

PENGURANGAN RISIKO BENCANA ALAM GEMPA BUMI SEBAGAI UPAYA UNTUK MELAKSANAKAN *RISK-BASED EARLY WARNING*

Widodo Pawirodikromo¹

Program Magister Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia (UII), Daerah Istimewa
Yogyakarta, Indonesia
Email : widodo355@gmail.com

ABSTRACT

The occurrence of natural hazards and disasters in general can not be avoided, and accordingly, the best way to overcome is to carry out an effective disaster management. The disaster management cycle has been defined and understood clearly. One of the main problem especially in the earthquake occurrence is the method of early warning. Semi quantitative investigation on the earthquake occurrences particularly at Yogyakarta province has been conducted. The relationship between earthquake occurrence and an effective early warning became the main discussion. The data of earthquake occurrence at Yogyakarta provinve in general is still relatively limited. The only available data was started at 1960's and therefore for the purpose of earthquake forecasting and prediction, the numbers/completeness of the data should be improved. Result of the investigation showed that the concept of early warning system will be more comprehensive if it be conducted by using the principle of Risk-Based Early Warning. Reducing the disaster fatalities can be done not only by carrying out an early warning immediately before hazard but also can be extended inclusively in the disaster risk reduction program. Based on preliminary investigation and experiences, the structural damage at Yogukarata province would be occur if the shallow earthquake magnitude M is greater than 5.3 with the epicenter distance approximately less than 40 km. There are several earthquake prediction methods that have been developed by researchers, and one of them is strange animal behavior before earthquake. The strange animal behaviors were occurred before the Yogyakarta 27 May 2006 earthquake. This method can be used for the earthquake early warning in the future when it has been verified successfully.

Key words: *natural disaster, earthquake, disaster risk, early warning, integrated early warning, risk-based early warning, earthquake forecasting, earthquake prediction*

PENDAHULUAN

Gempa bumi adalah salah satu jenis peristiwa alam yang sudah sangat dikenali oleh sebagian besar rakyat Indonesia. Hal ini disebabkan bahwa, kejadian gempa bumi adalah peristiwa alam yang relatif sering terjadi, sering mengakibatkan kerusakan fisik dan lingkungan yang sangat besar, berdampak sosial dan ekonomi yang serius, mengganggu kehidupan normal manusia serta peristiwanya tersebar luas keseluruh pelosok daerah. Sebagai contoh, gempa Aceh 2004 mengakibatkan dampak fisik, sosial, ekonomi dan lingkungan yang sangat besar sehingga diperlukan masa pemulihan lebih dari 5-tahun. Karena ber-

ulang-ulangnya kejadian bencana gempa bumi di suatu daerah maka masyarakat setempat sampai mampu merumuskan dan menggunakan kearifan lokal untuk mengurangi segala dampak yang terjadi.

Bedasarkan kajian untuk rentang waktu 10-tahun terakhir, di Indonesia gempa bumi merupakan bencana alam yang paling mengakibatkan korban manusia dan kerugian materi/harta benda yang paling besar (Widodo, 2011). Apabila kejadian gempa bumi sudah mengakibatkan dampak yang tidak mampu ditahan oleh masyarakat secara normal, maka peristiwa gempa bumi tersebut sudah berubah menjadi suatu bencana/bencana alam. Setelah melalui

kajian yang mendalam dan cukup lama akhirnya para ahli berpendapat bahwa bencana alam tidaklah dapat di hindari/tolak. Sesuatu yang dapat dikerjakan oleh suatu komunitas adalah dengan mengelola kejadian bencana sehingga dampaknya dapat diminimalisir. Manajemen kebencanaan kemudian dilakukan sebagai suatu cara sistematik untuk mengelola bencana alam.

Secara garis besar elemen-elemen dalam manajemen kebencanaan dapat diurutkan mulai dari kejadian bencana yaitu mulai dari search and rescue, emergency response, recovery, prevention, mitigation, preparedness dan early warning. Early warning sering dipandang sebagai suatu elemen yang sangat strategis karena menyangkut kejadian bencana. Pada umumnya diyakini bahwa apabila early warning suatu kejadian bencana dapat dilakukan dengan baik, maka korban manusia yang terjadi akan dapat diminimalisir.

Untuk dapat melakukan early warning yang baik/berhasil maka perlu didahului oleh suatu monitoring, identifikasi, pengumpulan informasi dan melakukan prediksi kejadian bencana yang baik pula. Untuk itu diperlukan beberapa prasyarat yang diantaranya adalah pengetahuan yang baik tentang jenis bencana yang akan terjadi, karakter objek bencana, alat dan teknologi sebagai alat bantu serta data / informasi dan pengalaman-pengalaman masa lalu yang berkenaan dengan kejadian dan peringatan dini suatu bencana.

Berkenaan dengan hal-hal tersebut di atas, akan terdapat beberapa permasalahan yang perlu dicari jawabannya yaitu seperti apa fakta-fakta/informasi bencana alam gempa bumi utamanya di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) hubungannya dengan konsep peringatan dini (early warning) agar kemungkinan korban akibat bencana gempa bumi dapat diminimalisir. Tulisan ini merupakan hasil kajian yang sifatnya semi-kuantitatif dengan tujuan menyajikan fakta resiko bencana gempa bumi di Yogyakarta

dan aplikasinya dalam bentuk peringatan dini (early warning) sekaligus untuk mendapatkan masukan dari beberapa pihak.

Resiko Akibat Bencana Alam

Kejadian alam baik banjir, tanah longsor, angin ribut maupun gempa bumi tidak selalu akan menjadi bencana. Sering dirasakan adanya gempa bumi yang relatif kecil yang hanya mengakibatkan guncangan yang mengagetkan. Hal senada juga sering terjadi pada banjir kecil, tanah longsor lokal/ kecil maupun angin ribut yang relatif kecil. Hal itu semua merupakan salah satu contoh peristiwa alam yang dapat menjadi ancaman yang dapat menimbulkan bahaya/kerugian (hazard). Tidak selalu peristiwa-peristiwa alam tersebut dapat menjadi disaster karena terdapat beberapa hal yang saling mempengaruhi. Ibarat manusia, ancaman luar berupa virus atau bakteri tidak akan mengakibatkan sakit apabila tubuh mempunyai ketahanan yang baik dan manusia mempunyai cara yang baik untuk menangkal ancaman penyakit.

Demikian juga dengan natural hazard, beberapa jenis hazard tidak akan menjadi bencana (disaster) apabila intensitas bencana tidak besar, kerentanan masyarakat kecil dan kemampuan/kapasitas yang dimiliki cukup besar. Apabila terjadi suatu bencana maka akan menimbulkan akibat/dampak negatif atau kerugian atau resiko (risk) yang harus ditanggung oleh suatu komunitas/ masyarakat. Semakin besar kerentanan (vulnerability) internal maka semakin besar resiko bencana yang akan dihadapi. Selain kondisi faktual kerentanan internal, pada masyarakat biasanya ada usaha-usaha untuk menurunkan kerentanan internal atau meningkatkan kapasitas internal (capacity). Semakin besar kapasitas internal (capacity) maka resiko akibat bencana akan semakin kecil dan sebaliknya.

