Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada
Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN II
HALAMAN PENGESAHAN III
HALAMAN PERNYATAAN IV
KATA PENGANTAR V
DAFTAR ISI VI
DAFTAR TABEL IX
DAFTAR GAMBAR X
INTISARI XV
ABSTRACT XVI
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Batasan Masalah 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Stabilitas Galian Dalam dan Dinding Penahan Tanah *Secant pile* 5
2.2 Perilaku Kopel Hidro-Mekanik pada Galian 6
2.3 Pengaruh Air Terhadap Perilaku Tanah Tak Jenuh 7
2.4 Mekanika Tanah Tak Jenuh 8
2.5 Studi Terdahulu 11
2.6 Keaslian Penelitian 13
BAB 3 LANDASAN TEORI 14
3.1 Mekanika Tanah dan Parameter Geoteknik 14
3.2 Kurva Karakteristik Air Tanah 18
3.3 Tekanan Tanah Lateral Pada Dinding *Secant Pile* di Tanah Tak Jenuh 20
3.3.1 Tekanan Tanah Aktif di Tanah Tak Jenuh 23
3.3.2 Tekanan Tanah Pasif di Tanah Tak Jenuh 30
3.4 Defleksi dan Momen Lentur Yang Terjadi di Sepanjang Tiang 36
3.4.1 Persamaan Diferensial Defleksi Tiang 36
3.4.2 Metode Beda Hingga 37
3.4.3 Momen Lentur 40

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.5 Daya Dukung Tiang 40
3.5.1 Tahanan Ujung (*End Bearing*) 40
3.5.2 Tahanan Selimut (*skin friction*) 41
3.5.3 Tahanan Selimut Tiang Modifikasi Untuk Kondisi Tanah Tak Jenuh 44
3.6 Infiltrasi air hujan 46
3.6.1 Persamaan Dasar (*Governing Equation*) 47
3.6.2 Kondisi Batas dan Kondisi Awal 50
3.6.3 Solusi Analitik Untuk Infiltrasi Dua Dimensi (2-D) Transien 53
3.7 Pengaruh Curah Hujan pada Analisis Hidromekanik Galian Dalam 57
3.8 Distribusi Data 58
3.8.1 Distribusi Poisson 59
3.8.2 Distribusi Geometri 59
3.8.3 Distribusi Eksponensial 61
3.9 Proses Stokastik 62
3.10 Model Curah Hujan Stokastik Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP) 64
3.10.1 Pemodelan *NSRP* 64
3.10.2 Pendugaan Parameter 67
3.10.3 Uji kesesuaian Model 68
3.11 Metode Disagregasi 69
3.12 Metode Penyesuaian (*Adjusting*) 71
BAB 4 METODE PENELITIAN 73
4.1 Lokasi Penelitian 73
4.2 Objek Penelitian 74
4.3 Prosedur Penelitian 76
4.3.1 Tahap Pengumpulan Data 76
4.3.2 Tahap Simulasi Numeris dan Analisis Terkopel 76
4.3.3 Tahap Simulasi Numeris dan Analisis Terkopel 77
4.3.4 Tahap Evaluasi Respons dan Kesimpulan 77
4.4 Tahapan Simulasi Numeris 79
4.4.1 Pemodelan Hidrologis (Hujan Stokastik) 79
4.4.2 Simulasi Infiltrasi Air 2D Transien 80
4.4.3 Analisis Respons Mekanis 81
BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN 84
5.1 Interpretasi Lapisan dan Parameter Tanah 84

Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada
Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

5.2 Eksplorasi Data Curah Hujan 87
5.2.1 Pemodelan *Neyman-Scott Rectangular Pulses* (*NSRP*) 90
5.2.2 Metode Disagregasi Waktu 93
5.3 Infiltrasi Air Hujan 95
5.3.1 Proses Infiltrasi Air Hujan di Tanah Tak Jenuh 98
5.4 Evaluasi Perubahan Daya Dukung Tiang Akibat Proses Galian dan Hujan 109
5.5 Respon Deformasi *Secant Pile* Terhadap Tekanan Tanah Lateral 112
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN 117
6.1 Kesimpulan 117
6.2 Saran 118
DAFTAR PUSTAKA 120

Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada
Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Hubungan nilai kuat geser tak terdrainase (s_u) tanah lempung dengan hasil uji *N-SPT* (Ameratunga *dkk.* 2016) 14
Tabel 3.2 Perkiraan nilai tipikal berat volume tanah dalam kondisi kering dan jenuh 15
Tabel 3.3 Nilai modulus elastisitas untuk berbagai jenis tanah (Look 2007) 16
Tabel 3.4 Nilai tipikal rasio Poisson untuk jenis tanah dan batuan (Look 2007)..... 17
Tabel 3.5 Hubungan *N-SPT* dan kepadatan relatif terhadap sudut geser dalam pada tanah non-kohesif (Ameratunga *dkk.* 2016)..... 17
Tabel 3.6 Rentang nilai permeabilitas tanah (*k*) berdasarkan jenis tanah 18
Tabel 3.7 Nilai-nilai K/K_o untuk tiang bor berdasarkan Kulhawy (1991), dikutip dalam Hardiyatmo (2023) 43
Tabel 3.8 Nilai-nilai δ/φ' pada tiang bor berdasarkan Kulhawy (1991), dikutip dalam Hardiyatmo (2023) 43
Tabel 3.9 Skema data disagregasi curah hujan..... 70
Tabel 5.1 Parameter fisik dan properti indeks tanah di berbagai kedalaman..... 85
Tabel 5.2 Hubungan antara tegangan hisap dengan derajat kejenuhan dan kadar air volumetrik 85
Tabel 5.3 Parameter *Soil-Water Characteristic Curve* (*SWCC*)..... 86
Tabel 5.4 Karakteristik curah hujan per-jam 90
Tabel 5.5 Statistik data curah hujan per-jam 91
Tabel 5.6 Parameter *NSRP* 91
Tabel 5.7 Uji *Goodness of Fit* untuk skala jam-jaman..... 93
Tabel 5.8 Hasil disagregasi waktu menggunakan metode *proportional adjusted* pada tanggal 19 Maret 2020..... 96
Tabel 5.9 Lanjutan hasil disagregasi waktu menggunakan metode *proportional adjusted* pada tanggal 19 Maret 2020 97
Tabel 5.10 Data pengujian permeabilitas 98
Tabel 5.11 Parameter hidrolis tanah untuk simulasi infiltrasi..... 99
Tabel 5.12 Parameter dan peningkatan kapasitas tiang pada kondisi tak jenuh..... 111

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema konstruksi dinding secant pile menunjukkan susunan tiang primer (tanpa tulangan) dan tiang sekunder (dengan tulangan) yang saling tumpang tindih modifikasi dari Shulthony *dkk.* (2025) 5

Gambar 2.2 Visualisasi mekanisme deformasi galian dalam dua skenario: (a) deformasi dan distribusi perpindahan tanpa pengaruh hujan; (b) peningkatan deformasi dan perubahan distribusi perpindahan akibat pengaruh hujan modifikasi dari Lam *dkk.* (2014) 6

Gambar 2.3 Model aliran vertikal dalam media berpori, menunjukkan fluks masuk (q_t) pada permukaan dan fluks keluar (q_b) pada dasar lapisan modifikasi dari Wu *dkk.* (2018) 8

Gambar 2.4 Visualisasi umum mekanika tanah yang memperlihatkan perubahan pendekatan, dari yang semula hanya memakai satu variabel tegangan (tegangan efektif) pada tanah jenuh, menjadi dua variabel tegangan terpisah, yaitu tegangan normal dan isapan matriks pada tanah tak jenuh (Fredlund 1996) 9

Gambar 2.5 Kategorisasi tanah di atas muka air tanah berdasarkan tingkat kejenuhan. Ilustrasi ini memperlihatkan perubahan kondisi tanah, mulai dari zona kapiler yang hampir jenuh hingga tanah yang kering di dekat permukaan, lengkap dengan keterangan yang menunjukkan susunan fase padat, air, dan udara (Fredlund 1996). 10

