

ARTIKEL RISET

# Estimasi Magnitudo *Paleoearthquake* Dengan Metode *Magnitude Bound*

Desi Kiswiranti\* dan Juventus K S N

## Abstrak

Yogyakarta telah merekam jejak kegempaan yang unik pada bangunan candi diantaranya adalah candi Kedulan, candi Plaosan, candi Gampingan, candi Morangan serta candi Kadisoka yang mengalami deformasi pada tubuh bangunan akibat likuifaksi. Struktur likuifaksi yang dijumpai pada situs candi berupa *sand pillar*, *sand fissure* dan *sand sill* yang terdiri dari material pasir yang mengintrusi lapisan sedimen lainnya. Metode *Magnitude Bound* digunakan untuk menentukan besarnya kekuatan gempa masa lalu berdasarkan data paleolikuifaksi dengan memanfaatkan jarak terjauh terbentuknya likuifaksi dengan episentrum gempa. Penerapan metode tersebut menunjukkan bahwa di masa lampau, Yogyakarta pernah terjadi gempa bumi besar dengan magnitudo sebesar 6,25–6,5 M. Gempa bumi tersebut dapat menimbulkan kerusakan fisik yang parah, serta dapat menimbulkan bencana sekunder berupa likuifaksi.

**kata kunci:** *magnitude bound*; likuifaksi; *paleoearthquake*; paleolikuifaksi; Yogyakarta

## Abstract

Yogyakarta was recorded unique seismic on the temple buildings such as Kedulan, Plaosan, Gampingan, Morangan and Kadisoka deformed on the body of the building due to liquefaction. Liquefaction structure found on the site of sand pillar, sand fissure and sand sill consisting of sand material that intrusion other sediment layer. Magnitude Bound method is used to estimate the paleoearthquake magnitudes from paleoliquefaction data by utilizing the farthest distance liquefaction formed with epicenter earthquake. The application of the method shows that Yogyakarta had a large earthquake with magnitude of 6.25-6.5 M. The earthquake can cause severe physical damage, and can lead to secondary disasters such as liquefaction.

**keywords:** magnitude bound; liquefaction; paleoearthquake; paleoliquefaction; Yogyakarta

## 1. Pendahuluan

Peristiwa gempabumi besar dapat menimbulkan dampak primer seperti guncangan, kenaikan dan penurunan tektonik, patahan permukaan, dan dampak sekunder seperti tsunami, longsoran dan likuifaksi. Fenomena likuifaksi akibat gempabumi merupakan peristiwa hilangnya kekuatan lapisan pasir lepas akibat kenaikan tekanan airpori karena menerima getaran gempabumi. Dengan demikian, peristiwa likuifaksi akan terjadi di daerah rawan gempabumi besar yang tersusun oleh endapan pasir jenuh air dengan kepadatan rendah, dan di daerah dengan pergerakan permukaan koseismik melebihi nilai batas ambangnya [1] Berdasarkan catatan sejarah kejadian

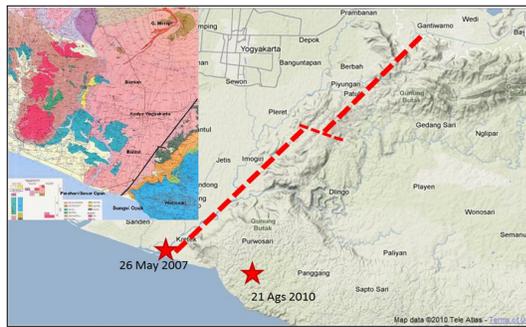
gempa, Yogyakarta pernah mengalami sebanyak tujuh kejadian gempa merusak [2] Salah satu kejadian gempa tersebut diduga mengakibatkan terjadinya tsunami, yaitu gempa tahun 1840 (Tabel 1). Kejadian gempa pada tahun 1943, 2006 dan 2010 diperkirakan bersumber dari sesar Opak.

Secara umum litologi wilayah Yogyakarta pada umumnya merupakan endapan Kuartar yang tersusun dari endapan rombakan gunung api muda dan endapan alluvial, serta batuan sedimen Tersier. Endapan rombakan gunung api dihasilkan oleh erupsi gunung api, khususnya Merapi. Secara umum batuan hasil erupsi gunung api ini berupa abu vulkanik, tuf, lava, breksi vulkanik, breksi andesit dan agglomerat. Batuan vulkanik lainnya yang banyak ditemukan di sekitar wilayah Yogyakarta merupakan hasil erupsi Gunung Tidar, Puser, Balak, Candikukuh, Merbabu, Sumbing dan Merapi. Endapan aluvium terdiri dari material lepas berupa kerakal, pasir, lanau dan

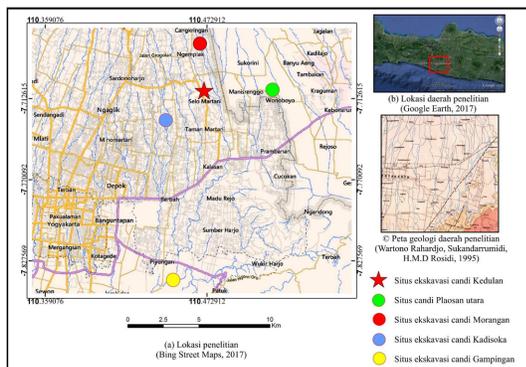
\*Korespondensi: kiswiranti@akprind.ac.id

Jurusan Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Mineral, Institut Sains dan Teknologi AKPRIND, Jl.Kalisahak No.28 Kompleks Balapan, 55222, Yogyakarta, Indonesia

Informasi lengkap tentang penulis dapat dilihat pada akhir artikel



Gambar 1: Posisi sesar Opak yang disadur dari peta geologi lembar Yogyakarta, Jawa (insert) [3]. Tanda bintang berwarna merah menunjukkan posisi episentrum [4]

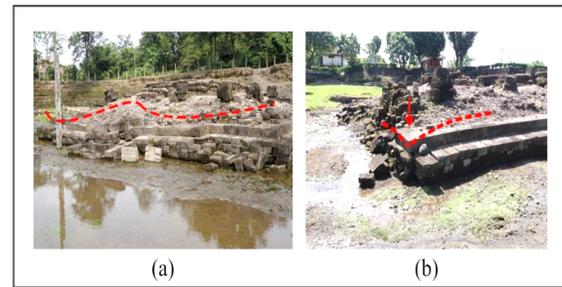


Gambar 2: Peta lokasi daerah penelitian

lempung sepanjang sungai besar dan dataran pantai.

