

## PENGEMBANGAN INDEKS KUALITAS PEMADATAN DIGITAL YANG MENGINTEGRASIKAN DATA KEPADATAN DAN CBR UNTUK PROYEK JALAN

Natanael Nugraha Haloho<sup>1\*</sup>, Suprayogi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Pertahanan Republik Indonesia, [natanael.n.haloho@gmail.com](mailto:natanael.n.haloho@gmail.com)

### ABSTRAK

Pemadatan tanah dasar memiliki peranan yang sangat penting terhadap kemampuan dukung dan masa pakai permukaan jalan. Penelitian ini menciptakan Indeks Kualitas Pemadatan Digital (DCQI) yang menggabungkan nilai CBR dan tingkat kepadatan lapangan untuk mengevaluasi kualitas subgrade secara kuantitatif. Objek yang diteliti adalah Proyek Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A, pada STA 11+875 sampai 11+975, dengan menggunakan hasil uji Dynamic Cone Penetrometer (DCP) dan sand cone pada tanah yang berupa lempung berpasir. Nilai CBR dan kepadatan disesuaikan dengan standar ( $CBR_{ref} = 6\%$ ;  $K_{ref} = 95\%$ ), kemudian digabungkan melalui model DCQI. Hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan bobot  $\alpha = 0,735$  untuk CBR dan  $\beta = 0,265$  untuk kepadatan, yang mengindikasikan bahwa kekuatan tanah memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap kualitas pemadatan. Nilai DCQI yang sudah dikalibrasi dihitung untuk setiap STA, dengan rata-rata 1,02, yang menunjukkan bahwa kualitas pemadatan memenuhi standar teknis. Wilayah dengan DCQI di atas 1,05 menunjukkan adanya pemadatan berlebih. Visualisasi digital dalam bentuk grafik DCQI menunjukkan variasi kualitas tanah dasar sepanjang jalur. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa DCQI efektif sebagai indikator digital terpadu untuk kontrol kualitas pemadatan tanah dasar, serta berpotensi untuk dikembangkan menjadi sistem pemantauan kualitas lapangan berbasis digital secara real-time dalam proyek infrastruktur jalan.

**Kata kunci :** *DCQI, CBR, sand cone, DCP*

Penerbit : Fakultas Teknik Universitas Pasifik Morotai

## 1 PENDAHULUAN

Kinerja jalan sangat dipengaruhi oleh kualitas tanah dasar (subgrade) yang berfungsi sebagai lapisan penopang utama. Tanah dasar yang telah dipadatkan dengan baik dapat meningkatkan kapasitas dukung dan mengurangi deformasi permanen selama masa operasional jalan [1]. Oleh karena itu, proses pengujian dan pengendalian mutu pemadatan menjadi langkah penting dalam pembangunan jalan. Biasanya, penilaian dilakukan secara terpisah dengan menggunakan uji CBR (California Bearing Ratio) untuk mengevaluasi kekuatan tanah dan uji sand cone atau nuclear density test untuk mengukur kepadatan di lapangan. Namun, pendekatan ini belum memberikan gambaran yang menyeluruh tentang kualitas pemadatan secara keseluruhan.

Di zaman digital dan konstruksi pintar, ada kebutuhan untuk membuat indeks komposit yang bisa menggabungkan berbagai parameter geoteknik menjadi satu indikator kuantitatif yang mudah untuk dianalisis dan divisualisasikan. Beberapa penelitian sebelumnya telah berusaha menghubungkan parameter CBR dan kepadatan, namun masih

terbatas pada hubungan empiris tanpa menciptakan indeks kualitas yang terkalibrasi secara digital[2]. Oleh karena itu, pengembangan Digital Compaction Quality Index (DCQI) merupakan langkah inovatif untuk meningkatkan efisiensi pengendalian mutu tanah dasar di lapangan.

