



Studi sifat mekanis dan elektrik paduan Cu-Ni-W_x (2 ≤ x ≤ 5wt. %) disintesis menggunakan *cold compaction*

Study on mechanical and electrical properties of the Cu-Ni-W_x (2 ≤ x ≤ 5wt. %) alloys synthesized by cold compaction

Suprianto*, D. Hadiarsa, A. Syahputra, Mahadi, A. Pintoro

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater Kampus USU, Medan, 20155, INDONESIA. HP. 085261070641

*E-mail: suprianto@usu.ac.id

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 25 April 2024

Accepted 17 June 2024

Available online 01 October 2024

Keywords:

Powder metallurgy

Cu-alloy

Mechanical properties

Electrical properties



Copper-based alloys are common material which are widely used as electrodes for electrical discharge machining (EDM) due to their good electrical conductivity, but low mechanical properties. This problem can be solved by addition of some elements and also correct selected of the process parameter, in such compaction pressure in the powder metallurgy (PM) stages. The aim of this study to investigates the effect of W-refractory element and compaction pressure on the mechanical and electrical properties of the Cu-Ni-W_x based alloy. The research was conducted with varying (190, 220, and 250 MPa) of compaction pressure and W_x (x=2, 3, 4, and 5wt.%). Horizontal milling with 300 rpm has been used to mixing powder material. Furthermore, the sintering process at 770°C for 60 minutes by using a conventional furnace was conducted. In this current study, the maximum results of 123.2 VHN of the hardness, 325 MPa of compressive strength at 200 kN of the maximum load, and 4.62 x 10⁷ (S/m) of the electrical conductivity were obtained at 250 MPa compaction pressure. The addition of W into Cu-based alloy tends to increase of the mechanical properties, however, reduce the electrical conductivity. On the other hand, microstructure observation shows that the increasing compaction pressure increases the solid solution phase between Cu-Ni and reduces the porosity.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 14, No. 2, Oktober 2024, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

Tembaga dan paduannya merupakan material yang banyak dipergunakan dalam bidang keteknikan khususnya sebagai elektroda pada *electric discharge machine* (EDM), dimana proses pemotongan menghasilkan kekasaran permukaan lebih baik untuk elektroda Cu-Ni (Ahmad dkk., 2018). Elektroda EDM dipergunakan pada proses pemotongan maupun pemesinan lainnya. Kondisi kerja pada temperatur tinggi

berpotensi menyebabkan degradasi dari sifat mekanis elektroda serta terjadinya keausan dan patah pada komponen tersebut. Walaupun paduan antara Cu dan Ni sangat mudah membentuk *phase solid solution* pada berbagai komposisi, namun kekuatan mekanis paduan tersebut masih relatif rendah. Permasalahan ini dapat diatasi melalui berbagai cara seperti penambahan elemen lain yang bertindak sebagai pemerkuat dan pemilihan parameter proses yang tepat. Kombinasi elemen W-Cu memiliki efek yang berbeda, peningkatan Cu cenderung menurunkan resistivitas dan kekerasan, sebaliknya rasio W lebih tinggi menghasilkan kekerasan yang lebih baik (Erçetin dkk., 2017). Elemen Cu telah banyak dikombinasikan dengan elemen lain seperti Al-Cu memperlihatkan kenaikan kekerasan dengan kenaikan % Cu (Suprianto dkk., 2023). Kombinasi paduan Cu-Zn-Ag juga telah dilakukan, hasilnya diperoleh bahwa keberadaan Ag pada paduan ini berpengaruh terhadap pembentukan porositas (Lee dkk., 2022). Penambahan elemen memiliki pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik paduan berbasis tembaga, diantaranya dapat meningkatkan kekuatan Cu-alloy. Penambahan Fe (5~40) wt.% meningkatkan kekuatan paduan Cu, sebaliknya konduktivitas listrik menurun (Yuan dkk., 2023). Kondisi ini perlu menjadi perhatian terutama untuk aplikasi elektroda EDM sehingga kinerja peralatan dapat dipertahankan. Material elektroda EDM telah dikembangkan termasuk kombinasi Cu dengan penambahan dua elemen yang berbeda. Kombinasi ketiga elemen Cu-Ni-5wt.%W telah digunakan sebagai elektroda melalui sintesis dengan metode metalurgi serbuk pada 735°C temperatur sinter dan penekanan 7 ton (Sabri dkk., 2019).

