



DISERTASI

**STUDI LABORATORIUM PERBAIKAN KEKUATAN
CLAY SHALE TERDEGRADASI DENGAN METODE
INJEKSI SEMEN DAN *GEOPOLYMER***

Oleh:
Sumiyanto
NIM. 21010119510011

Diajukan sebagai Bahan Ujian Tertutup
dan sebagai Salah Satu Syarat dalam Memperoleh Gelar Doktor Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG**

MARET 2023

HALAMAN PENGESAHAN



DISERTASI

STUDI LABORATORIUM PERBAIKAN KEKUATAN *CLAY* *SHALE* TERDEGRADASI DENGAN METODE INJEKSI SEMEN DAN *GEOPOLYMER*

Oleh:
Sumiyanto
NIM. 21010119510011

Diajukan sebagai Bahan Ujian Tertutup
dan sebagai Salah Satu Syarat Dalam Memperoleh Gelar Doktor Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Diponegoro

Semarang, Maret 2023

Mahasiswa,

Sumiyanto

NIM. 21010119510011

Menyetujui,

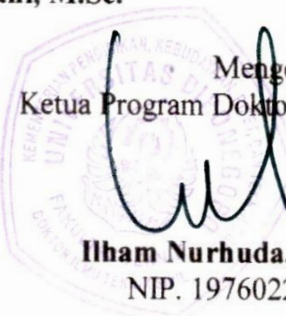
Promotor

Ko-Promotor

**Prof. Dr. Ir. Sri Prabandiyani Retno
Wardani, M.Sc.**

Prof. Agus Setyo Muntohar, Ph.D.

Mengetahui,
Ketua Program Doktor Teknik Sipil UNDIP



Ilham Nurhuda, ST., MT., Ph.D

NIP. 19760225200012001

LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI

Disertasi ini telah diperbaiki dan disempurnakan berdasarkan masukan dan koreksi dari Tim Penguji pada saat pelaksanaan Ujian Tertutup/Akhir pada tanggal 17 Maret 2023 di Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.

Semarang, Maret 2023

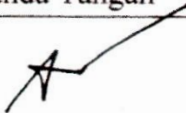
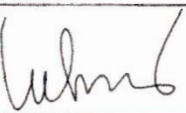
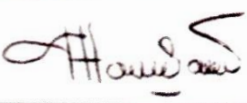

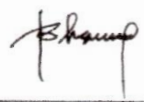


Mahasiswa,



Sumiyanto

NIM. 2101011951001

Disetujui oleh Tim Penguji Ujian Tertutup/Akhir pada tanggal:

No	Nama Penguji	Tanda Tangan
1	Prof. Ir. M. Agung Wibowo, MM., MSc., Ph.D	
2	Ilham Nurhuda, ST., MT., Ph.D.	
3	Prof. Dr. Ir. Sri Prabandiyani Retno Wardani, M.Sc.	
4	Prof. Agus Setyo Muntohar, Ph.D.	
5	Dr. Bagus Hario Setiadji, ST., MT.	
6	Dr. Kresno Wikan Sadono, ST., M.Eng.	
7	Prof. Yusep Muslih Purwana, ST., MT., Ph.D.	

Mengetahui,

Ketua Program Doktor Ilmu Teknik Sipil FT UNDIP


Ilham Nurhuda, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 19760225000121001

SURAT PERNYATAAN
KEASLIAN SEBAGAI KARYA TUNGGAL

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Sumiyanto, dengan ini menyatakan bahwa disertasi yang berjudul "Studi Laboratorium Perbaikan Kekuatan *Clay shale* Terdegradasi dengan Metode Injeksi Semen dan *Geopolymer*", adalah karya saya sendiri, dan belum pernah serta tidak sedang diajukan untuk mendapatkan gelar akademik dimanapun.

Disertasi ini sepenuhnya karya saya, dan setiap informasi yang ditulis dalam naskah disertasi ini yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yaitu mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam disertasi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam disertasi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala risiko.

Semarang, Maret 2023

Yang membuat pernyataan,
Penulis,



Sumiyanto

NIM. 21010119510011

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan kesempatan penulis melanjutkan studi S3 pada Program Doktor Teknik Sipil UNDIP. Naskah disertasi ini disusun dan dipersiapkan untuk ujian kelayakan. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan kekuatan dan kemudahan dalam seminar hasil penelitian maupun pada tahap-tahap selanjutnya.

Naskah disertasi ini berjudul” Studi Laboratorium Stabilisasi *Clay shale* Terdegradasi dengan Metode Injeksi Semen dan *Geopolymer*”. Naskah disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat studi S3 Program Doktor pada Program Studi Ilmu Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Penyusunan naskah disertasi ini mendapatkan dukungan dan bantuan dari berbagai pihak, baik langsung maupun tidak langsung. Penghargaan dan ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

- 1) Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah memberikan dukungan beasiswa BPPDN.
- 2) Prof. Dr. Yos Johan Utama, S.H., M.Hum. selaku Rektor UNDIP yang telah menerima penulis sebagai mahasiswa S3 UNDIP.
- 3) Prof. Dr Suwanto, M.S. selaku Rektor UNSOED yang telah memberikan penugasan studi lanjut.
- 4) Prof. Ir. M. Agung Wibowo, M.M., M.Sc, Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik UNDIP yang telah memberikan dukungan dalam proses studi.
- 5) Dr. Eng. Suroso, ST., M.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik UNSOED yang telah memberikan dorongan dan motivasi dalam studi lanjut.
- 6) Ilham Nurhuda, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Doktor Teknik Sipil UNDIP dan sekaligus sebagai penguji pada seminar hasil penelitian disertasi.
- 7) Prof. Dr. Ir. Sri Prabandiyani Retno Wardani, M.Sc. selaku promotor yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan naskah disertasi.
- 8) Prof. Agus Setyo Muntohar, Ph.D. selaku kopromotor yang selalu memberikan bimbingan dan arahan penelitian dan penyusunan naskah disertasi.
- 9) Prof. Dr. Ir. Suripin, M.Eng. selaku penguji proposal disertasi.
- 10) Dr. Bagus Hario Setiadji, ST., MT. selaku penguji internal.

- 11) Dr. Kresno Wikan Sadono, ST., M.Sc. selaku penguji internal.
- 12) Prof. Yusep Muslih Purwana, ST., MT., Ph.D. selaku penguji eksternal.
- 13) Bapak dan Ibu dosen Program Studi Doktor Teknik Sipil UNDIP yang telah memberikan ilmu untuk dasar penulisan naskah disertasi ini.
- 14) Rekan-rekan sejawat baik sesama mahasiswa pada Program Studi Doktor Teknik Sipil UNDIP yang selalu memberikan dukungan.
- 15) Rekan-rekan sejawat dosen Teknik Sipil UNDIP yang selalu memberikan motivasi dan dukungan.
- 16) Seluruh staf administrasi pada Program Studi Doktor Teknik Sipil UNDIP yang telah memberikan dukungan layanan administrasi.
- 17) Para ketua laboratorium dan seluruh staf pada Laboratorium Geoteknik UMY, Laboratorium Terpadu UNDIP, Laboratorium Mekanika Tanah UNSOED, yang telah membantu pelaksanaan penelitian.
- 18) Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan naskah disertasi ini.

