

Analisis Pengaruh Volume Filler Metal terhadap Kekuatan Mekanik dan Integritas Sambungan serta Efisiensi Proses pada Lini Produksi Air Conditioner

Ronal Putra Zulni*, Koswara, Rohib

Institut Sains dan Teknologi Nasional, Indonesia

Email: ronalzulni@gmail.com*, koswara@istn.ac.id, rohib@istn.ac.id

Keywords:

*Brazing; Filler Metal; Efisiensi;
ANOVA; Base Metal Failure;
Optimal Volume Point.*

Abstract

This research aims to determine the optimal volume of brazed filler rods in copper pipe connections to meet technical standards while increasing material cost efficiency in AC production lines. The research method uses pure experimentation by gradually reducing the volume of the rod filler (Reduce 1 to Reduce 4). Testing is carried out using tensile tests, leak tests and functional tests (running tests). Data were analyzed using One-Way ANOVA and optimized by integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) methods, with the safety parameter (leak test) as the main priority weighing 54.77%. ANOVA results show that reducing the filler volume to Reduce level 4 ($\pm 50\%$) does not make a significant difference to the tensile strength of the joint ($p\text{-value} > 0.05$). However, TOPSIS optimization results show that the optimal limit for material reduction is different for each pipe geometry. For pipes with diameters of 9 mm and 6 mm, the optimal conditions are Reduce 3 with preference scores of 0.6690 and 0.9653 respectively, resulting in material cost efficiency of around 40% without reducing mechanical quality. Meanwhile, the 7 mm diameter pipe shows an increase in leakage at extreme reduction so that optimal conditions are at Reduce 1 with a score of 0.8721. The results of the research produced recommendations for standardizing the volume of brazed filler rods based on technical risk management to support the company's cost down program.

Kata Kunci:

*Brazing; Filler Metal; Efisiensi;
ANOVA; Base Metal Failure;
Optimal Volume Point.*

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menentukan volume rod filler brazing yang optimal pada sambungan pipa tembaga agar memenuhi standar teknis sekaligus meningkatkan efisiensi biaya material pada lini produksi AC. Metode penelitian menggunakan eksperimen murni melalui pengurangan volume rod filler secara bertahap (Reduce 1 hingga Reduce 4). Pengujian dilakukan menggunakan uji tarik (tensile test), uji kebocoran (leak test), dan uji fungsional (running test). Data dianalisis menggunakan One-Way ANOVA dan dioptimasi dengan integrasi metode Analytic Hierarchy Process (AHP) dan Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), dengan parameter keselamatan (leak test) sebagai prioritas utama berbobot 54,77%. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa pengurangan volume filler hingga tingkat Reduce 4 ($\pm 50\%$) tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan ($p\text{-value} > 0,05$). Namun, hasil optimasi TOPSIS menunjukkan bahwa batas optimal pengurangan material berbeda pada setiap geometri pipa. Untuk pipa berdiameter 9 mm dan 6 mm, kondisi optimal berada pada Reduce 3 dengan skor preferensi masing-masing 0,6690 dan 0,9653, menghasilkan efisiensi biaya material sekitar 40% tanpa menurunkan kualitas mekanik. Sementara itu, pipa diameter 7 mm menunjukkan

peningkatan kebocoran pada pengurangan ekstrem sehingga kondisi optimal berada pada Reduce 1 dengan skor 0,8721. Hasil penelitian menghasilkan rekomendasi standardisasi volume rod filler brazing berbasis manajemen risiko teknik untuk mendukung program cost down perusahaan.

PENDAHULUAN

Pipa tembaga merupakan komponen kritis dalam sistem pendingin Air Conditioner (AC) yang berfungsi sebagai saluran utama bagi *refrigerant* dalam siklus pendinginan. Dalam industri HVAC dan *plumbing* modern, proses *brazing* menjadi metode penyambungan yang paling diandalkan karena kemampuannya menghasilkan sambungan kuat, rapat, serta memiliki resistensi tinggi terhadap fluktuasi tekanan dan suhu (Anis & Winarto, 2025). Meskipun demikian, integritas sambungan *brazing* sangat bergantung pada penggunaan *filler* (*brazing rod*) yang tepat; jumlah *filler* yang tidak akurat dapat berakibat fatal pada kinerja, keandalan, serta durabilitas unit AC (Cozzarini et al., 2020).

Dalam praktik industri, ketergantungan pada pengalaman empiris atau "kebiasaan operator" tanpa perhitungan yang terukur sering kali menjadi celah yang merugikan. Ketidadaan standar eksak ini menyebabkan ketidakkonsistenan kualitas sambungan dan pemborosan material yang signifikan. Penggunaan *filler* secara berlebihan tidak hanya meningkatkan biaya material—yang dalam skala produksi massal berdampak langsung pada margin keuntungan—tetapi juga berisiko menurunkan kualitas sambungan (Alimardani et al., 2019). Fenomena *over-engineering* ini diduga terjadi karena kecenderungan operator untuk mengejar aspek estetika visual (gumpalan *fillet* yang besar) tanpa menyadari bahwa kekuatan mekanik sebenarnya terletak pada kedalaman penetrasi di dalam celah sambungan. Sebaliknya, penggunaan *filler* yang terlalu sedikit akan mengakibatkan *incomplete wetting* atau celah sambungan yang tidak terisi sempurna, yang berdampak pada risiko kebocoran *refrigerant* dan kegagalan komponen prematur (Campilho, 2024; Ilman, 2024).

Kesenjangan antara kebutuhan untuk menekan biaya produksi dan keharusan menjaga standar keselamatan ini menjadi dasar penting bagi dilakukannya penelitian secara ilmiah (Lai et al., 2023). Hingga saat ini, belum terdapat data kuantitatif yang jelas mengenai sejauh mana volume *filler metal* dapat dikurangi tanpa mengorbankan kekuatan tarik (*tensile strength*) pipa. Selain itu, diperlukan pemetaan mengenai titik kritis di mana efisiensi material mulai bersinggungan dengan risiko kegagalan fungsional dan kendala ergonomi operator di lapangan.

Melalui pendekatan eksperimen laboratorium (*true experiment*) yang mengendalikan variabel input secara ketat, penelitian ini bertujuan untuk menguji pengaruh reduksi volume *filler* terhadap performa mekanik sambungan. Dengan mengumpulkan data sistematis mengenai kekuatan tarik, ketahanan tekanan, dan kualitas visual sambungan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis berupa **Titik Volume Optimal** (*Optimal Volume Point*). Melalui pendekatan ini, industri dapat mencapai efisiensi biaya yang terukur melalui pengurangan *waste material* berdasarkan data sistem SAP, sekaligus menjamin integritas sambungan sesuai standar kualitas yang disyaratkan (Suprpto et al., 2017; C. Zhang et al., 2022).

