

REKONSTRUKSI MODEL SITUS KUTA LUBOK BERDASARKAN DATA ELEKTROMAGNETIK VERY LOW FREQUENCY (VLF)

¹Nazli Ismail, ²Muhammad Yanis, ³Gunawati
Jurusan Fisika, Universitas Syiah Kuala,
Darussalam Banda Aceh - 23111, Indonesia

¹*nazli.ismail@unsyiah.ac.id*
²*yanislancok46@gmail.com*

ABSTRAK

Situs benteng Kuta Lubok merupakan salah satu bangunan peninggalan sisa-sisa kejayaan Aceh pada masa silam. Berdasarkan catatan sejarah, Kuta Lubok merupakan bagian dari pusat perdagangan Kerajaan Lamuri abad ke-9, sehingga sering disinggahi oleh berbagai pelayaran internasional. Benteng tersebut juga sempat dikuasai Portugis pada abad ke-16 untuk kepentingan penyerangan wilayah Nusantara. Pada saat ini kawasan yang pernah megah tersebut hanya tersisa puing-puingnya saja. Mengingat pentingnya peran kawasan Kuta Lubok pada masa lampau kami telah melakukan rekonstruksi model benteng berdasarkan variasi resistivitas batuan yang terukur dari peralatan Very Low Frequency (VLF). Kami mengukur komponen medan magnet dan medan listrik sekaligus pada frekuensi 15 – 30 kHz. Untuk mendapatkan visualisasi geometri 3D dengan resolusi terbaik, kami membuat 12 profil sepanjang 60 meter yang memotong areal sisa bangunan dengan jarak antar station 5 meter dan jarak antar lintasan 10 meter. Berdasarkan analisa data tilt magnetik, sisa bangunan benteng yang terkubur ditandai oleh kluster-kluster pola distribusi rapat muatan minimum. Pada data mode resistivity, bangunan benteng ditunjukkan oleh nilai resistivitas yang tinggi. Berdasarkan informasi dari dua metode pengukuran tersebut, geometri benteng Kuta Lubok diduga berbentuk dinding persegi panjang setebal 2 meter yang menutupi areal seluas 30 meter x 90 meter menghadap lautan.

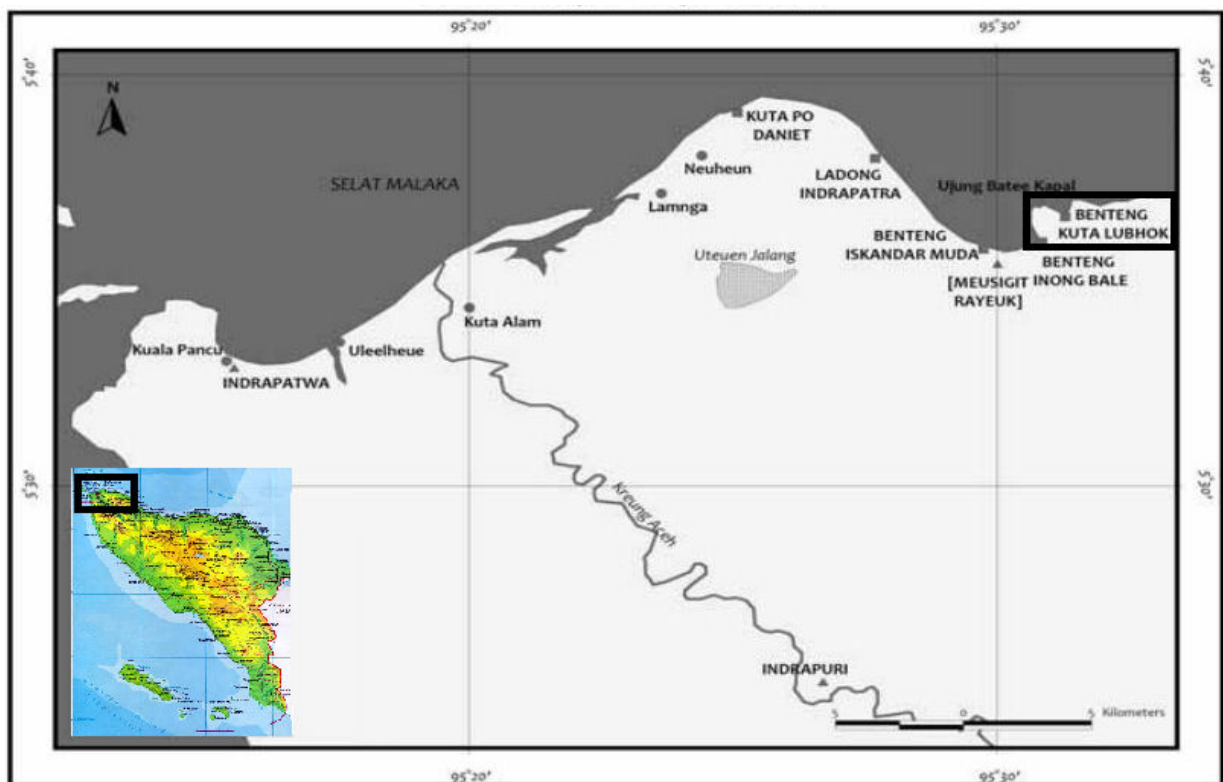
Kata kunci: Very low frequency, resistivitas, geosisika arkeologi, benteng, Nusantara.

