

Variasi Suhu dan Kelembapan Subgred di Bawah Simulasi Hujan Buatan

Zuhayr Md Ghazaly¹, Noor Halizah Abdullah^{*2}, dan Abdul Naser Abdul Ghani²

¹*Fakulti Kejuruteraan dan Teknologi Awam, Universiti Malaysia Perlis
02600 Arau, Perlis.*

²*Pusat Pengajian Perumahan, Bangunan, dan Perancangan
Universiti Sains Malaysia
11800 USM, Pulau Pinang.*

^{*}Pengarang Berurusan: nhalizah@usm.my

Abstrak

Kajian ini bertujuan untuk menilai kesan variasi keamatan dan tempoh hujan terhadap perubahan suhu serta kelembapan dalam tanah subgred. Faktor ini juga adalah kritikal dalam menentukan kestabilan struktur dan prestasi jangka panjang sistem turapan di kawasan beriklim tropika lembap. Dua jenis tanah subgred berklasifikasi AASHTO A-2-6 diperoleh daripada dua kuari di negeri Perlis, masing-masing mewakili jenis pasir bergradasi rendah (SP) dan pasir bergradasi baik (SW). Selain itu, kajian menggunakan simulator hujan buatan yang dibina khas untuk meniru keadaan hujan sebenar berdasarkan data keamatan hujan ekstrem dari Jabatan Meteorologi Malaysia antara tahun 2013 hingga 2024. Tiga kadar keamatan hujan digunakan (2.14, 2.49 dan 2.74 mm/min) dengan empat tempoh pendedahan berbeza (30, 60, 90 dan 120 minit). Sampel tanah dipadatkan ke dalam acuan Nisbah Galas California (CBR) bersaiz piawai dan dilengkapi dengan sensor digital pada tiga kedalaman berbeza (atas, tengah, dan bawah) untuk merekod perubahan suhu dan kelembapan secara masa nyata. Selain itu, ujian-ujian geoteknikal seperti ayakan, had Atterberg dan pemadatan Proctor turut dilaksanakan bagi menentukan sifat fizik tanah dan kesesuaiannya sebagai bahan asas jalan. Hasil kajian menunjukkan peningkatan kelembapan yang ketara pada lapisan atas tanah dan penurunan suhu progresif seiring dengan peningkatan keamatan hujan, menandakan kewujudan hubungan langsung antara infiltrasi air dan kehilangan haba tanah. Selain itu juga, tanah dari Kuari 1 menunjukkan peningkatan kandungan kelembapan tertinggi sebanyak 53.8%, manakala Kuari 2 menunjukkan penurunan suhu paling besar iaitu 7.8°C. Perbezaan ini dikaitkan dengan variasi tekstur, pemadatan, dan kebolehtelapan semula jadi tanah. Penemuan ini bukan sahaja menegaskan pentingnya pemilihan bahan subgred yang sesuai mengikut ciri iklim setempat, malah menyediakan asas saintifik untuk pembangunan strategi rekabentuk dan pemodelan prestasi turapan yang lebih berdaya tahan terhadap perubahan iklim.

Kata kunci: CBR, kelembapan subgred, kestabilan tanah, keamatan hujan, simulasi hujan buatan.

Variation of Subgrade Temperature and Moisture Under Simulated Rainfall Conditions

Abstract

This study aims to evaluate the effects of variations in rainfall intensity and duration on changes in temperature and moisture within the subgrade soil. These factors are critical in determining the structural stability and long-term performance of pavement systems in humid tropical regions. Two types of AASHTO A-2-6 classified subgrade soils were obtained from two quarries in Perlis, each representing poorly graded sand (SP) and well-graded sand (SW). Additionally, the study employed a specially constructed artificial rainfall simulator designed to replicate actual rainfall conditions based on extreme rainfall intensity data from the Malaysian Meteorological Department from year 2013 until 2024. Three rainfall intensities (2.14, 2.49, and 2.74 mm/min) and four exposure durations (30, 60, 90, and 120 minutes) were applied. The soil samples were compacted into standard California Bearing Ratio (CBR) molds and equipped with digital sensors at three different depths (top, middle, and bottom) to record real-time temperature and moisture changes. Furthermore, geotechnical tests such as sieve analysis, Atterberg limits, and the Proctor compaction test were conducted to determine the physical properties and suitability of the soils as subgrade materials. The results revealed a significant increase in moisture content at the upper soil layer and a progressive decrease in temperature with increasing rainfall intensity, indicating a direct relationship between water infiltration and soil heat loss. Additionally, soil from Quarry 1 recorded the highest increase in moisture content (53.8%), while soil from Quarry 2 exhibited the greatest temperature drop (7.8°C). These differences were attributed to variations in texture, compaction, and natural permeability of the soils. The findings not only emphasize the importance of selecting subgrade materials suitable for local climatic conditions but also provide a

scientific basis for developing resilient pavement design and performance modeling strategies to withstand the impacts of climate variability.

Keywords: CBR, subgrade moisture, soil stability, rainfall intensity, artificial rainfall simulation.

Article history:

Submitted: 27/10/2025; Revised: 18/11/2025; Accepted: 20/12/2025; Online: 24/12/2025

PENDAHULUAN

Air merupakan punca utama kepada kegagalan subgred jalan (Alex et. al. 2014). Hujan merupakan salah satu sumber yang membekalkan air dan menambah kelembapan dalam tanah subgred, yang tahapnya berbeza mengikut perubahan musim. Di Malaysia, kelembapan subgred dipengaruhi oleh corak hujan bermusim, khususnya semasa Monsun Timur Laut yang berlaku antara bulan Oktober hingga Mac setiap tahun. Ketika hujan lebat, kandungan lembapan dalam subgred akan meningkat dan seterusnya menjejaskan kekuatan tanah asas. Keadaan ini boleh mengurangkan kapasiti galas beban subgred dan menyebabkan kerosakan struktur akibat tekanan beban trafik (Han dan Cheng 2015; Nguyen et al. 2010). Oleh itu, penyelidikan terhadap kesan corak hujan terhadap perubahan lembapan subgred adalah penting bagi mengelakkan kegagalan kejuruteraan jalan serta membolehkan kaedah rawatan yang lebih berkesan dicadangkan bagi mengurangkan risiko kerosakan lanjut. Kajian ini menyasarkan matlamat untuk membina simulasi hujan yang sebenar berdasarkan rekod data hujan ekstrem dari tahun 2013 hingga 2024. Keunikan kaedah simulasi dalam kajian ini adalah penyiataan perubahan suhu dan kelembapan tanah yang dipengaruhi oleh keamatan hujan terkawal menggunakan acuan CBR bersaiz piawai. Simulasi yang selari turut dijalankan untuk menyalut kekuatan tanah subgred melalui ujian CBR. Oleh itu, penyiataan ini dapat memberikan hubung kait secara terus antara kekuatan dan kelembapan tanah subgred. Kelebihan kaedah ini adalah muncung air yang digunakan untuk simulator hujan buatan ini adalah kecil dan menjimatkan kos kerana tidak memerlukan pam air.

KAJIAN LITERATUR

Kerosakan subgred akibat kelembapan daripada hujan boleh dinilai melalui ujian kekuatan subgred seperti ujian California Bearing Ratio (CBR). Selain itu, variasi corak hujan memainkan peranan penting dalam menganalisis kadar dan kedalaman penembusan lembapan ke dalam tanah subgred. Corak iklim adalah berbeza dan unik bagi setiap negara. Banyak penyelidik telah membangunkan alat penyimulasi hujan dan melaksanakan corak hujan berdasarkan data tempatan bagi kawasan tertentu (Betani et al. 2018; Hou et al. 2020). Menurut Betani et al. (2018), tiada satu piawaian khusus bagi reka bentuk penyimulasi hujan yang boleh digunakan untuk semua keadaan. Reka bentuk sistem simulasi hujan bergantung kepada parameter seperti frekuensi, tempoh dan keamatan hujan yang ditetapkan mengikut objektif kajian (Zhu et al. 2019; Liu et al. 2020; Zhao et al. 2011). Kajian mengenai kesan penembusan air hujan terhadap kelembapan subgred masih kurang dijalankan di Malaysia. Selain itu, tanah subgred yang diambil daripada kuari berbeza menunjukkan ciri kelembapan yang tidak sama apabila terdedah kepada hujan dan banjir bergantung pada sifat mineral dan tekstur tanahnya (Radzi et al. 2017; Nazri, Zamani dan Singh 2018). Oleh itu, pembangunan sistem simulasi hujan yang direka khusus bagi menyalut kesan kelembapan terhadap tanah subgred akibat corak hujan di Malaysia adalah amat diperlukan.

Corak hujan maksimum dan minimum tahunan di Malaysia boleh diperoleh melalui laman sesawang Jabatan Meteorologi Malaysia (2024). Variasi musim hujan di Semenanjung Malaysia terbahagi kepada tiga kawasan utama iaitu di negeri-negeri pantai timur, di kawasan barat daya dan di seluruh Semenanjung yang lain. Musim hujan ini berlaku pada Monsun Timur Laut (Oktober-Mac), Monsun Antara (Mac-Mei dan September-November) dan Monsun Barat Daya (Mei-September). Purata taburan hujan tahunan di Malaysia dari 2013 hingga 2022 telah disenaraikan dalam Jadual 1. Berdasarkan Jadual 1, taburan hujan tahunan yang tertinggi di bahagian Semenanjung Malaysia telah direkodkan oleh stesen cuaca di Kuantan, Pahang pada tahun 2022 sebanyak 4197 mm. Manakala di Semenanjung Barat Malaysia pula, stesen cuaca di Kuching, Sarawak telah merekodkan taburan hujan tahunan tertinggi sebanyak 5441 mm. Selain itu, menurut Jabatan Meteorologi Malaysia (2024), hujan sejam tertinggi ialah 164.6 mm (2.74 mm/min) di Perai, Pulau Pinang pada 14 Ogos 2017. Catatan terkini bagi hujan sejam tertinggi pada tahun 2024 pula ialah 128.6 mm (2.14 mm/min) yang direkodkan di Kerteh, Terengganu pada 29 November 2024. Oleh itu, keamatan hujan yang sesuai berdasarkan cuaca ekstrem di Malaysia yang digunakan bagi simulasi hujan buatan kajian ini ditetapkan pada tiga kadar keamatan hujan iaitu 2.14 mm/min, 2.49 mm/min dan 2.74 mm/min.