Kehadiran litologi berbutir halus (endapan aluvial, piroklastik, lendapan lahar berbutir halus) yang belum terkonsolidasi dan ketinggian muka air tanah yang cenderung rendah yaitu kurang dari 9 meter [5] mengakibatkan daerah Yogyakarta berpotensi untuk terjadinya likuifaksi. Kejadian gempa Yogyakarta pada tahun 2006 serta beberapa kejadian gempa sebelumnya diidentifikasi sebagai pemicu munculnya likuifaksi. Likuifaksi umumnya dijumpai di daerah sepanjang sesar Opak berupa *sand boiling*, *sand dike* serta beberapa pondasi bangunan yang mengalami penurunan setelah terjadi gempa.

Berdasarkan data dari USGS (*United State Geological Survey*), posisi episentrum gempa Yogyakarta 27 Mei 2006 berada di kawasan Pantai Samas atau tepatnya di muara Sungai Opak, pada koordinat  $8,007^{\circ}LS110,286^{\circ} BT$  sejauh 20 km ke arah selatan dari kota Yogyakarta (Gambar 1). Episentrum ini berada tepat di sebuah patahan yang berarah timur laut - barat daya dan membentang



Gambar 3: Deformasi pada struktur candi utama Kedulan. Pondasi bergelombang pada sisi bagian timur (a), lensa kamera menghadap barat. Penurunan pada sudut pondasi arah barat daya (b), lensa kamera menghadap timur laut



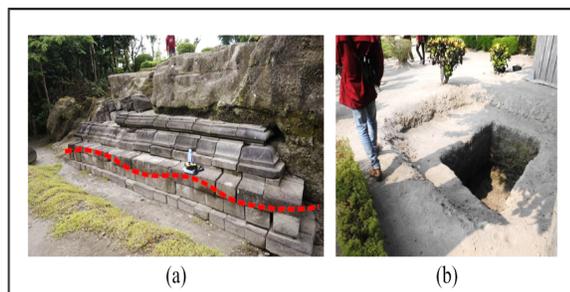
Gambar 4: Deformasi pada struktur pondasi candi perwara situs Kedulan, lensa kamera menghadap selatan.

mulai dari kawasan utara Candi Prambanan hingga ke muara Sungai Opak. Hal tersebut dapat menjelaskan bahwa kegempaan pada daerah Yogya berhubungan dengan aktivitas patahan Sungai Opak. Hal tersebut berkaitan dengan tingkat kerusakan terparah dan korban jiwa terbesar yang berada pada sumbu imajiner Bantul-Klaten, karena patahan tersebut membentang dari Bantul selatan hingga Klaten selatan (kawasan Prambanan).

Struktur pondasi bangunan yang mengalami penurunan dan roboh selama ini dipercaya oleh peneliti disebabkan oleh terjangan besar lahar gunung Merapi sekitar awal abad ke-11. Akan tetapi, kerusakan struktur tersebut disebabkan oleh likuifaksi [6]. Arah robohnya bangunan yang tidak memiliki orientasi tertentu menjadi salah satu ciri terjadinya likuifaksi. Selain identifikasi, prediksi potensi gempa bumi besar di masa lampau juga dapat dilakukan berdasarkan keberadaan likuifaksi pada bangunan candi di sekitar Yogyakarta. Selain itu, besar magnitudo gempa bumi juga dapat diestimasi



Gambar 5: Perubahan struktur bangunan pada candi Morangan. pondasi yang bergelombang dan penurunan pada pondasi candi utama (a), lensa kamera menghadap timur. Perubahan struktur pada tubuh candi perwara (b), lensa kamera menghadap tenggara.



Gambar 6: Kondisi situs dan bangunan candi Kadisoka. Salah satu bagian dari pondasi pada sisi utara yang sedikit bergelombang, pondasi telah direkonstruksi (a). Sumur uji pada situs ekskavasi (b). Lensa kamera menghadap tenggara pada kedua objek tersebut

berdasarkan metode *Magnitude Bound* sehingga dapat diperkirakan tingkat kerusakan yang dapat ditimbulkan dan akibat lanjutannya.

Ciri struktur likuifaksi berdasarkan jarak dari sumber gempa terduga juga dapat diteliti. Ciri likuifaksi yang mungkin dapat diamati adalah dimensi dan bentuk dari struktur tersebut, yang dapat berupa *sand dike*, *sand sill*, *sand pillar*, dsb. Penelitian ini juga melibatkan syarat dari potensi likuifaksi seperti litologi dan ketinggian muka air tanah. Oleh karena itu, penentuan magnitudo gempa massa lalu berdasarkan likuifaksi dengan metode *Magnitude Bound* menjadi menarik untuk dilakukan.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer yang diperoleh berupa pengamatan struktur bangunan candi, pengamatan tinggi muka air tanah, data stratigrafi serta dokumentasi. Sedangkan



Gambar 7: Kondisi lokasi situs candi Plaosan utara. Lokasi situs telah ditata sejak proses ekskavasi berakhir (a), lensa kamera menghadap utara. Candi utama yang dikelilingi oleh puluhan candi perwara yang belum dipugar seluruhnya (b), lensa kamera menghadap selatan



Gambar 8: Deformasi pada bangunan candi Plaosan utara. Penurunan pada sudut-sudut pondasi candi perwara (a), lensa menghadap utara. Kondisi pagar candi utama yang bergelombang dan miring ke arah selatan (b), lensa menghadap timur

data sekunder diperoleh dari penelitian terdahulu terkait dengan obyek dan lokasi penelitian. Lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar 2. Proses pengumpulan data primer dilakukan dengan dua cara yakni pengumpulan data di lokasi penelitian serta pengolahan data dan analisis studio. Pengumpulan data primer dilakukan pada lokasi situs:

a. Candi Kedulan, desa Tirtomartani, kec. Kalasan, kab. Sleman, D.I. Yogyakarta. Koordinat lokasi  $7^{\circ} 44' 32,95''$  LS;  $110^{\circ} 28' 10,80''$  BT.

b. Candi Plaosan, desa Bugisan, kec. Prambanan, kab. Klaten Jawa Tengah. Koordinat lokasi  $7^{\circ} 44' 25,88''$  LS;  $110^{\circ} 30' 16,53''$  BT

c. Candi Gampingan, dusun Gampingan, kec. Piyungan, kab. Bantul. Koordinat lokasi  $7^{\circ} 50' 07,88''$  LS;  $110^{\circ} 26' 14,46''$  BT

d. Candi Kadisoka, desa Purwomartani, kec. Kalasan, kab. Sleman. Koordinat lokasi  $7^{\circ} 45' 19,01''$  LS;  $110^{\circ} 26' 45,10''$  BT

e. Candi Morangan, dusun Morangan, kec. Ngemplak, kab. Sleman. Koordinat lokasi  $7^{\circ} 41' 04,96''$  LS;  $110^{\circ} 28' 10,15''$  BT

Penentuan lokasi ini pertama-tama didasarkan pada informasi mengenai keberadaan struktur bangunan kuno (candi) yang mengalami deformasi secara alami.



