



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**ANALISIS PENGARUH GROUTING TERHADAP
PENGENDALIAN REMBESAN WADUK CENGLIK DI
KABUPATEN BOYOLALI, JAWA TENGAH**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**MUHAMMAD AL-MUHAIMIN
21100112120013**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK GEOLOGI**

**SEMARANG
DESEMBER 2017**

**HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS PENGARUH GROUTING TERHADAP PENGENDALIAN
REMBESAN WADUK CENGLIK DI KABUPATEN BOYOLALI,
JAWA TENGAH**

Disusun Oleh :

Muhammad Al-Muhaimin

21100112120013

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat

Kurikulum Program S-1 Departemen Teknik Geologi

Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Telah dipertahankan di depan penguji

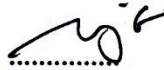
Hari / Tanggal : Rabu, 6 Desember 2017

Penguji I : Ir. Henarno Pudjihardjo, M.T
NIP. 19530203 198312 1 001

Penguji II : Reddy Setyawan, S.T., M.T
NIK. 198810230214011224

Penguji III : Najib, S.T., M.Eng., Ph.D
NIP. 19771020 200501 1 001

Penguji IV : Jenian Marin, ST., M. Eng.
NIK. 19871014 021401 2 223



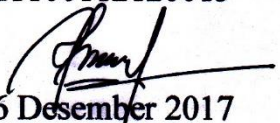
Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Geologi



Najib, S.T., M.Eng., Ph.D
NIP. 19771020 200501 1 00

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tugas Akhir / Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

NAMA : MUHAMMAD AL-MUHAIMIN
NIM : 21100112120013
Tanda Tangan : 
Tanggal : 6 Desember 2017

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Al-Muhaimin
NIM : 21100112120013
Departemen : Teknik Geologi
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tugas Akhir / Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

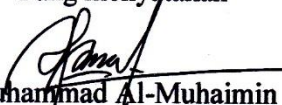
Analisis Pengaruh Grouting Terhadap Pengendalian Rembesan Waduk Cengklik Di Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah

Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 6 Desember 2017

Yang menyatakan


Muhammad Al-Muhaimin
NIM. 21100112120013

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga Penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul Analisis Pengaruh *Grouting* Terhadap Pengendalian Rembesan Waduk Cengklik Di Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah. Laporan Tugas Akhir ini penulis kerjakan untuk memenuhi syarat kurikulum program S1 Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

Bendungan di Indonesia rata-rata telah mencapai usia yang mengharuskan untuk dilakukannya peremajaan. Kebanyakan bendungan mengalami kerusakan dan kegagalan fisik sehingga mengganggu fungsi bendungan dan berpotensi terjadinya keruntuhan tubuh bendungan. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai pengaplikasian metode *grouting* pada bendungan Cengklik untuk mencegah pelebaran retakan dan mencegah terjadinya keruntuhan tubuh bendungan.

Akhirnya Penulis berharap semoga penelitian ini berguna bagi Penulis pribadi dan bagi *civitas academica* secara umum.

Semarang, 24 November 2017

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur kepada Allah Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan kebesaran-Nya yang tidak pernah putus diberikan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul Analisis Pengaruh *Grouting* Terhadap Pengendalian Rembesan Waduk Cengklik Di Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah.

Dalam pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah Subhanahu wa Ta'ala yang telah memudahkan hamba-Nya untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Ibuku tersayang yang selalu memberikan kasih sayangnya tiada henti dan dukungan moril serta materil.
3. Kakak-kakaku tersayang yang telah dan selalu memberi dukungan moril dan materil.
4. Ir. Henarno Pudjihadjo, M.T selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir yang telah memberikan bimbingan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Reddy Setyawan, S.T., M.T selaku dosen pembimbing II Tugas Akhir yang memberikan bimbingan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Ir. Wahyu Krisna Hidayat, M.T selaku dosen wali yang telah membantu dalam banyak hal dari awal kuliah hingga saat ini.
7. Keluarga besar HMTG "MAGMADIPA" yang sangat penulis cintai dan banggakan.
8. Keluarga kecilku Teknik Geologi angkatan 2012 atas setiap waktu yang sudah dihabiskan bersama-sama selama masa perkuliahan baik di lapangan maupun di kampus.
9. PT. Selimut Bumi Adhi Cipta yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan tugas akhir dan membimbing dalam pelaksanaannya.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu dalam penyelesaian laporan ini.

