

Evaluasi awal kerentanan pelulukan/likuefaksi daerah Kendal dan sekitarnya, Jawa Tengah

UNGKAP M. LUMBANBATU dan SUYATMAN HIDAYAT

Pusat Survei Geologi, Jln. Diponegoro No. 57, Bandung

SARI

Daerah penelitian merupakan suatu wilayah yang rentan terhadap pelulukan karena daerah ini tersusun oleh endapan Kuarter yang sifatnya masih urai dan jenuh air. Endapan Kuarter tersebut terendapkan di lingkungan pengendapan rawa, alur estuari, laut dekat pantai, laut lepas pantai, dan fluvial (endapan limbah banjir, cekungan banjir, dan alur sungai purba). Di antara endapan Kuarter tersebut, endapan alur sungai purba dan alur estuari yang terdiri atas pasir halus hingga menengah (*fine-to medium-grained sand*) adalah endapan yang mempunyai kerentanan tinggi terhadap pelulukan.

Zona sumber gempa bumi sebagai pemicu terjadinya gempa bumi, yang dapat mengakibatkan terjadinya bencana pelulukan, bersumber dari aktivitas sesar naik yang terletak sebelah selatan daerah penelitian dan dari Lajur Subdaksi Jawa. Gempa bumi yang dihasilkan oleh aktivitas sesar naik adalah gempa bumi dangkal, sedangkan yang dihasilkan oleh subdaksi adalah gempa dalam.

Daerah penelitian ini dibagi menjadi wilayah kerentanan pelulukan rendah, sedang, dan tinggi. Pembagian ini didasarkan pada sifat fisik endapan rentan pelulukan, besar butir, ketebalan, kedudukan lapisan pasir terhadap permukaan air tanah, serta ketebalan dan sifat fisik endapan penutup.

Kata kunci: kerentanan pelulukan, sumber gempa bumi, Kendal, sesar

ABSTRACT

The investigated area is a region prone to liquefaction hazards since it consists of loose, saturated Quaternary deposits. The Quaternary deposits were deposited in several sediment environments such as swamp, estuary, near shore, off shore, and fluvial (flood plain, flood basin and paleo channel). Among those Quaternary deposits, the paleo channel and estuary deposits which mainly consist of fine - to medium - sand have high susceptibility to liquefaction.

An earthquake-source zone which is able to trigger earthquake and to cause liquefaction hazards is known to be thrust fault and subduction zones. Earthquakes produced by thrust fault activities are classified as shallow earthquakes while earthquakes produced by a subduction zone are deep earthquakes.

The investigated area is divided into low liquefaction susceptibility, moderate susceptibility and high liquefaction susceptibility zones. This division has been made based on physical characteristic of the sand deposits, grain size, thickness of sand and its position to groundwater level as well as the physical character of overburden layer.

Keywords: liquefaction susceptibility, earthquake source, Kendal, fault

PENDAHULUAN

Ditinjau dari letak geografisnya, daerah penelitian berpotensi untuk berkembang dengan sangat pesat, karena daerah penelitian ini terletak antara Bandung dan Jakarta di sebelah barat dan Semarang

di sebelah timur. Konsekuensinya, pertumbuhan penduduk cenderung meningkat dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, seiring dengan pertambahan penduduk, maka percepatan perkembangan pembangunan di bidang penyediaan berbagai sarana, seperti pemukiman, perkantoran, kawasan

industri, sarana transportasi, dan sebagainya perlu dilakukan. Perencanaan pengembangan wilayah yang berwawasan perlu mempertimbangkan potensi sumber daya serta kendalanya (limitasi). Potensi sumber daya alam perlu dianalisis supaya terdapat keseimbangan antara potensi ketersediaan sumber daya alamnya dengan kebutuhan.

Hal penting lainnya yang perlu dikaji adalah kendala atau limitasi yang terdapat di wilayah tersebut. Kendala yang dimaksudkan dalam tulisan ini adalah bencana geologi berupa ancaman bahaya pelulukan/likuifaksi. Dengan mengetahui potensi bencana pelulukan yang mengancam daerah tersebut, maka perencanaan pengembangan wilayah untuk peruntukan pemukiman, kawasan industri, perdagangan, dan wisata dapat ditata sesuai dengan daya dukung lahan.

Ditinjau dari aspek geologi dan kegempaan maka daerah penelitian ini terindikasi rentan terhadap pelulukan. Hal ini didasarkan pada batuan penyusun di daerah penelitian yang terdiri atas hampir 90 % merupakan endapan Kuartar muda (Thanden dr., 1996). Endapan Kuartar muda tersebut disusun oleh berbagai endapan sedimen klastika yang sifatnya masih urai (*loose*) dan belum mengalami pemadatan/konsolidasi. Selain itu, posisi permukaan air tanah dangkal diperkirakan tidak dalam, karena daerah penelitian merupakan daerah dataran pantai (*coastal plain*).

Sementara dari aspek kegempaan, daerah penelitian ini cukup berpotensi untuk digoncang gempa, walaupun lajur subdaksi yang dianggap merupakan lajur sumber gempa yang dapat memicu pelulukan terletak jauh di selatan. Terbukti pada tanggal 8 Agustus 2007 pukul 04:58 terjadi gempa yang cukup besar (M 7,5 skala Richter), dengan kedalaman 289,2 km. Gempa ini dikenal dengan nama Gempa Indramayu. Walaupun kedalaman gempa cukup dalam, namun getaran yang ditimbulkannya dirasakan hingga ke Pulau Bali di sebelah timur dan Padang di sebelah barat. Berdasarkan analisis *momen tensor* yang dibuat oleh USGS, fokal mekanisme gempa menunjukkan sesar naik dengan arah dan kemiringan sesar N 323°E / 28°. Menurut BMG, koordinat titik pusat gempa terletak pada 6,17° LS dan 107,66° BT, lebih kurang 40 km sebelah barat laut Kota Bandung. Di pihak lain, USGS menyebutkan koordinat titik pusat gempa adalah 5,924°LS dan

107,741° BT. Berdasarkan kedua informasi tersebut, apabila kedua data tersebut diplot ke dalam peta, terlihat bahwa letak titik pusat gempa oleh BMG lebih dekat ke pantai dibandingkan dengan letak titik pusat dari USGS.

Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut di atas (aspek litologi, aspek kegempaan, dan posisi permukaan air tanah dangkal), daerah ini diperkirakan dapat mengalami bencana pelulukan, dan karenanya perlu dilakukan penelitian yang lebih terperinci menyangkut kejadian bahaya pelulukan di wilayah ini.

Seperti diketahui, bencana akibat pelulukan merupakan salah satu bencana yang paling merusak dan menimbulkan kerugian yang cukup besar. Contoh berikut ini adalah gempa-gempa yang memicu terjadinya pelulukan dan menimbulkan korban jiwa, serta kerugian material yang cukup besar, seperti Gempa Niigata (Jepang) 1964, Gempa Alaska (USA) 1964, Gempa Flores 1992, Gempa Biak 1996, Gempa Aceh 2004, dan Gempa Yogyakarta 2007.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mempelajari kerentanan bencana pelulukan (*susceptibility*) yang dibuat berdasarkan sifat fisik endapan rentan pelulukan dan kedudukannya terhadap permukaan air tanah dangkal, serta faktor lainnya, seperti posisi lapisan pasir, ketebalan lapisan pasir, jenis batuan yang menindih dan mengalasi lapisan pasir di daerah ini. Tujuan penelitian ini adalah untuk menggambarkan penyebaran tingkat potensi pelulukan di seluruh daerah penelitian. Dengan demikian, perencanaan pengembangan wilayah dapat dilakukan dengan mengacu pada peta tersebut, sehingga hasil-hasil pembangunan dapat terhindar dari ancaman bencana pelulukan.

LOKASI PENELITIAN

Daerah penelitian adalah Kabupaten Kendal, Provinsi Jawa Tengah, yang secara geografis terletak pada koordinat 110°00' – 110°15' Bujur Timur dan 6° 50' – 7° 00' Lintang Selatan (Gambar 1). Daerah penelitian dapat dijangkau melalui jalan darat menggunakan kendaraan roda empat/dua dengan kondisi jalan aspal baik, namun untuk beberapa tempat harus ditempuh dengan berjalan kaki.

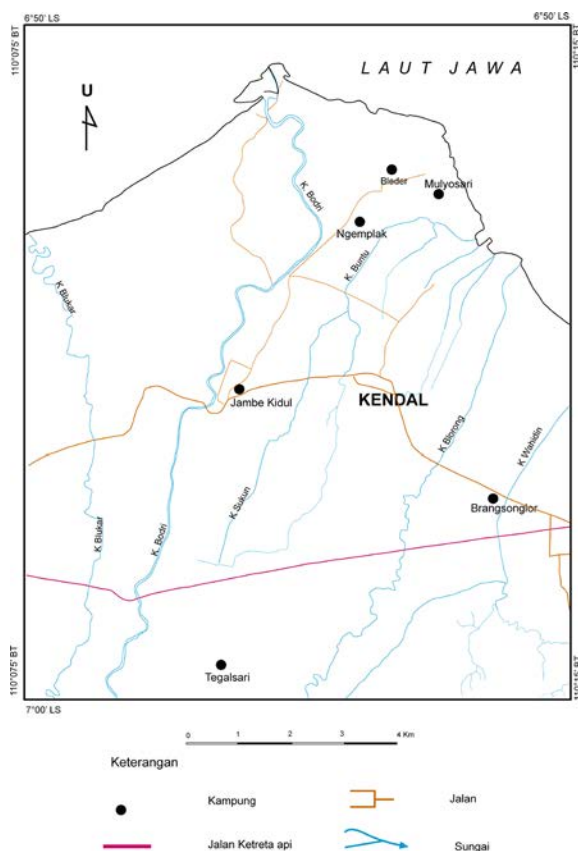
METODE PENELITIAN

Untuk mendapatkan data, dilakukan pemboran dangkal dengan menggunakan *hand auger*. Pemboran dilakukan secara acak di daerah-daerah yang ditempati oleh endapan Kuarter. Jumlah pemboran sebanyak 25 titik bor. Selanjutnya, untuk menganalisis kerentanan pelulukan dilakukan prosedur berikut:

1. Menganalisis jenis batuan dan lingkungan pengendapannya. Hal ini dilakukan dengan membuat deskripsi batuan menyangkut sifat fisik (warna, kandungan fosil, kandungan material organik, kandungan lempung, kandungan mineral, besar butir, bentuk butir, struktur, kekompakan, dan sifat fisik lainnya). Berdasarkan hasil pemerian tersebut kemudian dilakukan pengelompokan batuan sesuai dengan lingkungan pengendapannya.
2. Mengukur kedalaman permukaan air tanah

dangkal. Kedalaman permukaan air tanah dangkal dapat diketahui pada saat pemboran dilakukan.

3. Melakukan pengamatan khusus terhadap lapisan pasir jenuh air yang mencakup ketebalan, pemilihan butir, besar butir dan kandungan lempungnya, serta ketebalan endapan pasir, jenis batuan yang menindih dan mengalasi lapisan pasir. di daerah ini.
4. Melakukan analisis laboratorium terutama ditujukan untuk mendapatkan kisaran besar butir endapan pasir. Pelulukan biasanya terjadi pada endapan pasir dengan kisaran butir tertentu. Sebanyak empat percontoh batuan dikirimkan ke laboratorium untuk keperluan tersebut.
5. Mengidentifikasi lajur sumber gempa bumi dan menggambarkan sebaran titik pusat gempa dangkal, sedang, dan dalam.
6. Memetakan kategori/tingkat potensi pelulukan (*likuefaksi*).



