

PENGARUH PENAMBAHAN *IRON MILL-SCALE* DAN TEMBAGA SEBAGAI MATERIAL PELAT BIPOLAR

Nisya Ulmiah dan Fitri Suryani Arsyad

Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Sriwijaya Palembang, Sumatera Selatan
Email: nisya.ulmiah94@gmail.com

Deni Shidqi Khaerudini

Pusat Penelitian Fisika, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia

ABSTRACT

Bipolar plate is an important component of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), which provides fuel and oxidant to reactive sites, collect produced current, and mechanical support for the cell in the stacks. This study concerns to find the optimum composition and sintering temperature of iron mill-scale in matrix aluminium as bipolar plate material. This work firstly carried out by downsizing aluminium flake from scrap into powder using high energy milling for 120 min and treated the iron mill-scale at 300 and 1000 °C for 60 min. The waste aluminium powder, after sieving of 150 mesh, was mixing with iron mill-scale containing 30 to 50 vol.% using shaker mill for 10 min. The mixed powders were then pressed 300 MPa and sintered with temperature of 500-600 °C for 60 min and flowed with N₂ gas. The structural changes, physical, and mechanical properties of the sintered sample were studied by optical micrograph, density, porosity, hardness Vickers, and electrical conductivity test. The result showed that the optimum composition Fe is 40 vol. % and sinter temperature is 550 °C. Conductivity value of 45.406 S/cm and hardness 183.96 HV hasn't meet expectation. Cu added containing 4-10 vol. % Fe aims to improve physical properties composites as bipolar plate material PEMFC. The result showed Cu 4 vol. % Fe can increase conductivity value 64.481 S/cm and hardness 340.13 HV.

Keywords: *Aluminium Flake Powder; Bipolar Plates; Composite; Iron Mill-Scale.*

ABSTRAK

Pelat bipolar merupakan komponen utama PEMFC yang mensuplai bahan bakar dan oksidan ke *reactive sites*, mengumpulkan arus yang dihasilkan, dan sebagai penguat susunan sel bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh komposisi dan temperatur sintering dari *iron mill-scale* dalam matriks aluminium yang optimum sebagai material pelat bipolar. Pertama, dilakukan proses *downsizing* aluminium flake dari bentuk serpihan menjadi serbuk menggunakan *high energy milling* selama 120 menit dan *iron mill-scale* di-*treatment* dengan disinter pada temperatur 300 dan 1000°C selama 60 menit. Serbuk aluminium yang sudah diperkecil ukurannya diayak sampai ukuran 150 mesh, kemudian di-*mixing* dengan komposisi *iron mill scale* 30-50 vol.% menggunakan *shaker mill* selama 10 menit. Selanjutnya serbuk dicetak dengan tekanan 300 MPa dan disinter pada temperatur 500-600°C selama 60 menit dengan dialiri gas N₂. Perubahan struktur, sifat fisik, dan sifat mekanik dari sampel diamati dengan dilakukan *optical micrograph*, uji densitas, porositas, uji kekerasan, dan uji konduktivitas listrik. Hasil menunjukkan penambahan Fe optimum sebesar 40 vol. % dan temperatur sinter optimum 550 °C. Hasil uji konduktivitas listrik 45.406 S/cm dan kekerasan 183.96 HV belum memenuhi standar. Cu ditambahkan 4-10 vol.% Fe dengan tujuan untuk meningkatkan sifat fisik material pelat bipolar

PEMFC. Hasil menunjukkan penambahan Cu 4 vol. % Fe dapat meningkatkan nilai konduktivitas komposit sebesar 64.481 S/cm dan kekerasan 340.13 HV.

Kata Kunci: *Aluminium Flake Powder; Bipolar Plates; Composite; Iron Mill-Scale.*

PENGANTAR

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) merupakan jenis *fuel cell* yang dapat mengkonversi hidrogen dan oksigen menjadi air secara bersamaan menghasilkan energi listrik dan panas. Karakteristik PEMFC seperti memiliki efisiensi tinggi, kerapatan daya tinggi, *startup* yang cepat, sistem ketahanan yang baik, serta dapat bekerja pada temperatur rendah (60-80°C) (Karimi dkk, 2012; Yi dkk, 2012; Joo dkk, 2008) sehingga menjadi daya tarik peneliti untuk mengembangkannya lebih lanjut.

Permasalahan yang sering terjadi adalah mahalnya biaya produksi dalam pembuatan PEMFC. Salah satu faktor penyebab tingginya biaya produksi adalah pelat bipolar yang beratnya 60-80% berat keseluruhan dan 30-45% biaya keseluruhan (Wang dan Northwood, 2007; Shen dkk, 2007; Khaerudini dkk, 2017). Pelat bipolar merupakan bagian internal dari PEMFC yang berfungsi sebagai konduktor arus antara sel, saluran untuk aliran gas reaktan seperti hidrogen dan oksigen serta sebagai penguat (*backbone*) susunan sel bahan bakar (Antunes dkk, 2010). Pelat bipolar yang lebih ringan, volume lebih kecil serta biaya yang rendah untuk dapat diproduksi secara massal dan dapat dikomersilkan perlu dikembangkan.

