



**SEMINAR DAN RAPAT TAHUNAN BIDANG ILMU MIPA  
BADAN KERJASAMA PTN WILAYAH BARAT  
(SEMIRATA BKS-PTN B) TAHUN 2009  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SYIAH KUALA**

BANDA ACEH, 4 – 5 MEI 2009



BKS PTN BARAT  
Bidang Ilmu MIPA

---

**SURAT KETERANGAN**

No: 251/ SEMIRATA-22.K/1/2009

Panitia Seminar dan Rapat Tahunan Badan Kerjasama Perguruan Tinggi Negeri Wilayah Barat (SEMIRATA BKS PTN-B) Bidang Ilmu MIPA Tahun 2009, di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Syiah Kuala menerangkan:

Nama : Malahayati  
Instansi : Universitas Syiah Kuala  
Judul : Kajian Simetri Kristal Pada Bahan Magnetoelektrik

Benar yang namanya tersebut di atas telah mempresentasikan makalahnya pada acara Seminar dan Rapat Tahunan BKS PTN-B Bidang Ilmu MIPA Tahun 2009.

Demikian surat keterangan ini dibuat agar dapat digunakan seperlunya.

Ketua Panitia,

Dr. Syahrudin Nur Madjid, M.Si  
NIP. 132 090 408

---

Note HP Sekretariat (0651-710223)

Sekretariat : FMIPA Unsyiah, Jl. Syech A.Rauf No. 1. Darussalam, Banda Aceh, 23111

Telp./Fax. : (0651) 7551381, Email: semiratamipa2009@unsyiah.ac.id Website: fmipa.usk.ac.id/semiratamipa2009

<http://www.semiratamipa2009.org>

# KAJIAN SIMETRI KRISTAL PADA BAHAN MAGNETOELEKTRIK

Malahayati<sup>1</sup>



Telah dilakukan telaah teoritis terhadap efek magnetoelektrik pada kristal. Telaah ini dimaksudkan untuk menjelaskan tentang efek magnetoelektrik, yang pernah dianggap sebagai efek yang terlarang pada kristal karena tidak memenuhi simetri kristal. Efek magnetoelektrik ditandai dengan munculnya polarisasi magnetik ketika bahan dikenakan medan listrik atau sebaliknya, polarisasi listrik dapat ditemukan ketika bahan diberikan medan magnet luar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak semua kristal dapat menunjukkan efek magnetoelektrik. Tinjauan simetri kristal menunjukkan efek magnetoelektrik hanya boleh dimiliki oleh kelas kristal magnetic tipe III, dimana elemen simetri R (pembalikan arus) tidak muncul sendiri tetapi muncul dalam kombinasi dengan rotasi atau refleksi. Terdapat 58 subgrup titik magnetik yang membolehkan keberadaan efek magnetoelektrik di dalamnya. Sebagian besar dari kelompok tersebut memiliki benahan antiferromagnet. Meskipun tinjauan simetri membolehkan efek magnetoelektrik dimiliki oleh ke-58 kelas kristal magnetik, tetapi baru sebagian kecil kristal yang dapat dibuktikan secara eksperimen memiliki efek magnetoelektrik.

Kata Kunci: Efek magnetoelektrik.

## ABSTRACT

A study has been conducted literally about the linear magnetoelectric effect on crystal. The aim of this study is to further investigate the magnetoelectric effect that ever been assumed as forbidden effect symmetrically on crystal. On the magnetoelectric effect, external magnetic field induced the electric polarization. From many sources, it has been known that not all crystal posses magnetoelectric effect. Symmetrically, the magnetoelectric effect can be found in type III magnetic crystal class, when the symmetry element R (current reverse symmetry) appear in combination with other symmetry elements such as translation and rotation. There are 58 magnetic point subgroups which enable the existence of magnetoelectric effect in it. Most of them are antiferromagnet. Though all of 58 magnetic crystal class symmetrically should have magnetoelectric effect, but only some of hem show the effect experimentally.

---

<sup>1</sup> Staf pengajar FMIPA Fisika UNSYIAH

## **I. PENDAHULUAN**

Efek magnetoelektrik merupakan penyimpangan dari sifat kristal yang umum (Litvin, 2002). Pada kristal yang umum, magnetisasi muncul karena adanya medan magnet, sebaliknya polarisasi listrik diinduksi oleh medan listrik. Pada kristal yang memiliki efek magnetoelektrik munculnya polarisasi listrik juga disebabkan oleh medan magnet dan munculnya magnetisasi juga dipengaruhi oleh medan listrik.