PENDAHULUAN

Aceh merupakan pintu gerbang Nusantara yang memegang peranan penting lalu-lintas transportasi laut pada masa lampau. Karena itu, kemasyhuran Aceh pada masa lampau tidak hanya tercatat dalam dokumen sejarah di berbagai belahan dunia, tetapi juga bukti-bukti fisik sisa-sisa kejayaan berupa situs-situs purbakala masih tersebar luas di seluruh Aceh. Di sepanjang

pantai Banda Aceh dan Aceh Besar saja terdapat puluhan lokasi peninggalan bersejarah (Gambar 1), salah satu situsnya adalah benteng Kuta Lubok di Desa Lamreh, Kecamatan Masjid Raya, Kabupaten Aceh Besar, Propinsi Aceh. Kawasan tersebut diduga sebagai bekas Kerajaan Lamuri yang dibangun pada abad ke-9 (McKinnon, 1998). Dengan demikian Lamuri merupakan kerajaan di Aceh yang lebih tua dari dua kerajaan besar; Samudera Pasai dan Kerajaan Aceh Darussalam. Selain peninggalan benteng Kuta Lubok, di kawasan Lamreh juga terdapat Benteng Kuta Inong Balee (abad ke-15) dan areal perkuburan kuno yang dibangun sejak abad ke-9, sehingga keberadaannya patut dilestarikan.

Seiring dengan perkembangan masa, Desa Lamreh tidak hanya menarik dari sisi sejarah. Bentangan alam Lamreh berupa areal perbukitan yang berbatasan langsung dengan lautan Samudera Hindia memberikan keindahan panorama yang mengesankan. Mengingat indah dan strategisnya kawasan tersebut, Pemerintah Aceh telah memberikan izin kepada investor untuk mengembangkan perbukitan Lamreh menjadi lapangan golf (Serambi Indonesia, 20 Mei 2012). Pada sisi lain, kawasan Lamreh juga menyimpan cadangan bijih besi yang potensial untuk dieksploitasi. Kedua prospek tersebut merupakan tantangan sekaligus ancaman terhadap keberadaan situs-situs peninggalan sejarah masa kerajaan Lamuri. Oleh karena itu, upaya penelitian dan pengembangan dalam rangka pelestarian situs purbakala pada kawasan Lamreh perlu dilakukan. Untuk melakukan pengembangan dan pemeliharaan, perlu dilakukan pencarian kembali sebagian sisa-sisa peninggalan bersejarah yang terkubur di bawah permukaan. Eksplorasi geofisika untuk arkeologi merupakan cabang baru, tetapi telah berhasil diaplikasikan untuk pencarian berbagai situs arkeologi penting di dunia (David, et.al. 2008).



Gambar 1: Peta lokasi kawasan Benteng Kuta Lubok dan kawasan bersejarah lain.

Pada penelitian ini kami menggunakan metode Very Low Frequency (VLF) untuk memetakan keberadaan situs benteng Kuta Lubok yang telah terpendam di bawah permukaan. Metode VLF cocok digunakan untuk eksplorasi arkeologi karena sifatnya yang pasif, yaitu dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh transmitter-transmitter radio berfrekuensi rendah (15 kHz - 30 kHz). Aplikasi metode geofisika pasif dapat menjamin tidak ada gangguan fisik terhadap target situs selama dilakukan pengukuran.

METODE VLF

Metode *very low frequency* (VLF) merupakan pengembangan dari metode *magnetotelluric* (Paal, 1965). Jika pada metode magnetotelluric menggunakan gelombang elektromagnetik yang bersumber dari alam (arus-arus telluric dari atmosfer), maka pada metode VLF digunakan sumber dari pemancar radio frekuensi yang sangat rendah (15 – 30 kHz). Masing-masing komponen medan listrik dan medan magnet diukur sehingga diperoleh hubungan (*transfer function*) antara keduanya. Hubungan tersebut memberikan informasi perubahan konduktivitas secara lateral sepanjang lintasan dan sekitar titik-titik yang diukur. Hasil pengukurannya dapat langsung ditransform dalam bentuk peta resistivitas dalam areal yang luas (Becken, 2000).

