

// **Mengurangi Paket Kritis di Bina Marga dengan Ilmu Pengadaan Jasa Konstruksi dari Filipina**

Punto Budiharto, S.T, M.T

// **METODE KONSTRUKSI TANGGUL LAUT TERINTEGRASI JALAN TOL SEMARANG-DEMAK, INOVASI KONSTRUKSI TIMBUNAN DENGAN MATRAS BAMBU DI INDONESIA**

Zulaikha Budi Astuti

// **Merangkai Jalan Tol dan Mendorong Inovasi Pembiayaan Infrastruktur, Kisah Dr. Herry Trisaputra Zuna**

Dr. Ir. Alfa Adib Ash Shiddiqi, S.T., M.Sc



9 772746 165008



ISSN 2746-1653 (Media Cetak)

BULETIN BINEKA

VOLUME 7 EDISI APRIL 2026



TIM PENYUSUN

Pelindung

Direktur Jenderal Bina Marga

Penanggungjawab

Ir. Pantja Dharma Oetojo, M.Eng.Sc.

Redaktur

Firman Permana Wandani, S.T., M.P.P.

Neni Kusnianti, S.T., M.T.

Ir. Wahyu Supriyo Winurseto, ST, M.Eng.

Hendarto, S.T., M.T., M.D.M, Ph.D.

Armen Adekristi, S.T., MSCE.

Ali Rachmadi, S.T., M.T.

Dian Asri Moelyani, S.T., M.Sc.

Hendro Sujatmiko, S.T., M.T.

Dr. Drs. Madi Hermadi, M.M.

Redrik Irawan, S.T., M.T.

Ir. Widi Nugraha, S.T., M.T.

Penyunting

Ani Mulyani, S.Sos., M.Ak

Risma Hermawati, S.T.

Iwan Pirdaus, S.AP.

Sekretariat

Uman Sumantri, S.S.I.

Aditya Abdurachman

Yadi Rusyadi, S.Sos

Fotografer

Yogi Sutana, S.Kom

Rully Nurjaya

Diterbitkan Oleh

Direktorat Bina Teknik Jalan
dan Jembatan

Alamat Redaksi

Jl. A.H Nasution No. 264
Kota Bandung 40294

Email:

perpustakaan.jatan@pu.go.id

SALAM REDAKSI

Pada terbitan Buletin BINEKA Vol. 7 Edisi April 2026, kami memilih artikel tentang metode konstruksi tanggul laut terintegrasi jalan tol Semarang-Demak, inovasi konstruksi timbunan dengan matras bambu di Indonesia dipilih sebagai tajuk utama. Infrastruktur ini dirancang sebagai solusi cerdas yang menggabungkan fungsi konektivitas di pulau Jawa, sekaligus perlindungan pesisir dari banjir rob yang menjadi masalah serius di pantai utara Jawa Tengah.

Selain itu rubrik artikel pilihan pada edisi ini terdapat 5 artikel pilihan, artikel pilihan kesatu mengenal sistem akuisisi data kondisi struktur jembatan, artikel kedua terkait masalah kemacetan: warisan kegagalan perencanaan jalan perkotaan, kemacetan bukan sekadar soal jumlah kendaraan, melainkan cermin kegagalan merancang jalan perkotaan, artikel pilihan ketiga mengenai *colloidal nano silica* untuk meningkatkan kinerja beton, artikel pilihan keempat tentang menaklukkan batuan vulkanik lemah: tantangan dan strategi desain adaptif terowongan untuk infrastruktur di Indonesia. Serta artikel pilihan kelima mengenai retak refleksi pada perkerasan beraspal yang menggunakan lapis fondasi tanah semen. Untuk rubrik tokoh pada edisi ini menceritakan tentang pegawai teladan dan berprestasi Dr. Herry Trisaputra Zuna, merangkai jalan tol, untuk mendorong inovasi pembiayaan infrastruktur. Dan rubrik laporan proyek tentang mengurangi paket kritis di Bina Marga dengan menerapkan ilmu pengadaan jasa konstruksi dari Filipina, serta untuk rubrik Binekapedia menginformasikan tentang alat DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) untuk pengujian kekuatan pekerjaan stabilisasi tanah.

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan dan penerbitan buletin ini. Semoga buletin ini membawa manfaat dan inspirasi bagi kita semua.

Akan tetapi tentunya buletin edisi kali ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun dari pembaca sangat kami harapkan demi peningkatan kualitas terbitan berikutnya.

Salam Hormat
Redaksi

DAFTAR ISI

TAJUK UTAMA

- “Metode Konstruksi Tanggul Laut Terintegrasi
Jalan Tol Semarang-Demak, Inovasi Konstruksi Timbunan
Dengan Matras Bambu Di Indonesia” 06
Oleh : Janto, Zulaikha Budi Astuti, Oktaviani Tri Handayani
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Tengah - DI Yogyakarta

NASKAH PILIHAN

- “Mengenal Sistem Akuisisi Data Kondisi Struktur Jembatan” 19
Oleh : Imam Akbar, ST.
Balai Geoteknik, Terowongan dan Struktur
- “Macet: Warisan Kegagalan Perencanaan Jalan Perkotaan
Kemacetan bukan sekadar soal jumlah kendaraan,
melainkan cermin kegagalan merancang jalan perkotaan” 30
Oleh : Syafiyah Veronika, S.T.
Balai Sistem Jaringan dan Lingkungan Jalan
- “Colloidal Nano Silica Untuk Meningkatkan Kinerja Beton” 38
Oleh : N. Retno Setiati
Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur
- “Menaklukkan Batuan Vulkanik Lemah:
Tantangan dan Strategi Desain Adaptif Terowongan
untuk Infrastruktur di Indonesia” 46
Oleh : Eka Dhamayanti
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Timur – Bali

5

LAPORAN PROYEK

- “Mengurangi Paket Kritis di Bina Marga dengan
Ilmu Pengadaan Jasa Konstruksi dari Filipina” 62
Oleh : Punto Budiharto, S.T, M.T
Direktorat Preservasi Jalan dan Jembatan Wilayah I
- “Retak Refleksi pada Perkerasan Beraspal
yang Menggunakan Lapis Fondasi Tanah Semen” 69
Oleh : Silvester Fransisko
Balai Bahan dan Perkerasan Jalan

ARTIKEL TOKOH

- “Dr. Herry Trisaputra Zuna, Merangkai Jalan Tol,
Mendorong Inovasi Pembiayaan Infrastruktur” 79
Oleh : Dr. Ir. Alfa Adib Ash Shiddiqi, S.T., M.Sc
Direktorat Jalan Bebas Hambatan

Serba-Serbi

BINEKAPEDIA

- Penggunaan alat DCP 84
Oleh: Silvester Fransisko
Balai Bahan dan Perkerasan Jalan

Redaksi menerima kiriman artikel/tulisan/opini/foto yang berkaitan dengan bidang jalan dan jembatan dalam lingkup kegiatan Bina Marga. Pengiriman dapat dilakukan melalui email ke **perpustakaan.jatan@pu.go.id** disertai dengan data diri berupa biografi singkat dan alamat, nomor telepon yang dapat dihubungi. Redaksi berhak menyunting dan melakukan perubahan naskah tanpa mengubah isi dari pada tulisan.

Metode Konstruksi Tanggul Laut Terintegrasi Jalan Tol Semarang-Demak, Inovasi Konstruksi Timbunan Dengan Matras Bambu Di Indonesia

Oleh: Janto, Zulaikha Budi Astuti, Oktaviani Tri Handayani

Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Tengah - DI Yogyakarta

6

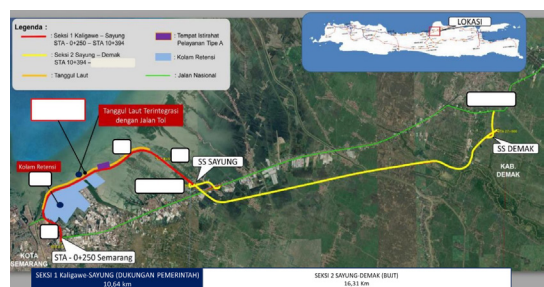
Jalan Tol Semarang – Demak bukan sekedar jalan tol biasa. Infrastruktur ini dirancang sebagai solusi cerdas yang menggabungkan fungsi konektivitas di pulau Jawa, sekaligus perlindungan pesisir dari banjir rob yang menjadi masalah serius di pantai utara Jawa Tengah.

Melalui konsep tanggul laut dengan sistem polder, jalan tol ini dapat mengendalikan banjir rob. Pengendalian banjir rob dilakukan dengan cara membendung air sebagai sistem polder yang mencakup pembangunan kolam retensi, pompa, pintu air, dan sistem drainase yang merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari manajemen pengelolaan air.

Tulisan ini akan mengajak pembaca melihat lebih dekat tentang lokasi pekerjaan dan pembagian paket pekerjaan pada Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Seksi I. Fokus utama pembahasan pada konstruksi tanggul laut di Paket *Toll Road Development of Semarang-Demak 1B*, mulai dari pelaksanaan pekerjaan cerucuk bambu dan matras bambu, pekerjaan lapisan timbunan pasir, hingga pekerjaan lapisan timbunan pilihan.

A. LOKASI PEKERJAAN

Pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak terbagi menjadi dua seksi. Seksi II ruas Sayung – Demak sepanjang 16,31 km yang dikerjakan oleh badan usaha jalan tol lebih dulu selesai dan kini telah dioperasikan oleh PT PPSPD. Sementara itu, Seksi I sepanjang 10,64 km masih dalam konstruksi.