Kebaruan penelitian ini terletak pada beberapa aspek. Pertama, penelitian ini mengintegrasikan metode statistik One-Way ANOVA untuk menguji signifikansi pengaruh reduksi volume filler terhadap kekuatan tarik sambungan pada tiga variasi diameter pipa (6

mm, 7 mm, dan 9 mm). Kedua, penelitian ini menggunakan metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM) dengan pendekatan AHP-TOPSIS untuk menentukan titik volume optimal yang menyeimbangkan aspek teknis (kekuatan tarik, kebocoran, uji fungsional) dan aspek ekonomi (efisiensi biaya material), dengan parameter keselamatan (leak test) sebagai prioritas utama berbobot 54,77%. Ketiga, penelitian ini memberikan rekomendasi standarisasi volume filler brazing berbasis manajemen risiko teknik yang berbeda untuk setiap geometri pipa, mengakomodasi karakteristik unik masing-masing diameter. Keempat, penelitian ini memberikan bukti empiris yang mematahkan mitos "estetika fillet besar itu bagus" melalui pembuktian statistik bahwa reduksi volume hingga 50% tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan ($p\text{-value} > 0,05$). Pendekatan ini berbeda dari penelitian sebelumnya yang umumnya hanya menggunakan optimasi parameter tunggal tanpa mempertimbangkan trade-off antara kualitas teknis dan efisiensi ekonomi secara simultan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh reduksi volume filler metal terhadap kekuatan mekanik dan integritas fungsional sambungan pipa tembaga, menentukan titik volume optimal yang menyeimbangkan kualitas teknis dan efisiensi material, serta menghitung potensi penghematan biaya yang dapat dicapai. Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan ilmu teknik penyambungan logam dan memperkaya data empiris mengenai pengaruh volume filler metal terhadap kualitas sambungan brazing. Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi dasar penyusunan standar operasional brazing yang lebih efektif, meningkatkan efisiensi penggunaan material, serta mendukung peningkatan kompetensi operator melalui pedoman teknis yang objektif dan terukur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen murni (true experimental research) dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh reduksi volume filler metal terhadap kualitas sambungan brazing pada pipa tembaga di lini produksi Air Conditioner (AC). Variabel bebas berupa tingkat reduksi volume rod filler brazing yang dibagi menjadi beberapa perlakuan, yaitu kondisi awal (baseline), Reduce 1, Reduce 2, Reduce 3, dan Reduce 4, sedangkan variabel terikat meliputi kekuatan mekanik sambungan, tingkat kebocoran, ketahanan tekanan, dan efisiensi penggunaan material. Data diperoleh melalui pengujian tarik (tensile test) menggunakan Universal Testing Machine (UTM), leak test, dan running test. Hasil pengujian dianalisis menggunakan One-Way ANOVA untuk mengetahui signifikansi pengaruh variasi volume filler terhadap kualitas sambungan. Selanjutnya, penentuan volume optimal dilakukan dengan integrasi metode Analytic Hierarchy Process (AHP) untuk menentukan bobot kriteria dan Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) untuk memilih alternatif terbaik berdasarkan aspek kekuatan mekanik, integritas fungsional, keselamatan, dan efisiensi material. Hasil analisis digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi standarisasi volume filler brazing yang optimal dan ekonomis bagi perusahaan.

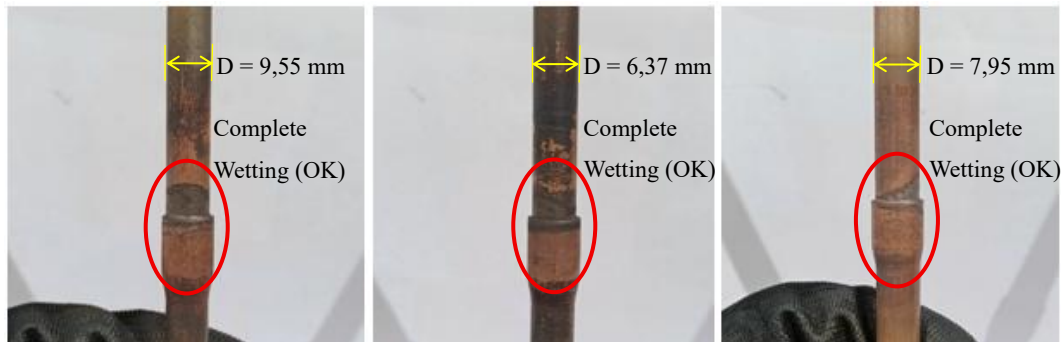
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengamatan Visual dan Integritas Sambungan

1. Analisis Pembentukan *Fillet*

Setelah dilakukan reduksi panjang *filler rod* hingga sebesar 50% pada ketiga variasi diameter pipa, dilakukan observasi visual terhadap *fillet* yang terbentuk pada area sambungan.

Berdasarkan hasil pengamatan makro pada gambar 4.1 di bawah, terlihat bahwa seluruh spesimen menunjukkan karakteristik **complete wetting** dan **full penetration**. Meskipun volume material pengisi dikurangi secara signifikan, cairan logam pengisi (*rod filler*) tetap mampu mengalir dan mengisi celah kapiler sambungan secara merata. Hal ini dibuktikan dengan terbentuknya *fillet* yang halus, kontinu, dan tidak ditemukan adanya indikasi *incomplete filling* atau porositas pada permukaan luar sambungan.

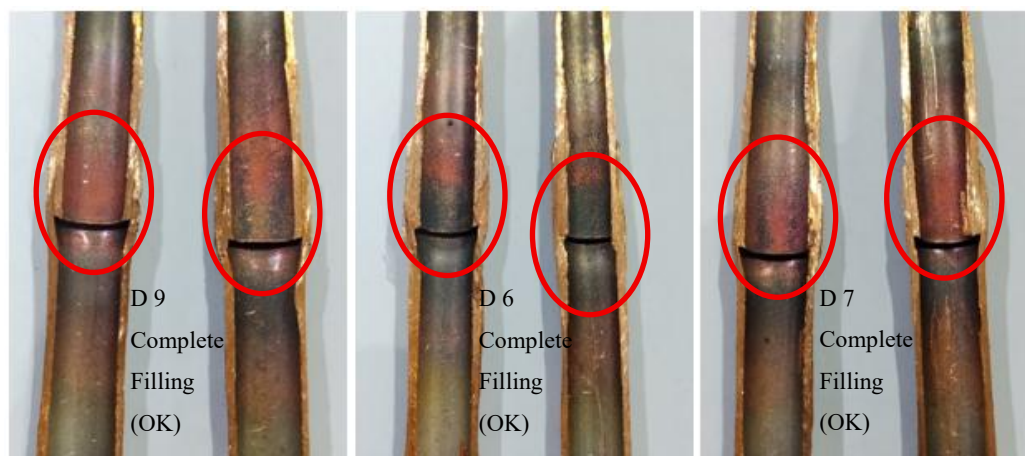


Gambar 1. Hasil Brazing dengan *Reduce Rod Filler* maksimal (50%)

2. Karakteristik Makrografi

Untuk memverifikasi kualitas sambungan setelah reduksi *filler rod* sebesar 50%, dilakukan pengamatan pada penampang melintang spesimen (gambar dibawah). Hasil metalografi makro menunjukkan bahwa logam pengisi berhasil melakukan **penetrasi total** ke dalam seluruh celah *overlap* antara pipa dalam dan pipa luar.

