

STUDI PERBANDINGAN VARIASI SIKLUS AGE HARDENING TERHADAP KEKERASAN PADUAN BERYLLIUM COPPER (*BeCu*)

Dede Andi Nur Saban^{*1}, Muhammad Hasan Albana^{1*}

*** Politeknik Negeri Batam**

Program Studi Teknik Mesin

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: dede.andi2410@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jumlah siklus age hardening terhadap nilai kekerasan paduan beryllium copper (BeCu) C17200 serta menentukan siklus yang paling efektif untuk mendukung efisiensi waktu produksi. Material diuji menggunakan metode eksperimental dengan perlakuan aging pada temperatur 300°C selama 3 jam untuk setiap siklus, yang divariasikan menjadi 1 siklus, 2 siklus, dan 3 siklus. Pengukuran kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell skala C (HRC), kemudian dianalisis menggunakan uji paired t-test. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kekerasan rata-rata meningkat dari 40,35 HRC pada kondisi awal menjadi 40,75 HRC setelah aging 1 siklus, 40,98 HRC setelah aging 2 siklus, dan 41,00 HRC setelah aging 3 siklus. Analisis statistik menunjukkan bahwa peningkatan kekerasan pada aging 2 siklus signifikan secara statistik (p-value = 0,033), sedangkan aging 1 siklus dan 3 siklus tidak menunjukkan perbedaan signifikan dibanding kondisi awal. Perbedaan antara aging 2 siklus dan 3 siklus juga tidak signifikan (p-value = 0,795). Berdasarkan hasil tersebut, aging 2 siklus direkomendasikan sebagai kondisi optimal karena mampu meningkatkan kekerasan secara signifikan dengan waktu proses yang lebih efisien dibandingkan aging 3 siklus.

Kata kunci: Beryllium Copper, Age Hardening, Aging Cycle, Kekerasan Rockwell, Perlakuan Panas.

Abstract

This study aimed to investigate the effect of varying age hardening cycles on the hardness of C17200 beryllium copper (BeCu) alloy and to determine the most effective cycle for improving production efficiency. An experimental method was employed in which specimens underwent aging treatment at 300°C for 3 hours per cycle, with variations of one, two, and three aging cycles. Hardness measurements were conducted using the Rockwell C hardness test (HRC), and the results were analyzed using a paired t-test. The results showed that the average hardness increased from 40.35 HRC in the untreated condition to 40.75 HRC after one aging cycle, 40.98 HRC after two aging cycles, and 41.00 HRC after three aging cycles. Statistical analysis indicated that the increase achieved after two aging cycles was significant (p-value = 0.033), whereas the increases after one and three aging cycles were not statistically significant compared with the initial condition. Furthermore, no significant difference was found between the two-cycle and three-cycle aging treatments (p-value = 0.795). Therefore, the two-cycle aging treatment is recommended as the optimal condition, as it provides a significant improvement in hardness while maintaining better production time efficiency than the three-cycle treatment.

Keywords : Beryllium Copper, Age Hardening, Aging Cycle, Rockwell Hardness, Heat Treatment.

Pendahuluan

Pada industri perusahaan yang bergerak dibidang manufaktur, produk berbasis paduan tembaga banyak digunakan sebagai komponen teknik seperti komponen tooling manufaktur, serta komponen kelistrikan [1]. Diantara paduan tembaga lainnya tembaga-berillium (*beryllium copper*) merupakan salah satu paduan tembaga berkekuatan tinggi yang banyak digunakan pada komponen presisi karena memiliki kombinasi sifat mekanik dan fisis yang baik, ditandai dengan kekuatan luluh sebesar 1030-1380 MPa, kekuatan tarik maksimum sebesar 1200-1520 MPa, elongasi 2-9%, serta kekerasan 37-45 HRC) meliputi kekuatan, kekerasan, elastisitas, ketahanan aus, ketahanan lelah, serta konduktivitas listrik dan termal yang memadai (dengan nilai konduktivitas listrik 22-28% IACS dan karakteristik pengelasan yang tergolong baik hingga cukup baik) [2,3].

