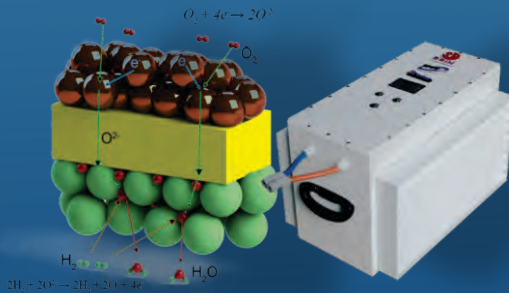




ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET BIDANG TEKNIK MATERIAL

PENGEMBANGAN KERAMIK MAJU BERBASIS LOGAM TANAH JARANG UNTUK *FUEL CELL* DAN BATERAI SEBAGAI ENERGI YANG RAMAH LINGKUNGAN



OLEH:
JAROT RAHARJO

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
JAKARTA, 26 OKTOBER 2022

PENGEMBANGAN KERAMIK MAJU
BERBASIS LOGAM TANAH JARANG
UNTUK *FUEL CELL* DAN BATERAI
SEBAGAI ENERGI YANG RAMAH
LINGKUNGAN

Diterbitkan pertama pada 2022 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG TEKNIK MATERIAL**

**PENGEMBANGAN KERAMIK MAJU
BERBASIS LOGAM TANAH JARANG
UNTUK *FUEL CELL* DAN BATERAI
SEBAGAI ENERGI YANG RAMAH
LINGKUNGAN**

**OLEH:
JAROT RAHARJO**

**BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
JAKARTA, 26 OKTOBER 2022**

© 2022 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Material Maju

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pengembangan Keramik Maju Berbasis Logam Tanah Jarang untuk *Fuel Cell* dan Baterai sebagai Energi yang Ramah Lingkungan/Jarot Raharjo–Jakarta: Penerbit BRIN, 2022.

xi + 60 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8052-03-5 (cetak)
978-623-8052-04-2 (e-book)

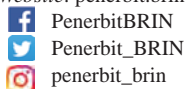
- | | |
|-----------------------|---------------------------------|
| 1. Teknologi material | 2. Keramik maju |
| 3. Logam tanah jarang | 4. <i>Solid oxide fuel cell</i> |
| 5. Baterai | |

666

Copy editor : Sarah Fairuz
Proofreader : Mayasuri Presilla & Dhevi E.I.R. Mahelingga
Penata Isi : Dhevi E.I.R. Mahelingga
Desainer Sampul : S. Imam Setyawan
Cetakan Pertama : Oktober 2022



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id



BIODATA RINGKAS



Jarot Raharjo, lahir di Yogyakarta pada tanggal 15 Maret 1971 adalah anak kesepuluh dari sepuluh bersaudara dari Bapak H. Soedardjo Hardjo Prasonto (alm.) dan Ibu Hj. Soemartini (almh.). Menikah dengan Lisa Paras Setyowati, S.H., M.Kn. dan dikarunai satu orang anak, yaitu Raditya Arsa Pradana.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 3/M tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022 diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 1 Oktober 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala BRIN Nomor 299/I/HK/2022, tanggal 6 Oktober 2022 tentang Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Keputran VII Yogyakarta tahun 1983, Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 IKIP Yogyakarta tahun 1986, dan Sekolah Menengah Atas BOPKRI 1 Yogyakarta tahun 1989. Memperoleh gelar Sarjana Teknik Kimia dari Universitas Pembangunan Nasional (UPN) Yogyakarta tahun 1994, gelar *Master of Science* dari Universitas Indonesia (UI) tahun 2001, dan gelar *Doctor of Philosophy in Chemical and Process Engineering* dari Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) tahun 2012.

Mengikuti beberapa pelatihan antara lain: *Tailor made course on advances materials for fuel cells application* di University of Delaware, USA (2016), *Tailor made course on fuel cell technology* di Imperial College London, UK (2015), *Southeast*

Asia International Joint Research and Training Program-Low carbon green energy and environmental green technology for sustainable environmental development di National Tsing Hua University, Taiwan (2014), *Training on thermo gravimetry analysis* di Lyon, Perancis (2013), *Heat treatment and metal finishing for improvement metal properties* di JICA CBIC, Nagoya Jepang (2002), Sertifikasi Auditor Teknologi oleh Badan Nasional Sertifikasi Profesi (2019), dan *Certified International Research Reviewer (CIRR)* oleh Quantum HRM (2019).

Mulai bekerja di BPPT sejak tahun 1995 sebagai staf Dit. Pengkajian Sarana Industri, Deputi Bidang Pengkajian Industri. Tahun 1998–2021 sebagai staf Pusat Teknologi Material (PTM) dan mulai September 2021 sampai sekarang sebagai staf Pusat Riset Material Maju, BRIN. Diangkat pertama kali dalam jabatan fungsional peneliti sebagai Peneliti Muda III/c tahun 2004, Peneliti Muda III/d tahun 2006, Peneliti Madya IV/a tahun 2012, Peneliti Madya IV/b tahun 2014, Peneliti Madya IV/c tahun 2017, dan Peneliti Utama IV/d tahun 2020.

Menghasilkan 62 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun berkolaborasi dengan penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 19 KTI ditulis dalam bahasa Indonesia dan 43 KTI dalam bahasa Inggris, serta menghasilkan dua paten terdaftar.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti dan perekayasa di Pusat Teknologi Material BPPT; pembimbing skripsi S-1 di UI, ITS, ITB, UNJ, UIN Jakarta, dan Surya University; pembimbing tesis S-2 di UI dan ITS; pembimbing disertasi S-3 di Universiti Kebangsaan Malaysia; dan penguji disertasi S-3 di UNDIP.

Aktif dalam organisasi ilmiah, yaitu sebagai sekretaris umum Perhimpunan Indonesian Fuel Cell and Hydrogen

Energy (IFHE), sebagai anggota Perhimpunan Periset Indonesia (PPI), Materials Research Society Indonesia, dan Badan Kejuruan Kimia Persatuan Insinyur Indonesia (PII).

Menerima tanda Penghargaan Satyalancana Karya Satya X (2006), Karya Satya XX (2016), dan Satyalancana Wirakarya (2015) dari Presiden Republik Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	v
PRAKATA PENGUKUHAN	xi
I. PENDAHULUAN	1
II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI KERAMIK MAJU UNTUK <i>LOW-INTERMEDIATE TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELL</i> DAN BATERAI.....	5
2.1 Perkembangan Material <i>Low Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell</i> Masa Lalu, Masa Kini, dan Masa Depan.....	5
2.2 Perkembangan Material Baterai <i>Fast Charging</i> Masa Lalu, Masa Kini, dan Masa Depan	9
III. RISET KERAMIK MAJU UNTUK <i>LOW-INTERMEDIATE TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELL</i> DAN BATERAI.....	13
3.1 Riset Material Elektrolit, Elektroda, dan Teknik Fabrikasi untuk <i>Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell</i>	13
3.2. Riset Material untuk <i>Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell</i> dan Baterai Berbasis Logam Tanah Jarang Indonesia.....	18
IV. PELUANG PENGEMBANGAN DAN PEMANFAATAN LOGAM TANAH JARANG INDONESIA SEBAGAI BAHAN KERAMIK MAJU	25
4.1. Pengembangan dan Pemanfaatan Logam Tanah Jarang di Indonesia serta Arah Kebijakan.....	25
4.2. Pengembangan dan Penerapan Teknologi <i>Fuel Cell</i> dan Baterai untuk Teknologi Rendah Karbon	27
V. KESIMPULAN.....	29
VI. PENUTUP.....	30
UCAPAN TERIMAKASIH.....	32
DAFTAR PUSTAKA.....	34
LAMPIRAN.....	43
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	44
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	54

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrohmaanirrohiim,

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera dan salam sehat untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang mulia, Kepala BRIN yang terhormat, dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama, marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt., atas segala rahmat, karunia, serta dengan izin-Nya lah pada kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi Pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, serta dengan segala kerendahan hati perkenankanlah saya menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

**“PENGEMBANGAN KERAMIK MAJU BERBASIS
LOGAM TANAH JARANG UNTUK *FUEL CELL*
DAN BATERAI SEBAGAI ENERGI YANG RAMAH
LINGKUNGAN”**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan perjanjian Paris tahun 2016, Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) menjadi 29% di tahun 2030 dengan usaha sendiri atau sebesar 41% dengan bantuan internasional. Sektor energi diharapkan dapat mengurangi GRK sebesar 314–398 juta ton CO₂ pada tahun 2030 melalui pengembangan energi baru terbarukan (EBT), penerapan efisiensi energi, konservasi energi, serta penerapan teknologi energi bersih. Pemerintah telah menetapkan target EBT, yaitu 23% dalam bauran energi nasional pada tahun 2025 dan menjadi 31% pada tahun 2050¹. Peraturan Menteri ESDM No. 16 Tahun 2020 menyatakan bahwa target tingkat komponen dalam negeri (TKDN) untuk subsektor energi baru terbarukan dan konservasi energi (EBTKE) mencapai 55,45%. Dalam mendukung mengembangkan EBTKE dengan TKDN maksimal, kegiatan penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan (litbangjirap) teknologi material menjadi salah satu kunci.

Indonesia memiliki mineral logam tanah jarang (LTJ) yang belum dimanfaatkan secara optimal. Salah satu sumber LTJ adalah pasir monasit yang tersebar di Bangka-Belitung, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua dengan total potensi sekitar 1,5 miliar ton². Permintaan LTJ meningkat setiap tahun dengan pertumbuhan 4,17%–7,12%, atau sekitar 5.000 ton–7.500 ton. Permintaan LTJ dunia pada tahun 2040 diperkirakan mencapai 315 ribu ton. Indonesia menyuplai sekitar 6%–8% total permintaan dunia dari limbah pengolahan timah yang mengandung pasir monasit (*slag*). Jika pemrosesan LTJ dilakukan dari hulu penambangan mineral, Indonesia diperkirakan mampu memenuhi 24%–25% permintaan dunia. LTJ sangat diperlukan sebagai bahan keramik maju (*advanced ceramics*) untuk

pengembangan EBT dan teknologi energi bersih, seperti magnet permanen pada penggerak generator listrik tenaga angin, *solar cell*, baterai, dan *fuel cell*^{3,4}. LTJ juga banyak digunakan untuk komponen elektronik, seperti sensor^{5,6,7} dan *phosphor display*⁸. Pemanfaatan LTJ di masa yang akan datang diharapkan dapat menghasilkan material bernilai tambah tinggi yang dapat memacu pertumbuhan industri baru di berbagai bidang, seperti energi dan elektronika.

LTJ, seperti serium, gadolinium, dan lantanum menjadi bahan utama dalam pengembangan produk keramik maju untuk aplikasi teknologi energi bersih, seperti *fuel cell* dan baterai. Keramik maju merupakan keramik berkinerja tinggi yang mengombinasikan pengendalian kimiawi dan sengaja (*by design*) dirancang mikrostrukturnya sehingga dihasilkan bahan yang memiliki sifat unik, seperti stabil pada suhu tinggi dan konduktivitas ionik yang tinggi⁹.

Fuel cell adalah alat konversi energi yang mengubah bahan bakar gas atau cairan secara elektrokimia untuk menghasilkan listrik secara langsung dengan hasil samping berupa air dan panas. *Fuel cell* lebih efisien daripada mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*), memiliki *energy density* yang tinggi, dan ramah lingkungan³. *Solid oxide fuel cell* (SOFC, sel bahan bakar oksida padatan) adalah jenis keramik *fuel cell* suhu tinggi yang berpotensi sebagai sistem pembangkit energi karena memiliki efisiensi pertukaran energi tinggi (65%) dan tidak menggunakan katalis platinum yang mahal seperti pada *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFC)¹⁰. Suhu operasi yang tinggi akan mempengaruhi bahan yang digunakan dalam SOFC, seperti sifat termal mekanis, daya tahan, biaya tinggi, dan kesulitan dalam pemilihan bahan¹¹. Fokus riset SOFC saat ini adalah penurunan suhu operasi rendah-menengah (<800°C, low-

intermediate temperature SOFC, LT-IT SOFC). Penurunan suhu umumnya mengakibatkan penurunan kinerja sel SOFC. Hal ini menjadi tantangan dan peluang bagi peneliti dan industri untuk mencari solusi. Riset dilakukan dalam usaha mengembangkan bahan elektrolit dan elektroda yang dapat beroperasi pada suhu lebih rendah dengan performa elektrokimia yang baik. LTJ berperan penting dalam rekayasa material untuk LT-IT SOFC^{3,12}. Berbagai teknik proses dan fabrikasi elektrolit serta elektroda juga perlu dikembangkan^{2,13}.

Salah satu komponen yang tidak dapat dipisahkan dari kebutuhan energi listrik adalah perangkat penyimpan energi (baterai). Salah satu baterai isi ulang yang paling dominan saat ini adalah baterai ion-litium (*lithium-ion battery*, LiB). Pemerintah telah menerbitkan Peraturan Presiden RI Nomor 55 tahun 2019 tentang Percepatan Program Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB) untuk transportasi jalan sehingga pasar KBLBB di Indonesia akan berkembang pesat. Salah satu tantangan pengembangan baterai dalam kendaraan listrik adalah keamanan pengguna dan waktu pengisian daya yang lebih lama¹⁴. Anoda LiB menggunakan grafit karena memiliki nilai kapasitas tinggi (372 mAh/g), namun pada pengisian daya yang lebih cepat, muncul kekhawatiran dari segi keamanan karena grafit memiliki tegangan operasi yang terlalu rendah mendekati tegangan *lithium plating*¹⁵. Alternatif material anoda LiB berbasis LTJ adalah *lithium lanthanum titanate* (LLTO) karena memiliki sifat pseudo-kapasitif yang sesuai digunakan untuk aplikasi pengisian daya yang cepat dan juga menyimpan energi spesifik yang tinggi¹⁶.

Kegiatan riset material SOFC dan baterai yang dilakukan memiliki kontribusi signifikan dalam menjawab tantangan penguasaan teknologi maju berbasis LTJ dalam menghasilkan

material keramik maju yang bernilai tambah tinggi dengan memanfaatkan LTJ yang diolah di dalam negeri (LTJ Indonesia) sehingga dapat memacu pertumbuhan industri hilir secara bertahap, seperti pada aplikasi SOFC dan baterai¹⁷. Pengembangan teknologi aplikasi LTJ ini diharapkan juga dapat mendukung program pemerintah dalam memenuhi *net zero emission* pada tahun 2060 melalui penerapan teknologi energi bersih.

