

PENGUJIAN KEKERASAN DAN KEAUSAN PADA ALUMINIUM DAUR-ULANG DARI UKM YANG DILAPISI TEMBAGA

*Ivano Patrick Pasomba¹, Sulardjaka², Norman Iskandar²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +6285223839925

*E-mail: ivanopa3@gmail.com

Abstrak

Aluminium merupakan material yang banyak digunakan di industri karena ringan dan tahan korosi, namun memiliki kekurangan dalam hal kekerasan dan ketahanan terhadap keausan. Untuk mengatasi kelemahan ini, dilakukan pelapisan menggunakan logam tembaga (Cu) melalui metode elektroplating. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pelapisan Cu terhadap peningkatan kekerasan dan ketahanan aus aluminium. Metode yang digunakan meliputi proses elektroplating dengan variasi waktu pelapisan dan tegangan tertentu, dilanjutkan dengan pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers dan pengujian keausan menggunakan metode pin-on-disk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu pelapisan menghasilkan ketebalan lapisan yang lebih besar, yang secara langsung meningkatkan nilai kekerasan dan ketahanan aus permukaan aluminium. Lapisan tembaga dapat meningkatkan sifat mekanik (kekerasan) suatu material. Penelitian ini bermanfaat dalam memberikan alternatif teknologi pelapisan permukaan untuk memperkuat aluminium daur ulang, serta sebagai acuan bagi industri dalam memilih jenis lapisan yang sesuai untuk meningkatkan performa dan umur pakai komponen berbahan aluminium daur ulang.

Kata kunci: aluminium daur ulang; elektroplating; kekerasan; keausan; tembaga

Abstract

Aluminum is a material widely used in industry due to its light weight and corrosion resistance; however, it has shortcomings in terms of hardness and wear resistance. To address these weaknesses, a coating using copper (Cu) metal was applied through the electroplating method. The aim of this study is to determine the extent to which Cu coating affects the improvement of aluminum's hardness and wear resistance. The methods used include the electroplating process with variations in plating time and voltage, followed by hardness testing using the Vickers method and wear testing using the pin-on-disk method. The results of the study show that increasing the plating time results in greater coating thickness, which directly enhances the surface hardness and wear resistance of aluminum. The copper coating was found to improve the mechanical properties (hardness) of the material. This study is beneficial in providing an alternative surface coating technology to reinforce recycled aluminum and serves as a reference for industries in selecting appropriate coating types to improve the performance and service life of components made from recycled aluminum.

Keywords: aluminum recycle; copper; electroplating; hardness; wear

1. Pendahuluan

Aluminium adalah salah satu logam yang paling banyak digunakan di berbagai sektor industri, mulai dari otomotif, pesawat terbang, elektronik, hingga konstruksi. Keunggulan utama aluminium daur-uang dari UKM dibandingkan logam lain adalah bobotnya yang ringan [1], ketahanan terhadap korosi, dan kemudahan dalam pembentukan dan fabrikasi [2]. Namun, aluminium daur-uang dari UKM juga memiliki kelemahan signifikan dalam hal kekuatan dan ketahanan terhadap keausan, khususnya jika digunakan dalam lingkungan yang melibatkan gesekan tinggi atau beban mekanis yang besar. Kelemahan ini sering kali menjadi hambatan dalam aplikasinya untuk komponen-komponen yang membutuhkan daya tahan ekstra, seperti bagian mesin kendaraan atau peralatan yang bekerja pada suhu tinggi dan beban berat [3] [4].

Di dunia industri, untuk mengatasi kekurangan ini, teknik perlakuan permukaan (surface treatment) seperti electroplating telah berkembang pesat dan menjadi solusi yang diandalkan. Electroplating merupakan teknik pelapisan logam yang melibatkan proses elektrokimia untuk melapisi logam dasar dengan lapisan logam lain yang memiliki sifat mekanik dan ketahanan yang lebih baik. Dalam penelitian ini, aluminium daur-uang dari UKM dilapisi dengan tiga jenis logam, yaitu tembaga (Cu) [5] [6] [7].

Lapisan tembaga (Cu) digunakan sebagai dasar karena daya lekatnya yang baik pada aluminium daur-uang dari UKM dan kemampuannya meningkatkan ketangguhan awal. [8] [9] Penelitian ini berkontribusi dalam pengembangan material komposit berbasis aluminium daur-uang dari UKM yang lebih tahan lama dan berkinerja tinggi [10]. Material yang lebih tahan aus dapat mendukung keberlanjutan dengan mengurangi frekuensi penggantian komponen, limbah industri, dan biaya produksi. Studi ini juga bertujuan memahami pengaruh pelapisan tembaga terhadap sifat mekanik aluminium daur-uang dari UKM. Pengujian meliputi kekerasan untuk mengukur ketahanan terhadap deformasi, serta keausan untuk menilai daya tahan lapisan terhadap gesekan berulang.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian dimulai dengan identifikasi masalah dan studi literatur, dilanjutkan dengan pembuatan spesimen, proses elektroplating, serta pengujian kekerasan dan keausan. Pembuatan spesimen meliputi pemotongan aluminium daur-ulang dari UKM dengan diameter 27 mm dan ketebalan 2,6 mm, pengamplasan, pemolesan, serta pembersihan menggunakan larutan asam untuk memastikan permukaan siap dilapisi.

