



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Ismunandar

**MATERIAL FeRAM DAN ENERGI BARU:
Memindai Kristal Pada Skala Atomik**

9 Januari 2009
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Judul: Pidato Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung
**MATERIAL FeRAM dan ENERGI BARU:
Memindai Kristal pada Skala Atomik**

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Data katalog dalam terbitan

Prof. Ismunandar

MATERIAL FeRAM dan ENERGI BARU:

Memindai Kristal pada Skala Atomik

Disunting oleh Prof. Ismunandar

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2009

vi+34 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-979-18230-9-8

1. Pendidikan Tinggi 1. Prof. Ismunandar

Percetakan cv. Senatama Wikarya, Jalan Sadang Sari 17 Bandung 40134

Telp. (022) 70727285, 0811228615; E-mail:paulusuyanto@yahoo.co.id

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, yang atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan pidato ini.

Terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Majelis Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberi kesempatan kepada saya untuk menyampaikan Pidato Ilmiah ini di sidang pleno Majelis Guru Besar.

Tulisan ini akan membahas keterkaitan struktur atomik padatan oksida logam dan sifat kimia dan fisiknya. Pertama akan dibahas mengapa padatan oksida logam penting. Setelah itu dibahas pula teknik-teknik penentuan struktur, terutama padatan oksida logam yang berbentuk serbuk. Teknik utama yang didiskusikan adalah teknik difraksi serbuk sinar-X dan neutron serta teknik simulasi atomik.

Bagian 2 mendiskusikan beberapa hubungan struktur dan sifat feroelektrik bahan padatan oksida logam berstruktur Aurivillius. Bahasan di bagian ini akan mencakup sintesis oksida Aurivillius baru, penentuan struktur oksida dengan teknik difraksi resolusi tinggi, penentuan distribusi ion, dan hasil studi mengikuti transisi fasa yang diakibatkan perubahan suhu.

Bagian 3 akan dengan singkat memaparkan kajian awal dalam satu tahun terakhir pada pencarian oksida-oksida logam yang dapat dimanfaatkan untuk membuat sel bahan bakar yang bekerja pada suhu lebih rendah dan tahan pada bahan bakar yang terkontaminasi sulfida.

Pidato ini adalah bentuk pertanggungjawaban akademis dan komitmen saya sebagai seorang yang baru menduduki jabatan guru besar. Buku sederhana ini saya persembahkan untuk semua guru yang telah mendidik dan membimbing saya.

Semoga tulisan ini bermanfaat.

Bandung, 9 Januari 2009

Ismunandar

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	iii
1. PENDAHULUAN	3
- Oksida Logam	3
- Padatan Kristalin	5
- Teknik Pemindaian yang Digunakan	6
- Difraksi serbuk	6
- Pemodelan kristal	10
2. MATERIAL FeRAM	11
- Sintesis oksida Aurivillius Baru	13
- Mengamati Kelumit Distorsi	14
- Difraksi Anomalous	15
- Mencermati Transisi Fasa	17
- Pemodelan	19
3. MATERIAL SOFC	22
- Sintesis Material-material SOFC baru	23
4. PENUTUP DAN HARAPAN	25
UCAPAN TERIMA KASIH	26
DAFTAR PUSTAKA	27
CURICULUM VITAE	31

*“Solids are like people -imperfect!
It’s the defects that make them unique & interesting”
(J. Corish)*

1. PENDAHULUAN

Paparan ini akan membahas bagaimana hasil-hasil pemindaian struktur material oksida logam dapat digunakan untuk memahami sifat fisika dan kimianya, terutama sifat feroelektrik dan hantaran. Oleh karena itu, pada bagian ini, dibahas secara ringkas oksida logam dan teknik-teknik pemindaian yang digunakan.

OKSIDA LOGAM

Oksida logam telah lama digunakan sebagai bahan mentah untuk keramik, refraktori dan semen. Keramik pertama dibuat kira-kira 24000 tahun yang lalu. Ketika orang mulai menetap dan praktek bertani mulai dilakukan (kira-kira 6400 B.C.), pembuatan barang gerabah menjadi kebiasaan umum. Pada kira-kira tahun 6000 B.C., teknik-teknik pencetakan, pemolesan dan penghiasan barang gerabah telah dikenal.

Banyak bahan mineral atau bijih logam ditemukan di alam dalam bentuk oksida logam. Hal ini membuat oksida logam sangat penting, karena dari bijih tersebut dapat diekstraksi logamnya. Hampir separuh dari unsur-unsur yang diketahui didapat dari bijih oksidanya. Dominannya bijih oksida ini merupakan akibat langsung dari kelimpahan oksigen di alam serta kereaktifan oksigen yang tinggi (oksigen membentuk paling tidak satu senyawa dengan hampir semua unsur, kecuali gas mulia ringan).

Kecuali kegunaan tradisional di atas, oksida logam juga memiliki tempat yang penting di banyak aplikasi mutakhir. Berdasarkan kegunaannya, bahan mutakhir dibagi dalam dua kelas besar yaitu bahan struktural dan fungsional. Untuk bahan struktural sifat yang diutamakan adalah sifat mekanik bahan seperti Modulus Young, Modulus Elastisitas, dan sebagainya, sementara untuk bahan fungsional sifat yang terpenting adalah sifat listrik, magnetik, katalitik dan optik bahan (1).

Material feroelektrik biasanya didefinisikan sebagai material yang memiliki polarisasi spontan, yang arahnya dapat diubah secara reversibel dengan medan transien yang sesuai. Polarisasi spontan dihasilkan oleh susunan ion dalam padatan. Awalnya diduga bahwa feroelektrik muncul akibat adanya ikatan hidrogen, namun penemuan feroelektrik pada BaTiO_3 membantah dugaan itu. Sejak itu studi feroelektrik terfokus pada oksida ini dan sejenisnya. Seperti yang akan dibahas di bagian 2, material ini dapat dimanfaatkan untuk memori, yang secara khusus disebut FeRAM (*Ferroelectric Random Access Memory*) (2).

Di era keterbatasan bahan bakar minyak dan meningkatnya gas rumah kaca, padatan oksida logam juga menyediakan potensi solusi, melalui sel bahan bakar padatan oksida (SOFC = *Solid oxide fuel cells*). Semua komponen SOFC - anoda, katoda dan elektrolit- dibuat dari oksida. Karena terbuat dari keramik, sel dapat beroperasi pada suhu yang tinggi, sehingga efisiensi yang tinggi dapat dicapai. Topik material SOFC akan dibahas di bagian 3 buku ini.

Contoh-contoh di atas mengilustrasikan jangkauan yang sangat luas dari aplikasi yang nyata dan potensial dari oksida logam. Keragaman aplikasi ini berasal dari keragaman struktur dan sifat (fisik maupun kimia) oksida logam. Jadi oksida logam bukan hanya untuk bahan gerabah saja, tetapi berbagai aplikasi telah dan masih menanti untuk dieksplorasi.

Sifat oksida logam merupakan fungsi dari struktur bahan, teknik sintesis, serta komposisinya. Oleh karena itu penelitian struktur bahan oksida logam sangat penting dalam usaha untuk menuju desain bahan baru dan yang berkinerja lebih baik. Penentuan struktur oksida-oksida logam dihadapkan dengan masalah dengan bentuknya yang umumnya berupa serbuk, kandungan unsur dengan kekuatan hamburan sinar-X yang berbeda, serta seringnya muncul distorsi, maupun *ordering*.

Dengan kemajuan teknik pemodelan dan instrumentasi difraksi berbagai kerumitan tadi dapat diatasi. Kemajuan ini termasuk ketersediaan teknik penentuan struktur dari data difraksi serbuk, ketersediaan sumber neutron dan

sinar-X dengan intensitas lebih tinggi, resolusi pengukuran yang lebih tinggi, serta kemajuan yang memungkinkan komputasi yang lebih mudah dan lebih cepat. Di bagian selanjutnya akan diberikan paparan singkat tentang struktur kristal dan selanjutnya berbagai modus eksperimen difraksi dan komputasi yang telah memungkinkan berbagai kerumitan masalah tadi dijawab.

PADATAN KRISTALIN

Sejak zaman purba, kristal telah menarik perhatian manusia. Orang-orang purba mengumpulkan kristal kemungkinan untuk digunakan sebagai peralatan. Beberapa catatan juga menyebut kristal tertentu digunakan orang purba untuk ritual permohonan hujan. Bahkan hingga kini, intan, suatu alotrop karbon, masih merupakan daya tarik bagi banyak orang.

Simetri dan keindahan kristal juga menarik perhatian saintis sejak abad ke-17 (3). Sebelum penemuan von Laue, Friedrich dan Knipping pada tahun 1912, bahwa sinar-X dapat digunakan untuk menentukan struktur internal kristal, hanya bentuk eksternal kristal sajalah yang tersedia bagi saintis. Namun beberapa genius telah membuat lompatan-lompatan penting dalam prediksi dan kerangka teori struktur internal kristal. Puncaknya adalah deduksi secara independen oleh E. S. Fedorov (1853-1919), Artur Schoenflies (1853-1928) dan W. Barlow (1845-1934) bahwa struktur kristal pasti mengikuti salah satu dari hanya 230 jenis kisi dalam ruang. Ratusan ribu struktur kristal yang telah ditentukan dengan presisi dan akurat sampai saat ini sejak 1912 telah menunjukkan beberapa susunan dari 230 kemungkinan tersebut (4).

Suatu kisi adalah susunan titik-titik yang ekuivalen dalam ruang berdimensi 1, 2, atau yang lebih umum 3, sehingga struktur kristal bisa dianggap sebagai konvolusi dari kisi dan satuan asimetri. Satuan asimetri berada di dalam sel satuan, yakni satuan terkecil yang diulang-ulang. Dalam sel satuan, yang didefinisikan dengan besarnya sumbu-sumbu dan sudut antar sumbu (a, b, c, α, β dan γ), atom-atom posisinya ditandai dengan menggunakan koordinat

fraksional (x,y,z) . Menentukan struktur kristal pada dasarnya adalah menentukan simetri (jenis kisi), besarnya sel satuan, dan posisi-posisi atom dalam sel satuan.