Akhir kata semoga naskah disertasi ini dapat diterima sebagai bahan ujian kelayakan naskah disertasi, dan proses selanjutnya dapat berjalan dengan lancar dan tepat waktu.

Semarang, Maret 2023

Sumiyanto

ABSTRAK

Clay shale merupakan batuan sedimen dengan durabilitas rendah. Pada kondisi terbuka, *clay shale* akan terpapar perubahan cuaca yang berupa siklus kering basah. Kondisi ini menyebabkan terjadinya proses pelapukan sehingga mengakibatkan terjadinya degradasi. *Clay shale* yang terdegradasi perlu dilakukan perbaikan, namun stabilisasi dengan metode *mixing* akan mengalami kesulitan karena keberadaan bangunan maupun pelapukan yang cukup dalam. Injeksi *grouting* merupakan metode yang diusulkan untuk memperbaiki *clay shale* yang telah terdegradasi. Penelitian dilakukan di laboratorium untuk mempelajari efektifitas metode injeksi *grouting* pada *clay shale*, dengan bahan *grouting* yang digunakan adalah pasta semen dan *geopolymer* berbahan dasar *fly ash*. Pengamatan keberhasilan metode injeksi ini dilakukan berdasarkan ukuran kolom *grouting* yang terbentuk dan kuat dukung hasil uji tekan bebas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *geopolymer* lebih cocok digunakan untuk injeksi pada *clay shale*. Injeksi pasta semen tidak berhasil membentuk kolom *grouting* dan kuat dukung *clay shale* tidak mengalami peningkatan yang berarti. Sedangkan injeksi *geopolymer* berhasil membentuk kolom *grouting* dan meningkatkan kuat dukung *clay shale*. Pembentukan kolom *grouting* ini merupakan indikasi bahwa *geopolymer* berhasil menyebar pada pori-pori *clay shale* dan membentuk ikatan antar fragmen. Keberadaan *geopolymer* pada kolom *grouting* ini terkonfirmasi hasil pengamatan mikrostruktur menggunakan SEM. Pada injeksi *geopolymer*, variabel porositas, kadar air, rasio aktivator *fly ash*, tekanan dan durasi injeksi merupakan variabel yang berpengaruh terhadap volume *geopolymer* yang berhasil diinjeksikan. Volume injeksi ini berkorelasi dengan ukuran kolom *grouting* yang terbentuk. Kuat dukung *clay shale* yang diinjeksi *geopolymer* dipengaruhi oleh kondisi awal *clay shale*, ukuran kolom *grouting*, dan rasio aktivator *fly ash*. Berdasarkan kuat dukungnya, injeksi *geopolymer* pada *clay shale* dengan kepadatan 0,85 dan 0,95 MDD optimum pada rasio aktivator *fly ash* kurang lebih 1.

Kata kunci: *clay shale*, stabilisasi, injeksi, semen, *geopolymer*.

ABSTRACT

Clay shale is a sedimentary rock with low durability. In open conditions, *clay shale* will be exposed to changes in the dry-wet cycle weather. This condition causes the *clay shale* to undergo a weathering process which causes degradation in the future. Stabilization by the *mixing* method will be difficult, this is related to the presence of the existing structure and weathering of the *clay shale* which is quite deep. Injection *grouting* is a proposed method for repairing degraded *clay shales*. Laboratory research was conducted to study the effectiveness of the injection *grouting* method on *clay shale*, with the *grouting* materials used were cement paste and *fly ash*-based *geopolymer*. Observation of the success of this injection method was carried out based on the *grouting* column formed and the strength of the unconfined compression test results. The results showed that the *geopolymer* was more suitable for injection into *clay shale*. Cement paste injection was not successful in forming the *grouting* column and the strength was not significantly increased. Meanwhile, *geopolymer* injection succeeded in forming a grouted column and its strength increased significantly. The formation of this *grouting* column proves that the *geopolymer* has succeeded in spreading in the pores of the *clay shale* and forming bonds between fragments. The presence of *geopolymers* in the *grouting* column was confirmed by microstructural observations using SEM. The result of the *geopolymer* injection research shows that porosity, moisture content, *fly ash* activator ratio, pressure and injection duration are variables that affect the volume of *geopolymer* injection. This injection volume is correlated with the size of the *grouting* column formed. The strength of *clay shale* injected with *geopolymer* is influenced by the initial conditions of the *clay shale*, the size of the *grouting* column, and the *fly ash* activator ratio. Based on the strength of *clay shale* at densities of 0.85 and 0.95 MDD which has been injected with *geopolymer*, the optimum *fly ash* activator ratio is in the range of 1.

Keywords: *clay shale*, stabilization, injection, cement, *geopolymer*.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI.....	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SEBAGAI KARYA TUNGGAL	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR ISTILAH	xx
DAFTAR SINGKATAN	xxi
DAFTAR NOTASI	xxii
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.1.1. Stabilisasi Tanah	3
1.1.2. Injeksi <i>Grouting</i>	3
1.1.3. Bahan <i>Grouting</i>	4
1.2. Identifikasi Masalah	6
1.2.1. Keberhasilan Proses Injeksi.....	7
1.2.2. Keberhasilan Sementasi	9
1.3. Perumusan Masalah.....	10
1.4. Maksud dan Tujuan Penelitian	11
1.5. Manfaat Penelitian.....	11
1.6. Pembatasan (Ruang Lingkup) Masalah	12
1.7. Sistematika Penulisan	13
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN KERANGKA PIKIR	15
2.1. Kajian Pustaka.....	15
2.1.1. <i>Clay shale</i>	16
2.1.2. Semen	24
2.1.3. <i>Geopolymer</i>	24
2.1.4. Metode Injeksi <i>Grouting</i>	28
2.1.5. Stabilisasi Tanah	39
2.1.6. Kolom <i>Grouting</i>	41
2.1.7. Pengujian Kuat Dukung	44
2.1.8. Metode <i>Resistivity</i>	46
2.1.9. Analisis Data dan Interpretasi.....	49
2.2. Kerangka Pikir.....	55
2.2.1. Konsep Pemecahan Masalah	55
2.2.2. Konsep Penelitian.....	58
2.2.3. Konsep Analisis Data	59
2.3. Kebaharuan (Noveltis).....	59
2.4. Hipotesis Penelitian	71
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	72
3.1. Persiapan Bahan, Alat dan Lokasi Penelitian	76
3.1.1. Lokasi Penelitian	76
3.1.2. Penyiapan dan Pengujian Bahan.....	76
3.1.3. Penyiapan Peralatan	78
3.1.4. Peralatan Uji <i>Resistivity</i>	80

