



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

**Profesor Agustinus Agung Nugroho
Sulistyo Hutomo**

**MENGGALI POTENSI KEADAAN ELEKTRONIK
BARU UNTUK TEKNOLOGI MASA DEPAN**

10 Juli 2021
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
10 Juli 2021

**Profesor Agustinus Agung Nugroho
Sulistyo Hutomo**

**MENGGALI POTENSI KEADAAN ELEKTRONIK
BARU UNTUK TEKNOLOGI MASA DEPAN**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: MENGGALI POTENSI KEADAAN ELEKTRONIK BARU
UNTUK TEKNOLOGI MASA DEPAN
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 10 Juli 2021.

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

Agustinus Agung Nugroho Sulisty Hutomo
MENGGALI POTENSI KEADAAN ELEKTRONIK BARU
UNTUK TEKNOLOGI MASA DEPAN
Disunting oleh Agustinus Agung Nugroho Sulisty Hutomo

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2021

viii+70 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-46-8

1. Fisika Material 1. Agustinus Agung Nugroho Sulisty Hutomo

KATA PENGANTAR

Penelitian di bidang fisika eksperimen material termampatkan (*experimental Condensed Matter Physics*) yang bertujuan mengungkap atau mencari fenomena fisis baru sangat membutuhkan selain material berkualitas juga fasilitas pengukuran yang presisi dan memiliki keterulangan yang tinggi. Material padatan dikatakan berkualitas apabila memiliki kristalinitas yang tinggi dan ratio stoichiometrik yang baik dari unsur penyusunnya. Fakta-fakta eksperimen yang diperoleh dari material tersebut tidaklah sempurna tanpa disertai penjelasan teori terkait mekanisme fisisnya. Tulisan ini merupakan rangkuman dari capaian riset dalam bidang fisika materi termampatkan yang telah dilakukan pada material yang terdefinisi dengan baik. Capaian tersebut merupakan hasil kolaborasi riset antara bidang eksperimen dan teori.

Fisika materi termampatkan mengkaji keadaan dasar dan eksitasi elektron dan juga manifestasinya (*quasiparticle*) untuk menjelaskan perubahan sifat-sifat fisis suatu material. Perubahan sifat fisis merupakan fenomena transisi fase yang dapat disebabkan oleh perubahan keadaan termodinamik atau keadaan topologi. Dalam konteks tersebut, tulisan ini akan menunjukkan keadaan-keadaan kemagnetan yang terlibat pada sifat-sifat fisis material.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca untuk berpartisipasi mengembangkan

keilmuan fisika, khususnya fisika materi termampatkan.

Bandung, 10 Juli 2021

Prof. Agustinus Agung Nugroho

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
SINOPSIS	vii
1. PENDAHULUAN	1
2. PERAN SIMETRI DAN KEADAAN ELEKTRONIK DALAM MENENTUKAN SIFAT MATERIAL	5
2.1. Peran simetri dalam penentuan sifat fisis material	5
2.2. Sistem elektron terkorelasi kuat	7
2.3. Struktur elektronik material topologi	10
3. EKSPLOKORASI KEMAGNETAN EKSTOTIK DAN POTENSI APLIKASINYA	13
3.1. Keadaan antiferromagnetik dalam sistem keteraturan orbital t_{2g} dalam material YVO_3	13
3.2. Sifat magnetocaloric dalam material $HoVO_3$	17
3.3. Keterkaitan antara keteraturan orbital, muatan dan magnetik pada senyawa <i>half-doped</i> manganites	18
3.4. Interaksi magnetoelektrik dalam sistem antiferromagnetik	21
3.5. Interaksi magnetik jangkauan panjang yang diperantarai oleh gugus organik	23
3.6. Sifat anomali pada material topologi Weyl magnetik	26
4. PENUTUP	29
5. UCAPAN TERIMA KASIH	30

6. DAFTAR PUSTAKA	34
CURRICULUM VITAE	45

SINOPSIS

Aktivitas keseharian manusia hampir tidak bisa terlepas dari penggunaan material sehingga dapat dikatakan bahwa era revolusi industri juga ditandai oleh terobosan teknologi yang didukung oleh perkembangan dalam bidang material. Perkembangan tersebut dipengaruhi oleh pengetahuan tentang faktor-faktor yang menentukan fungsionalisasi sifat fisisnya. Perumusan sifat fisis material berdasarkan keadaan elektronik diharapkan dapat memberi panduan dalam menentukan hubungan antara peningkatan performa kinerja dan komposisi material tersebut. Oleh karena itu, dasar keilmuan dalam bidang material harus terus dikembangkan dalam memahami sifat fisis baru yang berpotensi untuk menghasilkan terobosan teknologi masa depan.

Dalam fisika material, banyak keilmuan baru yang munculnya diawali dari pengamatan anomali suatu sifat fisis yang diyakini berasal dari keadaan elektronik yang memiliki anomali pula. Resistivitas material logam pada umumnya menurun secara linier terhadap penurunan suhu. Apabila sifat resistivitas logam tidak lagi menurun secara linier tetapi berbentuk kuadratik atau mengikuti bentuk pangkat tertentu atau bahkan berubah secara eksponensial, maka hal ini mengindikasikan bahwa material tersebut bukan logam yang biasa. Keeksotikan logam tersebut bergantung pada mekanisme transpor elektron digambarkan untuk logam tersebut.

Sifat anomali dapat pula terkait dengan transisi fase yang melibatkan perubahan keadaan elektronik seperti transisi logam menjadi isolator akibat perubahan suhu. Selain suhu, fenomena transisi fase tersebut dapat juga terjadi akibat perubahan keadaan termodinamika lainnya seperti pemberian tekanan atau medan listrik/magnetik. Transisi fase elektronik tersebut melibatkan keadaan dasar dan keadaan eksitasi dari sistem elektron dalam material. Kajian-kajian terkait dengan fenomena tersebut dibahas dalam fisika material termampatkan.

Berdasarkan hasil-hasil penelitian yang dikumpulkan penulis dalam bidang fisika material termampatkan, tulisan ini membahas tiga dasar kajian perubahan keadaan elektronik suatu material, yaitu (1) berdasarkan perubahan simetri, (2) saling keterkaitan antara keadaan muatan, spin dan orbital, dan (3) sifat topologi struktur pita elektronik. Berdasarkan kajian tersebut, beberapa keadaan magnetik eksotik yang terlibat dalam perubahan sifat fisis material akan dibahas termasuk diantaranya yang berpotensi untuk aplikasi dalam bidang energi.

MENGGALI KEADAAN ELEKTRONIK BARU UNTUK TEKNOLOGI MASA DEPAN

1. PENDAHULUAN

Kemajuan dalam bidang teknologi sensor, elektronik dan komunikasi sangat terasa membantu aktivitas keseharian baik dalam bidang pekerjaan maupun sosial. Teknologi hadir dalam wujud peralatan yang langsung dapat dipakai. Oleh karena itu, teknologi dapat berperan mengubah perilaku interaksi antar manusia maupun antara manusia dan lingkungannya. Teknologi juga diperlukan untuk membantu peneliti dalam membongkar misteri alam dan menyusun alam buatan yang berpotensi dikembangkan menjadi teknologi baru. Teknologi terus berkembang karena tuntutan kehidupan untuk mendapatkan, mengolah dan menyimpan informasi yang besar secara cepat dan efisien. Selain itu, tingginya tingkat mobilitas dari pengguna teknologi menuntut agar alat bantu yang dipakai memiliki bentuk yang semakin kecil, fleksible, memiliki jangkauan akses yang luas dan membutuhkan daya listrik yang sangat kecil.

Tuntutan terhadap teknologi baru dapat terjawab melalui budaya literasi sains yang baik. Literasi sains mendorong seseorang untuk memiliki rasa ingin tahu sehingga orang akan bertanya bagaimana mekanisme yang bekerja pada suatu teknologi dan mempertanyakan apakah ada mekanisme lain yang membuat prinsip kerjanya bisa

diperbaharui atau ditingkatkan. Jawaban terhadap mekanisme tersebut pada akhirnya akan mengerucut pada ilmu dasar. Oleh karena itu, perkembangan baru dalam *ilmu dasar dapat memberi dampak yang cukup luas dan jangka panjang* terhadap kemajuan teknologi. Salah satu contoh diantaranya adalah perkembangan teori kuantum dalam material pada tahun 1920an yang mampu menggambarkan struktur elektronik suatu material. Berdasarkan teori struktur elektronik tersebut, keadaan elektron dalam material dapat diketahui. Teori ini selanjutnya dikenal dengan teori pita. Teori pita pada saat itu sangat bermanfaat dalam menjelaskan sifat transpor elektron dalam material, terutama untuk material semikonduktor. Eksplorasi terhadap material semikonduktor menggunakan teori pita menghasilkan penemuan transistor pada tahun 1947. Transistor yang dapat menggantikan lampu tabung untuk memproses informasi menjadikan ukuran komputer pada saat itu menjadi lebih kecil dan konsumsi daya listrik yang lebih rendah. Pengetahuan tentang struktur elektronik material semikonduktor juga membuka wawasan baru mengeksplorasi sifat optik yang berdampak pada kemajuan teknologi fotonik.

Kemajuan teknologi pembuatan piranti semikonduktor masih menempatkan semikonduktor sebagai komponen utama dalam prosesor yang masih belum tersaingi. Disatu sisi, material semikonduktor seperti silikon tersedia berlimpah di alam, di sisi yang lain, penguasaan teknologi pembuatan film tipis yang terintegrasi juga semakin maju. Meskipun

demikian, pertumbuhan akan penambahan jumlah komponen transistor dalam suatu prosesor tidak lagi mengikuti prediksi Moore yang menyatakan bahwa pertumbuhan penggunaan komponen semikonduktor akan berlipat dua tiap tahun [1]. Hal ini mengindikasikan bahwa diperlukan material baru yang dapat melanjutkan estafet pertumbuhan jumlah transistor seperti prediksi Moore.

Perkembangan ilmu dasar biasanya dipicu oleh penemuan fenomena alam yang baru atau persepsi baru dalam memahami fenomena alam yang ada. Ilmu dasar ditantang untuk menjelaskan fenomena tersebut dan fakta-fakta baru yang terkait melalui pemodelan matematik. Pemodelan matematik dapat memberikan prediksi untuk mengeksplorasi fenomena tersebut lebih lanjut dan juga menggali potensi aplikasinya untuk teknologi tertentu. Perjalanan penelitian ilmu dasar dari penemuan fenomena baru sampai pada terapannya untuk teknologi umumnya memerlukan waktu yang cukup panjang dibandingkan dengan penelitian aplikatif. Akan tetapi hasil penemuan dari penelitian dasar juga tidak sepenuhnya terkait dengan penelitian aplikatif. Akibatnya, penelitian ilmu dasar biasanya kurang mendapatkan apresiasi dibandingkan penelitian aplikatif yang langsung memberikan solusi terhadap suatu permasalahan.

Penemuan elektron pada tahun 1887 oleh J. J Thomson tidak membayangkan bahwa akan memunculkan teori kuantum untuk material padatan oleh F. Bloch pada tahun 1928, apalagi penemuan transistor pada

tahun 1947. Dengan demikian, peran ilmu dasar dirasakan masih cukup penting terutama untuk mendasari konsep-konsep untuk mengembangkan pemikiran baik fundamental maupun aplikatif. Penelitian dalam bidang ilmu dasar sering disebut sebagai investasi untuk pengetahuan masa depan. Pengembangan keilmuan membutuhkan pengujian fakta-fakta terkait dengan keilmuan tersebut. Hal tersebut menuntut resolusi pengukuran dan reproduktibilitas yang memadai. Kolaborasi penelitian dalam penyediaan dan pemanfaatan fasilitas penelitian untuk penggalan ilmu dasar memiliki peran yang sangat penting mengingat keterbatasan dana, fasilitas dan sumber daya penelitian. Hasil kolaborasi penelitian memberi peluang untuk kemajuan yang dapat dinikmati bersama di masa mendatang dalam sisi keilmuan dan dasar pengembangan teknologi baru.

Tulisan ini merupakan rangkaian dari beberapa capaian penelitian dasar dalam bidang kemagnetan yang dilakukan penulis berkolaborasi dengan beberapa riset grup. Beberapa diantaranya akan dipaparkan terkait dengan sifat listrik, panas dan optik berikut potensi aplikasinya. Tulisan ini diharapkan dapat memberikan motivasi pengembangan ilmu dasar terutama dalam mengeksplorasi fenomena alam baru melalui eksplorasi material yang telah ada dan pencarian material baru yang memiliki performa yang lebih tinggi dari material yang telah ada.

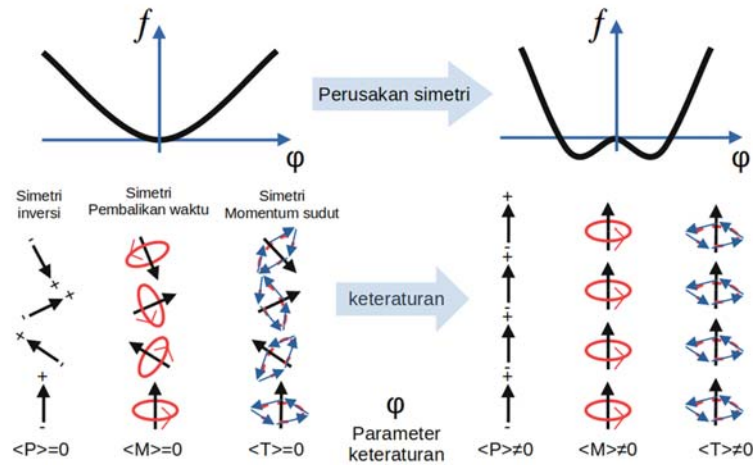
2. PERAN SIMETRI DAN KEADAAN ELEKTRONIK DALAM MENENTUKAN SIFAT MATERIAL

2.1. Peran simetri dalam penentuan sifat fisis material

Ilmu fisika tidak dapat terlepas dari konsep energi, medan dan materi. Suatu material dibangun dari atom-atom sebagai materi penyusunnya. Dalam material padatan, atom-atom tersusun memadapati suatu ruang sedemikian sehingga terjadi susunan yang merupakan pengulangan dari suatu unit susunan terkecil (*unit cell*) mengikuti suatu simetri ruang (*space group*) tertentu. Keteraturan susunan atom dapat terjadi karena adanya interaksi antar atom pada kondisi termodinamika tertentu. Perubahan kekuatan interaksi atomik terhadap derajat keteraturan atom dapat mengklasifikasi material dalam fase/wujud padat, cair atau gas. Dalam klasifikasi tersebut, energi interaksi dan jarak antar objek yang berinteraksi merupakan besaran yang saling menentukan.

