

KARAKTERISTIK GUNUNG LUMPUR ZONA REMBANG DAN IMPLIKASINYA TERHADAP LAPANGAN MIGAS DI JAWA TIMUR

(Characteristics of Mud Volcanoes Rembang Zone and Its Implication to Surrounding Oil Field in East Java)

M. Burhannudinnur

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi
Universitas Trisakti Jl. Kyai Tapa No. 1, Jakarta, Indonesia

E-mail: burhan@trisakti.ac.id

Teregistrasi I tanggal 7 Agustus 2019; Diterima setelah perbaikan tanggal 17 September 2019;
Disetujui terbit tanggal: 31 Desember 2019.

ABSTRAK

Penelitian gunung lumpur (*mud volcano*) sudah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu, namun belum ada yang komperhensif membahas menggunakan integrasi data permukaan dan bawah permukaan. Zona Rembang terdapat beberapa gunung lumpur dengan manifestasi permukaan yang beragam dan berada di sekitar lapangan migas yang masih produktif hingga sekarang. Penelitian ini dilakukan dengan mengintegrasikan data lapangan dan data bawah permukaan. Data lapangan yang diambil berupa morfologi gunung lumpur dan pengambilan perconton lumpur pada Gunung Lumpur Kuwu, Crewek, Cangkringan, Medang, Kesongo dan Anak Kesongo. Dari data permukaan tersebut dilakukan analisis karakteristik gunung lumpur dan sumber gunung lumpur. Kemudian diintegrasikan dengan analisis data bawah permukaan berupa data log sumur dan seismik. Hasil dari analisis data bawah permukaan tersebut digunakan untuk mendeliniasi zona *overpressure* yang merupakan penyebab dari munculnya gunung lumpur. Integrasi dari analisis data permukaan dan bawah permukaan tersebut menghasilkan suatu mekanisme sistem gunung lumpur. Potensi sumber gunung lumpur (sub sistem generatif) mulai diendapkan pada waktu Formasi Tawun dengan sebaran mengikuti jejak arah Meratus. Besaran laju sedimentasi yang cukup tinggi dibandingkan formasi lain pada sedimen yang berbutir halus menyebabkan terbentuknya zona *overpressure* yang merupakan elemen subsistem migrasi

Kata Kunci: sistem gunung lumpur, zona rembang, *overpressure*

ABSTRACT

Research on the mud volcano has been done by many early researchers, but no one has comprehensively used the integration of surface and subsurface data. There are several mud volcanoes in Rembang Zone with diverse surface manifestations and they are dependent around the oil and gas fields which are still productive today. This research was conducted by integrating field data and subsurface data. Field data taken consisted of mud volcano morphology and mud sample collection in Kuwu Mud Mountain, Crewek, Cangkringan, Medang, Kesongo and Kesongo Children. From the surface data the characteristics of the mud volcano and the source of the mud volcano are analyzed. Then it is integrated with subsurface analysis data consisting of well log and seismic data. The results of subsurface analysis data are used to delineate the overpressure zone which is the cause of the presence of mud volcanoes. This integration of surface and subsurface data analysis results in a mud volcano system. Potential sources of mud volcanoes (generative sub-systems) began to be deposited at the time of the Tawun Formation with the distribution starting from the Meratus Direction. The amount of sedimentation rate is quite high compared to

other formations in fine-grained sediments due to the formation of overpressure zones which are elements of the migration subsystem.

Keywords: *Mud volcano system, rembang zone, overpressure*

I PENDAHULUAN

Gunung lumpur (*mud volcano*) adalah ekspresi permukaan dari lumpur yang berasal dari kedalaman di bawah permukaan. Topografi gunung lumpur tergantung dari geometri saluran dan properti fisik material letusan yang dapat berupa morfologi kubah, pai lumpur dengan topografi yang rendah ataupun kerucut (Kopf, 2002). Gunung lumpur terjadi dengan keluarnya material berupa batuan, cairan, atau gas dari formasi batuan di kedalaman yang mempunyai kondisi tekanan luap (*overpressure*), yang kemudian membentuk morfologi yang khas. Kajian karakteristik gunung lumpur pada penelitian ini akan meliputi morfologi di permukaan, jenis material dan proses keluarnya, serta implikasinya terhadap lapangan migas. Fenomena gunung lumpur di Indonesia sudah banyak berkembang terutama pada Zona Kendeng terdapat Lumpur Sidoarjo atau biasa disebut dengan Lusi. Kelahiran Gunung Lumpur Lusi diawali dengan terjadinya erupsi lumpur beserta cairan secara tidak terduga pada tanggal 29 Mei 2006 di Porong, Sidoarjo dua hari setelah Gempa Yogyakarta 27 Mei 2006. Erupsi ini berjarak 200 m ke arah baratdaya dari lokasi pengeboran BJP-1. Dua kelompok peneliti saling bertentangan mengenai pemicu lahirnya Lusi. Kelompok pertama berpendapat karena kesalahan pengeboran sehingga mengakibatkan blowout di bawah tanah dipelopori oleh Davies, dkk. (2007); Tingay, dkk. (2008). Kelompok kedua menyatakan lahirnya Gunung Lumpur Lusi karena pengaruh gempa Yogyakarta yang didukung oleh Mazzini, dkk. (2007); Istadi, dkk. (2009); Sawolo, dkk. (2009).

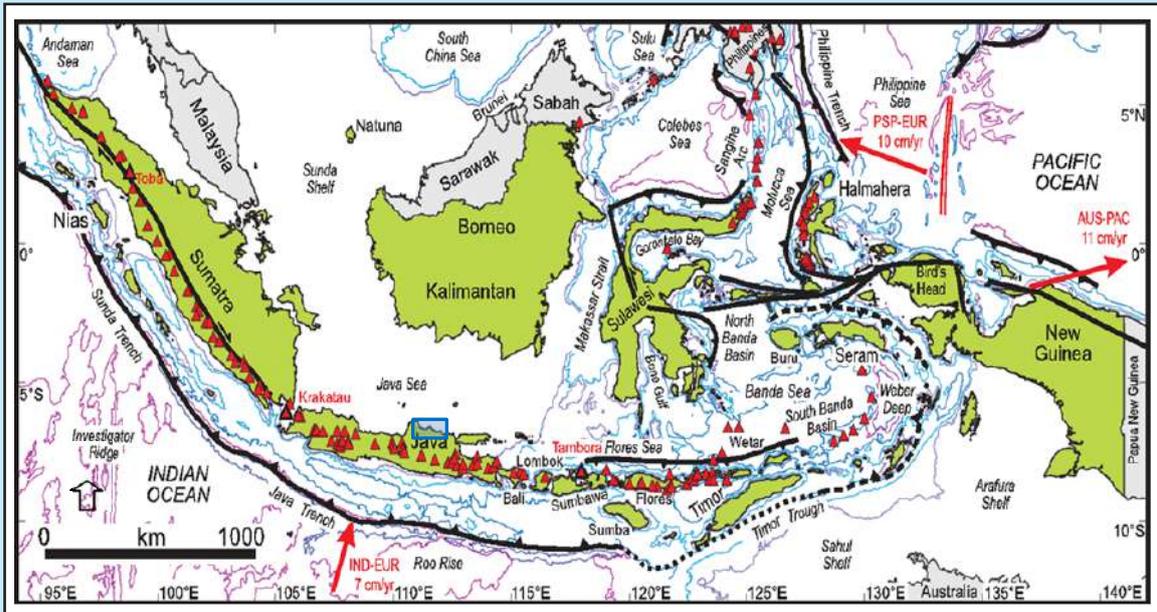
Daerah penelitian merupakan lajutan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Burhannudinnur (2012) yang terletak berada di Zona Rembang daerah Kradenan, Jawa Timur dengan menambahkan analisis data permukaan dan mengintegrasikan dengan data bawah permukaan. Gunung lumpur yang di teliti diantaranya adalah Gunung Lumpur Kesongo, Gunung Lumpur Kuwu, Gunung Lumpur Cangkringan, Gunung Lumpur Medang, dan Gunung Lumpur Anak Kesongo

yang sebarannya berada pada titik merah dalam kotak merah yang merupakan daerah penelitian pada Gambar 1. Disekitar gunung lumpur tersebut terdapat lapangan migas yang cukup produktif diantaranya milik Pertamina. Dengan hadirnya manifestasi gunung lumpur tersebut, maka harus dilakukan delineasi mengenai hadirnya kemungkinan zona overpressure. Hadirnya zona tekanan luap tersebut di deliniasi dengan menggunakan data bawah permukaan dan di konfirmasi dengan data permukaan. Sumber lumpur yang terdapat di permukaan di lakukan analisis umur dengan metode mikropaleontologi, dan sebarannya di analisis dengan menggunakan databawah permukaan.

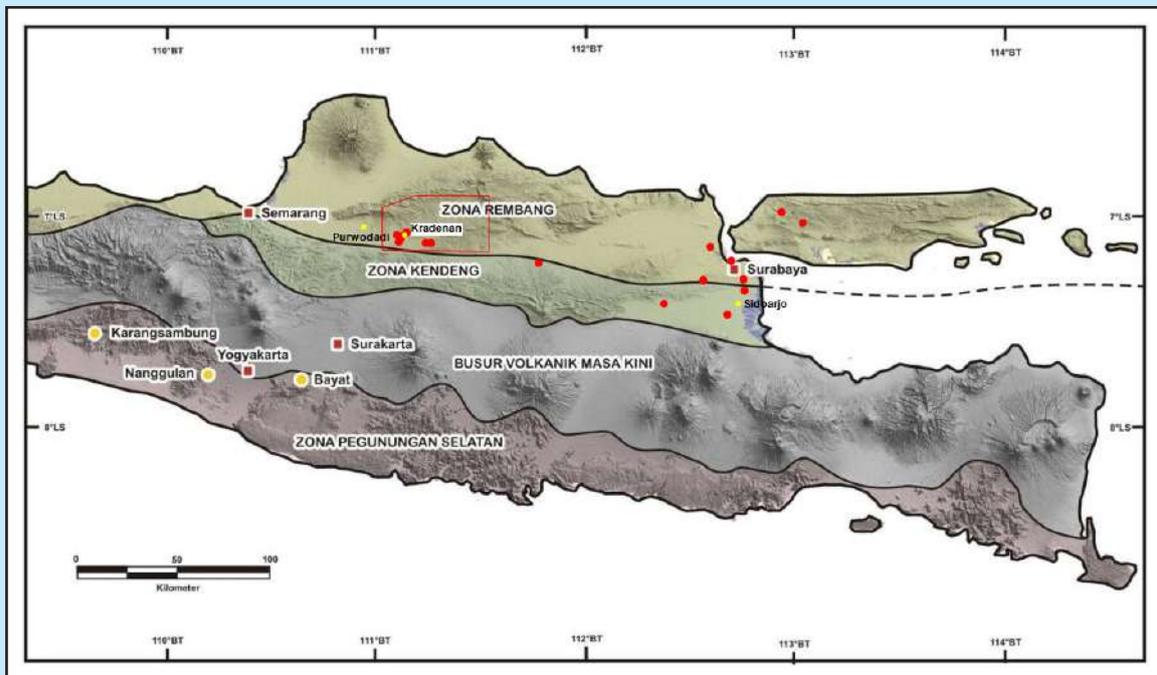
Mekanisme mengenai sistem gunung lumpur di Zona Rembang belum diteliti lebih lanjut oleh peneliti sebelumnya dengan komperhensif. Pemicu dan sumber material gunung lumpur yang berada di Zona Rembang masih belum konklusif dan memberikan banyak peuang untuk dilakukan penelitian. Hampir semua peneliti mengambil kesimpulan berdasarkan data laboratorium, data pengeboran, atau konsep regional secara terpisah-pisah, tidak terpadu. Penelitian gunung lumpur secara terpadu ini akan sangat menarik dan diharapkan mendapatkan kesimpulan yang cukup komperhensif mengenai sumber material lumpur, pembentukan gunung lumpur hingga mekanisme gunung lumpur.

A. Tektonik Regional

Pulau Jawa terletak paling selatan dari Daratan Sunda. Pertemuan lempeng ini menghasilkan zona subduksi dan busur vulkanik, dan telah berlangsung sejak zaman Kapur Akhir–Paleosen (70-55 jtl [juta tahun yang lalu]) menghasilkan kompleks busur plutonik–vulkanik, prisma akresi, zona subduksi, dan asosiasi batuan sedimen. Gambar 2 menunjukkan kerangka tektonik Indonesia dan lokasi Pulau Jawa yang terletak di Daratan Sunda. Pulunggono & Martodjojo (1994) mengelompokkan arah struktur utama di Pulau Jawa menjadi 3 bagian, yaitu: (1) Arah Meratus (baratdaya–timurlaut), (2) Arah Sunda (utara–selatan) dan (3) Arah Jawa (timur–barat). Disamping tiga arah utama tersebut, Untung & Sato (1978) berdasarkan data gaya berat dan Satyana



Gambar 1
 Posisi gunung lumpur (titik merah) pada peta fisiografi Jawa Timur (sumber peta van Bemmelen (1949) dalam Prasetyadi, 2007). Daerah penelitian hanya di fokuskan pada kotak warna merah.



Gambar 2
 Kerangka tektonik masa kini Pulau Jawa terhadap kerangka tektonik Indonesia (Hall, 2008). Kotak merah adalah daerah penelitian.

(2007) mengidentifikasi pola struktur yang lain yaitu Arah Sumatra (baratlaut-tenggara). Sribudiyani, dkk. (2003) dan Sapiie, dkk. (2006) menyampaikan bahwa arah timur-barat terdapat dua kejadian utama

yaitu arah Sakala yang lebih tua dengan Formasi Pra-Ngimbang berumur Paleosen-Eosen sebagai pengisinya dan yang kedua adalah Arah Jawa, berumur Miosen sampai sekarang.