Paduan tersebut mendapatkan nilai unggulnya melalui perlakuan termal *age hardening (precipitation hardening)*, merupakan metode perlakuan panas yang digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan paduan melalui pembentukan presipitat halus yang menghambat pergerakan dislokasi di dalam matriks logam [4]. Namun, Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik paduan Cu-Be sangat dipengaruhi oleh proses *age hardening*. Pada aplikasi consumable tooling, kebutuhan akan ketersediaan tooling yang cepat mendorong pentingnya efisiensi proses fabrikasi. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap variasi jumlah siklus *age hardening* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai kekerasan material serta menentukan siklus yang paling efektif [5,6].

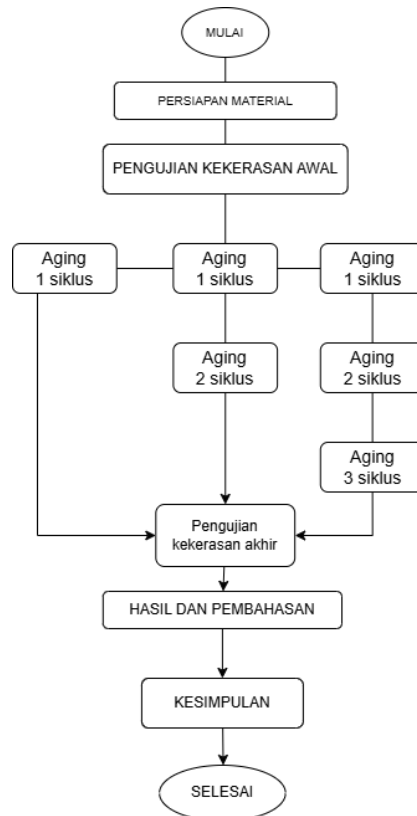
Berdasarkan permasalahan tersebut, rumusan masalah yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah bagaimana mengurangi siklus *age hardening* tersebut dalam upaya mempersingkat waktu produksi tanpa mengurangi kekuatan dari material tersebut.

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan hasil kekerasan paduan tembaga-berillium terhadap siklus *age hardening*. Dengan penelitian ini, diharapkan dapat diketahui siklus aging yang paling optimal untuk meminimalkan waktu proses fabrikasi *tooling fixture* dan tidak membuat proses welding tersebut menjadi terhambat.

Penelitian ini dibatasi pada analisis perubahan nilai kekerasan akibat variasi jumlah siklus *aging* pada material *beryllium copper*. Untuk melaksanakan perlakuan termal, penelitian ini menggunakan mesin oven industri ESPEC *Temperature Chamber series*. Pengukuran dilakukan menggunakan mesin *rockwell hardness tester* skala tersebut cocok digunakan untuk mengukur kekerasan material keras, salah satunya *beryllium copper*. Dengan demikian, hasil pengukuran diharapkan dapat memberikan data yang akurat.

Metodologi Penelitian

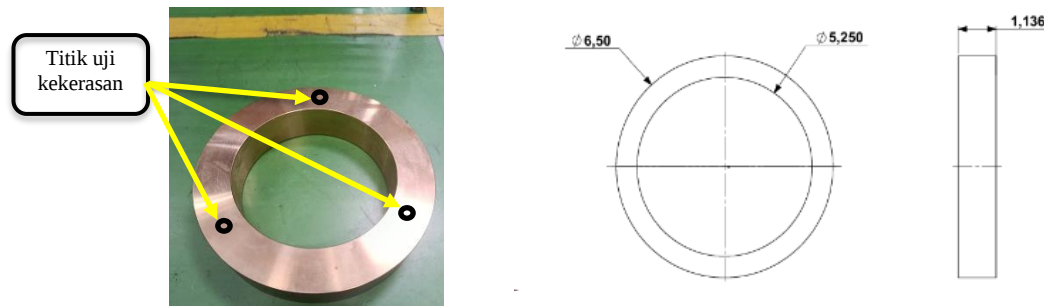
Dalam penelitian ini digunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh jumlah siklus *aging* terhadap nilai kekerasan paduan *beryllium copper* setelah proses *machining*. Alur penelitian ditampilkan pada gambar 1



Gambar 1: Diagram Alir Penelitian

2.1. Persiapan material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah *beryllium copper* C17200 dalam kondisi awal *as-received* dengan spesifikasi sesuai dengan tabel 1. Material awal memiliki diameter 8 inci lalu di beri tanda pada lokasi titik uji kekerasannya.



