

Pengaruh Elemen Paduan dan Senyawa terhadap Karakteristik Paduan Magnesium dan Aplikasinya – Kajian

Adi Ganda Putra^{1,2}, Azwar Manaf², dan Djoko HP³

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur, Universitas Jenderal Achmad Yani, Bandung, Indonesia

² Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

³PTNBR, BATAN, Jln. Tamansari 71 Bandung 40317 Indonesia

adi.ganda@ui.ac.id, azwar@ui.ac.id, joko60@gmail.com

Abstrak

Paduan berbasis Magnesium sebagai logam struktural yang paling ringan dan Mg memiliki potensi aplikasi yang besar dalam industri otomotif dan kedirgantaraan. Namun, Magnesium pada aplikasinya tersebut dibatasi oleh kekuatan dan keuletan yang rendah. Cara yang paling efektif untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan adalah dengan penambahan unsur paduan, penghalusan butir dan penguatan dispersi. Namun, teknik penguatan secara universal untuk paduan magnesium masih terus dilakukan penelitian dan beberapa masih diperdebatkan. Makalah ini menyajikan tinjauan singkat tentang pengembangan metode penambahan elemen paduan untuk paduan magnesium, yang akan berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang mengendalikan sifat mekanik dan memberikan pandangan penelitian masa depan di bidang ini.

Kata Kunci: Paduan Magnesium, Elemen paduan, Penghalusan butir, Sifat mekanik

Abstract

Alloys based on Magnesium the lightest structural metal and Mg have great application potential in the automotive and aerospace industries. However, Magnesium in its application is limited by its low strength and ductility. The most effective way to increase strength and ductility is by adding alloying elements, grain refinement, and dispersion strengthening. However, universal strengthening techniques for magnesium alloys are still being researched, and some are still being debated. This paper presents a brief overview of the development of methods of adding alloying elements to magnesium alloys, contributing to a better understanding of the factors controlling mechanical properties and providing an outlook for future research in this area.

Keywords: Magnesium Alloys, Alloying elements, Grain refinement, Mechanical properties

1. Pendahuluan

Paduan Magnesium merupakan material logam yang memiliki struktur paling ringan di antara logam-logam industri lainnya. Kombinasi dari modulus young dan kekuatan spesifik yang tinggi dari paduan Magnesium menunjukkan nilai yang sama atau lebih baik dibandingkan dengan aluminium dan baja komersil. Seperti kebanyakan logam lainnya, Magnesium jarang digunakan dalam bentuk elemen murni. Penambahan elemen paduan untuk memperbaiki atau meningkatkan sifat dari Magnesium. Perbaikan sifat paduan Magnesium dapat pula melalui proses penempaan selain proses pengecoran. Magnesium memiliki kekuatan tarik sekitar 190 Mpa, kekuatan *creep*-nya sekitar 98 MPa dan elongasi sekitar 16% (Krisnawan, 2009) kira-kira sekitar 2 sampai 3 kali lebih kuat dari logam aluminium.

Magnesium dan paduannya mempunyai sifat-sifat seperti: densitas rendah, kekuatan tinggi, konduktivitas termal yang tinggi, mudah dalam pembuatan, mudah didaur ulang, *biocompatible*, (G.-L. Song, 2011). Selama beberapa dekade sebelumnya, Magnesium dikenal sebagai elemen yang terlupakan, namun seiring dengan tingginya masalah tingkat pencemaran akibat gas buang kendaraan, berkurangnya cadangan bahan bakar minyak dan mobilitas masyarakat yang tinggi, menjadikan Magnesium sebagai pilihan material alternatif yang dapat mengurangi masalah masalah tersebut. Jepang pada tahun 1999 mulai mengembangkan pemanfaatan paduan Magnesium untuk berbagai aplikasi dengan membangun program yang diberi nama "*Magnesium Platform Science and Technology for Advanced Magnesium Alloys*" (Kojima, 2001).

Penggunaan paduan Magnesium semakin meluas dikarenakan sifat mekanik paduan Magnesium yang meningkat dengan ditamahnya elemen-elemen pepadu. Penerapan material ringan menjadi pilihan dalam pembuatan komponen otomotif (misalnya pada aplikasi komponen otomotif, antara lain *drive brackets, oil pan, steering column brackets, 4-wheel drive transfer case, manual transmission case, induction cover, clutch pedal, brake pedal, steering column brackets, crankcase, chain housing, steering box, rear-link arms, subframe* badan dan rangka kendaraan) di masa depan. Berat kendaraan secara umum dipengaruhi oleh 3 komponen yaitu mesin (28%), badan (28%) dan rangka kendaraan (27%) (James *et al.*, n.d.). Data dari kementerian sumber daya alam dan energi di Jepang, bidang

Info Makalah:

Dikirim : 09-15-21;

Revisi 1 : 11-14-21;

Diterima : 12-03-21.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-812-9475-563

e-mail : azwar@ui.ac.id

transportasi menggunakan 60 % konsumsi energi sehingga diperlukan suatu kendaraan yang dapat menghemat energi dan menurunkan pencemaran lingkungan. (Watarai, 2006).

Peningkatan berat kendaraan merupakan respon tuntutan dari konsumen kendaraan bermotor yang tak terhindarkan terkait dengan masalah keamanan, kenyamanan dan kemewahan dalam berkendara. Rasio masa jenis yang rendah dengan kekuatan yang ada pada paduan Magnesium merupakan sebuah keuntungan yang mendasari penggunaan paduan Magnesium pada industri transportasi, dimana penurunan berat juga akan menurunkan konsumsi bahan bakar dan emisi. Pada industri otomotif penggunaan Magnesium biasanya terpusat pada bagian depan kendaraan yang berhubungan dengan mesin diantaranya *casing engine*, *front engine cover*, dan lainnya. Pengurangan berat pada bagian ini bisa membantu meningkatkan performa dan kesetimbangan berat. Penggunaan Magnesium mempunyai banyak keuntungan antara lain hampir tidak mengalami perubahan dimensi berkaitan dengan perubahan temperatur dalam waktu pemakaian yang lama, dapat menyerap getaran, mudah diproses dan permukaan halus.

Industri otomotif sudah mulai mengembangkan paduan Magnesium. Sebagai contoh, pada tahun 2002 perusahaan mobil VW telah berhasil membuat kendaraan yang disebut *1 litre Car* (konsep kendaraan sangat ekonomis). Penggunaan paduan Magnesium menghasilkan berat total kendaraan hanya 290 kg (1/3 dari berat kendaraan pada umumnya). Kendaraan tersebut dapat berjalan sejauh 100 km dengan konsumsi bahan bakar sebanyak 0,89 liter (Kawamura, 2010). Komponen yang berpotensi digantikan oleh paduan Magnesium antara lain panel-panel instrument, aplikasi *power train*. Selain itu komponen yang paling potensial mengurangi berat kendaraan adalah pada *chasis*.

Aplikasi Mg pada industri otomotif seperti kendaraan *VW beetle* terbukti berkurang karena dibutuhkan unjuk kerja dari komponen yang lebih tinggi. Persyaratan untuk mengurangi rasio berat pada komponen mobil sebagai akibat dari tuntutan yang membatasi emisi telah memicu dilakukannya penelitian baru pada logam Magnesium. Pada tahun 1944, konsumsi dunia terhadap penggunaan Magnesium telah mencapai 228.000 ton/tahun dan turun setelah perang dunia II menjadi 10.000 ton/tahun. Pada tahun 1998 konsumsi logam Mg meningkat kembali menjadi 360.000 ton/tahun dengan harga US \$ 3,6 per kg. Tingkat pertumbuhan penggunaan Magnesium selama 10 tahun ke depan diperkirakan meningkat 7% per tahun (Mordike & Ebert, 2001). Paduan Magnesium merupakan material logam yang memiliki struktur paling ringan diantara logam-logam industri lainnya. Kombinasi dari *modulus elastis* dan kekuatan tarik yang tinggi dari paduan Magnesium menunjukkan nilai yang sama atau lebih baik dibandingkan aluminium dan baja komersil, perbandingan sifat fisik. Pada Tabel 1, diringkaskan beberapa keunggulan dan kelemahan dari perbandingan karakteristik logam besi (Fe), Aluminium (Al) dan Magnesium (Mg). Mg memiliki keunggulan lebih ringan 35 % dari Al dan 77% dari Fe namun kelemahannya memiliki kekakuan spesifik dan keuletan yang rendah.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Fisik dan Mekanik dari Material, (James *et al.*, 2011)

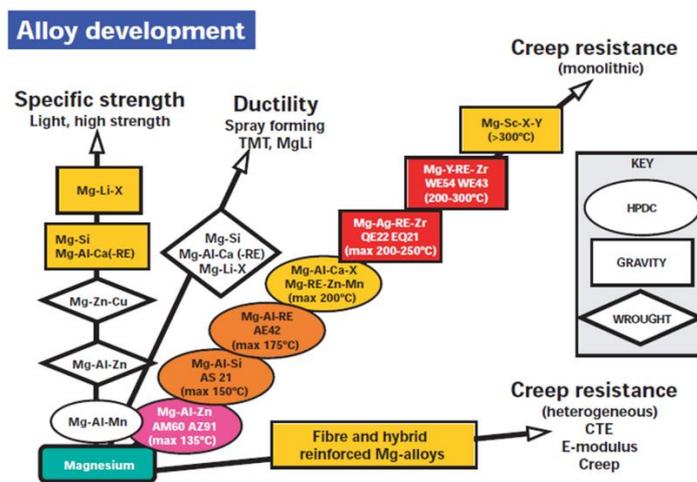
Property	Mg	Al	Fe
Atomic number	12	13	26
Atomic weight	24,32	26,98	58,7
Crystal structure	HCP	FCC	BCC
Density at 20 °C (g/cm ³)	1,74	2,70	7,86
Elastic modulus (GPa)	45	69	207
Melting point °C	650	660	1536
Boiling point °C	1105	2520	2862
Poisson's ratio	0,35	0,33	0,33
Specific strength (kNm/kg)	35-260	7-200	30-50
Specific stiffness (MNm/kg)	21-29	25-38	28-30

Tabel 2. Kode Paduan Magnesium Berdasarkan Elemen Tambahan (ASM Handbook, 1999).