Efek magnetoelektrik ini sangat menarik untuk diteliti karena tidak semua kristal memiliki efek magnetoelektrik. Efek ini sangat berhubungan erat dengan simetri. Telah ditemukan suatu grup dari senyawa magnetik (terutama antiferromagnet) dimana efek magnetoelektrik linier mematuhi simetri kristal dan telah diobservasi secara eksperimental untuk sistem ferromagnetik aksial.

Penelitian ini akan difokuskan pada sebab-sebab keberadaan efek magnetoelektrik yang tidak dimiliki oleh semua kristal melainkan hanya dimiliki oleh kelas kristal tertentu.

## **II. METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini merupakan telaah teoritis terhadap efek magnetoelektrik pada kristal dengan memadukan teori-teori yang ada. Penelitian dilakukan melalui penelusuran, pemahaman dan pengolahan berbagai bahan pustaka yang mempunyai subyek bahasan yang sama.

Efek magnetoelektrik berhubungan erat dengan simetri kristal, sehingga pembahasan mengenai teori simetri menjadi penting untuk ditampilkan. Penelitian terutama difokuskan pada sifat simetri yang ada pada kristal dengan efek magnetoelektrik linier. Dengan menganggap operator pembalikan arus  $R$  sebagai operator pengganti warna akan ditunjukkan elemen-elemen simetri yang mungkin dimiliki oleh kristal tersebut.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### III.1. Simetri Intrinsik dan Inversi Waktu

Sifat-sifat fisika makroskopik dari suatu material dapat direpresentasikan dalam bentuk tensor-tensor yang terkait melalui kuantitas-kuantitas fisika tertentu. Berbagai upaya dilakukan untuk menyelidiki sifat independensi antar komponen suatu tensor sebagai upaya penyederhanaan. Salah satu upaya tersebut adalah dengan memperhatikan sifat simetri antar komponen tensor atau disebut juga simetri intrinsik (Mulyono, 2003). Kaitan antara simetri suatu kristal dengan simetri intrinsik sifat-sifat makroskopik diberikan oleh prinsip Newmann (Birss, 1963) yang menyatakan: "Elemen-elemen simetri dari sembarang sifat fisika suatu kristal harus memasukkan semua elemen simetri grup titik dari kristal tersebut".

Berdasarkan prinsip Newmann, suatu tensor yang merepresentasikan sembarang sifat fisika harus invarian terhadap setiap operasi simetri yang diberikan oleh kelas kristal terkait. Syarat invariansi ini akan menghasilkan sejumlah komponen tensor yang independen atau tidak independen.

Terkait dengan sifat-sifat simetri intrinsik tensor-tensor terhadap kelas kristal non magnetik, suatu tensor dispesifikasikan sebagai tensor polar dan tensor aksial. Disamping itu tensor juga dapat dibedakan atas simetri-waktu (tensor-i) atau anti simetri-waktu (tensor-c) (Birss, 1963). Suatu tensor disebut simetri-waktu bila tensor tersebut tidak berubah atau invarian terhadap operasi inversi waktu dan suatu tensor disebut antisimetri-waktu jika tensor tersebut berubah atau anti-varian terhadap operasi inversi waktu. Kedua tensor tersebut penting untuk diketahui bila ingin menyelidiki sifat simetri intrinsik suatu tensor terhadap operasi grup titik magnetik yang melibatkan operasi inversi waktu. Hal ini disebabkan karena hakikat dari operasi inversi waktu dalam material magnetik hanyalah operasi pembalikan arah momen magnetik di tiap titik dalam ruang, tetapi tidak beroperasi terhadap koordinat-koordinat ruang.