Dengan demikian antara hazard, vulnerability, risk dan capacity akan mempunyai hubungan langsung. Hubungan tersebut dinyatakan dalam (DeLeon, 2006)

$$\text{Risk} = \text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \quad (1)$$

Persamaan (1) adalah formulasi untuk mengestimasi resiko terhadap objek yang mempunyai tingkat kerentanan (*vulnerability*) akibat ancaman luar (*hazard*) yang paling sederhana. Formulasi tersebut pada umumnya dipakai untuk mengestimasi resiko kehilangan/loss suatu kerusakan utamanya untuk objek fisik individual. Untuk kondisi tertentu yang didalamnya terdapat populasi yang padat nilai/densitas nilai (*exposure*) maka persamaan (1) dikembangkan menjadi

$$\text{Risk} = \frac{\text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{Exposure}}{\text{Capacity}} \quad (2)$$

Namun demikian untuk estimasi suatu objek yang ada hubungannya dengan aktivitas manusia maka unsur kapasitas akan muncul, sehingga persamaan (1) dapat dikembangkan menjadi,

$$\text{Risk} = \frac{\text{Hazard} \times \text{Vulnerability}}{\text{Capacity}} \quad (3)$$

Apabila hadirnya densitas nilai (*exposure*) diperhitungkan maka persamaan (3) akan menjadi,

$$\text{Risk} = \frac{\text{Hazard} \times \text{Vulnerability} \times \text{Exposure}}{\text{Capacity}} \quad (5)$$

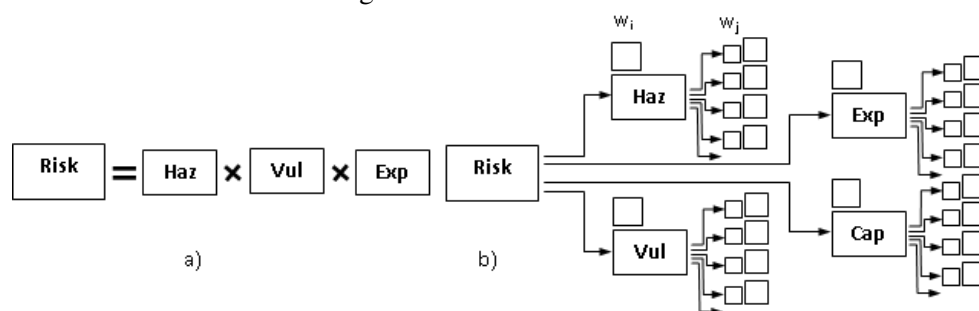
Resiko yang harus dihadapi akibat bencana di suatu objek/kawasan sebagaimana disajikan dalam persamaan (1), persamaan (2), persamaan (3) atau persamaan (3) dapat diestimasi (*risk assessment*) dengan memakai beberapa pendekatan. Untuk dapat mengestimasi resiko tersebut, semua elemen yang terlibat dalam persamaan tersebut harus benar-benar dimengerti /

dikuasai secara baik. Analisis terhadap resiko bencana merupakan salah satu elemen dari metode penanggulangan bencana alam.

Secara kualitatif, maupun kuantitatif akibat/dampak yang disebabkan oleh suatu bencana sangat dipengaruhi oleh elemen-elemen sebagaimana disampaikan pada persamaan (1), persamaan (2), persamaan (3) atau persamaan (4). Elemen-elemen tersebut dipengaruhi oleh penyebab sebelumnya misal, kondisi lokal/regional daerah yang bersangkutan dan dapat bervariasi dari suatu kawasan/negara ke kawasan/negara yang lain (McKenzie et al., 2005). Selanjutnya juga disebutkan bahwa berdasarkan hasil survai, dampak akibat bencana geologi (gempa, letusan gunung, tsunami) lebih banyak mengakibatkan kerusakan langsung (*direct*) daripada kerusakan tidak langsung. Hal yang sebaliknya terjadi (kerusakan tidak langsung/*indirect*) pada bencana hidrologi seperti kekeringan maupun banjir.

Resiko Akibat Bencana Alam Gempa Bumi

Sebagaimana disampaikan sebelumnya, pers.1) adalah formulasi tata-cara mengestimasi/ menghitung resiko (*risk*) akibat ancaman (*hazard*) utamanya terhadap sesuatu objek fisik yang mempunyai kerentanan (*vulnerability*). Resiko akibat kerusakan bangunan fisik oleh gempa bumi merupakan contoh yang riil. Formulasi resiko suatu kerusakan objek fisik yang mempunyai kepadatan/densitas nilai (*exposure*) akibat hazard secara skematis ditunjukkan oleh Gambar 1.a).



Gambar 1 Skema analisis resiko akibat bencana alam

Akibat gempa bumi maka akan menimbulkan getaran tanah yang intensitasnya dinyatakan dalam percepatan tanah. Percepatan tanah tersebut berfungsi sebagai hazard yang berpotensi merusakkan fisik bangunan. Sementara itu setiap bangunan akan mempunyai kondisi / perilaku tertentu apabila mendapatkan guncangan/getaran percepatan tanah akibat gempa. Singkatnya setiap bangunan akan mempunyai tingkat kerentanan tertentu, sehingga akan menimbulkan kerusakan akibat *hazard* dengan sebaran probabilitas tiap level kerusakan tertentu. Dengan diketahuinya densitas nilai (*exposure*) maka secara keseluruhan resiko suatu kawasan akibat skenario *earthquake hazard* tertentu akan dapat disetimasikan.

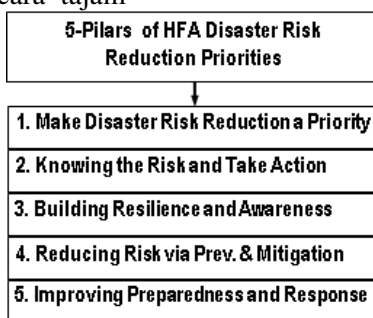
Pada umumnya untuk kerusakan objek fisik yang sifatnya *tangible*, *risk assessment* dapat dilakukan sampai pada *level loss* yang harus ditanggung. Namun demikian untuk hal-hal yang sifatnya *in-tangible* seperti persoalan sosial ataupun kultural, *risk assessment* pada umumnya diarahkan pada pengelompokan standar kondisi tertentu misalnya sangat baik, cukup baik, sedang, kurang ataupun kurang sekali. Gamba 1.b) adalah contoh skema *disaster risk assessment* untuk objek yang sifatnya *in-tangible* seperti persoalan sosial, kultural dan sejenisnya.

Disaster Risk Reduction

Sudah disajikan dibeberapa kesempatan bahwa jumlah bencana alam diseluruh dunia cenderung me-ningkat secara tajam

terutama 30-tahun terakhir. Hal tersebut diantaranya disebabkan oleh meningkatnya kerentanan (*vulnerability*) akibat perkembangan demografi, kondisi sosial-ekonomi dan teknologi, urbanisasi yang tidak terkendali, perubahan iklim, pembangunan di daerah rawan bencana, penurunan kualitas lingkungan, kompetisi penguasaan sumber daya alam, *geological hazard* serta hadirnya epidemi seperti HIV/AIDS, Antrax dll (Anonim, 2005). Analisis terhadap dampak bencana terhadap masyarakat juga sudah sering dilakukan. Hasil analisis menunjukkan bahwa persentase dampak bencana terhadap GNP di negara-negara relatif miskin jauh lebih besar daripada yang terjadi di negara-negara maju. Hal ini ibarat terkena pisau bermata-dua, karena GNP negara-negara relatif miskin sudah kecil dan persentase kerugian akibat bencana justru relatif besar.

Menyadari kondisi seperti itu maka sejak tahun 1994 telah dimulai gerakan penurunan resiko bencana secara global dengan dirumuskannya Yokohama Strategy. Evaluasi terhadap *strategy* tersebut menunjukkan bahwa cenderung terjadi perbaikan sistematika penanggulangan bencana dibanyak negara, peningkatan ketahanan masyarakat baik secara lokal, maupun nasional. Pada perkembangannya kemudian dilanjutkan pada Hygo Framework for Actions (HFA) pada tahun 2005 yangmana 5-prioritas penurunan resiko bencana seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 5-Pilar HFA Disaster Risk Reductions

Apabila diperhatikan, maka pilar-pilar pada Gambar 2 dapat digolongkan menjadi 2-kelompok besar yaitu : 1) *Disaster Risk Analysis and Dissemination* dan 2) *Intragted Disaster Management*. Sudah selayaknya bahwa untuk dapat melakukan manajemen kebencanaan secara baik sekaligus menurunkan resiko bencana, maka hal tersebut harus dilandasi oleh pemahaman secara baik tentang jenis bencana-bencana yang mungkin akan terjadi, rangking bencana yang menjadi ancaman, intensitas setiap jenis bencana, dampak yang terjadi yang dinyatakan dalam resiko bencana. Tidak kalah pentingnya adalah melakukan diseminasi / menyebarluaskan infomasi kepada masyarakat yang kemudian dapat dilanjutkan dengan *integrated early warning systems* (akan dijelaskan kemudian).

Peringatan Dini (*Early Warning,EW*)

Peringatan di atau *Early Warning (EW)* adalah salah satu tahapan penting dalam siklus manajemen kebencanaan. Banyak versi definisi atau pengertian *early warning (EW)* yang pada intinya adalah suatu usaha identifikasi, prediksi dan penyebaran informasi tentang kemungkinan adanya suatu ancaman bencana sehingga dapat diikuti dengan persiapan-persiapan untuk mengurangi dampak yang timbul akibat bencana tersebut. Basher (2006) memberikan ilustrasi tentang komponen-komponen didalam EW sebagaimana disajikan pada Gambar 3. Pada gambar

tersebut tampak bahwa terdapat 4-kelompok aktivitas utama didalam *disaster early warning* yaitu pemahaman tentang resiko bencana, monitoring, pelayanan, diseminasi dan komunikasi serta kemampuan melakukan respons terhadap dampak bencana.