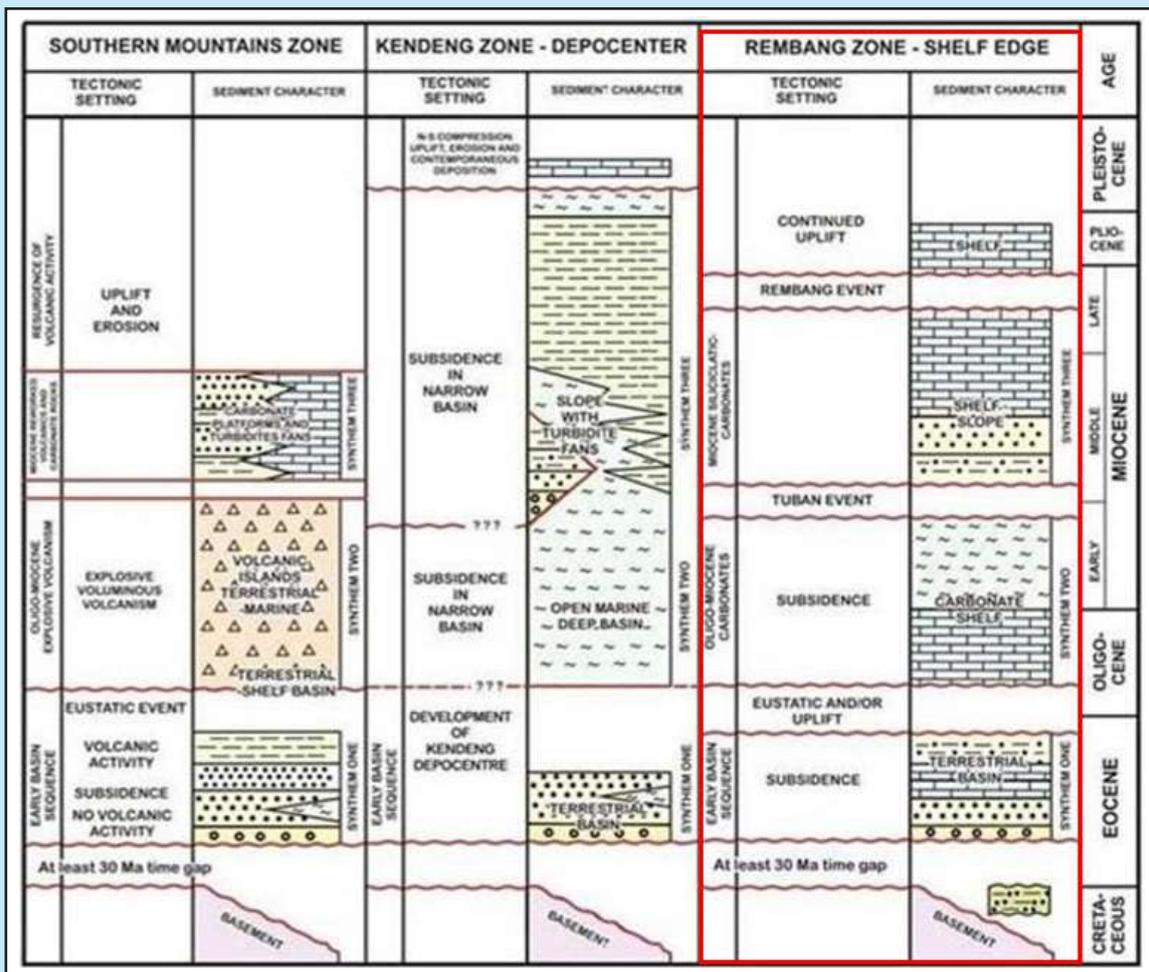
B. Stratigrafi Regional

Formasi Zona Rembang pada umumnya tersusun oleh sekuen endapan tepian paparan sedimen klastik laut dangkal dan endapan karbonat yang melampar luas dari batuan berumur Eosen sampai dengan Pliosen. Prasetyadi (2007) menyebutkan batuan dasar yang mengalasi Zona Rembang didominasi oleh berbagai jenis batuan metamorf berumur Kapur seperti batusabak (Sumur PWD1), filit (Sumur Kujung-1), dan batuan beku diorit (Sumur NCJ-1). Formasi batuan tertua berdasarkan data sumur adalah Formasi Pra-Ngimbang yang tersusun oleh batupasir, batulanau, dan serpih dengan sisipan batubara. Penyebaran formasi ini berada di bagian timur Zona Rembang dan berdasarkan kandungan fosil nanno menunjukkan umur Paleosen sampai Eosen Awal (Phillips, dkk., 1991).

Formasi yang lebih muda dari Formasi Pra-Ngimbang adalah Formasi Ngimbang, diinterpretasikan mempunyai hubungan stratigrafi tidak selaras, meskipun tidak tegas. Formasi

Ngimbang berumur Eosen Tengah tersusun dari Anggota Klastik Ngimbang di bagian bawah, Anggota Karbonat Ngimbang saat transgresi di bagian selatan dan Anggota Serpih Ngimbang saat puncaknya transgresi (Phillips, dkk., 1991). Anggota Klastik Ngimbang tersusun oleh batupasir dan konglomerat secara berangsur ke atas berubah menjadi batupasir, serpih, dan lapisan batubara, diendapkan dari terestrial di bagian bawah sampai lingkungan laut dangkal di bagian atasnya.

Formasi Kujung tersusun oleh karbonat dan diendapkan di atas ketidakselarasan ini dengan bidang perlapisan yang mempunyai orientasi mirip dengan Formasi Ngimbang sehingga ketidakselarasan ini diinterpretasikan karena penurunan muka air laut (Smyth, dkk., 2005). Dominasi endapan karbonat dari Formasi Kujung di atas Formasi Ngimbang menunjukkan berkurangnya pasokan material klastik yang kemungkinan disebabkan baik oleh naiknya muka air laut ataupun oleh berkurangnya kondisi relief di daerah sumbernya (Prasetyadi, 2007).



Gambar 3
Rangkuman stratigrafi regional Jawa bagian timur Smyth, dkk., 2005.

Pola sedimentasi berubah ketika seri batuan silisiklastik diendapkan di bagian atas Formasi Kujung. Perubahan dari endapan karbonat menjadi endapan *terigenous* yang berasal dari daratan pada Formasi Tawun dan Formasi Ngrayong. Formasi Tawun didominasi batuan berbutir halus diendapkan pada lingkungan laut dalam. Umur Formasi Tawun adalah Miosen Awal ditentukan berdasarkan fosil foraminifera.

Setelah Formasi Ngrayong diendapkan secara berurutan Formasi Bulu, Formasi Wonocolo, Formasi Ledok, dan Formasi Mundu. Komposisi formasi-formasi tersebut dicirikan dengan endapan-endapan karbonat berumur Miosen Akhir sampai Pliosen. Formasi Wonocolo tersusun oleh napal dan batugamping berumur Miosen Tengah sampai Miosen Akhir. Formasi Ledok tersusun oleh batugamping dan batugamping glokonitan berumur Miosen Akhir bagian atas. Formasi Mundu tersusun oleh napal, berumur Pliosen Awal diendapkan pada lingkungan neritik sampai batial. Gambar 3 menunjukkan rangkuman kolom stratigrafi di Jawa Timur yang dikemukakan oleh Smyth, dkk. (2005).

C. Penelitian Gunung Lumpur di Jawa Timur

Gejala diapir di Zona Kendeng Jawa Timur ditulis oleh Soetarso & Patmosukismo (1976) berdasarkan data sumur, yang menduga bahwa diapir secara langsung mempengaruhi terakumulasinya hidrokarbon dan kematangan batuan induk di Cekungan Jawa Timurlaut (*Northeast Java Basin*). Itihara, dkk. (1985) melakukan penelitian lapangan untuk gunung lumpur dan beberapa analisis laboratorium gunung lumpur di Kubah Sangiran. Kubah Sangiran merupakan bagian dari salah satu lipatan Neogen berarah barat-timur. Itihara, dkk. (1985) membuat model penampang geologi untuk Gunung Lumpur Sangiran dan menginterpretasikan bahwa pembentukan gunung lumpur berhubungan dengan sesar-sesar batuan dasar yang berorientasi utara-selatan. Sesar ini berfungsi sebagai pusat tekanan lupat batulempung berumur Miosen Awal yang naik sepanjang sesar sungkup, batuan yang rekah di sepanjang bidang sesar keluar ke permukaan menjadi gunung lumpur. Itihara, dkk. (1985) mendeskripsi juga jenis dan ukuran blok asing sampai dengan 40 cm terdiri atas batuan metamorf, batuan sedimen, dan batugamping *Nummulites* berumur Eosen. Kandungan gas berupa metana dan air, pembahasan tentang komposisi gas dan air terbatas di penelitian Itihara, dkk. (1985).

Gunung Lumpur Lusi merupakan gejala yang sangat fenomenal, meletus pada 29 Mei 2006 dengan material campuran gas, lumpur, dan air panas keluar 200 m di selatan sumur BJP-1. Volume material yang keluar sangat besar dengan volume tertinggi mencapai 180.000 m³ perhari (Mazzini, dkk., 2007). Volume material Gunung Lumpur Lusi dimodelkan oleh Istadi, dkk. (2009) dengan model awal volume 37,3 juta m³ (Mei 2007) pada laju ~ 120.000 m³/hari dan diprediksi sampai 1 Juni 2010 sebesar 136 juta m³ dengan asumsi laju aliran lumpur 90.000 m³/hari. Pada kenyataannya pada bulan Juni 2010 tercatat laju volume yang keluar 20.000 m³/hari, sehingga seharusnya volume material lebih kecil dari prediksi.

Pemicu lahirnya Gunung Lumpur Lusi masih banyak perdebatan di antara para peneliti. Berdasarkan pemicu lahirnya Gunung Lumpur Lusi, terdapat dua kelompok utama yaitu karena kesalahan pengeboran sehingga mengakibatkan ledakan (*blowout*) di bawah tanah dan karena pengaruh gempa Yogyakarta dua hari sebelum Gunung Lumpur Lusi meletus. Dalam perdebatan ilmiah tentang pemicu lahirnya Lusi dan menjawab kemungkinan adanya kesalahan pengeboran sebagai pemicu lahirnya Lusi, Sawolo, dkk. (2009) berpendapat bahwa program pengeboran adalah aman pada saat gempa dan sumur dalam kondisi mati sehingga tidak mungkin terjadi ledakan bawah tanah. Efek gempa mengakibatkan dua kali hilang lumpur kira-kira menit ke-7 setelah gempa Yogyakarta dan dua hari setelahnya. Sawolo berpendapat bahwa hilangnya lumpur akibat gempa Yogyakarta dan memicu lahirnya Gunung Lumpur Lusi. Beberapa kejadian hilangnya lumpur (*mud losses*) biasanya merupakan gejala atau indikasi adanya retakan di lubang bor. Total *losses* lumpur sering kali sebagai gejala awal dari ledakan.

Belajar dari Lusi, penelitian mengenai karakteristik sistem gunung lumpur belum dilakukan secara mendetil khususnya pada Zona Rembang. Padahal daerah Kradenan yang berda pada Zona Rembang memiliki manifestasi gugung lumpur yang cukup masif dan terletak pada Lapangan Migas milik negara.

II. BAHAN DAN METODE

A. Karakteristik Gunung Lumpur di Permukaan

Karakterisasi permukaan gunung lumpur menjadi sangat penting untuk membedakan gejala gunung lumpur dengan gejala alam lain semisal gejala geiser. Karakterisasi permukaan dimulai dari hasil

observasi lapangan dengan mengenali karakter morfologi gunung lumpur di daerah penelitian. Data lapangan telah digunakan sebagai data awal dalam memahami dan mengelompokkan gunung lumpur. Karakterisasi di permukaan adalah perpaduan antara data lapangan dan hasil analisis laboratorium dari percontonya permukaan. Hasil karakterisasi ini merupakan data penting dan diperlukan untuk tahap penelitian selanjutnya. Data yang dipakai dalam tahap selanjutnya antara lain umur lumpur, jenis lumpur dan sumber material gunung lumpur, serta komposisi material.

B. Karakteristik Bawah Permukaan Sistem Gunung Lumpur

Karakter bawah permukaan dibutuhkan untuk memisahkan karakter sistem gunung lumpur, termasuk sumber material, dengan gejala lain di bawah permukaan. Hasil karakterisasi permukaan menyimpulkan bahwa sumber lumpur dari gunung lumpur di Daerah Kradenan berasal dari Formasi Tawun. Karakterisasi sistem gunung lumpur di bawah permukaan akan lebih mengutamakan pada formasi-formasi sumber lumpur.

Karakterisasi bawah permukaan meliputi pendefinisian pola refleksi (*reflection pattern*) di penampang seismik, identifikasi dan delineasi zona tekanan luap (*overpressured*) dari data sumur dan seismik, konfirmasi zona tekanan luap dari data tekanan pori sumuran. Hal-hal tersebut digunakan untuk: (1) memisahkan gejala sistem gunung lumpur dan gejala lain di bawah permukaan, (2) melakukan validasi pengelompokan gunung lumpur pada tahap sebelumnya. Hasil tahapan ini antara lain: karakter seismik, peta-peta bawah permukaan, analisis log, dan hasil interpretasi tekanan luap, diperlukan untuk penelitian selanjutnya.

III. HASIL DAN DISKUSI

Interpretasi dan analisis data citra *Quickbird* dilakukan sebagai langkah awal dalam survei lapangan. Dua hal yang dihasilkan dari interpretasi citra yaitu peta awal untuk gunung lumpur yang berskala besar dan koordinat awal gunung lumpur untuk persiapan survei. Data citra ada dua jenis yaitu data komersial dan data umum. Data komersial diperoleh melalui pembelian resmi, sedangkan data citra umum diperoleh dari *Google Earth*. Keduanya mempunyai resolusi yang hampir setara dan karena kebutuhan dalam penelitian ini tidak memerlukan data citra *real time* maka keduanya dipakai untuk saling melengkapi. Citra *Quickbird* sangat tepat

dalam penelitian ini karena resolusinya sangat baik mencapai 1 m.

Observasi lapangan awal dilakukan bulan Mei 2009. Survei lapangan dilakukan pada akhir September 2009, April 2010, Mei 2011, dan terakhir November 2012. Lokasi semua gunung lumpur ditentukan dengan GPS dan dimasukkan ke dalam data base bersama dengan data bawah permukaan. Lokasi survei lapangan gunung lumpur di area penelitian adalah: (1) Kesongo; (2) Kuwu; (3) Cangkringan; (4) Crewek; (5) Banjarlor; (6) Medang; (7) Anak Kesongo.

A. Gunung Lumpur Kesongo

Gunung Lumpur Kesongo secara tradisional dikenal sebagai Bleduk Kesongo terletak di Lapangan Minyak Gabus milik PT Pertamina EP. Merupakan daerah kawasan hutan lindung dengan morfologi perbukitan landai. Lokasi terletak di koordinat $111^{\circ}15'14,96''$ BT, $7^{\circ}9'19,92''$ LS. Percontonya air, lumpur, gas, dan fragmen batuan diambil untuk analisis laboratorium dengan nomor percontonya B-073, B-081, B-116 untuk lumpur dan gas, serta KSG-1 sampai dengan KSG-48 untuk percontonya fragmen batuan. Memiliki luas area morfologi pai puncak kubah kurang lebih 1×1 km².

Gunung Lumpur Kesongo mempunyai morfologi kubah landai dengan puncak datar-cekung membentuk kawah landai. Beda tinggi dengan relief sekelilingnya berkisar 20-30 m. Diameter morfologi kubah mencapai 2,5-3,0 km, di puncak kubah terdapat kawah landai dengan bekas pai dari gunung lumpur. Beda tinggi pinggir kawah mencapai 5m (Gambar 4). Beberapa rekahan dapat dikenali dengan jelas sebagai kekar dan sesar naik, dengan arah timurlaut-baratdaya dan baratlaut-tenggara. Jejak pai diikuti perubahan warna melingkar lumpur dari dalam keluar berwarna abu-abu gelap, abu-abu terang, merah kecoklatan, sampai coklat muda pada bagian paling luar. Pola lingkaran warna diduga mempunyai hubungan dengan sejarah pengendapan lumpur dan periode letusannya.