Gambar 1. Peta lokasi daerah Kendal dan sekitarnya.

GEOLOGI UMUM

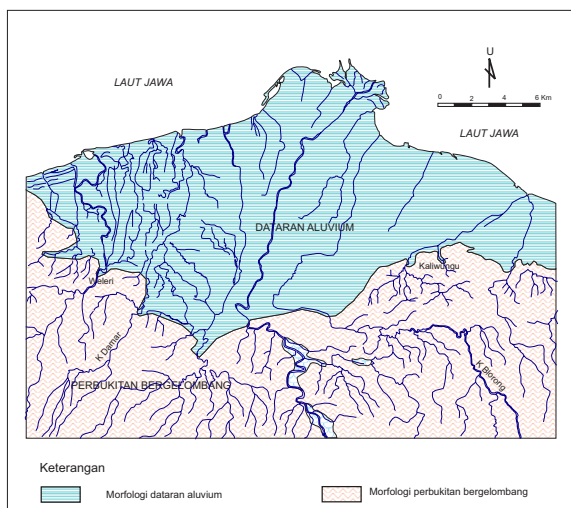
Geomorfologi

Morfologi daerah penelitian dapat dikelompokkan menjadi dua satuan, yaitu satuan perbukitan bergelombang dan satuan dataran aluvium (Gambar 2). Pembagian ini terutama didasarkan pada kondisi bentang alamnya.

Satuan Dataran Aluvium

Satuan ini terdiri atas satuan dataran pantai, sungai, dan rawa. Kemiringan lereng berkisar dari datar sampai agak landai ($0 - 5^\circ$), dengan ketinggian kurang dari 1 m sampai lebih kurang 10 m. Satuan ini disusun oleh endapan rawa dan sungai yang pada umumnya terdiri atas lempung, pasir, lanau, lumpur, dan gambut. Secara umum, tumbuhannya didominasi oleh semak dan rawa. Sungai utama yang mengalir di daerah ini adalah Kali Bodri, Kali Kuntor, Kali Blukar, dan Kali Cangkring yang hulu-nya bersumber dari perbukitan sebelah selatan dan bermuara di pantai utara Jawa. Material hasil erosi yang kemudian diangkut oleh sungai ini diendapkan di pantai utara Jawa dan membentuk endapan delta aktif.

Secara umum, terlihat bahwa kerapatan pola



Gambar 2. Peta geomorfologi daerah penelitian.

aliran yang berkembang di sebelah timur lebih jarang bila dibandingkan dengan kerapatan pola aliran di sebelah barat. Di sebelah timur berkembang pola aliran subparalel - paralel, sedangkan di sebelah barat dan di sebelah selatan berkembang pola aliran subdendritik - dendritik (Gambar 3).

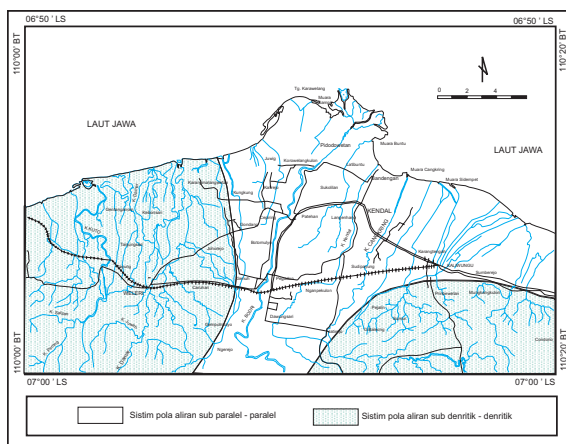
Satuan Perbukitan Bergelombang

Morfologi satuan perbukitan bergelombang mempunyai kemiringan lereng berkisar dari agak landai sampai agak terjal ($5 - 25^\circ$) dengan ketinggian antara 50 m sampai 300 m di atas permukaan laut. Sekitar 25% daerah penelitian ditempati oleh satuan ini, yang tersebar di sebelah selatan daerah penelitian.

Batuan yang menyusun satuan morfologi ini pada umumnya terdiri atas batupasir tufan, konglomerat, dan breksi vulkanik. Breksi vulkanik diendapkan sebagai lahar (Thanden drr., 1996).

TATAAN STRATIGRAFI

Menurut Thanden drr. (1996) urutan stratigrafi daerah penelitian disusun oleh Formasi Damar, Endapan Rawa, dan Aluvium. Hubungan antara Formasi Damar dengan endapan aluvium/rawa adalah tidak selaras. Pemerian tiap-tiap formasi, mulai dari umur tua ke yang muda, adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Sistem pola aliran daerah penelitian.

Formasi Damar (QTd)

Formasi Damar tersingkap di sekitar Sungai Damar yang letaknya sebelah barat daya daerah penelitian. Formasi ini berumur Plio-Plistosen, dan sedimennya sebagian diendapkan di lingkungan nonmarin, yang diindikasikan oleh fosil sisa vertebrata. (Thanden drr., 1996). Formasi ini terdiri atas batupasir tufan, konglomerat, dan breksi vulkanik. Batupasir mengandung mineral mafik, felspar, dan kuarsa. Formasi ini tersebar di sebelah selatan daerah penelitian dengan pola penyebaran timur – barat.

Endapan Aluvium (Qal)

Endapan Aluvium tersebar cukup luas dan menutupi hampir 90% daerah penelitian. Endapan aluvium ini menindih Formasi Damar secara tidak selaras. Thanden drr. (1996) membedakan endapan aluvium menjadi endapan dataran pantai, dataran sungai, dan danau. Endapan dataran pantai umumnya terdiri atas lempung dan pasir, membentuk endapan delta, dan mencapai ketebalan kurang lebih 80 m. Endapan alur sungai dan danau terdiri atas kerikil, kerakal, pasir, dan lanau dengan tebal 1 – 3 m.

STRUKTUR DAN TEKTONIK

Struktur geologi yang terdapat di daerah penelitian merupakan struktur sesar yang bertindak sebagai batas tektonik, yaitu antara Formasi Damar dan Formasi Kerek. Di dalam Peta Geologi Lembar Magelang – Semarang, skala 1 : 100.000 (Thanden

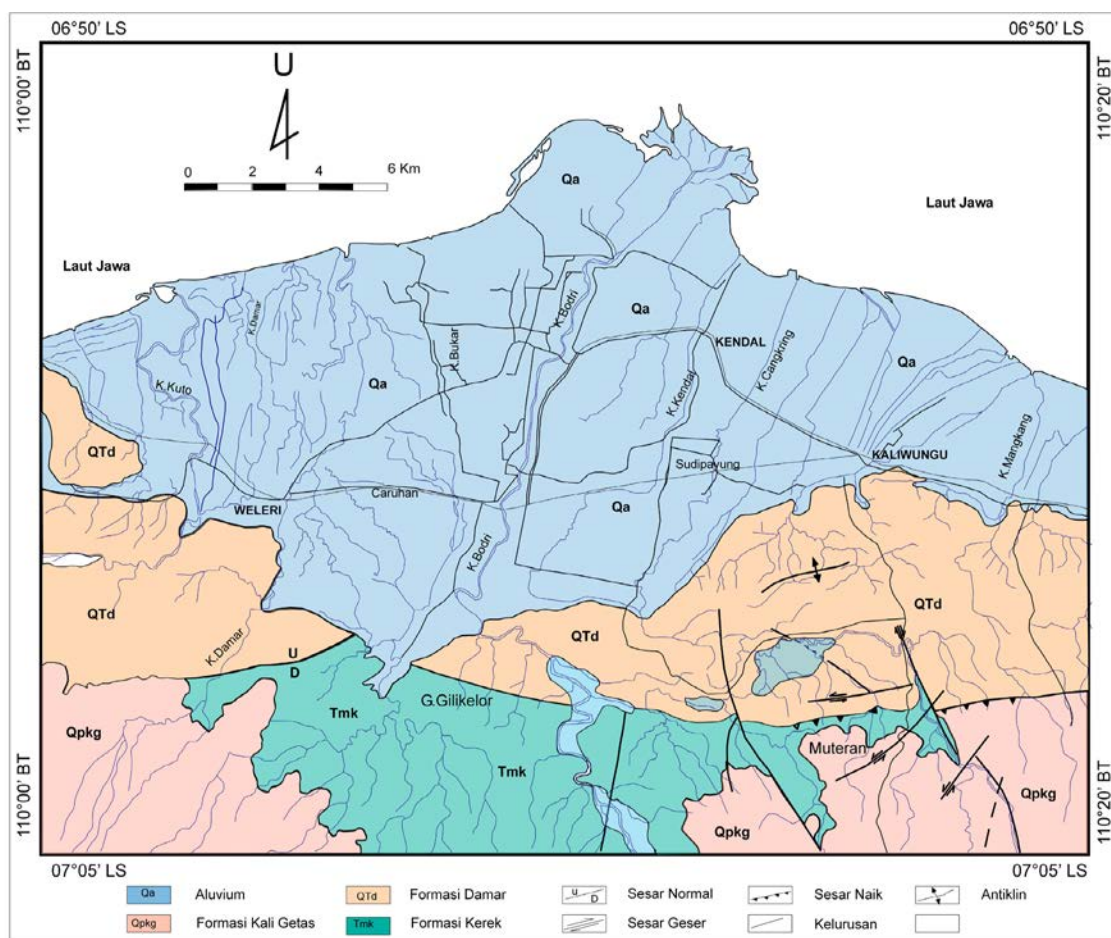
dr. 1996), struktur sesar tersebut digambarkan memanjang dengan arah timur – barat dan memotong Formasi Kerek, Formasi Damar, dan Formasi Kali Getas (Gambar 4). Berdasarkan fakta tersebut, sesar ini merupakan sesar Kuarter yang berumur lebih muda dari umur formasi yang dipotong oleh sesar tersebut, yaitu Formasi Damar (Plio-Plistosen).

Di sekitar daerah Muteran, sesar tersebut digambarkan secara jelas sebagai sesar naik, sedangkan di sekitar lereng utara Gunung Gili Kelor digambarkan sebagai kelurusan, dan sekitar Sungai Damar sesar tersebut kemudian digambarkan sebagai sesar yang diberi notasi U (*up*) dan D (*down*).

Menurut Thanden dr. (1996), kegiatan tektonik di daerah ini ditandai oleh munculnya intrusi basal dan andesit pada Tersier Awal. Kegiatan ini kemudian diikuti oleh pengangkatan dan proses erosi.

Hasil erosi kemudian mengendap dan membentuk sedimen turbidit diendapkan Formasi Kerek di lingkungan neritik, yang kemudian di atasnya diendapkan Formasi Kalibeng di lingkungan laut dalam, serta Formasi Damar di lingkungan transisi – abisal. Pada Plio-Pliostosen kemudian terjadi lagi tektonik yang membentuk lipatan-lipatan tak simetris (tak setangkup), dan diikuti oleh sesar naik berarah relatif barat – timur, sesar geser berarah timur laut – barat daya dan barat laut – tenggara, serta sesar normal.

