

Pengaruh Durasi dan Intensitas Hujan Dengan Metode Stokastik Terhadap Kejenuhan Tanah di Area Dinding Galian Dalam: Simulasi Numerik dengan Skenario Genangan Air

Andika Wicaksana¹, Sito Ismanti^{1*}

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: sito.ismanti@ugm.ac.id

INTISARI

Penelitian ini menganalisis pengaruh durasi dan intensitas hujan terhadap profil kejenuhan tanah di area galian dalam. Metode stokastik *Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP)* diterapkan untuk membangkitkan data hujan jam-jaman sebagai input beban hidrologis yang representatif. Data tersebut diintegrasikan ke dalam simulasi numerik dengan skenario genangan air (*ponding*) guna memodelkan respons infiltrasi pada tanah tak jenuh. Hasil studi menunjukkan bahwa kombinasi durasi hujan panjang dan intensitas tinggi memicu transisi kondisi tanah dari tak jenuh menjadi jenuh, yang secara drastis mereduksi *matric suction*. Hilangnya tegangan geser tanah akibat peningkatan tekanan air pori ini terbukti meningkatkan tekanan tanah aktif secara signifikan di belakang dinding galian. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengabaian efek genangan dan variabilitas hujan stokastik dapat menyebabkan underestimasi terhadap risiko ketidakstabilan tanah pada pekerjaan galian di wilayah tropis.

Kata kunci: Saturasi, infiltrasi hujan, tekanan air pori, tekanan tanah lateral, analisis numerik.

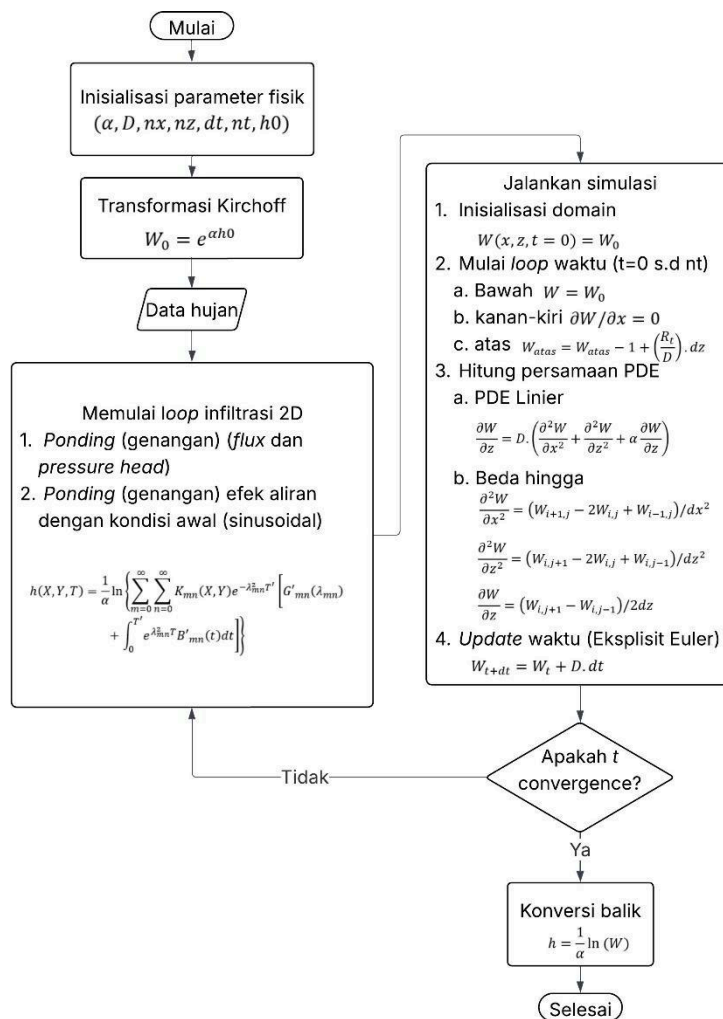
1 PENDAHULUAN

Pelaksanaan konstruksi galian dalam (*deep excavation*) di tengah kepadatan infrastruktur perkotaan bukan sekadar tantangan teknis, melainkan upaya krusial dalam mitigasi risiko lingkungan. Fokus utama pekerjaan ini bukan sekadar menjaga kestabilan lubang galian, melainkan juga melindungi bangunan di sekitarnya dari dampak pergerakan tanah. Rasool *dkk.* (2023) memperingatkan bahwa deformasi lateral yang tak terkendali merupakan ancaman nyata yang dapat merusak fondasi bangunan sekitar area galian hingga infrastruktur vital kota. Tantangan ini menjadi semakin kompleks di wilayah tropis seperti Indonesia. Di sini, curah hujan ekstrem memicu infiltrasi masif yang melemahkan sistem penahan tanah, sebuah fenomena yang menurut catatan Purnamayoga *dkk.* (2024) dan Nguyen (2025) menjadi penyebab utama berbagai kegagalan konstruksi. Insiden pada dinding *secant pile* di wilayah Sumatera Utara menjadi studi kasus relevan dalam penelitian ini mengenai bagaimana kegagalan dalam mengantisipasi respons tanah terhadap beban air hujan dapat melemahkan sistem galian tanah. Dalam desain, sering kali muncul dilema dalam menyikapi parameter kekuatan tanah. Pada kondisi tak jenuh (*unsaturated*), tanah seolah memiliki kapasitas dukung ekstra karena adanya *matric suction* yang bekerja sebagai perekat antar-butiran. Namun, mengandalkan kekuatan ini memiliki risiko besar karena sifatnya yang sementara. Transisi kritis terjadi ketika air hujan menghilangkan daya isap tersebut dan menjenuhkan tanah, sebuah proses yang jika diabaikan dalam desain, dapat memicu keruntuhan mendadak. Zhang *dkk.* (2022) menegaskan bahwa untuk memahami dinamika ini, pemetaan perilaku hidrolis melalui *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)* adalah prasyarat mutlak, karena kurva inilah yang memvisualisasikan hilangnya kekuatan tanah seiring bertambahnya kadar air. Untuk merekonstruksi mekanisme pergerakan tersebut, penelitian ini tidak dapat bergantung pada data curah hujan harian rata-rata yang terlalu kasar untuk menangkap proses infiltrasi cepat. Sebagai solusinya, digunakan model statistik *Neyman-Scott Rectangular Pulse (NSRP)*. Sebagaimana dibuktikan oleh Syafrina *dkk.* (2018) serta Yendra dan Yendra dan Desvina (2018), metode ini mampu mereplikasi detail durasi dan intensitas badai ekstrem secara presisi. Data presipitasi mendetail ini kemudian diintegrasikan ke dalam analisis hidro-mekanik terkopel (*coupled analysis*) dengan skenario genangan air (*ponding*). Pendekatan terpadu ini dinilai lebih unggul karena mampu menangkap lonjakan tekanan air pori transien, yang sangat relevan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Marasabessy (2025) bahwa faktor keamanan galian sering tergerus pada kondisi jangka panjang. Strategi analisis ini juga mempertimbangkan rasio kecepatan penggalian terhadap permeabilitas tanah, selaras dengan saran yang diberikan oleh Nguyen (2025). Pentingnya faktor fluktuasi air dalam stabilitas galian juga dikuatkan oleh temuan Zhang *dkk.* (2018) dan Goh *dkk.* (2020). Namun, menyadari kompleksitas pemodelan numerik sebagaimana disampaikan oleh Beltrán-Vargas *dkk.* (2025), validasi model menjadi hal yang wajib. Karena keterbatasan data