Gambar 2: Material BeCu

Tabel 1
Spesifikasi Material [3]

Material	Standar	Grade / UNS	Cu (%)	Be (%)	Co + Ni (%)	Yield Strength (Mpa)	Ultimate Strength (Mpa)	Elongation (%)	Rockwell Hardness	Electrical Conductivity	Weldability
Beryllium Copper	UNS	C17200	Balance / Remainder	1,80 – 2,00	Min. 0,20	± 1030 – 1380	± 1200 – 1520	± 2 – 9	± 37 – 45 HRC	± 22 – 28 % IACS	Good / Fair

2.2. Pengujian Kekerasan Awal

Setelah spesimen disiapkan, dilakukan pengujian kekerasan awal untuk memperoleh data dasar material sebelum mengalami proses manufaktur dan perlakuan termal. Nilai kekerasan awal ini digunakan sebagai acuan untuk membandingkan perubahan kekerasan setelah machining, stress relief, dan aging. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Rockwell skala C (HRC) sesuai ASTM E18, dengan indenter diamond cone 120°, beban minor 10 kgf, dan beban mayor 150 kgf [7,8].



Gambar 3: Rockwell hardness

2.3. Proses Stress relief dan Aging

Parameter aging dipilih pada 300°C selama 3 jam karena proses presipitasi pada paduan Be-Cu efektif terjadi pada rentang temperatur 280-400°C dengan urutan pembentukan presipitat GP zones yang lebih stabil, beberapa studi menunjukkan bahwa pada temperatur sekitar 260-340°C, paduan Cu2.0 wt.% Be dapat mencapai kekuatan maksimum dalam waktu sekitar 2 jam yang dikaitkan dengan dominasi presipitat γ'' dan γ' pada mikrostruktur. Oleh karena itu, parameter 300°C selama 3 jam masih berada dalam rentang efektif pembentukan presipitat penguat dan mendekati kondisi peak aging [9].

Berikut ini proses aging 1 siklus :

1. Semua spesimen uji di bersihkan dari segala kotoran, jika tidak dibersihkan maka akan menimbulkan bekas pada permukaan spesimen
2. kemudian semua kelompok spesimen dimasukkan kedalam oven dengan temperatur oven 300°C
3. Specimen uji ditahan di dalam oven selama 3 jam
4. Spesimen dikeluarkan dari dalam oven, lalu didinginkan di udara hingga mencapai temperatur ruang (sekitar 25°C).

Berikut ini proses aging 2 siklus :

1. Setelah spesimen uji mengalami aging siklus pertama dingin, maka spesimen dapat diberikan siklus ke-dua
2. Semua kelompok spesimen dimasukkan kedalam oven kembali dengan temperatur oven 300°C
3. Selanjutnya ditahan di dalam oven selama 3 jam
4. Setelah 3 jam maka spesimen uji dikeluarkan dan didinginkan di udara hingga mencapai temperatur ruang (sekitar 25°C).

Berikut ini proses aging 3 siklus :

1. Setelah spesimen uji yang mengalami aging siklus ke-dua kali dingin, maka spesimen dapat masuk ke dalam tahapan terakhir, yaitu siklus ke tiga
2. Seluruh spesimen dimasukkan kedalam oven dengan temperatur oven 300°C
3. selanjutnya ditahan di dalam oven selama 3 jam
4. langkah terakhir spesimen di keluarkan dari dalam oven dan didinginkan di udara hingga mencapai temperatur ruang (sekitar 25°C).



Gambar 4: Oven Industri

(Sumber: <https://www.ESPEC.co.jp/english/products/catalog/pvph.pdf>)

2.4. Pengujian Kekerasan Setelah Perlakuan Termal

Setelah setiap tahap perlakuan termal selesai, dilakukan pengujian kekerasan untuk mengetahui perubahan respons material. Pengujian dilakukan setelah setiap siklus *aging*, sehingga tren perubahan kekerasan dari siklus pertama hingga siklus terakhir dapat diamati secara langsung. Nilai kekerasan yang diperoleh pada tiap spesimen dinyatakan sebagai nilai rata-rata dari tiga titik pengujian. Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh gambaran perubahan sifat mekanik yang lebih representatif terhadap perlakuan yang diberikan.

