023, doi: 10.3390/lubricants11060253.
- [4] A. V. Thombare, S. V. Dudhe, S. K. Wankhade, and C. G. Deshmukh, "Modelling of Excavator Bucket With the Help of Catia As a Cad Tool," *Int. Res. J. Mod. Eng. Technol. Sci.*, no. 03, pp. 2582–5208, 2021, [Online]. Available: www.irjmets.com
- [5] V. I. Bolobov and S. A. Chupin, "About the use of 110G13L steel as a material for the excavator bucket teeth," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 378, no. 1, pp. 0–5, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012005.
- [6] S. Darmo and B. D. Prihadianto, "the Effect of Hard Facing Process on the Hardness and Microstructure of Bucket Tooth for Different Manganese Content," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 827–836, 2022, doi: 10.21776/jrm.v13i3.1222.
- [7] F. Sapar, O. Rerung, R. Dimu, and A. Muttaqin, "Experiment Design for Manufacturing Quality Kitchen Knife Materials using Carbon Steel with Hard Facing Technology and Hot Forging Process," pp. 174–180, 2023, doi: 10.5220/0010941800003260.
- [8] L. S. S. K. Weerasekralage, M. Karunarathne, and S. D. Pathirana, "Optimization of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process for mild steel Optimization of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process for mild steel," no. October, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.23458.58560.
- [9] S. Wolff, "Specification Product," *Pt*

- Krakatau Steel*, pp. 3–4, 2022.
- [10] O. D. Rerung, F. Sapar, and R. J. Dimu, “Study About Normalizing of AISI 1010 Steel Result Hardened by Manganese Stone Powder Using True Experimental Method,” vol. 208, no. Icist 2020, pp. 422–427, 2021.
- [11] O. D. Rerung, F. Sapar, and R. J. Dimu, “Experimental Design of Hard Facing Welding in Crusher Clinker Cooler Hammer With Factorial Methods,” vol. 208, no. Icist 2020, pp. 264–268, 2021.
- [12] M. P. Loginov, V. P. Ivanitsky, M. S. Maramygin, and V. A. Tatyannikov, “Roadmaps classification,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4.7 Special Issue 7, pp. 91–96, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.7.20522.
- [13] M. A. Lutfianto and R. Prabowo, “Implementation of Six Sigma Methods with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) as a Tool for Quality Improvement of Newspaper Products (Case Study: PT. ABC Manufacturing – Sidoarjo, East Java – Indonesia),” *J. Integr. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 87–98, 2022, doi: 10.28932/jis.v5i1.4615.
- [14] S. H. Suryo, “Wear Behavior of Using Las Overlays on Bucket Teeth Excavators,” *Doc-Pak.Undip.Ac.Id*, vol. 5, no. 6, pp. 1190–1193, 2020, [Online]. Available: http://doc-pak.undip.ac.id/2264/2/peer_IJISRT20JUN942.pdf
- [15] R. Sadiana, “Pengaruh Ukuran Mesh Serbuk Batubara Proses Karburasi Padat Pada Baja Aisi 4130 Terhadap Nilai Kekerasan Dan Ketangguhan,” vol. 9, no. 1, pp. 25–30, 2020.
- [16] Y. M. Rachman, “Pengaruh proses hardening baja aisi 1045 terhadap sifat keausan,” vol. 8, no. 83, pp. 89–95, 2020.
- [17] A. Prayogi and Suhardiman, “Analisa pengaruh variasi media pendingin pada perlakuan panas terhadap kekerasan dan struktur mikro baja karbon rendah,” *J. Polimesin*, vol. 17, no. 2, pp. 83–90, 2019.
- [18] T. F. Denson and C. A. Anderson, “16 Experimental Methods,” no. June, 2023, doi: 10.1017/9781009010054.017.
- [19] E. Design, “Chapter 13,” *Wort und Wahrheit*, pp. 335–356, 2019, doi: 10.31826/9781463218584-013.
- [20] S. F. Haider, M. M. Quazi, J. Bhatti, M. Nasir Bashir, and I. Ali, “Effect of Shielded Metal Arc Welding (SMAW) parameters on mechanical properties of low-carbon, mild and stainless-steel welded joints: A review,” *J. Adv. Technol. Eng. Res.*, vol. 5, no. 5, pp. 191–198, 2019, doi: 10.20474/jater-5.5.1.
- [21] M. Badaruddin, “Pengaruh Proses Austempering Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja AISI 4140,” vol. 12, no. 02, pp. 263–272, 2023.
- [22] O. Rerung, F. Sapar, and R. Dimu, “Factorial Identification on Surface Hardness of Cut Low Carbonsteel with Hardening Process using Manganese Minerals Powder,” pp. 167–173, 2023, doi: 10.5220/0010941700003260.