Gambar 2.6 Visualisasi mekanika tanah jenuh dan tak jenuh berdasarkan sifat kesinambungan fase fluida. Diagram ini secara detail menjelaskan bagaimana fase air dan udara berinteraksi, mulai dari udara terlarut di zona jenuh, udara tidak menerus di zona kapiler, hingga air tidak menerus di kondisi tanah kering (Fredlund 1996). 11

Gambar 3.1 Tipikal kurva karakteristik air tanah modifikasi dari Fredlund (1996) 19

Gambar 3.2 Modifikasi pengaruh isapan matriks terhadap kekuatan geser tanah 21

Gambar 3.3 Modifikasi klasifikasi tanah berdasarkan parameter fitting model Van Genuchten (α dan n) (Lu *dkk.* 2010) 22

Gambar 3.4 Diagram keseimbangan gaya pada baji tanah untuk analisis tekanan tanah aktif modifikasi dari Sahoo dan Ganesh (2018) 23

Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada
Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 3.5 Modifikasi visualisasi kekuatan geser tanah tak jenuh sebagai fungsi tegangan dan isapan (Fu *dkk.* 2022) 32
Gambar 3.6 Tekanan tanah pasif modifikasi dari Das dan Sivakugan (2019) 33
Gambar 3.7 Distribusi tekanan tanah pasif terhadap kedalaman modifikasi dari Deng dan Yang (2019) 35
Gambar 3.8 Titik kedalaman yang akan ditinjau modifikasi dari Lafit *dkk.* (2021) 38
Gambar 3.9 Nilai faktor adhesi (α) untuk tiang bor berdasarkan Reese dan O'neil (1989) dalam Hardiyatmo (2023)..... 42
Gambar 3.10 Variasi tekanan air pori terhadap kedalaman dengan memperhatikan posisi awal muka air tanah. Modifikasi dari Georgiadis *dkk.* (2003) 45
Gambar 3.11 Modifikasi fungsi probabilitas pada distribusi geometri (Sugiyama 2016) 60
Gambar 3.12 Implementasi *model storm cell* untuk simulasi curah hujan dalam Python..... 63
Gambar 3.13 Gambar skematik model *NSRP*: (a) selang waktu antar awal badai, (b) jumlah sel dalam satu badai, (c) selang waktu antar sel hujan, (d) intensitas hujan, (e) gabungan kejadian hujan modifikasi dari Nizeyimana *dkk.* (2024) 65
Gambar 3.14 Ilustrasi pembagian skala waktu tinggi menjadi beberapa subperiode skala waktu rendah modifikasi dari Koutsoyiannis (2003) 71
Gambar 4.1 Peta lokasi penelitian pada konstruksi *underpass* di jalan M.Yamin, Medan .. 73
Gambar 4.2 Model 3D skematik *underpass* pada tahap operasional (Dinas Sumber Daya Air, Bina Marga dan Bina Konstruksi Kota Medan, 2023)..... 74
Gambar 4.3 Dokumentasi proses galian dalam (*deep excavation*) yang diproteksi oleh dinding *secant pile* dan sistem penyokong (*strutting*)..... 74
Gambar 4.4 Proses instalasi *secant pile*: (a) *dewatering* dan (b) pengecoran beton. 75
Gambar 4.5 Proses monitoring tekanan air pori di lapangan: (a) pemasangan unit *piezometer* dan (b) pencatatan data. 75
Gambar 4.6 Bagan alir penelitian..... 78
Gambar 4.7 Bagan alir model *Neyman-Scott Rectangular Pulse* (*NSRP*) 79
Gambar 4.8 Bagan alir simulasi infiltrasi air 2D transien..... 80
Gambar 4.9 Lanjutan bagan alir simulasi infiltrasi air 2D transien 81
Gambar 4.10 Bagan alir perhitungan kapasitas dukung tiang pada kondisi tak jenuh..... 82
Gambar 4.11 Bagan alir tekanan tanah lateral pada kondisi tanah tak jenuh..... 83
Gambar 5.1 Profil dan stratigrafi di bawah permukaan tanah..... 84

Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada
Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.2 (a) hubungan antara tegangan hisap dengan derajat kejenuhan; (b) hubungan antara tegangan hisap dengan kadar air volumetrik 86
Gambar 5.3 Lokasi stasiun pengukuran curah hujan yang berada di sekitar lokasi penelitian (Google earth) 87
Gambar 5.4 Plot curah hujan bulanan kota Medan tahun 2020 88
Gambar 5.5 Verifikasi curah hujan skala waktu atau per-jam (a) plot curah hujan di kota Medan tahun 2020 selama 366 hari; (b) curah hujan di Bandar Lampung tahun 2008 selama 120 hari berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hidayah *dkk.* (2010) 89
Gambar 5.6 Bangkitan sebelum *adjusting* curah hujan Per-jam tahun 2020 92
Gambar 5.7 Bangkitan setelah *adjusting* curah hujan Per-jam tahun 2020..... 93
Gambar 5.8 Bangkitan Curah Hujan Per-jam bulan maret tahun 2020..... 94
Gambar 5.9 Prediksi muka air tanah selama setahun penuh di lokasi kontruksi tahun 2020 dengan mempertimbangkan curah hujan tahunan 95
Gambar 5.10 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *flux* vertikal, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 100
Gambar 5.11 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *flux* horizontal, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 100
Gambar 5.12 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *flux* vertikal kontan, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 101
Gambar 5.13 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *flux* horizontal konstan, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 101
Gambar 5.14 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *flux* vertikal (garvitasi), (a)

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 101

Gambar 5.15 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *head top* konstan, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 102

Gambar 5.16 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas *flux* vertikal (garvitasi), (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 102

Gambar 5.17 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D *transient unsaturated infiltratio*n) dengan kondisi batas genangan (*podnding*), (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei *dkk.* (2016) 103

Gambar 5.18 Simulasi penambahan tekanan air pori Δu saat setelah terjadinya hujan dengan variasi waktu (a) t = 1 jam; (b) t = 3 jam; (c) t = 6 jam; (d) t = 9 jam; dan (e) t = 12 jam..... 104

Gambar 5.19 Simulasi tekanan air pori total u saat setelah terjadinya hujan dengan variasi waktu (a) t = 1 jam; (b) t = 3 jam; (c) t = 6 jam; (d) t = 9 jam; dan (e) t = 12 jam 105

Gambar 5.20 Titik-titik kritis dalam massa tanah (S7, S9, S11, S13, dan S15) yang mewakili zona aktif di belakang dinding *secant pile*..... 106

Gambar 5.21 Lintasan tegangan efektif pada tanah setelah terjadinya hujan dengan variasi waktu (a) t = 1 jam; (b) t = 3 jam; (c) t = 6 jam; (d) t = 9 jam; dan (e) t = 12 jam 108

Gambar 5.22 Distribusi tahanan gesek dan tahanan ujung terhadap penurunan 109

Gambar 5.23 Distribusi kapasitas tiang terhadap kedalaman akibat galian 7 meter 110

Gambar 5.24 Grafik perbandingan kapasitas ultimit dan gaya angkat (tarik) tiang terhadap kedalaman 111

Gambar 5.25 Perbandingan komponen kapasitas dukung ultimit (tahanan gesek dan tahanan ujung) antara kondisi jenuh dan tak jenuh 112

Gambar 5.26 Perubahan tekanan tanah aktif (P_a) dan pasif (P_p) terhadap waktu akibat simulasi infiltrasi 113

Hidro-Mekanik Terkopel Pada Pekerjaan Galian Dalam Dengan Dinding Penahan Tipe Secant Pile Pada
Tanah Tak Jenuh
Andika Wicaksana, Dr.Eng. Ir. Sito Ismanti, S.T., M.Eng.,IPM.
Universitas Gadjah Mada, 2025 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Gambar 5.27 Evolusi isapan matriks (tegangan isap) terhadap kedalaman akibat infiltrasi selama 12 jam 114
Gambar 5.28 Distribusi tekanan tanah aktif dan pasif terhadap kedalaman pada berbagai kondisi 114
Gambar 5.29 Perbandingan defleksi lateral dinding penahan hasil simulasi dan pengamatan 115
Gambar 5.30 Distribusi momen di sepanjang *secant pile* 116