

The Effect of Composition and Sintering Temperature on The Characteristics of xCu-yNi-5 wt.%W Alloy as A Candidate Electrode Material

Dwiki Rifhardi Siregar¹, Muhammad Farhan Azmi¹, Suprianto^{2*}, Muhammad Akhsal³

¹Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
Jln. Almamater Kampus USU, Padang Bulan, Medan, 20155, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
Jln. Almamater Kampus USU, Padang Bulan, Medan, 20155, Indonesia

³Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara
Jln. Almamater Kampus USU, Padang Bulan, Medan, 20155, Indonesia

*Corresponding author: suprianto@usu.ac.id

Abstract

Cu alloys are widely used as electrical components, including electrodes that work at high temperatures. High-temperature environments cause a decrease in strength and failure of these components. This problem can be minimized by strength improvement without significantly decline the electrical conductivity of the Cu based alloys. The aim of this research to investigate effect of Cu/Ni ratio and sintering temperature on mechanical properties and electrical conductivity of the Cu-Ni-5 wt.%W. The Cu-Ni-W model alloys synthesized by powder metallurgy with high purity powders as starting material. The powder mixed by using horizontal milling, the compaction process was carried at room temperature to obtain the green material subsequent by sintering at temperature 770-870°C. Ther characterize of the bulk materials with varying method such as Vickers hardness tess, compressive test, electrical conductivity, and microstructure observation. The result shows that the increases of the Cu/Ni ratio and sintering temperatur tend to slingtly increase of mechanical properties however, the addition Ni element up to 30 wt.% reduce the electrical conductivity.

Keywords: hardness, compressive strength, microstructure, powder metallurgy, Alloys

Abstrak

Paduan Cu banyak dipergunakan sebagai komponen kelistrikan diantaranya elektroda yang bekerja pada temperatur tinggi, lingkungan tempertur tinggi menyebabkan penurunan kekuatan dan kegagalan pada komponen tersebut. Permasalahan ini dapat diminimalisir melalui usaha peningkatan kekuatan tanpa mengabaikan penurunan konduktivitas listrik paduan berbaasis Cu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh rasio komposisi Cu/Ni dan temperatur sintering terhadap sifat mekanis dan konduktivitas listrik paduan Cu-Ni-5 wt.%W. Sintesis model paduan Cu-Ni-W dilakukan menggunakan teknik metalurgi serbuk menggunakan serbuk dengan kemurnian tinggi. Proses pencampuran serbuk menggunakan *horizontal milling*, dilanjutkan kompaksi pada temperatur ruang untuk mendapatkan *green material* diikuti proses sintering pada temperatur 770-870°C. Bulk material yang diperoleh dari proses sintering dilakukan karakterisasi dengan berbagai cara diantaranya pengujian kekerasan Vickers, tekan, konduktivitas listrik, dan observasi mikrostruktur. Hasil penelitian diperoleh peningkatan rasio Cu/Ni dan temperatur sintering cenderung meningkatkan sifat mekanis, namun penambahan Ni hingga 30 wt.% menyebabkan penurunan konduktivitas listrik.

Kata kunci: kekerasan, kekuatan tekan, mikrostruktur, metalurgi serbuk, paduan

1. Pendahuluan

Material tembaga diketahui memiliki konduktifitas litrik dan ketahanan korosi yang baik. Hal ini mendorong penggunaan material tembaga banyak digunakan diberbagai bidang diantaranya sebagai penghantar listrik, elektroda, elemen *alloys*, dan sebagai *coating* telah diterapkan pada pada permukaan baja karbon rendah [1]. Lebih lanjut untuk tembaga banyak

digunakan sebagai elektroda seperti pada *electrical discharge machining* (EDM) [2]. Untuk aplikasi elektroda konduktivitas listrik disyaratkan memiliki IACS yang memadai sehingga proses pemotongan berjalan dengan baik, dimana konduktivitas >50%, lebih disukai. Namun, konduktivitas IACS lebih rendah sekitar 22% juga pernah digunakan dengan perlakuan khusus untuk aplikasi benda tertentu [3]. Selain