Secara teknis, meskipun volume kawat las dikurangi hingga batas maksimal kemampuan operator, fenomena **aksi kapiler** (*capillary action*) tetap berjalan optimal. Logam cair mampu membasahi permukaan tembaga secara seragam tanpa menyisakan rongga udara (*void*) atau diskontinuitas di tengah jalur sambungan.



Gambar 2. Hasil *Sectioning* Uji Visual Kualitas Penetrasi Hasil Brazing dengan *Reduce Rod Filler* maksimal (50%)

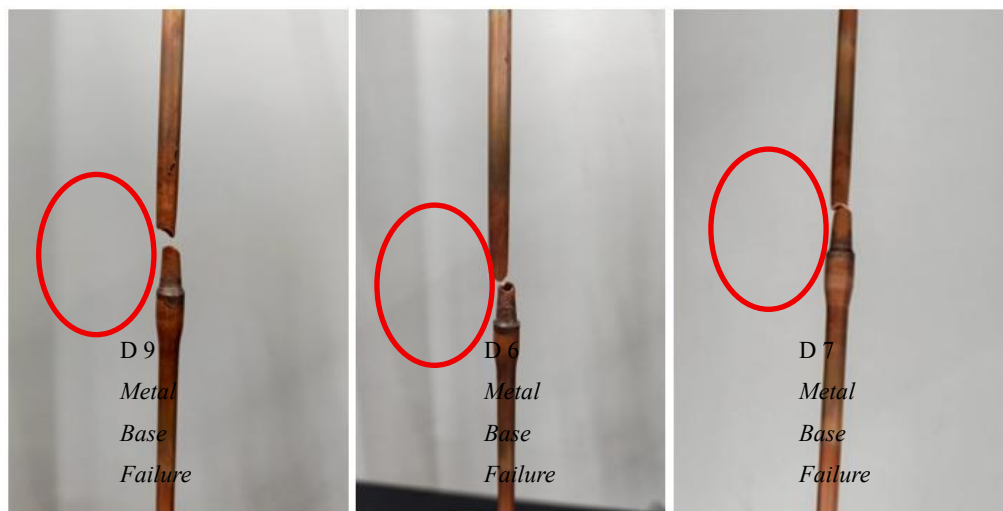
Pengamatan ini membuktikan secara empiris bahwa efisiensi material 50% tidak mengorbankan **kedalaman penetrasi**. Sebagaimana didukung oleh pernyataan **Campilho (2024)**, kekuatan mekanik sebenarnya terletak pada pengisian celah yang sempurna. Dengan

terisnya seluruh area *overlap* secara padat, maka luas ikatan efektif tetap maksimal, sehingga integritas sambungan dalam menahan tekanan refrigeran dan beban tarik tetap terjaga pada level optimal.

Analisis Kekuatan Mekanik dan Perilaku Kegagalan

1. Kegagalan Logam Induk (*Base Metal Failure*)

Berdasarkan hasil pengujian tarik pada spesimen dengan reduksi tahap 4 *filler rod* sebesar 50%, seluruh sampel menunjukkan karakteristik kegagalan pada logam induk (*base metal failure*). Sesuai dengan kriteria kualifikasi dalam standar **AWS B2.2**, fenomena ini secara otomatis menyatakan bahwa prosedur *brazing* telah memenuhi syarat (*qualified*). Patahan yang terjadi pada pipa tembaga, dan bukan pada area sambungan, membuktikan secara empiris bahwa efisiensi sambungan (*joint efficiency*) telah mencapai 100%.



Gambar 3. Hasil Uji Tarik Pipa *Reduce Rod Filler*

Hal ini mengindikasikan bahwa kekuatan geser metalurgi dari pengisian celah kapiler jauh melampaui kekuatan tarik material dasar. Penetrasi *filler* yang sempurna ke seluruh area *overlap* menciptakan ikatan yang sangat kuat, sehingga tegangan maksimum terkonsentrasi pada area pipa yang lebih lemah secara struktural. Dengan demikian, optimasi volume *filler* yang dilakukan terbukti sangat efektif karena tetap mampu menjaga integritas mekanik unit sesuai standar industri, tanpa mengorbankan durabilitas operasional meskipun jumlah material pengisi telah dikurangi secara signifikan.

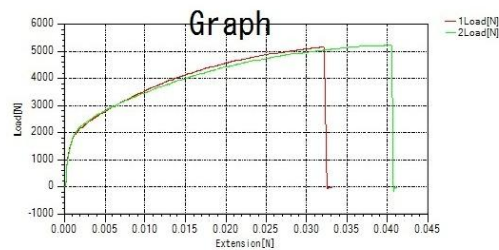
2. Hasil Uji Tarik

Berikut disajikan data uji Tarik 6 *pieces* pertama diameter 9 menggunakan UTM Tensilon. Untuk diameter 6 dan 7 dilampirkan di halaman lampiran A.

Data hasil pengujian tarik pada seluruh variasi volume *filler* (dari *Reduce 1* hingga *Overfill*) menunjukkan nilai tegangan yang berkisar antara **201,27 MPa hingga 240,10 MPa**. Jika dikomparasikan dengan standar tensile strength material coppertube sesuai **JIS H3300** dalam *mill data sheet*, yang menetapkan ambang batas minimum kekuatan tarik (*tensile strength*) sebesar ≥ 205 MPa, mayoritas spesimen telah memenuhi standar kualifikasi material.

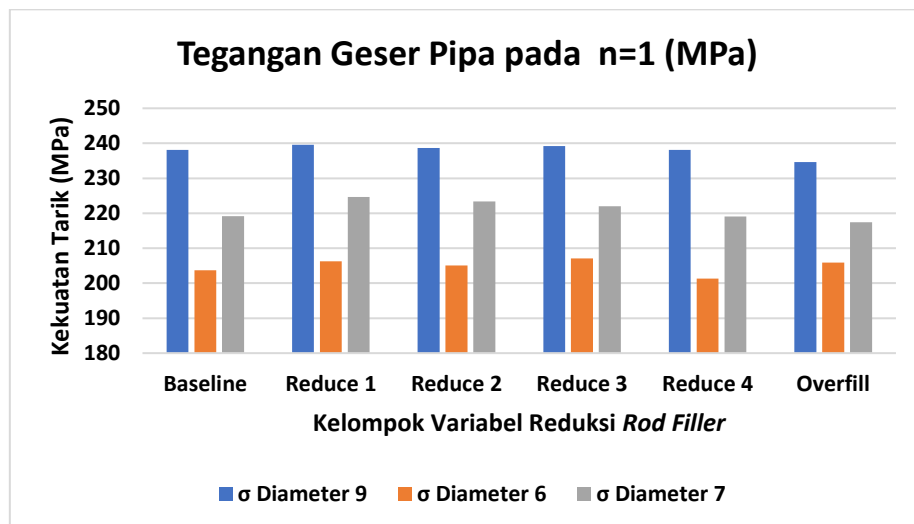
PT. KANSA

Test date	2026/03/13
Temperature	22.4 Celcius
Humidity	67.2%
Sample name	COPPER TUBE
Lot number	12/03/2026
Operation conditions	COPPER TUBE BRAZING D9
User	MOQ C KANSA
Operator	AGUNG

