

TINJAUAN LITERATUR: PENGARUH TEMPERATUR *HOT EXTRUSION* PADUAN MAGNESIUM TERHADAP MIKROSTRUKTUR DAN SIFAT MEKANIK

Faid Farisman¹, Fatwa Khulafaur Rasyid¹, Muhammad Eko Lutfiyanto¹, Aswin Prastyo Nugroho¹, Ibnu Dwi Setiawan⁵, Sri Hastuti^{1*}

¹Program Studi S1 Teknik Mesin, Universitas Tidar,
Magelang, Jawa Tengah, Indonesia

*E-mail: hastutisrimesin@untidar.ac.id

Abstrak

Tinjauan literatur ini mengulas pengaruh perubahan temperatur dalam proses ekstrusi panas terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik berbagai paduan magnesium. Kajian ini secara khusus bertujuan untuk mengidentifikasi, membandingkan, dan menentukan rentang temperatur ekstrusi yang paling efektif dalam menghasilkan kombinasi optimal antara kekuatan, keuletan, dan stabilitas mikrostruktur pada paduan magnesium. Metodologi tinjauan dilakukan melalui proses pencarian literatur pada jurnal nasional dan internasional bereputasi (2018–2025), diikuti tahap seleksi sumber relevan, ekstraksi data, serta analisis komparatif terhadap perubahan rekristalisasi dinamis, ukuran butir, tekstur, dan presipitat pada berbagai paduan magnesium seperti Mg-2Y-1Zn-0.6Zr, Mg-4Zn-1Mn-0.5Ca, Mg-1.3Zn-0.5Ca, dan AZ31. Hasil kajian menunjukkan bahwa temperatur berperan dominan dalam mengendalikan mekanisme DRX, penghalusan butir, serta modifikasi tekstur. Temperatur yang terlalu rendah menyebabkan DRX tidak sempurna dan meningkatkan kekuatan namun menurunkan keuletan, sedangkan temperatur terlalu tinggi memicu pertumbuhan butir abnormal dan penurunan kekuatan. Rentang temperatur menengah (300–340 °C) terbukti menghasilkan keseimbangan terbaik antara kekuatan, keuletan, dan homogenitas mikrostruktur. Studi ini menegaskan pentingnya kontrol temperatur sebagai parameter kritis dalam optimasi performa paduan magnesium melalui proses *hot extrusion*.

Kata kunci: *Hot extrusion*, mikrostruktur, paduan magnesium, temperatur ekstrusi

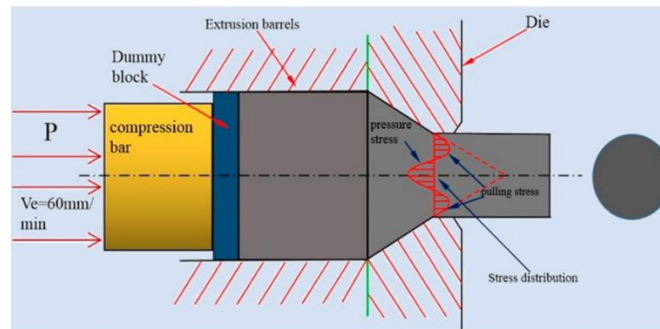
1. Pendahuluan

Paduan magnesium adalah material logam ringan yang mempunyai densitas rendah dengan kekuatan dan konduktivitas thermal yang tinggi. Karena sifatnya yang ringan, material ini banyak dipertimbangkan untuk dipakai di industri seperti otomotif, pesawat, dan perangkat elektronik (AG Putra dkk., 2021). Namun, kondisi paduan magnesium yang masih *as-cast* biasanya memiliki beberapa kelemahan, misalnya ukuran butir yang masih besar, distribusi komposisinya tidak merata, dan sifat mekaniknya masih kurang baik (Shastri dkk., 2020; AG Putra, dkk., 2025). Karena itu, paduan magnesium perlu diproses lagi supaya mikrostrukturnya lebih halus dan sifatnya meningkat.

Salah satu proses yang umum digunakan *hot extrusion*. Proses ini membentuk logam pada temperatur tinggi dengan menekannya melewati sebuah die, sehingga material mengalami deformasi plastis. Di dalam proses ini terjadi perubahan pada mikrostruktur, seperti terbentuknya rekristalisasi dinamis, ukuran butir menjadi lebih kecil, dan presipitat lebih merata (Li et al., 2024). Perubahan-perubahan tersebut nantinya berpengaruh pada kekuatan, kekerasan, dan keuletan paduan magnesium. Proses *hot extrusion* ditunjukkan pada Gambar 1.

Dalam *hot extrusion* sendiri ada beberapa parameter penting, seperti rasio ekstrusi, kecepatan, dan temperatur, tetapi yang paling berpengaruh terhadap perubahan mikrostruktur adalah temperatur. Temperatur tinggi dapat membantu aktivasi mekanisme deformasi pada struktur HCP magnesium, sehingga proses deformasi menjadi lebih mudah (He et al., 2012). Selain itu, peningkatan temperatur mendorong terjadinya rekristalisasi dinamis (DRX), yang dapat menghasilkan butir halus dan meningkatkan homogenitas mikrostruktur. Namun, jika temperatur terlalu tinggi, hal ini dapat memicu pertumbuhan butir abnormal, sehingga ukuran butir menjadi terlalu besar dan mengurangi kehalusan

mikrostruktur (Xiaofeng Wu et al., 2020). Oleh karena itu, pengaturan temperatur merupakan faktor krusial dalam mengontrol hasil mikrostruktur pada proses ekstrusi panas paduan magnesium.



