

ISSN 0853 - 0823

**PROSIDING
PERTEMUAN ILMIAH XXX
HIMPUNAN FISIKA INDONESIA JATENG & DIY**

SALATIGA, 28 MEI 2016

**“SAINS DAN PEMBELAJARAN SAINS YANG MENARIK DAN
MENANTANG: PENGUATAN PERAN SAINS DAN PENDIDIKAN
SAINS DALAM MENGHADAPI MEA”**



Penyunting :

**Pramudita Anggraita
Sismanto
Kuwat Triyana
Ign. Edi Santosa
Ahmad Kusumaatmaja
Sholihun
Moh. Adhib Ulil Abshor
Fahrudin
Edi Istiyono
Dadan Rosana
Restu Widiatmono
Dewita
Frida Iswinning Diah
Idrus Abdul Kudus**

**Bagian Penerbitan
HIMPUNAN FISIKA INDONESIA
Cabang Jateng & DIY 2016
Website: www.hfi-diyjateng.or.id**

**d/a
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator
Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Babarsari POBox 6101ykbk Yogyakarta 55281**

Estimasi Komponen Vertikal Medan Sekunder akibat Tsunami

Latifatul Cholifah, Tjipto Prastowo, Dyah Ayu Puspitasari

Prodi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Kampus FMIPA Unesa Ketintang, Surabaya 60231

e-mail: latifah.cholifah@gmail.com

Abstrak – Penelitian ini mengkaji masalah pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami dalam konteks ocean dynamo effect yang menghasilkan medan sekunder dan dikenal sebagai anomali lokal medan magnet bumi. Besaran fisika yang diukur dari anomali lokal medan magnet bumi adalah komponen vertikal medan sekunder yang ditentukan besarnya baik melalui estimasi analitik komponen vertikal medan sekunder berbasis asumsi frozen-flux dan estimasi visual berbasis data magnetogram dari jaringan magnetik global INTERMAGNET dan BCMT. Berdasarkan data tsunami Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015, disimpulkan bahwa pendekatan frozen-flux adalah valid di lokasi di mana proses adveksi mendominasi proses difusi. Data magnetogram kasus Chili 2010 dan Tohoku 2011 sesuai dengan estimasi analitik anomali lokal medan berbasis pendekatan frozen-flux dalam penelitian ini. Data magnetogram dan estimasi analitik untuk kasus Chili 2010 menyimpulkan penyimpangan lokal maksimum $b_z \approx 0,5$ nT sedangkan untuk kasus Tohoku 2011 penyimpangan lokal maksimum $b_z \approx 15,5$ nT.

Kata kunci: ocean dynamo effect, medan sekunder, asumsi frozen-flux

I. PENDAHULUAN

Gerak air laut sebagai fluida konduktif yang mengalir memotong garis gaya medan magnet bumi telah lama diyakini sebagai sumber sekunder yang menghasilkan anomali medan magnet bumi [1]. Fenomena alam ini dikenal sebagai *ocean dynamo effect* yang dipelajari melalui telaah teoretik-analitik [2] dan menjadi referensi utama kajian penelitian bidang ini. Publikasi secara luas berbasis pendekatan teoretik, pemodelan numerik, dan pengamatan langsung telah banyak dilaporkan sejak saat itu [3-6]. Intensitas anomali medan tersebut meskipun jauh lebih kecil dari intensitas medan magnet utama bumi, namun terukur oleh baik jaringan stasiun magnetik di darat dan di udara [2, 3] maupun instrumen magnetik *ocean bottom magnetometer* di dasar laut [4, 5, 6].

Eksistensi *ocean dynamo effect* muncul saat terjadi tsunami yang dipicu oleh gempa bumi besar bawah laut. Saat gelombang tsunami merambat di laut lepas, maka massa air laut dalam skala masif bergerak horisontal memberikan efek induksi elektromagnetik [2, 3] dalam bentuk anomali lokal medan magnet utama bumi. Terminologi anomali lokal digunakan karena anomali lokal medan magnet utama bumi tersebut teramat dan terukur di lokasi di mana tsunami dibangkitkan.