konduktivitas yang baik, sifat mekanis tetap harus menjadi pertimbangan. Elektroda yang dioperasikan pada temperatur tinggi akan berdampak kepada berbagai aspek diantaranya penurunan sifat mekanik, perubahan dimensi akibat erosi termal yang terjadi selama proses EDM. Permasalahan ini dapat diatasi melalui berbagai cara diantaranya penambahan berbagai jenis elemen *alloys*. Keberadaan elemen akan berpengaruh terhadap perbaikan karakteristik paduan logam. Seperti penambahan Fe meningkatkan kekuatan paduan Cu, sebaliknya konduktivitas listrik menurun [4]. Keberadaan elemen *alloys* seperti Mn, Cr, Sn, P, Be, dan Ti di dalam Cu berpotensi meningkatkan kekerasan, namun beberapa elemen ini dapat menurunkan keuletan dan sifat konduktivitas [5]. Penambahan Ni ke dalam Cu di gunakan untuk meningkatkan kekuatan mekanik. Beberapa penelitian sebelumnya telah berhasil mensintesis Cu-Ni dengan penambahan Al menggunakan teknik metalurgi serbuk [6]. Paduan lainnya diantaranya W/Cu/Ni dapat disintesis dengan metalurgi serbuk, dengan kekuatan dan konduktivitas yang cukup baik walaupun W akan sulit masuk ke dalam Cu maupun membentuk senyawa intermetallic, sifat kelistrikan Paduan ini juga dapat ditingkatkan melalui penambahan elemen Zr dan Ti [7]. Selain faktor elemen alloy, teknik sintesis juga berpengaruh terhadap sifat mekanis paduan logam. Berbagai metode telah di gunakan untuk mensintesis paduan berbasis Cu-Ni-W, diantaranya metalurgi serbuk. Metode ini memiliki kelebihan, diantaranya pengendalian komposisi, mikrostruktur, dan sifat yang lebih baik. Paduan Cu-Ni-xFe [8], Al-Cu [9], Fe-Cr [10], dan Cu-Ni-TiN telah berhasil disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk [11]. Parameter proses metalurgi serbuk seperti temperatur *sintering*, kenaikan temperatur berhasil meningkatkan densitas paduan berbasis Al yang mengandung Fe, Cr, dan Ti [12]. Penerapan berbagai variasi temperatur *sintering* pada W-Cu telah dilakukan, hasilnya memperlihatkan perbaikan densitas dan kekerasan seiring dengan kenaikan temperatur [13]. Paduan 90Cu-6Nb-4TiB telah dipanaskan pada variasi temperatur 650-700°C, temperatur *sintering* 700°C diperoleh kekerasan lebih tinggi [14]. Lebih lanjut, temperatur *sintering* juga berpengaruh terhadap sifat kelistrikan

paduan logam, seperti Cu-WC pada temperatur 1075°C menghasilkan konduktivitas hingga 90%IACS [15]. Penelitian lain juga menyatakan bahwa metode densifikasi menggunakan *spark plasma sintering* (SPS) memperlihatkan konduktivitas material Cu-Mo-C mencapai 84%IACS, lebih baik bila dibanding dengan metode konvensional [16].

Sintesis paduan berbasis tembaga telah banyak dilakukan dengan menggunakan teknologi metalurgi serbuk. Parameter komposisi dan temperatur *sintering* diyakini berpengaruh signifikan terhadap karakteristik paduan. Namun, berdasarkan kajian yang lebih spesifik mengenai penerapan rasio Cu/Ni dan temperatur *sintering* secara bersamaan terhadap Cu/Ni-5 wt.% masih sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh rasio Cu/Ni dan temperatur *sintering* terhadap karakteristik mekanis dan konduktivitas listrik model paduan berbasis Cu-Ni-W menggunakan teknik sintesis metalurgi serbuk.

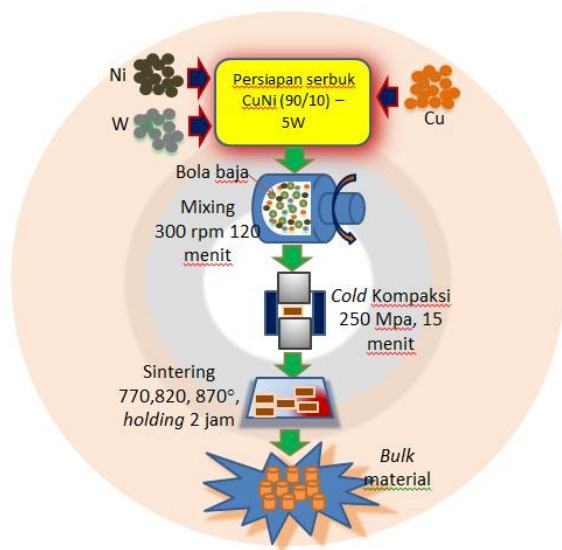
2. Metode

Sintesis paduan Cu-Ni-5 wt.%W pada penelitian ini menggunakan serbuk Cu, Ni, dan W dengan kemurnian > 99,9% dengan ukuran 30~40 µm. Adapun komposisi dan model paduan yang disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk seperti diperlihatkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain paduan Cu-Ni-W

| Model paduan | Komposisi (wt.%) | | | Temperatur <i>sintering</i> (C ^o) |
|--------------|------------------|-------------------|---|---|
| | (Cu, Ni) | Rasio Cu/Ni (x/y) | w | |
| CuNi-R1 | 95 | 90/10 | 5 | 770 |
| CuNi-R2 | 95 | 80/20 | 5 | 770 |
| CuNi-R3 | 95 | 70/30 | 5 | 770 |
| CuNi-T1 | 95 | 90/10 | 5 | 820 |
| CuNi-T2 | 95 | 90/10 | 5 | 870 |