Peralatan yang digunakan dalam proses elektroplating meliputi power supply yang menyediakan arus dan tegangan dengan pengaturan yang dapat disesuaikan untuk mendukung proses pelapisan, gelas breaker yang digunakan sebagai wadah larutan elektroplating dan tempat sampel selama proses berlangsung, serta kabel penghubung yang berfungsi menghubungkan sumber listrik ke anoda dan katoda. Selain itu, pemanas digunakan untuk menaikkan suhu larutan elektrolit agar proses berjalan optimal, klem statif berperan sebagai penyangga agar posisi elektroda tetap stabil, dan pinset digunakan dalam penanganan spesimen saat pembersihan sebelum pelapisan. Setelah pelapisan, dryer digunakan untuk mengeringkan spesimen, sedangkan alat uji kekerasan seperti Vickers atau Rockwell Hardness Tester berfungsi mengukur tingkat kekerasan lapisan hasil pelapisan, dan alat uji keausan seperti tribometer digunakan untuk menguji ketahanan lapisan terhadap gesekan dan keausan.

Bahan penelitian yang digunakan meliputi aluminium daur-ulang dari UKM dengan diameter 27 mm dan tebal 2,6 mm; elektroda tembaga yang terdiri dari CuSO_4 (tembaga sulfat) dan H_2SO_4 (asam sulfat); H_3BO_3 (asam borat) dan H_2SO_4 (asam sulfat); elektrolit Cu (tembaga) alkohol 96%; larutan Na_2CO_3 ; larutan HCl 10%; larutan sabun; dan aquades.

Proses pembuatan spesimen sangat penting untuk memastikan keberhasilan pelapisan elektroplating pada aluminium daur-uang dari UKM. Langkah awal dalam proses ini adalah pemotongan sampel; pemotongan dilakukan untuk mendapatkan ukuran spesimen yang sesuai untuk proses elektroplating dan pengujian kekerasan serta keausan; sampel aluminium daur-uang dari UKM dipotong dengan ketebalan 2,6 mm dan diameter 27 mm; proses pemotongan dilakukan menggunakan alat pemotong sampel metalografi untuk mendapatkan hasil yang presisi.

Langkah selanjutnya adalah pengamplasan dan pemolesan; pengamplasan bertujuan untuk menghaluskan permukaan aluminium daur-uang dari UKM dan menghilangkan lapisan oksida atau cacat yang mungkin ada; proses ini dilakukan secara bertahap menggunakan kertas ampelas dengan grit yang berbeda, dimulai dari grit kasar seperti 200–400 hingga grit halus mencapai 800–5000; setelah itu dilakukan tahap pemolesan menggunakan kain pemoles dan pasta abrasif untuk memastikan permukaan benar-benar halus dan berkilau; permukaan yang halus sangat penting agar lapisan elektroplating dapat menempel dengan baik dan mengurangi ketidakrataan lapisan.

Setelah pengamplasan, dilakukan pembersihan permukaan aluminium daur-uang dari UKM melalui proses pickling dan degreasing; tahap pertama dimulai dengan mencuci spesimen menggunakan larutan sabun cair atau deterjen; setelah pencucian awal, spesimen dibilas dengan aquades secara menyeluruh untuk menetralkan permukaan dan menghilangkan sisa bahan kimia; kemudian spesimen direndam dalam larutan alkohol 96% selama 1 menit dan kembali dibilas dengan aquades untuk memastikan permukaan benar-benar bersih.

Langkah berikutnya adalah perendaman spesimen dalam larutan Na_2CO_3 dengan suhu 60–70°C selama 1 menit; setelah itu, spesimen dibilas dengan aquades lalu dicuci kembali dengan larutan sabun dan dibilas hingga benar-benar bersih untuk memastikan tidak ada residu sabun yang tertinggal; tahap akhir dilakukan dengan menyiapkan larutan HCl 10% dan mencelupkan spesimen ke dalam larutan tersebut selama 3 detik saja untuk menghindari kerusakan permukaan; spesimen kemudian segera dibilas dengan aquades untuk menetralkan sisa asam dan dikeringkan menggunakan pengering udara bertekanan rendah agar pengeringan merata dan spesimen siap untuk proses pelapisan selanjutnya. Gambar 3.1 merupakan elektroda untuk proses elektroplating.



Gambar 3.1 Elektroda Tembaga

Gambar 3.2 memperlihatkan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini, yang berfungsi sebagai objek utama untuk serangkaian pengujian eksperimental. Spesimen tersebut memiliki diameter sebesar 27 mm dan ketebalan 2,2-2,7 mm, dan dibuat dengan dimensi tersebut untuk memastikan kesesuaian dengan standar pengujian serta untuk mendapatkan hasil yang representatif.