Berdasarkan fakta tersebut, terlihat jelas bahwa kegiatan tektonik Plio-Plistosen merupakan tektonik yang paling optimal pada saat itu. Setelah kegiatan tersebut berangur-angsur melemah, terjadilah peningkatan aktivitas gunung api yang menghasilkan berbagai ragam batuan.



Gambar 4. Peta geologi daerah Kendal dan sekitarnya, Propinsi Jawa Tengah (Thanden, dkk., 1996).

HASIL PENELITIAN

Endapan Kuarter

Pembahasan litologi terinci dibatasi hanya pada endapan Kuarter saja, sebab umumnya batuan yang rentan mengalami pelulukan adalah batuan yang masih urai (*loose*), belum mengalami kompaksi (*unconsolidated sediments*), dan jenuh air (*water saturated*). Batuan yang mempunyai sifat fisik seperti disebut di atas pada umumnya adalah endapan Kuarter.

Di dalam Peta Geologi Lembar Magelang-Semarang skala 1:100.000 (Thanden drr.,1996) terlihat bahwa sebagian besar daerah penelitian ditutupi oleh endapan aluvium (Qa), dan sebagian kecil lainnya yaitu di sebelah selatan tersingkap batuan Formasi Damar yang terdiri atas batupasir tufan, konglomerat, dan breksi vulkanik. Breksi vulkanik diendapkan sebagi lahar.

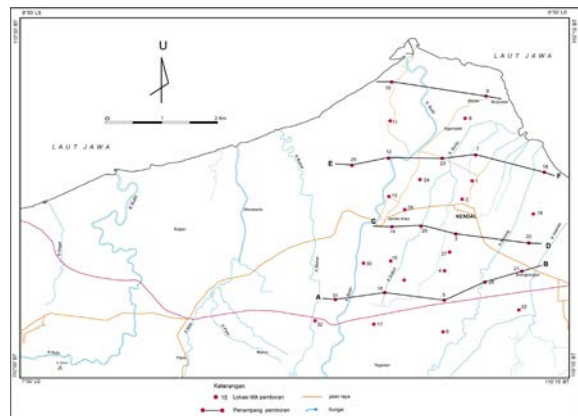
Untuk mendapatkan data bawah permukaan dilakukan pemboran dangkal (*hand auger*) secara acak (Gambar 5). Lebih lanjut, berdasarkan data pemboran dangkal dan genesis serta fasies lingkungan pengendapannya, endapan Kuarter yang terbentuk di daerah penelitian dapat dibedakan menjadi fasies lingkungan pengendapan rawa, alur estuari, laut dekat pantai, laut lepas pantai, fluviatil, dan substrata Praholosen (Tersier). Selanjutnya, endapan fluviatil dapat dibagi menjadi fasies lingkungan pengendapan limpah banjir (*flood plain deposits*), cekungan banjir (*flood basin deposits*), dan endapan alur sungai (*channel deposits*) (Reineck dan Singh, 1973). Sementara Reading (1978) mengelompokkan endapan fluviatil ini menjadi endapan berbutir halus (*fine member deposit*) dan endapan berbutir kasar (*coarse member deposit*).

Endapan Rawa

Ciri umum fasies endapan rawa terdiri atas lempung lanauan yang lengket dan mengandung sisa tumbuhan (*plant remains*) berupa akar dan daun. Selain itu, di beberapa tempat terlihat adanya konkresi Fe dan Mn serta adanya *mottling* (bercak-bercak kuning). Fasies ini dapat dibedakan dengan fasies lainnya berdasarkan konsistensi dan banyaknya kandungan zat organik.

Endapan Dataran Banjir (*Flood Plain Deposits*)

Fasies lingkungan dataran banjir (*flood plain*



Gambar 5. Peta lokasi titik pemboran dan penampang korelasi pemboran daerah Kendal dan sekitarnya, Jawa Tengah.

deposits) dicirikan oleh adanya perselingan antara lapisan lempung, lempung pasir, dan pasir yang tipis. Lapisan pasir mengandung fragmen batuan berukuran kerikil. Secara samar-samar, terlihat adanya struktur silang-siur (*cross lamination*). Secara umum, endapan fasies ini berwarna abu-abu gelap mengandung bercak merah (oksidasi).

Endapan Cekungan Banjir (*Flood Basin Deposits*)

Lingkungan pengendapan cekungan banjir (*flood basin deposits*) menurut Reineck dan Singh (1973) adalah bagian terbawah dataran banjir. Oleh karena itu material yang diendapkan pada fasies lingkungan ini adalah material halus (*fine-grained sediments*). Berdasarkan hasil pemboran, secara umum fasies lingkungan pengendapan cekungan banjir diisi oleh lempung lanauan yang banyak mengandung material organik berupa potongan-potongan tumbuhan (*organic matter*). Pada umumnya, struktur sedimen yang teramati adalah laminasi sejajar (*parallel lamination*).

Endapan Alur Sungai Purba (*Paleo Channel Deposits*)

Endapan alur sungai direpresentasikan oleh endapan pasir, urai, dan jenuh air, warna abu-abu kecoklatan dengan kisaran besar butir dari kasar - halus. Umumnya, pemilahan buruk sampai baik, dengan bentuk butir menyudut tanggung sampai membulat tanggung. Di beberapa tempat mengandung pecahan pecahan cangkang moluska dan min-

eral gelap (*mafic minerals*). Batas bawah endapan alur sungai seringkali tidak dapat dicapai. Hal ini karena endapan alur sungai tersebut sangat urai dan jenuh air, sehingga mengakibatkan lubang bor pada saat ditarik tertutup kembali.

Endapan dataran banjir dan endapan cekungan banjir dikategorikan menjadi endapan berbutir halus (*fine member deposit*), sedangkan endapan alur sungai dikategorikan menjadi endapan berbutir kasar (*coarse member deposit*) yang terdiri atas konglomerat (Reading, 1978)

Endapan Laut Dekat Pantai (*Near Shore Deposits*)

Endapan ini diwakili oleh endapan lempung lanauan, berwarna abu-abu gelap - hitam, lunak, dan mengandung pecahan-pecahan cangkang moluska. Struktur sedimen merupakan laminasi antara lapisan lempung lanau, pasir halus. Sementara fasies endapan lepas pantai didominasi oleh lempung berwarna abu-abu kehijauan - kebiruan, lunak, dan mengandung cangkang moluska.

Endapan Substrata Praholosen (*pHs*)

Endapan substrata Praholosen dianggap sebagai batuan dasar (*basement*) untuk endapan Kuartar. Di daerah penelitian endapan ini tersingkap di bagian selatan, yang terdiri atas batupasir tufan, konglomerat, dan breksi vulkanik (*Formasi Damar*). Breksi vulkanik diendapkan sebagai lahar.

Pemukaan Air Tanah Dangkal

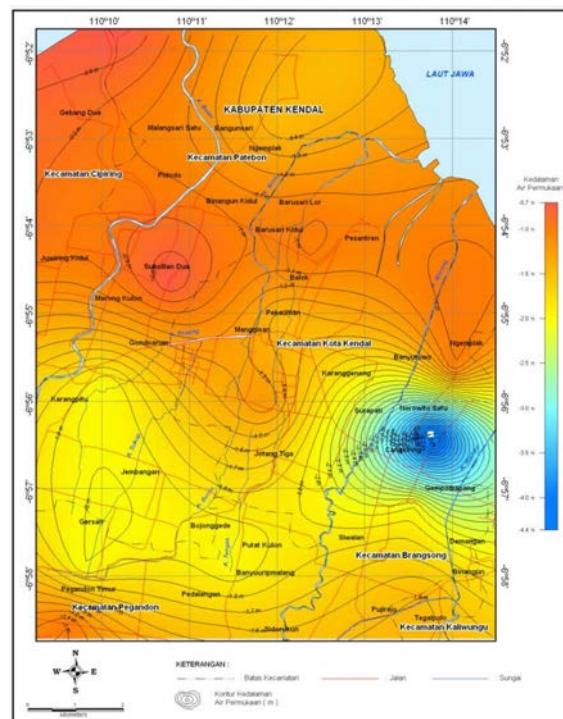
Berdasarkan data pengukuran kedalaman permukaan air tanah dari sejumlah 25 titik pemboran, dibuatkan peta kedalaman konfigurasi permukaan air tanah dangkal (Gambar 6). Data pengukuran kedalaman permukaan air tanah dangkal dan koordinatnya pada setiap titik pemboran disajikan dalam Tabel 1. Dalam Gambar 6, terlihat bahwa kedalaman air bawah permukaan berkisar antara -1,00 m sampai dengan -4,50 m dpl. Kedudukan permukaan air tanah dangkal yang terdalam terdapat di daerah Gempolbapang bagian tenggara daerah penelitian dengan kedalaman maksimal -4,50 m dpl, sementara yang terdangkal terdapat di sekitar Kecamatan Cipiring, Sukilan Dua, dan daerah Ngemplak, Kota Kendal.

Data pemboran menunjukkan bahwa posisi lapisan pasir rentan pelulukan di daerah ini terletak di bawah permukaan air tanah dangkal, sehingga

dapat dipastikan bahwa lapisan pasir berada dalam kondisi jenuh air. Kedudukan permukaan air bawah tanah merupakan salah satu faktor penting untuk diketahui, sebab batuan yang jenuh air adalah batuan yang mempunyai potensi mengalami pelulukan.

Endapan Rentan Pelulukan (*Sediments Susceptible to Liquefaction*)

Pelulukan pada umumnya terjadi pada kondisi geologi tertentu, yaitu di tempat-tempat yang batumannya masih muda (*Holosen*) dengan sifat fisik batuan yang masih urai dan jenuh air. Kondisi geologi yang demikian umumnya terdapat di daerah pantai (*coastal plain*), dataran rendah (*low land*) dan di tanah reklamasi (*reclaimed land*). Pelulukan itu sendiri terjadi akibat meningkatnya tekanan air antarbutir (*pore water pressure*). Meningkatnya tekanan air antarbutir tersebut dapat terjadi karena getaran atau guncangan yang mempengaruhi susunan butir, sehingga volume rongga berkurang. Pelulukan terjadi apabila tekanan air antarbutir tersebut melampaui batas litostatisnya. Faktor yang dapat mempengaruhi perubahan tekanan air antarbutir



Gambar 6. Peta kedalaman muka air tanah bebas daerah Kendal dan sekitarnya, Provinsi Jawa Tengah.