Fenomena transisi fase biasanya disebabkan oleh perubahan suhu kecuali transisi fase kuantum yang terjadi pada suhu nol Kelvin. Keadaan fase yang berbeda oleh karena perubahan suhu ditandai oleh perubahan parameter keteraturan (*order parameter*). Pada keadaan yang teratur, jumlah simetri dari parameter keteraturan lebih rendah daripada keadaan yang rambang. Pada kasus perubahan fase gas ke fase cair atau dari fase cair ke fase padat, jumlah simetri translasi menjadi berkurang. Penurunan simetri tersebut dapat dikaitkan dengan penurunan entropi dan dikenal sebagai fenomena perusakan simetri (*symmetry breaking*). Berdasarkan

parameter keteraturan dan perusakan simetri, keadaan termodinamis kritis dari suatu fenomena fisis dapat diungkapkan melalui perumusan fenomenologis seperti ditampilkan pada Gbr.1. Akan tetapi, mekanisme terkait dengan perubahan keadaan elektronik dalam fenomena tersebut memerlukan pendekatan mikroskopik. Simetri dari suatu keadaan elektronik dapat mempengaruhi sifat-sifat fisis seperti transpor listrik, optik dan magnetik.



Gambar 1. Skematik proses transisi fase yang dideskripsikan melalui perusakan simetri melalui fungsional f dari parameter keteraturan ϕ . P, M dan T adalah parameter keteraturan sebagai fungsi suhu masing-masing untuk polarisasi listrik, magnetisasi dan toroida.

Salah satu fenomena yang terkait dengan perusakan simetri adalah munculnya keteraturan dipol listrik dan magnetik yang terkait dengan

sifat polarisasi listrik dan magnetisasi. Kemunculan dipol listrik diakibatkan karena perubahan posisi atom-atom yang memiliki simetri inversi (*inversion*) atau perusakan simetri inversi, sedangkan munculnya magnetisasi diakibatkan oleh rusaknya simetri pembalikan waktu (*time-reversal*). Perusakan simetri tersebut dapat terjadi karena perubahan suhu atau pemberian medan luar. Fungsionalisasi sifat kemagnetan dapat dipengaruhi oleh saling keterkaitan antara simetri magnetik dan simetri-simetri lainnya seperti simetri dipol listrik melalui interaksi magnetoelektrik atau simetri struktur melalui interaksi magnetostriction.

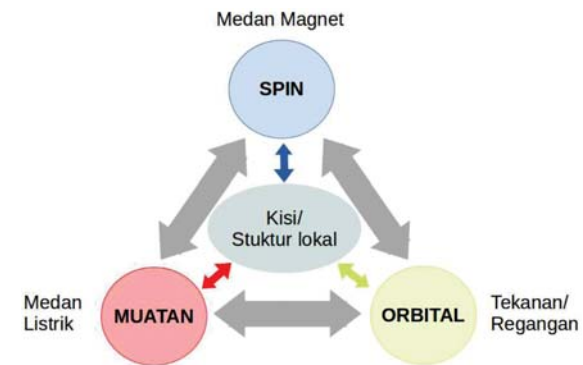
2.2. Sistem elektron terkorelasi kuat

Penentuan keadaan elektronik suatu material menggunakan teori pita cukup berhasil untuk menjelaskan elemen logam dan semikonduktor, akan tetapi teori pita mulai menghadapi persoalan untuk menyelesaikan senyawa-senyawa oksida logam transisi (*transition metal oxides*) yang memiliki celah energi yang besar atau bersifat isolator. Dalam kasus tersebut besar kekuatan interaksi antar elektron setara atau lebih besar dari lebar pita. Interaksi kuat antar elektron mengakibatkan sistem elektronik menjadi sistem elektron jamak sehingga selain interaksi Coulomb, interaksi pertukaran (*exchange correlation*) juga memegang peran yang cukup penting. Perhitungan struktur elektronik untuk sistem elektron jamak menggunakan metode *Density Functional Theory* (DFT) dan menerapkan bentuk korelasi pertukaran GGA (*Generalized Gradient Approximation*) telah menunjukkan banyak keberhasilan. Meskipun

demikian metode tersebut masih belum dapat sepenuhnya menghitung sistem elektronik yang memiliki korelasi elektron kuat [2].

Sebagai alternatif, keadaan elektronik elektron jamak dari sistem elektron terkorelasi dimodelkan menggunakan teori medan kuantum dalam representasi dari operator penciptaan (*creation*) dan peniadaan (*annihilation*). Model yang sangat sederhana yang terdiri dari suku kinetik dan interaksi Coulomb diusulkan oleh J. Hubbard pada tahun 1963 sebagai berikut: $H = -\sum_{i,j,\sigma} t_{ij} \hat{c}_{i,\sigma}^\dagger \hat{c}_{j,\sigma} + U \sum_i \hat{n}_{i,\uparrow} \hat{n}_{i,\downarrow}$. Dalam model tersebut, energi kinetik, t , dan interaksi Coulomb *on-site*, U , masing-masing berkisar antara 0.1 eV – 1 eV, dan 2 - 10 eV [3]. Model ini dapat dipecahkan menggunakan teknik perhitungan *mean-field* dan menghasilkan keadaan dasar (*ground state*) elektronik yang bersifat isolator dan antiferromagnetik apabila setiap keadaan elektronik terisi hanya oleh satu elektron (*half-filled*). Hal ini juga dapat ditunjukkan bahwa energi sektor yang minimum dari Model Hubbard tidak lain adalah model interaksi magnetik *superexchange*, $H = J \sum_{i,j} (S_i S_j - 1/4)$ dengan konstanta interaksi magnetik $J=4t^2/U$ [4, 5, 6]. Interaksi *superexchange* biasanya terjadi dalam senyawa yang berbasis oksida logam transisi. Dalam senyawa tersebut, interaksi magnetik antar ion magnetik yang saling berjauhan diperantarai oleh ion oksigen yang berikatan dengan ion magnetik tersebut. Apabila terjadi penambahan atau pengurangan jumlah elektron, maka lebar pita (*bandwidth*), W , juga semakin melebar maka keadaan dasar sistem dapat berubah menjadi

metalik dan ferromagnetik. Proses eksitasi dari keadaan dasar isolator menjadi metalik sangat ditentukan oleh ukuran dari lebar pita. Hal ini akan membatasi apakah karakter transpor muatan memiliki karakter isolator Mott-Hubbard ($U>W$) atau karakter metalik ($W>U$). Keberhasilan model ini menjelaskan fenomena transisi fase elektronik menjadikan Model Hubbard sebagai model dasar untuk menjelaskan keadaan elektronik sistem elektron berkorelasi kuat [7].



Gambar 2. Saling keterkaitan antara keadaan spin, muatan dan orbital terhadap kisi/stuktur lokal dalam sistem elektron jamak terkorelasi.

Disamping penambahan faktor lain yang mempengaruhi keadaan elektronik seperti interaksi Coulomb antar tetangga terdekat atau interaksi antara elektron dan perubahan struktur lokal, pengembangan teknik perhitungan melampaui pendekatan *mean-field* dapat semakin memperkaya kajian fisis Model Hubbard. Salah satu diantaranya dilakukan oleh Kugel-Khomskii dengan memperhitungkan transfer

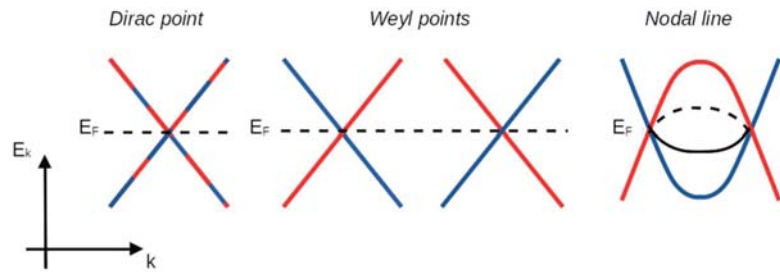
elektron antar kemungkinan keadaan orbital pada suatu struktur kristal [8]. Hal ini dapat menunjukkan bahwa dalam material yang berbasis pada oksida logam transisi dapat terjadi keteraturan spin dan orbital yang mengikuti aturan Goodenough-Kanamori [9, 10]. Dalam aturan tersebut keadaan ferromagnetik akan memiliki keadaan antiferro-orbital demikian pula sebaliknya, keadaan antiferromagnetik akan memiliki keadaan ferro-orbital.

Selain keteraturan keadaan spin dan orbital, dalam oksida logam transisi dapat pula terjadi keteraturan muatan. Valensi ion logam transisi yang berbeda membentuk pola keteraturan tertentu yang arah orientasinya berbeda satu dengan lainnya. Sistem elektron terkorelasi kuat dapat menyebabkan saling kebergantungan antara keadaan muatan, spin dan orbital yang dapat mengakibatkan sifat magnetik dapat dikontrol dengan medan listrik ataupun pemberian tekanan, sifat listrik seperti resistivitas listrik dapat dikontrol dengan medan listrik ataupun medan magnetik, dan perubahan struktur lokal atau regangan terkait dengan keadaan orbital dapat dipengaruhi oleh medan listrik dan medan magnetik, seperti ditunjukkan pada Gbr.2 [11]. Dalam Bab berikutnya akan ditunjukkan bagaimana pengukuran konduktivitas optik dapat terkait dengan sifat kemagnetan.

2.3. Struktur elektronik material topologi

Sejak teramatinya fitur struktur pita elektronik yang terproteksi secara

topologi dari pengukuran *Angle Resolved Photoemission* (ARPES), maka keberadaan material topologi semakin mendapat perhatian dalam mengeksplorasi sifat-sifat fisis yang baru [12]. Fitur-fitur pengamatan dari pengukuran ARPES dapat mengkasifikasikan material topologi berdasarkan jenis “partikel”: *Dirac Fermion* yang diprediksi dari Persamaan Dirac., seperti partikel: Dirac, Weyl dan Majorana. Diantara partikel *Dirac Fermion* yang teramati oleh fisika partikel di alam sejauh ini hanya partikel Dirac, yaitu elektron dan anti-elektron (positron). Meskipun demikian dalam alam zat padat ketiga jenis partikel Dirac tersebut telah diamati manifestasinya. Dalam zat padat, karakter topologi yang dinyatakan oleh titik persilangan pada struktur pita elektronik. Gambar 3 menunjukkan model persilangan yang dapat terjadi dan masing-masing memiliki kurvatur Berry terkait. Sifat transpor listrik dari material yang memiliki persilangan topologi, akan dipengaruhi oleh keadaan dari kurvatur Berrynya di sekitar energi fermi [13]. Hal ini dapat memberikan kontribusi yang cukup signifikan diantaranya adalah sifat transpor seperti anomali Hall, kuantum anomali Hall, anomali Nernst, dan anomaly chiral kuantum. Sifat kuantum yang muncul disebabkan oleh kuantisasi fluks dari kurvatur Berry yang ada [14, 15]. Kemunculan sifat-sifat tersebut sangat berpotensi untuk pengembangan divais spintronik.



Gambar 3. Persilangan pita energi yang berupa *Dirac point*, *Weyl point* dan *Nodal line* dalam material topologi.

Berbeda dengan pembahasan sebelumnya bahwa akibat perusakan simetri dapat munculkan suatu keteraturan baru, maka perubahan topologi struktur elektronik dari struktur elektronik yang memiliki celah (*gapped*) menjadi berstruktur sambung (*gapless*) juga dapat memunculkan sifat fisis yang baru. Diantaranya adalah munculnya material *topological insulator* yang dalam keadaan bulk bersifat isolator akan tetapi keadaan permukaannya bersifat logam [16]. Keadaan transpor elektron pada permukaan logam ini memiliki keunikan karena akibat keadaan persilangan pada daerah batas antara bagian bulk dan permukaan mengakibatkan elektron akan bergerak dengan keadaan spin tertentu yang tidak bersinggungan dengan elektron dengan arah yang lain. Dengan kata lain masing-masing elektron dengan arah orientasi spin ke atas memiliki jalur lintasan terpisah dengan elektron dengan arah orientasi spin ke bawah. Hal ini merupakan potensi besar pemanfaatan material ini untuk teknologi spintronik.

3. EKSPLORASI KEMAGNETAN EKSOTIK DAN POTENSI APLIKASINYA

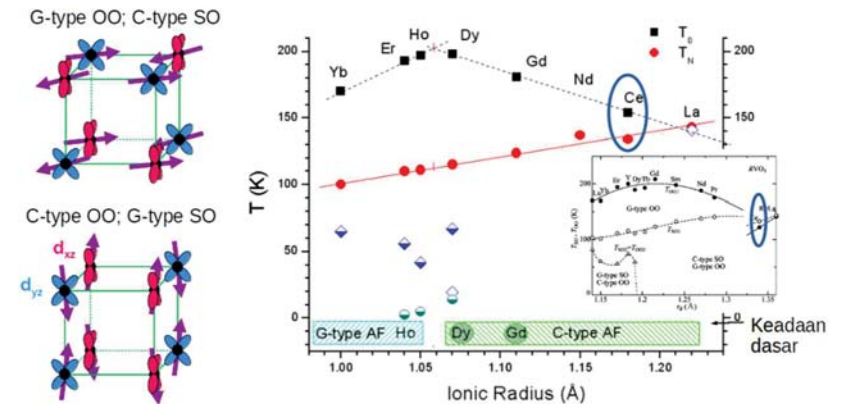
3.1. Keadaan antiferromagnetik dalam sistem keteraturan orbital t_{2g} dalam material YVO_3

Salah satu fenomena yang menarik dalam kemagnetan adalah fenomena pembalikan arah magnetisasi karena berpotensi untuk diaplikasikan untuk pengontrolan/sensor dan penyimpanan data. Fenomena tersebut ditemukan pada kristal tunggal YVO_3 di bawah suhu transisi antiferromagnetik (AF), $T_N \sim 116$ K [17]. Pembalikan arah magnetisasi dalam sistem perovskite YVO_3 terjadi pada suhu sekitar 95 K dan 77 K. Pada suhu tinggi, ~ 95 K, fenomena tersebut dapat dijelaskan akibat interaksi antara *single-ion anisotropy* dan *Dzyaloshinsky-Moriya* (interaksi anti-simetrik) mengikuti perubahan parameter keteraturan dalam keadaan antiferromagnetik. Berbeda dengan transisi pada suhu 95 K, pada suhu rendah, $T_S \sim 77$ K, pembalikan arah magnetisasi terjadi sangat cepat melibatkan transisi struktur kristal yang merupakan transisi fase order pertama dan dapat dipengaruhi oleh medan magnetik [17, 18]. Hal tersebut dijelaskan terkait dengan perubahan keteraturan spin (*Spin Ordering/SO*) dan orbital (*Orbital Ordering/OO*). Pembalikan magnetisasi yang terkait dengan perubahan keteraturan orbital dan spin tersebut menjadi tidak teramati pada senyawa-senyawa RVO_3 (R: logam tanah jarang) dengan jari-jari ion R lebih besar dari jari-jari ion Holmium. Hal

tersebut diduga karena pengaruh interaksi magnetik antara ion magnetik R^{3+} dan V^{3+} dan interaksi antar ion V^{3+} . Fenomena pembalikan arah magnetisasi pada sistem RVO_3 sama dengan kasus YVO_3 , hanya teramati pada material kristal tunggal dan tidak pada material polikristal.