Kode Huruf	Elemen pepaduan
A	Aluminium (Al)
C	Tembaga (Cu)
E	Logam tanah jarang (RE)
H	Thorium (Th)
K	Zirconium (Zr)
L	Lithium (Li)
M	Mangan (Mn)
Q	Perak (Ag)
S	Silicon (Si)
W	Yttrium (Y)
Z	Seng (Zn)

Perbaikan beberapa sifat logam Magnesium dapat dilakukan dengan teknologi pemaduan secara mekanik atau *mechanical alloying*. Tebel 2 menunjukkan kodefikasi berdasarkan penambahan elemen paduan pada Magnesium. Kelarutan elemen paduan didalam logam Magnesium sangat terbatas, hal ini pula yang membatasi peningkatan kekuatan dan perilaku sifat ketahanan korosi. Sifat keuletan logam Magnesium rendah dikarenakan memiliki struktur kristal berbentuk heksagonal susunan rapat (hcp) yang hanya memiliki satu bidang susunan tumpuk padat yaitu bidang basal (0001).

Penelitian dan pengembangan paduan Magnesium pada masa lalu sangat terbatas karena kurangnya penggunaan logam Magnesium pada skala besar. Akibatnya, paduan Magnesium cor banyak tersedia sedangkan paduan tempa sangat sedikit. Sifat yang dipersyaratkan komponen otomotif dan potensi logam Magnesium dapat menggantikan bahan komponen yang ada, menuntut dilakukan pengembangan paduan Magnesium agar memenuhi semua persyaratan. Kebutuhan penggantian komponen otomotif tidak hanya berdasarkan karena alasan biaya saja tetapi sifat yang tidak sesuai dengan yang diharapkan. Gambar 1. memperlihatkan arah pengembangan paduan sesuai dengan sifat yang dibutuhkan. Penambahan unsur pada paduan Magnesium secara spesifik dapat menentukan sifat yang diinginkan seperti peningkatan kekuatan, keuletan, ketahanan mulur melalui berbagai teknologi proses yaitu pembentukan, pengecoran dan pengecoran tertutup dengan tekanan tinggi.



Gambar 1. Arah Pengembangan Paduan Magnesium Sesuai Sifat yang Dibutuhkan (Mordike & Ebert, 2001)

Magnesium adalah elemen kimia dalam tabel periodik yang memiliki simbol Mg dan nomor atom 12 serta berat atom 24,31 g/mol. Magnesium adalah elemen terbanyak kedelapan yang membentuk 2,7% berat di bumi, serta merupakan elemen terlarut ketiga terbanyak pada air laut. Magnesium merupakan logam dengan berat jenis 1,7 g/cm³, lebih ringan dari Aluminium (2,7 g/cm³), Titanium (4,5 g/cm³) dan Besi (7,9 g/cm³) (James et al., n.d.). Magnesium bersumber dari mineral dolomit (CaCO₃.MgCO₃), magnesit (MgCO₃). Dolomit termasuk rumpun mineral karbonat, mineral dolomit murni secara teoritis mengandung 45,6% MgCO₃ atau 21,9% MgO dan 54,3% CaCO₃ atau 30,4% CaO. Rumus kimia mineral dolomit dapat ditulis meliputi CaCO₃.MgCO₃, CaMg(CO₃)₂ atau CaxMg1-xCO₃, dengan nilai x lebih kecil dari satu. Dolomit tersebar hampir di sebagian besar daerah di Indonesia, namun jumlahnya relatif jauh lebih kecil dan hanya berupa lapisan tipis pada endapan batu gamping, tetapi yang mempunyai jumlah sumberdaya cukup besar adalah di Sumatera Utara, Sumatera Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur dan Madura serta Papua. (Tushadi, 1990).

Magnesium murni memiliki kekuatan tarik sebesar 110 N/mm² dalam bentuk hasil pengecoran (*casting*), kekuatan tarik ini dapat ditingkatkan melalui proses pengerjaan. Magnesium bersifat lunak dengan modulus elastisitas yang sangat rendah 45 GPa (Al = 69 GPa; Baja = 207 GPa). Magnesium memiliki perbedaan dengan logam lain termasuk dengan aluminium, baja dan tembaga dalam sifat pengerjaannya di mana Magnesium memiliki struktur hexagonal sehingga tidak mudah terjadi geseran. Oleh karena itu, Magnesium tidak mudah dibentuk dengan pengerjaan dingin. Cara yang paling efektif untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan paduan Magnesium adalah dengan penambahan elemen paduan. Klasifikasi paduan Magnesium diatur berdasarkan kandungan elemen serta proses pembuatan paduan tersebut. Kode yang mewakili paduan tersebut bila dilihat dari komposisi kimia di dalamnya dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

Paduan Magnesium mempunyai kekuatan, kekakuan spesifik, kestabilan dimensi, mampu redam dan mampu didaur ulang yang sangat baik. Berdasarkan keunggulan-keunggulan tersebut dan dalam rangka menurunkan dampak lingkungan dengan menggunakan konstruksi ringan, berbagai penelitian dan pengembangan paduan Magnesium telah dilakukan untuk aplikasi industri. Magnesium dan paduannya menjadi material yang memainkan peranan penting untuk produk-produk komponen otomotif, aeronotika dan elektronik (Yang, et.al., 2008). Penambahan elemen Al pada paduan Mg-Al akan memperkaya kandungan oksida Al₂O₃ sehingga membentuk matriks pada permukaan

lapisan Al₂O₃. (Nordlien *et al.*, 1997). Penambahan elemen Zn dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan akan tetapi dapat mengurangi ketahanan korosi sehingga Zn biasanya digunakan kurang dari 3%. Ukuran dan distribusi fasa pengotor menyebabkan Magnesium mudah terkorosi. dan penambahan elemen Al membentuk fasa β-Mg₁₇Al₁₂ memiliki pengaruh besar terhadap ketahanan laju korosi. Perlakuan panas dan pendinginan lambat meningkatkan ukuran dan bentuk endapan (presipitat) yang menyebabkan menurunnya laju korosi (Distribution, n.d.2004)

Logam Mg murni memiliki sifat yang lunak dan secara mekanik kekuatannya rendah. Namun ada beberapa peningkatan pada pengembangan paduan Mg untuk aplikasi yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Paduan Mg merupakan material multi fasa yang terdiri atas partikel intermetalik yang terdispersi dalam matrik α-Mg. Multi fasa ini terjadi disebabkan adanya ketidakseimbangan proses pembekuan yang memungkinkan kekuatan mekanik dari material berubah. Paduan yang memiliki sifat ini adalah kelompok paduan dengan adanya elemen tambahan Al seperti AZ91, AM60, AM50 dan AZ31. Diagram fasa memberikan informasi yang penting dari paduan Mg-Al seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3, dengan penambahan 6% berat Al akan dapat menghasilkan kekuatan dan keuletan optimum (Mordike & Ebert, 2001). Fasa yang terbentuk hasil proses pengecoran pada paduan Mg-Al terdiri dari α-Mg dengan sel satuan Hexagonal, *spece group* P6₃/mmc, a = 0,32 nm dan c = 0,521 nm, adanya porositas dan fasa α-Mg sekunder dengan struktur interdendritik (Esmaily *et al.*, 2017)

Klasifikasi paduan Magnesium diatur berdasarkan kandungan elemen serta proses pembuatan paduan tersebut. Kodefikasi standar paduan Magnesium mengidentifikasi elemen paduan yang ditambahkan yang dapat dilihat dari komposisi kimia. Tabel 3. Menunjukkan kodefikasi paduan Mg berdasarkan jenis paduan yang digunakan secara umum memiliki perbedaan dari komposisi kimia serta teknologi proses pembuatannya. Sebagai contoh kode AZ91E adalah paduan Magnesium dengan elemen yang ditambahkan adalah Aluminium (A) 9 % berat dan Seng (Z) 1% berat dan 2% berat Calsium (E) dengan teknologi proses pengecoran cetakan pasir (sand casting/SC) dan cetakan permanent (permanent mold/PM)

Tabel 3. Kodefikasi Paduan Magnesium dengan Elemen Pemasu Didalamnya. (Mayer Kuts, 2006)