Komposisi penyusun merupakan hal yang penting untuk memperoleh sifat paduan yang diinginkan, namun hal lain yang tidak kalah penting adalah parameter proses seperti suhu sinter, tekanan kompaksi dan perlakuan panas. Penerapan proses *solution* dan *ageing* pada temperatur 900°C selama 2 jam terhadap paduan Cu-Ni-Si yang disintesis menggunakan model sinter dengan penekanan panas (30MPa, 960°C) menghasilkan kekerasan dan konduktivitas yang lebih baik dibanding dengan tanpa perlakuan (Tao dkk., 2022). Pada penelitian lain, paduan Cu-Al-Ni dikombinasikan dengan Ag telah berhasil disintesis menggunakan teknologi metalurgi serbuk pada suhu sinter 850°C diikuti dengan teknik pendinginan yang berbeda menghasilkan kekuatan tekan tertinggi diperoleh dengan penggunaan media pendingin air (Abbas dkk., 2020). Kajian mengenai perbaikan sifat mekanis dan elektrik paduan Cu dan pengaruh parameter proses paduan telah dilakukan (Sabri dkk., 2019). Parameter tekanan kompaksi walaupun bukan hal yang paling utama dalam densifikasi, namun tetap memiliki kontribusi terhadap perbaikan sifat mekanis suatu paduan seperti pada material AA7075/B4C/graphite (Manohar dkk., 2021) dan peningkatan density serta kekerasan komposit matrik Cu diperoleh pada tekanan tinggi hingga 700 MPa (Ankur dkk., 2021). Penelitian lain juga telah melaporkan perbaikan karakteristik paduan berbasis Cu diperoleh dengan penambahan Sn dan peningkatan tekanan kompaksi (Anugraha dan Widyastuti., 2014), densitas Cu-CuO dapat dilakukan dengan meningkatkan tekanan kompaksi pada proses metalurgi serbuk (Tse Lop Kun dkk., 2023). Kekuatan tekan paduan berbasis Al/Si/Cu dipengaruhi oleh kenaikan tekanan kompaksi yang diterapkan selama proses (Meyer dkk., 2020). Besarnya tekanan kompaksi yang diberikan pada proses metalurgi serbuk juga berpengaruh terhadap perbaikan densitas material setelah kompaksi. Karakteristik kompaksi, densitas, dan kekerasan serbuk Cu yang dikompaksi diyakini dipengaruhi aspek ratio yang merupakan perbandingan antara tinggi dengan diameter sampel (Dong dkk., 2020).

Berdasarkan uraian diatas bahwa studi mengenai proses pembuatan material alternatif elektroda EDM berbasis Cu telah dilakukan, namun jumlahnya masih sangat terbatas khususnya mengenai pengaruh parameter proses seperti tekanan kompaksi dan komposisi W < 5wt.%. Pada penelitian ini dilakukan kajian mengenai pengaruh tekanan kompaksi dingin (*cold compaction*) dan tungsten terhadap struktur mikro, kekerasan, kekuatan tekan, dan konduktivitas listrik material berbasis Cu-Ni-W menggunakan teknologi metalurgi serbuk.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan teknologi metalurgi serbuk untuk mensintesis paduan berbasis Cu-Ni-W_x alloy. Serbuk yang digunakan memiliki kemurnian > 99.00% dan ukuran partikel atau serbuk ± 40 μm dengan komposisi W_x (x=2, 3, 4, dan 5wt.%), secara detail komposisi paduan dan tekanan kompaksi yang dipergunakan pada penelitian ini diperlihatkan pada tabel 1.

Tabel 1 Komposisi dan tekanan kompaksi paduan berbasis Cu-Ni-W

No.	Tekanan kompaksi (MPa)	Komposisi 70Cu30Ni (wt.%)	Komposisi W (wt.%)
1	190	95	5
2	220	95	5
3	250	95	5
4	250	98	2
5	250	97	3

Proses pencampuran serbuk dengan komposisi yang telah ditetapkan dilakukan menggunakan *horizontal milling* pada kecepatan putaran 300 rpm selama 120 menit, diikuti dengan proses penekanan dingin selama 15 menit pada berbagai variasi tekanan kompaksi untuk menghasilkan *compact material*. Pada proses kompaksi cetakan yang digunakan terbuat dari bahan stainless steel 316 memiliki dimensi diameter dalam ±25,4 mm dan tinggi sampel ±7 mm dan sampel pengujian tekan mengacu kepada standar ASTM B925-03, bentuk dan kelengkapan cetakan diperlihatkan pada gambar 1. Proses densifikasi dilanjutkan melalui proses penyinteran pada temperatur 770°C selama 60 menit menggunakan *muffle furnace* sehingga diperoleh *bulk material*. Proses preparasi sampel uji dari *bulk material* dilakukan menggunakan kertas ampelas ukuran grid 100 ~2000, dilanjutkan dengan *autosol metal polish* untuk menghilangkan goresan dan memperoleh permukaan spesimen lebih halus untuk dilakukan pengujian mekanis dan fisis. Sampel yang telah selesai dipreparasi selanjutnya dilakukan pengujian kekerasan menggunakan metode Vickers dengan standar ASTM E384 dengan pembebanan sebesar 100 gr selama 10 detik, selanjutnya nilai kekerasan diperoleh melalui pengukuran diameter bekas injakan. Pengujian tekan dilaksanakan pada kondisi temperatur ruangan, dengan laju pembebanan 5 (mm/s) menggunakan peralatan *universal testing machine* mengacu kepada standar ASTM E9-89a. Observasi mikrostruktur menggunakan *Reflected Metallurgical Microscope* dengan perbesaran 200x tanpa etsa. Pengujian sifat kelistrikan yaitu konduktivitas listrik dari model paduan Cu-Ni-W dilakukan menggunakan peralatan Keithley 6517B *Electrometer* kondisi suhu ruang untuk berbagai tekanan kompaksi dan komposisi W.

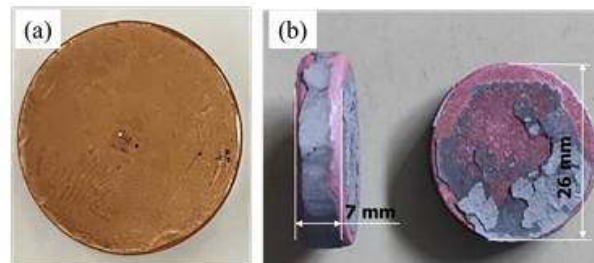


Gambar 1. Cetakan permanen berbahan dasar *stainless steel*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berbagai karakteristik model paduan Cu-Ni-W_x dengan penekanan dingin telah diperoleh melalui serangkaian observasi mikrostruktur, pengujian sifat mekanis dan konduktivitas listrik diuraikan sebagai berikut.