Keteraturan orbital pada ion V^{3+} awalnya terdeteksi dari perubahan nilai momen magnetik di sekitar suhu 200 K dan lebih jelas lagi dari pengamatan *anomali-lambda* pada pengukuran kapasitas panas. Penentuan keadaan orbital dan spin yang terlibat dilakukan melalui pengukuran difraksi menggunakan X-ray synchrotron dan neutron [19, 20]. Keteraturan orbital t_{2g} dari V^{3+} ditentukan berdasarkan pola dari distorsi Jahn-Teller (JT) yang teramati, meskipun distorsi JTnya relatif lebih kecil dibandingkan dalam sistem orbital e_g dalam sistem maganites. Keteraturan spin yang terkait dengan keadaan OO ditentukan mengikuti aturan Goodenough-Kanamori dan arah *easy axis* dari magnetisasi. Gambar 4 menunjukkan konfigurasi OO tipe-G dan konfigurasi AF tipe-C pada daerah suhu antara transisi magnetik T_N sampai dengan keadaan reorientasi spin dan orbital, T_S , menjadi konfigurasi OO tipe-C dan konfigurasi AF tipe-G. Perubahan keadaan spin dan orbital tersebut juga konsisten dengan penelaahan simetri berdasarkan pengukuran optik [21, 22]. Pola keteraturan orbital dan spin yang sama teramati juga pada senyawa RVO_3 yang berjari-jari ionik R lebih kecil dari Dy. Untuk senyawa-senyawa yang jari-jari ioniknya R yang besar dari Dy, transisi fase orde pertama pada suhu rendah tidak terjadi, sehingga struktur magnetik tetap

memiliki konfigurasi AF tipe-C dan konfigurasi orbital tipe-G seperti yang terlihat pada Gbr 4.



Gambar 4. Di sebelah kanan merupakan diagram fase keteraturan OO-SO berdasarkan pengukuran kapasitas panas (unpublished). Simbol \diamond merupakan transisi dari keadaan OO dan SO masing-masing tipe-G dan tipe-C SO pada suhu tinggi berubah menjadi tipe C dan tipe G pada suhu rendah. Transisi di bawah keadaan tersebut merupakan transisi keteraturan magnetic logam tanah jarang. Inset dalam diagram fase merupakan kontroversi pada $CeVO_3$.

Berdasarkan hasil pengukuran struktur, magnetisasi dan kapasitas panas pada material $CeVO_3$ dan $LaVO_3$, transisi SO dan OO terjadi pada rentang suhu yang saling kecil bahkan hamper berimpitan pada $LaVO_3$ seperti yang ditampilkan pada Gbr.4 [23]. Hasil tersebut memicu kontroversi terutama pada sistem $CeVO_3$ karena peneliti lain melaporkan bahwa SO terjadi lebih dahulu pada suhu tinggi sebelum terjadinya OO [24]. Penemuan fakta bahwa SO terjadi sebelum OO didukung oleh teori

orbital fluktuasi [25]. Untuk memecahkan ketidakcocokan tersebut, pengukuran konduktivitas optik yang diamati memiliki fitur yang sama pada sistem RVO_3 dari kedua belah pihak menjadikan alternatif solusi. Pengukuran optik pada daerah disekitar suhu transisi magnetik dapat memberikan informasi keadaan elektronik yang menentukan sifat kemagnetan bahan [26, 21, 27]. Dalam sistem RVO_3 , pemodelan *spectra weight* dari konduktivitas optik dikembangkan atas dasar model Kugel-Khomskii yang mencakup interaksi antar orbital dan efek distorsi kisi [28]. Model ini berhasil mengestimasi efek dari fluktuasi orbital pada *spectra weight* sebelum dan sesudah terjadi transisi magnetik. Berdasarkan pemodelan tersebut prediksi akan adanya keadaan orbital yang berfluktuasi dalam RVO_3 diklarifikasi tidak terjadi, sehingga keadaan OO terjadi lebih dulu daripada keadaan SO [29]. Dengan demikian diagram fase yang dilaporkan oleh Miyasake dkk. selanjutnya diperbaharui oleh Fujioka dkk. menjadi sesuai dengan diagram fase yang kami peroleh [30].

Keadaan antiferromagnetik pada keadaan antara TN dan TS dalam material perovskite RVO_3 memiliki keunikan yang terungkap dari keadaan eksitasi energi 0.4 eV. Energi ini tidak dapat dikaitkan dengan keberadaan eksitasi kolektif baik fonon ataupun magnon. Oleh karena itu, pemodelan eksitasi kolektif orbital atau orbiton diusulkan [27]. Keberadaan orbiton dalam sistem RVO_3 lebih lanjut diverifikasi melalui pengukuran resonant inelastic X-ray scattering [31]. Keberadaan orbiton juga terdeteksi manifestasinya melalui interaksinya dengan phonon di sektor

energi yang lebih rendah lagi sekitar 1400 cm^{-1} atau sekitar 0.17 eV [32].

Aspek lain yang menarik dari keadaan spin dan orbital dalam sistem YVO_3 adalah respons foto eksitasinya. Dalam sistem ini, perubahan SO dan OO memiliki respon yang berbeda akibat pemberian pulsa cahaya yang cepat. Perubahan konfigurasi SO terjadi dalam waktu di bawah 4ps, sedangkan konfigurasi OO terjadi dalam waktu lebih dari 100 ps. Karakteristik ini diakibatkan karena interaksi antara keadaan spin dan orbital. Perubahan konfigurasi spin dalam orde pico-second akibat pemberian efek cahaya/foton memiliki potensi aplikasi yang cukup penting dalam pemrosesan informasi dalam orde THz [33, 34].

3.2. Sifat magnetocaloric dalam material $HoVO_3$

Transisi dari satu konfigurasi SO/OO ke konfigurasi SO/OO dalam sistem RVO_3 memiliki keunikan dibandingkan dengan logam transisi lain karena prosesnya merupakan transisi fase orde pertama. Dalam sistem perovskite $RMnO_3$, konfigurasi SO/OO dapat memiliki perubahan *commensurability* spin tanpa ada transisi fase orde pertama. Secara umum perubahan keadaan magnetik akan menghasilkan magnetik entropi. Melalui proses pemberian medan magnetik (memagnetisasi) dan penghilangan medan magnetik (mendemagnetisasi) maka akan terjadi perubahan suhu. Pada proses demagnetisasi akan terjadi penurunan suhu sehingga material magnetik berpotensi dijadikan “mesin” pendingin. Performa kinerja (*figure of merit*) dari material magnetocaloric agar dapat

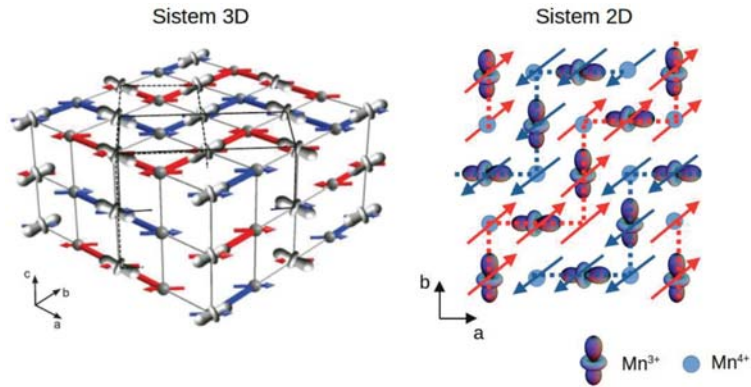
terapkan sebagai suatu divais pendingin harus memiliki nilai *refrigerant capacity* (RC) yang besar. Pada sistem vanadates yang dilakukan untuk HoVO_3 , nilai RC yang diperoleh melebihi nilai dalam sistem RMnO_3 manganites. Nilai RC tertinggi pada rentang medan magnetik 7 Tesla untuk sistem manganites terdapat pada senyawa DyMnO_3 sekitar 450 J/kg. Nilai tersebut masih lebih rendah dari yang nilai RC pada HoVO_3 , yaitu 620 J/kg pada kondisi medan magnetik yang sama [35]. Nilai ini termasuk yang tertinggi untuk material oksida. Meskipun demikian karena suhu operasinya masih di bawah suhu kamar dan medan magnetik yang relatif cukup tinggi, maka material HoVO_3 masih belum memenuhi kriteria untuk diaplikasikan.

3.3. Keterkaitan antara keteraturan orbital, muatan dan magnetik pada senyawa *half-doped* manganites

Berbeda dengan kasus perovskite vanadates dimana keadaan elektronik ditentukan oleh orbital t_{2g} , maka dalam kasus manganites keadaan elektronik ditentukan oleh keadaan orbital e_g . Dalam kasus *half-doped* manganite, valensi ion Mn terparuh menjadi dua menjadi Mn^{3+} dan Mn^{4+} . Pada kondisi ini, interaksi superexchange, double-exchange dan keteraturan OO saling mempengaruhi, sehingga ion Mn^{3+} dan Mn^{4+} dapat memiliki keteraturan untuk masing-masing ion yang dinamakan keteraturan muatan (*charge ordering/CO*) *site-centered*. Selain itu keteraturan muatan dapat pula melibatkan ion oksigen seperti $\text{Mn}^{3+}\text{-O}^{2-}$

Mn^{4+} yang dinamai *CO bond-centered*. Keadaan CO *bond-centered* mirip dengan keadaan distorsi Peierls. Banyak pengukuran struktur kristal dalam sistem *half-doped* manganates yang melaporkan keberadaan keadaan CO *bond-centered* daripada CO *site-centered*, sehingga diyakini bahwa CO yang terjadi pada kasus *half-doped* adalah CO *bond-centered*.

Terdorong untuk memverifikasi akan keberadaan keadaan CO pada kasus *half-doped* manganites, maka disiapkanlah sampel kristal tunggal dengan ratio stoichiometric yang sama antara Mn^{3+} dan Mn^{4+} dalam material $\text{Nd}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_3$ [36] Kualitas sampel dengan ratio $\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ yang baik dapat terlihat ketika terjadi keteraturan CO, resistivitasnya berubah sampai dengan 4 orde magnitute menjadi isolator. Pengukuran struktur kristal dan magnetik menggunakan difraksi neutron menunjukkan bahwa keberadaan keteraturan CO *site-centered* merupakan keadaan elektronik yang sesungguhnya pada sistem *half-doped* manganites. Ratio yang tidak sama antara Mn^{3+} dan Mn^{4+} mengakibatkan teramatinya keteraturan CO *bond-centered*. Konfigurasi CO yang diperoleh mengkonfirmasi pola keteraturan checkerboard dari model Goodenough dengan konfigurasi OO dari e_g orbital berbentuk stripelike dan konfigurasi SO berupa antiferromagnetik tipe CE *zig-zag* seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 5.



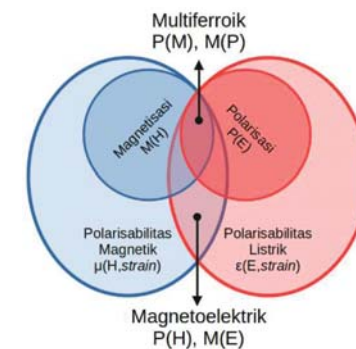
Gambar 5. Pola keteraturan OO-SO dan OO berbentuk *zig-zag* dalam material half-doped manganites baik dalam sistem 3D dan 2D.

Pola keteraturan checkedboard di atas dapat ditunjukkan terjadi juga untuk sistem *layered-manganites* (2D) dalam material $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$ (PCMO) pada suhu rendah. Dalam kasus lapisan tunggal (*single-layered*), *apical* oksigen yang terdapat pada satu koordinasi oktahedra tidak terhubung dengan oktahedra lainnya, oleh karena itu, interaksi antara ion Mn yang berada pada lapisan sama berbeda dengan pada antar lapisan. Kenaikan nilai resistivitas dan munculnya efek distorsi Jahn-Teller pada material PCMO pada suhu 320 K menandai terjadinya CO dan OO [37]. Berdasarkan pengukuran elipsometri diketahui bahwa interaksi magnetik pada lapisan Mn-O, dapat mempengaruhi keadaan orbital oksigen pada lapisan Mn-O untuk mengarah pada keadaan orbital ion Mn^{3+} , sehingga menjadikan pola *zig-zag* seperti pada kasus 3D ketika terjadi SO pada suhu 130 K dengan keadaan orbital oksigen pada lapisan Mn-O menjadi saling

tegak lurus [38]. Disisi lain, pada saat terjadi keteraturan *checkedboard* (SO-CO dan OO) terjadi perubahan struktur lokal oktahedra yang juga dipengaruhi oleh keadaan orbital dari *apical* oksigen [37, 39].

3.4. Interaksi magnetoelektrik dalam sistem antiferromagnetik

Interaksi magnetoelektrik terjadi karena ada interaksi antar parameter keteraturan magnetik dan elektrik. Hal ini memungkinkan untuk mengubah sifat magnetik, M , melalui pemberian medan listrik, E , $M(E)$ ataupun sebaliknya $P(H)$ seperti pada Gbr. 6. Penemuan sifat multiferroic pada material antiferromagnetik TbMnO_3 telah membuka wawasan baru dalam memahami dan mengeksplorasi sifat magnetoelektrik baru [40]. Munculnya polarisasi listrik dalam material TbMnO_3 disebabkan oleh adanya struktur magnetik spiral antiferromagnetik yang memiliki komponen tegak lurus dengan arah propagasi spiralnya [41, 42].



Gambar 6. Irisan sifat magnetoelektrik dan multiferroic yang memungkinkan untuk mengubah sifat listrik melalui kemagnetan dan sebaliknya. Keadaan irisan tersebut juga memenuhi keadaan simetri keduanya.

Kestabilan stuktur spiral akibat kehadiran muatan tambahan dalam material dikaji melalui penambahan Ca dalam material $TbMnO_3$ menjadi $Tb_{1-x}Ca_xMnO_3$. Dalam material tersebut keadaan ferroelektrik dapat berubah menjadi keadaan relaxor yang sifat struktur magnetik dan dinamikanya dikaji melalui pengukuran difraksi neutron dan relaksasi spin muon [43, 44, 45]. Selain itu, kehadiran muatan akibat fotoeksitasi dalam sistem $TbMnO_3$ dapat menimbulkan respons yang anisotropi terhadap propagasi muatannya meskipun relaksasinya bersifat isotropik. Hal ini terjadi karena adanya interaksi antara elektron yang tereksitasi dan korelasi antiferromagnetik, dan tidak sensitif terhadap perubahan keadaan spiralnya [46]. Efek fotoeksitasi terlihat apabila diamati arus transien pada arah polarisasi pada keadaan ferroelektriknya [47].