Serbuk dengan komposisi yang telah ditetapkan selanjutnya dilakukan proses *mixing* menggunakan *horizontal milling* dengan *cane stainless steel SS 316* dan *grinding* bola terbuat dari material baja dengan ukuran 10 mm. Proses *mixing* dilakukan dengan rasio bola terhadap serbuk (BPR) 10:1, dengan kecepatan 300 rpm dan waktu *milling* 2 Jam. Selanjutnya, serbuk yang telah dicampur dilakukan proses kompaksi pada suhu ruang dengan tekanan 250 MPa selama 15 menit. Cetakan permanen digunakan pada proses kompaksi dengan ukuran diameter dalam 28 mm dan tinggi 11 mm yang menghasilkan *green material*. Proses densifikasi dilanjutkan melalui *sintering* dengan variasi temperatur 820-870 °C dan waktu tahan selama 2 jam menggunakan *electric muffle furnace*. Skema proses sintesis paduan logam berbasis Cu-Ni-5 wt.%W diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema proses sintesis paduan Cu-Ni-5 wt.%W

Bulk material yang dihasilkan dari proses sinter selanjutnya dilakukan karakterisasi dengan berbagai cara. Adapun ukuran sampel pengujian mekanis untuk paduan logam berbasis serbuk mengacu kepada ASTM B925-03 [17]. Karakterisasi densitas menggunakan teknik Archimedes. Observasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optic (OM) tipe Rax Vision

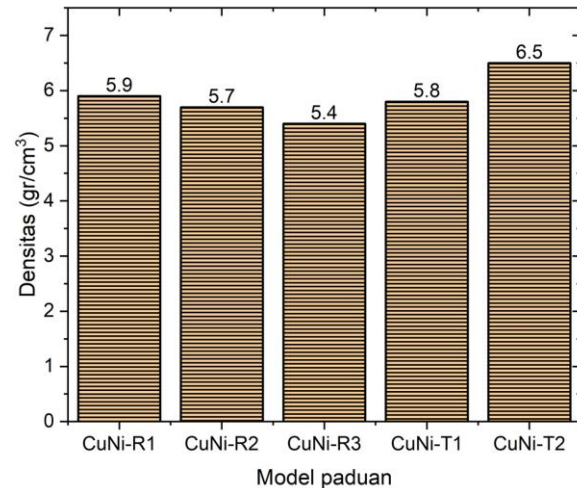
No.545491, MM-10A, 230V-50Hz. Pengujian sifat mekanis diantaranya kekerasan menggunakan metode mikro Vicker dengan pembebanan 100 gr selama 5 detik dan pengujian tekan dilakukan pada temperatur ruang menggunakan mesin kapasitas 30 Ton dan *loading rate* 5 mm/menit. Pengujian sifat konduktivitas listrik menggunakan peralatan uji mesin Keitley telah dilakukan.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil berbagai pengujian yang telah dilakukan terhadap material paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan variasi rasio Cu/Ni dan temperatur *sintering* selanjutnya dianalisa serta disajikan sebagai berikut:

3.1. Densitas material paduan Cu-Ni-w

Hasil pengujian densitas yang telah dilakukan untuk berbagai model paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan variasi rasio Cu/Ni dan temperatur sinter yang telah disintesis pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Densitas berbagai paduan Cu-Ni-5 wt.%

Penambahan Ni ke dalam Cu cenderung sedikit menurunkan densitas, penurunan dari 5,9 gr/cm³ menjadi 5,4 gr/cm³ masing-masing untuk penambahan nikel 10 dan 30 wt.% secara berurutan atau setara dengan 8,47%. Penurunan ini tidak terlalu tinggi, hal ini diyakini dipengaruhi oleh densitas Ni yang sedikit lebih rendah. Pada bagian lain densitas paduan meningkat