TEKNIK PEMINDAIAN YANG DIGUNAKAN

Dalam pekerjaan yang dilakukan penulis terutama memindai kristal dengan dua teknik utama, yakni difraksi serbuk dan pemodelan. Bagian ini akan membahas kedua teknik tersebut.

DIFRAKSI SERBUK

Hampir semua material yang menjadi perhatian penulis selama ini didapat sebagai material serbuk atau polikristalin. Umumnya penentuan struktur kristal dilakukan dengan menggunakan kristal tunggal, yang dapat diatur orientasinya sedemikian sehingga overlap puncak dapat diminimalkan. Dalam pola difraksi sinar-X serbuk overlap puncak difraksi, terutama pada nilai 2θ tinggi, menjadi tak terhindarkan. Terjadinya overlap ini menyebabkan pemisahan intensitas-intensitas dari masing-masing pemantulan sangat sulit dilakukan, padahal intensitas puncak difraksi ini sangat penting dalam penentuan struktur.

Rietveld (5) mengusulkan bahwa penentuan struktur kristal dengan data difraksi serbuk dimungkinkan dengan melakukan *refinement* model menggunakan minimisasi residual antara data intensitas difraksi yang diamati dan intensitas difraksi hitungan. Intensitas difraksi hitungan adalah jumlah dari kontribusi dari puncak-puncak Bragg yang bertetangga dan dari puncak *background*.

Penentuan struktur presisi dan akurat oksida logam dari difraksi serbuk menggunakan metoda Rietveld dimungkinkan dan difasilitasi oleh perkembangan-perkembangan yang dibahas berikut ini.

Ketersediaan radiasi sinkrotron

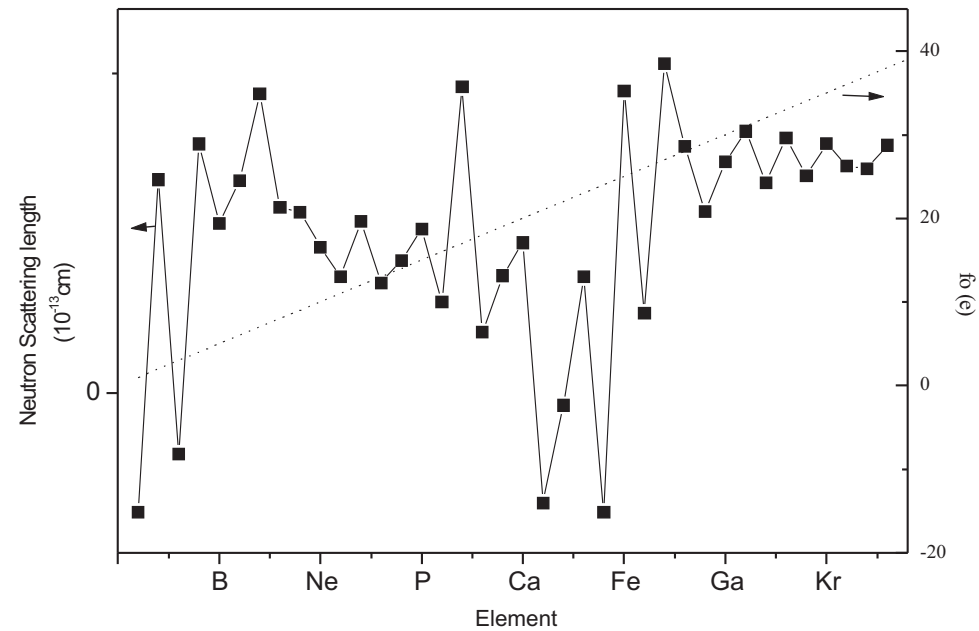
Sinar-X, seperti juga radiasi gelombang elektromagnetik yang lain, dapat juga dihasilkan dengan fasilitas sinkrotron. Dalam instalasi sinkrotron, elektron atau positron dipercepat pada kecepatan relativistik dalam orbit beberapa meter hingga ribuan meter. Jelas, bahwa fasilitas ini sangat kompleks dan mahal. Namun, karena berbagai keunggulan dan banyak percobaan yang hanya dimungkinkan dengan fasilitas ini, pemanfaatan di berbagai bidang termasuk kristalografi berkembang sangat pesat. Penulis berkat kolaborasi yang dijalin telah memanfaatkan fasilitas sinkrotron di *Photon Factory*, Tsukuba, Jepang; *Spring-8*, Himeji, Jepang; dan *Australian Synchrotron*, Melbourne, Australia.

Bila dibandingkan dengan sinar-X yang dihasilkan dengan sumber konvensional di laboratorium, karakteristik penting sinar-X sinkrotron adalah radiasinya yang kontinyu dan intensitasnya yang sangat tinggi (6). Sifat pertama memungkinkan dilakukannya percobaan difraksi anomalous, yang akan dibahas di bagian dua buku ini. Sedang sifat yang kedua memungkinkan perekaman data yang lebih singkat, percobaan dengan sampel dalam jumlah sangat kecil, dan data yang dihasilkan lebih tinggi resolusinya. Perekaman data difraksi yang singkat dapat dipersingkat lagi dengan menggunakan detektor pelat (*image plate*). Desain difraktometer dengan pelat perekam di *Photon Factory* merupakan salah satu jenis yang pertama yang digunakan, penulis turut dalam usaha desain dan komisioning peralatan ini (7, 8). Resolusi yang lebih tinggi sangat penting dalam penentuan struktur dari data difraksi serbuk, karena dapat mengurangi masalah overlap puncak-puncak difraksi.

Kombinasi difraksi sinar-X dan neutron

Karena perbedaan interaksinya dengan materi, kebergantungan kekuatan hamburan sinar-X dan neutron pada nomor atom berbeda, gambar 1. Perbedaan kekuatan hamburan inilah yang dapat dimanfaatkan untuk melengkapi informasi yang didapatkan dari salah satu teknik. Dalam banyak pekerjaan

penulis, sifat ini sangat penting, karena dalam bahan sekaligus terkandung Bi dan O, Bi ($Z=83$) memiliki kekuatan hamburan sinar-X sekitar sepuluh kali lebih besar dari O ($Z=8$). Jadi difraksi neutron menjadi penting, karena kekuatan hamburan neutron kedua unsur tidak berbeda terlalu ekstrim. Percobaan difraksi neutron selama ini dilakukan di Puspipstek Serpong; *Bragg Institute, Australia*; *High Flux Beam Reactor, Brookhaven National Laboratory, USA*.

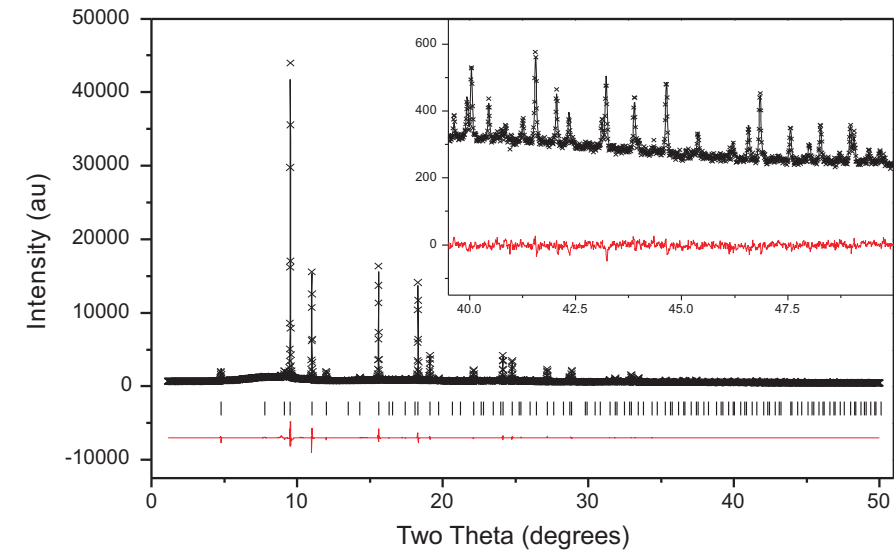
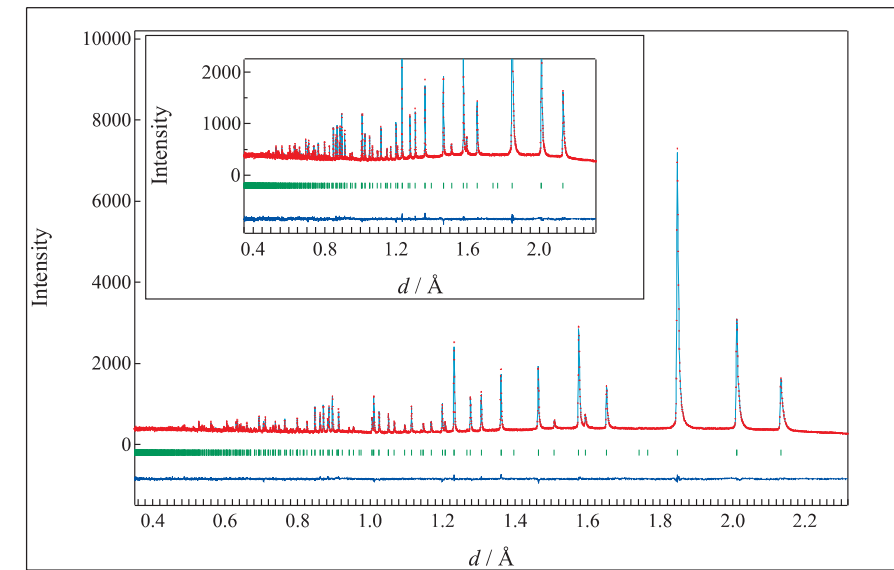


Gambar 1

Kekuatan hamburan sinar-X dan neutron materi sebagai fungsi nomor atom. Terlihat kekuatan hamburan sinar-X monoton naik, sedang untuk neutron bervariasi secara dramatik dari unsur ke unsur.