Sifat magnetoelektrik memiliki potensi besar untuk aplikasi adalah sifat magnetoelektrik linier. Oleh karena itu, kondisi yang menentukan munculnya sifat ini selain dari panduan simetri juga menjadi kajian riset yang menarik. Pada material $MnTiO_3$, sifat magnetoelektrik linier teramati melalui pengamatan munculnya polarisasi listrik dalam pengaruh medan magnetik pada keadaan antiferromagnetik. Hal tersebut dapat dijelaskan menggunakan perumusan fenomenologi *Ginzburg-Landau* (GL), dimana proses interaksi antara medan magnetik dan medan listrik dapat diperantarai oleh fluktuasi magnetik [48]. Terlepas dari analisa struktur magnetik dalam pengaruh medan magnetik yang membutuhkan peralatan yang khusus, analisa *scaling* dari persamaan GL untuk

mendapat efek magnetoelektrik linier dapat diterapkan.

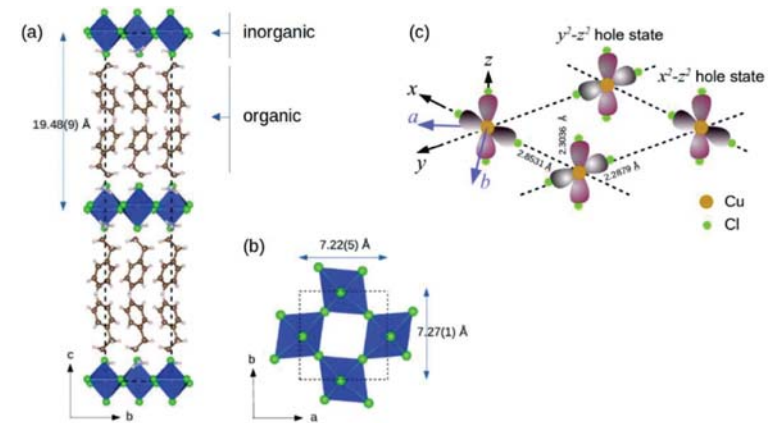
Persamaan fenomenologi GL dapat pula dipakai untuk mendapatkan sifat magnetoelektrik yang kuadratik melalui kehadiran interaksi P^2M^2 . Berdasarkan hubungan tersebut, pengukuran transisi antiferromagnetik dapat teramati melalui pengukuran kapasitansi, dan sekaligus dapat mengungkap sifat magnetocapacitancinya (MC). Peningkatan efek MC dalam material $YMnO_3$ dapat diperoleh melalui substitusi Mn dengan Ga. Selain itu dalam pengaruh medan magnetic dapat pula mengubah arah polarisasi listrik [49]. Hubungan kuadratik, P^2M^2 , menunjukkan kebergantungan kapasitansi yang kuadratik terhadap magnetisasi atau medan magnetik disamping magnetisasi itu sendiri bergantung terhadap medan magnetik seperti yang ditunjukkan dalam sistem spinel MCr_2O_4 dengan M adalah logam transisi seperti: Co, Mn dan Ni [50].

3.5. Interaksi magnetik jangkauan panjang yang diperantarai oleh gugus organik

Dalam sistem magnetik, interaksi antar magnetik momen memegang peran yang penting untuk terjadinya keteraturan jangkauan panjang (*long-range ordering*/LRO). Selain interaksi pertukaran (*exchange*) yang telah banyak diterapkan pada sistem-sistem yang dibahas sebelumnya, terdapat interaksi dipolar yang secara eksplisit memperhitungkan jarak antar momen magnetik. Biasanya di dalam material interaksi exchange jauh lebih besar dibandingkan interaksi dipolar. Dalam material hibrida

organik dan inorganik, sifat-sifat fisis lebih ditentukan oleh keadaan elektronik logam transisi dalam komponen inorganik sedangkan komponen organik berfungsi sebagai penghubung antar komponen inorganik menjadikan material ini hybrid dapat lebih fleksible dan ringan.

Di antara material hibrida organik-inorganik adalah material A_2CuCl_4 dengan A adalah $C_2H_5NH_3$ dan $C_2H_5CH_2CH_2NH_3$ yang masing-masing dikenal dengan nama hibrida Cu-EA dan Cu-PEA. Dalam senyawa tersebut, jarak antar atom Cu mencapai masing-masing 10 Å dan 20 Å untuk senyawa hibrida Cu-EA dan Cu-PEA. Gambar 7 (a) dan (b) menunjukkan struktur kristal Cu-PEA dengan jarak antar ion magnetic Cu yang sangat besar sepanjang sumbu-c. Berdasarkan pengukuran susceptibilitas-ac diperoleh Cu-EA dan Cu-PEA masing-masing bersifat antiferromagnetik dan ferromagnetik. Keberadaan interaksi LRO pada masing-masing senyawa diverifikasi melalui pengukuran muon spin melalui pengamatan pola osilasi pada spektrum waktu. Berdasarkan model perubahan parameter keteraturan terhadap suhu diperoleh suhu transisi dan medan internal untuk Cu-EA dan Cu-PEA masing-masing sebesar $T_N \sim 10$ K, $B_0 \sim 240$ G dan $T_C \sim 9$ K, $B_0 \sim 230$ G [51].



Gambar 7. (a) dan (b) masing-masing adalah struktur kristal Cu-PEA yang diproyeksikan dalam bidang b-c dan a-b. (c) merupakan pola keteraturan orbital AF yang didapatkan berdasarkan pengukuran XAS.

Penentuan posisi henti muon merupakan parameter penting untuk menganalisa besar medan magnetik internal dan sumber munculnya kemagnetan yang ada dalam material. Untuk mendukung kajian tersebut, prosedur penentuan posisi henti muon berdasarkan perhitungan DFT dikembangkan dengan metode validasi medan internal pada keadaan dasar, B_0 [52]. Penerapan prosedur tersebut dalam material Cu-EA dan Cu-PEA diperoleh indikasi bahwa terdapat peran dari komponen organik yang berupa lingkaran Benzene yang memberi kontribusi sebagai perantara interaksi LRO antar ion magnetik Cu yang saling berjauhan seperti pada kasus Cu_PEA [53]. Interaksi jangkauan panjang melalui komponen organik yang mengandung stuktur Benzene diharapkan

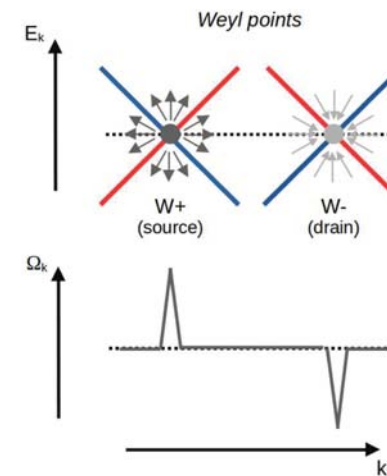
berlaku lebih umum dan luas, tidak hanya pada Cu-hibrida. Prosedur perhitungan posisi henti muon masih terus dikembangkan untuk posisi henti dengan validasi pencocokan spektrum waktu hasil pengukuran muon spin.

Selain sifat magnetik yang unik dengan interaksi jangkauan panjang, kajian struktur kristal pada material Cu-PEA menunjukkan adanya distorsi JT yang mengindikasikan kemungkinan adanya keteraturan orbital meskipun jenis orbitalnya tidak dapat ditentukan. Untuk memastikan adanya keteraturan orbital dalam senyawa hibrida dengan distorsi JT, maka dilakukan pengukuran Linear Dichorism X-ray Absorption. Hasil fitting spektrum absorpsi tersebut dengan pemodelan orbital memastikan bahwa keadaan OO merupakan alternasi dari keadaan orbital dx^2-z^2 dan dy^2-z^2 sesuai dengan kaidah Goodenough Kanamori tentang antisimetri keadaan orbital dan spin, seperti yang ditampilkan pada Gbr. 7(c) [54].

3.6. Sifat anomali pada material topologi Weyl magnetik

Material Weyl memiliki karakteristik pasangan titik persilangan pada struktur pita elektronik yang masing-masing memiliki chirality yang berbeda. Titik chiral + terdiri atas pasangan arah momentum dan spin (k, \uparrow) , $(-k, \downarrow)$ dan chiral - yang terdiri atas pasangan $(-k, \uparrow)$, (k, \downarrow) . Kurvatur Berry untuk masing-masing titik chiral disekitar titik chiral menggambarkan pola masuk (*source*) atau keluar (*drain*) sehingga masing-

masing disebut titik monopol + dan monopol - atau pasangan “dipol magnetik” dalam ruang momentum yang nilai medannya cukup besar dirasakan oleh elektron. Dalam material topologi, jumlah pasangan “dipol magnetik” tersebut bisa lebih dari satu pasang. Keberadaan pasangan “dipol” melalui kurvatur Berry yang ada di sekitar energi fermi dapat menimbulkan sifat anomali pada sifat transpor muatannya [55].



Gambar 8. Skematik perilangan pada struktur pita elektronik yang menghasilkan Weyl points dan kurvatur Berry Ω_k yang terkait.

Pada material antiferromagnetik Mn_3Sn dengan momen magnetik spontan yang sangat kecil dapat memunculkan nilai anomali Hall (AHE) dan nilai anomali Nerst (ANE) yang cukup besar dibandingkan pada material logam antiferromagnetic biasa. Hal ini diakibatkan karena kehadiran “medan magnetik” dalam ruang momentum atau kurvatur

Berry seperti yang diilustrasikan pada Gbr. 8 [56, 57].

Material yang memiliki nilai ANE yang tinggi sangat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai material pembangkit tegangan listik yang ramah lingkungan. Sifat ANE ditentukan oleh koefisien transversal termoelektrik, α_{xy} , yang pada logam biasa memiliki kebergantungan linier terhadap kenaikan suhu, $\alpha_{xy} \sim -T$. Nilai koefisien α_{xy} yang sangat besar mencapai 4 ditemukan pada material Weyl magnetik Co_2MnGa [57]. Kontribusi kurvatur Berry terhadap koefisien transversal termoelektrik memiliki kebergantungan terhadap suhu $\alpha_{xy} \sim -T \ln T$. Berdasarkan kebergantungan tersebut eksplorasi pencarian material magnetik Weyl dapat lebih diakses daripada menggunakan pengukuran ARPES. Pencarian material Weyl magnetik selain Co_2MnGa dipandu menggunakan perhitungan DFT mendapatkan material Weyl magnetik CoMnSb . Kebergantungan koefisien transversal $\alpha_{xy} \sim -T \ln T$ teramati juga pada material CoMnSb , akan tetapi nilainya tidak sebesar material Co_2MnGa . Sejauh ini material yang diprediksi masuk dalam kategori material half-Heusler, akan tetapi secara eksperimen yang berhasil diperoleh adalah material CoMnSb half-Heusler yang mengandung struktur superstructure [58]. Sintesis material CoMnSb tanpa superstructure masih terus diupayakan saat ini.

Selain memberi sifat anomali pada sifat transpor, titik persilangan Weyl juga berpengaruh pada dinamika spin atau magnon. Hal ini dapat terlihat secara eksperimen hamburan inelastik neutron pada material

SrRuO_3 melalui anomali pelemahan (*softening*) dari celah eksitasi magnon dan kekakuan gerakannya (*stiffness*). Perubahan celah eksitasi magnon dan kekakuan gerak magnon yang tidak mengikuti perubahan dari orde keteraturan dapat dipecahkan dengan melibatkan perubahan konduktivitas Hall yang mengandung persilangan titik Weyl. Melalui pemodelan secara fenomenologis tersebut, hasil eksperimen kebergantungan suhu terhadap perubahan magnetisasi, konduktivitas Hall, dan hubungan dispersi magnon dapat dijelaskan [59].

4. PENUTUP

Berdasarkan uraian di atas, keadaan kemagnetan dapat terkait dengan sifat listrik baik melalui interaksi magnetoelektrik, saling keterkaitan dengan keadaan orbital, dan keadaan topologi struktur pita elektronik. Saat ini, piranti elektronika bekerja berdasarkan mekanisme transport muatan atau arus muatan yang bersifat disipatif. Hal ini menyebabkan penggunaan piranti elektronik yang besar dan massif akan berdampak pada efek pemanasan global. Oleh karena itu, eksplorasi mekanisme transport baru yang melibatkan keadaan spin dan orbital yang mendukung teknologi spintronik dan orbitronik terus dikaji untuk mendapatkan teknologi masa depan yang dapat mentransfer, memproses dan menyimpan informasi yang besar secara cepat tanpa menghasilkan energi panas yang besar.

Dalam rangka mengeksplorasi material baru dan mekanisme fisis

baru yang dapat mendukung pengembangan teknologi masa depan, kelompok kemagnetan di Fisika ITB mengembangkan sifat-sifat kemagnetan dan bahan magnetik yang dapat memiliki sifat transpor listrik yang *dissipationless*, konversi arus spin ke arus muatan yang efisien, fungsionalisasi interaksi magnetoelektrik dan peningkatan efisiensi konversi panas ke listrik. Selain itu dikembangkan pula metode analisis untuk mengkaji interaksi magnetik berdasarkan kekuatan medan magnetik internal dari pengukuran dinamika muon spin. Untuk itu, kerjasama penelitian yang selama ini telah berjalan dengan kelompok peneliti di LIPI, PSTBM-BATAN Max-Planck Institute for Chemical Physics of Solid, Experimental Physics II - University of Cologne, Department of Physics - University of Tokyo, Department of Applied Physics - Mie University dan Nishina Center - RIKEN, akan terus ditingkatkan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang atas berkat dan rahmatNya naskah orasi ilmiah ini dapat diselesaikan. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas kesempatan untuk menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru ITB.

Pada kesempatan ini, kami juga menyampaikan terima kasih pada

para pihak yang mendukung pengusulan jabatan akademik Guru Besar saya mulai dari kelompok riset Fisika Magnetik dan Fotonik, Senat FMIPA, Senat Akademik sampai Rektor ITB dan jajarannya. Secara khusus kami berterima kasih atas mendorong dan dukungan pengajuan jabatan akademik ini oleh Prof. Edy Tri Baskoro dekan FMIPA 2013-2018, pemberi rekomendasi dari ITB: Prof. Toto Winata, Prof. Yana Maolana Syah, dari ITS: Prof. Darminto dan dari University of Cologne: Prof. Emeritus Mohsen Abd-Elmeguid.