Gambar 1. Proses *Hot extrusion*

Oleh karena itu, pengaturan temperatur selama proses *hot extrusion* menjadi aspek penting dalam mengendalikan perkembangan mikrostruktur dan menjaga keseimbangan antara kekuatan serta keuletan paduan magnesium. Temperatur yang terlalu tinggi cenderung meningkatkan mobilitas dislokasi dan pemulihan butir secara berlebihan, sedangkan temperatur rendah dapat membatasi proses rekristalisasi dinamis dan menyebabkan akumulasi tegangan internal selama deformasi. Selain itu, upaya penguatan pasca-ekstrusi seperti penerapan *Plasma Electrolytic Oxidation* (PEO) dan *Hydrothermal Treatment* (HT) banyak dikembangkan untuk menjaga stabilitas mikrostruktur dan meningkatkan sifat permukaan material. Lapisan oksida keras yang terbentuk melalui PEO mampu menahan potensi degradasi struktur akibat kondisi ekstrusi, sementara perlakuan HT dapat memodifikasi permukaan menjadi lebih bioaktif melalui pembentukan fase keramik tertentu (Abudullah Faqih et al., 2025). Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa pengendalian temperatur proses dan perlakuan pasca-ekstrusi memiliki peran saling mendukung dalam meningkatkan kualitas struktural dan performa paduan magnesium untuk berbagai kebutuhan aplikasi.

Seiring meningkatnya kebutuhan material yang ringan namun memiliki kekuatan tinggi, pemahaman mengenai efek temperatur pada proses hot extrusion terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik paduan magnesium menjadi semakin krusial. Berbagai studi menunjukkan bahwa suhu ekstrusi panas berperan signifikan dalam menentukan struktur mikro dan performa mekaniknya. Pada temperatur tinggi, proses *dynamic recrystallization* (DRX) lebih intensif sehingga fraksi butir rekristal meningkat dan tekstur melemah, yang menyebabkan keuletan meningkat namun kekuatan tarik menurun akibat pertumbuhan butir (Honglin et al., 2021). Sebaliknya, ekstrusi pada temperatur rendah menghasilkan butir lebih halus dan densitas dislokasi lebih tinggi, sehingga kekuatan meningkat tetapi keuletan menurun (Li et al., 2024). Pola *trade-off* ini juga ditemukan pada paduan Mg-Y-Zn-Zr, yang menunjukkan bahwa pemilihan temperatur ekstrusi yang tepat sangat penting untuk memperoleh kombinasi sifat mekanik yang optimal (Wang et al., 2020).

Variasi temperatur selama proses *hot extrusion* juga memengaruhi perkembangan tekstur dan distribusi dislokasi yang terbentuk selama deformasi, sehingga berpengaruh pada perilaku plastis paduan magnesium saat menerima beban lanjutan. Pada temperatur lebih tinggi, aktivasi slip *non-basal* dan mekanisme *twinning* semakin intensif sehingga struktur HCP magnesium mampu berdeformasi lebih mudah, tetapi kondisi ini juga cenderung menurunkan kekuatan akibat peningkatan ukuran butir. Sebaliknya, pada temperatur rendah, densitas dislokasi yang lebih tinggi dan penguatan tekstur basal menyebabkan peningkatan kekuatan tetapi dengan konsekuensi penurunan regangan maksimum sebelum patah. Keterkaitan antara tekstur deformasi, ukuran butir, dan tingkat rekristalisasi dinamis tersebut menunjukkan bahwa kontrol parameter ekstrusi berperan dalam menentukan stabilitas mekanik paduan magnesium pada aplikasi yang membutuhkan kombinasi kekuatan serta keuletan yang baik, khususnya pada lingkungan pembebanan yang berubah-ubah (Abdus Shomad et al., 2020).

Tinjauan literatur ini menyoroti pengaruh temperatur ekstrusi terhadap rekristalisasi, ukuran butir, tekstur, presipitat, serta implikasinya pada sifat mekanik paduan magnesium. Peningkatan temperatur terbukti mempercepat rekristalisasi dinamis dan menghasilkan butir yang lebih halus sehingga meningkatkan kombinasi kekuatan dan keuletan (Agnew & Duygulu, 2005). Namun, temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan butir berlebih serta menurunnya densitas presipitat penguat, yang berdampak negatif pada sifat mekanik (Mordike & Ebert, 2001). Selain itu, kontrol temperatur berperan dalam melemahkan tekstur basal dan meningkatkan deformabilitas paduan Mg (Wang et al., 2018). Oleh karena itu, kajian pustaka ini dimaksudkan untuk memahami bagaimana variasi temperatur pada proses ekstrusi panas mempengaruhi mikrostruktur dan sifat mekanik paduan magnesium.

2. Metodologi

Penelitian ini menerapkan metode dengan pendekatan konseptual sesuai dengan bidang kajian menurut (Cahyo et al., 2019) yang diuraikan ke dalam lima langkah utama yang mencakup:

a. Identifikasi Sumber Literatur

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data Scopus, ScienceDirect, Springer, Google Scholar, serta portal jurnal nasional yang memiliki publikasi terkait hot extrusion paduan magnesium. Kata kunci yang digunakan meliputi *magnesium alloys*, *hot extrusion*, *extrusion temperature*, *dynamic recrystallization*, dan *mechanical properties*.

b. Seleksi dan Evaluasi Sumber Literatur

Artikel yang ditemukan diseleksi berdasarkan kriteria kelayakan meliputi: (a) relevansi dengan topik temperatur ekstrusi, (b) pembahasan mengenai mekanisme rekristalisasi dinamis (DRX), tekstur kristal, serta perubahan sifat mekanik, (c) keterbaruan publikasi (2018–2025). Sumber yang tidak memenuhi kriteria dikeluarkan dari analisis.

c. Ekstraksi dan Kategorisasi Data

Data penting yang diekstraksi meliputi parameter proses (temperatur, kecepatan ekstrusi, rasio ekstrusi), hasil karakterisasi mikrostruktur (ukuran butir, tekstur, presipitat), serta hasil uji mekanik (kekuatan tarik, kekuatan luluh, elongasi). Data kemudian dikategorikan berdasarkan rentang temperatur ekstrusi untuk memudahkan analisis pola.