Pada umumnya *early warning (EW)* hanya diasosiasikan kaitannya dengan kejadian ancaman / *hazard (hazard-based early warning)*, yaitu langkah-langkah strategis untuk menghadapi ancaman bencana agar dampak/korban yang terjadi dapat dihindari/dikurangi. Pada kenyataannya EW lebih banyak dialamatkan kepada usaha-usaha Aparat / Pengambil Keputusan / penggiat dalam menghadapi suatu bencana. Durasi suatu bencana pada umumnya tidak lama apalagi pada gempa bumi. Dengan demikian apabila EW hanya diasosiasikan dengan kejadian bencana maka EW hanya berlangsung cukup singkat menjelang kejadian bencana saja.

Peringatan dini merupakan tahap manajemen kebencanaan yang strategis karena mempunyai tujuan yang mulia. Menurut Anonim (2003) tujuan utama EW adalah :

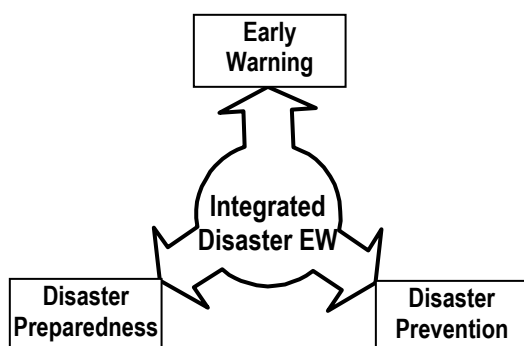
1. Untuk melindungi kehidupan manusia secara pribadi, kelompok, komunitas, bangsa,
2. Untuk melindungi aset dan sumberdaya produktif

risk knowledge knowledge of the relevant hazards, and of the vulnerabilities of people and society to these hazards	monitoring and warning service a technical capacity to monitor hazard precursors, to forecast the hazard evolution, and to issue warnings
dissemination and communication the dissemination of understandable warnings, and prior preparedness information, to those at risk	response capability knowledge, plans and capacities for timely and appropriate action by authorities and those at risk

Gambar 3 People-centered early warning systems (Basher, 2006)

Integrated Early Warning Systems

Disaster early warning (EW) tidaklah efektif kalau hanya dipandang sebagai suatu upaya yang berdiri sendiri sebelum kejadian bencana alam. Terdapat aktivitas-aktivitas pada *early warning* yang saling berkaitan dengan aktivitas di manajemen kebencanaan. Hal ini terjadi karena aktivitas-aktivitas dalam manajemen kebencanaan merupakan aktivitas yang saling berkaitan, berkesinambungan dan saling mendukung satu sama lain. Oleh karena itu Anonim (2003) mengatakan bahwa konsep *integrated early warning systems* merupakan kaitan proses yang *integrated* antara *early warning*, *disaster preparedness* dan *disaster prevention* yang secara skematis disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Integrated disaster early warning (Anonim, 20073)

Integrated early warning systems dapat mempunyai versi yang berbeda-beda tergantung dari sisi mana penyelesaian persoalan akan didekati. Anonim (2003) menyajikan konsep *integrating EW system* seperti pada Gambar 4 sementara itu Basher (2006) mengajukan konsep *integrated EW systems* sebagaimana yang tampak pada Gambar 5. Basher (2006) mengatakan bahwa *early warning* yang efektif tidak hanya berdasar pada *scientific and technical aspects* tetapi harus diikuti dengan komitmen yang kuat dari orang-orang yang terlibat dalam penanggulangan bencana. Oleh karenanya Basher (2006) mengusulkan *disaster early warning* berdasarkan *people-based early warning*

yang secara skematis disajikan pada Gambar 5.

Tampak pada Gambar 4 dan Gambar 5 bahwa *integrated EW systems* dapat dinyatakan dalam unsur-unsur menurut tahapan *disaster management* dan kerjasama antara *disaster management* dengan *stakeholders*. Tampak bahwa konsep/penyajian *integrated early warning systems* dapat berbeda-beda bergantung pada pendekatan yang dipakai.

METODE KAJIAN

Tempat dan waktu

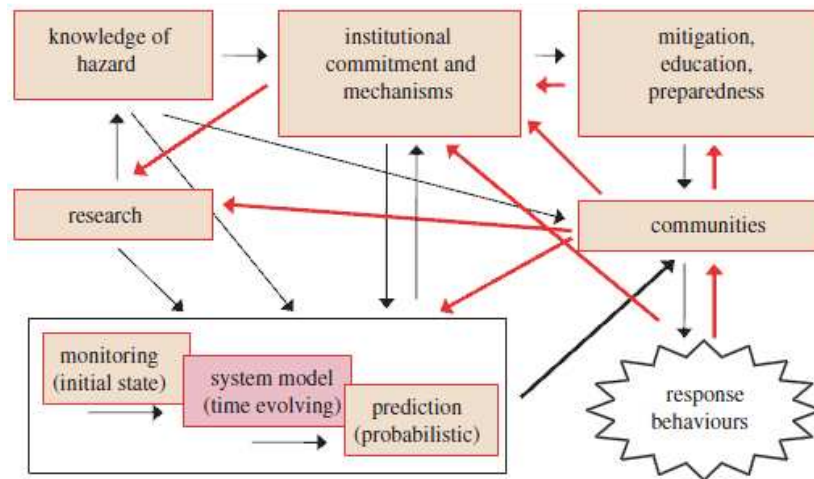
Kajian tentang resiko bencana alam gempa bumi ini khususnya dilakukan di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) karena DIY termasuk kawasan yang rawan bencana. Untuk menjawab pertanyaan secara eksplisit sebenarnya bencana jenis apa yang paling merugikan maka kajian ini dilakukan. Rentang data yang diperlukan untuk kajian adalah selama ± 40 tahun terakhir mulai dari tahun 1970 sampai dengan tahun 2010.

Data dan alat

Data yang berhubungan dengan resiko bencana di DIY pada parakteknanya tidak mudah diperoleh secara lengkap. Oleh karena itu data yang diperlukan diperoleh dari beberapa sumber, saling melengkapi dengan menggunakan alat/sarana website, paper maupun publikasi yang lain.. Data yang diperlukan ada yang sudah matang tetapi ada juga yang masih perlu diolah. Dengan demikian data yang diperoleh berupa data sekunder dan data primer.

Metode Analisis

Analisis atau bahasan terhadap data yang diperoleh dilakukan secara kualitatif dengan memperhatikan suatu fakta, intensitas ataupun kecenderungan kejadian gempa atau akibat yang timbul. Dengan menghubungkan, mengkomunikasikan dan menggunakan dasar teori yang ada maka pembahasan dapat dilakukan dan simpulan dapat dirumuskan.