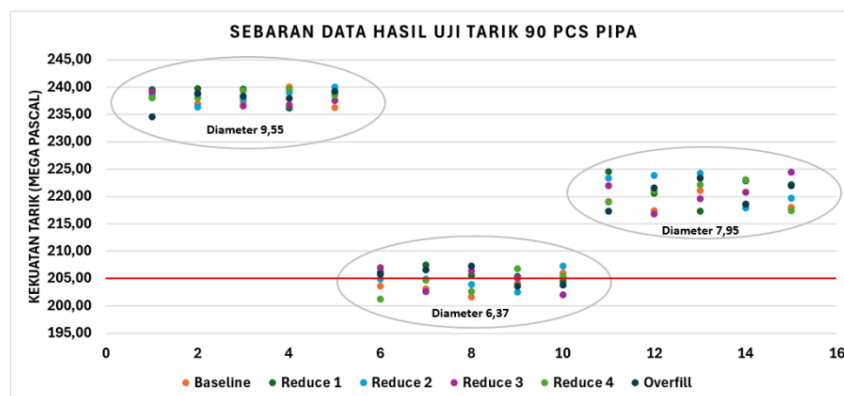


	Max point Load kgf	Break point Load kgf	Last max point Load kgf	Break point Elongation %
1	523.86	-1.4919	523.86	28.610
2	532.85	-1.3846	532.85	35.688
3	531.72	-3.0846	531.72	36.870
4	534.05	5.8942	534.05	36.123
5	534.95	4.3868	534.95	31.218
6	531.72	-1.0102	531.72	32.609

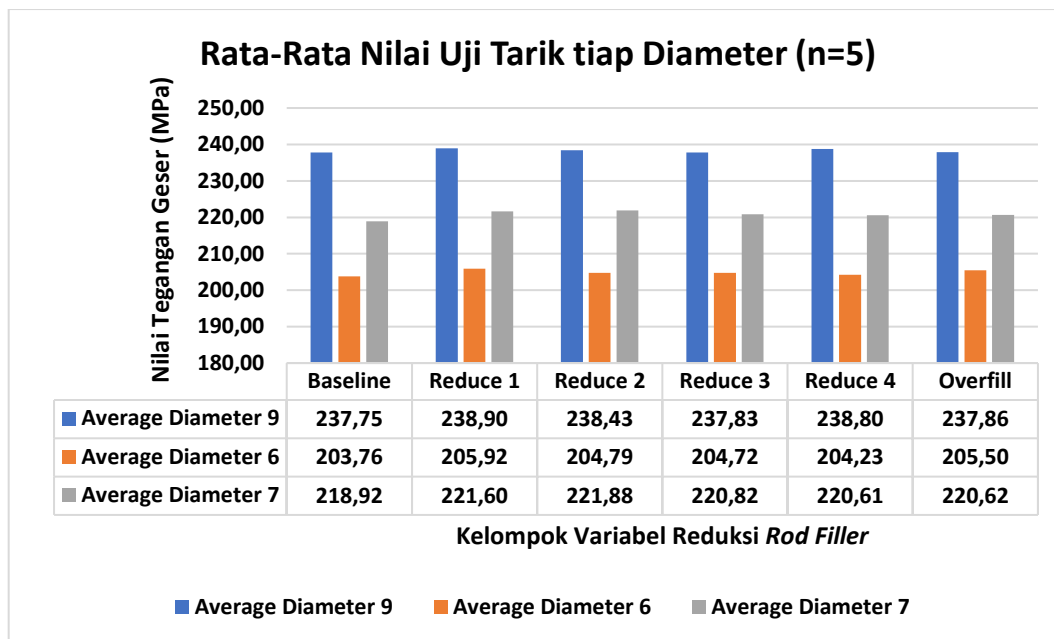
Gambar 4. Hasil Uji Tarik Diameter 9



Gambar 5. Tegangan Geser Pipa pada saat pengujian ke n=1



Gambar 6. Grafik Sebaran Data Hasil Uji Tarik



Gambar 7. Rata-Rata Nilai Uji Tarik tiap Diameter dengan Lima Kali Pengujian

Namun, ditemukan beberapa titik data yang berada sedikit di bawah ambang batas 205 MPa. Fenomena ini tidak mengindikasikan kegagalan pada sambungan *brazing*, melainkan berkaitan dengan kondisi **Base Metal** (logam induk). Sebagaimana terlihat pada hasil uji tarik, seluruh patahan terjadi pada pipa tembaga, bukan pada area sambungan. Penurunan nilai kekuatan pada beberapa sampel ini merupakan dampak dari siklus termal selama proses *brazing* manual.

Secara metalurgi, paparan panas tinggi yang terkonsentrasi saat proses pembakaran dapat menyebabkan terjadinya **perubahan struktur butir** pada pipa tembaga. Suhu yang melampaui titik rekristalisasi mengakibatkan pertumbuhan butir (*grain growth*) yang membuat material menjadi lebih lunak atau, dalam beberapa kasus, mengalami penurunan kekuatan sehingga terkesan sedikit getas dibandingkan material aslinya (*mill data sheet*). Hal ini menjelaskan mengapa kekuatan tarik pipa sedikit menurun dari nilai awal *mill data sheet* setelah melalui proses pemanasan.

Meskipun terdapat fluktuasi kecil akibat pengaruh panas (*heat-affected zone*), konsistensi data pada kategori *Reduce 4* (penghematan 50%) tetap setara dengan kategori *Baseline* dan *Overfill*. Hal ini membuktikan bahwa faktor utama penentu kekuatan mekanik adalah integritas penetrasi *filler* di dalam celah sambungan.

Sesuai dengan standar **AWS B2.2**, karena kegagalan tetap terjadi di logam induk dan nilainya masih mendekati atau melampaui batas minimum standar **JIS H3300**, maka optimasi reduksi *filler rod* hingga 50% dinyatakan aman dan valid untuk diimplementasikan. Penghematan material ini tidak memperburuk kondisi pipa, karena degradasi minor pada *base metal* merupakan konsekuensi alami dari proses penyambungan termal, bukan akibat dari pengurangan volume *filler*.

Analisis Statistik dan Korelasi Interaksi

Bagian ini menggunakan statistik untuk mematahkan mitos "estetika fillet besar". Website kalkulator ANOVA: [Social Science Statistics](https://www.social-science-statistics.com/)

1. Uji ANOVA

Tabel dibawah berisi data ANOVA hasil uji Tarik. Untuk detail nya terdapat pada Lampiran E.