Pada bagian awal orasi ini akan disampaikan tentang perkembangan material *fuel cell* dan baterai. Pada bab berikutnya akan disampaikan hasil riset keramik maju untuk LT-IT SOFC dan baterai. Selanjutnya, akan disampaikan peluang pengembangan dan pemanfaatan LTJ Indonesia sebagai bahan keramik maju. Orasi ini akan diakhiri dengan kesimpulan dan penutup.

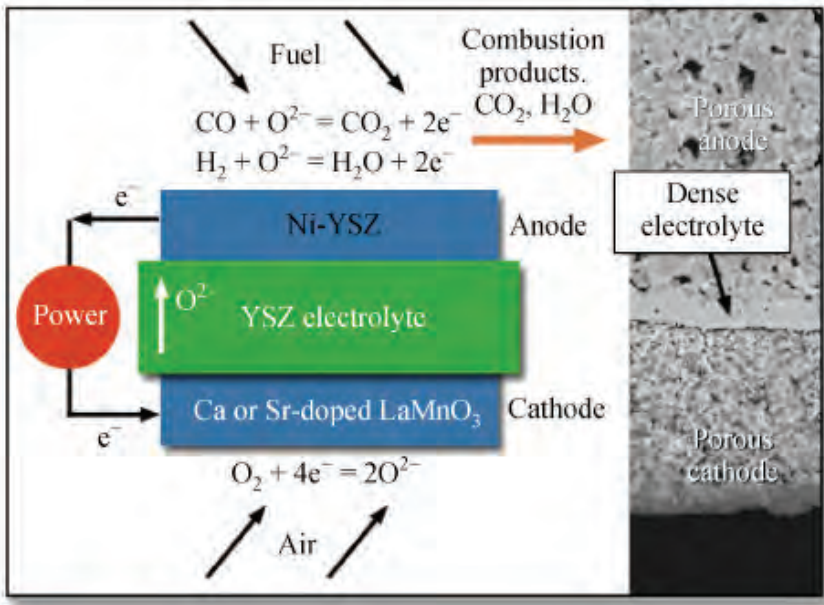
II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI KERAMIK MAJU UNTUK *LOW-INTERMEDIATE TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELL* DAN BATERAI

Material LTJ terdiri dari 17 unsur dalam tabel periodik unsur kimia. 15 unsur merupakan golongan lantanida, ditambah 2 unsur lainnya yaitu *scandium* (Sc) dan *yttrium* (Y)¹⁷. LTJ akan menjadi kunci masa depan dunia karena mineral ini sangat dibutuhkan dalam teknologi modern. LTJ mempunyai ciri istimewa, yaitu mampu bereaksi dengan unsur lain untuk menghasilkan senyawa yang baru¹². LTJ, seperti “vitamin” material, dengan ditambahkan dalam jumlah sedikit ke dalam material awal dapat meningkatkan karakteristiknya¹⁸. LTJ diketahui dapat meningkatkan karakteristik material pada teknologi konversi energi dan penyimpanan energi. Beberapa aplikasi yang efektif dari LTJ adalah untuk SOFC dan baterai^{19,20}. Aplikasi ini menjadi lebih efisien karena sifat konduktivitas ionik, listrik, magnet, dan spektroskopi yang unik dari LTJ. Pada bab ini dijelaskan perkembangan material LT-IT SOFC dan baterai pada masa dulu, masa kini dan masa depan.

2.1 Perkembangan Material *Low Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell* Masa Lalu, Masa Kini, dan Masa Depan

Perhatian utama di dunia saat ini, terutama di bidang energi, diarahkan pada sumber energi yang bersih, efisien, dan tahan lama. SOFC adalah *fuel cell* yang efisien, terutama jika bekerja dengan kombinasi panas dan daya (*combine heat power*, CHP), dan memiliki fleksibilitas bahan bakar berupa gas, seperti H₂, CO, dan CH₄¹¹. Komponen utama SOFC berupa *sandwich* berbahan keramik maju, terdiri dari elektroda (anoda dan katoda) berpori, dipisahkan oleh elektrolit padat²¹.

Gambar 1 adalah diagram skema proses dan komponen sel SOFC. Pasokan bahan bakar berbasis hidrogen dan hidrokarbon diumpungkan ke sisi anoda, sedangkan udara disuplai ke sisi katoda. Kondisi operasional SOFC dapat mencapai 1.000°C. Reaksi elektrokimia dalam SOFC tergantung pada ion oksigen O^{2-} bermigrasi melalui kisi kristal, sementara ion hidrogen bermuatan positif H^+ mengalir pada anoda ketika oksigen melewati elektrolit untuk mengoksidasi bahan bakar pada bagian katoda. Oleh karena itu, daya listrik yang dihasilkan sebagai akibat dari elektron, bergerak dari anoda ke katoda di sirkuit¹¹.



Gambar 1. Diagram Skema Proses dan Komponen Sel SOFC¹¹

Material maju untuk SOFC pada masa lalu menggunakan elektrolit *Yttria Stabilized Zirconia* (YSZ) yang beroperasi pada suhu yang tinggi, yaitu 800–1.000°C (*high temperature solid*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

oxide fuel cell, HT-SOFC). Suhu operasi yang tinggi ini menjadi masalah utama dalam pengembangan SOFC. Pada suhu yang tinggi, isu utamanya adalah penurunan kinerja yang disebabkan oleh tingginya suhu oksidasi, korosi, dan transisi fasa komponen atau reaksi kimia dan ketidaksesuaian ekspansi termal antara komponen SOFC¹¹. Oleh karena itu, yang menjadikan perhatian utama adalah motivasi menurunkan suhu operasi SOFC menjadi menengah atau rendah (LT-IT SOFC, suhu operasi <800°C), yang memungkinkan penggunaan *interconnect* logam yang sebelumnya menggunakan bahan keramik sehingga dapat mengurangi biaya³. Dengan penurunan suhu operasi, resistansi polarisasi dari elektrolit dan elektroda naik secara signifikan sehubungan dengan sifat aktivasi termal pada proses dalam komponennya. Salah satu masalah utama dengan turunnya suhu operasi adalah *ohmic loss* pada elektrolit dan *polarization loss* elektroda²¹. Hal ini menjadi tantangan teknologi material pada LT-IT SOFC, khususnya tentang (1) strategi mendesain material baru dan mikrostruktur untuk setiap komponennya, (2) teknik meningkatkan konduktivitas ionik pada elektrolit dan elektroda yang sesuai, (3) nanoteknologi dan teknik fabrikasi komponennya, terutama untuk membuat lapisan tipis elektrolit²².

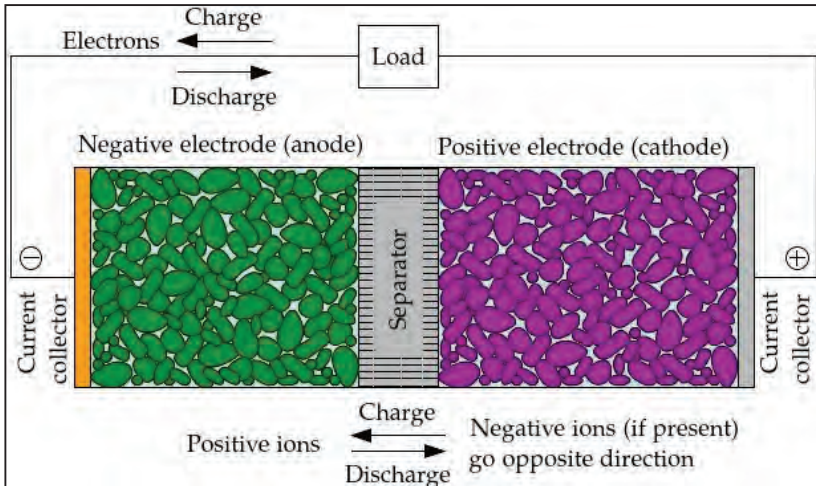
Material maju untuk SOFC pada masa kini adalah material yang dapat memberikan kinerja yang baik pada suhu operasi 600–800°C (*intermediate temperature solid oxide fuel cell*, IT-SOFC). Pada suhu ini, elektrolit YSZ yang digunakan dalam HT-SOFC tidak dapat menghasilkan konduktivitas yang cukup (lebih kecil dari 10^{-1} S.cm) sehingga pada IT-SOFC sistem elektrolit *gadolinium doped cerium* (GDC) atau *samarium doped cerium* (SDC) lebih banyak digunakan²¹. Pada IT-SOFC, kehilangan kinerja katalisis katoda yang cukup besar ditemukan telah terjadi dan menjadikan masalah utama untuk kinerja sistem ini²². Banyak penelitian IT-SOFC berfokus pada pengembangan

sistem material baru katoda untuk mengurangi hilangnya kinerja katalis katoda^{21,23}. Penggunaan SOFC terbatas pada kisaran suhu operasi IT-SOFC karena kurangnya sistem elektrolit yang dapat menghasilkan konduktivitas cukup untuk dapat menghasilkan output daya yang dapat diterima pada sistem (*low temperature solid oxide fuel cell*) LT-SOFC²¹. Kombinasi elektrolit IT-SOFC (GDC atau SDC) dengan fase konduktivitas proton (dari berbagai karbonat) telah dilaporkan menghasilkan peningkatan konduktivitas ionik pada elektrolit. Kinerja material tersebut untuk LT-SOFC menunjukkan peningkatan daya yang dihasilkan dapat dibandingkan dengan IT-SOFC yang dicapai pada kisaran suhu 400–600°C, dengan potensi bahkan dapat dioperasikan pada suhu operasi yang lebih rendah²⁴.

Material maju untuk SOFC pada masa depan diperlukan riset lebih lanjut dalam rangka mengoptimalkan performa material elektrolit dan elektroda supaya memiliki daya tahan dan stabil dalam jangka waktu yang panjang pada sistem LT-IT SOFC. *Doped-ceria* adalah pilihan terbaik untuk elektrolit LT-IT SOFC^{10,21}. Material anoda dan katoda untuk sistem LT-IT SOFC perlu dipikirkan yang sesuai dengan elektrolit *doped-ceria*. Sedangkan *perovskite lattice* material (ABO_3), seperti *lanthanum gallate* merupakan salah satu material yang menjanjikan karena menghasilkan karakteristik yang sesuai untuk LT-IT SOFC, namun harus dipikirkan kesesuaian dengan material pada komponen yang lain^{11,21}. Komposit elektrolit membran semikonduktor gabungan antara konduktor ionik (seperti *samarium doped cerium*) dan semikonduktor (seperti $CeO_{2-\delta}$ dan $SrTiO_3$) sangat menjanjikan untuk LT-SOFC²⁵. Mikro SOFC ke depan banyak dikembangkan karena dapat beroperasi pada suhu rendah²⁴. Selain itu, nanoteknologi dalam sintesis bahan SOFC dan lapisan tipis elektrolit SOFC diyakini menjadi salah satu hal yang penting untuk meningkatkan performa sel SOFC²⁴.

2.2 Perkembangan Material Baterai *Fast Charging* Masa Lalu, Masa Kini, dan Masa Depan

Baterai merupakan perangkat yang mampu mengonversi energi kimia menjadi energi listrik melalui reaksi reduksi-oksidasi (redoks). Baterai memiliki sejumlah komponen utama, seperti elektroda negatif (anoda), elektroda positif (katoda), elektrolit, pengoleksi arus (*current collector*), dan pemisah (*separator*) seperti pada Gambar 2. Gambar 2 memperlihatkan komponen utama penyusun sel baterai isi ulang (*rechargeable battery* atau *secondary battery*). Elektroda negatif menyalurkan elektron ke sirkuit eksternal dan kation ke elektroda positif melalui elektrolit selama proses pengosongan muatan listrik, sementara pada proses pengisian muatan listrik, elektroda ini menerima elektron dari sirkuit eksternal dan kation dari elektroda positif melalui elektrolit.



Gambar 2. Komponen Utama Penyusun Sel Baterai²⁶

Dalam 30 tahun terakhir, densitas baterai (Wh/kg) telah meningkat mengikuti tiga gelombang perkembangan teknologi

baterai, yaitu perkembangan baterai Ni-Cd pada tahun 1995 (dengan sekitar 70 Wh/kg), baterai Ni-MH tahun 2000 (~100 Wh/kg) dan gelombang ketiga dengan pengembangan baterai ion-litium pada tahun 2005 yang mencapai sekitar 200 Wh/kg. Kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*battery electric vehicle*, BEV) dapat mengemudi 150 km dalam sekali pengisian daya¹⁴, dengan densitas energi baterai saat ini.

Di antara berbagai teknologi baterai, baterai ion-litium telah menarik minat secara signifikan sebagai perangkat pendukung pada *Electric Vehicle Hybrid* (HEV), *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEV) dan *Electric Vehicle* (EV) karena memiliki densitas energi yang relatif tinggi (hingga 200 Wh/kg), efisiensi energi yang tinggi (lebih dari 95%), dan umur siklus yang panjang (3.000 siklus pada pengosongan 80%)²⁷. Karena densitas energi dan performa keamanan baterai ion-litium terus meningkat seiring dengan penurunan biayanya maka permintaan baterai ion-litium terus meningkat tidak hanya pada kendaraan listrik tetapi juga pada seluruh bidang komunikasi, tenaga listrik, dan pusat data. Oleh karena itu, baterai ion-litium merupakan baterai generasi selanjutnya (*next-generation*) sebagai sumber energi utama²⁸.

Material baterai ion-litium masa lalu menggunakan anoda grafit karena memiliki nilai kapasitas tinggi (372 mAh/g). Namun pada pengisian daya yang lebih cepat, muncul kekhawatiran dari segi keamanan karena grafit cenderung membuat lapisan *solid electrolyte interphase* (SEI) ketika proses pengisian daya cepat, yang dapat menyebabkan *short circuit* pada sistem¹⁵. Dengan demikian, anoda grafit tidak sesuai untuk aplikasi pada tingkat pengisian daya yang cepat.

Material baterai ion-litium masa kini dikembangkan dari senyawa berbasis titanat sebagai elektroda baterai ion-litium²⁹.

