

Modifikasi *Pattern Informatics* untuk Prediksi *Hotspot* Aktivitas Seismik pada Gempa di Pulau Jawa

Adi Wibowo¹, Asep Insani², Boko Nurdiyanto S.^{3,4}

Abstract— Earthquake is a serious problem in economic, social, and cultural point of view. The forecasting and prediction can be one way solution in reducing the effects of earthquakes in a region. In this paper, pattern informatics method was modified with time parameters to conduct hotspot prediction of seismic activity for the earthquake forecasting in Java. The experiment using seismic activity and earthquake data in Java were conducted to examine the performance of proposed method with several period prediction scenarios. The prediction results show an improvement of prediction result and shorten the prediction period.

Intisari—Gempa bumi menjadi masalah yang sangat besar, baik dari sisi ekonomi, sosial, maupun budaya. Salah satu cara untuk mengurangi dampak gempa adalah dengan melakukan prediksi kemungkinan terjadinya gempa pada sebuah wilayah. Pada makalah ini dilakukan prediksi *hotspot* aktivitas seismik menggunakan metode *Pattern Informatics* yang dimodifikasi dengan penambahan parameter waktu untuk peramalan gempa di Pulau Jawa. Eksperimen menggunakan data aktivitas seismik dan gempa dilakukan untuk menguji kinerja metode yang diusulkan dengan beberapa skenario periode prediksi. Dari hasil prediksi terlihat peningkatan hasil prediksi dan memperpendek rentang waktu prediksi.

Kata Kunci— Prediksi Gempa Bumi, *Pattern Informatics*, *Hotspot* Aktivitas Seismik, Gempa Pulau Jawa.

I. PENDAHULUAN

Gempa bumi menjadi salah satu bencana yang memiliki dampak yang sangat besar, baik dari sisi ekonomi, sosial, maupun budaya. Selain itu, gempa terjadi tanpa peringatan awal sehingga kurang persiapan yang matang untuk menghadapi bencana tersebut, seperti terjadinya gempa di Yogyakarta pada tanggal 27 Mei 2006 dengan kekuatan 5,9 pada skala Richter yang menewaskan 6.234 jiwa [1]. Kejadian serupa juga terjadi di berbagai wilayah di Indonesia, dengan kerugian yang cukup besar baik harta maupun jiwa. Salah satu cara penganggulangan bencana tersebut adalah dengan melakukan pemantauan potensi penanda fenomena alam dan melakukan prediksi lokasi yang rawan terjadi gempa.

¹Staf Pengajar, Departemen Teknik Informatika, Universitas Diponegoro, Jl. Prof Soedarto SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, INDONESIA (telp: 024-7474754; fax: 024-7474754; e-mail: bowo.adi@undip.ac.id).

²Peneliti, Puslit KIM, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Kompleks Puspiptek, Serpong, INDONESIA.

³Peneliti, Pusat Penelitian dan Pengembangan, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Jakarta, INDONESIA.

⁴Peneliti, Geophysics, Upstream Technology Center, Pertamina (Persero), Jakarta, INDONESIA.

Penanda fenomena alam biasanya digunakan sebagai salah satu parameter untuk mendapatkan prediksi gempa [2]. Beberapa penanda fenomena tersebut di antaranya adalah perubahan dalam *seismicity*, perubahan dalam kecepatan seismik, ketegangan prekursor, sinyal elektromagnetik, fenomena hidrologi, dan emisi kimia [3], [4]. Akan tetapi, dari semua penanda fenomena alam, aktivitas seismik pada kerak bumi menjadi penanda penting dari prediksi gempa. Di sisi lain, karakteristik aktivitas seismik pada kerak bumi sangatlah kompleks dan juga secara umum diketahui bahwa gempa bumi adalah fenomena yang tak menentu. Oleh karena itu, peramalan gempa menggunakan penanda fenomena alam dari karakteristik pada kerak bumi harus mempertimbangkan dasar statistiknya [5].