Tabel 1. Kedalaman Permukaan Air Tanah Dangkal pada masing- masing Titik Bor

No. Lokasi Pemboran	Elevasi (m dpl)	Koordinat	Kedalaman air tanah dangkal (m)
1	2,00	S. 06°54'183" - E. 110°12'3.6"	1,00
2	2,50	S. 06°55'09" - E. 110°12'073"	1,50
3	3,00	S. 06°56'018" - E. 110°11'889"	1,20
4	4,80	S. 06°57'048" - E. 110°11'538"	1,80
5	5,00	S. 06°57'887" - E. 110°114'493"	2,00
6	6,00	S. 06°58'738" - E. 110°11'339"	1,50
7	1,75	S. 06°53'885" - E. 110°12'468"	1,00
8	2,00	S. 06°52'808" - E. 110°12'035"	1,50
9	1,75	S. 06°52'139" - E. 110°12'720"	1,50
10	1,50	S. 06°51'749" - E. 110°10'304"	0,70
11	2,00	S. 06°52'865" - E. 110°10'144"	1,00
12	3,60	S. 06°53'820" - E. 110°09'852"	1,00
13	4,00	S. 06°54'975" - E. 110°10'051"	1,20
14	5,50	S. 06°55'819" - E. 110°10'054"	2,00
15	7,00	S. 06°56'843" - E. 110°09'904"	2,00
16	2,00	S. 06°71'848" - E. 110°09'798"	2,00
17	1,50	S. 06°58'514" - E. 110°09'621"	1,00
18	1,50	S. 06°54'616" - E. 110°14'535"	1,00
19	3,50	S. 06°55'632" - E. 110°14'022"	1,00
20	4,00	S. 06°56'431" - E. 110°13'777"	4,50
21	4,50	S. 06°27'180" - E. 110°13'364"	2,00
22	5,00	S. 06°58'195" - E. 110°13'905"	1,50
23	3,00	S. 06°53'955" - E. 110°11'509"	1,00
24	3,50	S. 06°54'644" - E. 110°10'788"	0,70
25	3,20	S. 06°54'197" - E. 110°09'209"	0,90

tersebut antara lain magnitudo gempa, lamanya getaran/guncangan, ukuran besar butir, bentuk butir (*shape*), kesarangan butir (*permeability*), dan pemilahan butir (*sorting*).

Batuan di daerah penelitian terutama terdiri atas endapan rawa, endapan dataran banjir, endapan cekungan banjir, endapan sungai purba, endapan estuari, endapan laut dekat pantai, dan endapan laut lepas pantai.

Berdasarkan hasil pengamatan lapangan, endapan rawa, endapan laut dekat pantai, dan endapan laut lepas pantai umumnya terdiri atas lempung, lanau, dan lempung lanauan. Jenis endapan ini dapat menyimpan air, tetapi tidak dapat melepaskannya (kesarangan jelek). Oleh karena itu, jenis endapan ini tidak dikategorikan ke dalam endapan yang rentan terhadap pelulukan. Demikian juga halnya dengan endapan dataran banjir dan endapan cekungan banjir yang umumnya terdiri atas perselingan lempung, lanau, dan lapisan pasir tipis. Yould dan Perkin (1978) menyebutkan bahwa pasir (*clean sand*)

dan pasir lanauan (*ilty sand*) yang diendapkan di lingkungan alur sungai lebih rentan dibandingkan dengan perselingan antara pasir kasar dan gravel yang diendapkan pada lingkungan kipas aluvium.

Oleh karena itu, dari berbagai jenis fasies lingkungan pengendapan yang terdapat di daerah penelitian terlihat bahwa yang rentan mengalami pelulukan adalah endapan pasir alur sungai purba (*palaeochannel deposits*) dan endapan pasir alur estuari. Sifat fisik kedua endapan tersebut pada umumnya masih urai, jenuh air, dan belum mengalami kompaksi. Deskripsi endapan pasir pada masing-masing titik pemboran diuraikan pada Tabel 2. Posisi endapan alur sungai berada di bawah permukaan air tanah dangkal, sehingga kondisi endapan tersebut selalu jenuh air.

Kegempaan

Sebaran titik pusat gempa berdasarkan kedalaman di daerah penelitian memperlihatkan adanya pengaruh kuat aktivitas subdaksi. Secara jelas terlihat bahwa pola sebaran kedalaman gempa mengalami perubahan. Kedalaman gempa dari arah selatan ke arah utara secara berangsur-angsur berubah menjadi lebih dalam (Gambar 7). Kondisi ini dapat dilihat lebih jelas pada profil gempa yang dibuat mulai dari zona subdaksi hingga ke Laut Jawa melalui daerah penelitian (A – B) (Gambar 8).

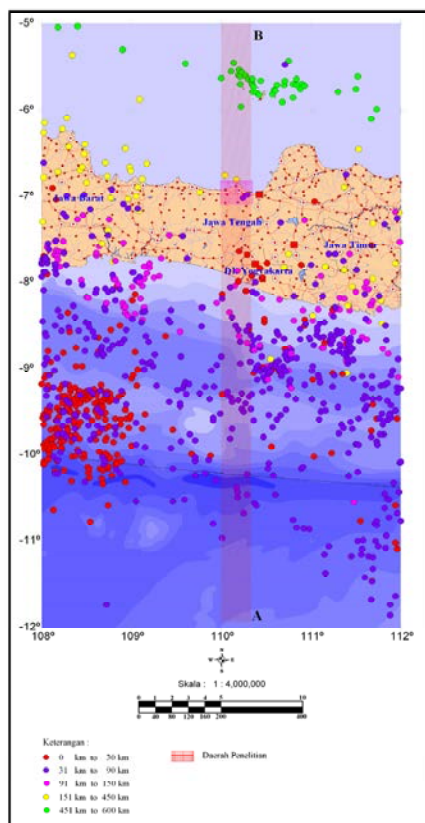
Di sebelah utara daerah penelitian (Laut Jawa), terlihat adanya konsentrasi gempa dengan kisaran kedalaman antara 451 – 600 km. Sementara di sebelah timur terdapat titik-titik pusat gempa dengan kedalaman antara 151 – 450 km, dan di sebelah selatan terdapat gempa-gempa dengan kedalaman antara 91 – 150 km. Secara umum, gempa-gempa tersebut digolongkan ke dalam gempa dalam.

Selanjutnya berdasarkan magnitudo gempa (Gambar 9), di daerah penelitian terlihat adanya gempa yang berkekuatan antara 6,1 mb – 7,0 mb pada kedalaman antara 151 km – 450 km. Secara umum, kekuatan gempa di daerah penelitian berkisar antara 4,1 mb – 6,0 mb dengan kedalaman gempa berkisar dari 151 km – 600 km.

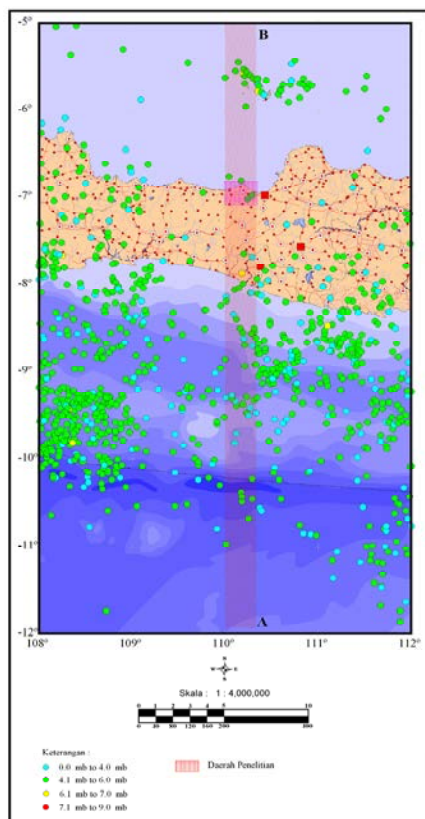
Namun, apabila kita perhatikan lebih terperinci, di sekitar daerah penelitian terdapat beberapa gempa dengan kedalaman yang dangkal (0 – 90 km) dengan magnitudo sebesar 4 – 6 mb. Berdasarkan letak geografisnya yang jauh dari zona subdaksi,