Logam merupakan kandidat yang baik untuk aplikasi pelat bipolar (Cunningham, 2007; Mawdsley dkk, 2013). Karakteristik logam seperti konduktivitas listrik tinggi, impermeabilitas gas, sifat mekanik yang baik, dan dapat direduksi menjadi submilimeter, sehingga memungkinkan desain *stack fuel cell* untuk mengurangi volume dan berat (Oladoye dkk, 2014). Bahan logam yang banyak digunakan sebagai pelat bipolar adalah *stainless steel* dan aluminium paduan. Satu kesatuan PEMFC terdiri atas 740 pelat bipolar, aluminium paduan 65% lebih ringan dibanding *stainless steel* dan berpotensi mereduksi berat

total dari *stack fuel cell* (Baig dkk, 2015). Hal tersebut yang mendasari tulisan ini, di mana penelitian ini ditujukan untuk membuat pelat bipolar yang ringan berbasis material logam. Biaya produksi menjadi lebih murah dilakukan dengan memanfaatkan bahan limbah, yaitu serbuk aluminium yang berasal dari limbah *frame* berbentuk *shaving* yang diperkecil ukurannya menjadi serbuk dengan metode *milling* dan *mill scale* yang berasal dari limbah industri yang masih memiliki kandungan besi yang cukup tinggi sekitar 74% Fe (Nugroho dkk, 2014). Penambahan logam Fe (99.99%) ke dalam matriks aluminium telah banyak dilakukan (Baig dkk, 2015; Mahmoud dkk, 2016). Umumnya penambahan logam Fe ke dalam matriks aluminium bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik dan fisis komposit. Paduan Al-Fe telah banyak dilakukan karena sifat Fe yang rendah difusi sehingga adanya Fe dalam matriks aluminium membuat mikrostruktur paduan stabil. Fe membentuk fasa kedua/*intermetallics* yang membuat mikrostruktur dari paduan lebih stabil dan meningkatkan ketahanan paduan agar tidak mudah rapuh saat temperatur tinggi (Baig dkk, 2015; Heinzl dkk, 2009). Teknik pencampuran Al-Fe adalah menggunakan metode *milling* yang cenderung meningkatkan *solubility limit* Fe dalam matriks Al serta mengubah mikrostruktur partikel menjadi ukuran nanometer dan bersifat *intermetallics*.

Pemanfaatan bahan limbah sebagai material pelat bipolar PEMFC tentunya akan mempengaruhi sifat mekanik dan elektrik dari komposit dibanding dengan menggunakan material murni. Karakteristik limbah *mill scale* seperti tidak mudah meledak, tidak mudah terbakar, tidak bereaksi dengan air, dan tidak korosif sangat menguntungkan jika diaplikasikan sebagai material pelat bipolar (Nugroho dkk, 2014). Akan tetapi, permasalahannya adalah nilai konduktivitas elektrik dari limbah *mill scale* belum memenuhi standar sehingga perlu ditambahkan material lain sebagai doping di dalam Fe untuk meningkatkan sifat elektrik komposit keseluruhan. Pada penelitian ini, tembaga/Cu 99.5% akan ditambahkan sebagai doping

dalam komposit Al-Fe. Penambahan Cu dilakukan dengan pertimbangan bahwa logam Cu memiliki konduktivitas listrik dan termal yang baik dan memiliki ketahanan terhadap korosi (Pratama dan Widyastuti, 2012). Hal ini disebabkan Cu tidak bereaksi dengan air, tetapi bereaksi dengan oksigen di udara membentuk lapisan coklat-hitam tembaga oksida dan menghambat terjadinya korosi pada komposit (Pratama dan Widyastuti, 2012). Oleh karena itu, diharapkan dengan ditambahkan Cu akan meningkatkan sifat elektrik dari komposit Al-Fe. Limbah *frame* dengan kandungan aluminium sebesar 95.8% dalam bentuk *shaving* diperkecil ukurannya menjadi 150 mesh menggunakan alat *high energy milling* dengan kecepatan *milling* 750 rpm selama 120 menit. Perbandingan bola terhadap banyak serbuk (BPR) adalah 5.24 : 1. Untuk menghindari terjadinya aglomerasi akibat adanya penyebaran panas dari *ball mill* ke serbuk yang tidak merata, serbuk digerus dengan perbandingan waktu ON-OFF adalah 1 : 3. *Iron mill-scale* digerus untuk menghasilkan serbuk ukuran 150 mesh, serbuk diberikan perlakuan awal dengan dipanaskan pada temperatur 300°C selama 60 menit dengan di aliri gas *inert*, kemudian serbuk Fe ditambahkan karbon sebanyak 1% dari total Fe kemudian *dimilling* selama 10 detik dengan perbandingan bola terhadap banyak serbuk 1 : 1 gram. Serbuk Fe+C tersebut disinter kembali pada temperatur 1000°C selama 60 menit dengan di aliri gas *inert* untuk menghindari adanya oksidasi. Pemberian perlakuan awal dengan tujuan untuk menghilangkan pengotor (oli, minyak, debu) yang kemungkinan masih tertinggal dalam serbuk *mill scale*. Penambahan karbon diharapkan dapat mengikat oksida yang ada di dalam serbuk *mill scale* sehingga munculnya fase logam Fe meningkat.

Limbah *iron mill scale* yang telah *di-treatment* berperan sebagai *reinforcement* ditambahkan ke matriks aluminium dengan variasi 30, 40, dan 50 vol.%. Proses *mixing* Al-Fe dilakukan selama 10 menit menggunakan *shaker mill* dengan BPR 5.24: 1. Setelah proses *mixing*, sampel dicetak menggunakan cetakan berdiameter 1 cm dengan lama waktu tahan

pencetakan selama 1 menit dan tekanan sebesar 300 MPa. Kemudian sampel disinter dengan variasi temperatur sinter 500, 550, dan 600°C dengan waktu tahan 60 menit dan dialiri gas N_2 .

Setelah dihasilkan komposisi penambahan Fe optimal, ditambahkan logam Cu (99.5%) sebanyak 4, 6, 8, dan 10 vol % Fe. Al-Fe-Cu selanjutnya di-*mixing* selama 10 menit menggunakan *shaker mill* dengan BPR 5.24 : 1. Sampel dicetak dengan diameter 1 cm dengan tekanan 300 MPa selama 1 menit. Selanjutnya sampel disinter pada temperatur sinter optimal selama 60 menit dan dialiri gas N_2 .