Salah satu pendekatan statistik untuk peramalan gempa bumi adalah dengan menggunakan metode *Pattern Informatics* (PI) [6], [7]. Pendekatan ini berdasar pada pengkuantifikasian varian pola aktivitas seismik, baik spasial maupun temporal, dengan mengidentifikasi daerah yang memiliki fluktuasi kegempaan yang sangat tinggi. Metode PI ini telah digunakan untuk mendeteksi pola aktivasi seismik di beberapa negara untuk menghasilkan prakiraan *hotspot* aktivitas seismik yang diprediksi menjadi episentrum gempa, seperti di India [6], China [8], USA [9], dan Jepang [10]. Hal ini menunjukkan bahwa metode PI memiliki teknik yang baik untuk peramalan gempa dan lebih presisi. Modifikasi metode ini telah banyak dilakukan, tetapi peramalan yang dihasilkan memiliki rentang waktu yang sangat panjang, antara 5 - 10 tahun dan perlu optimalisasi hasil peramalan. Selain itu, penerapan metode PI ini belum pernah diujicobakan pada data gempa di pulau Jawa.

Pada makalah ini, metode PI dimodifikasi untuk menghasilkan hasil peramalan dengan rentang waktu yang lebih pendek dan meningkatkan kinerja metode tersebut. Modifikasi dilakukan dengan menambahkan parameter waktu untuk peramalan gempa. Data gempa di Pulau Jawa digunakan untuk menguji hasil modifikasi metode tersebut. Hasil dari peramalan dibandingkan dengan data gempa pada periode peramalan yang sama. Struktur makalah ini terdiri atas bagian II yang menjelaskan metode PI dan juga penjelasan modifikasi yang dilakukan pada metode tersebut. Eksperimen dijelaskan pada bagian III, yaitu peramalan menggunakan data gempa di Pulau Jawa dengan menggunakan metode PI dan metode PI termodifikasi digunakan dalam eksperimen. Pada bagian IV, perbandingan hasil peramalan antara metode PI dengan metode PI termodifikasi dianalisis. Kemudian pada bagian V kesimpulan dan saran pengembangan untuk penelitian ini disampaikan.

II. METODOLOGI

Pada bagian ini akan dibahas tentang metode PI dan modifikasi yang dilakukan.

A. *Pattern Informatics (PI)*

Pendekatan ini memiliki enam proses langkah yang menciptakan system, bergantung pada vektor waktu dalam Hilbert *space* bernilai nyata dan menggunakan sudut fase untuk memprediksi masa depan [11]. Metode ini berdasar pada gagasan bahwa masa depan evolusi waktu seismik dapat digambarkan oleh fase murni dinamika [12], [13].

Pada langkah pertama, daerah studi dibagi menjadi N kotak persegi. Tengah kotak ke-*i* dilambangkan oleh \bar{x}_i dan setiap kotak memiliki panjang tepi sebesar Δx . Intensitas seismik di kotak *i* didefinisikan sebagai jumlah total gempa bumi $n(\bar{x}_i, t_b, t)$ di dalam kotak selama periode dari dasar t_b waktu ke waktu $t > t_b$ dengan magnitudo lebih besar daripada m_c . Setiap kotak memiliki sebuah fungsi bernilai $s(\bar{x}_i, t_b, t)$ yang didefinisikan sebagai tingkat rerata terjadinya gempa bumi dalam kotak *i* selama periode t_b untuk waktu selama t , yaitu sebagai berikut [10].

$$s(\bar{x}_i, t_b, t) = \frac{n(\bar{x}_i, t_b, t)}{t - t_b} \quad (1)$$

Nilai rerata terjadinya gempa bumi di kotak *i* diperoleh dengan mengambil t_b nilai-nilai pada interval harian dari t_0 sampai $t-1$. Nilai-nilai tersebut dirata-rata untuk memberikan nilai sebagai berikut.

$$s^*(\bar{x}, t_0, t) = \frac{1}{t - 1 - t_0} \sum_{t_b=t_0}^{t-1} s(\bar{x}_i, t_b, t) \quad (2)$$