Keunggulan elektroda berbasis titanat adalah: (1) bebas dari presipitasi logam litium karena *platform* potensialnya yang tinggi; (2) tidak berbahaya dan relatif murah; (3) unggul dalam hal stabilitas termal sehingga menjamin keamanan kinerja tinggi baterai ion-litium; dan (4) memiliki ekspansi volumetrik yang kecil selama proses penyisipan/ekstraksi litium sehingga dapat mencapai siklus penggunaan yang panjang³⁰. Litium titanat, yaitu $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ spinel, telah menjadi senyawa berbasis titanat paling sukses untuk baterai ion-litium karena memiliki tingkat pengisian (*charging*)/pengosongan (*discharging*) muatan listrik yang tinggi, stabilitas termal yang tinggi dalam kondisi pengisian dan pengosongan muatan listrik yang tinggi, serta mampu beroperasi pada temperatur rendah²⁹. Namun, kelemahan utama litium titanat adalah konduktivitas elektronik rendah (10^{-12} – 10^{-13} S.cm⁻¹) dan koefisien difusi ionnya yang rendah sehingga menyebabkan kapasitas praktisnya buruk pada laju pengisian/pengosongan muatan listrik yang besar. Hal ini yang membatasi penggunaannya dalam aplikasi skala besar³¹. Selain itu, rasa kecemasan terhadap keamanannya dan waktu pengisiannya yang lama dibandingkan dengan pengisian bahan bakar konvensional sering dianggap sebagai salah satu masalah utama yang menghambat penggunaannya dalam kendaraan listrik secara luas. Hal demikian berkaitan dengan pengisian daya pada kecepatan tinggi menghasilkan pemanasan resistif yang dapat menyebabkan degradasi material sehingga terjadi penurunan kapasitas dan kemampuan daya baterai³².

Saat ini, litium lantanum titanat (*lithium lanthanum titanate*, LLTO) yang dikembangkan dengan formula $\text{Li}_{1-x}\text{La}_{2x}\text{TiO}_3$ (di mana x merupakan komposisi mol ion-litium berkisar $0 < x < 0,16$) merupakan material *perovskite* (ABO_3) yang bersifat konduktor superionik pada temperatur ruang. LLTO ($\text{Li}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{TiO}_3$) memiliki konduktivitas (σ) tinggi berkisar di

$10^{-3} - 10^{-5} \text{ Scm}^{-1}$ pada suhu kamar³³. Selain itu, ia juga memiliki lantanum yang berkontribusi untuk menjaga struktur kristal inang (*host*) dan stabilitas elektrokimia sebelum dan sesudah reaksi elektrokimia berlangsung³⁴. LLTO juga menampilkan reaksi pseudo-kapasitif yang memungkinkan proses penyimpanan dan pelepasan muatan listrik yang cepat dan peningkatan kapasitas penyimpanan energi sehingga memungkinkan kompromi antara kapasitas yang tinggi dan laju pengisian/pengosongan muatan listrik yang cepat pada kondisi optimal³⁰.

Material baterai ion-litium masa depan, LLTO, dapat sebagai baterai padat (*solid state battery*) ion-litium. LLTO bisa sebagai elektrolit dan anoda baterai ion-litium sehingga terdapat kemungkinan LLTO bisa digunakan sebagai elektrolit dan anoda dalam satu sistem baterai *solid state*^{20,29}. Sifatnya adalah superkonduktor ionik pada suhu kamar ($10^{-3} \text{ S.cm}^{-1}$) sehingga sangat aplikatif untuk pembuatan elektrolit padat dalam baterai ion-litium menggantikan elektrolit cair. Keuntungan baterai ion-litium yang menggunakan elektrolit padat adalah memiliki densitas energi yang lebih tinggi daripada elektrolit cair, tidak memiliki risiko ledakan atau kebakaran, dan tidak perlu memiliki komponen untuk mengontrol keamanan sehingga menghemat lebih banyak ruang dalam instalasinya³². Selain itu, sifatnya yang pseudo-kapasitif (sifat yang berada antara baterai dan kapasitor) membuat LLTO sangat aplikatif sebagai anoda baterai ion-litium yang bisa menghasilkan baterai yang bisa mencapai *specific energy* dan *charging rate* yang tinggi²⁰.

III. RISET KERAMIK MAJU UNTUK *LOW-INTERMEDIATE TEMPERATURE SOLID OXIDE FUEL CELL* DAN BATERAI

Pada bab ini dijelaskan riset keramik maju menggunakan bahan baku LTJ untuk LT-IT SOFC dan baterai. Pasir monasit hasil limbah pengolahan timah saat ini sudah bisa diolah menjadi REOH (*rare earth hydroxide*) dan REO₂ (*rare earth oxide*), seperti CeO₂, Gd₂O₃ dan La₂O₃³⁵. Oksida LTJ buatan Indonesia tersebut digunakan sebagai bahan baku riset keramik maju untuk aplikasi LT-IT SOFC dan baterai.

3.1 Riset Material Elektrolit, Elektroda, dan Teknik Fabrikasi untuk *Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*

Penurunan suhu operasi sel juga memerlukan modifikasi bahan elektrolit-elektroda yang sudah ada. Modifikasi ini sangat penting untuk dilakukan mengingat penurunan suhu operasi secara langsung menyebabkan penurunan kinerja karena reaksi kinetik kimia lebih lambat. Terdapat beberapa masalah penting saat memilih bahan dan membuat komponen SOFC. Reaktivitas antar lapisan, porositas, kapasitas pencampuran, dan *short circuit* elektrolit serta kesesuaian koefisien ekspansi termal di antara komponen SOFC adalah masalah yang harus ditanggapi dengan serius³. Pada bab ini diuraikan riset material terkini dan komponen kunci untuk LT-IT SOFC, dengan fokus kepada material, struktur, dan teknik fabrikasinya.

3.1.1 Riset Material Elektrolit *Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*

Elektrolit harus memiliki karakteristik transfer ionik yang cepat, stabilitas termodinamika pada berbagai suhu dan tekanan

oksigen parsial, memiliki koefisien ekspansi termal sesuai dengan elektroda dan komponen lainnya, serta sifat mekanik yang sesuai. Terdapat dua jenis bahan yang sering digunakan sebagai elektrolit tradisional SOFC, yaitu *yttria stabilized zirconia* (YSZ) untuk HT-SOFC dan serium terdoping (CeO_2) untuk IT-SOFC. Gadolinium dan samarium adalah unsur utama yang sering digunakan sebagai dopan serium, masing-masing disebut sebagai *gadolinium doped cerium* (GDC) dan *samarium doped cerium* (SDC). Selain jenis materialnya, nanomaterial dan nano teknologi dapat meningkatkan performa material SOFC²⁴.

Berbagai riset pengembangan material elektrolit untuk LT-IT SOFC sudah dilakukan, antara lain berbagai teknik sintesis elektrolit GDC untuk menghasilkan nanopartikel GDC dengan karakteristik yang sesuai. GDC yang disintesis menggunakan metode *solid state* dengan parameter suhu kalsinasi menghasilkan GDC dengan dengan ukuran partikel 647,3 nm, kepadatan elektrolit di atas 95%, dengan konduktivitas ionik $0,0153 \text{ S.cm}^{-1}$ pada suhu operasi 800°C ³⁶. GDC yang disintesis menggunakan metode ko-presipitasi dengan parameter senyawa karbonat sebagai presipitan mampu menghasilkan partikel GDC mencapai $52,49\text{nm}$ ^{37,38}. Elektrolit baru *ytterbium scandium stabilized zirconia* (1Yb10ScSZ) juga dikembangkan dengan metode presipitasi dan sol-gel, serta menggunakan asam amino l-arginine sebagai prekursor organik, menghasilkan nanopartikel 1Yb10ScSZ yang homogen dan konduktivitas ionik tertinggi $0,012 \text{ S.cm}^{-1}$ pada suhu operasi 800°C ^{39,40,41,42}. Studi pertumbuhan elektrolit 1Yb10ScSZ dengan metode sol-gel dan presipitasi turut dipelajari^{39,40,41}. Teknik *co-dopant* GDC dengan doping unsur LTJ, seperti La, Sc, Yb, dan Nd diteliti untuk meningkatkan ionik konduktivitas elektrolit^{43,44}. *Co-dopant* elektrolit GDC *co-doping neodymium* ($\text{Ce}_{0,9}\text{Gd}_{0,1-x}\text{Nd}_x\text{O}_{1,9}$) menghasilkan konduktivitas ionik yang tinggi, yaitu $0,55 \text{ S.cm}^{-1}$ pada suhu

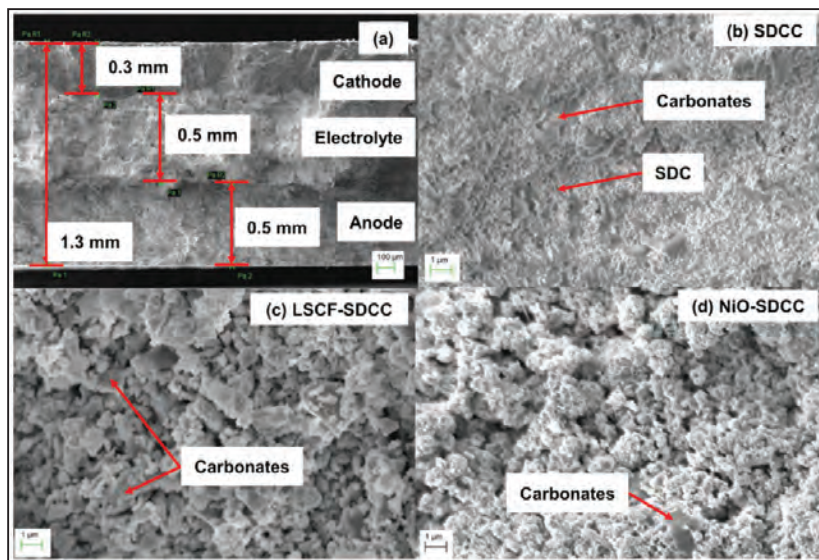
600°C⁴⁵. Elektrolit SDC-(Li/Na)₂CO₃ diteliti untuk LT-SOFC dengan metode sol-gel untuk menghasilkan fasa yang diinginkan dan nanopartikel dengan ukuran hingga 36 nm, kepadatan di atas 95% dan menghasilkan konduktivitas ionik 4,56.10⁻² S.cm⁻¹ dan 5,87.10⁻¹ S.cm⁻¹, masing-masing pada suhu 500°C dan 650°C^{46,47}. Hasil riset yang dilakukan telah berkontribusi menghasilkan bahan elektrolit yang dapat berfungsi pada suhu operasi SOFC lebih rendah (kurang dari 800°C, LT-IT SOFC) dan mengatasi permasalahan tingginya suhu operasi SOFC.

3.1.2 Riset Material Elektroda dan *Interconnect Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*

Elektroda dan *interconnect* material adalah salah satu hal yang penting untuk dikembangkan pada sistem LT-IT SOFC. Elektroda yang baik memiliki beberapa karakteristik, yaitu stabilitas kimia dan termal, konduktivitas listrik tinggi, aktivasi katalis yang baik, koefisien ekspansi termal yang sesuai, kekuatan mekanik yang baik, mudah dibuat dengan struktur mikro diinginkan (porositas dan luas permukaan yang sesuai), dan hemat biaya^{48,49}. Pengurangan suhu operasi juga memungkinkan *interconnect* keramik yang mahal digantikan oleh *interconnect* logam, yang memiliki konduktivitas listrik yang lebih baik dan lebih ekonomis kemampuan prosesnya⁵⁰.

Berbagai riset pengembangan material elektroda dan *interconnect* untuk LT-IT SOFC sudah dilakukan, antara lain optimasi mikrostruktur pada anoda NiO-SDC terhadap performa SOFC⁵¹. Komposit katoda *perovskite* La_{0,6}Sr_{0,4}Co_{0,2}Fe_{0,8}O_{3-δ} (LSCF) diteliti sifat termal kesesuaian dengan elektrolit dan memperlihatkan nilai ekspansi termal katoda mendekati elektrolit ketika jumlah campuran elektrolit SDC-karbonat dalam komposisi katoda naik⁵². Material katoda baru *barium strontium cobalt ferrite-samarium doped ceria* ditambah dengan

argentum (Ag) (BSCF-SDC-Ag) dikembangkan untuk SOFC suhu rendah (LT-SOFC). Dari uji performanya didapatkan konduktivitas maksimum $39,37 \text{ S.cm}^{-1}$ pada suhu operasi 600°C ⁵³. Pada Gambar 3, katoda komposit berbasis *perovskite* $\text{La}_{0,6}\text{Sr}_{0,4}\text{Co}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF)- $\text{Ce}_{0,8}\text{Sm}_{0,2}\text{O}_{1,9}$ karbonat (SDCC), diselidiki sebagai bahan katoda untuk LT SOFC, performa sel yang dihasilkan $60,3 \text{ mW/cm}^2$ - $75,4 \text{ mW/cm}^2$ pada suhu 600°C - 650°C ²³. Baru-baru ini dikembangkan bahan baru katoda *perovskite* $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Zn}_{0,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_{3-\delta}$ untuk LT-SOFC⁵⁴ dan menghasilkan konduktivitas listrik tertinggi terutama pada 250 dan 300°C , yaitu $1,45 \cdot 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$ dan $3,87 \cdot 10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$.



Gambar 3. Gambar FESEM Bagian Melintang dari (a) *Uniaxially Pressed* Sel Tunggal SOFC, (b) Komposit Elektrolit SDCC, (c) Komposit Katoda LSCF-SDCC, dan (d) Komposit Anoda NiO-SDCC²²

Elektroda yang akan digunakan dalam LT-IT SOFC harus berpori (20–30%). Porositas yang cukup diperlukan untuk

memasok gas bahan bakar hidrogen di sisi anoda, dan udara di sisi katoda. Penting untuk mengoptimalkan porositas elektroda dengan mengontrol struktur mikro untuk meningkatkan kinerja elektroda^{55,56}.

Material *interconnect* $(\text{Cu,Mn,Co})_3\text{O}_4$ dikembangkan sebagai bahan pelapis *interconnect* LT-IT SOFC karena memiliki konduktivitas listrik yang tinggi (116 S.cm^{-1}) untuk meminimalkan kerugian ohmik antara elektroda yang berdekatan sel⁵⁰. Hasil riset yang dilakukan telah berkontribusi menghasilkan bahan elektroda dan *interconnect* yang saling bersesuaian dengan komponen lain dan dapat beroperasi pada suhu operasi kurang dari 800°C (LT-IT SOFC).

3.1.3 Riset Teknik Fabrikasi *Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*

Komponen utama SOFC berupa *sandwich* berbahan keramik, terdiri dari elektroda (anoda dan katoda) berpori, dipisahkan oleh elektrolit padat. Elektroda harus berpori dan cukup berpori (porositas 20–40%) untuk melewati umpan gas hidrogen dan oksigen pada masing-masing antarmuka elektrolit, di mana reaksi parsial terjadi. Anoda dan katoda harus memiliki sifat konduktivitas elektronik untuk menyediakan sumber elektron dari anoda atau katoda pada setiap masing-masing reaksi parsial. Selain itu, elektrolit harus memiliki sifat konduktivitas ion oksigen sebagai media untuk konduksi ion oksigen dari suatu reaksi parsial ke sisi yang lain. Elektrolit ini harus padat (kepadatan $> 95\%$) dengan jenis gas yang ada, baik di anoda maupun di katoda untuk mencegah pencampuran antara bahan bakar dan oksidasi^{48,49}.