Pengusulan jabatan Guru Besar disadari memang membutuhkan langkah yang panjang dan merepotkan banyak pihak terutama pada proses penilaian karya ilmiah yang telah terbit. Terima kasih sebesar-besarnya kepada Prof. Tjia May On (alm), atas dukungan terus-menerus untuk mulai berproses dan selama pengajuan jenjang akademik Guru Besar. Capaian yang dirangkumkan dalam tulisan ini tidak akan terjadi jika pada saat tugas akhir S1 Pak Tjia tidak memberikan topik tentang Model Hubbard dan mengajak untuk bergabung di Fisika ITB. Kami juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Dr. Soetrisno (alm), ketua Jurusan Fisika ITB tahun 1993 yang mendukung kami bergabung menjadi staf Fisika ITB dan berpesan untuk selalu harus mengembangkan keilmuan fisika.

Terima kasih yang setinggi-tingginya pada tim pembimbing selama mengikuti Progam Doktor di Van der Waals - Zeeman Institute, Universitas Amsterdam (UvA), Prof. Jaap Franse, Dr. Alois Menovsky,

Prof. Frank de Boer dan Prof. Tjia May On. Terima kasih untuk Pak Alois yang mengajarkan bagaimana membangun dasar keilmuan yang mapan berawal dari kualitas sampel yang unggul. Terima kasih juga kepada Prof. Thom Palstra yang menjadi mentor selama Program *post doctoral* di Material Science Center, Universitas Groningen (RuG) yang sekarang bernama Zernike Institute for Advanced Material. Terima kasih atas kerjasama penelitian yang cukup panjang dan rintisan program *research-based sandwich program* antara FMIPA ITB dan Zernike Institute sampai Pak Thom meninggalkan RuG menjadi rektor di Universitas Twente pada tahun 2016. Program ini telah berhasil menghasilkan S3 bahkan beberapa staf muda di prodi Fisika dan Kimia ITB. Terima kasih Prof. Paul van Loosdrecht dan Prof. Katja Loos sebagai partner koordinator program sandwich tersebut. Kami juga berterima kasih pada kolega peneliti Prof. Hao Tjeng dan Dr. Zhiwei Hu dari Max-Planck Institute for Chemical Physics of Solid, Dresden, yang selalu menyempatkan diskusi dan memberi akses eksperimen yang mereka bangun di fasilitas X-ray absorption di Synchrotron radiation di Taiwan. Terima kasih juga kepada Prof. Khomskii, Prof. Markus Braden, Prof. Paul van Loosdrecht, Prof. Emeritus Mohsen El-meguid, dan Prof. Thomas Lorenz yang membuat Experimental Physics Institute II di Koeln sangat nyaman untuk tempat eksperimen. Terima kasih juga pada Prof. Satoru Nakatsuji yang mengajak untuk mengeksplor material kuantum dan material topologi di Institute for Solid State Physics, University of Tokyo. Kepada rekan-rekan di Prodi

Kimia ITB, Prof. Ismunandari, Prof. Djulia Onggo, Dr. Vernardi dan Dr. Bambang Prijamboedi atas kerjasama riset selama selama ini.

Kami juga mengucapkan terima kasih setinggi-tingginya untuk guru-guru di Prodi Fisika ITB, Prof. Tjia May On (alm) yang selalu mendorong untuk tidak pernah menyerah, Prof. Barmawi (alm) yang memberikan pengenalan tentang perhitungan struktur elektronik zat padat, Prof. Waloejo (alm), yang mensupervisi proyek penelitian RUT sebagai mitra pembiayaan riset KNAW selama kami menempuh program doktor di UvA. Terima kasih juga untuk Prof. Pantur Silaban dan Prof. The Houw Liong atas perhatiannya dan masih bersedia meluangkan waktu untuk berbagi pandangan tentang perkembangan zaman.

Kami juga mengucapkan banyak terima kasih kepada para ketua dan mantan ketua kelompok keahlian (KK) di Fisika: Prof. Freddy Zen, Prof. Triyanta, Prof. Mitra Djamal, Prof. Supriadi, Prof. Zaki Suud, Dr. Nurul Siti Khotimah, Prof. Doddy Sutarno, Prof. Umar Fauzi, Prof. Toto Winata, Prof. Mikrajuddin, Prof. Khairurrijal atas kerjasamanya. Terima kasih juga untuk rekan-rekan di KK Fisika Magnetik dan Fotonik: Dr. Herman, Dr. Daniel Kurnia, Dr. Alexander Iskandar, Dr. Agoes Soehianie, Dr. Rachmat Hidayat, Dr. Inge Sutjahja, Dr. Priastuti Wulandari, Dr. Berlinson Napitu, Dr. Andy Latief dan Dr. Muizz Pradipto atas dukungan dan kerjasamanya. Terima kasih juga untuk segenap staf fisika dan tendik fisika atas kebersamaan dan kerjasamanya.

Pada kesempatan ini, saya juga mengucapkan terima kasih sebesar-

besarnya pada pihak keluarga, orangtua yang saya cintai Bapak A. Sriyono dan Ibu M. Sudarmi yang secara terus menerus memberikan dukungan dan doa selama menempuh pendidikan dan berkarya sampai saat ini. Terima kasih juga untuk Bapak/Ibu mertua, Bapak L. Roeswadi dan Ibu A. Sukarnani (alm) atas pendampingan dan dukungan kepada keluarga kami saat anak-anak kami tinggal bertugas. Kepada keluarga tercinta, istri saya Dhian dan anak-anak, Astri dan Ariyo, terima kasih atas kebersamaan dan suka cita yang kita alami selama ini dan juga permohonan maaf yang sebesar-besarnya karena sering meninggalkan waktu kebersamaan ketika mendapatkan waktu eksperimen di luar. Terima kasih juga untuk kakak Hananto dan adik Dewi beserta keluarga atas kebersamaan selama ini. Secara khusus, kami sangat terima kasih pada Mas Harsono (alm) yang menumbuhkan minat kami pada keilmuan fisika saat kami menempuh SMA di Yogya.

Kepada para sahabat seprofesi dalam bidang kemagnetan yang tergabung dalam *Indonesian Magnetic Society* dan rekan mahasiswa yang membantu kelancaran eksperimen di luar dan meramaikan kegiatan penelitian di lab magnetik, saya mengucapkan banyak terima kasih atas dukungan dan kerjasamanya selama ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Tuomi, "The Lives and Death Moore's Law: First Monday," *Peer-Reviewed Journal on the Internet*, vol. 7, 2002.

- [2] A. J. Cohen, P. Mori-Sánchez and W. Yang, "Insights into current limitations of density functional theory," *Science*, vol. 321, p. 792-794, 2008.
- [3] J. Hubbard, "Electron correlations in narrow energy bands," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 276, p. 238-257, 1963.
- [4] K. A. Chao, J. Spalek and A. M. Oleś, "Canonical perturbation expansion of the Hubbard model," *Physical Review B*, vol. 18, p. 3453, 1978.
- [5] A. P. Balachandran, E. Ercolessi, A. M. Srivastava and G. Morandi, *The Hubbard model and anyon superconductivity*, World Scientific, 1990.
- [6] A. A. N. Sulisty Hutomo, *Studi Model tJ Satu Dimensi Tanpa dan Dengan Satu Lubang*, Jurusan Fisika, Institut Teknologi Bandung, 1993.
- [7] "The Hubbard model at half a century," *Nature Physics*, vol. 9, p. 523-523, 2013.
- [8] K. I. Kugel and D. I. Khomskii, "The Jahn-Teller effect and magnetism: transition metal compounds," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 25, p. 231, 1982.
- [9] J. B. Goodenough, "Theory of the role of covalence in the perovskite-type manganites [La, M (II)] MnO₃," *Physical Review*, vol. 100, p. 564, 1955.

- [10] J. Kanamori, "Superexchange interaction and symmetry properties of electron orbitals," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 10, p. 87-98, 1959.
- [11] Y. Tokura, "Correlated-electron physics in transition-metal oxides (vol 56, pg 50, 2003)," *Physics Today*, vol. 56, p. 14-14, 2003.
- [12] C. Zhang, Y. Li, D. Pei, Z. Liu and Y. Chen, "Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy Study of Topological Quantum Materials," *Annual Review of Materials Research*, vol. 50, p. 131-153, 2020.
- [13] B. Yan and C. Felser, "Topological materials: Weyl semimetals," *Annual Review of Condensed Matter Physics*, vol. 8, p. 337-354, 2017.
- [14] M. Gradhand, D. V. Fedorov, F. Pientka, P. Zahn, I. Mertig and B. L. Györfy, "First-principle calculations of the Berry curvature of Bloch states for charge and spin transport of electrons," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 24, p. 213202, 2012.
- [15] J. Noky and Y. Sun, "Linear response in topological materials," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 4832, 2019.
- [16] Y. Ando, "Topological insulator materials," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 82, p. 102001, 2013.
- [17] Y. Ren, T. T. M. Palstra, D. I. Khomskii, E. Pellegrin, A. A. Nugroho, A. A. Menovsky and G. A. Sawatzky, "Temperature-induced magnetization reversal in a YVO_3 single crystal," *Nature*, vol. 396, pp.

441-444, 1998.

- [18] Y. Ren, T. T. M. Palstra, D. I. Khomskii, A. A. Nugroho, A. A. Menovsky and G. A. Sawatzky, "Magnetic properties of YVO_3 single crystals," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 62, pp. 6577-6586, 2000.
- [19] G. R. Blake, T. T. M. Palstra, Y. Ren, A. A. Nugroho and A. A. Menovsky, "Transition between orbital orderings in YVO_3 ," *Physical Review Letters*, vol. 87, pp. 2455011-2455014, 2001.
- [20] G. R. Blake, T. T. M. Palstra, Y. Ren, A. A. Nugroho and A. A. Menovsky, "Neutron diffraction, x-ray diffraction, and specific heat studies of orbital ordering in YVO_3 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 65, pp. 1741121-1741129, 2002.
- [21] A. A. Tsvetkov, F. P. Mena, Y. Ren, I. S. Elfimov, P. H. M. Van Loosdrecht, D. Van Der Marel, A. A. Nugroho, A. A. Menovsky and G. A. Sawatzky, "Optical and magneto-optical study of orbital and spin ordering transitions in YVO_3 ," *Physica B: Condensed Matter*, Vols. 312-313, pp. 783-784, 2002.
- [22] A. A. Tsvetkov, F. P. Mena, P. H. M. Van Loosdrecht, D. Van der Marel, Y. Ren, A. A. Nugroho, A. A. Menovsky, I. S. Elfimov and G. A. Sawatzky, "Structural, electronic, and magneto-optical properties of YVO_3 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 69, p. 075110, 2004.

- [23] Y. Ren, A. A. Nugroho, A. A. Menovsky, J. Stempfer, U. Rütt, F. Iga, T. Takabatake and C. W. Kimball, "Orbital-ordering-induced phase transition in LaVO_3 and CeVO_3 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 67, pp. 141071-141076, 2003.
- [24] S. Miyasaka, Y. Okimoto, M. Iwama and Y. Tokura, "Spin-orbital phase diagram of perovskite-type RVO_3 (R= rare-earth ion or Y)," *Physical Review B*, vol. 68, p. 100406, 2003.
- [25] A. M. Oles, P. Horsch and G. Khaliullin, "One-dimensional orbital fluctuations and the exotic magnetic properties of YVO_3 ," *Physical Review B*, vol. 75, p. 184434, 2007.
- [26] S. Miyasaka, Y. Okimoto and Y. Tokura, "Anisotropy of Mott-Hubbard gap transitions due to spin and orbital ordering in LaVO_3 and YVO_3 ," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 71, p. 2086-2089, 2002.
- [27] E. Benckiser, R. Rückamp, T. Möller, T. Taetz, A. Möller, A. A. Nugroho, T. T. M. Palstra, G. S. Uhrig and M. Grüninger, "Collective orbital excitations in orbitally ordered YVO_3 and HoVO_3 ," *New Journal of Physics*, vol. 10, p. 053027, 2008.
- [28] P. Horsch, A. M. Oleś, L. F. Feiner and G. Khaliullin, "Evolution of Spin-Orbital-Lattice Coupling in the RVO_3 Perovskites," *Physical review letters*, vol. 100, p. 167205, 2008.
- [29] J. Reul, A. A. Nugroho, T. T. M. Palstra and M. Grüninger, "Probing orbital fluctuations in RVO_3 (R = Y, Gd, or Ce) by ellipsometry,"

- Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 86, p. 125128, 2012.
- [30] J. Fujioka, T. Yasue, S. Miyasaka, Y. Yamasaki, T. Arima, H. Sagayama, T. Inami, K. Ishii and Y. Tokura, "Critical competition between two distinct orbital-spin ordered states in perovskite vanadates," *Physical Review B*, vol. 82, p. 144425, 2010.
- [31] E. Benckiser, L. Fels, G. Ghiringhelli, M. Moretti Sala, T. Schmitt, J. Schlappa, V. N. Strocov, N. Mufti, G. R. Blake, A. A. Nugroho, T. T. M. Palstra, M. W. Haverkort, K. Wohlfeld and M. Grüninger, "Orbital superexchange and crystal field simultaneously at play in YVO_3 : Resonant inelastic x-ray scattering at the v L edge and the O K edge," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 88, p. 205115, 2013.
- [32] B. Roberge, S. Jandl, A. A. Nugroho and T. T. M. Palstra, "Micro-Raman study of orbiton-phonon coupling in YbVO_3 ," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 43, pp. 127-130, 2012.
- [33] D. A. Mazurenko, A. A. Nugroho, T. T. M. Palstra and P. H. M. van Loosdrecht, "Dynamics of spin and orbital phase transitions in YVO_3 ," *Physical review letters*, vol. 101, p. 245702, 2008.
- [34] F. Novelli, D. Fausti, J. Reul, F. Cilento, P. H. M. Van Loosdrecht, A. A. Nugroho, T. T. M. Palstra, M. Grüninger and F. Parmigiani, "Ultrafast optical spectroscopy of the lowest energy excitations in the Mott

- insulator compound YVO_3 : Evidence for Hubbard-type excitons," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 86, p. 165135, 2012.
- [35] M. Balli, B. Roberge, S. Jandl, P. Fournier, T. T. M. Palstra and A. A. Nugroho, "Observation of large refrigerant capacity in the HoVO_3 vanadate single crystal," *Journal of Applied Physics*, vol. 118, p. 073903, 2015.
- [36] H. Ulbrich, F. Krüger, A. A. Nugroho, D. Lamago, Y. Sidis and M. Braden, "Spin-wave excitations in the ferromagnetic metallic and in the charge-, orbital-, and spin-ordered states in $\text{Nd}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ with $x \approx 0.5$," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 84, p. 094453, 2011.
- [37] I. P. Handayani, A. A. Nugroho, S. Riyadi, G. R. Blake, N. Mufti, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Correlation between lattice vibrations with charge, orbital, and spin ordering in the layered manganite $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 92, p. 205101, 2015.
- [38] M. A. Majidi, E. Thoeng, P. K. Gogoi, F. Wendt, S. H. Wang, I. Santoso, T. C. Asmara, I. P. Handayani, P. H. M. Van Loosdrecht, A. A. Nugroho, M. Rübhausen and A. Rusydi, "Temperature-dependent and anisotropic optical response of layered $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$ probed by spectroscopic ellipsometry," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 87, p. 235135, 2013.
- [39] V. Capogrosso, M. Malvestuto, I. P. Handayani, P. H. M. Van Loosdrecht, A. A. Nugroho, E. Magnano and F. Parmigiani, "Effects of charge-orbital order-disorder phenomena on the unoccupied electronic states in the single-layered half-doped $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 87, p. 155118, 2013.
- [40] T. Kimura, T. Goto, H. Shintani, K. Ishizaka, T.-h. Arima and Y. Tokura, "Magnetic control of ferroelectric polarization," *nature*, vol. 426, p. 55-58, 2003.
- [41] M. Mostovoy, "Ferroelectricity in spiral magnets," *Physical Review Letters*, vol. 96, p. 067601, 2006.
- [42] H. Katsura, N. Nagaosa and A. V. Balatsky, "Spin current and magnetoelectric effect in noncollinear magnets," *Physical review letters*, vol. 95, p. 057205, 2005.
- [43] N. Mufti, A. A. Nugroho, G. R. Blake and T. T. M. Palstra, "Relaxor ferroelectric behavior in Ca-doped TbMnO_3 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 78, p. 024109, 2008.
- [44] N. Mufti, G. R. Blake, A. A. Nugroho and T. T. M. Palstra, *Magnetic field induced ferroelectric to relaxor crossover in $\text{Tb}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$* , vol. 21, IOP Publishing, 2009, p. 452203.
- [45] A. A. Nugroho, Risdiana, N. Mufti, T. T. M. Palstra, I. Watanabe and M. O. Tjia, "Changes of spin dynamics in multiferroic $\text{Tb}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ "

Physica B: Condensed Matter, vol. 404, pp. 785-788, 2009.

