

KAPASITAS DAYA DUKUNG PROTOTYPE PONDASI TIANG AKIBAT DARI PENGARUH GEJALA ELEKTROOSMOSIS

Edy¹⁾, R.M. Rustamaji¹⁾, Eka Priadi¹⁾, Abubakar Alwi¹⁾

¹⁾Program studi Magister Teknik Sipil, jurusan Teknik Sipil, FT. UNTAN
e-mail : ¹⁾edy9tan@gmail.com

ABSTRAK

Pertumbuhan pembangunan memaksa kebutuhan akan ruang untuk infrastruktur semakin meningkat, tetapi seperti diketahui bahwa tanah di daerah Pontianak memiliki nilai daya dukung yang relatif kecil sehingga salah satu solusi untuk meningkatkan daya dukung tanah tersebut adalah dengan stabilisasi tanah. Ada beberapa metode stabilisasi tanah lunak, yaitu metode stabilisasi kimia, metode hidrolis (dewatering), metode grouting, dan banyak lagi metode lainnya. Metode lain yang tidak umum digunakan adalah metode yang memanfaatkan gejala-gejala elektrokinetik. Metode stabilisasi tanah secara hidrolis ini diyakini dapat menjawab tantangan permasalahan yang dihadapi terkait daya dukung tanah yang kurang baik di Pontianak. Penelitian ini dilakukan dengan menguji tiang dengan perlakuan elektrokinetik dan tiang tanpa perlakuan elektrokinetik. Dari penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa metode elektrokinetik berhasil memberikan peningkatan daya dukung dikarenakan gejala-gejala elektrokinetik berupa gejala elektroosmosis, elektromigrasi, elektroforesis, dan streaming potensial selama proses perlakuan elektrokinetik yang menimbulkan pengaruh sementasi, koagulasi, dan akhirnya meningkatkan tegangan efektif tanah dan juga dapat diambil kesimpulan bahwa peningkatan daya dukung dengan perlakuan elektrokinetik dapat memberikan hasil yang lebih maksimal ketika menggunakan kuat arus yang lebih besar ketimbang menggunakan perlakuan elektrokinetik dengan waktu tunggu yang lebih lama.

Kata kunci: elektrokinetik, daya dukung, arus listrik searah (DC)

PENDAHULUAN

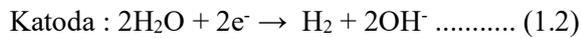
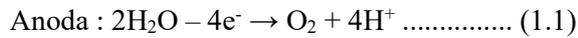
Tanah merupakan pendukung dari fondasi bangunan, artinya tanah merupakan tempat menanam fondasi dari suatu bangunan dan diharapkan tanah tersebut dapat mendukung sepenuhnya konstruksi yang berada di atasnya. Di Pontianak, Kalimantan Barat sendiri permasalahan pada umumnya adalah nilai daya dukung tanah yang rendah dan kadar air tanah yang tinggi karena tanah di wilayah Pontianak didominasi oleh tanah lunak. Hal ini tentu saja menimbulkan masalah pada fondasi, nilai daya dukung fondasi menjadi kecil dan memungkinkan terjadinya penurunan ataupun kegagalan (*failure*) pada fondasi.

Ada beberapa metode stabilisasi tanah lunak, yaitu metode stabilisasi kimia, metode hidrolis (*dewatering*), metode *grouting*, dan banyak lagi metode lainnya. Metode lain yang tidak umum digunakan adalah metode yang memanfaatkan gejala-gejala elektrokinetik.

Metode stabilisasi tanah secara hidrolis ini diyakini dapat menjawab tantangan permasalahan yang dihadapi terkait daya dukung tanah yang kurang baik terutama untuk tanah di kota Pontianak. Metode ini layak untuk dikembangkan karena diyakini lebih efektif dan efisien baik dari segi waktu maupun biaya sehingga perlu dilakukan penelitian mendalam dengan harapan suatu saat metode ini dapat digunakan secara luas untuk menaikkan daya dukung tanah. Jika metode ini diaplikasikan pada fondasi tiang pancang maka diyakini bahwa gaya gesekan sepanjang badan tiang dapat dioptimalkan sehingga fondasi tiang tidak perlu dipancang sampai tanah keras untuk mencapai kapasitas daya dukung optimal. Hal ini tentunya akan mempercepat proses pembangunan dan efisien dalam pembiayaan.

Elektrokinetik adalah salah satu metode perbaikan tanah lunak dengan menggunakan arus listrik searah (DC) secara langsung. Metode ini menggunakan arus listrik yang dialirkan pada

dua kutub elektroda, yaitu anoda dan katoda. Ketika kedua elektroda ini ditanam di dalam tanah dan diberi beda potensial, maka akan terjadi proses elektrolisis dengan persamaan :



Pada dasarnya, teori elektroosmosis ini adalah perpindahan kation (H^+) ke katoda dan anion (OH^-) ke anoda. Metode ini mengharapkan arus listrik akan mengikat air dan membawanya bergerak mengikuti arah listrik tersebut, sehingga dengan mengurangi air dapat meningkatkan daya dukung tanah.

Penelitian ini akan dilakukan pada tanah asli dan tiang model sehingga akan mendapatkan hasil yang lebih mendekati kondisi aslinya. Dari penelitian ini diharapkan dapat diketahui pengaruh pemberian variabel kuat arus dan waktu terhadap peningkatan tahanan dari tiang pancang baja di tanah lempung setelah dilakukan proses elektrokinetik akan didapatkan kuat arus maupun waktu yang optimum dalam proses elektroosmosis.