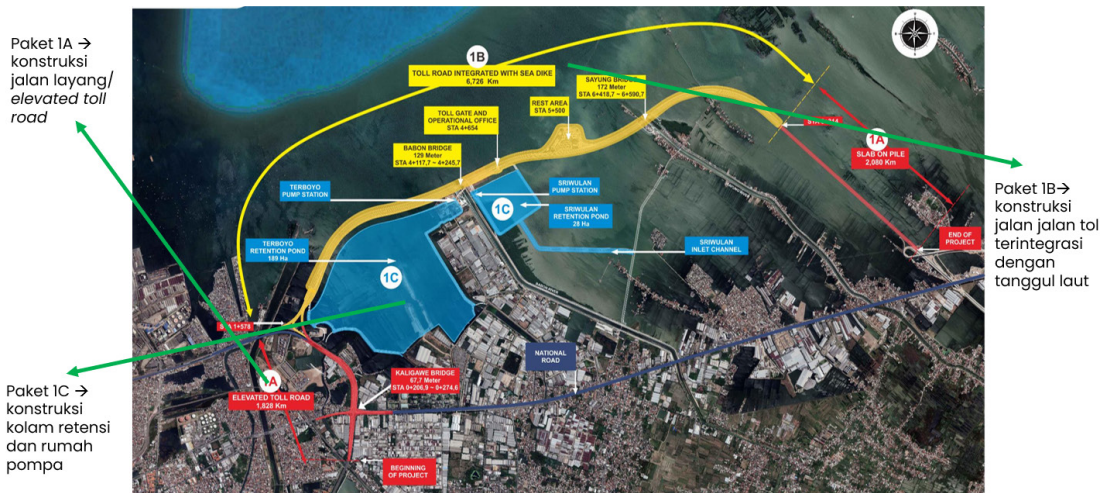
Gambar 1. Lokasi Pekerjaan Pembangunan Jalan Tol Semarang – Demak
(Sumber: Progress Kegiatan Jalan Tol Semarang Demak, Satker PJT Semarang-Demak, 2024)

Paket pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Seksi I (Kaligawe-Sayung), merupakan segmen dukungan konstruksi oleh Pemerintah dan dikerjakan secara bertahap dalam 3 (tiga) paket konstruksi yaitu:

1. Paket *Toll Road Development of Semarang-Demak 1A* adalah paket yang menangani konstruksi jalan layang pada segmen Kaligawe dan Sayung;

2. Paket *Toll Road Development of Semarang-Demak 1B* adalah paket yang menangani konstruksi jalan tol terintegrasi dengan tanggul laut pada segmen Kaligawe dan Sayung;

3. Paket *Toll Road Development of Semarang-Demak 1C* adalah paket yang menangani konstruksi jalan layang pada segmen Kaligawe dan Sayung.



Gambar 2. Paket pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak
(Sumber: Progress Kegiatan Jalan Tol Semarang Demak, Satker PJT Semarang-Demak, 2024)

B. KONSTRUKSI JALAN TOL TERINTEGRASI TANGGUL LAUT

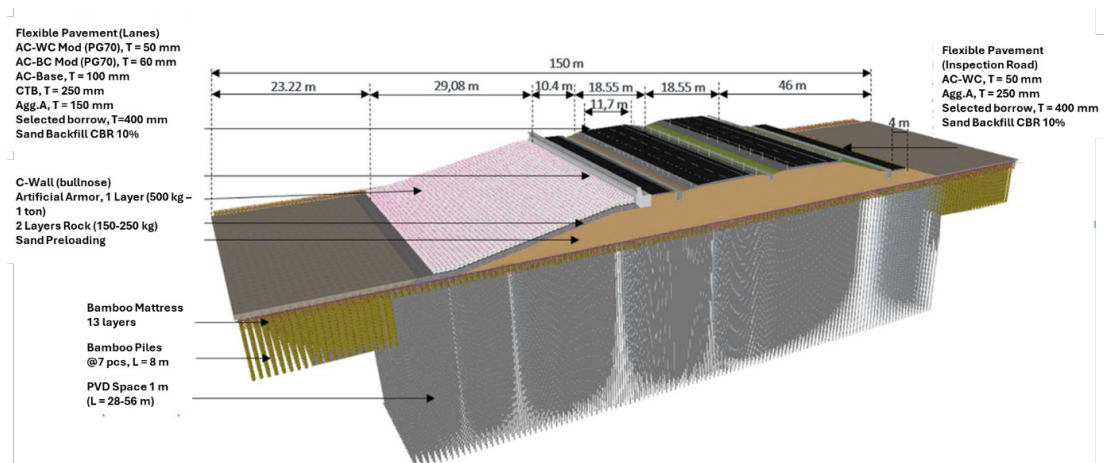
Paket *Toll Road Development of Semarang - Demak 1B* hadir dalam bentuk yang tidak biasa. Jalan tol ini menyatu dengan tanggul laut yang memiliki panjang total 6,73 km dengan lebar tanggul yang cukup besar, antara 140 hingga 170 m. Jalan tol ini memiliki jumlah lajur 2x2 lajur, lebar lajur 3,6 m, lebar median 12,7 m (termasuk bahu dalam), lebar bahu luar 3,00 m dan bahu dalam 1,5 m, serta memiliki satu buah TIP tipe A.

Namun, yang membuatnya istimewa bukan sekedar dimensinya, melainkan cara pembangunannya. Tanggul Laut pada Jalan Tol Semarang-Demak Seksi I dirancang dengan menggunakan konstruksi dari material timbunan pasir dan timbunan pilihan dengan kriteria teknis tertentu mencapai ketinggian berkisar antara 5,60 hingga 6,10 m di atas muka air laut rata-rata. Di sisi yang menghadap laut, tanggul menggunakan konstruksi *revetment* dengan material batu *boulder* dan *single layer armour (A-Jack Armour)* yang berfungsi sebagai struktur utama penahan rob dan gelombang air laut. Di balik konstruksi tersebut, terdapat kombinasi teknologi modern dan inovasi lokal.

Untuk memperkuat tanah lunak digunakan metode pra-pembebanan (*preloading*) yaitu pemanfaatan material-material geosintetis seperti geotekstil, penyalir vertikal prefabrikasi (*Prefabricated Vertical Drainage/PVD*), penyalir horizontal prefabrikasi (*Prefabricated Horizontal Drainage/PHD*) dan geomembran. Menariknya, proyek ini memanfaatkan bambu sebagai inovasi ramah lingkungan, lestari dan berkelanjutan. Bambu disusun menjadi cerucuk dan matras bambu dalam proses perbaikan tanah lunak sebagai penguat dasar tanah. Hal ini menjadi penting mengingat jalan tol dibangun di atas tanah dasar yang sangat lunak dengan ketebalan 40 - 50 m dan selalu terendam air.

Oleh karena itu, pelaksanaan konstruksi jalan tol terdiri dari beberapa pekerjaan utama yaitu:

1. Pekerjaan perbaikan tanah eksisting (*soil improvement*) yang terdiri dari Cerucuk Bambu & Matras Bambu 13 Layer, Timbunan Pra Pembebanan Sementara (*Preloading*) menggunakan pasir (*layer 1-2*) dan timbunan pilihan (*layer 1-6*) dengan waktu tunggu konsolidasi total selama 425 hari, dan Pekerjaan Material Geosintetis (PVD, PHD, Geotekstil).
2. *Sea Dike: A-Jack Armor*, Batu Boulder.
3. *Main Road: Flexible Pavement* dengan menggunakan aspal modifikasi (PG70).

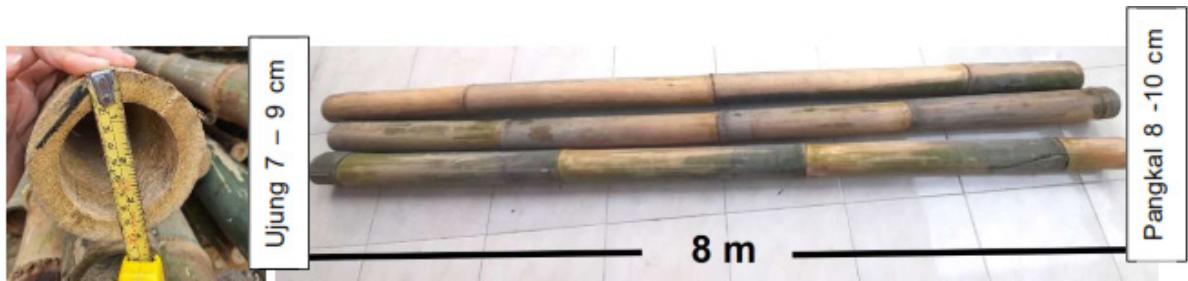


Gambar 3. Tipikal potongan melintang konstruksi jalan tol terintegrasi tanggul laut
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

C. PEKERJAAN CERUCUK BAMBU DAN MATRAS BAMBU

Pekerjaan cerucuk bambu dan matras bambu pada lokasi pembangunan Jalan Tol Semarang Demak Seksi 1B memegang peran penting sebagai peningkatan perkuatan tanah dasar. Cerucuk bambu merupakan susunan bambu – bambu yang diikat menjadi kesatuan, umumnya terdiri dari tujuh batang bambu dan dipancang ke dalam tanah. Posisi cerucuk ini berada di bawah

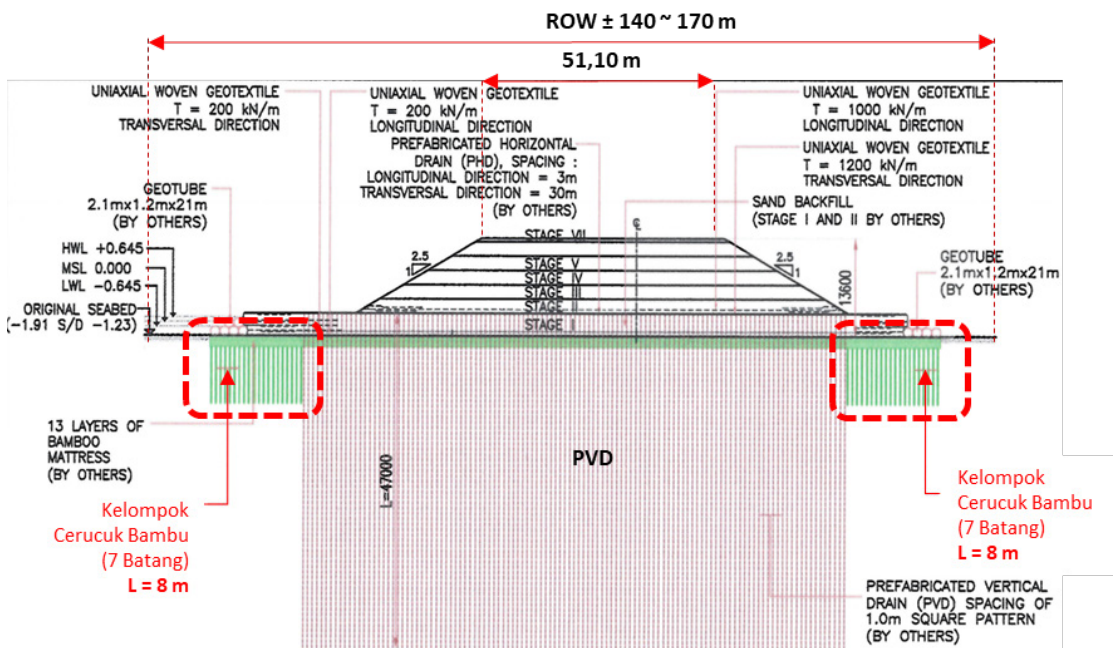
matras bambu dan berfungsi sebagai peningkatan daya dukung tanah dasar dan *counterweight*. Sementara itu, matras bambu adalah susunan bambu yang diikat menjadi satu kesatuan yang diletakkan pada lapisan bawah timbunan, sebagai peningkatan daya dukung tanah dasar. Material bambu yang digunakan pun tidak sembarangan. Material harus memenuhi spesifikasi khusus yang disyaratkan yaitu diameter pangkal 8-10 cm, diameter ujung 7-9 cm, serta panjang nominal 8m.