Spesifikasi suatu tensor termasuk tensor-i atau tensor-c diawali dengan memperkenalkan model arus kanjang (persistent current) dari suatu spin elektron individual. Spin elektron bisa berubah dari spin-up ( $\uparrow$ ) menjadi spin-down ( $\downarrow$ )

atau sebaliknya tanpa harus menjalani perubahan jenis muatan listrik elektron (Mulyono,2003). Artinya, jenis muatan listrik elektron invarian terhadap perubahan arah spin (momen dipol magnet) elektron. Di sisi lain, pembalikan arah spin elektron menyiratkan pembalikan arus listrik. Berangkat dari definisi kuat arus listrik  $i = \frac{dq}{dt}$  didapatkan  $-i = \frac{dq}{t(-t)}$ . Karena itu, kuat arus listrik  $i$  tampak sebagai tensor peringkat 0 yang anti-invarian terhadap proses inversi waktu. Sedangkan muatan listrik  $q$  tampak sebagai tensor peringkat 0 yang invarian terhadap proses inversi waktu. Sehingga kuat arus  $i$  disebut tensor-c peringkat 0 dan muatan listrik  $q$  disebut tensor-i peringkat 0. Selanjutnya rapat muatan  $\rho$  diketahui sebagai tensor-i peringkat nol dan rapat arus  $\vec{j}$  adalah tensor-c peringkat-1.

### III.2. Simetri Magnetik pada Kristal

Tinjauan terhadap sifat listrik dan magnetik pada suatu kristal, memberikan perbedaan yang mencolok antara sifat listrik dan sifat magnetik pada kristal, yang merupakan hasil dari perbedaan kelakuan muatan dan arus terhadap pembalikan waktu.

Didefinisikan fungsi  $\rho(x, y, z)$  dan  $\vec{j}(x, y, z)$  berturut-turut sebagai rapat muatan mikroskopik dan rapat arus pada suatu titik dalam kristal, yang merupakan fungsi-fungsi yang menentukan struktur kristal listrik dan magnetik. Ketika  $t$  diganti dengan  $-t$ ,  $\vec{j}$  berubah tanda, jika keadaan benda tetap tidak berubah, maka  $\vec{j} = -\vec{j}$  yaitu  $\vec{j} = 0$ . Sehingga terdapat alasan mengapa terdapat material yang rapat arusnya identik dengan nol. Pada kebanyakan material, tidak hanya rapat arus yang identik dengan nol, tetapi medan magnetik rata-rata (terhadap waktu) dan momen magnetik juga dapat diabaikan (tanpa medan magnet luar). Material seperti ini dikatakan tidak memiliki struktur magnetik, dan kebanyakan material di alam termasuk kategori ini.

Di sisi lain, rapat muatan  $\rho(x, y, z)$ , tidak berubah ketika  $t$  berubah menjadi  $-t$ . Karenanya, tidak ada alasan fungsi ini identik dengan nol, sehingga

dengan kata lain tidak ada kristal yang tidak memiliki struktur listrik dan disinilah letak perbedaan yang esensial antara sifat listrik dan magnetik kristal.

Selanjutnya didefinisikan suatu elemen simetri yang dihasilkan dari pembalikan arus yang dikenal juga sebagai elemen simetri inversi waktu yang telah disebutkan terdahulu. Transformasi ini dinyatakan sebagai  $R$ . Jika rapat arus memiliki simetri  $R$ , maka  $\vec{j} = -\vec{j}$  yaitu  $\vec{j} = 0$  dan benda tidak memiliki struktur magnetik. Simetri magnetik dikelompokkan dalam grup yang terdiri dari rotasi, refleksi dan kombinasinya dengan  $R$ , yang disebut kelas kristal magnetik. Mereka dihubungkan dengan grup ruang magnetik dengan cara yang sama seperti kelas kristal biasa dengan grup ruang biasa. Pertama-tama mencakup 32 kelas kristal biasa, dan kemudian ditambah dengan kombinasinya dengan elemen  $R$ . Kelas tambahan ini adalah grup simetri makroskopis untuk semua benda yang tidak memiliki struktur magnetik. Namun benda yang memiliki struktur magnetik juga dapat termasuk dalam kelas tambahan ini dengan syarat, grup simetri ruang magnetik dari benda mencakup elemen  $R$  hanya dalam kombinasi dengan translasi dan tidak sendiri. Terdapat 58 kelas kristal magnetik dimana  $R$  masuk hanya dalam kombinasi dengan rotasi atau refleksi. Ke-58 kelas ini menjadi kelas kristal biasa jika  $R$  diganti oleh identitas (Birrs, 1963).

### III.3 Grup Titik Magnetik

Zat padat kristalin dalam tiga dimensi secara alamiah terbagi dalam 7 macam sistem kristal, yaitu triklinik, monoklinik, orthorhombic, tetragonal, trigonal, hexagonal dan kubik. Dari tujuh sistem kristal terdapat 14 sistem kekisi yang disebut kekisi bravais. Ke-14 kekisi bravais tersebut dapat dilakukan operasi-operasi rotasi, refleksi, inversi atau kombinasinya untuk mendapatkan elemen-elemen simetrik, sehingga terbentuk 32 grup titik kristallografi.