Penambahan serbuk limbah *iron mill scale* dan Cu diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanik dan fisik material pelat bipolar. Pengujian sampel harus dilakukan sebagai tolak ukur seberapa besar pengaruh yang diberikan. Pengujian yang dilakukan berupa konduktivitas listrik, densitas, porositas, dan kekerasan.

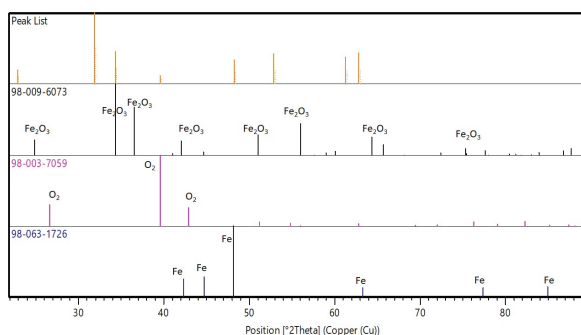
Pengujian konduktivitas listrik menggunakan metode *through-plane* (ZBT Duisburg, Jerman). Uji densitas serta porositas dilakukan sesuai dengan prosedur yang mengacu pada ASTM C20. Kemudian dilakukan juga uji kekerasan menggunakan alat *Microhardness Vickers Tester* (LM 100 AT, Leco Microhardness). Metode uji kekerasan adalah dengan menggunakan vickers yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan mekanik pada material pelat bipolar tersebut. Selanjutnya, mikrostruktur sampel diamati dengan alat *Image Analyzer (optical microscope)* untuk menganalisa permukaan material dan melihat perubahan struktur dari komposit. Uji XRD (Rigaku Smartlab) dilakukan untuk mengamati perubahan fase yang terjadi setelah perlakuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil XRD Serbuk *Mill Scale*

Gambar 1 menunjukkan kandungan serbuk *mill scale* yang telah diberikan perlakuan awal dan penambahan karbon. Dari gambar terlihat bahwa setelah disinter pada temperatur 1000°C, muncul fase hematit (Fe_2O_3) dan Dioxygen (O_2), fase logam Fe terdeteksi berada pada sudut (2θ) 42.303°, 44.716°, 48.145°, 63.244°,

77.363°, dan 84.926°. Berdasarkan data XRD, *peak* tertinggi yang dimiliki logam Fe berada pada sudut 48.145° dengan indeks Miller berada pada bidang hkl (011).



Gambar 1.
Pola XRD untuk serbuk *mill scale* dengan perlakuan awal

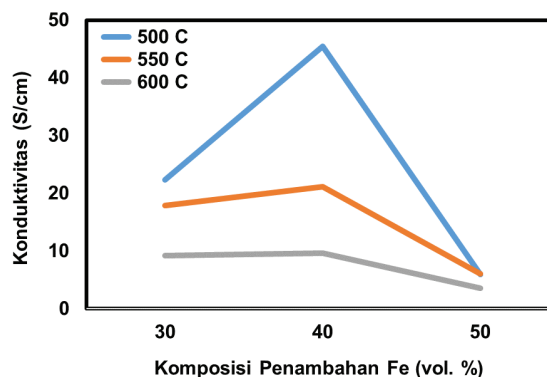
Analisa Pengaruh Penambahan Komposisi Fe terhadap Nilai Konduktivitas Listrik

Performa suatu komposit sangat dipengaruhi oleh jenis material penyusun dan komposisi dari *reinforcement* komposit tersebut. Untuk meningkatkan sifat mekanik dan elektrik material komposit berbasis logam aluminium agar dapat memenuhi standar US DoE (*department of energy*) dilakukan penambahan serbuk Fe ke dalam matriks Al sehingga menjadi komposit Al-Fe. Komposisi penambahan Fe ke dalam matriks Al divariasikan yaitu 30, 40, dan 50 vol. %.

Gambar 2 adalah grafik hasil pengujian konduktivitas komposit Al-Fe menggunakan *through-plane*. Dari gambar terlihat ketika penambahan Fe sebanyak 30 dan 40% ke dalam matriks Al dapat meningkatkan nilai konduktivitas komposit. Tetapi pada penambahan Fe 50% nilai konduktivitas kompositnya justru menurun.

Hariyanto dkk, (2011) menyatakan bahwa semakin banyak jumlah Fe yang ditambahkan ke dalam suatu matriks akan menurunkan daya hantar listrik komposit tersebut. Logam Fe merupakan konduktivitas termal yang baik (Khaerudini dkk, 2017) dibanding aluminium. Sehingga ketika Al dan Fe dipanaskan pada temperatur tertentu, Al akan lebih cepat untuk

meleleh dan menguap serta membentuk lapisan oksida yang menghambat proses difusi antar atom Al dan Fe. Semakin banyak penambahan Fe ke dalam matriks akan menurunkan daya hantar listrik komposit.



Gambar 2.
Grafik konduktivitas listrik komposit Al-Fe

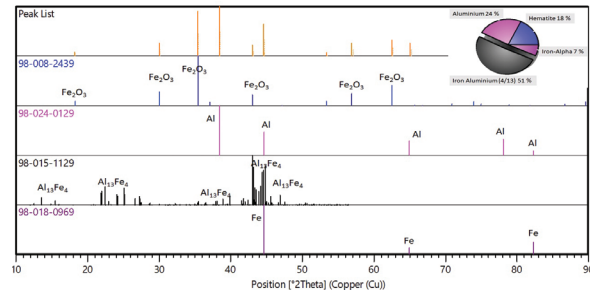
Pada komposisi penambahan Fe 40%, nilai konduktivitas yang paling tinggi merupakan komposisi optimum untuk penambahan Fe ke dalam matriks Al. Hal ini disebabkan karena pada komposisi ini terbentuk ikatan antara atom-atom Al dan Fe. Gambar 3 menunjukkan pola XRD untuk komposisi penambahan Fe 40%. Dari gambar terlihat bahwa pada komposisi Fe 40% terbentuk fase kristal baru Al₁₃Fe₄. Fase kristal Al₁₃Fe₄ dengan *peak* tertinggi pada sudut (2θ) 43.018° dengan indeks Miller berada pada bidang hkl (620).