ASTM Designation	Ag	Al	Fe max	Mn	Ni max	Rare Earth	Si	Zn	Zr	Forms
AM50A		4.9	0.004	0.32	0.002			0.22		DC
AM60B		6.0	0.005	0.42	0.002			0.22 max.		DC
AS41B		4.2	0.0035	0.52	0.002		1.0	0.12		DC
AZ91D		9	0.005	0.33	0.002			0.7		DC
ACM522		5.3		0.17		2.6	E			DC
AJ52A		5		0.38		C		0.20		DC
AJ62A		6		0.38		D		0.20		DC
AZ31B		3	0.005	0.6	0.005			1		S, P, F, E
AZ61A		6.5	0.005	0.33	0.005			0.9		F, E
AZ80A		8.5	0.005	0.31	0.005			0.5		F, E
AZ81A		7.6		0.24				0.7		SC, PM, IC
AZ91E		9	0.005	0.26	0.0010			0.7		SC, PM
EZ33A						3.2		2.5	0.7	SC, PM
K1A									0.7	SC, PM
M1A				1.6						E
QE22A	2.5					2.2			0.7	SC, PM, IC
WE43A			0.01	0.15	0.005	A		0.20	0.7	SC, PM, IC
WE54A				0.15	0.005	B			0.7	SC, PM, IC
ZE41A				0.15		1.2		4.2	0.7	SC, PM, IC
ZE63A						2.6		5.8	0.7	SC, PM, IC
ZK40A								4	0.7	E
ZK60A								5.5	0.7	F, E

A = 4 Yttrium; 3 RE. C = 2.0 Strontium. E = 2.0 Calcium.
 B = 5.1 Yttrium; 4 RE. D = 2.5 Strontium.
 DC = die casting; E = extrusion; F = forging; IC = investment casting; P = plate; PM = permanent mold; S = sheet;
 SC = sand casting

Berdasarkan proses pengerjaan paduan Magnesium dapat dibagi dalam 2 jenis yaitu paduan cor dan paduan tempa. Paduan Magnesium komersil utama antara lain seri AZ (Mg-Al-Zn), seri AM (Mg-Al-Mn), seri AE (Mg-Al-RE), seri EZ (Mg-RE-Zn), seri ZK (Mg-Zn-Zr) dan seri WE (Mg-RE-Zr). Lebih dari 90% paduan Magnesium untuk komponen-komponen struktural dibuat dengan proses pengecoran, khususnya dengan proses *die-casting*.

Identifikasi dan tantangan penggunaan logam Magnesium untuk aplikasi industri transportasi telah diusulkan dalam pertemuan United State Automotive Materials Partnership (USAMP), Automotive Metals Division (AMD) di kantor United State Council for Automotive Research (USCAR) pada tanggal 7 Desember 2004 yang menghasilkan dokumen, "Visi Magnesium 2020". Enam puluh satu anggota industri otomotif Amerika Utara (NA) bertemu untuk membahas kemungkinan dampak kolaborasi global terhadap penggunaan Magnesium. Sehingga pada saat ini, akademisi dan industri banyak melakukan penelitian pengembangan paduan Magnesium guna mengatasi tantangan yang dapat memperluas penggunaan di industry otomotif dalam skala besar. (menghasilkan lebih dari 99 % komponen otomotif terbuat dari paduan Magnesium). (Distribution, n.d, 2004.)

Perbandingan penurunan berat paduan Magnesium terhadap baja sebesar 45-80%, terhadap baja ringan turun sebesar 35-55% dan terhadap Aluminium turun sebesar 20-35%. (USAMP, 2006). Dalam reduksi berat kendaraan, terdapat beberapa material yang dapat digunakan, diantaranya adalah *high strength steel*, paduan magnesium, paduan aluminium, *glass fiber composite* dan *carbon fiber composite*. Tabel 4 menunjukkan Magnesium dan *carbon fiber*

composite memiliki reduksi berat tertinggi terhadap baja karbon rendah yang merupakan material tradisional untuk komponen kendaraan yaitu sebesar 55-60%. (Kardys, 2017a)

Pada dekade terakhir ini paduan Magnesium seri AZ, terutama paduan AZ91 telah banyak dipelajari dan dipakai untuk beberapa komponen struktural dari otomotif dan pesawat terbang karena memiliki kekuatan spesifik dan sifat mampu cor yang baik. Dari sudut pandang aplikasi, paduan tempa Magnesium jika dibandingkan dengan paduan cor memiliki peluang yang menjanjikan. Inilah yang menyebabkan paduan tempa Magnesium yang berkemampuan tinggi, teknologi proses baru, dan berkualitas tinggi banyak dikembangkan dan diteliti. Tabel 4 menunjukkan reduksi berat dari masing-masing material terhadap baja karbon rendah. Magnesium memiliki reduksi ratio berat 55 -60%.

Tabel 4. Pengurangan Berat Material Ringan Terhadap Baja Karbon Rendah (Kardys, 2017b)

Material	Weight Reduction vs. Low-Carbon Steel
High-Strength Steel	15-20%
Glass-fiber composite	25-35%
Aluminium	40-50%
Magnesium	55-60%
Carbon-fiber composite	55-60%

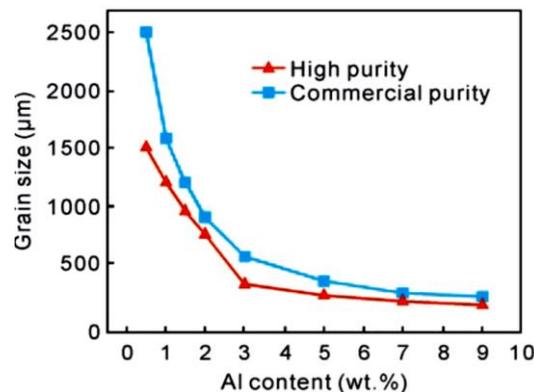
2. Metode Pengembangan Paduan Magnesium

Penambahan elemen padu pada paduan Magnesium dilakukan agar diperoleh paduan Magnesium yang lebih berdaya guna. Dalam penambahan elemen pada paduan Magnesium dapat dibagi dalam 3 katagori, yaitu: (Yang *et al.*, 2008), yang pertama adalah elemen yang dapat meningkatkan kekuatan dan keuletan yaitu elemen Al, Zn, Ca, Ag, Ce, Ni, Cu dan Th, yang kedua adalah elemen yang hanya dapat meningkatkan keuletannya saja tetapi mempunyai sedikit pengaruh terhadap kekuatan yaitu Cd, Tl dan Li, dan yang ketiga adalah elemen yang dapat menurunkan keuletan tetapi meningkatkan kekuatan yaitu Sn, Pb, Bi dan Sb.

Proses pemaduan pada paduan Magnesium umumnya dilakukan pada saat proses peleburan (pencairan), melalui berbagai metoda proses pembentukan diantaranya *die casting (DC)*, *extrusion (E)*, *forging (F)*, *investment casting (IC)*, *permanent mold (PM)*, *sand canting (SC)*, *sheet metal forming (SMF)*.

2.1. Pengaruh penambahan elemen pada paduan Magnesium

Penambahan Aluminium pada Magnesium bertujuan untuk meningkatkan kekuatan, mampu cor dan ketahanan korosi. Aluminium dapat larut didalam Magnesium sebanyak 12,7% pada suhu 437° C dan kelarutannya berkurang bersamaan dengan turunnya suhu (ASM International, 1992). Pada paduan Mg-Al, fasa-β yaitu Mg₁₇Al₁₂ dapat terbentuk, dan menurunkan ketahanan mulur, sehingga diperlukan elemen padu lainnya yang mampu membentuk senyawa intermetalik dengan aluminium dengan tujuan membatasi pertumbuhan fasa β (C. Song *et al.*, 2009). Aluminium berikatan dengan karbon membentuk partikel Al₄C₃. Karbon berasal dari pengotor yang ada pada saat logam dalam keadaan cair. Partikel pengotor yang terbentuk tersebut menyebabkan terjadinya efek penghalusan butir pada matriks α-Mg. Gambar 2 memperlihatkan pengaruh penambahan aluminium terhadap ukuran butir pada paduan Mg murni dan komersial, semakin banyak Al yang ditambahkan dalam % berat akan memepengaruhi terhadap ukuran besar butir. Pada Mg murni tapa penambahan Al memiliki ukuran butir 1500 μm, dengan penambahan Al sebesar 9 % berat terjadi penghalusan ukuran butir menjadi 250 μm.