3.2. Injeksi dan Uji Volume Injeksi.....	80
3.2.1. Pembuatan Benda Uji.....	81
3.2.2. Proses Injeksi	82
3.3. Uji Kolom <i>Grouting</i>	83
3.3.1. Uji Kolom <i>Grouting</i> Metode <i>Jar test</i>	83
3.3.2. Uji Kolom <i>Grouting</i> Metode <i>Phenolphthalein</i>	84
3.3.3. Pengujian <i>Resistivity</i>	85
3.4. Uji Tekan Bebas	86
3.5. Pengujian Mikro Struktur	88
3.6. Analisis dan Interpretasi Data Hasil Pengujian.....	88
3.6.1. Analisis Data Proses Injeksi	88
3.6.2. Analisis Uji Kolom <i>Grouting</i>	89
3.6.3. Analisis Uji <i>Resistivity</i>	90
3.6.4. Analisis Data Uji Tekan Bebas.....	90
BAB 4 KOMPILASI DAN ANALISIS DATA	92
4.1. Uji Bahan	92
4.1.1. <i>Clay shale</i>	92
4.1.2. Semen dan Pasta Semen	96
4.1.3. <i>Fly ash</i> dan <i>Geopolymer</i>	96
4.2. Uji Volume Injeksi <i>Grouting</i>	98
4.3. Uji Kolom <i>Grouting</i>	101
4.3.1. Uji Kolom <i>Grouting</i> Metode <i>Jar test</i>	101
4.3.2. Kolom <i>Grouting</i> Metode <i>Phenolphthalein</i>	106
4.3.3. Uji <i>Resistivity</i>	107
4.4. Uji Tekan Bebas	111
4.4.1. Non Injeksi.....	112
4.4.2. Injeksi Pasta Semen.....	113
4.4.3. Injeksi <i>Geopolymer</i>	114
4.4.4. <i>Mixing</i> Pasta Semen	115
4.4.5. <i>Mixing Geopolymer</i>	116
4.5. Pengujian XRD dan SEM.....	116
BAB 5 PEMBAHASAN HASIL PENELITIAN	120
5.1. Pengujian Bahan.....	120
5.2. Volume Injeksi	121
5.2.1. Pengaruh Porositas dan Kadar Air <i>Clay shale</i>	122
5.2.2. Pengaruh Bahan <i>Grouting</i>	123
5.2.3. Pengaruh Tekanan dan Durasi Injeksi	125
5.2.4. Pengaruh Ukuran Benda Uji dan Lubang Injeksi	126
5.2.5. Analisis Hubungan antar Variabel Terhadap Volume Injeksi (V_i).....	127
5.3. Kolom <i>Grouting</i>	131
5.3.1. Perbandingan Metode <i>Jar Test</i> dan <i>Phenolphthalein</i>	131
5.3.2. Variabel Kolom <i>Grouting</i>	133
5.3.3. Evaluasi dengan Metode <i>Resistivity</i>	142
5.3.4. Analisis Hubungan antar Variabel Terhadap Radius Kolom <i>Grouting</i> (R_{cg})	144
5.4. Kuat Dukung dan Sifat Mekanik Lainnya	154
5.4.1. Pola Keruntuhan.....	154
5.4.2. Pengujian Benda Uji Non Injeksi	155
5.4.3. Injeksi Pasta Semen.....	156
5.4.4. Injeksi <i>Geopolymer</i>	159
5.4.5. Perbandingan Metode Injeksi dan <i>Mixing</i>	176
5.5. Mikro Struktur.....	180
5.6. Perbandingan Injeksi Pasta Semen dan <i>Geopolymer</i>	184

5.6.1. Kendala Pada Injeksi Pasta Semen	184
5.6.2. Faktor-faktor Keberhasilan Injeksi <i>Geopolymer</i>	185
5.7. Gambaran Aplikasi di Lapangan	186
5.7.1. Desain Awal.....	186
5.7.2. Koreksi Desain	189
5.7.3. Perbedaan Kondisi di Lapangan dan Laboratorium.....	190
BAB 6 KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN	194
6.1. Kesimpulan	194
6.2. Implikasi Hasil Penelitian.....	195
6.3. Saran-saran	196
DAFTAR PUSTAKA	197
LAMPIRAN.....	209

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi batuan berdasarkan tingkat pelapukannya (Dearman, 1974).....	19
Tabel 2.2	Klasifikasi durabilitas batuan berdasarkan nilai <i>disintegration ratio</i> (Erguler and Shakoor, 2009).....	20
Tabel 2.3	Hubungan antara nilai JST dan SDT (Santi, 2006).....	21
Tabel 2.4	Nilai K dan C untuk pengukuran viskositas dengan Ford Cup (ASTM, 2005a) dan Zahn Cup (ASTM, 2005b).....	34
Tabel 2.5	Perbandingan viskositas pasta semen dan <i>geopolymer</i> dari penelitian sebelumnya.....	36
Tabel 2.6	Matrik posisi penelitian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya.....	62
Tabel 3.1	Variasi benda uji dengan diameter 46 mm untuk benda uji non injeksi, injeksi pasta.....	74
Tabel 3.2	Benda uji dengan diameter 105 dan 205 mm.....	76
Tabel 4.1	Hasil pengujian sifat-sifat fisik <i>clay shale</i>	93
Tabel 4.2	Unsur-unsur utama <i>clay shale</i> hasil pengujian XRF.....	95
Tabel 4.3	Hasil pengujian sifat-sifat fisik pasta semen pada variasi rasio air semen.....	96
Tabel 4.4	Unsur-unsur utama hasil pengujian XRF pada <i>fly ash</i>	97
Tabel 4.5	Hasil pengujian sifat-sifat fisik <i>geopolymer</i>	98
Tabel 4.6	Contoh analisis data proses injeksi untuk menentukan volume <i>grouting</i> yang berhasil diinjeksikan (V_i).....	98
Tabel 4.7	Hasil analisis volume pasta semen yang berhasil diinjeksikan (V_i) pada benda uji diameter 46 mm.....	99
Tabel 4.8	Hasil analisis volume <i>geopolymer</i> yang berhasil diinjeksikan (V_i) pada benda uji diameter 46 mm.....	100
Tabel 4.9	Nilai korelasi variabel-variabel injeksi terhadap volume <i>grouting</i> yang berhasil diinjeksikan (V_i).....	100
Tabel 4.10	Contoh analisis data pengujian kolom <i>grouting</i> dengan metode <i>jar test</i> untuk menentukan radius kolom <i>grouting</i> (R_{cg-JT}).....	104
Tabel 4.11	Hasil analisis radius kolom <i>grouting</i> dengan metode <i>jar test</i> (R_{cg-JT}).....	105
Tabel 4.12	Korelasi variabel injeksi dan radius kolom <i>grouting</i> dengan metode <i>jar test</i> (R_{cg-JT}).....	105
Tabel 4.13	Salah satu analisis data pengujian kolom <i>grouting</i> dengan <i>phenolphthalein</i> (R_{cg-PH}).....	106
Tabel 4.14	Hasil analisis radius kolom <i>grouting</i> dengan metode <i>phenolphthalein</i> (R_{cg-PH}).....	107
Tabel 4.15	Salah satu contoh analisis data pengujian untuk mendapatkan nilai <i>resistivity</i> dengan metode Schlumberger.....	108
Tabel 4.16	Hasil analisis data <i>resistivity</i> sebagai ada input Res2dinv.....	109
Tabel 4.17	Contoh analisis properti mekanis pengujian tekan bebas.....	112
Tabel 4.18	Nilai kuat dukung (q_u), modulus elastisitas (E), <i>brittleness</i> (B_i) dan <i>toughness</i> (T_g) berdasarkan grafik tegangan regangan uji tekan bebas <i>clay shale</i> non injeksi.....	113