Analisa Pengaruh Perubahan Temperatur terhadap Nilai Konduktivitas Listrik

Nilai konduktivitas listrik suatu komposit juga dipengaruhi oleh adanya perubahan temperatur. Gambar 2 menunjukkan bahwa seiring dengan bertambahnya temperatur sintering mengakibatkan nilai konduktivitas komposit menurun. Penurunan nilai konduktivitas ini disebabkan karena partikel Al dan Fe saling bertumbukan satu sama lain seiring bertambahnya temperatur sintering.

Pada bahan logam terdapat banyak elektron bebas yang mengangkut muatan baik dalam konduksi listrik dan konduksi termal

(Gundara, 2017). Dengan adanya perubahan temperatur, elektron-elektron dalam material akan bergetar dan saling bertumbukan. Ketika temperatur dinaikkan, getaran elektron semakin besar akibatnya ada tumbukan antar elektron sehingga menghalangi penyimpangan elektron dan akhirnya menghalangi arus untuk melintas (Khaerudini dkk, 2017). Hal ini menyebabkan nilai konduktivitas listrik komposit Al-Fe menurun seiring dengan bertambahnya temperatur sintering.



Gambar 3
Pola XRD fase-fase yang terbentuk ketika penambahan Fe 40%

Tabel 1
Hasil uji karakterisasi

Temperatur Sintiring (°C)	Sampel Fe (vol.%)	Konduktivitas (S/cm)	Densitas (gram/cm ³)		Porositas (%)	Kekerasan (HV)
			Dimensi	ASTM C20		
500	30	22.345	3.512	1.488	2.68	158.98
	40	45.406	3.046	1.494	2.15	183.96
	50	5.954	3.310	1.464	4.25	158.39
550	30	17.857	3.195	1.420	1.81	152.67
	40	21.107	3.247	1.472	1.57	221.30
	50	6.048	3.426	1.468	2.71	145.17
600	30	9.181	3.190	1.441	3.55	126.97
	40	9.630	3.263	1.451	2.36	140.89
	50	3.590	3.006	1.437	7.00	109.59

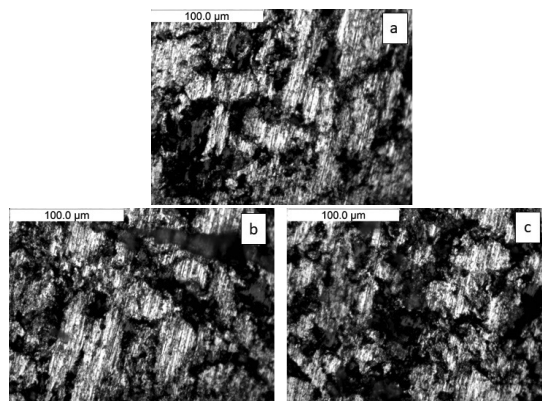
Porositas Komposit Al-Fe

Porositas suatu material dipengaruhi oleh bentuk dari pori dan hubungan antar pori tersebut (Susanto dkk, 2017; Anovitz dan Cole, 2015). Tabel 1 menunjukkan hasil persentase uji porositas pada setiap variasi temperatur sintering. Porositas dari komposit saat penambahan Fe 40% menurun, tetapi dengan bertambahnya komposisi Fe menjadi 50% porositas meningkat kembali. Oleh karena itu, secara garis besar dapat kita simpulkan bahwa semakin tingginya suatu temperatur sintering dan komposisi penambahan Fe ke dalam matriks Al, porositas dari komposit akan semakin meningkat. Meningkatnya persentase porositas menandai bahwa ukuran pori dalam komposit semakin besar yang menyebabkan berkurangnya kepadatan dari material yang berikatan. Porositas dapat membentuk jarak antar partikel Al dan Fe bertambah, sehingga atom-atom memiliki *gap* yang lebih lebar dan konduktivitas menurun.

Porositas Fe 50% terus meningkat seiring dengan bertambahnya temperatur sintering. Gambar 4 (a-c) menunjukkan hasil OM Fe 50% pada setiap temperatur sintering. Dari gambar terlihat ketika temperatur sinter dinaikkan berpotensi meningkatkan porositas dengan ukuran pori beragam. Meningkatnya porositas tersebut diakibatkan Al yang meleleh dan menguap sehingga membentuk *void-void* kosong. *Void-void* kosong inilah yang disebut pori dengan ukuran diameter dan bentuk beragam. Bentuk dari pori tidak selalu bulat, tetapi dapat berupa *irregular* dengan diameter yang lebar. Semakin besar diameter pori yang terbentuk, maka luas area kontak material akan semakin jauh akibat adanya jarak antarpartikel.

Anovitz dan Cole (2015) menyatakan bahwa karakteristik yang mempengaruhi padatan berpori adalah luas permukaan spesifik, ukuran pori rata-rata, dan distribusi dari ukuran pori itu sendiri. Berdasarkan hasil pengujian, dihasilkan nilai porositas yang paling kecil berada pada temperatur 550°C, ini

menunjukkan distribusi persebaran pori besar dan kecil pada permukaan sampel seimbang sehingga dapat disimpulkan pada temperatur 550°C merupakan temperatur ideal untuk komposit Al-Fe dari bahan limbah. Sedangkan pada temperatur sintering 500°C diameter pori yang dominan adalah pori kecil dan pada temperatur sintering 600°C diameter pori yang dominan adalah pori besar.



