

Pembangunan Model Matematik Lanjutan untuk Meramal Parameter Pemadatan Tanah Berbutir Halus dari Segi Had Atterberg

(The Development of Advanced Mathematical Models to Predict Compaction Parameters of Fine-Grained Soils in Terms of Atterberg Limits)

Nur Hijrah Nasuha Suzaili^a & Anuar Kasa^{a,b,c*}

^aDepartment of Civil Engineering,
^bDepartment of Engineering Education,
^cCentre for Engineering Education Research,

Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Malaysia

*Corresponding author: iranuar@ukm.edu.my

Received 17th June 2022, Received in revised form 8th August 2022
Accepted 1th September 2022, Available online 15th November 2022

ABSTRACT

Compaction is an important engineering process that ensures the stability of soils by compressing them to a predefined strength. However, in most construction projects, particularly large-scale projects, achieving the appropriate compaction properties, such as optimum moisture content (OMC) and maximum dry density (MDD), it requires time and high cost. Predicting the compaction characteristics from the Atterberg limit, which involves simpler and faster testing techniques, becomes an important task in this scenario. The purpose of this study is to study the comparison of the multiple linear regression (MLR) method with the response surface method (RSM) and artificial neural network (ANN) to determine an accurate, efficient and simple technique to predict soil compaction parameters. For this research, 29 samples were subjected to a variety of laboratory testing. All of the parameters' statistical relationships were analyzed. In this research, techniques are used, and the findings of these studies are discussed and analysed. To see the performance and accuracy of the model, the criteria for validation of the model used are based on the value of coefficient of determination (R^2), absolute mean error (MAE), mean square error (MSE) and mean square root error (RMSE). A comparison with the test data revealed that the coefficient of determination (R^2) of ANN model predictions was greater than those of other models. In addition, the findings indicate that the accuracy of ANN models are superior to the statistical models MLR and RSM.

Keywords: Maximum dry density; optimum moisture content; artificial neural networks; atterberg limit; multiple linear regression

ABSTRAK

Pemadatan ialah proses kejuruteraan yang penting bagi memastikan kestabilan tanah dengan memampatkannya pada kekuatan yang telah ditetapkan. Walau bagaimanapun, dalam kebanyakan projek pembinaan, terutamanya projek berskala besar, untuk mencapai sifat pemadatan yang sesuai, seperti kandungan lembapan optimum (OMC) dan ketumpatan kering maksimum (MDD), ia memerlukan masa yang lama dan kos yang tinggi. Meramalkan ciri pemadatan daripada had Atterberg, yang melibatkan teknik ujian yang lebih mudah dan lebih pantas, menjadi tugas penting dalam senario ini. Tujuan kajian ini adalah untuk mengkaji perbandingan kaedah regresi linear berganda (MLR) dengan kaedah gerak balas permukaan (RSM) dan rangkaian saraf tiruan (ANN) untuk menentukan teknik yang tepat, cekap dan mudah untuk meramalkan menganggar parameter pemadatan tanah. Dalam penyelidikan ini, 29 sampel telah dijalani dengan pelbagai ujian makmal. Semua hubungan statistik parameter telah dianalisis. Dalam penyelidikan ini, teknik-teknik tersebut digunakan, dan dapatan kajian ini dibincangkan dan dianalisis. Bagi melihat prestasi dan ketepatan model, kriteria bagi pengesahan model yang digunakan adalah berdasarkan nilai pekali penentuan (R^2), ralat mutlak min (MAE), ralat kuasa dua min (MSE) dan ralat punca kuasa dua min (RMSE). Perbandingan dengan data ujian mendedahkan bahawa pekali penentuan (R^2) bagi ramalan model ANN, adalah lebih besar daripada model lain. Di samping itu, dapatan menunjukkan bahawa ketepatan model ANN lebih unggul daripada model statistik MLR dan RSM.

Kata kunci: Ketumpatan kering maksimum; kandungan lembapan optimum; rangkaian saraf buatan; had atterberg; regresi linear berganda

PENGENALAN

Jurutera geoteknik sering berhadapan dengan pengendalian jumlah tanah yang besar, di mana ia digunakan sebagai bahan binaan. Jika dilihat dalam bidang kejuruteraan awam, tanah adalah bahan binaan semula jadi dan asas untuk menyokong pelbagai aspek iaitu jalan raya, kereta api, jambatan, bangunan dan empangan. Tanah terbentuk melalui pelbagai proses semula jadi dan mempunyai ciri-ciri kekuatan fizikal tertentu berdasarkan fungsi sokongan binaan dan bahan binaan.

Secara umumnya, tanah dapat diklasifikasikan kepada tiga jenis, iaitu tanah berbutir halus (tanah jeleket), tanah berbutir kasar dan tanah organik. Tanah berbutir halus adalah tanah yang sebahagian besar butir-butir tanahnya terdiri daripada tanah liat dan kelodak. Kebiasaannya, *borrow material* didapati tergolong dalam kumpulan tanah berbutir halus.

Kajian sifat fizikal tanah adalah sangat penting dari pelbagai aspek antaranya asal usul tanah, pengedaran, butiran, kebolehmampatan, kapasiti galas beban, kebolehtelapan, kekuatan ricih, dan kelakuan tanah apabila dikenakan sebarang jenis daya. Pemahaman yang mendalam tentang tanah terutamanya tentang jenis, ciri dan kekuatannya adalah penting untuk memastikan keselamatan dan kestabilan bangunan. Bagi mencapai piawaian keselamatan dan kestabilan ini, ciri kejuruteraan tanah di bawah struktur atau pada struktur mesti dikenal pasti dengan secukupnya. Walau bagaimanapun, untuk mencapai kualiti kejuruteraan, tanah ini memerlukan lebih banyak usaha dan perbelanjaan.

Selain itu, kebanyakan kualiti kejuruteraan tanah bergantung pada sifat indeksinya. Salah satu ujian dalam menentukan sesuatu sifat tanah adalah uji kaji pemadatan tanah. Pemadatan adalah proses yang paling penting untuk menentukan kekuatan tanah. Ia adalah proses penggunaan tenaga mekanikal pada tanah untuk menyusun semula zarahnya bagi meminimumkan nisbah lompong. Matlamat asas pemadatan ialah untuk meningkatkan kekuatan ricih dan kapasiti galas, mengurangkan penurunan, dan menurunkan kebolehtelapan tanah.

Dilihat dari sudut kejuruteraan, pengetahuan mengenai ciri-ciri pemadatan tanah adalah sangat penting untuk menentukan daya majunya sebagai bahan binaan. Dua sifat penting pemadatan tanah yang diperolehi daripada ujian pemadatan makmal ialah ketumpatan kering maksimum (MDD) dan kandungan lembapan optimum (OMC). Kedua-dua ciri ini ditentukan sama ada dengan melakukan ujian proktor konvensional atau ujian proktor terubah suai yang memerlukan masa dan usaha yang banyak. Walau bagaimanapun, ujian penentuan had cecair dan had plastik atau dikenali juga sebagai had atterberg adalah lebih mudah dilakukan dan menjimatkan masa dan kos. Kebiasaannya, had atterberg digunakan untuk mencari korelasi dengan

sifat kejuruteraan tanah yang lain disebabkan parameternya dapat memberi gambaran ciri-ciri tanah.

Oleh itu, model ramalan boleh digunakan untuk menentukan pemadatan tanah, terutamanya apabila sifat indeks sudah diketahui. Beberapa hubungan antara OMC dan MDD dapat ditemui dalam beberapa literatur bagi ujian pemadatan proktor piawai berdasarkan beberapa sifat indeks terpilih seperti had cecair (LL) dan had plastik (PL). Jadi, adalah penting untuk menghubungkan ciri pemadatan dengan sifat indeks dan had ketekalan, yang mudah untuk diketahui.

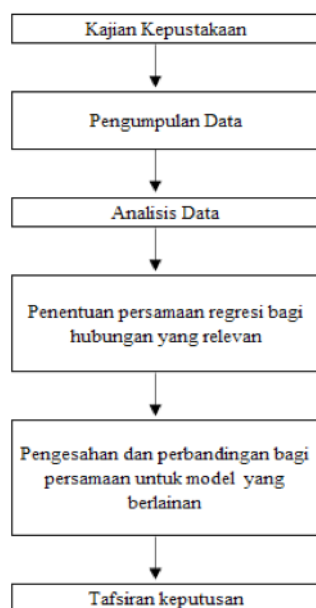
Ciri-ciri pemadatan adalah sangat penting, oleh sebab itu beberapa penyelidik telah membuat percubaan terhadap dan beberapa kajian sejak dahulu dalam membina model empirikal untuk meramalkan ciri pemadatan. Beberapa korelasi telah dibangunkan dalam meramalkan ciri pemadatan tanah berbutir halus dengan sifat indeks dan graviti tentu. Di Matteo et al. (2009) telah mengkaji model yang sesuai untuk menganggar sifat proktor yang diubah suai bagi tanah yang dipadatkan. Model regresi telah dibangunkan untuk menganggar kandungan lembapan optimum dan ketumpatan kering maksimum tanah berbutir halus menggunakan sifat fizikal dan indeks daripada 30 sampel tanah yang dikumpul di sekitar kawasan Itali. Dalam kajian Farooq et al. (2016), lengkung ramalan bagi proktor piawai dan terubah suai untuk menganggar ketumpatan kering maksimum dan kandungan lembapan optimum berdasarkan data had cecair dan plastik bagi tanah berbutir halus telah dihasilkan. Shien Ng et al. (2015) juga membangunkan persamaan korelasi mudah dalam menganggar ketumpatan kering maksimum dan kandungan lembapan optimum menggunakan data ujian sifat indeks yang agak mudah. Tiga model ramalan matematik untuk menentukan dua ciri pemadatan direka bentuk berdasarkan analisis regresi berganda.

Sekiranya nilai ketumpatan kering maksimum tanah dan kandungan lembapan optimum tanah dapat dihubungkan dengan had atterberg secara grafik atau empirik, ini akan menjadikan kerja-kerja jurutera lebih pantas dan berkesan. Kajian ini penting bagi meminimumkan kos dan masa yang akan ditanggung dalam menjalankan ujian pemadatan makmal dan juga untuk memudahkan ujian penentuan parameter pemadatan tanah yang dilakukan bagi projek pembangunan berskala besar yang memerlukan banyak sampel untuk diuji.

KAEDAH KAJIAN

REKA BENTUK KAJIAN

Rajah 1 menggambarkan proses penyelidikan yang digunakan untuk menyiapkan projek ini

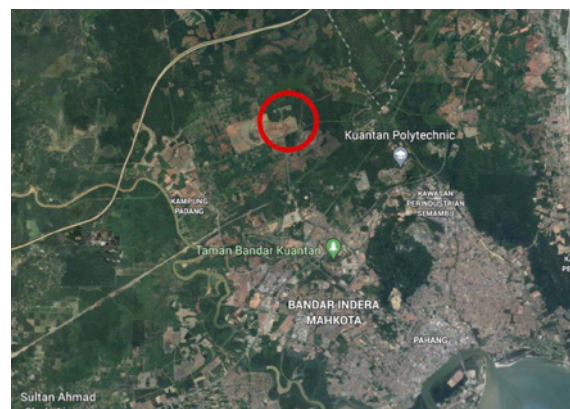


RAJAH 1. Carta aliran proses kajian

PENGUMPULAN DATA

Bagi sampel-sampel tanah yang terlibat, pelbagai parameter diambil kira antaranya kandungan lembapan optimum tanah, ketumpatan kering maksimum, data taburan saiz zarah tanah serta had-had atterberg. Untuk mewujudkan kualiti fizikal dan pemadatan tanah, ujian telah dijalankan selaras dengan kriteria Piawaian British (BS 1377: 1990). Rajah 2 menunjukkan lokasi yang terlibat bagi sampel tanah yang diuji. Data had cecair, had plastik, indeks keplastikan, dikaitkan dengan kandungan kelembapan optimum dan ketumpatan kering maksimum untuk menentukan corak, tingkah laku dan korelasi antaranya.

Jadual 1 menunjukkan data parameter pemadatan tanah untuk sampel tanah yang dikumpul, bersama-sama dengan had atterberg yang sepadan. Data had cecair yang dikumpul adalah antara 52.6 peratus hingga 92 peratus, dengan nilai min 67.9 peratus. Had plastik bernilai antara 28.2 hingga 55.0 peratus, dengan nilai min 36.9 peratus. Hasilnya, nilai min bagi indeks keplastikan ialah 31.0 peratus, dengan julat 21.2 peratus hingga 45.5 peratus. Jadual 1 juga memaparkan data yang dikumpul bagi ketumpatan kering maksimum dengan julat dari 1.42 Mg/m³ hingga 1.62 Mg/m³. Purata ketumpatan kering maksimum ialah 1.55 Mg/m³.



RAJAH 2. Lokasi 29 sampel tanah, Kuantan, Pahang

JADUAL 1. Parameter pemadatan dan nilai had atterberg untuk data yang dikumpul

No. Tanah	LL (%)	PL (%)	PI (%)	MDD (Mg/m ³)	OMC (%)
SPA3	76.10	54.60	21.50	1.42	31.00
SPB1	74.40	39.50	34.90	1.49	30.60
S1	53.10	29.30	23.80	1.58	22.90
S2	68.00	31.10	36.90	1.56	23.10
S3	52.60	31.40	21.20	1.62	19.50
S4	59.00	29.00	30.00	1.59	23.10
S5	59.60	28.70	30.90	1.60	24.50
S6	57.10	28.60	28.50	1.58	23.90
S7	56.80	28.40	28.40	1.61	22.40
S8	55.60	28.20	27.40	1.59	22.70
S9	53.60	30.70	22.90	1.59	21.00
S10	55.80	31.20	24.60	1.61	19.50
S11	70.00	30.00	40.00	1.56	24.50
S12	65.10	32.60	32.50	1.53	25.00
S13	66.00	38.70	27.30	1.53	25.70
S14	69.40	31.40	38.00	1.57	25.50
S15	54.70	32.60	22.10	1.58	23.50
S16	72.00	40.00	32.00	1.57	25.50
S17	67.60	36.00	31.60	1.55	28.00
S18	75.70	38.40	37.30	1.55	27.00
S19	70.30	36.00	34.30	1.50	26.00
S20	79.40	49.00	30.40	1.49	27.50
S21	87.00	55.00	32.00	1.48	32.40
S22	76.40	45.00	31.40	1.51	26.10
S23	86.40	44.60	41.80	1.50	29.40
S24	92.00	46.50	45.50	1.48	30.10
S25	83.10	45.00	38.10	1.50	28.60
S26	64.90	39.40	25.50	1.56	23.00
S27	68.20	39.00	29.20	1.58	27.10

MODEL ANALISIS DATA RAMALAN

Tiga pendekatan digunakan untuk meramalkan ciri pemadatan tanah daripada paramater ujian indeks: regresi linear berbilang (MLR), kaedah gerak balas permukaan (RSM), dan rangkaian saraf buatan (ANN). Rangkaian saraf buatan ialah teknik interpolasi yang sangat berkesan yang boleh menghubungkan pembolehubah bersandar kepada beberapa pembolehubah bebas. Dalam bidang penyelidikan kejuruteraan geoteknik, kaedah ini telah terbukti sebagai salah satu kaedah yang paling banyak digunakan. Oleh kerana ia adalah kaedah berasaskan komputer, ia tidak memberikan sebarang persamaan atau korelasi yang boleh digunakan untuk pengiraan yang dilakukan secara manual atau mengikut peraturan praktikal. Atas sebab ini, pendekatan MLR dan RSM juga digunakan untuk membina korelasi antara ciri pemadatan dan sifat indeks tanah.

ANALISIS REGRESI LINEAR BERGANDA

Bagi tujuan penganalisan data dapatan kajian kuantitatif, Minitab Statistical 21 digunakan. Dalam kaedah regresi, pembolehubah bebas yang mempengaruhi pembolehubah bersandar ditentukan terlebih dahulu. Regresi berperingkat menyediakan kaedah alternatif untuk menentukan pembolehubah bebas mana yang relevan dengan mengenal pasti model subset yang baik yang menghasilkan masa pengkomputeran yang jauh lebih sedikit daripada yang diperlukan untuk mengira semua regresi yang mungkin. Tujuan analisis regresi linear berganda ini adalah untuk mengenal pasti secara serentak dua atau lebih pembolehubah tidak bersandar yang menerangkan variasi pembolehubah bersandar. Untuk kandungan lembapan optimum, OMC dianggap sebagai pembolehubah bersandar, manakala had cecair dan had plastik adalah pembolehubah bebas. Untuk ketumpatan kering maksimum, MDD dianggap sebagai pembolehubah bersandar, manakala had cecair dan had plastik adalah pembolehubah bebas. Analisis MLR telah dijalankan untuk menentukan hubungan antara dua pembolehubah bebas yang berkaitan dengan OMC dan MDD. MLR adalah berdasarkan konsep kuasa dua terkecil, iaitu nilai parameter anggaran dinyatakan sebagai fungsi linear seperti yang dinyatakan dalam Persamaan 1.

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_n X_n \quad (1)$$

di mana, Y mewakili pembolehubah bersandar, α mewakili jangka malar, X_n mewakili pembolehubah bebas, dan β ialah pekali cerun bagi setiap pembolehubah bebas.

KAEDAH PERMUKAAN TINDAK BALAS

Data-data ujian ini juga akan diperiksa kemudian dengan menggunakan kaedah RSM untuk mengetahui perlakuan antara parameter pemadatan tanah dan had atterberg. Menurut Dahmoune (2015), kaedah RSM ialah satu set teknik

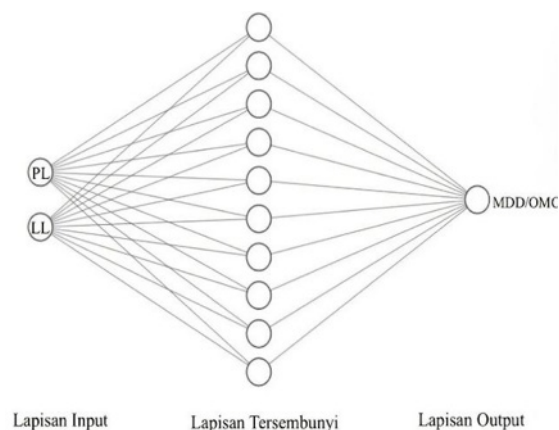
matematik dan statistik untuk menilai saling kebergantungan antara satu set input (pembolehubah bebas) dan satu set output (tindak balas). Kaedah ini biasanya digunakan apabila terdapat banyak parameter input dalam menentukan hasil akhir (tindak balas). Dalam analisis ini, reka bentuk komposit berpusat untuk dua pembolehubah tidak bersandar telah digunakan. Pembolehubah yang diambil kira ialah had cecair (% LL; 52.60-92.00%) dan had plastik (% PL; 28.20-55.00%). Model polinomial tertib kedua digunakan untuk meramalkan respons dan menerangkan perhubungan antara pembolehubah bebas Persamaan 2.

$$Y = a + \beta_i X_i + \beta_{ii} X_i^2 + \beta_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

di mana, Y mewakili pembolehubah bersandar, a mewakili jangka malar, X_i mewakili pembolehubah bebas, dan β_i ialah pekali linear, β_{ii} ialah pekali kuadratik, β_{ij} ialah pekali interaktif menurut Dahmoune (2015).

RANGKAIAN SARAF TIRUAN

Rangkaian saraf tiruan ialah algoritma pembelajaran mesin berdasarkan konsep neuron manusia menurut Han (2018). Oleh kerana kesederhanaan, kebolehpercayaan, ketaklinearan dan keteguhannya, rangkaian saraf buatan yang diilhamkan oleh pemprosesan sistem saraf biologi, boleh digunakan untuk menyelesaikan dan memodelkan pelbagai sistem persekitaran yang rumit. Dalam kajian ini, dua pembolehubah input telah digunakan dalam model rangkaian saraf iaitu PL dan LL dengan menggunakan perisian MATLAB. Seni bina ANN ini terdiri daripada lapisan input, lapisan output dan satu lapisan perantara yang dipanggil lapisan tersembunyi seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Lapisan tersembunyi merupakan elemen yang penting dalam ANN kerana ia mempunyai fungsi kompleks yang mencipta peramal. Satu set nod dalam lapisan tersembunyi yang dipanggil neuron mewakili fungsi matematik yang mengubah suai data input. Semua pembolehubah input dinyatakan dalam peratusan; oleh itu, lapisan input mempunyai dua lapisan. Lapisan keluaran hanya mempunyai satu lapisan iaitu MDD atau OMC. Bagi lapisan tersembunyi pula sebanyak sepuluh lapisan neuron yang akan digunakan. Levenberg-Marquardt dipakai sebagai fungsi pembelajaran dan pemindahan fungsi *tan sigmoid* digunakan untuk lapisan input dan lapisan output. Dalam kajian ini, 15% daripada data asal digunakan sebagai set penentuan, 70% daripada data digunakan untuk melatih rangkaian saraf, dan baki 15% daripada data digunakan untuk menguji rangkaian saraf. Pembahagian ini bertujuan untuk meningkatkan keupayaan model ANN untuk membuat generalisasi dan menghentikannya daripada terlalu sesuai atau *over-fitting*. Untuk menguji ketepatan setiap rangkaian, punca perbezaan ralat purata kuasa dua (MSE) dan pekali penentuan (R^2) antara nilai yang diukur dan diramalkan telah ditentukan.



RAJAH 3. Struktur rangkaian model ANN

Analisis Regresi Linear Berganda

Untuk model regresi, penting untuk mengesahkan kesesuaian model dan kepentingan statistik parameter anggaran. Kajian ini diteruskan dengan menentukan sama ada terdapat korelasi yang signifikan bagi paramater pemadatan tanah dengan had cecair dan had plastik. Bagi melihat prestasi model, analisis korelasi yang digunakan adalah berdasarkan nilai pekali penentuan (R^2), ralat min mutlak (MAE), ralat kuasa dua min (MSE) dan ralat punca kuasa dua min (RMSE) di mana:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x - y)^2}{\sum_{i=1}^n (x - z)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y) \quad (4)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2 \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2 \right)} \quad (6)$$

di mana x adalah nilai data ramalan, y adalah nilai data sebenar, z adalah nilai purata nilai-nilai data sebenar dan n adalah jumlah data yang digunakan.

ANALISIS DAN DAPATAN KAJIAN

Tiga pendekatan digunakan untuk menentukan hubungan ciri pemadatan tanah daripada paramater ujian indeks iaitu:

regresi linear berbilang, kaedah gerak balas permukaan, dan rangkaian saraf buatan.

ANALISIS REGRESI LINEAR BERBILANG

Model MLR adalah cara piawai untuk memodelkan interaksi linear sesuatu hubungan. Ia sering digunakan sebagai piawai untuk membandingkan model lain yang tidak linear. Terdapat kemungkinan bahawa meramalkan ciri pemadatan tanah berbutir halus berdasarkan hanya pada had cecair, had plastiknya dan plastik indeks boleh mempunyai kelemahan yang ketara, atas sebab ini, ia adalah lebih wajar untuk mencipta model yang mengambil kira ketiga-tiga had ketekalan. Parameter plastik indeks tidak dikira untuk analisis dalam kajian ini kerana semasa pemrosesan regresi ini ia adalah kolinear. Untuk mengambil kira kedua-dua nilai ketekalan, had cecair dan had plastik diambil kira sebagai pembolehubah bebas, manakala MDD dan OMC diambil kira sebagai pembolehubah bersandar. Pada akhirnya, satu set model diperolehi dengan kaedah regresi linear berbilang menggunakan perisian Minitab. Persamaan 7 dan 8 didapati sebagai cara terbaik untuk meramalkan prestasi parameter pemadatan. Model-model ini dinyatakan dalam Persamaan 7 dan 8 seperti berikut:

$$MDD = 1.7820 - 0.001501 LL - 0.00359 PL \quad (7)$$

$$(R^2 = 0.776)$$

$$OMC = 8.31 + 0.1859 LL + 0.1232 PL \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.779)$$

Kedua-dua model ini menghasilkan pekali regresi yang baik iaitu 0.776 untuk MDD dan 0.779 untuk OMC, di mana ia menunjukkan bahawa model adalah setanding dan terdapat hubungan yang baik antara pemadatan tanah dan had ketekalan.

ANALISIS KAEDAH PERMUKAAN TINDAK BALAS

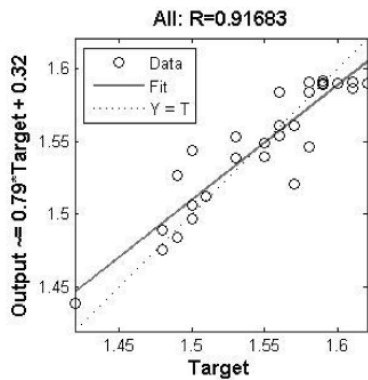
Penyiasatan menggunakan kaedah RSM telah dijalankan untuk menentukan kesan pembolehubah dan ramalan parameter pemadatan tanah untuk parameter yang berbeza nilai. Persamaan polinomial tertib kedua digunakan untuk menyatakan tindak balas dengan menggunakan keputusan eksperimen yang diperolehi atas dasar reka bentuk komposit berpusat, CCD. Persamaan yang diperolehi diberikan dalam Persamaan 9 dan 10. Keputusan menunjukkan R^2 bagi MDD dan OMC adalah 0.816 dan 0.806. Nilai R^2 tersebut berada dalam kategori yang sangat baik walaupun tidak menghampiri nilai 1.

$$MDD = 1.896 - 0.00359 LL - 0.00598 PL - 0.00091 LL^2 - 0.00031 PL^2 + 0.000383 LL(PL) \quad (R^2=0.816) \quad (9)$$

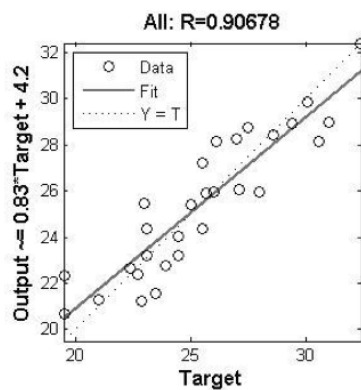
$$OMC = 2.7 + 0.849 LL - 0.794 PL - 0.000775 LL^2 - 0.000775 PL^2 + 0.0009 LL(PL) + 0.016 PL(LL) \quad (R^2=0.806) \quad (10)$$

RANGKAIAN SARAF BUATAN

Keputusan keseluruhan prestasi model ANN untuk anggaran MDD dan OMC dipaparkan dalam Rajah 4 dan 5 di mana ia menunjukkan graf linear regresi antara parameter pemadatan dan dua input iaitu PL dan LL daripada model ANN. Berdasarkan graf tersebut, pekali korelasi bagi MDD dan OMC ialah 0.917 dan 0.907. Nilai korelasi (R) tersebut berada dalam kategori yang sangat baik dengan nilai yang menghampiri 1. Ini juga menunjukkan bahawa bagi pekali penentuan (R^2) untuk MDD serta OMC pula ialah 0.841 dan 0.822.



RAJAH 4. Prestasi rangkaian neural untuk MDD dengan had ketekalan



RAJAH 5. Prestasi rangkaian neural untuk OMC dengan had ketekalan

PENGESAHAN MODEL YANG DIBANGUNKAN

Ketepatan setiap model dinilai berdasarkan korelasi yang ditemui antara nilai yang diramalkan untuk model tersebut

dan nilai yang sebenarnya diperoleh. Selepas itu, model terbaik dipilih jika ia mempunyai ciri statistik ini;

1. Mempunyai nilai R^2 yang tinggi.
2. Mempunyai nilai MSE yang rendah.
3. Mempunyai nilai MAE yang rendah
4. Mempunya nilai RMSE yang rendah.

ANALISIS REGRESI LINEAR BERGANDA

Bagi pengesahan model yang dibangunkan menggunakan persamaan 7 dan 8, berat unit kering maksimum yang diukur dan diramalkan serta kandungan lembapan optimum telah ditunjukkan dalam bentuk graf seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6. Daripada hasil analisis menggunakan MLR, R^2 bagi OMC dan MDD ialah 0.773 dan 0.779. Berdasarkan ringkasan keputusan pengesahan model MLR iaitu Jadual 2, nilai min ralat mutlak, MAE yang diperolehi ialah 0.017 bagi MDD dan 1.243 bagi OMC. Nilai MSE pula ialah 0.001 bagi MDD, di mana ia menunjukkan bahawa model ini sangat tepat, manakala OMC pula ialah 2.351 di mana ia kurang tepat berbanding model MDD. Selain itu, ralat punca kuasa dua juga dikira. RMSE bagi MDD ialah 0.023 dan bagi OMC pula ialah 1.533. Keputusan ini jelas menunjukkan bahawa keperluan untuk model matematik yang lebih tepat diperlukan bagi mencapai tahap ketepatan yang dikehendaki.

JADUAL 2. Ringkasan keputusan pengesahan model parameter pemadatan bagi model MLR

	R^2	MAE	MSE	RMSE
Maksimum Ketumpatan Kering, MDD (Mg/m^3)	0.773	0.017	0.001	0.023
Kandungan Lembapan Optimum, OMC (%)	0.779	1.243	2.351	1.533

ANALISIS KAEDAH PERMUKAAN TINDAK BALAS

Rajah 7 menggambarkan perwakilan grafik bagi model yang disahkan untuk MDD dan OMC. Ringkasan pengesahan model yang menunjukkan keputusan R^2 , MAE, MSE dan RMSE ditunjukkan dalam Jadual 3. Seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3, R^2 bagi OMC ialah 0.806 dan MDD pula ialah 0.813, manakala MAE, MSE, RMSE bagi MDD ialah 0.017, 0.000, dan 0.021. Bagi OMC pula ialah 1.102, 2.065, dan 1.437.

JADUAL 3. Ringkasan keputusan pengesahan model parameter pemadatan bagi model RSM

	R ²	MAE	MSE	RMSE
Maksimum Ketumpatan Kering, MDD (Mg/m ³)	0.813	0.017	0.000	0.021
Kandungan Lembapan Optimum, OMC (%)	0.806	1.102	2.065	1.437

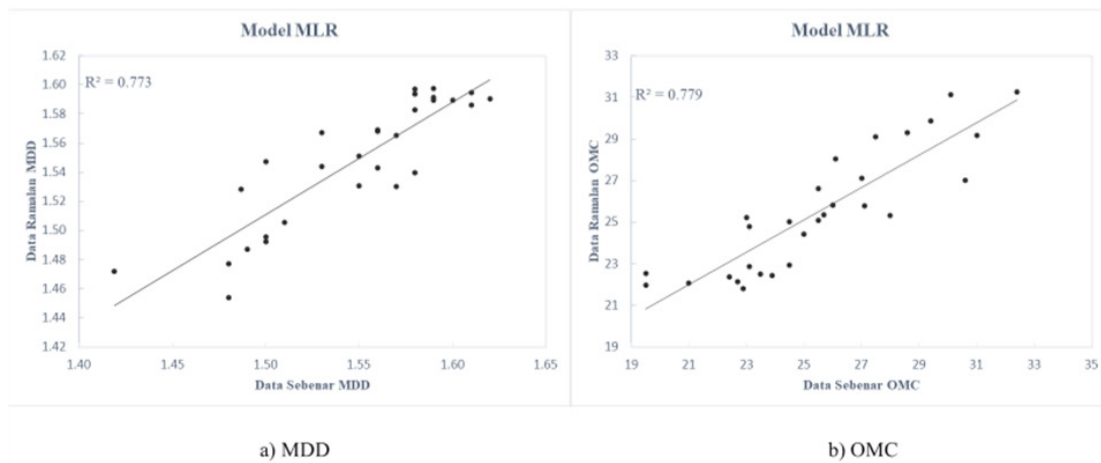
RANGKAIAN SARAF TIRUAN

Dalam Rajah 8, data ramalan ANN telah diplot dengan data yang sebenar bagi menentukan pekali penentuan. Berdasarkan graf yang telah diplot dalam Rajah 8 tersebut, didapati bahawa MDD mempunyai ketepatan yang tinggi dengan nilai pekali penentuan, R² menghampiri nilai 1 iaitu

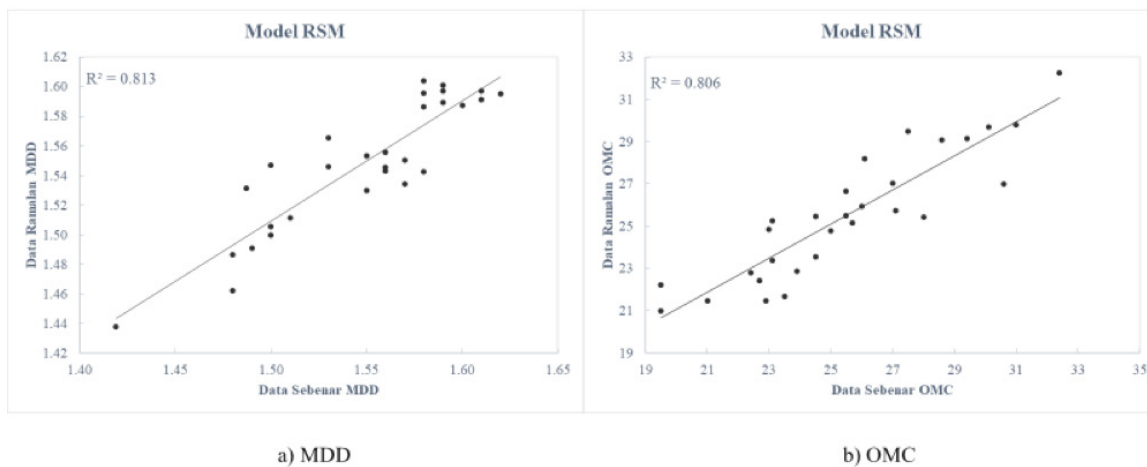
0.912, manakala OMC pula adalah 0.909. Nilai MAE yang diperolehi daripada proses pengiraan bagi MDD dan OMC ialah 0.012 dan 0.707. Nilai RMSE adalah berpandukan kepada nilai MSE. Nilai RMSE digunakan untuk mengukur ketepatan model. Melalui proses analisis ini, nilai RMSE yang diperolehi bagi MDD dan OMC adalah 0.015 dan 1.038.

JADUAL 4. Ringkasan keputusan pengesahan model parameter pemadatan bagi model ANN

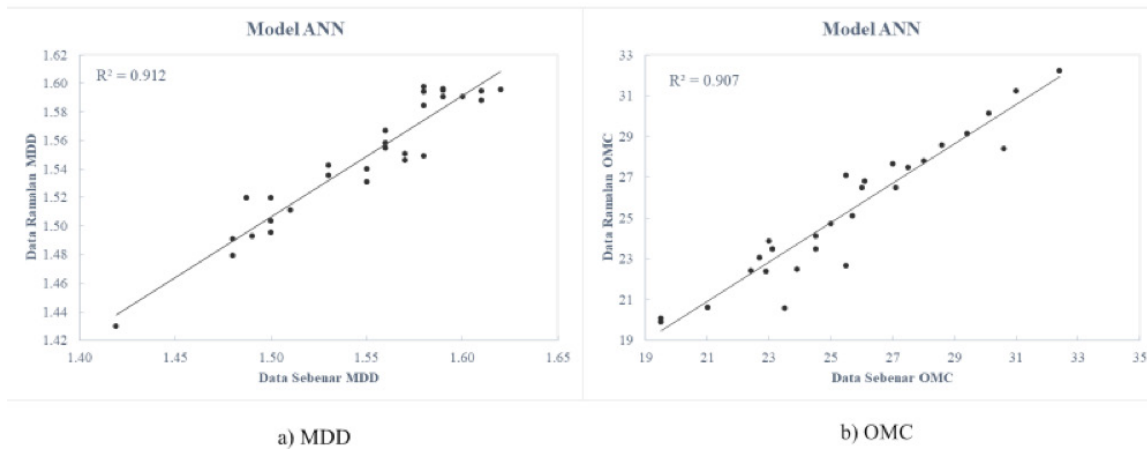
	R ²	MAE	MSE	RMSE
Maksimum Ketumpatan Kering, MDD (Mg/m ³)	0.912	0.012	0.000	0.015
Kandungan Lembapan Optimum, OMC (%)	0.909	0.707	1.077	1.038



RAJAH 6. Plot serakan data ramalan dan data sebenar untuk pengesahan model MLR untuk a) MDD dan b) OMC



RAJAH 7. Plot serakan data ramalan dan data sebenar untuk pengesahan model RSM untuk a) MDD dan b) OMC



RAJAH 8. Plot serakan data ramalan dan data sebenar untuk pengesahan model ANN untuk a) MDD dan b) OMC

PERBANDINGAN MODEL YANG DIBANGUNKAN

MAKSIMUM KETUMPATAN KERING

Jadual 5 menunjukkan ringkasan keputusan analisis statistik bagi ketiga-tiga model bagi MDD. Model ANN menjana hasil yang lebih tepat daripada model MLR. Mengenai parameter ralat, MSE model ANN adalah jauh lebih kecil. Ini kerana daripada Jadual 4.4 dapat diperhatikan bahawa nilai R^2 untuk model ANN adalah lebih besar berbanding model yang lain. Jadual 5 juga menunjukkan bahawa prestasi bagi model MLR tidak memuaskan, manakala model RSM mempunyai tahap prestasi yang lebih kurang sama. MLR tidak begitu boleh dilaksanakan kerana pembolehubah tertentu telah dipadamkan daripada model regresi semasa pemprosesan regresi kerana ia adalah kolinear. Model ANN, iaitu dengan R^2 0.912 dan RMSE 0.015 bagi MDD, mungkin dianggap lebih cekap sedikit daripada pesaingnya, model RSM, dengan hanya R^2 0.813, dan MSE dengan serendah 0.021. Nilai MAE yang kecil menunjukkan bahawa struktur model rangkaian saraf tiruan direka bentuk dengan baik dengan ketepatan yang tinggi.

JADUAL 5. Ringkasan keputusan pengesahan model parameter MDD bagi ketiga-tiga model

	R^2	MAE	MSE	RMSE
MLR	0.773	0.017	0.001	0.023
RSM	0.813	0.017	0.000	0.021
ANN	0.912	0.012	0.000	0.015

KANDUNGAN LEMBAPAN OPTIMUM

Dapat diperhatikan daripada Jadual 6 bahawa R^2 dan RMSE bagi paramater OMC iaitu dengan 0.909 dan 1.038 dalam model ANN adalah lebih baik berbanding model RSM dengan hanya R^2 serendah 0.806 dan RMSE setinggi 1.437. Perbandingan nilai R^2 , RMSE dan MAE menunjukkan bahawa model ANN mengatasi prestasi model MLR dan RSM dan memberikan hasil yang lebih dekat dengan nilai 1.

JADUAL 6. Ringkasan keputusan pengesahan model parameter OMC bagi ketiga-tiga model

	R^2	MAE	MSE	RMSE
MLR	0.779	1.243	2.351	1.533
RSM	0.806	1.102	2.065	1.437
ANN	0.909	0.707	1.077	1.038

PERBINCANGAN

Dalam penyelidikan ini, setiap MDD dan OMC dianggap sebagai pembolehubah bersandar. Nilai MDD terkecil ialah 1.42 Mg/m³, dan nilai maksimum ialah 1.6 Mg/m³, manakala nilai minimum OMC ialah 19.5 peratus dan nilai maksimum ialah 32.4 peratus. Penemuan telah menunjukkan bahawa model ANN mampu meramalkan MDD dan OMC dengan lebih baik. Ini kerana daripada Jadual 5 dan Jadual 6 dapat diperhatikan bahawa nilai R^2 untuk model ANN adalah lebih besar berbanding model yang lain. Jadual 5 dan Jadual 6 juga menunjukkan bahawa prestasi bagi model MLR tidak memuaskan, manakala model RSM mempunyai tahap prestasi yang lebih kurang sama. MLR tidak begitu boleh dilaksanakan kerana pembolehubah tertentu telah dipadamkan daripada model regresi semasa pemprosesan regresi kerana ia adalah kolinear. Model ANN, iaitu dengan R^2 0.912 dan RMSE 0.015 bagi MDD, mungkin dianggap lebih cekap sedikit daripada pesaingnya, model RSM, dengan hanya R^2 0.813, dan RMSE dengan serendah 0.021. Dapat dilihat juga daripada Jadual 6 bahawa R^2 dan RMSE bagi paramater OMC iaitu dengan 0.909 dan 1.038 dalam model ANN adalah lebih baik berbanding model RSM dengan hanya R^2 serendah 0.806 dan RMSE setinggi 1.437. Nilai MAE yang kecil menunjukkan bahawa struktur model rangkaian saraf tiruan direka bentuk dengan baik dengan ketepatan yang tinggi.

Bagi perbandingan kajian yang lepas dengan kajian terkini, dalam kajian Omar (2018), model ANN digunakan untuk percubaan membuat ramalan mengenai sifat pemadatan tanah berbutir halus (ketumpatan kering

maksimum dan kandungan lembapan optimum) daripada pelbagai sifat fizikal. Nilai R^2 untuk OMC adalah 0.85, dan nilai R^2 untuk MDD pula adalah 0.90. Penemuan yang dicapai daripada kajian sekarang dengan menggunakan model ANN adalah lebih unggul, dengan nilai R^2 0.909 bagi OMC serta R^2 0.912 bagi MDD. Berdasarkan hasil kajian, ia akan dapat meramalkan ketumpatan kering maksimum dan kandungan lembapan optimum pada masa hadapan untuk ujian pemadatan dengan hanya menggunakan parameter had atterberg.

RUMUSAN DAN CADANGAN

Berdasarkan hasil kajian, kesemua matlamat dalam disertasi ini telah tercapai. 29 tanah berbutir halus di Kuantan, Pahang telah digunakan untuk membangunkan dan mengesahkan persamaan empirikal untuk menganggar parameter pemadatan Proctor standard daripada parameter Atterberg. Dapat diperhatikan, penggunaan had ketekalan dalam meramalkan parameter pemadatan tanah membuahkan hasil yang memuaskan. Ini kerana hubungan antara ketumpatan kering maksimum dan kandungan lembapan optimum dengan parameter had atterberg adalah wujud. Objektif pertama bagi kajian ini tercapai kerana hasil kajian ini menunjukkan bahawa terdapat perkaitan yang kuat dan korelasi yang baik di antara berat unit kering maksimum dan kandungan air optimum dengan had cecair dan had plastik kerana nilai pekali penentuan menunjukkan ia mempunyai keputusan yang sangat baik.

Berdasarkan hasil kajian, ramalan setiap parameter pemadatan tanah; maksimum ketumpatan kering (MDD) dan kandungan lembapan optimum (OMC) antara Had Atterberg dapat ditentukan melalui model-model yang telah dibangunkan melalui tiga kaedah analisis yang berbeza. Nilai ramalan bagi setiap pemadatan tanah melalui tiga kaedah yang berbeza diperlukan bagi menentukan ketepatan model-model yang telah dibangunkan.

Seperti yang telah dinyatakan dalam objektif kajian ini, penyelidikan ini juga bertujuan untuk membandingkan model regresi dan algoritma pembelajaran mesin bagi membangunkan teknik yang tepat, cekap dan mudah untuk meramalkan parameter pemadatan tanah iaitu MDD dan OMC. Keputusan model ramalan telah dibandingkan dengan data eksperimen dan ketiga-ketiga model yang dijana telah digunakan dalam proses pengesahan. Perbandingan keputusan daripada proses pengesahan model menunjukkan bahawa model ANN yang dibangunkan memberikan ramalan yang sangat tepat. Penemuan penyelidikan ini menunjukkan, ANN mampu membangunkan model ramalan dengan tahap ketepatan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan model MLR dan RSM. Ini kerana rangkaian saraf tiruan berfungsi lebih baik dalam analisis ramalan kerana lapisan tersembunyi. Model regresi linear hanya menggunakan nod input dan output untuk membuat ramalan. Namun rangkaian saraf tiruan ini menggunakan lapisan tersembunyi yang berfungsi seperti neuron dalam

otak manusia untuk membuat ramalan lebih tepat. Secara keseluruhannya, model ANN terus unggul dari segi kecekapan dan ketepatannya semasa menganggar data kerana ANN ialah instrumen yang kuat untuk meramal parameter penyatuan, dan keputusan yang lebih tepat dicapai berbanding dengan pendekatan tradisional.

Dalam penyelidikan lanjutan, lebih banyak data yang diperlu untuk dianalisis bagi mencapai keputusan yang lebih tepat. Dalam penyelidikan seterusnya, ia boleh diperluaskan lagi dengan menggabungkan parameter tanah lain seperti graviti tentu, peratus pasir, peratus kelodak, peratus batu kelikir, dan lain-lain untuk membangunkan model di mana ia tidak hanya tertumpu kepada parameter Had Atterberg sahaja dalam meramalkan parameter ujian pemadatan. Dengan cadangan ini, ia dapat meningkatkan lagi ketepatan ramalan parameter pemadatan tanah ini.

Bukan itu sahaja, untuk meningkatkan ketepatan model, kajian tambahan perlu dilakukan menggunakan lebih banyak model berasaskan AI untuk anggaran parameter pemadatan tanah untuk menyelesaikan kesukaran model dan untuk menyiasat sumbangan setiap kombinasi input seperti penggunaan analisis ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*). ANFIS adalah gabungan daripada rangkaian saraf dan prinsip Logik Fuzzy yang mempunyai keupayaan untuk memanfaatkan kedua-duanya dalam satu rangka kerja. Model yang canggih boleh digunakan sebagai alat yang boleh dipercayai dan praktikal untuk mengira indeks mampatan tanah. Penambakan dalam isu ini akan meningkatkan dengan ketara kegunaan teknik buatan ini dan mungkin akan menjadi satu alat yang berguna untuk generasi akan datang.

RUJUKAN

- Hasnat, A. 2019. Prediction of Compaction Parameters of Soil using Support Vector Regression. *Current Trends in Civil & Structural Engineering* 4(1).
- Kamarudin, F. 2005. Estimation of soil compaction parameters based on Atterberg limits. Report.
- Karimpour-Fard, M., Machado, S.L., Falamaki, A., Carvalho, M.F. & Tizpa, P. 2019. Prediction of Compaction Characteristics of Soils from Index Test's Results. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering* 43: 231–248.
- Rollings, M.P. 1996. *Geotechnical materials in construction*. (R. S. Rollings, Ed.). book, New York: McGraw-Hill.
- Toms, T. & Philip, J.G. 2016. Prediction of Compaction Characteristics from Atterberg Limits and Specific Gravity for Kuttanad Soil. *International Journal of Science*
- Verma, G. & Kumar, B. 2020. Prediction of compaction parameters for fine-grained and coarse-grained soils: a review. *International Journal of Geotechnical Engineering* 14(8): 970–977.
- Matteo, L., Bigotti, F., & Ricco, R. 2009. Best-fit models to estimate modified proctor properties of compacted soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 135(7): 992–996.

- Omar, M., Shanableh, A., Mughieda, O., Arab, M., Zeiada, W., & Al-Ruzouq, R. 2018. Advanced mathematical models and their comparison to predict compaction properties of fine-grained soils from various physical properties. *Soils and Foundations* 58(6): 1383–1399.
- Shien Ng, K., Hafeez Osman, M., & Ghazali, M. S. 2015. Estimating maximum dry density and optimum moisture content of compacted soils effect of SCBA/SCSA on mechanical properties of cement-treated soil view project analytical formulation of double layer consolidation on floating stone columns using nonlinear theory view project estimating maximum dry density and optimum moisture content of compacted soils.