Gambar 2. Pengaruh Kemurnian Elemen Al Terhadap Ukuran Butir (C. Song *et al.*, 2009)

Adanya Al pada Mg dapat membentuk senyawa intermetalik diantaranya adalah Mg₁₇Al₁₂, Mg_xMe_y dan Al_zMe_w. Untuk menekan pertumbuhan fasa β Mg₁₇Al₁₂, maka diperlukan elemen Me (logam) yang memiliki afinitas lebih tinggi terhadap Al dibandingkan Mg, sehingga Al_zMe_w kemungkinan besar akan terbentuk. Elemen yang mampu

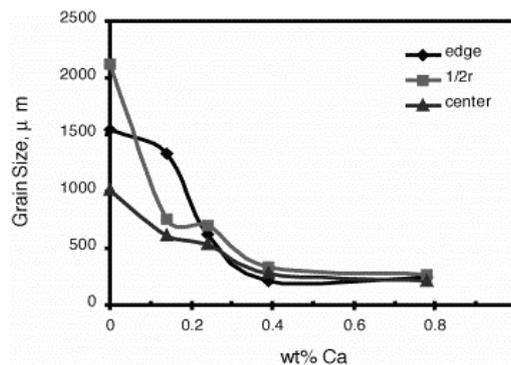
membentuk senyawa intermetalik adalah elemen tanah jarang, alkali tanah dan elemen transisi 3d. (Aghion & Bronfin, 2004; ASM International, 1992). Untuk meningkatkan fluiditas, kekuatan pada suhu kamar dan mengurangi efek korosif besi dan nikel, seng umumnya ditambahkan pada paduan Mg-Al. Namun, penambahan seng dengan konsentrasi 1,0-1,5% terhadap paduan Magnesium dengan aluminium 7-10% dapat menyebabkan retakan panas (*hot cracking*) (ASM International, 1992).

Penambahan karbon (untuk membentuk partikel nukleasi (Al_4C_3) saat ini adalah salah satu yang paling populer dan metode efektif untuk menurunkan ukuran butir paduan Mg-Al. Karbon dapat ditambahkan dalam bentuk serbuk. Menurut Motegi, (Yano et al., 2003) metode penambahan karbon yang paling efektif adalah melalui penggunaan klorida organik seperti *hexachloroethane* (C_2Cl_6) dan karbon tetraklorida (CCl_4). Terjadi penurunan ukuran butir pada paduan AZ91E hingga 0,08% berat. Penambahan partikel Al_4C_3 pada saat peleburan ke dalam Magnesium murni sebesar 0,5% berat menunjukkan perubahan ukuran butir secara signifikan. Ukuran butir menjadi sama dan selanjutnya penambahan di atas 0,5% berat tidak menyebabkan penurunan lagi dalam ukuran butir.

Xue dkk. (Xue et al., 2005) melakukan penelitian dengan menambahkan serbuk Al_4C_3 pada paduan Mg-Al menghasilkan efektifitas yang besar, terjadi pengurangan ukuran butir hingga 60%. Penambahan partikel Al_4C_3 langsung pada saat peleburan lebih efektif dibandingkan pembentukan partikel dengan penambahan karbon. Aluminium berikatan dengan karbon membentuk partikel Al_4C_3 . Karbon berasal dari pengotor yang ada saat logam dalam keadaan cair. Partikel-partikel yang terbentuk tersebut menyebabkan terjadinya efek penghalusan butir pada matrik α -Mg.

Kalsium (Ca) adalah elemen padu yang relatif murah dengan densitas yaitu $1,55 \text{ g/cm}^3$ yang juga rendah seperti densitas Magnesium yaitu $1,74 \text{ g/cm}^3$ dimana dapat menjaga sifat spesifik dari paduan Magnesium, yang sangat berguna untuk meningkatkan sifat mekanik dalam paduan dasar Mg-Al pada temperatur tinggi karena penambahan kalsium akan membentuk senyawa intermetalik seperti Al_2Ca dan Mg_2Ca yang dimana memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dan juga dapat menghaluskan ukuran butir. (Rokhlin et al., 2009)(Jun et al., 2005). Penggunaan kalsium dalam paduan Magnesium adalah saat akan dilakukan penuangan yang bertujuan untuk mengurangi oksidasi pada saat proses peleburan.

Penambahan kalsium memberikan efek cukup signifikan dalam menurunkan ukuran butir pada Magnesium murni seperti diperlihatkan pada Gambar 3. Pada penambahan Ca sebesar 0.8 % berat menunjukkan pada bagian tengah terjadinya penghalusan butir semula $1000 \mu\text{m}$ (tanpa penambahan Ca) menjadi sekitar $250 \mu\text{m}$. Efek penghalusan butir dari kalsium disebabkan oleh tingginya nilai *Growth Restriction Factor* (Lee et al., 2000). Semakin besar nilai GRF maka penghambatan pertumbuhan butir akan semakin tinggi. Nilai GRF kalsium adalah 11.94, nilai ini menunjukkan kemampuan segregasi yang tinggi dari kalsium (Z. Jiang, Jiang, Yang, et al., 2015). Nilai GRF yang tinggi akan mengurangi suhu *undercooling* antar padatan dan lelehan dengan pembentukan lapisan pembatas difusi yang menghambat pertumbuhan butir, sehingga mendorong pertumbuhan inti pada lelehan. Namun, ukuran butir mencapai jenuh pada $270 \mu\text{m}$ dengan 0,4 wt% Ca untuk paduan Mg-Ca, dan penambahan selebihnya hanya memberikan sedikit pengaruh pada besar butir (Lee et al., 2000).

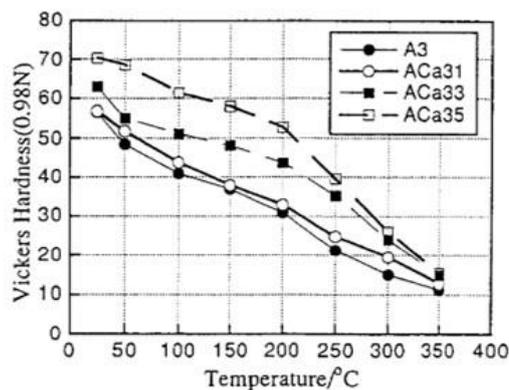


Gambar 3. Pengaruh Kalsium (Ca) pada Magnesium Murni (Lee et al., 2000)

Penambahan kalsium sebanyak 1% pada paduan Mg-Al akan mendorong pembentukan fasa Al_2Ca pada batas butir dan akan mengurangi pertumbuhan fasa β - $Mg_{17}Al_{12}$. Saat penambahan Ca ditingkatkan hingga 4%, fasa β - $Mg_{17}Al_{12}$ menghilang, dan fasa Al_2Ca bertambah dengan pembentukan fasa baru Mg_2Ca (Wu et al., 2005).

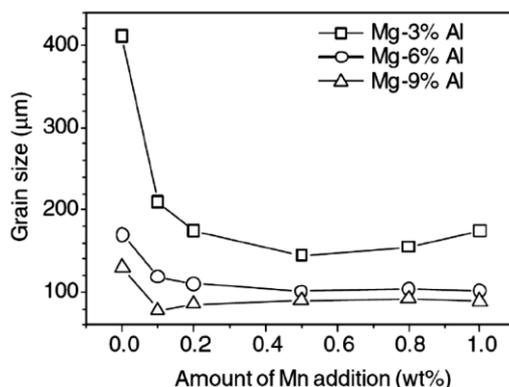
Dalam penelitian yang dilakukan dengan merujuk penelitian lain bahwa senyawa yang diinginkan adalah intermetalik Al_2Ca karena meningkatkan nilai kekerasan dalam berbagai temperatur dari paduan Magnesium sehingga dapat diaplikasikan untuk bidang otomotif. Penambahan elemen Ca dalam paduan AZ91, dapat menurunkan jumlah fasa $Mg_{17}Al_{12}$ dan meningkatkan pembentukan fasa Al_2Ca (Qudong et al., 2001)

Fasa Al_2Ca memiliki kestabilan pada suhu tinggi. Kecenderungan pertumbuhan fasa Al_2Ca juga menekan pertumbuhan fasa $\beta-Mg_{17}Al_{12}$ yang mampu mengurangi kestabilan pada suhu tinggi (Qudong *et al.*, 2001), (Rokhlin *et al.*, 2006). Fasa Al_2Ca akan terbentuk saat kadar kalsium lebih dari 0,1 wt%, pada paduan Mg-Al, namun hanya pada rasio kalsium-aluminium dibawah 0,8 (Baldwin, 2004). Pada penelitian yang dilakukan oleh Ninomiya, penambahan elemen Al dan Ca dengan rasio mendekati Ca 0,8 dari Al, memberikan peningkatan kestabilan sifat mekanik pada suhu 100-200° C. Gambar 4 memperlihatkan hasil penelitian paduan ACa3x, dengan rasio Al-Ca tersebut, memiliki *heat resistant temperature* di suhu 282° C. Paduan ACa35 juga menunjukkan pengurangan nilai kekerasan yang rendah pada suhu 350° C, yaitu sebesar 5 HV dari 68 HV.