Gambar 4 Hasil OM Fe 50% pada temperatur sinter (a) 500, (b) 550, dan (c) 600°C.

Densitas Komposit Al-Fe

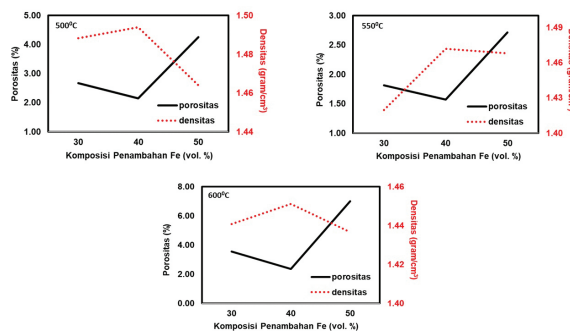
Tabel 2 menunjukkan densitas RoM yaitu saat semua material komposit dalam keadaan optimal. Seiring dengan bertambahnya komposisi Fe dalam matriks Al densitas akan semakin meningkat karena dalam komposit Fe dominan.

Tabel 2
Densitas RoM (*Rule of Mixture*) Al-Fe

Komposisi Al (%)	Komposisi Fe (%)	Densitas (gram/cm ³)
70	30	4.154
60	40	4.537
50	50	4.921

Hasil pengujian komposit Al-Fe yang mengacu pada ASTM C20 ditunjukkan pada Tabel 1. Ketika penambahan Fe 40% densitas meningkat, tetapi penambahan 50% densitas menurun untuk setiap variasi temperatur sintering. Hal ini disebabkan oleh Fe yang merupakan konduksi termal yang baik sehingga berkontribusi memberikan panas tambahan kepada Al agar lebih cepat

meleleh dan menguap sehingga kepadatan komposit semakin menurun. Semakin banyak penambahan Fe di dalam komposit logam aluminium menyebabkan aluminium semakin cepat meleleh dan menguap ketika disinter pada temperatur tinggi.

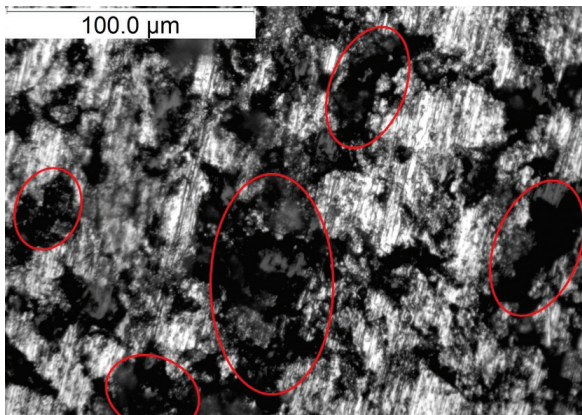


Gambar 5 Grafik porositas-densitas penambahan komposisi Fe pada setiap temperatur sinter

Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara densitas dan porositas komposit Al-Fe berbanding terbalik, semakin tinggi densitas maka porositasnya semakin kecil karena tingkat kepadatan material meningkat. Pada penelitian ini, penambahan Fe 50% yang disinter pada temperatur 600°C memiliki nilai porositas paling tinggi yaitu mencapai 7% yang menandakan bahwa jumlah pori di dalam komposit Al-Fe dengan penambahan Fe 50 % paling banyak.

Gambar 6 hasil OM menunjukkan pori yang terbentuk saat penambahan Fe 50% dan temperatur sinter 600°C. Dapat dilihat bahwa pori yang terbentuk sangat besar dan penyebarannya merata dipermukaan komposit, terbentuknya pori tersebut akibat dari Al yang meleleh dan menguap karena Al sudah mendekati titik lelehnya dan ditambah dengan adanya panas yang diberikan oleh Fe sehingga mempercepat Al untuk meleleh kemudian menguap dan menimbulkan pori.

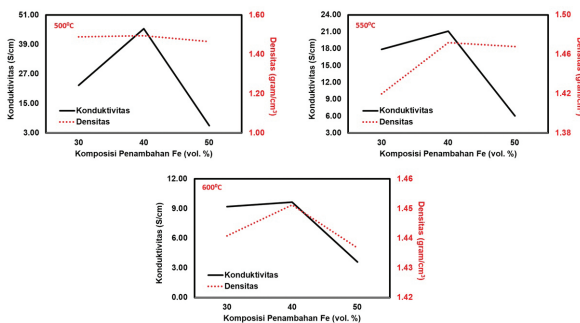
Berdasarkan Tabel 1 dapat kita lihat bahwa dengan menurunnya densitas pada komposisi penambahan Fe 50% juga akan mempengaruhi nilai konduktivitas material, hal ini ditandai dengan konduktivitas komposit yang ikut menurun. Menurut Khaerudini dkk bahwa semakin tinggi tingkat kepadatan



Gambar 6

Porositas pada komposisi penambahan Fe 50% dan temperatur 600°C.

suatu material, semakin tinggi juga tingkat kemampuan material untuk menghantarkan arus listrik (Khaerudini dkk, 2017). Atom-atom yang berkumpul untuk membentuk suatu padatan, elektron valensi nya akan saling berinteraksi (Muhriz dkk, 2011). Elektron valensi dari atom membentuk pita energi yang lebar ketika mereka membentuk padatan. Pita energi ini dipisahkan oleh suatu *gap* (Abdullah, 2008). Untuk melewati *gap* tersebut elektron membutuhkan energi yang bergantung pada jauh dan dekatnya jarak pita valensi ke pita konduksi (Abdullah, 2008). Semakin tinggi tingkat kepadatan suatu material, jarak antara pita valensi ke pita konduksi semakin dekat dan energi yang dibutuhkan untuk melewati *gap* semakin kecil sehingga mempermudah elektron pembawa muatan listrik untuk menghantarkan arus.