Morfologi khas gunung lumpur yang dapat diamati adalah gryphon, salsa, pai kecil, dan kolam. Gryphon dijumpai berdiri sendiri atau membentuk punggung yang berorientasi sejajar dengan sesar atau rekahan, berukuran tinggi mencapai 1,2 m. Suara berisik keluar dari gryphon ketika mengeluarkan atau melontarkan lumpur. Salsa tersebar di beberapa tempat dengan rembesan gas kecil namun sangat banyak. Frekuensi gelembung yang bisa diamati 2-3 kali per detik dengan ukuran gelembung di

permukaan air umumnya berdiameter kurang dari 5 cm. Pai kecil berada di gryphon yang sudah tidak aktif. Kolam dijumpai di sisi timur gunung lumpur dengan ukuran mencapai 30x50 m². Morfologi khas gunung lumpur tersebut sebagian besar berada di dalam lumpur warna abu-abu terang sampai warna abu-abu gelap. Khusus *gryphon* dan *salsa* kadang dijumpai di bagian terluar sampai setempat-setempat namun mempunyai kelurusan dengan punggung *gryphon* di tengah (Gambar 5).

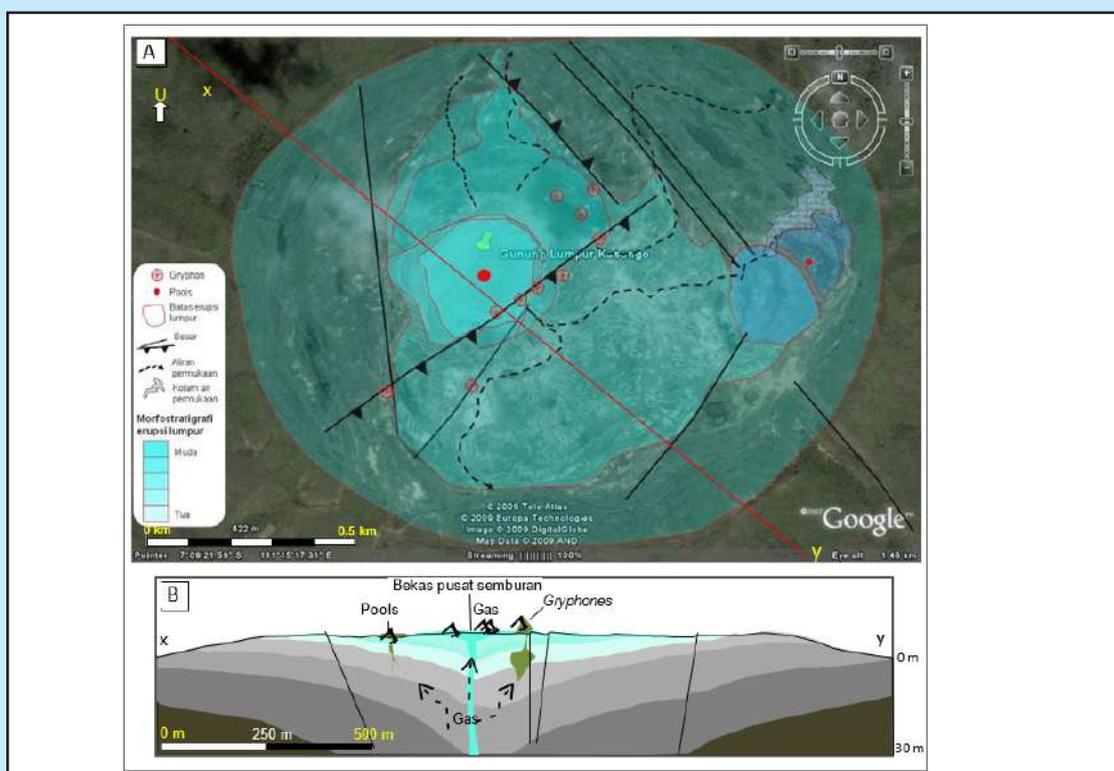
Gunung Lumpur Kesongo merupakan gunung lumpur yang besar dengan kubah berukuran berdiameter 2,5-3 km dengan beda tinggi dari morfologi sekitar berkisar 20-30 m. Jika diasumsikan faktor *subsidence*, laju lumpur, dan pengaruh erosi sangat kecil, maka volume lumpur yang keluar dapat dihitung secara sederhana. Volume lumpur Gunung Lumpur Kesongo dihitung sebagai silinder dengan diameter 2,75 km dan tinggi 25 m, volume mencapai 148,4 juta m³.

B. Gunung Lumpur Kuwu

Gunung Lumpur Kuwu atau secara lokal disebut Bleduk Kuwu terletak di Desa Kuwu Kradenan, di pinggir Jalan Purwodadi Cepu. Koordinat Gunung Lumpur Kuwu 111°7'0,03" BT, 7°7'15,96" LS.

Pengambilan perconton lumpur, gas, dan air bernomor B-071, B-080, dan B-106. Luas areanya berkisar 0,9x0,7 km².

Morfologi Gunung Lumpur Kuwu merupakan kubah sangat landai, tinggi kubah diukur dengan bantuan kompas sekitar 2-4 meter dari sebelah tenggara dan 1-2 meter jika diukur dari sebelah utara. Geometri Gunung Lumpur Kuwu dari peta adalah lingkaran sampai sedikit elips dengan kelonjongan 0,85. Puncak kubah datar sedikit cekung di tengah menyerupai kawah sangat landai dengan tanggul kawah di tepi tidak lebih dari 1 m. Di tengah kawah terdapat morfologi khas gunung lumpur pai yang terdiri atas dua, yaitu pai utama (timur) dan pai barat. Morfologi pai besar berdiameter 60 m di timur dan 20 m di barat. Ledakan gelembung gas besar diperkirakan mencapai 4-5 m (Gambar 6). Frekuensi ledakan pai timur 0,25-2 ledakan per menit, pai barat lebih lambat 0,1-0,5 ledakan per menit, meledak secara periodik. Rembesan gas dan pai kecil berkembang di sebelah timurlaut pai timur sampai ke pinggir kawah. Di antara pai barat dan timur terdapat banyak pai kecil antara 0,5-2 m, lebih dari 30 buah. Periode ledakan pai kecil bervariasi, sangat lambat 0,01-0,5 ledakan per menit. Ukuran gelembung ledakan maksimum di pai kecil yang bisa



Gambar 4

(A) Peta geologi Gunung Lumpur Kesongo berdasarkan data citra dan survei lapangan tahun 2009.
(B) Penampang geologi dengan kedalaman diperkirakan dari perbedaan tinggi kubah di lapangan.



Gambar 5

Morfologi dan geometri di Gunung Lumpur Kesongo. (A) Foto dari arah barat memperlihatkan morfologi dasar kawah landai, dan posisi bekas pusat semburan. (B) Variasi fragmen batuan. (C, D) Ukuran fragmen batuan mencapai 40 cm. (E) Retakan terbuka berarah baratlaut-tenggara. (F) Gejala sesar naik memanjang berarah barattimur. (G) Punggungan gryphon berarah barat-timur di utara dan sejajar dengan sesar naik. (H, I) Punggungan gryphon di zona tengah berasosiasi dengan salsa. (J) Morfologi gryphon dengan lelehan aliran lumpur. (K) Morfologi gryphon yang berevolusi menjadi morfologi pai. (L) Gryphon bersuara saat melontarkan lumpur. (M) Diameter lubang gryphon 10 cm, kedalaman lubang sumbat lumpur 60 cm.

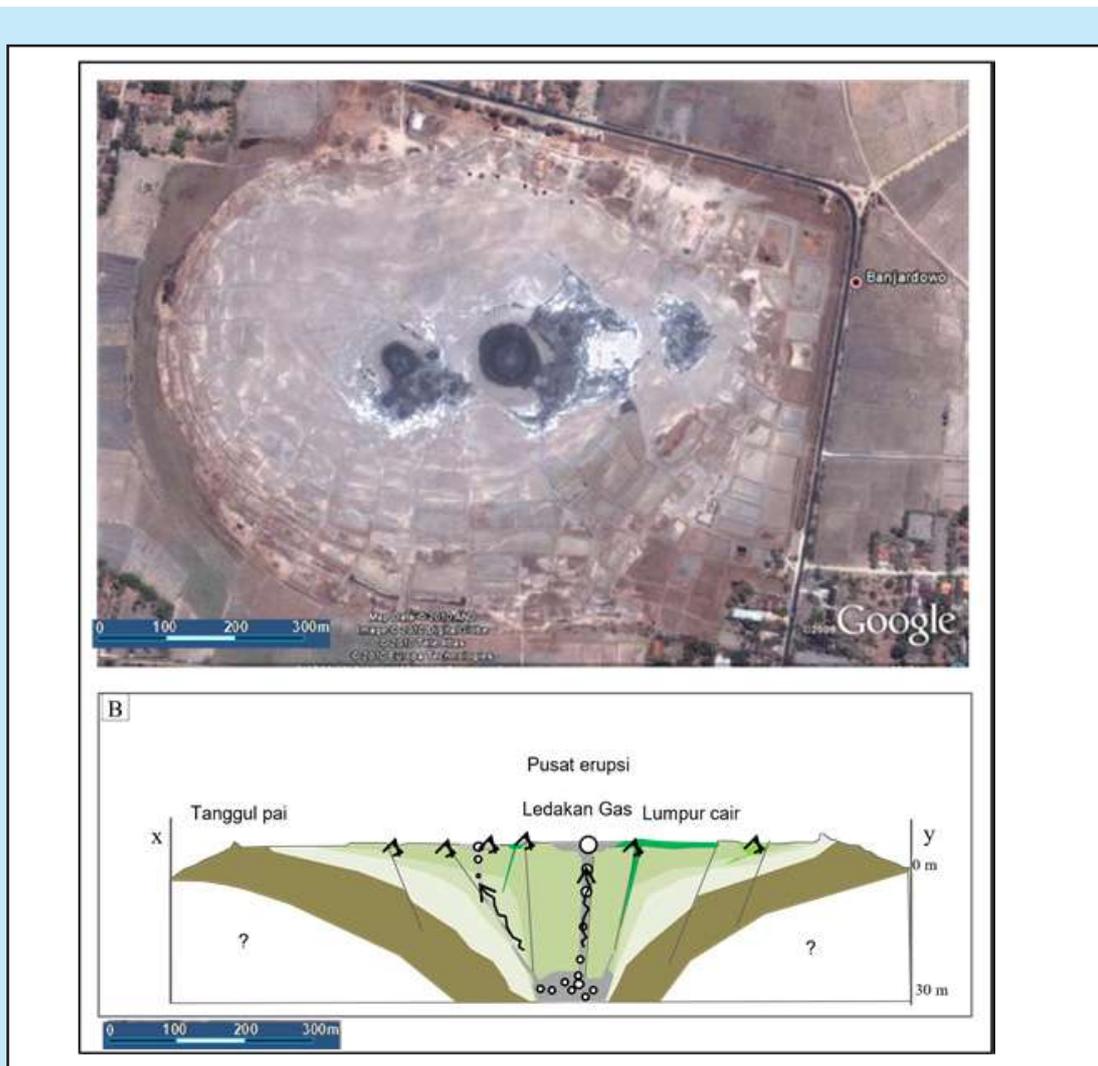
diukur berkisar antara seperlima sampai sepertiga diameter pai. Rekahan berarah barat-laut-tenggara dijumpai di bagian tengah dengan morfologi sedikit rendah disekitar pai utama.

Penambahan material sulit diamati secara langsung karena tidak ada aliran lumpur atau air, hanya bisa diperkirakan arahnya dari bentuk pai yang meleleh (Gambar 7). Rembesan air dan gas berasosiasi dengan salsa-salsa kecil atau keluar melalui rekahan. Frekuensi keluarnya gelembung gas sangat bervariasi berkisar 20 s/d 80 per menit, ukuran gelembung berukuran maksimal 5 cm. Viskositas lumpur sangat tinggi, air relatif lambat tertiris dari lumpur. Tambang garam tradisional berada di sisi timur dan timurlaut dengan mengalirkan rembesan air ke kolam buatan ketika air di salsa melimpah. Suhu air sebesar 30-32°C dengan pH 6,5-7.

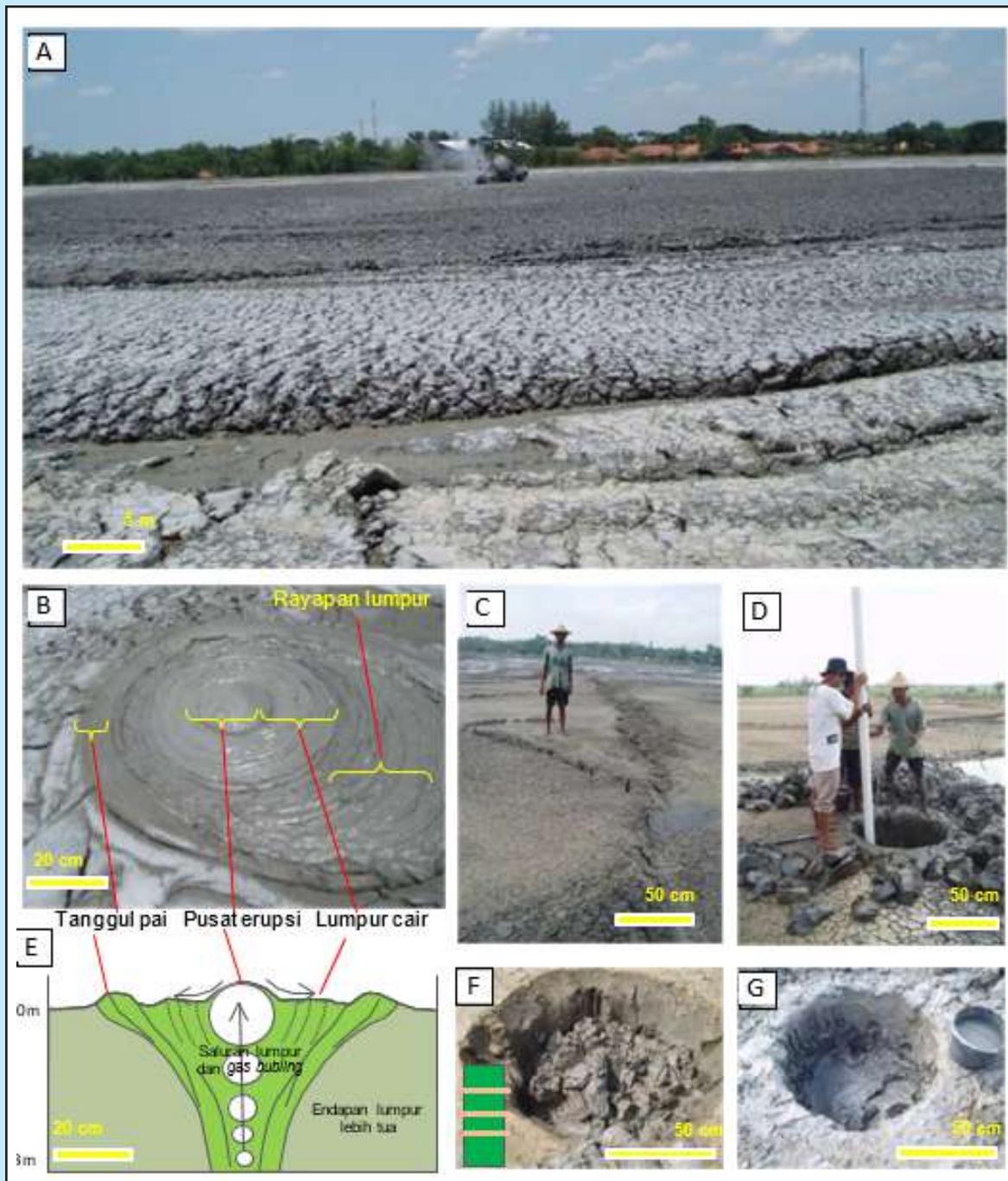
C. Gunung Lumpur Cangkringan

Gunung Lumpur Cangkringan berada di Desa Cangkringan dikenal juga dengan Bleduk Lanang atau Bleduk Manten kira-kira 1,5 km di sebelah baratdaya Gunung Lumpur Kuwu, dengan masuk dari jalan desa di Desa Cangkringan. Memiliki koordinat 111°6'34,86" BT, 7°7'10,49" LS, dengan pengambilan percontonya air, lumpur, dan gas dengan nomor percontonya B-072 dan B-105.