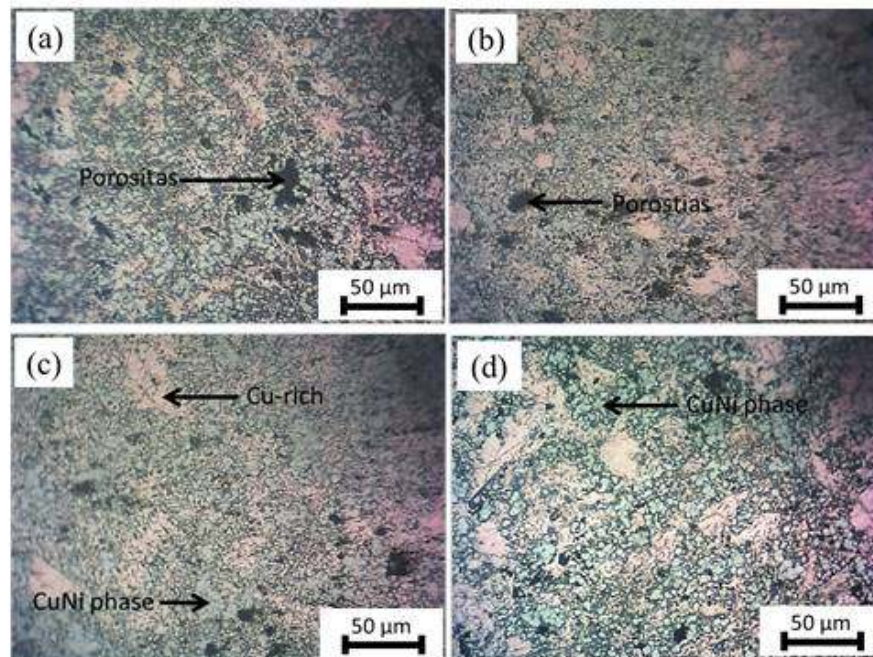
Gambar 2a-b merupakan sampel paduan Cu-Ni-5wt.%W setelah proses kompaksi dan *bulk material* (*as sintered*) secara berurutan. Hasil pengamatan secara visual terlihat bahwa material *compact* berwarna coklat kemerahan dan dimensi sesuai dengan standar ukuran cetakan yang digunakan, lihat gambar 2a. Hasil ini jelas memperlihatkan bahwa proses kompaksi dengan tekanan 250 MPa berhasil melakukan densifikasi awal, dimana *interlocking* terjadi diantara serbuk logam Cu, Ni, dan W. Permukaan cetakan yang mulus dan pemberian tekanan yang tepat penting diperhatikan sehingga sampel material *compact* tidak mengalami *fracture* saat dikeluarkan dari cetakan, sehingga memudahkan dalam penanganan untuk proses lanjutan.



Gambar 2. a) *green body* dan b) *bulk material* paduan Cu-Ni-5wt.%W

Selanjutnya, proses sintering pada temperatur 770°C telah mendorong adanya perubahan pada visual sampel bulk Cu-Ni-5wt.%W alloy, permukaan cenderung berwarna kemerahan dan adanya terak lepas pada permukaan sampel. Fenomena ini diyakini berkaitan dengan adanya interaksi antar partikel dan lingkungan selama proses sintering temperatur tinggi, terbentuknya berbagai fase seperti *solid solution* (Cu-Ni), *intermetallic* dan oksidasi merupakan beberapa hal yang dapat menyebabkan perubahan visual sampel setelah proses sintering.

Gambar 3 (a-c) memperlihatkan hasil observasi mikrostruktur menggunakan mikroskop optik paduan Cu-Ni-5wt.%W pada berbagai tekanan kompaksi dan paduan Cu-Ni dengan komposisi 2wt.%W, lihat gambar 3d. Mikrostruktur paduan berbasis Cu-Ni umumnya terdiri dari tiga area utama yaitu warna kemerahan, hijau muda, dan gelap yang diindikasikan sebagai *phase* larut padat Cu-Ni, *Cu-rich*, dan porositas secara berurutan. Pada tekanan kompaksi 190 MPa keberadaan Cu terdistribusi diantara matrik *phase* Cu-Ni *solid solution* (α) tidak merata dan cenderung membentuk *cluster* dengan ukuran < 50 μ m, seperti diperlihatkan pada gambar 3a. Gambar 3b merupakan hasil foto mikro spesimen dengan tekanan kompaksi 220 MPa, terlihat bahwa ukuran partikel paduan Cu-Ni-W lebih kecil dengan sedikit porositas terbentuk. Peningkatan tekanan hingga 250 MPa sedikit merubah mikrostruktur *alloy*, lebih banyak *phase solid solution* terdistribusi merata dan porositas yang halus. Keterkaitan antara temperatur sinter dan tekanan kompaksi terhadap bentuk dan ukuran porositas pada paduan berbasis serbuk logam telah dilaporkan pada penelitian-penelitian terdahulu (Castillo dkk., 2019). Faktor yang berpengaruh terhadap mikrostruktur suatu material sangat beragam, tidak hanya parameter proses namun juga komposisi penyusun. Mikrostruktur paduan Cu-Ni dengan tungsten 2wt.% diperlihatkan pada gambar 3d. Jumlah W yang lebih sedikit berimplikasi terhadap naiknya rasio jumlah Cu-Ni, diindikasikan dengan area berwarna kehijauan yang lebih luas (gambar 3d). Keberadaan W dengan titik cair jauh lebih tinggi dari kedua elemen (Cu, Ni) akan sulit untuk mengalami *liquid phase sintering*, namun dispersi elemen ini diantara matrik diharapkan dapat berperan sebagai *dispersion strengthening*.