Gambar 7

Grafik konduktivitas-densitas penambahan Fe pada setiap temperatur sinter.

Gambar 7 menunjukkan grafik konduktivitas-densitas komposisi penambahan Fe pada setiap temperatur sinter. Densitas komposit Al-Fe menurun seiring dengan semakin banyaknya penambahan Fe ke dalam matriks Al. Hal ini juga mengakibatkan konduktivitas material menurun karena elektron pembawa muatan sulit untuk melewati *gap* antara pita valensi ke pita konduksi.

Kekerasan Komposit Al-Fe

Hal yang mempengaruhi kekerasan adalah tingkat kerapatan dan struktur sel material (Javier dkk, 2014). Selain itu, perubahan temperatur juga sangat mempengaruhi kekerasan material (Khaerudini dkk, 2017). Adanya perubahan temperatur akan menyebabkan terjadinya perubahan struktur butiran material. Pada penelitian ini, semakin tinggi temperatur yang diberikan saat perlakuan panas maka kekerasan akan semakin berkurang. Pada temperatur komposit Al-Fe rendah, tingkat kekerasan material cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya komposisi Fe di dalam matriks. Struktur butir komposit akan cenderung merapat sehingga tidak ada ruang kosong yang terjadi, molekul akan sulit untuk bergerak dan berdeformasi. Pada temperatur sintering tinggi, struktur butir yang dimiliki oleh komposit Al-Fe akan merenggang dan cenderung untuk terlepas ikatannya sehingga akan menyebabkan material semakin lunak dan mudah dibentuk.

Lapisan atom antara Al dan Fe juga dihalangi oleh batas butir. Dengan kata lain, lapisan atom antara satu dengan lainnya dihalangi oleh batas butir karena baris atom tidak tersusun teratur dan rapat. Semakin banyak batas butir akan menyebabkan logam menjadi lebih keras (Javier dkk, 2014). Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa ketika Fe 40% pada temperatur sinter 550°C, kekerasan komposit paling besar yaitu 221.30 HV. Hal ini menunjukkan bahwa pada komposisi Fe 40% ini terbentuk banyak batas butir sehingga kekerasan meningkat.

Penambahan (Doping) Cu pada Komposit Al-Fe

Setelah didapatkan komposisi Al-Fe yang optimal, didapati hasil uji konduktivitas listrik belum memenuhi standar DoE. Untuk meningkatkan sifat elektrik dari komposit akan ditambahkan logam Cu, dengan pertimbangan Cu memiliki konduktivitas listrik dan termal yang baik dan tahan terhadap korosi, hal ini disebabkan Cu tidak bereaksi dengan air, tetapi akan bereaksi dengan oksigen di udara membentuk lapisan coklat-hitam tembaga oksida. Lapisan oksida ini juga dapat menghambat terjadinya korosi pada komposit.

Berdasarkan hasil sebelumnya komposisi penambahan Fe yang optimal adalah sebanyak 40% dan temperatur optimal nya pada 550°C,

maka logam Cu akan ditambahkan ke dalam komposit dengan variasi penambahannya sebesar 4, 6, 8, dan 10 vol.% ke dalam matriks Fe. Material Al-(Fe+doping Cu) akan melalui proses pabrikasi yang selanjutnya dilakukan proses pengujian sampel yaitu berupa konduktivitas listrik, densitas, porositas, dan kekerasan.

Tabel 3 menunjukkan densitas RoM Al-(Fe+doping Cu) yaitu tingkat kepadatan material ketika dalam keadaan optimal menunjukkan semakin banyak penambahan logam Cu akan meningkatkan densitas komposit. Untuk membuat agar bahan material yang digunakan dalam keadaan optimal amatlah sulit mengingat bahan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bahan limbah.

Tabel 3
Densitas RoM (*Rule of Mixture*) Al-(Fe+doping Cu)

Komposisi Al (%)	Komposisi Fe (%)	Komposisi Cu (%)	Densitas (gram/cm ³)
60	36	4	4.622
60	34	6	4.665
60	32	8	4.707
60	30	10	4.750

Tabel 4 hasil uji karakterisasi menunjukkan bahwa dengan menambahkan logam Cu terbukti dapat meningkatkan nilai konduktivitas. Selain itu, kekerasan juga meningkat yang ditandai dengan meningkatnya nilai hasil uji kekerasan. Densitas dimensi dan praktikal (mengacu ASTM C20) menunjukkan semakin banyak

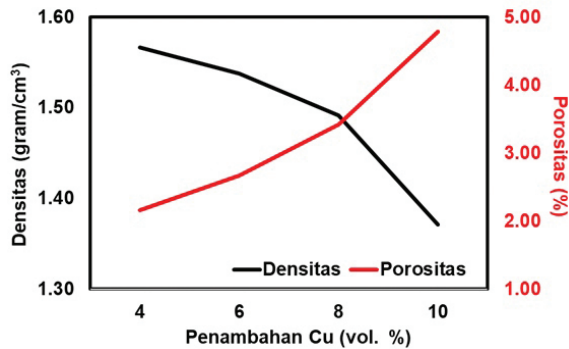
penambahan logam Cu ke dalam komposit akan menurunkan tingkat kepadatan material dan meningkatkan porositas. Sehingga secara umum, berdasarkan penelitian ini komposisi penambahan Cu 4 vol. % Fe ke dalam matriks Al adalah yang paling optimum.