Tabel 4.19	Nilai kuat dukung (q_u), modulus elastisitas (E), <i>brittleness</i> B_i dan <i>toughness</i> (T_g) berdasarkan grafik tegangan regangan <i>clay shale</i> yang diinjeksi pasta semen.....	113
Tabel 4.20	Nilai kuat dukung (q_u), modulus elastisitas (E), <i>brittleness</i> B_i dan <i>toughness</i> (T_g) berdasarkan grafik tegangan regangan uji tekan bebas benda uji <i>clay shale</i> yang diinjeksi <i>geopolymer</i>	114
Tabel 4.21	Nilai kuat dukung (q_u), modulus elastisitas (E), <i>brittleness</i> B_i , dan <i>toughness</i> (T_g) berdasarkan <i>clay shale</i> yang dicampur pasta semen (metode <i>mixing</i>) pada kadar pasta semen setara dengan metode injeksi (tekanan 100 kPa, selama 20 menit).....	115
Tabel 4.22	Nilai kuat dukung (q_u), modulus elastisitas (E), <i>brittleness</i> B_i , dan <i>toughness</i> (T_g) berdasarkan <i>clay shale</i> yang campur <i>geopolymer</i> (<i>mixing</i>) pada kadar <i>geopolymer</i> setara dengan metode injeksi (tekanan 100 kPa, selama 20 menit).....	116
Tabel 5.1	Konstanta pada formulasi volume injeksi (V_i).....	129
Tabel 5.2	Nilai-nilai konstanta pada persamaan R_{cg} pada Formulasi C.....	150
Tabel 5.3	Nilai-nilai konstanta pada persamaan R_{cg} pada Formulasi D.....	151
Tabel 5.4	Nilai korelasi variabel injeksi terhadap kuat dukung	154
Tabel 5.5	Perbandingan kadar <i>fly ash</i> pada metode <i>mixing</i> dan metode injeksi <i>geopolymer</i>	179

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Permasalahan yang timbul akibat degradasi pada <i>clay shale</i> : (a) longsor pada lereng Toll Bawen-Semarang (Alatas et al., 2015), dan kerusakan bangunan, jalan dan lereng di kota Tabuk Saudi Arabia (Embaby et al., 2020).	2
Gambar 1.2	Alur identifikasi masalah pada <i>clay shale</i>	6
Gambar 1.3	Identifikasi faktor-faktor dan variabel yang berpengaruh terhadap injeksi <i>grouting</i> pada <i>clay shale</i>	7
Gambar 2.1	Pengelompokan <i>mud rock</i> berdasarkan nilai LL dan PI (Dick and Shakoor, 1992).	15
Gambar 2.2	Ilustrasi proses disintegrasi pada pelapukan <i>clay shale</i> (Sadisun et al., 2010).....	17
Gambar 2.3	Perubahan nilai kuat geser lempung pada berbagai kondisi (Stark and Duncan, 1991).	18
Gambar 2.4	Pengaruh pelapukan oleh siklus kering-basah terhadap penurunan nilai kohesi <i>clay shale</i> , sampel dari: (a) Bawen, dan (b) Hambalang (Alatas et al., 2016).	19
Gambar 2.5	Diskripsi secara visual hasil jar slake test (Santi, 1998).	21
Gambar 2.6	Shale rating berdasarkan nilai SDT, indeks plastisitas, dan point load test (Franklin, 1981).	22
Gambar 2.7	Hubungan antara porositas dan berat satuan kering batuan dan tanah (Kanji and Leao, 2020).	23
Gambar 2.8	Mekanisme pada <i>alkali activated material</i> dan <i>geopolymer</i> (Thapa and Waldmann, 2018).	25
Gambar 2.9	Model konseptual proses <i>geopolymerization</i> : (a) material awal, (b) proses <i>dissolution</i> oleh larutan basa (NaOH), (c) penyebaran <i>geopolymer</i> di dalam dan diluar <i>fly ash geopolymerization</i> , dan (d) hasil <i>geopolymerization</i> (Garcia-Lodeiro et al., 2016).	27
Gambar 2.10	Skema injeksi <i>grouting</i> (Rawlings et al., 2000).	28
Gambar 2.11	Injeksi <i>grouting</i> pada tanah dasar di bawah perkerasan kaku Bandara Magong Penghu (Ni and Cheng, 2012).	30
Gambar 2.12	<i>Groutable zone</i> berdasarkan distribusi ukuran butiran: (a) <i>groutable zone</i> berdasarkan grafik distribusi butiran tanah (Karol, 2003), dan (b) <i>groutable zone</i> berdasarkan d_{50} (Vipulanandan and Ozgurel, 2009).....	30
Gambar 2.13	Kurva hubungan fraksi pada dan viskositas; (a) pada pasta semen(Struble and Sun, 1995), dan (b) perbandingan pasta semen dan <i>geopolymer</i> metakaolin (Favier et al., 2014).	35
Gambar 2.14	Hubungan antara volume <i>bleeding</i> dan waktu pada pasta semen dengan variasi rasio air semen.	37
Gambar 2.15	Volume <i>bleeding</i> akibat tekanan pada injeksi pasta semen pada tanah pasir: (a) $f_{PC} = 1$, dan (b) $f_{PC} = 0,5$ (Wang et al., 2016).....	37
Gambar 2.16	(a) Hubungan tekanan injeksi dan radius sebaran pada injeksi kerikil berpasir (Ping et al., 2008) dan (b) hubungan antara waktu injeksi dan jumlah semen <i>grouting</i> yang berhasil di injeksikan pada tanah pasir, dengan rasio air semen 2,0 (Fu et al., 2019).	38