Gangguan lokal permukaan air laut akibat tsunami tersebut terukur sebagai variasi spasial dan temporal komponen vertikal medan sekunder dengan simpangan maksimum yang dapat ditentukan secara analitik berbasis *frozen-flux approximation* dan secara visual berbasis magnetogram dari institusi INTERMAGNET dan BCMT. Tujuan penelitian ini adalah membuktikan keberlakuan asumsi *frozen-flux* melalui kesesuaian nilai simpangan maksimum komponen vertikal medan sekunder antara prediksi teori berbasis persamaan teoretik-analitik dan data magnetogram dari kasus tsunami besar Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015.

II. LANDASAN TEORI

Mekanisme pembangkitan anomali lokal medan dapat dipelajari dengan *starting point* persamaan berikut,

$$\partial_t b_z = -\nabla_H \cdot (F_z \mathbf{u}_H) + \kappa \nabla^2 b_z \quad (1)$$

yang memberikan diskripsi masalah *tsunami-generated magnetic signals* [2, 4, 5]. Ruas kiri persamaan tersebut adalah evolusi komponen vertikal b_z medan sekunder. Ruas kanan terdiri dari dua faktor yang berkompetisi dalam proses evolusi b_z ; suku pertama mendiskripsikan produksi medan sekunder melalui proses adveksi air laut akibat perambatan gelombang tsunami, sedangkan suku ke dua mendiskripsikan kontra-produksi medan sekunder melalui proses difusi air laut akibat sirkulasi lokal.

Dalam (1), κ adalah tetapan difusi magnetik air laut, b_z dan F_z menyatakan komponen vertikal medan sekunder (menembus tegak lurus ke luar permukaan geopotensial) dan komponen vertikal medan magnet utama bumi.

Tyler [2] melakukan telaah teoretik-analitik terhadap (1) dan menemukan bahwa rasio komponen vertikal medan sekunder akibat tsunami terhadap komponen vertikal medan magnet bumi, b_z/F_z , sebanding dengan rasio gangguan lokal permukaan laut terhadap kedalaman laut, η/h . Kesebandingan itu menjadi sebuah persamaan bila dikalikan dengan faktor c/c_s di mana $c_s = c + i c_d$ dengan $c_d = 2\kappa/h$ adalah kecepatan difusi air laut dan $c = (gh)^{1/2}$ adalah kecepatan gelombang tsunami. Persamaan tersebut dituliskan sebagai

$$b_z/F_z = \eta/h \times c/c_s \quad (2)$$

yang menunjukkan pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami merupakan fungsi kedalaman laut.

Persamaan (2) di atas secara eksplisit mendiskripsikan kompetisi antara proses adveksi air laut yang diwakili oleh besaran fisis c dan proses difusi air laut yang diwakili oleh besaran fisis c_d dalam proses evolusi b_z . Minami dkk. [6] membagi masalah pembangkitan sinyal magnetik akibat tsunami menjadi tiga kasus terpisah berdasarkan besaran tak berdimensi kedalaman laut h/L , di mana L adalah panjang karakteristik masalah dinamo air laut yang didefinisikan $L = (2\kappa/g)^{1/2} \approx 2,53$ km. Apabila proses adveksi mendominasi proses difusi, maka $c \approx c_s$ sehingga (2) berubah menjadi sederhana,

$$b_z/F_z = \eta/h \quad (3)$$

di mana asumsi *frozen-flux* [2, 6] telah diberlakukan. Persamaan (3) inilah yang menjadi basis estimasi analitik anomali lokal medan akibat tsunami.

III. METODE PENELITIAN

Gambar 1 berikut memberikan gambaran mekanisme penelitian, di mana data penelitian berupa data magnetik, bathymetri, dan kejadian tsunami. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data numerik dan data visual magnetogram. Data numerik penelitian diperoleh dari: <http://www.ngdc.noaa.gov/IGAG/vmod/> (data magnetik) yang dikelola oleh *International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA)* dalam bentuk model magnetik *International Geomagnetic Reference Field (IGRF)* Generasi 12; data bathymetri ETOPO1 di <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/> yang dikelola oleh pemerintah US melalui *National Geophysical Data Centre (NGDC)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*; data tsunami Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015 melalui penelusuran informasi di <http://www.ngdc.noaa.gov> Selain data numerik, data magnetogram dapat diperoleh dari www.intermagnet.org dan www.bcmt.fr.