DCQI dibentuk dengan mengkombinasikan parameter CBR sebagai gambaran kekuatan tanah dan tingkat kepadatan sebagai indikator keseragaman hasil pemadatan. Melalui normalisasi terhadap nilai acuan, kedua parameter ini digabungkan dalam model matematis yang memiliki bobot seimbang ( $\alpha$  dan  $\beta$ ) berdasarkan hubungan statistik. Indeks yang dihasilkan tidak hanya mengindikasikan kecukupan pemadatan, tetapi juga membantu mengidentifikasi area yang kurang padat dan berlebihan secara kuantitatif.

Penelitian ini dilakukan pada Proyek Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A, dengan fokus pengamatan di STA 11+875 sampai 11+975. Data di lapangan diperoleh melalui uji Dynamic Cone Penetrometer (DCP) untuk perkiraan nilai CBR dan uji sand cone untuk kepadatan tanah subgrade. Dengan melakukan analisis korelasi dan kalibrasi bobot, telah dikembangkan model DCQI yang terintegrasi dan divisualisasikan secara digital untuk mengevaluasi distribusi kualitas pemadatan di lapangan[3].

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada penerapan sistem pengendalian mutu pemadatan yang berbasis data digital, yang lebih efisien, objektif, dan aplikatif dalam proyek infrastruktur jalan. Selain itu, konsep DCQI dapat menjadi dasar dalam mengembangkan sistem pemantauan pemadatan secara real-time untuk mendukung implementasi manajemen kualitas cerdas di bidang teknik sipil.

## **2 METODE PENELITIAN**

### **2.1 Lokasi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan pada Proyek Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A, yang termasuk dalam jaringan tol penting penghubung kawasan industri Karawang–Purwakarta. Fokus penelitian tertuju pada bagian STA 11+875 sampai STA 11+975, di mana kondisi tanah dasar berupa lempung berpasir (sandy clay) yang dihasilkan dari proses timbunan dan pemadatan lapangan. Lokasi ini dipilih karena mencerminkan karakteristik umum subgrade di area proyek yang mengalami variasi dalam nilai kepadatan dan kemampuan dukung.

### **2.2 Data dan Peralatan Penelitian**

Studi ini memanfaatkan informasi utama yang didapat dari hasil pengujian di lapangan serta informasi tambahan dari hasil analisis di laboratorium dan rincian teknis proyek.

Data primer terdiri atas:

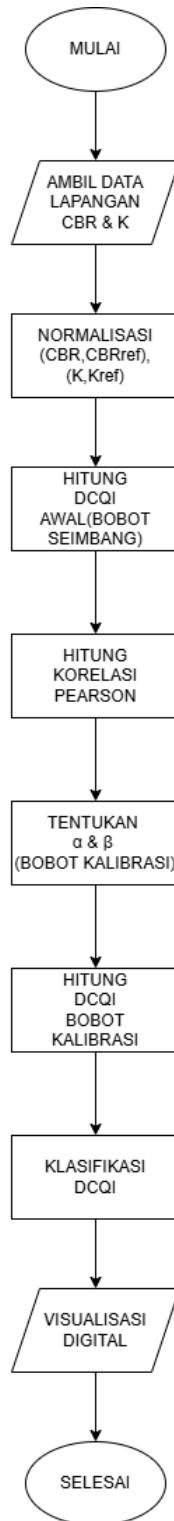
1. Uji Dynamic Cone Penetrometer untuk mengkonversi nilai DPI menjadi % California Bearing Ratio
2. Uji Sand Cone untuk menentukan derajat kepadatan tanah terhadap kepadatan kering maksimum (MDD)

Data sekunder terdiri atas hasil uji karakteristik tanah dasar (berat isi, kadar air, dan plastisitas) serta spesifikasi acuan proyek untuk nilai standar CBR Ref=6% dan K Ref=95%

Data sekunder terdiri atas

Data sekunder mencakup hasil uji karakteristik tanah dasar (berat isi, kadar air, dan plastisitas) serta spesifikasi acuan proyek untuk nilai standar CBR = 6% dan  $K = 95\%$ .

### 2.3 Tahapan Penelitian



Gambar 1. Tahapan penelitian DCQI  
(Sumber: Olahan penulis, 2025)

Tahapan pelaksanaan penelitian ditunjukkan pada diagram alir (Gambar 1) dan dijelaskan sebagai berikut:

Pengumpulan data lapangan:

Pengujian dilakukan pada interval setiap 25 meter di sepanjang STA 11+875–11+975. Pada setiap titik pengamatan, dilakukan uji DCP dan sand cone secara bersamaan untuk memperoleh data yang berpasangan.