Gambar 2.17	Kolom <i>grouting</i> pada injeksi tanah pasir: (a) hasil eksperimen laboratorium (Wang et al., 2016), dan (b) injeksi di lapangan (Hashimoto et al., 2016).....	42
Gambar 2.18	Hasil deteksi beton menggunakan sifat basa: (a) menggunakan indikator pH <i>phenolphthalein</i> (Rukzon and Chindaprasirt, 2010), (b) menggunakan indikator <i>thymolphthalein</i> (Revert et al., 2018), dan (c) perbandingan menggunakan curcumin dan <i>phenolphthalein</i> (Chinchón-Payá et al., 2016).....	43
Gambar 2.19	Skema sebaran injeksi (Zhang et al., 2020).	43
Gambar 2.20	Tipe keruntuhan pada uji tekan bebas (Stappen et al., 2019).....	45
Gambar 2.21	Hubungan antara rasio air semen dan kuat dukung kerikil berpasir yang diinjeksi pasta semen (Ping et al., 2008).	45
Gambar 2.22	Tipikal nilai <i>resistivity</i> material (ASTM, 2018).....	47
Gambar 2.23	Susunan elektroda pada: (a) metode Schlumberger, (b) Wenner, dan (c) Dipole-dipole (Telford et al., 1990).....	47
Gambar 2.24	Hubungan antara pola sebaran data dan nilai korelasinya (Montgomery and Runger, 2014).....	50
Gambar 2.25	Ilustrasi grafik fungsi eksponensial dengan berbagai nilai β (Chatterjee and Hadi, 2012).	51
Gambar 2.26	Ilustrasi grafik fungsi logaritmik dengan berbagai nilai β (Chatterjee and Hadi, 2012).	52
Gambar 2.27	Ilustrasi grafik logistik (Montgomery and Runger, 2014).	52
Gambar 2.28	Ilustrasi dua variabel bebas yang tidak ada interaksi (Montgomery and Runger, 2014).....	54
Gambar 2.29	Ilustrasi dua variabel bebas yang ada interaksi (Montgomery and Runger, 2014).....	54
Gambar 2.30	Ilustrasi pola hubungan dua variabel bebas terhadap satu variabel terikat dalam bentuk: (a) grafik 3D dan (b) grafik bentuk kontur (Montgomery and Runger, 2014).....	54
Gambar 2.31	Alur pikir penyelesaian masalah.	55
Gambar 2.32	Ilustrasi injeksi <i>grouting</i> pada <i>clay shale</i> yang telah terdegradasi (Du et al., 2022).....	56
Gambar 2.33	Konsep penelitian dan pengujian.	58
Gambar 2.34	Peta data Scopus dengan kata kunci <i>clay shale stabilization</i> per tanggal 12 Desember 2021.....	60
Gambar 2.35	Peta data Scopus dengan kata kunci <i>clay shale grouting</i> per tanggal 12 Desember 2021.....	60
Gambar 2.36	Road map penelitian perbaikan tanah <i>clay shale</i> dengan metode injeksi.	65
Gambar 3.1	Alur penelitian.....	72
Gambar 3.2	(a) Skema tabung cetak benda uji, dan (b) skema tabung injeksi.	79
Gambar 3.3	Skema rangkaian peralatan injeksi <i>grouting</i>	80
Gambar 3.4	Proses pencetakan benda uji: (a) tabung benda uji yang dipasang di dalam tabung pengaku (cover), (b) tabung diisi <i>clay shale</i> , dan (c) clay dipadatkan dengan dikempa.	81
Gambar 3.5	Proses pembuatan lubang injeksi benda uji: (a) benda uji dipasang pada pelat mal lubang, (b) pembuatan lubang bor pipa, (c) benda	

	uji dengan lubang injeksi, dan (d) benda uji dipasang pada peralatan injeksi.....	82
Gambar 3.6	Dokumentasi Tabung injeksi dan hasil injeksi.....	83
Gambar 3.7	Skema pengujian sebaran bahan stabilisasi dengan menggunakan <i>phenolphthalein</i>	84
Gambar 3.8	Skema pengujian <i>resistivity clay shale</i> dan <i>geopolymer</i>	85
Gambar 3.9	Dokumentasi pengujian <i>resistivity</i> untuk mendapatkan profil resistivty benda uji <i>clay shale</i> yang diinjeksi <i>geopolymer</i> : (a) susunan elektroda, dan (b) setting alat pengujian.	86
Gambar 3.10	Dokumentasi pengujian tekan bebas (a) Pengujian tekan bebas, dan (b) benda uji pasca pengujian.....	87
Gambar 4.1	Sampel <i>clay shale</i> : (a) fragmen dari lapangan, dan (b) setelah dilakukan degradasi di laboratorium.	92
Gambar 4.2	Distribusi butiran fragmen <i>clay shale</i> setelah dilakukan degradasi di laboratorium dengan menggunakan analisis ayakan.....	93
Gambar 4.3	Grafik distribusi ukuran butiran <i>clay shale</i> hasil pengujian hidrometer dengan modifikasi perendaman selama 3 hari.....	94
Gambar 4.4	Hubungan antara kadar air dan berat satuan kering hasil percobaan <i>Standard Proctor</i>	95
Gambar 4.5	Mikro struktur hasil uji SEM <i>clay shale</i> yang digunakan pada penelitian ini.....	95
Gambar 4.6	Dokumentasi semen PCC merk Dynamix.....	96
Gambar 4.7	<i>Fly ash</i> yang digunakan pada penelitian: (a) foto <i>fly ash</i> , dan (b) hasil uji <i>scanning electron microscope</i> (SEM).	97
Gambar 4.8	Grafik intensitas dan sudut difraksi <i>fly ash</i> berdasarkan hasil uji XRD.	97
Gambar 4.9	Dokumentasi uji jar test: (a) sampel awal, (b) perendaman, (c) pasca perendaman dengan kondisi ditiriskan.	101
Gambar 4.10	Dokumentasi kolom <i>grouting</i> hasil pengujian <i>jar test</i> pada <i>clay shale</i> yang diinjeksi pasta semen dengan variasi R_c dan f_{PC} , pada $p = 100$ kPa, dan $t = 20$ menit.	102
Gambar 4.11	Dokumentasi Kolom <i>grouting</i> hasil pengujian <i>jar test</i> pada <i>clay shale</i> yang diinjeksi <i>geopolymer</i> dengan variasi R_c dan f_{GP} , pada $p = 100$ kPa, dan $t = 20$ menit.	103
Gambar 4.12	<i>Resistivity</i> hasil pengujian (a) <i>clay shale</i> , dan (b) <i>geopolymer</i>	108
Gambar 4.13	Profil <i>resistivity</i> pada <i>clay shale</i> yang diinjeksi <i>geopolymer</i> dengan $f_{GP} = 1,0$ (a) umur 7 hari, (b) 14 hari, (c) 21 hari, dan (d) 28 hari untuk $R_c = 0,85$	110
Gambar 4.14	Sebaran <i>resistivity</i> pada <i>clay</i> yang diinjeksi <i>geopolymer</i> pada kedalaman 25 mm pada umur 7, 14, 21 dan 28 hari.	111
Gambar 4.15	Analisis grafik tegangan regangan berdasarkan data uji tekan bebas.....	112
Gambar 4.16	Hasil uji XRD <i>geopolymer</i> pada lubang injeksi.....	117
Gambar 4.17	Hasil uji XRD <i>clay shale</i> yang terjangkau <i>geopolymer</i>	117
Gambar 4.18	Hasil uji SEM <i>geopolymer</i> pada lubang injeksi.	118
Gambar 4.19	Hasil uji SEM <i>clay shale</i> yang terjangkau <i>geopolymer</i>	118
Gambar 4.20	Hasil uji SEM <i>clay shale</i> bagian tepi yang tidak terjangkau <i>geopolymer</i>	119