Morfologi Gunung Lumpur Cangkringan adalah kubah landai kecil berada di kubah yang lebih besar sehingga berkesan berundak, dengan beda tinggi antar undak 0,5-1,5 m, memiliki luas area 0,4x0,3 km² (Gambar 8). Pada puncak kubah berdiameter 60 m, terdapat banyak pai, yang terbesar berdiameter 10 m. Aliran campuran air, lumpur, dan gas sangat



Gambar 6
Geometri, morfologi dan peta geologi hasil interpretasi citra Quickbird dan pengecekan lapangan Gunung Lumpur Kuwu. (B) Interpretasi penampang Gunung Lumpur Kuwu.

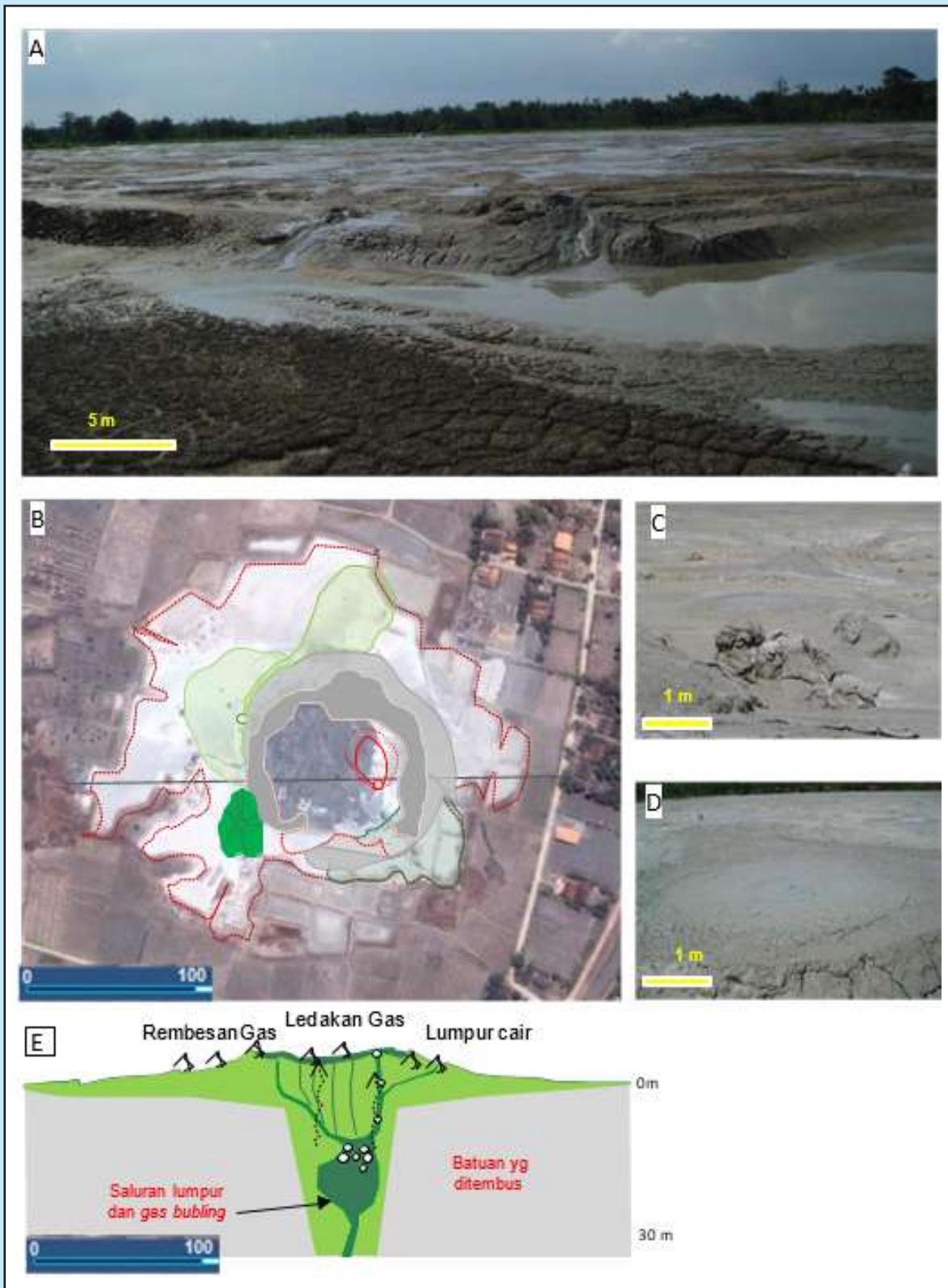


Gambar 7

A) Morfologi pai timur dengan ledakan yang besar. (B) Morfologi pai terdiri atas pusat ledakan, zona lumpur cair, tanggul pai, lelehan lumpur. (C) Rekahan berarah barat-laut-tenggara latar belakang salsa. (D) Pengambilan percontaan yang lebih dalam dengan paralon yang besar 3 atau 4 inch untuk lumpur yang lebih dalam, bisa masuk antara 50-100 cm saja. (E) Penampang pai. (F) Sumur-uji-1 gagal mendapatkan kedalaman yang mencukupi karena lumpur naik relatif cepat ke atas. (G) Sumur-uji-2 tetap gagal meskipun lokasi sudah digeser ke jarak yang lebih jauh.

cepat meluber sampai ke sekeliling kubah teratas. Air terpisah dengan cepat dari lumpurnya membentuk *salsa* dan kolam. Ledakan gas dari pai utama dengan frekuensi 1-2 ledakan per detik. Air cukup banyak mengalir di pinggir kubah tertiris ke parit.

Morfologi lain sering dijumpai dengan ukuran lebih kecil, kurang dari 0,5 m, adalah *gryphon* dengan pai dibagian puncaknya. *Salsa* dan corong ventilasi gas (*gas venting*) yang sangat banyak menyebar sampai di luar kubah.



Gambar 8

(A) Kubah landai dari Gunung Lumpur Cangkiring, banyak pai dengan lumpur, air, dan gas terlihat keluar di setiap pai. (B) Peta Geologi Gunung Lumpur Cangkiring. (C) Gryphon sering dijumpai diluar pai sampai diluar kubah. (D) Pai pada kubah kecil diameter 2 m. (E) Penampang memotong Gunung Lumpur Cangkiring.



Gambar 9
Morfologi kubah datar dan endapan travertin di Gunung Lumpur Crewek. (A) Citra dan batas morfologi kubah kecil. (B) Puncak kubah. (C) Tinggi kubah dan air panas. (D) Travertin dan kolam air panas. (E) Travertin.



Gambar 10
(A) Citra Gunung Lumpur Banjarlor, garis merah batas morfologi kubah kecil. (B) Salsa dan kolam air panas di Banjarlor. (C) Pengukuran suhu salah satu kolam di Banjarlor.

D. Gunung Lumpur Crewek

Gunung Lumpur Crewek terletak di Desa Crewek di pinggir jalan alternatif Purwodadi-Sragen, setelah rel kereta api. Koordinatnya adalah $111^{\circ}6'46,43''$ BT, $7^{\circ}9'2,75''$ LS. Pengambilan percontonya air, lumpur, dan gas diambil untuk analisis laboratorium dengan nomor B-079 dan B-102.

Purwodadi-Sragen, setelah rel kereta api. Koordinatnya adalah $111^{\circ}6'46,43''$ BT, $7^{\circ}9'2,75''$ LS. Pengambilan percontonya air, lumpur, dan gas diambil untuk analisis laboratorium dengan nomor B-079 dan B-102.

Morfologi kubah atau bukit kecil terpisah memanjang ke arah utara-selatan, dengan banyak lubang galian manusia sehingga morfologi alami dan morfologi buatan tidak bisa dikenali dengan baik. Ukuran kubah yang terbentuk $30 \times 50 \text{ m}^2$, dengan tinggi 3 m dari permukaan tanah, dengan morfologi salsa $2-4 \text{ m}^2$, kolam $3-6 \text{ m}^2$ dengan gelembung gas sangat banyak, mempunyai warna air berbedabeda, berbau, terdapat sejenis travertin berarah utara-selatan, sampai timurlautbaratdaya, lumpur sedikit (Gambar 9). Gelembung gas yang terbentuk berkisar

dari 2 cm sampai 8 cm dengan frekuensi pengeluaran 80-180 gelembung per menit beberapa diantaranya seperti mengalir tidak bisa dihitung secara manual karena gas keluar sangat cepat. Beberapa kolam merupakan kolam air panas yang mempunyai suhu paling panas diantara gunung lumpur lain yaitu $48-54^{\circ}\text{C}$ dengan pH 6,0-6,4. Beberapa diantaranya kolam relatif dingin bersuhu $33-38^{\circ}\text{C}$ dengan pH 6,5-7.

E. Gunung Lumpur Banjarlor

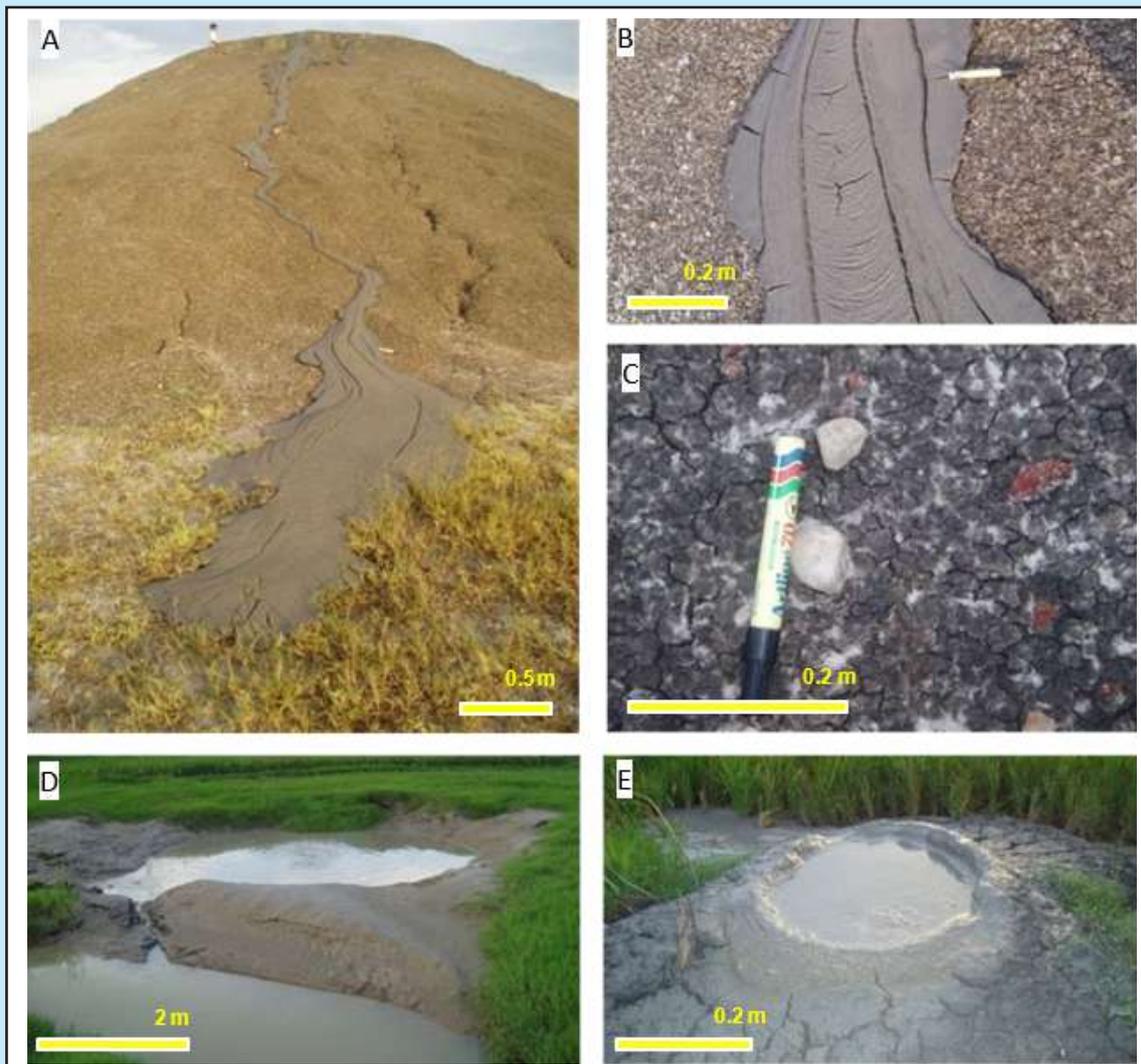
Gunung Lumpur Banjarlor terletak di sebelah barat laut pertigaan jalan alternatif Purwodadi-Kradenan, di tengah persawahan penduduk. Koordinat Banjarlor adalah $111^{\circ}7'12,57''$ BT, $7^{\circ}7'58,9''$ LS. Pengambilan percontonya air, lumpur, dan gas untuk analisis laboratorium, dengan nomor percontonya B-078 dan B-104, dengan luas area mencapai $100 \times 150 \text{ m}^2$.