d. Analisis Komparatif Antar Penelitian

Setiap penelitian dibandingkan untuk melihat kesesuaian tren, perbedaan hasil, serta faktor yang memengaruhi perubahan mikrostruktur pada berbagai paduan seperti Mg-Y-Zn-Zr, Mg-Zn-Mn-Ca, Mg-Zn-Ca, dan AZ31. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi efek dominan dari variasi temperatur ekstrusi terhadap DRX, tekstur, serta sifat mekanik.

e. Sintesis Temuan Utama

Seluruh temuan utama dirangkum untuk menentukan rentang temperatur ekstrusi yang paling optimal serta menguraikan hubungan antara evolusi mikrostruktur dan perubahan sifat mekanik paduan magnesium. Tahap ini digunakan untuk menarik kesimpulan komprehensif mengenai pengaruh temperatur pada proses hot extrusion.

2.1 Tinjauan Penelitian Terdahulu

Kajian terhadap penelitian sebelumnya dibutuhkan untuk memperoleh pemahaman mengenai efek temperatur pada proses *hot extrusion* terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik paduan magnesium. Berbagai studi sebelumnya memberikan dasar ilmiah untuk membandingkan hasil penelitian ini dengan perkembangan terbaru dalam proses deformasi termomekanik. Beberapa artikel yang relevan dan menjadi rujukan utama ditampilkan sebagai berikut. :

- a. Advanced direct extrusion process with real-time controllable extrusion parameters for microstructure optimization of magnesium alloys (Liere et al., 2023).
- b. Effects of Hot Extrusion Temperature on Mechanical and Corrosion Properties of Mg-Y-Zn-Zr Biological Magnesium Alloy Containing W Phase and I Phase (Xiaofeng Wu et al., 2020).
- c. Effect of Hot Extrusion on Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of Mg-Zn-Mn-0.5Ca Alloy (Li et al., 2024).
- d. The effect of extrusion temperatures on microstructure and mechanical properties of Mg-1.3Zn-0.5Ca alloys (Honglin et al., 2021).
- e. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheets Prepared by Low-Speed Extrusion with Different Temperature (Zhang et al., 2020).

2.2 Studi Literatur

Bagian ini merangkum beberapa penelitian terkait proses ekstrusi paduan magnesium yang menjadi dasar pembahasan dalam studi ini. Setiap penelitian menawarkan pendekatan berbeda melalui metode baru maupun modifikasi proses untuk meningkatkan kualitas hasil ekstrusi, terutama terkait kontrol parameter proses, pengaturan temperatur, kecepatan ekstrusi, serta optimasi rekristalisasi dinamis. Modifikasi tersebut berpengaruh pada perubahan mikrostruktur, tekstur kristal, dan sifat mekanik material. Uraian ringkas penelitian-penelitian tersebut disajikan sebagai berikut:

- a. Advanced direct extrusion process with real-time controllable extrusion parameters for microstructure optimization of magnesium alloys.

Penelitian ini berfokus pada proses ekstrusi langsung paduan magnesium AZ31 untuk mengkaji evolusi mikrostruktur dengan memanfaatkan sistem kontrol proses secara real-time. Metode konvensional dimodifikasi melalui penerapan sistem ekstrusi adaptif yang dapat mengatur kecepatan ekstrusi secara otomatis berdasarkan temperatur material yang dipantau menggunakan infrared camera selama proses berlangsung. Dalam metode ini, kecepatan ram dievaluasi dan disesuaikan secara dinamis oleh sistem kontrol melalui protokol komunikasi OPC sehingga temperatur ekstrusi dapat dipertahankan mendekati kondisi isothermal. Pendekatan ini berbeda dari metode ekstrusi biasa yang menggunakan kecepatan tetap, karena mampu mengoreksi fluktuasi panas akibat gesekan internal dan deformasi, sehingga menghasilkan mikrostruktur yang lebih seragam dibandingkan proses tanpa kontrol adaptif.

- b. Effects of Hot Extrusion Temperature on Mechanical and Corrosion Properties of Mg-Y-Zn-Zr Biological Magnesium Alloy Containing W Phase and I Phase.

Penelitian ini mengkaji proses *Conform Direct Extrusion* (CDE) untuk membentuk kawat AZ31 dengan menekankan modifikasi utama berupa pemanfaatan gaya gesek antara billet dan *wheel-groove* sebagai sumber pemanasan internal, sehingga material dapat terdeformasi tanpa pemanas eksternal. Metode ini dilengkapi kontrol kecepatan *wheel* dan penyesuaian rasio ekstrusi untuk menstabilkan aliran material. Hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi proses yang optimal mampu menghasilkan kawat magnesium dengan morfologi butir yang lebih halus dan kualitas permukaan yang lebih baik dibandingkan ekstrusi konvensional.

- c. Effect of Hot Extrusion on Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of Mg-Zn-Mn-0.5Ca Alloy.

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh suhu ekstrusi 300–400 °C terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik paduan magnesium AZ80 dengan menggunakan metode ekstrusi langsung yang dimodifikasi melalui pemanasan billet terkontrol untuk menjaga kestabilan temperatur sebelum proses berlangsung. Pendekatan ini dikombinasikan

dengan karakterisasi mikrostruktur berbasis OM, SEM, dan EBSD serta uji tarik untuk menilai perubahan rekristalisasi dan tekstur. Hasilnya menunjukkan bahwa suhu lebih tinggi mempercepat rekristalisasi dinamis, melemahkan tekstur basal, dan meningkatkan keuletan, meskipun sedikit menurunkan kekuatan.

- d. The effect of extrusion temperatures on microstructure and mechanical properties of Mg-1.3Zn-0.5Ca alloys.

