

HALAMAN PERSETUJUAN	II
HALAMAN PENGESAHAN	III
HALAMAN PERNYATAAN	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VI
DAFTAR TABEL	IX
DAFTAR GAMBAR	X
INTISARI.....	XV
<i>ABSTRACT</i>	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 <i>Secant pile</i>	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 <i>Secant Pile</i> 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

3.5	Daya Dukung Tiang.....	40
3.5.1	Tahanan Ujung (<i>End Bearing</i>).....	40
3.5.2	Tahanan Selimut (<i>skin friction</i>)	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 (<i>Governing Equation</i>).....	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 <i>NSRP</i>	64
3.10.2	Pendugaan Parameter	67
3.10.3	Uji kesesuaian Model	68
3.11	Metode Disagregasi	69
3.12	Metode Penyesuaian (<i>Adjusting</i>).....	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



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/>

3.2	Eksplorasi Data Curah Hujan	87
5.2.1	Pemodelan <i>Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP)</i>	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 <i>Secant Pile</i> Terhadap Tekanan Tanah Lateral	112
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN		117
6.1	Kesimpulan.....	117
6.2	Saran	118
DAFTAR PUSTAKA		120

Tabel 3.1	Hubungan nilai kuat geser tak terdrainase (s_u) tanah lempung dengan hasil uji N -SPT (Ameratunga <i>dkk.</i> 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-kohefif (Ameratunga <i>dkk.</i> 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 <i>Soil-Water Characteristic Curve (SWCC)</i>	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 <i>Goodness of Fit</i> untuk skala jam-jaman.....	93
Tabel 5.8	Hasil disagregasi waktu menggunakan metode <i>proportional adjusted</i> pada tanggal 19 Maret 2020.....	96
Tabel 5.9	Lanjutan hasil disagregasi waktu menggunakan metode <i>proportional adjusted</i> 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

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 <i>dkk.</i> (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 <i>dkk.</i> (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 <i>dkk.</i> (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 <i>dkk.</i> 2010).....	22
Gambar 3.4	Diagram keseimbangan gaya pada baji tanah untuk analisis tekanan tanah aktif modifikasi dari Sahoo dan Ganesh (2018).....	23

Gambar 3.5	Modifikasi visualisasi kekuatan geser tanah tak jenuh sebagai fungsi tegangan dan isapan (Fu <i>dkk.</i> 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 <i>dkk.</i> (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 <i>dkk.</i> (2003)	45
Gambar 3.11	Modifikasi fungsi probabilitas pada distribusi geometri (Sugiyama 2016)	60
Gambar 3.12	Implementasi <i>model storm cell</i> untuk simulasi curah hujan dalam Python.....	63
Gambar 3.13	Gambar skematik model <i>NSRP</i> : (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 <i>dkk.</i> (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 <i>underpass</i> di jalan M.Yamin, Medan ..	73
Gambar 4.2	Model 3D skematik <i>underpass</i> pada tahap operasional (Dinas Sumber Daya Air, Bina Marga dan Bina Konstruksi Kota Medan, 2023)	74
Gambar 4.3	Dokumentasi proses galian dalam (<i>deep excavation</i>) yang diproteksi oleh dinding <i>secant pile</i> dan sistem penyokong (<i>strutting</i>).....	74
Gambar 4.4	Proses instalasi <i>secant pile</i> : (a) <i>dewatering</i> dan (b) pengecoran beton.	75
Gambar 4.5	Proses monitoring tekanan air pori di lapangan: (a) pemasangan unit <i>piezometer</i> dan (b) pencatatan data.	75
Gambar 4.6	Bagan alir penelitian	78
Gambar 4.7	Bagan alir model <i>Neyman-Scott Rectangular Pulse (NSRP)</i>	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

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 <i>dkk.</i> (2010)	89
Gambar 5.6	Bangkitan sebelum <i>adjusting</i> curah hujan Per-jam tahun 2020	92
Gambar 5.7	Bangkitan setelah <i>adjusting</i> 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 konstruksi tahun 2020 dengan mempertimbangkan curah hujan tahunan	95
Gambar 5.10	Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>flux</i> vertikal, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	100
Gambar 5.11	Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>flux</i> horizontal, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	100
Gambar 5.12	Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>flux</i> vertikal kontan, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	101
Gambar 5.13	Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>flux</i> horizontal konstan, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	101
Gambar 5.14	Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>flux</i> vertikal (garvitasi), (a)	

hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	101
Gambar 5.15 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>head top</i> konstan, (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	102
Gambar 5.16 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas <i>flux</i> vertikal (garvitasi), (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (2016)	102
Gambar 5.17 Validasi proses infiltrasi tak jenuh transien dua dimensi (2D <i>transient unsaturated infiltration</i>) dengan kondisi batas genangan (<i>podnding</i>), (a) hasil simulasi numeris; (b) hasil simulasi numeris yang dilakukan oleh Sanayei <i>dkk.</i> (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 <i>secant pile</i>	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



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 <i>secant pile</i>	116