1. Konversi nilai DCP ke CBR

Nilai CBR dihitung menggunakan rumus empiris:

$$F=10(2,8135-1,313 \cdot \log_{10}(E))$$

2. Normalisasi Nilai Parameter:

Nilai CBR dan K dinormalisasi terhadap nilai standar proyek:

$$CBR = \frac{CBR}{CBR_{ref}}, K_n = \frac{K}{K_{ref}}$$

3. Normalisasi bertujuan menyamakan satuan kedua parameter sehingga dapat digabungkan secara proporsional.

Perhitungan Indeks DCQI awal:

Model awal Digital Compaction Quality Index (DCQI) dihitung menggunakan bobot seimbang:

$$DCQI = 0.5 (CBR_n) + 0.5 (K_n)$$

4. Penentuan bobot kalibrasi ( $\alpha$  dan  $\beta$ )

Analisis korelasi Pearson dilakukan antara DCQI, CBR, dan K untuk menentukan kontribusi relatif masing-masing parameter. Bobot dihitung menggunakan persamaan:

$$\alpha = \frac{r_{CBR}}{r_{CBR} + r_k}, \beta = \frac{r_k}{r_{CBR} + r_k}$$

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh  $\alpha = 0,735$  dan  $\beta = 0,265$ , menunjukkan bahwa CBR memiliki pengaruh dominan terhadap mutu pemadatan.

5. Model DCQI terkalibrasi

Dengan bobot kalibrasi tersebut, persamaan DCQI diperbarui menjadi:

$$DCQI = 0,765(CBR_n) + 0,265(K_n)$$

6. Analisis dan Visualisasi digital

Nilai DCQI dari setiap titik divisualisasikan dalam bentuk grafik profil menggunakan perangkat lunak Python

7. Klasifikasi mutu DCQI

Nilai DCQI diklasifikasikan menjadi tiga kategori:

Tabel 1. Klasifikasi Nilai DCQI

Rentang DCQI	Kategori	Interpretasi
<0,95	Under-compacted	Belum memenuhi kepadatan
0,95-1,05	Well-compacted	Memenuhi spesifikasi
>1,05	Over-compacted	Pemadatan berlebih

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Data Hasil Uji lapangan

Pengujian lapangan dilakukan pada lima titik pengamatan di sepanjang STA 11+875 hingga STA 11+975. Data hasil uji Dynamic Cone Penetrometer (DCP) dan Sand Cone digunakan untuk menentukan nilai CBR lapangan (CBR<sub>field</sub>) serta derajat kepadatan (K). Nilai CBR diperoleh melalui konversi hasil DCP menggunakan rumus empiris Kleyn (1975).

Tabel 2 Data Uji Lapangan

STA	Nilai CBR (X)	Nilai Sand Cone(Y)
11+875	7,74	95,51
11+900	9,03	95,95
11+925	8,25	95,61
11+950	8,18	97,96
11+975	7,83	95,19
SUM	41,03	480,22

Hasil menunjukkan bahwa nilai CBR bervariasi antara 7,74–9,03% dengan kepadatan lapangan berkisar antara 95,19–97,96%. Nilai tersebut memenuhi syarat minimal yang direkomendasikan oleh Bina Marga (CBR ≥ 6%; K ≥ 95%).

#### 3.2. Normalisasi Nilai CBR dan Kepadatan

Nilai CBR dan K kemudian dinormalisasi terhadap nilai acuan CBR<sub>ref</sub> = 6% dan K<sub>ref</sub> = 95%. Hasil normalisasi digunakan untuk menyetarakan skala pengaruh masing-masing parameter sebelum dimasukkan dalam model DCQI.