yang dimiliki, maka penelitian ini melakukan verifikasi ketat terhadap pola fenomena fisik yang terjadi dengan membandingkannya terhadap studi terdahulu yang teruji. Validasi dilakukan baik pada pola distribusi hujan jam-jaman maupun mekanisme pergerakan *wetting front* pada infiltrasi tanah. Tujuannya adalah memastikan bahwa simulasi yang dibangun mampu menyajikan rekonstruksi akurat mengenai bagaimana durasi dan intensitas hujan secara sistematis menjenuhkan tanah dan mereduksi stabilitas area dinding galian.

2 METODE PENELITIAN

Tahapan simulasi dimulai dengan inialisasi parameter fisik tanah (α, D) dan diskritisasi domain, dilanjutkan penerapan Transformasi Kirchoff (Gambar 1) untuk melinearisasi variabel *pressure head* (h) menjadi variabel linear (W) yang dapat dilihat pada Gambar 1. Proses komputasi menyelesaikan persamaan infiltrasi 2D adaptas Wu dkk. (2018) menggunakan skema *Finite Difference* dan integrasi waktu *Explicit Euler*, di mana input hujan jam-jaman diolah dengan kondisi batas dinamis yang mengakomodasi efek genangan (*ponding*) serta profil awal sinusoidal. Setelah konvergensi tercapai, hasil perhitungan (W) dikonversi kembali menjadi (h) melalui transformasi balik logaritma natural.



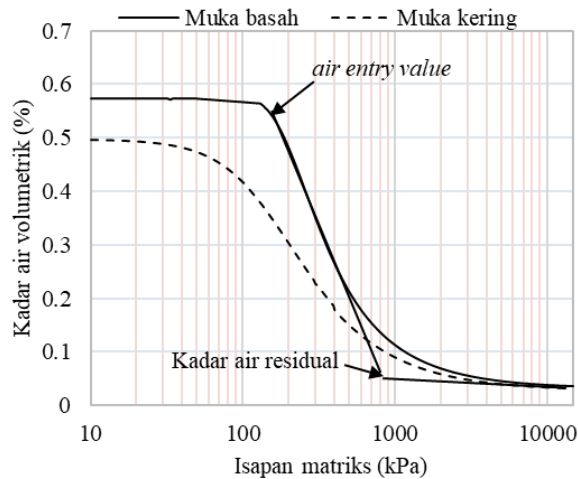
Gambar 1 Bagan alir simulasi infiltrasi air hujan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kontrol Karakteristik Air Tanah

Respons fisik tanah terhadap infiltrasi air divisualisasikan melalui *Soil Water Characteristic Curve (SWCC)* yang disajikan pada Gambar 1. Grafik ini dikembangkan berdasarkan analisis gradasi butiran sampel tanah pasir yang diambil pada kedalaman tertentu. Mengingat data stratigrafi pengeboran menunjukkan profil lapisan tanah yang relatif homogen dan didominasi pasir, satu sampel gradasi ini dianggap representatif untuk mewakili perilaku hidrolis lapisan tanah di lokasi tinjauan. Parameter hidrolis kritis, seperti *Air Entry Value (AEV)*, didekati

menggunakan korelasi empiris Fredlund (1996) untuk mengonversi data fisik gradasi menjadi parameter hidrolik. Selanjutnya, metode *fitting* Van Genuchten diterapkan guna menghasilkan kurva *SWCC* yang kontinu, di mana parameter α , n , dan m menentukan kelengkungan grafik yang presisi untuk keperluan simulasi numerik. Aspek signifikan pada Gambar 2 adalah fenomena histeresis yang mencerminkan ketergantungan perilaku tanah pada riwayat kebasahannya. Kurva muka kering (absorpsi) menunjukkan laju resapan yang lebih lambat akibat hambatan udara dalam pori, sedangkan kurva muka basah (desorpsi) menunjukkan aliran yang lebih cepat karena jalur pori telah terkoneksi air. Dinamika ini krusial dalam memprediksi profil infiltrasi dan waktu pencapaian kejenuhan penuh pada tanah di bawah pengaruh beban hidrologi stokastik yang akan dibahas pada Subbab 3.2.



Gambar 2 Kurva karakteristik air tanah (*SWCC*) yang menunjukkan zona absorpsi dan desorpsi tanah.