Gambar 4.21	Hasil uji SEM <i>clay shale clay shale</i> distabilisasi <i>geopolymer</i> dengan metode <i>mixing</i>	119
Gambar 5.1	Ploting distribusi ukuran butiran fragmen <i>clay shale</i> yang disiapkan untuk pembuatan benda uji pada <i>groutable zone</i> (Karol, 2003).	120
Gambar 5.2	Pengaruh porositas (n) terhadap volume injeksi <i>geopolymer</i> yang berhasil diinjeksikan (V_i): (a) pasta semen, (b) <i>geopolymer</i>	122
Gambar 5.3	Hubungan antara kadar air dan volume injeksi (V_i) pada injeksi <i>geopolymer</i>	123
Gambar 5.4	Volume injeksi (V_i) pada variabel porositas dan rasio air semen atau rasio aktivator <i>fly ash</i> , (a) pada injeksi semen, dan (b) pada injeksi <i>geopolymer</i>	124
Gambar 5.5	Hubungan antara f_{PC} dan f_{GP} terhadap volume injeksi <i>grouting</i> (V_i) pada: (a) injeksi pasta semen, dan (b) injeksi <i>geopolymer</i>	124
Gambar 5.6	Pengaruh tekanan injeksi (p) dan durasi (t) terhadap volume injeksi (V_i) pada injeksi pasta semen dan <i>geopolymer</i> : (a) pengaruh tekanan dan (b) pengaruh durasi injeksi.....	125
Gambar 5.7	Perbandingan volume injeksi geopolimer pada diameter tabung dan lubang injeksi yang berbeda: (a) perbandingan diameter benda uji, dan (b) perbandingan radius lubang injeksi.	127
Gambar 5.8	Hubungan antara V_i hasil pengujian dan V_i hitungan: (a) pada injeksi pasta semen, dan (b) injeksi <i>geopolymer</i>	129
Gambar 5.9	Validasi formula V_i menggunakan variasi ukuran benda uji dan lubang injeksi.	130
Gambar 5.10	Skema hubungan antar variabel terhadap volume injeksi.	130
Gambar 5.11	Hasil analisis kolom <i>grouting</i> dengan metode <i>phenolphthalein</i> pada injeksi semen.	132
Gambar 5.12	Hasil analisis kolom <i>grouting</i> dengan metode <i>phenolphthalein</i> pada injeksi <i>geopolymer</i>	132
Gambar 5.13	Hubungan antara radius kolom <i>grouting</i> metode <i>jar test</i> (R_{cg-JT}) dan metode <i>phenolphthalein</i> (R_{cg-PH}).....	133
Gambar 5.14	Hubungan antara V^* dan R^*	134
Gambar 5.15	Hubungan antara f_{PC} atau f_{GP} dengan radius kolom <i>grouting</i> (R_{cg-JT}) pada: (a) pada injeksi pasta semen, dan (b) injeksi <i>geopolymer</i>	135
Gambar 5.16	Volume injeksi setelah dikoreksi pengaruh <i>bleeding</i> pada pasta semen, pada (a) $R_c = 0,75$, (b) $R_c = 0,85$, dan (c) $R_c = 0,95$	137
Gambar 5.17	Hubungan antara kapadatan, porositas dan radius kolom <i>grouting</i> (R_{cg-JT}) pada: (a) pada injeksi pasta semen, dan (b) injeksi <i>geopolymer</i>	139
Gambar 5.18	Hubungan antara kadar air dan radius kolom <i>grouting</i> (R_{cg-JT}) pada injeksi <i>geopolymer</i>	140
Gambar 5.19	Hubungan antara tekanan (p) terhadap R_{cg} dan V_i : (a) pada injeksi pasta semen, dan (b) injeksi <i>geopolymer</i>	141
Gambar 5.20	Hubungan antara durasi injeksi (t) terhadap R_{cg} dan V_i : (a) pada injeksi pasta semen, dan (b) injeksi <i>geopolymer</i>	141
Gambar 5.21	Pengaruh ukuran tabung dan lubang injeksi terhadap radius kolom <i>grouting</i> : (a) perbandingan tabung diameter 46 mm dan 205 mm, dan (b) pengaruh radius lubang injeksi.	142