Grup kristallografi tersebut dibentuk tanpa meninjau spin elektron individual yang terdapat dalam kristal dan bagaimana orientasi spin-spin tersebut antara satu dengan yang lainnya. Peninjauan kedua hal tersebut akan membawa kepada pembahasan tentang kristal dan grup magnetik.

Kelas kristal magnetik terdiri dari 3 tipe. Tipe- I mencakup 32 kelas kristal biasa (G) yang tidak melibatkan operasi pembalikan arus R. Type\_II mencakup 32 kelas kristal biasa (G) ditambah dengan perkaliannya dengan R atau dapat ditulis sebagai:

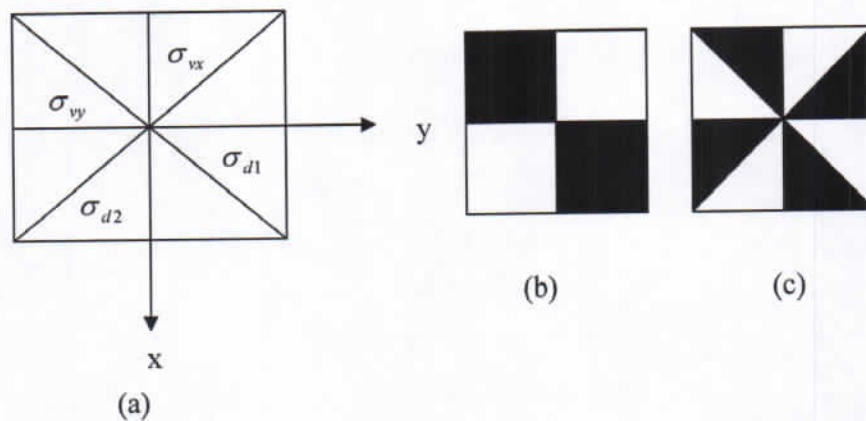
$$\mathbf{M} = \mathbf{G} + \mathbf{R}\mathbf{G}$$

Tipe-III mencakup 58 kelas magnetik dimana R masuk dalam kombinasi dengan rotasi atau refleksi, atau dapat ditulis sebagai:

$$\mathbf{M} = \mathbf{G} + \mathbf{R}\mathbf{G}_1\mathbf{H}$$

**H** menyatakan subgrup dari **G** yang elemen simetrinya tidak dikalikan dengan R, sedangkan elemen lain dari **G** ( $\mathbf{G}_1$ ) muncul dalam perkalian dengan R.

Untuk menjelaskan kelas kristal magnetik ini, R dianggap sebagai operator peubah warna hitam menjadi putih atau sebaliknya sebagai ganti atas adanya spin up dan spin down dari elektron-elektron individual yang secara kolektif menghasilkan magnetisasi. Sebagai ilustrasi cara kerja operator ini, ditinjau suatu contoh berupa operasi-operasi simetri dari bujur sangkar seperti dalam Gambar 1.



Gambar 1. Grup  $C_{4v}$  tak berwarna (a) dan berwarna (b dan c)

Dari Gambar 1a tampak bahwa bujur sangkar tersebut memiliki 8 operasi simetri yaitu operasi identitas (E), rotasi memutar sumbu z sebesar  $90^\circ$  searah jarum jam ( $C_{4z}^+$ ), rotasi memutar sumbu z sebesar  $180^\circ$  ( $C_{2z}$ ), rotasi memutar

sumbu z searah jarum jam sebesar  $270^0$  atau berlawanan arah jarum jam sebesar  $90^0$  ( $C_{4z}^-$ ), dan operasi refleksi dalam bidang-bidang vertikal ( $\sigma_{d1}, \sigma_{d2}, \sigma_{vx}, \sigma_{vy}$ ). Kedelapan operasi simetri tersebut tergabung dalam grup  $C_{4v}$  (dalam notasi *Schonflies*) atau  $4mm$  (dalam notasi internasional) yang dinamakan ditetragonal-pyramidal. Gambar 1a diperoleh dari stereogram 32 grup titik kristal yang diberikan oleh De Jong dalam Mulyono (2003), sedangkan bujur sangkar Gambar 1b dan 1c merupakan model-model pewarnaan untuk bujursangkar 1a. Ketiga bujur sangkar tersebut hanya dibedakan oleh blok warna yang merupakan representasi dari orientasi spin-spin.