Gambar 4. Pengaruh Penambahan Elemen Ca Terhadap Nilai Kekerasan (Ninomiya *et al.*, 1995)

Efisiensi penghalusan butir oleh Mn meningkat dengan naiknya kandungan aluminium. Ini terjadi karena senyawa Al-Fe-Mn merupakan senyawa yang memiliki potensi yang besar sebagai pembentuk inti (nukleasi). (Cao, P. 2006). Gambar 5. memperlihatkan penambahan % berat Mn pada paduan Mg-Al mempengaruhi ukuran besar butir. Semakin besar Al yang ditambahkan menghasilkan penghalusan ukuran butir. Pada paduan Mg- 9% berat Al dengan penambahan Mn 1 % berat, ukuran butir yang dihasilkan dibawah 100 μm . Penambahan 0,81 – 0,91 % berat Mn pada Paduan Mg-RE akan meningkatkan Kekuatan Tarik (Du.J 2007)



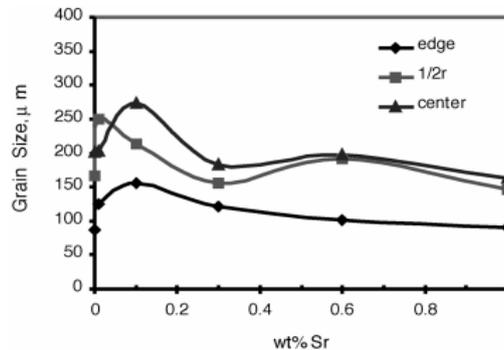
Gambar 5. Pengaruh Mn terhadap ukuran butir (T.A. Leil, 2009).

Seng (Zn) merupakan elemen paduan utama paling banyak digunakan pada Magnesium setelah aluminium karena mempunyai kelarutan yang sangat baik dalam Magnesium. Kelarutan maksimum Zn dalam Mg pada temperatur 345°C adalah sebesar 6,2%. Kelarutan pada temperatur kamar sebesar 2%, sehingga kelebihan Zn akan membentuk senyawa intermetalik $Mg_{51}Zn_{20}$ yang sangat keras dan getas. Penambahan Zn dapat pula meningkatkan fluiditas, tetapi dalam jumlah yang lebih besar akan menyebabkan terjadinya cacat retak panas. (Ramachandran *et al.*, 2008)

Lee dkk, melakukan penambahan 2% ZnO pada paduan Magnesium AZ91E dengan temperatur pencairan dan pengadukan selama 30 detik dihasilkan penurunan besar butir sebesar 75% (Al-tib *et al.*, 2011). Penampahan hingga 3 % ZnO pada paduan Mg-3% Zn dapat menurunkan ukuran butir rata-rata dari 1100 μm (tanpa penambahan ZnO) menjadi 410 μm . (Fu *et al.*, 2008)

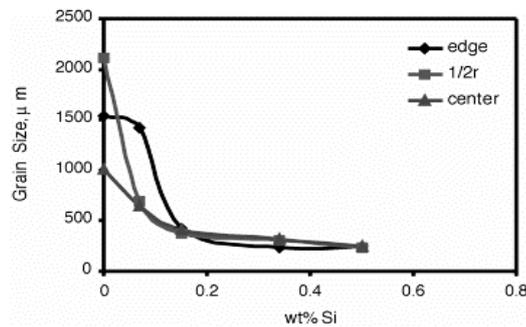
Kelarutan Sr (Stronsium) 0,11% di dalam Mg dapat menyebabkan terjadinya penghalusan butir. Kelarutan yang rendah ini memungkinkan Sr untuk memperkaya cairan di depan antarmuka padatan yang menyebabkan terhalangnya pertumbuhan butir (Yang *et al.*, 2008). Ditemukan adanya konsentrasi partikel Sr disekeliling batas butir yang menghalangi pelarutan. Selain itu, ditemukan juga partikel di tengah butir yang kaya akan Al, Fe, Mn, Mg, dan Sr. Terdapat senyawa intermetalik Al-Fe-Mn yang bertindak sebagai tempat nukleasi penghalusan butir pada

temperatur tinggi. Sehingga diusulkan bahwa senyawa Al-Fe-Mn dan Mg-Sr mengendap dari fasa cair, kemudian bergabung untuk membentuk partikel nukleasi heterogen (Pan., Y., Liu., X. and Yang, 2007). Gambar 6. memperlihatkan penambahan 1 % berat Sr pada Magnesium pada sampel di bagian tengah hasil analisa pengukuran ukuran butir menghasilkan penghalusan butir yang semula sekitar 275 μm menjadi sekitar 180 μm .



Gambar 6. Penambahan Sr paduan Mg-9Al terhadap ukuran butir. (Pan., Y., Liu., X. and Yang, 2007)

Silikon merupakan elemen paduan yang umum digunakan pada paduan Magnesium. Silikon berbentuk chips ditambahkan ke dalam Magnesium cair pada 700°C, kemudian diaduk untuk melarutkan silikon dengan sempurna. Hasil pengukuran butir seperti ditunjukkan pada **Gambar 7**. memperlihatkan penambahan Silikon dalam % berat yang jumlahnya kecil berpengaruh besar terhadap penurunan ukuran butir Magnesium murni pada sampel di bagian tengah yang semula 1000 μm setelah di tambahkan 0,5 & berat Si menjadi 250 μm . Ini menunjukkan bahwa silikon merupakan elemen yang efektif dalam menghaluskan butir Magnesium (Lee *et al.*, 2000).



Gambar 7. Pengaruh penambahan Silikon (Si) pada Magnesium (Lee *et al.*, 2000)

Karbon yang berikatan dengan silika akan membentuk senyawa karbida yang memiliki sifat mekanik yang tinggi, sehingga pengembangan paduan Magnesium dengan menambahkan senyawa karbida akan memiliki kekuatan tarik, ketahanan mulur, kekerasan, dan ketahanan aus yang tinggi serta koefisien ekspansi panas yang rendah. Penambahan 0,1 hingga 0,5% berat SiC dapat meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik secara signifikan dari 104 MPa dan 174 MPa menjadi 124 MPa dan 216 MPa. Peningkatan sifat mekanik ini dikarenakan adanya senyawa karbida SiC memberikan efek terhadap terbentuknya butir yang halus (Wang, Z., Kang, Y., Dong, W., Zhao, H., Liu, J. and Xu, 2005). Penambahan SiC nanopartikel pada AZ91 memberikan dampak menghambat pertumbuhan butir, dapat meningkatkan kemampuan deformasi dari paduan komposit SiC/AZ91. (Nie *et al.*, 2018)

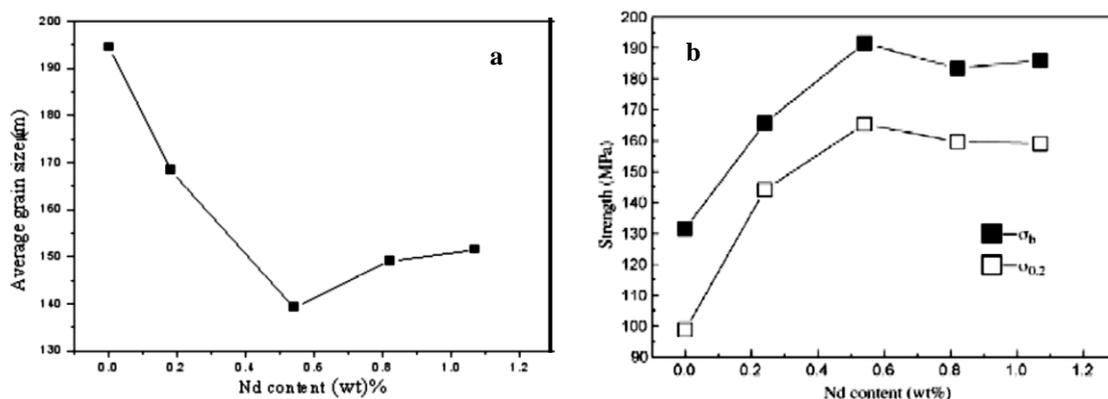
Paduan AZ91 dengan penambahan partikel nano SiC kurang dari 2% dapat meningkatkan kekuatan, keuletan dan kemampuan coranya. SiC terdispersi dengan membentuk kluster-kluster pada matrik Mg-4Zn. Terbentuk pula fasa intermetalik MgZn₂ disekitar kluster SiC. SiC bertindak sebagai katalis terjadinya pengintian. Demikian pula untuk paduan Mg-6Zn dan Mg-8Zn, terjadi peningkatan kekuatan dan keuletannya, terbentuk fasa kedua Mg₇Zn₃ dan Mg₂Zn₃. (De Cicco *et al.*, 2009)

Zirkonium merupakan elemen paduan yang mempunyai sifat sebagai penghalus butir terbaik. Sejumlah kecil zirkonium dapat meningkatkan penghalusan butir dan berpengaruh terhadap sifat mekanik paduan Magnesium. Penguatan ini disebabkan oleh ukuran parameter kisi dari zirkonium (a=0.323 nm, c=0.514 nm) mendekati ukuran parameter kisi Magnesium. Partikel-partikel yang kaya akan zirkonium akan menyediakan tempat untuk terjadinya pengintian heterogen butir-butir Magnesium selama proses pembekuan (Saha & Dissertation, 2010).

Penghalusan butir pada paduan Magnesium dapat dilakukan dengan menggunakan paduan utama Mg-Zr (*master alloys*). Berkaitan dengan batas kelarutan zirkonium yang rendah dalam Magnesium, sehingga umumnya zirkonium berada sebagai partikel terisolasi atau sebagai kelompok partikel. Saat ini, di pengecoran, sekitar 1% berat

zirkonium ditambahkan sebagai penghalus butir. Qian dkk. (Qian *et al.*, 2003) menambahkan 1% berat zirkonium dalam bentuk paduan master Zirmax® (Mg-33,3% Zr) ke dalam cairan Magnesium murni pada 730°C dan 780°C. Dari pengamatan struktur mikro terlihat bahwa partikel zirkonium yang tidak larut berbentuk partikel atau sebagai kelompok besar dengan ukuran $\geq 10 \mu\text{m}$. Kelompok-kelompok ini tidak turut dalam proses penghalusan butir dan berada di bagian bawah krusibel. Perilaku endapan partikel zirkonium ditentukan oleh distribusi ukuran partikel awal paduan utamanya.