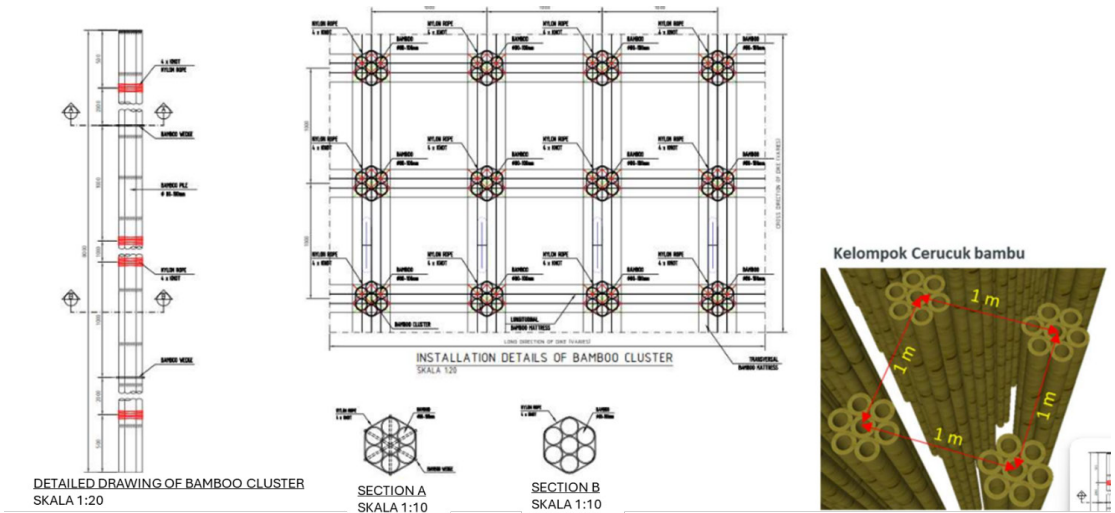
Gambar 4. Dimensi bambu
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

1. Metode Pelaksanaan Pemancangan Cerucuk Bambu

Proses pemasangan cerucuk bambu menjadi tahap awal yang sangat penting. Cerucuk dipasang di tepi zona dan tepat berada di bawah matras bambu. Setiap cerucuk bambu terdiri dari tujuh batang bambu yang diikat menjadi satu, dengan panjang 8 m. cerucuk dipasang dengan jarak 1 m antar titik dengan toleransi lokasi cerucuk sekitar 20 cm.



Gambar 5. Area cerucuk bambu
(Sumber: *Metode pelaksanaan pekerjaan*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)



Gambar 6. Detail cerucuk bambu
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Menariknya, fabrikasi cerucuk bambu dilakukan di darat (area *stockpile*). Setelah itu dilakukan pelangsiran ke lokasi cerucuk bambu menggunakan perahu. Pemancangan cerucuk bambu di laut dilaksanakan dengan menggunakan *crane* tongkang dan *drop hammer*.

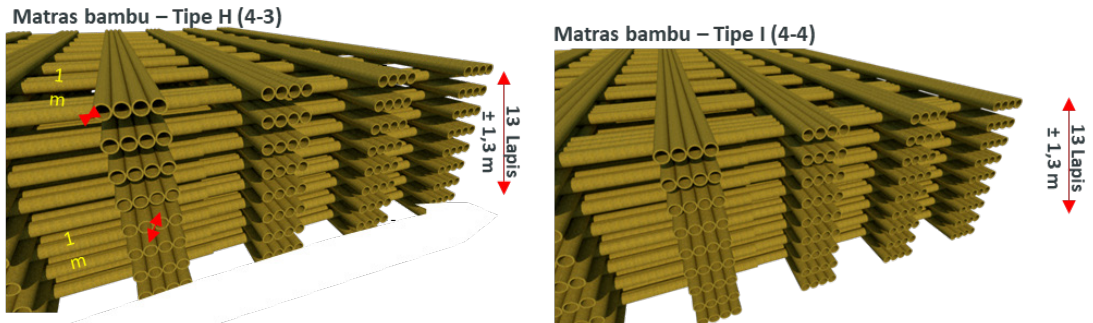
Diawali dengan pemasangan jangkar untuk menahan posisi *crane* tongkang dan *template* pemancangan bambu, kemudian bambu dimasukkan ke dalam *template* satu persatu.



Gambar 7. Pemancangan cerucuk bambu
(Sumber: *Metode pelaksanaan pekerjaan*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

2. Metode Pelaksanaan Pemasangan Matras Bambu

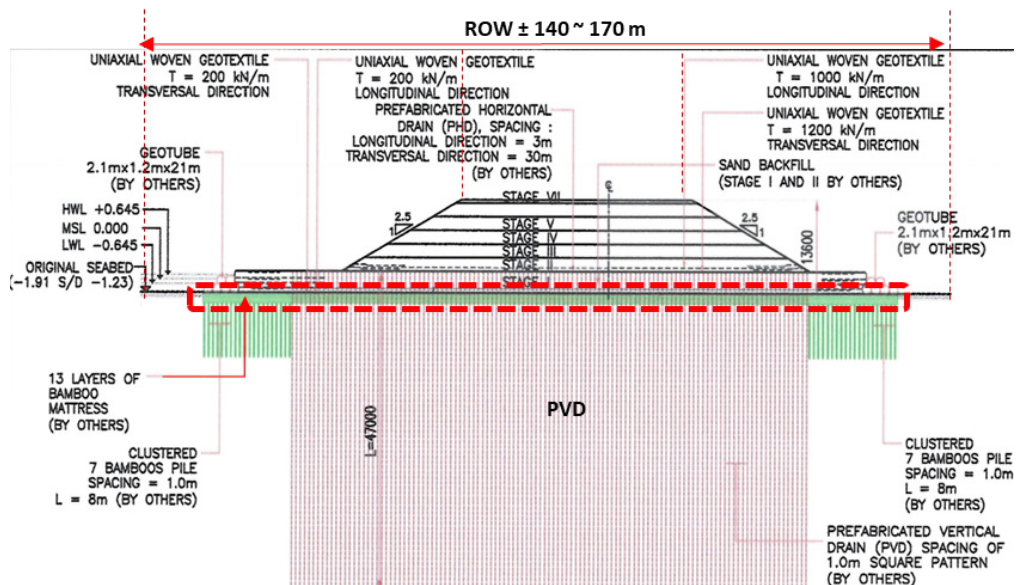
Setelah cerucuk terpasang, tahap berikutnya adalah pemasangan matras bambu. Matras yang digunakan sebanyak 13 lapis terdiri dari Tipe H (empat bambu per meter arah melintang timbunan dan tiga bambu per meter arah memanjang timbunan) dan Tipe I (empat bambu per meter arah melintang timbunan dan empat bambu per meter arah memanjang timbunan).



Gambar 8. Konfigurasi matras bambu
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Matras bambu dipasang pada *top* cerucuk bambu, menjadi lapisan dasar sebelum proses penimbunan dimulai. Posisi akhirnya direncanakan akan berada pada *top sea bed*. Agar matras tidak bergeser di luar batas toleransi maka diberi pasak pada beberapa area matras.

Karena pemasangan matras bambu dilakukan di atas air sehingga perlu dilakukan fabrikasi platform bambu di darat terlebih dahulu dan dilanjutkan dengan mobilisasi serta instalasi di lokasi sesuai dengan *shop drawing*.



Gambar 9. Area matras bambu
(Sumber: *Metode pelaksanaan pekerjaan*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)



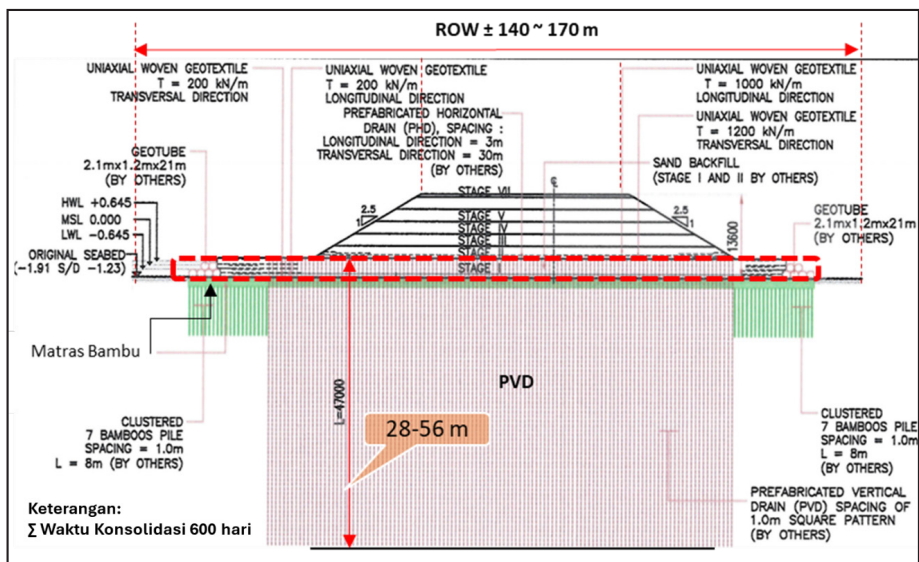
Gambar 10. Penyusunan matras bambu
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

D. PEKERJAAN LAPISAN TIMBUNAN PASIR

Pembangunan tanggul laut Tol Semarang – Demak dilakukan secara berlapis. Secara keseluruhan, lapisan pada tanggul laut terdiri dari tujuh lapisan,

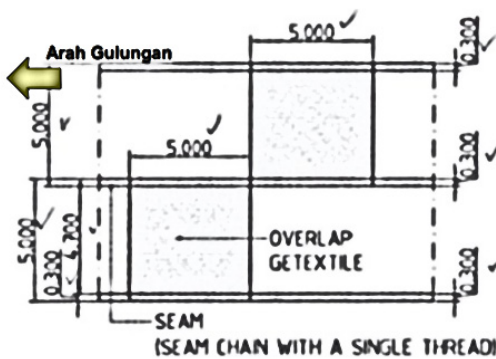
dengan dua jenis timbunan yaitu lapisan timbunan pasir untuk lapis 1 dan 2 serta timbunan pilihan untuk lapis 3 sampai dengan lapis 7.