Semarang, 24 November 2017

Penulis

HALAMAN PERSEMBAHAN

“TIDAKLAH AKU CIPTAKAN JIN DAN MANUSIA KECUALI UNTUK BERIBADAH KEPADAKU (ALLAH)”

(QS. ADZ-DZARIYAT : 56)

“DAN KAMI PERINTAHKAN KEPADA MANUSIA AGAR BERBUAT BAIK KEPADA ORANG TUANYA, IBUNYA TELAH MENGANDUNGNYA DALAM KEADAAN LEMAH DAN MENYAPIHNYA DALAM DUA TAHUN, BERSYUKURLAH KALIAN KEPADAKU DAN KEPADA KEDUA ORANG TUAMU. HANYA KEPADAKULAH KALIAN KEMBALI”

(QS. LUKMAN : 14)

“DAN RABBMU TELAH MEMERINTAHKAN AGAR KAMU JANGAN BERIBADAH MELAINKAN HANYA KEPADANYA DAN HENDAKLAH BERBUAT BAIK KEPADA IBU BAPAK. JIKA SALAH SEORANG DIANTARA KEDUANYA ATAU KEDUANYA SAMPAI BERUSIA LANJUT DALAM PEMELIHARAANMU, MAKA JANGAN SEKALI KALI KAMU MENGATAKAN KEPADA KEDUANYA PERKATAAN “AH” DAN JANGANLAH ENGKAU MEMBENTAK KEDUANYA, DAN UCAPKANLAH KEPADA KEDUANYA PERKATAAN YANG BAIK. DAN RENDAHKANLAH DIRIMU KEPADA KEDUANYA DENGAN PENUH KASIH SAYANG DAN UCAPKANLAH, “YA RABBKU, SAYANGILAH KEDUANYA SEBAGAIMANA MEREKA BERDUA TELAH MENDIDIK AKU PADA WAKTU KECIL”

(QS. AL-ISRA : 23-24)

“MAKA NIKMAT TUHANMU YANG MANAKAH YANG ENGKAU DUSTAKAN”

(QS. AR-RAHMAN)

ABSTRAK

Bendungan di Indonesia rata-rata mempunyai nilai resiko kerusakan 40 yang masuk ke dalam resiko kerusakan menengah. Waduk Cengklik memiliki nilai resiko kerusakan 48 yang masuk ke dalam klasifikasi bendungan dengan resiko kerusakan tinggi. Kerusakan fisik yang terjadi pada tubuh bendungan berupa retakan di puncak bendungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *grouting* yang digunakan untuk mengendalikan debit rembesan dan meningkatkan faktor keamanan *piping* yang terjadi pada tubuh bendungan. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah geolistrik, pemboran inti, *packer test* dan analisis laboratorium. Penyelidikan geolistrik dilakukan dengan mengukur resistivitas batuan di 22 titik dengan prinsip *Vertical Electrical Sounding* (VES) konfigurasi schlumberger. Pemboran inti dilakukan pada tubuh bendungan sebelum *grouting* 6 titik dan setelah *grouting* 10 titik. *Packer test* dilakukan dua tahap bersamaan dengan pemboran ini. Fungsinya untuk mengetahui permeabilitas batuan sebelum dan setelah *grouting*. Analisis laboratorium merupakan kegiatan menganalisa hasil data lapangan dan memodelkannya dengan *software* Slide 6.0 untuk mengetahui debit rembesan sebelum dan setelah *grouting*. Dari hasil pemboran inti dan penyelidikan geolistrik didapatkan jenis tanah/batuan di daerah penelitian berupa lempung, pasir lempungan, lempung pasiran, pasir, breksi, *gravel* dan batupasir. Dari hasil analisis *software* Slide 6.0 debit rembesan total lapisan pondasi 1 sebelum *grouting* 6,938 liter/detik dan setelah *grouting* menjadi 0,001619 liter/detik. Debit rembesan total lapisan pondasi 2 sebelum *grouting* 4,68 liter/detik dan setelah *grouting* menjadi 0,000468 liter/detik. Nilai faktor keamanan *piping* sebelum *grouting* pada STA 1 awalnya $3 < 4$ (tidak aman) kemudian setelah *grouting* menjadi $4,24 > 4$ (aman). Pada STA 2 nilai FK *piping* sebelum *grouting* $5,14 > 4$ (aman) menjadi $6,44 > 4$ (aman). Pada STA 3 nilai FK *piping* sebelum *grouting* $7,7 < 4$ (aman) dan setelah *grouting* menjadi $10,05 > 4$ (aman).