Gambar 9: Perubahan struktur bangunan pada candi Gampingan. Pondasi yang bergelombang dan penurunan sudut pondasi pada candi utama (a), lensa kamera menghadap utara. Deformasi pada candi perwara situs Gampingan (b), lensa menghadap barat laut

Kemudian, melalui data penelitian atau ekskavasi bangunan candi akan divalidasi apakah deformasi tersebut disebabkan oleh likuifaksi melalui rekaman stratigrafi, walaupun tidak semua data stratigrafi menampilkan adanya likuifaksi.

Kemudian lokasi situs yang diduga sebagai calon objek penelitian divalidasi sekali lagi menggunakan data ketinggian muka air tanah, litologi serta sejarah kegunaan pada daerah sekitarnya. Semua proses tersebut sesuai dengan standar validitas potensi pembentukan likuifaksi di alam. Setelah rangkaian *cross-checking* tersebut dilakukan, maka diperoleh lokasi dan objek penelitian yang tepat.

Proses pengamatan dilakukan terhadap beberapa objek yang mendukung syarat terbentuknya likuifaksi yang berhubungan dengan *paleoearthquakes*. Serta pengamatan pada struktur bangunan candi yang menandakan aktivitas likuifaksi di sekitar lokasi candi. Pengamatan pertama dilakukan pada struktur bangunan candi. Berdasarkan teori yang disampaikan oleh Ishihara dan Yosimine dalam muntohar [6] bahwa suatu bangunan mencirikan deformasi tertentu bila terjadi likuifaksi. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan faktor lain seperti sejarah kegunaan, litologi serta ketinggian muka air tanah sekitar. Data litologi juga dikumpulkan dari lokasi penelitian. Beberapa data yang diperlukan lainnya adalah jenis litologi (berukuran halus) serta kondisinya yang masih lepas (*unconsolidated*). Data lapangan ini akan memvalidasi informasi yang diperoleh baik dari penelitian ekskavasi sebelumnya maupun dari geologi regional. Setelah data yang diperoleh di lapangan terkumpul, maka dilakukan tahapan pengolahan data dan analisis data. Tahapan-tahapannya adalah sebagai berikut:

Tahap pertama adalah identifikasi struktur likuifaksi pada data stratigrafi ekskavasi candi Kedulan. Identifikasi melalui data stratigrafi ini harus dilakukan

mengingat kondisi dinding ekskavasi candi tidak lagi menampilkan struktur dengan baik. Beberapa di antaranya karena telah tertutup dinding batu (dinding bagian timur). Dinding bagian barat telah mengalami pelapukan, erosi dan jenis litologi yang tidak mendukung terbentuknya likuifaksi.

Selain pengamatan terhadap struktur likuifaksi pada litologi lokasi penelitian, pengamatan juga dilakukan pada struktur bangunan candi. Pengamatan dilakukan dalam kriteria likuifaksi dan dampaknya pada tingkat penurunan/ambles pada tubuh bangunan. Teori likuifaksi dan dampaknya pada deformasi bangunan dikemukakan oleh Ishihara dan Yosimine dalam muntohar [6].

Tahap berikutnya yakni menentukan magnitudo gempa masa lalu menggunakan metode *Magnitude bound* [7]. Lokasi sumber gempa bumi terduga (dalam kasus ini sesar Opak) serta lokasi situs candi yang mengalami likuifaksi diplot ke dalam peta. Kemudian diukur jarak antara situs candi dengan pusat gempa bumi terduga. Pengukuran jarak dilakukan antara masing-masing lokasi situs ke posisi lokasi sumber gempa bumi terduga. Kemudian jarak yang diperoleh dikonversi ke satuan kilometer lalu diplotkan ke dalam grafik semilog. Hasil plotting kemudian akan menunjukkan magnitudo gempa masa lalu pada wilayah di sekitar lokasi penelitian.

Pengamatan ciri likuifaksi berdasarkan jarak lokasi dijumpainya struktur likuifaksi dengan sumber gempa (episentrum) terduga juga dilakukan. Lokasi ditemukannya struktur likuifaksi merupakan situs candi di sekitar wilayah Yogyakarta. Ciri yang dimaksud seperti jenis likuifaksi, dimensi dan jumlahnya bila memungkinkan. Pemilihan lokasi dan pengamatan ini mempertimbangkan jenis litologi, ketinggian muka air tanah, dan lokasi yang dianggap mengalami dampak gempa bumi.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Deformasi Struktur Bangunan Candi

Deformasi yang berkaitan dengan kehadiran likuifaksi umumnya dicirikan dengan terjadinya penurunan, struktur bangunan yang bergelombang maupun miring serta keruntuhan tubuh bangunan. Perubahan bentuk dan posisi bangunan kuno dalam penelitian ini kemudian diamati secara visual kemudian didokumentasikan serta diberi keterangan petunjuk pola deformasi secara sederhana. Teknik ini yang menjadi pola pengamatan untuk semua objek penelitian.

Candi Kedulan menampakkan kondisi deformasi pada beberapa bagian tubuh candi, terutama struktur pondasi. Gambar 3 menunjukkan suatu bentuk deformasi yang terjadi pada pondasi candi utama.

Tabel 1: Riwayat gempa bumi yang merusak di Yogyakarta dan sekitarnya (Elnashai dkk, 2006 dalam Muntohar 2010:21)

Tanggal	Bulan	Tahun	Latitude (South)	Latitude (East)	Magnitudo/ Intensitas	Kedalaman (km)
-	-	1797	-	-	8,4	-
-	-	1833	-	-	8,7	-
4	Januari	1840	-	-	Tsunami	-
20	Oktober	1859	-	-	Tsunami	-
10	Juni	1867	-	-	MM>VIII	-
28	Maret	1875	-	-	MM=V-VII	-
27	Februari	1903	8,00	106,00	7,9	25
11	September	1921	11,35	110,76	7,5	-
27	September	1937	8,88	110,65	7,2	-
29	Mei	1955	10,30	110,50	6,4	-
21	Desember	1962	9,00	112,40	6,3	-
16	Desember	1963	6,40	105,40	6,1	-
28	Mei	1972	11,05	116,97	6,2	-
7	September	1974	9,80	108,48	6,5	-
14	Juli	1976	8,22	114,87	6,5	36
19	Agustus	1977	11,16	118,41	6,9	33
7	Oktober	1977	9,95	117,32	6,3	33
24	Juli	1979	11,15	107,71	6,9	31
20	Oktober	1979	8,32	116,02	6,2	33
2	November	1979	7,66	108,25	6,0	25
17	Desember	1979	8,41	115,96	6,3	33
11	Maret	1982	9,27	118,48	6,4	33
7	Agustus	1982	11,14	115,42	6,2	33
27	Mei	2006	7,96	110,46	6,3	10
17	Juli	2006	9,22	107,32	7,7	34