- [46] I. P. Handayani, R. I. Tobey, J. Janusonis, D. A. Mazurenko, N. Mufti, A. A. Nugroho, M. O. Tjia, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Dynamics of photo-excited electrons in magnetically ordered TbMnO_3 ," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 25, 2013.
- [47] I. P. Handayani, N. Mufti, A. A. Nugroho, M. O. Tjia, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Photo-induced modulation of ferroelectric polarization in multiferroic TbMnO_3 ," in *2013 International Conference of Information and Communication Technology (ICoICT)*, 2013.
- [48] N. Mufti, G. R. Blake, M. Mostovoy, S. Riyadi, A. A. Nugroho and T. T. M. Palstra, "Magnetoelectric coupling in MnTiO_3 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 83, p. 104416, 2011.
- [49] A. A. Nugroho, N. Bellido, U. Adem, G. Nénert, C. Simon, M. O. Tjia, M. Mostovoy and T. T. M. Palstra, "Enhancing the magnetoelectric coupling in YMnO_3 by Ga doping," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 75, p. 174435, 2007.
- [50] N. Mufti, A. A. Nugroho, G. R. Blake and T. T. M. Palstra, "Magnetodielectric coupling in frustrated spin systems: The spinels MCr_2O_4 (M = Mn, Co and Ni)," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 22, p. 075902, 2010.
- [51] E. Suprayoga, "Moun sites and internal fields calculation in Cu-based

organic-inorganic hybrid materials", ITB: Dissertation, 2018.

- [52] E. Suprayoga, A. A. Nugroho, A. O. Polyakov, T. T. M. Palstra and I. Watanabe, "Search for potential minimum positions in metal-organic hybrids, $(\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$ and $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$, by using density functional theory," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 551, p. 012054, 2014.
- [53] E. Suprayoga, A. A. Nugroho, D. Onggo, A. O. Polyakov, T. T. M. Palstra and I. Watanabe, "3D long-range magnetic ordering in $(\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$ compound revealed by internal magnetic field from muon spin rotation and first principal calculation," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 545, p. 76-79, 2018.
- [54] A. A. Nugroho, Z. Hu, C. Y. Kuo, M. W. Haverkort, T. W. Pi, D. Onggo, M. Valldor and L. H. Tjeng, "Cross-type orbital ordering in the layered hybrid organic-inorganic compound $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$," *Physical Review B*, vol. 94, p. 184404, 2016.
- [55] K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, A. A. Nugroho, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo and S. Nakatsuji, "Evidence for magnetic weyl fermions in a correlated metal," *Nature Materials*, vol. 16, pp. 1090-1095, 2017.
- [56] H. Narita, M. Ikhlas, M. Kimata, A. A. Nugroho, S. Nakatsuji and Y. Otani, "Anomalous Nernst effect in a microfabricated thermoelectric

element made of chiral antiferromagnet Mn₃Sn," *Applied Physics Letters*, vol. 111, p. 202404, 2017.

- [57] A. Sakai, Y. P. Mizuta, A. A. Nugroho, R. Sihombing, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, N. Takemori, R. Ishii, D. Nishio-Hamane, R. Arita, P. Goswami and S. Nakatsuji, "Giant anomalous Nernst effect and quantum-critical scaling in a ferromagnetic semimetal," *Nature Physics*, vol. 14, pp. 1119-1124, 2018.
- [58] H. Nakamura, M. Y. P. Akbar, T. Tomita, A. A. Nugroho and S. Nakatsuji, "Crystal structure and magnetic properties of the ferromagnet CoMnSb," *JPS Conf. Proc.*, vol. 29, p. 013004, 2020.
- [59] K. Jenni, S. Kunkemöller, D. Brüning, T. Lorenz, Y. Sidis, A. Schneidewind, A. A. Nugroho, A. Rosch, D. I. Khomskii and M. Braden, "Interplay of Electronic and Spin Degrees in Ferromagnetic SrRuO₃: Anomalous Softening of the Magnon Gap and Stiffness," *Physical Review Letters*, vol. 123, p. 017202, 2019.

CURRICULUM VITAE



Nama : **AGUSTINUS AGUNG NUGROHO
SULISTYO HUTOMO**

Tmpt./tgl lahir : Solo, 31 Juli 1969

Kel. Keahlian : Fisika Magnetik dan Fotonik

Alamat Kantor : Gedung Fisika ITB

Jl. Ganesha 10, Bandung

Nama Istri : Veronica Dhian Rusnasari

Nama Anak : 1. Gregorius Ariyo Kresnadhi
2. Chatarina Astri Adhiani

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (Ph.D.), bidang fisika eksperimen, Van der Waals- Zeeman Institute, University of Amsterdam, Belanda, 2001
- Diploma Programme, bidang teori materi termampatkan, International Center for Theoretical Physics, Trieste, 1995
- Sarjana Fisika (Drs.), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1993.

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Prodi Fisika, FMIPA ITB, 1994-sekarang
- Editor Jurnal ITB, 2010-sekarang
- Ketua kelompok kelimuan Fisika Magnetik dan Fotonik, FMIPA ITB, 2013-2018

- Anggota Senat akademik FMIPA ITB, 2013-sekarang
- Ketua kelompok keilmuan Fisika Magnetik dan Fotonik, FMIPA ITB, 2021-sekarang.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- Penata Muda, III/a, 01-03-1994
- Penata, III/c, 01-10-2005
- Penata TK 1, III/d, 01-04-2008
- Pembina, IV/a, 01-04-2010.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Asisten Ahli Madya, 16-11-1996
- Asisten Ahli, 16-11-2001
- Lektor, 01-03-2003
- Lektor Kepala, 01-06-2009
- Profesor/Guru Besar, 01-09-2020

V. RIWAYAT DALAM ORGANISASI PROFESI

- Ketua Indonesian Magnetic Society (2020-2022)
- American Physical Society (2005-sekarang)

VI. KEGIATAN PENELITIAN

- KNAW Postdoc, 2005-2007

- Studi Peran Derajat Kebebasan Spin Elektron dalam Peningkatan Kinerja Bahan Termoelektrik untuk Aplikasi Sumber Energi Akrab Lingkungan (2007)
- Studi Peran Derajat Kebebasan Spin Elektron dalam Peningkatan Kinerja Bahan Termoelektrik untuk Aplikasi Sumber Energi Akrab Lingkungan (2008)
- Pengkajian Bahan Oksida Magnetik untuk Pembangkitan Energi Listrik Berdasarkan Efek Thermoelektrik (2009)
- Study of Spin Dynamics in Multiferroic Cu-hybrid (2011)
- Studi Interaksi Magnetik Jangkauan Panjang dalam Senyawa Magnetik Hibrida berdasarkan Pengukuran Dinamika Spin (2012)
- Kajian vibrasi kisi dalam transisi fase logam isolator senyawa manganite berlapis $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$ (2013)
- Study of Magnetic Properties of Organic-Inorganic Hybrids and Its Potential Applications (2014-2016)
- Studi Peningkatan Kinerja Pembawa Muatan Listrik dalam Material Magnet Organik Menggunakan Spektroskopi Raman (2016)
- Study of Enhancing Power Factor of Bi_2Te_3 Theroelectric using Nanoparticle (2019)
- Studi interaksi antara spin muon dan elektron dalam material magnetik-topologi berdasarkan metoda DFT (2019-2021)

- Peningkatan kinerja material magnetik-topologi sebagai pembangkit energi listrik (2019-2021)
- Studi dinamika spin muon untuk menentukan sifat topologi dari material magnetik (2019)
- Kajian sifat magnetoelektrik melalui pengaturan tegangan listrik pada material oksida magnetik (2021).

VII. PUBLIKASI

- A. R. Nugraha, N. L. Kartika, Dedi and **A. A. Nugroho**, "Thermoelectric properties of SnO₂/Bi₂Te₃ composite," *Materials Science Forum*, vol. 1028 MSF, pp. 99-104, 2021.
- Y. Rafitasari, A. Septiani, A. R. Nugraha, E. N. Arrasyid, Dedi and **A. A. Nugroho**, "Synthesis of bismuth ferrite and its application for oscillator material up to 25 ghz range," *Materials Science Forum*, vol. 1028 MSF, pp. 9-14, 2021.
- M. A. Carpenter, D. Pesquera, D. O'Flynn, G. Balakrishnan, N. Mufti, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra, M. Mihalik, M. Mihalik, M. Zentková, A. Almeida, J. A. Moreira, R. Vilarinho and D. Meier, "Strain relaxation dynamics of multiferroic orthorhombic manganites," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 33, p. 125402, 2021.
- M. Y. P. Akbar, A. Insani, B. Prijamboedi and **A. A. Nugroho**, "Evidence for local structural distortion and mixed states of fe in β -nafeo₂: A bond valence sum analysis," *Materials Science Forum*, vol.

1028 MSF, pp. 21-25, 2021.

- F. H. Murdaka, E. Suprayoga, A. M. Pradipto, K. Nakamura and **A. A. Nugroho**, "Density functional theory approach for muon sites estimation in Mn₃Sn," *Materials Science Forum*, vol. 1028 MSF, pp. 199-203, 2021.
- A. Prasetyo, B. Mihailova, V. Suendo, **A. A. Nugroho** and Ismunandar, "The effect of the A-Site cation on the structural transformations in ABi₄Ti₄O₁₅ (A= Ba, Sr): Raman scattering studies," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 283, p. 121131, 2020.
- Nurhayati, V. Suendo, **A. A. Nugroho** and A. Alni, "Temperature-dependent photoluminescence of H₂TPP and ZnTPP thin films on Si substrates," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 858, p. 012036, 2020.
- M. Y. P. Akbar, R. Ishii and **A. A. Nugroho**, "Stability of high-spin state of iron in β -nafeo₂," *Key Engineering Materials*, vol. 855 KEM, pp. 177-182, 2020.
- Nurhayati, V. Suendo, A. Alni, **A. A. Nugroho**, Y. Majima, S. Lee, Y. P. Nugraha and H. Uekusa, "Revealing the Real Size of a Porphyrin Molecule with Quantum Confinement Probing via Temperature-Dependent Photoluminescence Spectroscopy," *Journal of Physical Chemistry A*, vol. 124, pp. 2672-2682, 2020.
- Z. Zhang, K. Amelin, X. Wang, H. Zou, J. Yang, U. Nagel, Roö&tild, T. m, T. Dey, **A. A. Nugroho**, T. Lorenz, J. Wu and Z. Wang,

- "Observation of E8 particles in an Ising chain antiferromagnet," *Physical Review B*, vol. 101, p. 220411, 2020.
- M. Porer, L. Rettig, E. M. Bothschafter, V. Esposito, R. B. Versteeg, P. H. M. Van Loosdrecht, M. Savoini, J. Rittmann, M. Kubli, G. Lantz, O. J. Schumann, **A. A. Nugroho**, M. Braden, G. Ingold, S. L. Johnson, P. Beaud and U. Staub, "Correlations between electronic order and structural distortions and their ultrafast dynamics in the single-layer manganite $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$," *Physical Review B*, vol. 101, p. 075119, 2020.
 - F. H. Murdaka, A. M. Pradipto, K. Nakamura and **A. A. Nugroho**, "Benchmarking full-potential linearized augmented plane wave (Flapw) method for determination of muon stopping sites in lif," *Key Engineering Materials*, vol. 855 KEM, pp. 248-252, 2020.
 - V. F. Gustiani, L. Septiany, **A. A. Nugroho** and G. R. Blake, "Thermoelectric Performance of $\text{Ge}_{0.99-x}\text{Na}_{0.01}\text{Ag}_x\text{Se}$," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1245, p. 012094, 2019.
 - F. H. Murdaka, **A. A. Nugroho**, A. Kusumaatmaja, Isnaeni and I. Santoso, "The study on tuning photoluminescence of colloidal graphene quantum dots synthesized through laser ablation," *Materials Science Forum*, vol. 966 MSF, pp. 3-7, 2019.
 - H.-H. Yang, C.-C. Lee, Y. Yoshida, M. Ikhlas, T. Tomita, **A. Nugroho**, T. Ozaki, S. Nakatsuji and Y. Hasegawa, "Scanning tunneling microscopy on cleaved $\text{Mn}_3\text{Sn}(0001)$ surface," *Scientific*

Reports, vol. 9, p. 9677, 2019.