Berbagai riset teknik fabrikasi SOFC sudah dilakukan, antara lain penelitian optimasi fabrikasi elektrolit yang padat

dan elektroda yang berpori menggunakan teknik *pressureless sintering* dengan menghasilkan elektrolit padat di atas 95% dan elektroda berpori 20–40%. Metode ini lebih murah dan dapat digunakan produksi massal, dibandingkan dengan teknik *hot pressed* yang selama ini digunakan^{55,56,57}. Selain itu teknik fabrikasi elektroda dengan metode *screen printing* berperan dalam menghasilkan elektroda dengan kualitas yang tinggi¹³. Hasil riset yang telah dilakukan berkontribusi menghasilkan sel SOFC dengan metode *pressureless sintering* yang lebih murah dan menghasilkan mikrostruktur yang sesuai untuk SOFC.

3.2. Riset Material untuk *Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell* dan Baterai Berbasis Logam Tanah Jarang Indonesia

LTJ sangat bermanfaat dalam meningkatkan efisiensi teknologi konversi energi, terutama untuk sumber energi terbarukan dan energi bersih, seperti pada *fuel cell* (SOFC) dan baterai. Teknologi ini menjadi lebih efisien karena sifat listrik, magnet, konduktivitas ionik, dan spektroskopi yang unik dari LTJ. Penelitian ini didukung oleh Konsorsium Nasional Pengembangan Industri Berbasis LTJ¹⁶, di mana telah dihasilkan oksida tanah jarang, seperti serium oksida (Tabel 1)⁵⁸ dan lantanum oksida (Tabel 2)¹⁶ sebagai bahan baku aplikasi LTJ.

3.2.1. Riset Material Elektrolit *Low-Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell* Berbasis Logam Tanah Jarang Indonesia

Penelitian SOFC telah mengembangkan keramik maju untuk elektrolit padat LT-IT SOFC dengan menggunakan LTJ Indonesia (nonkomersial), di antaranya adalah *gadolinium-doped ceria* (GDC) dan *ytterbium scandia stabilized zirconia* (YbScSZ), seperti terlihat dalam Gambar 4^{39,58}. Sesuai dengan

tren riset di bidang SOFC, telah dilakukan rekayasa material untuk menurunkan suhu operasi dari SOFC.

Pembuatan nano partikel CeO_2 untuk bahan baku SOFC dari bahan CeO_2 nonkomersial, dioptimalkan menggunakan metode presipitasi dengan presipitan basa KOH , NaOH , dan NH_4OH , menghasilkan ukuran partikel terkecil 953 nm⁵⁹. *Gadolinium doped cerium* (10% mol Gd_2O_3 , GDC10) banyak dikembangkan sebagai elektrolit IT-SOFC³. Beberapa penelitian proses sintesis GDC10 menggunakan LTJ nonkomersial telah dilakukan, di antaranya optimasi dan analisis kemurnian hasil sintesis GDC10 menggunakan prekursor Gd_2O_3 (nonkomersial) dan $\text{Ce}(\text{OH})_4$ (nonkomersial) dengan metode kopresipitasi, dan menggunakan agen presipitasi berupa senyawa karbonat, yaitu amonium karbonat ($(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$), potasium karbonat (K_2CO_3), dan sodium hidrogen karbonat (NaHCO_3)⁶⁰.



Gambar 4. Elektrolit dan Elektroda SOFC Berbasis LTJ^{13,38}

Sifat fisik GDC10 menggunakan bahan CeO_2 (nonkomersial) dan metode *solid state* juga telah dikaji dengan melakukan perbandingan terhadap bahan baku CeO_2 komersial. Hasil keduanya menunjukkan material yang menjanjikan untuk elektrolit IT-SOFC⁵⁸. Pengaruh polietilena glikol (PEG400) terhadap sifat

fisik GDC10 diteliti untuk menghasilkan nanopartikel elektrolit dengan menggunakan metode kopresipitasi³⁸. Pengaruh suhu kalsinasi terhadap sifat fisik GDC10 menggunakan bahan CeO₂ nonkomersial diteliti untuk menghasilkan fasa yang sesuai, yaitu fasa tunggal CeO₂ dengan struktur kristal *fluorite*⁶¹. Penelitian dengan bahan LTJ Indonesia menunjukkan hasil yang menjanjikan sebagai elektrolit SOFC, dan berkontribusi dalam substitusi material impor untuk elektrolit SOFC.

3.2.2 Riset Material Anoda Baterai NiMH Berbasis Logam Tanah Jarang Indonesia

LTJ, seperti lantanum (La) dan serium (Ce), merupakan unsur yang biasa digunakan sebagai material aktif pada elektroda negatif (anoda) di sistem baterai NiMH. Baterai NiMH telah banyak digunakan karena kapasitas elektrokimia yang sangat baik⁶². Prinsip kerja dari baterai NiMH adalah bagaimana mengubah hidrogen (H⁺) dalam sel baterai menjadi *metal hydride* yang akan terbentuk pada anoda dalam rangkaian sel dengan katoda *nickel oxide standard electrode*. Lantanum pentanikel (LaNi₅) dan serium pentanikel (CeNi₅) merupakan material logam paduan bersifat intermetalik dan berperan penting dalam menyerap atom H₂ pada komponen anoda baterai NiMH. Kedua bahan tersebut sering digunakan sebagai paduan penyimpanan hidrogen dalam baterai NiMH karena beberapa sifatnya, seperti kapasitas elektrokimia besar, siklus hidup panjang, karakteristik *over-charge/discharge* yang baik, dan ramah lingkungan⁶³. Namun demikian, aplikasinya dibatasi oleh biaya produksi yang tinggi. Penelitian yang dilakukan adalah memanfaatkan LTJ Indonesia untuk pembuatan anoda dengan proses yang lebih murah dan menggunakan bahan nonkomersial sehingga dapat berkontribusi mengurangi biaya produksi.

Berbagai penelitian anoda baterai NiMH sudah dilakukan, antara lain optimasi pembuatan anoda $CeNi_5$ dengan metoda *solid state* dan penggunaan oksida tanah jarang serium nonkomersial telah berhasil diperoleh anoda $CeNi_5$ ⁶⁴. Optimasi pembuatan anoda $LaNi_5$ menggunakan *wet method* dengan bahan baku oksida tanah jarang lantanum nonkomersial juga sudah berhasil dilakukan⁶³. Pembuatan *co-doping* $LaNi_5Ce$ diteliti untuk mengetahui pengaruh CeO_2 terhadap sifat elektrokimia anoda $LaNi_5Ce$. Hasil yang didapatkan adalah *co-doping* CeO_2 1% pada $LaNi_5$ dapat meningkatkan konduktivitas sampai 1.067 S/cm⁶². $LaNi_5$ juga diproduksi dengan metode *combustion reduction process*, di mana sifat kimia fisik dan pengaruh suhu peleburan dipelajari untuk mendapatkan proses desain yang optimal dan sesuai dengan bahan dan peralatan yang relatif lebih mudah diperoleh secara lokal. Proses sintesis material anoda NiMH ini dapat digunakan sebagai acuan untuk produksi material penyimpan energi yang mudah untuk di-*scale up*^{65,66}.

3.2.3. Riset Material Anoda Baterai Ion-Litium Berkemampuan Fast Charging Berbasis Logam Tanah Jarang Indonesia

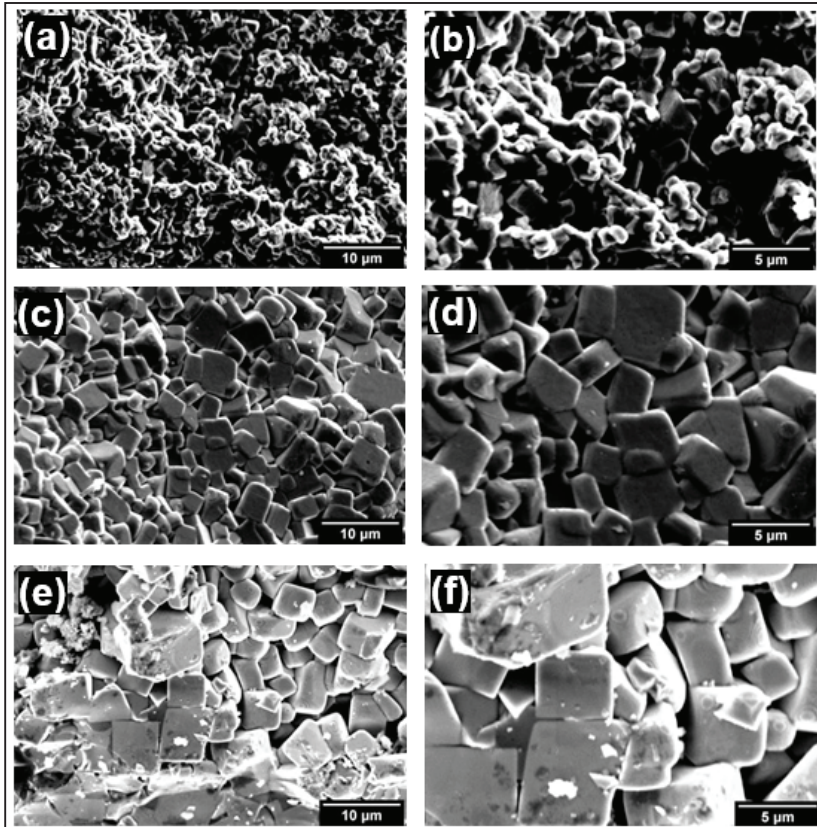
Kegiatan riset *battery pack* berkemampuan *fast charging* dengan kapasitas 72V 20Ah diawali dengan *reverse engineering* baterai sepeda motor listrik Gesits dan dilanjutkan dengan melakukan redesain. Pembuatan purwarupa baterai *pack fast charging* (Gambar 5.) dari hasil redesain bekerja sama dengan industri baterai lokal, yaitu PT Batex dan PT Nipress.



Gambar 5. Purwarupa Baterai *Pack Fast Charging* LTO

Purwarupa *battery pack* telah dilakukan pengujian dan telah menghasilkan waktu *charging* 1,5 jam. Di sisi lain, material aktif anoda dan sel baterai dikembangkan dengan tujuan substitusi impor material aktif dan sel baterai.

Pengembangan material aktif anoda berkontribusi mengatasi kekurangan penggunaan material LTO untuk *battery pack* berkemampuan *fast charging*. Telah dilakukan beberapa penelitian untuk meningkatkan performa anoda LTO, di antaranya menambahkan grafena untuk meningkatkan konduktivitas LTO⁶⁷, dan memvariasikan temperatur perlakuan panas (kalsinasi) yang tinggi untuk menyintesis LLTO (khususnya $\text{Li}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{TiO}_3$) dari kombinasi lantanum oksalat $\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$ nonkomersial, Li_2CO_3 komersial, dan TiO_2 anatase komersial. Hasil penelitian tersebut, seperti terlihat dalam Gambar 6., memperlihatkan mikrostruktur SEM dari bahan LLTO yang disintesis menggunakan metode *solid state reaction*. Pemanfaatan dopan LTJ berupa lantanum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap konduktivitas anoda.



Gambar 6. Mikrostruktur dari LLTO-1 (a,b), LLTO-2 (c,d) dan LLTO-3 (e,f) pada pembesaran 2.500x dan 5.000x¹⁵

LLTO-2 yang disintesis pada temperatur kalsinasi 1.150°C menunjukkan luas permukaan dan volume pori yang paling besar, butir tersusun secara acak dan memiliki sifat pseudo-kapasitansi sehingga memberikan kapasitas spesifik yang tinggi sebesar 17.120 mAh.g⁻¹ (pada *C-rate* 0,5 dan potensial yang mendekati nol), dan konduktivitas yang tinggi sekitar $2,45 \times 10^{-2}$ S.cm⁻¹¹⁶. Konduktivitas yang didapatkan lebih tinggi dari yang

pernah dilaporkan di literatur ($1 \times 10^{-2} \text{ S.cm}^{-1}$). LLTO yang memiliki konduktivitas $1 \times 10^{-2} \text{ S.cm}^{-1}$ dikategorikan sebagai superkonduktor ionik yang bisa memberikan sifat *fast charging*³³ sehingga LLTO yang dikembangkan ini dapat memberikan sifat *fast charging* pada anoda baterai lithium-ion. Anoda LLTO yang dikembangkan ini juga menjanjikan untuk digunakan sebagai anoda potensial rendah dalam baterai ion-litium karena memiliki kapasitas spesifik yang tinggi apabila pada potensial rendah.

IV. PELUANG PENGEMBANGAN DAN PEMANFAATAN LOGAM TANAH JARANG INDONESIA SEBAGAI BAHAN KERAMIK MAJU

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 3 Tahun 2020 tentang Perubahan Atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara, salah satunya mengamanatkan pengembangan dan peningkatan nilai tambah mineral. Pengembangan dan peningkatan nilai tambah mineral LTJ dapat dilakukan melalui kerja sama semua pihak: pemerintah, lembaga riset, industri, lembaga pendidikan, swasta, dan masyarakat pengguna. Peluang pengembangan dan pemanfaatan LTJ sebagai bahan keramik maju khususnya untuk aplikasi *fuel cell* dan baterai dalam rangka ketahanan material dan energi di Indonesia disajikan dalam subbab berikut.

4.1. Pengembangan dan Pemanfaatan Logam Tanah Jarang di Indonesia serta Arah Kebijakan

Sisa Hasil Produksi (SHP) bijih timah menghasilkan monasit sebagai bahan baku LTJ yang jumlahnya cukup besar sehingga ekonomis untuk dilakukan proses pemurnian menjadi produk LTJ. Berdasarkan data Kementerian Perindustrian RI (2017), seluruh kebutuhan LTJ Indonesia masih impor sebesar 219 ton dan diprediksi akan mencapai 1.710 ton pada tahun 2030. Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 28 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Bidang Perindustrian, percepatan industrialisasi LTJ dapat didorong dengan memberikan kemudahan mendapatkan bahan baku dan menjamin ketersediaannya, serta menjadikan industri strategis LTJ. Ketersediaan sumber daya mineral LTJ untuk memenuhi kebutuhan industri LTJ harus segera dipersiapkan dengan cara pelarangan atau pembatasan ekspor produk hulu dan produk antara LTJ dalam rangka

menjamin kemudahan untuk mendapatkan bahan baku dan bahan penolong industri LTJ di masa depan. Selain itu, perlu dibentuk “Badan Pengumpul Sumber Daya Mineral LTJ” untuk mencegah keluarnya mineral strategis tersebut.