Sifat resistivitas listrik material di bawah permukaan bumi dapat dihitung berdasarkan perbandingan medan listrik dan magnetik terukur (Cagniard, 1953). Ward dan Hohmann (1987) menurunkan formulasi tersebut untuk gelombang datang yang tegak lurus, uniform, homogenous, dan *plane wave* terhadap medium model bumi isotropik berlapis. Jika diasumsikan gelombang bidang merambat dalam arah z positif ke bawah, sumbu x merupakan arah pengukuran medan listrik dan sumbu y arah pengukuran medan magnet, maka resistivitas semu (ρ_{xy}) dan fase (ϕ_{xy}) dapat diperkirakan dari elemen impedansi sebagai

$$\rho_a(\omega) = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2, \text{ dan} \quad (1)$$

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1}[Z_{xy}(\omega)] = \tan^{-1} \left[\frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right] \quad (2)$$

di mana ω adalah frekuensi, μ_0 adalah permeabilitas, E adalah medan listrik, H adalah medan magnetik. Sedangkan *sub-script* x dan y masing-masing menunjukkan arah komponen yang diukur. Resistivitas semu menunjukkan variasi resistivitas medium terhadap kedalaman sedangkan nilai fase lebih besar dari 45° dalam asumsi bumi 1D dapat diinterpretasikan sebagai medium konduktif dan fase kurang dari 45° sebagai medium resistif pada kedalaman terkait. Kedalaman pendugaan struktur pada metode VLF dinyatakan sebagai *skin depth* (δ); yaitu kedalaman di mana amplitudo turun menjadi 37% dari amplitudo pada permukaan, dengan persamaan

$$\delta \approx 500 \sqrt{\frac{\rho}{f}} [m], \quad (3)$$

dimana ρ adalah resistivitas [Ohm-m] dan f adalah frekuensi [Hz].

SIFAT ELEKTROMAGNETIK MATERIAL ARKEOLOGI

Keberhasilan eksplorasi situs-situs purbakala yang terpendam di bawah permukaan dengan menggunakan metode geofisika sangat bergantung pada pengetahuan sifat-sifat fisika target yang dicari. Pada metode VLF sifat-sifat magnetik dan listrik material merupakan sifat utama yang dapat mengindikasikan keberadaan target yang dicari. Kebanyakan situs purbakala yang dicari terpendam kurang dari 1 meter di bawah permukaan. Material yang menutupi di atas target umumnya berupa *alluvium*, *colluvium*, *peat*, pasir, tanah, atau lumpur. Kondisi demikian memberikan tantangan tersendiri dalam eksplorasi yang menggunakan konsep elektromagnetik. Metode elektromagnetik VLF berkerja berdasarkan adanya variasi resistivitas atau konduktivitas material di bawah permukaan.

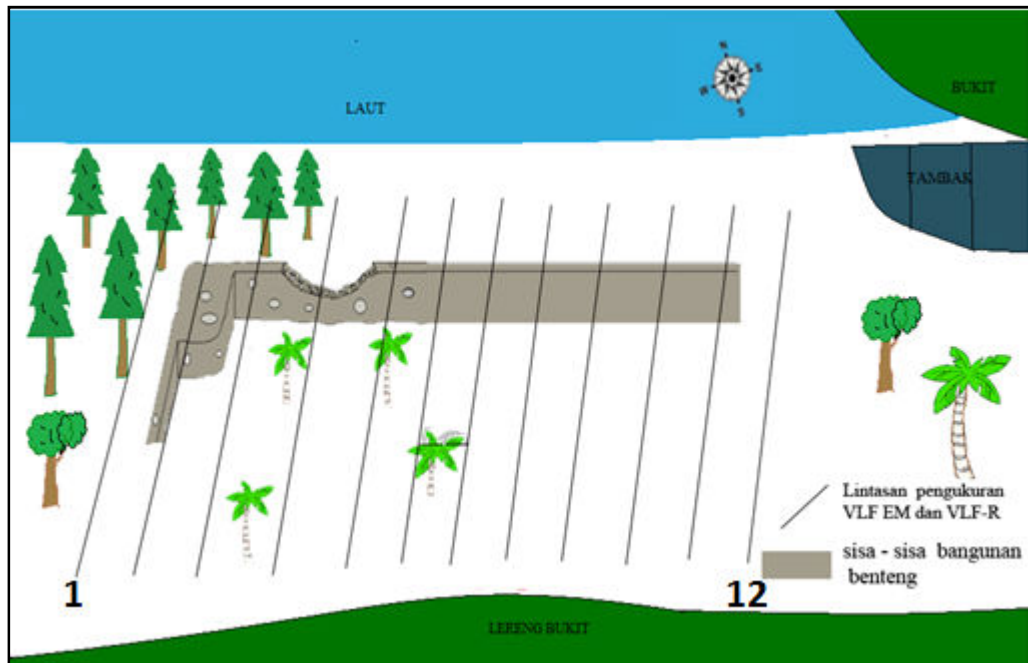
Resistivitas batuan di bawah permukaan bumi sangat bergantung pada kandungan air dan salinitas air di dalamnya. Air asin memiliki sifat konduktifitas yang lebih tinggi daripada air tawar. Sementara itu, kandungan air di dalam batuan juga dapat meningkatkan konduktivitas batuan tersebut (Telford, et.al., 1990). Sisa-sisa kanal purba yang terisi tanah atau *silt* umumnya bersifat basah, sehingga memiliki sifat resistivitas yang relatif rendah. Sedangkan material berupa kerikil dan kerakal yang terpendam di bawah permukaan bahkan dapat menyimpan air yang lebih banyak jika dibatasi oleh lapisan yang kedap di bawahnya. Kondisi semacam ini dapat meningkatkan nilai konduktivitas lapisan tersebut dibandingkan dengan material lain yang ada di sekitarnya. Sedangkan formasi berupa tembok umumnya kering dengan nilai resistivitas yang relatif tinggi. Ini merupakan target utama dalam pencarian sisa-sisa bangunan benteng Kuta Lubok, karena benteng Kuta Lubok terbuat dari bongkahan-bongkahan batuan beku dan batu gamping yang disemen dengan proses pembakaran batu kapur.