2.5. Hasil analisa

Hasil analisa didapat dengan menghitung hasil pengujian *Rockwell hardness test* kondisi awal dan setelah perlakuan aging dengan variasi siklus, yaitu aging 1x, aging 2x, aging 3x. menggunakan uji t-test berpasangan untuk mengetahui perbedaan hasil kekerasan yang signifikan antara kondisi awal dan setiap siklus aging, Rumus statistik uji berpasangan adalah sebagai berikut:

- A. Menentukan nilai hipotesis nol (H_0) dan hipotesis alternatif (H_1)

$H_0 : \mu \text{ sebelum} = \text{kekerasan material sebelum dilakukan aging}$

$H_1 : \mu \text{ sesudah} = \text{kekerasan material sesudah dilakukan aging}$

p-value digunakan untuk menilai apakah data yang diperoleh cukup kuat untuk menolak H_0 ($\alpha = 0.05$)

- B. Menghitung selisih tiap pasangan

$d = \text{sebelum} - \text{sesudah (data perbedaan)}$

$d_1 = x_1 - y_1$

setelah itu menghitung jumlah selisihnya

$$\sum d = d_1 + d_2 \quad [10]$$

Selanjutnya menghitung rata-rata selisih

$$\bar{d} = \frac{\sum d}{n} \quad [10]$$

- C. Hitung selisih kuadrat dari rata-rata selisih

$$\sum (d - \bar{d})^2 \quad [10]$$

- D. Simpangan baku

$$s_d = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{d})^2}{n-1}} \quad [10]$$

- E. Selanjutnya menghitung t hitung (uji statistik)

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad [10]$$

- F. Dan terakhir menghitung t tabel (Derajat kebebasan)

$$df = n - 1 \quad [10]$$

Untuk membantu hasil perhitungan nilai statistik, penulis menggunakan microsoft excel dengan upaya mengetahui p-value dari data yang sudah di hitung, dengan harapan hasil perhitungan statistik menjadi lebih akurat.

Analisa hasil dan pembahasan

Pengujian kekerasan pada penelitian ini dilakukan menggunakan *rockwell hardness* dengan kekuatan diberi beban 150 kgf pada 3 titik yang berbeda. Pengujian kekerasan yang dilakukan pada spesimen tanpa perlakuan aging dan dilakukan perlakuan perlakuan aging tiap siklusnya. Hasil pengujian tanpa aging dapat dilihat pada tabel 2 dibawah ini:



Gambar 5: Material yang telah diberikan aging hingga 3 siklus

Tabel 2
Pengujian uji Rockwell Hardness Test – Tanpa aging

SPESIMEN	KEKERASAN TANPA AGING			Rata-rata
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	
1	40,3	40,2	40,7	40,400
2	40,4	40,5	40,0	40,300
3	40,0	41,0	40,5	40,500
4	40,4	40,8	41,8	41,000
5	38,8	39,0	39,0	38,933
6	39,0	38,9	38,7	38,867

Dari tabel hasil pengujian kekerasan yang dapat dilihat pada tabel 2, kekerasan material memiliki hasil yang begitu beragam pada kekerasan awalnya, pada material yang mengalami aging 1 siklus dapat dilihat pada tabel 3 dibawah ini:

Tabel 3
Pengujian uji Rockwell Hardness Test – Siklus Aging 1x

SPESIMEN	KEKERASAN AGING 1 SIKLUS			Rata-rata
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	
1	40,5	40,7	41,0	40,733
2	40,8	40,6	40,9	40,767
3	41,0	41,5	42,0	41,500
4	40,5	41,8	42,8	41,700
5	39,0	39,1	39,5	39,200
6	39,1	40,0	39,4	39,500

Hasil pengujian kekerasan pada material yang mengalami aging 1 siklus terdapat kenaikan pada nilai kekerasannya sebesar 1,41%. Peningkatan ini mengindikasikan adanya peningkatan nilai kekerasan pada perlakuan aging siklus 1.