Penelitian ini menggunakan metode ekstrusi panas pada paduan Mg-1.3Zn-0.5Ca dengan tiga variasi suhu (300 °C, 350 °C, dan 400 °C) untuk mempelajari pengaruhnya terhadap perubahan mikrostruktur dan sifat mekanik. Metode ini dimodifikasi dengan menghentikan proses ekstrusi pada beberapa posisi di dalam die sehingga tahapan awal rekristalisasi dinamis (DRX) dapat diamati secara langsung. Karakterisasi dilakukan menggunakan mikroskop optik, SEM-EDS, EBSD, serta uji tarik untuk menganalisis hubungan antara suhu ekstrusi, ukuran butir, fraksi rekristalisasi, tekstur butir, dan perubahan kekuatan serta daktilitas material.

- e. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheets Prepared by Low-Speed Extrusion with Different Temperature.

Penelitian ini memanfaatkan metode ekstrusi kecepatan rendah pada paduan magnesium AZ31 dengan variasi suhu proses 350 °C, 400 °C, dan 450 °C untuk mempelajari perubahan mikrostruktur serta sifat mekaniknya. Modifikasi utama pada metode ini adalah penggunaan ekstrusi berkecepatan sangat rendah (1 mm/s) dengan rasio ekstrusi 16:1, yang memungkinkan terjadinya deformasi plastis intensif dan rekristalisasi dinamis lebih stabil dibandingkan ekstrusi konvensional. Selain itu, seluruh sampel diekstrusi setelah proses pemanasan awal cetakan dan bahan untuk memastikan kondisi termal merata sebelum deformasi. Karakterisasi dilakukan menggunakan mikroskop optik, EBSD, dan uji tarik, sehingga hubungan antara suhu ekstrusi, ukuran butir, tekstur kristal, dan kekuatan material dapat dianalisis secara komprehensif.

3. Hasil dan pembahasan

Berdasarkan hasil sintesis dari lima artikel yang ditinjau, parameter proses ekstrusi—terutama temperatur dan laju deformasi—terbukti sangat menentukan perkembangan mikrostruktur serta sifat mekanik paduan magnesium. Seluruh studi menunjukkan bahwa pengaturan kenaikan temperatur ekstrusi secara tepat dapat memicu terjadinya *Dynamic Recrystallization* (DRX), yang berfungsi memperkecil ukuran butir, mengurangi dominasi tekstur basal, dan meningkatkan keseragaman struktur sehingga berdampak pada peningkatan elongasi serta kestabilan sifat mekaniknya. Namun, ketika suhu ekstrusi melebihi batas optimum, sebagian fasa penguat seperti *W-phase*, *I-phase*, serta presipitat MgZn mengalami pelarutan dan redistribusi, yang mengurangi efek *particle pinning* pada batas butir sehingga memicu pertumbuhan butir abnormal dan berujung pada penurunan kekuatan tarik meskipun terjadi peningkatan elongasi. Dari kelima referensi, terlihat kecenderungan konsisten bahwa rentang suhu ekstrusi sekitar 300–340 °C merupakan kondisi optimum yang memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan tarik, ketahanan korosi, dan keuletan, terutama pada paduan berbasis Mg–Zn, Mg–Ca, dan Mg–Y–Zn–Zr. Selain suhu, kecepatan ekstrusi juga terbukti berpengaruh, di mana kecepatan ekstrusi yang terlalu tinggi menyebabkan distribusi regangan yang tidak homogen dan berkurangnya waktu untuk terjadinya DRX, sedangkan kecepatan yang terlalu rendah dapat menyebabkan pertumbuhan butir berlebih akibat paparan termal berkepanjangan; oleh karena itu, kecepatan ekstrusi menengah (misalnya 0,1 mm/s pada salah satu studi) dinyatakan sebagai kondisi paling stabil. Secara keseluruhan, kelima artikel tersebut menunjukkan bahwa optimasi parameter ekstrusi harus mempertimbangkan interaksi antara laju deformasi, suhu proses, evolusi fasa mikro, dan respon deformasi plastis sehingga pengendalian sifat mekanik paduan magnesium dapat dicapai bukan hanya melalui variasi komposisi bahan, tetapi juga melalui rekayasa proses termomekanik yang tepat. Temuan tersebut selanjutnya diperkuat

melalui penyajian tabel perbandingan parameter ekstrusi dan sifat mekanik, serta ilustrasi grafik dan gambar mikrostruktur, sehingga hubungan antarvariabel proses dan karakteristik material dapat diamati secara lebih jelas dan sistematis.

Ditunjukkan pada Tabel 1 bahwa sifat mekanik paduan Mg-2Y-1Zn-0.6Zr mengalami perubahan signifikan seiring peningkatan temperatur ekstrusi berdasarkan penelitian Xiaofeng Wu et al. (2020). Pada kondisi *as-cast*, paduan masih memiliki ukuran butir besar dan fasa kedua berbentuk partikel kasar, sehingga kekuatan tarik dan kekuatan luluhnya relatif rendah namun keuletannya masih cukup baik. Ketika diekstrusi pada 250 °C, rekristalisasi dinamis belum berlangsung optimal sehingga masih terdapat banyak dislokasi dan fasa kedua tidak mampu menghambat pergerakan batas butir secara efektif. Hal ini meningkatkan kekuatan tarik secara signifikan, tetapi menurunkan keuletan dan menyebabkan perilaku material lebih getas. Pada temperatur ekstrusi 300 °C, rekristalisasi dinamis terjadi secara sempurna dan menghasilkan ukuran butir yang sangat halus serta mikrostruktur yang lebih homogen, sehingga memberikan kombinasi kekuatan dan elongasi yang lebih baik. Sedangkan pada 350 °C, sebagian fasa kedua mulai melarut dan memicu pertumbuhan butir berlebihan, sehingga kekuatan menurun meskipun keuletannya tetap cukup baik (Xiaofeng Wu et al., 2020).