Sifat yang komplemen antara sinar-X dan neutron dalam penentuan posisi atom ini, sering digunakan dalam *refinement* gabungan data sinar-X dan neutron. Misalnya, dalam penentuan *ordering* atom pada piroklor $\text{Bi}_2\text{TaCrO}_{7-y}$. Kombinasi difraksi sinar-X sinkrotron dan neutron memungkinkan *ordering* pada posisi Bi dan O' dan parameter termal yang dapat diterima secara fisik berhasil didapat.

kan. Gambar 2 menunjukkan hasil *refinement* data difraksi neutron dan sinar-X, yang menunjukkan fit yang sangat baik, bahkan hingga nilai sudut besar (9).



Gambar 2

Profil Rietveld fit $\text{Bi}_2(\text{CrTa})\text{O}_{7-y}$ RT neutron (atas) dan sinar-X sinkrotron (bawah), data (+), hitungan (garis solid) dan selisih (garis paling bawah). Garis-garis vertikal pendek menunjukkan puncak Bragg yang diizinkan.

PEMODELAN KRISTAL

Walaupun kemajuan daya komputer telah meningkat pesat, namun hingga kini kita belum mampu memodelkan semua proses fisik. Hingga kini, masih belum praktis untuk menangani sistem besar (lebih dari 10^3 atom) secara mekanika kuantum penuh. Dengan demikian, pemodelan dengan metoda simulasi atomik menggunakan potensial antar atom masih sangat bermanfaat untuk memahami dan memprediksi struktur dan sifat material. Simulasi padatan terutama dilakukan dengan melakukan minimisasi energi (10-11). Dalam padatan ionik, yang menjadi perhatian penulis, energi senyawa terutama disumbang oleh energi kisi.

Energi kisi suatu material dapat dinyatakan secara klasik dengan asumsi semua ion sebagai bola bermuatan dan interaksi antar ion-ion ini mengikuti hukum gaya antar ion sederhana. Pernyataan umum energi yang sering digunakan dalam perhitungan adalah:

$$E_L = \sum_{ij} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} + \sum_{ij} V(r_{ij}) + \dots$$

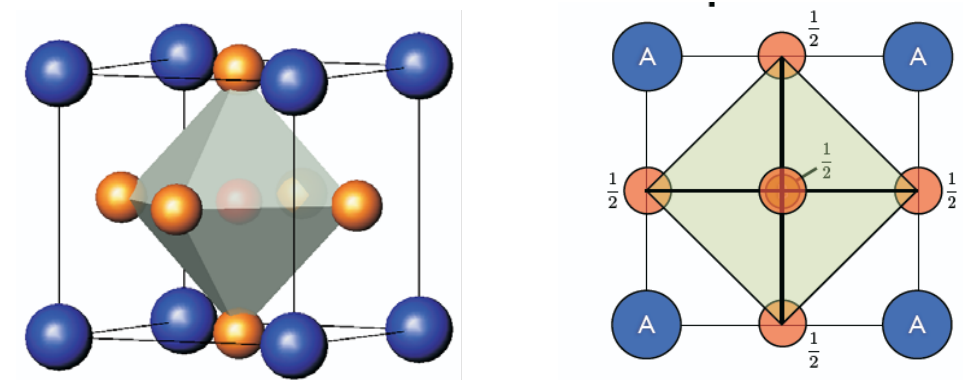
Persamaan tersebut menunjukkan semua pasangan ion i dan j . Suku pertama pada sisi kanan merupakan jumlah interaksi Coulomb antara pasangan ion i dan j yang terpisah pada jarak r_{ij} . Suku selanjutnya adalah interaksi dua, tiga, empat, ... partikel. Namun, dalam praktek jarang kita perlu sampai mempertimbangkan interaksi tiga partikel.

Studi yang lebih menarik dan banyak dilakukan, adalah studi padatan dengan defek. Dalam pembentukan padatan berdefek, kontribusi terbesar pada energi pembentukannya adalah energi relaksasi kristal di sekitar pusat defek. Simulasi padatan berdefek dilakukan dengan membagi padatan menjadi dua daerah utama, daerah sekitar defek dan daerah kontinyu. Di daerah sekitar defek, minimisasi energi dilakukan dengan teknik seperti padatan kristalin sempurna. Di pihak lain, daerah sekitar defek cukup diperlakukan dengan teori

kontinyu. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak GULP (12).

2. MATERIAL FeRAM

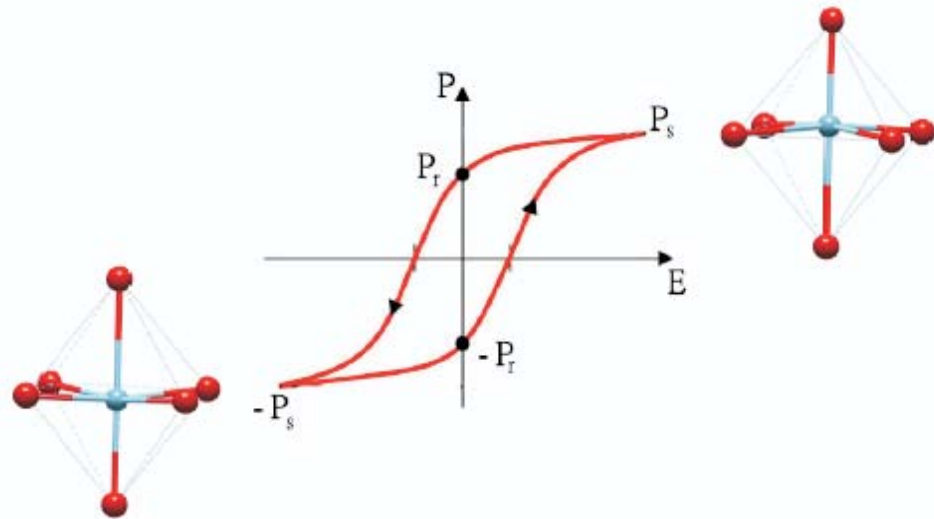
Dalam padatan yang bersel satuan tidak simetrik (*non centrosymmetric*), dapat timbul momen dipol. Sel satuan di sekitarnya dapat dirangsang oleh sel satuan tersebut agar memiliki arah momen dipol yang sama dan membentuk suatu daerah yang disebut domain feroelektrik. Salah satu contoh material yang banyak memiliki sifat feroelektrik adalah perovskit, ABO_3 , A dan B adalah ion logam, yang struktur idealnya diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3

Struktur oksida perovskit, ABO_3 (kiri) dan proyeksinya di bidang ab (kanan). Atom B di pusat oktahedra dan O di pojok-pojok oktahedra.

Material feroelektrik menunjukkan lup histerisis. Bila medan listrik diberikan pada bahan feroelektrik, atom B, yang memiliki dua posisi stabil dalam struktur tersebut, akan bergerak ke atas atau ke bawah relatif terhadap oksigen. Pergeseran ini menghasilkan momen dipol dalam sel satuan, yang disebut polarisasi ($\pm P_s$). Bila medan kemudian dihilangkan, atom B tetap pada posisi tersebut sehingga polarisasi tetap ada, jadi diperoleh sifat non-volatil, Gambar 4.



Gambar 4

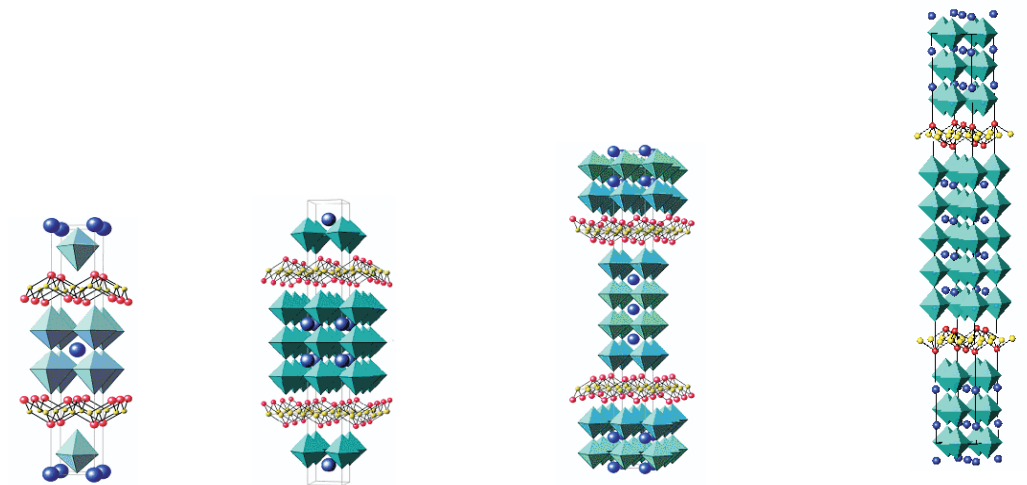
Polarisasi spontan dapat dimunculkan dengan memberikan medan listrik. Kristal dapat dibiarkan dalam keadaan *up* atau *down*, yang biasanya digunakan untuk menyatakan 1 dan 0. Informasi yang disimpan tetap ada walaupun medannya telah dimatikan, sehingga memori bersifat non-volatil.

Keadaan feroelektrik diamati hanya di bawah nilai suhu T_c , yang disebut suhu Curie, yang khas untuk material tertentu. Transisi dari fasa feroelektrik ke fasa paraelektrik di atas T_c berkaitan dengan transisi fasa struktural. BaTiO_3 di bawah suhu 183 K bersimetri rombohedral, pada rentang 183-278 K bersimetri ortorombik, dan pada rentang 278-403 K bersimetri tetragonal. Di atas 403 K didapatkan fasa paraelektriknya yang bersimetri kubus (Gambar 3).