Tabel 4
Hasil uji karakterisasi penambahan Cu

Sampel Cu (vol.%)	Konduktivitas (S/cm)	Densitas (gram/cm ³)		Porositas (%)	Kekerasan (HV)
		Dimensi	ASTM C20		
4	64.481	3.371	1.567	2.166	340.13
6	57.306	2.991	1.538	2.669	336.97
8	52.771	2.966	1.494	3.425	322.05
10	26.970	2.291	1.371	4.784	164.20

Hubungan antara densitas dan porositas komposit Al-(Fe+doping Cu) berbanding terbalik, semakin besar tingkat kepadatan komposit maka porositas semakin kecil, begitu

pun sebaliknya. Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa semakin banyak penambahan logam Cu, densitas komposit semakin menurun dan porositas meningkat.

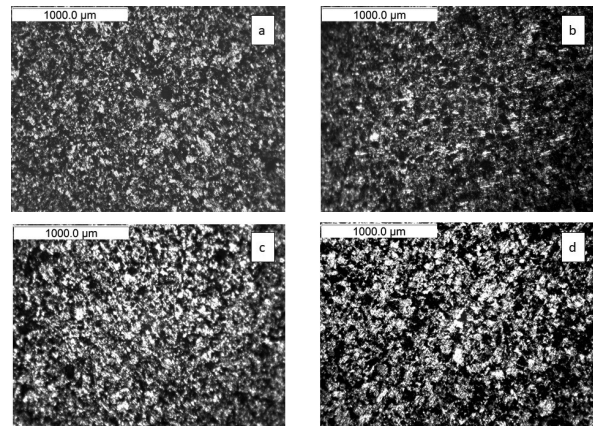


Gambar 8

Densitas-porositas penambahan Cu dalam komposit Al-Fe.

Berdasarkan hasil OM yang dapat dilihat pada Gambar 9, semakin banyak penambahan doping logam Cu ke dalam *reinforcement* Fe akan meningkatkan porositas komposit. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran pori dari komposit semakin besar dan tingkat kepadatan dari material yang berikatan berkurang. Porositas yang terbentuk menyebabkan jarak antarpartikel bertambah, sehingga atom-atom akan memiliki *gap* antara pita valensi dan pita konduksi menjadi lebar. Melebarnya *gap* antaratom tersebut mengakibatkan konduktivitas menurun karena elektron pembawa muatan sulit untuk melewati *gap* antara pita valensi ke pita konduksi. Hal ini ditandai pada penambahan Cu 10 vol. % Fe densitas komposit sebesar 1.371 gram/cm³ yang menunjukkan bahwa jarak antarpartikel merenggang dan menimbulkan banyak pori yang ditandai dengan nilai porositas komposit sebesar 4.784%. Densitas dan porositas akan mempengaruhi konduktivitas listrik sehingga menurun menjadi 26.970 S/cm dan kekerasan juga menurun menjadi 164.20 HV.

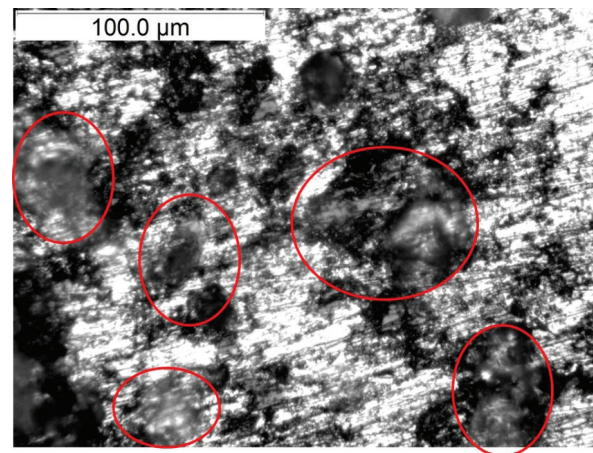
Pada Gambar 10 dapat kita lihat hasil OM yang menunjukkan porositas dari penambahan Cu 10 vol.% Fe, terlihat pada komposit ukuran porinya besar dan adanya udara terperangkap dalam komposit. Menurut Javier dkk, (2014), jika pori memiliki udara yang terperangkap, maka akan mempengaruhi laju pengurangan pori. Terperangkapnya udara di dalam komposit Al-Fe ini akan menimbulkan banyak *void* dan laju pengurangan poros berkurang mengakibatkan tingkat kekerasan



Gambar 9

Hasil OM penambahan Cu (a) 4, (b) 6, (c) 8, dan (d) 10 vol. % Fe

komposit Al-Fe menurun yang berdampak pada ketahanan komposit dalam menahan beban dari luar ikut menurun. Selain itu *void* dalam komposit akan membentuk cacat yang dapat mengurangi tingkat kesolidan ikatan antara matriks dan *reinforcement*, menurunkan kekuatan geser interlamina serta menginisiasi terjadinya retakan lebih lanjut (Gundara, 2017).



Gambar 10

Hasil OM yang menunjukkan adanya udara yang terperangkap pada poros komposit dengan jumlah penambahan Cu 10 vol. % Fe

SIMPULAN

Berdasarkan data hasil karakterisasi Al-Fe menunjukkan bahwa penambahan Fe optimum sebesar 40 vol.% dan temperatur sinter optimum 550°C. Berdasarkan data konduktivitas, densitas, porositas, dan

kekerasan temperatur sinter ideal berada pada temperatur 550°C. Nilai konduktivitas tertinggi yaitu 45.406 S/cm pada komposisi penambahan limbah *iron mill-scale* optimum dan belum memenuhi standar DoE. Untuk meningkatkan sifat fisik dari material pelat bipolar PEMFC, logam Cu ditambahkan dengan variasi 4-10 vol.% Fe. Hasilnya menunjukkan bahwa melalui penambahan Cu sebanyak 4 vol. % Fe dapat meningkatkan nilai konduktivitas komposit dari 45.406 S/cm menjadi 64.481 S/cm dan kekerasan komposit juga meningkat dari 221.30 HV menjadi 340.13 HV. Hal ini membuktikan dengan menambahkan logam Cu ke dalam komposit Al-Fe dapat meningkatkan konduktivitas dan kekerasan, tetapi masih perlu untuk dioptimalkan lebih lanjut supaya memenuhi standar sebagai material pelat bipolar PEMFC.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih ditujukan kepada para peneliti Kelompok Penelitian *Fuel Cell and Hydrogen Technology*, Pusat Penelitian Fisika - LIPI atas dukungan fasilitas penelitian dan alat uji. Kami juga ucapkan banyak terima kasih atas bantuan teknis dalam penggunaan alat proses kepada saudara Ilham Chanif.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, M. 2008. Nanosains dan Naoteknologi. FMIPA Institut Teknologi Bandung.