1. Penimbunan Pasir Lapis 1



Gambar 11. Area timbunan pasir lapis 1
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Penimbunan pasir lapis 1 dilakukan di atas *Geotextile Woven* 200 kN/m transversal. Penggelaran *Geotextile* 200 kN/m arah transversal dilaksanakan pada area yang matras bambu yang telah terfabrikasi hingga *Top Layer*. Gulungan material *Geotextile* yang digelar di atas matras akan diikatkan ke matras bambu agar ketika ada pekerjaan penimbunan material di atasnya tidak terjadi pergeseran. Selain itu, perlu diberikan *overlapping* ujung *Geotextile* sepanjang 5 meter dan untuk sisi samping *overlapping* sepanjang 30 cm dengan penjahitan tipe SSn-2.



Gambar 12. *Overlapping* geotekstil 200 kN/m
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Setelah itu, penggelaran pasir dilakukan secara bertahap dengan bantuan alat *excavator long arm* dan *bulldozer*.

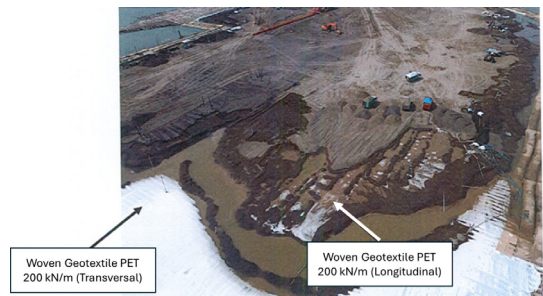


Gambar 13. Penimbunan pasir di atas geotekstil 200 kN/m (transversal)
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Setelah penggelaran *Geotextile* 200 kN arah transversal, dilaksanakan penimbunan sebagai separator antara *Geotextile* 200 kN transversal dan longitudinal. Tebal timbunan diperlukan sekitar 1,7 meter.

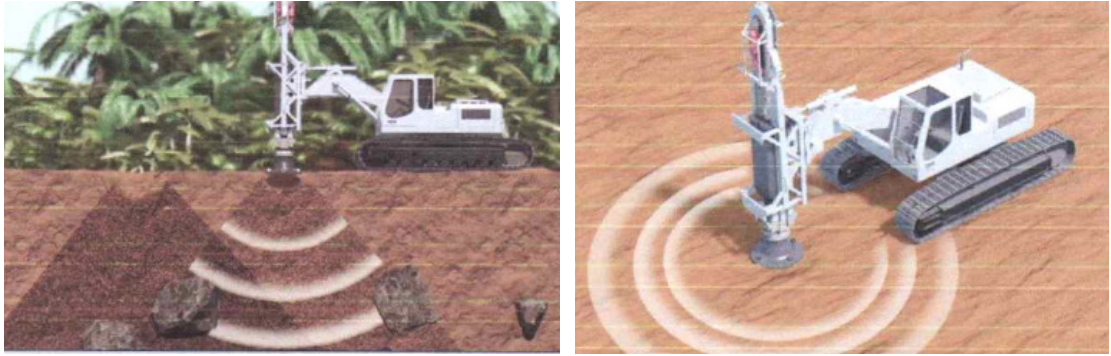
Dikarenakan muka air yang cukup tinggi sehingga apabila timbunan kurang dari 1 meter, alat berat tidak mampu untuk meratakan penghamparan pasir di atas matras. Setelah itu, material *Woven Geotextile* 200 kN dipasang dengan arah longitudinal.

Untuk *overlapping* ujung *Geotextile* adalah sepanjang 5 meter, sedangkan sisi samping *overlapping* sepanjang 30 cm namun tidak perlu dijahit seperti arah transversal. Selanjutnya penimbunan pasir lapis 1 dilanjutkan hingga elevasi sekitar 1,2m.



Gambar 14. Penimbunan pasir lapis 1 di atas geotekstil 200 kN/m longitudinal
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

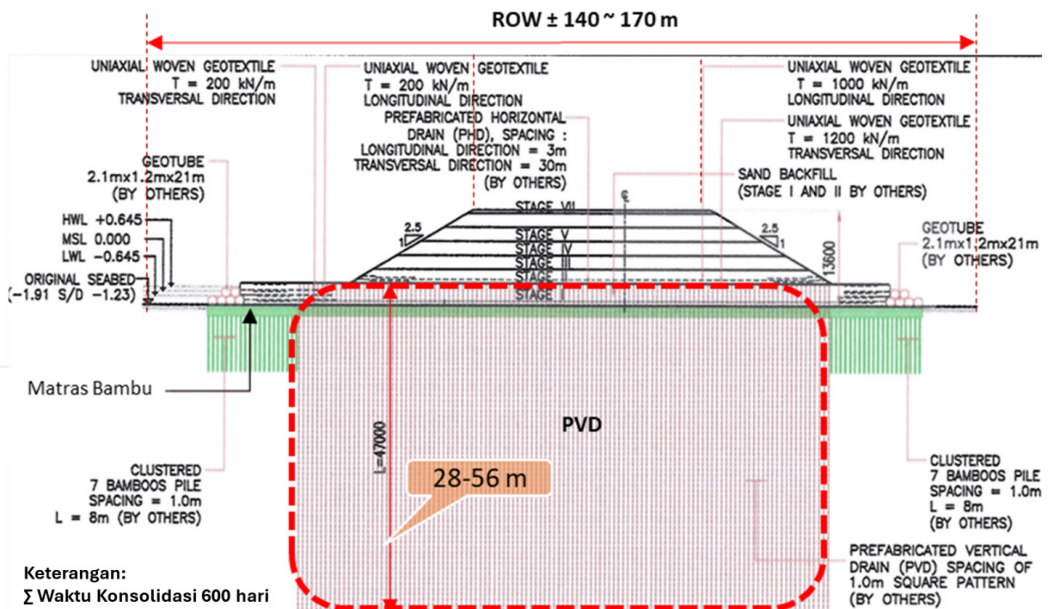
Agar lebih padat dan stabil, timbunan pasir dipadatkan dengan menggunakan metode pemadatan dalam menggunakan alat *Rapid Impulse Compaction* (RIC). Metode ini membantu mitigasi potensi likuifaksi pada tanah kepasiran di bawah muka air terhadap beban gempa.



Gambar 15. Ilustrasi pemadatan dengan RIC
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

2. Pekerjaan PVD dan PHD

Setelah timbunan pasir lapis 1 selesai (mencapai kedalaman yang direncanakan), tahap berikutnya pekerjaan pemancangan PVD dan instalasi PHD di sepanjang konstruksi tanggul laut. Pekerjaan ini berfungsi sebagai salah satu metode dalam perbaikan tanah/ *soil improvement* yaitu dengan mempercepat proses konsolidasi tanah lunak.



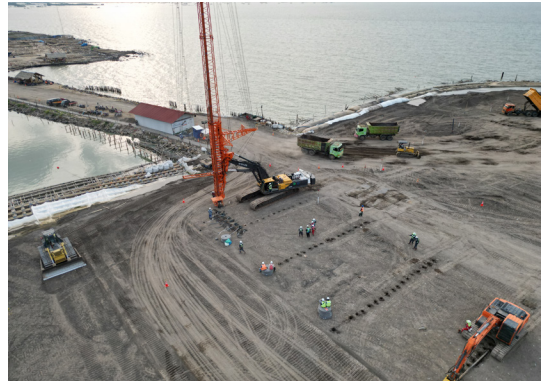
Gambar 16. Area pekerjaan PVD
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Material *Vertical Drain* dan *Rig PVD* di mobilisasi ke lokasi timbunan dengan selalu melakukan monitoring kecepatan angin dimana saat kecepatan angin kencang *Rig PVD* perlu direbahkan untuk menghindari risiko *Rig PVD* terguling. Area timbunan yang dilewati *Rig PVD* lebar 3,3 m diberikan Plat Baja dengan lebar sekitar 5 m agar beban *Rig PVD* menjadi merata.



Gambar 17. Pemasangan PVD ke PVD rig
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Selanjutnya melakukan pemasangan gulungan PVD ke alat pancang. *Anchor Plate* dipasang pada ujung tiang pancang bila dibutuhkan, berfungsi untuk menahan PVD tepat pada kedalaman rencana saat pengangkatan mandrel dan mengurangi risiko air dan tanah menyumbat material PVD. PVD dipasang dengan menekan mandrel, mandrel kemudian didorong masuk ke dalam tanah dengan menggunakan PVD rig sampai dengan tanah keras atau kedalaman rencana. Setelah PVD sudah mencapai tanah keras, mandrel kemudian ditarik ke atas tanah. Selama proses ini, PVD tetap berada di dalam tanah tertahan oleh angkur. Setelah mandrel telah sepenuhnya keluar ke atas tanah, PVD yang berada di atas tanah kemudian dipotong sepanjang sesuai gambar *shop drawing*.