Gambar 5 Integrated Early Warning Systems (Basher, 2006)

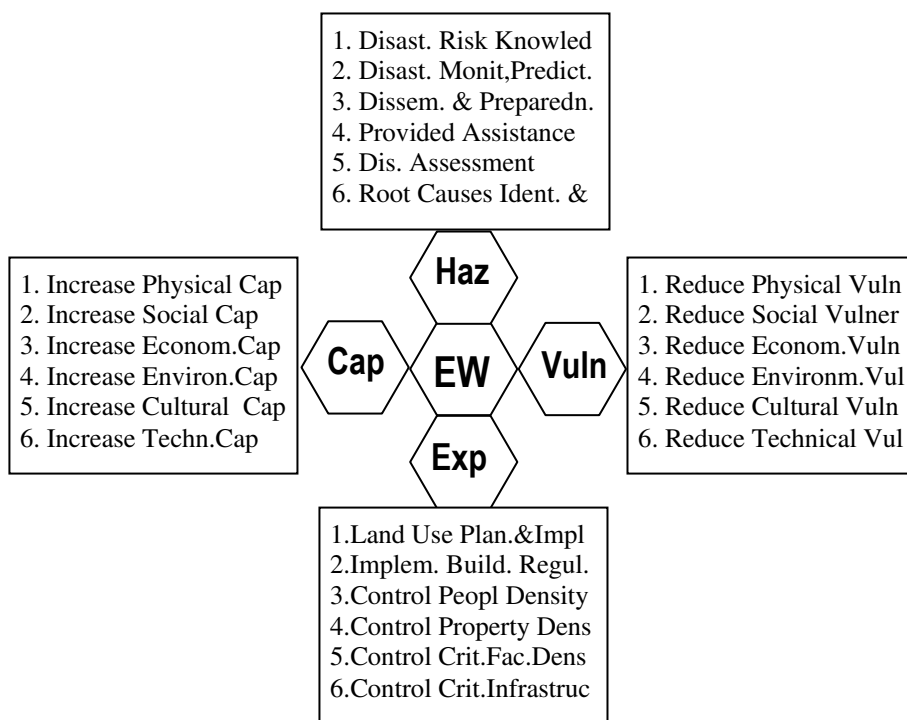
HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep Risk-Based Early Warning Systems (RBEW)

Masa kejadian bencana yang diikuti dengan *search and rescue*, *emergency response* dan *recovery* (periode I) pada umumnya juga tidak terlalu lama. Durasi selanjutnya sampai dengan kedatangan bencana berikutnya (periode II) jauh lebih lama dari durasi kajasama bencana sampai selesai *recovery*. Problem mengurasi resiko bencana pada hakekatnya tidak hanya terfokus pada periode I, tetapi justru pada periode II terdapat banyak hal yang harus diperbaiki. Konsep EW untuk mengurangi resiko bencana akan lebih efektif apabila tidak hanya diterapkan menjelang kejadian bencana tetapi juga pada periode II. Konsep EW menjelang kejadian bencana pada hakekatnya hanya mempersiapkan diri untuk mengurangi dampak *hazard* pada persamaan 1, persamaan 2, persamaan 3 atau persamaan.4.

Penurunan resiko akibat bencana tidak hanya usaha menurunkan kualitas/kuantitas *hazard* tetapi juga harus menurunkan pengaruh yang lain yaitu menurunkan tingkat kerentanan (*vulnerability*), menurunkan densitas nilai (*exposure*) dan menaikkan kapasitas (*capacity*). Usaha menurunkan pengaruh kerentanan dan densitas nilai serta menaikkan kapasitas tidaklah terjadi secara instan, tetapi harus

melalui tahapan/prioritas. Tahapan/prioritas yang dimaksud dimulai dari prioritas teratas dari 3-unsur yaitu "*in the most vulnerable condition, exposure and capacity*". Hal yang demikian itu berarti harus ada "*tahap identifikasi dini, prediksi, diseminasi informasi dan penyiapan dini*". Hal itu sebenarnya sama dengan definisi *early warning* yang diimplementasikan pada ke-4 unsur *riks* yang dimaksud. Dengan demikian EW tidak saja hanya difokuskan pada *hazard* tetapi juga harus diterapkan pada penurunan kerentanan (*vulnerability*), penurunan / pengendalian / monitoring densitas nilai (*exposure*) dan peningkatan kapasitas (*capacity*) sehingga secara keseluruhan diusulkan menjadi *risk-based early warning systems (RBEW)*. Sebagaimana dikatakan sebelumnya, hal-hal yang dilakukan di atas kebanyakan bersifat *instant /jangka pendek* yaitu menangani kemungkinan dampak bencana. Konsep integrated EW dapat melibatkan unsur penurunan kerentanan, densitas nilai dan peningkatan kapasitas. Kerentanan fisik bangunan misalnya dapat dielaborasi risikonya, dapat dimonitor tempat-tempatnya, dapat disebar-luaskan masalahnya kepada masyarakat, dapat dilakukan penyiapan untuk perbaikan, dapat dilakukan bantuan teknik/ketrampilan dan seterusnya. Hal yang sama dapat dilakukan pada kerentanan sosial, ekonomi dan sebagainya.



Gambar 6 Integrated early warning systems

Antara kerentanan dan kapasitas mempunyai pengaruh saling berlawanan, kerentanan yang baik adalah yang nilainya rendah sedangkan kapasitas yang baik nilainya yang tinggi. Masing-Masing jenis *vulnerability* dan *capacity* mempunyai butir-butir dan indikator sendiri-sendiri. Butir-butir pada setiap jenis *vulnerability* dan *capacity* disajikan secara lengkap oleh Hahn (2003) dan Anonim (2007b). Sementara itu EW pada unsur *exposure* utamanya ditujukan pada pengendalian taha-guna lahan, implementasi peraturan pembangunan, identifikasi/pengendalian kepadatan penduduk, bangunan, properti, fasilitas kritis maupun infrastruktur-2 yang penting.

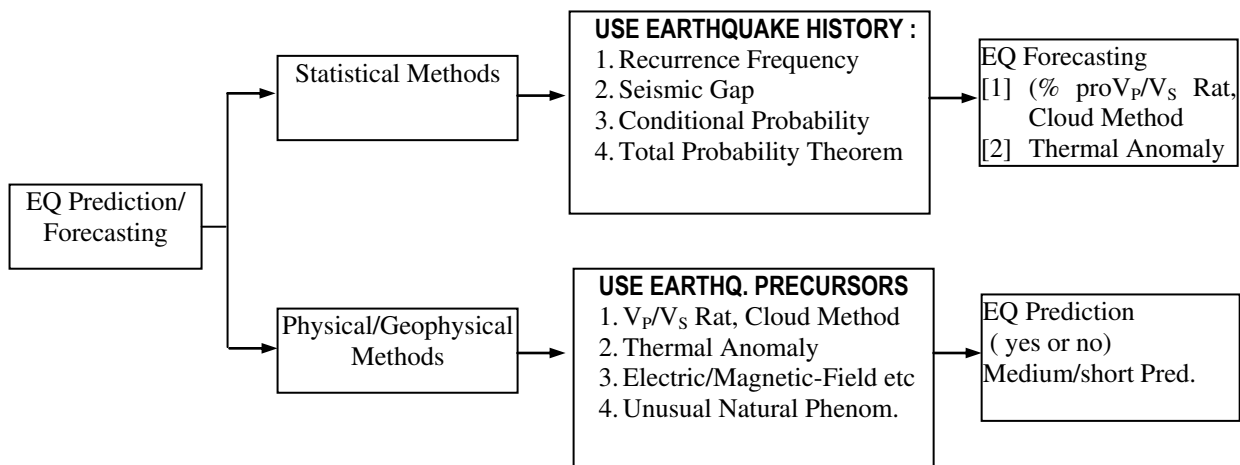
Earthquake Forecasting and Predicting

Terdapat 2-istilah yang kadang-kadang agak kacau penggunaannya yaitu *earthquake forecasting* dan *earthquake predicting*. Dua istilah tersebut sebenarnya mempunyai basis pijakan yang berbeda dan maksudnyapun juga berbeda. Long (2005) dan Anonim (2008) mengatakan bahwa *earthquake forecasting* menggunakan

sejarah kejadian gempa (*earthquake history*) dan menggunakan pendekatan statistik untuk mengestimasi probabilitas kejadian gempa. Probabilitas kejadian gempa dapat diestimasi mulai jangka dekat sampai jangka panjang. Sementara itu *earthquake prediction* menggunakan *earthquake precursors* dan pendekatan *physical/geophysical* untuk memprediksi kejadian gempa. Hasil prediksi banyak bersifat *yes* atau *no* dan prediksi kejadian gempa lebih banyak bersifat jangka pendek. Skematis perbedaan antara *earthquake forecasting* dan *earthquake prediction* adalah seperti yang disajikan pada Gambar 7.