METODE PENGUKURAN

Akuisisi data lapangan dilakukan di bekas situs Kuta Lubok, Desa Lamreh, Kecamatan Masjid Raya, Aceh Besar. Data lapangan diukur menggunakan peralatan T-VLF IRIS *Instrument* dalam mode *tilt angle* dan *resistivity*. Mode *tilt* merupakan data perbandingan intensitas medan magnet vertikal H_z dan medan magnet horizontal H_y , sedangkan pada mode *resistivity* (VLF-R) diukur komponen medan magnetik dan komponen medan listrik secara sekaligus sehingga dapat diperoleh nilai resistivitas semu dan fase pada daerah pengukuran (Persamaan 1 dan 2). Sumber gelombang elektromagnetik frekuensi sangat rendah yang digunakan berasal dari stasiun pemancar VLF HWU France (18.3 kHz) dan JJI Japan (22.2 kHz) untuk mode *tilt*, sedangkan mode *resistivity* digunakan frekuensi dari pemancar VLF JJI Japan (22.2 kHz) dan RCV Rusia (27.0 kHz), pemilihan stasiun ini dilakukan karena dapat diterima dengan kualitas sinyal yang

bagus pada lokasi pengukuran, kualitas sinyal yang dapat diterima di lapangan rata-rata 40% yaitu masih batas yang bisa digunakan untuk pengukuran elektromagnetik VLF yaitu 12%.

Data lapangan diukur pada 12 lintasan, panjang tiap lintasan 60 meter, dengan jarak antar stasiun (titik) 5 meter dan jarak antar lintasan sepanjang 10 meter (Gambar 2). Lintasan pertama dan lintasan ke 12 berada di luar benteng, sedangkan lintasan 2 sampai dengan 11 dibuat memotong lokasi sisa bangunan benteng.



Gambar 2: Peta Pengukuran VLF *tilt angle* dan *resistivity* dan animasi kondisi dan singkapan sisa bangunan benteng.

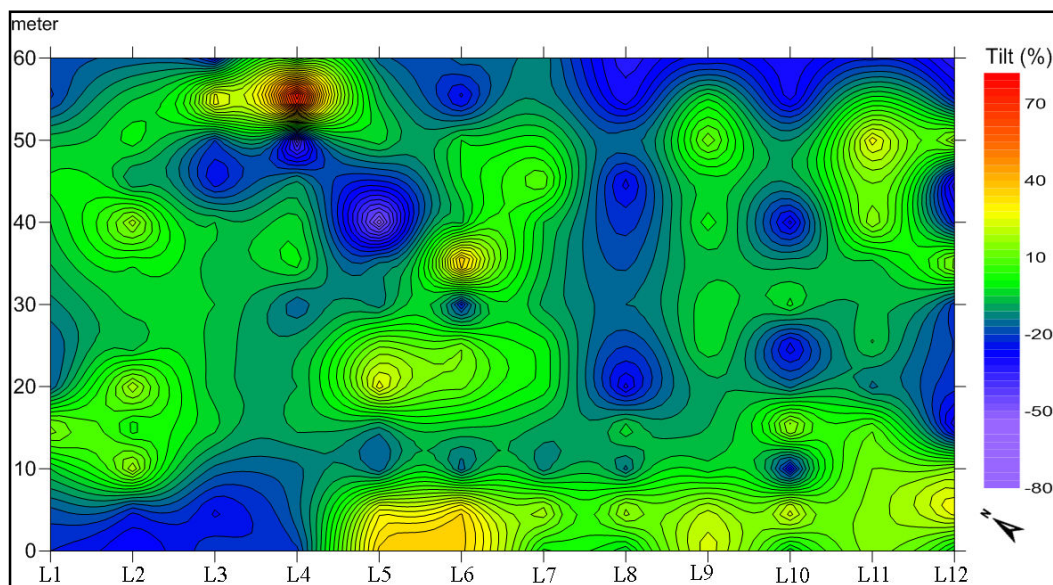
HASIL DAN PEMBAHASAN

Mode tilt

Pengukuran data mode *tilt* dengan frekuensi 18.3 kHz dan 22.2 kHz diperoleh nilai *tilt* dan *ellipsitas*. Sudut *tilt* adalah rasio kuat medan magnet vertikal terhadap kuat medan magnet horizontal yang dinyatakan dalam %. Semakin besar sudut *tilt* yang terukur semakin konduktif daerah tersebut, sehingga dapat memberikan perbedaan informasi tentang keberadaan benteng yang terkubur dengan keadaan sekitar benteng. Sedangkan *elliptisitas* merupakan perbandingan medan magnetik vertikal terhadap sumbu mayor dan minor. Nilai *tilt* dengan frekuensi 18.3 kHz dalam bentuk kontur ditunjukkan oleh Gambar 3.