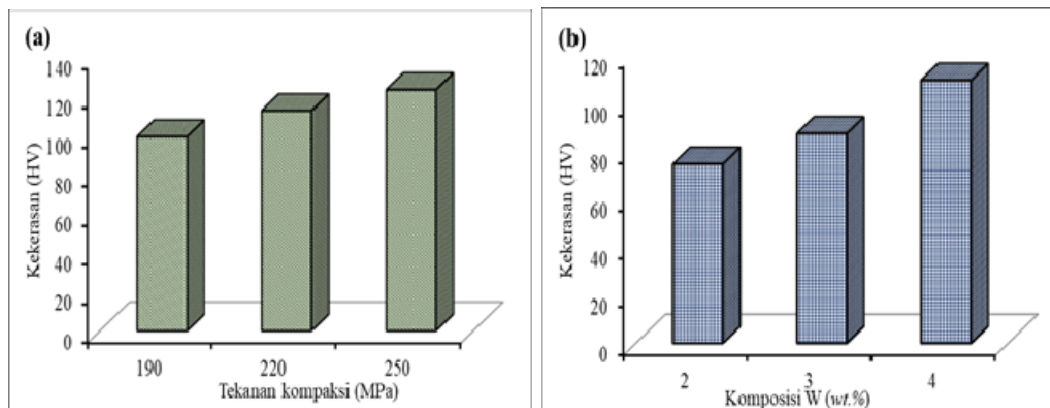


Gambar 3. Mikrostruktur model paduan Cu-Ni-5wt.%W setelah disinter pada berbagai variasi tekanan kompaksi (a) 190 MPa, (b) 220 MPa, (c) 250 MPa, dan (d) mikrostruktur Cu-Ni-2wt.%W tekanan 250 MPa.

Penerapan tekanan kompaksi yang berbeda berpengaruh terhadap kualitas material *compact*, namun untuk paduan setelah disinter tidak terlalu signifikan. Hal ini dipengaruhi oleh adanya proses lanjutan yaitu sinter pada temperatur tinggi dimana proses densifikasi terjadi melalui fenomena difusi selama proses. Perubahan terhadap mikrostruktur walaupun sedikit tentunya akan berdampak terhadap performansi dari suatu paduan logam. Efek tekanan secara jelas memiliki pengaruh terhadap perubahan mikrostruktur, seperti telah dilaporkan bahwa kenaikan tekanan kompaksi cenderung mengurangi pembentukan porositas dari paduan berbasis Cu, hal

ini tentunya akan berpengaruh baik terhadap karakteristik paduan seperti sifat mekanis dan konduktivitas listrik (Kumar dkk., 2020). Peningkatan jumlah porositas berdampak negatif terhadap konduktivitas termal, listrik dan sifat mekanis berbagai paduan seperti SS 304L (Tomanek dkk., 2021). Keberadaan porositas merupakan permasalahan yang umum dijumpai pada teknik metalurgi serbuk, dimana terjadinya infiltrasi oksigen atau kontaminan lainnya saat proses pencampuran serbuk mendorong pembentukan porositas, oksida, dan karbida selama sintering.

Gambar 4 memperlihatkan pengaruh tekanan kompaksi dan komposisi tungsten terhadap kekerasan paduan berbasis Cu-Ni. Kekerasan paduan Cu-Ni-5wt.%W mengalami peningkatan seiring dengan naiknya tekanan kompaksi, lihat gambar 4a. Metode kompaksi dingin walaupun tidak signifikan pengaruhnya terhadap densifikasi dibanding proses sintering, namun proses ini diyakini berdampak terhadap luasan kontak permukaan antar partikel dan penurunan jumlah porositas diantara mikrostruktur (Manish dan Srivastava, 2018), hubungan antara kenaikan parameter tekanan kompaksi terhadap perbaikan densitas, porositas, kekerasan, dan kekuatan berbagai material telah dilaporkan pada penelitian terdahulu diantaranya Cu-Al alloy (Suprianto dkk., 2023), titanium based alloy (Zhang dkk., 2019), dan komposit AA7075/B4C/Graphite (Manohar dkk., 2021). Selain parameter tekanan, kekerasan paduan Cu-Ni juga dipengaruhi oleh adanya penambahan elemen tungsten, diketahui bahwa kekerasan individual elemen dari tungsten jauh lebih tinggi dari nilai kekerasan *based metal* Cu dan Ni. Pengaruh elemen ini terhadap kekerasan paduan diperlihatkan pada gambar 4b. Penambahan elemen W pada rentang 2~4wt.% pada penelitian ini memperlihatkan kenaikan kekerasan secara konsisten dengan kekerasan maksimum 109,4 HV dicapai dengan penambahan 4wt.% W. Perbaikan kekerasan berbagai jenis paduan lain melalui penambahan W telah dilakukan, seperti peningkatan kekerasan diperoleh pada Cu-3wt.%Si hingga 0.8wt.%W, namun sebaliknya konduktivitas listrik cenderung mengalami penurunan (Nnakwo, 2019). Walaupun keberadaan tungsten dapat meningkatkan kekerasan, namun penambahan elemen ini menurunkan ketangguhan paduan logam seperti pada paduan Fe yang mengandung 0,8wt.%Cu (Myszka dkk., 2021), termasuk terjadinya aglomerasi W diantara mikrostruktur serta penurunan konduktivitas listrik terjadi dengan naiknya rasio tungsten hingga ~30wt.% pada paduan Cu-W (Li dkk., 2022).