METODOLOGI

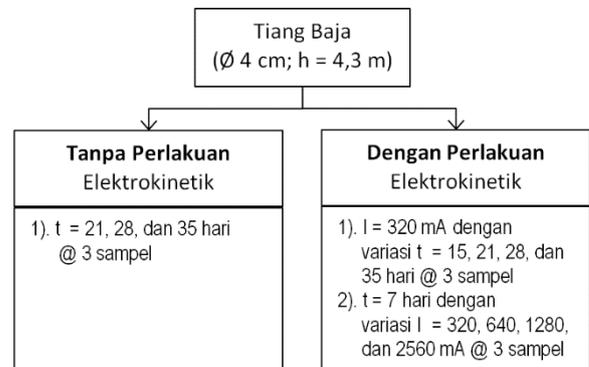
Pada dasarnya penelitian ini adalah studi lapangan menggunakan data uji beban tiang (*loading test*) tiang tunggal dari hasil penelitian di lapangan dan dibandingkan dengan daya dukung ultimit tiang tanpa perlakuan elektrokinetik dan dengan perlakuan elektrokinetik selama waktu tunggu yang telah ditentukan. (lihat gambar 1). Untuk perlakuan elektrokinetik dilakukan pengaliran arus listrik secara kontinu dengan variasi kuat arus dan variasi waktu. Hasil pembebanan tiang (*loading test*) tiang tunggal akan dibandingkan untuk melihat perubahan daya dukung yang disebabkan oleh proses elektrokinetik. Uji pembebanan tiang (*loading test*) dilakukan dengan metode *Quick Maintained Loading Test* secara bertahap, sedangkan hasil interpretasi data uji pembebanan tiang (*loading test*) menggunakan tiga metode yaitu : Metode Elastis Plastis, Metode Mazurkiewich, dan Metode Chin

Bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

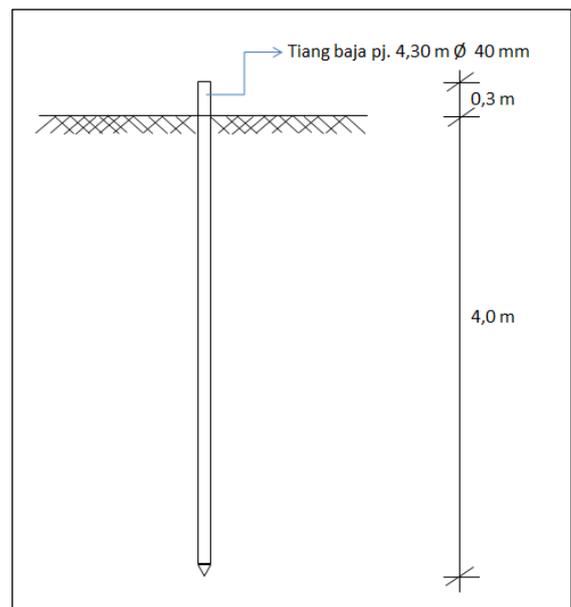
1. Tanah di lokasi Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura dalam kondisi asli (belum diganggu), tepatnya depan ruang D18.
2. Tiang tunggal digunakan tiang baja Ø 4 cm dengan panjang 4,30 m berfungsi sebagai anoda saat diberi perlakuan elektrokinetik

dan baja tulangan dengan Ø 10 mm dengan panjang 4,50 m, berfungsi sebagai katoda.

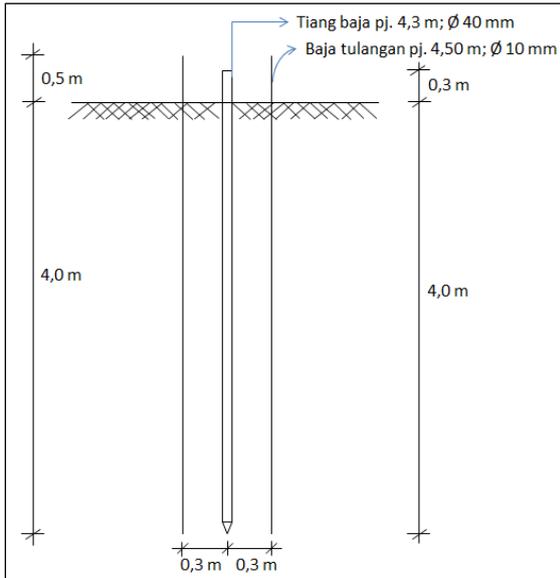
3. Alat uji pembebanan (*loading test*).
4. Catu daya DC (*power supply*).
5. Alat ukur listrik/ Multimeter.
6. Kabel dan jepit buaya.



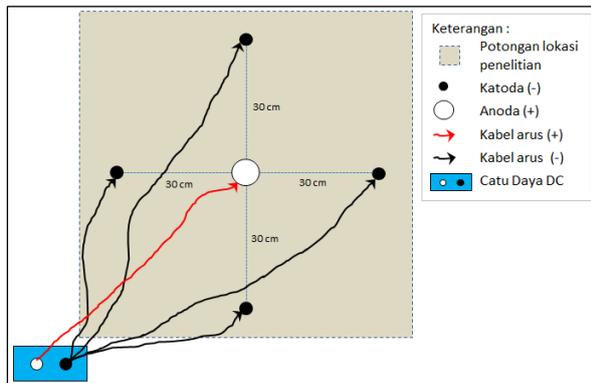
Gambar 1. Prosedur penelitian



Gambar 2. Sket tiang tanpa perlakuan



Gambar 3. Sket tiang dengan perlakuan



Gambar 4. Sketsa konfigurasi elektroda

HASIL DAN ANALISA

Tanpa Perlakuan Elektrokinetik

Pada penelitian tanpa perlakuan elektrokinetik ini, setelah dipancang tiang tunggal kemudian didiamkan selama waktu tunggu rencana, lalu dilakukan uji pembebanan (*loading test*).

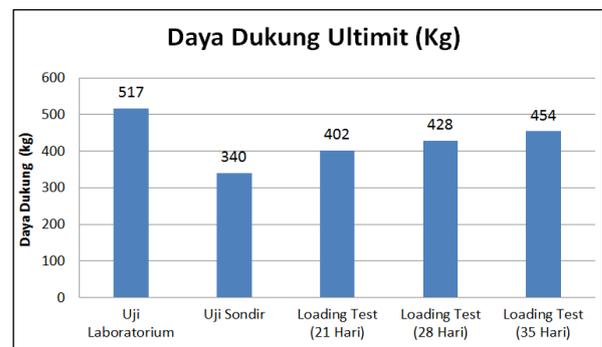
Setelah dilakukan uji pembebanan (*loading test*) dengan metode *Quick Maintained Load Test* didapatkan data beban dan penurunan yang terjadi untuk masing-masing waktu tunggu yaitu 21, 28, dan 35 hari, dan dari data hasil uji pembebanan (*loading test*) kemudian dilakukan interpretasi untuk menentukan besarnya daya dukung ultimit tiang tunggal untuk masing-masing sampel. Rekapitulasi hasil interpretasi daya dukung ultimit tiang tunggal tanpa perlakuan elektrokinetik untuk masing-masing waktu tunggu 21, 28, dan 35 hari disajikan pada Tabel 1 di bawah ini :