Pada frekuensi 18.3 kHz, interval nilai *tilt* umumnya bervariasi antara 32% sampai 85%. Sebaran besaran nilai *tilt* pada frekuensi 18.3 kHz tersebar dengan merata. Keberadaan benteng Kuta Lubok terlihat jelas pada jarak 35 dan 40 m mulai dari lintasan 2 sampai lintasan 11.

Klosur-klosur anomali pada lintasan 2 sepanjang stasiun 10 sampai 40 menunjukkan suatu kelurusan yang juga mengindikasikan keberadaan bangunan benteng-benteng, hal ini bersesuaian dengan singkapan di lapangan, di mana terdapat sisa-sisa bangunan benteng pada stasiun tersebut (Gambar 2). Garis-garis kontur pada lintasan 6 sampai 11 stasiun 30 terdapat suatu kelurusan yang diperkirakan sebagai jalan benteng, ini juga bersesuaian dengan singkapan di lapangan. Pada lintasan 3 sampai 10 terdapat suatu kelurusan garis-garis kontur sepanjang *station* 5 sampai 15 dengan interval nilai *tilt* nya antara 4% sampai 16%, kemungkinan besar ini merupakan respon terhadap batuan benteng yang sudah terkubur. Keberadaan sisa bangunan benteng Kuta Lubok lebih jelas lagi terlihat dari perpotong nilai *tilt* dan fraser seperti ditunjukkan pada Gambar 4 untuk beberapa sampel lintasan pada frekuensi 18.3 kHz.



Gambar 3: Kontur tilt dengan frekuensi 18.3 kHz.

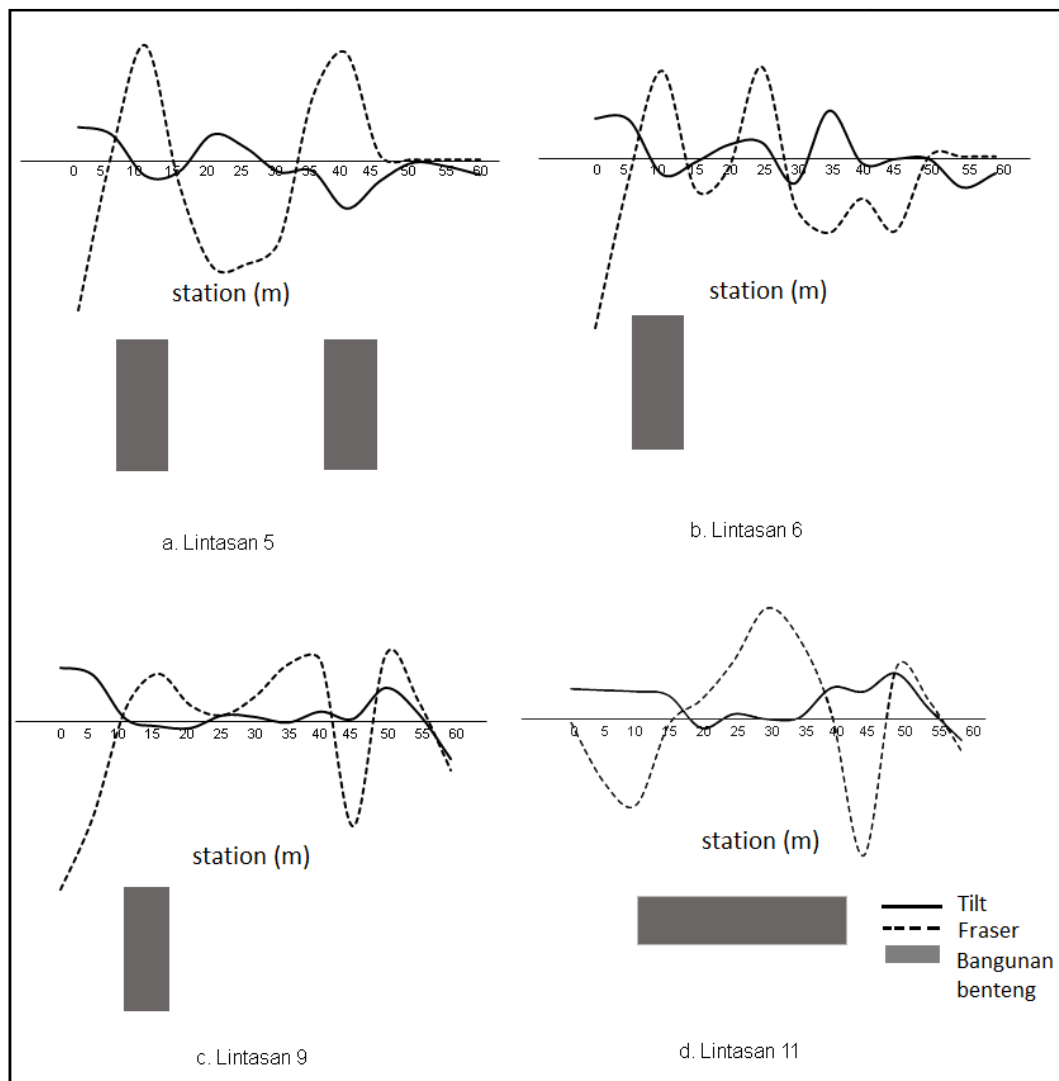
Pada lintasan 5 (Gambar 4a) perpaduan maksimum nilai fraser dan minimum nilai *tilt* pada stasiun 15 menunjukkan respon dari bangunan benteng bagian barat yang sudah terkubur, hal yang sama juga terlihat stasiun 40. Pada lintasan-lintasan yang lain memang didapat singkapan bangunan benteng pada station 35-40 tersebut. Pada lintasan 6 (Gambar 4b) dan lintasan 9 (Gambar 4c) stasiun 10 - 15 juga terdapat anomali vertikal yang diperkirakan sebagai batuan benteng yang sudah terkubur. Sebaliknya pada lintasan 6 dan 9 tidak terdapat anomali pada stasiun 40, berat dugaan kehilangan anomali ini disebabkan oleh keberadaan intrusi air asin yang sangat konduktif. Pada lintasan 11 (Gambar 4d) terdapat perpotongan kurva fraser dan tilt yang lebar sepanjang stasiun 10-40 juga mengindikasikan sisa-sisa bangunan. Pengukuran VLF mode *tilt* menggunakan frekuensi dari JJI Japan (22.2 kHz) juga menunjukkan hasil pola yang serupa.