Pada awalnya, bahan yang banyak dipakai sebagai FeRAM adalah $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ (PZT). Namun, kini tengah tumbuh niat besar untuk mengganti bahan-bahan feroelektrik yang berbasiskan perovskit PZT, baik karena alasan lingkungan (Pb adalah unsur yang toksik) maupun untuk meningkatkan kinerja. Bahan yang dijagokan menjadi kandidat pengganti PZT adalah bahan-bahan yang berstruktur Aurivillius, bahan yang pertama kali disintesis lima puluh tahun lalu (13). Bahan Aurivillius mempunyai lapisan perovskit dalam

strukturnya, lapisan perovskit ini terselang dengan lapisan $[\text{Bi}_2\text{O}_2]^{2+}$, sehingga membentuk oksida dengan rumus umum $\text{Bi}_2\text{A}_{n-1}\text{B}_n\text{O}_{3n+3}$, $n = 2, 3, 4, 5, \dots$; dengan A dan B, masing-masing menyatakan ion-ion logam transisi atau pos-transisi yang berada di pusat kuboktahedra dan pusat oktahedra oksigen dalam lapisan perovskit dan n menunjukkan jumlah lapisan oktahedra dalam lapisan perovskit, lihat Gambar 5. Kebanyakan oksida Aurivillius memiliki ion B berupa Ti, Nb, W.

Berikut dipaparkan beberapa kontribusi penulis dalam pengungkapan struktur dan sifat feroelektrik, serta inovasi teknik sintesis bahan-bahan feroelektrik Aurivillius. Hasil studi transisi dari fasa feroelektrik ke fasa paraelektrik (studi kebergantungan suhu) juga akan dibahas.



Gambar 5.

Struktur Aurivillius $\text{Bi}_2\text{A}_{n-1}\text{B}_n\text{O}_{3n+3}$, $n = 1, 2, 3, \dots$; dalam gambar di atas dari kiri ke kanan, $n = 2, 3, 4$ dan 5 .

SINTESIS OKSIDA AURIVILLIUS BARU

Usaha substitusi di lapisan perovskit maupun di lapisan Bi_2O_2 , di lapisan perovskit telah dicoba menggantikan sebagian atau seluruh ion Ti/Nb dengan ion lain (14). Namun substitusi di lapisan perovskit terutama pada ion

oktahedralnya terbatas pada ion-ion pensubstitusi berupa ion logam transisi. Usaha untuk mensubstitusi dengan ion pos-transisi telah dicoba dilakukan, yakni untuk mensubstitusikan Sb^{5+} kedalam lapisan perovskit membentuk oksida $SrBi_2Nb_{2-x}Sb_xO_9$, $SrBi_2Nb_{2-x}Sb_xO_9$ hanya berhasil disintesis untuk nilai $0,1 \leq x \leq 0,5$. Batas kelarutan Sb dalam larutan padat $SrBi_2Nb_{2-x}Sb_xO_9$ adalah 0,5. Di atas $x = 1,0$ dihasilkan campuran dengan fasa lain. Hasil ini menunjukkan ion pos transisi dalam jumlah terbatas dapat digunakan untuk mensubstitusi ion logam transisi dalam lapisan perovskit (15).

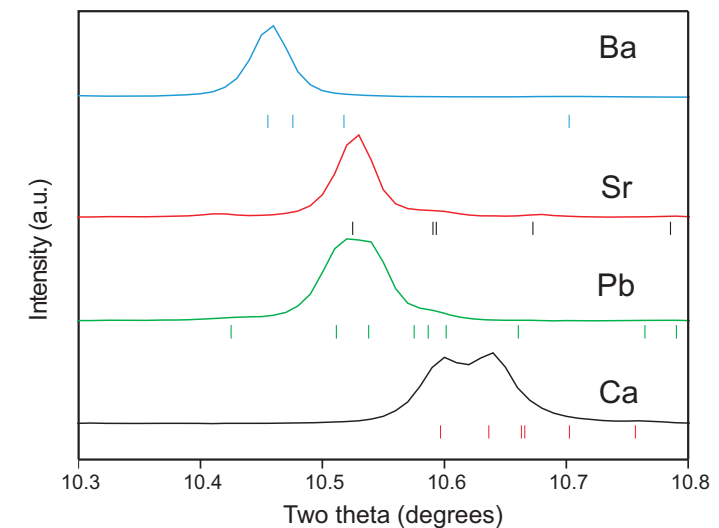
Ukuran partikel, terutama saat mendekati ukuran nanometer, sangat mempengaruhi sifat fisik, termasuk sifat feroelektrik. Pada oksida Aurivillius tiga lapis, telah dilakukan inovasi penggunaan teknik hidrotermal untuk merekayasa ukuran partikel $Bi_4Ti_3O_{12}$. Dengan mengatur kombinasi konsentrasi mineralizer, waktu reaksi, dan suhu reaksi ukuran partikel oksida dapat diubah-ubah (16). Dengan kemampuan mengubah-ubah ini, dimungkinkan untuk membuat bahan feroelektrik dengan sifat-sifat yang khas.

Selain itu, sintesis beberapa oksida Aurivillius dengan $n = 4$ baru juga telah dilakukan. Struktur oksida hasil sintesisnya telah pula ditentukan (17). Beberapa komposisi material yang juga telah dicoba disintesis adalah yang memasukkan ion logam transisi dengan elektron tak berpasangan, dengan harapan muncul sifat magnetoelektrik (18).

MENGAMATI KELUMIT DISTORSI

Studi struktur oksida Aurivillius untuk menghasilkan informasi struktur oksida yang akurat dan presisi telah dilakukan, mulai dari oksida dengan $n = 2$ hingga $n = 5$ (19). Dalam pekerjaan ini, peran difraksi neutron untuk menentukan posisi oksigen di tengah keberadaan atom-atom berat sangat penting. Pada oksida yang diteliti, sering sekali distorsi dari fasa tetrahedral paraelektrik sangat kecil. Peran difraktometer dengan resolusi yang tinggi, yakni difraksi sinar-X sinkrotron, untuk mengamati distorsi yang sangat kecil ini sangat vital.

Contoh yang diberikan di sini adalah pengamatan distorsi dari simetri tetrahedral ke ortorombik pada bahan $A_2Bi_4Ti_5O_{18}$ ($A = Ca, Sr, Ba$ and Pb). Sel satuan untuk $A = Ca, Sr, Ba$ dan Pb berturut-turut adalah $a = 5,4251(2), b = 5,4034(1), c = 48,486(1)$; $a = 5,4650(2), b = 5,4625(3), c = 48,852(1)$; $a = 5,4988(3), b = 5,4980(4), c = 50,352(1)$; $a = 5,4701(2), b = 5,4577(2), c = 49,643(1)$; $a = 5,4937(3), b = 5,4571(4), c = 24,9169(14)$ Å. Gambar 6 memperlihatkan cuplikan pola difraksi sinkrotron untuk empat oksida $A_2Bi_4Ti_5O_{18}$ pada suhu kamar. Tampak dengan jelas pembelahan puncak 110 ($I4/mmm$) menjadi 200/020 ($Bc2b$) untuk senyawa Ca dan Pb, sementara untuk Sr dan Ba hanya nampak puncak tunggal. Pembelahan ini tidak teramati sama sekali di pola difraksi yang dihasilkan dari sinar-X konvensional.



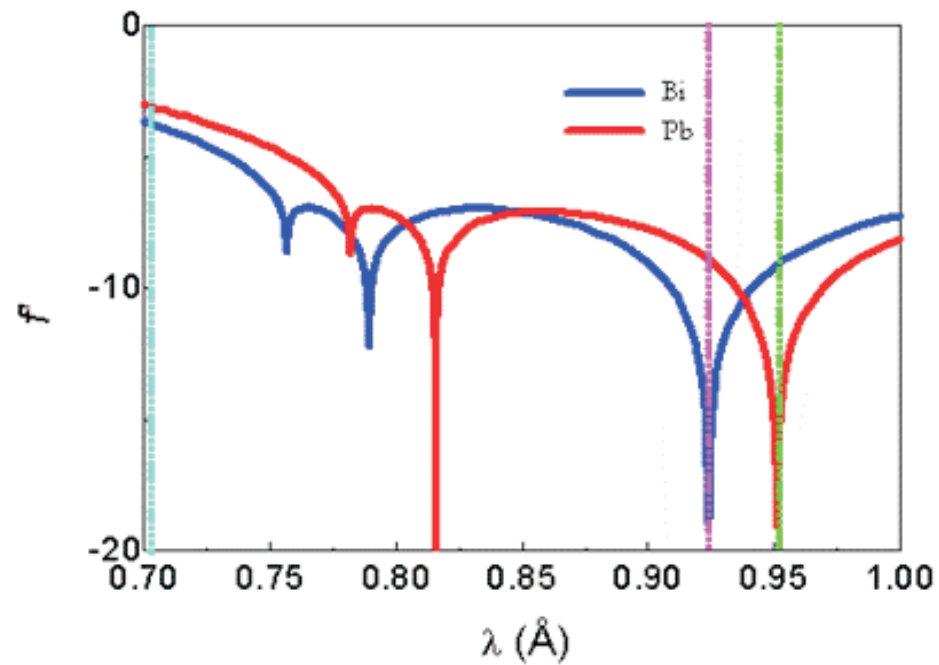
Gambar 6

Cuplikan pola difraksi sinkrotron untuk empat oksida $A_2Bi_4Ti_5O_{18}$ RT. Tampak dengan jelas pembelahan puncak 110 ($I4/mmm$) menjadi 200/020 ($Bc2b$) untuk senyawa Ca dan Pb, sementara untuk Sr dan Ba hanya nampak puncak tunggal.