Elemen-elemen simetri dari bujur sangkar Gambar 1b dan 1c terkait dengan operator peubah warna  $R$ . Operator  $R$  ini hanya bersifat merubah warna dari hitam menjadi putih atau putih menjadi hitam. Sehingga dapat dilihat bahwa operasi-operasi simetri pada Gambar 1b adalah  $E, C_{2z}, \sigma_{d1}, \sigma_{d2}, RC_{4z}^+, RC_{4z}^-, R\sigma_{vx}, R\sigma_{vy}$ . Elemen-elemen simetri ini bergabung membentuk suatu grup baru dengan notasi  $C_{4v}(C_{2v})$  atau  $4mm$ . Sedangkan untuk Gambar 1c diperoleh operasi-operasi simetri  $E, C_{2z}, C_{4z}^+, C_{4z}^-, R\sigma_{vx}, R\sigma_{vy}, R\sigma_{d1}$  dan  $R\sigma_{d2}$  yang bergabung membentuk suatu grup baru dengan notasi  $C_{4v}(C_4)$  atau  $4mm$ .

Uraian di atas merupakan salah satu contoh grup titik magnetik yang termasuk dalam kelas kristal magnetik type III. Dari contoh tersebut terlihat bahwa operasi pembalikan arus  $R$  dalam kelas kristal ini hanya muncul dalam kombinasi dengan elemen simetri lainnya, dalam hal ini rotasi dan refleksi. Hal ini merupakan syarat simetri yang utama bagi keberadaan efek magnetoelektrik dalam kristal.

Terdapat 58 kelas magnetik yang mungkin memiliki efek magnetoelektrik bila ditinjau dari simetri kristalnya, namun baru beberapa kristal magnetik yang secara eksperimen telah dibuktikan memiliki efek magnetoelektrik di dalamnya. Kristal-kristal tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kristal magnetik yang telah ditemukan efek magnetoelektrik di Dalamnya (Agyei, Birman, 1990)

No	Kristal	Asumsi atom ME	Grup titik magnetik kristal
1.	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr	<u>3'm</u>
2.	Fe <sub>2</sub> TeO <sub>6</sub>	Fe	4/ <u>mmm</u>
3.	Nb <sub>2</sub> Co <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	Co	<u>3'm</u>
4.	Nb <sub>2</sub> Mn <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	Mn	<u>3'm</u>
5.	Ta <sub>2</sub> Co <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	Co	<u>3'm</u>
6.	Ta <sub>2</sub> Mn <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	Mn	<u>3'm</u>
7.	LiCoPO <sub>4</sub>	Co	<u>mmm</u>
8.	LiFePO <sub>4</sub>	Fe	<u>mmm</u>
9.	LiNiPO <sub>4</sub>	Ni	<u>mmm</u>
10.	LiMnPO <sub>4</sub>	Mn	<u>mmm</u>
11.	DyAlO <sub>3</sub>	Dy	<u>mmm</u>
12.	GdAlO <sub>3</sub>	Gd	<u>mmm</u>
13.	TbAlO <sub>3</sub>	Tb	<u>mmm</u>
14.	TbCoO <sub>3</sub>	Co	<u>mmm</u>
15.	DyOOH	Dy	2/ <u>m</u>
16.	ErOOH	Er	2/ <u>m</u>
17.	TbPO <sub>4</sub>	Tb	<u>mmm</u>

#### III. 4. Efek Magnetoelektrik linier

Efek magnetoelektrik dicirikan oleh munculnya polarisasi listrik karena medan magnet atau munculnya magnetisasi karena medan listrik (Wiegelmann *dkk*, 1995), atau dalam suku-suku liniernya ditulis sebagai

$$\vec{P} = \epsilon_0 \vec{\chi}^e \vec{E} + \frac{1}{c} \vec{\chi}^{em} \vec{H}, \quad (1)$$

$$\vec{M} = \epsilon_0 c \vec{\chi}^m \vec{H} + \vec{\chi}^{me} \vec{E}. \quad (2)$$

Tidak semua bahan magnetik memiliki efek magnetoelektrik karena ia sangat berhubungan erat dengan elemen simetri yang dimiliki oleh kristal bahan tersebut.