Waktu Tunggu	Arus Listrik	Sample	Daya Dukung Ultimate (kg)			
			Metode			Rata - Rata
			Elastis-Plastis	Mazurkiewich	Chin	
21 Hari		Sample 1	315	450	348,675	402,126
		Sample 2	330	570	416,667	
		Sample 3	310	500	378,788	
		Rata-Rata	318,333	506,667	381,377	
28 Hari	Tanpa Perlakuan	Sample 1	370	480	385,802	428,218
		Sample 2	300	490	490,196	
		Sample 3	375	500	462,963	
		Rata-Rata	348,333	490,000	446,320	
35 Hari		Sample 1	490	500	555,555	454,063
		Sample 2	330	600	347,222	
		Sample 3	335	550	378,788	
		Rata-Rata	385,000	550,000	427,188	

Tabel 1. Daya dukung tiang tunggal tanpa perlakuan elektrokinetik

Berdasarkan data Tabel 1 diatas, dapat dilihat bahwa semakin lama waktu tunggu, daya dukung tiang tunggal tanpa perlakuan elektrokinetik semakin meningkat. Rata-rata daya dukung tiang tunggal dari masing-masing metode adalah untuk waktu tunggu 21 hari sebesar 402,126 kg, waktu tunggu 28 hari sebesar 428,218 kg, dan waktu tunggu 35 hari sebesar 454,063 kg. Peningkatan daya dukung ini dipengaruhi oleh menurunnya tekanan air pori tanah secara alami. Di awal pemancangan tanah disekitar tiang terganggu dan tekanan air pori tanah akan meningkat dan setelah waktu tunggu tertentu kondisi tanah akan pulih kembali (*recovery*) dan tekanan air pori akan turun perlahan secara alami sehingga tegangan efektif tanah akan meningkat.

Apabila dibandingkan dengan daya dukung rencana awal dari data sekunder uji laboratorium dan uji sondir, maka daya dukung tiang tunggal selama waktu tunggu 21 hari sudah melebihi hasil uji sondir dengan daya dukung hasil *loading test*. Besarnya masing-masing daya dukung disajikan pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Grafik daya dukung data awal dan hasil *loading test*

Perlakuan Elektrokinetik Variasi Waktu

Pada penelitian dengan perlakuan elektrokinetik variasi waktu ini, setelah dipancang tiang tunggal kemudian langsung dialiri arus listrik DC sebesar 320 mA dengan

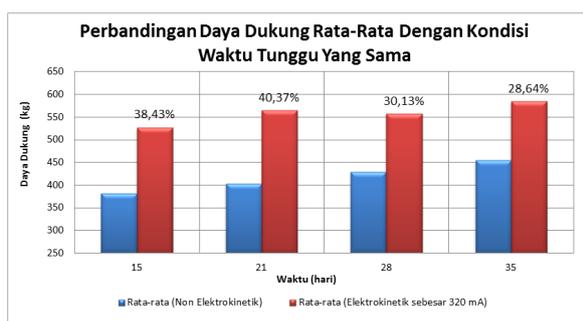
variasi waktu tunggu selama 15, 21, 28, dan 35 hari. Setelah diberi arus sesuai waktu tunggu rencana selanjutnya dilakukan uji pembebanan (*loading test*) pada masing-masing sampel. Rekapitulasi hasil interpretasi daya dukung ultimit tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik untuk masing-masing waktu tunggu 15, 21, 28, dan 35 hari dengan kuat arus 320 mA disajikan pada Tabel 2 dibawah ini.

Waktu Tunggu	Arus Listrik	Sample	Daya Dukung Ultimate (Kg)			
			Metode			Rata-Rata
			Elastis-Plastis	Mazurkiewich	Chin	
15 Hari	320 mA	Sample 1	540	550	567,279	527,303
		Sample 2	335	550	536,942	
		Sample 3	510	550	606,502	
		Rata-Rata	461,667	550,000	570,241	
21 Hari	320 mA	Sample 1	490	515	641,030	553,192
		Sample 2	495	500	684,744	
		Sample 3	450	540	662,954	
		Rata-Rata	478,333	518,333	662,909	
28 Hari	320 mA	Sample 1	375	520	770,179	557,245
		Sample 2	360	515	756,201	
		Sample 3	400	555	763,825	
		Rata-Rata	378,333	530,000	763,402	
35 Hari	320 mA	Sample 1	380	560	790,639	584,107
		Sample 2	370	550	815,395	
		Sample 3	450	545	795,925	
		Rata-Rata	400,000	551,667	800,653	

Tabel 2. Daya dukung tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik variasi waktu

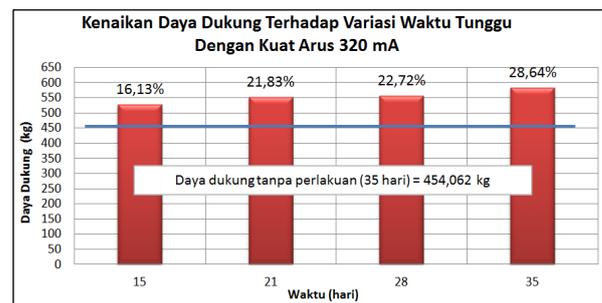
Berdasarkan Tabel 2 diatas, dapat dilihat bahwa peningkatan daya dukung tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik untuk kuat arus 320 mA berbanding lurus dengan waktu perlakuan elektrokinetik, semakin lama waktu tunggu daya dukungnya juga semakin meningkat. Adapun rata-rata daya dukung tiang tunggal untuk waktu tunggu 15 hari sebesar 527,303 kg, waktu tunggu 21 hari sebesar 553,192 kg, waktu tunggu 28 hari sebesar 557,245 kg, dan waktu tunggu 35 hari sebesar 584,107 kg.