DIFRAKSI ANOMALOUS

$ABi_2Nb_2O_9$, $A = Sr, Ba$ dan Pb adalah bahan feroelektrik, yang sifat feroelektriknya dihipotesiskan dipengaruhi oleh detail pengisian ion (disorder)

dalam strukturnya. Untuk meneliti detail pengisian ion pada $\text{PbBiNb}_2\text{O}_9$, terdapat kesukaran utama, yakni baik sinar-X maupun neutron tidak mampu membedakan Pb dan Bi dengan baik. Untuk itu kemudian dilakukan inovasi cara eksperimen penentuan disorder dengan mengadopsi teknik dispersi anomalous. Dengan teknik anomalous, dapat dipilih panjang gelombang tertentu yang memungkinkan selisih nilai f' yang besar yang memungkinkan Pb dan Bi dibedakan, gambar 7.



Gambar 7

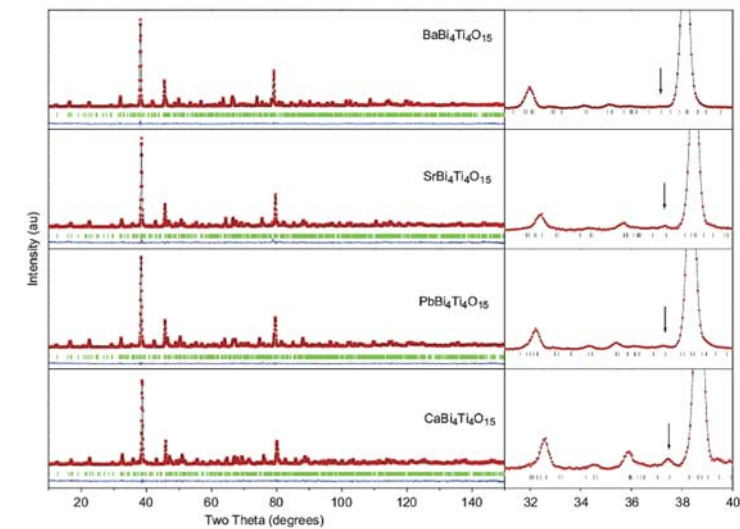
Nilai suku kedua kekuatan hamburan, f' , sebagai fungsi panjang gelombang sinar-X. Terlihat dengan jelas pada beberapa nilai energi, selisih f' untuk Pb dan Bi besar.

Melalui pengukuran pada panjang gelombang terpilih tersebut percobaan difraksi, yang secara khusus disebut difraksi anomalous, dilakukan. Hasilnya dapat dengan meyakinkan memberikan informasi distribusi ion, yang sebelumnya tidak mungkin ditentukan. Melalui usaha yang diawali penulis

pada material Aurivillius oksida $\text{PbBi}_2\text{Nb}_2\text{O}_9$ (20), penentuan distribusi ion logam telah banyak dilakukan. Hasil penentuan menunjukkan bahwa disorder (distribusi) ion antara lapisan perovskit dan Bi_2O_2 merupakan hal umum dalam oksida Aurivillius (21).

MENCERMATI TRANSISI FASA

Deskripsi rinci bagaimana fasa feroelektrik menjadi fasa paraelektrik merupakan topik yang sangat menarik, dan penting dalam aplikasi material. Telah dilakukan studi ketergantungan suhu pada oksida Aurivillius empat lapis $\text{ABi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ($A = \text{Ca, Sr, Ba dan Pb}$) (22). Pola difraksi pada suhu 300 K (suhu kamar), Gambar 8, menunjukkan bahwa strukturnya ortorombik.

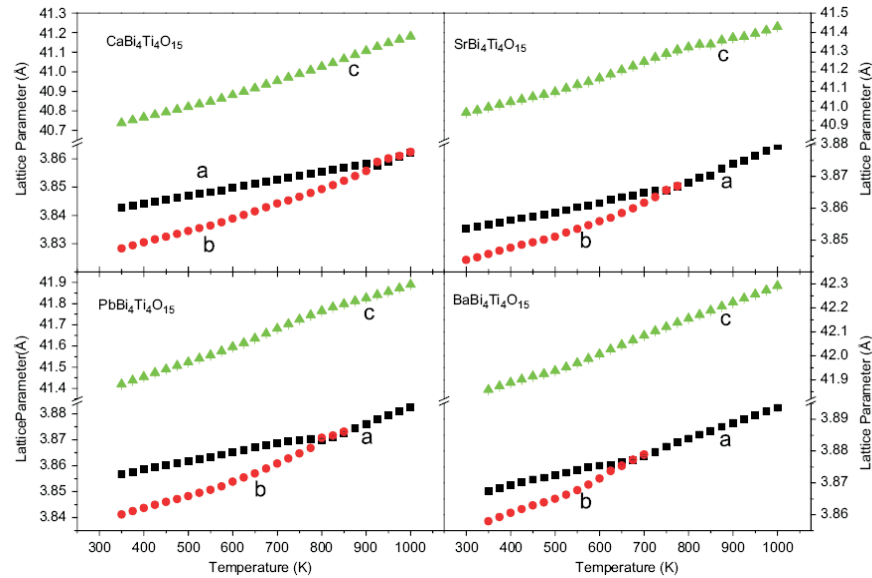


Gambar 8

Rietveld plot $\text{ABi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ $A = \text{Ca, Sr, Ba and Pb}$ dalam grup ruang $A2_1am$. Panel kanan menunjukkan puncak (215) yang dilarang di $I4/mmm$. Peningkatan intensitas puncak ini mencerminkan peningkatan penjurangan oktahedra TiO_6 .

Pola difraksi juga dengan jelas menunjukkan bahwa karena adanya perbedaan ukuran ion A , terjadi peningkatan penjurangan oktahedra TiO_6 .

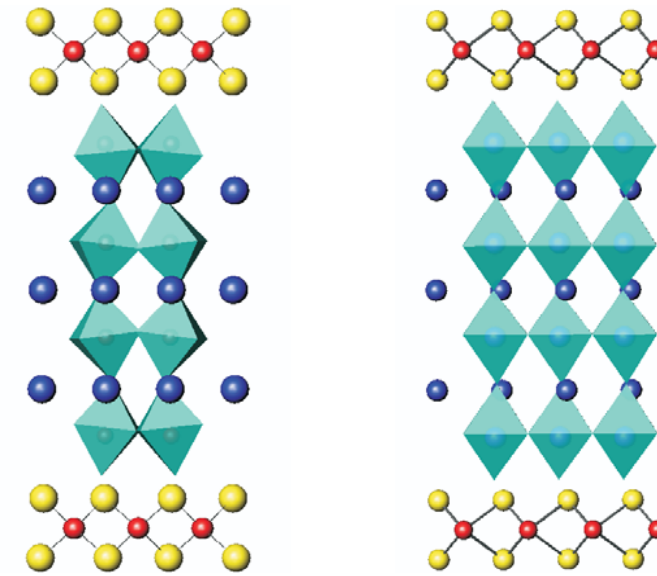
dalam urutan Ba<Sr<Pb<Ca, sesuai dengan urutan mengecilnya jari-jari ion. Gambar 9 menunjukkan perubahan nilai sel parameter sebagai fungsi suhu, terlihat dengan jelas T_c meningkat dalam urutan yang sama seperti di atas, yakni Ba<Sr<Pb<Ca.



Gambar 9

Kebergantungan suhu parameter sel $ABi_4Ti_4O_{15}$ $A = Ca, Sr, Ba$ and Pb . Parameter a dan b pada struktur ortorombik di suhu rendah telah diskalakan pada struktur tetragonal.

Gambar 10 memberikan gambar bagian struktur $BaBi_4Ti_4O_{15}$ pada suhu kamar dan suhu 700 K. Terlihat dengan jelas penjurangan oktahedra pada suhu kamar, yang hilang pada suhu 700 K. Pengamatan lebih detail menunjukkan bahwa transformasi struktur adalah transisi yang kontinyu dengan melibatkan fasa *intermediate*. Selain itu, dapat pula disimpulkan bahwa sifat feroelektrik yang diamati adalah konsekuensi dari pergeseran kation A dan B dalam lapisan perovskit dan relatif terhadap lapisan Bi_2O_2 . Pengamatan yang senada disimpulkan dari Aurivillius dualapis (23).

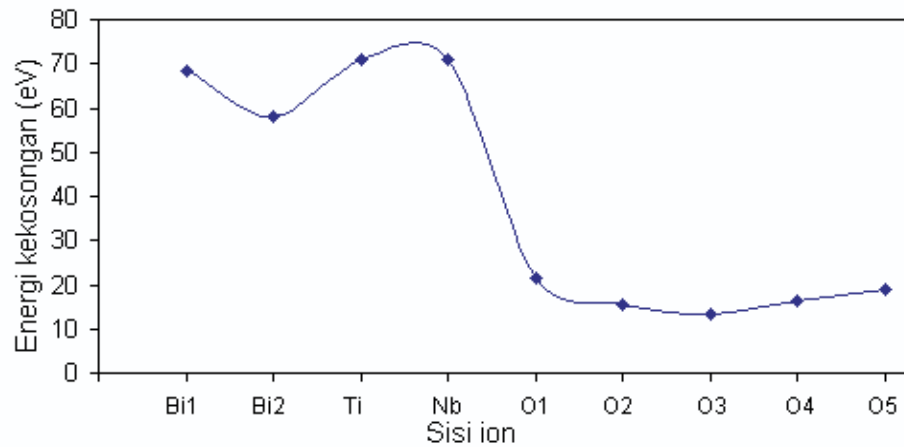


Gambar 10

Struktur $BaBi_4Ti_4O_{15}$ pada suhu rendah, ortorombik $A2_{1am}$ (kiri) dan suhu tinggi, tetragonal $I4/mmm$ (kanan). Perhatikan penjurangan oktahedra dan pergeseran kation pada struktur suhu rendah.