Untuk menormalisasi nilai rerata, dilakukan pengurangan rerata spasial untuk semua kotak dan membaginya dengan standar deviasi, sehingga menjadi (3).

$$\hat{s}^*(\bar{x}_i, t_b, t) = \frac{s^*(\bar{x}, t_0, t) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s^*(\bar{x}_j, t_b, t)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{s^*(\bar{x}_j, t_0, t) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s^*(\bar{x}_k, t_0, t)\}^2}} \quad (3)$$

Nilai normalisasi rerata dapat lebih dijabarkan dengan mengganti nilai periode waktu dari t_0 ke $t_1 > t_0$ menjadi dari t_0 ke $t_2 > t_1$, dan diperoleh (4),

$$\Delta \hat{s}^*(\bar{x}, t_0, t_1, t_2) = \hat{s}^*(\bar{x}_i, t_0, t_2) - \hat{s}^*(\bar{x}_i, t_0, t_1) \quad (4)$$

sehingga akhirnya dapat ditemukan probabilistik perubahan aktivitas seismik dari kotak tersebut dari kuadrat $\Delta \hat{s}^*(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2)$, yaitu

$$P(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2) = \{\Delta \hat{s}^*(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2)\}^2 \quad (5)$$

Dikarenakan $\Delta \hat{s}^*(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2)$ adalah kuadrat, maka probabilitasnya adalah sebuah hasil pengukuran seismik yang aktif dan seismik tidak aktif. Skematik proses tersebut dapat direpresentasikan sebagai (6).

$$n \longrightarrow s \longrightarrow s^* \longrightarrow \hat{s}^* \longrightarrow \Delta \hat{s}^* \longrightarrow P \quad (6)$$

dengan simbol \wedge berarti “berlaku normalisasi”, simbol Δ berarti “menghitung perubahan tingkat”, dan symbol * berarti “atas dasar rata-rata waktu”.

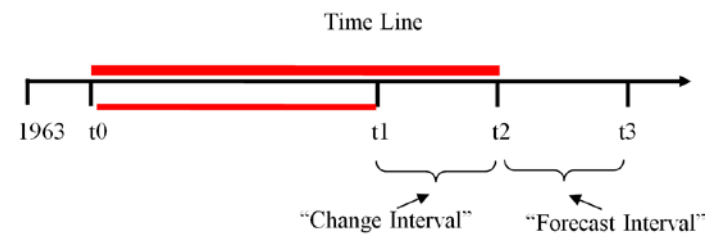
Untuk fungsi probabilistik baru dengan membandingkan aktivitas sesismik dengan kesetabilan seismik, diperoleh

$$P'(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2) = P(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P(\bar{x}_j, t_0, t_1, t_2) \quad (7)$$

Penggunaan $P(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2)$ untuk memprediksi terjadinya gempa bumi disebut sebagai PI. Dalam memperkirakan haruslah menyampaikan informasi waktu t dengan jangkauan $t_3 > t > t_2$. Dapat digunakan interval $t_2 - t_1$ sebagai “*Change Interval*” dan $t_3 - t_2$ sebagai “*Forcast Interval*”, seperti ditunjukkan pada Gbr. 1.

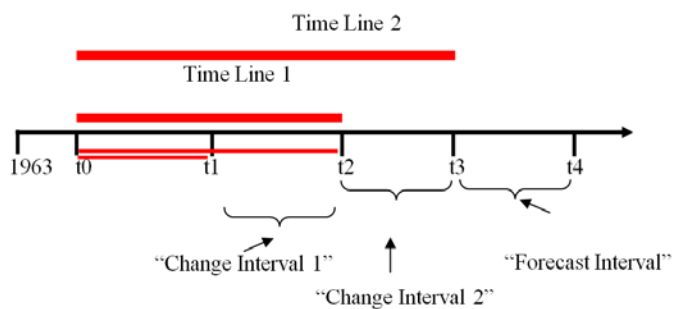
B. *Modifikasi Metode Pattern Informatics*