Gambar 4. Grafik (a) hubungan tekanan kompaksi terhadap kekerasan paduan Cu-Ni-5wt.%W, (b) pengaruh komposisi tungsten (W) terhadap kekerasan paduan berbasis Cu-Ni.

Karakteristik mekanis dari paduan berbasis Cu-Ni telah dilakukan melalui pengujian tekan pada kondisi temperatur ruangan. Hasil pengujian seperti diperlihatkan pada tabel 2, diperoleh peningkatan kekuatan tekan seiring dengan bertambahnya tekanan kompaksi 190 s/d 250 MPa. Kekuatan model paduan CuNi-5wt.%W terbesar 325 MPa pada tekanan kompaksi 250 MPa, kekuatan tertinggi ini diikuti dengan penurunan tinggi sampel yang lebih kecil 15,6 % setelah proses penekanan selesai. Fenomena ini diyakini berkaitan dengan proses pemberian beban yang lebih tinggi akan menyebabkan penurunan ukuran dan jumlah kekosongan (*pores*), hubungan antara peningkatan tekanan, kenaikan densitas, penurunan jumlah porositas telah dilaporkan oleh Manish Dixit dan R. K. Srivastava (2018). Sebaliknya tekanan yang lebih rendah menyebabkan proses densifikasi tidak optimum dan terbentuknya porositas berpengaruh terhadap kekuatan tekan paduan jauh lebih rendah (~181,6 MPa) diperoleh. Hasil ini berkesesuaian dengan observasi mikrostruktur yang telah dilakukan, dimana diperoleh porositas dan ketidakhomogenan distribusi dari Cu-rich *phase* diantara matrik Cu-Ni *solid*

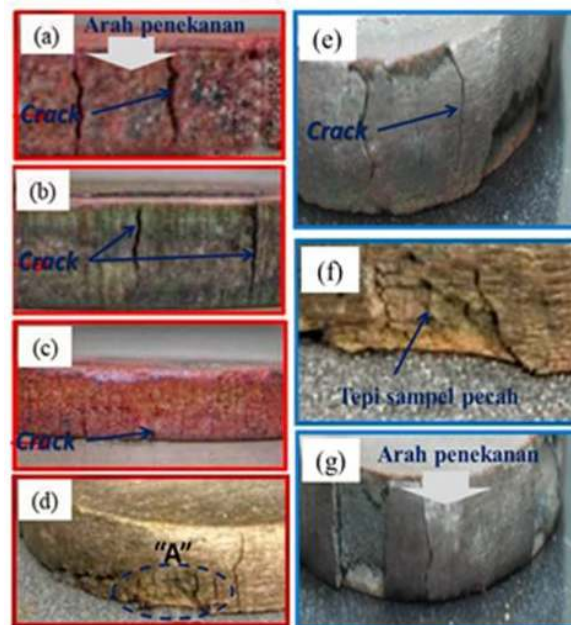
solution. Keberadaan keduanya yaitu porositas dan segregasi elemen diantara mikrostruktur dapat mempengaruhi kekuatan tekan.

Tabel 2 Nilai kekuatan tekan paduan berbasis Cu-Ni berbagai variasi tekanan dan komposisi tungsten.

No.	Tekanan kompaksi (MPa)	Komposisi W (wt.%)	Compressive yield strength (MPa)	Kekuatan tekan maksimum (MPa)	Penurunan tinggi sampel (%)	Kondisi sampel
1	190	5	73,0	181,6	25,9	Crack
2	220	5	85,2	255,2	19,4	Crack
3	250	5	83,1	325,0	15,6	Crack
4	250	2	81,6	327,0	31,0	Crack
5	250	3	81,0	337,5	30,5	Crack
6	250	4	88,5	345,2	28,1	Crack

Lebih lanjut pada tabel 2 juga terlihat bagaimana pengaruh komposisi tungsten dengan kenaikan 1,0wt.% terhadap kekuatan tekan sampel, penambahan tungsten dapat meningkatkan kekuatan ditandai dengan penurunan tinggi sampel tidak berbeda jauh (28,1~31,06)% dengan komposisi 2~4 wt.%W, dan kekuatan tekan maksimum 345 MPa pada komposisi 4wt.%W dengan tekanan kompaksi 250 MPa.

Kekuatan tekan yang ditampilkan pada tabel 2 diperoleh pada pembebanan di rentang 94.8 ~184.2 KN, dimana pada beban ini sampel telah mengalami deformasi plastis yang ditandai dengan terbentuknya *crack* pada permukaan sampel paduan berbasis Cu-Ni. Hal ini mengindikasikan kekuatan *yield* sampel masih di bawah kekuatan tekan yang ditampilkan pada tabel 2 diatas. Hasil pengujian tekan yang telah dilakukan sejalan dengan hasil observasi secara visual terhadap sampel, dimana terlihat makro *crack* terjadi pada masing-masing paduan Cu-Ni setelah dilakukan pengujian, *crack* yang terjadi pada masing-masing sampel uji diperlihatkan pada gambar 5.