Gambar 3.2 Spesimen

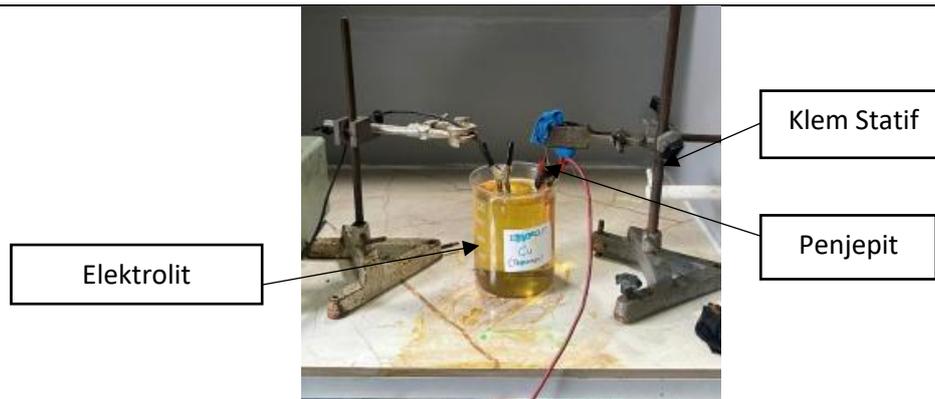


Gambar 3.3 Spesimen setelah proses elektroplating

Gambar 3.3 menunjukkan sebuah spesimen yang telah melalui proses elektroplating. Spesimen tersebut dilapisi tembaga. Dalam gambar 3.3, spesimen yang terlihat memiliki permukaan yang halus dan bersih, yang menunjukkan bahwa proses elektroplating telah memberikan lapisan logam yang rata dan berkilau. Proses ini biasanya digunakan untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi, memberikan daya tahan mekanik yang lebih baik, atau untuk tujuan estetika pada permukaan spesimen. Gambar ini memberikan gambaran visual tentang hasil akhir dari proses elektroplating pada spesimen, yang kini memiliki permukaan yang lebih halus dan terlindungi dengan lapisan logam pelindung.

Proses electroplating dilakukan dengan satu pelapis yaitu pelapisan tembaga, memiliki peran penting dalam meningkatkan daya tahan dan kekerasan permukaan aluminium daur-uang dari UKM. Pelapisan dimulai dengan tembaga yang berfungsi sebagai lapisan dasar untuk memperkuat daya rekat lapisan berikutnya serta meratakan permukaan dan mengisi pori-pori pada substrat aluminium daur-uang dari UKM. Larutan yang digunakan adalah elektrolit tembaga yang terdiri dari CuSO_4 dan H_2SO_4 dengan suhu kamar. Aluminium daur-uang dari UKM yang telah dipersiapkan dijadikan sebagai katoda dan elektroda tembaga sebagai anoda; arus listrik sebesar 3A digunakan untuk memastikan hasil pelapisan merata. Proses ini dilakukan selama 90 detik dengan pembalikan posisi spesimen setiap 45 detik agar pelapisan merata di kedua sisi; setelah pelapisan selesai, spesimen dibilas dengan aquades dan dikeringkan.

Tahap akhir adalah pengecekan dan finishing untuk memastikan kualitas lapisan. Pemeriksaan visual dilakukan untuk mengidentifikasi cacat permukaan seperti noda atau gelembung; sementara pengukuran ketebalan dilakukan menggunakan alat pengukur seperti mikrometer atau alat non-destruktif lainnya. Setelah semua tahapan selesai dan lapisan sesuai spesifikasi; spesimen siap untuk diuji kekerasan dan keausannya. Gambar 3.4 merupakan bagaimana proses elektroplating dilakukan.



Gambar 3.4 Pelapisan Tembaga

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui sejauh mana lapisan elektroplating dapat meningkatkan resistensi terhadap deformasi pada permukaan aluminium daur-uang dari UKM. Dua metode utama yang digunakan adalah Vickers dan Rockwell. Metode Vickers lebih tepat untuk mengukur lapisan tipis karena menggunakan penetrator berlian berbentuk piramida dengan beban ringan (100–1000 gram) dan menghasilkan jejak yang diukur mikroskopis. Sementara metode Rockwell cocok untuk lapisan yang lebih tebal karena menggunakan beban lebih besar (60–150 kg) dengan penetrator bola atau kerucut dan menghasilkan nilai otomatis berdasarkan kedalaman penetrasi. Kedua metode ini bertujuan mencatat nilai kekerasan pada lapisan tembaga untuk menilai efektivitasnya dalam memperkuat substrat aluminium daur-uang dari UKM.

Pengujian keausan dilakukan untuk menilai daya tahan lapisan terhadap gesekan dan abrasi. Metode pin-on-disk digunakan dengan menekan pin keras ke permukaan lapisan yang berputar dan mencatat keausan berdasarkan kedalaman atau volume yang hilang. Parameter seperti beban (5–10 N), kecepatan (100–300 rpm), dan durasi (10–60 menit) disesuaikan menurut standar seperti ASTM G99. Selain itu, metode alternatif Taber Abrasion menggunakan dua roda abrasif yang menekan permukaan sampel yang berputar, dan ketahanan keausan diukur berdasarkan kehilangan berat setelah sejumlah siklus tertentu (biasanya 500–1000). Kedua metode ini memberikan informasi penting tentang seberapa baik lapisan elektroplating melindungi aluminium daur-ulang dari UKM dari aus akibat kontak mekanis yang terus-menerus.

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian terhadap sampel aluminium daur-ulang dari UKM yang dilapisi dengan lapisan tembaga melalui proses elektroplating. Data spesimen yang digunakan dalam penelitian ini mencakup informasi mengenai dimensi sampel, parameter proses pelapisan, serta detail jenis lapisan yang diterapkan. Tabel berikut menunjukkan rincian data spesimen yang digunakan untuk pengujian kekerasan dan keausan.