Terdapat banyak metode yang dapat dipakai untuk memprediksi kejadian gempa, yang diantaranya adalah berdasarkan kelompok (Widodo, 2009b):

1. *Geophysic anomalies (geomagnetic field, Vp/Vs anomaly, earthquake light, gravitational field anomaly, foreshock events, heat current, strange animal behavior etc.)*



Gambar 7 Earthquake Forecasting and Predicting (Widodo, 2009a)

2. *Geochemistry anomalies (radon gas concentration, raising water temperature etc),*
3. *Geodetic anomalies (water level fluctuation, ground tilt occurrence, ground settlement etc.),*
4. *Geo-atmospheric interaction anomalies (thermal anomaly, cloud method, air humidity anomaly etc.)*

Salah satu contoh *earthquake forecasting* adalah probabilitas kejadian gempa dengan $M > 5,0$ yang terjadi akibat aktivitas sesar Opak di Yogyakarta. Dengan berdasar pada sejarah kejadian gempa akibat aktivitas sesar Opak dengan $M > 5$, maka dapat diestimasi probabilitas kejadian gempa tersebut untuk kurun/interval waktu mendatang. Gambar 9 adalah menyajikan probabilitas kejadian gempa $M > 5$ akibat aktivitas sesar Opak pada 10 tahun mendatang sejak tahun 2011. Hasil tersebut diperoleh dengan asumsi bahwa mekanisme, laju dan proses kejadian gempa yang akan datang dianggap sama dengan kejadian sebelumnya. *Earthquake forecasting* maupun *earthquake prediction* untuk selanjutnya akan dipakai untuk tujuan *disaster early warning*.

Aktivitas Kegempaan di Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY)

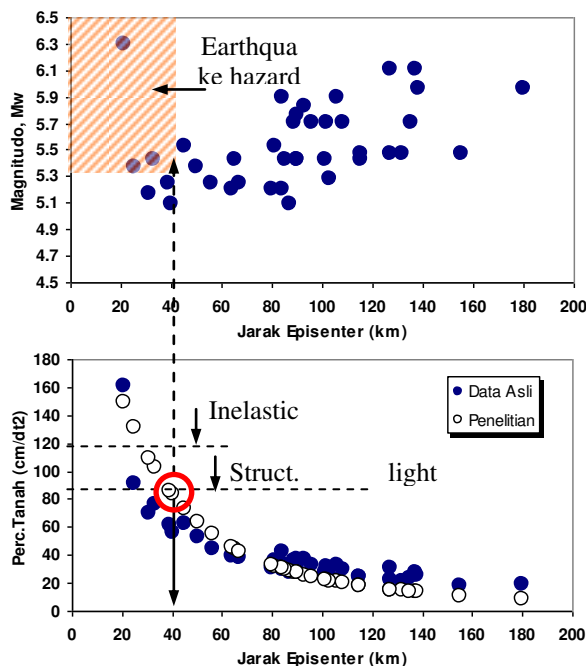
Sebagaimana disampaikan sebelumnya, data tentang kegempaan di suatu kawasan belum tentu tersedia dengan baik. Pada kajian ini data kegempaan di DIY hanya

diperoleh sejak tahun 1973 sampai sekarang. Data kegempaan yang dipakai pada kajian ini adalah data gempa utama yang berjarak maksimum 250 km dari kota Yogyakarta yang mempunyai magnitude $M > 5$. Data yang dimaksud dalam bentuk plot anatar jarak episenter vs magnitude gempa seperti yang disajikan pada Gambar 8.a).

Tampak pada Gambar 8.a) bahwa kebanyakan gempa yang relatif besar yang terjadi di DIY mempunyai jarak episenter antara 80 – 140 km. Jarak ini cukup jauh sehingga pada Gambar 8.b) hanya akan mengakibatkan percepatan tanah antara 20 – 40 cm/dt^2 . Gambar 8.b) menyajikan data dan hasil penelitian (Widodo dkk, 2011) kejadian gempa di DIY yang disajikan dalam plot antara jarak episenter vs. percepatan tanah. Tampak pada gambar bahwa hasil penelitian cukup mewakili data kejadian gempa yang ada walaupun cenderung *overestimate* pada gempa jarak dekat dan *underestimate* untuk gempa jarak jauh.

Menurut hasil penelitian, bangunan gedung beton bertulang mulai mengalami respons inelastik apabila dibebani gempa dengan percepatan tanah melebihi $\pm 120 \text{ cm}/\text{dt}^2$. Apabila beban Code berkisar antara 0,67 – 0,7 beban pada saat leleh pertama maka percepatan tanah yang akan mengakibatkan mulainya kerusakan kecil pada struktur bangunan adalah $\pm 80 \text{ cm}/\text{dt}^2$. Apabila nilai percepatan tanah tersebut di plot pada

Gambar 8.b) maka akan diperoleh jarak ± 40 km. Hal ini berarti bahwa bangunan akan mulai mengalami kerusakan kecil



Gambar 8 Plot antara rpisenter vs nagmitudo dan percepatan tanah gempa-2 di DIY

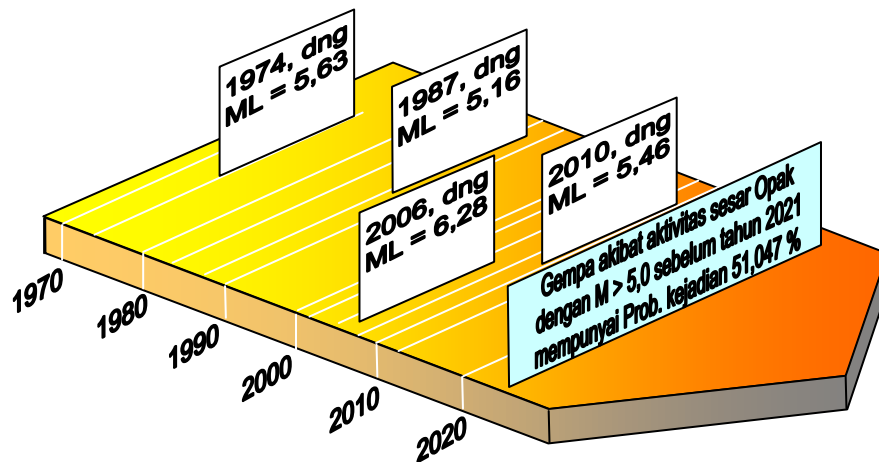
Dengan berdasar percepatan ± 80 cm/dt2 dan jarak episenter $R \leq 40$ km, maka menurut persamaan atenuasi yang dipakai magnitudo gempa M yang akan mengakibatkan percepatan tanah ≥ 80 km adalah $M \geq 5.3$. Selanjutnya dengan berdasar pada jarak episenter $R \leq 40$ km dan magnitudo gempa $M \geq 5.3$, maka pada Gambar 8.a) akan diperoleh sebaran gempa yang akan mengakibatkan kerusakan, sebagaimana daerah diarsir. Tampak pada gambar bahwa sebenarnya tidak banyak gempa di DIY yang mengakibatkan kerusakan bangunan. Walaupun jumlah gempa yang dimaksud tidak banyak tetapi berdasar pada informasi tersebut kiranya dapat diambil langkah-langkah *disaster early warning* (EW) khususnya meningkatkan kualitas bangunan (menurunkan kerentanan/*vulnerability*) di kawasan selatan DIY

apabila gempa dengan $M \geq 5,3$ (akan dijelaskan kemudian) apabila sumber gempa berjarah $R < 40$ km.

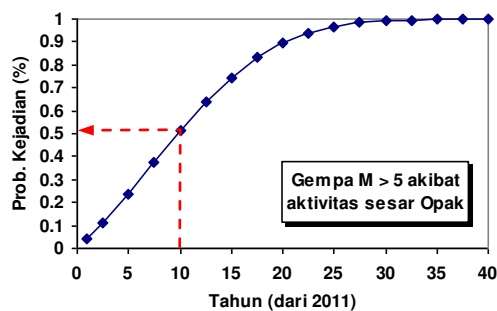
Probabilitas Kejadian Gempa akibat Aktivitas Sesar Opak

Selain infoemasi tentang kegempaan di DIY maka juga dapat dilakukan *forecasting* kemungkinan kejadian gempa, misalnya akibat aktivitas sesar Opak di DIY. *Forecasting* kemungkinan kejadian gempa dimasa mendatang disuatu kawasan akan lebih baik apabila disertai dengan data kegempaan yang relatif lengkap. Data yang berhunungan dengan kegempaan akibat aktivitas sesar Opak relatif terbatas, yaitu beberapa gempa sejak tahun 1973. *Forecasting* yang dilakukan dengan memakai metode conditional probability dan dengan anggapan bahwa proses, mekanisme, laju dan gerakan tektonik yang mengakibatkan gempa mendatang dianggap sama dengan periode sebelumnya. Hasil *forecasting* tersebut disajikan pada Gambar 9.