Mode Resistivity

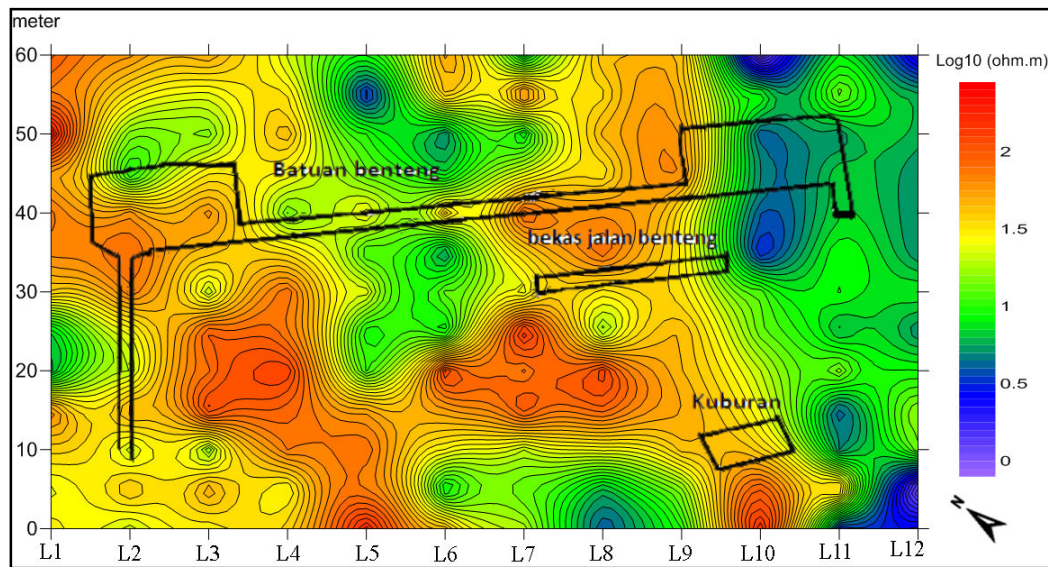
Pengukuran mode *resistivity* menggunakan transmitter dengan frekuensi 22.2 kHz dan 27.0 kHz. Parameter yang diukur pada mode *resistivity* yaitu resistivitas semu (ρ) dan fase (φ). Resistivitas

semu (ρ) merupakan nilai resistivitas yang terukur di lapangan dan bisa memberikan perkiraan kasar dari resistivitas pada setiap kedalaman, nilai resistivitas berbanding terbalik dengan konduktifitas, semakin besar resistifitas maka konduktifitasnya kecil, begitu juga sebaliknya. Sedangkan fase (ϕ) dapat menjelaskan perubahan lateral konduktivitas material di bawah permukaan bumi, dimana untuk fase di bawah 45° menunjukkan resistor pada kedalaman dan fase di atas 45° menunjukkan konduktur pada kedalaman.

Dengan mengetahui nilai resistivitas semu (ρ) dan fase (ϕ) maka diharapkan bisa memberikan informasi secara kualitatif atau perkiraan kasar tentang keberadaan situs Kuta Lubok. Nilai resistivitas semu dengan frekuensi 27.0 kHz dalam bentuk kontur ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 4: Kurva fraser dan *tilt* frekuensi 18.3 kHz.



Gambar 5: Kontur resistivitas semu (ρ) dengan frekuensi 27.0 kHz.

Nilai resistivitas semu pada frekuensi 27.0 kHz bervariasi antara 1 Ωm sampai 209 Ωm atau dalam skala logaritmik antara 0 Ωm sampai 2.32 Ωm , pada umumnya kawasan penelitian didominasi oleh resistivitas tinggi, resistivitas tinggi terdapat di sebelah Utara, Barat, dan juga Selatan, zona konduktif terdapat sebelah Timur sedangkan sebelah Barat didominasi oleh zona resistif, di bagian tengah juga terdapat zona konduktif yang dibatasi oleh dua zona resistif tengah sebelah Barat dan Timur.