Tabel 4
Pengujian uji Rockwell Hardness Test – Siklus Aging 2x

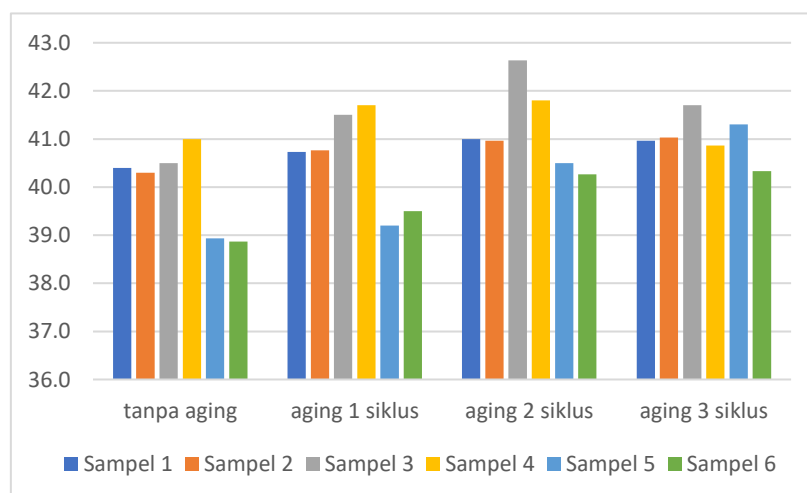
SPESIMEN	KEKERASAN AGING 2 SIKLUS			Rata-rata
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	
1	40,9	41,1	41,0	41,000
2	41,1	41,1	40,7	40,967
3	42,0	42,8	43,1	42,633
4	40,8	41,5	42,2	41,800
5	40,3	40,2	41,0	40,00
6	40,0	40,3	40,5	40,267

Jika dilihat dari tabel 4 diatas pengujian kekerasan pada material yang mengalami aging 2 siklus menagalami peningkatan kekerasan sebesar 2,71%, lebih tinggi dibandingkan aging 1 siklus yang hanya sebesar 1,41%. Hasil ini menunjukkan bahwa aging 2 siklus masih mampu meningkatkan kekerasan pada material.

Tabel 5
Pengujian uji Rockwell Hardness Test – Siklus Aging 3x

SPESIMEN	KEKERASAN 3 SIKLUS			Rata-rata
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	
1	40,6	41,3	41,0	40,967
2	41,3	41,0	40,8	41,033
3	41,9	41,4	41,8	41,700
4	40,7	40,9	41,0	40,867
5	41,1	41,0	41,5	41,300
6	39,9	40,3	40,8	40,333

Berdasarkan hasil pengujian, sebanyak 3 dari 6 spesimen mengalami penurunan nilai kekerasan dengan rata-rata penurunan sebesar 1,50% setelah perlakuan aging 3 siklus. Sementara itu, 3 spesimen lainnya menunjukkan peningkatan nilai kekerasan dengan rata-rata peningkatan sebesar 0,77%. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun sebagian spesimen mengalami penurunan kekerasan setelah perlakuan aging 3 siklus, sebagian spesimen lainnya masih mengalami peningkatan kekerasan. Perbedaan respons tersebut mengindikasikan bahwa proses aging 3 siklus belum menghasilkan perubahan kekerasan yang seragam pada seluruh spesimen. Tren perubahan nilai kekerasan tersebut dapat diamati pada diagram di bawah ini



Gambar 6: Diagram batang hasil rata-rata pengujian kekerasan tiap kondisi

Hasil data yang diperoleh berasal dari pengukuran uji kekerasan menggunakan *Rockwell hardness test* dan di analisis menggunakan uji t berpasangan satu persatu tiap siklusnya. Pengujian dilakukan pada taraf signifikasi 5% dengan derajat kebebasan (df) sebesar 5, sehingga t-tabel yang diperoleh adalah 2,571. Pengambilan keputusan dilakukan dengan membandingkan nilai t-hitung terhadap t-tabel serta memperhatikan nilai signifikasi (p-value). Hasil analisis statistik tersebut dapat dilihat pada tabel 6 dibawah ini.

Tabel 6
Hasil analisis uji t-berpasangan

No.	Perbandingan siklus aging	t-Hitung	t-Tabel	p-value (2-tailed)	Keputusan
1	Tanpa Aging vs siklus ke-1	5,141	2,571	0,004	signifikan
2	Tanpa Aging vs siklus ke-2	4,810	2,571	0,005	signifikan
3	Tanpa Aging vs siklus ke-3	2,958	2,571	0,032	signifikan
4	siklus ke-1 vs siklus ke-2	2,994	2,571	0,030	signifikan
5	siklus ke-1 vs siklus ke-3	1,184	2,571	0,290	tidak signifikan
6	siklus ke-2 vs siklus ke-3	0,590	2,571	0,581	tidak signifikan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perbandingan antara kondisi tanpa aging dengan aging 1 siklus menghasilkan t-hitung sebesar 5,141 dengan p-value 0,004. Nilai t-hitung yang lebih besar dari t-tabel dan p-value yang lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa perlakuan aging 1 siklus memberikan perubahan yang signifikan terhadap material dibandingkan kondisi material tanpa aging.