3.2 Observasi Data Hujan

Setelah karakteristik tanah sebagai media resapan dipahami pada Subbab 3.1, analisis dilanjutkan pada aspek beban hidrologi menggunakan data curah hujan harian tahun 2020, Mengingat sifat temporal hujan, data referensi diambil dari stasiun terdekat yaitu Stasiun Sampali dengan jarak 4,49 km di sisi timur laut, sebagaimana tersaji pada Gambar 2 yang tersaji pada Gambar 3. Histogram tersebut memperlihatkan polarisasi musim yang tajam, di mana periode basah (Januari–Mei dan Oktober–Desember) dengan curah hujan ekstrem melebihi 100 mm yang berpotensi memicu genangan (*ponding*), serta periode kering (Juni–September) dengan aktivitas hujan minimal. Namun, resolusi data harian dinilai terlalu kasar untuk merepresentasikan dinamika infiltrasi tanah yang terjadi dalam hitungan jam. Oleh karena itu, data historis ini perlu didisagregasi menjadi skala jam-jaman menggunakan pendekatan stokastik *Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP)* guna mengatasi ketiadaan data observasi jam-jaman di lokasi penelitian. Mekanisme pembentukan model stokastik ini akan diuraikan lebih lanjut pada Subbab 3.1.1.



Gambar 3 Plot data historis curah hujan selama satu tahun di tahun 2020.

3.1.1 Parameter *Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP)*

Berdasarkan data observasi curah hujan harian yang telah dipaparkan pada Subbab 3.2, analisis dilanjutkan dengan pembentukan model stokastik menggunakan metode *Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP)*. Penggunaan model

NSRP ini bertujuan untuk melakukan disagregasi data curah hujan harian menjadi data curah hujan jam-jaman (*hourly rainfall*), sehingga dapat menangkap karakteristik durasi dan intensitas hujan yang lebih detail untuk keperluan simulasi numerik. Proses estimasi parameter model dilakukan dengan mencocokkan sifat statistik dari data observasi historis dengan properti statistik teoritis model *NSRP*. Hasil estimasi parameter stokastik yang diperoleh untuk setiap bulan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Paramater stokastik *NSRP*.

Bulan	λ	β	ν	η	ζ
Januari	0.500	0.754	10.597	0.474	1.610
Februari	0.500	0.648	8.586	0.643	1.185
Maret	0.500	0.572	7.145	0.765	1.490
April	0.500	0.531	6.367	0.831	1.160
Mei	0.500	0.538	6.500	0.820	0.480
Juni	0.001	0.300	2.000	1.200	1.000
Juli	0.001	0.300	2.000	1.200	1.000
Agustus	0.001	0.300	2.000	1.200	1.000
September	0.001	0.300	2.000	1.200	1.000
Oktober	0.176	0.418	4.226	1.012	0.165
November	0.500	0.800	11.467	0.400	1.823
Desember	0.500	0.748	10.483	0.483	1.405

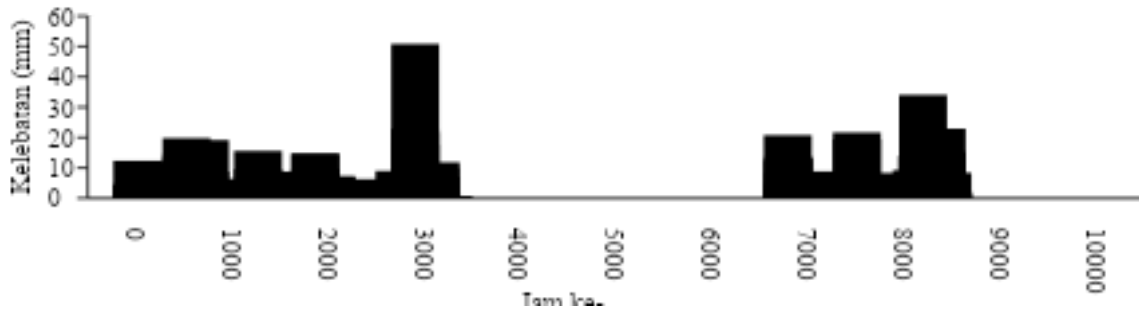
Model *NSRP* pada studi ini didefinisikan oleh lima parameter utama, yaitu (λ) Laju rata-rata kedatangan badai, (β) Parameter yang berkaitan dengan waktu tunggu rata-rata sel hujan setelah awal badai, (ν) Rata-rata jumlah sel hujan per badai, (η) Parameter yang mengontrol durasi rata-rata sel hujan, (ζ) Parameter yang mengontrol intensitas rata-rata sel hujan. Nilai estimasi parameter pada Tabel 1 memperlihatkan variasi musiman yang signifikan. Pada musim penghujan (Januari–Mei, November–Desember), nilai λ cenderung konstan (0.500) dengan ν mencapai maksimum 11.467 pada bulan November, mengindikasikan tingginya frekuensi dan kompleksitas badai. Sebaliknya, musim kemarau (Juni–September) menunjukkan penurunan aktivitas drastis di mana λ dan parameter lain konstan, merepresentasikan kelangkaan kejadian hujan. Bulan Oktober teridentifikasi sebagai periode transisi dengan nilai parameter yang moderat. Kelima parameter stokastik ini selanjutnya digunakan sebagai basis input untuk membangkitkan data curah hujan sintetik jam-jaman pada Subbab 3.1.2.