Jadual 1: Purata taburan hujan tahunan di Malaysia dari 2013 hingga 2022 (Jabatan Meteorologi Malaysia 2024)

Stesen cuaca	Purata hujan (mm)									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Subang, Selangor	2085	2570	3250	2638	2631	3543	3141	3238	3508	2800
Kuantan, Pahang	3471	3781	1914	2230	2955	2777	1924	2407	4122	4197
Kuala Terengganu, Terengganu	2947	2874	1863	2935	3088	2659	2063	2951	2285	3602
Batu Pahat, Johor	1889	2374	1814	1858	1581	1972	1922	2056	2684	2861
Kota Bharu, Kelantan	2274	2998	2071	2641	3375	2892	1706	2987	2534	4051
Alor Setar, Kedah	1816	2103	2157	1904	2767	2084	2185	2413	2277	2199
Kuala Pilah, N. Sembilan	1621	1351	1620	1476	1877	1951	1308	1709	1771	2276
Ipoh, Perak	2691	2485	2954	1940	3304	3078	2810	3279	2959	3340
Butterworth, P. Pinang	2741	2270	2425	2562	2545	2276	2163	2166	1988	2079
Melaka, Melaka	1393	1830	2213	2243	2335	1976	1618	1871	2476	2684
Chuping, Perlis	1710	1805	2010	1450	1975	1844	1558	2200	2087	2154
K. Kinabalu, Sabah	3114	3028	2006	2091	3152	2328	2522	3461	3589	3550
Kuching, Sarawak	4002	3517	4554	5441	3741	3867	3312	4090	4442	3842

Kajian yang komprehensif terhadap kesan kelembapan terhadap pelbagai jenis tanah subgred diperlukan bagi memahami interaksi antara air dan tanah secara lebih mendalam. Beberapa penyelidik telah membangunkan sistem simulasi hujan buatan untuk meniru keadaan hujan sebenar bagi kawasan tertentu. Kesan kelembapan terhadap tanah subgred akibat corak hujan dan tempoh pendedahan yang berbeza dapat diperhatikan bagi menilai perubahan kekuatan subgred. Penyimulasi hujan dibangunkan bagi meniru corak hujan sebenar dan membolehkan penghasilan semula hujan semula jadi dalam keadaan terkawal. Namun begitu, tiada satu piawaian khusus bagi penyimulasi hujan yang sesuai digunakan untuk semua keadaan. Oleh itu, pembangunan sistem penyimulasi hujan telah direka bentuk bagi mensimulasikan pelbagai senario yang mewakili ciri-ciri hujan sebenar di lapangan seperti yang disenaraikan dalam Jadual 2. Hujan buatan yang dihasilkan serta-merta mengikut keamatan dan tempoh yang dikehendaki, sekali gus membolehkan pengumpulan data dijalankan dengan cepat di bawah keadaan yang seragam. Betani et al. (2019) telah membangunkan satu penyimulasi hujan bagi menilai prestasi hidrologi turapan telap jenis turapan telap air kolam mikro takungan (MDPP). Peranti simulasi hujan yang direka bentuk sendiri ini membolehkan pelarasan keamatan hujan, keseragaman taburan hujan, saiz titisan, dan halaju titisan bagi meniru hujan semula jadi dengan tahap ketepatan yang tinggi. Sementara itu, Hou et al. (2020) telah mereka bentuk penyimulasi hujan dalaman untuk mengkaji lima jenis struktur turapan dengan menggunakan empat tahap keamatan hujan buatan iaitu 2.5 mm/min, 3.4 mm/min, 4.6 mm/min dan 5.5 mm/min. Reka bentuk penyimulasi ini bertujuan untuk menilai pengaruh struktur turapan telap terhadap aliran permukaan air hujan di kawasan bandar, hubungan antara perubahan kandungan lembapan tanah subgred, serta kesan kandungan awal air tanah terhadap kadar penembusan hujan. Walau bagaimanapun, faktor seperti aras air bawah tanah, lapisan penambat beku, dan keadaan beban trafik turut mempengaruhi kadar penembusan serta ciri saluran bagi sistem turapan telap. Kajian terdahulu telah membangunkan penyimulasi hujan bagi meneliti aliran permukaan, penembusan air, dan hakisan tanah di bawah keadaan terkawal, yang secara signifikan telah menyumbang kepada pemahaman terhadap tindak balas hidrologi (Blanquies et al. 2003). Reka bentuk penyimulasi yang lebih maju seperti sistem muncung bertekanan dan pengawal aliran boleh laras telah membolehkan simulasi intensiti ribut yang lebih realistik, manakala penggunaan bahan geosintetik dan penyelesaian saluran turut dikaji bagi mengurangkan kelemahan sistem turapan akibat hujan. Walau bagaimanapun, kebanyakan kajian masih tertumpu kepada aspek hidrologi permukaan atau teknik penstabilan setempat, dengan integrasi yang terhad terhadap

penilaian menyeluruh mengenai kemerosotan kekuatan subgred di bawah keadaan penembusan hujan sebenar secara masa nyata.

Jadual 2: Ringkasan kajian simulator hujan buatan untuk penyelidikan subgred.

Rujukan	Tempoh hujan	Intensiti hujan	Jenis pemasangan nozel	Fokus aplikasi
Mendes et al. (2021)	5–60 minit	Boleh atur (programmable)	Nozel semburan bertekanan	Ujian hidrologi dan geoteknik
Fernández-Raga et al. (2022)	Boleh laras (makmal)	Pelbagai tahap boleh atur	Modul makmal dengan nozel terkalibrasi	Ciri titisan hujan dan keseragaman semburan
Živanović et al. (2022)	10–60 minit	Terlaras berdasarkan CU	Peralatan mudah alih jenis semburan penuh	Rintangan tanah dan hakisan
Bosio et al. (2023)	Tempoh lanjutan	Dikalibrasi skala besar	Ketinggian jatuhan 10.4 m + skrin pengagih	Simulator makmal skala besar untuk kajian hidrologi
Ngezahayo et al. (2021)	30–60 minit	Saiz titisan 1–6 mm	Radas kos rendah (kaedah tepung untuk kalibrasi)	Kebolehakisan jalan tanah tidak berturap
Meena et al. (2022)	Ribut bergerak boleh atur	50–180 kPa (bervariasi)	Sistem multi-nozel automatik	Simulasi hidrologi bergerak
Robinson & Tingle et al. (2025)	Fasa pra-tepu (pra-ujian)	Hujan buatan untuk tepu asas	Gabungan sistem hujan + bebanan plat	Kepekakan kelembapan asas / landasan
Liu & Guo et al. (2025)	Kitaran hujan–saliran	Keamatan tersuai	Radas asas dengan bahan penyalir (wicking)	Asas bertetulang geosintetik
Alabama DOT (2020)	30–60 minit	2–6 in/jam ($\pm$ 50–150 mm/jam)	Sistem gantungan tinggi dengan nozel semburan	Kawalan hakisan & sedimen
Hou et al. (2020)	-	2.5 mm/min, 3.4 mm/min, 4.6 mm/min dan 5.5 mm/min	-	Penyimulasi hujan dalaman untuk mengkaji lima jenis struktur turapan
Bateni et al. (2019)	10–60 minit	40–220 mm/jam	Nozel bertekanan	Infiltrasi turapan telap air

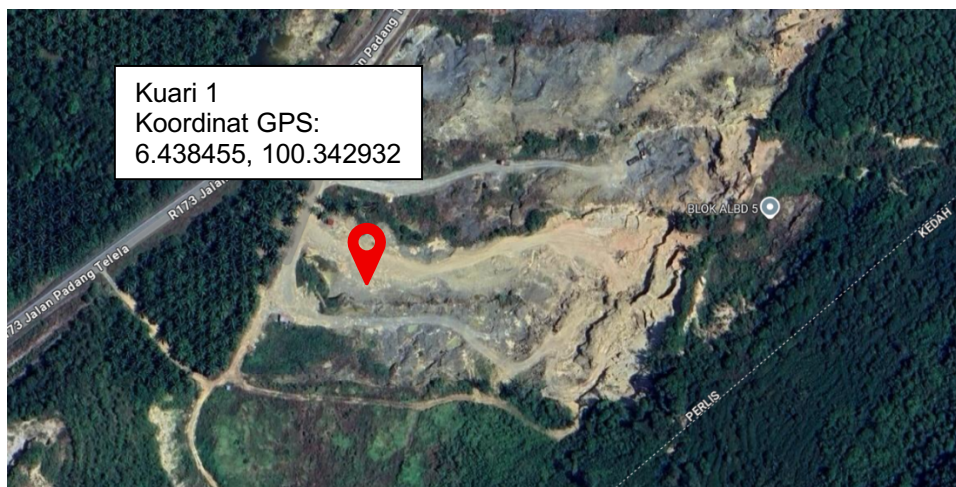
Berdasarkan kajian lepas daripada Mhaske et. al. (2019) telah membuktikan bahawa sistem muncung bertekanan mampu menghasilkan titisan hujan dengan saiz, halaju dan tenaga kinetik yang setara dengan hujan semula jadi, sekali gus membolehkan penilaian sistematik terhadap hakisan tanah dan tindak balas hidrologi di bawah variasi cerun, keamatan, serta jenis tanah yang berbeza. Walaupun reka bentuk penyimulasi hujan kini menunjukkan kemajuan dari segi keseragaman taburan hujan, pengagihan titisan, dan perwakilan tenaga kinetik, kebanyakan kajian sedia ada masih tertumpu kepada ramalan hakisan dan hidrologi permukaan, dengan integrasi yang terhad terhadap implikasi geoteknikal khususnya dalam prestasi turapan. Secara khususnya, masih terdapat kekurangan kajian eksperimen yang menghubungkan secara langsung ciri penembusan hujan daripada eksperimen simulasi dengan kemerosotan kekuatan subgred seperti perubahan kelembapan dan nilai Nisbah Galas California (CBR). Selain itu, ramai penyelidik telah melaksanakan simulasi hujan mudah, membangunkan struktur turapan yang pelbagai serta menggunakan ujian berangka atau simulasi komputer bagi menilai kesan kelembapan dan tempoh penembusan air hujan (Hou et al. 2020; Ahmed et al. 2019; Gaspard et al. 2019; Peng et al. 2020). Walau bagaimanapun, penyiasatan terhadap taburan kelembapan dalaman dalam tanah subgred masih kurang diberi perhatian, sedangkan kekuatan dan kapasiti galas subgred sangat bergantung kepada keadaan lembapan dalaman tersebut. Banyak kajian terdahulu seperti Ahmed et al. (2019) dan Zhou (2012) memberi tumpuan kepada cerun atau lapisan tertentu yang hanya mewakili sebahagian kecil daripada taburan kelembapan menegak dalam struktur turapan. Maka, maklumat mengenai taburan lembapan subgred masih terhad. Justeru, kajian ini memberi tumpuan untuk menilai hubungan antara ciri taburan kelembapan tanah subgred dengan parameter corak hujan yang berbeza bagi memahami kesan sebenar infiltrasi hujan terhadap prestasi subgred. Oleh itu, pembangunan eksperimen simulasi hujan buatan dengan corak hujan yang sesuai dengan iklim Malaysia telah menjadi objektif utama kajian ini bagi menentukan kesan kelembapan terhadap dua jenis tanah subgred. Data hujan yang digunakan dalam kajian ini merangkumi tempoh antara tahun 2013 hingga 2024. Corak keamatan hujan yang digunakan dalam kajian ini ditetapkan dengan mengambil kira nilai hujan ekstrem serta corak hujan paling lebat dalam tempoh sejam. Tempoh hujan bagi setiap corak pula ditetapkan pada 30, 60, 90 dan 120 minit bagi membangunkan penyelidikan yang komprehensif terhadap kesan kelembapan terhadap tanah subgred.