Dalam makalah ini, untuk mendapatkan peramalan yang lebih singkat dan meningkatkan kinerja, metode PI dioptimalkan dengan penambahan parameter waktu menjadi sampai dengan t_4 sehingga terjadi *change interval* yang bertambah. Modifikasi metode PI ini berdasar pada ide pada *time series* pada perhitungan nilai normalisasi rerata aktivitas seismik ($\Delta \hat{s}^*$), sehingga terhadap nilai normalisasi rerata akan ditambahkan perhitungan-perhitungan dengan menggeneralisasi rumus tersebut. Modifikasi perhitungan nilai normalisasi rerata aktivitas seismik ini diharapkan lebih mengakuratkan nilai normalisasi rerata aktivitas seismik secara presisi, karena dari metode PI sebelumnya, seperti terlihat pada Gbr. 1, nilai tersebut hanya dihitung dengan melihat rerata waktu yang sama pada periode sebelumnya.



Gbr. 1 Metode PI awal dimana interval $t_2 - t_1$ sebagai “*Change Interval*” dan $t_3 - t_2$ sebagai “*Forcast Interval*”.

Pada makalah ini, metode baru diajukan untuk normalisasi rerata dengan memberikan $t_2 - t_1$ sebagai “*Change Interval 1*”, $t_3 - t_2$ sebagai “*Change Interval 2*”, dan $t_4 - t_3$ sebagai “*Forcast Interval*”, dengan total *Time Line* yang sama dengan sebelumnya, ditunjukkan pada Gbr. 2.



Gbr. 2 Metode PI Modifikasi dengan interval $t_2 - t_1$ sebagai "Change Interval 1", $t_3 - t_2$ sebagai "Change Interval 2", dan $t_4 - t_3$ sebagai "Forecast Interval".

Nilai normalisasi rerata dapat lebih dijabarkan dengan mengganti nilai periode waktu dari t_0 ke $t_1 > t_0$ menjadi dari t_0 ke $t_2 > t_1$, $t_3 > t_2$, dan $t_4 > t_3$ sehingga diperoleh

$$\Delta \hat{s}_0^* (\bar{x}, t_0, t_1, t_2) = \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_2) - \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_1) \quad (8)$$

$$\Delta \hat{s}^* (\bar{x}, t_0, t_1, t_2, t_3) = \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_3) - \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_2) - \Delta \hat{s}_0^* (\bar{x}, t_0, t_1, t_2) \quad (9)$$

sehingga akhirnya dapat ditemukan probabilistik perubahan aktivitas seismik dari kotak tersebut dari kuadrat $\Delta \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2, t_3)$ yaitu

$$P(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2, t_3) = \{\Delta \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2, t_3)\}^2 \quad (10)$$

Dikarenakan $\Delta \hat{s}^* (\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2, t_3)$ adalah kuadrat, maka probabilitasnya adalah sebuah hasil pengukuran seismik yang aktif dan seismik tidak aktif. Skematik proses tersebut dapat direpresentasikan sebagai berikut.

$$n \longrightarrow s \longrightarrow s^* \longrightarrow \hat{s}^* \longrightarrow \Delta \hat{s}^* \longrightarrow P \quad (11)$$

dengan simbol \wedge berarti "berlaku normalisasi", simbol Δ berarti "menghitung perubahan tingkat", dan simbol $*$ berarti "atas dasar rata-rata waktu".

Untuk fungsi probabilistik baru, dengan membandingkan aktivitas seismik dengan kestabilan seismik, diperoleh

$$P'(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2, t_3) = P(\bar{x}_i, t_0, t_1, t_2, t_3) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P(\bar{x}_j, t_0, t_1, t_2, t_3) \quad (12)$$