3.1.2 Hujan Skala Waktu (Jam) dan Statistik

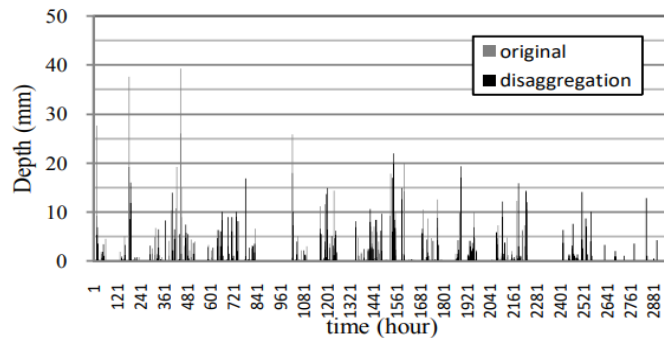
Berdasarkan parameter stokastik pada Tabel 1, dilakukan disagregasi data curah hujan harian menjadi rangkaian waktu jam-jaman (*hourly time series*) untuk periode satu tahun penuh (366 hari) pada tahun 2020. Hasil simulasi yang disajikan pada Gambar 4(a) memperlihatkan kemampuan model *NSRP* dalam menangkap karakteristik hujan ekstrem, dengan intensitas maksimum mencapai kisaran 50 mm/jam pada pertengahan tahun, selaras dengan tingginya nilai parameter λ dan ν pada musim basah. Mengingat ketiadaan data observasi jam-jaman *in-situ*, validasi model dilakukan melalui pendekatan komparatif terhadap studi Hidayah *dkk.* (2010) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4(b). Meskipun lokasi tinjauan berbeda, perbandingan visual mengonfirmasi kesesuaian pola karakteristik hujan tropis yang logis, yaitu adanya pengelompokan kejadian hujan (*rain cells clustering*) yang diselingi periode kering, serta distribusi intensitas yang didominasi hujan ringan namun memiliki puncak (*peaks*) signifikan dalam durasi singkat.

Selain verifikasi visual, analisis kuantitatif dilakukan terhadap karakteristik statistik data curah hujan jam-jaman yang dirangkum pada Tabel 2. Data ini mempertegas polarisasi musim yang dihasilkan model stokastik: periode kemarau ekstrem (Juni–September) dengan curah hujan nol, selaras dengan parameter *input* λ yang rendah pada Subbab 3.1.1, dan periode basah (Januari–Mei, Oktober–Desember) yang menunjukkan fluktuasi dinamis dengan standar deviasi tinggi. Meskipun intensitas maksimum tahunan terjadi pada bulan Mei (50.784 mm/jam), studi ini menyoroti kejadian spesifik pada 19 Maret 2020 pukul 14:00 WIB, di mana teridentifikasi intensitas hujan sebesar 38.6 mm. Kejadian ini krusial karena bertepatan dengan periode kritis observasi lapangan. Replikasi hujan ke skala jam sangat vital untuk merekam jejak historis hujan (*rainfall history*), mengingat kejenuhan tanah adalah proses kumulatif, bukan instan. Infiltrasi bertahap dari kejadian hujan sebelumnya (*antecedent rainfall*) berperan

menurunkan hisapan matriks (*matric suction*) dan mereduksi tegangan geser tanah secara progresif. Oleh karena itu, data hujan jam-jaman ini divalidasi sebagai fungsi beban hidrologis (*transient boundary condition*) yang representatif untuk analisis numerik selanjutnya pada subbab 3.2.



(a)



(b)

Gambar 4 Verifikasi curah hujan skala waktu atau per-jam (a) plot curah hujan tahun 2020 selama 366 hari; (b) curah hujan di Bandar Lampung tahun 2008 selama 120 hari berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hidayah *dkk.* (2010).

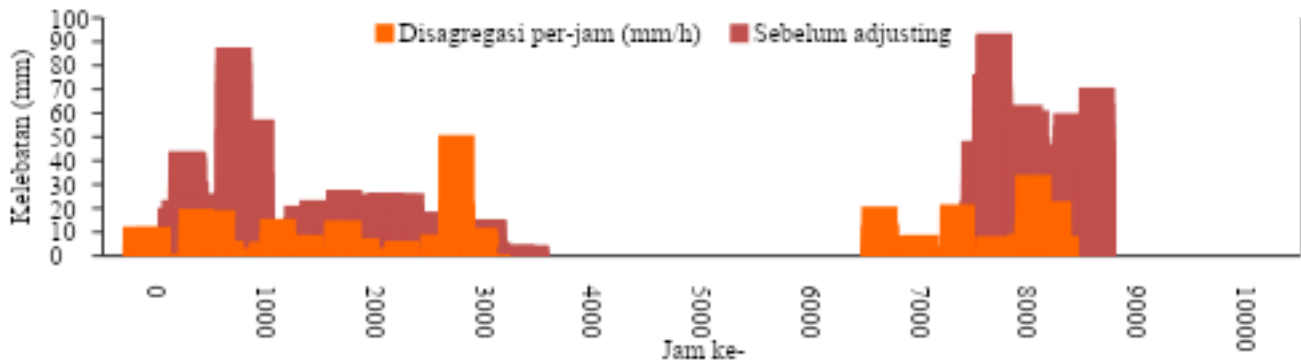
Tabel 2 Karakteristik curah hujan per-jam.

Bulan	Rata-rata	Std Dev	Min	Maks
Januari	0.304	1.715	0.000	19.782
Februari	0.172	1.014	0.000	15.568
Maret	0.284	1.205	0.000	14.652
April	0.119	0.740	0.000	8.982
Mei	0.218	2.382	0.000	50.784
Juni	0.000	0.000	0.000	0.000
Juli	0.000	0.000	0.000	0.000
Agustus	0.000	0.000	0.000	0.000
September	0.000	0.000	0.000	0.000
Oktober	0.191	1.341	0.000	20.755
November	0.178	1.281	0.000	21.628
Desember	0.296	2.087	0.000	34.031
Total Tahunan	0.147	1.283	0.000	50.784