Pada Gambar 9 tampak bahwa probabilitas kejadian gempa dengan $M > 5$ akibat aktivitas sesar Opak sebelum tahun 2021 (10 tahun mendatang) sebesar $51,047 \% < 90 \%$. Hal ini berarti bahwa kejadian gempa pada periode tersebut tergolong "*likely*", berkemungkinan, belum pasti. Sementara itu probabilitas kejadian gempa $M > 5$ akibat aktivitas sesar Opak untuk rentang waktu 2 – 40 tahun dari tahun 2011 disajikan pada Gambar 10. Pada gambar tersebut tampak bahwa setelah 20 tahun dari tahun 2011 kemungkinan kejadian gempa sudah menjapai $\pm 90 \%$, suatu angka yang hampir pasti. Secara umum probabilitas kejadian gempa dimasa mendatang mengikuti fungsi distribusi kumulatif (*Cumulative Distribution Function, CDF*). Dengan hasil estimasi tersebut maka langkah-langkah *disaster early warning* (EW) segera dapat dirancang. Namun demikian hasil tersebut diperoleh dengan anggapan seperti yang disampaikan sebelumnya.



Gambar 9. *Forecasting* kejadian gempa akibat aktivitas sesar Opak sebelum tahun 2021



Gambar 10. Probabilitas kejadian gempa $M > 5$ akibat aktivitas sesar Opak sampai 40 tahun mendatang

Probabilitas Kejadian, Prediksi Kejadian dan Pringatan Dini (*Early Warning*)

Probabilitas kejadian gempa, prediksi kejadian gempa sudah disampiakan pengertian dan contohnya. Khusus untuk prediksi kejadian gempa persoalannya menjadi sangat berbeda, karena jawaban yang diharapkan bukan probabilitas tetapi “ya” atau “tidak”, artinya terjadi gempa atau tidak. Prediksi kejadian gempa selengkapnya akan menyangkut : 1) prediksi magnitudo M ; 2) prediksi tempat kejadian dan 3) prediksi waktu, kapan gempa akan terjadi.

Prediksi tempat kejadian gempa secara kasar kira-kira sudah diketahui tempatnya mulai dari sudah diketahuinya aktivitas tektonik, kondisi geologi dan

sejarah/episenter kejadian gempa-gempa sebelumnya. Dengan demikian data tersebut sudah dapat dipakai untuk peringatan dini (EW) secara kasar. Magnitudo gempa juga penting karena akan mempengaruhi dampak yang akan ditimbulkan. Namun demikian prediksi magnitudo ini tidak begitu dipermasalahkan/dipentingkan. Prediksi yang paling dipentingkan adalah kapan gempa akan terjadi. Prediksi waktu kejadian gempa dapat terdiri atas prediksi jangka panjang (tahun, puluhan tahun), jangka menengah (bulan-tahun) dan jangka pendek (hari-minggu). Mengingat orang pada umumnya tidak sabar menunggu berbulan-bulan, maka prediksi waktu dikehendaki prediksi jangka pendek.

Menurut sejarah usaha memprediksi kejadian gempa sudah dimulai di China pada tahun 132 AD oleh Zhang Heng dengan memakai seismometer. Hasil prediksinya masih sangat sederhana yaitu baru terbatas menentukan arah guncangan. Setelah itu prediksi kejadian gempa tidak memperoleh kemajuan yang berarti. Baru setelah 1800 tahun kemudian, tepatnya pada tahun 1975, manusia baru berhasil memprediksi kejadian gempa yaitu gempa Haicheng, China 4 Februari 1975. Keberhasilan itu dimulai dengan adanya perubahan elevasi tanah, elevasi air tanah dan adanya gempa-gempa kecil awal

(foreshock). Pada hari-hari terakhir sebelum gempa terjadi ditandai dengan adanya perilaku binatang yang tidak seperti biasanya dan evakuasi pun segera dilakukan, dan ternyata gempa benar-benar terjadi. Telah banyak nyawa manusia diselamatkan oleh keberhasilan itu. Tetapi hal itu adalah keberhasilan yang pertama sekaligus terakhir karena pada gempa berikutnya, yaitu Tangsan, China 27 Juli 1976 telah merenggut lebih dari 250 000 manusia.

Sampai dengan saat ini perburuan tentang kejadian gempa tidak serta merta surut, yang pada garis besarnya terdapat 2 kelompok besar yaitu kelompok optimistis dan kelompok pesimistis. Kelompok optimistis berdasar pada fakta bahwa gempa sedang/besar bukanlah gempa-gempa yang terjadi secara random baik tempat maupun waktu. Perkiraan tempat-tempat yang berkemungkinan terjadi gempa sekarang ini sudah diketahui dengan baik (disekitar *plate boundaries*). Berdasarkan keterangan di atas tampak jelas bahwa hasil prediksi gempa ternyata tidak/belum bermanfaat bagi usaha kemanusiaan, karena yang dibutuhkan adalah *short term prediction* (dalam minggu bahkan hari). Kelompok pesimistik berpendapat bahwa kejadian gempa tidak akan dapat diprediksi secara akurat apabila patahan/*faults* disemua tempat tidak diketahui secara jelas (misalnya seperti kasus gempa Northridge, 1994 dan gempa Kobe, 1995). Lebih jauh lagi kondisi bumi secara umum adalah heterogen, sangat besar untuk ukuran manusia, bentuk *faults* umumnya sangat tidak beraturan, dan secara umum *faults* dan *focus* adalah suatu objek yang tidak dapat dijangkau/*inaccessibility* (Byliner dkk, 1998). Berdasarkan atas hal-hal tersebut Aki (1995) mengatakan bahwa kejadian gempa adalah *space, time, state dependent* dan *fault heterogeneities multiple scale variables*.

Banyak metode yang telah dikembangkan dalam rangka memprediksi kejadian gempa misalnya dengan memakai kondisi *earthquake gap*, perubahan kecepatan

gelombang primer, *foreshock precursors*, *elastic strain build-up rate* perubahan *electrical conductivity*, *water flow rate* (Lomnitz dan Rosembueth, 1976) sampai pada *cloud method*, *sun-eclipse method* tetapi hasilnya masih nihil. Para ahli justru mengatakan *it may impossible to predict an earthquake in the exact time and place*, sehingga usaha untuk itu dapat dikatakan membuang-buang waktu, sia-sia dan pemborosan. Dengan demikian prediksi kejadian gempa jangka pendek sampai saat ini belum dapat berhasil sehingga belum dapat dipakai sebagai bahan peringatan dini (EW) secara dekat.

Prediksi Kejadian Gempa

Strange Animal Behavior

Pada penjelasan di atas telah disampaikan bahwa prediksi gempa secara tepat baik magnitudo, tempat dan waktu kejadian sekarang ini adalah sesuatu yang mustahil. Namunn demikian para peneliti terus mencari dan mengembangkan metode prediksi kejadian gempa yang salah satunya adalah memanfaatkan gejala *strange animal behavior* sebelum kejadian gempa. Hasil penelitian sementara perilaku aneh binatang-binatang sebelum gempa Yogyakarta 27 Mei 2006 adalah seperti yang disajikan pada Gambar 11.

Pada gambar 11.a) menunjukkan perilaku cacing-tanah sbelum kejadian gempa. Sebelum kejadian gempa cacing tanah keluar dari dalam tanah dan menggelepar-2 dipermukaan tanah. Tampak pada gambar bahwa dibanyak tempat cacing tanah keluar pada rentang waktu 9 – 2 hari menjelang kejadian gempa pada jarak 10 – 20 km dari sesar Opak. Acuan yang dipakai pada kasus ini adalah : 1) unusual place; 2) unusual time dan 3) unusual number. Maksudnya adalah tidak biasa cacing tanah menggelepar-2 di permukaan tanah/paving block, juga tidak biasa hal tersebut terjadi pada musim kemarau (Mei 2006 musim kemarau) dan tidak biasa cacing tanah yang keluar mencapai puluhan, ratusan bahkan ribuan. Hal ini berarti telah terjadi apa-apa

di dalam tanah 9-2 hari sebelum gempa Yogyakarta (27 Mei 2006) yang dapat dirasakan oleh cacing tanah, tetapi tanda-tanda tersebut sama sekali tidak diperhatikan oleh manusia !.