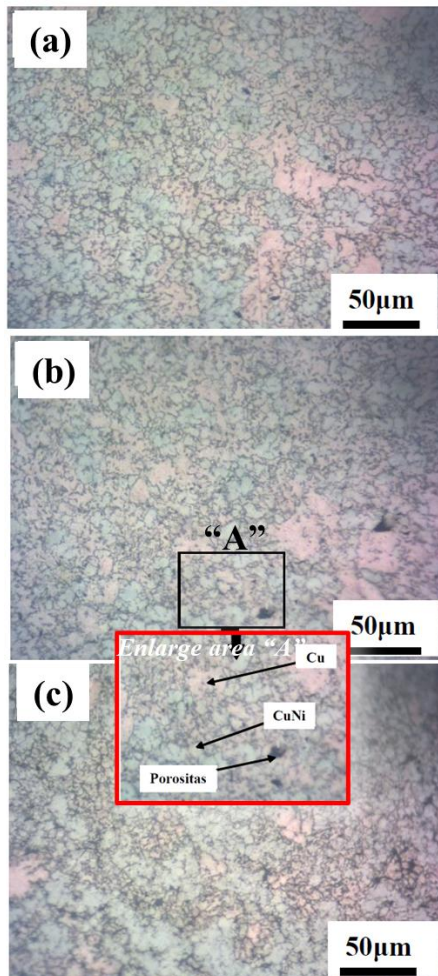
seiring dengan peningkatan suhu *sintering*. Paduan CuNi-T2 dengan suhu *sintering* 870°C di peroleh densitas sebesar 6,5 g/cm³ atau meningkat sekitar 10%. Peran temperatur *sintering* sangat penting dalam proses densifikasi, temperatur yang lebih tinggi akan memudahkan proses difusi atom terjadi. Kenaikan difusi Cu seiring kenaikan temperatur *sintering* juga telah dilaporkan terjadi pada Paduan Al-Cu-Li, yang berdampak terhadap kehomogenan mikrostruktur [18]. Namun, temperatur yang terlalu tinggi juga berpotensi mendorong pembentukan oksida dengan elemen tertentu pada saat menggunakan metode *sintering* konvensional. Hasil pengujian densitas ini memperlihatkan bahwa densitas paduan masih dibawah densitas elemental masing-masing elemen penyusun (Cu, Ni, dan W). Banyak faktor yang mempengaruhi hal tersebut diantaranya terdapatnya kontaminan, pembentukan oksidasi, dan proses penekanan yang belum optimal. Pembentukan oksidasi pada temperatur tinggi akan berpengaruh terhadap kekosongan *void*, hal ini tentunya berdampak terhadap densitas yang lebih rendah [19]. Faktor lain seperti besarnya tekanan kompaksi berdampak terhadap densitas material, tekanan lebih tinggi berkorelasi dengan deformasi plastis dan ukuran *void* lebih kecil yang pada akhirnya diperoleh densitas lebih baik, begitu juga sebaliknya jika tekanan lebih rendah [20].

3.2 Mikrostruktur Cu-Ni-5 wt.%W

Gambar 3a-c memperlihatkan hasil obeservasi mikroskop optik terhadap paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan pembesaran 200x. Berdasarkan pengamatan terlihat jelas bahwa paduan Cu-Ni-5 wt.%W terdiri dari fase *solid solution* Cu/Ni, Cu-rich, dan porositas. Kesemua fase tersebut di indikasikan dengan area yang bewarna kehijauan, *orange*, dan *dark gray* dengan fokus yang kurang sempurna secara berurutan. Penambahan Ni cenderung menyebabkan pembentukan area bewarna kehijauan lebih banyak, lihat Gambar 3c. hal

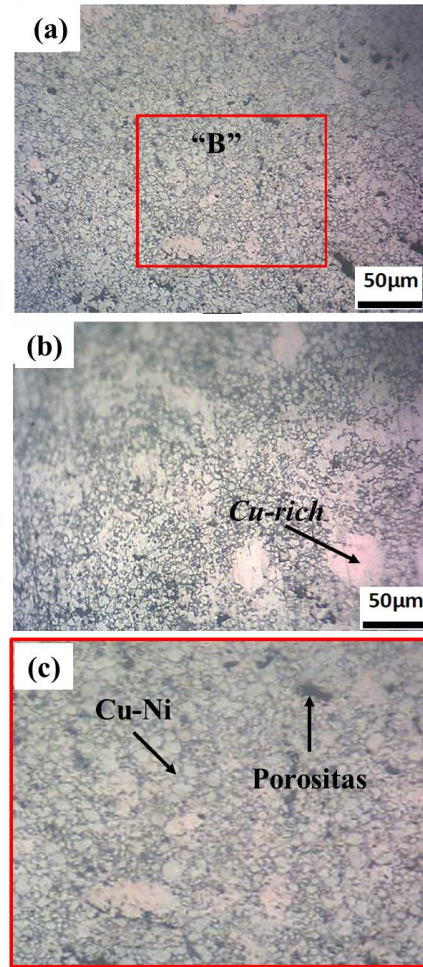
ini di karenakan Ni akan terdifusi ke dalam matrik Cu mendorong terbentuknya *solid solution* lebih banyak selama proses *sintering* pada temperatur tinggi. Namun, hasil observasi yang diperoleh juga memperlihatkan tidak semua Cu-Ni dapat larut membentuk *solid solution*. Sebahagian elemen Cu dengan area berwarna *orange* cenderung membentuk *cluster* Cu-rich terdistribusi secara tidak merata diantara fase utama *solid solution*. Pembentukan porositas terjadi dikarenakan adanya kontaminan yang masuk diantara matrik logam selama pemrosesan, kontaminan ini dapat berupa oxygen maupun elemen lainnya. keberadaan porositas diperlihatkan pada daerah "A" yang diperbesar di Gambar 3. Sementara itu serbuk W sangat sulit terdeteksi menggunakan observasi *optical microscopy*. Namun, dikarenakan titik cair elemen ini yang sangat tinggi ($\pm 3.422^\circ\text{C}$) dibanding dengan temperatur *sintering* yang diterapkan menyebabkan elemen ini kemungkinan besar akan terdistribusi diantara matrik utama Cu-Ni.