PEMODELAN

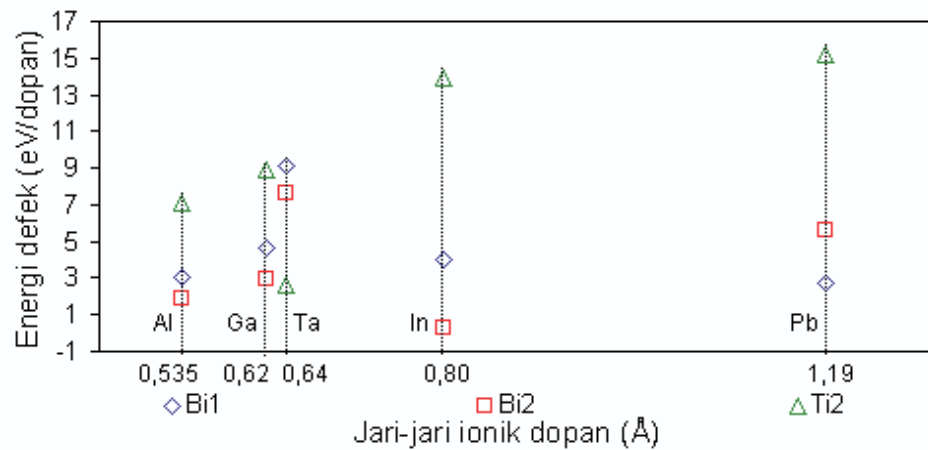
Simulasi atomik yang dilakukan berhasil dengan baik mereproduksi data struktural untuk oksida-oksida Aurivillius Bi_3TiNbO_9 (BTN), $Bi_4Ti_3O_{12}$ (BTO), $BaBi_4Ti_4O_{15}$ (BBT) dan $Ba_2Bi_4Ti_5O_{18}$ (B2BT), dan oksida-oksida lainnya (24). Selain itu, perhitungan energi defek terisolasi dan studi konsentrasi dopan juga telah dilakukan (25). Energi defek terisolasi suatu contoh oksida Aurivillius ditunjukkan pada Gambar 11. Dari grafik seperti ini dapat disimpulkan pada posisi mana defek akan mudah terbentuk dalam oksida.



Gambar 11

Energi defek titik akibat kekosongan terisolasi pada $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$. Skala di sumbu-X adalah posisi-posisi kristalografik dalam senyawa oksida ini.

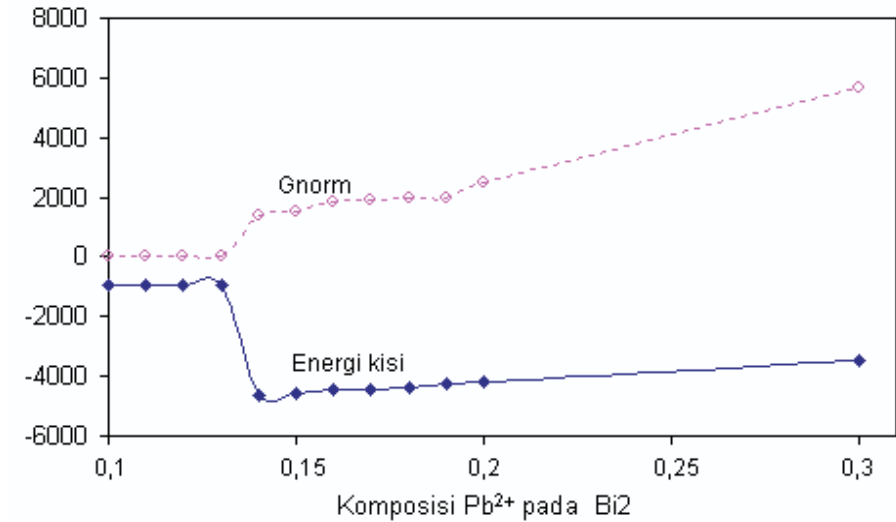
Energi oksida berdefek akibat suatu posisi kristalografik jika diberi dopan tertentu dapat pula dihitung. Suatu contoh hasilnya diberikan pada Gambar 12. Dari grafik seperti ini dapat disimpulkan pada posisi tertentu dopan mana yang akan stabil mensubstitusi.



Gambar 12

Energi defek $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ akibat kehadiran dopan Al^{3+} , Ga^{3+} , In^{3+} , Ta^{5+} dan Pb^{2+} .

Untuk memprediksi konsentrasi maksimum dopan yang dapat dimasukkan dalam oksida, dapat dilakukan variasi konsentrasi dopan dan diamati energi serta G_{norm} -suatu ukuran kekonvergenan simulasi-nya. Hasilnya seperti yang ditampilkan di Gambar 13.



Gambar 13

Variasi energi kisi $\text{Bi}_3\text{TiNbO}_9$ dan G_{norm} sebagai fungsi konsentrasi defek Pb^{2+} .

Dengan melakukan perhitungan pendahuluan seperti ini, maka usaha sintesis dapat dilakukan pada komposisi-komposisi yang telah diprediksikan stabil saja, sehingga mereduksi usaha *trial-error* (26).

Usaha yang lebih sederhana juga telah dilakukan untuk memprediksi energi kisi padatan oksida logam dari data-data oksida logam komponennya, mengembangkan hubungan yang diusulkan oleh Yoder-Flora (27). Ternyata hubungan sederhana seperti hubungan stoikiometris antara energi kisi komponen oksida dengan energi kisi oksida logam hasil sintesis telah didapatkan. Cukup mengejutkan bahwa hubungan sederhana ini berlaku untuk variasi struktur oksida yang cukup luas (28).

3. MATERIAL SOFC

Untuk mengatasi menipisnya bahan bakar minyak dan meningkatnya gas rumah kaca, teknologi yang menghasilkan energi yang bersih dan dapat diperbaharui sangat diperlukan. Pemerintah telah menetapkan bahwa 17% dari konsumsi energi nasional pada tahun 2025, harus merupakan sumber energi baru dan terbarukan (29). Sel bahan bakar merupakan salah satu sistem konversi energi yang menjanjikan karena menggunakan sumber energi yang dapat diperbaharui.

SOFC, yang terdiri atas katoda, anoda dan elektrolit oksida logam dan bekerja pada suhu tinggi sekitar 1000 °C dapat digunakan sebagai generator dengan bahan bakar seperti etanol, metanol, metana dan hidrokarbon lainnya serta hidrogen. Di samping itu sel bahan bakar padatan ini dapat memiliki efisiensi yang sangat tinggi (> 60 %), terlebih bila panas yang dihasilkan juga dikonversi.

Material yang banyak digunakan dalam studi SOFC adalah oksida berbasis perovskit $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO) atau $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y\text{O}_3$ (LSCFO) sebagai katoda, Y_2O_3 yang distabilisasikan dengan ZrO_2 yang diberi dopan Ni sebagai anoda dan samarium oksida yang diberi dopan Ce sebagai elektrolitnya (30). Akan tetapi bahan tersebut (terutama pada bahan anoda) tidak begitu stabil jika dalam bahan bakarnya mengandung sulfur. Y. H. Huang, et al, melaporkan bahwa struktur perovskit ganda dengan komposisi $\text{Sr}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{MoO}_6$ (SMMM) dapat dijadikan sebagai bahan anoda pada sel bahan bakar padatan yang baik dan tahan terhadap sulfur (31). Akan tetapi jika dibandingkan dengan bahan bakar hidrogen tanpa kandungan sulfur, daya yang dihasilkan mengalami penurunan, hingga 30 %. Hal ini menunjukkan bahwa bahan baru untuk anoda pada sel bahan bakar padatan yang tahan terhadap sulfur dengan kemampuan untuk mengeluarkan daya yang tinggi sangat diperlukan.

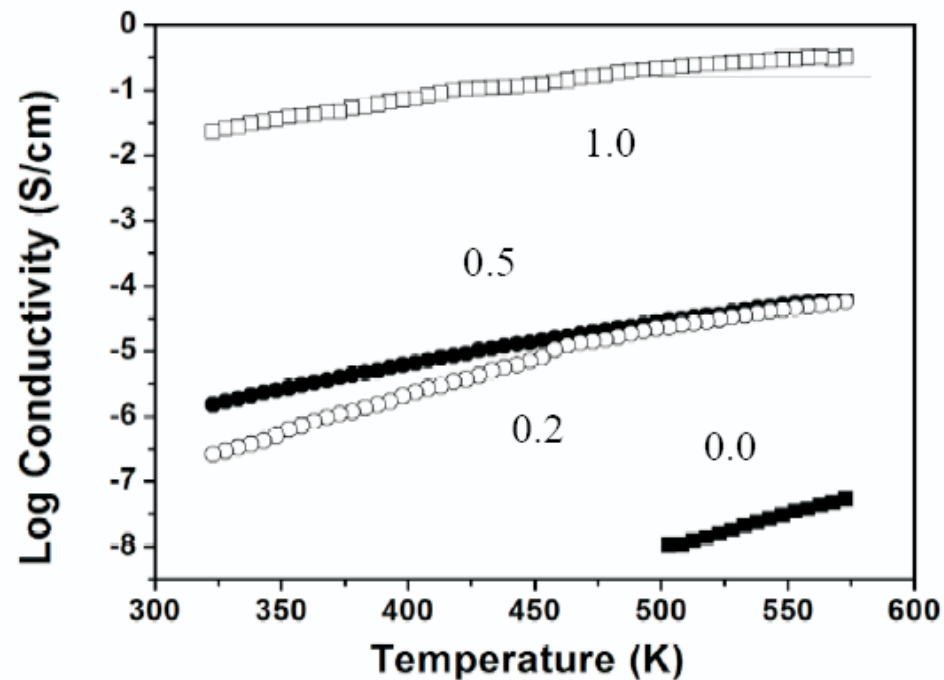
Selain itu, upaya untuk menurunkan temperatur operasional dari sekitar

900°C menjadi sekitar 600°C merupakan obyek penelitian yang menarik, karena penurunan temperatur operasional akan menurunkan biaya pembuatan sel sekaligus biaya pemeliharannya. Berikut akan disampaikan beberapa usaha awal untuk pencarian material elektroda dan elektrolit menuju SOFC yang tahan pada sulfur dan berkinerja baik pada suhu operasional yang lebih rendah.