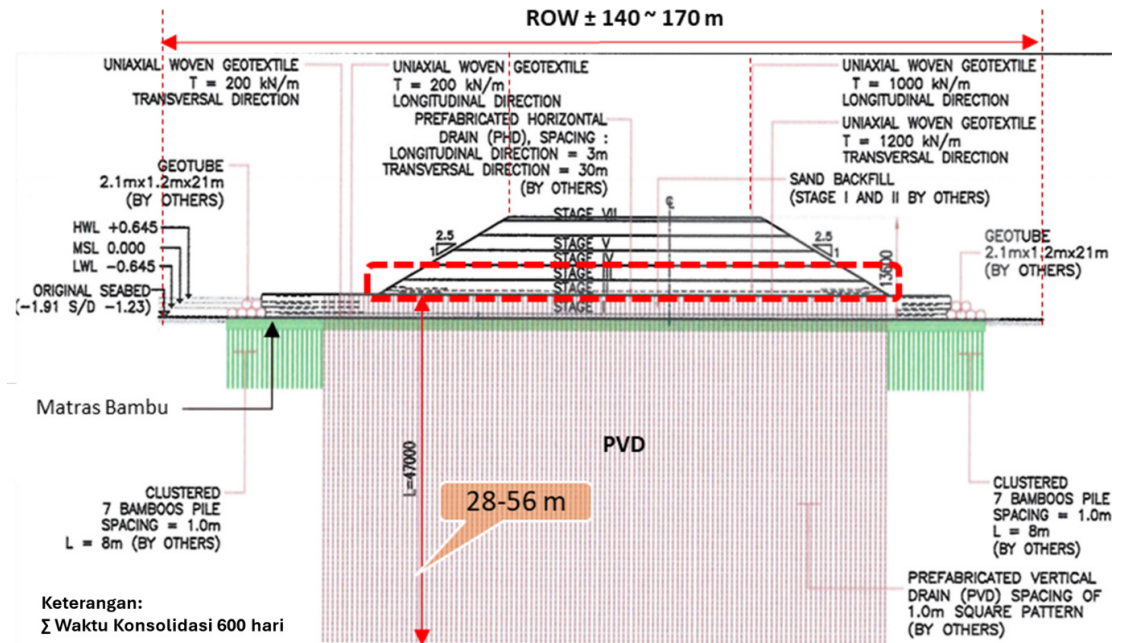
Gambar 18. Pemancangan PVD
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Penghamparan PHD dilaksanakan setelah beberapa baris PVD sudah terinstal. PHD dihamparkan di atas garis referensi yang telah dibuat secara transversal setiap 3m dan dihamparkan secara longitudinal dengan jarak 30m. Selanjutnya, ujung PVD yang muncul diatas tanah disambungkan ke PHD sesuai dengan konfigurasi. PHD akan mengalirkan pembuangan air dari PVD menuju ke sisi transversal timbunan (arah cerucuk) yang nantinya ditampung di bak penampungan.



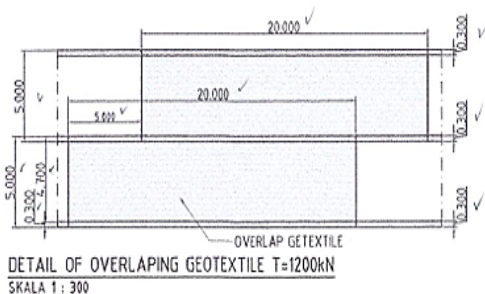
Gambar 19. Penyambungan PVD dan PHD
(Sumber: *Work Method Statement*, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

3. Penimbunan Pasir Lapis 2



Gambar 20. Area timbunan pasir lapis 2
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Pelaksanaan dilakukan seperti tahapan pada lapis 1, penimbunan pasir lapis 2 dilakukan di atas *Woven Geotextile* PET 1200 KN/m transversal setinggi 30 cm. selanjutnya *Woven Geotextile* PET 1000 KN/m (*matrass Type H*) atau *Woven Geotextile* PET 1200 KN/m (*matrass Type I*) dihampar di atas timbunan 30 cm arah longitudinal dengan menggunakan *overlapping* 10 m dan 15 m pada arah memanjangnya dan *overlapping* 30 cm pada arah melintangnya.



Gambar 21. *Overlapping* geotekstil 1200 kN/m
(Sumber: *Work Method Statement*,
Satker PJT Semarang-Demak, 2023)



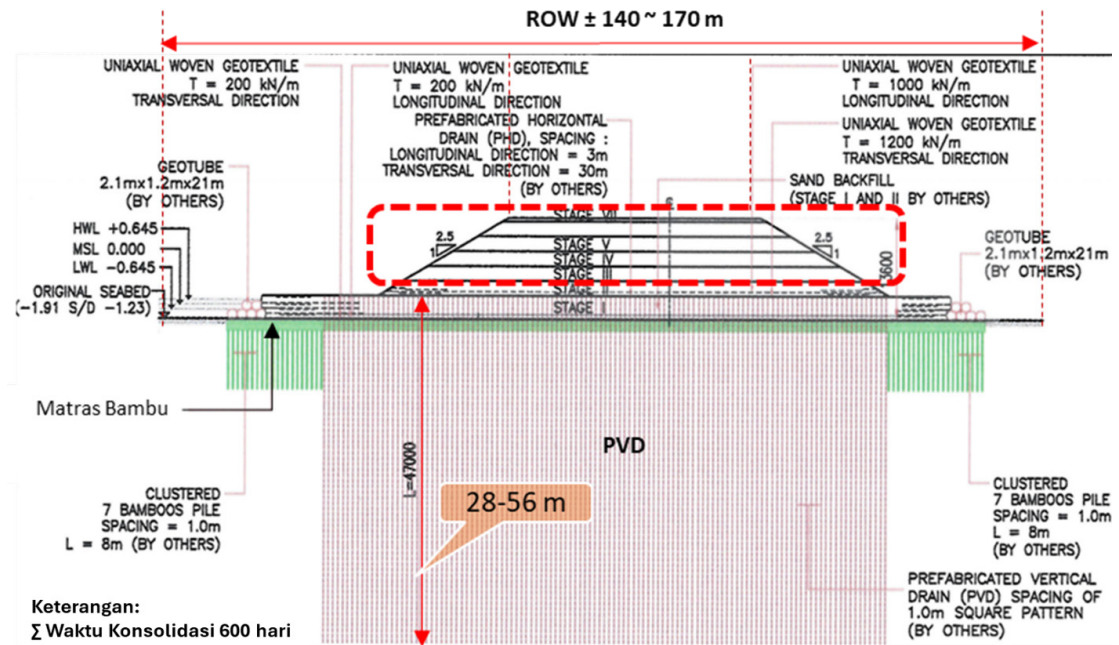
Gambar 22. Penimbunan pasir lapis 2 di atas geotekstil
1200 kN/m transversal
(Sumber: *Work Method Statement*,
Satker PJT Semarang-Demak, 2023)



Gambar 23. Penimbunan pasir lapis 2 di atas *Geotextile*
200 kN/m longitudinal
(Sumber: *Work Method Statement*,
Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

E. PEKERJAAN LAPISAN TIMBUNAN PILIHAN

Setelah dua lapisan awal selesai, pembangunan dilanjutkan ke lapisan timbunan pilihan berada pada lapis 3 sampai dengan lapis 7.



Gambar 24. Area timbunan pilihan
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Pada tahap ini, material timbunan diperoleh dari *quarry* dengan beberapa pengujian diantaranya uji batas Atterberg, pengujian hasil analisa saringan, pengujian tes CBR laboratorium, pemeriksaan izin usaha pertambangan *quarry*, serta data-data lain sesuai spesifikasi teknis.

Penghamparan material dilaksanakan lapis demi lapis sesuai dengan spesifikasi teknis.



Gambar 25. Pendatangan material timbunan dari *quarry*
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan, Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

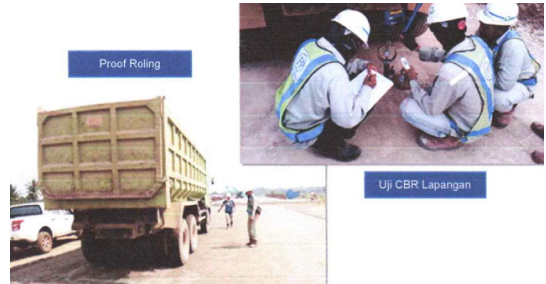
Pemadatan timbunan pilihan dilakukan dengan metode pemadatan permukaan. Sebelum pelaksanaan pemadatan timbunan, dilakukan *trial* pemadatan untuk mendapatkan jumlah lintasan optimum. Selanjutnya dilakukan pemadatan timbunan lapis per lapis setebal maksimal 20 cm menggunakan *vibro roller* dengan jumlah lintasan sesuai hasil dari *trial* pemadatan.



Gambar 26. Pemadatan timbunan hingga kepadatan 100%
(Sumber: Metode pelaksanaan pekerjaan,
Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Pekerjaan pemadatan permukaan pada lapisan timbunan pilihan dilakukan hingga mencapai CBR lapangan minimum sebesar 15%. Pengujian kepadatan dilakukan dengan melakukan pengujian CBR lapangan, *proof rolling*, dan pengujian *sand cone*. CBR lapangan digunakan untuk memperoleh nilai CBR asli di lapangan sesuai dengan kondisi tanah pada saat itu.

Uji *proof rolling* dilakukan dengan menggunakan *dumptruck* berisi tanah untuk mengecek lendutan timbunan. Pengujian *sand cone* dilakukan untuk mengetahui kepadatan tanah di lapangan dengan berat isi kering laboratorium.



Gambar 27. Pengujian CBR dan *proof rolling*
(Sumber: *Work Method Statement*,
Satker PJT Semarang-Demak, 2023)



Gambar 28. Pengujian *sand cone*
(Sumber: *Work Method Statement*,
Satker PJT Semarang-Demak, 2023)

Jalan Tol Semarang – Demak bukan hanya proyek infrastruktur, tetapi juga simbol adaptasi terhadap tantangan lingkungan. Dengan menggabungkan teknologi modern dan kearifan lokal, proyek ini menunjukkan bahwa pembangunan dapat berjalan selaras dengan kondisi alam.

Di tengah ancaman perubahan iklim dan kenaikan muka air laut, pendekatan seperti ini menjadi semakin penting. Jalan tol ini bukan hanya mempercepat perjalanan, tetapi juga melindungi masa depan wilayah pesisir

Mengenal Sistem Akuisisi Data Kondisi Struktur Jembatan

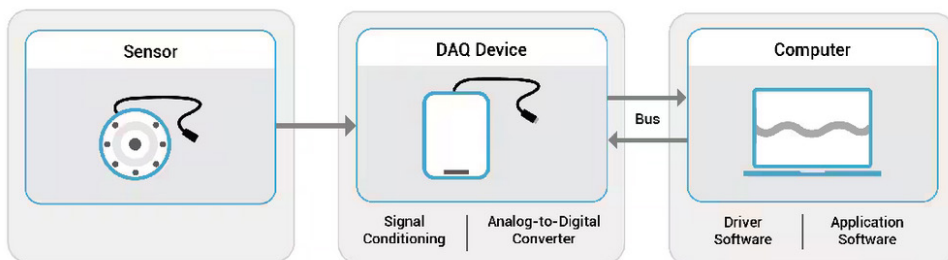
Oleh: Imam Akbar, ST.