Setiap sampel memiliki diameter yang seragam, yaitu 27 mm, dengan variasi ketebalan lapisan yang berbeda-beda sebelum proses pelapisan dilakukan. Lapisan yang diterapkan pada masing-masing sampel adalah tembaga, yang dipilih karena kemampuannya dalam meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan terhadap keausan. Proses pelapisan dilakukan dengan variasi parameter tegangan dan arus listrik. Untuk lapisan tembaga, tegangan yang digunakan adalah 2,4 V, dengan arus antara 1A hingga 4A tergantung pada spesimen yang diuji. Waktu pelapisan juga divariasikan antara 15 hingga 40 menit untuk menghasilkan ketebalan lapisan yang berbeda-beda dan karakteristik permukaan yang beragam.

Hasil pengamatan mikroskop optik terhadap aluminium daur-ulang dari UKM yang dilapisi tembaga menunjukkan adanya lapisan pelapisan berwarna lebih gelap dibandingkan dengan substrat pada pembesaran 500x. Ketebalan lapisan di tiga titik pengamatan tercatat sebesar 12,45 μm , 15,30 μm , dan 10,60 μm , dengan rata-rata ketebalan 12,78 μm . Variasi ketebalan ini diduga disebabkan oleh distribusi arus listrik yang tidak merata atau bentuk kontur permukaan dasar yang tidak homogen. Pada pembesaran 50x, struktur mikro permukaan lapisan tembaga tampak menunjukkan butiran halus dengan beberapa bintik hitam yang diduga merupakan pori-pori mikro atau cacat akibat parameter pelapisan yang belum optimal. Ketebalan lapisan pada titik ini adalah 21,50 μm , 19,80 μm , dan 22,40 μm , dengan rata-rata sebesar 21,23 μm . Gambar lainnya menunjukkan adanya void atau porositas kecil berwarna gelap di permukaan logam, yang kemungkinan besar merupakan kekosongan akibat proses difusi yang tidak sempurna, korosi mikro, atau kondisi pelapisan yang belum seragam. Ketebalan yang terukur di titik-titik tersebut adalah 60,10 μm , 53,75 μm , dan 49,90 μm , dengan rata-rata ketebalan 54,58 μm . Tabel 3.1 merupakan data spesimen dimulai dari dimensi spesimen dan parameter spesimen yaitu tegangan, arus, dan waktu.

Tabel 3.1 Data Spesimen

Lapisan	Dimensi (mm)		Parameter Proses Pelapisan			Rata-Rata Thickness(μm)
	Diameter	Tebal	Tegangan (v)	Arus (A)	Waktu (m)	
Tembaga 1A	27 mm	2,22 mm	2,4 V	1A-4A	15	Tembaga 1A
Tembaga 1B	27 mm	2,26 mm	2,4 V	1A-4A	20	Tembaga 1B
Tembaga 1C	27 mm	2,62 mm	2,4 V	1A-4A	25	Tembaga 1C

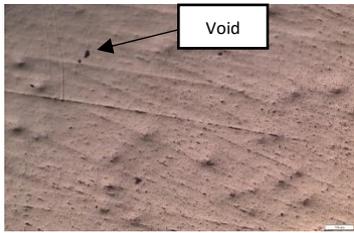
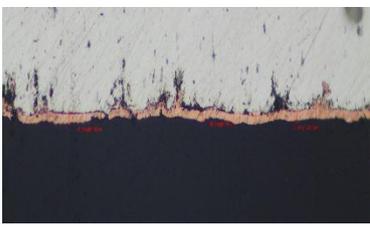
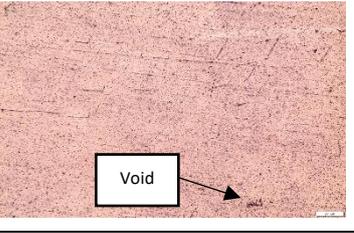
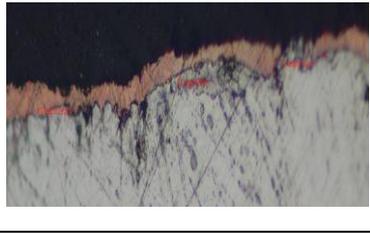
Thickness dan Struktur Mikro Penelitian ini menggunakan spesimen berbentuk silinder dengan diameter tetap sebesar 27 mm, yang kemudian dilapisi dengan tembaga dalam tiga variasi, yaitu Tembaga 1A, Tembaga 1B, dan Tembaga 1C. Ketiga spesimen tersebut mengalami proses pelapisan tembaga dengan parameter yang sama, yakni tegangan 2,4 V dan rentang arus 1 A hingga 4 A, namun dengan perbedaan pada durasi waktu pelapisan. Spesimen Tembaga 1A memiliki ketebalan awal 2,22 mm dan dilapisi selama 15 menit, sementara Tembaga 1B memiliki ketebalan 2,26 mm dengan waktu pelapisan 20 menit. Adapun Tembaga 1C menunjukkan ketebalan tertinggi, yaitu 2,62 mm, yang diperoleh setelah proses pelapisan selama 25 menit. Peningkatan waktu pelapisan terlihat berbanding lurus dengan peningkatan ketebalan spesimen, yang mencerminkan adanya pertumbuhan lapisan tembaga seiring waktu. Data ini menjadi acuan dalam mengevaluasi pengaruh waktu pelapisan terhadap hasil ketebalan rata-rata lapisan tembaga yang terbentuk pada masing-masing spesimen.