BAHAN DAN KAEDAH

Kajian ini dijalankan bagi menilai kesan variasi hujan buatan terhadap perubahan suhu dan kelembapan dalam tanah subgred. Bahan utama yang digunakan terdiri daripada sampel tanah subgred yang diambil daripada kuari terpilih di negeri Perlis. Sampel tanah dikeringkan udara sebelum melalui ujian piawai seperti had Atterberg, ujian pemadatan, dan ujian CBR bagi menentukan sifat fizikal serta kejuruteraan tanah.

Kawasan Kajian dan Pensampelan Tanah

Kajian ini dijalankan menggunakan sampel tanah subgred yang diperoleh dari dua buah kuari terpilih di negeri Perlis, Malaysia, iaitu Kuari Hairi (Kuari 1) dan Kuari Mizan (Kuari 2), yang mewakili jenis tanah berkelompok A-2-6 berdasarkan sistem klasifikasi AASHTO. Kuari 1 terletak di Kurong Anai, Arau, Perlis (koordinat GPS 6.438455, 100.342932), seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Manakala, Kuari 2 terletak di Padang Siding, berhampiran Stadium Universiti Malaysia Perlis (koordinat GPS 6.465269, 100.344894), seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Kawasan ini dipilih kerana mempunyai keadaan geoteknik dan geologi yang berbeza, sekaligus membolehkan perbandingan kesan kelembapan terhadap jenis tanah subgred yang berlainan.



Rajah 1: Lokasi Kuari Hairi di mana sampel tanah untuk Kuari 1 diambil.



Rajah 2: Lokasi Kuari Mizan di mana sampel tanah untuk Kuari 2 diambil.

Kawasan kajian terletak dalam zon beriklim tropika lembap, yang menerima hujan tahunan melebihi 2,000 mm dan mengalami dua musim monsun utama iaitu Monsun Timur Laut (Oktober hingga Mac) dan Monsun Barat Daya (Mei hingga September). Hujan lebat yang kerap semasa musim monsun menyebabkan kadar kelembapan tanah subgred berubah dengan ketara dan berpotensi menjejaskan kekuatan sokongan lapisan asas jalan.

Bagi tujuan pensampelan, tanah dikumpul bagi setiap kuari dengan dua kaedah yang berbeza. Tanah dikumpul dari permukaan kuari dan disimpan di dalam tong bertutup. Selain itu, tanah juga dikumpul serta-merta selepas ia digali di kuari dan diambil dari lapisan bawah aras permukaan (kedalaman 0.3-1.0 meter) dan disimpan di dalam beg pengedap udara bagi mengekalkan kelembapan semula jadi. Kawasan dan kaedah pensampelan ini membolehkan perbandingan yang jelas terhadap sifat lembapan dan tindak balas mekanikal tanah subgred daripada dua sumber berbeza di bawah simulasi hujan buatan, sekali gus menyediakan asas empirikal bagi memahami kesan hujan terhadap kestabilan subgred jalan di Malaysia.

Ujian Tanah

Sampel tanah yang diperoleh dibawa ke Makmal Geoteknik, Fakulti Kejuruteraan Awam dan Teknologi, Universiti Malaysia Perlis (UniMAP) untuk diproses dan diuji. Ujian yang dijalankan antaranya adalah ujian kelembapan tanah, ayakan, had Atterberg dan pemadatan tanah. Setiap sampel ditimbang dalam keadaan basah sebelum dikeringkan dengan ketuhar pada suhu terkawal 105 ± 5 °C selama 24 jam. Sampel kering kemudiannya disejukkan dalam desikator dan ditimbang semula untuk mendapatkan jisim kering. Kandungan lembapan dikira sebagai nisbah jisim air yang hilang kepada jisim kering tanah, dinyatakan sebagai peratusan. Ujian ini menyediakan indeks garis dasar bagi keadaan in-situ tanah dan penting untuk mentafsir tingkah laku pemadatan seterusnya dan untuk menilai perubahan yang disebabkan oleh penyusutan hujan semasa ujian simulasi.

Taburan saiz butiran tanah ditentukan melalui analisis ayak mengikut ASTM D422 dan BS 1377 untuk mewujudkan pecahan saiz zarah dan mengelaskan tanah untuk penilaian subgred. Sebelum ini, sampel tanah dikeringkan dengan ketuhar. Kemudian sampel tanah diletakkan di atas susunan ayakan piawai yang disusun mengikut turutan saiz bukaan yang menurun, dipasang pada pengayak mekanikal, dan digetarkan untuk tempoh masa tertentu bagi memastikan pemisahan yang menyeluruh. Jisim tertahan pada setiap ayakan direkodkan, dan peratusan yang melepasi dikira berdasarkan jisim keseluruhan sampel.

Menurut BS 1377-2:1990, ujian had Atterberg melibatkan penentuan had cecair (LL), had plastik (PL), dan indeks keplastikan (PI) tanah bagi memahami ketekalan dan sifat kelakuannya. Ujian LL dijalankan mengikut prosedur piawai untuk menentukan kandungan air di mana tanah berubah daripada keadaan plastik kepada keadaan cecair. Sebelum itu, sampel tanah yang telah dikeringkan di dalam ketuhar pada suhu terkawal 110 °C selama 16 jam dan dilalukan melalui ayakan berukuran 425 μm .

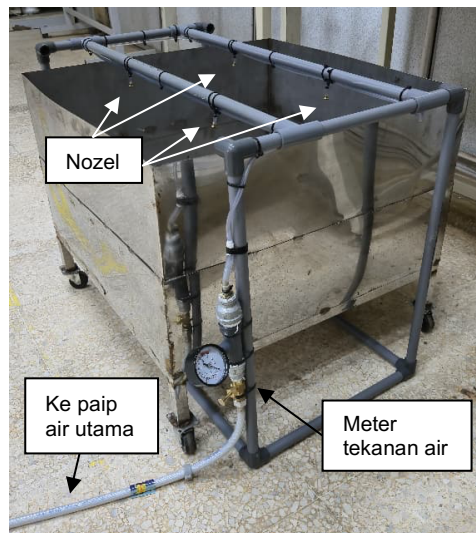
Ujian proctor diubahsuai yang melibatkan usaha pemadatan lebih tinggi dijalankan mengikut BS 1377: Bahagian 4: 1990, Klausa 3.6 bagi menentukan hubungan antara kandungan lembapan dan ketumpatan kering tanah. Acuan silinder berisipadu kira-kira 1000 cm^3 digunakan bersama penukul logam seberat 4.5 kg yang dijatuhkan dari ketinggian terkawal 450 mm. Sampel tanah daripada kedua-dua kuari yang telah disediakan dan ditapis melepasi ayakan 20 mm dicampur dengan pelbagai kandungan air untuk mencapai tahap lembapan berbeza. Tanah lembap dimasukkan ke dalam acuan dalam lima lapisan sama tebal dengan 27 hentakan setiap lapisan bagi memastikan pemadatan sekata. Selepas pemadatan, sambungan acuan ditanggalkan dan permukaan tanah diratakan menggunakan pembaris lurus, manakala zarah kasar yang tertinggal diganti dengan bahan halus daripada sampel yang sama. Sebahagian tanah diambil untuk dikeringkan dalam ketuhar pada suhu 105–110°C bagi menentukan kandungan lembapan. Prosedur diulangi dengan penambahan air secara berperingkat bagi menghasilkan sekurang-kurangnya lima keadaan lembapan berbeza. Lengkung pemadatan lengkap kemudiannya diplot untuk menentukan ketumpatan kering maksimum (MDD) dan kandungan lembapan optimum (OMC).

Reka bentuk simulator hujan buatan

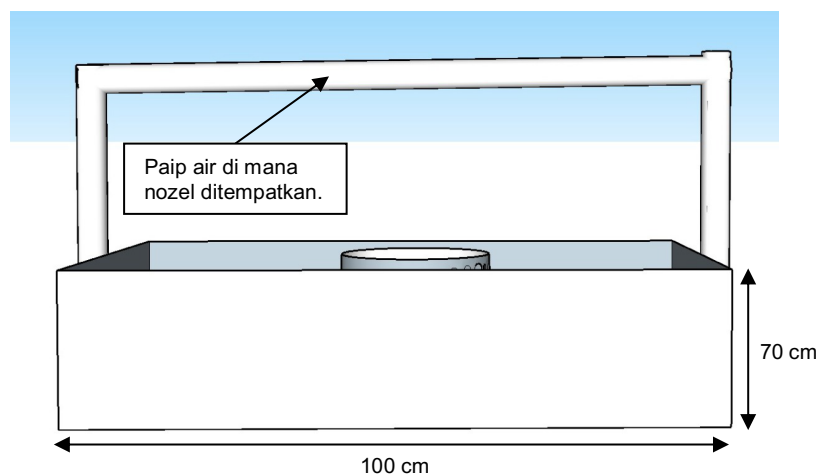
Reka bentuk eksperimen simulator hujan buatan untuk kajian ini dirancang bagi menilai kesan pelbagai keamatan dan tempoh hujan terhadap perubahan suhu dan kelembapan dalam tanah subgred di bawah keadaan terkawal. Ujian dijalankan menggunakan sistem simulasi hujan buatan yang direka bentuk untuk meniru keadaan hujan sebenar berdasarkan data intensiti hujan maksimum di Malaysia yang direkodkan antara tahun 2013 hingga 2024. Purata hujan bulanan tertinggi yang direkodkan adalah pada tahun 2017 sebanyak 164 mm/jam bersamaan dengan 2.74 mm/min. Manakala catatan terkini bagi hujan sejam tertinggi pada tahun 2024 pula ialah 128.6 mm/jam bersamaan dengan 2.14 mm/min.