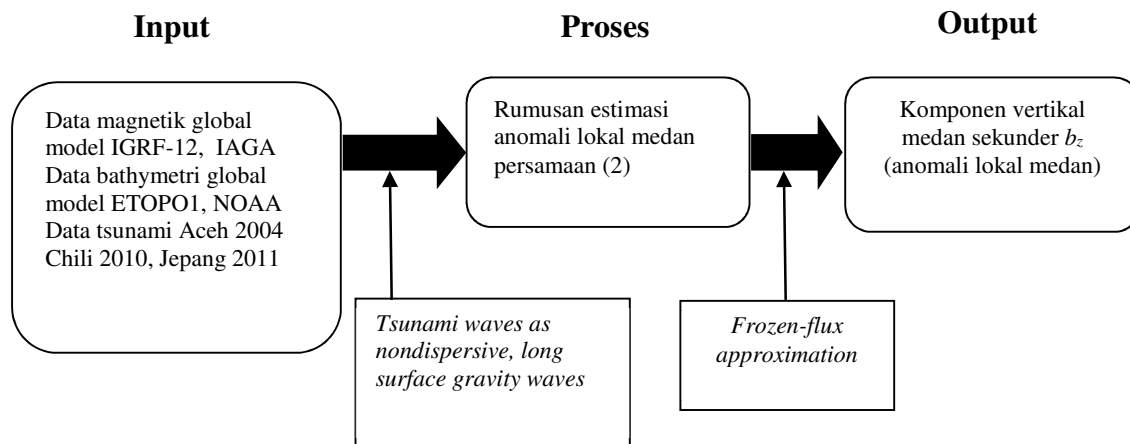
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Estimasi analitik anomali lokal medan magnet bumi berbasis persamaan teoretik-analitik (3) yang menghitung batas atas komponen vertikal b_z medan sekunder akibat tsunami diuji validitasnya dengan data magnetogram.

Fokus bagian ini adalah 3 kasus tsunami, yaitu: tsunami Chili 2010 akibat gempa dengan magnitudo M_w 8,8; tsunami Tohoku 2011 akibat gempa dengan magnitudo M_w 8,9 dan tsunami Chili 2015 akibat gempa dengan magnitudo M_w 8,3. Data numerik untuk ketiga kasus tsunami tersebut diberikan pada Tabel 1 berikut.

Ekspedisi bawah laut untuk di kawasan Pasifik timur dekat dengan lokasi tsunami Chili 2010, Chili 2015, dan kawasan Pasifik barat dekat dengan lokasi tsunami Tohoku 2011 telah dilakukan oleh institusi global INTERMAGNET, BCMT, dan NOAA. Berdasarkan data kedalaman laut h , tsunami Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015 dapat dikategorikan sebagai kasus proses adveksi mendominasi proses difusi karena semua stasiun magnetik terkait memenuhi persyaratan $h/L \geq 2,0$ di mana $h \geq 5,1$ km dan $L = 2,53$ km.

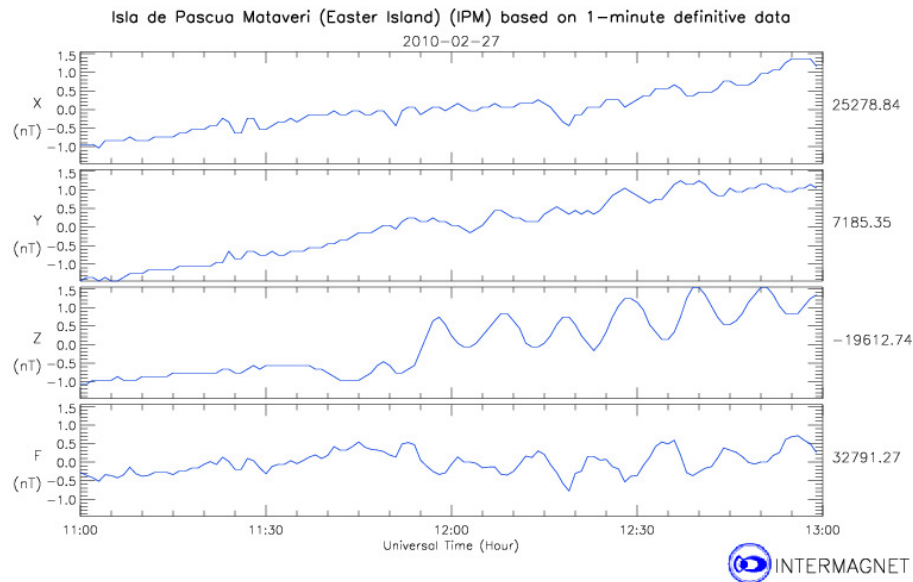
Data magnetogram untuk kasus tsunami Chili 2010 diberikan oleh Gambar 2 di bawah ini dengan fokus perhatian adalah komponen vertikal Z . Panel ke tiga Gambar 2 (variasi temporal komponen vertikal Z) jelas menunjukkan bahwa mulai jam 11:45 UTC terlihat ada sinyal periodik dengan amplitudo 0,47 nT.



Gambar 1. Skema perhitungan estimasi analitik komponen vertikal medan sekunder b_z .

Tabel 1. Data tsunami dalam penelitian ini: kasus Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015.

Kasus Tsunami	Nama Stasiun	Posisi Lintang	Posisi Bujur	F_z (nT)	η (m)	h (m)	b_z (nT)
Chili 2010	IPM	27,17 S	109,41 W	19.019,6	0,15	6.933	0,41
	PPT	17,57 S	149,57 W	18.886,0	0,12	5.085	0,45
Tohoku 2011	B14	39,03 N	144,48 E	37.271,6	2,35	5.830	15,02
	KAK	36,23 N	140,18 E	35.619,2	4,50	10.272	15,60
Chili 2015	Chanaral	26,40 S	70,60 W	9.897,5	1,09	7.578	1,42
	Bucalemu	34,60 S	72,00 W	14.062,0	0,76	7.846	1,36
	Caldera	27,10 S	70,80 W	10.269,2	1,14	7.578	1,54

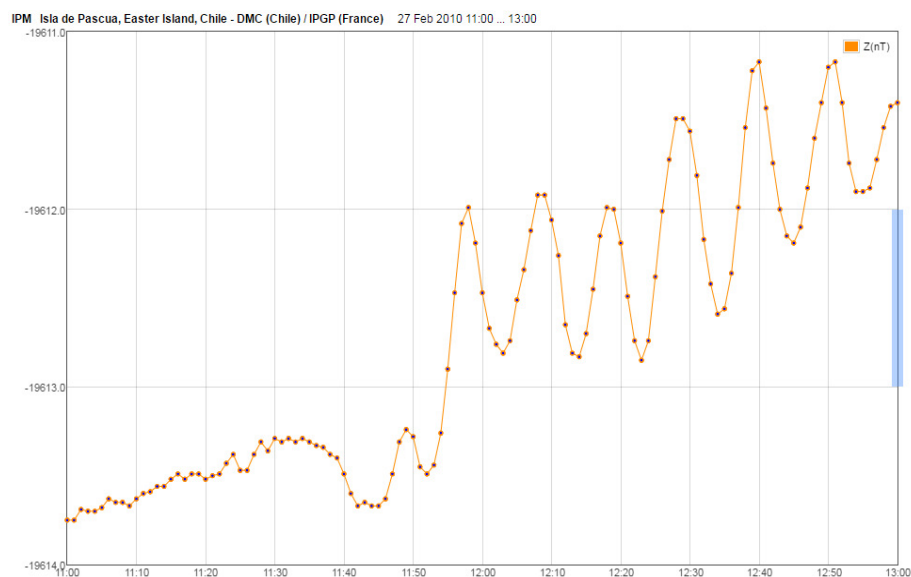


Gambar 2. Magnetogram kasus tsunami Chili 2010 yang terekam oleh stasiun magnetik IPM (berada 3500 km dari episenter gempa) 5 jam sesudah OT tsunami [3]. Magnetogram tersebut diberikan oleh INTERMAGNET.