Morfologi didominasi oleh salsa dan kolam berukuran kecil sampai besar $4-40 \text{ m}^2$, rembesan gas sangat banyak, travertin disekitar kolam, keluaran lumpur sangat sedikit membentuk pai-pai kecil (Gambar 10). Air ditiris dan dimanfaatkan sebagai



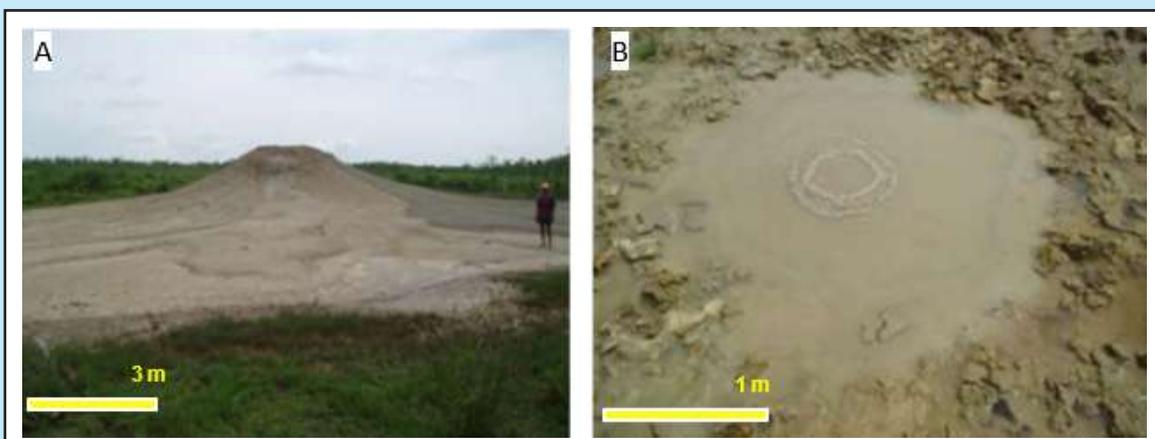
Gambar 11

(A) Citra Gunung Lumpur Medang dengan lokasi jenis morfologi. (B) Kerucut dengan puncak pai. (C, D) Pai dengan kubah kecil, latar belakang kolam. (E) Kolam dengan aliran gas tunggal-besar. (F) Gelebung gas di sawah.



Gambar 12

(A) Aliran lumpur dari puncak Gunung Lumpur Medang. (B) Struktur aliran dalam tubuh aliran lumpur. (C) Jenis fragmen batuan berbentuk butir yang menyudut di dalam breksi lumpur. (D) Kolan lumpur. (E) Pai lumpur di puncak kerucut kecil.



Gambar 13

(A) Gunung Lumpur Anak Kesongo, merupakan kerucut dan pai lumpur. Kerucut dengan pai di bagian puncaknya. (B) Keluaran aliran gas di salsa.

Analisis fosil foram besar menunjukkan kehadiran *Lepidocyclina* dan *Myogypsinoides* yang mengindikasikan umur Oligosen Tengah sampai Miosen Awal. Analisis foram kecil dari fragmen menunjukkan umur tertua adalah N3 mulai munculnya *Globerina cf prebulloides* dan berakhirnya *Globigerina cf tipartita*, yang lain berumur lebih muda yaitu Miosen Awal sampai Miosen Tengah (Gambar 14).

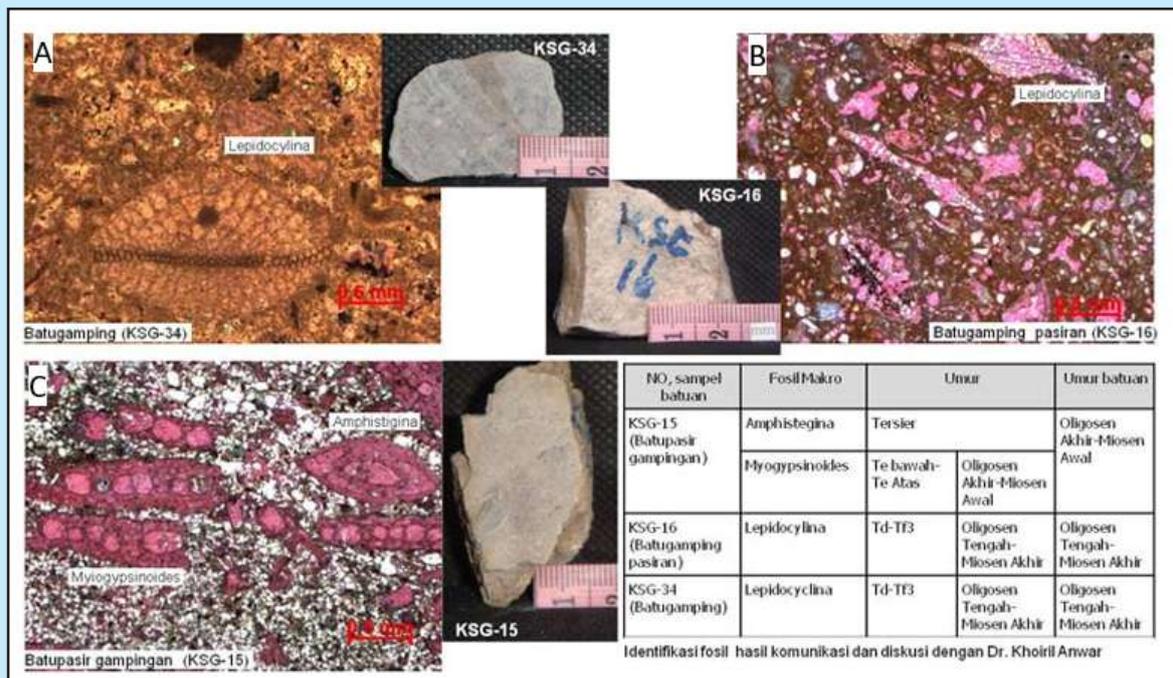
Analisis foram kecil dilakukan pada 7 perconto lumpur, kondisi fosil baik-sangat baik. Gunung lumpur di Zona Rembang yang diwakili oleh Gunung

Lumpur Kuwu, Cangkingan, Crewek, Banjarlor, Anak Kesongo menunjukkan pencampuran umur sumber lumpur dari Miosen Awal sampai Mio-Pliosen berada pada Formasi Tawun (Tabel 1). Beberapa data memperlihatkan pencampuran sumber lumpur sampai berumur Plistosen B-073 dan B-90. Lingkungan pengendapan dari neritik tengah sampai batial atas (Tabel 2).

Data umur dari fragmen batuan di Kesongo menunjukkan umur sumber lumpur yang lebih tua yaitu Oligosen Tengah-Akhir. Keberadaan fragmen batuan yang berumur lebih tua ada dua penjelasan

Table 2
Ringkasan data lingkungan pengendapan berdasarkan mikrofosil (foraminifera) dari perconto lumpur gunung lumpur

No.	No. Sample	Gunung Lumpur	Litologi	Neritic				Bathyal					
				Inner		Middle		Outer		Upper		Lower	
				0m	30m	100m	200m	500m	2000m	4000m	5000m		
1	B-071	Kuwu	Napal										
2	B-072	Cangkringan	Napal										
3	B-073	Kesongo	Napal										
4	B-078	Banjarlor	Napal										
5	B-079	Crewek	Lanau-Napal										
6	B-080	Kuwu	Napal										
7	B-081	Kesongo	Napal										



Gambar 14
(A) Gunung Lumpur Anak Kesongo, merupakan kerucut dan pai lumpur. Kerucut dengan pai di bagian puncaknya. (B) Keluaran aliran gas di salsa.

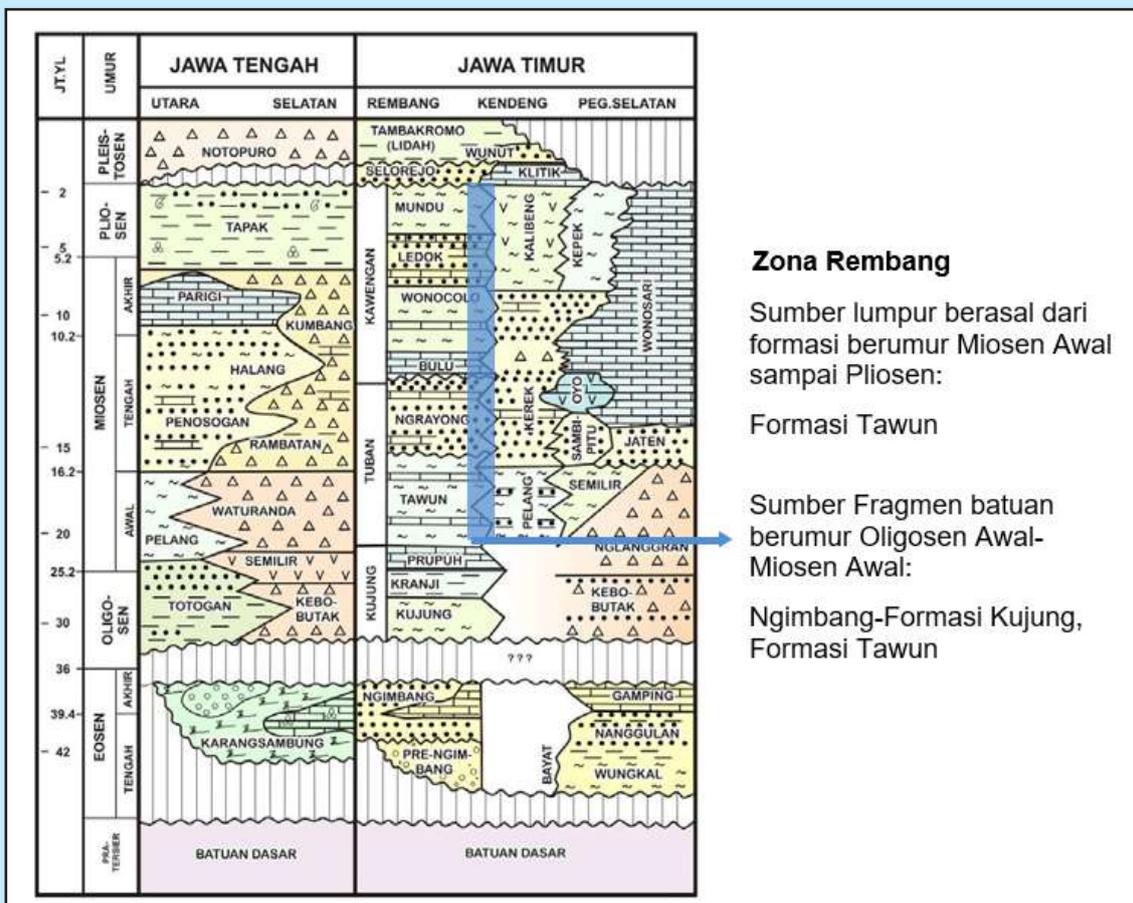
tentang kemungkinan sumbernya, yaitu (1) fragmen batuan sebagian komposisi penyusun dari formasi lebih muda yang ikut keluar bersama-sama dengan sedimen yang berbutir halus; (2) fragmen batuan berasal dari zona sesar yang ikut terbawa ke atas seperti yang dikemukakan Itihara, dkk. (1985) untuk Gunung Lumpur Sangiran. Dalam penjelasan kedua diperlukan sumber tekanan luap yang lebih dalam dari lapisan sumber fragmen batuan dan fragmen batuan yang ditemukan harus mempunyai bukti struktur dalam teksturnya. Berdasarkan analisis fragmen dan lumpur, maka disimpulkan bahwa sumber lumpur berasal dari Formasi Tawun (Gambar 15). Untuk lapisan tekanan luap yang lebih dalam dari pada Formasi Tawun bisa dilakukan pengecekan dengan data penampang kecepatan seismik.

I. Pemetaan Bawah Permukaan

Setelah dilakukan analisis material asal lumpur berdasarkan data mikrofossil, hal selanjutnya yang diperlukan dalam penelitian ini adalah interpretasi bawaha permukaan Formasi Tawun yang didominasi oleh batuan sedimen berbutir halus dengan skala

lebih regional. Interpretasi seismik sudah dilakukan oleh PT Pertamina EP dengan beberapa versi, penamaan formasi yang sama kadang mempunyai level yang berbeda jika dilakukan korelasi antara lapangan satu dan lainnya. Interpretasi seismik, lebih tepatnya disebut interpretasi ulang, di Zona Rembang diperlukan dengan alasan interpretasi yang ada terbatas di sekitar struktur tutupan yang menarik, dengan fokus interpretasi pada formasi-formasi yang potensial sebagai reservoir seperti Formasi Ngrayong, Formasi Kujung, dan Formasi Ngimbang.

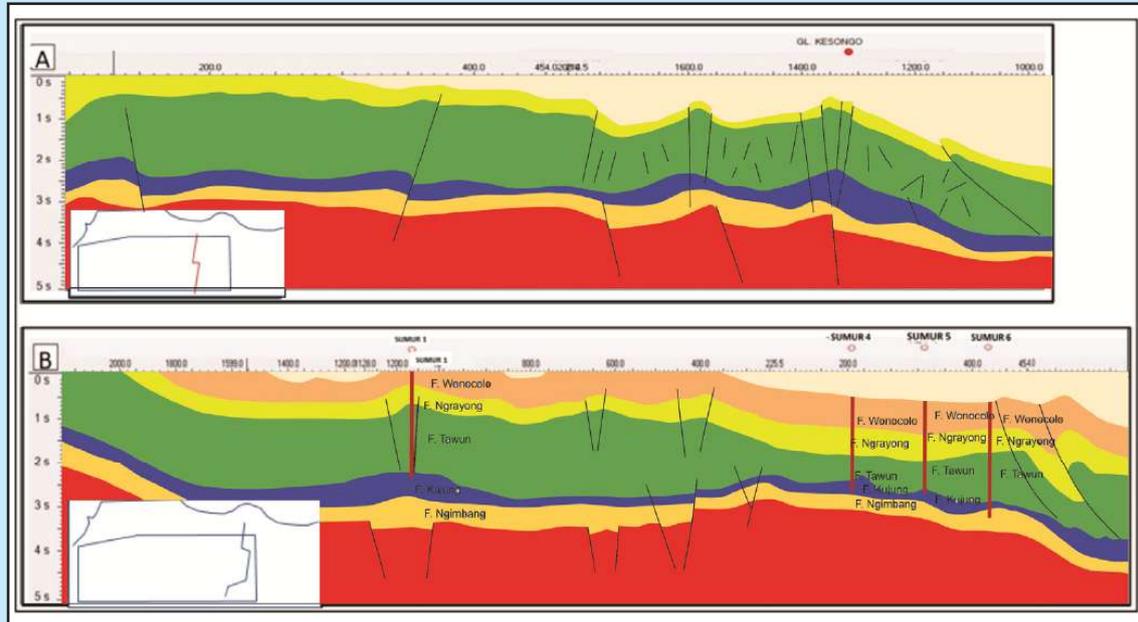
Kondisi struktural di bagian timur hasil dari interpretasi seismik diwakili oleh Gambar 16. Posisi batuan dasar, Tinggian Purwodadi semakin dalam, Formasi Tawun menebal di bagian tengah di atas sesar-sesar turun yang memotong batuan dasar. Formasi ini di bagian selatan menipis sedangkan di bagian tengah menebal. Geometri Formasi Tawun menebal ke arah utara dan menipis ke arah selatan, puncak Formasi Tawun membentuk tinggian atau struktur antiklinal, sedangkan bagian bawahnya membentuk struktur bentukan sinklinal dengan