Balai Geoteknik, Terowongan dan Struktur

Mengenal Sistem di Balik Jembatan

Pernahkan kita membayangkan bagaimana kondisi sebuah jembatan dapat terus dipantau tanpa harus diperiksa secara langsung? Kini, hal tersebut dimungkinkan dengan sistem akuisisi data (*Data Acquisition System/DAQ*), pengumpulan informasi mengenai kondisi struktur suatu jembatan secara elektronik.

Di Indonesia, teknologi ini diterapkan dalam sistem monitoring kesehatan struktur (SMKS) jembatan, seperti pada Jembatan Suramadu, Jembatan Ir. Soekarno, dan lainnya. Sistem ini terdiri dari sensor, pengkondisi sinyal, dan perangkat keras yang berfungsi mengumpulkan, mengolah, dan mengirimkan data untuk dianalisis lebih lanjut.



Gambar 1. Sistem akuisisi data. (Sumber: www.omega.co.uk).

Sistem ini dapat bekerja secara optimal dengan pemilihan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang sesuai dengan kebutuhan akuisisi data. Berbagai faktor mulai dari sistem koneksi (kabel atau nirkabel), keterpencangan alat (*embedded tools*) seperti sistem elektro-mekanik mikro (*Micro Electro-Mechanic System/MEMS*), hingga penggunaan program komputer (*computer program*) perlu dipertimbangkan agar tercapai kesesuaian kebutuhan saat ini maupun di masa mendatang.



Gambar 2. Sistem elektro-mekanik mikro (MEMS).

(Sumber: www.bisinfotech.com).

Artikel ini akan membawa pembaca mengenal lebih jauh tentang sistem akuisisi data mulai dari prinsip, komponen, jenis, dan beberapa tinjauan lainnya.

Prinsip-Prinsip Sistem DAQ

Sistem DAQ digunakan untuk pengumpulan dan pengolahan data yang diperlukan untuk memahami fenomena elektrik dan fisik dari suatu materi/struktur. Sebagai contoh, ketika kita mengukur suhu suatu benda seperti koil (lilitan kawat), benda tersebut dipanaskan, suhu tersebut diukur dan direkam, lalu hasilnya disimpan untuk dianalisis, proses ini disebut akuisisi data. Contoh lain yakni pengukuran dan perekaman beda potensial dari aliran listrik pada resistor elektrik.

Alasan dari pengukuran dan perekaman fenomena listrik dan fisik menggunakan sistem akuisisi data adalah untuk mendapatkan gambaran kondisi struktur secara mendalam.

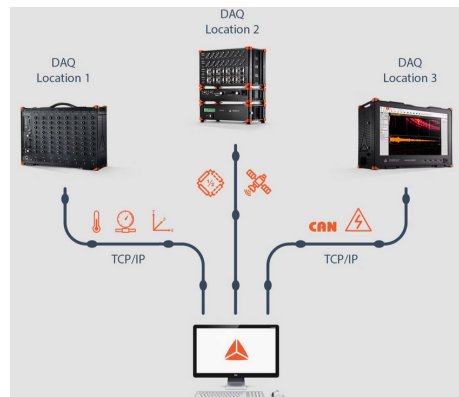
Dengan bantuan perangkat lunak, Sistem DAQ dapat memperoleh data dari sistem aktual dan menyimpan data tersebut dalam sebuah format yang sederhana mudah diakses untuk revidi teknik atau ilmiah.

Dalam praktiknya, Sistem DAQ dapat berupa alat yang dapat digenggam (*handheld device*) atau yang dioperasikan dari jarak jauh (*remotely operated device*). Sistem DAQ genggam digunakan saat ada kebutuhan untuk pembacaan kondisi spesimen yang dapat dilakukan secara interaksi fisik, **Gambar 3a**. Saat interaksi langsung dengan objek bersifat tidak mungkin, sistem DAQ dari jarak jauh digunakan untuk pengukuran, **Gambar 3b**.



Gambar 3a. Osiloskop, multimeter, dan logger genggam universal.

(Sumber: www.industrysearch.com.au).



Gambar 3b. Sistem akuisisi data terdistribusi.

(Sumber: dewesoft.com).

Dalam pemilihan sistem DAQ, terdapat hal-hal yang menjadi pertimbangan, yaitu:

- jumlah masukan (*input*) dan keluaran (*output*) yang diperlukan, yakni, jumlah terminal analog atau digital yang bisa dihubungkan,
- jumlah sensor,
- jenis pengukuran, yaitu lokal atau jarak jauh,
- jenis informasi yang akan diolah atau disiapkan dalam sistem,
- pengarsipan data yang konsisten dan dapat diakses untuk pemantauan jangka panjang,
- pengiriman informasi tentang kondisi sistem untuk petugas pemeliharaan atau sistem kendali,
- ketersediaan sumber daya (*power supply*) untuk penggunaan jangka panjang, dan
- evaluasi kondisi operasional dan lingkungan.

Akuisisi data untuk monitoring struktur

Dalam pemantauan kesehatan jembatan, pengukuran terhadap rentang struktur yang besar dapat dilakukan, dari sinyal digital yang diukur secara lambat (statik) hingga sinyal analog (tegangan) konvensional dengan laju pengukuran dinamik yang beragam (Catbas et al. 2012, Chen dan Maung 2014). Sebagai contoh, perubahan suhu akibat perbedaan siang dan malam dapat dipantau dengan pengambilan data secara berkala (parameter respons statik), misal setiap satu jam. Sementara, untuk sinyal dinamik, laju pengambilan sampel bergantung kepada ukuran struktur dan rentang frekuensi beban eksternal.

Agar dapat berfungsi dalam jangka panjang, sistem DAQ bergantung kepada perangkat keras yang handal, berupa perlindungan dari lingkungan yang kasar (misalnya debu, suhu tinggi, dan kelembaban), penutup komputer yang kuat, dan sebagainya. Selain itu, dibutuhkan pemeliharaan akses jalan menuju lokasi sistem DAQ, kesediaan daya listrik yang stabil, seperti tersedianya *Uninterruptable Power Supply* (UPS), juga sistem komunikasi berkecepatan tinggi perlu disediakan.

Akuisisi data dalam monitoring jembatan

Secara umum, DAQ merupakan komponen kunci dari sistem akuisisi dan transmisi data dalam sistem MKS. Sistem DAQ tersusun atas unit akuisisi data yang tetap, unit akuisisi data yang bisa berpindah, dan pengubah video ke data digital (*digital video converter* / DVC) untuk pengumpulan sinyal acak (*random signal*) dan sinyal video digital (*digital video signal*). Alat-alat tersebut berbasis komputer personal / PC.

Unit akuisisi data yang tetap, dipasang secara permanen dalam lantai dan menara jembatan untuk pengumpulan dan pengolahan sinyal yang diperoleh dari sistem sensor. Unit akuisisi data yang bisa berpindah digunakan untuk mengumpulkan sinyal dari akselerometer yang dipindahkan lokasinya selama pengukuran getaran lingkungan dan pekerjaan pengukuran lapangan tertentu. Komponen utama dalam unit akuisisi data meliputi pengendali antar-hubung komponen sekeliling (*Peripheral Component Interconnect* / PCI), alat pengkondisi sinyal (*signal conditioner*), dan pengubah sinyal analog ke digital (*signal converter*). Rancangan yang baik dari komponen-komponen ini bisa menjadi kunci untuk memperoleh data pengukuran berkualitas tinggi.

Komponen-Komponen dari Sistem DAQ

Komponen dasar dari sistem akuisisi data

Dalam proses akuisisi data, langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan fenomena atau karakteristik fisik yang akan diukur. Suhu, intensitas cahaya, getaran, tekanan gas, gerakan fluida, dan gaya merupakan beberapa contoh dari faktor pertimbangan dalam sistem DAQ. Terlepas dari jenis sifat fisik yang akan diukur, keadaan fisik harus berbentuk sampel yang dapat diambil / diukur oleh sistem DAQ.

Perubahan/pengukuran ini dikerjakan menggunakan sensor. Sistem DAQ memungkinkan pengukuran atau kendali sifat fisik dari objek yang ada di dunia nyata. Sistem DAQ yang lengkap terdiri dari perangkat keras DAQ, sensor, aktuator, pengkondisi sinyal, dan komputer yang menjalankan perangkat lunak DAQ. Dalam beberapa kondisi, sistem waktu juga menjadi faktor penting. Oleh karena itu, sistem DAQ sering dilengkapi dengan pengaturan waktu, terutama ketika dipelurkan pencatatan data berdasarkan sistem DAQ moda kejadian (*event mode*).

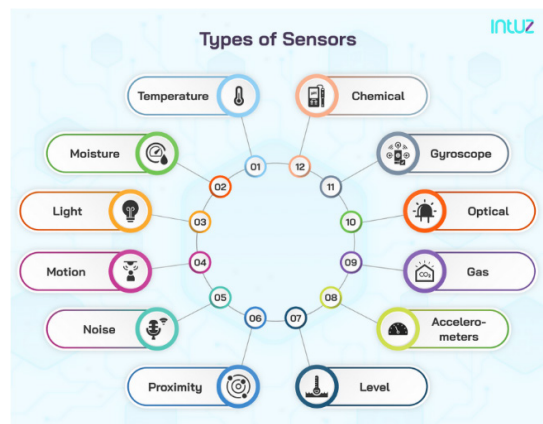
a. Sensor

Sensor atau *transducer* berfungsi sebagai alat interaksi antara sistem DAQ dengan subjek yang diukur, baik secara langsung atau tidak langsung, serta secara kontak atau non-kontak. Alat-alat ini mengubah nilai kondisi fisik menjadi keluaran sinyal listrik. Terdapat banyak jenis sensor yang berbeda yang digunakan dalam sistem DAQ yang bergantung kepada sifat penggunaannya.

Misalnya, saat temperatur diukur, sensor temperatur digunakan. Tetapi saat mengukur cahaya, sensor fotovoltaiik digunakan.

b. Pengirim / pengkondisi sinyal

Sinyal listrik yang dihasilkan oleh sensor tidak selalu langsung dapat digunakan. Sering kali, sinyal tersebut masih mengandung gangguan (*noise*) atau interferensi dari sinyal lainnya, sehingga memerlukan modifikasi. Sinyal mungkin lemah atau pada keadaan yang mana sistem DAQ tidak bisa mengukurnya. Karena itu, rangkaian listrik tambahan digunakan untuk optimisasi sinyal tersebut. Rangkaian listrik ini dikenal sebagai pengkondisi sinyal, yang merupakan proses optimisasi sinyal.