Jika dibandingkan dengan kondisi tanpa perlakuan pada waktu tunggu yang sama maka terjadi kenaikan daya dukung masing-masing sebesar 146,385 kg (38,43 %) pada waktu tunggu 15 hari, waktu tunggu 21 hari terjadi kenaikan sebesar 162,324 kg (40,37 %), waktu tunggu 28 hari terjadi kenaikan sebesar 129,027 kg (30,13 %), dan untuk waktu tunggu 35 hari terjadi kenaikan sebesar 130,044 kg (28,64 %).



Gambar 6. Grafik perbandingan daya dukung pada waktu tunggu yang sama

Dan apabila dibandingkan dengan hasil daya dukung tertinggi tiang tunggal tanpa perlakuan elektrokinetik untuk waktu tunggu selama 35 hari yang hanya mempunyai daya dukung sebesar 454,062 kg, artinya dengan perlakuan elektrokinetik yang diberi kuat arus sebesar 320 mA untuk masing-masing waktu tunggu 15, 21, 28, dan 35 hari terjadi peningkatan daya dukung berturut-turut sebesar 73,24 kg (16,13 %); 99,129 kg (21,83 %); 103,182 kg (22,72 %); dan 130,044 kg (28,64 %).



Gambar 7. Grafik kenaikan daya dukung dengan variasi waktu

Perlakuan Elektrokinetik Variasi Arus

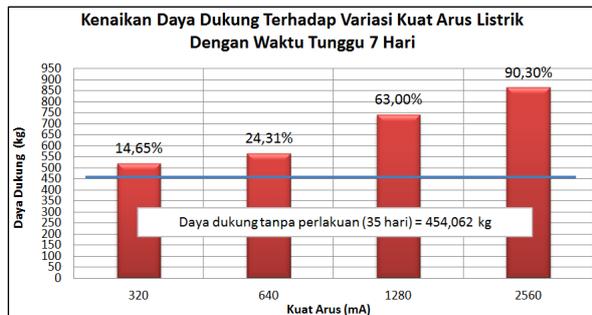
Pada penelitian dengan perlakuan elektrokinetik variasi arus ini, setelah dipancang tiang tunggal kemudian langsung dialiri arus listrik DC selama 7 hari dengan arus sebesar 320 mA, 640 mA, 1280 mA, dan 2560 mA. Setelah diberi arus sesuai waktu tunggu rencana selanjutnya dilakukan uji pembebanan (*loading test*) pada masing-masing sampel. Rekapitulasi hasil interpretasi daya dukung ultimit tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik untuk masing-masing kuat arus 320 mA, 640 mA, 1280 mA, dan 2560 mA masing-masing selama 7 hari disajikan pada Tabel 3 dibawah ini.

Waktu Tunggu	Arus Listrik	Sample	Daya Dukung Ultimate (Kg)			
			Metode			Rata-Rata
			Elastis-Plastis	Mazurkiewich	Chin	
7 Hari	320 mA	Sample 1	475	550	534,531	520,572
		Sample 2	482	580	523,451	
		Sample 3	485	522	533,163	
		Rata-Rata	480,667	550,667	530,382	
7 Hari	640 mA	Sample 1	310	680	809,061	564,449
		Sample 2	410	530	833,333	
		Sample 3	300	420	787,650	
		Rata-Rata	340,000	543,333	810,015	
7 Hari	1280 mA	Sample 1	530	670	1249,375	740,102
		Sample 2	300	510	1209,482	
		Sample 3	420	600	1172,058	
		Rata-Rata	416,667	593,333	1210,305	
7 Hari	2560 mA	Sample 1	430	670	1660,027	864,071
		Sample 2	400	620	1262,626	
		Sample 3	430	670	1633,987	
		Rata-Rata	420,000	653,333	1518,880	

Tabel 3. Daya dukung tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik variasi arus

Berdasarkan Tabel 3 diatas, dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan daya dukung tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik untuk waktu tunggu 7 hari yang berbanding lurus dengan besarnya kuat arus yang diberikan. Adapun rata-rata daya dukung tiang tunggal untuk kuat arus 320 mA sebesar 520,572 kg, kuat arus 640 mA sebesar 564,449 kg, kuat arus 1280 mA sebesar 740,102 kg, dan kuat arus 2560 mA sebesar 864,071 kg.

Sebagai pembanding pada kondisi tanpa perlakuan selama 35 hari maka untuk kondisi dengan perlakuan elektrokinetik waktu tunggu selama 7 hari dengan variasi kuat arus sebesar 320 mA, 640 mA, 1280 mA, dan 2560 mA, masing-masing mengalami peningkatan daya dukung sebesar 66,509 kg (14,65 %); 110,387 kg (24,31 %); 286,039 kg (62,99 %); dan 410,008 kg (90,30 %).



Gambar 8. Grafik kenaikan daya dukung dengan variasi arus

Berdasarkan hasil analisa penelitian menunjukkan bahwa untuk kondisi tanpa perlakuan elektrokinetik maupun dengan perlakuan elektrokinetik menunjukkan adanya peningkatan daya dukung untuk waktu tunggu yang lebih lama.

Hasil penelitian dengan perlakuan elektrokinetik untuk kuat arus tetap yaitu sebesar 320 mA dengan variasi waktu tunggu selama 15, 21, 28, dan 28 hari (lihat Tabel 2) menunjukkan peningkatan yang berbanding lurus terhadap lamanya waktu perlakuan elektrokinetik.

Demikian juga hasil penelitian dengan perlakuan elektrokinetik untuk waktu tunggu tetap yaitu selama 7 hari dengan variasi kuat arus sebesar 320 mA, 640 mA, 1280 mA, dan 2560 mA (lihat Tabel 3) menunjukkan peningkatan yang berbanding lurus terhadap besarnya kuat arus yang diberikan.

Peningkatan daya dukung dengan perlakuan elektrokinetik adalah akibat dari meningkatnya tegangan efektif tanah karena

gejala-gejala elektrokinetik berupa gejala elektroosmosis, elektromigrasi, elektroforesis, dan *streaming potensial* selama proses perlakuan elektrokinetik. Melalui gejala elektrokinetik ini terjadi pergerakan silang ion-ion yang berupa *cementing agent* sehingga terjadi reaksi *precipitation* dan menimbulkan pengaruh sementasi, koagulasi, dan akhirnya meningkatkan tegangan efektif tanah.