Tabel 1. Hasil ANOVA Data Uji Tarik

Diameter	Grand Mean	SS Between Groups	SS Within Groups	df Between Groups	df Within Groups	MS Between Groups	MS Within Groups	F	P-Value	Result
9	238.26	0.75	52.59	4	25	0.19	2.10	0.0893	0.984969	Not Statistically Significant
6	204.82	0.48	92.56	4	25	0.12	3.70	0.0322	0.997872	Not Statistically Significant
7	220.74	4.66	171.06	4	25	1.17	6.84	0.1704	0.951485	Not Statistically Significant

Berdasarkan hasil pengujian *Analysis of Variance* (ANOVA) yang dilakukan terhadap kekuatan Tarik sambungan pada tiga variasi diameter pipa, yaitu 6 mm, 7 mm, dan 9 mm, ditemukan sebuah fakta statistik yang sangat krusial bagi optimasi proses produksi. Data menunjukkan konsistensi nilai P-Value yang sangat di seluruh kelompok pengujian, Di mana diameter 9 mm menghasilkan nilai 0,984, diameter 6 mm menghasilkan 0,997, dan diameter 7 mm berada pada angka 0,951.

Secara ilmiah, mengingat nilai seluruh P-Value tersebut jauh melampaui ambang batas signifikansi 0,05, maka hipotesis nol diterima yang berarti tidak terdapat perbedaan performa mekanik yang nyata antara kondisi *baseline*, *reduction*, hingga kondisi *overfill*. Temuan ini secara otomatis mematahkan mitos mengenai “estetika fillet besar itu bagus” yang selama ini menjadi standar kualitas visual di lini produksi. Nilai P-Value yang mendekati angka satu memberikan pembuktian absolut bahwa fillet yang terbentuk hanyalah bentuk pemborosan material yang tidak memberikan kontribusi tambahan terhadap kekuatan Tarik. Hal ini menegaskan bahwa selama aksi kapiler telah mencapai penetrasi penuh di dalam celah sambungan, maka penambahan volume *filler* metal untuk mengejar tampilan fisik fillet yang besar dikategorikan sebagai *over-processing waste*. Kegagalan yang terjadi tetap di logam induk (*Base Metal Failure*) di semua tingkatan volume kawat semakin memperkuat argument bahwa integritas sambungan pada level reduksi paling ekstrem sekalipun sudah lebih dari cukup untuk melampaui kekuatan pipa tembaga itu sendiri.

Kondisi statistik ini memberikan justifikasi teknis yang sangat kuat bagi Perusahaan untuk melakukan transisi dari standar visual subjektif menuju standardisasi berbasis data laboratorium. Dengan nilai F-hitung yang sangat rendah, dapat disimpulkan bahwa variasi volume *filler* rod bukanlah variable penentu kualitas sambungan. Oleh karena itu, kebijakan pengurangan konsumsi material hingga level reduction tiga dinyatakan aman secara ekonomi, karena performa fungsional yang dihasilkan terbukti identik dengan standar lama yang jauh lebih boros.

Analisis Ekonomi dan Efisiensi Manufaktur

Menghubungkan temuan teknis ke dampak finansial perusahaan. Berikut table rangkuman temuan teknis pada penelitian ini.

Tabel 2. Hasil Rata-Rata Pengujian

Parameter Uji	Hasil Eksperimen	Standar Referensi	Status
Kekuatan Tarik	±260 MPa	ASTM B88 (Min. 210 MPa)	Pass
Lokasi Patah	Logam Induk (<i>Base Metal</i>)	AWS B2.2 (Luar Sambungan)	Pass
Kebocoran	0,25 g/a	ASTM E427	Pass
Tekanan Uji	2.0 MPa	ASME B31.5 (> Tekanan Kerja)	Pass

Berdasarkan tabel tersebut dapat dilihat bahwa secara teknis hasil pengujian bisa dianggap bahwa pengurangan *rod filler* bisa dilakukan. Lalu selanjutnya dilakukan analisis ekonomi bagaimana dampak ekonomi terhadap pengurangan *rod filler* ini.

Material Description	Plant	Loca	SL	BUn	Unrestricted	Quality Inspection	Blocked	Value Unrestricted	Value in QualInsp.
BRAZING MATERIAL 2.4X500MM	3000	5100	KG		660	0	0	209,531,947	0
		5100						209,531,947	0

Gambar 8. Data Stok Rod Brazing dan Biaya (IDR)

Gambar diatas merupakan data harga estimasi *rod brazing* yang diambil dari data SAP. Data ini akan digunakan sebagai dasar penghitungan. Pada gambar tersebut satuan nya adalah kilogram di mana harga perkilogram menjadi Rp317.472,64. Jika dikonversi ke harga tiap mm rod akan menjadi seperti tabel dibawah

Tabel 3. Hasil Konversi Harga *Rod Filler* ke mm

Qty (pcs)	Berat (g)	Panjang (mm)	Harga
1	17,79	500	Rp5.647,84
56,21135469	1000	28105,67735	Rp317.472,64
0,002	0,03558	1	Rp11,30

Selanjutnya akan dilakukan analisa penghematan jika dilakukan reduksi panjang kawat sampai batas minimal.

1. Komparasi Konsumsi Material

Tabel 4. Komparasi Konsumsi Material Diameter 9

Diameter 9			
N	Panjang Rod Filler (mm)	%Reduce	Harga Rod (Rp)
Baseline	10	100%	Rp112,96
Reduce 1	8	80%	Rp90,37
Reduce 2	7	70%	Rp79,07
Reduce 3	6	60%	Rp67,77
Reduce 4	5	50%	Rp56,48
Overfill	11	110%	Rp124,25

Tabel 5. Komparasi Konsumsi Material Diameter 6

Diameter 6			
N	Panjang Rod Filler (mm)	%Reduce	Harga Rod (Rp)
Baseline	8	100%	Rp90,37
Reduce 1	7	88%	Rp79,07
Reduce 2	6	75%	Rp67,77
Reduce 3	5	63%	Rp56,48
Reduce 4	4	50%	Rp45,18
Overfill	9	113%	Rp101,66

Tabel 6. Komparasi Konsumsi Material Diameter 7

Diameter 7			
N	Panjang Rod Filler (mm)	%Reduce	Harga Rod (Rp)
Baseline	14	100%	Rp158,14
Reduce 1	12	86%	Rp135,55
Reduce 2	10	71%	Rp112,96
Reduce 3	8	57%	Rp90,37
Reduce 4	7	50%	Rp79,07
Overfill	15	107%	Rp169,44

Dari tabel tersebut diperoleh potensi penghematan yang cukup signifikan di mana ketiga varian diameter memungkinkan untuk dilakukan penghematan sampai 50% dari kondisi baseline.