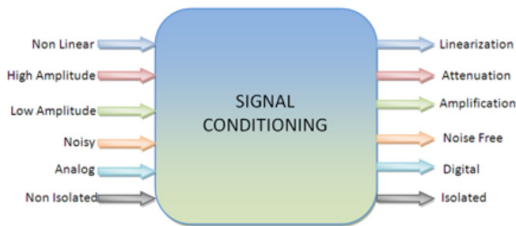
Gambar 4. Jenis-jenis sensor untuk pengukuran besaran fisika dan kimia.

(Sumber: *dzone.com*).

Pengkondisi sinyal bekerja dengan memanfaatkan rangkaian listrik penyaring (*filter*) untuk memisahkan gangguan dari sinyal interferensi. Selain itu, digunakan rangkaian listrik penguat (*amplifier*) untuk memperkuat sinyal yang lemah. Dua hal ini merupakan fungsi yang paling umum yang dilakukan oleh pengirim atau pengkondisi sinyal.

Sebuah rangkaian pengkondisi sinyal yang memadai dapat melakukan proses-proses seperti linearisasi, kalibrasi, dan eksitasi.

Pilihan dari rangkaian pengkondisi sinyal ini bergantung kepada karakteristik sensor yang akan digunakan dalam sistem DAQ.



Gambar 5. Fungsi-fungsi dari pengkondisi sinyal (signal conditioner). (Sumber: www.quora.com)

c. Perangkat keras akuisisi data

Perangkat keras akuisisi data merupakan perangkat keras yang dihubungkan diantara sensor dan komputer. Perangkat keras ini dihubungkan kepada komputer menggunakan sambungan USB atau melalui sambungan khusus PCI yang ditemukan pada *motherboard*.

Perangkat keras akuisisi data berlaku untuk memasukan sinyal dari sensor kemudian mengubahnya menjadi sinyal digital yang dapat dibaca oleh komputer. Ini merupakan fungsi dari perangkat keras DAQ.

d. Pengubah analog-ke-digital

Komponen ini berfungsi mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital (**Gambar 6a**). Komponen ini berada pada inti (*core*) dari sistem akuisisi data, berupa *chip* yang berfungsi untuk mengambil data dari lingkungan dan mengubahnya menjadi tingkat-tingkat yang terpisah yang dapat diterjemahkan oleh prosesor.

dengan perubahan terkecil yang dapat dideteksi yang dapat ditemukan dalam sinyal yang terukur.

Semakin tinggi jumlah bit dari pengubah analog ke digital, semakin besar jumlah tingkat diskrit yang dapat digunakan untuk menyatakan sebuah sinyal analog, dan semakin besar pula resolusi dari pengubah analog ke digital.

Resolusi pengubah analog ke digital dapat dibandingkan dengan tanda-tanda yang ditemukan pada batang pengukuran. Dengan menggunakan batang pengukuran metrik, sebuah batang pengukuran yang memiliki tanda milimeter memiliki resolusi yang lebih besar daripada yang bertanda sentimeter.

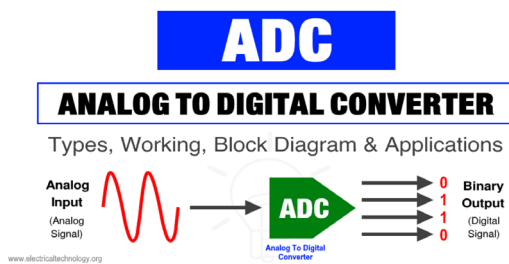
Sebagai contoh, pada sistem pengukuran di Amerika Serikat, sebuah batang *yard* yang memiliki ukuran inci spesifik akan memperlihatkan resolusi yang lebih besar daripada yang hanya dipecah oleh *feet* individual. Kebutuhan milimeter atau sentimeter bergantung kepada hal yang diukur. Prinsip yang sama juga berlaku pada resolusi pengubah analog ke digital: semakin tinggi resolusinya, semakin detail data yang dapat diperoleh.

e. Pengubah digital-ke-analog

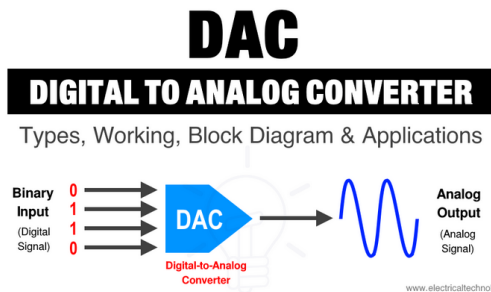
Fungsi komponen ini adalah menyediakan dukungan untuk proses masukan sinyal biner (*binary*) dan keluaran berupa sinyal analog (**Gambar 6b**).

Jenis-Jenis Sistem Akuisisi Data

Sistem akuisisi data memiliki beragam bentuk dan terus berkembang seiring kemajuan teknologi komputer, pengukuran, serta sistem kendali. Namun, secara mendasar, struktur yang diterapkan secara ekstensif dalam sistem alat diagnosis meliputi sistem akuisisi data mikrokomputer dan akuisisi data terdistribusi.



Gambar 6a. Ilustrasi analog-to-digital converter. (Sumber: www.electricaltechnology.org).



Gambar 6b. Ilustrasi digital-to-analog converter. (Sumber: www.electricaltechnology.org).

Sistem akuisisi data mikrokomputer

Sistem akuisisi data berbasis mikrokomputer merupakan salah satu jenis sistem yang paling umum digunakan karena strukturnya relatif sederhana dan efisien. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama, seperti sensor,

penguat sinyal, pengubah analog ke digital (A/D), hingga komputer dan perangkat lunak pendukung (**Gambar 7**). Dalam alur kerjanya, sinyal dari sebuah sistem akuisisi data mikrokomputer, sampel masukan dan amplifier-penahan membentuk pengambilan sampel secara bersamaan dari sinyal masukan dan membentuk sistem akuisisi data multikanal. Pengubah A/D membentuk pengambilan sampel secara simultan dari sinyal masukan, dan pengubahannya menjadi sinyal digital. Dalam sistem akuisisi data mikrokomputer, komputer merupakan inti dari sistem keseluruhan. Kendali pengambilan sampel, pengolahan sinyal, analisis dan perhitungan sinyal dikerjakan oleh komputer.

Pemilihan jenis komputer dalam sistem akuisisi data sangat bergantung pada kebutuhan pengukuran. Pilihannya pun beragam, mulai dari mikroprosesor sederhana, mikrokomputer chip tunggal (*single chip microcomputer/SCM*), hingga komputer industri berbasis Intel (*industrial personal computer/IPC*) yang dirancang untuk bekerja di lingkungan yang lebih berat.



Gambar 7. Sistem akuisisi data mikrokomputer portabel. (Sumber: metromatics.com.au).

Struktur dari sistem DAQ mikrokomputer bersifat sederhana dan murah. IPC dapat digunakan dalam lingkungan yang keras. Disamping itu, modul masukan/keluaran dan perangkat lunak dari mikrokomputer bersifat lengkap dan mudah untuk dibentuk menjadi sebuah sistem.

Karena pengaruh aplikasi dan perawatan yang sesuai, sistem DAQ mikrokomputer telah digunakan dalam sistem diagnosis kerusakan sedang.

Sistem akuisisi data terdistribusi

Sistem akuisisi data terdistribusi merupakan produk dari teknologi jaringan komputer. Sistem tersebut terdiri dari beberapa “stasiun akuisisi data” dan sebuah stasiun master serta sambungan komunikasi (**Gambar 8**). Stasiun akuisisi data (juga mengacu kepada terminal akuisisi data) terletak dekat peralatan produksi, dan dapat secara terpisah memenuhi akuisisi data dan pra-pengolahan. Disamping itu, sistem tersebut dapat mengirimkan data kepada stasiun master dalam bentuk sinyal digital.

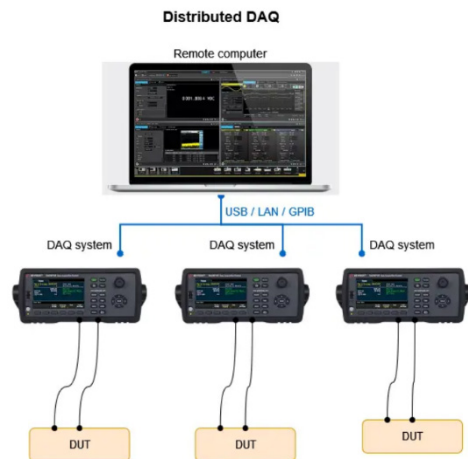
Stasiun akuisisi data secara umum dibentuk oleh alat akuisisi data SCM. Stasiun master memindahkan data dari setiap stasiun akuisisi data pada layar, mencetak data dalam laporan, atau menyimpan data pada cakram-data (*disk*) dalam format dokumen. Lebih lanjut, sistem tersebut dapat mengirim parameter kendali dari sistem kepada setiap stasiun untuk menyesuaikan status kerja dari setiap stasiun. Stasiun master merupakan komputer serba-guna (IPC) yang dapat dilengkapi dengan printer dan mesin penggambar. Komunikasi data biasanya menerapkan mode *master-slave* (pemimpin-pesuruh) dan stasiun master memutuskan stasiun mana untuk transfer data.

Sistem DAQ terdistribusi menggunakan beberapa stasiun akuisisi data dengan SCM sebagai inti. Dalam sistem tersebut, stasiun-stasiun bekerja secara “paralel”. Dengan demikian, sistem ini menyediakan kehandalan yang tinggi dan respon waktu-nyata yang efektif. Disamping itu, sistem ini menggantikan transmisi sinyal analog dengan transmisi sinyal digital, yang dapat secara efektif mengurangi interferensi (gangguan) dari mode

diferensial dan mode umum, yakni lingkungan kerja dengan interferensi elektromagnetik yang kuat.

Akuisisi data dan perangkat keras kendali

Sistem akuisisi data dan perangkat keras kendali tersedia dalam berbagai bentuk, dengan tingkat kemampuan yang berbeda-beda. Perbedaan ini mencakup jumlah kanal yang dapat digunakan, kecepatan pengambilan data, tingkat ketelitian (resolusi), akurasi, hingga biaya yang dibutuhkan.



Gambar 8. Sistem akuisisi data terdistribusi.

(Sumber: www.keysight.com).

a. Papan akuisisi data *plug-in*

Seperti adapter tampilan, modem, dan jenis papan ekspansi lainnya, papan akuisisi data *plug-in* dirancang untuk penambahan dalam slot papan pada *motherboard* komputer. Kebanyakan papan akuisisi data dirancang untuk PCI (antarmuka komponen tambahan / *Peripheral Component Interconnect*) atau bus ISA (arsitektur standar industri / *Industry Standard Architecture*).