Peningkatan daya dukung ini dipengaruhi oleh menurunnya tekanan air pori positif akibat perlakuan elektrokinetik. Pergerakan air mengalir menjauhi tiang tunggal (anoda) ini dikenal dengan fenomena elektroosmosis dimana air mengalir dari anoda (tiang tunggal) menuju katoda (besi tulangan). Pada awal pemancangan tekanan air pori akan meningkat dan setelah dialiri arus listrik pada jangka waktu tertentu dan dengan kuat arus tertentu maka tekanan air pori positif akan turun secara perlahan. Bahkan daya dukung tiang tunggal setelah dialiri arus listrik searah (DC) selama 7 hari saja sudah lebih tinggi dibandingkan dengan tiang tunggal tanpa perlakuan elektrokinetik meskipun tiang tunggal sudah didiamkan selama 35 hari. Hal ini menunjukkan bahwa metode elektrokinetik dapat digunakan sebagai alternatif perbaikan tanah lunak karena dapat menaikkan daya dukung pada tiang tunggal.

Dari Gambar 7 dan Gambar 8 diatas menunjukkan bahwa dengan waktu perlakuan elektrokinetik yang relatif singkat yaitu 7 hari mampu memberikan kenaikan daya dukung sebesar 90,30 % pada kuat arus 2560 mA, bandingkan dengan kondisi waktu tunggu selama 35 hari dengan kuat arus 320 mA hanya memberi kenaikan daya dukung sebesar 28,64 % Ini menunjukkan bahwa kelebihan pada pemberian arus besar dengan waktu yang lebih singkat adalah lebih efektif untuk menaikkan daya dukung dibandingkan dengan pemberian arus kecil dengan waktu tunggu yang lebih lama.

Pengujian Parameter Pendukung

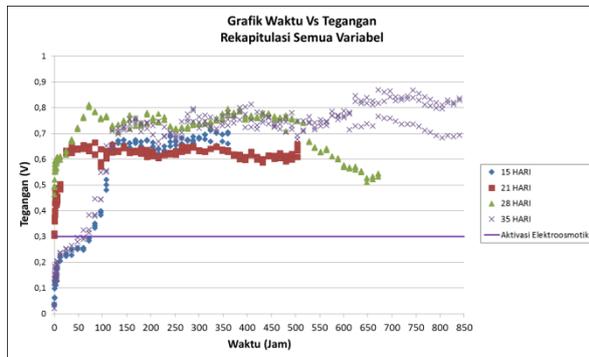
Selama penelitian berlangsung juga dilakukan penelitian pendukung lainnya seperti mengukur tegangan listrik (volt) pada elektroda, uji pH tanah, dan uji permeabilitas tanah.

Tegangan Listrik

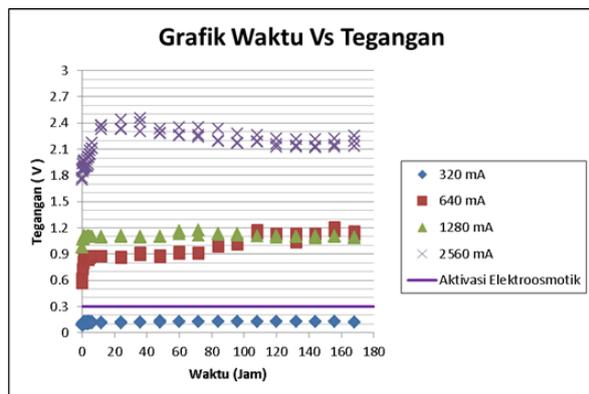
Dari hasil pembacaan tegangan listrik menunjukkan bahwa potensial listrik meningkat perlahan-lahan hingga waktu tunggu tiang tunggal yang telah ditentukan. Peningkatan potensial listrik ini berkaitan dengan

konduktivitas sistem yang berhubungan erat dengan beberapa proses yang terjadi di dalam sistem elektrokinetik antara lain *ionisasi*, *dissosiasi*, *elektrolisis*, dan reaksi-reaksi *elektrokimia* lainnya yang memberikan pengaruh kepada konduktivitas suatu sistem elektrokinetik (Rustamaji, 2007). Lamanya proses yang terjadi di dalam sistem elektrokinetik ini memberikan hasil yang berbeda untuk mencapai keadaan potensial listrik sebesar 1 V/m, yaitu keadaan dimana kecepatan elektroosmotik dan kecepatan hidrolis sama dengan nol ($v_{eo} = v_h$).

Rekapitulasi hubungan tegangan listrik terhadap waktu pada perlakuan elektrokinetik kondisi kuat arus tetap 320 mA dengan variasi waktu tunggu dan perlakuan elektrokinetik kondisi waktu tunggu tetap selama 7 hari dengan variasi kuat arus disajikan pada Gambar 9 dan Gambar 10. di bawah ini.



Gambar 9. Grafik Rekapitulasi hubungan tegangan listrik terhadap waktu tiang tunggal untuk waktu tunggu 15,21,28, dan 35 hari dengan kuat arus 320 mA



Gambar 10. Grafik Rekapitulasi hubungan tegangan listrik terhadap waktu pada tiang tunggal untuk waktu tunggu 7 hari dengan kuat arus 320 mA, 640 mA, 1280 mA, dan 2560 mA.

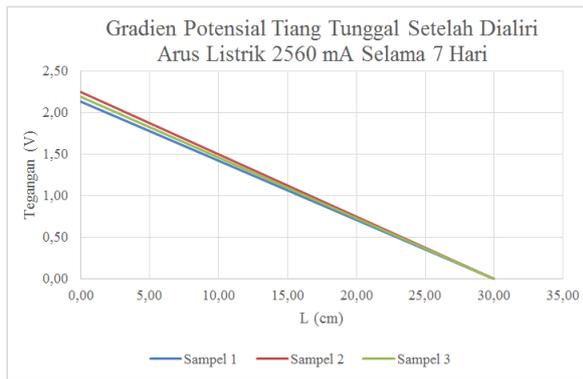
Dari Gambar 9 diatas, dapat dilihat bahwa pada tiang tunggal yang dialiri kuat arus 320 mA pada percobaan 15 hari, 1 V/m dicapai

pada waktu 84 jam. Sedangkan untuk 21, 28, dan 35 hari secara berurutan memerlukan waktu 0 jam, 0 jam, dan 60 jam untuk mencapai 1 V/m. Dan dari Gambar 10, dapat dilihat bahwa pada tiang yang dialiri arus selama 7 hari, pada percobaan 320 mA tidak tercapai 1 V/m. Sedangkan untuk kuat arus 640 mA, 1280 mA, dan 2560 mA sama-sama memerlukan waktu 0 jam untuk mencapai 1 V/m.