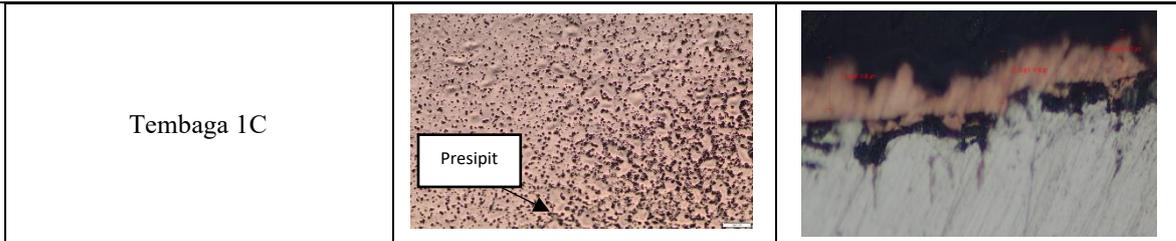
3.1 Thickness dan Struktur Mikro

Tabel 3.3 menunjukkan permukaan logam dengan struktur mikro yang didominasi oleh titik-titik hitam kecil yang tersebar merata, yang diduga sebagai pori-pori mikro atau inklusi non-logam akibat proses manufaktur seperti pengecoran atau sintering. Beberapa titik tampak lebih besar dan gelap, mengindikasikan adanya void yang cukup signifikan. Permukaan logam masih menunjukkan goresan sejajar dari proses pengamplasan atau pemolesan tanpa terlihat batas-batas butir. Pada gambar kedua, ketebalan lapisan yang terukur adalah 3,58 μm , 3,84 μm , dan 3,84 μm . Gambar lain memperlihatkan struktur mikro yang relatif homogen dengan sebaran pori-pori halus dan goresan permukaan, tanpa retakan atau void besar yang terlihat jelas; ketebalan lapisan pada gambar tersebut adalah 5,89 μm , 4,99 μm , dan 4,10 μm . Selain itu, gambar pertama pada pengamatan berbeda menunjukkan banyak presipit hitam yang merata di permukaan, menunjukkan adanya dispersi partikel karbida atau fasa lain akibat proses difusi seperti carburizing, dengan ketebalan lapisan yang terukur sebesar 14,98 μm , 14,98 μm , dan 13,70 μm , lihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 menunjukkan hasil pengujian mikrografi terhadap tiga sampel tembaga (Tembaga 1A, 1B, dan 1C) yang masing-masing dianalisis pada pembesaran 50x dan 500x. Pada pembesaran 50x,

Tabel 3.3 Berikut ini adalah gambar struktur micro dan gambar thickness dari pengujian micrografi.

Pengujian Mikrografi	Struktur Mikro 50x	Thickness 500x
Tembaga 1A		
Tembaga 1B		



Terlihat pada Tabel 3.3 bahwa Tembaga 1A memiliki struktur mikro yang relatif halus dengan sedikit kekasaran pada permukaannya. Tembaga 1B, di sisi lain, menunjukkan struktur yang lebih merata, meskipun terdapat variasi tekstur yang lebih kasar dibandingkan Tembaga 1A. Sementara itu, Tembaga 1C memiliki struktur yang lebih tidak teratur dan distribusi mikro yang lebih bervariasi, yang mungkin dipengaruhi oleh perlakuan atau proses pembuatan yang berbeda. Pada pembesaran 500x, pengamatan terhadap ketebalan lapisan menunjukkan bahwa Tembaga 1A memiliki lapisan yang tipis, sedangkan Tembaga 1B menunjukkan lapisan yang lebih seragam dan sedikit lebih tebal. Tembaga 1C, di sisi lain, menunjukkan ketebalan lapisan yang lebih tebal dan variasi ketebalan yang lebih jelas. Pengujian mikrografi ini memberikan wawasan mendalam tentang struktur dan ketebalan lapisan tembaga pada skala mikroskopik, yang dapat membantu dalam menilai kualitas dan sifat material tersebut.

3.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan lapisan tembaga terhadap permukaan aluminium daur-uang dari UKM. Parameter seperti variasi tegangan, arus, dan waktu pelapisan digunakan untuk memastikan keberhasilan proses pelapisan. Pada setiap sampel, pengujian kekerasan dilakukan pada tiga titik, dan nilai kekerasan akhir diperoleh dari rata-rata ketiga pengukuran tersebut. Hasil pengujian kekerasan spesimen yang dilapisi tembaga ditunjukkan dalam tabel berikut.

Metode Vickers digunakan dalam pengujian ini, yaitu teknik pengujian kekerasan yang memanfaatkan indenter berbentuk diamond pyramid untuk memberikan tekanan pada permukaan material. Metode ini mengukur ketahanan material terhadap penetrasi dengan memberikan beban tertentu dan mengukur diagonal jejak yang terbentuk pada permukaan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan waktu pelapisan secara konsisten meningkatkan kekerasan permukaan. Pada lapisan tembaga dengan tegangan 2,4 V dan arus 1–4 A, nilai kekerasan meningkat dari 110 HV (15 menit) pada sampel 1A, menjadi 117,6 HV (20 menit) pada 1B, dan 124,3 HV (25 menit) pada 1C. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa waktu pelapisan merupakan faktor dominan dalam memperkuat lapisan tembaga melalui mekanisme pertumbuhan kristal dan pepadatan struktur.