Tabel 3 Normalisasi nilai cbr dan kepadatan

STA	CBR/CBR <sub>ref</sub>	K/K <sub>ref</sub>
11+875	1,29	1,01
11+900	1,5	1,01
11+925	1,38	1,01
11+950	1,36	1,03
11+975	1,31	1

#### 3.3. Perhitungan Indeks DCQI Awal (Bobot Seimbang)

DCQI awal dihitung menggunakan bobot seimbang ( $\alpha = \beta = 0,5$ ) untuk melihat variasi mutu pematatan sebelum kalibrasi.

$$DCQI = 0,5 \left( \frac{CBR}{CBR_{ref}} \right) + 0,5 \left( \frac{K}{K_{ref}} \right)$$

**Tabel 4 Perhitungan DCQI awal**

STA	DCQI AWAL	KATEGORI
11+875	1,15	Well-compacted
11+900	1,26	Over-compacted
11+925	1,19	Well-compacted
11+950	1,2	Over-compacted
11+975	1,15	Well-compacted

Rata-rata DCQI awal sebesar 1,19, menunjukkan kualitas pemadatan yang baik dengan sedikit indikasi *over compaction* pada STA 11+900 dan 11+950.

### 3.4. Kalibrasi Bobot $\alpha$ dan $\beta$

Untuk mendapatkan keseimbangan empiris antara kekuatan tanah (CBR) dan kepadatan (K), dilakukan analisis korelasi Pearson antara DCQI, CBR, dan K.

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai korelasi antara DCQI dan CBR lebih tinggi ( $r = 0,985$ ) dibandingkan antara DCQI dan K ( $r = 0,355$ ).

Dengan demikian, bobot ditentukan menggunakan rasio:

$$\alpha=0,735, \beta=0,265$$

Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan tanah (CBR) memiliki pengaruh lebih dominan terhadap mutu pemadatan dibandingkan kepadatan lapangan.

### 3.5. Nilai DCQI Terkalibrasi

Setelah bobot dikalibrasi, nilai DCQI dihitung kembali menggunakan persamaan:

$$DCQI=0,735 \left(\frac{CBR}{CBR_{ref}}\right)+ 0,265\left(\frac{K}{K_{ref}}\right)$$

**Tabel 5 Nilai DCQI setelah kalibrasi**

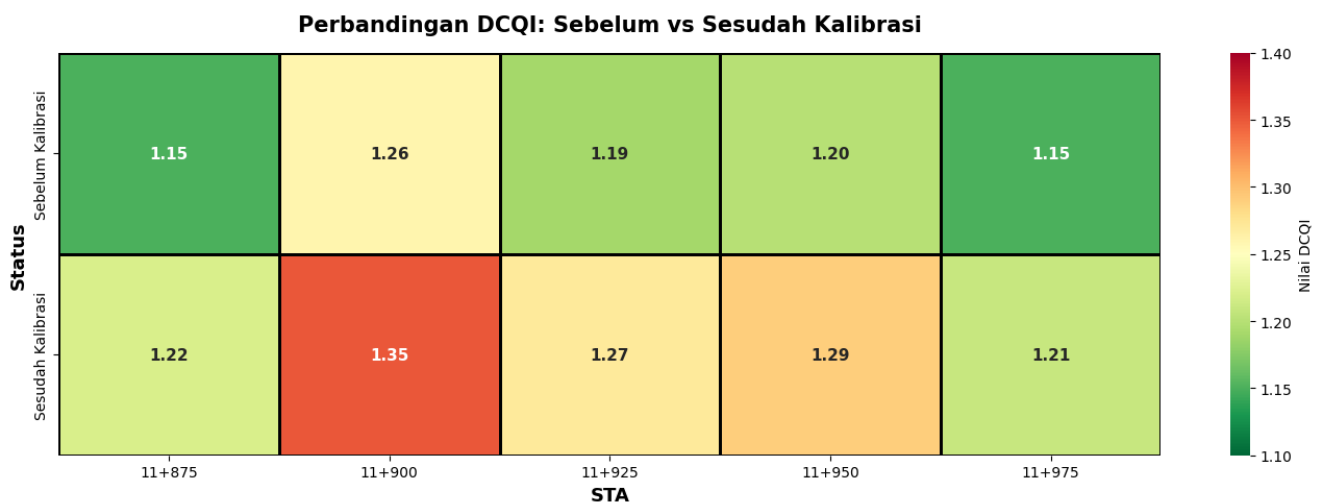
STA	DCQI	KATEGORI
11+875	1,22	Well-compacted
11+900	1,35	Over-compacted
11+925	1,27	Well-compacted
11+950	1,29	Over-compacted
11+975	1,21	Well-compacted

Nilai DCQI rata-rata = 1,27, menandakan hasil pemadatan berada dalam kondisi baik hingga sangat baik, dengan kecenderungan pemadatan berlebih di beberapa titik.