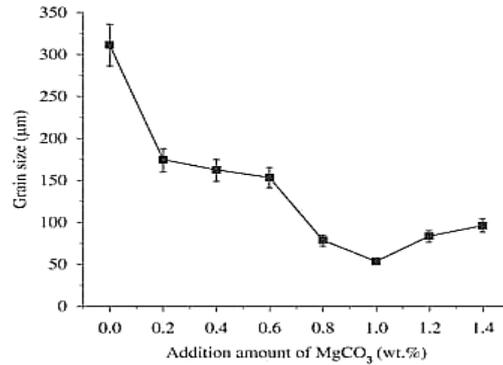
Logam tanah jarang seperti Cerium (Cr), Lanthanum (La), Praseodymium (Pd), Neodymium (Nd), Thorium (Th), Yttrium (Y) dan Scandium (Sc), Zirkonium (Zr) merupakan elemen logam yang banyak diteliti sebagai elemen aditif pada paduan Magnesium. Gambar 8. memperlihatkan pengaruh penambahan Neodymium (Nd) terhadap peningkatan kekuatan, optimum pada penambahan 0,6% berat Nd. Sifat mekanik paduan Magnesium tergantung adanya kelarutan elemen logam tanah jarang yang menghasilkan senyawa fasa intermetalik Mg-Zn-RE (Azad, 2012). Fasa intermetalik dapat menyebabkan ketahanan mulur yang baik pada temperatur tinggi. Penggunaan paduan secara komersial masih relatif sedikit seperti ZE10 (Mg-1.25Zn-0.2Ce-MM), WE43 (Mg-4Y-3Nd-0.5Zr) dan WE54 (Mg-5Y-3.5Nd-0.5Zr) disebabkan oleh harganya yang sangat mahal. (Lv *et al.*, 2013)(Rzychoń & Kielbus, 2006). Logam tanah jarang Cerium (Ce) jika ditambahkan pada magnesium AZ91 dapat menghasilkan penghalusan butir. mengurangi fraksi fasa $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$, membentuk senyawa intermetalik Al_4Ce , Ketika %Ce lebih tinggi, kondisi termodinamika dan kinetik pembentukan fasa Al_4Ce lebih tinggi sehingga meningkatkan proporsi fasa Al_4Ce yang tumbuh menjadi strip dan jarum. Pembentukan fasa Al_4Ce membuat reaksi eutektik berkurang, sehingga jumlah fasa $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ menurun dan Al_4Ce meningkat secara bersamaan (CAI *et al.*, 2016)



Gambar 8. (a) Pengaruh Nd Terhadap Ukuran Butir; (b) Pengaruh Nd Terhadap Kekuatan (Vinotha *et al.*, 2009).

Penambahan elemen Y 0.5 s.d. 2 % berat pada paduan AZ91D meningkatkan kekuatan luluh dan kekuatan tarik serta elongation dari AZ91D tanpa tambahan Y. Dengan proses lanjut berupa ekstrusi pada temperatur 300°C tetap menunjukkan kenaikan UTS (*Ultimate Tensile Strength*), YS (*Yield Strength*) dan *Elongation*, namun jika temperatur ekstrusi di variasikan dari 250, 300, 325, 350 dan 450 menunjukkan sifat mekanik berubah dengan bervariasi. Jika temperatur ekstrusi dinaikkan dari 250 s.d 400 maka UTS dan YS akan turun sebaliknya nilai elongasi akan meningkat. Ini menunjukkan bahwa meningkatnya temperatur ekstrusi akan berdampak negatif pada sifat UTS dan YS namun berbanding terbalik dengan elongasinya. (Zhao *et al.*, 2009)

Penambahan MgCO_3 pada AZ91 memberikan pengaruh yang besar terhadap penghalusan butir. Gambar 9. memperlihatkan penambahan 1,2% MgCO_3 pada AM60B memberikan penghalusan butir yang paling tinggi dari ukuran awal (tanpa pemaduan) sebesar $348 \mu\text{m}$ menjadi $69 \mu\text{m}$. Terjadi penurunan ukuran butir lebih dari 5 kali. Peningkatan ini terjadi karena adanya dekomposisi MgCO_3 menjadi MgO dan CO_2 , gas CO_2 akan bereaksi dengan Mg membentuk MgO dan kemudian C bereaksi dengan Al membentuk partikel Al_4C_3 sebagai presipitat. (Chen *et al.*, 2012).


 Gambar 9. Pengaruh Penambahan MgCO₃ Terhadap Ukuran Besar Butir pada AM60B (Chen et al., 2012)

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil telaah jurnal tentang pengaruh elemen penambah pada paduan Magnesium diperoleh bahwa elemen utama penambah di dominasi oleh elemen yang secara berurutan digunakan mulai dari yang paling banyak di tambahkan elemen murni adalah Aluminium (Al), Seng (Zn), Kalsium (Ca), Zirkonium (Zr) dan logam tanah jarang/*Rear Earth* (RE) kemudian elemen senyawa SiC, ZnO, MgO₃, TiB₂ dan TiC yang kesemuanya bertujuan untuk memperbaiki sifat guna memenuhi kriteria pada aplikasinya.

Karakteristik paduan Magnesium dipengaruhi oleh penambahan elemen dan proses pembuatan yang ditentukan oleh beberapa parameter diantaranya pemilihan jenis elemen/senyawa dan proses (pengeroran, tempa, perlakuan panas). Penelitian yang sudah dilakukan diantaranya penelitian tentang pengaruh elemen/senyawa terhadap karakteristik paduan Magnesium telah dilakukan beberapa peneliti. Tabel 5. menunjukkan rangkuman dari penelitian yang telah dilakukan pada paduan Magnesium dengan penambahan elemen/senyawa terhadap peningkatan sifat diantaranya penghalusan ukuran butir, peningkatan kekuatan, keuletan, kekerasan, ketahanan mulur dan ketahanan terhadap temperature tinggi. Penambahan elemen paduan pada Magnesium secara keseluruhan menyebabkan terjadinya penghalusan ukuran butir mencapai 70 – 90 %, yang dapat mempengaruhi karakteristik sifat yang lain.

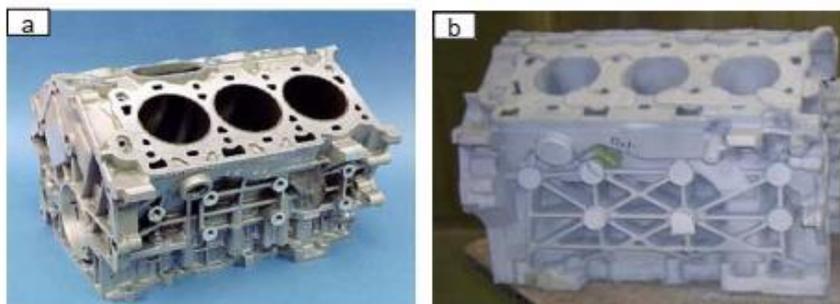
Tabel 5. Rangkuman Pengaruh Penambahan Elemen Terhadap Perubahan Sifat Paduan Magnesium.

Elemen/ Senyawa	Penghalusan butir	Kekuatan	Keuletan	Kekerasan	Ketahanan Mulur	Ketahanan Temp. Tinggi	Referensi
Al	√	√	√				Pan, 2005
Mn	√	√					Ning, 2007
Ti	√ + B		√				Wang, 2006
Zn		√	√	√			Balasubraman i, 2009
Ca	√	√	√		√	√ + RE	Qudong, 2001
Sr	√						Kainer, 2007
Si	√			√	√		Asano, 2008
Sb + Ce	√	√	√				Liu, 2009
Zr	√	√					Saha, 2010
Sc+Mn+Gd				√	√		Qingchun, 2011
Gd+Y+ Zn		√			√	√	B. Jiang, 2010
Y	√	√	√				Zhao, 2009
C	√						Motegi, 2005
Cu		√	√				Zhiyong, 2012
Sn		√			√		Antipas, 2013
MgO ₃	√	√					Chen, 2011
Sb	√	√			√		Yang, 2009
RE		√			√		You , 2017
SiC	√			√			Wang, 2005
ZnO	√						Fu et al., 2008