Pondasi yang bergelombang terlihat dominan pada sisi bagian timur (a) dan penurunan sudut pondasi berarah barat daya (b). Kondisi pondasi saat ini telah mengalami beberapa pemugaran, salah satunya penempatan kembali posisi material bangunan. Hal ini sedikit berpengaruh pada kondisi aktual deformasi akibat likuifaksi. Pada tubuh candi perwara situs Kedulan, deformasi dapat diamati pada sisi pondasi bagian utara dan sudut pondasi berarah timur laut yang juga mengalami penurunan (Gambar 4). Situs candi kedulan secara keseluruhan memiliki tiga candi perwara, namun dua candi lainnya tidak menunjukkan kenampakan ciri deformasi yang ideal secara signifikan.

Deformasi pada situs candi Morangan teramati dengan baik pada struktur pondasi candi utamanya (Gambar 5). Pondasi yang bergelombang dan penurunan terlihat pada sisi bagian utara dan timur. Penurunan juga teramati pada sudut pondasi berarah timur laut (a). Candi Morangan sebenarnya memiliki beberapa candi perwara, namun hanya terdapat satu perwara yang pondasinya dijumpai pada situs ini. Perubahan struktur pada candi perwara hanya dapat diamati pada sisi utara (b), sedang bagian lain pondasi belum tersingkap.

Situs candi Kadisoka memiliki kondisi yang sedikit berbeda dengan objek penelitian lainnya (Gambar 6). Situs ini baru menyingkap pondasi sisi utara yang diduga milik candi utama (a), sedang bagian lainnya berupa sumur dan parit uji (b). Pondasi yang

cenderung bergelombang lemah menjadi petunjuk likuifaksi pada litologi sekitar bangunan kuno ini. Tidak ada objek lain yang dapat diamati untuk kasus likuifaksi selain sisi utara pondasi dan data stratigrafi yang akan diulas kemudian.

Candi Plaosan utara merupakan satu-satunya objek data pendukung yang sebagian besar tubuh bangunannya telah dipugar (Gambar 7). Perbedaan mencolok lainnya adalah ketiadaan dinding ekskavasi atau parit/sumur uji, karena permukaan tanah lokasi situs ini telah dibuat sama rata dengan daerah sekitarnya (a). Hal ini yang menjadi penyebab kondisi litologi tidak dapat diamati secara langsung di lapangan. Komplek candi Plaosan utara terdiri atas beberapa candi utama dan pagar yang mengelilinginya serta puluhan candi perwara (b). Gambar 8 menunjukkan bahwa deformasi berada pada kelompok candi perwara bagian utara (a). Pada pagar yang mengelilingi candi utama menunjukkan kenampakan bergelombang di bagian barat dan pagar bagian utara cenderung miring ke arah selatan (b). Deformasi tidak dijumpai pada candi utama yang telah direkonstruksi ke bentuk dan posisi sebenarnya.

Situs candi Gampingan berdasarkan catatan ekskavasi didominasi oleh material hasil pelapukan berupa soil. Namun, deformasi pada situs ini menunjukkan ciri yang serupa dengan bangunan kuno lainnya, yakni berupa pondasi yang bergelombang dan mengalami penurunan (Gambar 9). Pondasi yang diduga sebagai candi utama yang paling menunjukkan

Tabel 2: Hasil perhitungan jarak likuifaksi terhadap episentrum

Lokasi	Jarak
Candi Kedulan - Episentrum	35,56 Km
Candi Plaosan utara - Episentrum	38,03 Km
Candi Morangan - Episentrum	40,97 Km
Candi Kadisoka - Episentrum	32,93 Km
Candi Gampingan - Episentrum	25,16 Km

indikasi tersebut, terutama pada bagian barat dan bagian timur (a). Serta kenampakan bergelombang pada pondasi candi Perwara (b).

Arah orientasi yang tidak seragam pada deformasi bangunan-bangunan candi tersebut menunjukkan bahwa perubahan struktural bukan disebabkan oleh dorongan dari arah tertentu seperti lahar dingin seperti dalam catatan ekskavasi. Kecendrungan deformasi dengan konsentrasi arah tertentu dalam konsep likuifaksi, seperti penurunan sudut pondasi berarah timur laut pada candi Morangan, dst juga tidak memiliki arti apapun yang mengindikasikan arah atau sumber kekuatan gempa dsb.

### 3.2 Ciri Litologi dan Stratigrafi

Ciri litologi pada situs candi Kedulan secara umum tersusun atas material lepas, mulai dari yang berukuran lempung hingga berangkal. Keragaman ukuran butir dan faktor litologi sedimen lainnya menunjukkan bahwa genesa daerah situs Kedulan dibentuk oleh endapan laharik dan piroklastik yang belum terkonsolidasi. Kondisi ini didukung oleh keberadaan sistem sungai di sekitar situs (sungai Wareng berada di bagian barat) yang menyuplai endapan laharik, serta lokasi situs yang berada dekat dengan gunung Merapi yang berada di utaranya sebagai penghasil material piroklastik. Secara keseluruhan, litologi situs candi Kedulan dirangkum dalam bentuk data stratigrafi (Gambar 10) oleh Badan Pelestarian Peninggalan Purbakala (BP3) Yogyakarta dalam Laporan Ekskavasi Penelitian Pagar I Situs Candi Kedulan: Unit Candi Kedulan [8].

Data stratigrafi candi Kedulan menggambarkan beberapa bentuk dari materi sedimen baik yang menimbun maupun yang menjadi alas dari situs candi Kedulan menunjukkan kenampakan struktur likuifaksi. Berdasarkan catatan penampang stratigrafi tersebut terdapat tiga penampang yang memberikan gambaran cukup detail terhadap struktur *post-sedimentary* ini, yakni dinding ekskavasi sisi timur, barat dan selatan.