Sifat mendasar dari kristal yang memiliki efek magnetoelektrik adalah adanya respon magnetoelektrik linear  $\bar{\chi}^{em} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial \bar{H}}$  dan  $\bar{\chi}^{me} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial \bar{E}}$  (Figotin dan Vitebsky, 2001). Dalam kebanyakan kasus berlaku kaitan  $\chi_{\alpha\beta}^{me} = \chi_{\beta\alpha}^{em}$ .

Efek magnetoelektrik terdapat dalam kristal yang tidak memiliki simetri inversi ruang,  $I$  (*space-inversion*) dan simetri pembalikan waktu,  $T$  (*time reversal*). Hal ini dapat dipahami dengan mengingat bahwa  $\bar{D} = -I\bar{D}$ ,  $\bar{E} = -I\bar{E}$ ,  $\bar{H} = I\bar{H}$ ,  $\bar{B} = I\bar{B}$  dan  $\bar{D} = T\bar{D}$ ,  $\bar{E} = T\bar{E}$ ,  $\bar{H} = -T\bar{H}$ ,  $\bar{B} = -T\bar{B}$  (Figotin dan Vitebsky, 2001). Apabila definisi-definisi ini dimasukkan dalam kaitan suseptibilitas magnetoelektriknya, maka diperoleh hubungan  $I\bar{\chi}^{me} = -\bar{\chi}^{me}$  dan  $T\bar{\chi}^{me} = -\bar{\chi}^{me}$ . Artinya, inversi ruang  $I$  maupun pembalikan waktu  $T$  mengubah tanda dari  $\bar{\chi}^{me}$ , sehingga efek magnetoelektrik tidak memenuhi simetri pembalikan ruang dan waktu. Dengan kata lain, grup titik dari struktur kristal magnetik tidak memiliki elemen simetri  $R$  (simetri pembalikan arus) saja, tetapi ia muncul dalam kombinasi dengan elemen simetri lainnya.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Kelas kristal magnetik terdiri dari 3 tipe, yaitu tipe I, tipe II dan tipe III. Tipe I mencakup 32 kelas kristal biasa (G) yang tidak melibatkan operasi pembalikan arus  $R$ . Tipe II mencakup 32 kelas kristal biasa (G) ditambah dengan perkaliannya dengan  $R$ , sedangkan tipe III mencakup 58 kelas magnetik dimana  $R$  masuk dalam kombinasi dengan rotasi atau refleksi.
2. Efek magnetoelektrik ditandai dengan munculnya polarisasi magnetik ketika bahan dikenakan medan listrik (efek  $ME_E$ ) atau sebaliknya,

polarisasi listrik dapat ditemukan ketika bahan diberikan medan magnet luar (efek  $ME_H$ ).

3. Tinjauan simetri kristal menunjukkan efek magnetoelektrik hanya boleh dimiliki oleh kelas kristal magnetik tipe III, dimana elemen simetri  $R$  tidak muncul sendiri tetapi muncul dalam kombinasi dengan rotasi atau refleksi. Sebagian besar kelompok kristal tersebut memiliki benahan antiferromagnet.
4. Meskipun efek magnetoelektrik diperkirakan mungkin dimiliki oleh 58 kelas kristal magnetik, tetapi baru sebagian kecil kristal yang dapat dibuktikan secara eksperimen memiliki efek magnetoelektrik.

## V. DAFTAR PUSTAKA

- Agyei, Alfred K., Birman, Joseph L., 1990, In the Linear Magnetoelectric Effect, *Condens. Matter* 2, hal. 3007-3020.
- Birrs, R.R., 1963, Macroscopic Symmetry in Space Time, *Progress in Physic* 26, hal. 307-343.
- Figotin, A., dan Vitebsky, I., 2001, Nonreciprocal Magnetic Photonic Crystals, *Physical Review E* 63.
- Landau, I. D., Lifshitz, E. M., 1960, *Electrodynamics of Countinuous Media*, 2<sup>nd</sup> ed., Pergamon Press, New york.
- Litvin, B. B., 2002, *Point Group Symmetries*, The Eberly College of Science, Pennsylvania State University.
- Mulyono, Suhadi, 2003, Analisis Teoritis Sifat-sifat Fisika Makriskopik Material Magnetik Berlandaskan aspek-aspek Simetri dan Teori Grup, *Tesis*, UGM, Yogyakarta.