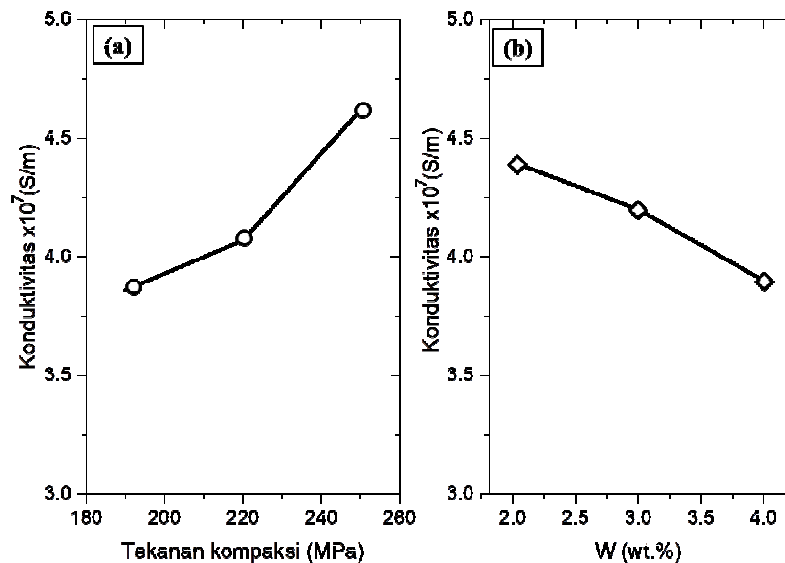


Gambar 5. Bentuk kerusakan paduan CuNi-5wt.%W alloy pada berbagai variasi tekanan kompaksi: (a) 190 MPa, (b) 220 MPa, (c) 250 MPa, (d) CuNi-3wt.%W, (e) CuNi-2wt.%W, (f) perbesaran area "A", dan (g) CuNi-4wt.%W alloy dengan tekanan kompaksi 250 MPa

Hasil observasi kerusakan pada sampel pengujian terlihat jelas bahwa sampel mengalami pemendekan dan terbentuknya *crack* yang berada di sisi diameter luar sampel dengan tinggi dan lebar *crack* bervariasi. Keretakan terbesar terjadi pada variasi tekanan kompaksi 190 MPa sebesar 5,3 mm, diikuti variasi 220 MPa

sebesar 3,2 mm, dan variasi 250 MPa sebesar 1,2 mm (Gambar 5a-c). Penurunan jumlah dan dimensi retak pada permukaan sampel paduan Cu-Ni sejalan dengan bertambahnya tekanan kompaksi yang diberikan dan naiknya *compressive strength* seperti ditampilkan pada tabel 2. Retak atau *crack* yang dialami suatu material paduan merupakan imbas dari penerapan beban, retak dapat dimulai pada daerah dimana terdapat *intermetallic* atau *phase* kedua yang terus menyebar seiring naiknya pembebanan hingga material mengalami patah (Ohništová dkk., 2019). Kerusakan akibat penekanan juga dialami sampel paduan dengan variasi tungsten, seperti diperlihatkan pada gambar 5d-f dengan komposisi Cu-Ni-(2~3)wt.%W. Sama halnya dengan sampel variasi tekanan kompaksi, *crack* terjadi pada sisi luar sampel. Pada sampel uji juga terjadi *fracture* pada sisi bawah sampel uji tekan, fenomena ini kemungkinan dipengaruhi banyak faktor diantaranya keberadaan cacat mikrostruktur selama proses sintesis paduan. Dampak negatif keberadaan cacat seperti porositas mikro terhadap kekerasan dan kekuatan paduan telah dilaporkan paduan aluminium yang mengandung Cu dan Mg (Gu dkk., 2020). Cacat porositas yang terbentuk di berbagai paduan logam lain disintesis menggunakan teknik metalurgi serbuk seperti (FeCrN) SS menyebabkan ketidaksempurnaan struktur, hal ini berkontribusi terhadap penurunan kekuatan tekan (Zhang dkk., 2021). Secara prinsip selama proses pengujian tekan dilakukan, diyakini bahwa dalam skala mikro sampel paduan yang menerima beban akan mengalami deformasi pada mikrostruktur yang terus mengalami akumulasi akibat beban eksternal. Hal ini akhirnya sampai ke daerah terluar sehingga menghasilkan *crack macro* dan kegagalan material terjadi. Lebih lanjut, fenomena *crack* yang diamati berbanding lurus dengan keberadaan porositas pada masing-masing sampel, lihat Gambar 3a-c. Berdasarkan hasil ini dapat ditarik suatu kesimpulan bahwa semakin banyak jumlah porositas paduan menyebabkan penurunan kekuatan dari model paduan CuNi-Tungsten yang dibahas pada penelitian ini.

Pengujian konduktivitas telah dilakukan terhadap model paduan berbasis Cu-Ni alloy pada berbagai variasi tekanan kompaksi dan komposisi W (wt.%), hasil pengujian seperti diperlihatkan pada gambar 6. Nilai konduktivitas listrik tertinggi diperoleh pada tekanan kompaksi 250 MPa sebesar $4,62 \times 10^7$ (S/m) yang setara dengan $\pm 76\%$ IACS.



Gambar 6. Nilai konduktivitas paduan berbasis Cu-Ni-W pada berbagai variasi: (a) tekanan kompaksi dan (b) komposisi tungsten.