Oleh itu, keamatan hujan berdasarkan cuaca ekstrem di Malaysia yang digunakan bagi simulasi hujan buatan kajian ini adalah 2.74 mm/min, 2.14 mm/min. Satu nilai di antara kedua-dua keamatan hujan ini juga diambil kira bagi mencukupkan tiga nilai keamatan hujan yang berbeza untuk kajian ini. iaitu 149.17 mm/jam bersamaan dengan 2.49 mm/min. Bagi setiap keamatan hujan, empat tempoh pendedahan hujan buatan telah ditetapkan, iaitu 30, 60, 90 dan 120 minit, bagi menilai kesan kumulatif penembusan air terhadap perubahan kelembapan dan suhu tanah.

Sistem simulator hujan buatan ini terdiri daripada nozel tekanan tetap yang disambungkan ke paip air utama dan pengawal aliran bersama meter tekanan air untuk memastikan kadar aliran yang stabil sepanjang eksperimen seperti yang ditunjukkan dalam rajah 3. Jarak antara nozel dan permukaan tanah dikekalkan pada 20 cm bagi memastikan taburan titisan hujan yang seragam. Keluasan ruang ujian ialah 70 cm tinggi 100 cm panjang dan 100 cm lebar seperti yang dapat dilihat dalam rajah 4. Acuan tanah yang digunakan untuk eksperimen ini ialah acuan CBR bersaiz piawai dengan ketinggian 127 mm dan 152 mm diameter.



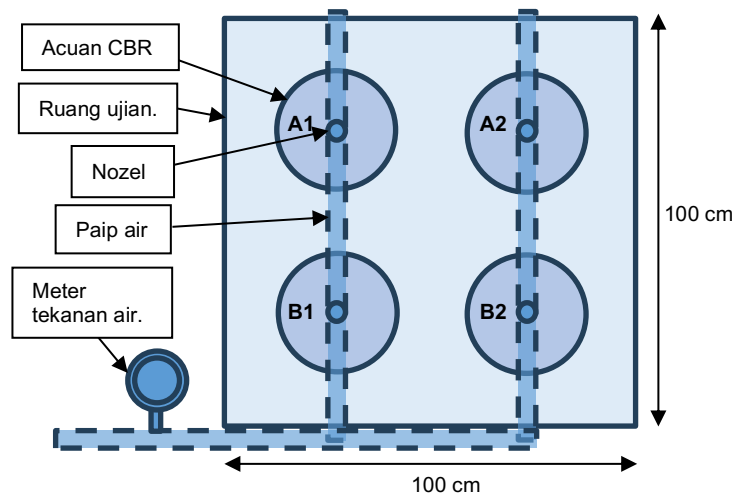
Rajah Error! No text of specified style in document.: Persediaan lengkap simulator hujan buatan.



Rajah 4: Dimensi ruang ujian bagi simulator hujan buatan.

Simulasi yang selari dapat dijalankan dengan menggunakan empat acuan CBR dalam satu masa yang sama seperti yang ditunjukkan dalam rajah 5. Simulasi ini dijalankan serentak dengan menggunakan nozel yang sama supaya eksperimen ini dapat dijalankan untuk mengukur suhu dan kelembapan tanah pada kadar masa dan kadar aliran air hujan buatan yang sama serta acuan ini juga dapat digunakan untuk menyiasat kekuatan tanah subgred melalui ujian CBR. Merujuk kepada rajah 5, setiap kali ujian dijalankan, acuan A1 dan A2 akan diuji bagi kadar masa dan keamatan hujan buatan yang sama, Acuan A1 akan digunakan untuk pengukuran suhu dan kelembapan tanahnya. Sebaliknya, acuan A2 akan digunakan untuk ujian CBR. Perkara yang sama juga turut dijalankan bagi acuan B1

dan B2. Oleh itu, penyiasatan ini dapat memberikan hubung kait secara terus antara kekuatan dan kelembapan tanah subgred.



Rajah 5: Pandangan atas ruang ujian bagi simulator hujan buatan beserta empat acuan CBR.

Bagi menentukan kadar aliran yang bersesuaian dengan keamatan hujan (unit mm/jam) yang telah ditentukan dalam kajian ini, keamatan hujan ditukarkan kepada kadar aliran dengan menggunakan rumus 1.

$$\text{Kadar aliran (L/min)} = (\text{Keamatan hujan (mm/jam)} \times \text{Keluasan (m}^2\text{)})/60 \quad (1)$$

di mana keamatan hujan adalah 128.6 mm/jam, 149.17 mm/jam dan 164 mm/jam. Manakala, keluasan ini adalah nilai keluasan permukaan acuan tanah yang digunakan dalam eksperimen ini iaitu 0.0181 m² (luas permukaan acuan CBR, $\pi r^2 = \pi(0.152/2)^2$). Oleh itu, nilai kadar aliran yang diperolehi adalah 0.039 L/min, 0.045 L/min dan 0.05 L/min. Pertukaran unit ini adalah untuk mendapatkan kadar aliran yang tepat bagi mewakili corak hujan ekstrem berdasarkan data daripada Jabatan Meteorologi Malaysia.

Kemudian, penentuan tekanan air berdasarkan penggunaan saiz orifis nozel 0.4 mm yang sesuai dengan keamatan hujan yang dikehendaki dalam kajian ini dapat dikira dengan menggunakan rumus 2 iaitu rumus aliran orifis.

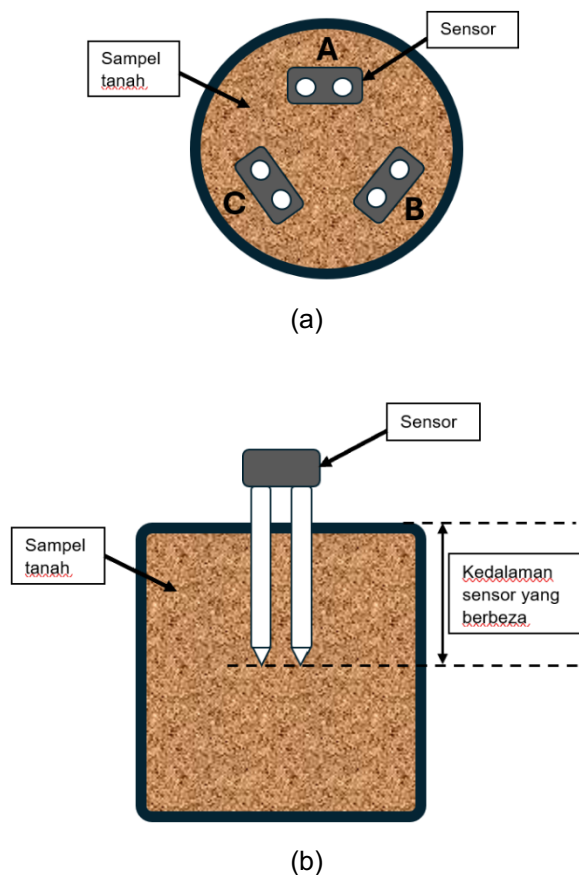
$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

di mana Q adalah kadar aliran (m³/s), C_d adalah pekali pelepasan (biasanya antara 0.60 – 0.75 untuk nozel kabus), A adalah luas bukaan orifis ($\pi d^2/4$), ΔP adalah perbezaan tekanan (Pa) dan ρ adalah ketumpatan air (~1000 kg/m³). Oleh kerana kadar aliran yang diperlukan adalah rendah, nozel yang mempunyai orifis bersaiz 0.4 mm telah dipilih bagi kajian ini dan ditunjukkan dalam rajah 6. Ciri-ciri nozel yang digunakan dalam kajian ini ialah jenis orifis kabus, mempunyai saiz orifis 0.4 mm, dapat digunakan pada tekanan hingga 30 psi, nilai C_d sekitar 0.65 (nilai purata praktikal) dan kadar aliran yang dapat diubah suai dengan kawalan tekanan air. Ianya juga amat bersesuaian digunakan untuk ujian makmal di mana tekanan air dari sumber air di bilik makmal adalah 25 psi. Pengiraan tekanan air bagi kadar aliran 0.039 L/min, 0.045 L/min dan 0.05 L/min adalah 5 psi, 6 psi dan 8psi. Oleh itu, eksperimen ini dapat dijalankan tanpa penambahan pam air. Secara tidak langsung, ia dapat menjimatkan kos penyediaan simulator hujan buatan ini.



Rajah 6: Nozel dengan orifis bersaiz 0.4 mm.

Tanah subgred dipadatkan ke dalam acuan CBR bersaiz piawai dengan ketumpatan maksimum makmal yang diperoleh daripada ujian pemadatan piawai. Setiap acuan diisi dengan tanah dalam tiga lapisan. Kemudian, sensor suhu dan kelembapan yang beroperasi secara digital dipasang pada tiga kedalaman berbeza iaitu masing-masing pada paras 28 mm dari permukaan tanah (atas), 56 mm dari permukaan tanah (tengah) dan 85 mm dari permukaan tanah (bawah) bagi sensor A, B, dan C. Rajah 7 menunjukkan susun atur bagi kaedah rekod bacaan sensor. Bacaan sensor dengan kedudukan kedalaman yang berbeza adalah untuk merekodkan perubahan parameter secara berterusan sepanjang tempoh simulasi hujan buatan dijalankan. Bacaan suhu dan kelembapan tanah direkod secara masa nyata bagi acuan A1 dan B1. Kemudian, sampel tanah bagi acuan A2 dan B2 diambil untuk ujian CBR. Reka bentuk eksperimen ini membolehkan penilaian yang sistematik terhadap kesan infiltrasi hujan terhadap tingkah laku mekanikal dan terma tanah subgred, serta menyediakan asas untuk pembangunan model ramalan prestasi turapan dalam keadaan hujan tropika.