2. Proyeksi *Annual Cost Saving*

Perhitungan penghematan biaya tahunan dapat diperkirakan berdasarkan volume produksi. Misal kuantiti produksi diameter 9, 6 dan 7 masing-masing adalah 100.000 unit/tahun maka **biaya yang dikeluarkan** untuk material *filler rod* adalah Rp11.296.000, Rp9.037.000 dan Rp15.814.000 dengan total sekitar **Rp36.147.000**. Namun jika diaplikasikan **reduksi 50%** masing-masing diameter maka biaya yang diperlukan untuk pembelian **menjadi** Rp5.648.000, Rp4.518.000 dan Rp7.907.000 dengan total **Rp18.073.000**. Potensi penghematan 50% dari biaya semula. Angka yang cukup besar bagi manufaktur untuk mempertimbangkan reduksi *filler rod brazing*.

Penentuan Titik Optimal (*Sweet Spot*) via MCDM

Angka penghematan yang cukup signifikan memunculkan pertanyaan apakah titik 50% setiap diameter apakah angka yang optimal. Jika dilihat dari data hasil eksperimental hal ini memungkinkan. Namun sebagai manusia, peneliti memiliki keterbatasan dalam menyimpulkan secara objektif pilihan mana yang terbaik terlepas dari kepentingan *cost reduction* oleh Perusahaan. Jika dilihat dari aspek prinsip manajemen risiko teknik (*Engineering Risk Management*), kondisi pengujian dilakukan di bagian *department quality* sehingga data dianggap diambil dalam kondisi terkontrol sedangkan ketika produk beroperasi di *customer* terdapat gangguan (*noise*) seperti keterampilan operator pemasangan, variasi tekanan gas hingga kontaminasi permukaan pipa. Maka dilakukan metode AHP-TOPSIS untuk menentukan titik optimal sesuai kriteria yang ada (*Multi-Criteria Decision Maker*).

1. Metode AHP

Penentuan skor akhir yang menyeimbangkan variabel kualitas (kekuatan tarik, kebocoran, uji operasional) dengan variabel ekonomi (biaya material). Tabel di bawah berisi poin AHP yang dikategorikan oleh penulis. Paling utama adalah menjaga *safety* terhadap *customer*, prioritas selanjutnya adalah performa mekanik, kondisi operasional baru terakhir *cost*.

Tabel 7. Kriteria *Pairwise Comparison* AHP

Kriteria	Poin AHP			
	C1 (Tarik)	C2 (Leak Test)	C3 (Running Test)	C4 (Ekonomi)
C1 (Tarik)	1	0,33	3	5
C2 (Leak Test)	3	1	5	7
C3 (Running Test)	0,33	0,2	1	5
C4 (Ekonomi)	0,2	0,14	0,2	1
Total	4,53	1,68	9,2	18

Setelah itu dilakukan normalisasi sehingga bobot diketahui. Diperoleh bobot seperti pada tabel berikut

Tabel 8. Bobot Kriteria AHP

Kriteria	C1 (Tarik)	C2 (Leak Test)	C3 (Running Test)	C4 (Ekonomi)	Bobot
C1 (Tarik)	0,221	0,199	0,326	0,278	25,58%
C2 (Leak Test)	0,662	0,597	0,543	0,389	54,77%
C3 (Running Test)	0,074	0,119	0,109	0,278	14,48%
C4 (Ekonomi)	0,044	0,085	0,022	0,056	5,17%

Langkah selanjutnya adalah menghitung vektor baris dengan cara mengalikan poin bobot masing-masing dengan baris poin AHP. Lalu setiap baris C1-C4 dihitung berapa jumlah vektor baris.

Tabel 9. Jumlah Vektor Baris

Kriteria	C1 (Tarik)	C2 (Leak Test)	C3 (Running Test)	C4 (Ekonomi)	Jumlah
C1 (Tarik)	0,25582915	0,18256023	0,434490768	0,258299507	1,13118
C2 (Leak Test)	0,76748745	0,547680691	0,724151279	0,36161931	2,400939
C3 (Running Test)	0,08527638	0,109536138	0,144830256	0,258299507	0,597942
C4 (Ekonomi)	0,05116583	0,078240099	0,028966051	0,051659901	0,210032

Selanjutnya adalah menghitung λ max dengan cara membagi jumlah vektor baris terhadap bobot seperti terdapat pada tabel berikut

Tabel 10. λ max tiap Kategori

Kriteria	λ max
C1 (Tarik)	4,42162142
C2 (Leak Test)	4,38382944

Kriteria	$\lambda \max$
C3 (Running Test)	4,12857301
C4 (Ekonomi)	4,06566555
$\lambda \max$	4,24992235

Selanjutnya dihitung CI (Consistency Index) dengan rumus $(\lambda_{\max} - n)/(n-1)$. Setelah itu dilakukan penghitungan Consistency Ratio dengan rumus $CR = CI / RI$. Nilai RI untuk n data = 4 adalah 0,9. Maka diperoleh **hasil akhir CR = 9%**. $CR \leq 10\%$, maka **pembobotan** dianggap konsisten yang artinya **data sah** dimana **prioritas** utama adalah **safety dan quality**, bukan sekadar mencari penghematan biaya.

2. Metode TOPSIS

Variasi Baseline dan Overfill diposisikan murni sebagai batas acuan kontrol. Evaluasi jarak Solusi ideal (D^+ dan D^-) serta nilai preferensi akhir (V_i) pada kelompok reduksi dirangkum pada tabel dibawah

Tabel 11. Hasil TOPSIS tiap Diameter

Panjang Rod Filler	Diameter 9 D+	Diameter 9 D-	Diameter 9 Vi	Diameter 6 D+	Diameter 6 D-	Diameter 6 Vi	Diameter 7 D+	Diameter 7 D-	Diameter 7 Vi
Baseline	0,0131	0,0462	0,7793	0,0146	0,1149	0,8873	0,0131	0,0909	0,8736
Reduce 1	0,0468	0,0078	0,1432	0,0095	0,1221	0,9275	0,0122	0,0832	0,8721
Reduce 2	0,0220	0,0270	0,5509	0,0080	0,1176	0,9363	0,0884	0,0096	0,0983
Reduce 3	0,0163	0,0329	0,6690	0,0043	0,1202	0,9653	0,0909	0,0130	0,1250
Reduce 4	0,0267	0,0250	0,4837	0,1008	0,0263	0,2068	0,0870	0,0153	0,1498
Overfill	0,0294	0,0214	0,4214	0,1229	0,0018	0,0148	0,0895	0,0031	0,0333

- Geometri Pipa Diameter 9 mm → Rekomendasi: Reduce 3
Pada kelompok reduksi pipa 9 mm alternatif **reduce 3** meraih skor tertinggi sebesar **0,6690**. Pilihan ini paling optimal karena memiliki jarak terdekat dengan Solusi ideal positif ($D^+ = 0,0163$) dengan indikasi stabilitas mekanik dan kebocoran tetap aman sekaligus **menghemat biaya** hingga **40%**. Pengurangan lebih ekstrem ke *reduce 4* ditolak oleh sistem akibat tingginya deviasi hasil uji fungsional.
- Geometri Pipa Diameter 6 mm → Rekomendasi: Reduce 3
Hasil paling ideal tercapai pada diameter 6 mm, di mana *reduce 3* mendominasi peringkat pertama dengan skor preferensi mutlak 0,9653. Secara geometris, *reduce 3* hampir menyentuh titik ideal sempurna ($D^+ = 0,0043$) karena mencatatkan nilai pengujian mekanik dan kekedapan gas yang sangat stabil, dipadukan dengan efisiensi biaya material yang tinggi. Angka ini memberikan justifikasi kuat untuk menerapkan *reduce 3* sebagai standar baru produksi.