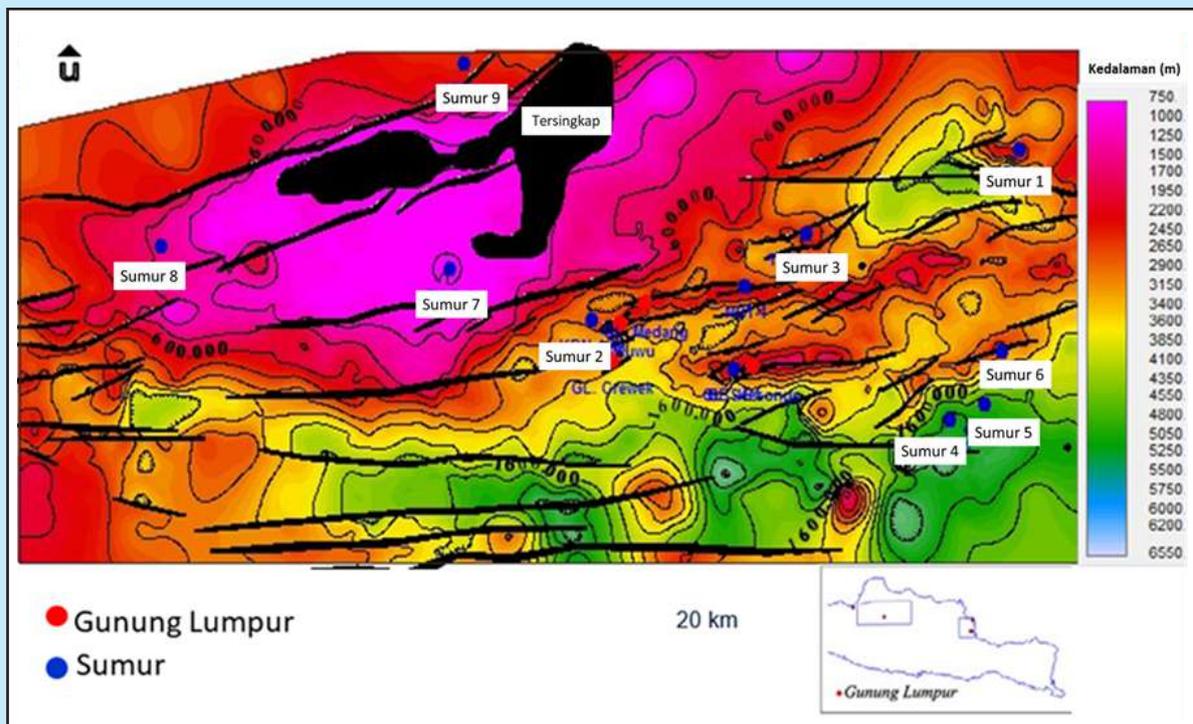
Gambar 15
 Penentuan sumber material gunung lumpur berdasarkan umur dari mikrofossil dan makrofossil.

endapan yang divergen. Hal ini menunjukkan adanya gejala kontraksional setelah Formasi Tawun diendapkan, dan kemungkinan besar inversi cekungan.

Peta struktur kedalaman Formasi Tawun dapat dilihat di Gambar 17. Peta ketebalan Formasi Tawun ada pada Gambar 18. Peta struktur kedalaman batuan dasar terlihat dua pola struktur yang hadir



Gambar 16
Hasil interpretasi seismik di bagian timur daerah penelitian. (A) Penampang hasil interpretasi seismik lintasan terpilih utara-selatan yang melewati Gunung Lumpur Kesongo. (B) Penampang hasil interpretasi seismik lintasan terpilih utara-selatan melewati sumur SUMUR 1, SUMUR 4, SUMUR 5, dan sumur 6.



Gambar 17
Peta struktur kedalaman puncak Formasi Tawun.

yaitu pola timur-timurlaut-barat-baratdaya dan pola timurlautbaratdaya. Beberapa sesar terlihat berarah barat-timur. Pola struktur berarah timurlaut-baratdaya dan barat-timur di penampang seismik merupakan sesar-sesar turun pembentuk separuh graben. Pola timur-timurlaut-barat-baratdaya merupakan kelurusan tren Tinggian Purwodadi. Pusat dalam ada di bagian selatan, mempunyai kecenderungan memanjang ke arah barat-timur dan membelok ke arah timurlaut-baratdaya dari bagian tengah sekitar Kesongo ke arah sumur SUMUR 1. Pola-pola ini masih berkembang sampai Formasi Ngimbang dan Kujung. Dalam bertambah lebar ke arah utara dan arah-arah barat-timur semakin terlihat jelas. Pada peta struktur Formasi Tawun, terlihat penyempitan dalam dengan satu arah dalam barat-timur

J. Identifikasi dan Delineasi Zona Tekanan Luap

Identifikasi sumuran zona tekanan luap menggunakan data sumur SUMUR 2 dan sumur SUMUR 3 berdasarkan plot kecepatan log sonik terhadap kedalaman. Hasil itu kemudian digabungkan dengan plot data kecepatan dari CDP yang dekat dengan sumur. Tekanan luap diidentifikasi dari anomali kecepatan rendah menyimpang dari NCT (*normal compaction trend*). NCT adalah garis interpretatif yang mewakili tren kompaksi yang normal dibuat berdasarkan data pada kompaksi normal. Penentuan NCT pada log sonik dengan mempertimbangkan kecepatan terendah (*matriks transit time*) 50-60 μ s/kaki.

Plot dan perhitungan tekanan pori berdasarkan data log dilakukan untuk sumur yang mempunyai data log sonik, tahanan jenis, dan densitas di Daerah Kradenan. Data kunci seperti *leak of test* (LOT), pengukuran tekanan, kendala operasional pengeboran, dan berat lumpur digunakan untuk pengecekan hasil hitungan dengan log, meskipun datanya sangat terbatas. Hasil plot gradien tekanan pori dipergunakan untuk memperkuat identifikasi tekanan luap dan melakukan delineasi tekanan luap di data seismik.

Untuk Daerah Kradenan identifikasi sumuran digunakan data dari sumur SUMUR 2 dan SUMUR 3. Dalam kasus ini karena keterbatasan data log sonik di sumur SUMUR 2 maka NCT memakai sumur SUMUR 3. Jarak yang berdekatan dan posisi kedua sumur dalam satu cekungan menjadi alasan lain penggabungan ini. Gejala tekanan luap dapat diidentifikasi mulai dari kedalaman 380 m setara

dengan Formasi Mundu. Tekanan luap selanjutnya mulai Formasi Ngrayong bagian bawah di kedalaman 750 m sampai Formasi Tawun dengan kedalaman lebih dari 2.000 m (Gambar 19).

Penampang seismik lintasan XX-08 dapat dilihat di Gambar 20 A. Identifikasi zona serpih tekanan luap sumuran berkorelasi dengan karakter seismik yang mempunyai amplitudo rendah atau mempunyai refleksi yang acak sampai tidak ada refleksi (*no reflection*). Secara kualitatif terlihat bahwa data sumur marker *overpressured-2* yang diidentifikasi dari data sumur, pada Formasi Tawun di sumur SUMUR 2 berada pada zona amplitudo rendah demikian halnya marker *overpressured-1* pada Formasi Mundu. Hal ini memberikan kepercayaan akan interpretasi zona tekanan luap di Formasi Mundu dan Formasi Tawun. Pada penampang kecepatan interval terpilih, terlihat bahwa marker *overpressured-2* terletak pada puncak kecepatan interval yang relatif rendah dari sekelilingnya pada Formasi Tawun.

Pada Gambar 20 B, Formasi Ngimbang berada pada posisi separuh graben di bagian bawah, dengan geometri terbatas mempunyai amplitudo rendah dengan kecepatan interval yang relatif lebih rendah dari sekelilingnya. Gejala ini diinterpretasikan sebagai zona tekanan luap. Tekanan luap antara Formasi Ngimbang dan Formasi Tawun dihubungkan oleh sesar besar dari batuan dasar.

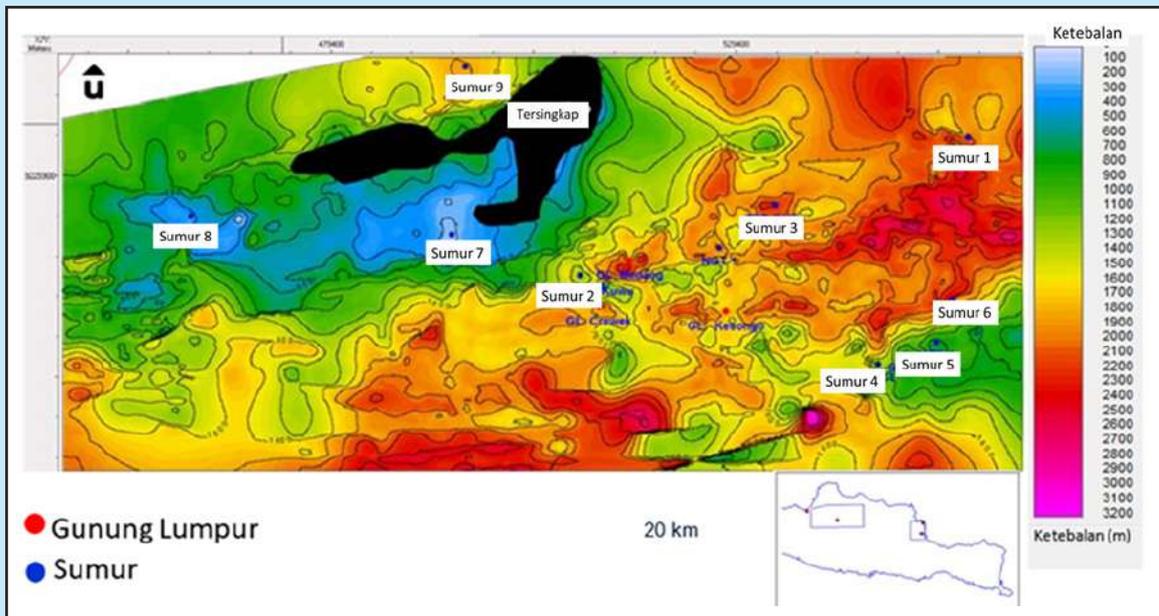
Gambar 20 (A) Penampang seismik lintasan XX-08 yang menunjukkan pola variasi amplitudo yang rendah dan tinggi dengan pola refleksi yang bisa diikuti. (B) Penampang kecepatan interval terpilih lintasan XX-08 yang mempunyai pola konsisten dengan penampang seismik. Data marker *overpressured-1* dan *overpressured-2* serta Formasi Tawun sumur SUMUR 2 terlihat mempunyai korelasi dengan pola amplitudo rendah dan kecepatan rendah (Burhannudinnur & Prasetyo, 2012)

Delineasi zona tekanan luap dilakukan di penampang seismik Kradenan pada Gambar 21 yang memperlihatkan gejala amplitudo tidak menerus dan zona refleksi yang membentuk saluran geometri di bawah Gunung Lumpur Kuwu. Data kecepatan di bawah Gunung Lumpur Kuwu menjadi tidak valid karena seismik terlihat *no reflection*.

Konfirmasi hasil interpretasi tekanan luap dilakukan dengan memadukan data lapangan dan data bawah permukaan. Penampang XX-02 menunjukkan bahwa terdapat pola saluran refleksi yang acak yang rendah amplitudo (*no reflection*) di bawah gunung lumpur yang masih aktif yaitu Kuwu dan Cangkringan (Gambar 22.A). Penampang

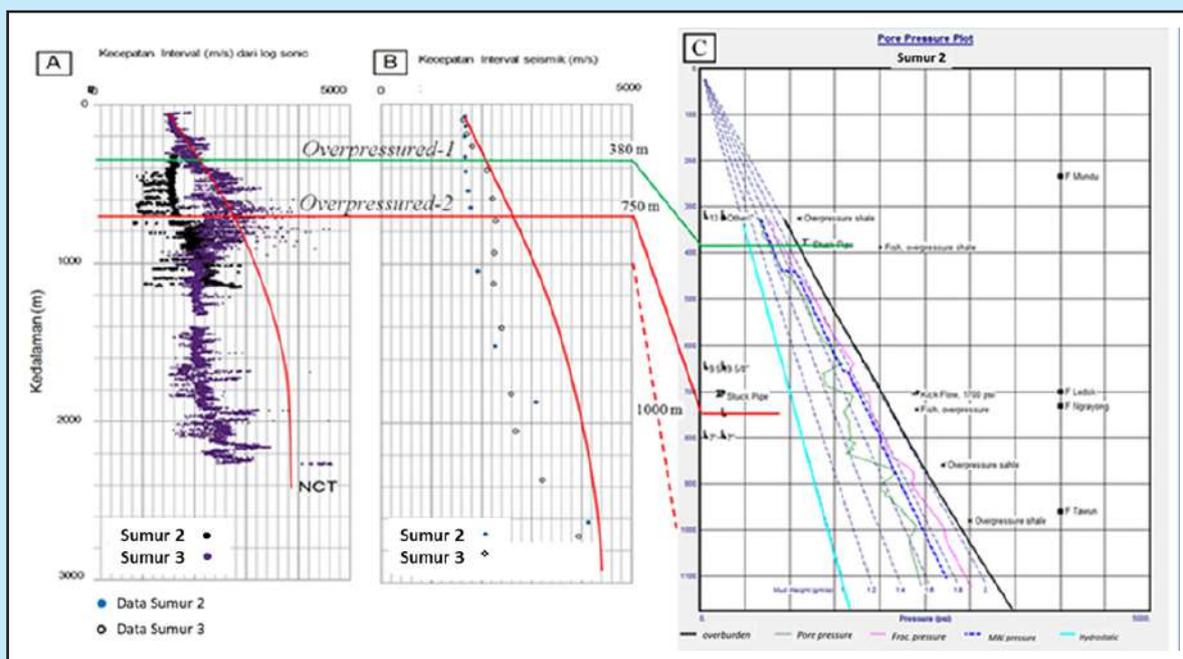
seismik XX-10 (Gambar 22.B) memperlihatkan gunung lumpur yang tidak aktif (Kesongo), dicirikan dengan terbentuknya struktur runtunan, saluran lumpurnya mempunyai pola refleksi acak yang vertikal, dengan amplitudo lebih kuat (garis poligon

putus-putus warna merah), dibandingkan dengan saluran lumpur dari gunung lumpur aktif Anak Kesongo (berupa garis poligon putus-putus warna hijau), refleksi acak berpola saluran. Konfirmasi antara data lapangan, gejala, dan pola refleksi



Gambar 18

Peta ketebalan Formasi Tawun, pola yang mempunyai ketebalan besar (warna merah) berarah barat-timur di bagian selatan dan berubang ke arah timur laut baratdaya di bagian timur-timurlaut daerah penelitian.



Gambar 19

A) Identifikasi zona tekanan luap dari sumur SUMUR 2 (NCT merujuk ke sumur SUMUR 3). (B) Data kecepatan di CDP yang dekat dengan sumur SUMUR 2 dan SUMUR 3. (C) Perhitungan tekanan pori dengan data log.

acak sangat diperlukan untuk menambah kepastian untuk menginterpretasikan zona tekanan luap.

