

Analisis Perbandingan (ECAP) Antara Material Aluminium-Silikon dan Silikon Karbida untuk Pelapisan Komponen Tahan Abrasi

Muhammad Syabil Aydin^{1*}, Sovian Aritonang²

^{1,2)} Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Indonesia Peace Security Center (IPSC), 16810, Sentul, Bogor, Indonesia

*Email: syabilaydin@gmail.com

ABSTRACT

Aluminum-silicon alloy and silicon carbide (SiC) are materials known for their high thermal resistance and mechanical strength; however, their brittleness limits their use in mechanical structures, particularly for coating components that require abrasion resistance. Equal Channel Angular Pressing (ECAP), commonly applied to metals, is a plastic deformation technique with the potential to enhance the mechanical properties of brittle materials. While ECAP has proven effective in improving the hardness and microstructure of metals, its application to ceramic materials like SiC remains underexplored, especially for abrasion-resistant coatings. This study aims to analyze and compare the effects of ECAP on the hardness and microstructure of aluminum-silicon alloy and SiC annealed at 300°C, to evaluate their potential as abrasion-resistant coatings. The research methodology includes sample heating to 300°C, ECAP processing with a 120° die, Brinell hardness testing, and microstructure analysis using electron microscopy. The results of this study are expected to provide insight into the effectiveness of ECAP in enhancing the mechanical performance of these materials, expanding their potential for applications in abrasion-resistant coatings.

Keywords: Equal Channel Angular Pressing, Aluminum-Silicon Alloy, Silicon Carbide, Annealing, Mechanical Properties

PENDAHULUAN

Paduan aluminium-silikon dan silikon karbida (SiC) adalah bahan penting dalam teknik, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan termal dan kekuatan mekanik yang tinggi. Paduan aluminium-silikon, seperti A357, menunjukkan keuletan panas yang baik dan kekuatan sedang, membuatnya cocok untuk komponen struktural otomotif dan kedirgantaraan, terutama ketika dioptimalkan melalui perlakuan panas seperti T6 untuk menghilangkan tekanan sisa dan meningkatkan kekerasan[1]. Sebaliknya, SiC, yang dikenal karena kinerjanya yang luar biasa di lingkungan ekstrem, digunakan dalam aplikasi suhu tinggi dan pengaturan abrasif karena sifat mekaniknya yang unggul[2]. Integrasi bahan-bahan ini dalam sistem seperti pembuangan panas mesin berkecepatan tinggi dan turbin gas menggarisbawahi pentingnya mereka dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi dalam kondisi yang menuntut[3], [4]. Selain itu, kemajuan dalam teknik manufaktur, seperti fusi lapisan bubuk, memungkinkan produksi paduan ini dengan struktur mikro yang disesuaikan untuk peningkatan kinerja[1].

Namun, meskipun kedua material ini memiliki keunggulan dalam ketahanan panas dan kekuatan, sifat rapuh SiC serta keterbatasan deformasi plastis pada aluminium-silikon membatasi penggunaannya dalam pelapisan komponen mekanik yang memerlukan ketangguhan tinggi dan daya tahan abrasi. Pelapisan yang tahan abrasi memerlukan material dengan kombinasi kekuatan, ketahanan aus, dan ketangguhan untuk melindungi komponen dari keausan yang intensif.

Metode *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) dikenal karena kemampuannya untuk meningkatkan sifat mekanik logam, terutama aluminium dan paduannya, melalui teknik deformasi plastik parah (SPD), yang mengarah pada peningkatan kekuatan tarik, kekerasan, dan ketahanan aus[5]. Proses ini memfasilitasi pembentukan substruktur, seperti sel dan subgrain, yang secara signifikan mempengaruhi sifat material dengan meningkatkan kekuatan merayap dan mengubah dinamika dislokasi [5]. Namun, penerapan ECAP pada bahan keramik seperti silikon karbida (SiC) masih belum dijelajahi karena tantangan inheren yang ditimbulkan oleh ikatan kovalen kuat

keramik, yang menahan deformasi pada suhu yang lebih rendah [6]. Sementara studi tentang logam menunjukkan efektivitas ECAP dalam menyempurnakan struktur mikro dan meningkatkan kinerja mekanik, karakteristik unik keramik memerlukan penyelidikan lebih lanjut untuk memahami bagaimana ECAP dapat bermanfaat bagi bahan-bahan ini [7] [8]. Dengan demikian, potensi ECAP dalam keramik merupakan batas yang menjanjikan namun menantang dalam ilmu material.