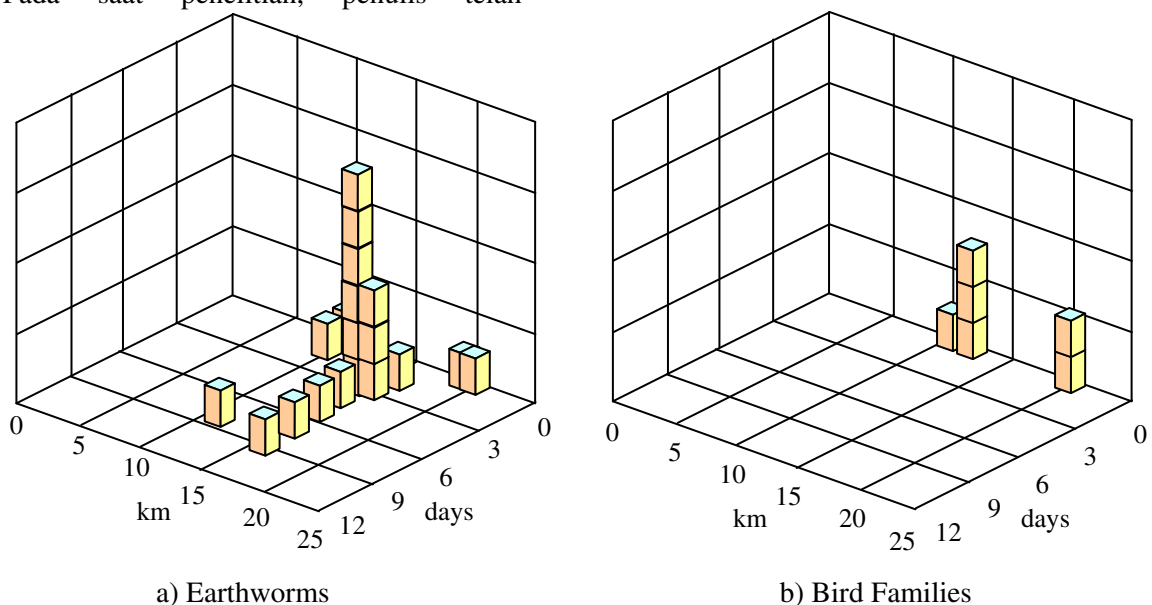
Gambar 11.b) menunjukkan perilaku aneh keluarga burung, termasuk burung unta di sawah, burung yang ada disangkar dan itik yang ada di kandang. Hewan-hewan tersebut menunjukkan perilaku yang aneh menjelang kejadian gempa. Banyak perilaku yang perilaku binatang yang lain yang dapat disampaikan tetapi karena terbatasnya tempat dan waktu maaka semuanya tidak dapat disajikan. Apabila para peneliti dan masyarakat arif dan bijaksana maka sebenarnya perilaku-perilaku aneh binatang tersebut dapat dipakai sebagai tanda dan segera dapat melakukan disaster early warning (EW).

Thermal Anomaly

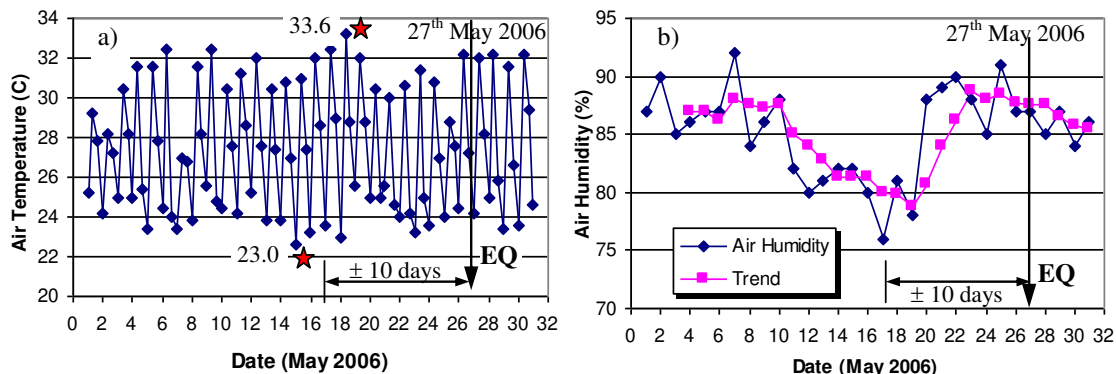
Thermal anomaly juga salah satu metode yang dikembangkan untuk dapat dipakai sebagai metode prediksi kejadian gempa. Pada saat penelitian, penulis telah

menelusuri kemungkinan terjadinya thermal anomaly ini sebelum kejadian gempa bumi Yogyakarta 27 Mei 2006. Data anomaly termal diperoleh dari stasiun Meteorologi TNI AU di Adisucipto. Hasilnya adalah seperti yang disajikan pada Gambar 12.

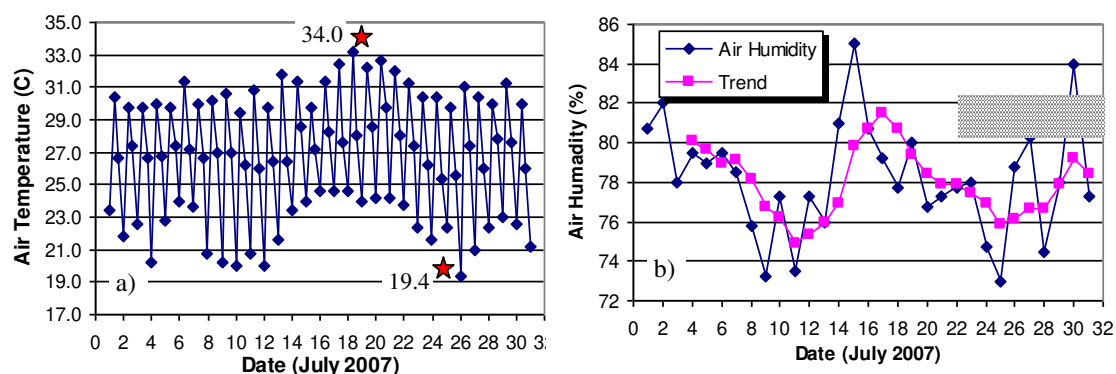
Gambar 12.a) menunjukkan perkembangan temperatur di Yogyakarta pada bulan Mei 2006. Menurut teori yang diajukan oleh para peneliti gempa bumi terjadi $\pm 7-14$ hari setelah suhu udara mencapai maksimum dan setelah terjadi kenaikan kelembaban udara. Berdasarkan hal ini dan dengan memperhatikan Gambar 12.a) dan Gambar 12.b) gempa Yogyakarta terjadi pada tanggal 27 Mei 2006, relatif cocok dengan teori. Pada bulan Juli 2007 kejadian serupa terjadi lagi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.a) dan Gambar 13.b) namun tidak terjadi gempa bumi. Hal ini berarti bahwa teori ini masih memerlukan banyak perbaikan sebelum menjadi metode yang lebih handal. Oleh karena itu *disaster early warning (EW)* belum dapat diterapkan berdasar pada gejala *thermal anomaly* ini.



Gambar 11 Statistik perilaku abeh binatang sebelum gempa Yogyakarta 27 Mei 2006.



Gambar 12 Perkembangan temperatur dan kelembaban udara di Yogyakarta bulan Mei 2006



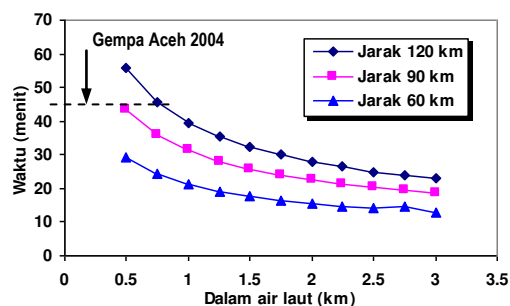
Gambar 13 Perkembangan temperatur dan kelembaban udara di Yogyakarta bulan Juli 2007

Prediksi Kedatangan Gelombang Tsunami.

Secara teoritik syarat-syarat terjadinya tsunami sudah diidentifikasi secara baik oleh para peneliti. Namun demikian problem terletak pada penentuan mekanisme kejadian gempa (apakah terjadi *dip-slip*) yang terjadi di dasar laut, yang tidak dapat diketahui dan harus diputuskan pada waktu yang relatif singkat. Namun demikian dengan bantuan serangkaian alat deteksi tsunami, kejadian tsunami dapat diputuskan dengan data yang lebih baik.