Gambar 21 (A) Penampang seismik Lintasan XX-06 yang melalui Gunung Lumpur Kuwu memperlihatkan refleksi acak membentuk pola saluran vertikal dari zona tekanan luap Formasi Tawun ke permukaan. (B) Penampang kecepatan interval terpilih menunjukkan Formasi Tawun mempunyai kecepatan lebih rendah, (Burhannudinnur & Prasetyo, 2012)

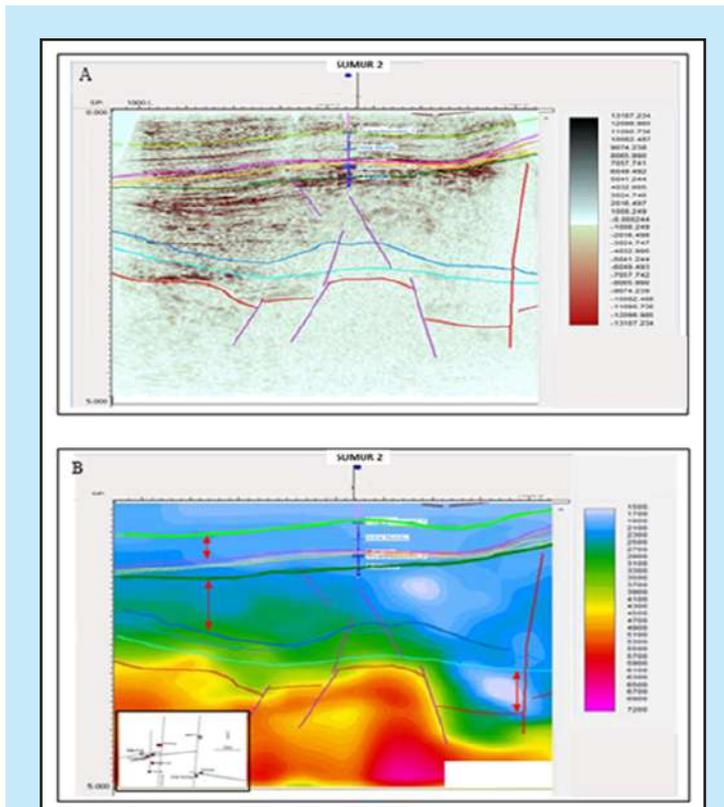
Formasi Tawun dari data sumur merupakan zona tekanan luap. Data penampang seismik memperlihatkan pola acak terutama di lintasan XX-10 (Gambar 22 B). Data tersebut dan konfirmasi dari data lapangan, maka data seismik dengan ciri khas tersebut diinterpretasikan sebagai zona tekanan luap. Secara geometri terlihat sangat tebal mencapai sekitar 1.750 ms, mulai dari 750 ms sampai pada 2.500 ms. Secara lateral pola refleksi acak terlihat tidak menerus, membentuk geometri seperti kantong. Panjang mencapai 10-15 Km, geometri yang cukup besar.

K. Hasil Karakterisasi Sistem Gunung Lumpur

Pembahasan hasil karakterisasi meliputi karakter sistem gunung lumpur yang merupakan integrasi antara karakter permukaan dan bawah permukaan, model geologi gunung lumpur di Daerah Kradenan, dan geometri zona tekanan luap. Karakter bawah permukaan didekati dengan pola refleksi seismik, indikasi dari data sumur, dan konfirmasi data lapangan.

Pola refleksi di area gunung lumpur terlihat kehadiran zona pola refleksi yang acak, membentuk geometri seperti saluran, memotong refleksi yang kuat, amplitudo rendah dibanding sekelilingnya. Di Daerah Kradenan zona pola refleksi yang acak berbentuk saluran selalu berada di bawah gunung lumpur dan atau di sekitar sesar atau sebagai kemenerusan sesar-sesar yang lebih tua yang berada di posisi lebih dalam. Pola gejala refleksi acak pada Formasi Tawun, Formasi Ngimbang, dan Formasi Kalibeng Bagian Atas memperlihatkan karakter refleksi yang memotong horizon.

Zona pola refleksi yang acak tersebar melebar di Formasi Tawun untuk Daerah Kradenan. Geometri



Gambar 20
(A) Penampang seismik lintasan XX-08 yang menunjukkan pola variasi amplitudo yang rendah dan tinggi dengan pola refleksi yang bisa diikuti. (B) Penampang kecepatan interval terpilih lintasan XX-08 yang mempunyai pola konsisten dengan penampang seismik. Data marker overpressured-1 dan overpressured-2 serta Formasi Tawun sumur SUMUR 2 terlihat mempunyai korelasi dengan pola amplitudo rendah dan kecepatan rendah (Burhannudinnur & Prasetyo, 2012).

pola refleksi acak di Daerah Sidoarjo lebih besar dan berada di bagian utara, barat, dan selatan daerah penelitian. Pola refleksi acak dengan struktur desakan yang besar terpapar di data lintasan seismik regional. Zona-zona struktur desakan dengan ukuran cukup besar mengelilingi daerah sekitar. Gejala *Vbright* amplitudo dijumpai di dekat saluran acak di beberapa data seismik. Sesar katup menjadi hal yang sangat khas terutama di daerah penelitian karena kehadirannya berasosiasi dengan struktur desakan dan sesar besar. Hadirnya sesar katup menjadi salah satu karakter pola refleksi di sistem gunung lumpur. Sesar katup ini sangat jelas dapat dikenali di penampang seismik dan dijumpai di Daerah Sidoarjo namun sangat sedikit dijumpai di Daerah Kradenan. Sesar minor atau sering disebut dengan sesar poligonal berkembang di beberapa tempat di dalam sumber material gunung lumpur Formasi

Tawun dan Formasi Kalibeng atau sebagai sesar poligonal.

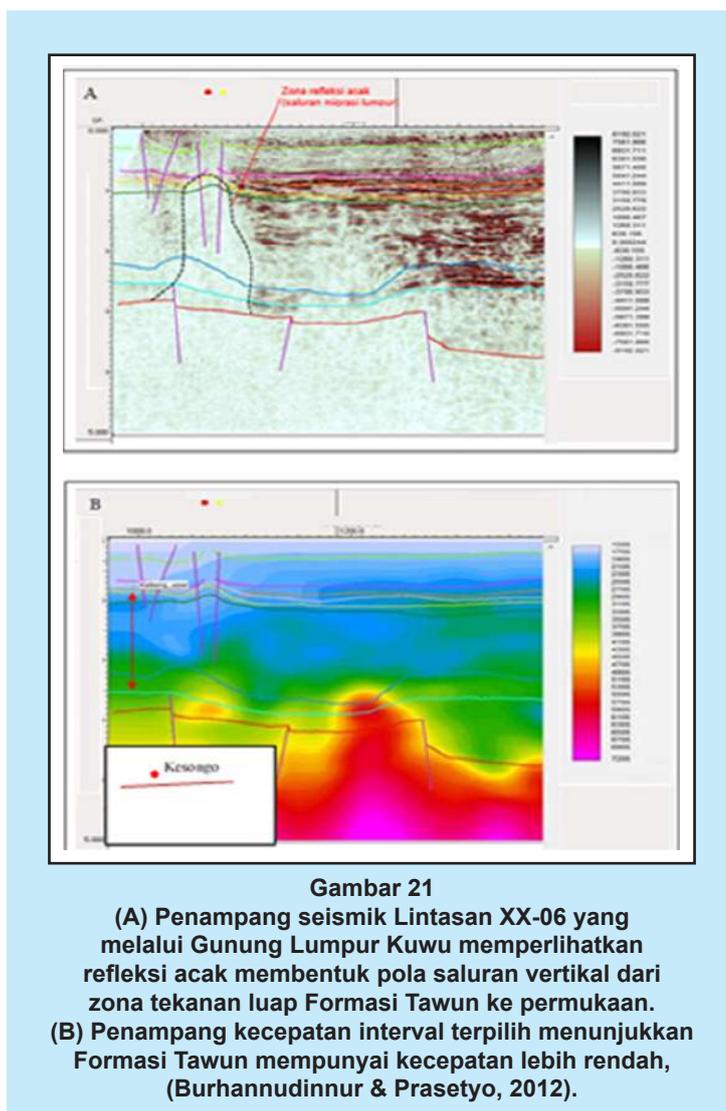
Model geologi Kompleks Gunung Lumpur Zona Rembang pernah dipublikasikan oleh Burhannudinnur, dkk. (2012) dapat dilihat di Gambar 23. Gunung lumpur terjadi di depan sistem sesar naik di bagian selatan yang terjadi pembebanan sesar sungkup (*thrust loading*) pada endapan syn rift dan post rift di bagian utara. Saluran material gunung lumpur ditandai dengan geometri saluran dari pola refleksi seismik acak sampai *no reflection*, berasosiasi dengan sesar tua yang aktif kembali atau menerusnya salah satu sisi sesar normal yang mengontrol separuh graben.

L. Mekanisme Pembentukan Gunung Lumpur

Pembahasan mekanisme pembentukan gunung lumpur mengacu pada integrasi analisis data permukaan dan bawah permukaan. Dari analisis data mikropaleontologi lumpur diperoleh informasi bahwa formasi sumber material gunung lumpur yaitu Formasi Tawun diendapkan pada tatanan tektonik kompresional. Dari kajian geologi regional ada dua kejadian tektonik yang besar yaitu saat Jawa Timur berubah dari sistem rift berarah timurlaut-baratdaya (Meratus) menjadi fase kompresional dengan arah barat-timur. Kemudian pada Kala Plio-Plistosen yang mengakibatkan pengangkatan dan reaktivasi sesar.

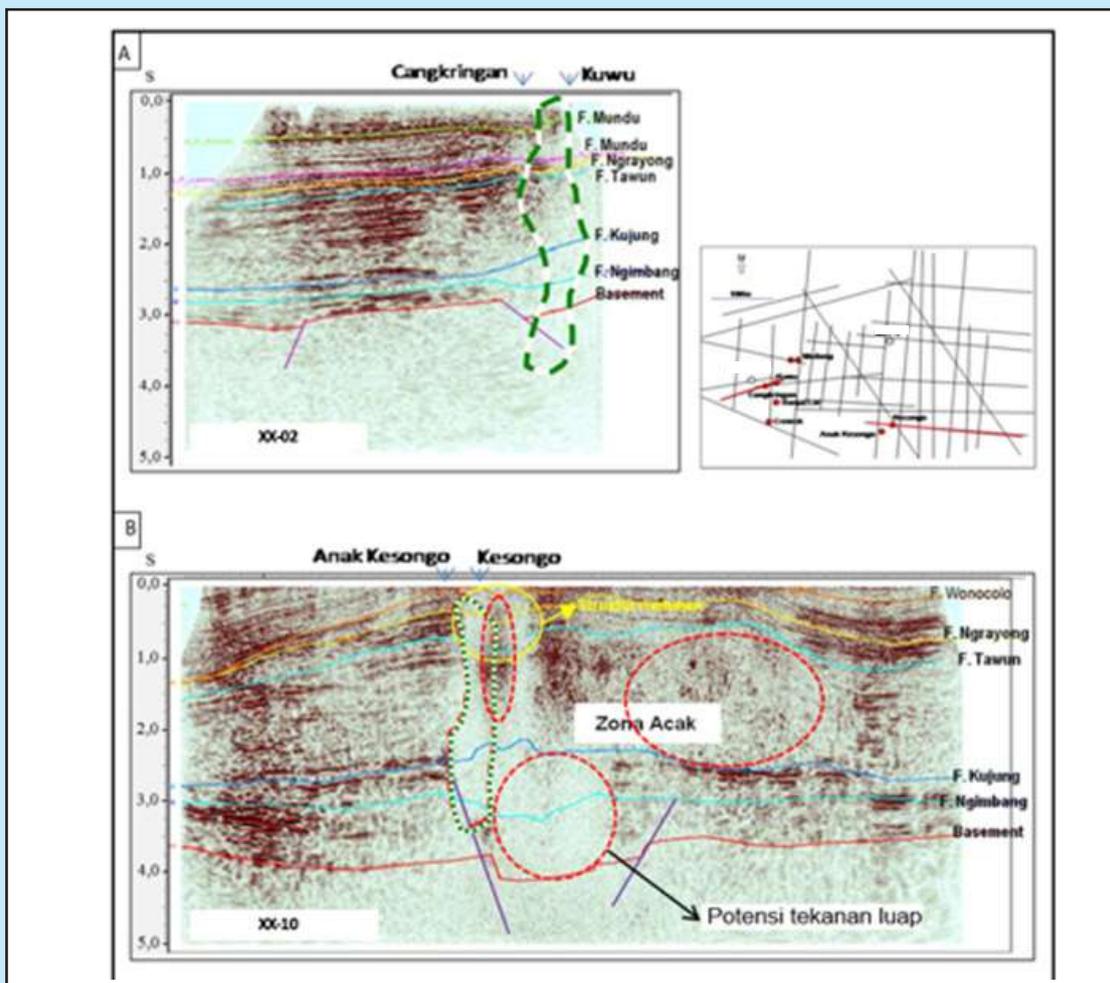
Dari kedua hal tersebut maka evolusi tektono-stratigrafi Cekungan Jawa Timur secara garis besar terdapat tiga fase yaitu fase awal Tersier (Paleogen) dicirikan oleh tektonik ekstensional yang membentuk sistem *rift* yang berarah timurlautbaratdaya yang berarah Meratus.

Fase ini dicirikan dengan endapan darat sampai laut dangkal diwakili oleh Formasi Pra Ngimbang sampai Formasi Ngimbang. Pada periode Kala Miosen sampai Pliosen daerah penelitian berada pada fase tektonik kompaksi dikuatkan dengan hasil analisis sejarah pemendaman. Pada periode ini diendapkan Formasi Tawun dan Formasi Kalibeng Atas yang tebal. Peta isopach Formasi Tawun masing-masing mempunyai gejala tren Meratus (timurlaut-baratdaya) dan tren Jawa (barat-timur). Hal tersebut menjadi penguat adanya reaktivasi



sesar-sesar tua arah Meratus menjadi sesar mendatar. Pengendapan terus berjalan sampai Formasi Wonocolo, tektonik kompresi mencapai puncaknya terjadi pada Plio-Plistosen yang dibuktikan dengan berkembangnya sesar-sesar naik dan lipatan di Zona Rembang. Struktur lipatan dan sesar sungkup ini memotong formasi batuan yang berumur Plistosen. Dibuktikan dengan pola pengendapan yang menebal ke arah sistem sesar sungkup di selatan. Keterkaitan tektono-stratigrafi dalam pembentukan gunung lumpur adalah dimulainya pengendapan Formasi Tawun pada saat Miosen Awal, sebagai bagian dari subsistem generatif.