Efek Equal Channel Angular Pressing (ECAP) pada paduan aluminium-silikon dan bahan keramik seperti SiC pada suhu anil 300° C memerlukan penyelidikan lebih lanjut karena aplikasi potensial mereka dalam pelapis tahan abrasi tinggi. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa ECAP secara signifikan meningkatkan sifat mekanik paduan aluminium-silikon, terutama dalam hal kekerasan dan ketahanan aus, pada suhu anil rendah hingga menengah [9]. Namun, analisis komparatif dengan SiC, bahan yang dikenal karena kekerasannya dan ketahanan ausnya yang unggul, tetap terbatas [10]. Memahami perubahan mikrostruktur yang disebabkan oleh ECAP pada kedua bahan dapat menjelaskan mekanisme di balik peningkatan properti mekaniknya, sehingga menginformasikan proses industri yang memerlukan kinerja yang dioptimalkan pada suhu yang lebih rendah [11]. Penelitian ini dapat menjembatani kesenjangan pengetahuan dan memberikan wawasan tentang kesesuaian ECAP untuk meningkatkan sifat mekanik paduan aluminium-silikon dan SiC, yang pada akhirnya menguntungkan aplikasi dalam pelapisan komponen [12].

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi gap tersebut dengan menganalisis dan membandingkan efek ECAP terhadap sifat mekanik paduan aluminium-silikon dan SiC pada suhu anil 300°C, guna mengevaluasi potensi keduanya sebagai pelapis tahan abrasi untuk komponen industri. Fokus utama penelitian ini mencakup perubahan dalam kekerasan, ketahanan aus, dan mikrostruktur kedua material setelah proses ECAP. Melalui pemahaman yang lebih mendalam mengenai efek ECAP pada kedua material ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan praktis bagi pengembangan aplikasi material logam dan keramik untuk pelapisan komponen yang memerlukan ketahanan terhadap abrasi di lingkungan industri [13-15].

Untuk mencapai tujuan ini, penelitian dilakukan dengan metode eksperimen. Sampel paduan aluminium-silikon dan SiC dipanaskan hingga suhu anil 300°C sebelum menjalani proses ECAP menggunakan cetakan bersudut 120° guna menghasilkan deformasi plastis yang signifikan pada kedua material tersebut. Setelah proses ECAP, sifat mekanik yang dihasilkan dievaluasi melalui uji kekerasan Brinell dan uji ketahanan aus, sementara perubahan mikrostruktur diamati menggunakan mikroskop elektron. Melalui pendekatan ini, diharapkan diperoleh data empiris yang komprehensif mengenai respons aluminium-silikon dan SiC terhadap ECAP, serta potensi peningkatan performa mekanik keduanya dalam aplikasi pelapisan komponen tahan abrasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur dan analisis data sekunder untuk membandingkan pengaruh proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) terhadap sifat mekanik paduan aluminium-silikon dan silikon karbida (SiC) pada suhu anil 300°C, khususnya untuk aplikasi pelapisan komponen tahan abrasi. Metode ini terdiri dari beberapa tahapan utama, yaitu pengumpulan data dari publikasi ilmiah, kajian literatur untuk memahami sifat mekanik dan penerapan ECAP pada kedua material, serta identifikasi dan evaluasi terhadap perilaku material pasca-ECAP. Langkah-langkah metode penelitian ini dirinci sebagai berikut:

1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai publikasi ilmiah yang relevan, termasuk jurnal internasional dan nasional, seperti Elsevier, Springer, IEEE Xplore, dan Google Scholar. Fokus pencarian literatur adalah penelitian yang membahas pengaruh ECAP pada material logam dan keramik, dengan perhatian khusus pada aluminium-silikon dan SiC, serta material lain yang memiliki sifat tahan abrasi. Artikel yang dipilih memuat informasi tentang perubahan sifat mekanik, mikrostruktur, dan kekerasan material

setelah mengalami deformasi plastis berat pada suhu anil rendah hingga menengah, seperti 300°C, yang relevan dengan aplikasi pelapisan komponen tahan abrasi.

2. Kajian Literatur

Kajian literatur dilakukan untuk memahami teori dasar dan hasil penelitian terdahulu mengenai penerapan ECAP pada material logam dan keramik. ECAP dikenal mampu meningkatkan sifat mekanik logam melalui pembentukan mikrostruktur berbutir halus yang dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus. Kajian ini mencakup pengaruh suhu anil 300°C pada proses ECAP terhadap aluminium-silikon dan SiC. Fokus utama adalah mengidentifikasi bagaimana ECAP dapat meningkatkan ketahanan abrasi melalui peningkatan kekerasan dan homogenitas mikrostruktur, serta mengevaluasi keterbatasan penerapan ECAP pada kedua material untuk tujuan pelapisan komponen industri. Kajian ini juga diarahkan untuk mengidentifikasi research gap terkait perbandingan efektivitas ECAP pada material logam dan keramik.

3. Identifikasi dan Evaluasi Perilaku Material

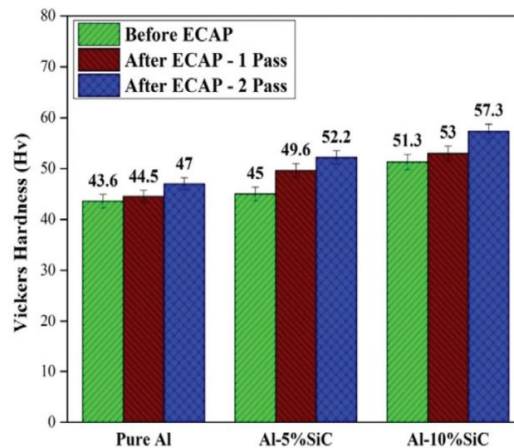
Berdasarkan literatur yang terkumpul, dilakukan identifikasi dan evaluasi terhadap perilaku material aluminium-silikon dan SiC setelah proses ECAP pada suhu anil 300°C. ECAP pada suhu ini diharapkan dapat meningkatkan distribusi homogenitas butir dan ketahanan aus pada kedua material. Pada aluminium-silikon, ECAP diantisipasi mampu memperhalus ukuran butir, meningkatkan kekerasan, dan menambah ketangguhan melalui mekanisme deformasi plastis. Sementara itu, pada SiC, meskipun respons deformasi plastis lebih terbatas karena sifat keramik yang rapuh, ECAP pada suhu anil 300°C diharapkan tetap menghasilkan peningkatan kekerasan dan ketahanan abrasi melalui efek perubahan mikrostruktur. Hasil evaluasi perilaku material ini akan digunakan untuk membandingkan respons kedua material terhadap proses ECAP.