SINTESIS MATERIAL-MATERIAL SOFC BARU

Sebagai material anoda, dilakukan pengembangan lebih lanjut material SMMO, yakni dengan melakukan doping atau penggantian Mg. Dalam perovskit ganda $\text{Sr}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{MoO}_6$ yang berfungsi sebagai anoda, elemen Mo berfungsi sebagai katalis yang diperlukan dalam proses reaksi, sedangkan Mg dan Mn digunakan sebagai penyeimbang muatan yang menyebabkan bahan tersebut dapat mengalirkan elektron dan membuat defek yang berguna bagi konduksi ion. Unsur Mg diketahui memiliki ketahanan yang baik terhadap sulfur. Kation asam keras, yang akan lebih senang berikatan dengan anion oksida yang keras daripada ion sulfida yang lunak, telah dicoba untuk mendoping Mg.

Perovskit ganda $\text{Sr}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{MoO}_6$ (SMMM) dan $\text{Sr}_2\text{Mg}_{1-x}\text{Fe}_x\text{MoO}_6$ telah disintesis, baik dengan menggunakan teknik reaksi kimia padat maupun sol gel. Teknik sol gel diperlukan untuk menghasilkan produk yang nantinya memudahkan dalam fabrikasi sel. Struktur kristal oksida yang diperoleh menunjukkan bahwa masih didapatkan struktur perovskit ganda. Pengukuran hantaran menunjukkan bahwa hantaran meningkat dengan meningkatnya konsentrasi dopan, seperti contoh yang diberikan di Gambar 14 (32).



Gambar 14

Variasi hantaran SMMMO, pada berbagai nilai konsentrasi Mn yang ditandai, sebagai fungsi suhu.

Sebagai material elektrolit tengah dikembangkan material $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2.85}$ (LSGMFO) (33) dan kompositnya dengan ZrO_2 yang distabilkan CeO_2 , Y_2O_3 (34). Dengan meningkatnya doping Fe kedalam $\text{La}_{0.9}\text{Sr}_{0.1}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_{2.85}$ (LSGMO) terjadi peningkatan hantaran. Komposit LSGMO dan ZrO_2 diharapkan akan meningkatkan kompatibilitas elektrolit yang diperoleh dengan elektroda. Kelas baru elektrolit yang juga menjadi perhatian adalah apatit ($\text{La}_{9,33+x}(\text{SiO}_4)_6\text{O}_{2+y}$). Kami telah berhasil mensintesis apatit dengan teknik hidrotermal pada suhu yang jauh lebih rendah dari yang biasa digunakan, 250 vs 1450 °C (35).

4. PENUTUP DAN HARAPAN

Dalam beberapa tahun terakhir, saya terlibat dalam kelompok Dr. Djulia Onggo dalam penentuan struktur padatan yang dibentuk oleh senyawa kompleks yang menunjukkan transisi spin. Berbeda dengan oksida logam yang umumnya strukturnya relatif sederhana, padatan senyawa kompleks memiliki struktur yang lebih rumit (36). Namun, hasil-hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa dengan penggunaan difraksi sinar-X sinkrotron struktur yang rumit pun dapat ditentukan (37). Saat ini masih ada dua mahasiswa doktor yang bekerja di bawah bimbingan kami dalam topik senyawa kompleks ini. Dalam hal ini akses ke fasilitas neutron dan sinar-X sinkrotron dimudahkan dengan kerjasama yang telah terjalin dengan Prof. T. Kamiyama dan Prof. Brendan Kennedy.

Bersama dengan seorang mahasiswa doktor (Zulhadjri), Dr. Bambang Prijamboedi dan Dr. A. A. Nugroho, kami sedang melakukan penelitian material magnetoelektrik. Kombinasi antara sifat magnetik dan feroelektrik dalam material yang sedang dikembangkan ini diharapkan menghasilkan material yang unik, karena ada satu derajat kebebasan tambahan yang dapat diatur.

Fokus utama ke depan adalah mengembangkan sel bahan bakar. Perhatian ke depan akan lebih diarahkan ke pembuatan sel menggunakan material-material yang telah dan sedang dikembangkan. Saat ini ada dua mahasiswa doktor (Atiek Rostika dan Fitria Rahmawati) yang melakukan riset di pengembangan material untuk SOFC di bawah arahan saya bersama dengan Dr. Bambang Prijamboedi, Prof. Syoni Soepriyanto, dan Dr. I Nyoman Marsih. Kerjasama riset dengan Prof. Gyeong Man Choi, Director Fuel Cell Research Center, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Korea telah mulai dijalin.

Pengembangan pemodelan padatan juga masih akan menjadi perhatian, terutama untuk mendukung riset sel bahan bakar. Saat ini ada satu mahasiswa doktor (Rolan Rusli) yang sedang mengembangkan pemodelan

terutama untuk mengetahui lintasan ion konduktif dalam padatan. Kerjasama dengan Dr. Stefan Adams, Department of Materials Science and Engineering, NUS, Singapore juga telah mulai dijalin.

Sel bahan bakar sistem konversi energi yang bersih dan paling efisien sudah berumur 170 tahun. Nampaknya untuk mendapatkan konversi energi ideal ini diperlukan usaha dan dukungan yang besar. Kami berharap riset ini mendapat dukungan dana dan kebijakan di tingkat nasional dan pada saatnya didukung oleh rekan di bidang lain yang terkait, serta kalangan industri untuk bersama-sama belajar secara mandiri merealisasikannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama, ucapan terima kasih penulis tujukan kepada (alm.) Ibu Surtini dan Bapak Pawirodisastro atas didikan dan kasih-sayangannya, kemudian kepada Pak Lik/Bu Lik Th. Soemarno, dan juga kepada ibu Hanawiyah Syukur yang selalu memberikan nasihat. Terimakasih untuk Ida, yang telah 12 tahun menjadi bagian diri saya, serta Aby dan Haqi atas kasih, dukungan, pengertian, kesabaran serta toleransi atas semua defek-defek saya. Terimakasih untuk sepuluh (+8) dan tujuh (+3) saudara-saudara penulis, yang langkah dan dedikasi di bidang masing-masing, selalu menjadi sumber inspirasi bagi penulis. Penulis juga berhutang-budi kepada Prof. Susanto Imam Rahayu, Prof. Brendan Kennedy (USyd) yang telah dengan intens membimbing penulis. Secara khusus, terimakasih pula kepada semua sahabat dosen di Kimia yang telah mengasah, mendorong dan memberi dukungan serta lingkungan kerja yang menyenangkan. Secara khusus terimakasih kepada rekan-rekan di KK Kimia Fisika dan Anorganik, terutama Dr. Cynthia L. Radiman dan Dr. Djulia Onggo, dan Dr. Akhmaloka yang dengan cara masing-masing yang khas telah mendukung, mendorong dan mempromosikan penulis pada jabatan akademik ini. Terimakasih kepada Dr.

Pudji Astuti, Dr. Idam Arief dan Dr. Khairurrijal atas pertemanan dan diskusi-diskusi yang bermanfaat. Terimakasih kepada para guru besar di FMIPA, Prof. T. Kamiyama (KENS, Jepang), Prof. Brendan J. Kennedy (U Sydney, Australia), Prof. Yang Farina Abdul Aziz (UKM, Malaysia) dan Prof Effendy (UM, Malang) yang telah memberikan rekomendasi promosi penulis. Kepada Dr. Bambang Prijamboedi, terimakasih atas kesediaan berbagi dan melengkapi sisi riset, terutama bagian fungsi dan sifat material. Akhirnya, penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para pejabat, karyawan dan rekan-rekan mahasiswa di ITB yang tak dapat disebutkan namanya satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

1. C. N. R. Rao, B. Raveau, *Transition Metal Oxides*, 2ed, Wiley-Interscience, 1998.
2. J.F.Scott, *Ferroelectric Memories*, Springer, 2000.
3. J. G. Burke, *Origins of the Science of Crystals*, U. California Press, Berkeley, 1966.
4. C. Giacovazzo (ed.), *Fundamentals of Crystallography*, 2nd ed, IUCr Texts on Crystallography 7, Oxford Science Publications, UK, 2002.
5. H. M. Rietveld, *J. Appl. Crystall.*, 2, (1969) 55.
6. E.E., Koch, *Handbook on Synchrotron Radiation*, North Holland, Amsterdam, 1983.
7. T.M. Sabine, B.J. Kennedy, R.F. Garrett, G.J. Foran, D.J. Cookson, *J. Appl. Crystallogr.* 28 (1995) 513.
8. D.J. Cookson, G. J. Foran, B. A. Hunter, Ismunandar, B. J. Kennedy, *Mater. Sci. Forum*, 113, (1996) 228.
9. Ismunandar, T. Kamiyama, A. Hishikawa, K. Oikawa, Y. Kubota, K. Kato, B.