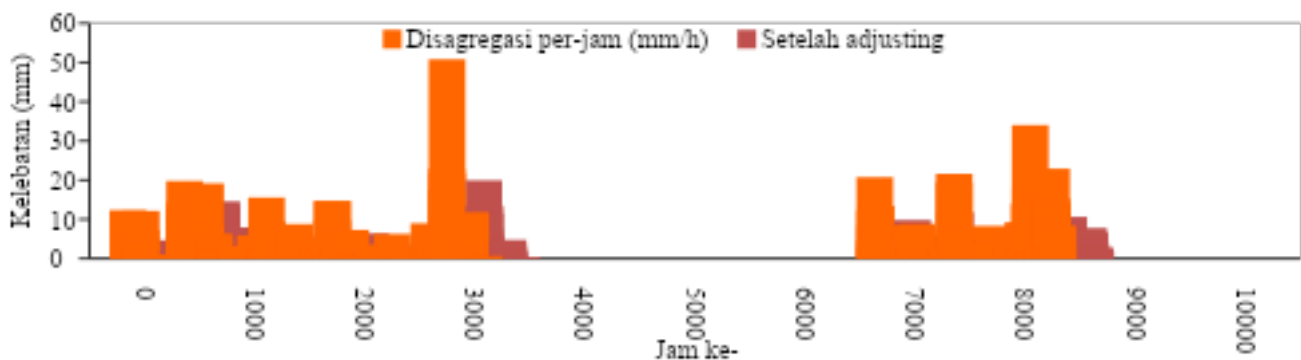
3.3 Disagregasi Waktu dan *Adjusting Model* Bangkitan Curah Hujan

Walaupun model NSRP (Subbab 3.1.2) mampu membangkitkan pola hujan, selisih akumulasi total terhadap data harian observasi kerap terjadi sehingga memerlukan koreksi (*adjusting*) demi konsistensi neraca air. Gambar 5 memperlihatkan kondisi sebelum koreksi, di mana *timing* kejadian hujan telah sesuai namun magnitudonya mengalami deviasi akibat sifat acak variabel intensitas (ξ) pada model *NSRP*. Untuk mengatasi diskrepansi tersebut, dilakukan proses *adjusting* atau penyesuaian proporsional. Prinsip dasar dari metode ini adalah mengalikan intensitas hujan jam-jaman hasil bangkitan dengan faktor koreksi, sedemikian rupa sehingga jumlah curah hujan jam-jaman dalam satu hari sama persis dengan data curah hujan harian observasi pada hari yang bersangkutan. Hasil dari proses penyesuaian ini divisualisasikan pada Gambar 6. Sebagaimana ditunjukkan pada

Gambar 6, setelah dilakukan *adjusting*, plot grafik Setelah *adjusting* kini memiliki kesesuaian yang presisi dengan target disagregasi. Tidak lagi terlihat adanya penyimpangan magnitudo yang signifikan, kedua grafik tersebut berimpit dengan baik sepanjang durasi tinjauan (8.784 jam). Keberhasilan proses *adjusting* ini mengonfirmasi bahwa data curah hujan jam-jaman yang dihasilkan tidak hanya valid secara pola distribusi waktu (stokastik), tetapi juga akurat secara kuantitas volume. Dengan demikian, rangkaian data hujan pada Gambar 6 ini telah memenuhi syarat *input* hidrologis yang reliabel untuk digunakan dalam simulasi numerik infiltrasi dan simulasi penjenjuran tanah pada subbab 3.3.



Gambar 5 Hujan bangkitan sebelum *adjusting*.



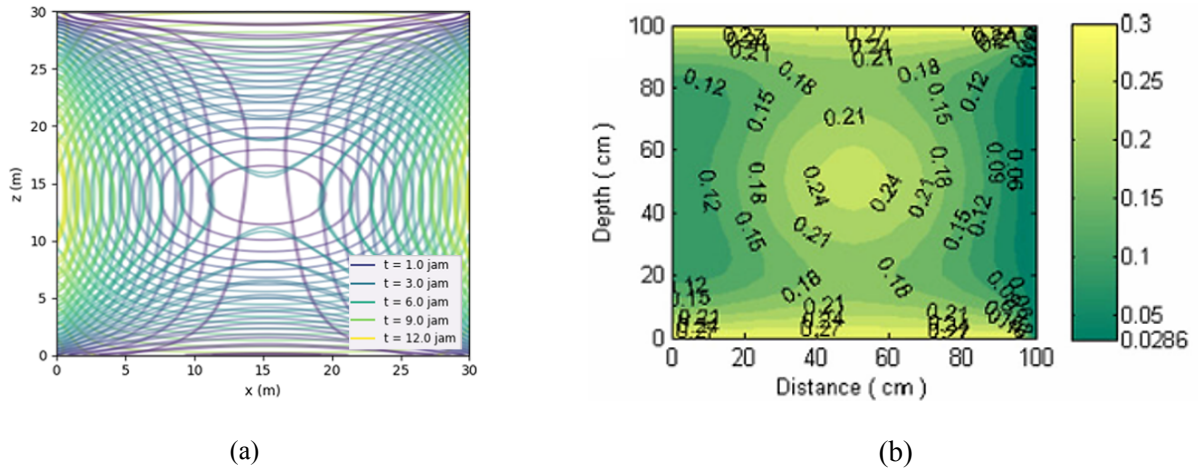
Gambar 6 Hujan bangkitan setelah *adjusting*.