Kata kunci: Waduk Cengklik, rembesan, FK *piping*, geolistrik, pemboran inti

ABSTRACT

On the average, Indonesia's dam has moderate risk of damage category which is 40 risk value. The risk value of damage on Cengklik Dam is 48 and it includes as high risk dam. Usually, physically damage to main dam is cracking on the peak of dam. The aim of this research are to investigate grouting effect which is used to control seepage debit and to increase the safety factor on main dam. The method used in this project are geoelectrical resistivity survey, core drilling, packer test and laboratory analysis. The geoelectrical resistivity survey purpose is to measure the resitivity of rock with Vertical Electrical Sounding (VES) principle and schlumberger configuration method on 22 spot. There are 6 spots of core drilling at main dam is done before the grouting and after grouting there are 10 spots of core drilling. Packer test is done with 2 phase together with core drilling. The aim of Packer test is to check the permeability before and after grouting. Laboratorium test used to analysis field data result and modelling it with software Slide 6.0 to know seepage debit before and after grouting. The result of core drilling and geoelectrical resistivity investigation : soil/rock in research area consist of clay, clayey sand, sandy clay, sand, breccia, gravel and sandstone. Software Slide 6.0 analysis result are seepage debit total on foundation of layer 1 before grouting is 6,938 liter/second, and after grouting is 0,001619 l/s. Seepage debit total on foundation of layer 2 before grouting is 4,68 liter/second, and after grouting is 0,000468 l/s. Safety factor of piping before grouting on STA 1 is $3 < 4$ (not safe) and after grouting is $4,24 > 4$ (safe). On STA 2, safety factors of piping before grouting $5,14 > 4$ (safe) after grouting is $6,44 > 4$ (safe). On STA 3, safety factors of piping before grouting $7,74 > 4$ (safe) after grouting is $6,71 > 10,05$ (safe).

Keywords: *Cengklik dam, seepage, SF of piping, geoelectrical resistivity survey, core drilling*

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN JUDUL..... | i |
| HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI TUGAS AKHIR | ii |
| HALAMAN ORISINALITAS | iii |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI..... | iv |
| KATA PENGANTAR | v |
| UCAPAN TERIMA KASIH..... | vi |
| HALAMAN PERSEMBAHAN | vii |
| ABSTRAK | viii |
| DAFTAR ISI..... | x |
| DAFTAR GAMBAR | xii |
| DAFTAR TABEL..... | xiv |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xv |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Maksud dan Tujuan | 2 |
| 1.2.1 Maksud | 2 |
| 1.2.2 Tujuan | 2 |
| 1.3 Rumusan dan Batasan Masalah | 2 |
| 1.3.1 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3.2 Batasan Masalah | 3 |
| 1.4 Lokasi dan Kesampaian Daerah Penelitian | 3 |
| 1.5 Peneliti Terdahulu | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | |
| 2.1 Geologi Regional Daerah Penelitian | 5 |
| 2.1.1 Fisiografi Jawa Tengah | 5 |
| 2.1.2 Stratigrafi Regional Kabupaten Boyolali | 7 |
| 2.2 Pengertian Waduk dan Bendungan | 10 |
| 2.2.1 Pengertian Umum | 10 |
| 2.2.2 Pembagian Tipe Bendungan | 11 |
| 2.3 Pengertian Tanah | 14 |
| 2.4 <i>Grouting</i> | 18 |
| 2.5 Rembesan Pada Tanah/Batuan | 19 |
| 2.5.1 Gradien Hidrolik | 22 |
| 2.5.2 Hukum Darcy | 23 |
| 2.5.3 Teori Kondisi Mengapung (<i>Quick-Condition</i>) | 23 |
| 2.5.4 Keamanan Bendungan Terhadap Bahaya <i>Piping</i> | 24 |
| 2.6 Geolistrik | 25 |
| BAB III METODE PENELITIAN | |
| 3.1 Metodologi Penelitian | 28 |
| 3.2 Tahapan Penelitian | 28 |
| 3.2.1 Tahapan Pendahuluan | 28 |
| 3.2.2 Tahapan Pengumpulan Data | 29 |
| 3.2.3 Tahapan Pengolahan Data | 30 |
| 3.3 Hipotesis Penelitian | 31 |
| 3.4 Diagram Alir Penelitian | 32 |