Zona konduktif sebelah Timur kemungkinan diakibatkan oleh respon terhadap air asin yang sangat konduktif, hal ini bersesuaian dengan singkapan di lapangan, di mana sebelah Timur terdapat muara atau tambak dan mempunyai jarak dengan laut hanya 10 meter, sehingga respon VLF terhadap benteng yang bersifat resistif tidak dapat dipetakan pada stasiun ini, pada bagian Utara juga didominasi oleh zona konduktif yang diakibatkan oleh intrusi air asin tapi di beberapa tempat dipotong oleh zona resistif, kemungkinan besar sangat berkaitan dengan keberadaan situs arkeologi Kuta Lubok, karena batuan benteng merupakan batuan yang besar sehingga menghalangi air terintrusi pada kawasan yang sudah ditanamkan benteng, namun pada bagian tengah terdapat zona konduktif, hal ini diperkirakan sebagai intrusi air asin yang relatif dangkal sehingga bangunan benteng yang resistif tidak dapat dipetakan dengan jelas, walaupun demikian zona resistif yang diperkirakan benteng masih dapat terlihat pada bagian tengah akibat respon terhadap intrusi tersebut. Zona resistif selain terdapat di daerah yang dianggap anomali benteng, juga terdapat di sebelah Selatan, kemungkinan diakibatkan oleh keberadaan beberapa kuburan kuno, hal ini bersesuaian dengan singkapan di lapangan di mana terdapat sisa-sisa kuburan benteng yang masih utuh, kemudian di bagian tengah Timur atau pada lintasan 7 sampai 9 sepanjang stasiun 30 juga terdapat zona resistif dengan interval kunter yang hampir sama dengan anomali kuburan yaitu 1.4 Ωm sampai 1.8 Ωm dalam skala logaritmik, anomali ini diperkirakan sebagai respon elektromagnetik terhadap jalan benteng.

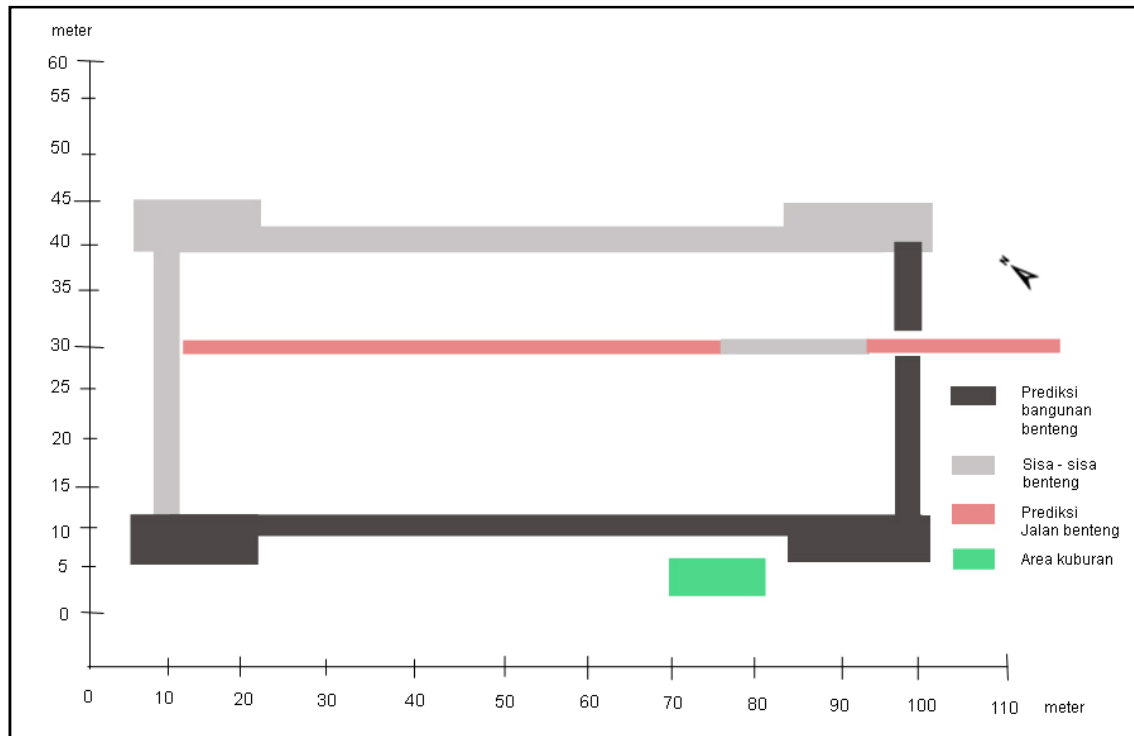
Pada Gambar 5 terlihat jelas garis kontur pada lintasan 2 stasiun 10 sampai 40 menunjukkan suatu kelurusan yang dianggap sebagai respon terhadap anomali benteng, kemudian pada lintasan 2 sampai 9 sepanjang stasiun 35 dan 40 juga membentuk suatu kelurusan yang diperkirakan sebagai respon terhadap anomali benteng, ini bersesuaian dengan kenyataan di lapangan di mana terdapat sisa-sisa bangunan benteng. Pada lintasan 2 sampai 10 juga terdapat suatu kelurusan kontur sepanjang stasiun 10, kemungkinan besar ini merupakan respon terhadap batuan benteng yang sudah terkubur, sehingga lebih diyakini respon yang dihasilkan dengan mode *resistivity* frekuensi 27.0 kHz merupakan respon terhadap anomali benteng Kuta Lubok. Pengukuran mode *resistivity* pada frekuensi 22.2 kHz juga mengindikasikan penampakan yang serupa, tetapi tidak memberikan informasi tentang keberadaan benteng Kuta Lubok dengan jelas seperti pada frekuensi 27.0 kHz. Kedalaman penetrasinya relatif dalam (Persamaan 3), sehingga kemampuan meresolusi benda dangkal berkurang, seperti kedalaman bangunan benteng 0-5 meter.