Pengembangan LTJ memerlukan keterlibatan berbagai pihak, baik pemerintah, industri/BUMN, lembaga riset, lembaga pendidikan, maupun masyarakat pengguna. Kementerian BUMN, dalam hal ini PT Timah Tbk yang saat ini adalah penghasil pasir monasit sebagai sumber LTJ, perlu terus mendorong dan mengoptimalkan pemanfaatan *by products (slag)* produksi timahnya. Kementerian ESDM perlu melakukan inventarisasi cadangan LTJ, baik yang berasal dari monasit maupun nonmonasit (seperti tambang bauksit (Y) dan tambang nikel (Sc)), yang tersebar di Bangka Belitung, Kalimantan, dan daerah lain di Indonesia². Hal ini diperlukan dalam membangun industri berbasis LTJ di Indonesia secara berkelanjutan. Kementerian Perindustrian perlu menumbuhkan industri potensial berbasis LTJ yang dikembangkan di Indonesia. LTJ berpotensi untuk pengembangan EBT dan teknologi energi bersih sehingga arah industri berbasis LTJ dapat diarahkan untuk menunjang bidang aplikasi tersebut dan sekaligus membantu pemerintah dalam mewujudkan *net zero emission* pada tahun 2060, seperti yang disampaikan oleh Presiden RI pada kesempatan Konferensi Tingkat Tinggi Perubahan Iklim Perserikatan Bangsa-Bangsa (COP-26) di Glasgow pada bulan November 2021. Kegiatan riset LTJ hendaknya menjadi perhatian khusus BRIN dalam mendukung industri berbasis LTJ.

Regulasi yang terintegrasi, mulai dari kebijakan pengumpulan dan pengolahan monasit, inventarisasi, dan eksplorasi sampai pada aplikasi industri sangat diperlukan. Pemerintah telah mengeluarkan beberapa kebijakan, yaitu Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2014 dan Peraturan Menteri

ESDM Nomor 25 Tahun 2018 yang mengamanatkan dalam rangka peningkatan nilai tambah sumber daya alam, pemerintah mendorong pengembangan industri pengolahan di dalam negeri. Kebijakan ini memberikan peluang pengembangan LTJ sampai ke hilir aplikasi. Pemerintah melalui Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi telah membentuk *task force* koordinasi pengawasan, pengendalian, penegakan hukum, dan pemanfaatan SHP Timah. Dengan dibentuknya *task force* tersebut, peningkatan nilai tambah hulu hilir LTJ dan SHP di Indonesia dapat terus dikawal. Dalam membangun industri berbasis LTJ, ekosistem industri perlu disiapkan. Konsorsium LTJ perlu mengamankan rantai industri LTJ dan bergerak bersama pada satu *time frame* yang disepakati sehingga peningkatan nilai tambah dari hulu ke hilir dapat merealisasikan ketahanan material, khususnya LTJ yang merupakan *critical raw material* di Indonesia.

4.2. Pengembangan dan Penerapan Teknologi *Fuel Cell* dan Baterai untuk Teknologi Rendah Karbon

Permintaan energi dunia terus meningkat, demikian juga kekhawatiran atas perubahan iklim yang didorong oleh bahan bakar fosil. Langkah menuju teknologi rendah karbon untuk pasokan energi bergantung pada kinerja teknologi ini yang selalu melibatkan beberapa bentuk konversi energi dalam rantai pasokan energi ke pengguna akhir.

Pembangkit jenis SOFC mampu mengonversi energi jauh lebih tinggi dibandingkan jenis lain pada kondisi operasinya. Karena fleksibilitas terhadap bahan bakar dan efisiensinya, SOFC dapat sebagai *central power station* atau *power station* kecil, sesuai kondisi wilayah di Indonesia. Untuk mengantisipasi berkurangnya cadangan minyak bumi dalam memenuhi kebutuhan energi yang meningkat dan tidak menggantungkan

pada produk impor, perlu dirintis penguasaan teknologi SOFC. SOFC semakin efisien apabila dikombinasikan dengan sumber panas (*combined heat power/CHP*), misalnya panas gas buang dari *steam boiler* yang dapat menjadikan sumber panas yang diperlukan untuk menghasilkan listrik dari sistem SOFC¹¹. Oleh sebab itu, teknologi ini juga sesuai diterapkan di industri yang memiliki potensi gas buang, seperti pada *boiler*.

Baterai ion-litium merupakan teknologi yang menjanjikan untuk mendukung transisi energi berbasis fosil ke energi baru terbarukan pada kendaraan listrik yang ramah lingkungan karena kinerja penyimpanan energinya yang unggul. Penelitian material energi untuk baterai ion-litium terus dilakukan secara intensif hingga saat ini. *Lithium lanthanum titanate* (LLTO, $\text{Li}_{0,5}\text{La}_{0,5}\text{TiO}_3$) dikembangkan dari kombinasi lantanum oksalat nonkomersial (95,296% lantanum) melalui *solid state reaction* yang sederhana dan berbiaya rendah. LLTO yang disintesis memiliki sifat pseudo-kapasitansi sehingga memberikan kapasitas spesifik yang tinggi sebesar $17.120 \text{ mAh.g}^{-1}$ (pada *C-rate* 0,5) dan konduktivitas yang tinggi sekitar $2,45 \times 10^{-2} \text{ S.cm}^{-1}$ ¹⁶. LLTO ini menjanjikan untuk digunakan sebagai anoda potensial rendah dalam baterai ion-litium dan teknologi *fast charging*.

Dalam acara peluncuran *net zero world COP-26* pada November 2021 di Glasgow, UK, Menteri ESDM menjelaskan bahwa harga EBT mulai tumbuh kompetitif, khususnya harga solar panel global yang cenderung turun. Pemerintah juga mendukung pengembangan teknologi energi bersih baru, seperti *pumped storage*, *hydrogen*, dan *battery energy storage system* (BESS) sehingga akan mengoptimalkan pemanfaatan potensi EBT yang melimpah di Indonesia. Kebijakan ini sesuai dengan arah riset yang dikembangkan dalam penerapan teknologi *fuel cell* dan baterai sebagai teknologi rendah karbon.

V. KESIMPULAN

Pengembangan keramik maju berbasis LTJ untuk aplikasi *fuel cell* dan baterai telah berkontribusi mengatasi permasalahan dari kedua aplikasi tersebut. Riset keramik maju berbasis LTJ untuk SOFC telah menghasilkan material elektrolit, anoda, katoda, dan *interconnect* SOFC yang mampu beroperasi pada suhu operasi $<800^{\circ}\text{C}$. Riset keramik maju ini telah berhasil memberikan kontribusi terhadap upaya menurunkan suhu operasi SOFC pada kisaran suhu rendah dan menengah (LT-IT SOFC). Riset keramik maju berbasis LTJ untuk anoda baterai litium berkemampuan *fast charging* telah memberikan kontribusi dalam meningkatkan konduktivitas dan kapasitas pada baterai litium. Anoda LLTO yang dikembangkan memiliki kelebihan sebagai anoda baterai berkemampuan *fast charging* dan sebagai material baterai masa depan *solid state battery*.

Keramik maju berbasis LTJ Indonesia berpotensi untuk diaplikasikan pada teknologi *fuel cell* dan baterai. Saat ini, kemurnian bahan baku oksida LTJ masih belum sesuai standar oksida LTJ komersial karena konsistensi tingkat kemurnian oksida LTJ masih berubah-ubah (79-90%). Oleh karena itu, dari sisi hulu penyediaan bahan baku oksida LTJ perlu ditingkatkan kemurnian dan konsistensi kemurniannya. Pengembangan keramik maju berbasis LTJ Indonesia untuk aplikasi *fuel cell* dan baterai ini pada akhirnya dapat mendukung terwujudnya ketahanan energi dan material di Indonesia.

VI. PENUTUP

Ketersediaan sumber daya mineral LTJ untuk memenuhi kebutuhan industri LTJ yang berkesinambungan menjadi tantangan dalam rangka menjamin kemudahan untuk mendapatkan bahan baku dan bahan penolong industri LTJ di masa depan. Teknologi maju berbasis LTJ juga menjadi tantangan untuk segera dikuasai. Ekosistem industri LTJ juga menjadi tantangan yang perlu segera ditumbuhkan. Pengembangan LTJ secara luas dan berhubungan dengan teknologi modern menjadi peluang bagi pemanfaatan hilirisasi produk berbasis LTJ, seperti aplikasi untuk EBT dan teknologi energi bersih pada *fuel cell* dan baterai. Pengembangan keramik maju berbasis LTJ untuk kedua aplikasi tersebut juga selaras dengan rencana pemerintah mengoptimalkan pemanfaatan EBT dan teknologi energi bersih untuk mengurangi emisi CO₂, serta membantu pemerintah dalam merealisasikan Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019. Selain itu, pengembangan kedua aplikasi LTJ tersebut dapat mendukung program pemerintah yang disampaikan oleh Presiden RI pada COP-26 dalam memenuhi *net zero emission* pada tahun 2060 melalui penerapan teknologi energi bersih.

Pengembangan LTJ dari hulu ke hilir memerlukan keterlibatan pemerintah, industri/BUMN, lembaga litbangjirap, lembaga pendidikan, dan masyarakat pengguna. PT Timah Tbk mewakili Kementerian BUMN perlu terus mendorong dan mengoptimalkan pemanfaatan pasir monasit yang merupakan produk samping pengolahan timah. Kementerian ESDM perlu melakukan inventarisasi cadangan LTJ dalam membangun industri berbasis LTJ di Indonesia secara berkelanjutan. Kementerian Perindustrian perlu menciptakan ekosistem dan menumbuhkan industri potensial berbasis LTJ yang

dikembangkan di Indonesia. Kegiatan riset pemanfaatan LTJ ini harus menjadi perhatian khusus bagi BRIN bekerja sama dengan perguruan tinggi/lembaga lain yang terkait untuk mendukung penguasaan teknologi berbasis LTJ. Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman dan Investasi terus mengawal pemanfaatan dan peningkatan nilai tambah hulu hilir LTJ dan SHP timah di Indonesia. Regulasi yang terintegrasi sangat diperlukan, mulai dari regulasi pengumpulan dan pengolahan monasit, inventarisasi dan eksplorasi, sampai dengan aplikasi industri.

UCAPAN TERIMAKASIH

Majelis Pengukuhan Profesor Riset yang mulia, Kepala BRIN, dan hadirin yang saya hormati.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, perkenankan saya menyampaikan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas berkat dan karunia-Nya orasi ini dapat berjalan sebagaimana yang diharapkan. Pada kesempatan ini juga perkenankan saya dengan segala kerendahan hati untuk menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. H. Joko Widodo, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc., dan Kepala Organisasi Riset Nanoteknologi dan Material, Prof. Dr. Ratno Nuryadi. Ketua dan Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Bambang Subiyanto M.Agr. dan Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani. Terima kasih disampaikan kepada Tim Penelaah Naskah Orasi BRIN: Prof. Dr. Eniya Listiani Dewi, B.Eng., M.Eng.; Prof. Dr. Ratno Nuryadi, M.Eng.; Prof. Dr. Anne Zulfia, M.Sc.; dan Tim Penelaah Naskah Orasi Internal di BPPT atas telaahan dan arahan yang diberikan dalam penyempurnaan naskah orasi ini.

Terima kasih kepada Ketua, Wakil Ketua, Sekretaris, dan para Anggota Majelis Profesor Riset, Majelis Asesor Peneliti Instansi, dan Tim Penilai Peneliti BRIN atas dukungan yang diberikan kepada saya dalam meniti karier sebagai peneliti hingga dapat melaksanakan orasi ilmiah ini.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada Sekretaris Utama BRIN; Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia; Kepala Biro Komunikasi Publik, Umum, dan Kesekretariatan; semua pejabat struktural di BRIN; dan Kepala BPPT periode 2019–2021, Dr. Hammam Riza, M.Sc.

Terima kasih kepada dosen Pembimbing S-1, S-2, dan S-3 saya, yaitu Dr. Ir. Priyo Waspodo, M.Sc., Dr. Bambang Sugianto, dan Prof. Dr. Wan Ramli Wan Daud serta guru dan dosen yang telah mendidik saya mulai dari sekolah dasar hingga perguruan tinggi, yang tidak bisa saya sebut satu per satu, saya ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas ilmu pengetahuan yang telah diajarkan. Begitu juga kepada teman-teman di Pusat Teknologi Material, seluruh tim Program Inovasi Teknologi *Energy Storage* dan *Battery Recycling*, dan teman-teman lainnya yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, yang telah bahu-membahu dalam melaksanakan penelitian dan perekayasaan di PTM. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada Konsorsium Nasional LTJ, panitia penyelenggara orasi ilmiah ini, rekan-rekan peneliti dan perekayasa OR Nanoteknologi dan Material, seluruh undangan dan hadirin, serta semua pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung untuk kesuksesan penyelenggaraan acara pengukuhan profesor riset hari ini.

Akhirnya, terima kasih yang tak terhingga diberikan kepada kedua orang tua saya, ayahanda H. Soedardjo H.P. (alm) dan ibunda Hj. Sumartini (almh), serta bapak dan ibu mertua, H. Soepawie S.H (alm) dan Hj. Suprih Utamie (almh). Kepada keluarga besar saya, khususnya kepada istri tercinta, Lisa Paras Setyowati, S.H., M.Kn., dan ananda tercinta, Raditya Arsa Pradana, terima kasih atas doa, dukungan, dan perhatiannya.

Tiada gading yang tak retak, untuk itu perkenankanlah kami memohon maaf atas segala kesalahan dan kekhilafan dalam penyampaian orasi ini. Kiranya Allah Swt. memberkati kita semua. Salam hormat kami, sekian dan terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

1. Suharyati, Pambudi SH, Wibowo JL, Pratiwi NI. Indonesia energy outlook 2019. In: Abdurrahman S, Pertiwi M, Walujanto, editors. Dewan Energi Nasional; 2019. 1–73.
2. Supriadi A, Kencono AW, Prasetyo BE, Kurniadi CB, Anggreani D, Setiadi I. Kajian potensi mineral ikutan pada pertambangan timah. Jakarta: Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral; 2017. 1–96.
3. **Raharjo J**, Dedikarni, Daud WRW. Perkembangan teknologi material pada sel bahan-bakar padat temperatur operasi menengah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2008;10(1):28–34.
4. Nandiyanto ABD, Maulana MI, **Raharjo J**, Sunarya Y, Minghat AD. Techno-economic analysis for the production of LaNi_5 particles. *Communications in Science and Technology*. 2020 Nov 25;5(2):70–84.
5. Hanafi R, Mayasari RD, Masmui, Agustanhakri, **Raharjo J**, Nuryadi R. Electrochemical sensor for environmental monitoring system: A review. In: AIP Conference Proceedings 2169. Jakarta: AIP; 2019. 1–5.
6. Aprilia L, Nuryadi R, Mayasari RD, Gustiono D, Masmui, **Raharjo J**, et al. Growth of zinc oxide sensitive layer on microcantilever surface for gas sensor application. In: 2015 International Conference on Quality in Research. 2015. 151–154.
7. Mayasari RD, Yuliani H, Deni Y, Masmui, **Raharjo J**, Nuryadi R. Penumbuhan ZnO rods terdoping CeO_2 pada substrat kaca menggunakan metode hidrotermal. *Eksergi*. 2019;16(2):31–4.
8. Roseno S, Effendi MD, Gustiono D, **Raharjo J**. Effect of Na^+ concentration on luminescence of phosphor $\text{CaO}:\text{Ce}^{3+}, \text{Na}^+$ for white LED for surgery lamp prepared by solid state synthesis method. In: Sumirat I, Rifai M, editors. International Conference on Materials Science and Technology and Workshop on Neutron Scattering – ICWMST 2018. Tangerang Selatan: Center for Science and Technology of Advanced Materials, National Nuclear Energy Agency; 2018. 61–5.