Tabel 2. Deskripsi Endapan Alur Sungai pada masing masing Titik Bor

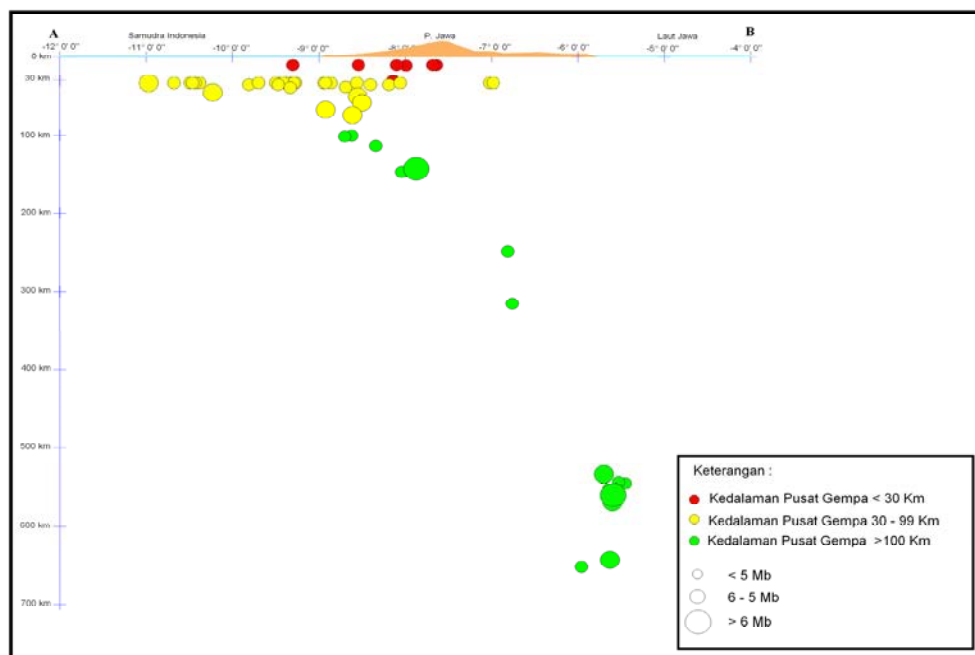
No. Lokasi Pemboran	Elevasi (m)	Koordinat	Kedalaman Lap. Pasir (m)	Ketebalan (m)	Keterangan
1	2,00	S. 06°54'183" - E. 110°12'3.6"	2,00 - 6,70	4,70	Pasir lempungan berbutir halus – sedang dan terpilah dengan baik, ditutupi oleh lempung dan lanauan, sedangkan alasnya berupa lempung
2	2,50	S. 06°55'09" - E. 110°12'073"	-	-	-
3	3,00	S. 06°56'018" - E. 110°11'889"	4,50 - 10,00	5,50	Pasir berbutir kasar – sedang, pemilahan sedang – baik, dengan bentuk butir menyudut tanggung – membulat, ditutupi oleh lempung dan lapisan yang mengalasinya tidak terdeteksi
4	4,80	S. 06°57'048" - E. 110°11'538"	3,50 - 5,40	1,90	Pasir berbutir sedang – kasar, pemilahan sedang, menyudut tanggung sampai membulat tanggung
5	5,00	S. 06°57'887" - E. 110°114'493"	4,50 - 6,50	2,00	Pasir berukuran sedang – kasar pemilahan jelek, dengan bentuk butir menyudut tanggung – membulat tanggung. Lapisan penutup berupa lempung lanauan dan alasnya berupa lempung
6	6,00	S. 06°58'738" - E. 110°11'339"	2,50 - 3,50	1,00	Pasir berukuran halus – sedang dengan pemilahan sedang – jelek, menyudut tanggung – membulat tanggung. Lapisan yang menutupi berupa lempung lanauan sedangkan alasnya lapisan lempung lanauan
7	1,75	S. 06°53'885" - E. 110°12'468"	0,50 - 4,50	4,00	Pasir berbutir sedang, terpilah dengan baik dan menyudut tanggung ke arah bawah besar butir mengasar (kasar – sedang) pemilahan jelek dengan bentuk butir menyudut tanggung
8	2,00	S. 06°52'808" - E. 110°12'035"	1,80 - 4,00	3,20	Pasir berukuran kasar dengan pemilahan jelek, menyudut tanggung – menyudut, dialasi oleh lempung dan ditutupi oleh lapisan lanau lempungan
9	1,75	S. 06°52'139" - E. 110°12'720"	4,70 - 8,00	3,30	Pasir berbutir sedang – kasar pemilahan bagus, ditutupi oleh lapisan lempung lanauan dan dialasi oleh endapan lempung
10	1,50	S. 06°51'749" - E. 110°10'304"	1,20 - 5,40	4,20	Pasir abu-abu gelap – hitam, berukuran sedang – kasar, pemilahan jelek, dengan bentuk butir menyudut tanggung – membulat tanggung, ditutupi oleh endapan lempung lanauan, sedangkan alasnya tidak diketahui
11	2,00	S. 06°52'865" - E. 110°10'144"	1,50 - 6,00	5,50	Pasir coklat abu-abu gelap, ukuran butir kasar – sedang, pemilahan jelek, bentuk butir menyudut tanggung – membulat tanggung, ditutupi oleh lempung lanauan sedangkan alasnya tidak diketahui
12	3,60	S. 06°53'820" - E. 110°09'852"	7,50 - 8,00	0,50	Pasir abu-abu kehijauan, ukuran butir sedang – kasar, pemilahan jelek, dengan bentuk butir menyudut tanggung – membulat tanggung. Ditutupi oleh lempung abu-abu, lapisan alas tidak diketahui.
13	4,00	S. 06°54'975" - E. 110°10'051"	-	-	-
14	5,50	S. 06°55'819" - E. 110°10'054"	4,00 - 8,00	4,00	Pasir halus – sedang berwarna abu-abu kecoklatan, pemilahan sedang, menyudut tanggung – membulat tanggung ke arah bawah ukuran besar butir semakin mengasar, dengan pemilahan jelek. Lapisan pasir ditutupi oleh lempung lanauan sedangkan lapisan atas tidak diketahui
15	7,00	S. 06°56'843" - E. 110°09'904"	6,80 - 8,00	1,20	Pasir kasar, berwarna abu-abu, pemilahan jelek, dengan bentuk butir menyudut tanggung – menyudut, lapisan yang mengalasinya tidak diketahui sedangkan lapisan yang menutupinya endapan lempung lanauan
16	2,00	S. 06°71'848" - E. 110°09'798"	-	-	-
17	1,50	S. 06°58'514" - E. 110°09'621"	-	-	-
18	1,50	S. 06°54'616" - E. 110°14'535"	4,20 - 6,00	1,80	Pasir lempungan berwarna abu-abu – hitam, berbutir halus – sedang, pemilahan jelek – sedang menyudut tanggung – membulat tanggung. Ditutupi oleh lempung lanauan dan dialasi oleh lempung berwarna abu-abu gelap – kehijauan.
19	3,50	S. 06°55'632" - E. 110°14'022"	-	-	-
20	4,00	S. 06°56'431" - E. 110°13'777"	-	-	-
21	4,50	S. 06°27'180" - E. 110°13'364"	3,50 - 11,00	7,50	Pasir abu-abu kehitaman, halus – sedang, pemilahan sedang menyudut tanggung – membulat tanggung, ke arah bawah besar butir berubah menjadi halus (lanau) berwarna abu-abu kehitaman.
22	5,00	S. 06°58'195" - E. 110°13'905"	-	-	-
23	3,00	S. 06°53'955" - E. 110°11'509"	3,50 - 5,50	2,00	Pasir berwarna abu-abu kehitaman, berbutir halus-sedang, dengan pemilahan sedang, menyudut tanggung – menyudut, Lapisan pasir ini dialasi oleh lapisan lempung sedangkan lapisan penutup terdiri atas lempung lanauan.
24	3,50	S. 06°54'644" - E. 110°10'788"	9,00 - 10,20	1,20	Pasir berwarna abu-abu kehijauan sampai kehitaman, berbutir kasar – sedang, pemilahan jelek ditutupi oleh lempung, dan alasnya tidak diketahui
25	3,20	S. 06°54'197" - E. 110°09'209"	3,50 - 4,70	1,20	Pasir berwarna abu-abu kecoklatan – hitam, berbutir kasar – sedang pemilahan jelek dengan bentuk butir menyudut tanggung – menyudut. Lapisan alas tidak diketahui.



Gambar 7. Peta kedalaman kedalaman gempa daerah Kendal dan sekitarnya, Provinsi Jawa Tengah.



Gambar 9. Peta kekuatan gempa berdasarkan amplitudo daerah Kendal dan sekitarnya, Provinsi Jawa Tengah.



Gambar 8. Profil gempa dari zona subduksi hingga ke Laut Jawa melalui daerah penelitian.

dipastikan bahwa kejadian gempa dangkal ini tidak terkait dengan aktivitas subdaksi. Oleh karena itu, jenis gempa ini merupakan gempa yang berkaitan dengan struktur sesar aktif di daerah tersebut. Fakta tersebut mengindikasikan bahwa lajur sumber gempa di daerah ini paling sedikit diwakili oleh lajur penunjaman subdaksi Jawa dan sesar aktif di sekitar Semarang.

Lumbanbatu (2004) telah melakukan kajian kegempaan di daerah Semarang. Dia menyebutkan bahwa kejadian gempa di daerah tersebut tercatat sejumlah 3.002 kali. Frekuensi kejadian gempa berdasarkan kedalamannya didominasi oleh gempa dangkal dengan kedalaman berkisar antara 0 – 90 km, yaitu sebesar 81,9%. Selanjutnya, disebutkan bahwa daerah ini patut dicermati sebagai daerah yang rentan terhadap bencana gempa bumi.

Analisis Laboratorium

Seperti disebutkan di atas, di daerah penelitian ini endapan yang rentan terhadap pelulukan adalah endapan alur sungai purba dan endapan alur estuari. Oleh karena itu, percontoh batuan untuk keperluan analisis besar butir diambil dari kedua jenis endapan tersebut. Lebih lanjut, Lumbanbatu dan Soemantri, (2007) memisahkan endapan alur sungai tersebut menjadi tiga kelompok yang berbeda. Pemisahan ini didasarkan pada posisi stratigrafis endapan alur sungai tersebut. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, sebanyak tiga percontoh diambil dari endapan alur sungai yang dianggap mewakili masing-masing kelompok dan satu percontoh mewakili endapan estuari (Gambar 10 a, b, c, dan d). Keempat percontoh tersebut diberi notasi SH/KD/06/07 sampai dengan SH/KD/09/07. Metode yang dilakukan untuk analisis besar butir adalah analisis ayakan kering (*dry sieved analysis*).

Keempat percontoh pasir yang dianalisis adalah klastika halus sampai kasar berwarna abu-abu sampai abu-abu kehitaman. Contoh SH/06/07 dan SH/08/07 tergolong sebagai pasir menengah - kasar, sedangkan percontoh SH/07/07 dan SH/09/07 sebagai pasir menengah - halus (Folk, 1961). Tabulasi hasil analisis masing-masing percontoh batuan dapat dilihat dalam Gambar 11, 12, 13, dan 14.

Secara umum berdasarkan hasil analisis besar butir tersebut, disimpulkan hal seperti yang terlihat dalam Tabel 3.

Hasil perhitungan statistik menunjukkan bahwa percontoh-percontoh pasir tersebut tergolong ke dalam pasir halus, menengah, dan kasar dengan pemilahan buruk sampai sedang. Atas dasar bentuk butir dan pemilahan yang buruk, percontoh-percontoh tersebut ditafsirkan diendapkan di lingkungan darat sebagai endapan alur sungai purba (*channel*).

Selanjutnya untuk mengetahui kaitan antara besar butir dengan potensi terjadinya pelulukan, gambar-gambar distribusi besar butir dari masing-masing percontoh batuan yang dianalisis dimasukkan ke dalam Diagram Tsucida (1971) (Gambar 15). Dalam gambar tersebut terlihat bahwa percontoh batuan SH/07/09 dan SH/09/07 merupakan percontoh batuan yang mempunyai kerentanan pelulukan tinggi, sedang dua percontoh lainnya SH/06/07 dan SH/08/07 berpotensi untuk mengalami pelulukan.

EVALUASI KERENTANAN PELULUKAN (LIQUEFACTION SUSCEPTIBILITY)

Walaupun banyak cara atau metode dalam melakukan evaluasi potensi pelulukan di suatu daerah seperti yang sudah diperkenalkan oleh Seed dan Idris (1971) serta Seed dr. (1983), dalam penelitian ini evaluasi dibatasi terhadap kerentanan pelulukan (*liquefaction susceptibility*).

Ada beberapa faktor yang penting untuk mengkaji proses kejadian bencana alam pelulukan. Faktor-faktor tersebut antara lain adalah sejarah kejadian pelulukan, lingkungan pengendapan, litologi (besar butir, pemilahan butir, kesarangan butir, bentuk butir, densitas), posisi kedalaman air tanah dangkal, kegempaan (jarak titik pusat gempa bumi, besaran gempa bumi (magnitudo) (Lumban Batu, 2004).

Informasi menyangkut sejarah pelulukan di suatu daerah perlu kita ketahui karena daerah yang pernah mengalami bencana pelulukan cenderung berpotensi mengalami pelulukan kembali di hari kemudian. Hingga saat ini, data sejarah kejadian pelulukan di daerah penelitian belum pernah diketahui.

Ditinjau dari aspek lingkungan pengendapan, daerah penelitian rentan untuk mengalami pelulukan. Tinsley dr. (1995), menyebutkan bahwa endapan yang terbentuk di lingkungan tertentu seperti lingkungan sungai dan danau, serta daerah reklamasi merupakan daerah yang mempunyai ke-

Gambar 11. Tabulasi Hasil Analisis Besar Butir Percontoh Batuan SH/06/07

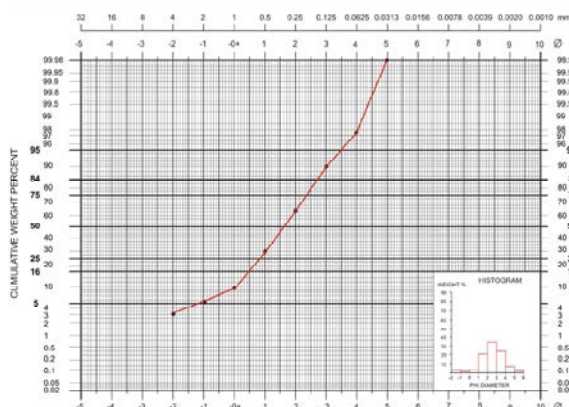
Berat contoh asal : 81,90 gr;		Berat setelah diproses : 81,10 gr;		Berat yang hilang : 0,80 gr	
Mesh	Diameter (mm)	Diameter (phi)	Berat (gr)	% Berat	% Kumulatif
5	> 4,00	< -2	2,50	3,08	3,08
10	4,00 - 2,00	-2 -1	1,70	2,10	5,18
18	2,00 - 1,00	-1 - 0	3,70	4,56	9,74
35	1,00 - 0,50	0 - 1	16,30	20,10	29,84
60	0,50 - 0,25	1 - 2	29,20	36,00	65,84
120	0,25 - 0,125	2 - 3	19,60	24,17	90,01
250	0,125 - 0,062	3 - 4	6,20	7,64	97,65
Pan	< 0,062	> 4	1,90	2,35	100,00
			81,10	100 %	