Berdasarkan hasil ini tekanan berkontribusi terhadap kenaikan konduktivitas listrik, dimana hasil ini sejalan dengan hasil observasi mikrostruktur (Gambar 3a-c) yang memperlihatkan kehomogenan distribusi partikel dan jumlah porositas yang lebih sedikit. Pada bagian lain, penambahan jumlah tungsten cenderung menurunkan konduktivitas listrik, diperoleh $3,9 \times 10^7$ (S/m) pada komposisi 4wt.%W. Hal ini dapat dijelaskan karena seiring kenaikan elemen tungsten akan diikuti dengan penurunan jumlah Cu yang memiliki konduktivitas terbaik dari elemen penyusun paduan Cu-Ni-W. Secara umum konduktivitas yang diperoleh pada model paduan yang disintesis pada penelitian ini masih dibawah nilai konduktivitas listrik Cu murni sebesar $5,98 \times 10^7$ (S/m)

pada temperatur 20°C. Hal ini disebabkan karena adanya penambahan unsur nikel dan tungsten, dimana nilai konduktivitas listrik dari kedua elemen lebih rendah dari tembaga. Penurunan konduktivitas listrik dan peningkatan sifat mekanis pada paduan lain seperti Al-(Cu, Ag, Mg) yang diikuti dengan proses *heat treatment* telah dilaporkan (Abdo dkk., 2021). Faktor lain yang juga dapat mempengaruhi sifat kelistrikan adalah terbentuknya cacat (*defect*) mikrostruktur selama proses sintesis paduan logam. Seperti keberadaan porositas diantara mikrostruktur diyakini berpengaruh terhadap penurunan nilai konduktivitas termal dan listrik suatu paduan logam termasuk stainless steel (Tomanek dkk., 2021). Penelitian lain terhadap paduan Cu-Zn juga telah melaporkan bahwa kenaikan tahanan listrik paduan diikuti dengan penurunan nilai konduktivitas (Miyajima dkk., 2022), diyakini bahwa nilai resistivitas atau tahanan listrik berkorelasi dengan jumlah porositas suatu paduan (Hakamada dkk., 2007). Pada penelitian ini terbentuknya porositas dan oksida diantara mikrostruktur telah teramati seperti diperlihatkan pada gambar 3a-b, hal ini diyakini berkontribusi terhadap pelemahan sifat konduktivitas listrik dari material berbasis Cu-Ni-W.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan observasi yang telah dilakukan terhadap karakteristik paduan berbasis Cu-Ni-W, maka ditarik beberapa kesimpulan, diantaranya perbaikan mikrostruktur yang meliputi kehomogenan distribusi Cu, ukuran partikel dan pembentukan *phase* larut pada CuNi yang lebih baik diperoleh pada tekanan kompaksi 250 MPa. Sifat mekanis paduan seperti kekerasan dan kekuatan tekan tertinggi sebesar 123.2 VHN dan 325 MPa diperoleh secara berurutan pada penerapan tekanan kompaksi 250 MPa, lebih lanjut sifat mekanis paduan Cu-Ni mengalami peningkatan seiring dengan penambahan komposisi W. Pada bagian lain pengujian konduktivitas listrik telah dilakukan, dimana nilai tertinggi diperoleh $4,62 \times 10^7$ (S/m) untuk tekanan kompaksi 250 MPa dan penambahan elemen lain seperti tungsten cenderung menurunkan sifat konduktivitas listrik. Berdasarkan hasil-hasil pengujian yang telah dilakukan terlihat jelas bahwa parameter proses dan komposisi berpengaruh terhadap karakteristik mekanis dan konduktivitas Cu-alloy.

UCAPAN TERIMAKASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Metalurgi Universitas Sumatera Utara atas dukungan dan pembiayaan penelitian yang diberikan oleh kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, Dan Teknologi dengan nomor kontrak 35/UN5.2.3.1/PPM/KP-DRTPM/B/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, G., Manzoor, T., Ahmad, A., Raza, H., Farooq, A., Karim, I., Iftikhar, W., Umar, M., Asad, F., Synthesis and investigate the properties of Cu-Al-Ni alloys with Ag addition using powder metallurgy technique, *Journal of Alloys and Compounds*, 817, 1–9, 2020.
- Abdo, H. S., Seikh, A. H., Mohammed, J. A., Soliman, M. S., Alloying elements effects on electrical conductivity and mechanical properties of newly fabricated al based alloys produced by conventional casting process, *Materials*, 14, 1–10, 2021.
- Ahmad, M. A. H., Rahim, M. Z., Fauzi, M. F. M., Abdullah, A., Omar, Z., Ding, S., Ismail, A., Ibrahim, M. R., Catalytic aided electrical discharge machining of polycrystalline diamond-parameter analysis of finishing condition, 9th International Conference on Tribology, Cappadocia, 0–9, 2018.
- American society for testing and materials, Standard practices for production and preparation of powder metallurgy (P/M) test specimens, designation: E 925, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2003.
- American society for testing and materials, Standard test method for knoop and vickers hardness of materials, designation: E384-11^{e1}, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2011.
- American society for testing and materials, Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature, designation: E9-89a, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2000.
- Ankur, Bharti, A., Prasad, D., Kumar, N., Saxena, K. K., A Re-investigation: effect of various parameter on mechanical properties of copper matrix composite fabricated by powder metallurgy, *Materials Today: Proceedings*, 45, 4595–4600, 2021.
- Anugraha, V.G., Widyastuti, Pengaruh komposisi Sn dan variasi tekanan kompaksi terhadap densitas dan kekerasan komposit Cu-Sn untuk aplikasi proyektil peluru frangible dengan metode metalurgi serbuk, *Jurnal Teknik POMITS*, 3(1), 102–107, 2014.
- Castillo, S. M., Muñoz, S., Trueba, P., Díaz, E., Torres, Y., Influence of the compaction pressure and sintering temperature on the mechanical properties of porous titanium for biomedical applications, *Metals*, 9, 1-15, 2019.