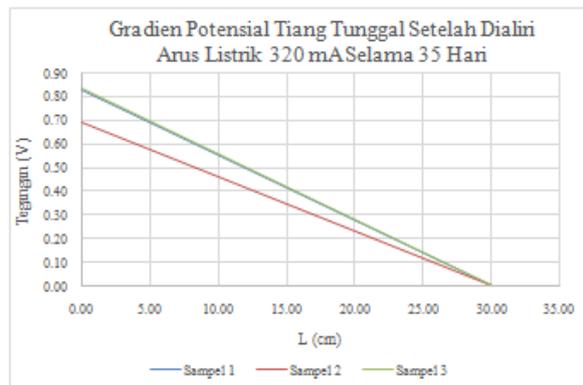
Pada saat gradien potensial mencapai 1 V/m maka mulai terjadilah proses elektroosmosis. Semakin besar kuat arus yang diberikan semakin cepat pula benda uji mencapai 1 V/m. Semakin cepat benda uji mencapai 1 V/m, semakin lama pula proses elektroosmosis terjadi. Dengan kata lain air yang dialirkan pada kuat arus listrik yang lebih besar akan lebih banyak. Pada penelitian ini jarak antar elektroda adalah 30 cm maka proses elektroosmosis akan mulai terjadi ketika hasil pembacaan tegangan listrik pada tiang adalah $\leq 0,3$ volt.

Menurut Mitchell (1993) kecepatan aliran elektroosmotik dipengaruhi oleh dua parameter yaitu koefisien permeabilitas, k_e ($m^2/V-s$) dan gradien potensial listrik, i_e (V/m). Gradien potensial sendiri dipengaruhi oleh besarnya tegangan listrik yang terjadi. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar arus yang diberikan semakin besar pula tegangan listrik yang terjadi sehingga semakin cepat pula terjadi aliran elektroosmotik. Semakin besar tegangan yang dihasilkan dan semakin cepatnya mencapai 1 V/m, semakin besar pula daya dukung yang dihasilkan.

Dari pengukuran tegangan listrik dapat dihitung gradient potensial listrik setiap sampel. Dari hasil analisa didapatkan bahwa semakin lama perlakuan elektrokinetik semakin naik pula gradient potensial listriknya. Naiknya gradient potensial menyebabkan naiknya kecepatan aliran sehingga berdampak signifikan pada daya dukung. Gradien potensial tiang tunggal dengan waktu tunggu 7 hari kuat arus 2560 mA dan waktu tunggu 35 hari kuat arus 320 mA disajikan pada Gambar 11 dan 12 di bawah ini.



Gambar 11. Gradien potensial setelah dialiri kuat arus 2560 mA selama 7 hari



Gambar 12. Gradien potensial setelah dialiri kuat arus 320 mA selama 35 hari

Gradien potensial listrik i_e (V/m) berperan dalam Bergeraknya air pori di dalam tanah walaupun tidak seluruhnya gradien potensial listrik digunakan oleh kedua elektroda tetapi sebagian besar gradien telah dipindahkan dengan efektif ke tanah (Lefebvre dan Burnote, 2002). Dari hasil keseluruhan grafik gradien baik perlakuan dengan variasi waktu maupun variasi kuat arus dapat diambil kesimpulan bahwa nilai gradien potensial listrik meningkat signifikan pada pengujian dengan variasi arus yang lebih besar, artinya semakin besar kuat arus yang diberikan nilai gradien potensial listrik akan semakin tinggi. Pada pengujian elektrokinetik dengan perlakuan variasi waktu, nilai gradien potensial juga mengalami peningkatan mengikuti waktu tunggu yang diuji, namun nilai gradien potensial tersebut tidak lebih besar dari perlakuan elektrokinetik dengan variasi arus. Hal ini sekali lagi membuktikan bahwa kelebihan pemberian arus yang besar menunjukkan efektivitas yang lebih baik.

pH Tanah

Pada saat kedua kutub anoda dan katoda ditanam dan diberi beda potensial, maka akan terjadi proses elektrolisis. Reaksi-reaksi

elektrolisis yang terjadi dibawah pengaruh medan listrik akan menghasilkan produk-produk elektrolisis dan reaksi-reaksi pengendalian elektrolisis pada elektroda, dimana reaksi oksidasi akan terjadi di anoda sedangkan di katoda akan terjadi reaksi reduksi. Reaksi oksidasi akan menghasilkan hidrogen yang menyebabkan sifat asam, sementara reaksi reduksi di katoda menghasilkan hidroksil yang meningkatkan pH atau menyebabkan sifat basa.