Menurut standar internasional ASTM E92, klasifikasi kekerasan berdasarkan nilai HV menunjukkan bahwa semua spesimen dengan nilai di bawah 150 dikategorikan sebagai material lunak. Dengan demikian, seluruh spesimen yang dilapisi tembaga dalam penelitian ini termasuk dalam kategori material lunak. Tabel 3.4 merupakan data Pengujian kekerasan yang mencakup nilai kekerasan tiap titik dan rata-rata nilainya

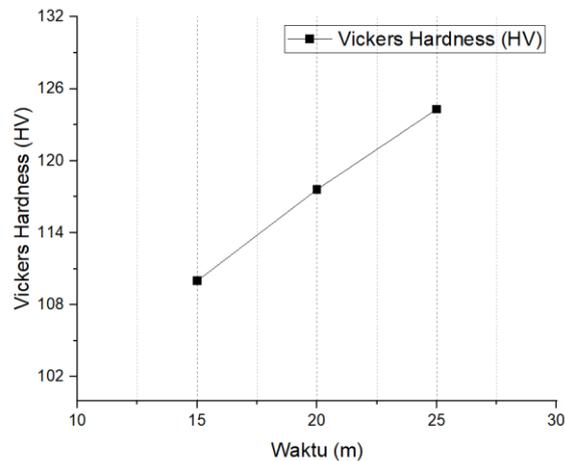
Tabel 3.4 menunjukkan hasil pengujian kekerasan (dalam satuan Vickers Hardness atau HV) terhadap tiga spesimen tembaga yang dilapisi dengan parameter proses pelapisan yang sama namun dengan variasi waktu yang berbeda. Setiap spesimen, yakni Tembaga 1A, 1B, dan 1C, dilapisi pada tegangan konstan 2,4 volt dengan arus bervariasi antara 1A hingga 4A. Yang membedakan ketiga spesimen adalah durasi pelapisan, masing-masing selama 15 menit (1A), 20 menit (1B), dan 25 menit (1C).

Tabel 3.4 Data Pengujian Kekerasan

No	Lapisan	Parameter Proses Pelapisan			Pengujian Kekerasan (HV)			
		Tegangan (v)	Arus (A)	Waktu (m)	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Rata-Rata
1	Tembaga 1A	2,4 V	1A-4A	15	106	111	113	110
	Tembaga 1B	2,4 V	1A-4A	20	117	115	121	117,6
	Tembaga 1C	2,4 V	1A-4A	25	124	123	126	124,3

Hasil pengujian kekerasan dilakukan di tiga titik untuk setiap spesimen, dan nilai rata-rata kekerasan dihitung sebagai acuan. Spesimen Tembaga 1A, yang dilapisi selama 15 menit, memiliki kekerasan rata-rata sebesar 110 HV. Tembaga 1B, dengan waktu pelapisan 20 menit, menunjukkan peningkatan kekerasan rata-rata menjadi 117,6 HV. Sementara itu, Tembaga 1C yang dilapisi selama 25 menit mencapai kekerasan rata-rata tertinggi yaitu 124,3 HV.

Gambar 3.5 memperlihatkan grafik hubungan antara waktu pelapisan (menit) dengan nilai kekerasan Vickers (HV) pada spesimen tembaga yang telah dilapisi dengan proses elektrodeposisi. Grafik menunjukkan tren linear meningkat, yang mengindikasikan bahwa semakin lama waktu pelapisan, maka nilai kekerasan permukaan tembaga juga semakin tinggi.



Gambar 3.5 Grafik Perbandingan Waktu dan Nilai Vickers Hardness Pelapisan Tembaga

Berdasarkan Tabel 3.5, klasifikasi kekerasan material menurut standar ASTM E92 dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu lunak, menengah, dan keras. Material dengan nilai kekerasan Vickers (HV) kurang dari 150 dikategorikan sebagai material lunak, sedangkan material dengan nilai kekerasan antara 150 hingga 400 HV termasuk dalam kategori menengah. Sementara itu, material yang memiliki kekerasan di atas 400 HV diklasifikasikan sebagai material keras. Klasifikasi ini bertujuan untuk memberikan acuan umum terhadap tingkat kekerasan suatu material yang dapat memengaruhi sifat mekaniknya, seperti ketahanan aus, kemampuan deformasi, dan proses pembentukan.

Tabel 3.5 ASTM E92 Klasifikasi Kekerasan Umum

Nilai HV (Hardness Vickers)	Klasifikasi Kekerasan Umum
<150 HV	Lunak
150-400 HV	Menengah
>400 HV	Keras

Dalam konteks penelitian ini, seluruh spesimen pelapisan tembaga menunjukkan nilai kekerasan antara 110 HV hingga 124,3 HV. Oleh karena itu, menurut standar ASTM E92, seluruh hasil tersebut masih berada dalam kategori lunak, yang menunjukkan bahwa lapisan tembaga yang terbentuk memiliki struktur mikro yang relatif halus namun belum mencapai ketahanan mekanik yang tinggi.