9. Passucci M, Katz R. Modern day applications of advanced ceramics. *Interceram*. 1993;42(2):71–8.
10. Dewi EL, **Raharjo J**. Perbandingan grafit bipolar plate model paralel dan serpentine sebagai komponen separator pada pemfc. In: *Prosiding Seminar Nasional Teknoin 2008 Bidang Teknik Mesin*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia Yogyakarta; 2008. 47–50.
11. Abdalla AM, Hossain S, Petra PM, Ghasemi M, Azad AK. Achievements and trends of solid oxide fuel cells in clean energy field: a perspective review. *Frontiers in Energy*. 2020 Jun 28;14(2):359–382.
12. Guanming Q, Xikum L, Tai Q, Haitao Z, Honghao Y, Ruiting M. Application of rare earth in advanced ceramic materials. *Journal of rare earths*. 2007;25(2): 281–286.
13. Baharuddin NA, Abdul Rahman NFA, Abd. Rahman H, Somalu MR, Azmi MA, **Raharjo J**. Fabrication of high-quality electrode films for solid oxide fuel cell by screen printing: A review on important processing parameters. *International Journal of Energy Research*. 2020 Sep 25;44(11):8296–8313.
14. Perujo A, Van Grootveld G, Scholz H. Present and future role of battery electrical vehicles in private and public urban transport. In: *New generation of electric vehicles*. InTech; 2012.3–25.
15. Chandrasekhar J, Dhananjaya M, Hussain OM, Mauger A, Julien CM. Enhanced electrochemical performance of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ by niobium doping for pseudocapacitive applications. *InMicro*. 2021 Jun 4;1(1):28–42.
16. Ma'dika B, Pravitasari RD, Tasomara R, Hapsari AU, Damisih, **Raharjo J**, et al. Synthesis of lithium lanthanum titanate derived from local lanthanum oxalate and its electrochemical impedance spectroscopic characterization for anode application in lithium-ion battery. In: *The International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicles (ICB-REV) 2021*. Jakarta: AIP; 2021.

17. Massari S, Ruberti M. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*. 2013 Mar 1;38(1):36–43.
18. Anderson CD, Taylor PR, Anderson CG. Rare earth flotation fundamentals: a review. *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 2017 Dec 14;6(11):1–12.
19. Hua YC, Zhang C, Sun LD. Rare earth nanotechnology. 1st ed. Timothy TTY, editor. Singapore: Jenny Stanford Publishing; 2012. 1–262.
20. Sun Y, Guan P, Liu Y, Xu H, Li S, Chu D. Recent progress in lithium lanthanum titanate electrolyte towards all solid-state lithium-ion secondary battery. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2019;44(4).
21. Zhang Y, Knibbe R, Sunarso J, Zhong Y, Zhou W, Shao Z, et al. Recent progress on advanced materials for solid-oxide fuel cells operating below 500°C. *Advanced Materials*. 2017;29(48).
22. Srinivasan R, Chandra Bose A. Structural properties of Sm³⁺ doped cerium oxide nanorods synthesized by hydrolysis assisted co-precipitation method. *Materials Letters*. 2010 Sep 30;64(18):1954–1956.
23. Ali MSA, **Raharjo J**, Anwar M, Khaerudini DS, Muchtar A, Spiridigliozzi L, et al. Carbonate-based lanthanum strontium cobalt ferrite (LSCF)–samarium-doped ceria (SDC) composite cathode for low-temperature solid oxide fuel cells. *Applied Sciences*. 2020 May 28;10(11).
24. Raza R, Zhu B, Rafique A, Naqvi MR, Lund P. Functional ceria-based nanocomposites for advanced low-temperature (300–600 °C) solid oxide fuel cell: a comprehensive review. *Materials Today Energy*. 2020 Mar;15(100373):1–16.
25. Lu Y, Zhu B, Shi J, Yun S. Advanced low-temperature solid oxide fuel cells based on a built-in electric field. *Energy Materials*. 2021; 1(100007):1–10.

26. Plett GL. Battery Management Systems. Volume 1: Battery modeling. 1st ed. Vol. 1. London: Artech House; 2015. 1–327.
27. Chen T, Jin Y, Lv H, Yang A, Liu M, Chen B, et al. Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University*. 2020;26:208–217.
28. Booth SG, Nedoma AJ, Anthonisamy NN, Baker PJ, Boston R, Bronstein H, et al. Perspectives for next generation lithium-ion battery cathode materials. *APL Materials*. 2021;9(10).
29. Zhang L, Zhang X, Tian G, Zhang Q, Knapp M, Ehrenberg H, et al. Lithium lanthanum titanate perovskite as an anode for lithium-ion batteries. *Nature Communications*. 2020;11(1):1–8.
30. Yi T-F, Wei T-T, Li Y, He Y-B, Wang Z-B. Efforts on enhancing the Li-ion diffusion coefficient and electronic conductivity of titanate-based anode materials for advanced Li-ion batteries. *Energy Storage Materials*. 2020 Apr;26:165–197.
31. Yaroslavtsev AB, Stenina IA, Kulova TL, Skundin AM, Desyatov AV. Nanomaterials for electrical energy storage. In: Andrews DL, Lipson RH, Nann T, Gregory DH, editors. *Comprehensive Nanoscience and Technology*. 2nd ed. London: Elsevier; 2019.165–206.
32. Tomaszewska A, Chu Z, Feng X, O’Kane S, Liu X, Chen J, et al. Lithium-ion battery fast charging: a review. *eTransportation*. 2019 Aug;1.
33. Okumura T, Ina T, Orikasa Y, Arai H, Uchimoto Y, Ogumi Z. Improvement of lithium-ion conductivity for A-site disordered lithium lanthanum titanate perovskite oxides by fluoride ion substitution. *Journal of Materials Chemistry*. 2011;21(27).
34. Furusawa S, Tabuchi H, Sugiyama T, Tao S, Irvine J. Ionic conductivity of amorphous lithium lanthanum titanate thin film. *Solid State Ionics*. 2005 Feb 14;176(5–6).
35. Setyadji M, Purwani MV, Suyanti, Sudibyo. *Desain konsep: pilot plant pengolahan REOH menjadi CeO₂, La₂O₃ dan konsentrat Na(OH)₃ kapasitas 25 kg/hari*. 1st ed. Sediawan WB, editor. Yogyakarta: Pustaka Pelajar; 2017. 1–115.

36. Damisih D, Hapsari AU, Agustanhakri A, Deni Y, Arjasa OP, **Raharjo J**, et al. Characteristics of gadolinium doped cerium at different calcination temperatures for intermediate temperature SOFC. *Sains Malaysiana*. 2020 Dec 31;49(12):3135–3142.
37. Hapsari AU, **Raharjo J**, Yuliani H, Suradharmika IGA, Damisih, Pravitasari RD, et al. Synthesis and characterization of gadolinium doped cerium ($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$) by using various carbonates as a precipitant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;622.
38. Damisih, **Raharjo J**, Yuliani H, Hapsari AU, Masmui, Pravitasari RD, et al. Effect polyethylene glycol (PEG 400) to the physical properties of gadolinium doped cerium ($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$) nanoparticles synthesized by co-precipitation method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;622.
39. **Raharjo J**, Muhammed Ali SA, Arjasa OP, Bakri A, Damisih, Dewi EL, et al. Synthesis and characterization of uniform-sized cubic ytterbium scandium co-doped zirconium oxide (1Yb10ScSZ) nanoparticles by using basic amino acid as organic precursor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017 Apr;42(14):9274–9283.
40. **Raharjo J**, Arjasa OP, Agustanhakri A, Damisih. Composite electrolyte of SOFC based on stabilized zirconia 1Yb10ScSZ nanopowder. *Advanced Materials Research*. 2015 Jul;1112.
41. **Raharjo J**, Arjasa OP, Arti DK, Agustanhakri, Sudaryanto, Septiva S. Ytterbium scandium co-doped zirconium oxides (1Yb10ScSZ) nanoparticles for intermediate temperature solid oxide fuel cell electrolytes. In: Oka AP, Saputra DA, Kurniawan, Darmawan A, editors. *Proceedings of the 4th International Conference on Fuel Cells and Hydrogen Technology 2013 (ICFCHT2013)*. Yogyakarta: Center for Materials Technology; 2013. 81–4.
42. Arjasa OP, **Raharjo J**, Agustanhakri, Arti DK. Studi pertumbuhan partikel 1Yb10ScSZ pada metode sol-gel dan presipitasi. In: Waluyo J, Mindaryani A, Suprihastuti, Dharmastiti R, editors. *Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri k-20*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada – Yogyakarta; 2014. 11–5.

43. **Raharjo J**, Damisih, Hapsari AU, Pravitasari RD, Yuliani H. Karakteristik elektrolit $Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95}$ dengan metode sintesis coprecipitation untuk aplikasi sel bahan bakar padatan. In: Winata T, Iskandar F, Aimon AH, editors. Prosiding Seminar Nasional Material 2018. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2018. 1–7.
44. Damisih, **Raharjo J**, Masmui, Aninda RS, Lestari NA. Synthesis and characterization of La, Sc, Yb and Nd co-doped gadolinium doped cerium (GDC) composite electrolyte for IT-SOFC. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;877.
45. **Raharjo J**, Damisih, Hapsari AU, Masmui, Yanti PP. Sintesis dan karakterisasi elektrolit $Ce_{0.9}Gd_{0.1-x}Nd_xO_{1.90}$ untuk aplikasi sel bahan bakar padatan suhu sedang. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2018 Jan;19(2):83–90.
46. **Raharjo J**, Muchtar A, Daud WRW, Muhamad N, Majlan EH. Physical and thermal characterisations of SDC-(Li/Na) $_2$ CO $_3$ electrolyte ceramic composites. *Sains Malaysiana*. 2012;41(1):95–102.
47. **Raharjo J**. Konduktivitas ionik komposit elektrolit SDC-(Li/Na) $_2$ CO $_3$ untuk solid oxide fuel cell bersuhu rendah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2013 Apr;14(3):159–65.
48. Adler SB. Factors governing oxygen reduction in solid oxide fuel cell cathodes. *ChemInform*. 2004 Dec 14;35(50).
49. Fergus J, Hui R, Li X, Wilkinson DP, Zhang J. Solid oxide fuel cells: materials properties and performance. 1st ed. In: Fergus J, Hui R, Li X, Wilkinson DP, Zhang J, editors. Florida: CRC Press; 2008. 1–298.
50. Mah JCW, Muchtar A, Somalu MR, Ghazali MJ, **Raharjo J**. Formation of sol–gel derived (Cu, Mn, Co) $_3$ O $_4$ spinel and its electrical properties. *Ceramics International*. 2017 Jul;43(10):7641–7646.
51. Ali MSA, Muchtar A, Mah JCW, **Raharjo J**, Khaerudini DS. Effect of open pore and pore interconnectivity in the Ni-SDC cermet anode microstructure on the performance of solid oxide fuel cells. In: the 32nd Symposium of Malaysian Chemical Engineers 2021. Kuching; 2021. 1–8.

52. **Raharjo J.** Performa elektrokimia komposit katoda berbasis $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ untuk solid oxide fuel cell bersuhu rendah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2012;13(2):198–203.
53. Yusop UA, Huai TK, Rahman HA, Baharuddin NA, **Raharjo J.** Electrochemical performance of barium strontium cobalt ferrite -samarium doped ceria-argentum for low temperature solid oxide fuel cell. *Materials Science Forum*. 2020 May;991:94–100.
54. Hanifah AFN, Saptari SA, **Raharjo J**, Damisih, Khaerudini DS. Development and optimization of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite as novel cathodes for solid oxide fuel cell. In: the 6th International Symposium on Frontiers of Applied Physics (ISFAP) 2021. Jakarta: Center for Physics; 2021.
55. **Raharjo J**, Muchtar A, Daud WRW, Muhamad N, Majlan EH. Porous NiO-SDC carbonates composite anode for LT-SOFC applications produced by pressureless sintering. *Applied Mechanics and Materials*. 2011 Mar;52–54:488–93.
56. **Raharjo J**, Muchtar A, Daud WRW, Muhamad N, Majlan EH. Fabrication of porous LSCF-SDC carbonates composite cathode for solid oxide fuel cell (SOFC) applications. *Key Engineering Materials*. 2011 Feb;471–472:179–184.
57. **Raharjo J**, Muchtar A, Daud WRW, Muhamad N, Majlan EH. Fabrication of dense composite ceramic electrolyte SDC-(Li/Na)₂CO₃. *Key Engineering Materials*. 2010 Sep;447–448:666–670.
58. **Raharjo J**, Damisih, Masmui, Hapsari AU, Riswoko A, Setyadji M, et al. Effect of the rare earth oxide impurities on the physical and thermal properties of $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{0.195}$ (GDC) composite electrolyte IT-SOFC. *Materials Science Forum*. 2018 Aug;929:116–120.
59. **Raharjo J**, Yuliani H, Masmui, Hapsari AU, Damisih, Pangestika PW, et al. Studi pengaruh presipitan basa terhadap sifat fisik nanomaterial cerium dioksida (CeO_2) dengan metode presipitasi. In: *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. Yogyakarta: Universitas Pembangunan Nasional Yogyakarta; 2018. K14-1-K14-5.