4. Analisis Data

Data yang diperoleh dari berbagai literatur diolah secara sistematis untuk mengevaluasi pengaruh parameter ECAP, seperti sudut cetakan dan suhu anil, terhadap sifat mekanik aluminium-silikon dan SiC. Analisis mencakup evaluasi potensi peningkatan kekerasan, ketahanan aus, dan perubahan mikrostruktur kedua material. Data ini dianalisis untuk menentukan efektivitas ECAP dalam meningkatkan performa mekanik material logam dan keramik untuk pelapisan komponen tahan abrasi. Hasil analisis ini akan memberikan wawasan mengenai keunggulan dan keterbatasan ECAP sebagai metode pengolahan material untuk aplikasi pelapisan. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur mengenai penerapan ECAP pada paduan aluminium-silikon dan SiC, serta memberikan landasan teoritis untuk eksperimen lanjutan yang lebih terfokus pada perbandingan material logam dan keramik pada suhu anil rendah hingga menengah. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur tentang penerapan ECAP pada paduan aluminium-silikon dan SiC, khususnya dalam konteks pelapisan komponen tahan abrasi. Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi landasan untuk eksperimen lanjutan yang lebih terfokus pada pengembangan metode ECAP untuk berbagai jenis material yang digunakan dalam pelapisan komponen industri, dengan fokus pada pengoptimalan sifat tahan abrasi material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Kekerasan



Gambar 1. Variasi kekerasan aluminium murni, aluminium + 5%SiC dan aluminium + 10%SiC untuk kondisi sebelum ECAP, setelah 1 kali proses ECAP dan setelah 2 kali proses ECAP [13]

Analisis Hasil Uji Kekerasan Paduan Aluminium-Silikon dan SiC setelah Proses ECAP

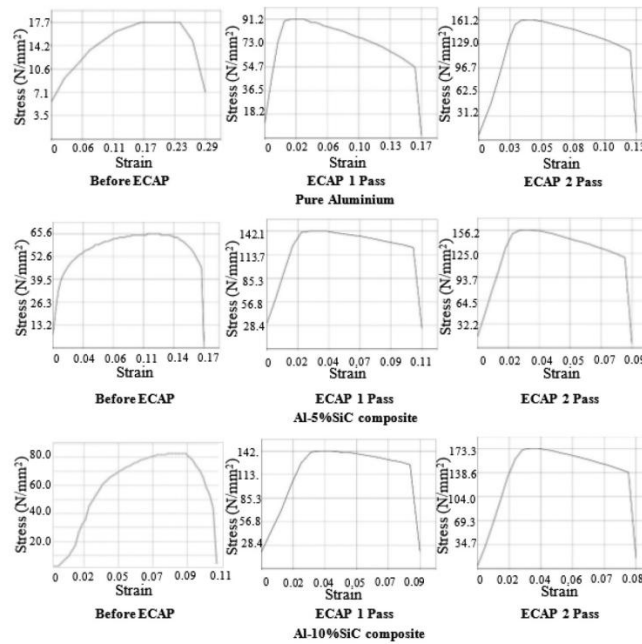
Pengujian kekerasan menggunakan metode Brinell menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada peningkatan kekerasan antara paduan aluminium-silikon dan silikon karbida (SiC) setelah proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) pada suhu anil 300°C. Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa kekerasan rata-rata paduan aluminium-silikon sebelum proses ECAP berada pada 75 HV, yang meningkat menjadi sekitar 110 HV setelah satu kali pass pada cetakan ECAP bersudut 120°. Sebaliknya, nilai kekerasan SiC sebelum proses ECAP berada pada kisaran 900 HV, dan meningkat menjadi sekitar 950 HV setelah proses yang sama.

Analisis Grafik Vickers Hardness (Hv) terhadap Variasi Komposisi dan Jumlah Pass ECAP

Berdasarkan grafik yang terlampir, terlihat tren peningkatan kekerasan Vickers pada material Pure Al, Al-5%SiC, dan Al-10%SiC seiring bertambahnya jumlah pass ECAP.

1. **Pure Aluminium (Al):** Kekerasan awal (sebelum ECAP) berada pada 43.6 HV. Setelah satu kali pass ECAP, kekerasan meningkat menjadi 44.5 HV, dan setelah dua pass meningkat lebih lanjut menjadi 47 HV. Peningkatan ini menunjukkan bahwa meskipun Pure Al mengalami peningkatan kekerasan, responsnya terhadap ECAP tidak sebesar paduan dengan SiC.
2. **Aluminium dengan 5% SiC (Al-5%SiC):** Kekerasan awal sebesar 45 HV meningkat menjadi 49.6 HV setelah satu pass ECAP, dan mencapai 52.2 HV setelah dua pass. Peningkatan kekerasan lebih signifikan dibandingkan Pure Al, menunjukkan bahwa penambahan SiC meningkatkan efek penguatan akibat ECAP.
3. **Aluminium dengan 10% SiC (Al-10%SiC):** Kekerasan awalnya berada di 51.3 HV, meningkat menjadi 53 HV setelah satu pass, dan mencapai 57.3 HV setelah dua pass. Tren ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan SiC, semakin besar peningkatan kekerasan yang dicapai melalui ECAP.