Tabel 1. Sifat mekanik paduan pada suhu ekstrusi yang berbeda

Temperature	Tensile Strenght (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
As-Cast	238 ± 7	129 ± 6	13.8 ± 0.7
250°C	376 ± 6	268 ± 5	10.8 ± 0.8
300°C	321.6 ± 7	320.7 ± 4	25.4 ± 0.9
350°C	272.5 ± 3	243 ± 3	22.5 ± 0.8

Ditunjukkan pada Tabel 2 bahwa sifat mekanik paduan Mg-4Zn-1Mn-0.5Ca mengalami perubahan akibat variasi suhu ekstrusi berdasarkan penelitian Ming Li et al. (2024). Peningkatan suhu ekstrusi berperan dalam memperhalus ukuran butir melalui rekristalisasi dinamis serta mengurangi dominasi tekstur basal, sehingga elongasi meningkat. Pada suhu 260 °C, kekuatan luluh dan kekuatan tarik masih relatif tinggi, namun keuletannya rendah karena rekristalisasi belum berlangsung secara optimal. Ketika suhu dinaikkan menjadi 300 °C, kekuatan tarik mencapai nilai tertinggi sebesar 342 MPa, disertai peningkatan elongasi menjadi 15,8%, menunjukkan adanya keseimbangan antara penguatan dan kemampuan deformasi. Pada suhu 340 °C, elongasi meningkat lebih jauh mencapai 18,9%, tetapi kekuatan menurun akibat pelunakan matriks dan pertumbuhan butir yang lebih besar. Dengan demikian, pengaturan suhu ekstrusi yang tepat memberikan pengaruh besar terhadap kombinasi kekuatan dan keuletan paduan untuk mendukung penerapannya sebagai material magnesium *biodegradable* (Li et al., 2024).

Tabel 2. Pengaruh perbedaan temperatur pada struktur mekanis paduan Mg-4Zn-1Mn-0.5Ca.

Samples	Tensile Strenght (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
260°C extrusion	281 ± 2	329 ± 4	11.6 ± 0.1
300°C extrusion	254 ± 3	342 ± 2	15.8 ± 0.2
340°C extrusion	202 ± 2	306 ± 3	18.9 ± 0.1

Ditunjukkan pada Tabel 3 bahwa sifat mekanik paduan Mg-1,3Zn-0,5Ca sangat dipengaruhi oleh variasi suhu ekstrusi berdasarkan penelitian Honglin et al. (2021). Pada kondisi T4 sebelum ekstrusi, kekuatan tarik dan luluh masih rendah serta keuletan terbatas akibat struktur yang belum mengalami rekristalisasi dinamis. Setelah diekstrusi pada 300 °C, terjadi peningkatan kekuatan signifikan dengan nilai UTS mencapai 355 MPa dan TYS 284 MPa, meskipun elongasinya masih relatif rendah yaitu 5,7%. Ketika suhu ekstrusi dinaikkan menjadi 350 °C, rekristalisasi dinamis berkembang lebih baik sehingga elongasi meningkat hingga 12,8% dengan penurunan kekuatan yang masih dapat diterima. Pada suhu yang lebih tinggi, yaitu 400 °C, jumlah dan ukuran butir rekristalisasi semakin besar serta tekstur basal melemah, menyebabkan elongasi meningkat menjadi 15,1%, namun UTS dan TYS menurun menjadi 274 MPa dan 220 MPa. Hal tersebut menunjukkan adanya *trade-off* antara kekuatan dan keuletan yang bergantung pada suhu ekstrusi yang diterapkan (Honglin et al., 2021).

Tabel 3. Hasil uji tarik paduan ZX10 yang dilakukan sepanjang ED.

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
T4	143 ± 6	92 ± 4	3.3 ± 0.5
Extruded at 300°C	355 ± 6	284 ± 6	5.7 ± 0.3
Extruded at 350°C	298 ± 7	234 ± 5	12.8 ± 0.7
Extruded at 400°C	274 ± 6	220 ± 6	15.1 ± 0.8

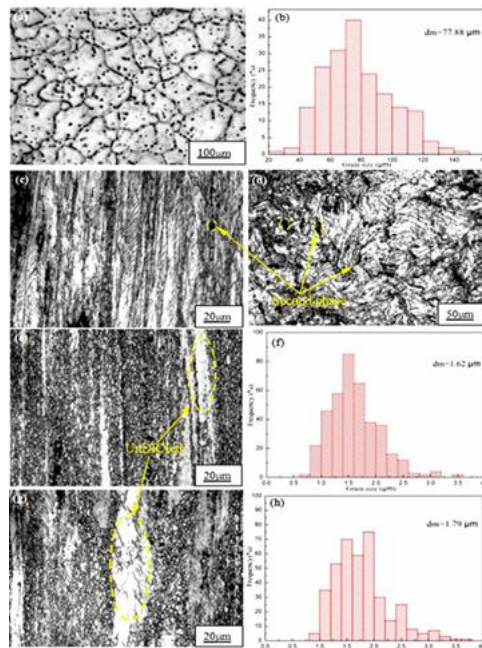
Ditunjukkan pada Tabel 4 bahwa sifat mekanik paduan magnesium AZ31 sangat dipengaruhi oleh suhu ekstrusi berdasarkan penelitian Zhang et al. (2020). Pada kondisi suhu ekstrusi yang lebih rendah, ukuran butir yang terbentuk menjadi lebih halus dan tekstur basal tetap kuat, sehingga material menunjukkan peningkatan kekuatan mekanik. Pada suhu 350 °C, diperoleh ukuran butir terkecil sekitar 2,7 µm yang berperan penting dalam meningkatkan ketahanan deformasi material melalui mekanisme penguatan batas butir. Hal ini tercermin pada nilai kekuatan luluh 226 MPa, kekuatan tarik 353 MPa, dan regangan 16,7% yang merupakan kombinasi sifat mekanik terbaik dibandingkan kondisi suhu ekstrusi lainnya. Hasil ini menegaskan bahwa pengendalian suhu ekstrusi menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan performa mekanik paduan magnesium AZ31 (Zhang et al., 2020).