3.3 Infiltrasi Air Hujan

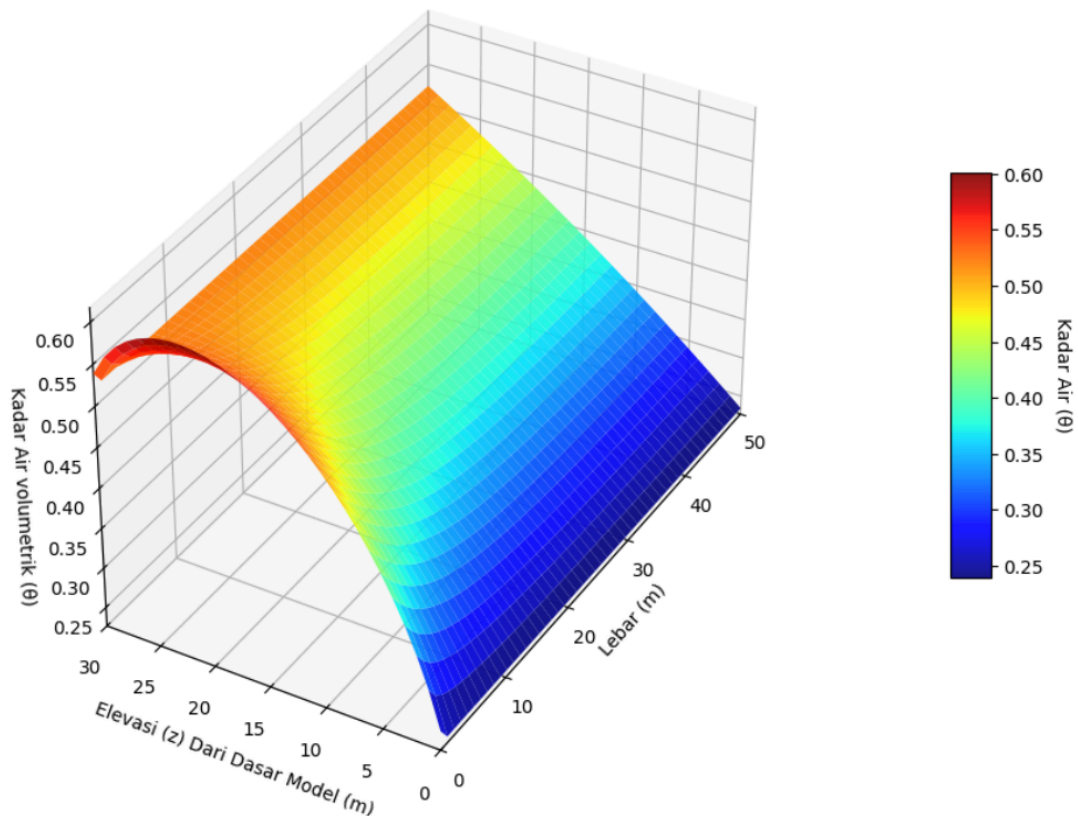
Analisis dalam studi ini berlanjut pada tahap simulasi numerik untuk mengamati perilaku infiltrasi, dengan memanfaatkan data hujan jam-jaman yang validitasnya telah teruji. Untuk memodelkan bagaimana air bergerak di dalam media tanah tak jenuh, digunakan persamaan Richards yang berlandaskan pada hukum Darcy. Pendekatan yang diterapkan pada kondisi batas permukaan bersifat dinamis, ketika intensitas hujan masih rendah maka model menggunakan kondisi fluks, namun begitu kapasitas infiltrasi tanah terlampaui, simulasi beralih menggunakan pendekatan Dupuit-Forchheimer untuk menangkap fenomena genangan atau *ponding* yang terjadi di lapangan. Sebagai langkah verifikasi, evolusi profil pembasahan (*wetting front*) selama periode 12 jam yang disajikan pada Gambar 7(a) telah divalidasi dan menunjukkan keselarasan pola dengan hasil studi dari Sanayei dkk. (2016), sehingga model ini dapat diandalkan. Perlu diperhatikan pada visualisasi 3D pada Gambar 8 yang memetakan sebaran kadar air volumetrik (θ) secara spasial. Untuk membaca grafik ini dengan tepat, penting untuk memahami orientasi sumbu vertikal yang digunakan, angka pada sumbu ini merepresentasikan elevasi atau ketinggian dari dasar model (z), bukan kedalaman dari permukaan. Artinya, posisi $z=0$ m adalah dasar lapisan tanah, sedangkan $z=30$ m adalah permukaan tanah tempat hujan turun. Oleh karena itu, konsentrasi *shading* berwarna merah pada angka 30 justru menunjukkan bahwa permukaan tanahlah yang mengalami kejenuhan akibat genangan air.

Gradasi *shading* warna yang perlahan berubah menjadi kuning dan biru saat bergerak ke angka yang lebih kecil mengindikasikan bahwa air sedang merambat turun dari permukaan menuju lapisan yang lebih dalam akibat gaya gravitasi, sehingga lapisan terdalam belum sepenuhnya dibasahi dan memiliki kadar air yang lebih rendah. Terkait interpretasi nilai yang tersaji pada skala warna yang tertera pada Gambar 8, rentang angka 0.25 hingga 0.60 dinyatakan dalam satuan fraksi volume, yang ekuivalen dengan kadar air 25% hingga 60%. Angka maksimum 0.60

merefleksikan kondisi tanah yang telah mencapai kejenuhan penuh, suatu kondisi yang mengingatkan bahwa karakteristik tanah di lokasi studi memiliki porositas tinggi dan daya tampung air yang besar. Di sisi lain, angka 0.25 merepresentasikan kondisi awal tanah sebelum terjadinya infiltrasi. Secara mekanis, pencapaian kondisi jenuh di permukaan ini menjadi indikator penting hilangnya hisapan matriks (*matrix suction*).



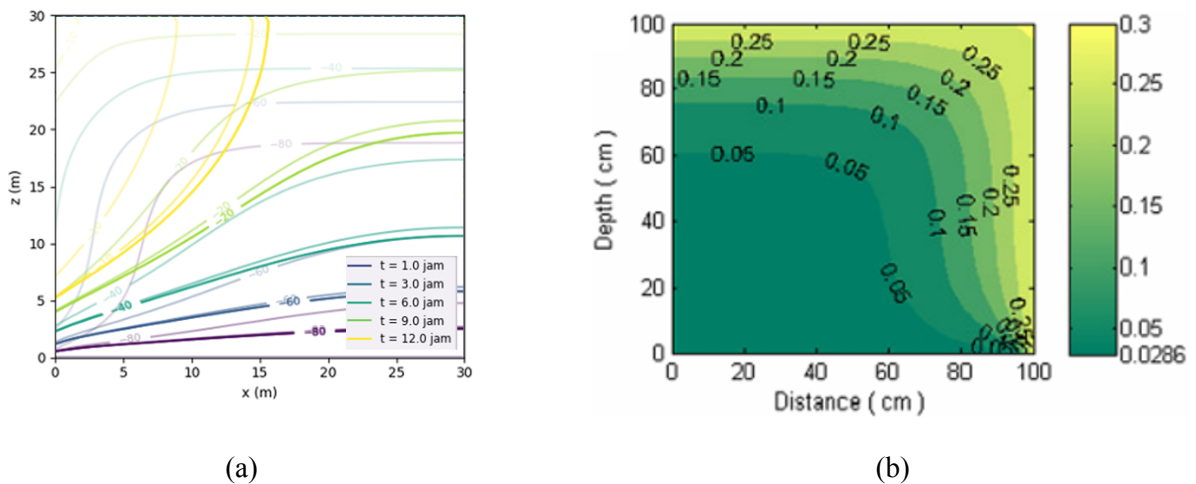
Gambar 7 Simulasi infiltrasi memperhitungkan efek genangan (*ponding*) dengan kondisi batas gabungan (*fluks* dan *pressure head*): (a) hasil simulasi numerik; (b) validasi model terhadap studi Sanayei *dkk.* (2016).