- c. Geometri Pipa Diameter 7 mm → Rekomendasi: *Reduce 1*
- Berbeda dengan diameter lainnya, diameter 7 mm mengunci Keputusan optimal pada *reduce 1* dengan nilai preferensi 0,8721. Berdasarkan data laboratorium, terjadi lonjakan nilai kebocoran (*Leak Rate*) yang merata dari 0,00258 g/a (*reduce 1*) melompat naik menjadi 0,00382 g/a dari titik *reduce 2* hingga *reduce 4*. Karena kriteria kebocoran memegang bobot penalty terbesar (54,77%), TOPSIS secara otomatis menjatuhkan skor preferensi *reduce 2*, 3, dan 4 hingga di bawah 0,15. Integrasi ini sukses memitigasi Risiko dengan membatasi pengurangan material maksimal hanya sampai Tingkat *reduce 1* demi menjaga keselamatan produk di lapangan.

Analisis dan Pembuktian Hipotesis Penelitian

1. Pengujian Hipotesis 1: Pengaruh Variasi Volume terhadap Kekuatan Mekanik
 - a. Keputusan Statistik: Menerima H_01 /Menolak H_11
 - b. Analisis dan Pembahasan: Hasil P-value > 0,05 secara statistik tidak terdapat perbedaan kekuatan tarik yang signifikan. Penurunan volume pengisian *rod filler* masih mampu memenuhi ruang kapiler secara optimal.
2. Pengujian Hipotesis 2: Pengaruh Variasi Volume terhadap Integritas Sambungan (*Leak Test*)
 - a. Keputusan Statistik: Menerima H_{12} /Menolak H_{02} (untuk diameter 7 mm) dan Menerima H_{02} (untuk diameter 9 mm dan 6 mm)
 - b. Analisis dan Pembahasan: Pada diameter 9 mm dan 6 mm tingkat kelulusan *leak test* stabil dan konstan dibawah batas toleransi kebocoran. Pada diameter 7 mm terjadi anomali kritis di mana terjadi lonjakan Tingkat kebocoran dari *reduce 1* – *reduce 2* sampai 4.
3. Pengujian Hipotesis 3: Optimasi Efisiensi Material
 - a. Keputusan Statistik: Menerima H_{13} /Menolak H_{03}
 - b. Analisis dan Pembahasan: Pengurangan volume *rod filler* berdasarkan perhitungan matematis terbukti memberikan peningkatan efisiensi biaya yang sangat signifikan dan terukur tanpa mengorbankan kualitas produk.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa formula volume rod filler brazing optimal yang aman untuk tiga jenis diameter pipa tembaga pada lini produksi Air Conditioner (AC) berhasil ditentukan melalui pendekatan terintegrasi antara analisis statistik dan metode pengambilan keputusan multi-kriteria. Hasil pengujian tarik dan analisis One-Way ANOVA menunjukkan bahwa reduksi volume rod filler hingga tingkat Reduce 4 tidak menurunkan kekuatan mekanik sambungan secara signifikan, dengan nilai rata-rata kekuatan tarik mencapai 253 MPa, melebihi standar minimum JIS H3300 sebesar 205 MPa serta menghasilkan Base Metal Failure sesuai kriteria AWS B2.2. Pengujian Leak Test dan Running Test juga membuktikan bahwa seluruh variasi volume masih mampu mempertahankan integritas hermetis dan keamanan operasional sesuai standar industri.

Melalui integrasi metode AHP–TOPSIS dengan prioritas keselamatan (*Leak Test*) sebesar 54,77%, diperoleh titik volume optimal pada pipa diameter 9 mm dan 6 mm di tingkat Reduce 3 dengan skor preferensi masing-masing 0,6690 dan 0,9653, sedangkan untuk pipa diameter 7 mm direkomendasikan maksimal pada tingkat Reduce 1 dengan skor preferensi

0,8721 untuk memitigasi risiko kebocoran. Implementasi rekomendasi ini berpotensi memberikan penghematan biaya material hingga $\pm 40\%$ pada pipa diameter 9 mm dan 6 mm serta $\pm 14\%$ pada pipa diameter 7 mm. Oleh karena itu, standardisasi volume rod filler brazing berbasis manajemen risiko teknik dapat menjadi solusi efektif untuk mendukung program cost down perusahaan tanpa mengorbankan kualitas maupun keselamatan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis struktur mikro menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM), pengujian pada berbagai jenis material filler brazing, serta pengujian kelelahan (fatigue test) guna memvalidasi ketahanan jangka panjang sambungan pada kondisi beban dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimardani, F., Moghaddam, H. A., Sarmadian, A., & Shafaei, M. (2019). Évaluation de la perte de pression et de la performance des conduites insérées dans des serpentins en spirale lors de l'évaporation par convection forcée du R-600a. *International Journal of Refrigeration*, 107, 20–30.
- American Welding Society (AWS) Committee on Brazing and Soldering. (2016). *C3.4M/C3.4: Specification for torch brazing* (4th ed.). American Welding Society.
- American Welding Society (AWS). (2007). *Brazing handbook* (5th ed.). American Welding Society.
- Anam, K. (2017). *The Effect of Filler Size Variation on The Mechanical Strength and Failure of Epoxy Adhesive Layer*.
- Anis, M., & Winarto. (2025). *LAS MATERIAL: Proses penyambungan dan permasalahan yang ditimbulkan*. PT. Rayyana Komunikasindo.
<https://books.google.co.id/books?id=5Q5DEQAAQBAJ>
- Assa, V. A., & Peginusa, S. S. (2025). *Praktik Kerja Baja*. Switly Peginusa.
<https://books.google.co.id/books?id=NnOtEQAAQBAJ>
- Bastidas, D. M., Cayuela, I., & Bastidas, J. M. (2006). *Ant-nest corrosion of copper tubing in air-conditioning units*.
- Campilho, R. D. S. G. (2024). Advances in the Experimentation and Numerical Modeling of Material Joining Processes. *Materials*, 17(1), 1–6. <https://doi.org/10.3390/ma17010130>
- Cozzarini, L., Marsich, L., & Schmid, C. (2020). Ant-nest corrosion failure of heat exchangers copper pipes. *Engineering Failure Analysis*, 109, 104387. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104387>
- Ech-Cheikh, F., & Drissi-Habti, M. (2023). Numerical Modeling of the Micromechanics Damage of an Offshore Electrical High-Voltage Phase. *Energies*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/en16145422>
- Hao, L., Liu, J., & Li, Y. (2021). Wetting and spreading of agcuti on selective laser-melted ti-6al-4v. *Materials*, 14(17), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma14174804>
- Jattakul, P., & Kanlayasiri, K. (2018). Effects of brazing parameters on the microstructure and tensile shear force of copper sheets using amorphous filler metal. *MATEC Web of Conferences*, 192, 01010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819201010>
- Khammayom, N., Maruyama, N., Chaichana, C., & Hirota, M. (2023). Experimental analysis of local air temperature and thermal performance of a serpentine copper pipe. *Energy Reports*, 9, 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.044>
- Lai, R., Zhang, W., Sheng, X., Ye, X., Cai, Y., Zhang, X., Luo, T., Chen, P., Lei, Q., & Li, Y. (2023). Microstructure and Properties of Phosphorus Bronze/Brass Joints Produced by Resistance Projection Welding. *Coatings*, 13(6), 1–12. <https://doi.org/10.3390/coatings13061032>