Dinding timur situs candi Kedulan memperlihatkan suatu struktur menyerupa intrusi tipe dike dengan material pasir kerakalan (Gambar 11). Intrusi ini menerobos tanah permukaan yang memiliki material

lebih halus dan padat. Pada dinding selatan, struktur likuifaksi memperlihatkan bentuk intrusi tipe *sill* yang memiliki dua cabang (Gambar 12). Material yang menyusun tubuh intrusi merupakan pasir kerakalan. Lapisan yang diintrusi terdiri atas dominasi pasir halus dan lempung. Dinding barat menunjukkan likuifaksi berbentuk dike yang terbentuk dari material pasir halus yang menembus lapisan tanah permukaan di atasnya (Gambar 13).

Pengamatan terhadap kondisi litologi situs ekskavasi candi Kadisoka (Gambar 14) dan candi Morangan (Gambar 15) dilakukan secara langsung di lapangan. Kondisi litologi kedua situs tersebut memiliki karakter yang serupa dengan candi Kedulan, yakni didominasi oleh material tidak terkonsolidasi hasil endapan laharik dan piroklastik. Material berukuran halus (pasir-lanau) pada lokasi penelitian ini menjadi media pemicu sekaligus pembentuk struktur likuifaksi. Situs candi Kadisoka memberikan petunjuk jejak likuifaksi pada sisi bagian timur. Lapisan yang menutupi bangunan kuno ini memiliki k.l 18 lapisan, dan likuifaksi terjadi pada lapisan dengan material pasir granulan/kerikilan (Gambar 16). Struktur ini menyerupai *dike* yang menerobos lapisan pasir di atasnya. Kemungkinan lain adalah lapisan pasir pada layer ke-8 itu merupakan bagian dari struktur likuifaksi yang lebih besar. Bentuknya menyerupai *injected sand/sand fissure* dengan perkembangan yang datang dari sisi selatan. Namun, tidak ada catatan stratigrafi yang menggambarkan kondisi lebih luas lagi pada sisi selatan situs ekskavasi.

Situs candi Gampingan berdasarkan data stratigrafi didominasi oleh material hasil pelapukan berupa soil. Peneliti situs ini membedakan lapisan soil berdasarkan warna dan material soil, seperti kehadiran arang bekas pembakaran tembikar atau bata pada lapisan paling bawah (Gambar 17). Pengaruh likuifaksi pada bangunan kuno ini diidentifikasi lebih banyak dipengaruhi oleh karakter litologi di bawah pondasi candi, karena kemungkinan likuifaksi terjadi pada material soil/lanau sangat kecil. Situs candi Gampingan tidak memberikan petunjuk jejak likuifaksi pada data stratigrafi yang tersedia. Sisi timur dari situs ekskavasi ini hanya menampilkan kenampakan normal lapisan sedimentasi (Gambar 18). Kondisi ini memberikan suatu petunjuk lain bahwa likuifaksi terjadi pada bagian bawah/lapisan batuan alas dari candi Gampingan. Ketidakterdiseaiaan data maupun petunjuk mengenai kondisi bawah permukaan candi menjadi kendala. Diperlukan metode lain seperti pembuatan parit uji atau sumur uji untuk pengamatan lebih lanjut dan detail pada kondisi ini.

Tidak ada informasi yang dapat dijabarkan mengenai kondisi litologi candi Plaosan utara. Hal

ini disebabkan kondisi lokasi situs saat ini yang tidak terdapat lagi dinding ekskavasi. Sedangkan informasi sekunder yang tersedia tidak menampilkan data-data tersebut. Pemilihan candi Plaosan utara sebagai objek pendukung data penelitian ditetapkan berdasarkan pada kondisi geologi regional dan cakupan wilayah terpengaruh gempa serta struktur bangunan yang mengalami deformasi.

### 3.3 Struktur Likuifaksi

Berdasarkan pengamatan visual yang dilakukan pada lokasi penelitian, tidak dijumpai adanya kenampakan struktur likuifaksi secara nyata. Hal ini disebabkan oleh intensitas pelapukan dan erosi yang terjadi. Dinding ekskavasi pada semua situs selama ini tidak diberi atap pelindung sehingga situs terekspos aktivitas eksogenik yang mengerosi dan melapukkan batuan di sekitarnya. Kenampakan struktur likuifaksi pada penelitian ini secara keseluruhan diperoleh berdasarkan data ekskavasi situs. Adanya perbedaan antara data ekskavasi dan kondisi situs saat ini mengenai kenampakan likuifaksi disebabkan oleh beberapa hal: pertama, perbedaan waktu dan titik penggalian; kedua, perbedaan persebaran litologi; ketiga, aktivitas erosi serta pelapukan yang intens seperti yang telah dijabarkan di sebelumnya. Data stratigrafi penggalian umumnya direkam pada saat ekskavasi pertama, seperti situs candi Kedulan yang digali dan diteliti pertama kali pada tahun 1993. Perubahan kemudian terjadi seiring dilakukannya penelitian lanjutan. Seperti perubahan lokasi atau pelebaran titik penggalian yang lalu membentuk dinding ekskavasi yang berubah bentuk dan posisinya (Gambar 19). Hal tersebut juga dipengaruhi oleh kondisi morfologi di sekitar situs. Secara umum, persebaran litologi/material sedimen akan mengikuti keadaan morfologi, terutama untuk endapan laharik dan piroklastik.

### 3.4 Ketinggian Muka Air Tanah

Muka air tanah pada beberapa lokasi penelitian muncul ke permukaan seperti pada candi Kedulan dan Morangan (Gambar 20). Berdasarkan pengamatan sederhana, dapat disimpulkan bahwa muka air tanah kedua situs itu dipengaruhi oleh keberadaan sungai di sekitarnya. Ketiga lokasi situs lainnya memiliki kondisi muka air tanah yang berbeda sehingga tidak dapat diamati langsung di lapangan. Kecamatan Depok dan Sleman, provinsi D.I. Yogyakarta memiliki ketinggian muka air tanah yang berkisar antara 4,5-14,6 meter di bawah permukaan tanah yang dikategorikan sebagai akuifer dangkal. Dengan ketinggian muka air tersebut maka daerah sekitar berpotensi terjadinya pembentukan likuifaksi.

### 3.5 Magnitudo *Paleoearthquakes*

Pengukuran terhadap jarak antara lokasi terbentuknya likuifaksi dengan episentrum dilakukan untuk memenuhi variabel dalam aplikasi metode *Magnitude bound* untuk memperoleh magnitudo gempa bumi masa lampau. Pengukuran jarak dalam penelitian ini menggunakan Google Earth. Posisi episentrum ditetapkan berdasarkan data dari USGS (*United State Geological Survey*) pada gempa Yogyakarta 27 Mei 2006. Berdasarkan titik koordinat lokasi-lokasi tersebut, maka menghasilkan jarak terjadinya likuifaksi terhadap episentrum gempa (Tabel 2).