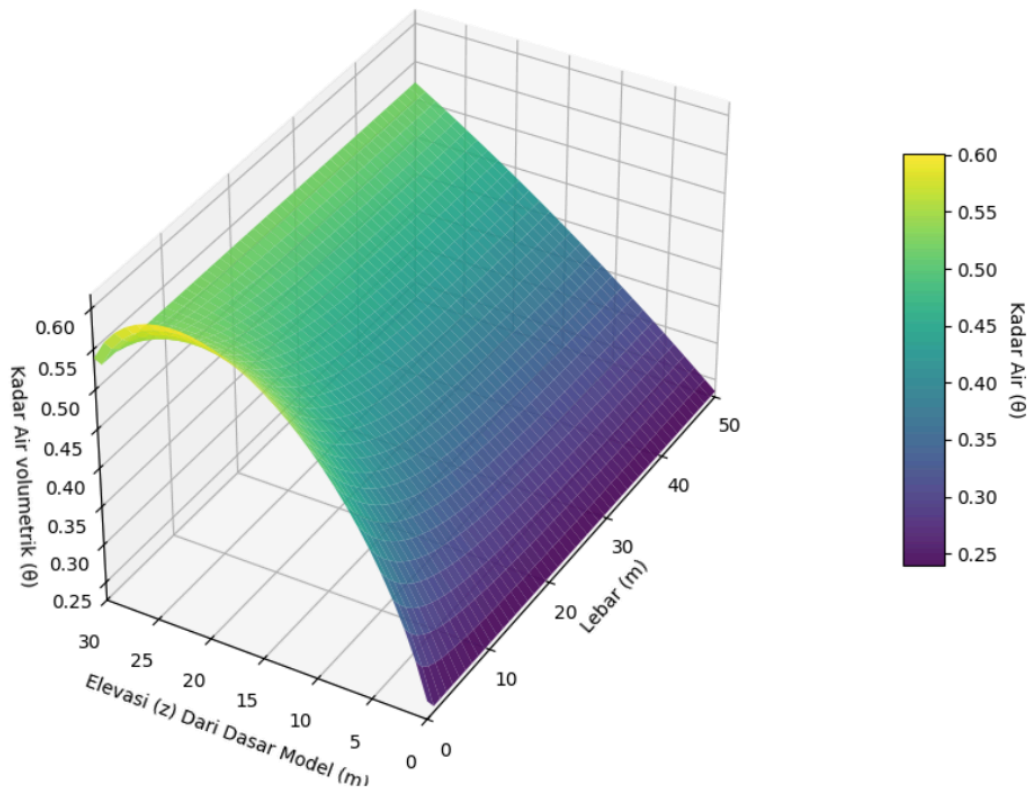
Gambar 8 Simulasi infiltrasi memperhitungkan efek genangan (*ponding*) dengan kondisi batas gabungan (*fluks* dan *pressure head*) berdasarkan elevasi, lebar, dan kada air.

Kemudian, pengujian terhadap keandalan model numerik dalam studi ini diperluas dengan menerapkan kondisi awal muka air tanah berbentuk sinusoidal. Pendekatan ini diambil untuk merepresentasikan geometri hidraulik

yang tidak seragam, sebuah kondisi yang jauh lebih realistis dalam menggambarkan variabilitas stratigrafi lapisan tanah alami dibandingkan asumsi lapisan datar yang ideal. Hasil simulasi yang terekam pada Gambar 9(a) memperlihatkan bahwa distribusi *pressure head* dan evolusi profil pembasahan secara konsisten mengikuti pola gelombang sinusoidal tersebut dari awal hingga akhir simulasi pada jam ke-12. Validasi silang terhadap studi referensi Sanayei dkk. (2016) pada Gambar 9(b) semakin mengonfirmasi akurasi model yang dikembangkan, di mana pola kontur kadar air dan kedalaman infiltrasi yang dihasilkan terbukti cukup identik dengan literatur tersebut. Fokus analisis visual kemudian diarahkan pada representasi 3D dalam Gambar 10, yang mempertegas respons spasial model terhadap kondisi awal yang lebih kompleks. Dalam membaca grafik ini, penting untuk kembali memahami orientasi spasialnya, di mana sumbu vertikal merepresentasikan elevasi (z) dari dasar model, di mana angka 0 adalah lapisan tanah terbawah dan angka 30 adalah permukaan tanah. Oleh karena itu, gradasi *shading* berwarna kuning terang hingga hijau muda dengan nilai θ mendekati 0.60 pada bagian atas grafik mencerminkan zona permukaan yang telah mengalami pembasahan intensif. Hal yang paling menarik dari visualisasi ini adalah permukaan profil air yang tidak datar, melainkan melengkung secara halus melintasi sumbu lebar model. Lengkungan atau kurvatur pada bidang gradasi warna tersebut merupakan jejak visual yang membuktikan bahwa model mampu mempertahankan bentuk sinusoidal dari kondisi awal, sekaligus mensimulasikan proses difusi air yang merata ke arah bawah menuju zona berwarna ungu dengan kadar air 0.25. Selain itu, Terkait dengan besaran nilai yang ditampilkan dengan rentang skala warna 0.25 hingga 0.60 merepresentasikan fraksi volume seperti yang telah dijelaskan juga sebelumnya pada uraian Gambar 8. Hal ini bermakna bahwa tanah bergerak dari kondisi kadar air residual 25% di lapisan dalam menuju kondisi jenuh 60% di permukaan. Stabilitas bentuk lengkungan sinusoidal pada plot 3D ini memberikan bukti kuat bahwa algoritma numerik yang dibangun memiliki keandalan (*robustness*) yang tinggi. Model terbukti tidak mengalami osilasi atau *error* numerik meskipun dihadapkan pada kondisi batas non-linear dan geometri awal yang tidak seragam, sehingga dapat diandalkan sebagai instrumen prediksi stabilitas untuk kasus-kasus geoteknik yang kompleks di lapangan.