Prediksi model bangunan benteng

Pengolahan data mode *tilt* berupa nilai distribusi rapat arus ekuivalen pada setiap kedalaman sehingga memberikan informasi tentang kedalaman dari bangunan benteng yaitu sekitar 5 meter, kemudian data fraser dari pengukuran *tilt* memberikan informasi tentang struktur geometri vertikal dari bangunan benteng tanpa diketahui kedalaman dari bangunan benteng. Setelah mendapatkan nilai resistivitas sebenarnya dari hasil inversi pada pengukuran mode *resistivity*, maka dapat diketahui informasi tentang bangunan benteng, jalan benteng dan area kuburan dengan sangat jelas.

Berdasarkan model nilai resistivitas (Gambar 5) pada pengukuran mode *resistivity* dan prediksi model pada kurva fraser (Gambar 4), maka dapat dilakukan rekontruksi ulang bangunan benteng Kuta Lubok secara keseluruhan. Model rekontruksi ulang situs Kuta Lubok secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 6.

Berdasarkan prediksi model bangunan benteng (Gambar 6), sisa atau singkapan bangunan benteng ditunjukkan oleh warna abu-abu, kemudian prediksi bangunan benteng yang sudah terkubur ditunjukkan oleh warna hitam, semua bangunan benteng baik itu singkapan maupun yang sudah terkubur dapat dipetakan dengan sangat baik dengan pengukuran VLF (*tilt* dan *resistivity*), sedangkan jalan benteng yang ditunjukkan dengan warna merah juga dapat direspon dengan baik dengan pengukuran mode *resistivity*. Area kuburan terlihat sangat jelas baik itu secara data maupun singkapan di lapangan.



Gambar 6. Prediksi model rekontruksi benteng Kuta Lubok berdasarkan pengukuran kedua mode pengukuran VLF.

SIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diambil beberapa simpulan sebagai berikut:

1. Metode *Very Low Frequency* (VLF) dapat dilakukan untuk pemetaan benda-benda arkeologi seperti bangunan benteng Kuta Lubok, jalan benteng dan area kuburan.
2. Berdasarkan interpretasi kualitatif, bangunan benteng Kuta Lubok ditunjukkan dengan nilai *tilt* rendah yang bervariasi antara -20% sampai 20% dan ditunjukkan dengan nilai resistivitas semu yang tinggi berkisar antara 1.5 Ωm sampai 2.5 Ωm dalam skala logaritmik.
3. Interpretasi kuantitatif menunjukkan bahwa kurva derivative fraser dapat memberikan informasi tentang nilai ketebalan bangunan benteng Kuta Lubok yaitu sekitar 5m serta dapat memberikan informasi tentang bangunan benteng terkubur yang tidak nampak di lapangan.
4. Secara keseluruhan, data kualitatif dan kuantitatif dapat memetakan benteng Kuta Lubok, sehingga dapat dilakukan rekontruksi ulang *pseudo* 3D situs Kuta Lubok.

DAFTAR PUSTAKA

- Becken, M., 2000. *Interpretation of magnetic transfer functions from airborne tensor VLF measurements*. Diploma Thesis, Technical University of Berlin.
- Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, 18, 605 – 653.

- David A, Linford N, Linford P, 2008, *Geophysical survey in archaeological field evaluation*. English Heritage Publishing.
- Fatria, Budi. 2012. Selamatkan Situs Lamuri, *Serambi Indonesia*, 22 Juni: 16.
- McKinnon, E.E., 1998, "Beyond Serandib: A Note on Lambri at the Northern Tip of Aceh", *Indonesia*, 46, 102 – 121.
- Paal, G., 1965. Ore prospecting based on VLF-radio signals. *Geoexploration*, Vol. 3, 139 – 147.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics*, 2nd Edition, Cambridge University Press.
- Ward, S. H. and Hohmann, G. W., 1987. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Vol. 1 – Theory. (ed. M. N. Nabighian) SEG, *Investigations in geophysics*, 3, 131 – 311.