Gambar 5.22	Perbandingan R_{cg} hasil hitungan dengan Persamaan 2.5 (Yang et al., 2019) dengan menggunakan nilai k_1 hasil pengujian dan k_2 berdasarkan nilai n .	145
Gambar 5.23	Skema sebaran <i>grouting</i> : (a) skema sebaran <i>grouting</i> , dan (b) diagram volume <i>grouting</i> .	147
Gambar 5.24	Perbandingan R_{cg} hasil eksperimen dan formulasi A.	148
Gambar 5.25	Perbandingan R_{cg} hasil eksperimen dan formulasi B.	149
Gambar 5.26	Perbandingan R_{cg} hasil eksperimen dan formulasi C.	150
Gambar 5.27	Perbandingan R_{cg} hasil eksperimen dan formulasi D.	151
Gambar 5.28	Skema hubungan antar variabel terhadap radius kolom <i>grouting</i> .	152
Gambar 5.29	Validasi R_{cg} Formula C menggunakan benda uji dengan diameter 105 dan 205 mm, dan radius lubang injeksi 6, 12,5 dan 19 mm.	152
Gambar 5.30	Perbandingan nilai q_u benda uji normal (non injeksi), injeksi pasta semen dan injeksi <i>geopolymer</i> .	154
Gambar 5.31	Pola keruntuhan benda uji: (a) keruntuhan geser pada benda uji non injeksi, (b) <i>vertical splitting</i> pada benda uji injeksi <i>geopolymer</i> , dan (c) keberadaan kolom <i>grouting</i> pasca uji tekan bebas.	155
Gambar 5.32	Grafik tegangan-regangan pengujian tekan bebas pada benda uji non injeksi.	156
Gambar 5.33	Hasil pengujian tekan bebas benda uji normal (non injeksi): (a) hubungan antara kepadatan (R_c), porositas (n) dan kuat dukung uji tekan bebas (q_u), dan (b) hubungan antara kuat dukung (q_u) dengan modulus elastisitas (E), <i>brittleness index</i> (B_i) dan <i>toughness index</i> (T_g).	156
Gambar 5.34	Hubungan antara kepadatan (R_c) dengan <i>mechanical properties</i> berdasarkan hasil pengujian tekan bebas: (a) kuat dukung (q_u) dan (b) modulus elastisitas (E).	157
Gambar 5.35	Hubungan antara kepadatan (R_c) dengan <i>mechanical properties</i> berdasarkan hasil pengujian tekan bebas: (a) hubungan <i>brittleness index</i> (B_i) dan (b) <i>toughness</i> (T_g).	158
Gambar 5.36	Perbandingan hubungan tegangan-regangan benda uji <i>clay shale</i> non injeksi dan injeksi pasta semen dengan variasi rasio air semen (f_{PC}) pada: (a) $R_c = 0,85$ dan (b) $R_c = 0,95$.	158
Gambar 5.37	Perbandingan hubungan tegangan-regangan benda uji <i>clay shale</i> non injeksi dan injeksi <i>geopolymer</i> dengan variasi rasio air semen (f_{GP}): (a) $R_c = 0,75$, (b) pada $R_c = 0,85$ dan (c) pada $R_c = 0,95$.	159
Gambar 5.38	Hubungan antara kepadatan (R_c), dan porositas (n) pada benda uji injeksi <i>geopolymer</i> terhadap: (a) kuat dukung benda, dan (b) peningkatan kuat dukung.	160
Gambar 5.39	Perbandingan porositas <i>clay shale</i> sebelum dan setelah injeksi <i>geopolymer</i> , pada: (a) $f_{GP} = 0,5$ (b) $f_{GP} = 0,75$, (c) $f_{GP} = 1$, dan (d) $f_{GP} = 1,25$.	161
Gambar 5.40	Zona f_{GP} optimum pada injeksi <i>geopolymer</i> .	163
Gambar 5.41	Hubungan antara tekanan (p) dan durasi injeksi (t) terhadap kuat dukung pada umur pengujian 7 hari.	163
Gambar 5.42	Hubungan antara kadar air (w) <i>clay shale</i> dan kuat dukung (q_u) pada umur pengujian 7 hari.	164
Gambar 5.43	Hubungan antara umur benda uji <i>clay shale</i> dan kuat dukung (q_u).	165

Gambar 5.44	Pengaruh injeksi <i>geopolymer</i> terhadap nilai: (a) Modulus elastisitas (E_{50}) dan (b) <i>Brittleness</i>	166
Gambar 5.45	(a) Pengaruh injeksi <i>geopolymer</i> terhadap nilai <i>toughness</i> , (b) hubungan antara q_u dan E	167
Gambar 5.46	Hubungan antara V_i dan q_u injeksi <i>geopolymer</i> pada: (a) $R_c = 0,75$, (b) $R_c = 0,85$, dan (c) $R_c = 0,95$	168
Gambar 5.47	Hubungan antara R_{cg} dan q_u injeksi <i>geopolymer</i> pada: (a) $R_c = 0,75$, (b) $R_c = 0,85$, dan (c) $R_c = 0,95$	169
Gambar 5.48	(a) Skema distribusi beban P_U pada bagian-bagian benda uji, dan (b) kuat dukung tanah di bawah kolom <i>geopolymer</i>	170
Gambar 5.49	Distribusi beban ultimit pada <i>clay shale</i> yang tidak tersementasi grouting (P_{U-CS}), kolom <i>geopolymer</i> (P_{U-GP}) dan <i>clay shale</i> tersementasi grouting (P_{U-CG}): (a) pada $R_c = 0,75$, (b) $R_c = 0,85$, dan $R_c = 0,95$	171
Gambar 5.50	Skema analisis kuat dukung pada kolom <i>grouting</i> : (a) kondisi pengujian benda uji non injeksi, (b) pengujian benda uji injeksi, dan (c) skema analisis kuat dukung kolom <i>grouting</i>	172
Gambar 5.51	Ploting nilai q_u hasil eksperimen dan hasil hitungan dengan formula usulan.	174
Gambar 5.52	Skema hubungan antar variabel terhadap nilai kuat dukung benda uji <i>clay shale</i> yang diinjeksi <i>geopolimer</i>	175
Gambar 5.53	Diagram alur hubungan antara V_i , R_{cg} , q_u , dan variabel injeksi.....	176
Gambar 5.54	Perbandingan antara kuat dukung <i>clay shale</i> yang distabilisasi pasta semen dengan: (a) metode injeksi dan dicampurkan (<i>mixing</i>): (a) pada $R_c = 0,75$, (b) pada $R_c = 0,85$ dan (c) pada $R_c = 0,95$	177
Gambar 5.55	Perbandingan antara kuat dukung <i>clay shale</i> yang distabilisasi <i>geopolymer</i> dengan metode injeksi dan dicampurkan (<i>mixing</i>): (a) pada $R_c = 0,75$, (b) pada $R_c = 0,85$, dan (c) pada $R_c = 0,95$	178
Gambar 5.56	Tipikal zona stabilisasi berdasarkan kadar bahan stabilisasi (Singhi et al., 2016; Hartono et al., 2018).....	179
Gambar 5.57	Mikro struktur hasil pengujian SEM <i>clay shale</i> yang diinjeksi pasta semen (a) pasta semen pada lubang bor, (b) <i>clay shale</i> pada kolom <i>grouting</i> , (c) <i>clay shale</i> diluar kolom <i>grouting</i> , dan (d) bagian luar benda uji.	181
Gambar 5.58	Mikro struktur hasil pengujian SEM <i>clay shale</i> yang diinjeksi <i>geopolymer</i> (a) <i>geopolymer</i> pada lubang bor, (b) <i>clay shale</i> pada kolom <i>grouting</i> , dan (c) bagian luar kolom <i>grouting</i>	182
Gambar 5.59	Hasil uji XRD (a) <i>fly ash</i> , (b) <i>geopolymer</i> pada lubang injeksi, dan (c) <i>clay shale</i>	183
Gambar 5.60	Mikro struktur hasil pengujian SEM <i>clay shale</i> yang distabilisasi <i>geopolymer</i> dengan metode <i>mixing</i>	184
Gambar 5.61	Skema formasi injeksi <i>grouting</i> di lapangan.....	187
Gambar 5.62	Desain awal injeksi <i>geopolymer</i> pada tanah <i>clay shale</i>	188
Gambar 5.63	Alur koreksi desain injeksi <i>geopolymer</i> pada tanah <i>clay shale</i>	189