Hasil perhitungan statistik (Folk, 1961)

Ukuran butir rata-rata (*Median*) : 1,55 ϕ = Pasir menengah (*medium sand*)
 Pemilahan (*Sorting*) : 1,21 ϕ = Buruk (*poorly sorted*)
 Kepencengan (*Skewness*) : -0,12 ϕ = Mencong ke kasar (*coarse skewed*)
 Kurtosis : 0,30 ϕ = *Leptokurtic*

Nama Batuan

Pasir kerikilan



Sumber : GeoLab Pusat Survei Geologi, Bandung, 2007

Gambar 12. Tabulasi Hasil Analisis Besar Butir Percontoh Batuan SH/09/07

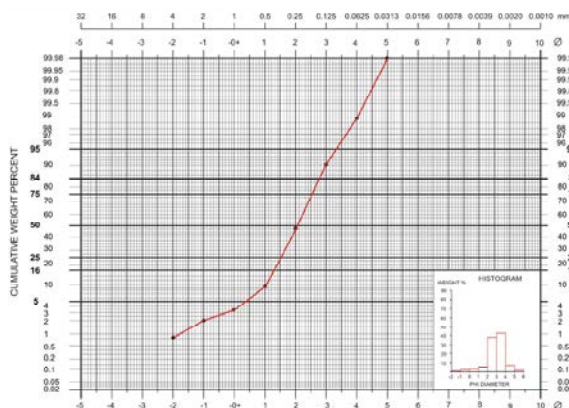
Berat contoh asal : 259,80 gr;		Berat setelah diproses : 259,30 gr;		Berat yang hilang : 0,50 gr	
Mesh	Diameter (mm)	Diameter (phi)	Berat (gr)	% Berat	% Kumulatif
5	> 4,00	< -2	2,00	0,77	0,77
10	4,00 - 2,00	-2 -1	3,20	1,23	2,00
18	2,00 - 1,00	-1 - 0	1,43	0,55	3,43
35	1,00 - 0,50	0 - 1	15,60	6,02	9,45
60	0,50 - 0,25	1 - 2	102,00	39,34	48,79
120	0,25 - 0,125	2 - 3	108,40	41,80	90,59
250	0,125 - 0,062	3 - 4	21,10	8,14	98,73
Pan	< 0,062	> 4	3,30	1,27	100,00
			259,30	100 %	

Hasil perhitungan statistik (Folk, 1961)

Ukuran butir rata-rata (*Median*) : 2,07 ϕ = Pasir (*fine sand*)
 Pemilahan (*Sorting*) : 0,84 ϕ = Cukup (*moderately sorted*)
 Kepencengan (*Skewness*) : +0,15 ϕ = Mencong ke kasar (*coarse skewed*)
 Kurtosis : 1,67 ϕ = *Very leptokurtic*

Nama Batuan

Pasir halus



Sumber : GeoLab Pusat Survei Geologi, Bandung, 2007

Gambar 13. Tabulasi Hasil Analisis Besar Butir Percontoh Batuan SH/07/07

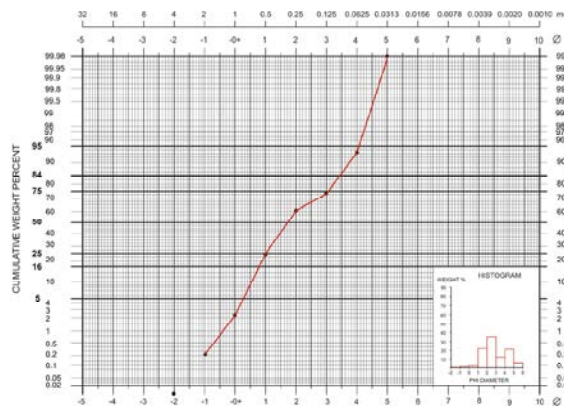
Berat contoh asal : 40,40 gr;		Berat setelah diproses : 39,70 gr;		Berat yang hilang : 0,70 gr	
Mesh	Diameter (mm)	Diameter (phi)	Berat (gr)	% Berat	% Kumulatif
5	> 4,00	< -2	-	-	-
10	4,00 - 2,00	-2 -1	0,10	0,25	0,25
18	2,00 - 1,00	-1 - 0	0,80	2,01	2,26
35	1,00 - 0,50	0 - 1	9,00	22,67	24,93
60	0,50 - 0,25	1 - 2	14,20	35,77	60,70
120	0,25 - 0,125	2 - 3	4,80	12,09	72,79
250	0,125 - 0,062	3 - 4	8,20	20,65	93,44
Pan	< 0,062	> 4	2,60	6,56	100,00
			39,70	100 %	

Hasil perhitungan statistik (Folk, 1961)

Ukuran butir rata-rata (*Median*) : 1,98 ϕ = Pasir menengah (*medium sand*)
 Pemilahan (*Sorting*) : 1,25 ϕ = Buruk (*poorly sorted*)
 Kepencengan (*Skewness*) : +0,32 ϕ = Mencong ke halus (*fine skewed*)
 Kurtosis : 0,76 ϕ = *Platykurtic*

Nama Batuan

Pasir menengah



Sumber : GeoLab Pusat Survei Geologi, Bandung, 2007

Gambar 14. Tabulasi Hasil Analisis Besar Butir Percontoh Batuan SH/08/07

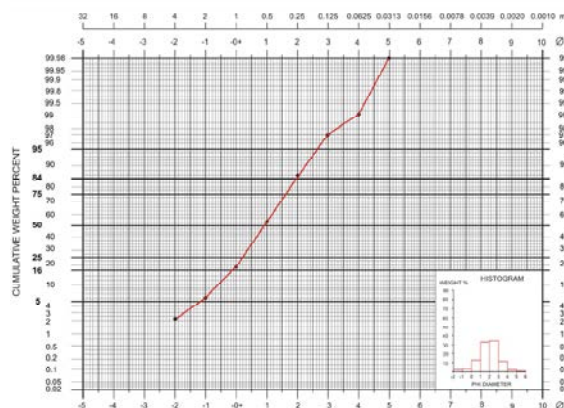
Berat contoh asal : 323,70 gr;		Berat setelah diproses : 322,80 gr;		Berat yang hilang : 0,90 gr	
Mesh	Diameter (mm)	Diameter (phi)	Berat (gr)	% Berat	% Kumulatif
5	> 4,00	< -2	7,70	2,38	2,38
10	4,00 - 2,00	-2 -1	12,10	3,75	6,13
18	2,00 - 1,00	-1 - 0	39,80	12,33	18,46
35	1,00 - 0,50	0 - 1	108,70	33,67	52,13
60	0,50 - 0,25	1 - 2	111,30	34,48	86,61
120	0,25 - 0,125	2 - 3	33,50	10,38	96,99
250	0,125 - 0,062	3 - 4	6,90	2,14	99,13
Pan	< 0,062	> 4	2,80	0,87	100,00
			322,80	100 %	

Hasil perhitungan statistik (Folk, 1961)

Ukuran butir rata-rata (*Median*) : 0,88 ϕ = Pasir menengah (*medium sand*)
 Pemilahan (*Sorting*) : 1,08 ϕ = Buruk (*poorly sorted*)
 Kepencengan (*Skewness*) : -0,11 ϕ = Mencong ke kasar (*coarse skewed*)
 Kurtosis : 0,21 ϕ = *Leptokurtic*

Nama Batuan

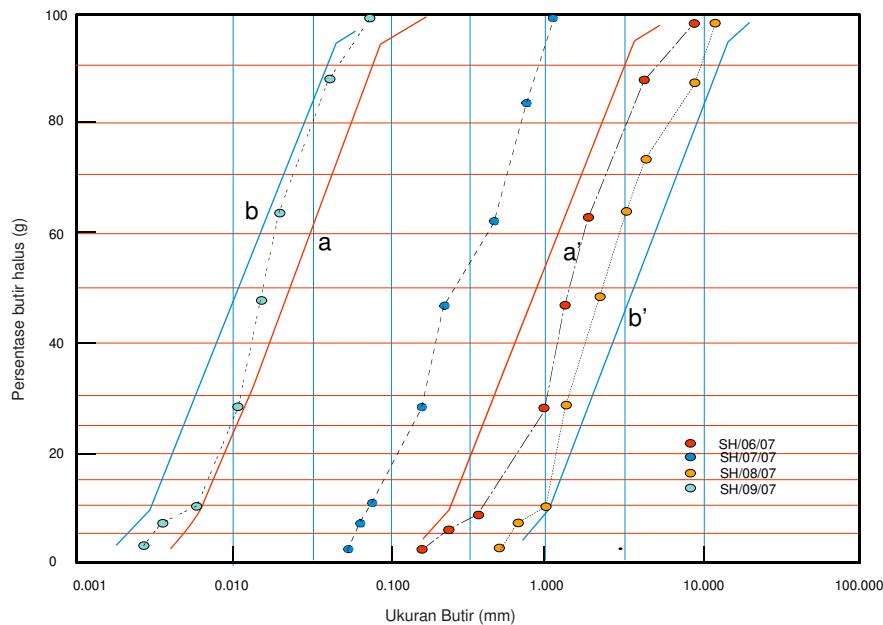
Pasir kerikilan



Sumber : GeoLab Pusat Survei Geologi, Bandung, 2007

Tabel 3. Hasil Analisis Besar Butir

No.	Nomor Percontoh	Perhitungan Statistik			
		Median (Mz)	Sorting (S)	Skewness (Sk)	Kurtosis (Kg)
1	SH/KD/06/07	Pasir menengah	Buruk	Mencong ke kasar	<i>Leptokurtic</i>
2	SH/KD/07/07	Pasir menengah	Buruk	Mencong ke halus	<i>Platykurtic</i>
3	SH/KD/08/07	Pasir kasar	Buruk	Mencong ke kasar	<i>Leptikurtic</i>
4	SH/KD/09/07	Pasir halus	Sedang	Mencong ke halus	<i>Very leptokurtic</i>



Gambar 15. Diagram distribusi besar butir yang diplot ke dalam diagram Tsucida (1971) memperlihatkan bahwa percontoh batuan mempunyai tingkat kerentanan tinggi terhadap pelulukan: Zona a - a' mempunyai tingkat kerentanan tinggi sedangkan zona b - b' kemungkinan untuk pelulukan.

rentanan pelulukan tinggi. Hal ini karena komposisi batuanya umumnya terdiri atas endapan fluviatil, aluvium atau endapan *colluvial* yang masih urai dan jenuh air.

Daerah penelitian ditempati endapan Kuartar yang umumnya masih bersifat urai (*loose*), belum mengalami kompaksi (*unconsolidated sediment*), dan jenuh air (*water saturated*). Endapan Kuartar tersebut terdiri atas endapan rawa, endapan limbah banjir, endapan cekungan banjir, endapan alur sungai, endapan alur estuari, endapan laut dekat pantai, dan endapan laut lepas pantai.