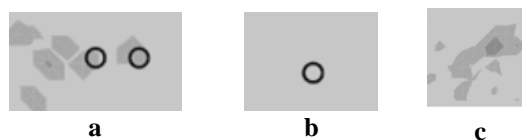
III. EKSPERIMEN

Pada makalah ini, katalog seismik dari *Advanced National Seismik System* (ANSS) digunakan sebagai sumber data gempa yang dapat diperoleh dari *homepage* resmi lembaga tersebut [14]. Data yang digunakan memiliki kriteria untuk gempa $M_c \geq 3$ skala Richter dengan kedalaman lebih dari 5 km dalam jangka waktu dari 1 Januari 1963 hingga 19 November 2009. Data tersebut digunakan untuk meramalkan gempa bumi dengan besar $M_c \geq 5$ skala Richter di Pulau Jawa dan juga untuk menguji metode ini terhadap kejadian gempa pada tanggal 27 Mei 2006. Area studi yang digunakan adalah data aktivitas seismik pada posisi dari 105 and 115 *longitude* dan antara -10 dan -5 *latitude* dengan magnitude $M_{min} \geq 3,0$

skala Richter. Pada Tabel I ditampilkan beberapa data gempa yang digunakan.

TABEL I
CONTOH DATA GEMPA DI PULAU JAWA

Tanggal			Posisi		Magnitudo
Tahun	Bulan	Hari	Lat	Long	
1963	2	21	-6,3	106,7	4,8
1963	2	21	-6,3	106,8	5,2
1963	2	22	-6,1	106,3	4,9
1963	3	23	-9,8	114	4,8
1963	5	6	-9,2	112,4	6,1



Gbr. 3 Parameter gambar untuk pengukuran kinerja metode, (a) Lokasi gempa yang sukses terprediksi, (b) Lokasi pusat gempa yang gagal terprediksi, (c) Prediksi lokasi gempa yang salah / error.

Untuk menerapkan metode PI pada gempa di Pulau Jawa, daerah observasi ditentukan sesuai usulan Tiampo yaitu membagi wilayah studi ke kotak ukuran menjadi 0,1 derajat atau identik dengan 11 Km dalam ukuran sebenarnya [7]. Untuk program PI, digunakan *source code* dari bahasa C yang diperoleh dari buku acuan [15]. Sedangkan untuk memvisualisasi ke dalam peta, digunakan *Generic Mapping Tools* (GMT) [16]. Hasil dari peramalan ditampilkan dalam peta, dengan nilai probabilitas aktivitas seismik diberikan dalam bentuk kode warna. Warna abu-abu muda menandakan aktivitas seismik cukup tinggi, sedangkan warna abu-abu tua merupakan tanda untuk aktivitas seismik yang sangat tinggi. Perbandingan hasil prediksi dengan kejadian sebenarnya ditampilkan dalam peta posisi gempa yang terjadi pada jangkauan prediksi dengan besar $M_c \geq 5$ skala Richter menggunakan tanda lingkaran.

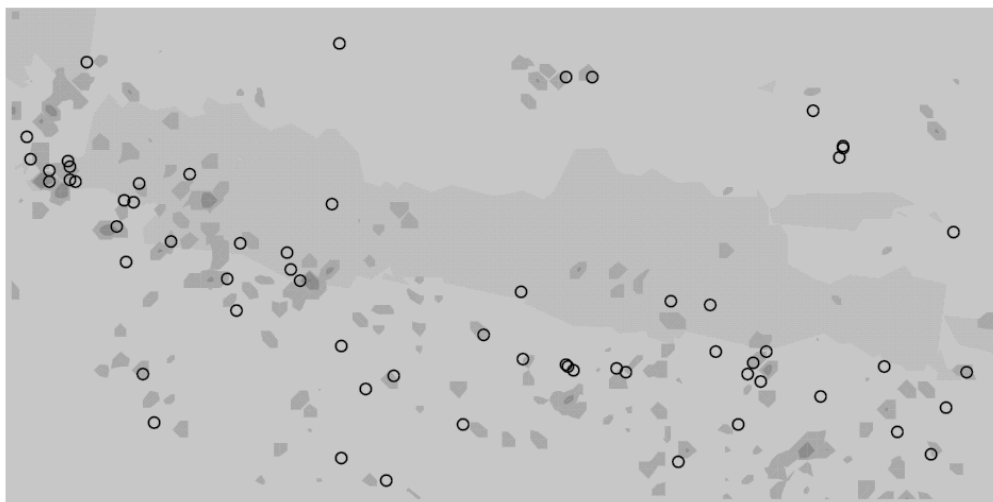
Untuk mengukur kinerja metode PI dan PI dimodifikasi, pada Gbr. 3 diperlihatkan cara pengukuran kinerja hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik yang dibandingkan dengan data posisi pusat gempa. Gbr. 3(a) menunjukkan *hotspot* gempa yang berhasil terprediksi, dengan hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik beririsan dengan lokasi pusat gempa. Gbr. 3(b) memperlihatkan hasil lokasi gempa gagal terprediksi dan Gbr. 3(c) adalah hasil prediksi yang salah atau *error*.