- Liu, H., Pu, J., Wu, M., Zhang, C., Rao, J., Long, W., & Shen, Y. (2023). Research on the Microstructure and Properties of Al Alloy/Steel CMT Welding-Brazing Joints with Al-Si Flux-Cored Welding Wires. *Coatings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/coatings13091590>
- Liu, S., Luan, Y., & Shohji, I. (2025). Brazing of Thin-Walled Stainless Steel Using Environmentally Friendly Ni-Cr-P Electrodeposition: Degradation Mechanism of Brazed Joint and Corresponding Improvement Strategy. *Materials*, 18(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma18102406>
- Ma, Q., Chen, Y., Li, S., Xu, G., Wang, F., He, P., & Zhang, S. (2023). Interfacial structure and strength of Al-25Si-4Mg-1Cu joint brazed with Zn interlayer. *Engineering Reports*, 5(8), 1–10. <https://doi.org/10.1002/eng2.12624>
- Mengen, L., & Li, B. (2023). Improving bonding strength and reliability of brazed titanium/copper dissimilar joint using vanadium interlayer. *Materials Research Express*, 10(12), 0–12. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad146e>
- Mohd Zahri, N. A., Yusof, F., Badruddin, I. A., Haseeb, A. S. M. A., Sukiman, N. L., & Kamangar, S. (2021). Deformation and Fracture Behavior of Sandwiched Copper Foam Brazed Joint Using Amorphous Copper-Tin-Nickel-Phosphorus Filler. *Frontiers in Materials*, 8(May), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.665219>
- Monteiro, B., & Simões, S. (2024). Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V to Al₂O₃ Brazed Joints Using Ti-Ag/Cu-Ti Thin Films. *Metals*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/met14020146>
- Nakkaew, S., Chitipalungsri, T., Ahn, H. S., Jerng, D.-W., Asirvatham, L. G., Dalkılıç, A. S., Mahian, O., & Wongwises, S. (2019). Application of the heat pipe to enhance the performance of the vapor compression refrigeration system. *Case Studies in Thermal Engineering*, 15, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100531>
- Nur Syahid, S. P. M. P. (2021). *Teknik Pengelasan Gas Tungsten SMK/MAK Kelas XII*. Gramedia Widiasarana indonesia. <https://books.google.co.id/books?id=X2oYEAAAQBAJ>
- Norkhudjayev, F., Mukhamedov, A., Djalolova, S., Guzashvili, K., Aralova, K., & Rakhimov, M. (2024). Technological Features of Cementation of Low-Alloy Structural Steel. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2024(18), 170–174. <https://doi.org/10.17683/ijomam/issue18.20>
- Olson, D. L., Siewert, T. A., Liu, S., & Edwards, G. R. (Eds.). (1993). *ASM handbook, volume 6: Welding, brazing, and soldering*. ASM International.
- Penyaz, M. A., Ivannikov, A. A., Sevryukov, O. N., & Kalin, B. A. (2021). Overview of nickel-based filler metals for brazing of austenitic stainless steels. *Non-Ferrous Metals*, 50(1), 41–56. <https://doi.org/10.17580/nfm.2021.01.06>
- Şafak, G., İrizalp, S., & Köroğlu, B. K. (2022). *Ag içeren dolgu metalleri ile elde edilen bakır/pirinç lehim bağlantısının mikroyapısı ve mekanik performansı üzerine çalışma Study on microstructure and mechanical performance of copper/brass brazing joint with Ag brazing fillers*.
- Sekulic, D. P. (Ed.). (2013). *Advances in brazing: Science, technology and applications*. Woodhead Publishing.
- Siqueira, L. O., Da Silva, A. C. S., Marques, I. J., Gonzalez, C. H., & De Abreu Santos, T. F. (2021). Microstructural Evaluation of Copper Brazed Joints Using Silver-Based Filler Metal. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 10(2), 174–183. <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00722-0>
- Suprpto, W., Press, U. B., & Media, U. B. (2017). *Teknologi Pengecoran Logam*. Universitas Brawijaya Press. <https://books.google.co.id/books?id=C-RVDwAAQBAJ>
- Wu, J., Xue, S., & Zhang, P. (2021). Effect of in and PR on the microstructure and properties

- of low-silver *filler* metal. *Crystals*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/cryst11080929>
- Xia, C. Z., Liang, Q. H., & Chen, D. F. (2021). Investigation of microstructure and properties near the interface of copper/aluminum brazed joint. *Metallic Materials*, 51(04), 235–239. https://doi.org/10.4149/km_2013_4_235
- Xu, J., Fu, Y., Yang, Y., Li, Z., Wang, L., Xue, S., & Wu, J. (2023). Combined Effect of In and Ce on Microstructure and Properties of Ag10CuZnSn Low-Silver Brazing *Filler* Metals. *Crystals*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/cryst13081285>
- Yang, X., Xue, Y., Wang, S., Ge, J., Chen, Y., Zhang, Z., Tang, J., & Xiao, J. (2022). *Microstructure and Mechanical Properties of GH4169 Superalloy and Si3N4 Ceramic Joints Brazed with AgCuTi/Cu foam/AgCuTi Compositated Filler*.
- Zhang, C., Chen, H., Yang, W., Zhang, Q., Yang, B., Hu, Y., Li, C., Gao, D., Si, X., Qi, J., & Cao, J. (2022). *Effect of the Surface States of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel on Mn-Based Brazing Alloy Wetting*.
- Zhang, L., Long, W. M., Zhong, S. J., & Pei, Y. Y. (2022). Microstructures and Properties of Ni-Cr-P *Filler* Metals and Brazed Joints Bearing CNTs. *Materials Transactions*, 63(10), 1375–1379. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-M2022061>