Tabel 4. Sifat mekanis lembaran ekstrusi yang dibuat dengan ekstrusi kecepatan rendah.

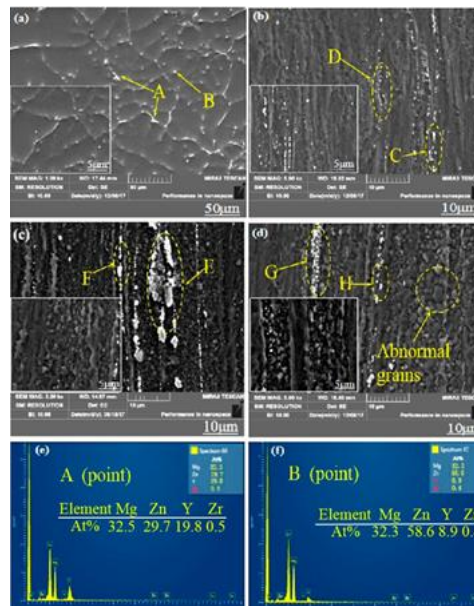
Extrusion Temperature	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
350°C	226 ± 3	353 ± 3	16.7 ± 0.2
400°C	200 ± 2	332 ± 3	16.4 ± 0.4
400°C	177 ± 2	320 ± 4	17.3 ± 0.3

Dalam studi yang dilakukan oleh Xiaofeng Wu et al. (2020), perubahan mikrostruktur paduan Mg-2Y-1Zn-0.6Zr akibat variasi suhu ekstrusi diamati melalui karakterisasi metalografi dan SEM seperti terlihat pada gambar. Pada kondisi *as-cast*, mikrostruktur masih berupa butir kasar berukuran sekitar 77,88 µm dengan partikel fasa kedua *W-phase* dan *I-phase* yang tersebar tidak merata. Setelah diekstrusi pada 250 °C, rekristalisasi dinamis belum berkembang sepenuhnya sehingga butir berbentuk memanjang dan banyak dislokasi yang tersisa, menunjukkan penghalusan butir yang belum optimal dan kecenderungan material menjadi getas. Pada suhu 300 °C, rekristalisasi dinamis berlangsung sempurna, menghasilkan ukuran butir yang sangat halus (~1,62 µm) dan mikrostruktur homogen yang mendukung peningkatan signifikan sifat mekanik dan ketahanan korosi. Namun pada 350 °C, sebagian fasa kedua mulai melarut dan memicu

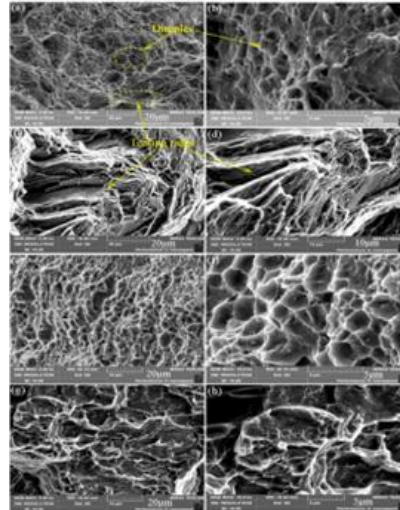
pertumbuhan butir abnormal, sehingga kekuatan material menurun meskipun keuletannya masih cukup baik (Xiaofeng Wu et al., 2020). Evolusi mikrostruktur dan karakter patahan yang menggambarkan perubahan mekanisme deformasi pada setiap kondisi ekstrusi tersebut ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4.



Gambar 2. Mikrograf optik dan ukuran butiran rata-rata paduan yang diekstrusi pada suhu yang berbeda: (a,b) Seperti cor; (c,d) 250 °C; (e,f) 300 °C; (g,h) 350 °C.

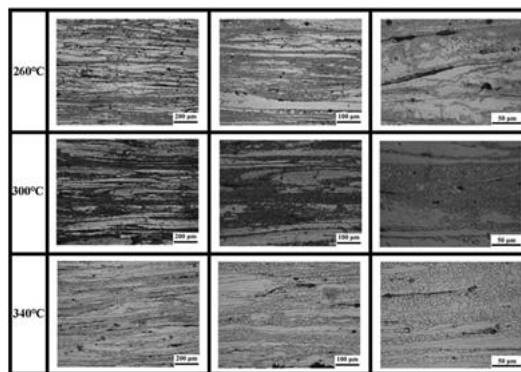


Gambar 3. Mikrograf SEM paduan Mg-2Y-1Zn-0.6Zr hasil coran dan ekstrusi: (a) Hasil coran; (b) 250 °C; (c) 300 °C; (d) 350 °C; (e,f) Spektrum EDS paduan ekstrusi



Gambar 4. Morfologi fraktur mikrokosmik paduan cor dan paduan ekstrusi suhu berbeda: (a,b) Cor; (c,d) 250 °C; (e,f) 300 °C; (g,h) 350 °C.