60. Hapsari AU, Pravitasari RD, Yuliani H, Damisih, **Raharjo J**. Analisis kemurnian hasil sintesis gadolinium doped cerium (GDC) menggunakan prekursor Gd_2O_3 dan $Ce(OH)_4$ lokal dengan metode kopresipitasi. *Jurnal Inovasi dan Teknologi Material*. 2019 Jun 3;1(1):11–5.
61. Damisih, **Raharjo J**, Hapsari AU, Agustanhakri, Ali M, Muchtar A. Solid state synthesis and characterization of $Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{1.95}$ for solid electrolyte application using CeO_2 precursor extracted from Indonesia monazite sand. In: *HPI International Conference on Innovation in Polymer Science and Technology 2019 in conjunction with The 7th International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology*. Bali: Himpunan Polimer Indonesia; 2019.
62. Hapsari AU, Zulfia A, **Raharjo J**, Agustanhakri. Effect of the cerium oxide (CeO_2) on the structural and electrochemical properties of the $LaNi_5Ce$ metal hydride anode. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017 Jul;877.
63. Hapsari AU, Pravitasari RD, Damisih, Yuliani H, Sujani N, **Raharjo J**. Sintesis dan karakterisasi black powder La_2NiO_4 sebagai produk antara untuk aplikasi anoda baterai $NiMH$. In: Winata T, Iskandar F, Aimon AH, editors. *Prosiding Seminar Nasional Material 2018*. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2018. 8–14.
64. Hapsari AU, **Raharjo J**, Damisih, Wahyudin. Sintesis dan karakteristik $CeNi_5$ dari oksida logam tanah jarang dengan metode solid state. In: *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. Yogyakarta: Universitas Pembangunan Nasional; 2018. A6-1-A6-6.
65. Hapsari AU, Pravitasari RD, Damisih, Saudi AU, Khaerudini DS, **Raharjo J**, et al. Effect of dissolution temperature on purity of $LaNi_5$ powder synthesized with the combustion reduction method. *Journal of Engineering and Technological Sciences* 2021;53(5).
66. Hidayanti F, Lestari KR, Sujani N, **Raharjo J**. A physical chemistry study of black powder materials by solution combustion synthesis method. *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry*. 2021 Oct;10(2):93–103.

67. Abiyu FT, Pravitasari RD, Tasomara R, Hapsari AU, Damisih, **Raharjo J**, et al. Synthesis of lithium titanium oxide ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) through sol-gel method and the effect of graphene addition in lithium-ion battery anodes. In: The International Conference on Energy Storage Technology and Applications (ICESTA 2021). Solo: Universitas Negeri Sebelas Maret Solo; 2021.

LAMPIRAN

Tabel 1. Komposisi Precursor CeO₂(59)

No.	Unsur	Kandungan (%)	
		Komersial	Nonkomersial
1	Ce	99,99	79,44
2	Y	-	0,06
3	Nd	-	0,53
4	La	-	0,435
5	Sm	-	0,097
6	Pr	-	0,173

Tabel 2. Komposisi Precursor La₂(C₂O₄)₃(15)

No	Unsur	Kandungan (%)
1	La	95.296
2	Nd	2.21
3	Pr	0.896
4	Sn	0.248
5	Te	0.116
6	Ca	0.698
7	Cl	0.152
8	Au	0.0000093
9	Yb	0.0000529
10	Tb	0.0000841
11	Gd	0.000865
12	Pm	0.0007244
13	Ce	0.000985
14	Sb	0.0003659
15	Y	0.0004896
16	Sr	0.0000335
17	K	0.0002183

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Bagian dari buku

1. Sudirman H, Wisodjodarmo LA, Suryadi, **Raharjo J**, Roseno S, Onny U, Ika MU, Indah F. Outlook inovasi teknologi material 2018. Pusat Teknologi Material; 2018. 40–58.

Jurnal Internasional

2. Hameed MASAK, Muchtar A, **Raharjo J**, Khaerudini DS. A review on the process-structure-performance of lanthanum strontium cobalt ferrite oxide for solid oxide fuel cells cathodes. *International Journal of Integrated Engineering*. 2022;14(2):121–137.
3. Ma'dika B, Pravitasari RD, Tasomara R, Hapsari AU, Damisih, Rahayu S, Yuliani H, Arjasa OP, Herdianto N, Deni Y, Suyanti, Syahrial AZ, Somalu MR, **Raharjo J**. Lithium lanthanum titanate derived from lanthanum oxalate as the anode active material in lithium-ion batteries. *International Journal of Integrated Engineering*. 2022;14(2):138–145.
4. Nandiyanto ABD, Putri DBDA. Sunarya Y, **Raharjo J**. Economic evaluation of different fuels in the production of La_2NiO_4 particles using a sol-gel combustion. *Journal of Engineering Research (Online First Article)*. DOI: 10.36909/jer.10437.
5. Hidayanti F, Lestari KR, Sujani N, **Raharjo J**. A physical chemistry study of black powder materials by solution combustion synthesis method. *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry*. 2021 Oct;10(2):93–103.
6. Hapsari AU, Pravitasari RD, Damisih, Saudi AU, Khaerudini DS, **Raharjo J**. Effect of dissolution temperature on purity of LaNi_5 powder synthesized with the combustion-reduction method. *Journal of Engineering and Technological Sciences*. 2021;53(5).

7. Suhendra N, Harahap ME, Masmui, Susanto H, Saudi AU, Arjasa OP, **Raharjo J**, Aryo DH. Carbon nanotubes reinforced zirconia composites for artificial hip joint's bearing surfaces. *International Journal of Advanced Research*. 2021;9(04):985–1002.
8. Nandiyanto ABD, Maulana MI, **Raharjo J**, Sunarya Y, Minghat AD. Techno-economic analysis for the production of LaNi_5 particles. *Communications in Science and Technology*. 2020;5(2):70–84.
9. Ali MSA, **Raharjo J**, Anwar M, Khaerudini DS, Muchtar A, Spiridigliozzi L, Somalu MR. Carbonate-based lanthanum strontium cobalt ferrite (LSCF)–samarium-doped ceria (SDC) composite cathode for low-temperature solid oxide fuel cells. *Applied Sciences*. 2020 May 28;10(11).
10. Baharuddin NA, Abdul Rahman NF, Abd. Rahman H, Somalu MR, Azmi MA, **Raharjo J**. Fabrication of high-quality electrode films for solid oxide fuel cell by screen printing: A review on important processing parameters. *International Journal of Energy Research*. 2020;44(11):8296–8313.
11. Damisih, Hapsari AU, Agustanhakri, Deni Y, Arjasa OP, Anggaravidya M, **Raharjo J**, Somalu MR. Characteristics of gadolinium doped cerium at different calcination temperatures for intermediate temperature SOFC. *Sains Malaysiana*. 2020 Dec 31;49(12):3135–3142.
12. Yusop UA, Huai TK, Rahman HA, Baharuddin NA, **Raharjo J**. Electrochemical performance of barium strontium cobalt ferrite -samarium doped ceria- argentum for low temperature solid oxide fuel cell. *Materials Science Forum*. 2020 May;991:94–100.
13. **Raharjo J**, Damisih, Masmui, Hapsari AU, Riswoko A, Setyadji M, Maria VP. Effect of the rare earth oxide impurities on the physical and thermal properties of $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{0.195}$ (GDC) composite electrolyte IT-SOFC. *Materials Science Forum*. 2018 Aug;929:116–120.
14. Mah JCW, Muchtar A, Somalu MR, Ghazali MJ, **Raharjo J**. Formation of sol–gel derived $(\text{Cu,Mn,Co})_3\text{O}_4$ spinel and its electrical properties. *Ceramics International*. 2017 Jul;43(10):7641–7646.

15. **Raharjo J**, Muhammed Ali SA, Arjasa OP, Bakri A, Damisih, Dewi EL, Muchtar A, Somalu MR. Synthesis and characterization of uniform-sized cubic ytterbium scandium co-doped zirconium oxide (1Yb10ScSZ) nanoparticles by using basic amino acid as organic precursor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017 Apr;42(14):9274–9283.
16. Rohendi D, Majlan EH, Mohamad AB, Shyuan LK, **Raharjo J**. Comparison of the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) electrodes with different carbon powder content and methods of manufacture. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*. 2016; 1(3):1–6.
17. **Raharjo J**, Rahayu S, Mustika T, Masmui, Budiyo B. Effect of TiO₂ and MgO on Microstructure of α -alumina ceramics and its sintering behavior. *Advanced Materials Research*. 2015; 1112: 519–523.
18. **Raharjo J**, Arjasa O, Agustanhakri, Damisih. Composite electrolyte of SOFC based on stabilized zirconia 1Yb10ScSZ nanopowder. *Advanced Materials Research*. 2015 Jul;1112:266–270.
19. **Raharjo J**, Muchtar A, Wan Daud WR, Muhamad N, Majlan EH. Physical and thermal characterisations of SDC-(Li/Na)₂CO₃ electrolyte ceramic composites. *Sains Malaysiana*. 2012;41(1):95–102.
20. **Raharjo J**, Muchtar A, Wan Daud WR, Muhamad N, Majlan EH. Porous NiO-SDC carbonates composite anode for LT-SOFC applications produced by pressureless sintering. *Applied Mechanics and Materials*. 2011 Mar;52–54:488–493.
21. **Raharjo J**, Muchtar A, Wan Daud WR, Muhamad N, Majlan EH. Fabrication of dense composite ceramic electrolyte SDC-(Li/Na)₂CO₃. *Key Engineering Materials*. 2010 Sep;447–448:666–670.
22. **Raharjo J**, Muchtar A, Wan Daud WR, Muhamad N, Majlan EH. Fabrication of porous LSCF-SDC carbonates composite cathode for solid oxide fuel cell (SOFC) applications. *Key Engineering Materials*. 2011 Feb;471–472:179–184.

Prosiding Internasional

23. Ali MSA, Muchtar A, Mah JCW, **Raharjo J**, Khaerudini DS. Effect of open pore and interconnectivity in the Ni-SDC cermet anode microstructure on the performance of solid oxide fuel cells. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1195(2021)012042. Kuching: IOP;2021.1–8.
24. Hanafi R, Mayasari RD, Masmui, Agustanhakri, **Raharjo J**, Nuryadi R. Electrochemical sensor for environmental monitoring system: A review. In: AIP Conference Proceedings 2169. Jakarta: AIP; 2019.1–5.
25. Damisih, **Raharjo J**, Yuliani H, Hapsari AU, Masmui, Pravitasari RD, et al. Effect polyethylene glycol (PEG 400) to the physical properties of gadolinium doped cerium ($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$) nanoparticles synthesized by co-precipitation method. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019. 622.
26. Abiyu FT, Pravitasari RD, Tasomara R, Hapsari AU, Damisih, Yuliani H, Arjasa OP, Herdianto N, Deni Y, Sahrial AZ, **Raharjo J**. Synthesis of lithium titanium oxide ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) through sol-gel method and the effect of graphene addition in lithium-ion battery anodes. In: The International Conference on Energy Storage Technology and Applications (ICESTA 2021). Solo: Universitas Negeri Sebelas Maret Solo; 2021.
27. Hapsari AU, **Raharjo J**, Yuliani H, Suradharmika IGA, Damisih, Pravitasari RD, et al. Synthesis and characterization of gadolinium doped cerium ($\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$) by using various carbonates as a precipitant. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2019. 622.
28. Roseno S, Effendi MD, Gustiono D, **Raharjo J**. Effect of Na^+ concentration on luminescence of phosphor $\text{CaO}:\text{Ce}^{3+}, \text{Na}^+$ for white LED for surgery lamp prepared by solid state synthesis method. In: Sumirat I, Rifai M, editors. International Conference on Materials Science and Technology and Workshop on Neutron Scattering–ICWMST 2018. Tangerang Selatan: Center for Science and Technology of Advanced Materials, National Nuclear Energy Agency; 2018. 61–5.

29. Ma'dika B, Pravitasari RD, Tasomara R, Hapsari AU, Damisih, Herdianto N, Deni Y, Suyanti, Sahrial AZ, **Raharjo J**. Synthesis of lithium lanthanum titanate derived from local lanthanum oxalate and its electrochemical impedance spectroscopic characterization for anode application in lithium-ion battery. In: International Conference on Battery for Renewable Energy and Electric Vehicles (ICB-REV) 2021. Jakarta: AIP; 2021.
30. Hanifah AFN, Saptari SA, **Raharjo J**, Damisih, Khaerudini DS. Development and optimization of $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Zn}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ perovskite as novel cathodes for solid oxide fuel cell. In: the 6th International Symposium on Frontiers of Applied Physics (ISFAP) 2021. Jakarta: Center for Physics; 2021.
31. Damisih, **Raharjo J**, Hapsari AU, Agustanhakri, Ali M, Muchtar A. Solid state synthesis and characterization of $\text{Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{1.95}$ for solid electrolyte application using CeO_2 precursor extracted from Indonesia monazite sand. In: HPI International Conference on Innovation in Polymer Science and Technology 2019 in conjunction with the 7th International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology. Bali: Himpunan Polimer Indonesia, 16–19 October 2019.
32. Hapsari AU, Zulfia A, **Raharjo J**, Agustanhakri. Effect of the Cerium Oxide (CeO_2) on the structural and electrochemical properties of the LaNi_5Ce metal hydride anode. Journal of Physics: Conference Series; 2017 July. 877.
33. Damisih, **Raharjo J**, Masmui, Aninda RS, Lestari NA. Synthesis and characterization of La, Sc, Yb and Nd co-doped gadolinium doped cerium (GDC) composite electrolyte for IT-SOFC. Journal of Physics: Conference Series; 2017. 877.
34. Aprilia L, Nuryadi R, Mayasari RD, Gustiono D, Masmui, **Raharjo J**, et al. Growth of zinc oxide sensitive layer on microcantilever surface for gas sensor application. In: 2015 International Conference on Quality in Research; 2015. 151–154.
35. Dewi EL, Arjasa OP, **Raharjo J**, Zulaicha I, Adiarso. The assessment and application of fuel cell for electricity and transportation. In: International Symposium Focusing on Multi-Disciplinary Fusion of Physics, Chemistry, Bioscience, and Green Science; Shizuoka, Japan; 2014 December. 1–2.