| | |
|-----------------------------|---|
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | |
| 4.1 | Litologi Daerah Penelitian 33 |
| 4.2 | Analisis Rembesan 60 |
| 4.2.1 | Analisis Rembesan Bagian Sebelah Barat Luar Tubuh Bendungan 60 |
| 4.2.2 | Analisis Rembesan Tubuh Bendungan 73 |
| 4.2.3 | Penanggulangan Rembesan Tubuh Bendungan 79 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | |
| 5.1 | Kesimpulan..... 83 |
| 5.2 | Saran 83 |
| DAFTAR PUSTAKA | |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 1.1 | Peta lokasi penelitian | 3 |
| Gambar 1.2 | Diagram tulang ikan penelitian | 4 |
| Gambar 2.1 | Fisiografi regional daerah penelitian (van Bemmelen, 1949 dengan modifikasi) | 6 |
| Gambar 2.2 | Peta zonasi Kabupaten Boyolali berdasarkan elevasi ketinggian (Nizar, 2012) | 7 |
| Gambar 2.3 | Geologi regional daerah penelitian (Thanden dkk, 1996; Sukardi dan Budhitisna, 1992; Surono dkk, 1992; dan Rahardjo dkk, 1995 dengan modifikasi) | 9 |
| Gambar 2.4 | Stratigrafi regional daerah penelitian (Thanden dkk, 1996; Sukardi dan Budhitisna, 1992; Surono dkk, 1992; dan Rahardjo dkk, 1995 dengan modifikasi) | 10 |
| Gambar 2.5 | Segitiga tekstural USDA (USDA, 1987) | 15 |
| Gambar 2.6 | Katup <i>Manchette</i> (Ortigao dan Sayao, 2004) | 18 |
| Gambar 2.7 | Metode uji permeabilitas <i>constant head</i> (Syaeful dan Sucipta, 2013) | 20 |
| Gambar 2.8 | Metode uji permeabilitas <i>pecker test</i> (Syaeful dan Sucipta, 2013) | 21 |
| Gambar 2.9 | Aliran rembesan dalam tanah | 23 |
| Gambar 2.10 | Aliran arus listrik apabila menggunakan satu elektroda A sebagai sumber arus (a), aliran arus listrik oleh sepasang elektroda sumber AB dan penerima MN (b) (Burval Working Group, 2006) | 25 |
| Gambar 2.11 | Konfigurasi elektroda yang umum digunakan (Milsom, 2003) | 26 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir penelitian | 32 |
| Gambar 4.1 | Peta geoteknik daerah penelitian | 33 |
| Gambar 4.2 | Model lapisan batuan pada titik GL 1 | 39 |
| Gambar 4.3 | Model lapisan batuan pada titik GL 2 | 40 |
| Gambar 4.4 | Model lapisan batuan pada titik GL 3 | 41 |
| Gambar 4.5 | Model lapisan batuan pada titik GL 4 | 42 |
| Gambar 4.6 | Model lapisan batuan pada titik GL 5 | 43 |
| Gambar 4.7 | Model lapisan batuan pada titik GL 6 | 44 |
| Gambar 4.8 | Model lapisan batuan pada titik GL 7 | 45 |
| Gambar 4.9 | Model lapisan batuan pada titik GL 8 | 46 |
| Gambar 4.10 | Model lapisan batuan pada titik GL 9 | 47 |
| Gambar 4.11 | Model lapisan batuan pada titik GL 10 | 48 |
| Gambar 4.12 | Model lapisan batuan pada titik GL 11 | 49 |
| Gambar 4.13 | Model lapisan batuan pada titik GL 12 | 50 |
| Gambar 4.14 | Model lapisan batuan pada titik GL 13 | 51 |
| Gambar 4.15 | Model lapisan batuan pada titik GL 14 | 52 |
| Gambar 4.16 | Model lapisan batuan pada titik GL 15 | 53 |
| Gambar 4.17 | Model lapisan batuan pada titik GL 16 | 54 |
| Gambar 4.18 | Model lapisan batuan pada titik GL 17 | 55 |
| Gambar 4.19 | Model lapisan batuan pada titik GL 18 | 56 |
| Gambar 4.20 | Model lapisan batuan pada titik GL 19 | 57 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.21 | Model lapisan batuan pada titik GL 20 | 58 |
| Gambar 4.22 | Model lapisan batuan pada titik GL 21 | 59 |
| Gambar 4.23 | Model lapisan batuan pada titik GL 22 | 60 |