Anovitz, L.M. dan D.R. Cole, 2015. Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 80 (1): 61-164.

Antunes, R.A., M.C.L. Oliveira, G. Ett, dan V. Ett. 2010. Corrosion of Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 3632-3647.

Baig, M., H.R. Ammar, dan A.H. Seikh. 2015. Thermo-Mechanical Respons of Nanocrystline Al-Fe Alloy Processed Using Mechanical Alloying and High Frequency Heat Induction Sintering.

Material Science & Engineering. 655: 132-141.

Cunningham, B. 2007. The development of compression moldable polymer composite bipolar plates for fuel cells. *Thesis*, Virginia: Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.

Gundara, G. 2017. Analisis Sifat Fisis dan Mekanis Komposit Serat Gelas Berlapis. *FT-UHAMKA*, 2: 2502-8782.

Hariyanto, M.L., H. Setiawati, S. Ilmiah, L. Mabruroh, A. Aliyatulmuna, Dan A. Fansuri. 2011. Pengaruh Komposisi Fe Terhadap Konduktivitas Ion Oksigen Pada Oksida Perovskit $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_{3-\delta}$. *Prosiding Seminar Nasional Kimia Unesa*. ISBN : 978-979-028-378-7.

Heinzel, A., F. Mahlendorf, dan C. Jansen. 2009. *Bipolar Plates*. Germany: University of Duisburg-Esse, Duisburg.

Javier, M., A. Cores, I.R. Bustina, R.F. Verdeja, J.I. Robla, dan F.G. Carcedo, 2014. "Iron Ore Sintering part 2. Quality Indices and Productivity. *Dyne*. 81 (183): 168-177.

Joo, S. H., H. I. Lee, dan D. J. You. 2008. Ordered mesoporous carbons with controlled particle sizes as catalyst supports for direct methanol fuel cell cathodes. *Carbon*, 46 (15) : 2034-2045.

Karimi, S., N. Fraser, B. Roberts, dan F.R. Foulkes. 2012. A Review of Metallic Bipolar Plates for Exchange Membrane Fuel Cells: Materials and Fabrication Methods. *Advances in Materials Science and Engineering*. 1: 22.

Khaerudini, D.S., G.B. Prakoso, D.R. Insiyanda, H. Widodo, dan N. Indiyarningsih. 2017. Effect of graphite addition into mill scale waste as potential bipolar plates material of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Physics*.

- Mahmoud, M.R.I. dan M.M. Tash, 2016. Characterization of Aluminum-Based-Surface Matrix Composites with Iron and Iron Oxide Fabricated by Friction Stir Processing. *Materials*. 9 (505).
- Mawdsley, J.R., J.D. Carter, X. Wang, S. Niyogi, C.Q. Fan, R. Koc, dan G. Osterhout. 2013. Composite-coated aluminium bipolar plates for PEM fuel cells. *Journal of Power Sources*. 231: 106-112.
- Muhriz, M., Subagio, A., dan Pardoyo. 2011. Pembuatan Zeolit Nanopartikel dengan Metode High Energy Milling (HEM). *Jurnal Sains dan Matematika*. Vol 19 (1) : 11-17.
- Nugroho, R., F. Suryanto, P.N. Rahardjo, T. Hernaningsih, Ikbali, Wiharja, dan T.A. Adibroto. 2014. *Laporan Tahunan (ANNUAL REPORT) 2014 Program Pengkajian dan Penerapan Teknologi Lingkungan*. Tangerang Selatan: Pusat Teknologi Lingkungan, Kedeputian Teknologi Pengembangan Sumberdaya Alam, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Oladoye, A.M., Carton, J.G. Carton, dan A.G. Olabi. 2014. Evaluation of CoBlast Coated Titanium Alloy as Proton Exchange Membrane Fuel Cells Bipolar plates. *Journal of Materials*, 1: 10.
- Pratama, F.B. dan Widyastuti. 2012. Pengaruh Penambahan Ni, Cu dan Al dan Waktu Milling pada *Mechanical Alloying* Terhadap Sifat Absorpsi dan Desorpsi Mg sebagai Material Penyimpan Hidrogen. *Jurnal Teknik ITS*. 1 (2012) : 97-101.
- Shen, C., M. Pan, Z. Hua, dan R. Yuan. 2007. Aluminate cement/graphite conductive composite bipolar plate for proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*. 166 (2) : 419-423.
- Susanto, R. Pradiantika, dan T.C.M. Bolle. 2017. Sintesis Nanomaterial Magnetit-Sitrat dan Pengujian Aplikasinya Sebagai Adsorben Emas (III). *Jurnal Tekno-Sains*. 6(2): 124-125.
- Wang, Y. dan D.O. Northwood. 2007. Effects of O₂ and H₂ on the corrosion of SS316L metallic bipolar plate materials in simulated anode and cathode environments of PEM fuel cells. *Electrochimica Acta*. 52(24) : 6793-6798.
- Yi, Peiyun., Peng, Linfa., Lai, Xinmin., Li, Mutian., dan Ni, Jun. 2012. Investigation of Sintered Stainless Steel Fiber Felt as Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 37: 11334-11344.