Gambar 9 Simulasi infiltrasi dengan efek genangan (*ponding*) pada kondisi awal sinusoidal: (a) hasil simulasi numerik; (b) validasi model terhadap studi Sanayei dkk. (2016).



Gambar 10 3D plot infiltrasi dengan efek genangan (*ponding*) pada kondisi awal sinusoidal berdasarkan elevasi, lebar, dan kadar air.

KESIMPULAN

Berdasarkan rangkaian analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode stokastik *Neyman-Scott Rectangular Pulses (NSRP)* telah berhasil mendetailkan karakteristik durasi dan intensitas hujan dari skala harian menjadi jam-jaman. Model ini mampu menangkap perilaku hujan ekstrem seperti kejadian pada 19 Maret 2020 yang menjadi *input* hidrologis kritis dalam studi ini. Hasil disagregasi tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam simulasi numerik dengan skenario genangan air, yang terbukti valid baik pada kondisi batas sederhana maupun kompleks (sinusoidal). Simulasi menunjukkan bahwa durasi hujan yang panjang dan intensitas yang tinggi secara progresif meningkatkan kadar air tanah melalui proses infiltrasi, yang secara fisik mereduksi hisapan matriks. Hal ini menegaskan korelasi langsung dengan judul penelitian, yaitu bahwa variabilitas hujan stokastik memainkan peran fundamental dalam mengubah profil kejenuhan tanah, yang pada akhirnya menjadi mekanisme utama penyebab penurunan stabilitas di area dinding galian dalam.

REFERENSI

- Beltrán-Vargas, D., García-Páez, F., Martínez-Morales, M., dan Rentería-Guevara, S.A., 2025. Novel Numerical Modeling of a Groundwater Level-Lowering Approach Implemented in the Construction of High-Rise/Complex Buildings. *Water*, 17 (5), 732.
- Fredlund, D.D., 1996. *The Emergence of Unsaturated Soil Mechanics*. Fourth Spenser J. Buchanan Lecturer. Texas: A & M University Press.
- Goh, A.T.C., Zhang, R.H., Wang, W., Wang, L., Liu, H.L., dan Zhang, W.G., 2020. Numerical study of the effects of groundwater drawdown on ground settlement for excavation in residual soils. *Acta Geotechnica*, 15 (5), 1259–1272.
- Hidayah, E., Anwar, N., dan Iriawan, N., 2010. Evaluating Error of Temporal Disaggregation from Daily into Hourly Rainfall using Heytos Model at Sampelan Catchments Area, 21 (1).
- Marasabessy, M.I., 2025. Numerical Analysis of Stability in Basement Excavations: The Influence of Undrained and Drained Conditions on Soft Soils in Surabaya, 8.

- Nguyen, K.T., 2025. Sep-Numerical Coupling Simulation of Groundwater Flow and Deformation in Excavation of Foundation Pit. *Journal of Water Management Modeling*.
- Purnamayoga, W., Saputra, T.R., Maulana, M.A., dan Winurseto, W.S., 2024. Excavation Slopes Stability Analysis with Cracked Soil in the Construction of the Serang – Panimbang Toll Road (STA 54+625) Under Maximum Rainfall Condition. *Journal of Infrastructure & Facility Asset Management*, 6 (0).
- Rasool, A.M., Niazi, F.S., Ahmed, T., dan Aziz, M., 2023. A parametric investigation on effect of supporting arrangements on earth retention system. *Geomechanics and Engineering*, 33 (5), 507–518.
- Sanayei, H.R.Z., Rakhshandehroo, G.R., dan Talebbeydokhti, N., 2016. New Analytical Solutions to 2-D Water Infiltration and Imbibition into Unsaturated Soils for Various Boundary and Initial Conditions. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 40 (3), 219–239.
- Syafrina, A.H., Norzaida, A., dan Noor Shazwani, O., 2018. Stochastic Modeling of Rainfall Series in Kelantan Using an Advanced Weather Generator. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8 (1), 2537–2541.
- Wu, L.Z., Xu, Q., dan Wang, T., 2018. Incorporating Hydromechanical Coupling of Unsaturated Soils into the Analysis of Rainwater-Induced Groundwater Ponding. *International Journal of Geomechanics*, 18 (6), 06018010.
- Yendra, R. dan Desvina, A.P., 2018. A Rainfall Model Comparison by Using Stochastic Neyman- Scott Rectangular Pulse (NSRP) and Bartlett-Lewis Rectangular Pulse (BLRP).
- Zhang, W., Wang, W., Zhou, D., Zhang, R., Goh, A.T.C., dan Hou, Z., 2018. Influence of groundwater drawdown on excavation responses – A case history in Bukit Timah granitic residual soils. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10 (5), 856–864.
- Zhang, X.-Q., Li, M.-G., dan Chen, J.-J., 2022. Hydro-mechanical analysis of a braced foundation pit affected by rainfall and excavation in unsaturated soils. *Acta Geotechnica*, 17 (12), 5675–5690.