3.3 Pengujian Keausan

Pengujian keausan menggunakan metode Pin on Disk dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan lapisan tembaga terhadap gesekan pada permukaan aluminium daur-uang dari UKM. Metode ini mensimulasikan kondisi gesekan aktual dengan menempatkan sampel (pin) pada permukaan disk yang berputar, di mana beban tertentu diberikan untuk menghasilkan gesekan yang menyebabkan keausan. Selama pengujian, dilakukan pengukuran terhadap perubahan massa pin sebagai indikator tingkat keausan, serta penghitungan koefisien gesek berdasarkan gaya gesek yang terjadi. Metode ini sangat efektif untuk mengevaluasi performa pelapisan permukaan seperti tembaga, baik dalam kondisi kering maupun dengan pelumas, dan juga memungkinkan pengujian di bawah berbagai kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembapan tertentu.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu pelapisan memengaruhi massa aus dan koefisien gesek secara signifikan. Untuk lapisan tembaga, sampel 1A (15 menit) memiliki massa aus sebesar 0,004 g dengan koefisien gesek 0,842439. Sampel 1B (20 menit) menunjukkan peningkatan keausan menjadi 0,006 g namun koefisien geseknya menurun menjadi 0,737846. Pada sampel 1C (25 menit), massa aus meningkat menjadi 0,007 g, sedangkan koefisien gesek terus menurun menjadi 0,506255. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun waktu pelapisan yang lebih lama menghasilkan penurunan koefisien gesek, keausan material justru meningkat. Hal ini menandakan bahwa penurunan koefisien gesek tidak selalu sejalan dengan peningkatan ketahanan aus, karena faktor lain seperti ketebalan lapisan dan struktur mikro juga berperan penting. Dengan demikian, waktu pelapisan tembaga berpengaruh langsung terhadap performa keausan dan karakteristik gesek permukaan aluminium daur-uang dari UKM.

Tabel 3.6 menunjukkan hasil pengujian keausan tiga spesimen tembaga yang dilapisi dengan waktu berbeda (15, 20, dan 25 menit), namun dengan tegangan dan arus pelapisan yang sama. Diameter spesimen tetap 27 mm, sementara ketebalan awal meningkat seiring lamanya pelapisan. Hasilnya, koefisien gesek menurun dari 0,842 (1A) menjadi 0,506 (1C), menunjukkan peningkatan sifat pelumas permukaan. Namun, massa aus justru meningkat dari 0,004 g (1A) menjadi 0,007 g (1C), yang menandakan bahwa meskipun gesekan berkurang, ketahanan terhadap keausan material belum optimal.

Tabel 3.6 Data Pengujian Keausan

No	Lapisan	Dimensi (mm)		Parameter Proses Pelapisan			Pengujian Keausan	
		Diameter	Tebal Sebelum Pelapisan	Tegangan (v)	Arus (A)	Waktu (m)	Koefisien Gesek	Massa Aus (g)
1	Tembaga 1A	27 mm	2,22 mm	2,4 V	1A-4A	15	0,842439	0,004
	Tembaga 1B	27 mm	2,26 mm	2,4 V	1A-4A	20	0,737846	0,006
	Tembaga 1C	27 mm	2,62 mm	2,4 V	1A-4A	25	0,506255	0,007

3.4 Laju Keausan

Laju keausan dapat dihitung berdasarkan perubahan massa dan jarak tempuh atau waktu pengujian. Persamaan 3.1 merupakan persamaan untung menghitung laju keausan.

$$\text{Laju Keausan} = \frac{\Delta m}{F \cdot s} \quad (3.1)$$

Dimana:

Δm = Perubahan massa (dalam gram)

F = Gaya beban (N)

s = Jarak gesek total (m)

Diketahui:

r = jari jari gesekan = 0,05 mm = 5 cm

n = RPM = 300 putaran/menit

t = waktu = 5 menit

Berikut perhitungan laju keausan pada salah satu spesimen:

1. Tembaga 1A

Konversi massa aus:

$$\Delta m = 0,004 \text{ g} = 4 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

Hitung jarak gesek total (s):

$$s = 2\pi r \cdot n \cdot t$$

$$s = 2\pi \cdot 0,05 \cdot 300 \cdot 5$$

$$s = 2\pi \cdot 0,05 \cdot 1500$$

$$s = 471,24 \text{ m}$$

$$\text{Laju keausan} = \frac{4 \times 10^{-6}}{5.471,24}$$

$$= 1,697 \times 10^{-9} \text{ kg/Nm} = 1,697 \times 10^{-6} \text{ g/Nm}$$

Tabel 3.7 menyajikan hasil perhitungan laju keausan pada tiga jenis spesimen tembaga, yaitu Tembaga 1A, 1B, dan 1C, dengan satuan g/Nm.