Dari pengukuran jarak ini dapat dilihat perbedaan nilai antar masing-masing lokasi terbentuknya likuifaksi dengan episentrum. Nilai pengukuran jarak tertinggi dimiliki oleh candi Morangan, sedangkan nilai terkecil oleh candi Gampingan. Perbedaan jarak ini akan mempengaruhi nilai magitudo gempa masa lampau dengan metode *Magnitude bound*. Hasil perhitungan jarak dapat terlihat pada peta tiga dimensi (3D) yang menampilkan relief dan kondisi morfologi wilayah sekitar (Gambar 21). Peta 3D ini membantu untuk dapat memahami posisi subjek dan hubungan morfologis: perbedaan ciri likuifaksi dan pengaruh gempa pada kawasan kaki gunung Merapi dengan yang berada di dataran aluvial wilayah Yogyakarta serta interaksi nilai magnitudo, jarak serta litologi yang mengontrol daerah tersebut.

Selanjutnya, memasukkan nilai ke dalam semilog metode *Magnitude bound* (Gambar 22), yakni pada garis sumbu-X dari diagram adalah jarak menuju lokasi likuifaksi paling jauh (km). Kemudian dari titik nilai yang telah diinput pada garis sumbu-X, ditarik garis lurus secara vertikal (berwarna merah) untuk penggunaan jarak lokasi likuifaksi (berwarna biru yang membelah diagram). Langkah berikutnya adalah menarik garis horisontal dari garis penentu ke arah kanan menuju garis sumbu Y adalah Momen magnitudo gempa bumi (M). Langkah terakhir adalah mencatat nilai magnitudo yang ditunjukkan berdasarkan garis horisontal yang dibuat sebelumnya. Hasil tersebut akan ditampilkan dalam bentuk rentang nilai (*range* yang menyatakan kisaran magnitudo gempa. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh magnitudo gempa sebesar: 6,25 – 6,5 M. Hal ini membuktikan bahwa pada masa lalu, Yogyakarta dan sekitarnya pernah terjadi gempa bumi besar yang dapat menimbulkan kerusakan fisik yang parah, serta dapat menimbulkan bencana sekunder berupa likuifaksi.

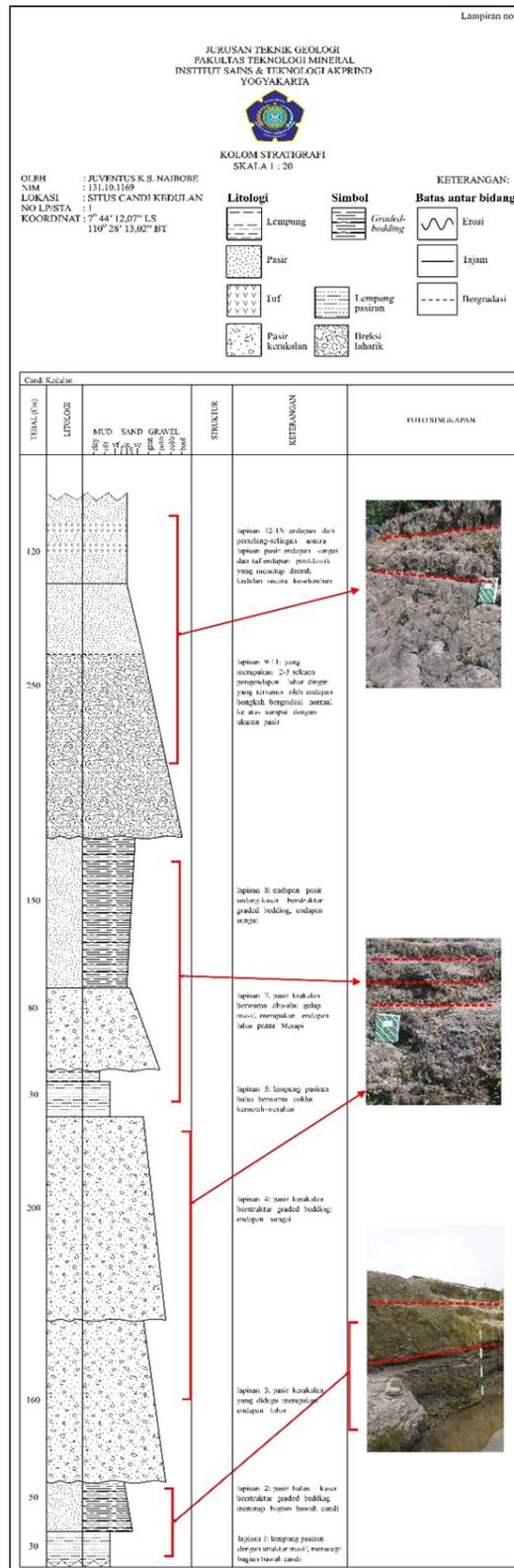
## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, candi Kedulan, candi Kadisoka, candi Morangan, candi Palosan dan

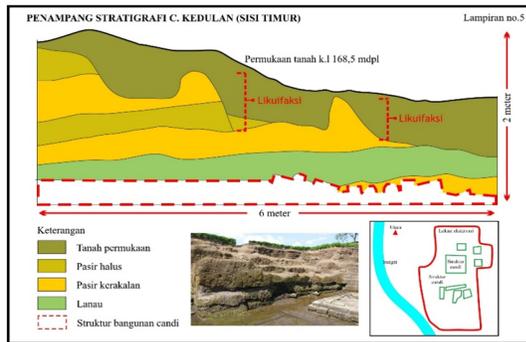
candi Gampingan menunjukkan ciri khas dari kehadiran likuifaksi yaitu pondasi yang bergelombang serta penurunan pada tubuh bangunan. Ketiadaan arah orientasi tertentu pada deformasi semakin menguatkan dugaan adanya likuifaksi. Data stratigrafi candi Kedulan menggambarkan beberapa bentuk kenampakan struktur likuifaksi pada lokasi penggalian. Jenis struktur tersebut berupa *sand pillars* yang merupakan intrusi berupa dike, serta *sand fissure* berupa *sill* bercabang dengan ukuran yang relatif kecil. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh magnitudo gempa sebesar: 6,25 – 6,5 M. Hal ini membuktikan bahwa pada masa lalu, Yogyakarta dan sekitarnya pernah terjadi gempa bumi besar yang dapat menimbulkan kerusakan fisik yang parah, serta dapat menimbulkan bencana sekunder berupa likuifaksi.