- M. A. Saleh, **A. A. Nugroho**, K. K. Dewi, A. R. Supandi, D. Onggo, H. Kuhn and P. H. M. Van Loosdrecht, "Optical absorption spectra of Mn^{2+} in of $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{-MnCl}_4$ and $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_2)_2\text{-MnCl}_4$ Hybrid Compounds," *Key Engineering Materials*, vol. 811 KEM, pp. 179-183, 2019.
- K. Jenni, S. Kunkemöller, D. Brüning, T. Lorenz, Y. Sidis, A. Schneidewind, **A. A. Nugroho**, A. Rosch, D. I. Khomskii and M. Braden, "Interplay of Electronic and Spin Degrees in Ferromagnetic SrRuO_3 : Anomalous Softening of the Magnon Gap and Stiffness," *Physical Review Letters*, vol. 123, p. 017202, 2019.
- D. Lu, G. Xu, Z. Hu, Z. Cui, X. Wang, J. Li, L. Huang, X. Du, Y. Wang, J. Ma, X. Lu, H.-J. Lin, C.-T. Chen, **A. A. Nugroho**, L. H. Tjeng and G. Cui, "Deciphering the Interface of a High-Voltage (5 V-Class) Li-Ion Battery Containing Additive-Assisted Sulfolane-Based Electrolyte," *Small Methods*, vol. 3, p. 1900546, 2019.
- M. Y. P. Akbar, R. R. Sihombing, A. Sakai, **A. A. Nugroho** and S. Nakatsuji, "Crystal structure and magnetic properties of non-stoichiometric Co_2MnGa heusler alloy," *Materials Science Forum*, vol. 966 MSF, pp. 319-324, 2019.
- A. Sakai, Y. P. Mizuta, **A. A. Nugroho**, R. Sihombing, T. Koretsune, M.-T. Suzuki, N. Takemori, R. Ishii, D. Nishio-Hamane, R. Arita, P. Goswami and S. Nakatsuji, "Giant anomalous Nernst effect and

quantum-critical scaling in a ferromagnetic semimetal," *Nature Physics*, vol. 14, pp. 1119-1124, 2018.

- I. M. Sutjahja, F. Berthalita, **A. A. Nugroho** and M. O. Tjia, "different dopant related to magnetic order and local structural changes in SrYCoO₃ based compound," *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*, vol. 80, pp. 135-148, 2018.
- F. Fauzi, H. Suhendar, A. Kusumaatmaja, F. Nugroho, K. Triyana, **A. A. Nugroho** and I. Santoso, "A simple method to examine room-temperature corrosion of graphene-coated copper foil after stored for 2.5 years," *Materials Research Express*, vol. 5, p. 105016, 2018.
- E. Suprayoga, **A. A. Nugroho**, D. Onggo, A. O. Polyakov, T. T. M. Palstra and I. Watanabe, "3D long-range magnetic ordering in (C₂H₅NH₃)₂CuCl₄ compound revealed by internal magnetic field from muon spin rotation and first principal calculation," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 545, pp. 76-79, 2018.
- Fitrilawati, M. B. Perkasa, N. Syakir, A. Aprilia, L. Safriani, T. Saragi, Risdiana, S. Hidayat, A. Bahtiar, R. Siregar, R. R. Sihombing and **A. Nugroho**, "Thermal Reduction Study of Graphene Oxide Paper," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 196, p. 012027, 2017.
- K. D. Jatmoko, A. Prasetyo, V. Suendo, S. Nakatsuji and **A. A. Nugroho**, "Temperature Dependent Raman Studies of Pr₂Zr₂O₇

Single Crystal," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 196, p. 012051, 2017.

- A. Prasetyo, B. Mihailova, V. Suendo, **A. A. Nugroho**, Zulhadjri and Ismunandar, "Structural transformations in Pb_{1-x}Bi_{4+x}Ti_{4-x}Mn_xO₁₅ (x = 0.2 and 0.4): a Raman scattering study," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 48, pp. 292-297, 2017.
- A. Prasetyo, B. Mihailova, V. Suendo, **A. A. Nugroho**, Zulhadjri and Ismunandar, "Raman scattering study of the effect of A- and B-site substitution on the room-temperature structure of ABi₄Ti₄O₁₅," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 196, p. 012041, 2017.
- S. Kunkemöller, D. Brüning, A. Stunault, **A. A. Nugroho**, T. Lorenz and M. Braden, "Magnetic shape-memory effect in SrRuO₃," *Physical Review B*, vol. 96, p. 220406, 2017.
- K. Kuroda, T. Tomita, M.-T. Suzuki, C. Bareille, **A. A. Nugroho**, P. Goswami, M. Ochi, M. Ikhlas, M. Nakayama, S. Akebi, R. Noguchi, R. Ishii, N. Inami, K. Ono, H. Kumigashira, A. Varykhalov, T. Muro, T. Koretsune, R. Arita, S. Shin, T. Kondo and S. Nakatsuji, "Evidence for magnetic weyl fermions in a correlated metal," *Nature Materials*, vol. 16, pp. 1090-1095, 2017.
- A. K. Efimenko, N. Hollmann, K. Hofer, J. Weinen, D. Takegami, K. K. Wolff, S. G. Altendorf, Z. Hu, A. D. Rata, A. C. Komarek, **A. A. Nugroho**, Y. F. Liao, K.-D. Tsuei, H. H. Hsieh, H.-J. Lin, C. T. Chen,

- L. H. Tjeng and D. Kasinathan, "Electronic signature of the vacancy ordering in NbO(Nb₃O₃)," *Physical Review B*, vol. 96, p. 195112, 2017.
- H. Narita, M. Ikhlas, M. Kimata, **A. A. Nugroho**, S. Nakatsuji and Y. Otani, "Anomalous Nernst effect in a microfabricated thermoelectric element made of chiral antiferromagnet Mn₃Sn," *Applied Physics Letters*, vol. 111, p. 202404, 2017.
 - B. Roberge, M. Balli, S. Jandl, P. Fournier, T. T. M. Palstra and **A. A. Nugroho**, "Raman and infrared study of 4f electron-phonon coupling in HoVO₃," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 28, p. 435401, 2016.
 - S. Kunkemöller, F. Sauer, **A. A. Nugroho** and M. Braden, "Magnetic anisotropy of large floating-zone-grown single-crystals of SrRuO₃," *Crystal Research and Technology*, vol. 51, pp. 299-305, 2016.
 - T. Higo, N. Kiyohara, K. Iritani, **A. A. Nugroho**, T. Tomita and S. Nakatsuji, "Magnetic and Transport Properties of Frustrated γ -MnPd alloys," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 683, p. 012026, 2016.
 - **A. A. Nugroho**, Z. Hu, C. Y. Kuo, M. W. Haverkort, T. W. Pi, D. Onggo, M. Valldor and L. H. Tjeng, "Cross-type orbital ordering in the layered hybrid organic-inorganic compound (C₆H₅CH₂CH₂NH₃)₂CuCl₄," *Physical Review B*, vol. 94, p. 184404, 2016.

- B. Roberge, S. Jandl, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra, L. D. Tung and G. Balakrishnan, "Study of phase coexistence in YVO₃ and LaVO₃," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 46, pp. 1157-1160, 2015.
- A. Bahtiar, L. Safriani, A. Aprilia, Risdiana, Harsojo, Triwikantoro, Darminto, **A. A. Nugroho**, H. Guo, I. Kawasaki and I. Watanabe, "Study of charge carrier dynamics of P3HT:PCBM blend for active material solar cell using MUON spin relaxation," *Materials Science Forum*, vol. 827, pp. 168-173, 2015.
- H. Setiadi, A. Prasetyo, V. Suendo and **A. A. Nugroho**, "Phonon properties of Co:TiO₂ single crystal," *Materials Science Forum*, vol. 827, pp. 360-365, 2015.
- M. Balli, B. Roberge, S. Jandl, P. Fournier, T. T. M. Palstra and **A. A. Nugroho**, "Observation of large refrigerant capacity in the HoVO₃ vanadate single crystal," *Journal of Applied Physics*, vol. 118, p. 073903, 2015.
- S. Kunkemöller, D. Khomskii, P. Steffens, A. Piovano, **A. A. Nugroho** and M. Braden, "Highly Anisotropic Magnon Dispersion in Ca₂RuO₄: Evidence for Strong Spin Orbit Coupling," *Physical Review Letters*, vol. 115, p. 247201, 2015.
- A. Prasetyo, B. Mihailova, V. Suendo, **A. A. Nugroho** and Ismunandar, "Further insights into the structural transformations in PbBi₄Ti₄O₁₅ revealed by Raman spectroscopy," *Journal of Applied Physics*, vol. 117, p. 064102, 2015.

- I. M. Sutjahja, F. Berthalita, M. Mustaqima, **A. A. Nugroho** and M. O. Tjia, "Effects of partial Co replacement by Fe in $\text{Sr}_{0.775}\text{Y}_{0.225}\text{CoO}_{3-\delta}$ on its magnetic property, oxygen deficiency and crystal structure," *Materials Science- Poland*, vol. 33, pp. 579-587, 2015.
- U. Adem, N. Mufti, **A. A. Nugroho**, G. Catalan, B. Noheda and T. T. M. Palstra, "Dielectric relaxation in YMnO_3 single crystals," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 638, pp. 228-232, 2015.
- I. P. Handayani, **A. A. Nugroho**, S. Riyadi, G. R. Blake, N. Mufti, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Correlation between lattice vibrations with charge, orbital, and spin ordering in the layered manganite $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 92, p. 205101, 2015.
- B. Klobes, M. Herlitschke, K. Z. Rushchanskii, H.-C. Wille, T. T. A. Lummen, P. H. M. Van Loosdrecht, **A. A. Nugroho** and R. P. Hermann, "Anisotropic lattice dynamics and intermediate-phase magnetism in delafossite CuFeO_2 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 92, p. 014304, 2015.
- F. Martak, D. Onggo, Ismunandar and **A. Nugroho**, "Synthesis and characterization of $[\text{Fe}(\text{picolinate})_3][\text{MnNi}(\text{oxalate})_3] \cdot \text{CH}_3\text{OH}$ polymeric complex," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 14, pp. 311-314, 2014.
- S. Kunkemöller, **A. A. Nugroho**, Y. Sidis and M. Braden, "Spin-

density-wave ordering in $\text{Ca}_{0.5}\text{Sr}_{1.5}\text{RuO}_4$ studied by neutron scattering," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 89, p. 045119, 2014.

- N. Hollmann, S. Agrestini, Z. Hu, Z. He, M. Schmidt, C.-Y. Kuo, M. Rotter, **A. A. Nugroho**, V. Sessi, A. Tanaka, N. B. Brookes and L. H. Tjeng, "Spectroscopic evidence for exceptionally high orbital moment induced by local distortions in $\text{a-CoV}_2\text{O}_6$," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 89, p. 201101, 2014.
- E. Suprayoga, **A. A. Nugroho**, A. O. Polyakov, T. T. M. Palstra and I. Watanabe, "Search for potential minimum positions in metal-organic hybrids, $(\text{C}_2\text{H}_5\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$ and $(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{CuCl}_4$, by using density functional theory," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 551, p. 012054, 2014.
- M. A. Majidi, E. Thoeng, P. K. Gogoi, F. Wendt, S. H. Wang, I. Santoso, T. C. Asmara, I. P. Handayani, P. H. M. Van Loosdrecht, **A. A. Nugroho**, M. Rübhausen and A. Rusydi, "Temperature-dependent and anisotropic optical response of layered $\text{Pr}_{0.5}\text{Ca}_{1.5}\text{MnO}_4$ probed by spectroscopic ellipsometry," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 87, p. 235135, 2013.
- K. Kimura, S. Nakatsuji and **A. A. Nugroho**, "Single-crystal study on the low-temperature magnetism of the pyrochlore magnet

Pr₂Zr₂O₇," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 63, pp. 719-721, 2013.

- I. P. Handayani, N. Mufti, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Photo-induced modulation of ferroelectric polarization in multiferroic TbMnO₃," 2013 *International Conference of Information and Communication Technology*, ICoICT2013, pp. 350-353, 2013.
- E. Benckiser, L. Fels, G. Ghiringhelli, M. Moretti Sala, T. Schmitt, J. Schlappa, V. N. Strocov, N. Mufti, G. R. Blake, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra, M. W. Haverkort, K. Wohlfeld and M. Grüninger, "Orbital superexchange and crystal field simultaneously at play in YVO₃: Resonant inelastic x-ray scattering at the v L edge and the O K edge," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 88, p. 205115, 2013.
- V. Capogrosso, M. Malvestuto, I. P. Handayani, P. H. M. Van Loosdrecht, **A. A. Nugroho**, E. Magnano and F. Parmigiani, "Effects of charge-orbital order-disorder phenomena on the unoccupied electronic states in the single-layered half-doped Pr_{0.5}Ca_{1.5}MnO₄," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 87, p. 155118, 2013.
- I. P. Handayani, R. I. Tobey, J. Janusonis, D. A. Mazurenko, N. Mufti, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Dynamics of photo-excited electrons in magnetically

ordered TbMnO₃," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 25, p. 116007, 2013.

- Risdiana, B. Adiperdana, L. Safriani, A. Bahtiar, Fitrilawati, R. E. Siregar, R. Hidayat, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia and I. Watanabe, "μR Study of Charge Carrier Diffusion in Regioregular Poly(3-Butylthiophene-2,5-Diyl)," *Physics Procedia*, vol. 30, pp. 97-100, 2012.
- F. Novelli, D. Fausti, J. Reul, F. Cilento, P. H. M. Van Loosdrecht, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra, M. Grüninger and F. Parmigiani, "Ultrafast optical spectroscopy of the lowest energy excitations in the Mott insulator compound YVO₃: Evidence for Hubbard-type excitons," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 86, p. 165135, 2012.
- S. Nakatsuji, K. Kuga, K. Kimura, R. Satake, N. Katayama, E. Nishibori, H. Sawa, R. Ishii, M. Hagiwara, F. Bridges, T. U. Ito, W. Higemoto, Y. Karaki, M. Halim, **A. A. Nugroho**, J. A. Rodriguez-Rivera, M. A. Green and C. Broholm, "Spin-orbital short-range order on a honeycomb-based lattice," *Science*, vol. 336, pp. 559-563, 2012.
- J. Reul, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra and M. Grüninger, "Probing orbital fluctuations in RVO₃ (R = Y, Gd, or Ce) by ellipsometry," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 86, p. 125128, 2012.