Tabel 3.7 Hasil Perhitungan Laju Keausan

Kode Spesimen	Hasil Perhitungan
Tembaga 1A	$1,697 \times 10^{-6}$ g/Nm
Tembaga 1B	$2,547 \times 10^{-6}$ g/Nm
Tembaga 1C	$2,971 \times 10^{-6}$ g/Nm

Dari hasil yang tercatat, Tembaga 1A memiliki laju keausan sebesar $1,697 \times 10^{-6}$ g/Nm, yang merupakan nilai terendah di antara ketiganya, menunjukkan bahwa material ini mengalami keausan paling sedikit di bawah gaya gesek dan jarak gesek yang diuji. Tembaga 1B memiliki laju keausan lebih tinggi, yaitu $2,547 \times 10^{-6}$ g/Nm mengindikasikan bahwa material ini lebih mudah mengalami keausan dibandingkan dengan Tembaga 1A. Sementara itu, Tembaga 1C memiliki laju keausan tertinggi, yaitu $2,971 \times 10^{-6}$ g/Nm, menunjukkan bahwa material ini lebih rentan terhadap keausan dibandingkan dengan kedua jenis tembaga lainnya. Dengan demikian, perbandingan ini memberikan gambaran tentang seberapa cepat setiap jenis tembaga akan aus ketika terkena gaya gesek, dengan Tembaga 1C sebagai yang paling cepat aus.

4. Kesimpulan

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dijalankan oleh penulis terkait hasil pengujian kekerasan dan keausan aluminium daur-ulang yang dilapisi tembaga, dapat disimpulkan yaitu waktu pelapisan terbukti memiliki pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan nilai kekerasan permukaan pada sampel yang diuji. Dari data yang diperoleh, baik pada sampel tembaga, terdapat tren yang konsisten di mana nilai kekerasan meningkat seiring bertambahnya waktu pelapisan. Hal ini menunjukkan bahwa waktu pelapisan merupakan parameter krusial dalam proses elektroplating yang berdampak langsung pada kualitas fisik lapisan logam. Lalu waktu pelapisan berpengaruh signifikan terhadap keausan dan koefisien gesek. Semakin lama waktu pelapisan, lapisan menjadi lebih tebal dan tahan terhadap gesekan (koefisien gesek menurun), namun juga meningkatkan massa aus akibat kerusakan permukaan yang lebih besar. Selain itu juga koefisien gesek tidak sepenuhnya linier terhadap massa aus. Nilai koefisien gesek yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan keausan yang lebih besar, karena faktor lain seperti ketebalan lapisan dan struktur mikro lapisan turut memengaruhi hasil keausan.

4.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat penulis sampaikan dari penelitian ini dengan harapan dapat mempertimbangkan dalam penelitian selanjutnya, yaitu diperlukan clamp yang berbeda dari yang penulis gunakan agar proses elektroplating mudah dilakukan dan hasil elektroplating terlapisi secara rata, selain itu juga diperlukan alarm waktu pada alat elektroplating untuk mempermudah dan tidak perlu menunggu waktu yang cukup lama saat proses elektroplating berjalan.

5. Daftar Pustaka

- [1] Madhusudan, S., Sarcar, M.M.M. and Rao, N.B.R.M. (2016) 'Mechanical properties of Aluminum-Copper(p) composite metallic materials', *Journal of Applied Research and Technology*, 14(5), pp. 293–299. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jart.2016.05.009>.
- [2] Subramanian, C. (2010) 'Wear properties of aluminium-based alloys', *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminium, Magnesium and Titanium Alloys*, pp. 40–57. Available at: <https://doi.org/10.1533/9781845699451.1.40>.
- [3] Summers, P.T. et al. (2015) 'Overview of aluminum alloy mechanical properties during and after fires', *Fire Science Reviews*, 4(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s40038-015-0007-5>.
- [4] Wang, D. and Liu, M. (2020) 'Design of a Tester for In Situ Simultaneous Measurement of the Wear of Two Different Film Materials', *Coatings*, 12(9). Available at: <https://doi.org/10.3390/coatings12091359>.
- [5] Rahimi, A., Sarraf, S. and Soltanieh, M. (2023) 'Nickel electroplating of 6061-T6 aluminum alloy using anodizing process as the pretreatment', *Journal of Materials Research and Technology*, 27(April 2024), pp. 5701–5708. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.10.285>.
- [6] Dewanto, H.O. (2024) 'SPECTA Journal of Technology', Sifat Mekanik Produk Metalurgi Serbuk dari Proses Ball Milling dengan Bahan Baku Al7075 Terhadap Variasi Temperatur Sinter dan Tekanan Kompaksi, 5(1), pp. 13–21.
- [7] Gugua, E.C. et al. (2024) 'Electroplating in the modern era, improvements and challenges: A review', *Hybrid Advances*, 7(August), p. 100286. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100286>.

-
- [8] Kostrada, F. (2023) ‘*Effectiveness of Metal Coating Using Electroplating, Electroless Plating and Hot Dipping in the Manufacture of Weapons*’, *International Journal of Social Service and Research*, 3(6), pp. 1494–1498. Available at: <https://doi.org/10.46799/ijssr.v3i6.399>
- [9] Kuruveri, U.B. et al. (2022) ‘*Surface Modification of 6xxx Series Aluminum Alloys*’, *Coatings*, 12(2), pp. 1–25. Available at: <https://doi.org/10.3390/coatings12020180>.
- [10] Wąsik, A., Leszczyńska-Madej, B. and Madej, M. (2024) ‘*Sustainability in the Manufacturing of Eco-Friendly Aluminum Matrix Composite Materials*’, *Sustainability (Switzerland)*, 16(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/su16020903>.