Ilustrasi pengendapan Formasi Tawun dapat dilihat di Gambar 24. Potensi sumber gunung lumpur (sub sistem generatif) mulai diendapkan pada waktu Formasi Tawun. Jejak arah Meratus masih terekam pada endapan Formasi Tawun dengan pola depocenter dan pola laju sedimentasi memanjang



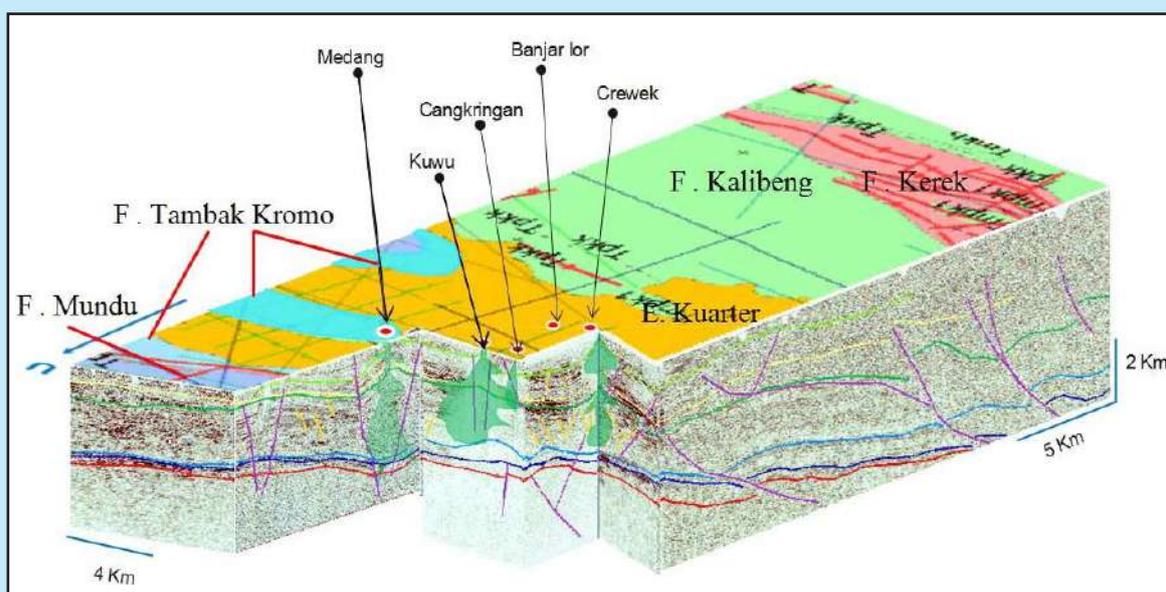
Gambar 22
Konfirmasi pola refleksi acak dengan data lapangan di daerah gunung lumpur mempunyai pola refleksi acak (no reflection) membentuk geometri seperti saluran vertikal/mendekati vertikal. (A) Lintasan seismik XX-02. (B) Lintasan XX-10, pola refleksi acak membentuk saluran berada di bawah gunung lumpur yang aktif, Anak Kesongo, Kuwu, dan Cangkringan (Burhannudinnur & Prasetyo, 2012).

berarah timurlautbaratdaya di bagian tengah dan timurlaut daerah penelitian. Formasi Tawun tersusun oleh endapan silisiklastik yang didominasi oleh sedimen berbutir halus. Lingkungan pengendapan pada neritik tengah sampai batial atas dengan laju sedimentasi yang cepat (lebih dari 280 m/juta tahun). Besaran laju sedimentasi diprediksi cukup tinggi dibandingkan formasi lain pada sedimen yang berbutir halus, menyebabkan terbentuknya zona tekanan luap yang merupakan elemen subsistem migrasi (Gambar 24 A).

Pengendapan selanjutnya oleh Formasi Ngrayong di atas Formasi Tawun, pada lingkungan laut dangkal di bagian utara daerah penelitian di sekitar Tinggian Purwodadi yang banyak kandungan kuarsa. Namun, ke arah selatan dan timur diduga tipe sedimennya

lebih dalam dengan hadirnya endapan karbonat di timur dan endapan berukuran lebih halus di bagian selatan, sebagian peneliti berpendapat terbentuk endapan kipas bawah laut, berumur Miosen Tengah. Selanjutnya, diendapkan sedimen berumur Mio-Pliosen dari Formasi Wonocolo dan Munggu. Di beberapa tempat Formasi Wonocolo menipis terutama di Tinggian Purwodadi (Gambar 24.B). Pengendapan formasi lebih muda memberikan tambahan pemendaman pada Formasi Tawun yang bertekanan luap.

Setelah pengendapan Formasi Munggu mulainya kompresi Plio-Plistosen yang melahirkan sesar-sesar naik di bagian selatan dan mendorong aktifnya kembali sesar-sesar tua berarah timurlaut-baratdaya menjadi sesar geser. Pengendapan formasi lebih



Gambar 23
Diagram blok model geologi Kompleks Gunung Lumpur Daerah Kradenan
berdasarkan hasil interpretasi seismik yang dipadukan dengan peta geologi dari P3G
(Datun dkk., 1996). Struktur dari data seismik menunjukkan kesesuaian dengan peta geologi
untuk formasi yang tersingkap (Burhannudinnur, 2012).

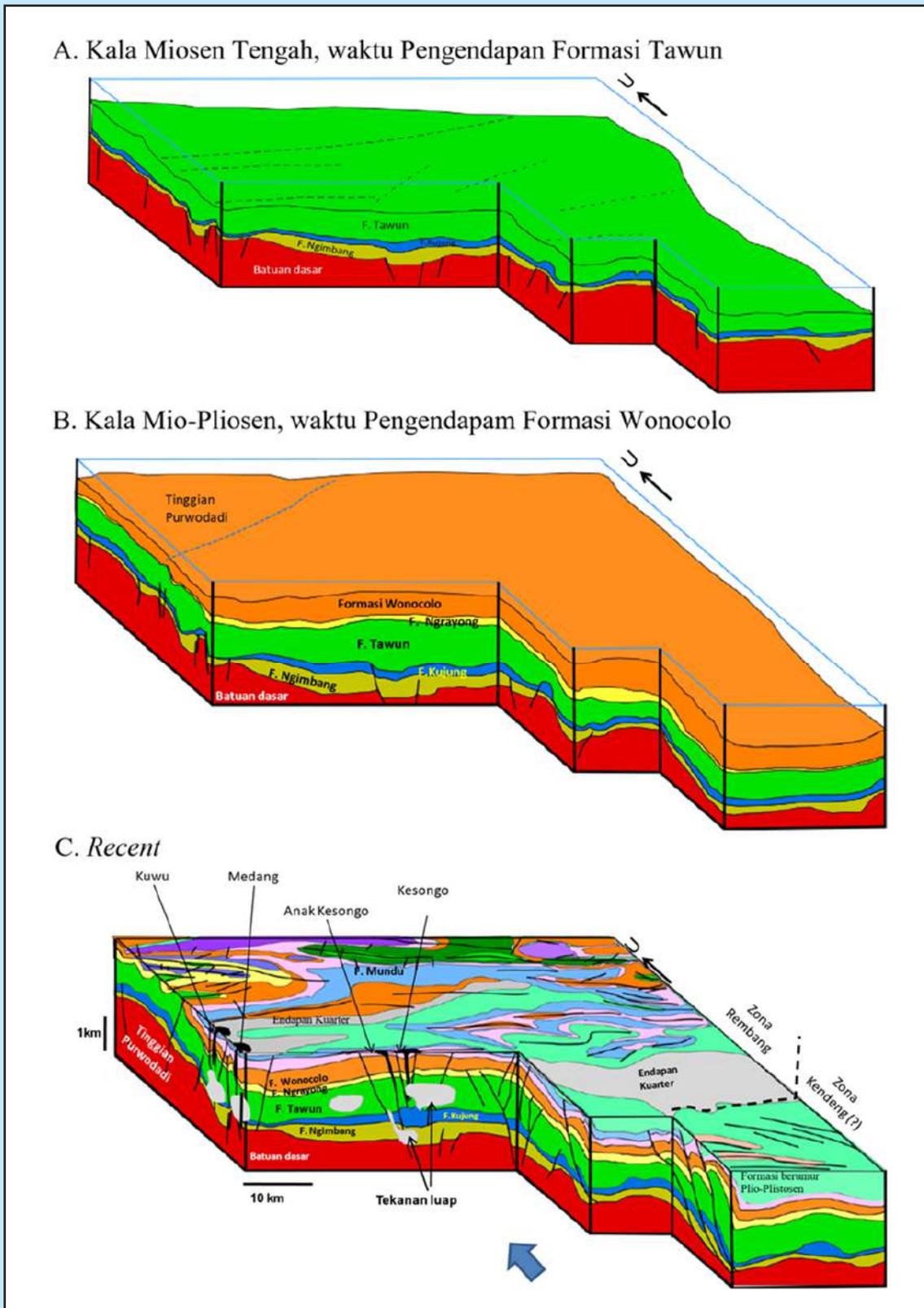
muda terus berjalan seiring dengan pembentukan sesar naik di selatan dicirikan oleh endapan yang menebal ke arah selatan akibat pembebanan sesar sungkup (*thrust loading*). Beberapa tempat mengalami pengangkatan dan erosi, namun beberapa tempat lainnya hanya mengalami pendangkalan sehingga terendapkan sedimen berumur Plistosen yang didominasi oleh batuan karbonat seperti Formasi Selorejo. Pengangkatan akan menyebabkan erosi dan pada gilirannya mengurangi tekanan overburden yang akan menjadi salah satu pemicu bekerjanya elemen dan proses subsistem ekstrusi (Gambar 24.C).

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil utama penelitian ini adalah untuk mendeterminasi mekanisme pembentukan gunung lumpur berdasarkan integrasi data permukaan dan bawah permukaan. Berdasarkan analisis morfologi gunung lumpur dapat disimpulkan mengenai manifestasi dan genetik dari masing-masing gunung lumpur di Zona Rembang. Sumber gunung lumpur di Zona Rembang berasal dari Formasi Tawun berdasarkan analisis mikrofosil. Hasil analisis dari data permukaan tersebut di konfirmasi dengandata bawah permukaan seperti analisis log sumur dan

penampang kecepatan seismik yang menunjukkan adanya indikasi zina *overpressure*.

Rumusan proses dan elemen sistem pembentukan gunung lumpur yang belum pernah dibuat oleh peneliti lain, bahwa proses dan elemen dalam sistem pembentukan gunung lumpur terdiri atas tiga subsistem, yaitu Subsistem Generatif, Subsistem Migrasi, dan Subsistem Ekstrusi. Elemen dan proses untuk masing-masing subsistem adalah (a) subsistem generatif terdiri atas elemen formasi batuan dengan kandungan serpih yang dominan dan jenis mineral lempung yang utama berupa smektit, dengan proses pemendaman yang dalam, laju sedimentasi relatif tinggi, dan tektonik kontraksi; (b) elemen dalam subsistem migrasi adalah lumpur tekanan luap, sesar, serta sesar katup, sedangkan prosesnya adalah sesar, re-aktivasi sesar, dan struktur desakan oleh zona tekanan luap (c) subsistem ekstrusi mempunyai elemen lumpur yang bermigrasi dan kondisi tekanan litostatik yang lebih rendah dari sekitarnya, sedangkan prosesnya meliputi ekstrusi, pengangkatan, dan erosi, serta pengendapan-penumpukan material ekstrusi. Hal tersebut menjadi menarik untuk dilakukan penelitian mengenai zona rawan bencana sistem gunung lumpur, melihat Zona Rembang terdapat beberapa lapangan migas untuk mencegah adanya resiko pengeboran.



Gambar 24
 Kartun mengilustrasikan mekanisme pembentukan gunung lumpur di Daerah Kradenan: (A) Kondisi geologi setelah pengendapan Formasi Tawun, (B) Setelah Formasi Wonocolo diendapkan dan Formasi Mundu mulai diendapkan (sedimen berumur Mio-Pliosen), dan (C) kondisi saat ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Dirjen Migas, SKKMigas dan PT. Pertamina EP atas ijin data untuk penelitian; Bapak Dr. Ir. Dardji Noeradi, Bapak Prof. Ir. Benyamin Sapiie, Ph.D., Bapak Prof. Dr. Ir. Doddy Abdassah dari ITB; Teknik Geologi FTKE Usakti dan Semua pihak yang membantu penelitian ini.

KEPUSTAKAAN

- Burhannudinnur, M.**, 2012. Komplek mud volcano Kradenan. Yogyakarta, IAGI, pp. 305-309.
- Burhannudinnur, M., Noeradi, D., Sapiie, B. & Abdassah, D.**, 2012. Karakter mud volcano di Jawa Timur. Yogyakarta, IAGI Annual Convention and Exhibition, pp. 300-304.
- Burhannudinnur, M. & Prasetyo, A.**, 2012. Kradenan mud volcano complex between prospect and its exploration risk. Palembang, HAGI-PIT HAGI.
- Davies, R. J., Swarbrick, R. E., Evans, R. J. & Huuse, M.**, 2007. Birth of a mud volcano, East Java. *GSA Today*, February, 17(2), pp. 4-9.
- Istadi, B. P., Pramono, G. H., Sumintadireja, P. & Alam, S.**, 2009. Modeling study of growth and potential geohazard for LUSI mud volcano: East Java, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, November, 26(9), pp. 1724-1739.
- Itihara, M., Sudijono, Wikarno & Kadar, D.**, 1985. Mud volcanoes in the Sangiran Kubah. GRDC Spec. Publication, 4(52).
- Kopf, A. J.**, 2002. Significance of mud volcanism. *Reviews of Geophysics*, May.40(2).
- Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G.G., Aloisi, G., Planke, S., Malthe-Sørensen, A. & Istadi, B.**, 2007. Triggering dan dynamic evolution of the LUSI mud volcano. *Earth and Planetary Science Letters*, September, 261(3-4), pp. 375-388.
- Phillips, T. L., Noble, R. A. & Sinartio, F. F.**, 1991. Origin of Hydrocarbon, Kangean Block Northern Platform, Offshore Northeast Java Sea. s.l., Indonesian Petroleum Association, pp. 637-661.
- Prasetyadi, C.**, 2007. Evolusi Tektonik Paleogen Jawa Bagian Timur. Bandung: ITB (tidak dipublikasikan).
- Pulunggono, A. & Martodjojo, S.**, 1994. Perubahan tektonik Paleogen-Neogen merupakan peristiwa tektonik terpenting di Jawa, Yogyakarta: UGM, Yogyakarta.
- Sapiie, B., Harsolumaks, A., C., P. & Asikin, S.**, 2006. Paleogen tectonic evolution and sedimentation of East Java Basin, Langkawi, Malaysia: UKM-ITB.
- Satyana, A.**, 2007. Central Java, Indonesia-A "Terra Incognita" in petroleum exploration: New considerations on the tectonic evolution and petroleum implications. Jakarta, Indonesian Petroleum Association.
- Sawolo, N., Sutriyono, E., Istadi, B. P. & Darmoyo, A. B.**, 2009. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling?. *Marine and Petroleum Geology*, November, 26(9), pp. 1766-1784.
- Smyth, H., Hall, R., Hamilton, J. & Kinny, P.**, 2005. East Java, Cenozoic basins, volcanoes, dan ancientm basement. Jakarta, Indonesian Petroleum Association.
- Soetarso, B. & Patmosukismo, S.**, 1976. The diapiric structures and relation on the occurrence of hydrocarbon in northeast Java basin. *Ikatan Ahli Geologi Indonesia*.
- Sribudiyani, Muchsin, N., Ryacudu, R., Kunto, T., Astono, P., Prasetya, L., Sapiie, B., Asikin, S., Harsolumakso, A.H., & Yulianto, I.**, 2003. The collision of the East Java Microplate and its implication for hydrocarbon occurrences in the East Java Basin. s.l., Indonesian Petroleum Association, pp. 1-12.
- Tingay, M., Heidbach, O., Davies, R. & Swarbrick, R.**, 2008. Triggering of the Lusi mud eruption: Earthquake versus drilling initiation. *Geology*, 36(8), p. 639-642.
- Untung, M. & Sato, Y.**, 1978. Gaya berat and Geological Studies in Jawa, Indonesia. s.l.:Geological Survey of Indonesia & Geological Survey of Japan.