#### Pustaka

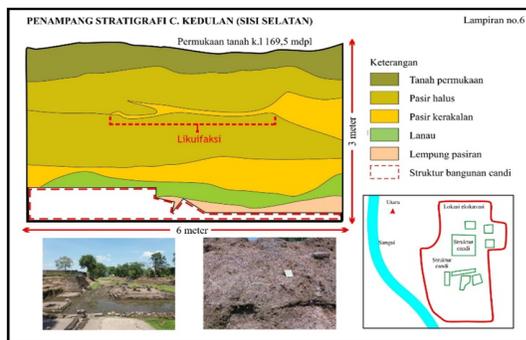
1. Adrin, T., Khori S, J.S. Arifan, Eko, S.: Kerentanan likuifaksi wilayah kota banda aceh berdasarkan metode uji penetrasi konus. *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan* vol. **74**, 489–520 (2005)
2. Supartoyo: Gempa Merusak Di Indonesia 2015. Badan Geologi, *Geomagz* vol. 6. (Juni, II), Bandung (2015)
3. Rahardjo, W., Sukandarrumidi, H.M.D. Rosidi: Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa Skala 1:100.000. Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi, Bandung (1995)
4. Rovicky: Peta Geologi Lembar Yogyakarta. Diakses pada 18 Februari 2017, pkl 20.40 WIB
5. sugalang: Panduan Geologi Teknik. Pusat Sumber Daya Air Tanah Dan Geologi Lingkungan Badan Geologi, Bandung (2002)
6. Muntohar, A.S.: Laporan Penelitian Mikro-Zonasi Potensi Likuifaksi Dan Penurunan Tanah Akibat Gempa Bumi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Diakses pada 03 Desember 2016, pkl 10.33 WIB
7. Olson, Scott, M.: Quantifying Uncertainties In Paleoliquefaction Studies, United State Geological Survey. Diakses pada 02 Desember 2016, pkl 15.23 WIB.
8. Yogyakarta, B.P.P.P.: Laporan Ekskavasi Penelitian Pagar I Situs Candi Kedulan: Unit Candi Kedulan 2007. BPCB Yogyakarta, Yogyakarta (2007)



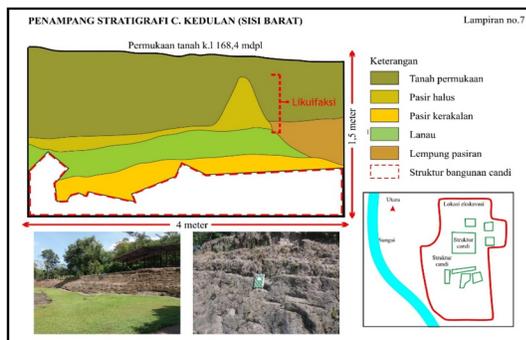
Gambar 10: Stratigrafi situs candi Kedulan kab. Sleman, D.I.Y



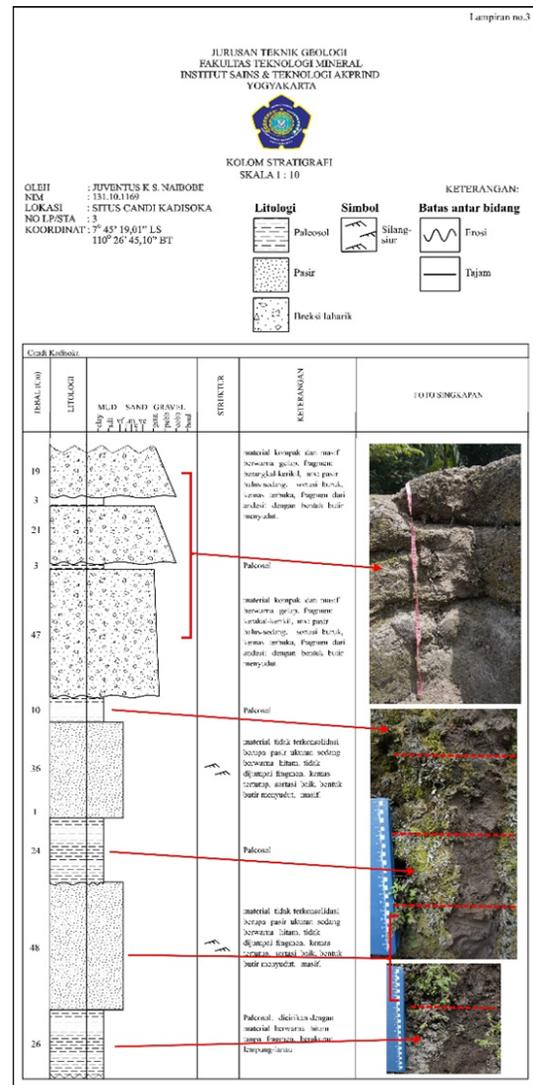
Gambar 11: Penampang stratigrafi situs candi Kedulan sisi Timur



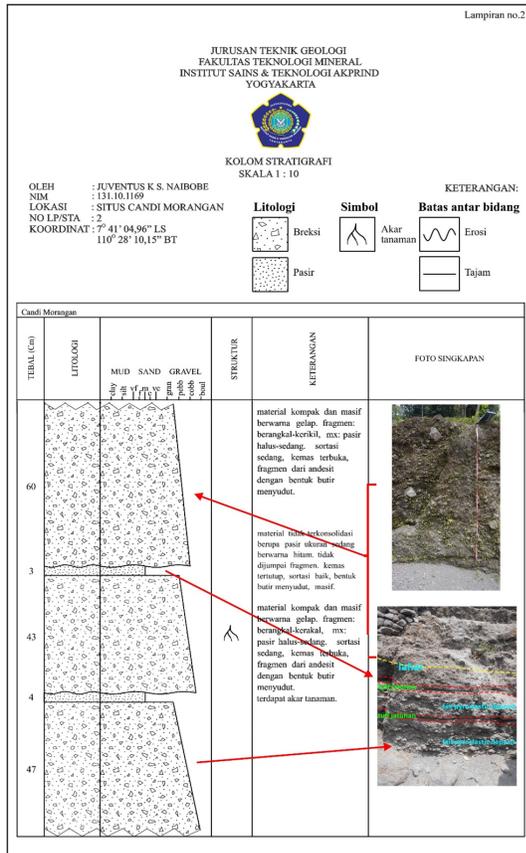
Gambar 12: Penampang stratigrafi situs candi Kedulan sisi Selatan