36. **Raharjo J**, Arjasa OP, Arti DK, Agustanhakri, Sudaryanto, Septiva S. Ytterbium scandium co-doped zirconium oxides (1Yb10ScSZ) nanoparticles for intermediate temperature solid oxide fuel cell electrolytes. In: Arjasa OP, Saputra DA, Kurniawan, Darmawan A, editors. In: Proceedings of the 4th International Conference on Fuel Cells and Hydrogen Technology 2013 (ICFCHT2013). Yogyakarta: Center for Materials Technology; Yogyakarta; 2013. 81-84.
37. Arjasa OP, **Raharjo R**, Arti DK, Bakri A, Rifai AK, Lestari NA. Chemical synthesis and characterization of ytterbium scandium co-doped zirconium oxides nanoparticles for SOFC. In: Proceedings of the 4th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Energy 2013 (ICFCHT2013), Yogyakarta, Indonesia, 7–10 Oktober 2013. 85–88.
38. **Raharjo J**, Muchtar A, Daud WRW, Muhamad N, Edy HM. $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ -based cathodes for SDC-carbonate composite electrolyte. In: Proceeding of the 3rd International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology (ICFCHT); 22–23 November 2011; Kuala Lumpur, Malaysia; 2011. 221–226.
39. **Raharjo J**, Daud WRW, Muhamad N, Muchtar A, Majlan EH, Dedikarni. Materials technology in low and intermediate temperature solid oxide fuel cells: A review. In: Proceeding 15th Regional Symposium on Chemical Engineering & the 22nd Symposium of Malaysian Chemical Engineers (SOMChe) RSCE-SOMCHE 2008, 2–3 December 2008; Kuala Lumpur, Malaysia; 2008. 609–612.
40. **Raharjo J**, Daud WRW, Muhamad N, Muchtar A, Majlan EH. Development of composite electrolytes based on samarium doped ceria-carbonate for low temperature solid oxide fuel cells. In: Proceedings of Graduate Publication; March 2009, Uniten; 51–52.
41. **Raharjo J**, Daud WRW, Muhamad N, Muchtar A, Majlan EH. The influence of carbonate content to the characteristics of SDC-carbonate composite electrolytes for low temperature solid oxide fuel cells. In: Proceeding of the Regional Engineering Postgraduate Conference; 20–21 Oktober 2009. Palm Garden Hotel. Putrajaya.

42. Muchtar A, **Raharjo J**, Daud WRW, Muhamad N, Majlan EH. Characterisation of SDC-carbonate composite electrolyte for low temperature solid oxide fuel cell. In: Proceeding International Conference on Sustainable Energy; 16–17 June 2009; Bandung: Institute of Technology Bandung.
43. **Raharjo J**, Muchtar A, Muhamad N, Daud WRW, Majlan EH. Microstructure characterisation of SDC-carbonate composite electrolytes produced by solid state method. In Proceedings of 4th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals Environment and 2nd Asian Symposium on Material and Processing; 1–3 June 2009; Malaysia. Penang: Universiti Sains Malaysia.
44. **Raharjo J**, Muchtar A, Muhamad N, Daud WRW, Majlan EH. Microstructure characteristics of SDC-carbonate composite electrolyte produced by sol-gel for LT-SOFC application. In: Proceedings of International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology; 28–29 October 2009; Jakarta: BPPT.

Jurnal Nasional

45. Mayasari RD, Yuliani H, Deni Y, Masmui, **Raharjo J**, Nuryadi R. Penumbuhan ZnO rods terdoping CeO₂ pada substrat kaca menggunakan metode hidrotermal. *Eksergi*. 2019;16(2):31–4.
46. Hapsari AU, Pravitasari RD, Yuliani H, Damisih, **Raharjo J**. Analisis kemurnian hasil sintesis gadolinium doped cerium (GDC) menggunakan prekursor Gd₂O₃ dan Ce(OH)₄ lokal dengan metode kopresipitasi. *Jurnal Inovasi dan Teknologi Material*. 2019 Jun;1(1):11–5.
47. **Raharjo J**, Damisih, Hapsari AU, Masmui, Yanti PP. Sintesis dan karakterisasi elektrolit Ce_{0,9}Gd_{0,1-x}Nd_xO_{1,90} untuk aplikasi sel bahan bakar padatan suhu sedang. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2018 Jan;19(2):83–90.
48. **Raharjo J**. Performa elektrokimia komposit katoda berbasis La_{0,6}Sr_{0,4}Co_{0,2}Fe_{0,8}O_{3-δ} untuk solid oxide fuel cell bersuhu rendah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2012;13(2):198–203.

49. **Raharjo J.** Konduktivitas ionik komposit elektrolit samarium terdoping cerium-(Li/Na)₂CO₃ untuk solid oxide fuel cell bersuhu rendah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2013 Apr;14(3):159–165
50. **Raharjo J,** Dedikarni, Wan Daud WR. Perkembangan teknologi material pada sel bahan-bakar padat temperatur operasi menengah. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 2008;10(1):28–34.
51. Zulfia A, Juwita R, Uliana A, Jujur IN, **Raharjo J.** Proses penuaan (*aging*) pada paduan aluminium AA 333 hasil proses sand casting. *Jurnal Teknik Mesin*. 2010; 12(1).

Prosiding Nasional

52. **Raharjo J,** Damisih, Hapsari AU, Pravitasari RD, Yuliani H. Karakteristik elektrolit Ce_{0,9}Gd_{0,1}O_{1,95} dengan metode sintesis coprecipitation untuk aplikasi sel bahan bakar padatan. Dalam: Winata T, Iskandar F, Aimon AH, editors. *Prosiding Seminar Nasional Material 2018*. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2018. 1–7.
53. Hapsari AU, Pravitasari RD, Damisih, Yuliani H, Sujani N, **Raharjo J,** Khaerudini DS. Sintesis dan karakterisasi black powder La₂NiO₄ sebagai produk-antara untuk aplikasi anoda baterai NiMH. Dalam: Winata T, Iskandar F, Aimon AH, editors. *Prosiding Seminar Nasional Material 2018*. Bandung: Institut Teknologi Bandung; 2018. 8–14
54. Hapsari AU, **Raharjo J,** Damisih, Wahyudin. Sintesis dan Karakteristik CeNi₅ dari oksida logam tanah jarang dengan metode solid state. Dalam: *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. Yogyakarta: Universitas Pembangunan Nasional; 2018. A6-1–A6.6.
55. **Raharjo J,** Yuliani H, Masmui, Hapsari AU, Damisih, Pangestika PW, et al. Studi pengaruh presipitan basa terhadap sifat fisik nanomaterial cerium dioksida (CeO₂) dengan metode presipitasi. Dalam: *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. Yogyakarta: Universitas Pembangunan Nasional Yogyakarta; 2018. K14-1–K14-5.

56. **Raharjo J**, Rahayu S. Pengaruh penambahan MgO dan SiO₂ serta suhu sintering terhadap sifat fisis dan mekanis komposit keramik α -alumina. Dalam: Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia; 18 Maret 2015; Yogyakarta. B13.1-B13.5.
57. **Raharjo J**, Rahayu S, Mustika T. Pengaruh tingkat kemurnian bahan baku alumina terhadap temperatur sintering dan karakteristik keramik alumina. Dalam: Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia; 18 Maret 2015; Yogyakarta. B14.1-B14.6.
58. Arjasa OP, **Raharjo J**, Agustanhakri, Arti DK. Studi pertumbuhan partikel 1Yb10ScSZ pada metode sol-gel dan presipitasi. Dalam: Waluyo J, Mindaryani A, Suprihastuti, Dharmastiti R, editors. Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri k-20. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada – Yogyakarta; 2014. 11–5.
59. **Raharjo J**, Sri R, Masmui, Agustanhakri. Karakteristik kekuatan mekanis dan mikrostruktur komposit keramik Al₂O₃-TiO₂-MgO dengan metode *pressureless sintering*. Dalam: Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia; 5 Maret 2014; Yogyakarta.
60. Hapsari AU, **Raharjo J**, Agustanhakri B, Giri WA. Karakterisasi serbuk tembaga (Cu), tungsten (W), dan timbal (Pb) untuk metal liner. Dalam: Prosiding Seminar Nasional Teknoin 2014: Meningkatkan Daya Saing Industri Nasional Berkelanjutan Berbasis Riset; 2014; Yogyakarta.
61. Hapsari AU, **Raharjo J**, Bakrie A, Putranto D. Karakteristik lapisan pengerasan permukaan pada baja scm 415 hasil proses carburizing untuk aplikasi roda gigi. Dalam: Prosiding Seminar Nasional TEKNOIN; 2013. 2.

62. Dewi EL, **Raharjo J.** Perbandingan grafit bipolar plate model paralel dan serpentina sebagai komponen separator pada PEMFC. Seminar Nasional Teknoin; 2008; Yogyakarta. A-47–A-50.

Patent

63. Proses pembuatan keramik armor berbasis alumina dan produk yang dihasilkan. IDP000065742.
64. Panel komposit keramik armor dan metode pembuatannya. IDP000080538.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama lengkap	: Dr. Jarot Raharjo
Tempat, tgl lahir	: Yogyakarta, 15 Maret 1971
Anak ke	: Sepuluh dari sepuluh bersaudara
Jenis kelamin	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: H. Soedardjo H.P. (alm.)
Nama Ibu Kandung	: Hj. Sumartini (almh.)
Nama Istri	: Lisa Paras Setyowati, S.H., M.Kn.
Jumlah Anak	: 1 (satu) orang
Nama Anak	: Raditya Arsa Pradana
Nama Instansi	: Pusat Riset Material Maju BRIN
Judul Orasi	: Pengembangan Keramik Maju Berbasis Logam Tanah Jarang untuk <i>Fuel Cell</i> dan Baterai sebagai Energi yang Ramah Lingkungan
Bidang Kepakaran	: Material <i>Energy Storage</i>
No. SK Pangkat Terakhir	: Keppres RI No.16/K Tahun 2021, tanggal 27 April 2021
No. SK Peneliti Ahli Utama	: Keppres RI No. 3/M Tahun 2022, tanggal 16 Januari 2022

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/PT	Tempat	Tahun Lulus
1.	S-3	Universiti Kebangsaan Malaysia	Malaysia	2012
2.	S-2	Universitas Indonesia	Jakarta	2001
3.	S-1	Universitas Pembangunan Nasional	Yogyakarta	1994
4.	SMA	BOPKRI I	Yogyakarta	1989
5.	SMP	Negeri I IKIP	Yogyakarta	1986
6.	SD	Negeri Keputran VII	Yogyakarta	1983

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan	Nama Kota/ Negara	Tahun
1	Sertifikasi Auditor Teknologi	Bogor	2019
2	Certified International Research Reviewer	Bogor	2019
3	Tailor Made Course on Advanced Materials for Fuel Cells Application	University of Delaware USA	2016
4	Tailor Made Course on Fuel Cell Technology	Imperial College London UK	2015
5	Southeast Asia International Joint Research and Training Program on Low Carbon Green Energy and Environmental Green Technology for Sustainable Environment Development	National Tsing Hua University, Taiwan	2014
6	Training on Thermogravimetry Analysis	Lyon, Prancis	2013
7	Training on Heat Treatment and Metal Finishing for Improvement Metal Properties	Nagoya, Jepang	2002

D. Jabatan Struktural

No.	Tahun	Nama Jabatan/ Eselon	Nama Instansi
-----	-------	----------------------	---------------

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Ahli Utama IV/d	20/10/2020
2.	Peneliti Madya IV/c	13/11/2017
3.	Peneliti Madya IV/b	28/05/2014
4	Peneliti Madya IV/a	23/01/2013
5	Peneliti Muda III/d	30/04/2006
6.	Peneliti Muda III/c	09/11/2004

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan / Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Pemimpin proyek penelitian dan pengembangan seni dan teknologi keramik dan porselin	Mensesneg	1997

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran	Penyelenggara	Tahun
1	<i>7th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology 2019</i> , Bali, 2—3 Oktober 2019	Pemakalah	IFHE, BPPT, & UKM Malaysia	2019
2	<i>International Conference on Materials Research Indonesia Meeting 2018</i> , Bali, 31 Juli 2018	Pemakalah	ITB	2018

3	<i>12th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials</i> , Paris, Prancis, 11—13 September 2017	Pemakalah	University of Pierre and Marrie Currie (UPMC)	2017
4	<i>International Conference on Nano Energy</i> , Liverpool, UK 29 Juli 2016	Pemakalah	University of Liverpool	2016
5.	<i>International Conference on Energy Sciences</i> , 27 Juli 2016	Pemakalah	ITB	2016
6	<i>5th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology 2015</i> , Kuala Lumpur Malaysia	Pemakalah	Universiti Teknologi Malaysia (UTM), UKM, & BPPT	2015
7	<i>3rd International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology 2013</i> , Yogyakarta	Pemakalah	BPPT & UKM	2013

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Jabatan	Majalah/Prosiding	Tahun
1.	Peer Reviewer	Jurnal Sains Materi Indonesia	2012–sekarang
2.	Editor	Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)	2020–sekarang

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	2
2.	Penulis bersama Penulis lainnya	60
	Total	62

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	19
2.	Bahasa Inggris	43
	Total	62

No.	Kualifikasi Publikasi	Jumlah
1.	Buku dan Bagian dari Buku	1
2.	Jurnal Internasional	21
3.	Jurnal Nasional	7
4.	Prosiding Internasional	22
5.	Prosiding Nasional	11
	Total	62

J. Paten

No.	Judul Paten	ID Paten
1.	Proses pembuatan keramik armor berbasis alumina dan produk yang dihasilkan	IDP000065742
2.	Panel komposit keramik armor dan metode pembuatannya.	IDP000080538

K. Pembinaan Kader Ilmiah

No.	Universitas/PT Tempat Membimbing	Nama yang Dibimbing	Tahun
1.	Program Sarjana S-3 UNDIP Semarang (Penguji)	Darjat	2021
2.	Program Sarjana S-3 Universiti Kebangsaan Malaysia (Pembimbing)	Nur Wardah Norman	2021
3.	Program Sarjana S-2 UI Depok (Pembimbing)	Ade Utami Hapsari	2016
4.	Program Sarjana S-1 UI Depok (Pembimbing)	Benediktus Madika Fawwaz Taqi Abiyu Hikam Angga Saputra	2021
5.	Program Sarjana S-1 ITS Surabaya (Pembimbing)	Annisa Ramadhanti	2021
6.	Program Sarjana S-1 UPI Bandung (Pembimbing)	Muhammad Irfansyah Dea Belle Dewari Artika	2020

L. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Nama Organisasi	Jabatan	Tahun
1	Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) / Perhimpunan Periset Indonesia	Anggota	2018–sekarang
2	Persatuan Insinyur Indonesia (PII)	Anggota	1997–sekarang
3	Indonesian Fuel Cell & Hydrogen Energy (IFHE)	Sekretaris Umum	2019–sekarang
4	Materials Research Society Indonesia	Anggota	2012–sekarang

M. Tanda Penghargaan

No.	Pejabat/Instansi yang memberikan	Nama/Jenis Penghargaan	Tahun
1	Presiden RI	Satyalancana Wirakarya	2015
2	Presiden RI	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	2016
3	Presiden RI	Satyalancana Karya Satya X Tahun	2008



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung BJ Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-9612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.692



ISBN 978-623-8052-03-5



9 786238 052035

Buku ini tidak diperjualbelikan.