DAFTAR ISTILAH

<i>Aktivator</i>	:	Larutan alkali pada pembuatan <i>geopolymer</i> .
<i>Amorph</i>	:	Mineral yang belum pada fasa kristal dan masih reaktif.
<i>Binder</i>	:	Bahan yang berfungsi sebagai bahan pengikat.
<i>Blast furnace slag</i>	:	Terak tanur tinggi.
<i>Cenosphere</i>	:	Cangkang pada <i>fly ash</i>
<i>Clay shale</i>	:	Salah satu jenis batuan sedimen yang tersusun atas mineral lempung dengan susunan berlapis-lapis.
Degradasi	:	Penurunan kuat dukung akibat pelapukan yang terjadi pada batuan sedimen.
<i>Disintegration ratio</i>	:	Nilai durabilitas berdasarkan luas area grafik distribusi ukuran butiran.
Durabilitas	:	Tingkat ketahanan batuan terhadap proses pelapukan.
<i>Fly ash</i>	:	Abu terbang pada pembakaran batu bara.
<i>Geopolymer</i>	:	Mineral anorganik yang berbasis alumina-silika atau polysialate yang membentuk ikatan seperti batu alam.
<i>Grouting</i>	:	Metode mengisi pori-pori, rongga, atau retakan tanah dengan bahan stabilisasi berupa suspensi atau koloid dengan memberikan tekanan.
<i>Jar slake test</i>	:	Pengujian durabilitas dengan metode perendemanan.
Kolom <i>grouting</i>	:	Bagian tersementasi yang dihasilkan oleh injeksi <i>grouting</i>
Metode <i>mixing</i>	:	Metode stabilisasi tanah dengan mencampurkan bahan stabilisasi.
<i>Mud rock</i>	:	Batuan sedimen yang tersusun atas butiran-butiran halus.
<i>Phenolphthalein</i>	:	Indikator basa untuk mendeteksi kedalaman korosi pada beton.
Radius kolom <i>grouting</i>	:	Radius tanah yang terstabilisasi berdasarkan uji <i>jar test</i> atau <i>phenolphthalein</i> .
Rasio air semen	:	Perbandingan berat air dan semen pada pembuatan pasta semen.
Rasio aktivator <i>fly ash</i>	:	Perbandingan berat aktivator dan <i>fly ash</i> pada pembuatan <i>geopolymer fly ash</i> .
<i>Resistivity</i>	:	Hambatan jenis material.
Sementasi	:	Ikatan yang dibentuk oleh <i>grouting</i> .
<i>Slake durability test</i>	:	Pengujian durabilitas batuan berdasarkan ASTM D4644-04.
Tabung <i>grouting</i>	:	Tabung untuk menempatkan bahan <i>grouting</i> pada proses injeksi.
Viskositas	:	Kekentalan bahan <i>grouting</i> .
Volume injeksi	:	Volume <i>grouting</i> yang berhasil diinjeksikan.

DAFTAR SINGKATAN

FA	:	<i>Fly ash</i>
GP	:	<i>Geopolymer</i>
JST	:	<i>Jar slake test</i>
MAPE	:	<i>Mean absolute persentage error</i>
MDD	:	<i>Maximum dry density</i>
OMC	:	<i>Optimum moisture content</i>
PC	:	Pasta semen
PLTU	:	Pembangkit listrik tenaga uap
RSME	:	<i>Root mean square error</i>
SDT	:	<i>Slake durability test</i>
SEM	:	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SSE	:	<i>Sum square error</i>
XRD	:	<i>X-Ray Diffraction</i>
XRF	:	<i>X-Ray Fluorescence</i>

DAFTAR NOTASI

Δq_u	: Peningkatan kuat dukung benda uji (kPa)
Δq_{cg}	: Peningkatan kuat dukung pada kolom <i>grouting</i> (kPa)
ε	: Regangan
ε_{50}	: Regangan saat tegangan 50% ultimit
ε_e	: Regangan saat batas elastis
ε_u	: Regangan saat tegangan ultimit
γ_{cs}	: Berat satuan <i>clay shale</i> (kN/m^3 , gr/cm^3)
γ_g	: Berat satuan <i>grouting</i> (kN/m^3 , gr/cm^3)
μ	: Viskositas (mPa.s, cP)
σ	: Tegangan pada uji tekan bebas (kPa)
σ_{50}	: Tegangan uji tekan bebas 50% tegangan ultimit (kPa)
B_i	: <i>Brittleness</i>
D_R	: <i>Disintegration ratio</i>
E	: Modulus elastisitas (MPa)
E_{50}	: Modulus elastisitas berdasarkan modulus secan saat tegangan 50% ultimit (MPa)
f_{GP}	: Rasio aktivator <i>fly ash</i> pada <i>geopolymer</i>
f_{PC}	: Rasio air semen pada pasta semen
G_s	: Specific gravity
I	: Arus listrik (A)
I_{d2}	: Slake durability index
L_b	: Kedalaman lubang bor (mm)
n	: Porositas
n_a	: Porositas bagian udara
p	: Tekanan injeksi (kPa)
q_u	: Kuat dukung uji tekan bebas (kPa)
q_n	: Kuat dukung benda uji normal atau tanpa injeksi (kPa)
R_b	: Radius lubang bor (mm)
R_c	: Kepadatan relatif
R_{cg}	: Radius kolom <i>grouting</i> (mm)
R_o	: Hambatan jenis ($\Omega.m$)
R_t	: Radius tabung sampel (mm)
S	: Derajat kejenuhan
t	: Durasi injeksi (menit)
T_g	: <i>Toughness</i> (kPa)
V	: Tegangan listrik (V)
V_i	: Volume injeksi (mm^3)
V_t	: Volume total tanah (mm^3 , m^3)
V_v	: Volume pori (mm^3 , m^3)
w	: Kadar air
W_g	: Berat <i>grouting</i> yang berhasil diinjeksikan (kN, gr)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Peralatan pendukung penelitian	209
Lampiran 2.	Hasil uji XRF <i>clay shale</i> dan <i>fly ash</i>	212
Lampiran 3.	Dokumentasi uji kolom <i>grouting</i> metode <i>phenolphthalein</i> pada benda uji injeksi <i>geopolymer</i>	214
Lampiran 4.	Dokumentasi uji kolom <i>grouting</i> metode <i>phenolphthalein</i> pada benda uji injeksi <i>geopolymer</i>	221
Lampiran 5	Dokumentasi benda uji tekan bebas	234
Lampiran 6.	Grafik tegangan-regangan uji UCS benda uji injeksi pasta semen	243
Lampiran 7.	Grafik tegangan-regangan uji UCS benda uji injeksi <i>geopolymer</i>	255
Lampiran 8.	Grafik tegangan-regangan uji UCS benda uji <i>mixing</i> pasta semen.....	281
Lampiran 9.	Grafik tegangan-regangan uji UCS benda uji <i>mixing geopolymer</i>	293
Lampiran 10.	Publikasi pada seminar internasional	305
Lampiran 11.	Artikel diterima (accepted) pada <i>International Journal of Geomate</i>	313
Lampiran 12.	HKI Aplikasi Mencatat dan Memetakan Artikel Ilmiah (diNote)	321
Lampiran 13.	Aplikasi untuk Estimasi Injeksi Grouting pada Clay Shale Terdegradasi (diG)	323