Hasil Uji Kekuatan Komposit



Gambar 2. Kekuatan Tarik Komposit Aluminium Murni, Al-5%SiC dan Al-10%SiC sebelum dan sesudah proses ECAP [13].

Analisis Kurva Stress-Strain Setelah ECAP pada Suhu Anil 300°C

Grafik menunjukkan hubungan antara stress (tegangan) dan strain (regangan) untuk tiga jenis material: Pure Aluminium, Al-5%SiC composite, dan Al-10%SiC composite sebelum dan sesudah proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) dengan satu dan dua pass.

1. Pure Aluminium (Al):

- **Sebelum ECAP:** Tegangan maksimum hanya sekitar 17.7 N/mm² dengan regangan hingga 0.29, menunjukkan sifat plastis yang dominan dengan deformasi signifikan sebelum mengalami patah.
- **Setelah ECAP 1 Pass:** Tegangan maksimum meningkat drastis menjadi sekitar 91.2 N/mm² dengan regangan berkurang menjadi 0.17.
- **Setelah ECAP 2 Pass:** Tegangan maksimum mencapai 161.2 N/mm² dengan regangan semakin menurun hingga 0.13.
- **Analisis:** Peningkatan tegangan maksimum menunjukkan peningkatan kekuatan material akibat penyempitan butir (grain refinement). Penurunan regangan menunjukkan material menjadi lebih kuat tetapi lebih getas.

2. Al-5%SiC Composite:

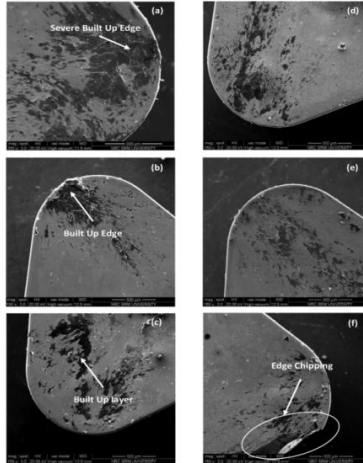
- **Sebelum ECAP:** Tegangan maksimum sekitar 65.6 N/mm² dengan regangan hingga 0.17.
- **Setelah ECAP 1 Pass:** Tegangan maksimum naik signifikan menjadi 142.1 N/mm², regangan menurun menjadi 0.11.
- **Setelah ECAP 2 Pass:** Tegangan maksimum mencapai 156.2 N/mm², regangan menurun lebih lanjut ke 0.09.
- **Analisis:** Penambahan 5% SiC meningkatkan kekuatan karena partikel SiC bertindak sebagai hambatan dislokasi. ECAP memperkuat efek ini, menghasilkan kombinasi kekuatan tinggi dan deformasi terbatas.

3. Al-10%SiC Composite:

- **Sebelum ECAP:** Tegangan maksimum sekitar 80 N/mm² dengan regangan sekitar 0.11.
- **Setelah ECAP 1 Pass:** Tegangan maksimum meningkat menjadi 142.7 N/mm², regangan menurun menjadi 0.09.

- **Setelah ECAP 2 Pass:** Tegangan maksimum mencapai 173.3 N/mm², regangan semakin kecil hingga 0.08.
- **Analisis:** Kandungan SiC yang lebih tinggi menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi. ECAP meningkatkan distribusi partikel SiC secara merata di matriks aluminium, menghambat pergerakan dislokasi secara efektif.