Lebih lanjut observasi struktur mikro Cu-Ni-5 wt.%W dengan berbagai variasi temperatur *sintering* diperlihatkan pada Gambar 4. Hasil observasi memperlihatkan temperatur lebih tinggi diperoleh struktur yang lebih merata untuk distribusi fase CuNi. Namun porositas tetap terbentuk diantara mikrostruktur dengan ukuran pada rentang antara 1-10 μm . Fase Cu-rich tidak terlalu banyak terbentuk, hal ini diyakini dipengaruhi oleh temperatur yang lebih tinggi meningkatkan proses difusi. Hal ini sejalan dengan *sintering* pada temperatur 870°C diperoleh densitas 6,5 gr/cm³ meningkat jika dibanding dengan *sintering* pada temperatur 770°C sebesar 5,9 gr/cm³, lihat Gambar 2. Temperatur *sintering* yang lebih tinggi akan mendorong difusi atom lebih mudah terjadi, pengurangan porositas, dan pada akhirnya berdampak terhadap peningkatan densitas suatu material [21].



Gambar 3. mikrostruktur Cu-Ni-5 wt.%W rasio Cu/Ni (a) 90/10 (b) 80/20, dan (c) 70/10

Walaupun terjadi sedikit peningkatan densitas, namun kenaikan temperatur *sintering* dapat mendorong pembentukan senyawa oksida yang diindikasikan dengan titik halus berwarna hitam diantara matrik Cu/Ni, lihat Gambar 4a. Keberadaan oksida-oksida yang berasal dari elemen kontaminan maupun penyusun berpengaruh terhadap densifikasi dan sifat mekanis. Densifikasi yang kurang baik ditandai dengan mikrostruktur yang kurang padat, pembentukan porositas, dan keberadaan oksida diantara mikrostruktur. Hal-hal ini pada akhirnya akan pengaruh terhadap penurunan sifat mekanis paduan logam sehingga peran temperatur sinter dalam meningkatkan sifat mekanis menjadi tidak optimum.



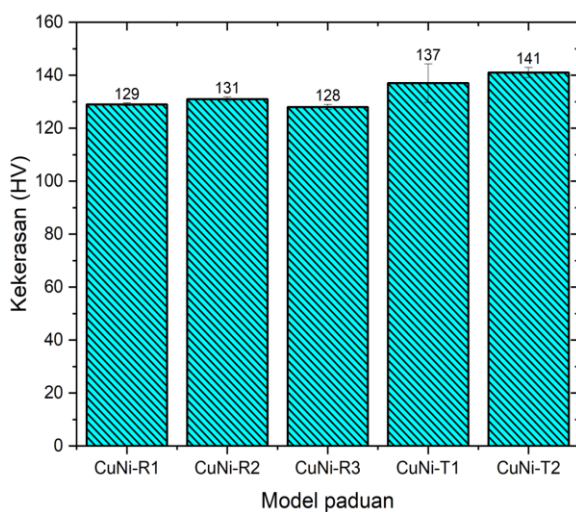
Gambar 4. Mikrostruktur paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan berbagai temperatur *sintering* (a) 820°C, (b) 870°C, dan (c) *Enlarge area* "B" pada Gambar 4(a).

3.3 Sifat mekanis paduan Cu-Ni-5 wt%W

Karakteristik mekanis paduan pada penelitian ini dilakukan melalui pengujian kekerasan dan tekan. Hasil pengujian kekerasan menggunakan standar Vickers terhadap paduan Cu-Ni-5 wt.%W pada berbagai rasio Cu/Ni dan suhu *sintering* ditampilkan pada Gambar 5.

Nilai kekerasan tertinggi pada paduan CuNi-T2 sebesar 141 HV, untuk nilai kekerasan terendah di dapat pada paduan CuNi-R3 sebesar 128 HV. Kenaikan kekerasan sejalan dengan kenaikan temperatur *sintering*, hal ini diyakini berkaitan dengan densifikasi yang lebih baik yang telah ditampilkan pada Gambar 2. Hubungan peningkatan densitas dan temperatur *sintering* terhadap kenaikan kekuatan juga telah dilaporkan terjadi pada

paduan berbasis aluminium *alloy* dan Ti-Cu [12, 22]. Sebaliknya peningkatan jumlah Ni sedikit meningkatkan kekerasan paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan 20 wt.%Ni sebesar 131 HV. Peningkatan yang tidak signifikan ini dipengaruhi oleh banyak faktor seperti porositas dan ketidak homogenab distribusi partikel. Nilai kekerasan Vickers dengan pemberian beban indentasi yang rendah hanya dipengaruhi oleh komposisi dan mikrostruktur, sedangkan pada pembebanan indentasi yang lebih besar nilai kekerasan yang diperoleh juga berkaitan dengan keberadaan porositas [23].