### 3.6. Visualisasi Digital Sebaran DCQI

Nilai DCQI kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik heatmap STA 11+875–11+975 menggunakan perangkat lunak jupyter. Grafik menunjukkan heatmap perbandingan nilai Digital Compaction Quality Index (DCQI) pada lima titik pengamatan di sepanjang STA 11+875 hingga STA 11+975, baik sebelum maupun sesudah proses kalibrasi bobot ( $\alpha$  dan  $\beta$ ).

Secara umum, tampak bahwa seluruh nilai DCQI berada di atas 1,10, yang berarti tingkat pemadatan tanah dasar telah memenuhi bahkan melebihi spesifikasi minimum proyek ( $CBR \geq 6\%$ ;  $K \geq 95\%$ ). Warna pada heatmap menggambarkan variasi mutu pemadatan, dengan gradasi dari hijau (baik) menuju merah (sangat padat/*over-compacted*).



Gambar 1 Grafik Heatmap DCQI menggunakan software intrepeter jupyter

## 4 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan suatu Indeks Kualitas Pemadatan Digital (Digital Compaction Quality Index – DCQI) yang mengintegrasikan data kekuatan tanah (CBR) hasil uji *Dynamic Cone Penetrometer (DCP)* dan derajat kepadatan lapangan (K) hasil uji *sand cone*. Penerapan metode ini pada Proyek Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan Paket 2A, khususnya pada STA 11+875 hingga 11+975, menghasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai CBR lapangan berada pada kisaran 7,74–9,03%, sedangkan kepadatan tanah berkisar antara 95,19–97,96%, yang menunjukkan kondisi tanah dasar berada di atas spesifikasi minimum proyek ( $CBR \geq 6\%$ ,  $K \geq 95\%$ ).
2. Nilai DCQI awal dengan bobot seimbang ( $\alpha = \beta = 0,5$ ) menunjukkan mutu pemadatan rata-rata 1,19, yang mengindikasikan kualitas pemadatan baik dengan sedikit indikasi *over-compaction*.
3. Hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa nilai CBR memiliki pengaruh lebih dominan terhadap DCQI dibanding kepadatan, dengan koefisien korelasi  $r(CBR) = 0,985$  dan  $r(K) = 0,355$ . Bobot kalibrasi yang dihasilkan adalah  $\alpha = 0,735$  dan  $\beta = 0,265$ .

4. Model DCQI terkalibrasi menghasilkan nilai rata-rata 1,27, dengan klasifikasi “well-compacted” hingga “over-compacted”, menunjukkan bahwa hasil pemadatan di lokasi penelitian memenuhi bahkan melebihi spesifikasi teknis.
5. Nilai DCQI > 1,25 mengindikasikan *over-compaction*, terlihat pada STA 11+900 dan STA 11+950, di mana kemungkinan energi pemadatan melebihi kebutuhan optimum.
6. Nilai 1,15–1,22 pada titik lain menunjukkan kondisi *well-compacted*, dengan kualitas pemadatan stabil dan sesuai spesifikasi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology* (2nd ed.). Pearson Education Limited.
- [2] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- [3] Ali, M. M. (2012). *Utilization of natural fibers in concrete as a sustainable material: A review*. *Construction and Building Materials*, 35, 433-442.
- [4] Ramli, M. (2013). *Performance of natural fiber reinforced concrete: A review*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, Article ID 303457.
- [5] ACI Committee 544. (2002). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI
- [6] Banthia, N., & Trottier, J. F. (1995). *Durability of fibre-reinforced concrete in aggressive environments*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(4), 207-210