Di antara ketujuh endapan Kuartar tersebut di atas, endapan pasir alur sungai dan endapan alur estuari merupakan endapan yang lebih rentan terhadap pelulukan. Hal tersebut dikarenakan endapan

rawa, endapan limbah banjir, endapan cekungan banjir, endapan laut dekat pantai, dan endapan laut lepas pantai disusun oleh batuan yang terdiri atas lempung, lempung lanauan, lempung pasiran, pasir lanauan, pasir lempungan, dan pasir kerikilan. Hasil analisis besar butir mendukung pernyataan di atas bahwa endapan alur sungai dan endapan estuari rentan terhadap pelulukan. Hasil analisis besar butir menunjukkan kedua jenis endapan tersebut tergolong pasir halus, menengah, dan kasar. Wang (1979), menyebutkan endapan yang berpotensi mengalami pelulukan adalah endapan yang berbutir halus ($> 0,005$ mm) dengan kandungan air $> 0,9\%$. Selanjutnya, disebutkan bahwa bentuk butir yang membundar baik (*well rounded*) dengan keseragaman butir yang baik (*well sorted*) mempunyai

kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk butir menyudut tanggung - menyudut (*sub angular – angular*).

Lebih lanjut, berdasarkan pengukuran kedalaman permukaan air tanah dangkal, diketahui bahwa posisi endapan alur sungai tersebut berada di bawah permukaan air tanah dangkal. Dengan demikian, endapan alur sungai tersebut menjadi bersifat jenuh air. Hal ini perlu diketahui karena walaupun batuan yang rentan terhadap pelulukan berlimpah di suatu wilayah, akan tetapi apabila batuan tersebut tidak jenuh air, maka proses pelulukan tidak akan terjadi.

Faktor lain yang sangat penting untuk dikaji adalah kegempaan di suatu wilayah. Data kegempaan yang dihimpun sejak tahun 1970 hingga sekarang (NEIC, USGS) menunjukkan adanya variasi karakteristik kegempaan di daerah ini, baik menyangkut kedalaman, jarak titik pusat gempa, ataupun kekuatan gempa (magnitudo).

Berdasarkan data kegempaan tersebut, dapat diketahui bahwa lajur sumber gempa di daerah penelitian bersumber dari dua lajur sumber gempa, yaitu Lajur Sumber Gempa Subdaksi dan Lajur Sumber Gempa Sesar Aktif. Di daerah penelitian gempa yang dihasilkan oleh aktivitas subdaksi adalah gempa dalam (451 km - 600 km) dengan kekuatan gempa berkisar dari 6,1 mb – 7,0 mb. Dengan data tersebut ancaman pelulukan yang dipicu oleh gempa sebagai hasil aktivitas subdaksi tidaklah begitu berbahaya. Yang perlu mendapat perhatian khusus adalah gempa yang bersumber dari sesar aktif, yang umumnya kedalaman gempa hasil aktivitas sesar tersebut adalah dangkal.

Berdasarkan data statistik, untuk kejadian gempa di Lembah Wabash dan Illinois, Amerika Serikat, diketahui bahwa pengaruh jarak gempa terhadap proses terjadinya pelulukan tidak menjadi hal pokok. Obemeier dr. (1993) menyatakan bahwa proses pelulukan di Lembah Wabash masih dapat diamati, walaupun jarak titik pusat gempa ke daerah Wabash tersebut terletak sekitar 500 km. Oleh karena itu, jarak gempa terhadap proses terjadinya pelulukan hampir dapat dianggap tidak berpengaruh. Namun sebaliknya, faktor kekuatan gempa menjadi penting.

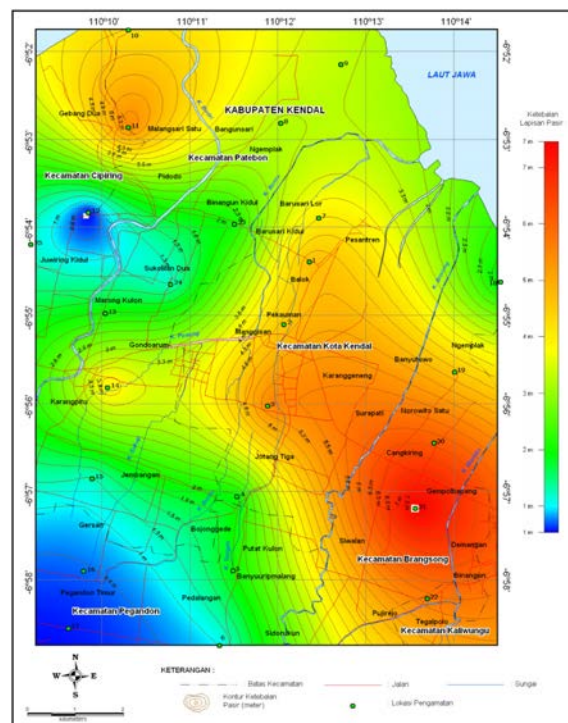
Zonasi Kerentanan Pelulukan

Berdasarkan evaluasi kerentanan bencana pelulukan di atas, daerah penelitian merupakan daerah yang rentan terhadap bencana pelulukan. Potensi pelulukan dapat terjadi pada endapan alur sungai purba dan endapan alur estuari yang umumnya terdiri atas pasir lepas dan jenuh air.

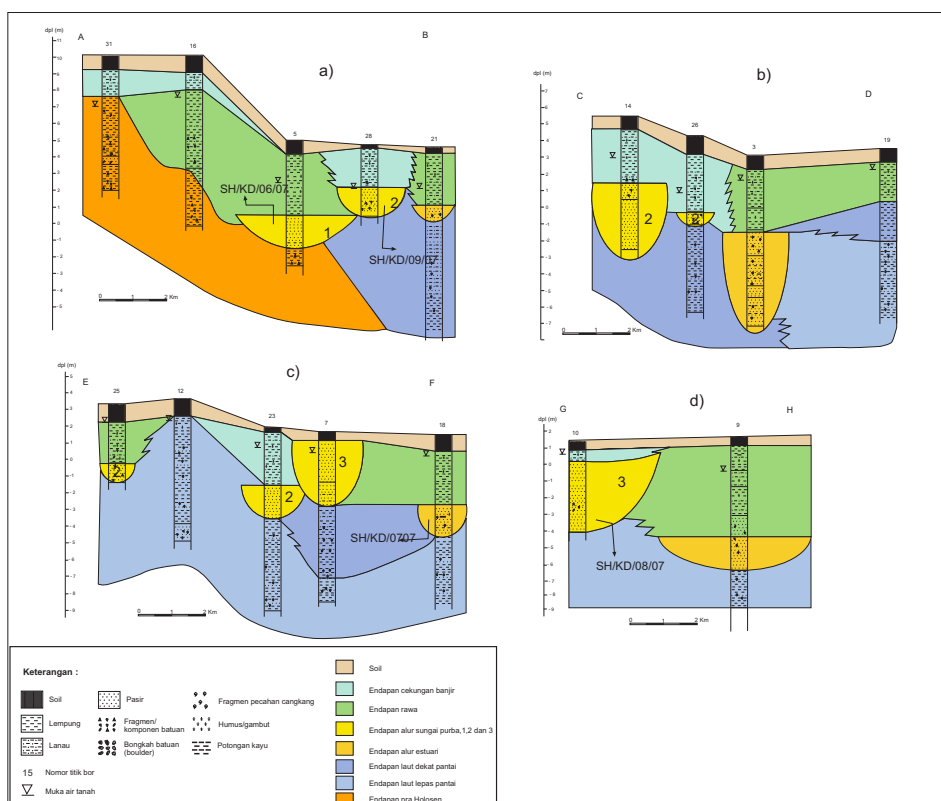
Untuk mengetahui distribusi endapan alur sungai purba serta ketebalannya, dibuatkan peta *isopach* (Gambar 16); sedangkan untuk mengetahui posisi stratigrafis endapan alur purba tersebut dibuatkan beberapa penampang pemboran. Penampang dibuat dengan arah timur – barat sebanyak empat buah, yaitu penampang A-B, C-D, E-F, dan penampang G-H. Masing masing penampang kemudian dikorelasikan, sehingga sebaran pasir, baik secara vertikal maupun horizontal dapat diketahui (Gambar 17). Masing masing penampang diuraikan sebagai berikut:

Penampang A-B

Penampang A-B (Gambar 17 a) terdiri atas penampang pemboran No. 31, 16, 5, 28, dan 21. Pada



Gambar 16. Peta *isopach* daerah Kendal dan sekitarnya, Provinsi Jawa Tengah.



Gambar 17. Korelasi penampang stratigrafi A - B, C - D, E - F, dan G - H.

korelasi penampang tersebut terlihat bahwa endapan yang berpotensi untuk mengalami pelulukan adalah endapan alur sungai purba dan endapan alur estuari. Endapan alur sungai purba (Titik bor No.5) dialasi oleh batuan dasar Praholosen (pH). Kondisi ini mengindikasikan bahwa endapan alur sungai purba tersebut merupakan alur sungai purba tertua atau yang pertama mengalir di wilayah ini. Endapan alur sungai purba ini kemudian ditutupi oleh endapan rawa. Keadaan ini menunjukkan bahwa pada saat itu kondisi tektonik tenang yang disertai oleh penurunan perlahan-lahan, sehingga terbentuk endapan rawa yang relatif tebal. Pada tahap selanjutnya alur sungai purba ini mengalami pergeseran ke arah timur (Titik bor No. 28). Walaupun dimensi alur sungai purba pada tahap ini relatif lebih kecil, namun aktivitas sungai lebih aktif. Hal ini terlihat dari terbentuknya endapan cekungan banjir. Endapan cekungan banjir dapat terbentuk apabila sungai dapat memasok material untuk diendapkan pada cekungan yang terdapat di dataran banjir.

Tebal endapan alur sungai purba dan endapan alur estuari berkisar dari 1,50 m – 2,0 m yang terbentuk pada kedalaman antara 2 m sampai dengan -1 m di atas permukaan laut.

Penampang C-D

Pada penampang C-D (Gambar 17 b) terlihat bahwa dimensi alur sungai purba lebih besar yang diindikasikan oleh ketebalan endapannya yang relatif lebih tebal dibandingkan dengan penampang A-B di sebelah selatannya. Tebal endapan alur sungai purba adalah antara 1 m dan 4,5 m, sedangkan tebal endapan alur estuari lebih kurang 6,0 m. Informasi lain yang dapat dilihat dari penampang tersebut adalah bahwa endapan estuari lebih dalam dibandingkan dengan endapan alur sungai purba. Hal ini memberi makna bahwa tingkat konsolidasi endapan estuari lebih tinggi karena volume sedimen yang menindih/membeban endapan estuari lebih besar, sehingga konsekuensinya tekanan terhadap endapan estuari juga menjadi lebih besar. Oleh sebab, itu tingkat

kerentanan pelulukan pada endapan alur estuari menjadi lebih rendah. Apabila dibandingkan dengan penampang A-B, tingkat kerentanan pada penampang C-D menjadi lebih tinggi karena ketebalan lapisannya yang lebih tebal.

Penampang E-F

Penampang E-F terdiri atas lima penampang titik bor yaitu titik bor No.25, 12, 23, 2, dan No. 18 (Gambar 17 c). Di antara kelima penampang titik pemboran tersebut hanya penampang pemboran No. 12 yang tidak mempunyai lapisan pasir rentan pelulukan. Pada penampang ini terlihat bahwa lapisan pasir rentan pelulukan terdiri atas pasir alur sungai purba dan pasir alur estuari. Berdasarkan korelasi tersebut terlihat bahwa tingkat kerentanan pelulukan semakin ke arah barat semakin menurun. Hal ini diindikasikan oleh kehadiran lapisan pasir rentan pelulukan yang semakin menipis.