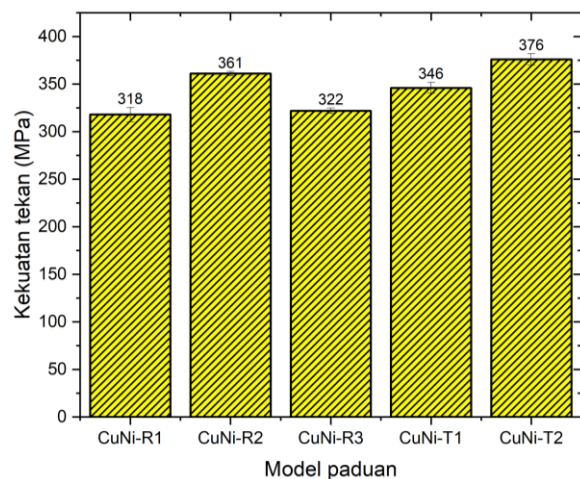


Gambar 5. Hasil pengujian kekerasan paduan Cu-Ni-5 wt.%W pada berbagai varias temperatur dan rasio Cu/Ni

Gambar 6 menampilkan hasil pengujian tekan berbagai paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan variasi rasio Cu/Ni dan suhu *sintering*. Kekuatan tertinggi diperoleh pada model paduan CuNi-T1 sebesar 376 MPa dan terendah pada paduan CuNi-R1 sebear 318 MPa. Nilai kekuatan tekan ini diperoleh hingga pemendekan 20% dan benda uji telah mengalami deformasi plastis atau *crack*. Deformasi plastis ditandai dengan bentuk sampel paduan tidak kembali ke ukuran semula pada saat beban dilepas dan terbentuknya retakan dipermukaan sampel telah teramati secara visual yang menandakan paduan telah rusak.

Penambahan elemen Ni cenderung menaikkan sedikit kekuatan Paduan Cu, penambahan 20 wt.%Ni diperoleh kekuatan

tekan 361 MPa atau terjadi kenaikan sekitar 13%, hasil uji tekan ini berkesesuaian dengan hasil pengujian kekerasan (Gambar 5), penambahan 30 wt.% Ni tidak meningkatkan kekuatan tekan. Pada berbagai *alloy* lain seperti paduan CrCrW penambahan Ni memiliki dampak yang terbatas dalam peningkatan kekuatan tekan paduan juga telah dilaporkan [24]. Pada bagian lain, kenaikan suhu sedikit meningkatkan kekuatan tekan, Dimana kekuatan mencapai 376 MPa. Peningkatan suhu *sintering* pada paduan Cu-Ni-5 wt.%W dapat meningkatkan difusi atom yang memungkinkan partikel material saling mengikat lebih baik. Dampak positif peningkatan temperatur *sintering* terhadap kekuatan tekan paduan juga telah dilaporkan pada material Cu-Sn-Zn-C, pada temperatur 700-800 °C diperoleh peningkatan kekuatan, namun temperatur *sintering* lebih tinggi hingga 900 °C kekuatan menurun [25]. Hal ini tentunya sedikit berbeda pada paduan Cu-Ni-5 wt.%W yang mengandung 5 wt.%W yang memiliki titik cair jauh lebih tinggi dibanding dengan elemen Sn dan Zn dengan titik cair lebih rendah, Dimana pada penelitian ini hingga temperatur 870 °C kekuatan tekan masih mengalami kenaikan.

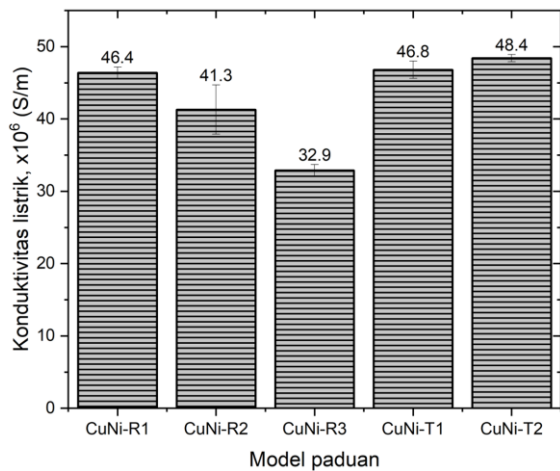


Gambar 6. Hasil pengujian tekan paduan Cu-Ni-5 wt.%W

3.4 Konduktivitas listrik Cu-Ni-5 wt.%W

Nilai konduktifitas listrik berbagai variasi rasio Cu/Ni dan temperatur *sintering* paduan Cu-Ni-5 wt.%W diperlihatkan pada

Gambar 7. Nilai konduktivitas material dengan rasio 90 wt.%Cu dan 10 wt.%Ni (CuNi-R1) memiliki konduktivitas listrik tertinggi sebesar $46,4 \times 10^6$ S/m dan mengalami peningkatan menjadi $48,4 \times 10^6$ S/m pada temperatur 870°C pada komposisi yang sama.