| Gambar 4.24 | Peta persebaran titik geolistrik | 62 |
| Gambar 4.25 | Penampang geolistrik sayatan A-A' | 64 |
| Gambar 4.26 | Penampang geolistrik sayatan B-B' | 66 |
| Gambar 4.27 | Penampang geolistrik sayatan C-C' | 68 |
| Gambar 4.28 | Peta <i>iso-resistivity</i> kedalaman 5 meter | 69 |
| Gambar 4.29 | Penampang Geolistrik 3D sayatan A-A', B-B' dan C-C' | 70 |
| Gambar 4.30 | Peta lokasi pemboran coring dan lokasi sayatan bendungan | 74 |
| Gambar 4.31 | Permodelan kurva dan debit rembesan | 75 |
| Gambar 4.32 | Permodelan rembesan STA 1 | 76 |
| Gambar 4.33 | Permodelan rembesan STA 2 | 76 |
| Gambar 4.34 | Permodelan rembesan STA 3 | 77 |
| Gambar 4.35 | Permodelan rembesan STA 1 setelah <i>grouting</i> | 80 |
| Gambar 4.36 | Permodelan rembesan STA 2 setelah <i>grouting</i> | 80 |
| Gambar 4.37 | Permodelan rembesan STA 3 setelah <i>grouting</i> | 81 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 1.1 | Peneliti terdahulu | 4 |
| Tabel 2.1 | Tipe-tipe bendungan urugan (Sosrodarsono dan Takeda, 2002) | 13 |
| Tabel 2.2 | Klasifikasi tanah AASHTO (Hardiyatmo, 2002) | 16 |
| Tabel 2.3 | Klasifikasi tanah USCS (Hardiyatmo, 2002) | 17 |
| Tabel 2.4 | Derajat permeabilitas menurut Task, 1950 (dalam Soedibyo, 1993) | 22 |
| Tabel 2.5 | Nilai resistivitas batuan menurut Nwakwo dkk (2013) | 27 |
| Tabel 2.6 | Nilai resistivitas batuan menurut Telford dkk (1976) | 27 |
| Tabel 2.7 | Nilai resistivitas batuan Culley dkk (1975) dan Telford dkk (1976) dalam McNeill (1980) | 27 |
| Tabel 3.1 | Kelengkapan data sekunder penelitian metode geolistrik..... | 29 |
| Tabel 3.2 | Kelengkapan data sekunder penelitian metode pemboran inti (sebelum <i>grouting</i>) dan penentuan nilai SPT | 29 |
| Tabel 3.3 | Kelengkapan data sekunder penelitian metode uji permeabilitas (sebelum <i>grouting</i>) | 29 |
| Tabel 3.4 | Kelengkapan data sekunder penelitian metode studi literatur | 29 |
| Tabel 3.5 | Kelengkapan data primer penelitian metode pemboran inti (setelah <i>grouting</i>) dan pengukuran nilai SPT | 30 |
| Tabel 3.6 | Kelengkapan data primer penelitian metode uji permabilitas (setelah <i>grouting</i>) | 30 |
| Tabel 4.1 | Deskripsi titik pemboran BH-1 | 34 |
| Tabel 4.2 | Deskripsi titik pemboran BH-2 | 35 |
| Tabel 4.3 | Deskripsi titik pemboran BH-3 | 36 |
| Tabel 4.4 | Deskripsi titik pemboran BH-4 | 36 |
| Tabel 4.5 | Deskripsi titik pemboran BH-5 | 37 |
| Tabel 4.6 | Deskripsi titik pemboran BH-6 | 38 |
| Tabel 4.7 | Nilai koefisien permeabilitas BH-1 | 71 |
| Tabel 4.8 | Nilai koefisien permeabilitas BH-2 | 71 |
| Tabel 4.9 | Nilai koefisien permeabilitas BH-3 | 71 |
| Tabel 4.10 | Nilai koefisien permeabilitas BH-4 | 72 |
| Tabel 4.11 | Nilai koefisien permeabilitas BH-5 | 72 |
| Tabel 4.12 | Nilai koefisien permeabilitas BH-6 | 72 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|------------|---|-----|
| Lampiran-1 | <i>Log bore</i> sebelum <i>grouting</i> | 87 |
| Lampiran-2 | Hasil pengolahan data geolistrik dengan <i>software</i> IP2WIN..... | 94 |
| Lampiran-3 | Uji permeabilitas sebelum <i>grouting</i> | 117 |
| Lampiran-4 | Uji permeabilitas setelah <i>grouting</i> | 139 |
| Lampiran-5 | <i>Index properties</i> | 143 |
| Lampiran-6 | Peta titik <i>grouting</i> | 148 |
| Lampiran-7 | Foto lapangan | 153 |