Gbr. 4 merupakan hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan juga *plot* posisi pusat gempa di Pulau Jawa pada periode 1 Januari 2000 sampai dengan 1 Januari 2005. Hasil prediksi pada gambar tersebut menggunakan metode PI yang belum dimodifikasi dengan parameter waktu $t_0 = 1$ Januari 1963, $t_1 = 1$ Januari 1995, $t_2 = 1$ Januari 2000, dan $t_3 = 1$ Januari 2005.

Pada Gbr. 5 ditampilkan hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan juga *plot* lokasi pusat gempa Pulau Jawa dengan periode yang sama, yaitu 1 Januari 2000 sampai dengan 1 Januari 2005 dari hasil menggunakan metode PI yang dimodifikasi dengan parameter waktu $t_0 = 1$ Januari 1963, $t_1 = 1$ Januari 1980, $t_2 = 1$ Januari 1995, $t_3 = 1$ Januari 2000, dan $t_4 = 1$ Januari 2005.



Gbr. 4 *Plot* hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan gempa di Pulau Jawa periode 1 Januari 2000 sampai dengan 1 Januari 2005 dengan metode PI.



Gbr. 5 *Plot* hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan gempa di Pulau Jawa periode 1 Januari 2000 sampai dengan 1 Januari 2005 dengan metode PI termodifikasi.

Pada Gbr. 6 ditampilkan hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan juga *plot* lokasi pusat gempa Pulau Jawa pada periode 19 November 2005 sampai dengan 19 November 2009. Pada Gbr. 7, periode prediksi lebih dipersingkat menjadi 19 November 2008 sampai dengan 19 November 2009. Perbandingan antara metode PI dan PI dimodifikasi untuk kedua periode yang berbeda ditampilkan pada Gbr. 6 dan Gbr. 7.

IV. ANALISIS HASIL

Dari perbandingan prediksi menggunakan metode PI tanpa modifikasi dengan metode PI yang telah dimodifikasi diperoleh hasil yang disajikan pada Tabel II.

Dari hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik gempa yang dibandingkan dengan posisi pusat gempa dengan besaran 5 skala Richter terlihat terdapat peningkatan kinerja metode PI setelah dimodifikasi. Pada semua periode prediksi (A, B, C) terlihat bahwa jumlah data lokasi pusat gempa yang sukses terprediksi hasil dari PI dimodifikasi lebih banyak daripada

metode PI. Hal ini dikarenakan *change interval* yang digunakan lebih panjang sehingga gempa bumi yang terjadi dalam jangka waktu yang sama pada interval sebelumnya diikutkan dalam prediksi berikutnya. Hal ini dikarenakan aktivitas seismik bumi tidak di setiap tempat memiliki interval yang berbeda, sehingga apabila interval prediksi yang sama diperpanjang, maka aktivitas seismik di beberapa tempat akan bertambah.