Gambar 7. Konduktivitas listrik berbagai model paduan Cu-Ni-5 wt.%W

Nilai terendah diperoleh pada model paduan CuNi-R3 sebesar $32,9 \times 10^6$ S/m. Diyakini penurunan konduktivitas listrik berkaitan dengan peningkatan kandungan Ni dalam paduan yang memiliki konduktivitas lebih rendah secara alamiah dibanding Cu. Pada suhu *sintering* 820°C hingga 870°C diperoleh konduktivitas listrik yang lebih baik, namun konduktivitas tidak mengalami peningkatan yang signifikan. Nilai konduktivitas yang lebih baik diyakini berkaitan dengan densifikasi yang lebih baik untuk paduan Cu-Ni-5 wt.%W dengan 10 wt.%Ni yang disinter pada temperatur 870°C , lihat Gambar 2. Hubungan antara densifikasi terhadap konduktivitas Listrik juga telah dilaporkan pada Paduan Cu-Cr-Zr, dimana peningkatan densitas berdampak terhadap peningkatan konduktivitas listrik [26]. Nilai konduktivitas yang diperoleh pada penelitian ini ekuivalen dengan $\pm 83\%$ IACS tertinggi dan $\pm 55\%$ IACS yang terendah, angka ini masih diatas 50% IACS sehingga masih memenuhi syarat untuk digunakan sebagai kandidat material elektroda.

4. Kesimpulan

Berdasarkan data hasil pengujian mekanis dan elektrik, maka dapat dibuatkan beberapa kesimpulan dari penelitian yang dilakukan. Penambahan komposisi Ni ke paduan Cu-Ni-5 wt.%W meningkatkan sifat mekanis, namun menurunkan konduktivitas listrik dan densitas paduan. Pada bagian lain temperatur *sintering* berpengaruh terhadap perbaikan sifat mekanis dan listrik. Kekuatan tekan tertinggi 376 MPa, kekerasan 141 HV, dan konduktivitas $48,4 \times 10^6$ S/m diperoleh pada suhu sinter 870°C dengan rasio Cu/Ni adalah 90/10. Sedangkan konduktivitas terendah sebesar $32,9 \times 10^6$ S/m diperoleh pada komposisi 30 wt.%Ni yang setara 55% IACS. Hasil observasi mikrostruktur memperlihatkan distribusi CuNi *phase* yang lebih baik dengan jumlah *Cu-rich cluster* yang lebih sedikit diperoleh pada temperatur sinter yang lebih tinggi pada rentang yang diterapkan pada penelitian ini $770\text{--}870^\circ\text{C}$.

Ucapan terimakasih

Penulis tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada DRTPM Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini dengan kontrak No. 35/UN5.2.3.1/PPM/KP-DRTPM/B/ 2023 dan seluruh anggota tim riset yang tergabung dalam *Alloys and Metal Processing Research Center*.

Referensi

- [1] Yuwono Y, Asroni A, Wahyudi TC, et al. 2024. Pengaruh Variasi Waktu Celup Terhadap Ketebalan Lapisan Dan Pantulan Cahaya Pada Proses Elektroplating Tembaga. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 13: 166–173.
- [2] Mahajan R, Krishna H, Singh AK, et al. 2018. A Review on Copper and its alloys used as electrode in EDM. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 1–11.