Rajah 7: Susun atur bagi kaedah rekod bacaan sensor mengikut kedalaman berbeza berdasarkan pandangan atas (a) dan sisi (b) dalam acuan CBR bersaiz piawai

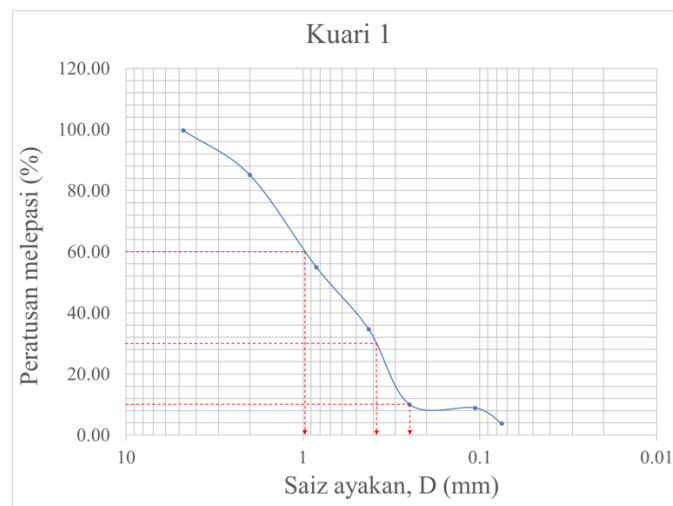
PENEMUAN DAN ANALISIS KAJIAN

Dalam kajian ini, penemuan yang didapati daripada beberapa ujian-ujian makmal yang telah dilakukan adalah untuk menganalisis kesan variasi keamatan hujan terhadap kekuatan dan prestasi subgred jalan dengan menggunakan data-data daripada Jabatan Meteorologi Malaysia.

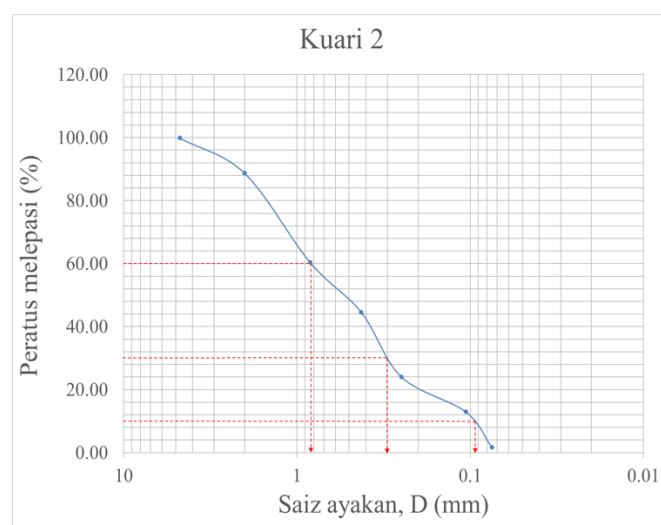
Klasifikasi tanah

Analisis ujian ayakan

Ujian ayakan telah dilakukan bagi sampel-sampel dari Kuari 1 dan 2 bagi mendapatkan maklumat berkenaan tekstur dan peratusan yang melalui setiap saiz ayakan. Rajah 8 menunjukkan keputusan ujian ayakan bagi kedua-dua sampel kuari. Berdasarkan Rajah 8, peratusan tanah berpasir adalah tertinggi dengan nilai 95.98% dan 98.118% bagi Kuari 1 dan 2 masing-masing. Selain itu, data D_{10} , D_{30} , dan D_{60} yang diperolehi daripada Rajah 8 juga telah digunakan untuk mendapatkan nilai pekali keseragaman, C_u dan pekali kelengkungan, C_c . Jadual 3 menunjukkan nilai C_u dan C_c bagi Kuari 1 dan 2. Nilai pekali keseragaman, C_u dan pekali kelengkungan, C_c bagi Kuari 1 masing-masing ialah 3.85 dan 8.78, manakala bagi Kuari 2 pula ialah 0.60 dan 1.16. Nilai-nilai ini menunjukkan perbezaan yang ketara dalam taburan saiz butir antara kedua-dua sampel. Menurut kriteria Sistem Klasifikasi Tanah Bersatu (USCS), pasir yang mempunyai nilai C_u kurang daripada 6 atau C_c tidak berada dalam julat 1 hingga 3 akan dikategorikan sebagai tanah pasir bergradasi rendah (SP), manakala nilai $C_u \geq 6$ dan $1 \leq C_c \leq 3$ menunjukkan tanah pasir bergradasi baik (SW) (Zhou 2023). Berdasarkan kepada kriteria ini, sampel daripada Kuari 1 diklasifikasikan sebagai SP manakala Kuari 2 diklasifikasikan sebagai SW.



(a)



(b)

Rajah 8: Keputusan ujian ayakan bagi sampel tanah (a) Kuari 1 dan (b) Kuari 2

Jadual 3: Nilai C_u dan C_c bagi Kuari 1 dan 2.

Kuari	Pekali keseragaman, C_u	Pekali kelengkungan, C_c
1	3.85	8.78
2	0.60	1.16

Walau bagaimanapun, hasil pemerhatian menunjukkan bahawa tanah daripada Kuari 1 menunjukkan kualiti yang lebih baik untuk dijadikan lapisan subgred berbanding Kuari 2. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui sifat fizik dan kejuruteraan tanah pasir bergradasi rendah (SP) yang lebih mudah dipadatkan sehingga mencapai ketumpatan maksimum dengan kadar kelembapan optimum. Menurut kajian oleh Salem, Shaban dan Almuhanna (2024), tanah yang mempunyai nilai C_u sederhana dan taburan butiran yang lebih seragam berpotensi mencapai modulus subgred yang tinggi apabila proses pemadatan dijalankan dengan baik, disebabkan oleh struktur butiran yang saling mengunci dan keupayaan mengekalkan kestabilan di bawah beban berulang. Selain itu juga, pasir jenis SP mempunyai kebolehtelapan yang lebih tinggi berbanding SW, dan mengurangkan risiko pengumpulan air dalam lapisan subgred semasa hujan lebat. Hal ini amat penting dalam konteks tropika seperti Malaysia yang mengalami kadar hujan tahunan yang tinggi, kerana kelembapan berlebihan boleh melemahkan kekuatan subgred dan menyebabkan penurunan daya sokongan.

Analisis ujian had Atterberg

Ujian Had Cecair (LL) dan Had Plastik (PL) telah dijalankan dalam kajian ini bagi mendapatkan data-data yang diperlukan untuk klasifikasikan sampel tanah dari kedua-dua kuari tersebut dengan menggunakan sistem Persatuan Pengangkutan dan Lebuhraya Negeri-negeri Amerika (AASHTO). Jadual 4 menunjukkan keputusan analisis bagi ujian LL dan PL bagi Kuari 1 dan 2. Berdasarkan jadual tersebut, Kuari 1 menunjukkan Had Cecair (LL) sebanyak 34.00%, Had Plastik (PL) sebanyak 21.19%, dan Indeks Keplastikan (PI) sebanyak 12.81. Sementara itu, Kuari 2 menunjukkan LL sebanyak 30.50%, PL sebanyak 18.87%, dan PI sebanyak 11.63.

Jadual 4: Nilai LL dan PL bagi Kuari 1 dan 2.

Kuari	Had Cecair, LL (%)	Had Plastik, PL (%)
1	34.00	21.19
2	30.50	18.87

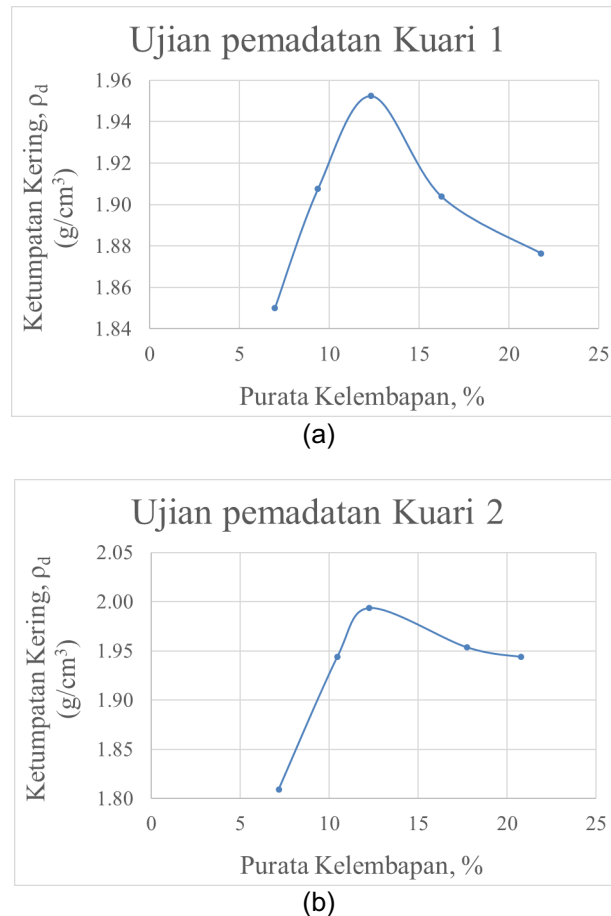
Kedua-dua sampel tanah daripada Kuari 1 dan Kuari 2 diklasifikasikan sebagai A-2-6 mengikut sistem klasifikasi AASHTO. Klasifikasi ini menunjukkan bahawa tanah tersebut adalah jenis berpasir dan berbatu serta mengandungi lumpur atau tanah liat. Kajian menunjukkan bahawa sistem klasifikasi tanah amat penting bagi jurutera geoteknik untuk meramal sifat-sifat tanah dan membimbing analisis kejuruteraan (Castro, Park dan Santamarina 2023). Selain itu, Indeks Kumpulan (GI) bagi kedua-dua kuari ditentukan sebagai 0, menunjukkan ciri-ciri kejuruteraan yang baik seperti mampatan rendah dan perubahan isipadu yang minimum, dan menandakan tanah tersebut sesuai digunakan dalam pelbagai aplikasi kejuruteraan awam. Penemuan ini sejajar dengan kajian yang menunjukkan bahawa tanah subgred timbunan yang diklasifikasikan sebagai A-4 hingga A-7-6 boleh menunjukkan kekuatan galas yang rendah serta ketidakstabilan isipadu, menekankan kepentingan klasifikasi yang betul (Yang et al. 2020).

Di samping itu, klasifikasi tanah seperti A-2-6 amat penting dalam projek kejuruteraan awam, terutamanya apabila mempertimbangkan penggunaannya sebagai bahan binaan. Sebagai contoh, sifat geoteknik tanah berpasir-liat dikaji untuk menilai kesesuaiannya dalam menyokong infrastruktur, di mana Indeks Keplastikan (PI) memberi petunjuk terhadap tahap mampatan (Lekman et al. 2016). Kehadiran kandungan pasir juga memberi kesan besar terhadap ciri fizikal tanah liat, mempengaruhi konsistensi dan pemadatan (Alnmar dan Ray 2024). Tambahan pula, pelbagai kajian telah meneliti sifat kekuatan ricih campuran pasir-liat yang penting dalam reka bentuk geoteknik (Dafalla et al. 2020; Najjar et al. 2015). Sehubungan itu, ciri-ciri geoteknik yang dikenal pasti dalam sampel kuari seperti klasifikasi A-2-6 dan nilai Indeks Kumpulan (GI) yang baik, bersama dengan had Atterberg, memberikan asas kukuh dalam menilai kesesuaian tanah untuk pembinaan. Pencirian terperinci terhadap sifat-sifat ini, seperti yang diketengahkan oleh pelbagai penyelidikan akademik, amat penting bagi membuat keputusan yang tepat dalam kejuruteraan awam.

Analisis ujian pemadatan Proctor yang diubahsuai

Dalam kajian ini, ujian pemadatan Proctor yang diubahsuai telah dijalankan untuk menentukan nilai maksimum berat unit kering, γ_{kering} dan kandungan lembapan optimum, % bagi sampel tanah kedua-dua kuari. Dua parameter tanah ini adalah penting dalam ujian simulasi hujan buatan seterusnya. Oleh itu, sebanyak 10 sampel tanah dari Kuari 1 dan 2 telah dijalankan bagi ujian ini. Rajah 9 menunjukkan

keputusan bagi kedua-dua kuari untuk ujian pemadatan ini. Bagi Kuari 1, nilai purata kelembapan yang diperoleh ialah 12.33%, manakala Kuari 2 menunjukkan nilai yang hampir sama iaitu 12.26%. Namun begitu, tanah Kuari 2 menghasilkan ketumpatan kering yang lebih tinggi iaitu 1.99 g/cm^3 , menunjukkan ciri pemadatan yang lebih baik dan berpotensi memberikan kekuatan yang lebih tinggi berbanding Kuari 1. Penemuan ini selari dengan prinsip bahawa pemadatan yang berkesan akan meningkatkan kekuatan ricih tanah, mengurangkan mampatan, serta menurunkan kebolehtelapan, yang keseluruhannya amat penting bagi kestabilan dan ketahanan struktur geoteknikal (Senturk et. al. 2024).



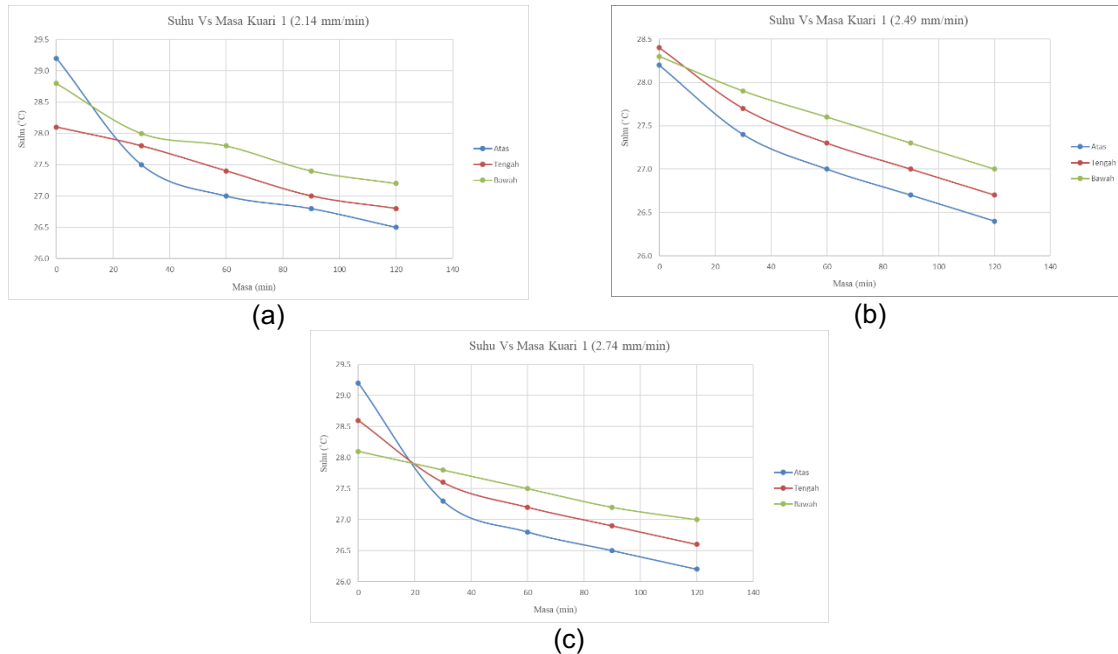
Rajah 9: Keputusan ujian pemadatan Proctor bagi (a) Kuari 1 dan (b) Kuari 2.

Selain itu, klasifikasi lanjut terhadap sampel tanah daripada Kuari 2 berdasarkan Sistem Klasifikasi Tanah Bersatu (USCS) mengenal pasti tanah tersebut sebagai SW (pasir bergradasi baik). USCS ialah sistem yang diiktiraf di peringkat antarabangsa yang mengelaskan tanah berdasarkan taburan saiz zarah, had cecair, dan indeks keplastikan, dan memberikan asas kukuh kepada jurutera untuk meramal tindakbalas tanah serta mempengaruhi keputusan reka bentuk (Castro et. al. 2023; Stevens 1982). Oleh itu, tanah berpasir bergradasi baik seperti SW lazimnya mempunyai sudut geseran dalaman yang tinggi, ciri saluran yang baik, serta daya galas yang tinggi, menjadikannya sangat sesuai digunakan sebagai bahan asas tapak, timbunan balik, dan lapisan asas jalan raya (Gaudiosi et al. 2023). Pencapaian sebenar nilai kandungan kelembapan dan berat unit kering di lapangan amat penting bagi merealisasikan kekuatan semula jadi tanah tersebut dan memastikan prestasi jangka panjang lapisan yang dipadatkan (Senturk et. al. 2024).

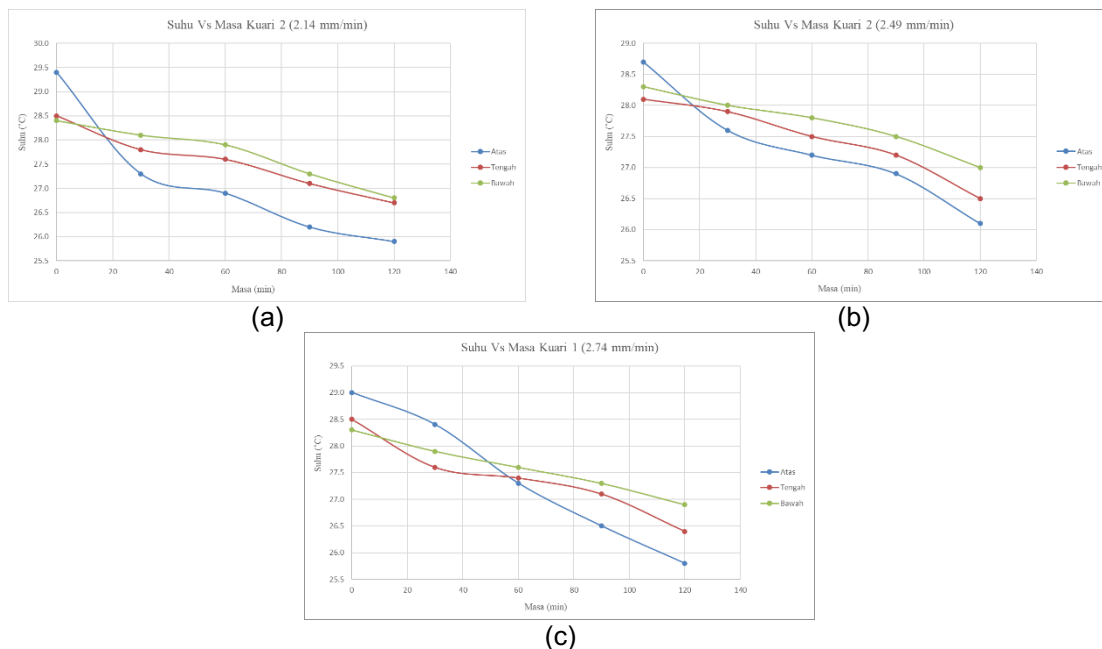
Di samping itu, perbezaan yang diperhatikan dalam ketumpatan kering antara dua kuari, walaupun mempunyai nilai kandungan kelembapan yang hampir sama, boleh disebabkan oleh variasi dalam taburan saiz zarah, bentuk zarah, atau komposisi mineralogi, yang semuanya mempengaruhi proses pemadatan. Ciri-ciri terperinci tanah seperti ini amat penting bukan sahaja untuk pemilihan bahan, tetapi juga untuk mengoptimumkan tenaga pemadatan semasa pembinaan, yang akhirnya menyumbang kepada keselamatan dan jangka hayat struktur infrastruktur.

Analisis Simulator Hujan Buatan

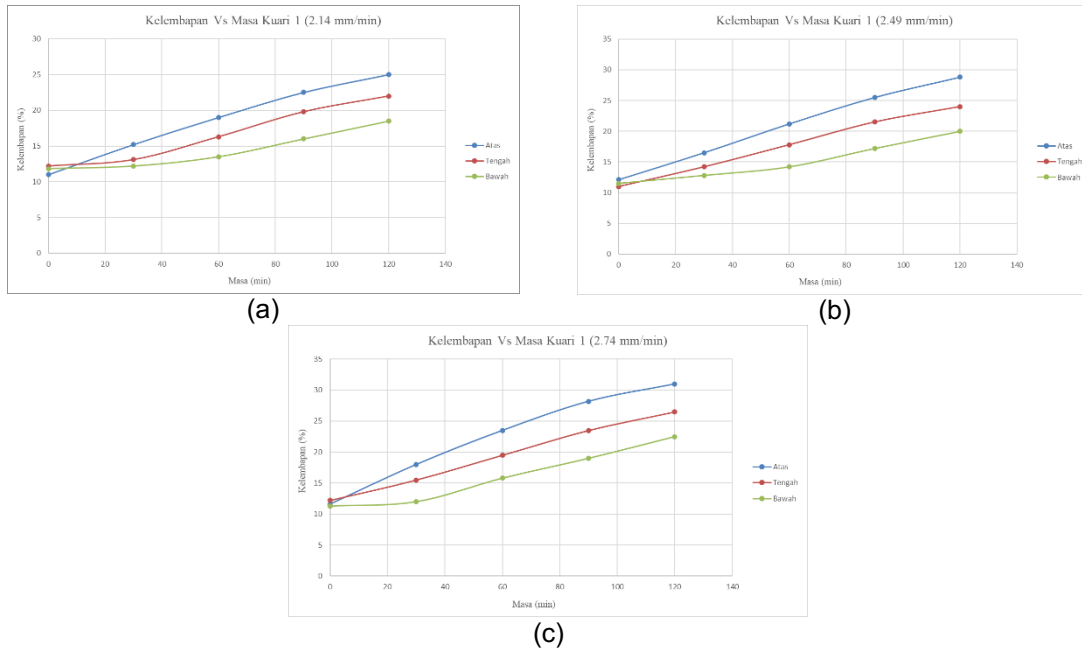
Dalam kajian ini, satu simulator fizikal telah dibangunkan bagi mengkaji variasi suhu dan kelembapan subgred di bawah simulasi hujan buatan. Sebanyak 30 sampel tanah bagi kedua-dua kuari telah dijalankan dengan menggunakan acuan piawai CBR dan diletakkan di dalam ruang ujian simulator untuk suatu tempoh masa yang ditetapkan mengikut keamatan hujan yang ditentukan. Rajah 10 dan 11 masing-masing menunjukkan keputusan simulasi ujian kesan hujan buatan terhadap perubahan suhu sampel tanah bagi Kuari 1 dan 2. Manakala, Rajah 12 dan 13 pula masing-masing menunjukkan keputusan simulasi ujian kesan hujan buatan terhadap perubahan kelembapan sampel tanah bagi Kuari 1 dan 2.



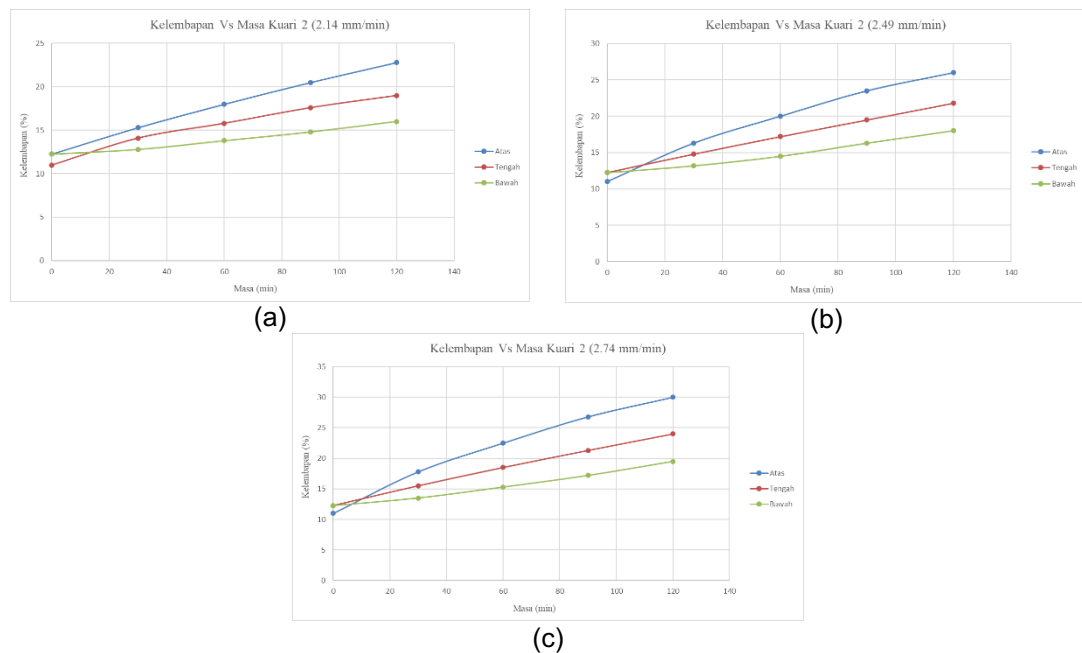
Rajah 10: Keputusan simulasi ujian kesan hujan buatan terhadap suhu bagi Kuari 1 untuk keamatan (a) 2.14 mm/min, (b) 2.49 mm/min, dan (c) 2.74 mm/min.



Rajah 11: Keputusan simulasi ujian kesan hujan buatan terhadap suhu bagi Kuari 2 untuk keamatan (a) 2.14 mm/min, (b) 2.49 mm/min, dan (c) 2.74 mm/min.



Rajah 12: Keputusan simulasi ujian kesan hujan buatan terhadap kelembapan bagi Kuari 1 untuk keamatan (a) 2.14 mm/min, (b) 2.49 mm/min, dan (c) 2.74 mm/min.



Rajah 13: Keputusan simulasi ujian kesan hujan buatan terhadap kelembapan bagi Kuari 2 untuk keamatan (a) 2.14 mm/min, (b) 2.49 mm/min, dan (c) 2.74 mm/min.

Berdasarkan graf yang diperolehi, secara keseluruhannya peratus peningkatan kandungan lembapan adalah tertinggi untuk tanah Kuari 1, manakala peratus penurunan suhu adalah tertinggi untuk tanah Kuari 2 masing-masing sebanyak 53.8% dan 7.8°C. Penemuan kajian ini menunjukkan bahawa peningkatan keamatan hujan menyebabkan penurunan suhu tanah secara signifikan, satu fenomena yang dijelaskan melalui pemindahan haba daripada tanah kepada air hujan. Penemuan ini sejajar dengan kajian oleh Yoshioka et al. (2015) yang mendapati perubahan suhu tanah berlaku secara nyata semasa eksperimen hujan buatan di lereng tebing, disebabkan oleh penyerapan haba oleh air hujan yang sejuk. Dalam masa yang sama, kelembapan tanah meningkat seiring dengan keamatan hujan yang lebih tinggi, mencerminkan keupayaan tanah menyerap air secara dinamik bergantung kepada tekstur dan struktur tanah. Kajian oleh Ali et al. (2018) menyokong dapatan ini

dengan menunjukkan bahawa pengairan buatan mempengaruhi profil suhu dan kelembapan tanah secara langsung.

Selain itu, kajian lain oleh Zhou et al. (2023) pula menekankan bahawa taburan hujan boleh memulihkan lapisan tanah kering dan meningkatkan kestabilan struktur tanah melalui peningkatan kelembapan. Dalam konteks ini, perbandingan antara Kuari 1 dan Kuari 2 jelas menunjukkan bahawa ciri fizikal tanah seperti kebolehtelapan dan taburan saiz partikel tanah memainkan peranan penting dalam kadar perubahan suhu dan kelembapan, selaras dengan penemuan Jin et al. (2008) yang mengkaji pengaruh amalan pengurusan tanah terhadap resapan dan hakisan semasa hujan. Di samping itu, penggunaan data kelembapan tanah daripada eksperimen hujan buatan juga terbukti berguna dalam pemodelan dan ramalan banjir seperti yang dibincangkan oleh Maggioni et. al. (2012) dan Brocca et al. (2015), menjadikan pendekatan ini semakin penting dalam perancangan pengurusan bencana dan pembangunan mampan. Kesimpulannya, penggunaan simulator hujan buatan bukan sahaja memberi kefahaman terhadap sifat dinamik tanah semasa hujan, malah memperkukuh keupayaan merancang strategi mitigasi risiko tanah dalam pelbagai aplikasi kejuruteraan dan alam sekitar.

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian yang dijalankan, dapat dirumuskan bahawa variasi keamatan hujan memberi kesan yang ketara terhadap sifat fizikal dan kejuruteraan subgred tanah, terutamanya dari aspek suhu dan kandungan kelembapan. Kajian ini telah berjaya membandingkan dua jenis tanah daripada Kuari 1 dan Kuari 2 melalui siri ujian makmal termasuk ujian ayakan, had Atterberg, ujian pemadatan Proctor, dan simulasi hujan buatan. Walaupun Kuari 1 diklasifikasikan sebagai pasir bergradasi rendah (SP) dan Kuari 2 sebagai pasir bergradasi baik (SW), masing-masing menunjukkan kelebihan tersendiri dalam konteks aplikasi geoteknikal. Keputusan ujian mendapati bahawa Kuari 2 mempunyai ketumpatan kering yang lebih tinggi, namun Kuari 1 menunjukkan keupayaan lebih baik dalam mengurangkan penyerapan air dan pemadatan pada kelembapan optimum, menjadikannya berpotensi lebih stabil dalam persekitaran tropika yang lembap. Dalam simulasi ujian hujan buatan berdurasi 2 jam, keamatan hujan sebanyak 2.14 mm/min hingga 2.74 mm/min telah digunakan. Hasil menunjukkan bahawa tanah Kuari 1 mengalami peningkatan kandungan kelembapan tertinggi sebanyak 53.8%, manakala tanah Kuari 2 mengalami penurunan suhu tertinggi iaitu sebanyak 7.8°C. Ini membuktikan bahawa peningkatan keamatan hujan bukan sahaja menjejaskan kelembapan tetapi juga suhu tanah secara signifikan, bergantung kepada sifat tekstur dan kebolehtelapan tanah. Penemuan ini menyokong kepentingan analisis geoteknikal terperinci dalam memilih bahan binaan subgred yang sesuai dan tahan terhadap pengaruh cuaca tropika yang ekstrim.

Rujukan

- Ahmed, A., Hossain, M. S., Pandey, P., Sapkota, A., & Thian, B. (2019). Deformation modeling of flexible pavement in expansive subgrade in Texas. *Geosciences*, 9(10), 446.
- Alex, K. A., James, R. A. G., & Gordon, D. A. (2014). Moisture-induced strength degradation of aggregate-asphalt mastic bonds. *Road Materials and Pavement Design*, 15, 239–262. doi:10.1080/14680629.2014.927951
- Ali, S., Xu, Y., Jia, Q., Ahmad, I., Ma, X., Yan, Z., Cai, T., Ren, X., Zhang, P., & Jia, Z. (2018). Interactive effects of planting models with limited irrigation on soil water, temperature, respiration and winter wheat production under simulated rainfall conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 198–211.
- Alnmr, A., & Ray, R. (2024). Investigating the impact of varying sand content on the physical characteristics of expansive clay soils from Syria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(4), 2675–2691.
- Batani, N., Lai, S. H., Putuhena, F., Mah, Y. S., & Mannan, A. (2018). A rainfall simulator used for testing of hydrological performances of micro-detention permeable pavement. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.18), 44–48.
- Blanquies, J., Scharff, M., & Hallock, B. (2003). The design and construction of a rainfall simulator. *International Erosion Control Association (IECA), 34th Annual Conference and Expo: Las Vegas, Nevada, Earth and Soil Sciences*, 22.
- Bosio, R., Cagninei, A., & Poggi, D. (2023). Large Laboratory Simulator of Natural Rainfall: From Drizzle to Storms. *Water*, 15(12), 2205.
- Brocca, L., Massari, C., Ciabatta, L., Moramarco, T., Penna, D., Zuecco, G., Pianezzola, L., Borga, M., Matgen, P., & Martínez-Fernández, J. (2015). Rainfall estimation from in situ soil moisture observations at several sites in Europe: an evaluation of the SM2RAIN algorithm. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, (3), 201–209.
- Castro, G. M., Park, J., & Santamarina, J. C. (2023). Revised soil classification system: implementation and engineering implications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(11), 04023109.
- Dafalla, M., Shaker, A., Elkady, T., Almajed, A., & Al-Shamrani, M. (2020). Shear strength characteristics of a sand clay liner. *Scientific reports*, 10(1), 18226.
- Donald, W. N., Fang, X., Zech, W., & Manning, C. (2022). *Evaluation of ALDOT Erosion Control Practices Using Rainfall Simulation* (No. FHWA/ALDOT 930-962). Auburn University. Highway Research Center.
- Fernández-Raga, M., Rodríguez, I., Caldevilla, P., Búrdalo, G., Ortiz, A., & Martínez-García, R. (2022). Optimization of a laboratory rainfall simulator to be representative of natural rainfall. *Water*, 14(23), 3831.
- Gaspard, K., Zhang, Z., Gautreau, G., Hanifa, K., Zapata, C. E., & Abufarsakh, M. (2019). Modeling the Resilient Modulus Variation of In Situ Soils due to Seasonal Moisture Content Variations. *Advances in Civil Engineering*, 2019.
- Gaudiosi, I., Romagnoli, G., Albarello, D., Fortunato, C., Imprescia, P., Stigliano, F., & Moscatelli, M. (2023). Shear modulus reduction and damping ratios curves joined with engineering geological units in Italy. *Scientific Data*, 10(1), 625.

- Han, C. P., & Cheng, P. F. (2015). Micropore variation and particle fractal representation of lime stabilised subgrade soil under freeze-thaw cycles. *Road Materials and Pavement Design*, 16, 19–30. doi:10.1080/14680629.2014.956139
- Hou, L., Wang, Y., Shen, F., Lei, M., Wang, X., Zhao, X., Gao, S. & Alhaj, A. (2020). Study on Variation of Surface Runoff and Soil Moisture Content in the Subgrade of Permeable Pavement Structure. *Advances in Civil Engineering*, 2020.
- Jabatan Meteorologi Malaysia. (2024). Maklumat Iklim. Retrieved from <https://www.met.gov.my/iklim/maklumat-iklim/> on 5 Jan 2020
- Jin, K., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Schiettecatte, W., De Neve, S., Lu, J., Buysse, T., Wu, H., Cai, D., Jin, J. & Harmann, R. (2008). Soil management effects on runoff and soil loss from field rainfall simulation. *Catena*, 75(2), 191-199.
- Lekmang, I. C., Daku, S. S., Yenne, E. Y., Wazon, H. N., & Goyit, M. P. (2016). Geotechnical investigations for infrastructural development: A case study of Daki Biyu District, Federal Capital Territory, Abuja, Central Nigeria.
- Liu, M., Liu, J., Bhat, S., Gao, Y., & Lin, C. (2025). Model tests on wicking geosynthetic composite reinforced bases over weak subgrade. *Geotextiles and Geomembranes*, 53(4), 938-949.
- Liu, W., Feng, Q., Deo, R. C., Yao, L., & Wei, W. (2020). Experimental Study on the rainfall-runoff responses of typical urban surfaces and two green infrastructures using scale-based models. *Environmental management*, 66, 683-693.
- Liu, Z. (2015). Influence of rainfall characteristics on the infiltration moisture field of highway subgrades. *Road Materials and Pavement Design*, 16(3), 635-652.
- Maggioni, V., Reichle, R. H., & Anagnostou, E. N. (2012). The impact of rainfall error characterization on the estimation of soil moisture fields in a land data assimilation system. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3), 1107-1118.
- Meena, R. K., Sen, S., Nanda, A., Dass, B., & Mishra, A. (2022). A contribution to rainfall simulator design—a concept of moving storm automation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(16), 4379-4390.
- Mendes, T. A., Pereira, S. A. D. S., Rebolledo, J. F. R., Gitirana Jr, G. D. F. N., Melo, M. T. D. S., & Luz, M. P. D. (2021). Development of a rainfall and runoff simulator for performing hydrological and geotechnical tests. *Sustainability*, 13(6), 3060.
- Mhaske, S. N., Pathak, K., & Basak, A. (2019). A comprehensive design of rainfall simulator for the assessment of soil erosion in the laboratory. *Catena*, 172, 408-420.
- Najjar, S. S., Yaghi, K., Adwan, M., & Jaoude, A. A. R. (2015). Drained shear strength of compacted sand with clayey fines. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 9(5), 513-520.
- Nazri, F. A., Zamani, N. S. M., & Singh, M. J. (2018). Analisis ramalan pelemahan hujan semenanjung Malaysia menggunakan peta rekaan berkontur. *Jurnal Kejuruteraan*, 30(1), 77-82.
- Ngezahayo, E., Burrow, M., & Ghataora, G. (2021). Calibration of the simple rainfall simulator for investigating soil erodibility in unpaved roads. *International Journal of Civil Infrastructure*, 4, 144-156.
- Nguyen, Q., Fredlund, D. G., Samarasekera, L., & Marjerson, B. L. (2010). Seasonal pattern of matric suctions in highway subgrades. *Canadian Geotechnical Journal*, 47, 267–280. doi:10.1139/T09-099
- Peng, J., Zhang, J., Li, J., Yao, Y., & Zhang, A. (2020). Modeling humidity and stress-dependent subgrade soils in flexible pavements. *Computers and Geotechnics*, 120, 103413.
- Radzi, S. M., Ghani, A. N. A., Ismail, M. S. N., Hamid, A. H. A., & Ahmad, K. (2017). A study on the use of polyurethane for road flood damage control. *GEOMATE Journal*, 12(32), 82-87.
- Robinson, W. J., Ordaz, M., & Tingle, J. S. (2025). Development of a Rainfall Simulator to Evaluate Moisture Sensitivity of Static Loading in Airfield Pavements. *Transportation Research Record*, 03611981251333712.
- Salem, L. A., Shaban, A. M., & Almuhanna, R. R. (2024, January). Predicting subgrade reaction modulus of sand soils using dynamic cone penetrometer. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2864, No. 1, p. 060007). AIP Publishing LLC.
- Senturk, M. A., Ordu, E., & Tan, R. K. (2025). Machine learning-based prediction of soil compaction parameters. *Environmental Earth Sciences*, 84(13), 349.
- Stevens, J. (1982). Unified soil classification system. *Civil Engineering—ASCE*, 52(12), 61-62.
- Yang, Y., Li, S., Li, C., Wu, L., Yang, L., Zhang, P., & Huang, T. (2020). Comprehensive laboratory evaluations and a proposed mix design procedure for cement-stabilized cohesive and granular soils. *Frontiers in Materials*, 7, 239.
- Yoshioka, M., Takakura, S., Ishizawa, T., & Sakai, N. (2015). Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments. *Journal of Applied Geophysics*, 114, 134-145.
- Zhao, F., Zhang, S. H., Chen, J. G., Kong, G., & Gong, Y. (2011). Research on rainwater infiltration collection and runoff reduction technology in permeable pavement. *Water Supply and Drainage*, 37(S1), S1254-S1258.
- Zhou, L. J. (2012). Subgrade stability analysis with rainfall infiltration. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 204, pp. 284-288). Trans Tech Publications Ltd.
- Zhou, Y. (2023). Soil Mechanics: Description & Classification. *CED Engineering*. Retrieved from <https://www.cedengineering.com/userfiles/G04-002%20-%20Soil%20Mechanics%20-%20Description%20&%20Classification%20-%20US.pdf> on 5 Jan 2025.
- Zhou, Z., Wang, Y., Li, R., Qi, L., Zhao, Y., Xu, Y., Tong, Y. & Huang, J. (2023). The deterioration and restoration of dried soil layers: New evidence from a precipitation manipulation experiment in an artificial forest. *Journal of Hydrology*, 625, 130087.
- Zhu, H., Yu, M., Zhu, J., Lu, H., & Cao, R. (2019). Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. *International journal of transportation science and technology*, 8(4), 373-382.
- Živanović, N., Rončević, V., Spasić, M., Čorluka, S., & Polovina, S. (2022). Construction and calibration of a portable rain simulator designed for the in situ research of soil resistance to erosion. *Soil and Water Research*, 17(3), 158-169.