Pada perbandingan antara kondisi tanpa aging dan aging 2 siklus diperoleh t-hitung sebesar 4,810 dengan p-value 0,005. Hasil tersebut juga memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekerasan material dibandingkan kondisi awal tanpa perlakuan aging.

Selanjutnya, perbandingan antara kondisi material tanpa aging dan aging 3 siklus menghasilkan t-hitung 2,958 dengan p-value 0,032. Meskipun nilai t-hitung lebih rendah dari dua perlakuan sebelumnya, tetapi nilainya masih lebih besar dari nilai t-tabel dan p-valuenya masih lebih rendah dari 0,05. Dengan demikian, perlakuan aging 3 siklus memberikan perubahan yang signifikan terhadap kondisi awal tanpa perlakuan aging.

Analisis antara perlakuan aging menunjukkan bahwa perbandingan antara aging 1 siklus dengan aging 2 siklus menghasilkan nilai t-hitung sebesar 2,994 dengan p-value sebesar 0,030. Hasil ini menunjukkan bahwa adanya perubahan yang signifikan di antara kedua perlakuan tersebut.

Sebaliknya, perbandingan antara aging 1 siklus dengan aging 3 siklus menghasilkan t-hitung sebesar 1,184 dengan p-value sebesar 0,290, sedangkan perbandingan antara siklus aging ke-2 dan siklus aging ke-3 menghasilkan nilai t-hitung sebesar 0,590 dengan p-value 0,581. Kedua perbandingan tersebut menunjukkan nilai t-hitung yang lebih kecil daripada t-tabel dan p-value yang lebih besar dari 0,05, sehingga tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik.

Kesimpulan

Daftar Pustaka

- [1] M. Kolev, "Predictive Modeling and Analysis of Cu–Be Alloys: Insights into Material Properties and Performance," *ChemEngineering*, vol. 8, no. 4, p. 70, Jul. 2024.
- [2] Z. Wang, J. Li, Y. Zhang, C. Lv, T. Li, J. Zhang, S. Hui, L. Peng, G. Huang, H. Xie, and X. Mi, "Comparison of the Mechanical Properties and Microstructures of QB2.0 and C17200 Alloys," *Materials*, vol. 15, no. 7, p. 2570, 2022.
- [3] [Copper.org - C17200 Alloy](https://copper.org) (Diakses pada tanggal 30 Mei 2026)
- [4] Twenty-Ninth International Matador Conference: Held in Manchester, 6th–7th April 1992*, J. Atkinson, G. Barrow, M. Burdekin, N. R. Chitkara, and R. G. Hannam, Eds. London, U.K.: Macmillan Education UK, 1992, pp. 381–387.
- [5] M. D. A. Valentine, A. Radhakrishnan, V. K. Maes, E. C. Pegg, M. D. R. Valero, J. Kratz, and V. Dhokia, "Additively manufactured cure tools for composites manufacture," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 127, pp. 3295-3313, 2023
- [6] F. R. S. Freitas, R. C. B. Casais, F. J. G. Silva, N. P. V. Sebbe, R. P. Martinho, V. F. C. Sousa, R. C. M. Sales-Contini, and F. D. Fernandes, "Wear Behavior of TiAlN/DLC Coating on Tools in Milling Copper–Beryllium Alloy AMPCOLOY® 83," *Coatings*, vol. 14, no. 11, p. 1354, 2024.
- [7] O. Dhurwey, A. Nagle, P. Pawar, S. Dunsuwa, and S. Bisone, "Experimental Investigations of Rockwell Hardness Test," *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, vol. 12, no. 4, 2024.
- [8] B. Kelechava, "ASTM E18-25: Rockwell Hardness Standard Test Methods," *ANSI Blog*, Nov. 4, 2025.
- [9] S. Montecinos and S. Tognana, "Influence of aging temperature on the microstructure and mechanical properties of a Cu-2Be alloy," *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, vol. 8, p. 100105, 2024.
- [10] D. Richi and D. E. Kurniawan, "Analisis Optimasi Kecepatan Transaksi Pembayaran pada Website Sewa Lapangan Badminton Menggunakan Uji T Berpasangan dan Integrasi Payment Gateway Midtrans," *Journal of Applied Informatics and Computing (JAIC)*