Hasil pengukuran pH tanah pada anoda dan katoda untuk masing-masing sampel disajikan pada tabel dibawah ini :

Sampel	pH Tanah Sebelum Perlakuan Elektrokinetik	pH Tanah Sesudah Perlakuan Elektrokinetik			
		7 hari dengan kuat arus 2560 mA		35 hari dengan kuat arus 320 mA	
		Anoda	Katoda	Anoda	Katoda
Sampel 1	6,11	3,64	4,22	3,87	5,06
Sampel 2	5,83	3,41	4,79	3,38	4,53
Sampel 3	5,74	3,80	4,16	3,31	4,47

Tabel 4. Hasil pengujian pH tanah pada tiang tunggal sebelum dan sesudah perlakuan elektrokinetik

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa perlakuan elektrokinetik mempengaruhi pH tanah baik di anoda maupun di katoda. Setelah perlakuan elektrokinetik, pH tanah masing-masing sampel pada anoda mengalami penurunan menjadi 3,64; 3,41; dan 3,80 untuk waktu perlakuan selama 7 hari dengan kuat arus 2560 mA, sementara untuk waktu perlakuan selama 35 hari dengan kuat arus 320 mA masing-masing sampel turun menjadi 3,87; 3,38; dan 3,31. Dan pH tanah masing-masing sampel pada katoda menjadi 4,22; 4,79; dan 4,16 untuk waktu perlakuan selama 7 hari dengan kuat arus 2560 mA, sementara untuk waktu perlakuan selama 35 hari dengan kuat arus 320 mA masing-masing sampel turun menjadi 5,06; 4,53; dan 4,47. Penurunan pH tanah ini disebabkan oleh proses-proses yang terjadi selama proses elektrokinetik. Perubahan nilai pH pada sekitaran anoda dan katoda menunjukkan adanya perpindahan ion di dalam tanah. Sesuai dengan persamaan reaksi elektrolisis, nilai pH akan turun pada sekitaran anoda akibat berubahnya senyawa air menjadi oksigen dan kation (H^+). Sementara pH di sekitar katoda seharusnya mengalami kenaikan karena senyawa air yang berubah menjadi anion (OH^-). Menurut Probstein dan Hick (1993) dan juga Azzam dan Oey (2001), variasi dari nilai pH di dalam tanah menyebabkan beberapa pengaruh diantaranya sifat-sifat permukaan partikel tanah seperti kapasitas tukar kation (CEC), besaran elektrokinetik, zeta potensial dan tingkat

penyerapan spesies. Hal ini memberikan kontribusi pada penguatan mekanis tanah, salah satunya yaitu peningkatan daya dukung tanah.

Permeabilitas Tanah

Pada tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik dengan kuat arus 2560 mA dilakukan pengujian permeabilitas tanah sebelum dan sesudah perlakuan elektrokinetik. Sampel pengujian diambil pada tiang tunggal untuk waktu tunggu selama 7 hari pada kedalaman 1-4 m. Adapun hasil pengujian permeabilitas tanah disajikan pada Tabel dibawah ini :

Permeabilitas Tanah Sebelum Perlakuan Elektrokinetik (Cm/detik) (2,5-3 M)	Permeabilitas Tanah Sesudah Perlakuan Elektrokinetik (Cm/detik)		Kedalaman Tanah (M)
	Anoda	Katoda	
7.87E-07	5.21E-06	5.21E-06	0,5 - 1
	1.01E-05	1.01E-05	1,5 - 2
	1.67E-07	1.67E-07	2,5 - 3
	3.87E-07	3.87E-07	3,5 - 4

Tabel 5. Hasil pengujian permeabilitas tanah pada tiang tunggal untuk waktu tunggu 7 hari dengan kuat arus 2560 mA

Dari data Tabel 5 dapat dilihat bahwa dengan perlakuan elektrokinetik dengan kuat arus 2560 mA sangat berpengaruh pada nilai permeabilitas tanah pada anoda, hal ini disebabkan karena proses-proses yang terjadi selama proses elektrokinetik. Setelah perlakuan elektrokinetik, koefisien permeabilitas tanah pada anoda menjadi semakin kecil daripada keadaan awal. Hal ini menunjukkan bahwa kepadatan tanah meningkat sehingga makin rendah koefisien permeabilitasnya dan mengakibatkan kemampuan air untuk mengalir pada pori dalam tanah semakin lambat.

Penampakan Visual Anoda dan Katoda

Tiang tunggal dengan perlakuan elektrokinetik setelah dilakukan uji pembebanan (*loading test*) kemudian dicabut dari tempatnya. Selama proses pencabutan tiang dilakukan pengamatan pada sepanjang tiang tunggal (anoda) dan baja tulangan (katoda). Dapat dilihat pada Gambar 4.1 dibawah ini, bahwa tiang tunggal (anoda) setelah perlakuan elektrokinetik terdapat gumpalan tanah yang melekat dan cenderung lebih kering yang diakibatkan oleh sementasi dan koagulasi pada tanah akibat fenomena elektrokinetik.

Sementara pada baja tulangan (katoda) ketika dicabut tampak berair/ lebih basah seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 dibawah ini. Hal ini terjadi akibat perpindahan air dari anoda

menuju katoda sehingga kadar air pada katoda (baja tulangan) lebih tinggi.

Dari proses kimia yang dibahas pada bagian 4.4.2 di atas, dapat dilihat bahwa proses elektrokinetik (saat diberi arus listrik searah (DC)), air pada anoda akan berubah menjadi gas oksigen dan kation (H^+). Gas oksigen ini akan bersenyawa dengan logam kutub positif dan menyebabkan karat pada tiang tunggal (anoda). Hal ini dilihat perbedaannya antara Gambar 4.3 dan Gambar 4.4, dimana tiang tunggal yang berlaku sebagai anoda tampak berkarat setelah perlakuan elektrokinetik.