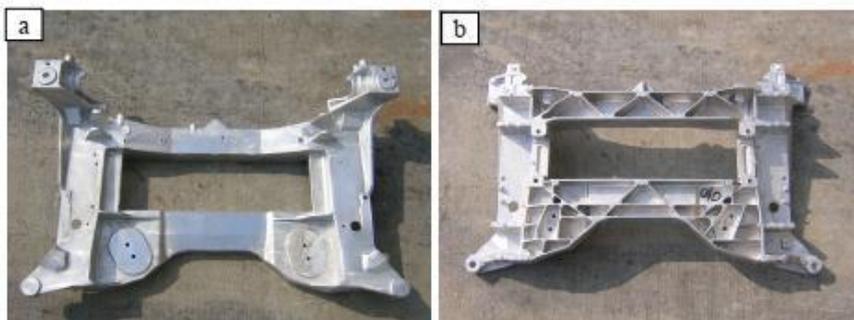
Magnesium dengan jumlahnya yang cukup melimpah di bumi setelah aluminium dan besi menjadi salah satu logam yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi baik struktural maupun non-struktural. Penggunaan terbesar paduan Magnesium adalah Mg-Al, dengan penambahan kandungan aluminium akan meningkatkan kekuatan dan ketahanan korosi dari Magnesium. Proses pembuatan paduan Magnesium yang paling banyak adalah hasil *die casting* yang dimanfaatkan dalam industri otomotif. Selain itu, Magnesium juga banyak digunakan untuk desulfurisasi besi dan baja serta penggunaan lainnya seperti pelat (*plate*) dan lembaran (*sheet*) Magnesium (Mayer Kuts, 2006)

Magnesium merupakan logam yang memiliki sifat-sifat menarik sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi struktural. Beratnya yang begitu ringan serta massa jenis yang rendah sangat cocok digunakan pada komponen dengan mobilitas tinggi. Sifat utama Magnesium yang menjadi dasar pemanfaatan struktural adalah masa jenis yang rendah diaplikasikan sebagai komponen mesin otomotif dan *aerospace*, sebagai kerangka komputer dan kamera serta peralatan olahraga sebagai contoh yaitu busur panah (Yang *et al.*, 2008). Penggunaan struktural lainnya dari Magnesium yaitu sebagai komponen pesawat terbang, komponen rudal, peredam suara perangkat elektronik, *hydrogen storage*, kaleng penyimpanan bahan bakar nuklir serta sebagai bahan pembuat koper karena sifat Magnesium yang tahan terhadap benturan. Magnesium dapat dengan mudah difabrikasi melalui berbagai proses pembentukan yang sederhana, seperti proses coran, tempa, ekstrusi dan *injection molding (thixocasting)*. Beberapa contoh sebagai hasil pengembangan paduan magnesium untuk aplikasi struktur ringan diperlihatkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.

Magnesium berada di salah satu urutan terbawah dalam deret volta (Nerst) sehingga sering digunakan sebagai anoda korban untuk melindungi baja dari korosi. Contohnya, Magnesium sebagai anoda korban digunakan untuk melindungi pipa bawah tanah, melindungi bagian dalam *water heater*, sebagai pelindung lambung kapal serta melindungi baja yang berada dalam lingkungan air laut (Mayer Kuts, 2006). Magnesium juga dapat ditambahkan pada besi cor kelabu, dimana serpihan karbon (grafit) berkumpul membentuk bulatan sehingga menghasilkan besi cor dengan grafit berbentuk bulat/nodular yang bersifat ulet dan retak coran pun berkurang. Hal ini menjadikan besi cor nodular memiliki kekuatan yang setara dengan baja.



Gambar 10. (a) dan (b) Blok silinder *Duratec 2,5L* berbahan paduan magnesium (Carpenter *et al.*, n.d.).



Gambar 11. Komponen *Cradle* yang terbuat dari paduan magnesium hasil pengecoran.
(a) Tampak bagian atas *Cradle* untuk *Corvette 2006*, (b) Tampak bagian bawah (Carpenter *et al.*, n.d.).

Kesimpulan

Magnesium merupakan logam ultra ringan yang potensial dapat diaplikasikan dengan pengurangan rasio berat. reduksi berat Mg terhadap baja karbon rendah dapat mencapai 55-60%. Penambahan elemen/senyawa sangat efektif untuk meningkatkan kekuatan dan keuletan paduan Mg. Perubahan ukuran struktur butir/penghalusan butir akibat penambahan elemen/senyawa dapat memperbaiki sifat mekanik. Mekanisme penghalusan ukuran besar butir dan pembentukan presipitat dapat pula diperoleh melalui proses pembentukan (*forging, die casting, rolling, extrusion*) dan perlakuan panas (*solid solution treatment*). Karena daktilitas dan ketahanan korosi berbanding terbalik dengan kekuatan, dan sulit untuk mengoptimalkan ketiganya pada saat yang sama, sulit untuk mengembangkan metoda untuk memproduksi Magnesium di dunia. Para peneliti telah melakukan berbagai penelitian dengan gagasan baru untuk memberikan dukungan dasar guna mengoptimalkan kemampuan paduan Mg sesuai yang diinginkan.

Perkembangan penelitian paduan Mg sebagai bahan dasar dan juga ilmu terapan baik dari segi modifikasi, mechano-fisik, termal dan sifat lainnya dari industri struktural maupun non struktural yang memanfaatkan logam ringan sebagai pertimbangan ratio pengurangan dari berat komponen terus dikembangkan. Kajian ini merupakan informasi singkat tentang pengembangan metode penambahan elemen/senyawa pada paduan magnesium, yang akan

berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor yang mengendalikan sifat mekanik dan memberikan pandangan penelitian masa depan di bidang ini. Potensi pengembangan penelitian berbasis dasar Magnesium sangat besar karena disamping dapat mereduksi berat dengan ratio diatas 60 % dengan kekuatan yang dapat ditingkatkan setara dengan logam ferro pada kendaraan sehingga akan menurunkan emisi gas buang, menghemat energi dan menurunkan pencemaran lingkungan.

Daftar Pustaka

- Aghion, E., & Bronfin, B. (2004). *Magnesium Alloys: Science, Technology and Applications*. January.
- Al-tib, W., Additions, Z., & Lee, K. (2011). *a Study on Grain Refinement of AZ91E Magnesium Alloy*.
- Antipas, G. (2013). The Effect of Increasing Sn Content on High-Temperature Mechanical Deformation of an Mg-3%Cu-1%Ca Alloy. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met3040337>
- Asano, K., & Yoneda, H. (2008). High Temperature Properties of AZ91D Magnesium Alloy Composite Reinforced with Short Alumina Fiber and Mg₂Si Particle. *Materials Transactions*, 49(7), 1688–1693. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MER2008092>
- ASM International. (1992). *ASM Metals Handbook Vol.2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*.
- Azad, A. (2012). *Grain refinemnet of magnesium alloy AZ91E*. April, 101.
- Balasubramani, N. (2009). *STUDIES ON GRAIN REFINEMENT AND ALLOYING ADDITIONS ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Mg-8Zn-4Al ALLOY*.
- Baldwin, W. (2004). *ASM Handbook : Metallography and Microstructures*. 9.
- CAI, H., GUO, F., REN, X., SU, J., & CHEN, B. (2016). Effects of cerium on as-cast microstructure of AZ91 magnesium alloy under different solidification rates. *Journal of Rare Earths*, 34(7), 736–741. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60085-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60085-6)
- Carpenter, J. A., Jackman, J., Li, N., Osborne, R. J., Powell, B. R., & Sklad, P. (n.d.). *Automotive Mg Research and Development in North America*. <http://www.scientific.net>
- Chen, T. J., Jiang, X. D., Ma, Y., Wang, R. Q., & Hao, Y. (2011). Grain refinement of AZ91D magnesium alloy by MgCO₃. *Materials Research*, 14(1), 124–133. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000017>
- Chen, T. J., Wang, R. Q., Huang, H. J., Ma, Y., & Hao, Y. (2012). Grain refining technique of AM60B magnesium alloy by MgCO₃. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(7), 1533–1539. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61352-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61352-6)
- De Cicco, M., Konishi, H., Cao, G., Choi, H. S., Turng, L. S., Perepezko, J. H., Kou, S., Lakes, R., & Li, X. (2009). Strong, ductile magnesium-zinc nanocomposites. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 40(12), 3038–3045. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0013-0>
- Distribution, F. O. R. (n.d.). *A NORTH AMERICAN AUTOMOTIVE STRATEGIC VISION FOR MAGNESIUM M A G N E S I U M V I S I O N 2 0 2 0 :*
- Esmaily, M., Svensson, J. E., Fajardo, S., Biribilis, N., Frankel, G. S., Virtanen, S., Arrabal, R., Thomas, S., & Johansson, L. G. (2017). Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion. In *Progress in Materials Science*. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.011>
- Fu, H. M., Qiu, D., Zhang, M. X., Wang, H., Kelly, P. M., & Taylor, J. A. (2008). The development of a new grain refiner for magnesium alloys using the edge-to-edge model. *Journal of Alloys and Compounds*. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.076>
- James, M., Kihui, J. M., Rading, G. O., & Kimotho, J. K. (2011). Use of magnesium alloys in optimizing the weight of automobile: Current trends and opportunities. *Sustainable Research and Innovation Conference Proceedings*, 3, 4–6.
- Jiang, B., Qiu, D., Zhang, M. X., Ding, P. D., & Gao, L. (2010). A new approach to grain refinement of an Mg-Li-Al cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 492(1–2), 95–98. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.066>
- Jiang, Z., Jiang, B., Yang, H., Yang, Q., & Dai, J. (2015). *In fl uence of the Al 2 Ca phase on microstructure and mechanical properties of Mg e Al e Ca alloys*. 647, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.060>
- Jiang, Z., Jiang, B., Zhang, J., Xia, X., & Pan, F. (2015). *Microstructural Evolution of Mg-4Al-2 . 5Ca Alloy during Solidification*. 816, 486–491. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.816.486>
- Jun, J. H., Park, B. K., Kim, J. M., Kim, K. T., & Jung, W. J. (2005). Effects of Ca addition on microstructure and mechanical properties of Mg-RE-Zn casting alloy. *Magnesium - Science, Technology and Applications*, 488–489, 107–110. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.107>
- Kainer, K. U. (2007). *Magnesium : proceedings of the 7th International Conference Magnesium Alloys and their Applications*. Wiley-VCH.
- Kardys, G. (2017a). *Magnesium Car Parts : A Far Reach for Manufacturers? Part 1*.
- Kardys, G. (2017b). *Magnesium Car Parts: Cost Factors (Part 2)*.
- Kawamura, Y. (2010). *Not journal Article Japan Technology : Ultralight Magnesium Alloy*. 28–29.
- Kojima, Y. (2001). Project of platform science and technology for advanced magnesium alloys. In *Materials*

- Transactions* (Vol. 42, Issue 7, pp. 1154–1159).
- Krisnawan, A. U. (2009). *Karakterisasi Sampel Paduan Magnesium AZ91D dengan berbagai Variasi waktu Milling Menggunakan XRF dan XRD*.
- Lee, Y. C., Dahle, A. K., & Stjohn, D. H. (2000). The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 31(11), 2895–2906. <https://doi.org/10.1007/BF02830349>
- Liu, S. F., Li, B., Wang, X. H., Su, W., & Han, H. (2009). Refinement effect of cerium, calcium and strontium in AZ91 magnesium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 3999–4004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.020>
- Lv, B., Peng, J., Peng, Y., & Tang, A. (2013). The effect of addition of Nd and Ce on the microstructure and mechanical properties of ZM21 Mg alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(1), 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.02.011>
- Mayer Kuts. (2006). *Material and Mechanical Design “Mechanical Engineer’s Handbook.”* John Willey & Sons, Inc.
- Mordike, B. L., & Ebert, T. (2001). Magnesium Properties - applications - potential. *Materials Science and Engineering A*, 302(1), 37–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(00\)01351-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)01351-4)
- Motegi, T. (2005). *Grain-refining mechanisms of superheat-treatment of and carbon addition to Mg – Al – Zn alloys.* 414, 408–411. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.214>
- Nie, K., Kang, X., Deng, K., Wang, T., & Guo, Y. (2018). *Effect of SiC Nanoparticles on Hot Deformation Behavior and Processing Maps of Magnesium Alloy AZ91.* <https://doi.org/10.3390/nano8020082>
- Ning, Z., Cao, P., Wang, H., Sun, J., & Liu, D. (2007). Effect of Cooling Conditions on Grain Size of AZ91 Alloy. *J. Mater. Sci. Technol*, 23(5).
- Ninomiya, R., Ojiro, T., Kubota, K., & Mining, M. (1995). *IMPROVED HEAT RESISTANCE OF Mg-Al ALLOYS BY THE Ca ADDITION Mg-3Al Mg-3Al Mg-6Al Mg-6Al Mg-9Al Mg-9Al.* 43(2).
- Nordlien, J. H., Ono, S., Masuko, N., & Nisancioglu, K. (1997). A tem investigation of naturally formed oxide films on pure magnesium. *Corrosion Science*, 39(8), 1397–1414. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(97\)00037-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(97)00037-1)
- Pan., Y., Liu., X. and Yang, H. (2007). Sr Microalloying for Refining Grain Size of AZ91D Magnesium Alloy. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science, Edition 22*, pp 74-76.
- Pan, Y., Liu, X., & Yang, H. (2005). Role of C and Fe in Grain Refinement of an AZ63B Magnesium Alloy by Al-C Master Alloy. *J. Mater. Sci. Technol*, 21(6).
- Qian, M., Stjohn, D. H., & Frost, M. T. (2003). Zirconium Alloying and Grain Refinement of Magnesium alloys. *Magnesium Technology 2003, October*, 209–214. <https://drive.google.com/open?id=0B0fTxDBXtHZMWmRPVlg1WVJLODQ>
- Qingchun, X., Jing, Z., Haicheng, P., Lina, H., & Rongde, L. (2011). Effects of scandium and zirconium combination alloying on as-cast microstructure and mechanical properties of Al-4Cu-1.5Mg alloy. In *China Foundry* (Vol. 8, Issue 1, pp. 137–140).
- Qudong, W., Wenzhou, C., Xiaoqin, Z., & Yizhen, L. U. (2001). *Effects of Ca addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91magnesium alloy.* 6, 3035–3040.
- Ramachandran, T. R., Sharma, P. K., & Balasubramanian, K. (2008). Grain refinement of light alloys. *68th World Foundry Congress*, 189–193. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957972949&partnerID=tZ0tx3y1>
- Rokhlin, L. L., Dobatkina, T. V., Nikitina, N. I., & Tarytina, I. E. (2009). Calcium-alloyed magnesium alloys. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(3–4), 164–169. <https://doi.org/10.1007/s11041-009-9127-7>
- Rokhlin, L. L., Nikitina, N. I., & Volchenkova, V. A. (2006). Magnesium-rich Mg-Al₂Ca alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2006(2), 185–188. <https://doi.org/10.1134/S0036029506020157>
- Rzychoń, T., & Kielbus, a. (2006). Effect of rare earth elements on the microstructure of Mg-Al alloys. *Manufacturing Engineering*, 17(1), 149–152.
- Saha, P., & Dissertation, A. (2010). *AN ANALYSIS OF THE GRAIN REFINEMENT OF MAGNESIUM BY ZIRCONIUM.*
- Song, C., Han, Q., & Zhai, Q. (2009). Review of grain refinement methods for as-cast microstructure of magnesium alloy. In *China Foundry* (Vol. 6, Issue 2, pp. 93–103).
- Song, G.-L. (2011). Corrosion electrochemistry of magnesium (Mg) and its alloys. In *Corrosion of Magnesium Alloys*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857091413.1.3>
- Tushadi. (1990). *Analisa Penyebaran dolomit di Indonesia.*
- USAMP. (2006). *Magnesium Vision 2020: A North American Automotive Strategic Vision for Magnesium.*
- Vinotha, D., Raghukandan, K., Pillai, U. T. S., & Pai, B. C. (2009). Grain refining mechanisms in magnesium alloys - An overview. In *Transactions of the Indian Institute of Metals*. <https://doi.org/10.1007/s12666-009-0088-8>
- Wang, Y., Zeng, X. and Ding, W. (2006). Effect of Al-4Ti-5B Master Alloy on the Grain Refinement of AZ31 Magnesium Alloy. *Scripta Materialia*, 54, pp 269-273.

- Wang, Z., Kang, Y., Dong, W., Zhao, H., Liu, J. and Xu, Y. (2005). Study of Grain Refinement and SiC Nanoparticle Reinforced Magnesium Alloy. *Material Science Forum*, 488–489, 889–892.
- Watarai, H. (2006). Trend of Research and Development for Magnesium Alloys-Reducing the Weight of Structural Materials in Motor Vehicles. *Science & Technology Trends, Quarterly*(2), 84–97.
- Wu, G., Fan, Y., Gao, H., Zhai, C., & Zhu, Y. P. (2005). The effect of Ca and rare earth elements on the microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AZ91D. *Materials Science and Engineering A*, 408(1–2), 255–263. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.011>
- Xue, F., Du, W., Sun, Y., & Science, M. (2005). *Microstructure Refinement of Magnesium Based Alloy*. 489, 143–146. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.488-489.143>
- YANG, M. bo, PAN, F. sheng, SHEN, J., & BAI, L. (2009). Comparison of Sb and Sr on modification and refinement of Mg₂Si phase in AZ61-0.7Si magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 19(2), 287–292. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60266-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60266-6)
- Yang, Z., Li, J. P., Zhang, J. X., Lorimer, G. W., & Robson, J. (2008). Review on Research and Development of Magnesium Alloys. *Acta Metall. Sin.(Engl. Lett)*, 21(5), 313–328. [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(08\)60054-X](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(08)60054-X)
- Yano, E., Tamura, Y., Motegi, T., & Sato, E. (2003). Effect of Carbon Powder on Grain Refinement of an AZ91E Magnesium Alloy * 1. *Materials Transaction*, 44 No 1, 107 to 110.
- You, S., Huang, Y., Kainer, K. U., & Hort, N. (2017). Recent research and developments on wrought magnesium alloys. In *Journal of Magnesium and Alloys*. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.09.001>
- Zhao, Z., Chen, Q., Wang, Y., & Shu, D. (2009). *Microstructures and mechanical properties of AZ91D alloys with Y addition*. 515, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.03.030>
- Zhiyong, Y., Yuhua, Z., Weili, C., Jinshan, Z., & Yinghui, W. (2012). Effect of Cu addition on microstructure and properties of Mg-10Zn-5Al-0.1 Sb high zinc magnesium alloy. *Research & Development*, 41(February), 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.036>