- [3] Grigoriev S, Volosova M, Grechisnikov V, et al. 2020. Wire electrical discharge machining of Al₂O₃-TiC in mineral oil and water. In: *Procedia CIRP*. Zurich: Elsevier B.V., 337–342.
- [4] Yuan X, Zhang P, Wang J, et al. 2023. Influences of Fe Content and Cold Drawing Strain on the Microstructure and Properties of Powder Metallurgy Cu-Fe Alloy Wire. *Materials* 16. DOI: 10.3390/ma16145180.
- [5] Peng C, Zeng L, Huang F, et al. 2020. Effects of alloying elements on mechanical and electronic properties of Cu by first-principles calculations. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Sanya: Institute of Physics Publishing, 1–7.
- [6] Elsayed A, Ibrahim R, Bahlol M, et al. 2018. Synthesis of cu-ni-al shape memory alloy by powder metallurgy. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, 1618–1622.
- [7] Liu DG, Zhang P, Ruan CF, et al. 2021. Fabrication and characterization of W/Cu/Ni-based high specific gravity alloy with Zr and Ti combined addition. *Int J Refract Metals Hard Mater* 101, 1–10.
- [8] Suprianto, Muhammad Ramadhan, Almi Syafroza, et al. 2023. The role of Cu element and compaction pressure on microstructure and mechanical Properties of Al-Cu binary alloy synthesized by powder metallurgy. *DINAMIS* 11, 06–15.
- [9] Suprianto, Maulana FP, Prasetyo SB, et al. 2025. Effect of iron content and warm compaction temperature on microstructure evolution and characteristics of the Cu-Ni-xFe based alloys. *Advances in Science and Technology Research Journal* 19, 12–26.
- [10] Ananda Yuda Pratama IGB, Suroso I, Utami N. 2023. Analisis Pengaruh Komposisi Bimetal Fe-Cr Dengan Blending Powder Metallurgy Terhadap Struktur Mikro. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 12, 218–225.
- [11] Saodaen R, Janmanee P, Rodchanarowan A. 2021. Characteristics of ternary metal (Cu-ni-tin) electrodes used in an electrical discharge machining process. *Metals* 11, DOI: 10.3390/met11050694.
- [12] Yuan X, Qu X, Yin H, et al. 2021. Effects of sintering temperature on densification, microstructure and mechanical properties of al-based alloy by high-velocity compaction. *Metals* 11, 1–11.
- [13] Lebedev M, Promakhov V, Schulz N, et al. 2023. Effects of Sintering Temperature on the Microstructure and Properties of a W-Cu Pseudo-Alloy. *Metals* 13, DOI: 10.3390/met13101741.
- [14] Eze AA, Sadiku ER, Kupolati WK, et al. 2020. Effect of sintering temperatures on the properties of in-situ copper-niobium-titanium diboride composites. *SN Appl Sci* 2, DOI: 10.1007/s42452-020-03960-z.
- [15] Zhou W, Hong L, Wang Y, et al. 2020. Effect of sintering temperature on microstructure and properties of nano-WC particle reinforced copper matrix composites prepared by hot-pressing sintering. *Mater Res Express* 7, 1–9.
- [16] Ke-sheng ZUO, Sheng-Qi XI, Jing-en ZHOU. 2021. Effect of sintering methods on properties of Cu-Based composite reinforced by mechanically alloyed Cu-Mo-C powder. *Results in Materials* 9, DOI: 10.1016/j.rinma.2020.100153.
- [17] American society for testing and materials. 2021. *Standard practices for production and preparation of powder metallurgy (P/M) test specimens*. Designation: B 925. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM Interantional.

- [18] Cañadilla A, Sanhueza JP, Montalba C, et al. 2024. Effect of Sintering Temperature on Phase Formation and Mechanical Properties of Al–Cu–Li Alloy Prepared from Secondary Aluminum Powders. *Metals* 14, 1–17.
- [19] Oleksak RP, Kapoor M, Perea DE, et al. 2018. The role of metal vacancies during high-temperature oxidation of alloys. *Materials Degradation* 25, 1–8.
- [20] Dixit M, Srivastava RK. 2018. Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of Copper prepared by Powder Metallurgy route. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Institute of Physics Publishing, 1–9.
- [21] Ogunbiyi O, Jamiru T, Sadiku R, et al. 2023. Effects of sintering temperature on the microstructure, mechanical, tribological and thermophysical properties of GNPs/IN738 composite. *Journal of Materials Research and Technology* 23, 5587–5605.
- [22] Akbarpour MR, Torknik FS, Ebadzadeh T. 2024. Effects of Sintering Temperature on the Densification, Microstructure, and Micro-hardness of Intermetallic Ti-Cu Alloy Prepared through Mechanical Alloying and Microwave-assisted Sintering Method. *Advanced Ceramics Progress* 10, 17–22.
- [23] Ternero F, Rosa LG, Urban P, et al. 2021. Influence of the total porosity on the properties of sintered materials—a review. *Metals* 11, 1–21.
- [24] Wang R, Zhang E. 2022. Synergistic Effect of Ni and Cu on the Microstructure, Corrosion Properties and Mechanical Properties of As-Cast Biomedical Co-Based Alloy. *Metals* 12, 1–16.
- [25] Susilowati SE, Sumardiyanto D. 2017. Effect of Sintering Temperature on the Mechanical Properties for a Cu-Sn-Zn-C Alloy Produced by Powder Metallurgy. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 10–17.
- [26] Chen Y, Hu Q, Wang L, et al. 2024. Study on Densification and Defects of Cu-Cr-Zr Alloy Formed by Selective Laser Melting. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics, 1–10.