- B. Roberge, S. Jandl, **A. A. Nugroho** and T. T. M. Palstra, "Micro-Raman study of orbiton-phonon coupling in YbVO₃," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 43, pp. 127-130, 2012.
- I. M. Sutjahja and **A. A. Nugroho**, "Magnetic states of the Co-ions in Ca and Y doped (Bi,Pb)₂Sr₂Co₂O₈ thermoelectric materials," *ITB Journal of Science*, vol. 44 A, pp. 230-238, 2012.
- H. Ulbrich, F. Krüger, **A. A. Nugroho**, D. Lamago, Y. Sidis and M. Braden, "Spin-wave excitations in the ferromagnetic metallic and in the charge-, orbital-, and spin-ordered states in Nd_{1-x}Sr_xMnO₃ with $x \approx 0.5$," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 84, p. 094453, 2011.
- N. Mufti, G. R. Blake, M. Mostovoy, S. Riyadi, **A. A. Nugroho** and T. T. M. Palstra, "Magnetoelectric coupling in MnTiO₃," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 83, p. 104416, 2011.
- Zulhadjri, B. Prijamboedi, **A. A. Nugroho**, N. Mufti and Ismunandar, "Five layers Aurivillius phases Pb_{2-x}Bi_{4+x}Ti_{5-x}Mn_xO₁₈: Synthesis, structure, relaxor ferroelectric and magnetic properties," *ITB Journal of Science*, vol. 43 A, pp. 139-150, 2011.
- Zulhadjri, B. Prijamboedi, **A. A. Nugroho**, N. Mufti, A. Fajar, T. T. M. Palstra and Ismunandar, "Aurivillius phases of PbBi₄Ti₄O₁₅ doped with Mn₃ synthesized by molten salt technique: Structure, dielectric, and magnetic properties," *Journal of Solid State Chemistry*, vol. 184, pp. 1318-1323, 2011.

- N. Mufti, **A. A. Nugroho**, G. R. Blake and T. T. M. Palstra, "Magnetodielectric coupling in frustrated spin systems: The spinels MCr₂O₄ (M = Mn, Co and Ni)," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 22, p. 075902, 2010.
- I. M. Sutjahja, T. Akbar and **A. Nugroho**, "Lanthanide contraction effect in magnetic thermoelectric materials of rare earth-doped Bi_{1.5}Pb_{0.5}Ca₂Co₂O₈," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1325, pp. 71-74, 2010.
- Risdiana, Fitrilawati, R. Hidayat, **A. A. Nugroho**, R. E. Siregar, M. O. Tjia and I. Watanabe, "Intra- and inter-chain polaron diffusion in regio-random polythiophene studied by muon spin relaxation," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 405, pp. S381-S383, 2010.
- S. Jandl, **A. A. Nugroho** and T. T. M. Palstra, "A comparative Raman study between YbVO₃ and YVO₃," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 200, p. 032025, 2010.
- Zulhadjri, B. Prijamboedi, **A. A. Nugroho** and Ismunandar, "Synthesis and structure analysis of aurivillius phases Pb_{1-x}Bi_{4+x}Ti_{4-x}Mn_xO₁₅," *Journal of the Chinese Chemical Society*, vol. 56, pp. 1108-1111, 2009.
- U. Adem, M. Mostovoy, N. Bellido, **A. A. Nugroho**, C. Simon and T. T. M. Palstra, "Scaling behavior of the magnetocapacitance of YbMnO₃," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 21, p. 496002, 2009.

- N. Mufti, G. R. Blake, **A. A. Nugroho** and T. T. M. Palstra, "Magnetic field induced ferroelectric to relaxor crossover in Tb_{1-x}CaxMnO₃," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 21, p. 452203, 2009.
- T. T. A. Lummen, C. Strohm, H. Rakoto, **A. A. Nugroho** and P. H. M. Van Loosdrecht, "High-field recovery of the undistorted triangular lattice in the frustrated metamagnet CuFeO₂," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 80, p. 012406, 2009.
- G. R. Blake, **A. A. Nugroho**, M. J. Gutmann and T. T. M. Palstra, "Competition between Jahn-Teller coupling and orbital fluctuations in HoVO₃," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 79, p. 045101, 2009.
- S. Krohns, P. Lunkenheimer, C. Kant, A. V. Pronin, H. B. Brom, **A. A. Nugroho**, M. Diantoro and A. Loidl, "Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature," *Applied Physics Letters*, vol. 94, p. 122903, 2009.
- **A. A. Nugroho**, Risdiana, N. Mufti, T. T. M. Palstra, I. Watanabe and M. O. Tjia, "Changes of spin dynamics in multiferroic Tb_{1-x}CaxMnO₃," *Physica B: Condensed Matter*, vol. 404, pp. 785-788, 2009.
- N. Mufti, **A. A. Nugroho**, G. R. Blake and T. T. M. Palstra, "Relaxor ferroelectric behavior in Ca-doped TbMnO₃," *Physical Review B -*

Condensed Matter and Materials Physics, vol. 78, p. 024109, 2008.

- D. A. Mazurenko, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra and P. H. M. Van Loosdrecht, "Dynamics of spin and orbital phase transitions in YVO₃," *Physical Review Letters*, vol. 101, p. 245702, 2008.
- E. Benckiser, R. Rückamp, T. Möller, T. Taetz, A. Möller, **A. A. Nugroho**, T. T. M. Palstra, G. S. Uhrig and M. Grüninger, "Collective orbital excitations in orbitally ordered YVO₃ and HoVO₃," *New Journal of Physics*, vol. 10, p. 053027, 2008.
- M. Corti, F. Carbone, M. Filibian, T. Jarlborg, **A. A. Nugroho** and P. Carretta, "Spin dynamics in a weakly itinerant magnet from Si₂₉ NMR in MnSi," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 75, p. 115111, 2007.
- S. Riyadi, Muafif, **A. A. Nugroho**, A. Rusydi and M. O. Tjia, "Mn-dopant-induced effects in Zn_{1-x}MnxO compounds," *Journal of Physics Condensed Matter*, vol. 19, p. 476214, 2007.
- M. Sikora, C. Marquina, M. R. Ibarra, **A. A. Nugroho** and T. T. M. Palstra, "Lattice effects in HoVo₃ single crystal," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 316, pp. e692-e694, 2007.
- U. Adem, **A. A. Nugroho**, A. Meetsma and T. T. M. Palstra, "Ferroelectric displacements in multiferroic Y(Mn,Ga)O₃," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 75, p. 014108, 2007.
- **A. A. Nugroho**, N. Bellido, U. Adem, G. Nénert, C. Simon, M. O.

- Tjia, M. Mostovoy and T. T. M. Palstra, "Enhancing the magnetoelectric coupling in YMnO₃ by Ga doping," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 75, p. 174435, 2007.
- D. Fausti, **A. A. Nugroho**, P. H. M. Van Loosdrecht, S. A. Klimin, M. N. Popova and L. N. Bezmaternykh, "Raman scattering from phonons and magnons in RFe₃(BO₃)₄," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 74, p. 024403, 2006.
 - F. Carbone, M. Zangrando, A. Brinkman, A. Nicolaou, F. Bondino, E. Magnano, **A. A. Nugroho**, F. Parmigiani, T. Jarlborg and D. Van Der Marel, "Electronic structure of MnSi: The role of electron-electron interactions," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 73, p. 085114, 2006.
 - C. Marquina, M. Sikora, M. R. Ibarra, **A. A. Nugroho** and T. T. M. Palstra, "Lattice effects in YVO₃ single crystal," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vols. 290-291 PART 1, pp. 428-430, 2005.
 - I. M. Sutjahja, M. Diantoro, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Vortex dynamics across the second-peak field in SmLa_{0.8}Sr_{0.2}CuO_{4-d}," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vols. 412-414, pp. 490-496, 2004.
 - A. A. Tsvetkov, F. P. Mena, P. H. M. Van Loosdrecht, D. Van der Marel, Y. Ren, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky, I. S. Elfimov and G.

- A. Sawatzky, "Structural, electronic, and magneto-optical properties of YVO₃," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 69, 2004.
- O. N. Bakharev, I. M. Abu-Shiekh, H. B. Brom, **A. A. Nugroho**, I. P. McCulloch and J. Zaanen, "NMR evidence for a two-step phase separation in Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_{4-d}," *Physical Review Letters*, vol. 93, pp. 037002-1-037002-4, 2004.
 - Y. Ren, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky, J. Stremper, U. Rütt, F. Iga, T. Takabatake and C. W. Kimball, "Orbital-ordering-induced phase transition in LaVO₃ and CeVO₃," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 67, pp. 141071-141076, 2003.
 - O. Tjernberg, L. H. Tjeng, P. G. Steeneken, G. Ghiringhelli, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky and N. B. Brookes, "Electrons, holes, and spin in Nd_{2-x}Ce_xCuO_{4-δ}," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 67, pp. 1005011-1005014, 2003.
 - I. M. Sutjahja, J. Aarts, **A. A. Nugroho**, M. Diantoro, M. O. Tjia, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Doping and field effects on the lowest Kramers doublet splitting in La_{1.6-x}Nd_{0.4}Sr_xCuO_{4-d} single crystal," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vols. 392-396, pp. 207-212, 2003.
 - P. G. Steeneken, L. H. Tjeng, G. A. Sawatzky, A. Tanaka, O. Tjernberg, G. Ghiringhelli, N. B. Brookes, **A. A. Nugroho** and A. A.

Menovsky, "Crossing the gap from p- to n-type doping: Nature of the states near the chemical potential in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ and $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ -d," *Physical Review Letters*, vol. 90, pp. 247005/1-247005/4, 2003.

- I. M. Sutjahja, D. Darminto, R. Sutarto, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Thermodynamic fluctuations in T^* -phase $\text{SmLa}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$ -d single crystal," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 369, pp. 291-294, 2002.
- D. Darminto, I. M. Sutjahja, **A. A. Nugroho**, A. Rusydi, A. A. Menovsky and M. O. Tjia, "Suppression of 2D fluctuation effect in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ single crystal with excessive-oxygen content," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 369, pp. 286-290, 2002.
- A. A. Tsvetkov, F. P. Mena, Y. Ren, I. S. Elfimov, P. H. M. Van Loosdrecht, D. Van Der Marel, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky and G. A. Sawatzky, "Optical and magneto-optical study of orbital and spin ordering transitions in YVO_3 ," *Physica B: Condensed Matter*, Vols. 312-313, pp. 783-784, 2002.
- G. R. Blake, T. T. M. Palstra, Y. Ren, **A. A. Nugroho** and A. A. Menovsky, "Neutron diffraction, x-ray diffraction, and specific heat studies of orbital ordering in YVO_3 ," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 65, pp. 1741121-1741129, 2002.

- I. M. Sutjahja, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Intrinsic parameters of a T^* -phase $\text{SmLa}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$ - δ single crystal and the fluctuation effects deduced from magnetization data," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 65, pp. 2145281-2145287, 2002.
- I. M. Sutjahja, M. Diantoro, D. Darminto, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Fishtail effect and the superconducting phase diagram of $\text{La}_{1.6-x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ single crystal," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vols. 378-381, pp. 541-545, 2002.
- D. Darminto, M. Diantoro, I. M. Sutjahja, **A. A. Nugroho**, W. Loeksmanto and M. O. Tjia, "Different roles of anisotropy and disorder on the vortex matter of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystal," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vols. 378-381, pp. 479-482, 2002.
- D. Darminto, M. O. Tjia, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky, J. Shimoyama and K. Kishio, "Variation of vortex-glass dynamics and critical region with oxygen content in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ single crystal," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vols. 357-360, pp. 617-620, 2001.
- G. R. Blake, T. T. M. Palstra, Y. Ren, **A. A. Nugroho** and A. A. Menovsky, "Transition between orbital orderings in YVO_3 ," *Physical Review Letters*, vol. 87, pp. 245501-1-245501-4, 2001.

- I. M. Sutjahja, **A. A. Nugroho**, M. Diantoro, M. O. Tjia, H. Gelders, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Single crystal growth of T*-phase $\text{SmLa}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 363, pp. 25-30, 2001.
- I. Loa, M. Diviš, V. Nekvasil, S. Jandl, K. Syassen, **A. A. Nugroho** and A. A. Menovsky, "Raman study of crystal-field excitations in Nd_2CuO_4 under pressure," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 64, pp. 2141061-2141066, 2001.
- I. M. Sutjahja, **A. A. Nugroho**, M. O. Tjia, A. A. Menovsky and J. J. M. Franse, "Peak effects and the solid vortex phase of a T*-phase $\text{SmLa}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{CuO}_4$ -d single crystal," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 64, pp. 1345021-1345027, 2001.
- **A. A. Nugroho**, V. Nekvasil, I. Veltruský, S. Jandl, P. Richard, A. A. Menovsky, F. R. De Boer and J. J. M. Franse, "Anisotropy of the neodymium-copper exchange interaction in Nd_2CuO_4 ," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vols. 226-230, pp. 973-975, 2001.
- V. Nekvasil, S. Jandl, M. Cardona, M. Diviš and **A. A. Nugroho**, "4f-levels in rare earth cuprates: Crystal field and exchange interaction," *Journal of Alloys and Compounds*, Vols. 323-324, pp. 549-553, 2001.
- H. B. Brom, I. M. Abu-Sieka, O. Bakharev, O. O. Bernal, P. H. Kes, Ming-Li, E. G. Nikolaev, G. B. Teitelbaum, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky and J. Zaanen, "Stripe and spin dynamics in hole doped

La_2NiO_4 , La_2CuO_4 , $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ and electron doped $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$ seen by nuclear resonance," *International Journal of Modern Physics B*, vol. 14, pp. 3368-3373, 2000.

- **A. A. Nugroho**, I. M. Sutjahja, M. O. Tjia, A. A. Menovsky, F. R. De Boer and J. J. M. Franse, "Magnetic relaxation of $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ single crystal," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 332, pp. 374-377, 2000.
- Y. Ren, T. T. M. Palstra, D. I. Khomskii, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky and G. A. Sawatzky, "Magnetic properties of YVO_3 single crystals," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 62, pp. 6577-6586, 2000.
- **A. A. Nugroho**, I. M. Sutjahja, M. O. Tjia, A. A. Menovsky, F. R. De Boer and J. J. M. Franse, "Vortex state in a $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ single crystal," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 60, pp. 15379-15383, 1999.
- **A. A. Nugroho**, I. M. Sutjahja, A. Rusydi, M. O. Tjia, A. A. Menovsky, F. R. De Boer and J. J. M. Franse, "Reversible magnetization of a $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$ single crystal," *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 60, pp. 15384-15387, 1999.
- T. D. Cuong, A. Syshchenko, L. Havela, V. Sechovský and **A. A. Nugroho**, "Co magnetism and related effects in $\text{Ho}(\text{Co}_{1-x}\text{Six})_2$," *Acta Physica Slovaca*, vol. 49, pp. 457-460, 1999.

- Y. Ren, T. T. M. Palstra, D. I. Khomskii, E. Pellegrin, **A. A. Nugroho**, A. A. Menovsky and G. A. Sawatzky, "Temperature-induced magnetization reversal in a YVO₃ single crystal," *Nature*, vol. 396, pp. 441-444, 1998.

VIII. PENGHARGAAN

- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 10 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 20 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 25 Tahun

IX. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen, 2010. Kementerian Pendidikan Nasional