- J. Kennedy, *Mater. Res. Bull.*, **39**, (2004) 553.
10. C. R. A. Catlow dalam A. K. Cheetham, P. Day, (Eds). *Computational Techniques and Simulation of Crystal Structures*; Oxford: New York, 1987; Chapter 7.
 11. C. R. A. Catlow, W. C. Mackrodt (Eds). *Computer Simulation of Solid*, Lecture Notes in Physics, Springer: Berlin, 1982.
 12. Gale, J.-D. *J. Chem. Soc., Faraday Trans.* **93** (1997) 629.
 13. B. Aurivillius, *Ark. Kemi* **1**, (1949) 499 .
 14. Misalnya a) R. E. Newnham, R. W. Wolfe and J. F. Dorrian, *Mater. Res. Bull.*, **6**, (1971), 1029. b) T. Rentschler, *Mater. Res. Bull.*, **32**, (1997), 351. c) P. Millan, A. Castro and J. B. Torrance, *Mater. Res. Bull.*, **28**, (1993), 117. d) P. Millan, A. Ramirez and A. Castro, *J. Mater. Sci. Lett.*, **14**, (1995), 1657. e) A. Castro, P. Millan, M. J. Martinez-Lope and J. B. Torrance, *Solid State Ionics*, **63-65**, (1993), 897. f) A. Castro, P. Millan and R. Enjalbert, *Mater. Res. Bull.*, **30**, (1995), 871.
 15. Ismunandar, Henny, H. Salam, B. J. Kennedy, Pacificchem 2005, Hawaii, 2005.
 16. Muhammad Rizal, Ismunandar, *JMS*, **12**(1), 2008.
 17. a). Edi Mikrianto, Ismunandar, *JMS*, **9**(3), (2004), 279 and b) Ismunandar, Edi Mikrianto, *Proc. ITB Eng. Science*, **36B**, (2004), 57.
 18. a). A. Azis, Ismunandar, *Proceeding Seminar Hamburan Sinar-X dan Neutron ke-5*, 2003. b) Zulhadjri, B. Prijamboedi, A. A. Nugroho, dan Ismunandar, *Proceeding ICMNS*, 2008, in press.
 19. a) Ismunandar, Kennedy, B. J., Gunawan, and Marsongkohadi, *J. Solid State Chem.* **126**, (1996), 135. b) Ismunandar, T. Kamiyama, A. Hishikawa, Q. Zhou, B.J. Kennedy, Y. Kubota, K. Kato, *J. Solid State Chem.* **177**, (2004), 4188. c) Ismunandar, T. Kamiyama, A. Hishikawa, Q. Zhou, B.J. Kennedy, *J. Neutron Res.* **13**(1-3), (2005), 183.
 20. Ismunandar, B. A. Hunter and B. J. Kennedy, *Solid State Ionics*, **112**(3-4), (1998), 281.
 21. a) Ismunandar and B. J. Kennedy, *J. Mater. Chem.*, **9** (1999), 541. b) S. M. Blake, M. J. Falconer, M. McCreedy and P. Lightfoot, *J. Mater. Chem.*, **7**(1997), 1609. c) R. Macquart, B.J. Kennedy, B.A. Hunter, C.J. Howard, Y. Shimakawa, *Integrated Ferroelectrics* **44** (2002) 101. d) R. Macquart, B.J. Kennedy, B.A. Hunter, C.J. Howard, *J. Phys. Condens. Matter* **14** (2002) 7955.
 22. a) B. J. Kennedy, Y. Kubota, B. A. Hunter, Ismunandar, K. Kato, **126** (2003), 653. b) B. J. Kennedy, Q. Zhou, Ismunandar, Y. Kubota, K. Kato, *J. Solid State Chem.*, **181** (2008), 1377.
 23. a) R.L. Withers, J.G. Thompson, A.D. Rae, *J. Solid State Chem.* **94** (1991) 404. b) Y. Shimakawa, Y. Kubo, Y. Nakagawa, S. Goto, T. Kamiyama, H. Asano, F. Izumi, *Phys. Rev.* **B61** (2000) 6559. c) R.B. Macquart, B.J. Kennedy, Y. Shimakawa, *J. Solid State Chem.* **160** (2001) 174. d) C.H. Hervoches, J.T.S. Irvine, P. Lightfoot, *Phys. Rev.* **B64** (2001) 100102(R).
 24. a) A. Rosyidah, D. Onggo, Khairurrijal, and Ismunandar, *Proceeding Asian Physics Symposium*, 2005, 56. b) Sundari Wirasmi, Ismunandar, *Proceeding ICMNS*, 2006, 102. c) A. La Kilo, R. Rusli, B. Prijamboedi and Ismunandar, *Proceeding ICMNS*, 2008, in press.
 25. A Rosyidah, D. Onggo, Khairurrijal and Ismunandar *J. Chin. Chem. Soc.*, **55**(1)(2008), 115.
 26. A. Rosyidah, D. Onggo, Khairurrijal, Ismunandar *AIP Conference Proceedings*, **989**(2008), 117.
 27. C. H. Yoder and N. J. Flora, *Am. Miner.*, **90** (2005), 488.
 28. a) D. Suhendar, Ismunandar, *JMS*, **11**(1), (2006), 18. b) H. Tehubijuluw, Ismunandar, *Indo. J. Chem.*, **8**(3) (2008) 385.
 29. Kebijakan Energi Nasional (PP 05/2006).
 30. A. J. Moulson and J. M. Herbert, *Electroceramics*, John Willey & Sons, Chichester, 2003.
 31. Y. H. Huang, R. I. Dass, Z. L. Xing and J. B. Goodenough, *Science* **312** (2006) 254.

32. a) N. R. Sari, B. Prijamboedi, and Ismunandar AIP Conference Proceedings, 989 (2008), pp. 172-175. b) Ismunandar, B. Prijamboedi, N. R. Sari, A. Nursanto, Proceeding IEEE ICSET, in press, 2008.
33. Rusmiati, B. Prijamboedi, Ismunandar AIP Conference Proceedings, 989 (2008), pp. 172-175.
34. F. Rahmawati, B. Prijamboedi and Ismunandar, Proceeding ICMNS 2008, in press.
35. A. Rostika, B. Prijamboedi and Ismunandar, Proceeding ICMNS 2008, in press.
36. D. Onggo, F. Martak, Ismunandar, B.M. Yamin, S. W. Ng, *Acta Cryst.*, E 62, (2006), m1112.
37. I. S. Jahro, D. Onggo, Ismunandar, S. I. Rahayu, M. C. Muñoz, A. B. Gaspar, M. Seredyuk, P. Gutlich, P., J. A. Real, *Inorg. Chim. Acta*, 361(14-15) (2008), 4047.

CURRICULUM VITAE



Nama : **Ismunandar**

Tempat dan tanggal lahir : Purwodadi, 9 Juni 1970

Alamat : KK Kimia Fisika dan Anorganik
FMIPA ITB, Jl. Ganesa 10 Bandung,
40132 Indonesia

E-mail : ismu@chem.itb.ac.id

Nama Istri & Anak : Syuraida Syukur, MCom.
Abiyyu Avicena Ismunandar
Baihaqi Avirous Ismunandar

Pendidikan:

- Doctor of Philosophy The University of Sydney 1994-1998
- Sarjana Institut Teknologi Bandung 1988-1992

Buku yang diterbitkan:

- Ismunandar, Kimia Populer, Penerbit ITB, 2007.
- Ismunandar, Oksida Logam: Struktur, Sintesis dan Sifat-sifatnya, Penerbit ITB, 2005.
- Ismunandar, D. Onggo, R. Sihombing, Ismunaryo, Olimpiade Kimia Internasional, Wahyu Media, 2008.
- Ismunandar (penerjemah), sejumlah buku teks online dapat diakses di inorg-phys.chem.itb.ac.id.

Riwayat Pekerjaan/Jabatan:

- 2008 - : Guru Besar pada FMIPA-ITB
- 2004 - 2008 : Lektor Kepala pada FMIPA-ITB
- 2001 - 2004 : Lektor pada FMIPA-ITB

2000 - 2001 : Lektor Muda pada FMIPA ITB
1999 - 2000 : Asisten Ahli pada FMIPA-ITB
1996 - 1999 : Asisten Ahli Madya pada FMIPA-ITB
1994 - 1998 : Tutor pada School of Chemistry, Uni. of Sydney.

Penugasan di ITB:

2008 - : Sekretaris Komisi Tridarma MGB ITB
2008 - : Ketua Komisi Pembelajaran ITB
2008 - : Anggota Redaksi Berita Pembelajaran
2008 - : Anggota Komisi IV SAITB
2008 - : Ketua KK Kimia Fisik dan Anorganik
2007 - : Editor Eksekutif ITB J. Science
2006 - : Manajer Penelitian FMIPA-ITB
2006 - : Anggota Gugus Kendali Mutu FMIPA-ITB
2001 - 2005 : Sekretaris Departemen Kimia -ITB
2001 - 2005 : Anggota Majelis Departemen Kimia-ITB
2000 - 2001 : Sekretaris Akademik Tim Implementasi QUE Kimia
1999 - 2005 : Ketua Laboratorium Tugas Akhir Kimia-ITB
1999 - 2000 : Anggota Tim Implementasi QUE Kimia-ITB

Keanggotaan dalam Organisasi Profesi:

2004 - : Affiliate Member Int. Union Pure & Applied Chem.
2003 - 2005 : Anggota American Assoc. Advancement of Science
1994 - 2003 : Anggota Biasa Royal Australian Chemistry Institute
1992 - : Anggota Biasa Himpunan Kimia Indonesia

Penghargaan dan Sejenisnya:

2006 : Satyalancana Karya Satya X Tahun.
2005 : Young Scholar Award Travel Grant Pacificchem, Hawaii.
2005 : Participant 55th Lindau Nobel Laureate Meeting, Germany.

2003 : Hitachi Research Fellowships, Japan.
2002 : Guest Professor in KEK, Japan (Min. Sci Tech. Sport Japan).
2000 : Indonesia Toray Science Foundation Award.
1999 : Juara I Pemilihan Peneliti Muda Indonesia LIPI-TVRI.
1999 : Gold Award of Research Excell. Aust. Inst Nucl. Sci.& Eng.
1998 : Le Fevre Student Award, School Chemistry, U. Sydney.
1997 : Young Scientist Travel Grant Award 5th EPDIC, Italy.
1994 - 8 : AusAid Scholarship.

Kegiatan lain:

- Mempopulerkan sains
- Penikmat sastra Indonesia dan kesenian tradisional Jawa