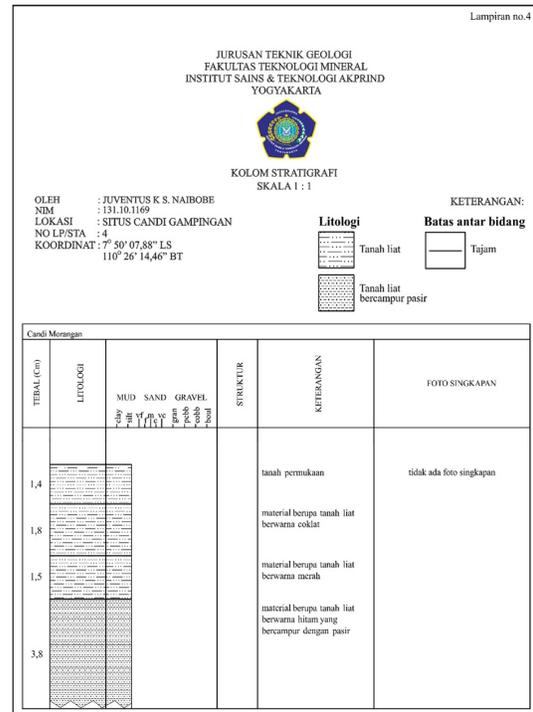
Gambar 13: Penampang stratigrafi situs candi Kedulan sisi Barat



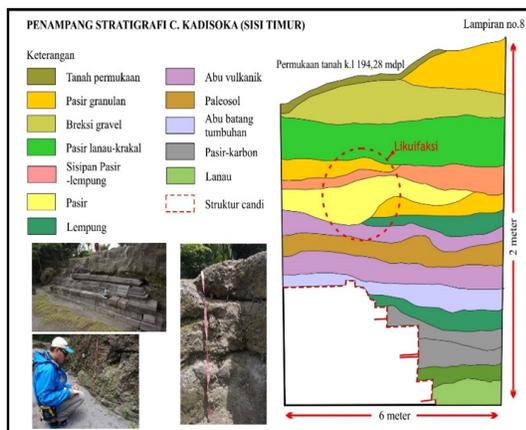
Gambar 14: Stratigrafi situs candi Kadisoka



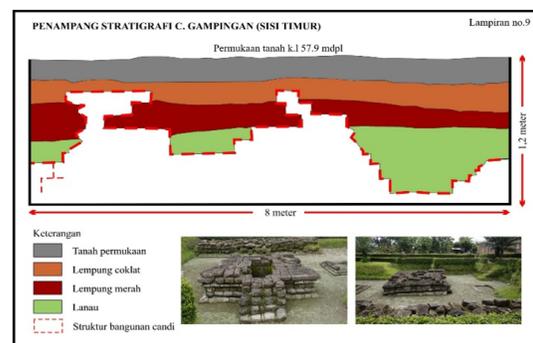
Gambar 15: Stratigrafi situs candi Morangan



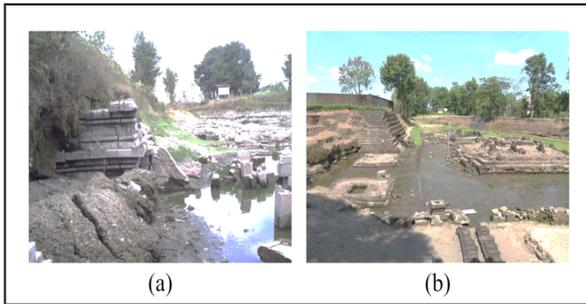
Gambar 17: Stratigrafi situs candi Gampingan



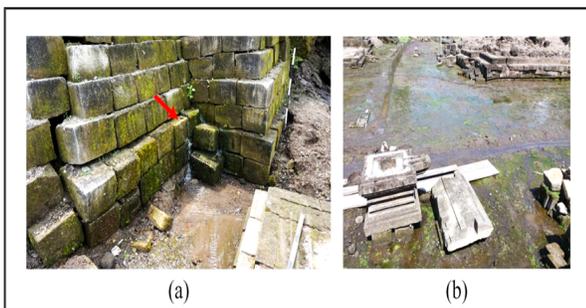
Gambar 16: Penampang stratigrafi situs candi Kadisoka sisi Timur



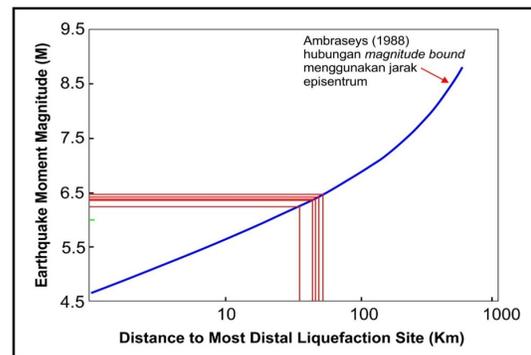
Gambar 18: Penampang stratigrafi situs candi Gampingan sisi Timur



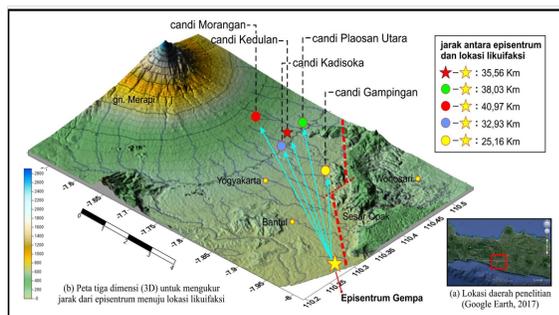
Gambar 19: Perubahan kondisi fisik lokasi ekskavasi situs candi Kedulan. Sisi timur lokasi pada saat perkembangan penggalian candi perwara (a) (anonim). Kondisi ekskavasi saat ini (b), lensa kamera menghadap selatan



Gambar 20: Kondisi hidrologi situs ekskavasi candi Kedulan. Kemunculan mata air pada salah satu sudut lokasi (a), lensa kamera menghadap tenggara. Pembuatan parit sederhana dan saluran pembuangan pada lokasi situs membantu mengontrol jumlah air agar tidak menggenangi dan merusak batuan candi dan artefak (b), lensa kamera menghadap selatan



Gambar 22: Aplikasi metode *Magnitude bound* dalam semilog. Garis biru merupakan garis penentu hubungan jarak terjauh lokasi likuifaksi dengan nilai magnitud gempa. Garis merah adalah nilai jarak yang diinput kemudian diurut untuk menemukan nilai magnitudo. [7] Dimodifikasi oleh penyusun)



Gambar 21: Peta tiga dimensi yang menampilkan hasil pengukuran jarak antara episentrum