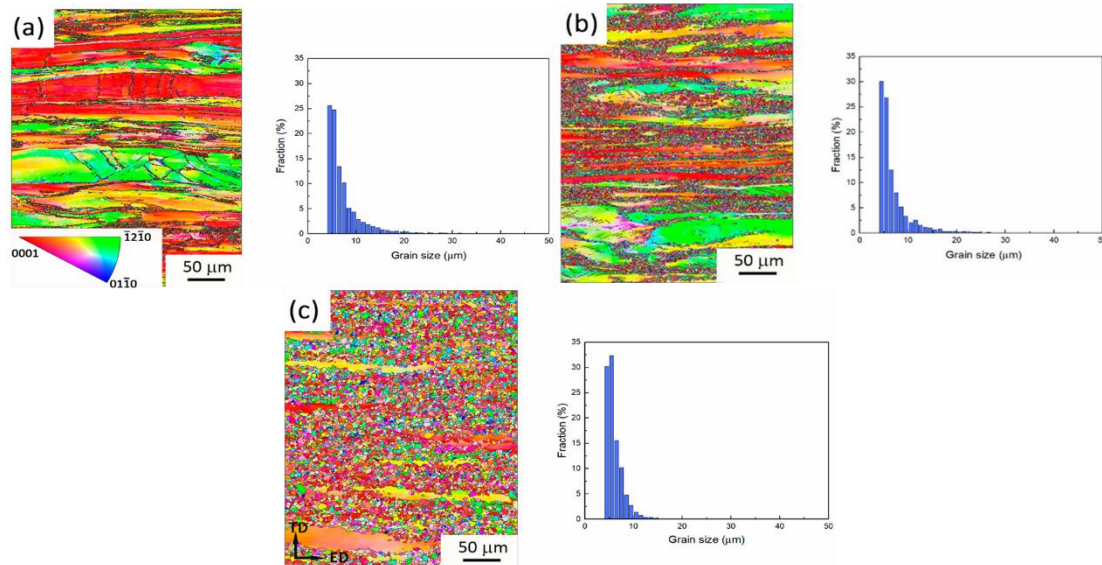
Dalam studi yang dilakukan oleh Ming Li et al. (2024), pengaruh variasi suhu ekstrusi 260 °C, 300 °C, dan 340 °C pada paduan Mg-4Zn-1Mn-0.5Ca diamati melalui karakterisasi mikrostruktur untuk memahami evolusi butir dan tekstur selama proses deformasi panas. Peningkatan suhu ekstrusi terbukti mendorong rekristalisasi dinamis yang lebih menyeluruh sehingga ukuran butir semakin halus dan orientasi tekstur basal berkurang, yang kemudian berdampak pada peningkatan keuletan material. Namun demikian, kecepatan ekstrusi juga memainkan peran penting, karena kecepatan terlalu tinggi menyebabkan deformasi yang tidak seragam dan penurunan homogenitas struktur. Kondisi optimal diperoleh pada kecepatan ekstrusi 0,1 mm/s, di mana pada suhu 300–340 °C diperoleh kombinasi terbaik antara kekuatan dan keuletan. Secara khusus, suhu 300 °C menghasilkan kekuatan tarik tertinggi 342 MPa, sedangkan pada 340 °C elongasi mencapai nilai tertinggi 18,9% dengan kekuatan masih dalam tingkat yang memadai untuk aplikasi *biodegradable* (Li et al., 2024). Evolusi mikrostruktur dan perbedaan morfologi butir pada berbagai suhu ekstrusi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



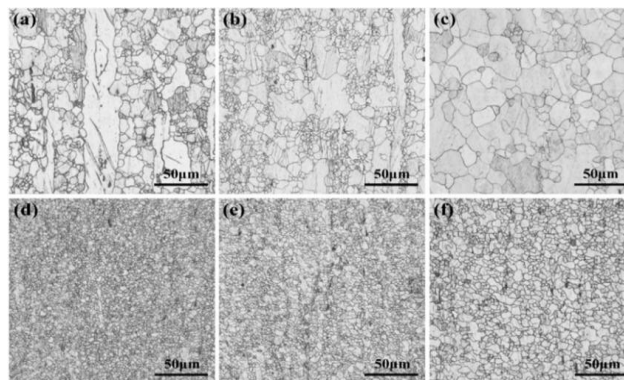
Gambar 5. Penampang longitudinal paduan Mg-4Zn-1Mn-0.5Ca yang diekstrusi pada suhu berbeda

Dalam studi yang dilakukan oleh Honglin dkk., pengaruh variasi suhu ekstrusi terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik paduan Mg-1,3Zn-0,5Ca dikaji untuk memahami evolusi rekristalisasi dinamis (DRX) selama proses deformasi panas. Peningkatan suhu ekstrusi dari 300 °C ke 400 °C menghasilkan butir hasil DRX yang semakin banyak dan berukuran lebih besar, serta mengurangi intensitas tekstur basal pada struktur material. Perubahan mikrostruktur ini berdampak langsung pada performa mekanik, di mana pada suhu 300 °C material menunjukkan kekuatan tarik (UTS) tertinggi 355 MPa dan kekuatan luluh (TYS) 284 MPa, namun regangan masih rendah yaitu 5,7%. Sebaliknya, pada suhu

400 °C regangan meningkat signifikan hingga 15,1%, tetapi UTS dan TYS mengalami penurunan menjadi 274 MPa dan 220 MPa. Kondisi suhu menengah 350 °C memberikan kompromi terbaik antara kekuatan dan keuletan dengan UTS 298 MPa, TYS 234 MPa, serta regangan 12,8%. Secara keseluruhan, hasil tersebut menegaskan bahwa kontrol suhu ekstrusi sangat menentukan kombinasi sifat mekanik dan mikrostruktur yang optimal untuk aplikasi magnesium *biodegradable* (Honglin et al., 2021), yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 6. Peta pola kutub terbalik (IPF) pada bidang ND paduan ZX10 (di sebelah kiri) dan distribusi ukuran butir yang sesuai (di sebelah kanan) untuk kondisi: (a) diekstrusi pada suhu 300 °C, (b) diekstrusi pada suhu 350 °C, (c) diekstrusi pada suhu 400 °C.