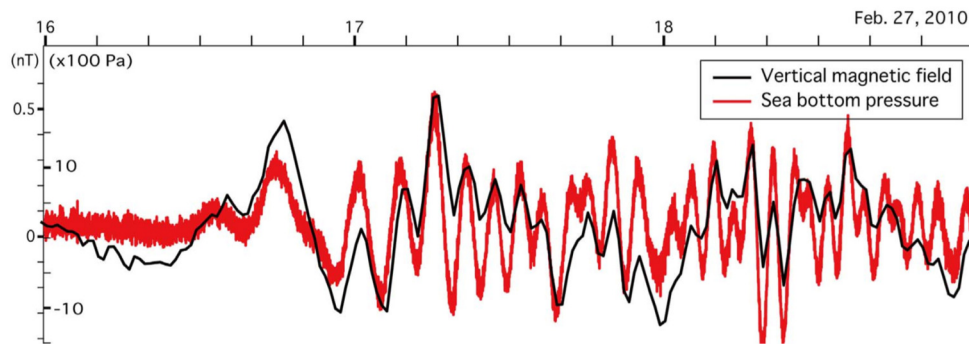
Gambar 3 di bawah ini menunjukkan bahwa mulai jam 11:45 UTC terlihat ada sinyal periodik dengan amplitudo 0,48 nT. Gambar 2 dan Gambar 3 jelas menunjukkan kesesuaian data *tsunami on-set* dan amplitudo komponen vertikal medan sekunder akibat tsunami $b_z \approx 0,5$ nT yang terekam sebagai magnetogram INTERMAGNET dan BCMT. Data kedua magnetogram tersebut sesuai dengan temuan [3] yang melaporkan gangguan periodik sinyal magnetik sebesar 1 nT (*peak to peak*) dan simpangan maksimum komponen vertikal medan sebesar 0,5 nT yang terdeteksi semua instrumen magnetik [5]. Berbeda dengan magnetogram dari stasiun IPM, magnetogram dari stasiun PPT memiliki bentuk sinyal yang sulit digunakan untuk

estimasi anomali lokal medan karena ‘efek lokal’ [3] meskipun kesesuaian estimasi analitik dan data magnetogram untuk tsunami Chili 2010 tetap terbukti dari stasiun IPM.

Gambar 4 di bawah ini menunjukkan gangguan sinyal magnetik dan variasi tekanan hidrostatik di dasar laut yang teramati oleh instrumen magnetik yang diletakkan di dasar laut (*site 8* dalam [5], dekat dengan stasiun IPM), di mana amplitudo komponen vertikal medan sekunder akibat tsunami $b_z \approx 0,5$ nT ditemukan jam 16:45 UTC.



Gambar 3. Magnetogram kasus tsunami Chili 2010 yang terekam oleh stasiun magnetik IPM (berada 3500 km dari episenter gempa) 5 jam sesudah OT tsunami [3]. Magnetogram tersebut diberikan oleh BCMT.



Gambar 4. Grafik komponen vertikal medan sekunder dan tekanan di dasar laut untuk kasus Chili 2010 (Figure 2 dalam [5]).

Berbeda dengan kasus tsunami Chili 2010 di mana karakteristik perambatan tsunami dari episenter gempa ditandai oleh gangguan sinyal magnetik secara periodik, kasus tsunami Tohoku 2011 menunjukkan karakteristik perambatan tsunami sebagai *a traveling solitary wave*. Untuk kasus Tohoku 2011, terjadi kenaikan variasi komponen vertikal medan sekunder yang sangat signifikan, yaitu $b_z \approx 15,8$ nT. Estimasi visual berbasis data magnetogram ini sesuai dengan estimasi analitik anomali lokal medan yang memberikan hasil untuk dua stasiun magnetik (KAK dan B14) sebesar $b_z \approx 15,3$ nT (rata-rata). Estimasi analitik dan visual anomali lokal medan kasus Tohoku 2011 di atas juga sesuai dengan pengamatan oleh [4] dengan menggunakan instrumen magnetik di dasar laut yang melaporkan komponen vertikal b_z medan sekunder akibat tsunami bervariasi antara $b_z \approx 12-19$ nT dengan nilai rerata $b_z \approx 15,5$ nT.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji fenomena alam anomali lokal medan akibat tsunami dan membahas estimasi analitik komponen vertikal medan sekunder b_z berbasis asumsi *frozen-flux approximation* dan estimasi visual berbasis data magnetogram dari jaringan global INTERMAGNET dan BCMT. Analisis data kasus tsunami Chili 2010, Tohoku 2011, dan Chili 2015 menyimpulkan bahwa pendekatan *frozen-flux* adalah valid untuk menghitung b_z di lokasi di mana $c/c_s \approx 1$ yang menjamin proses adveksi mendominasi proses difusi.