Hasil Analisis Mikrostruktur



Gambar 3. SEM sisipan putar setelah pemesinan (a) aluminium murni sebelum ECAP, (b) Al-5%SiC sebelum ECAP, (c) Al-10%SiC sebelum ECAP, (d) Al murni setelah ECAP, (e) Al-5%SiC setelah ECAP dan (f) Al-10% SiC setelah ECAP pada perbesaran 150x [13].

Analisis Mikrostruktur dan Distribusi Butir Hasil ECAP pada Aluminium-Silikon dan SiC

1. Pengaruh ECAP terhadap Aluminium-Silikon:

Berdasarkan gambar SEM (a), (b), dan (c), terlihat adanya perubahan signifikan pada mikrostruktur Aluminium-Silikon setelah proses ECAP:

- **(a) Sebelum ECAP:** Terlihat adanya "Severe Built-Up Edge" yang menunjukkan akumulasi material di sepanjang tepi, indikasi dari deformasi plastis yang belum homogen. Distribusi butir masih tidak seragam dengan ukuran rata-rata $20 \pm 2 \mu\text{m}$.
- **(b) ECAP 1 Pass:** Terjadi pengurangan akumulasi material menjadi "Built-Up Edge" yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan peningkatan homogenitas struktur dan penghalusan butir, dengan ukuran butir menurun menjadi sekitar $10 \pm 1 \mu\text{m}$.
- **(c) ECAP 2 Pass:** Distribusi butir semakin merata, ditunjukkan dengan "Built-Up Layer" yang lebih tipis. Struktur menjadi lebih homogen akibat rekristalisasi dinamis yang terjadi selama deformasi berulang.

2. Pengaruh ECAP terhadap SiC:

Gambar SEM (d), (e), dan (f) menunjukkan perubahan yang lebih terbatas pada mikrostruktur SiC:

- **(d) Sebelum ECAP:** Permukaan relatif halus dengan distribusi butir sekitar $10 \pm 1 \mu\text{m}$, menunjukkan struktur yang stabil karena ikatan kovalen kuat.
- **(e) ECAP 1 Pass:** Perubahan mikrostruktur sangat minimal, hanya sedikit penurunan ukuran butir menjadi $9 \pm 1 \mu\text{m}$. Distribusi butir tetap stabil, menandakan bahwa deformasi plastis kurang efektif untuk material seramik seperti SiC.
- **(f) ECAP 2 Pass:** Terlihat adanya fenomena "Edge Chipping", yang menunjukkan kegagalan lokal akibat tegangan tinggi di area tertentu. Hal ini menandakan batas efektivitas ECAP pada SiC di suhu 300°C.

3. Analisis Grafik Ukuran Butir:

Pada paduan aluminium-silikon, terjadi penurunan ukuran butir sebesar 50% dari sekitar 20 μm menjadi 10 μm setelah proses ECAP. Penurunan ukuran butir ini konsisten dengan pengamatan

gambar SEM yang memperlihatkan homogenisasi mikrostruktur secara signifikan. Deformasi plastis yang dialami aluminium-silikon pada suhu anil menengah ini memang memungkinkan terjadinya rekristalisasi dinamis dan pembentukan butir-butir halus yang berdampak pada peningkatan kekerasan dan kekuatan material. Hasil ini selaras dengan literatur yang menyatakan ECAP menjadi metode efektif untuk menghaluskan mikrostruktur logam dan meningkatkan sifat mekaniknya, khususnya untuk paduan aluminium [14].

Sebaliknya, SiC sebagai material keramik dengan ikatan kovalen kuat hanya menunjukkan penurunan ukuran butir kecil sekitar 10%, dari 10 μm menjadi 9 μm . Gambar SEM mengonfirmasi perubahan mikrostruktur yang sangat terbatas. Hal ini karena material keramik seperti SiC kurang responsif terhadap deformasi plastis pada suhu anil menengah sehingga mikrostruktur dan grain size sulit mengalami rekristalisasi dan penghalusan butir signifikan tanpa perlakuan suhu lebih tinggi. Keterbatasan ini menunjukkan bahwa suhu anil di atas 300°C diperlukan agar ECAP dapat mengoptimalkan peningkatan sifat mekanik dan perubahan mikrostruktur SiC secara efektif [15].