Apabila kejadian tsunami telah diputuskan maka berapa lama gelombang tsunami akan mencapai daratan dan seberapa jauh jangkauan (*run up*) gelombang tsunami akan terjadi adalah persoalan berikutnya. Untuk itu perlu dilakukan *assessment* tentang durasi waktu gelombang tsunami untuk mencapai daratan sehingga disaster

early warning (EW) dapat dilakukan. Salah satu contoh hasil *assessment* tersebut adalah seperti yang disajikan pada Gambar 14.



Gambar 14 Durasi waktu gelombang tsunami untuk mencapai daratan

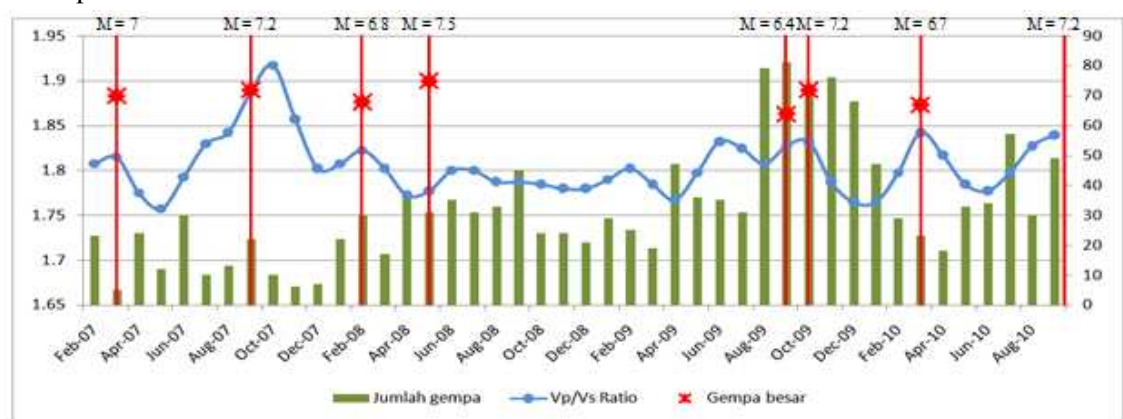
Secara teoritik durasi waktu gelombang tsunami untuk mencapai daratan dipengaruhi oleh beberapa hal, yang diantaranya adalah kedalaman air laut pada sumber gempa, jarak sumber gempa ke daratan, konfigurasi dasar laut menuju

pantai dan tinggi gelombang tsunami di laut bebas. Dengan berbagai penyederhanaan/anggapan maka Gambar 14 adalah durasi waktu yang diperlukan oleh gelombang tsunami untuk menuju daratan untuk tinggi gelombang tsunami di laut bebas $h_0 = 1,5$ meter. Dengan contoh hasil assessment seperti itu maka *disaster early warning (EW)* dapat dilakukan.

Anomali Vp/Vs

Pada awal tahun 1962 para ahli geofisika Rusia telah berhasil mendeteksi perubahan rasio kecepatan gelombang primer (*P-wave*) relatif terhadap gelombang geser (*S-wave*) sebelum terjadinya gempa Tadjikistan (1962). Rasio gelombang gempa itu cenderung lebih kecil daripada rasio normal dan berlangsung beberapa saat sebelum gempa bumi terjadi. Diketahui bahwa gempa bumi terjadi segera setelah rasio gelombang gempa itu kembali normal. Drajat (2011) memberikan contoh hasil observasi rasio gelombang gempa di Padang itu adalah seperti pada Gambar 15.

Pada Gambar 15 tampak bahwa pada umumnya gempa bumi terjadi segera setelah rasio Vp/Vs cenderung kembali pada posisi normal. Hal tersebut dapat dilihat relatif agak konsisten pada kejadian beberapa gempa. Hal ini berarti bahwa metode ini sudah relatif reliabel, sehingga *disaster early warning (EW)* dimungkinkan untuk dapat diimplementasikan mana kala ada kepastian.



Gambar 15 Perubahan rasio Vp/Vs sebelum terjadi gempa bumi (Drajat, 2011)

Metode Prediksi Kejadian Gempa yang lain.

Masih banyak metode prediksi kejadian gempa yang dikembangkan oleh para peneliti, walaupun kebanyakan belum memberikan hasil. Beberapa metode yang dimaksud misalnya adalah metode seismic gap (jangka panjang), metode getaran awal (*foreshocks*), *cloud method*, *geomagnetic anomaly method*, *gravitational field anomaly method* dll. Semua hal tersebut tidak dapat disajikan pada tulisan ini karena terbatasnya tempat dan waktu.

SIMPULAN

Fakta kejadian gempa bumi sebagai suatu informasi kebencanaan telah dilakukan. Beberapa metode/hasil *earthquake forecasting* dan *earthquake predicting* telah disampaikan, semikian juga tentang konsep *disaster early warning*. Berdasarkan atas hal-hal tersebut maka dapatlah disimpulkan sebagai berikut ini.

1. Tidak dapat dipungkiri bahwa kejadian bencana alam di dunia dan kerugian yang terjadi cenderung meningkat dengan berbagai alasan, termasuk didalamnya Indonesia dan DIY,
2. *Disaster early warning* akan lebih efektif dan efisien apabila dilaksanakan secara komprehensif sehingga memakai konsep *integrated disaster early warning* tidak hanya sekedar *hazard-based early warning*,

3. Konsep *integrated disaster early warning* dapat didekati dari beberapa arah yang salah satunya diusulkan berdasarkan *risk-based early warning (RBEW)*
4. Berdasarkan data yang ada, gempa bumi di Yogyakarta yang akan membuat kerusakan adalah gempa bumi yang magnitudo $M > 5,3$ dengan jarak episenter $R < 40$ km,
5. *Earthquake forecasting* di suatu kawasan dapat dibuat, misalnya gempa akibat aktivitas sesar Opak dengan magnitudo $M \geq 5,0$ sebelum tahun 2021 mempunyai probabilitas kejadian sebesar 51,047 %
6. Berbagai macam metode earthquake prediction telah dikembangkan oleh para peneliti, yang salah satunya adalah strange animal behavior yang ternyata terjadi sebelum gempa Yogyakarta 27 Mei 2006.
7. Baik *risk-based early warning*, *earthquake forecasting* dan *earthquake prediction* yang dilakukan mempunyai potensi untuk dapat dipakai sebagai *disaster early warning*, khususnya di DIY.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, (2003), *Integrating Early Warning into Disaster Risk Reduction Policies*, Second International Conference on Early Warning, 16-18 October 2003, Bonn, Germany,
- Anonim, (2005), *Hyogo Framework for Action (HFA) 2005-2015, Building Resilience of Nations and Communities to Disasters*, International Strategy For Disaster Reduction
- Anonim, (2007a), *Early Warning Systems, State of the Art Analysis and Future Directions*, United Nations Environment Programmes,
- Anonim, (2007b), *Vulnerability and Capacity Analysis, Tool for Mainstreaming Disaster Risk Reduction, Prevention Consortium Geneva Switzerland,*
- Anonim, (2008), *Earthquake Forecasting Concept: Proceeding of the 2008 RMS Science Symposium Advance in Earthquake Forecasting*
- Basher, R., (2006), *Global early warning systems for natural hazards: systematic and people-centred*, Philosophical Transaction 364, pp. 2167–2182
- Drajat, N., (2010), *Personal Communication*
- Hahn, H, De Leon, J.C.V., Hidayat, R., (2003), *Comprehensive Risk Management by Communities and Local Government: Indicators and Other Disaster Risk Management Instruments for Communities and Local Government*, Regional Policy Network in Natural Disasters, Dialogue Inter Americal Development Bank
- Long, J., (2005), *Earthquake Prediction Methods*, diakses 1 November 2014 dari <http://www.cs.sjsu.edu/faculty/lee/cs157b/Earthquake%20Prediction%20Methods.ppt>
- Widodo, (2009), *Understanding the Development of the Earthquake Forecasting/Prediction and Natural Phenomena before The 27th May 2006 Yogyakarta Earthquake*, Kerjasama Seminar antara FTSP UII dengan Pemerintah Kota Yogyakarta, Yogyakarta
- Widodo P, Wijaya H.H, Sunarto, (2011), *Intensity, Attenuation and Building Damage Under the 27th May 2006 Yogyakarta Earthquake*, Proceeding 2nd International Conference on Disaster Management and Human Health; Reducing Risk and Improving Outcomes, WIT Press, London.