Penampang G-H

Pada penampang G-H (Gambar 17 d) tampak bahwa dimensi endapan pasir alur sungai purba dan pasir endapan alur estuari semakin membesar. Selain itu, lapisan yang menutupi endapan alur sungai purba semakin tipis. Kondisi yang demikian memudahkan terjadinya proses pelulukan dan mengakibatkan kerusakan lahan. Dengan demikian, bangunan-bangunan yang ada di atasnya akan mengalami kerusakan pula. Hal penting lain yang perlu diperhatikan ialah bahwa kedalaman permukaan air tanah semakin dangkal. Hal ini memberi makna bahwa lapisan pasir alur sungai purba berada di bawah permukaan air tanah.

Berdasarkan data tersebut, secara umum dapat disebutkan bahwa bentuk geometri lapisan rentan pelulukan yang didapatkan dari hasil korelasi penampang pemboran semakin menebal ke arah utara dengan kedalaman yang semakin dangkal pula. Sebaliknya ke arah selatan lapisan pasir tersebut semakin menipis dan semakin dalam. Sementara kedalaman permukaan air tanah dangkal ke arah utara semakin dangkal. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa di daerah penelitian endapan pasir rentan pelulukan berada di bawah permukaan air tanah dangkal. Kondisi yang demikian ini memberi efek terhadap tingkat konsolidasi lapisan pasir. Lapisan pasir yang ditutupi oleh endapan yang lebih

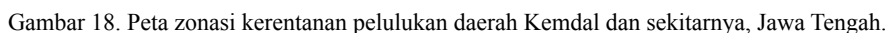
tebal akan mempunyai tingkat konsolidasi yang lebih besar. Konsekuensinya, lapisan pasir tersebut akan mempunyai tingkat kerentanan pelulukan yang rendah dibandingkan dengan endapan yang tingkat konsolidasinya rendah.

Hal lain yang dapat dilihat dari hasil korelasi penampang pemboran tersebut adalah bahwa posisi stratigrafis lapisan alur sungai purba dan endapan alur estuari yang sangat rentan terhadap bencana pelulukan, umumnya ditutupi dan dialasi oleh endapan yang mempunyai tingkat permeabilitas yang rendah. Lapisan penutup pada umumnya terdiri atas endapan limbah banjir, cekungan banjir, dan endapan rawa. Sementara yang mengalasinya adalah endapan laut dekat pantai dan endapan laut lepas pantai. Kondisi stratigrafis yang demikian ini menjadikan lapisan pasir alur sungai purba dapat mengalami pelulukan (*liquefied*) apabila mengalami guncangan akibat gempa bumi, dan sebagai konsekuensinya daya dukung lahan menjadi hilang.

Berdasarkan data dan kondisi tersebut di atas maka tingkat kerentanan pelulukan di daerah Kendal dan sekitarnya, dapat dipisahkan menjadi Wilayah Kerentanan Pelulukan Rendah, Wilayah Kerentanan Pelulukan Sedang, dan Wilayah Kerentanan Pelulukan Tinggi (Gambar 18).

Wilayah Kerentanan Pelulukan Rendah

Wilayah kerentanan pelulukan rendah tersebar di bagian selatan daerah penelitian dan sebagian kecil di bagian tengah yang memisahkan wilayah tingkat kerentanan sedang dan wilayah tingkat kerentanan tinggi. Wilayah ini disusun oleh endapan dataran banjir, cekungan banjir, endapan rawa, endapan laut dekat pantai, dan endapan laut lepas pantai. Secara umum, batuanannya didominasi oleh fraksi halus berupa lempung, lempung lanauan, dan lanau. Kehadiran lapisan pasir yang rentan terhadap pelulukan pada umumnya adalah berupa lapisan tipis sebagai sisipan pada batuan yang berbutir lebih halus. Oleh karena itu, daerah ini dikategorikan ke dalam wilayah rentan pelulukan rendah. Seed drr. (1983) menyatakan bahwa sedimen lempung tidak akan mengalami pelulukan apabila diguncang oleh gempa bumi. Akan tetapi sedimen pasir yang kandungan lempungnya kurang dari 15%, *liquid limit* kurang dari 35% dan kandungan air lebih besar dari 0,9% mempunyai potensi untuk mengalami pelulukan.



Lapisan pasir rentan pelulukan sedang diwakili oleh endapan pasir alur sungai purba dan endapan pasir alur estuari. Kedua lapisan rentan pelulukan tersebut dialasi dan ditutupi oleh lapisan yang permeabilitasnya relatif rendah. Kedua lapisan rentan pelulukan tersebut relatif tebal, yaitu berkisar antara 4 m – 6 m, dengan lapisan penutup dengan setebal 3 m – 5 m. Dengan perbandingan lapisan penutup dan ketebalan lapisan pasir rentan pelulukan yang demikian ini, peristiwa pelulukan di daerah ini dapat merusak dan merubuhkan bangunan di atasnya. Menurut Ishihara (1985; dalam Matti, 1991) pelulukan yang berpotensi menimbulkan kerusakan lahan (*ground failure*) dan dapat mengakibatkan kerusakan pada bangunan yang ada di atasnya harus mempunyai perbandingan ketebalan antara lapisan penutup dengan lapisan pasir 1 : 2. Data lain yang mengindikasikan daerah ini berpotensi mengalami pelulukan dengan tingkat kerentanan sedang adalah besar butirnya. Percontoh pasir untuk keperluan analisis besar butir diambil dari titik bor No. 28 dan No. 5. Kedua percontoh tersebut mewakili endapan alur sungai purba. Berdasarkan hasil analisis

laboratorium terlihat bahwa besar butir endapan alur sungai dari titik bor 5 menunjukkan besar butir rata-rata (*mean*): 1,55 Ø, yaitu pasir menengah (*medium sand*) dengan pemilahan buruk (*poorly sorted*): 1,21 Ø. Sementara percontoh yang diambil dari titik bor 29 menunjukkan rata-rata besar butir (*mean*): 2,02 Ø dengan pemilahan (*sorting*) cukup: 0,88 Ø (*moderately sorted*). Percontoh ini besar butirnya lebih halus dan tergolong pasir halus (*fine sand*).

Wilayah kerentanan tinggi tersebar di bagian utara daerah penelitian, yaitu menempati sebagian dataran delta. Tingkat kerentanan wilayah ini diindikasikan oleh kehadiran endapan rentan peluluhan berupa pasir alur sungai purba dan alur estuari yang cukup tebal (1 - 4 m). Endapan ini ditutupi oleh endapan rawa maupun endapan cekungan banjir yang tidak begitu tebal, khususnya pada titik bor No.7 dan No. 10. Sebagai konsekuensinya tingkat konsolidasi batuan pasir tersebut relatif lebih rendah. Selain itu kisaran besar butir di wilayah ini relatif lebih seragam. Untuk keperluan analisis besar butir dua percontoh diambil dari titik bor No. 25 dan titik

bor No. 24, masing-masing mewakili endapan alur sungai purba dan pasir alur estuari secara berurutan. Berdasarkan analisis laboratorium diketahui bahwa kisaran besar butir rata-rata endapan alur sungai purba (*mean*): 0,88 Ø (*medium sand*), sedangkan ukuran butir rata-rata pasir endapan alur estuari adalah 1,98 Ø (pasir menengah atau *medium sand*).

KESIMPULAN

Daerah penelitian tersusun oleh endapan Kuarter yang sifat fisiknya masih urai dan jenuh air. Endapan Kuarter tersebut dapat dibedakan berdasarkan lingkungan pengendapannya menjadi endapan rawa, endapan fluviatil (endapan alur sungai purba, endapan limbah banjir, endapan cekungan banjir), endapan alur estuari, endapan laut dekat pantai, dan endapan laut lepas pantai.

Endapan yang berpotensi mengalami pelulukan direpresentasikan oleh endapan pasir alur sungai dan endapan pasir alur estuari. Posisi stratigrafis endapan pasir rentan pelulukan berada di bawah permukaan air tanah dangkal, sehingga endapan pasir tersebut tetap jenuh air.

Kegempaan di daerah ini dapat bersumber dari sesar naik yang terletak di selatan daerah penelitian memanjang dengan arah timur – barat dan memotong Formasi Kerek, Formasi Damar, dan Formasi Kali Getas. Selain itu, lajur subdaksi merupakan sumber gempa lain yang dapat memicu kejadian gempa di daerah ini.

Ditinjau dari aspek lingkungan pengendapan dan batuan serta kegempaan, daerah penelitian berpotensi mengalami pelulukan.

Tingkat kerentanan pelulukan daerah Kendal dan sekitarnya dapat dipisahkan menjadi Wilayah Kerentanan Pelulukan Rendah, Wilayah Kerentanan Pelulukan Sedang, dan Wilayah Kerentanan Pelulukan Tinggi.

Ucapan Terima Kasih—Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sonny Mawardi, ST dan Yayan Sofian, ST atas bantuannya, sehingga makalah ini dapat diselesaikan. Juga penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan Dr. Herman Moechtar, Ir. Soemantri Poedjoprajitno, Ir. Santoso, dan kepada semua pihak yang memberikan koreksi, kritikan, dan masukan, sehingga makalah ini menjadi lebih baik.

ACUAN

- Folk, L.R., 1961. *Petrology of Sedimentary Rocks*. The University of Texas.
- Lumbanbatu U.M., dan Soemantri P., 2007. Dinamika Geologi Kuarter Dataran Pantai Daerah Kendal Provinsi Jawa Tengah. Dalam persiapan terbit di Jurnal Pusat Pengembangan Geologi Kelautan. Bandung.
- Lumbanbatu U.M., 2004. Kajian Potensi bencana Pelulukan (Liquefaction) di Daerah Semarang dan Sekitarnya. *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 1 (1), Pusat Survei Geologi.
- Matti J.C., 1991. Liquefaction Susceptibility in the San Bernardino Valley and Vinicity, South California; A Regional Evaluation. *U.S. Geological Bulletin* 1898.
- Obermeier S.F., Martin J.R., Frankel A.D., Yould T.L., Munson P.J., Munson C.A., dan Pond, E.C., 1993. Liquefaction Evidence for One or More Strong Holocene Earthquakes in the Wabash of Southern Indiana and Illinois, with a Preliminary Estimate of Magnitude. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1536. United State Government Printing Office, Whasington
- Reading, H.G., 1978. *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Boston, Palo Alto, Melbourne.
- Reineck, H.E. dan Singh, I.B., 1973. *Depositional Sedimentary Environment*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Seed, H.B., dan Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Proceeding of the American Society of Civil Engineering, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97 (SM).
- Seed, H.B., Idriss, I.M., and Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 109 (3), p. 458-482
- Thanden, R.E., Sumadirdja, H., Richards, P.W., Sutisna, K., dan Amin, T.C., 1996. *Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang, Skala 1 : 100.000*. Pusat Survei Geologi Bandung.
- Tinsley, J.C., Yould T.L., Perkin, D.M., dan Chen, A.T.F., 1995. Evaluating Liquefaction Potensial. *U.S Geological Survey Professional Paper* 1360. United State Government Printing Office, Washington.
- Yould, T.L., dan Perkin D.M., 1978. Mapping liquefaction-induced ground failure potential. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE.*, 104, GT4.
- Wang, 1979. <http://www.ce.washington.edu/~liquefaction/html/susceptible2.html>: Which soils are liquefaction susceptible?