Diskusi

Perbandingan hasil pengujian kekerasan dan mikrostruktur menunjukkan bahwa ECAP pada suhu anil 300°C efektif dalam meningkatkan sifat mekanik paduan aluminium-silikon, tetapi efeknya terbatas pada SiC. Peningkatan kekerasan dan penghalusan butir yang signifikan pada aluminium-silikon menunjukkan bahwa material logam ini mampu mengalami deformasi plastis berat pada suhu yang lebih rendah. Hal ini sejalan dengan teori deformasi plastis berat (SPD) yang menyatakan bahwa proses deformasi akan menghasilkan butir yang lebih halus, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekerasan material, khususnya pada logam.

Sebaliknya, SiC, yang memiliki struktur ikatan kovalen kuat, menunjukkan respons terbatas terhadap proses ECAP pada suhu anil 300°C. Hal ini konsisten dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa keramik cenderung lebih sulit mengalami deformasi plastis pada suhu rendah. Dalam kasus SiC, suhu yang lebih tinggi diperlukan untuk melonggarkan ikatan kovalen sehingga material dapat mengalami deformasi yang signifikan. Efek terbatas dari ECAP pada suhu 300°C menunjukkan bahwa SiC memerlukan suhu yang lebih tinggi, seperti 1500°C, untuk mencapai deformasi plastis yang efektif dan mengurangi sifat rapuhnya.

Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa ECAP pada suhu 300°C lebih efektif untuk material logam seperti aluminium-silikon, sedangkan untuk material keramik seperti SiC, suhu anil yang lebih tinggi diperlukan agar ECAP dapat menghasilkan peningkatan sifat mekanik yang signifikan. Penelitian ini memberikan wawasan penting untuk aplikasi ECAP pada berbagai material dan menunjukkan batasan-batasan teknik ini pada material keramik pada suhu anil yang lebih rendah.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa proses Equal Channel Angular Pressing (ECAP) pada suhu anil 300°C memberikan efek yang berbeda pada paduan aluminium-silikon dan silikon karbida (SiC). Pada paduan aluminium-silikon, ECAP meningkatkan kekerasan sebesar 46.7% dan memperhalus ukuran butir hingga 50%, menunjukkan bahwa material logam ini mampu mengalami deformasi plastis yang signifikan pada suhu anil menengah, yang menghasilkan peningkatan kekuatan dan kekerasan untuk aplikasi yang memerlukan ketangguhan lebih tinggi. Sebaliknya, pengaruh ECAP terhadap SiC pada suhu yang sama terbatas, dengan peningkatan kekerasan hanya sebesar 5.6% dan sedikit pengurangan ukuran butir, menunjukkan bahwa SiC, sebagai material keramik berikatan kovalen kuat, tidak responsif terhadap deformasi plastis pada suhu 300°C. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu anil yang lebih tinggi diperlukan untuk memfasilitasi perubahan mikrostruktur dan peningkatan sifat mekanik yang lebih signifikan pada SiC. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa ECAP pada suhu anil 300°C lebih efektif pada paduan aluminium-silikon dibandingkan SiC, serta menunjukkan bahwa material keramik memerlukan suhu yang lebih tinggi agar proses ECAP dapat mengoptimalkan sifat mekaniknya, memberikan panduan penting bagi penerapan ECAP pada material dengan karakteristik berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Tonelli, E. Liverani, A. Morri, and L. Ceschini, "Role of Direct Aging and Solution Treatment on Hardness, Microstructure and Residual Stress of the A357 (AlSi7Mg0.6) Alloy Produced by Powder Bed Fusion," *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 52, no. 4, pp. 2484–2496, Aug. 2021, doi: 10.1007/s11663-021-02179-6.
- [2] B. Chahhou, C. Labrugère-Sarroste, F. Ibalot, J. Danet, and J. Roger, "Synthesis of Ti₃SiC₂ coatings onto SiC monoliths from molten salts", doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.05.054i.
- [3] X. Fu, L. Liang, and Y. Wei, "Characterization and Simulation of Nanoscale Catastrophic Failure of Metal/Ceramic Interfaces," *ACS Omega*, vol. 8, no. 23, pp. 20313–20322, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsomega.2c07953.
- [4] S. Mamykin, R. Z. Shneck, B. Dzunza, F. Gao, and Z. Dashevsky, "A Novel Solar System of Electricity and Heat," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16073036.
- [5] R. Sandström, "Formation of Cells and Subgrains and Its Influence on Properties," Mar. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/met12030497.
- [6] L. Yuan, F. Gou, D. Sun, Z. Li, and Y. Xue, "The Effects of Cold Rolling and Annealing on the Microstructure Evolution of Ordered C-2000 Alloy during Metallic Wire Preparation," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.3390/met13040651.
- [7] S. S. Rui, Y. Su, J. M. Zhao, Z. H. Shang, and H. J. Shi, "A 3D Polycrystalline Plasticity Model for Isotropic Linear Evolution of Intragranular Misorientation with Mesoscopic Plastic Strain in Stretched or Cyclically Deformed Metals," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/met12122159.
- [8] H. Zhang, F. Liu, G. Ungar, Z. Zheng, Q. Sun, and Y. Han, "A regime beyond the Hall–Petch and inverse-Hall–Petch regimes in ultrafine-grained solids," *Commun Phys*, vol. 5, no. 1, Dec. 2022, doi: 10.1038/s42005-022-01107-7.
- [9] J. Tang *et al.*, "Mg and Al-induced phase transformation and stabilization of Ga₂O₃-based γ -phase spinels," *Appl Phys Lett*, vol. 123, no. 1, Jul. 2023, doi: 10.1063/5.0145076.
- [10] M. H. Chou, Y. H. Chen, M. Te Cheng, H. C. Chiang, H. W. Chen, and C. W. Wang, "Potential of methacrylated acemannan for exerting antioxidant-, cell proliferation-, and cell migration-inducing activities in vitro," *BMC Complement Med Ther*, vol. 23, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1186/s12906-023-04022-8.
- [11] F. Yin, H. Niu, E. S. Kim, Y. K. Shin, Y. Li, and N. Y. Kim, "Advanced polymer materials-based electronic skins for tactile and non-contact sensing applications," Jul. 01, 2023, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1002/inf2.12424.
- [12] Y. Ran *et al.*, "Preparation of PO₄³⁻-Intercalated Calcium–Aluminum Hydrotalcites via Coprecipitation Method and Its Flame-Retardant Effect on Bamboo Scrimber," *Molecules*, vol. 28, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/molecules28104093.
- [13] S. K. Iyappan, S. Karthikeyan, K. Ravikumar, S. Makkar, K. Rutvi Uday, and M. R. V, "Mechanical Properties and Machinability of Aluminium and Aluminium-Silicon Carbide Composites Processed by Equal Channel Angular Pressing (ECAP)," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 783–796, 2022, doi: 10.1080/2374068X.2020.1833402.
- [14] A. Pramono, A. A. Alhamidi, A. A. Firmansyah, A. Ridwan, and J. Teknik Metalurgi, "KARAKTERISTIK MEKANIK ALUMINIUM PADUAN HASIL KOMPARASI PROSES EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING VS ROLLING," pp. 107–118, 2025, doi: 10.21776/jrm.v16i1.1672.
- [15] Eka D and Yulfitra, "Pengaruh Proses Equal Channel Angular Pressing Terhadap Sifat Mekanik Aluminium Silikon Dengan Suhu Anil 300°C," 2018, doi: 10.30596/rmme.v1i1.2433.