- Dong, D., Huang, X., Cui, J., Li, G., Jiang, H., Effect of aspect ratio on the compaction characteristics and micromorphology of copper powders by magnetic pulse compaction, *Advanced Powder Technology*, 31, 4354–4364, 2020.
- Erçetin, A., Aslantaş, K., Production of WCu electrical contact material via conventional powder metallurgy method: Characterization, mechanical and electrical properties, *Tr. Doğa ve Fen Derg.–Tr. J. Nature Sci.*, 6(1), 37-42, 2017.
- Gu, J., Gao, M., Yang, S., Bai, J., Zhai, Y., Ding, J., Microstructure, defects, and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al-Cu4.3-Mg1.5 alloy, *Materials and Design*, 186, 1–13, 2020.
- Hakamada, M., Kuromura, T., Chen, Y., Kusuda, H., Mabuchi, M., Influence of porosity and pore size on electrical resistivity of porous aluminum produced by spacer method, 48(1), 32–36, 2007.
- Kumar, N., Bharti, A., Nigam, A., Effect of powder metallurgy process and its parameters on the mechanical and electrical properties of copper-based materials: literature review, *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 59, 401–410, 2020.
- Lee, S. H., Ahn, B., Sintering behavior and mechanical property of Cu-Sn alloy with Ag addition produced by pulsed electric current sintering, *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(4), 1475–1479, 2022.
- Li, X., Zhang, M., Zhang, G., Wei, S., Wang, Q., Lou, W., Liang, J., Chen, L., Xu, L., Zhou, Y., Pan, K., Influence evaluation of tungsten content on microstructure and properties of Cu-W composite, *Metals*, 12, 1–16, 2022.
- Manish, D., Srivastava, R. K., Effect of compaction pressure on microstructure, density and hardness of copper prepared by powder metallurgy route, *International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy, Sikkim*, 377, 1-9, 2018.
- Manohar, G., Pandey, K.M., Maity, S.R., Effect of compaction pressure on mechanical properties of AA7075/B4C/graphite hybrid composite fabricated by powder metallurgy techniques, *Materials Today: Proceedings*, 38, 2157–2161, 2021.
- Meyer, Y. A., Bonatti, R. S., Costa, D., Bortolozzo, A. D., Osório, W. R., Compaction pressure and Si content effects on compressive strengths of Al/Si/Cu alloy composites, *Materials Science and Engineering: A*, 770, 1–7, 2020.
- Miyajima, Y., Morimoto, H., Miyazaki, M., Okada, T., Ishikawa, K., Watanabe, C., Miura, H., Change in microstructure and electrical resistivity of CuZn alloy due to rolling, *Materials Transactions*, 63(4), 484–488, 2022.
- Myszka, D., Kasińska, J., Penkul, A., Influence of tungsten on the structure and properties of ductile iron containing 0.8% Cu, *Archives of Foundry Engineering*, 21(4), 121–126, 2021.
- Nnakwo, K. C., Effect of tungsten content on the structure, physical and mechanical properties of silicon bronze (Cu-3 wt%Si), *Journal of King Saud University - Science*, 3, 844–848, 2019.
- Ohništová, P., Piška, M., Dluhoš, J., Horníková, J., Šandera, P., Petrevec, M., A study of crack initiation mechanism in the aluminum alloy 7475-T7351 when tensile loading, *Procedia Structural Integrity*, 23, 469–474, 2019.
- Sabri, A. M., Rahim, M. Z., Ahmad, M. A. H., Azis, N. H., Ibrahim, M. R., Mubarak, A., Arifin, T., Ismail, A. E., The effect of powder metallurgy parameters on electrical conductivity of copper-nickel-tungsten electrode, *International Journal of Engineering & Technology*, 8, 111–116, 2019.
- Suprianto, Ramadhan, M., Syafroza, A., Ariani, F., The role of Cu element and compaction pressure on microstructure and mechanical properties of Al-Cu binary alloy synthesized by powder metallurgy, *Jurnal Dinamis*, 11(1), 6–15, 2023.
- Tao, S., Lu, Z., Xie, H., Zhang, J., Wei, X., Effect of preparation method and heat treatment on microstructure and properties of Cu-Ni-Si alloy, *Materials Letters*, 315, 1-4, 2022.
- Tomanek, L. B., Stutts, D. S., Pan, T., Liou, F., Influence of porosity on the thermal, electrical, and mechanical performance of selective laser melted stainless steel, *Additive Manufacturing*, 39, 1-7, 2021.
- Tse Lop Kun, J., Patterson, E., Learn, R., Atwater, M., Mechanical Properties of Microporous Copper Powder Compacts Produced by Oxide Reduction, *Metals*, 13, 1–14, 2023.
- Yuan, X., Zhang, P., Wang, J., Yang, B., Li, Y., Influences of Fe content and cold drawing strain on the microstructure and properties of powder metallurgy Cu-Fe alloy wire, *Materials*, 16, 1-13, 2023.
- Zhang, W., Li, L., Gao, J., Huang, J., Zhang, X., The effect of porosity on mechanical properties of porous FeCrN stainless steel, *Journal of Physics: Conference Series*, 2044, 1–6, 2021.
- Zhang, Y., Guo, X., Chen, Y., Li, Q., Effect of compaction pressure on the densification, microstructure, and mechanical properties of Ti-1Al-8V-5Fe alloy based on TiH₂ and HDH-Ti powders..*Micro and Nano Letters*, 14(8), 906–910, 2019.