Data magnetogram kasus Chili 2010 dan Tohoku 2011 sesuai dengan estimasi analitik anomali lokal medan berbasis pendekatan *frozen-flux* yang digunakan dalam penelitian ini. Estimasi analitik dan data magnetogram kasus Chili 2010 menemukan penyimpangan maksimum medan sekunder $b_z \approx 0,5$ nT, sesuai dengan temuan [3, 5] sedangkan untuk kasus Tohoku 2011 penyimpangan maksimum medan sekunder $b_z \approx 15,5$ nT, sesuai dengan temuan [4].

Kasus tsunami Chili 2015 dengan jelas membuktikan bahwa estimasi analitik berbasis pendekatan *frozen-flux* untuk lautan yang relatif dalam dengan $h/L \geq 2,0$ di mana $L = 2,53$ km [6] adalah pendekatan yang baik untuk menghitung nilai b_z . Perbedaan hasil hitung nilai b_z antara rumusan berbasis pendekatan *frozen-flux* (tanpa mempertimbangkan efek difusi laut) dan rumusan dengan mempertimbangkan efek difusi laut hanya $\leq 2\%$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis berterima kasih kepada kolega dosen dan mahasiswa Prodi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA Unesa yang telah memberikan dukungan moril berharga untuk melaksanakan penelitian ini. Terimakasih khusus kepada Prof. Dr. Madlazim, M.Si dan Endah Rahmawati, M.Si sebagai dosen penguji skripsi penulis pertama artikel ini, Muhammad Firdaus dan Berla Maghda Putri Mahanani sebagai rekan kerja yang menyenangkan.

PUSTAKA

- [1] T. B. Sanford, Motionally induced electric and magnetic fields in the sea, *Journal of Geophysical Research*. vol. 76, no. 15, 1971, pp. 3476-3492.
- [2] R. H. Tyler, a simple formula for estimating the magnetic field generated by tsunami flow, *Geophysical Research Letters*. vol. 32, L09608, 2005, pp. 1-4.
- [3] C. Manoj, C., S. Maus and A. Chulliat, Observation of magnetic fields generated by tsunamis, *Earth and Observatory System (EOS)*, vol. 92, no. 2, January 11, 2011, pp. 13-14.
- [4] H. Ichihara, Y. Hamano, K. Baba and T. Kasaya, Tsunami source of the 2011 Tohoku earthquake detected by an ocean-bottom magnetometer, *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 382, 2013, pp. 117-124.
- [5] H. Sugioka, Y. Hamano, K. Baba, T. Kasaya, N. Tada and D. Suetsugu, Tsunami: ocean dynamo generator. *Scientific Reports* at www.nature.com, vol. 4: 3596, 2014, pp. 1-7.
- [6] Minami, T., Toh, H. and Tyler, R. H. 2015. Properties of electromagnetic fields generated by tsunami first arrivals: classification based on the ocean depth, *Geophysical Research Letters*. Vol. 42, pp. 2171-2178.

TANYA JAWAB

Suaydhi / LAPAN

- ?1. Perhitungan ini berlaku untuk semua?
2. Apa penting mean vertical?

Latifatul Cholifah (UNESA)

- √ 1. Hanya yang besar saja, η masih kecil dan bisa dideteksi.
2. Anomali, untuk prediksi.

Sholihun (UGM)

? Bagaimana mencari B_z ?

Latifatul Cholifah (UNESA)

√ Ada dua telaah: solusi PDE, lihat tabel.