TABEL II
PERBANDINGAN HASIL PREDIKSI METODE PI DAN PI DIMODIFIKASI

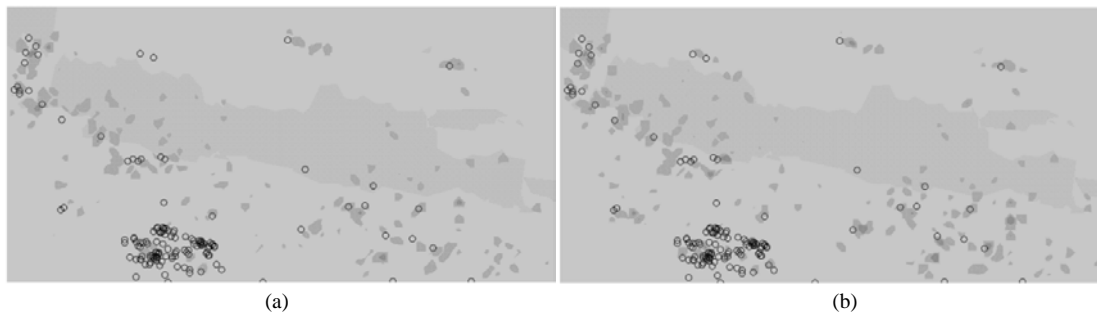
Metode	PI			PI dimodifikasi		
	A	B	C	A	B	C
Gempa sukses terprediksi	19	84	2	33	93	7
Gempa gagal terprediksi	40	56	8	26	47	3
Error	60	51	75	35	62	73

*Keterangan periode:

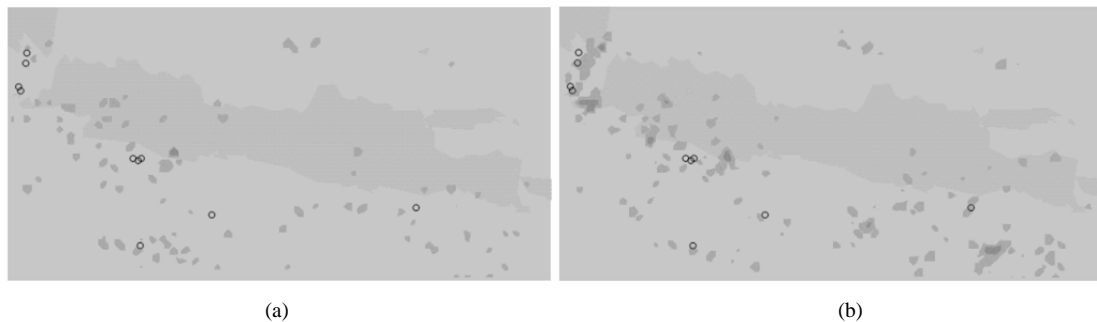
A (1 Januari 2000 – 1 Januari 2005)

B (19 November 2005 – 19 November 2009)

C (19 November 2008 – 19 November 2009)



Gbr. 6 Plot hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan gempa di Pulau Jawa periode 19 November 2005 sampai dengan 19 November 2009; (a) Metode PI, (b) Metode PI dimodifikasi.



Gbr. 7 Plot hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik dan gempa di Pulau Jawa periode 19 November 2008 sampai dengan 19 November 2009 ; (a) Metode PI, (b) Metode PI dimodifikasi.

Selain itu, metode PI dimodifikasi dapat mengurangi nilai *error* pada periode A. Nilai *error* yang kecil dikarenakan aktivitas seismik yang bertambah tersebut tetap dibandingkan dengan aktivitas ketenangan seismik dari tempat itu sendiri yang bertambah juga, sehingga secara seimbang dapat memprediksi lebih baik. Akan tetapi, nilai *error* tetap besar pada periode B dan C karena parameter waktu yang masih belum optimal dalam memperpendek periode prediksi. *Error* juga ditimbulkan karena yang dibandingkan hanya gempa dengan besaran 5 skala Richter.

Terdapat beberapa gempa yang tidak memiliki catatan seismik sebelumnya, seperti gempa 27 Mei 2006, sehingga tidak dapat terprediksi, kecuali parameter waktu t_1 , t_2 , dan t_3 diubah-ubah sehingga diperoleh aktivitas seismik di daerah tersebut. Hal ini menandakan juga bahwa terdapat daerah yang memiliki interval aktivitas seismik yang sangat panjang seperti 50 tahunan atau lebih. Ini menandakan bahwa untuk memprediksi *hotspot* aktivitas seismik di suatu tempat harus melihat juga sejarah waktu aktivitas gempa di daerah tersebut.