Gambar 14. Penampakan visual tanah pada anoda dan katoda



Gambar 15. Penampakan visual anoda setelah perlakuan elektrokinetik



Gambar 16. Penampakan visual anoda sebelum perlakuan elektrokinetik

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil pengujian di lapangan dan analisa data yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil *loading test* daya dukung tiang tunggal (Q_u) tanpa perlakuan maupun dengan perlakuan elektrokinetik sama-sama menunjukkan peningkatan daya dukung untuk waktu tunggu yang lebih lama.
2. Hasil *loading test* setelah perlakuan elektrokinetik dengan kondisi waktu tunggu tetap dan variasi kuat arus menunjukkan bahwa peningkatan daya dukung (Q_u) berbanding lurus terhadap besarnya kuat arus yang diberikan.
3. Untuk perlakuan dengan kondisi arus tetap dan variasi waktu tunggu menunjukkan peningkatan daya dukung (Q_u) yang berbanding lurus terhadap lamanya waktu tunggu perlakuan elektrokinetik.
4. Kelebihan perlakuan elektrokinetik dengan kondisi arus yang tinggi dan waktu tunggu yang singkat adalah lebih efektif dibandingkan dengan kondisi pemberian arus yang rendah dan waktu tunggu yang lebih lama dibuktikan dengan peningkatan daya dukung sebesar 90,3 % dengan waktu perlakuan selama 7 hari.
5. Semakin besar arus yang diberikan semakin besar pula tegangan listrik yang terjadi sehingga semakin cepat pula terjadi aliran elektroosmotik.
6. Dari hasil pengujian sampel tanah sebelum perlakuan dan sesudah perlakuan elektrokinetik menunjukkan bahwa parameter-parameter daya dukung tanah mengalami perubahan, antara lain:
 - a. Untuk hasil pengujian pH tanah, pH tanah pada anoda lebih kecil daripada tanah di katoda dan tanah sebelum perlakuan elektrokinetik.
 - b. Untuk hasil pengujian permeabilitas tanah, permeabilitas tanah pada daerah anoda lebih kecil daripada tanah sebelum perlakuan elektrokinetik.
 - c. Secara visual dapat dilihat saat tiang pancang dicabut, sepanjang sisi tiang ada gumpalan tanah yang melekat dan cenderung lebih kering. Penggumpalan ini diakibatkan oleh sementasi dan koagulasi pada tanah akibat fenomena elektrokinetik.

Sementara pada baja tulangan yang berlaku sebagai katoda tampak memiliki kondisi lebih basah setelah dilakukan perlakuan elektrokinetik. Hal ini disebabkan oleh perpindahan air dari anoda menuju katoda, sehingga kadar air disekitar katoda lebih tinggi. Serta akibat proses elektrolisis yang terjadi dapat dilihat pada tiang baja (anoda) berkarat setelah perlakuan elektrokinetik.

Saran

1. Dapat dilakukan kajian dan penelitian lanjutan untuk skala pemodelan dengan variabel kuat arus yang lebih tinggi (≥ 2560 mA) dan variabel waktu tunggu antara 7 hari sampai 15 hari untuk mendapatkan pengaruh terhadap daya dukung tiang tunggal pada perlakuan elektrokinetik yang lebih efektif dan efisien.
2. Dapat dilakukan kajian dan penelitian lanjutan tentang variasi jarak antar elektroda untuk mendapatkan pengaruh terhadap daya dukung tiang tunggal pada perlakuan elektrokinetik yang lebih efektif.
3. Dapat dilakukan kajian dan penelitian lanjutan tentang jumlah dan konfigurasi elektroda untuk mendapatkan pengaruh terhadap daya dukung tiang tunggal pada perlakuan elektrokinetik yang lebih efektif.
4. Dapat dilakukan kajian dan penelitian lanjutan untuk dimensi tiang tunggal yang lebih besar untuk mendapatkan pengaruh terhadap daya dukung tiang tunggal pada perlakuan elektrokinetik.
5. Dapat dilakukan kajian dan penelitian tentang ukuran dan panjang kabel yang digunakan pada proses elektrokinetik ini.

Daftar Pustaka

- Agustina. 2013. *Analisa Kombinasi Pre-loading Mekanis dan Elektrokinetis Terhadap Pemampatan Tanah Lunak Pontianak*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Azzam dan Oey. 2001. *The Utilization of Electrokinetics in Geotechnical and Environmental Engineering*.
- Azami, Fikri Irfanil. 2017. *Kajian Efisiensi Kelompok Tiang Dengan Konfigurasi 3x3*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.

- Das, Braja M. 1998. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa geoteknis) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Das, Braja M. 1998. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa geoteknis) Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Dika. 2009. *Elektrorestorasi Tanah Lunak Pontianak yang Terkontaminasi Logam Berat*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Firmansyah. 2018. *Studi Peningkatan Daya Dukung Tiang Pancang dengan Perlakuan Elektrokinetik*. Tesis. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Hardiyatmo, Hary Christandy. 2002. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta : Gadjah Mada University Press.
- Hausmann, Manfred R. 1990. *Engineering Principles of Ground Modification*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Hurul 'Ain Alydry. 2011. *Konsolidasi Tanah Lunak Pontianak Dengan Pengaruh Gejala Elektroosmosis*. Skripsi. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Lim, Aswin. 2014. *Evaluasi Formula Penentuan Daya Dukung Aksial Tiang Pancang Tunggal Menggunakan Data CPT Berdasarkan Metode Langsung (Direct Method)*. Lembaga Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat Universitas Katolik Parahyangan.
- Rahardjo, Paulus P. 2013. *Manual Pondasi Tiang Edisi 4*. Bandung : Universitas Katolik Parahyangan.
- Rustamaji, R.M. 2007. *Ground Improvement using Electro-Chemical Injection, Mitteilungen zur Ingeniurgeologie und Hydrogeologie, Lehrstuhl für Ingeniurgeologie und Hydrogeologie RWTH-Aachen, Druck und verlag Maintz. Aachen – Germany*.
- Reny Afriani. 2009. *Stabilisasi Tanah Lunak secara Elektrokinetik*. Skripsi. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Sardjono, H.S. 1984. *Pondasi Tiang Pancang Jilid 1*. Surabaya : Sinar Wijaya.
- Sepriawan, Muhar. 2012. *Studi Pemampatan Tanah Lunak Pontianak dengan pengaruh Gejala Elektroosmosis*. Pontianak : Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Tika Elfhira. 2014. *Mekanisme Aliran Elektroosmosis Pada Tanah Lunak Pontianak di Bawah Pengaruh Medan Listrik*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Tim Pusat Litbang Prasarana Transportasi Bandung. 2002. *Panduan Geoteknik 1 Proses Pembentukan dan Sifat-sifat Dasar Tanah Lunak Edisi Pertama*. Lembaga : Bandung.
- Tjandra, Daniel dan Paravita Sri Wulandari. 2006. *Pengaruh Elektrokinetik Terhadap Peningkatan Daya Dukung Pondasi Tiang di Lempung Mariana*. Dimensi Teknik Sipil. Vol. 8.
- Wirdayanti, Ni Nengah. 2010. *Studi Eksperimental Elektromediasi Kontaminasi Logam Berat Pada Tanah*. Tesis. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.
- Yunata, Vivi Aurora. 2009. *Elektrorestorasi Tanah Lempung Capkala yang Terkontaminasi oleh Logam Berat*. Skripsi. Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura.