

Korelasi Nilai *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (CPTu) untuk Estimasi Daya Dukung Tanah di Kota Batam, Kepulauan Riau

Firli Rahmadian^{1,*}, Asri Oktavioni Indraswari¹, Urwatul Wusqa¹

Program Studi Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Kampus Baru Depok Universitas Indonesia, Kota Depok, 16424, Indonesia

Narahubung: firli.rahmadian@ui.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (CPTu) dalam mengestimasi daya dukung tanah (q_a), guna mendukung perencanaan pembangunan panel surya di wilayah dengan kondisi geologi yang bervariasi. Pemilihan lokasi pembangunan panel surya memerlukan pemahaman karakteristik tanah, termasuk kemampuan tanah dalam menahan beban, untuk memastikan kestabilan dan keberlanjutan konstruksi di atasnya. Lokasi penelitian berada di daerah yang secara geologi tersusun atas Formasi Semarung dan Pancur yang terdiri atas batupasir arkosik, batulempung, batuserpih, dan konglomerat. Data terdiri dari 20 titik uji SPT dan 14 titik uji CPTu, masing-masing pada tiga kedalaman sejajar. Nilai daya dukung tanah (q_a) dihitung dari nilai N-SPT menggunakan rumus Bowles, lalu dikorelasikan secara linier dengan parameter CPTu, yaitu tahanan ujung konus (q_c) dan hambatan selubung (f_s). Sebanyak 30 pasang sampel digunakan, terdiri atas 24 pasang untuk membangun model korelasi dan 6 pasang untuk validasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa korelasi antara q_c dan q_a memiliki koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7302 dengan tingkat akurasi 90% (MAPE 10%), sedangkan korelasi antara f_s dan q_a memiliki R^2 sebesar 0,7169 dengan akurasi 87% (MAPE 13%). Model terbaik (q_c - q_a) digunakan untuk menghitung daya dukung di seluruh titik CPTu, kemudian digabungkan dengan hasil uji SPT dalam bentuk peta sebaran daya dukung tanah. Hasil akhir menunjukkan variasi nilai daya dukung tanah yang dipengaruhi oleh kondisi geologi, seperti jenis litologi, topografi, dan kedalaman tanah, yang penting untuk perencanaan teknis pembangunan panel surya.

Kata Kunci: SPT, CPTu, q_a , Korelasi Linier, MAPE

1. Pendahuluan

Pembangunan panel surya di Kota Batam merupakan bagian dari upaya percepatan transisi energi terbarukan yang sejalan dengan target pembangunan berkelanjutan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2011). Untuk menunjang keberhasilan infrastruktur ini, pemahaman terhadap karakteristik tanah menjadi hal yang sangat penting, terutama dalam kaitannya dengan estimasi daya dukung tanah yang berperan dalam menjaga kestabilan struktur (Das, 2017). Kota Batam memiliki kondisi geologi yang cukup kompleks, didominasi oleh Formasi Semarung dan Pancur, yang terdiri atas litologi

batupasir arkosik, batulempung, batuserpih, dan konglomerat (Kusnama dkk., 1994). Variasi litologi ini berpotensi menghasilkan perbedaan dalam parameter teknis tanah. *Standard Penetration Test* (SPT) banyak digunakan dalam evaluasi tanah, namun bersifat diskrit secara vertikal (SNI 4153: 2008). Untuk melengkapi keterbatasan tersebut, *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (CPTu) dapat digunakan karena menyediakan data yang kontinu serta informasi tambahan berupa tekanan pori (SNI 2827:2008). Integrasi kedua data ini melalui pendekatan korelasi linier diharapkan mampu meningkatkan akurasi estimasi daya dukung

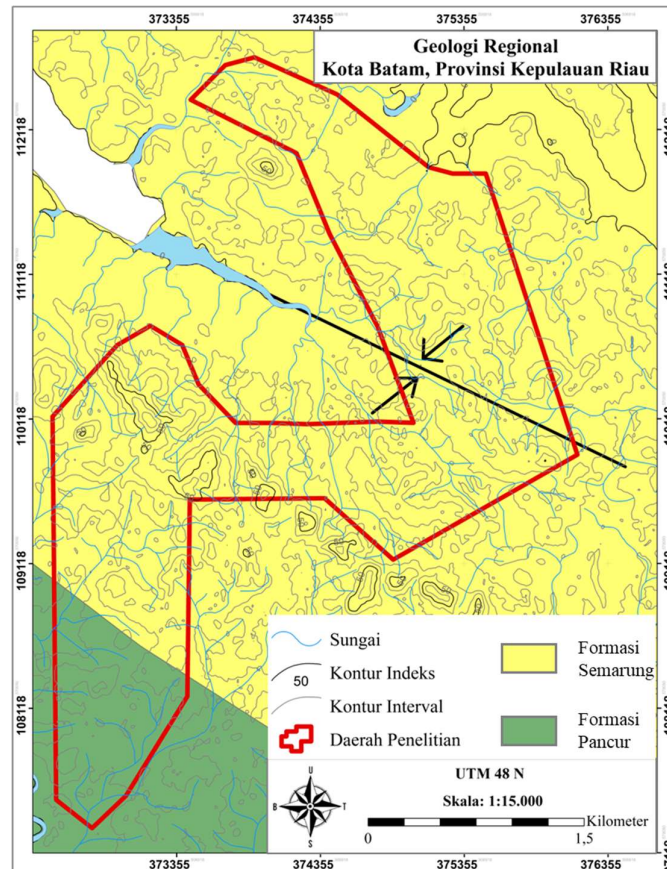
tanah, khususnya di lokasi dengan data uji terbatas (Satriyo dkk., 2020).

Permasalahan utama dalam penelitian ini berangkat dari perlunya memahami hubungan antara hasil uji SPT dan CPTu dalam konteks estimasi daya dukung tanah. Selain itu, penting untuk mengevaluasi tingkat akurasi model korelasi yang dibangun dari kedua metode tersebut agar dapat digunakan secara andal dalam perencanaan geoteknik. Di samping itu, pemetaan distribusi daya dukung tanah berdasarkan hasil pemodelan korelasi juga menjadi bagian penting untuk mengetahui pola penyebaran nilai-nilai daya dukung di seluruh lokasi penelitian.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji hubungan linier antara parameter-parameter hasil pengujian SPT dan CPTu sebagai dasar

estimasi daya dukung tanah. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menilai tingkat akurasi dari model korelasi linier yang dibangun agar dapat digunakan secara efektif dalam prediksi daya dukung. Akhirnya, hasil perhitungan ini akan digunakan untuk menyusun peta sebaran daya dukung tanah sebagai dasar pertimbangan teknis dalam perencanaan pembangunan infrastruktur di wilayah penelitian.

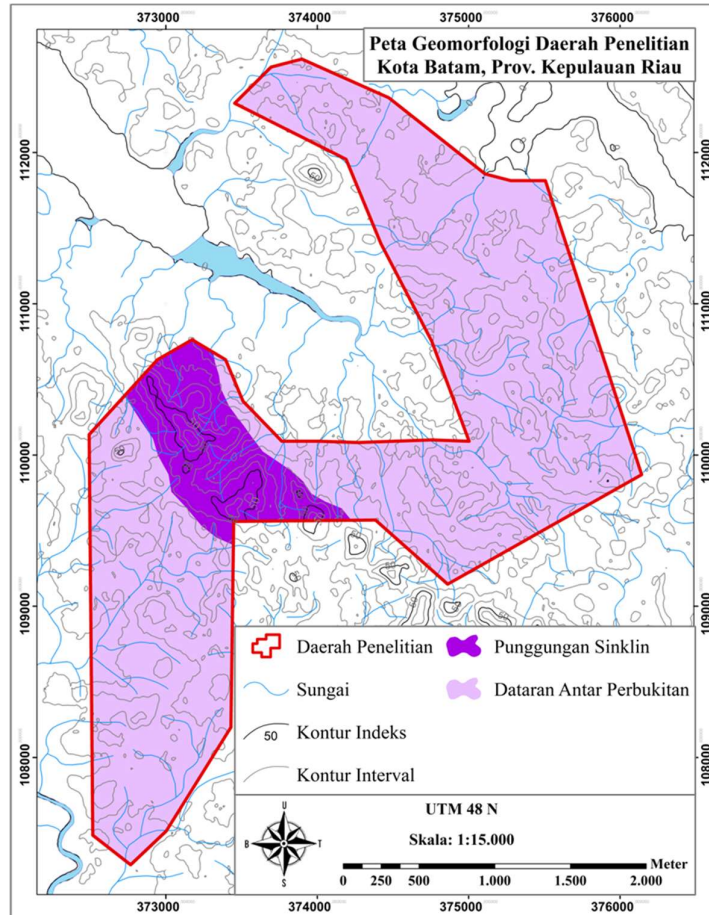
Menurut Kusnama dkk. (1994) Secara geologi daerah penelitian tersusun oleh Formasi Semarang yang terdiri atas batupasir arkosa dengan sisipan batulempung dan Formasi Pancur yang terdiri atas batuserpih dengan sisipan batupasir dan konglomerat, keduanya berumur kapur (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Geologi Regional (dimodifikasi dari Kusnama dkk., 1994). Zona berwarna kuning menunjukkan Formasi Semarang, sedangkan zona berwarna hijau menunjukkan Formasi Pancur.

Sedangkan secara struktural, wilayah ini termasuk daerah yang relatif stabil, dengan lipatan minor yang berorientasi barat-laut-tenggara (Nabella dkk., 2019). Dari aspek geomorfologi, daerah penelitian terbagi atas

satuan punggung sinklin dan dataran antar perbukitan (Gambar 2), yang menunjukkan variasi elevasi dan kemiringan lereng serta memengaruhi distribusi dan sifat fisik tanah.



Gambar 2. Peta Geomorfologi Lokal, diklasifikasi berdasarkan Brahmantyo dan Bando (2006). Zona ungu tua menunjukkan Satuan Punggungan Sinklin (kemiringan lereng 4°–33°). Zona ungu muda menunjukkan Satuan Dataran Antar Perbukitan (kemiringan lereng 0°–16°).

Penilaian daya dukung tanah dalam penelitian ini dilakukan melalui pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (CPTu). SPT menghasilkan nilai pukulan (N-SPT) yang mewakili kekuatan relatif tanah, tetapi bersifat diskrit karena interval pengujiannya berkisar setiap 1,5–2 meter (SNI 4153: 2008). Untuk pasir halus dengan nilai N-

SPT > 15, dilakukan koreksi menggunakan rumus Bowles (1997):

$$N_{60} = 15 + 0,5 (NSPT - 15) \quad (1)$$

Sementara itu, CPTu memberikan data kontinu terhadap kedalaman dan menghasilkan tiga parameter utama, yaitu tahanan ujung konus (q_c), hambatan gesekan selubung (f_s),

dan tekanan pori (u_b) (SNI 2827: 2008). Nilai-nilai ini digunakan untuk interpretasi stratigrafi dan klasifikasi jenis tanah berdasarkan metode Robertson (Robertson & Cabal, 2022). Daya dukung tanah dihitung dari hasil SPT

$$q_a = 20 N_{60} K_d \quad ; \text{jika } B \leq 1,2 \text{ m}$$

$$q_a = 12.5 N_{60} ((B + 0.3)/B)^2 K_d \quad ; \text{jika } B > 1,2 \text{ m}$$

$$*K_d = 1 + 0.33 (D_f)/B \quad ; \text{maks } 1,33$$

Untuk menghubungkan parameter CPTu terhadap daya dukung tanah dari SPT, digunakan pendekatan regresi linier. Korelasi antara q_c dan f_s terhadap q_a dianalisis dengan menilai koefisien determinasi (R^2), yang menunjukkan kekuatan hubungan antar variabel (Sugiyono, 2007). Interpretasi R^2 dibagi menjadi empat kategori: $< 0,25$ tidak baik, $0,25-0,55$ cukup baik, $0,56-0,75$ baik, dan $> 0,75$ sangat baik. Selain itu, akurasi model dievaluasi menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) yang dinyatakan dalam persen (Tayman & Swanson, 1999):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{y_i} \times 100 \quad (2)$$

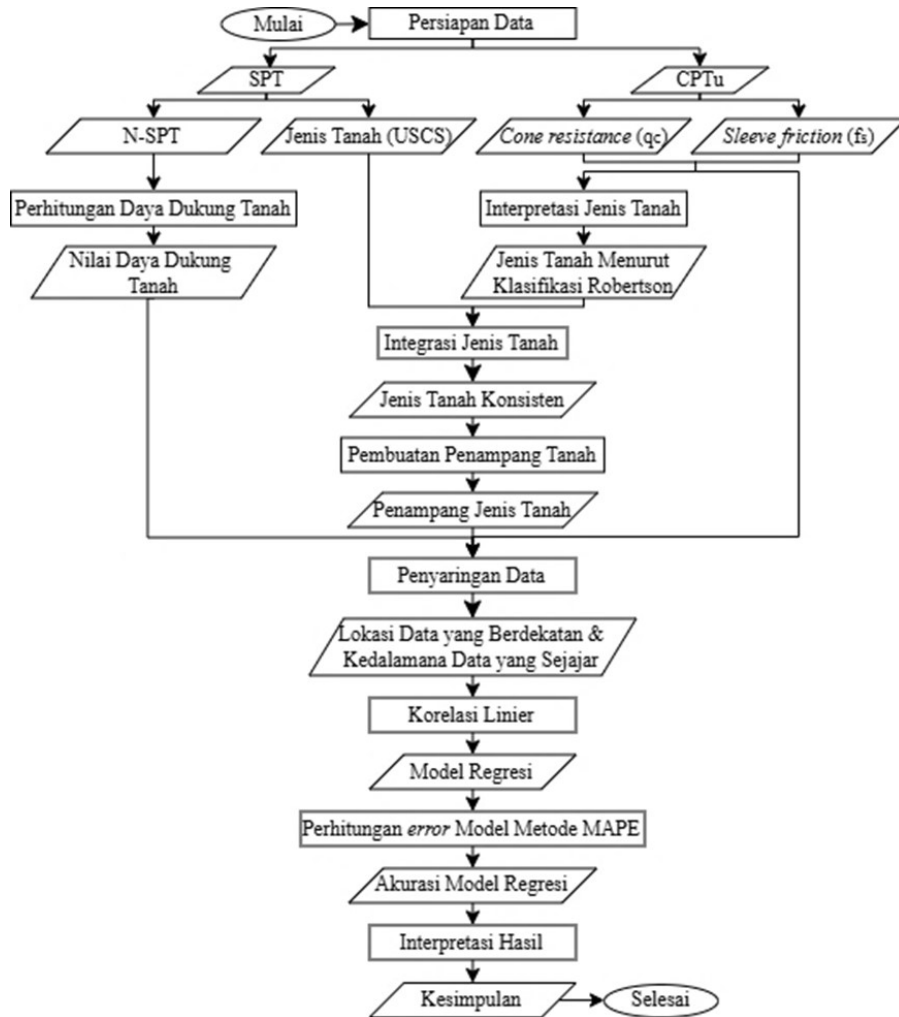
n = Jumlah data
 \hat{y}_i = Nilai prediksi
 y_i = Nilai aktual

menggunakan rumus empiris Bowles (1997), yang mempertimbangkan pengaruh kedalaman fondasi (D_f) dan lebar fondasi (B) sebagai berikut:

Dengan interpretasi: $<10\%$ sangat akurat, $10-20\%$ baik, $20-50\%$ wajar, dan $>50\%$ tidak akurat (Montaño Moreno dkk., 2013). Evaluasi statistik ini digunakan untuk memilih model terbaik yang dapat diandalkan dalam estimasi daya dukung tanah berbasis CPTu.

2. Data dan Metode

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa hasil pengujian SPT dan CPTu di Kota Batam. Nilai daya dukung tanah (q_a) dihitung dari N-SPT menggunakan rumus empiris Bowles (1997), lalu dikorelasikan secara linier dengan parameter CPTu berupa tahanan ujung (q_c) dan hambatan selubung (f_s). Integrasi jenis tanah dilakukan untuk mencocokkan titik SPT dan CPTu yang berdekatan, menghasilkan 30 pasangan data. Data kemudian dibagi menjadi *training set* (80%) dan *testing set* (20%) untuk membangun dan memvalidasi model regresi linier (Gholamy dkk., 2018). Evaluasi dilakukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) dan tingkat akurasi menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Alur lengkap penelitian ditunjukkan pada diagram alir berikut.

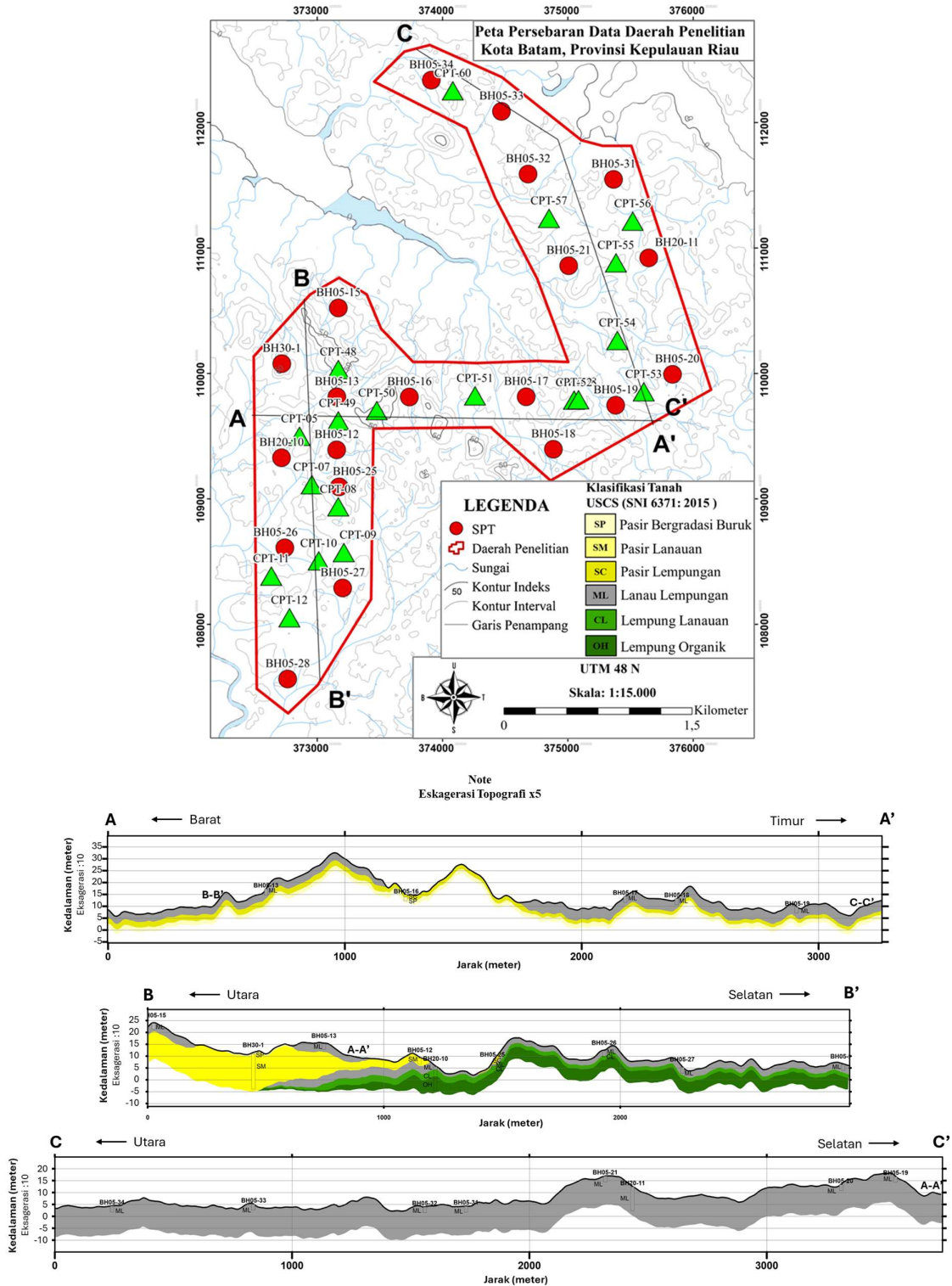


Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian SPT menghasilkan data klasifikasi jenis tanah berdasarkan sistem USCS dan nilai N-SPT pada beberapa kedalaman, sedangkan pengujian CPTu menghasilkan data parameter tahanan ujung konus (q_c) dan gesekan selubung (f_s) pada interval tiap 1 cm. Sebanyak 20 titik bor SPT dan 14 titik CPTu digunakan dalam penelitian ini, dan hasilnya menunjukkan variasi jenis tanah berupa Pasir Lanauan (SM), Pasir Lempungan (SC), Lanau Lempungan (ML), Lempung Lanauan (CL), dan Lempung

Organaik (OH) (SNI 6371: 2015). Penampang jenis tanah dibuat dengan mengintegrasikan data klasifikasi dari SPT dan interpretasi parameter q_c CPTu, menghasilkan korelasi stratigrafi vertikal-lateral yang menggambarkan sebaran jenis tanah di lokasi penelitian. Meskipun terdapat perbedaan rinci dalam klasifikasi akibat perbedaan sistem dan posisi titik uji, kedua metode menunjukkan konsistensi dalam mengidentifikasi kelompok tanah utama, yaitu tanah berbutir kasar dan halus, sehingga data dapat digunakan untuk tahap korelasi dan estimasi daya dukung tanah.



Gambar 4. Penampang jenis tanah daerah penelitian. Penampang A-A' menggambarkan stratigrafi tanah bagian tengah, tersusun atas Lanau Lempungan (ML), Pasir Lempungan (SC), dan Pasir Bergradasi Buruk (SP). Penampang B-B' menggambarkan stratigrafi bagian barat, tersusun atas Lempung Organik (OH), Lempung Lanauan (CL), Lanau Lempungan (ML), Pasir Lempungan (SC), Pasir Lanauan (SM), dan Pasir Bergradasi Buruk (SP). Penampang C-C' menggambarkan stratigrafi bagian timur, tersusun atas Lanau Lempungan (ML).

a. Estimasi Daya Dukung Tanah dari Hasil SPT

Sebanyak 60 data N-SPT dari 20 titik bor digunakan untuk estimasi daya dukung tanah dengan rumus Bowles (1997), menggunakan

asumsi lebar fondasi sama dengan kedalaman ($B = D_f$) sesuai prinsip desain fondasi dangkal (Das, 2017), sebagai kondisi minimum yang memenuhi stabilitas.

Tabel 1. Estimasi Daya Dukung Tanah dari Hasil SPT

Kode Sampel	D_f (m)	N_{SPT}	N_{60}	B (m)	K_d	q_a (kN/m ²)
BH05-12	0,95	4	4	0,95	1,33	76,00
BH05-12	2,45	9	9	2,45	1,33	188,51
BH05-12	3,95	14	14	3,95	1,33	269,45
BH05-13	0,95	9	9	0,95	1,33	171,00
BH05-13	2,21	50	32,5	2,21	1,33	696,96
BH05-13	3,73	50	32,5	3,73	1,33	630,72
BH05-15	0,95	10	10	0,95	1,33	190,00
BH05-15	2,95	9	9	2,95	1,33	181,60
BH05-15	4,95	12	12	4,95	1,33	224,41
BH05-16	0,95	20	17,5	0,95	1,33	380,00
BH05-16	2,45	50	32,5	2,45	1,33	680,74
BH05-16	3,6	50	32,5	3,6	1,33	634,12
BH05-17	0,95	7	7	0,95	1,33	133,00
BH05-17	2,95	10	10	2,95	1,33	201,78
BH05-17	4,95	41	28	4,95	1,33	523,63
BH05-18	0,95	6	6	0,95	1,33	114,00
BH05-18	2,95	11	11	2,95	1,33	221,96
BH05-18	4,95	18	16,5	4,95	1,33	308,57
BH05-19	0,95	12	12	0,95	1,33	228,00
BH05-19	2,45	7	7	2,45	1,33	146,62
BH05-19	4,45	8	8	4,45	1,33	151,54
BH05-20	0,95	5	5	0,95	1,33	95,00
BH05-20	2,45	12	12	2,45	1,33	251,35
BH05-20	4,45	21	18	4,45	1,33	340,96
BH05-21	0,95	17	16	0,95	1,33	323,00
BH05-21	2,95	9	9	2,95	1,33	181,60
BH05-21	4,95	9	9	4,95	1,33	168,31
BH05-25	0,95	4	4	0,95	1,33	76,00
BH05-25	2,45	14	14	2,45	1,33	293,24
BH05-25	3,95	18	16,5	3,95	1,33	317,56
BH05-26	0,95	2	2	0,95	1,33	38,00
BH05-26	2,95	7	7	2,95	1,33	141,25
BH05-26	4,95	15	15	4,95	1,33	280,52
BH05-27	0,95	7	7	0,95	1,33	133,00
BH05-27	2,95	13	13	2,95	1,33	262,32
BH05-27	4,95	11	11	4,95	1,33	205,71
BH05-28	0,95	5	5	0,95	1,33	95,00
BH05-28	2,95	9	9	2,95	1,33	181,60
BH05-28	4,95	16	15,5	4,95	1,33	289,87
BH05-31	0,95	6	6	0,95	1,33	114,00
BH05-31	2,95	8	8	2,95	1,33	161,43
BH05-31	4,95	20	17,5	4,95	1,33	327,27
BH05-32	0,95	7	7	0,95	1,33	133,00
BH05-32	2,95	11	11	2,95	1,33	221,96
BH05-32	4,95	23	19	4,95	1,33	355,32
BH05-33	0,95	7	7	0,95	1,33	133,00
BH05-33	2,95	13	13	2,95	1,33	262,32
BH05-33	4,95	10	10	4,95	1,33	187,01
BH05-34	0,95	9	9	0,95	1,33	171,00
BH05-34	2,95	17	16	2,95	1,33	322,85
BH05-34	4,45	50	32,5	4,45	1,33	615,62
BH20-10	0,95	6	6	0,95	1,33	114,00
BH20-10	2,45	9	9	2,45	1,33	188,51
BH20-10	3,95	16	15,5	3,95	1,33	298,32
BH20-11	0,95	6	6	0,95	1,33	114,00
BH20-11	2,95	8	8	2,95	1,33	161,43
BH20-11	4,95	34	24,5	4,95	1,33	458,18
BH30-01	0,95	8	8	0,95	1,33	152,00
BH30-01	2,25	50	32,5	2,25	1,33	694,00
BH30-01	3,63	50	32,5	3,63	1,33	633,31

b. Korelasi Data Hasil SPT dengan CPTu

Sebanyak 30 data hasil penyaringan dibagi secara acak menjadi 80% data training dan 20% data testing (Gholamy dkk., 2018), dengan

24 data digunakan untuk membentuk model korelasi linier dan 6 data sisanya untuk menguji akurasi model.

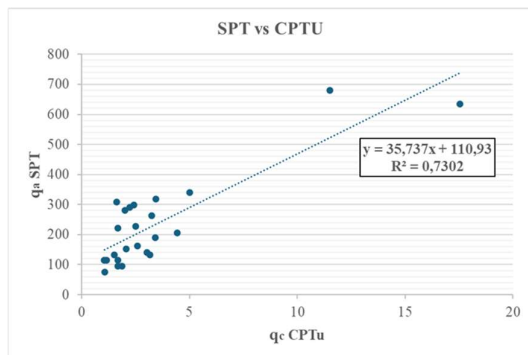
Tabel 2. Training Set untuk Korelasi Linier

No	Kedalaman (m)	SPT		CPTu		
		Kode Sampel	q_a (kN/m ²)	Kode Sampel	q_c (MPa)	f_s (MPa)
Training Set						
1	0,95	BH20-10	114,00	CPT-05	1,05	0,04
2	3,95	BH20-10	298,32	CPT-05	2,43	0,13

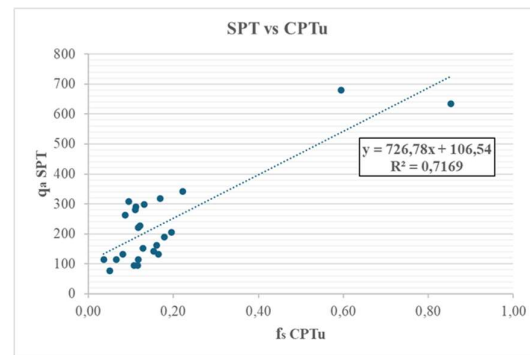
3	0,95	BH05-25	76,00	CPT-08	1,07	0,05
4	3,95	BH05-25	317,56	CPT-08	3,44	0,17
5	0,95	BH05-27	133,00	CPT-10	3,15	0,17
6	4,95	BH05-27	205,71	CPT-10	4,42	0,20
7	2,95	BH05-26	141,25	CPT-11	3,01	0,15
8	4,95	BH05-26	280,52	CPT-11	2,01	0,11
9	0,95	BH05-28	95,00	CPT-12	1,68	0,11
10	4,95	BH05-28	289,87	CPT-12	2,23	0,11
11	0,95	BH05-16	190,00	CPT-50	3,41	0,18
12	2,45	BH05-16	680,74	CPT-50	11,52	0,60
13	3,6	BH05-16	634,12	CPT-50	17,55	0,85
14	0,95	BH05-18	114,00	CPT-52	1,67	0,12
15	2,95	BH05-18	221,96	CPT-52	1,68	0,12
16	4,95	BH05-18	308,57	CPT-52	1,61	0,10
17	0,95	BH05-20	95,00	CPT-54	1,87	0,12
18	4,45	BH05-20	340,96	CPT-54	5,01	0,22
19	0,95	BH20-11	114,00	CPT-55	1,16	0,07
20	2,95	BH20-11	161,43	CPT-55	2,57	0,16
21	0,95	BH05-33	133,00	CPT-60	1,51	0,08
22	2,95	BH05-33	262,32	CPT-60	3,24	0,09
23	0,95	BH05-19	228,00	CPT-78	2,49	0,12
24	4,45	BH05-19	151,54	CPT-78	2,05	0,13

Berdasarkan hasil regresi linier antara q_c dan q_a , diperoleh persamaan $y = 35,737x + 110,93$, dengan y merupakan estimasi q_a dari data N-SPT dan x adalah nilai q_c . Hubungan ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai q_c , maka estimasi q_a juga meningkat, dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,7302$, yang berarti sekitar 73% variasi nilai q_a dapat dijelaskan oleh q_c . Nilai ini menunjukkan korelasi yang baik (Sugiyono, 2007).

Selain itu, regresi linier antara f_s dan q_a menghasilkan persamaan $y = 726,78x + 106,54$, dengan y merupakan estimasi q_a dari data N-SPT dan x adalah nilai f_s . Nilai $R^2 = 0,7169$, menunjukkan bahwa sekitar 71,7% variasi q_a dapat dijelaskan oleh f_s . Sama seperti q_c , nilai f_s juga menunjukkan pengaruh positif terhadap q_a , meskipun kekuatan hubungannya sedikit lebih rendah, namun memiliki korelasi yang baik (Sugiyono, 2007).



Gambar 5. Grafik korelasi linier q_c terhadap q_a . Nilai q_c dari uji CPTu berada di sumbu x (variabel bebas), dan nilai q_a hasil estimasi dari N-SPT berada di sumbu y (variabel terikat)



Gambar 6. Grafik korelasi linier f_s terhadap q_a . Nilai f_s dari uji CPTu berada di sumbu x (variabel bebas), dan nilai q_a hasil estimasi dari N-SPT berada di sumbu y (variabel terikat)

Berdasarkan hasil analisis regresi linier pada Gambar 5 dan Gambar 6, terlihat pola *clustering* yang cukup jelas pada sudut kiri bawah dan kanan atas grafik. Kelompok data di sudut kiri bawah menunjukkan nilai q_c dan f_s yang rendah, sejalan dengan nilai daya dukung tanah (q_a) yang juga rendah. Pola ini mengindikasikan dominasi tanah berbutir halus seperti lanau atau lempung, yang umumnya memiliki nilai tahanan ujung konus dan gesekan selubung yang rendah. Sebaliknya, dua data yang membentuk cluster di sudut kanan atas menunjukkan nilai q_c dan f_s yang tinggi, dengan q_a yang juga tinggi, yang merepresentasikan lapisan pasir, terutama pasir bergradasi buruk (SP), sesuai dengan penampang jenis tanah (Gambar 4). Jenis tanah ini memiliki kerapatan relatif tinggi meskipun tidak kohesif, sehingga

menghasilkan tahanan penetrasi dan gesekan yang besar. Pola tersebut mencerminkan pengaruh variasi litologi secara vertikal terhadap parameter CPTu dan estimasi daya dukung tanah.

c. Validasi Model Korelasi Linier

Cone Resistance/ Tahanan Konus (q_c)

Pengujian model q_c terhadap q_a menggunakan 6 data testing menghasilkan nilai MAPE sebesar 10%, yang menunjukkan tingkat akurasi sebesar 90%. Berdasarkan klasifikasi Montaña Moreno dkk. (2013), nilai ini termasuk kategori akurasi yang baik, sehingga model linier yang diperoleh dapat dianggap layak untuk digunakan dalam estimasi daya dukung tanah.

Tabel 3. Akurasi Hasil Model q_a -SPT dengan q_c -CPTu

Kedalaman (m)	SPT		CPTu			MAPE (%)
	Kode Sampel	q_a (kN/m ²)	Kode Sampel	q_c (MPa)	q_a (kN/m ²)	
<i>Testing Set</i>						
2,45	BH20-10	188,51	CPT-05	2,405	196,88	10%
2,95	BH05-27	262,32	CPT-10	3,90	250,23	
2,95	BH05-28	181,60	CPT-12	2,86	212,99	
2,45	BH05-20	251,35	CPT-54	3,05	219,89	
4,95	BH05-33	187,01	CPT-60	2,79	210,46	
2,45	BH05-19	146,62	CPT-78	1,411	161,35	

Sleeve Friction/ Gesekan Selubung (f_s)

Model korelasi antara f_s dan q_a (Gambar 6) diuji menggunakan 6 data testing untuk menilai akurasi prediksinya. Hasil evaluasi menunjukkan nilai MAPE sebesar 13%, yang berarti model memiliki tingkat akurasi sebesar

87%. Berdasarkan klasifikasi Montaña Moreno dkk. (2013), nilai ini masih tergolong baik, sehingga model linier f_s terhadap q_a dapat digunakan sebagai alternatif dalam estimasi daya dukung tanah.

Tabel 4. Akurasi Hasil Model q_a -SPT dengan f_s -CPTu

Kedalaman (m)	SPT		CPTu			MAPE (%)
	Kode Sampel	q_a (kN/m ²)	Kode Sampel	f_s (MPa)	q_a (kN/m ²)	
<i>Testing Set</i>						
2,45	BH20-10	188,51	CPT-05	0,15	218,46	13%
2,95	BH05-27	262,32	CPT-10	0,19	246,81	
2,95	BH05-28	181,60	CPT-12	0,16	225,73	
2,45	BH05-20	251,35	CPT-54	0,18	233,73	
4,95	BH05-33	187,01	CPT-60	0,13	203,93	
2,45	BH05-19	146,62	CPT-78	0,09	169,04	

Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi, model korelasi menggunakan parameter *cone resistance* (q_c) menunjukkan hubungan yang lebih kuat terhadap daya dukung tanah dibandingkan *sleeve friction* (f_s). Hal ini didukung oleh nilai MAPE yang lebih rendah pada model q_c , yaitu 10%, dibandingkan dengan 13% pada model f_s , yang menandakan bahwa q_c memiliki kemampuan prediksi yang lebih akurat dalam estimasi daya dukung tanah di daerah penelitian.

d. Estimasi Nilai Daya Dukung Tanah dari Model Korelasi

Perhitungan nilai daya dukung tanah dilakukan menggunakan model korelasi linier antara q_a dari SPT dan q_c dari CPTu, sesuai model regresi $y = 35,737x + 110,93$, dengan y sebagai nilai daya dukung tanah (kN/m^2) dan x sebagai tahanan ujung konus q_c (MPa). Perhitungan dilakukan pada kedalaman tertentu untuk seluruh titik CPTu dan SPT di lokasi penelitian.

Tabel 5. Perhitungan Nilai Daya Dukung Tanah dari Model q_a -SPT dengan q_c -CPTu

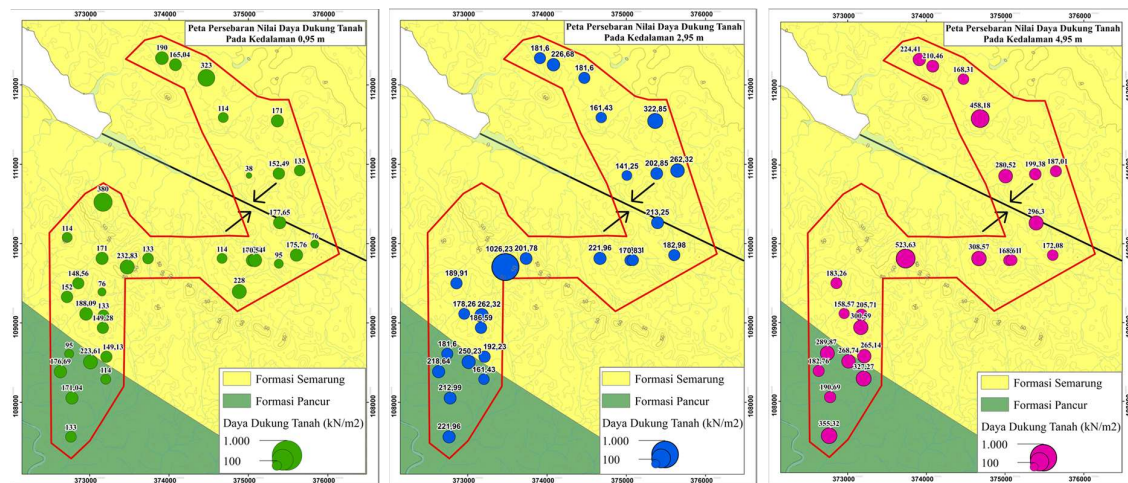
Kedalaman 0,95 m		Kedalaman 2,95 m		Kedalaman 4,95 m	
Kode Sampel	q_a (kN/m^2)	Kode Sampel	q_a (kN/m^2)	Kode Sampel	q_a (kN/m^2)
BH05-12	76,00	BH05-15	181,60	BH05-15	224,41
BH05-13	171,00	BH05-17	201,78	BH05-17	523,63
BH05-15	190,00	BH05-18	221,96	BH05-18	308,57
BH05-16	380,00	BH05-21	181,60	BH05-21	168,31
BH05-17	133,00	BH05-26	141,25	BH05-26	280,52
BH05-18	114,00	BH05-27	262,32	BH05-27	205,71
BH05-19	228,00	BH05-28	181,60	BH05-28	289,87
BH05-20	95,00	BH05-31	161,43	BH05-31	327,27
BH05-21	323,00	BH05-32	221,96	BH05-32	355,32
BH05-25	76,00	BH05-33	262,32	BH05-33	187,01
BH05-26	38,00	BH05-34	322,85	BH20-11	458,18
BH05-27	133,00	BH20-11	161,43	CPT-05	183,26
BH05-28	95,00	CPT-05	189,91	CPT-07	158,57
BH05-31	114,00	CPT-07	178,26	CPT-08	300,59
BH05-32	133,00	CPT-08	186,59	CPT-09	265,14
BH05-33	133,00	CPT-09	192,23	CPT-10	268,74
BH05-34	171,00	CPT-10	250,23	CPT-11	182,76
BH20-10	114,00	CPT-11	218,64	CPT-12	190,69
BH20-11	114,00	CPT-12	212,99	CPT-52	168,61
BH30-01	152,00	CPT-50	1026,23	CPT-53	172,08
CPT-05	148,56	CPT-52	170,83	CPT-54	296,30
CPT-07	188,09	CPT-53	182,98	CPT-55	199,38
CPT-08	149,28	CPT-54	213,25	CPT-60	210,46
CPT-09	149,13	CPT-55	202,85	CPT-78	168,61
CPT-10	223,61	CPT-60	226,68		
CPT-11	176,69	CPT-78	173,51		
CPT-12	171,04				
CPT-50	232,83				
CPT-52	170,54				
CPT-53	175,76				
CPT-54	177,65				
CPT-55	152,49				
CPT-60	165,04				
CPT-78	199,84				

Perhitungan daya dukung tanah pada kedalaman 0,95 m, 2,95 m, dan 4,95 m dilakukan menggunakan model regresi linier berdasarkan Gambar 5 pada seluruh titik CPTu, lalu digabungkan dengan data SPT pada kedalaman yang sama. Pada kedalaman 0,95 m, digunakan 14 data CPTu dan 20 data SPT dengan hasil estimasi daya dukung tanah berkisar antara 38–380 kN/m². Pada kedalaman 2,95 m, digunakan 14 data CPTu dan 12 data SPT, menghasilkan nilai estimasi daya dukung tanah berkisar antara 141,25–1.026,23 kN/m². Sedangkan pada kedalaman 4,95 m, digunakan 13 data CPTu dan 11 data SPT dengan rentang hasil estimasi nilai daya dukung tanah berkisar antara 158,57–523,63 kN/m². Hasil ini menunjukkan adanya peningkatan nilai daya dukung tanah seiring bertambahnya kedalaman, serta bergantung kepada kondisi tanah setempat.

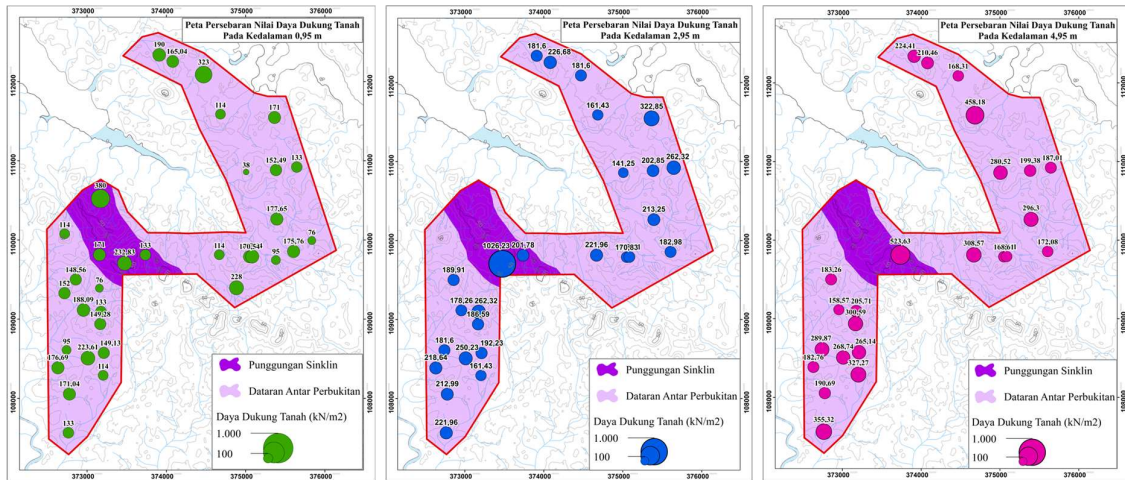
Variasi nilai daya dukung tanah meskipun pada jenis tanah yang serupa dapat dipengaruhi oleh kondisi geologi setempat (Gambar 7). Perbedaan litologi penyusun formasi regional, seperti batupasir arkosa, batulempung, batuserpih, dan konglomerat, menghasilkan produk pelapukan yang berbeda, sehingga memengaruhi komposisi tanah yang dapat mempengaruhi nilai daya dukung tanah (Schaeztl & Anderson, 2005).

Selain kondisi geologi, topografi juga berperan signifikan terhadap variasi daya dukung tanah (Gambar 8). Daerah perbukitan umumnya tersusun oleh litologi yang lebih resisten terhadap pelapukan, sehingga menghasilkan tanah yang lebih padat dan memiliki daya dukung lebih tinggi (Oliver & Oliver, 2018; Schaeztl & Anderson, 2005). Di lokasi penelitian, nilai daya dukung tanah tertinggi secara konsisten ditemukan pada satuan geomorfologi Perbukitan Sinklin di setiap kedalaman.

e. Faktor Pengontrol Variasi Nilai Daya Dukung Tanah



Gambar 7. Peta persebaran hasil estimasi nilai daya dukung tanah dipengaruhi oleh geologi regional. Lingkaran hijau menggambarkan besar estimasi daya dukung tanah pada kedalaman 0,95 m, lingkaran biru pada kedalaman 2,95 m, dan lingkaran ungu pada kedalaman 4,95 m.



Gambar 8. Peta persebaran hasil estimasi nilai daya dukung tanah dipengaruhi geomorfologi lokal. Lingkaran hijau menggambarkan besar estimasi daya dukung tanah pada kedalaman 0,95 m, lingkaran biru pada kedalaman 2,95 m, dan lingkaran ungu pada kedalaman 4,95 m.

Selain itu, lapisan tanah yang lebih dalam cenderung lebih padat akibat tekanan vertikal dari lapisan di atasnya, sementara pelapukan lebih intens terjadi di permukaan. Hal ini menyebabkan perbedaan karakteristik antara lapisan atas dan bawah, yang berdampak pada peningkatan daya dukung tanah seiring bertambahnya kedalaman (Oliver & Oliver, 2018). Secara keseluruhan, hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai daya dukung tertinggi berada di bagian barat wilayah penelitian pada setiap kedalaman.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Terdapat hubungan linier yang signifikan antara parameter CPTu dan daya dukung tanah (q_a), dengan nilai R^2 sebesar 0,7302 untuk q_c dan 0,7169 untuk f_s . Ini menunjukkan bahwa data CPTu dapat digunakan sebagai alternatif prediksi q_a di lokasi tanpa uji SPT.
2. Model regresi linier yang dikembangkan valid secara statistik. Model q_c memiliki

akurasi 90% (MAPE 10%) dan f_s sebesar 87% (MAPE 13%), sehingga model q_c lebih andal untuk estimasi daya dukung tanah.

3. Hasil estimasi daya dukung tanah dari model q_c divisualisasikan dalam peta, yang menunjukkan sebaran nilai q_a secara horizontal dan vertikal. Nilai pada kedalaman 0,95 m (38–380 kN/m²), 2,95 m (141,25–1.026,23 kN/m²), dan 4,95 m (158,57–523,63 kN/m²) seluruhnya berada di bagian barat daerah penelitian, variasi nilai mencerminkan terdapat pengaruh litologi, topografi, dan kedalaman.

5. Saran

Untuk meningkatkan akurasi dan representativitas korelasi antara parameter CPTu dan SPT, disarankan menambah jumlah sampel dengan metode sampling yang lebih sistematis serta menjaga konsistensi jarak pengujian guna mengurangi bias spasial dan menangkap variasi lokal tanah. Selain itu, pemodelan korelasi perlu mempertimbangkan klasifikasi jenis tanah agar regresi lebih spesifik terhadap perilaku tanah kasar dan halus.

Data dan Sumber Daya

Hasil pengujian *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement* (CPTu) yang mencakup data berupa jumlah pukulan (N-SPT), klasifikasi jenis tanah berdasarkan sistem USCS, nilai tahanan ujung konus (q_c), dan nilai hambatan selubung (f_s). Seluruh data tersebut merupakan data sekunder yang dikumpulkan oleh Tim dari Perusahaan Makranusa.

Referensi

- Badan Standardisasi Nasional. (2008a). SNI 2827-2008: Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan Alat Sondir.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008b). SNI 4153-2008: Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT.
- Badan Standardisasi Nasional. (2015). SNI 6371-2015: Tata Cara Pengklasifikasian Tanah untuk Keperluan Teknik dengan Sistem Klasifikasi Unifikasi Tanah.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design International Fifth Edition*. Dalam *Civil Engineering Materials*.
- Brahmantyo, B., & Bandonu. (2006). Klasifikasi Bentuk Muka Bumi (Landform) untuk Pemetaan Geomorfologi pada Skala 1:25.000 dan Aplikasinya untuk Penataan Ruang. *Jurnal Geoaplika*, 1(2).
- Das, B. M. (2017). *Shallow Foundations Bearing Capacity and Settlement* (3 ed.). Taylor & Francis Group.
- Gholamy, A., Kreinovich, V., & Kosheleva, O. (2018). Why 70/30 or 80/20 Relation Between Training and Testing Sets: A Pedagogical Explanation. *Departmental Technical Reports (CS)*, 1209.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2011). *Solar Cell, Sumber Energi Terbarukan Masa Depan*.
- Kusnama, Sutisna, K., Amin, T. C., Koesoemadinata, S., Sukardi, & Hermanto, B. (1994). *Peta Geologi Lembar Tanjungpinang, Sumatera*.
- Montaño Moreno, J. J., Palmer Pol, A., Sesé Abad, A., & Cajal Blasco, B. (2013). Using the R-MAPE index as a resistant measure of forecast accuracy. *Psicothema*, 25(4). <https://doi.org/10.7334/psicothema2013.23>
- Nabella, F., Utama, H. W., & Said, Y. M. (2019). Geology and Genesis of the Tanco Isolated Hill on the Kerinci Lake, Jambi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 279(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012027>
- Oliver, C. D., & Oliver, F. A. (2018). *Landforms and Soils. Dalam Global Resources and the Environment* (hlm. 137–156). Cambridge University Press.
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2022). *Guide to Cone Penetration Testing*. Book, 7th edition.
- Satriyo, N. A., Soebowo, E., & Sadisun, I. A. (2020). Core log and cone penetration test approach for bearing capacity analysis of quaternary deposit and its correlation to facies distribution in southern bali. *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 35(4). <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.4.1>
- Schaetzl, R., & Anderson, S. (2005). *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press.
- Sugiyono. (2007). *Statistika untuk Penelitian*. CV Alfabeta.
- Tayman, J., & Swanson, D. A. (1999). On the validity of MAPE as a measure of population forecast accuracy. *Dalam Population Research and Policy Review* (Vol. 18, Nomor 4). <https://doi.org/10.1023/A:1006166418051>