Untuk periode prediksi, metode PI yang telah dimodifikasi mampu memberikan hasil yang lebih baik. Hal ini dikarenakan pembuatan pola waktu gempa semakin kompleks dan membuat pola gempa.

V. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah dilakukan prediksi *hotspot* aktivitas seismik dengan menggunakan metode PI yang dimodifikasi dengan penambahan parameter waktu. Dari hasil prediksi *hotspot* aktivitas seismik yang dibandingkan dengan data lokasi pusat gempa Pulau Jawa, dapat terlihat bahwa metode yang diajukan dapat meningkatkan kualitas prediksi dan

digunakan untuk prediksi dengan waktu yang lebih pendek. Diharapkan modifikasi ini dapat lebih ditingkatkan kembali dengan memperhitungkan Gaussian dan normalisasi data pada penelitian selanjutnya dan juga memperpendek interval parameter waktu, sehingga dapat meningkatkan prediksi *hotspot* gempa yang memiliki aktivitas seismik yang tinggi.

REFERENSI

- [1] (2007) "Studi mekanisme gempa bumi jogja 2006 menggunakan GPS" [Online]. Available: <http://geodesy.gd.itb.ac.id/2007/01/05/studi-gempa-jogja/>, tanggal akses 28 Februari 2017.
- [2] Stein, Seth, and Michael Wyssession. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons, 2009.
- [3] Turcotte, D. L.. "Earthquake Prediction". *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 19, 263-281. 1991.
- [4] Scholz, C. H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd ed. Cambridge Univ. Press, New York 2002.
- [5] Tiampo, Kristy F., and Robert Shcherbakov. "Seismicity-based earthquake forecasting techniques: ten years of progress." *Tectonophysics* 522 : 89-121. 2012.
- [6] Mohanty, William K., Alok K. Mohapatra, Akhilesh K. Verma, Kristy F. Tiampo, and Kaushik Kislay. "Earthquake forecasting and its verification in northeast India". *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7, no. 1 : 194-214. 2016.
- [7] Tiampo, K. F., Rundle, J. B., McGinnis, S., and Klein, W., "Pattern Dynamics and Forecast Methods in Seismically Active Regions". *Pure Appl. Geophys.* 159, : 2429-2467. 2002.
- [8] Zhang, Shengfeng, Zhongliang Wu, and Changsheng Jiang. "The Central China North-South Seismic Belt: Seismicity, Ergodicity, and Five-year PI Forecast in Testing." *Pure and Applied Geophysics* 173, no. 1: 245-254. 2016.
- [9] Cho, N. F., and K. F. Tiampo. "Effects of location errors in pattern informatics." *Pure and Applied Geophysics* 170, no. 1-2: 185-196. 2013.
- [10] Kawamura, M., Y-H. Wu, T. Kudo, and C-C. Chen. "A statistical feature of anomalous seismik activity prior to large shallow

- earthquakes in Japan revealed by the pattern informatics method." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, no. 4 : 849. 2014.
- [11] Rundle, John B., Donald L. Turcotte, Robert Shcherbakov, William Klein, and Charles Sammis. "Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems." *Reviews of Geophysics* 41, no. 4 . 2003.
- [12] Mori, Hazime, and Yoshiki Kuramoto. *Dissipative structures and chaos*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [13] Rundle, John B., W. Klein, Kristy Tiampo, and Susanna Gross. "Dynamics of seismicity patterns in systems of earthquake faults." *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes* : 127-146. 2000.
- [14] (2016) ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (ComCat) Documentation. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> diakses terakhir pada tanggal 28 Februari 2016.
- [15] Holliday, James Roy. *Forecasting large magnitude earthquakes*. ProQuest, 2007.
- [16] (2016) Generic Mapping Tools .<http://gmt.soest.hawaii.edu/> diakses terakhir pada tanggal 28 Februari 2016.