Gambar 7. Gambar Mikrostruktur metalografi lembaran ekstrusi yang dibuat dengan ekstrusi kecepatan rendah pada suhu yang berbeda: (a,d) 350 °C; (b,e) 400 °C; (c,f) 450 °C.

Dalam studi yang dilakukan oleh Zhang dkk. (2020), diperlihatkan evolusi mikrostruktur paduan magnesium AZ31 pada proses ekstrusi dengan kecepatan rendah. Suhu ekstrusi yang lebih rendah, struktur mikro masih didominasi butir berukuran halus dan tekstur basal yang kuat, sedangkan peningkatan suhu ekstrusi menghasilkan pertumbuhan butir yang lebih besar dan homogenitas yang semakin baik ditunjukkan pada Gambar 6. Kondisi ekstrusi pada suhu 350 °C menunjukkan ukuran butir paling halus yaitu sekitar 2,7 μm, yang memberikan peningkatan optimal pada sifat mekaniknya. Pada kondisi ini, kekuatan luluh mencapai 226 MPa, kekuatan tarik mencapai 353 MPa, serta regangan meningkat hingga 16,7% (Zhang et al., 2020). Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian suhu ekstrusi berperan penting dalam memperoleh kombinasi terbaik antara kekuatan dan keuletan pada material magnesium. Hasil pengamatan ini ditunjukkan pada Gambar 7.

4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis berbagai penelitian, temperatur merupakan parameter paling berpengaruh dalam proses hot extrusion paduan magnesium. Variasi temperatur menentukan intensitas rekristalisasi dinamis, ukuran butir, kekuatan tekstur, serta stabilitas presipitat penguat. Temperatur rendah cenderung menghasilkan kekuatan tinggi namun keuletan rendah akibat DRX yang tidak sempurna, sementara temperatur tinggi menyebabkan pertumbuhan butir berlebih dan penurunan kekuatan. Rentang temperatur menengah (300–340 °C) terbukti memberikan kombinasi terbaik antara kekuatan, keuletan, dan homogenitas mikrostruktur pada sebagian besar paduan yang dikaji. Oleh karena itu, pengendalian temperatur yang tepat merupakan kunci dalam mendapatkan performa optimal paduan magnesium untuk aplikasi struktural maupun biodegradable.

Daftar Pustaka

- [1] Agnew, S. R., & Duygulu, Ö. (2005). Plastic anisotropy and the role of non-basal slip in magnesium alloy AZ31B. *International Journal of plasticity*, 21(6), 1161-1193.
- [2] Azpiazu, L. E., Egea, A., Letzig, D., & Ha, C. (2023). Advanced direct extrusion process with real-time controllable extrusion parameters for microstructure optimization of magnesium alloys. *International Journal of Material Forming*, 16(4), 39.
- [3] Cahyono, E. A., Sutomo, N., & Hartono, A. (2019). Literatur review; panduan penulisan dan penyusunan. *Jurnal Keperawatan*, 12(2), 12-12.
- [4] Faqih, M. A. A., Purniawan, A., Rasyida, A., & Susanti, D. (2025). PENGARUH REKAYASA PERMUKAAN TERHADAP NILAI KEKERASAN PADUAN MAGNESIUM AZ31. *MATHunesa: Jurnal Ilmiah Matematika*, 13(1), 190-196.
- [5] He, W.-W., Zhang, K., Huang, M., & Dai, S.-L. (2012). Influence of Secondary Phases on Dynamic Recrystallization Mechanisms in Extruded Mg-Zn-Y Magnesium Alloy. *Journal of Aeronautical Materials*, 32(5), 7-17.
- [6] Li, Y., Zhang, D., & Xu, S. (2024). Effect of hot extrusion on microstructure, texture, and mechanical properties of Mg-Zn-Mn-0.5Ca alloy. *Metals*, 14(10), 1112.
- [7] Mordike, B. L., & Ebert, T. J. M. S. (2001). Magnesium: properties—applications—potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45.
- [8] Putra, A. G., Afrianto, A., Mohamad, V., & Sukmara, S. (2025). Optimisasi Sifat Mekanik Paduan Mg AZ91: Pengaruh Proses Thixoforming dan Homogenisasi terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, dan Mikrostruktur. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 24(1), 51-57.
- [9] Putra, A. G., & Manaf, A. (2021). Effect of Alloy Elements and Compounds on Characteristics of Magnesium Alloys and Their Applications-Study. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 20(2), 166-179.
- [10] Shomad, M. A., & Jordianshah, A. A. (2020). Pengaruh penambahan unsur magnesium pada paduan aluminium dari bahan piston bekas. *Teknoin*, 26(1), 75-82.
- [11] Wang, H., Wu, P., Kurukuri, S., Worswick, M. J., Peng, Y., Tang, D., & Li, D. (2018). Strain rate sensitivities of deformation mechanisms in magnesium alloys. *International Journal of Plasticity*, 107, 207-222.
- [12] Wang, Y., & Zhao, G. (2020). Hot extrusion processing of Al-Li alloy profiles and related issues: a review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33(1), 64.
- [13] Wu, X., Xu, C., Kuan, J., Zhang, Z., Zhang, J., & Yang, W. (2020). Effects of hot extrusion temperature on mechanical and corrosion properties of Mg-Y-Zn-Zr biological magnesium alloy containing W phase and I phase. *Materials*, 13(5), 1147.
- [14] Zhang, H., Xu, Z., Kecskes, L. J., Yarmolenko, S., & Sankar, J. (2021). The effect of extrusion temperatures on microstructure and mechanical properties of mg-1.3 zn-0.5 ca (wt.%) alloys. *Crystals*, 11(10), 1228.
- [15] Zhang, W., Zhang, H., Wang, L., Fan, J., Li, X., Zhu, L., ... & Zhang, S. (2020). Microstructure evolution and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets prepared by low-speed extrusion with different temperature. *Crystals*, 10(8), 644.