Papan *plug-in* akuisisi data dan antarmuka telah dikembangkan untuk bus yang lain (EISA, IBM Micro Channel®, dan beragam bus Apple), tetapi hal ini tidak dianggap sebagai produk *mainstream* lagi. Sebagai sebuah kategori, papan *plug-in* menawarkan beragam fungsi uji, kecepatan tinggi, dan sensitivitas yang memadai untuk mengukur tingkat sinyal yang rendah, pada biaya yang relatif murah.

b. Sistem akuisisi data eksternal

Selain papan *plug-in*, sistem akuisisi data juga tersedia dalam bentuk perangkat eksternal. Berbeda dengan yang dipasang di dalam komputer, sistem ini berdiri sendiri dan terhubung ke komputer melalui antarmuka tertentu. Sebagai “kotak” terpisah, sistem eksternal umumnya menawarkan kapasitas yang lebih besar, seperti jumlah kanal yang lebih banyak, kondisi sinyal yang lebih stabil, serta fleksibilitas penggunaan untuk berbagai kebutuhan. Karena itu, sistem ini banyak digunakan dalam aplikasi industri yang membutuhkan pengukuran lebih kompleks.

Saat ini, sistem DAQ eksternal sering memiliki bentuk uji mandiri dan solusi pengukuran yang diorientasikan kepada aplikasi industri. Aplikasi yang digunakan, memerlukan lebih dari sebuah sistem berdasarkan kepada sebuah komputer personal dengan papan *plug-in* yang dapat disediakan. Beberapa keunggulannya antara lain

- Sensitivitas yang tinggi terhadap sinyal tegangan Tingkat rendah (sekitar 1mV atau lebih rendah).
- Aplikasi yang melibatkan beberapa jenis sensor, hitungan kanal yang tinggi, atau kebutuhan operasi mandiri.
- Aplikasi yang memerlukan kendali proses secara *real-time*.

Meskipun bekerja secara mandiri, sistem ini tetap terhubung dengan komputer untuk pengolahan dan penyimpanan data. Dalam praktiknya, perangkat-perangkat ini sering disusun dalam satu rak sistem standar, sehingga mudah diintegrasikan dalam lingkungan industri, meliputi VME, VXI, MXI, PCI, dan PXI.

c. Sistem akuisisi data hibrid

Sistem hibrid merupakan pengembangan terbaru dalam sistem DAQ eksternal. Sebuah sistem hibrid pada umumnya menggabungkan antarmuka pengguna dengan beberapa fungsi akuisisi data standar dan kemampuan ekspansi dalam sebuah paket yang terpadu serupa instrumen. Fungsi tipikal meliputi pengukuran tegangan dan arus AC dan DC, pengukuran suhu dan frekuensi, penghitung kejadian, pengukuran waktu, pencetusan, dan kendali proses.

Pertimbangan Lain

Pengukuran, modul, dan metode sistem akuisisi data

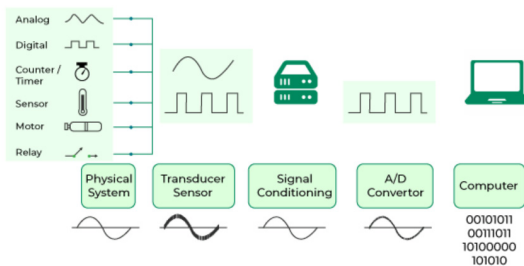
a. Pengukuran sistem akuisisi data

Sistem akuisisi data memiliki kemampuan untuk mengukur berbagai jenis parameter struktur yang berbeda. Pada dasarnya, semua pengukuran ini berawal dari sinyal analog yang kemudian diubah menjadi sinyal digital agar dapat diproses oleh komputer (Gambar 9). Beragam parameter dapat diukur melalui sistem ini, seperti arus, tegangan, regangan, frekuensi, tekanan, temperatur, jarak, getaran, sudut, hingga berat.

Modul atau sensor yang terpisah dapat digunakan untuk pengukuran parameter spesifik yang berbeda walaupun beberapa alat akuisisi data serba-guna multi-masukan dapat menjadi

antarmuka terhadap beragam sensor ini. Jenis sensor yang digunakan dalam pengukuran akuisisi data biasanya memberikan nilai tegangan secara khusus karena pembacaan ini dapat diubah kedalam pengukuran suhu, perpindahan, atau hal lainnya yang sedang dipelajari.

Sering sebuah modul akuisisi data dan sensor menggunakan sebuah *transducer* dengan suatu jenis tertentu untuk membuat sebuah parameter pengukuran dasar seperti tegangan. Pengukuran ini dikenal sebagai pengukuran pokok (*primary measurement*). Parameter tersebut kemudian diubah kedalam parameter tertentu yang diperlukan. Dengan cara ini, modul akuisisi data memiliki kemampuan mengukur hampir setiap parameter yang diperlukan.



Gambar 9 Pengukuran dalam siste akuisisi data.
(Sumber: www.geeksforgeeks.org).

b. Kartu dan modul akuisisi data

Banyak sistem akuisisi data memiliki modul rak yang diisi dengan kartu untuk menyediakan fungsi pengukuran yang berbeda. Kartu ini harus sesuai dengan sistem keseluruhan yang digunakan dalam antarmuka elektrik dan mekanik. Sistem rak tersebut sering terstandarisasi dan modul yang digunakan sering tersedia dari banyak produsen, dengan demikian membuat pemilihannya lebih mudah.

c. Perangkat lunak akuisisi data

Perangkat lunak akuisisi data kini telah banyak tersedia untuk mendukung proses pengambilan, penyimpanan, dan pengolahan data secara sistematis. Perangkat lunak ini dapat dikembangkan dengan berbagai bahasa pemrograman, atau digunakan dalam bentuk paket siap pakai untuk kebutuhan aplikasi tertentu. Keunggulan utama dari perangkat lunak siap pakai adalah kemudahan implementasinya. Sistem biasanya sudah dikembangkan dan diuji sebelumnya, sehingga pengguna tidak perlu membangun dari awal. Dengan demikian, sebagian besar potensi kendala teknis sudah lebih dulu diantisipasi. Meskipun tetap memerlukan biaya perawatan, penggunaan perangkat lunak yang sudah tersedia umumnya lebih efisien dibandingkan mengembangkan dan memelihara sistem sendiri dari awal. Oleh karena itu, banyak perusahaan memilih menggunakan perangkat lunak akuisisi data yang sudah ada, lalu menyesuaikannya dengan kebutuhan pengujian atau pemantauan yang lebih spesifik.

d. Sinyal *transducer* akuisisi data

Transduser merupakan alat elektronik yang mengubah energi dari sebuah sumber tertentu menjadi sebuah sinyal elektronik. Dengan bergantung kepada variabel spesifik yang mana sistem DAQ dirancang untuk mengukur, sinyal keluaran sifatnya beragam. Sistem akuisisi data biasanya didiskusikan dalam istilah sinyal keluaran yang dibuat. Sinyal keluaran yang dibuat tersebut bisa bersifat digital atau analog.

e. Metode akuisisi data yang digunakan oleh sistem DAQ

Dalam praktiknya, terdapat beberapa metode akuisisi data yang digunakan sesuai dengan kebutuhan, terutama dalam konteks investigasi digital dan pengolahan data.

a) Berkas cakram-ke-citra aliran-bit (*bit-stream disk-to-image file*)

Metode ini dilakukan dengan membuat salinan lengkap dari sebuah perangkat penyimpanan ke dalam bentuk file citra. Teknik ini digunakan oleh penyelidik forensik, karena fleksibel dan memungkinkan pembuatan satu atau lebih salinan berkas dari *drive* asli, termasuk menyalin setiap hal dari *drive* asli, yang meliputi sektor atau kluster yang saling terhubung, dan mengambil berkas yang dihapus. Beberapa alat populer yang digunakan untuk pembacaan berkas cakram-menjadi-citra meliputi EnCase, X-Ways, FTK, Ilook Investigator, dan lainnya.

b) Berkas cakram-ke-cakram aliran-bit (*bit-stream disk-to-disk file*)

Terkadang, saat pembuatan berkas cakram-ke-citra, aliran-bit tidak memungkinkan disebabkan kendala perangkat atau kesalahan sistem. Metode cakram-ke-cakram aliran-bit digunakan sebagai gantinya. Metode ini sering dimanfaatkan, terutama ketika mengambil data dari perangkat lama yang sulit diakses. Dengan cara ini, seluruh isi media dapat disalin ke perangkat lain untuk kemudian dianalisis lebih lanjut. Proses penyalinan biasanya menggunakan perangkat lunak khusus seperti *EnCase*, *Safe Back*, atau *Norton Ghost*. Alat-alat tersebut mampu merubah geometri cakram target untuk pencocokan data yang disalin dari *drive* terduga asli.

c) Akuisisi logis (*logical acquisition*)

Berbeda dengan metode sebelumnya, metode ini digunakan untuk mengumpulkan berkas yang diperlukan untuk penyelidikan kasus individual. Contohnya, pengumpulan berkas Outlook .ost atau .pst dalam penyelidikan email, dan pengumpulan rekaman spesifik dari server RAID yang besar akan digunakan melalui prosedur ini.

d) Akuisisi jarang (*sparse acquisition*)

Metode ini serupa dengan akuisisi logis. Dengan metode ini, penyelidik mampu mengumpulkan fragmen dari data yang belum teralokasi. Metode ini banyak digunakan saat tidak diperlukan pemeriksaan *drive* secara keseluruhan.

f. Pertimbangan saat pembentukan sistem akuisisi data

Dalam merancang sistem akuisisi data, ada beberapa hal penting yang perlu diperhatikan agar sistem dapat bekerja optimal dalam jangka panjang. Pertama, waktu operasi tanpa gangguan, durasi ini akan memengaruhi pemilihan perangkat keras, sistem operasi, hingga strategi pengelolaan data. Dalam praktiknya, sistem yang bekerja dalam jangka panjang berisiko mengalami penumpukan data, kesalahan pemrosesan, atau penurunan kinerja komponen. Media penyimpanan dan baterai, misalnya, dapat mengalami penurunan kualitas seiring waktu, bahkan berpotensi rusak setelah bertahun-tahun penggunaan. Untuk itu, faktor pertama dalam mempertimbangkan sistem DAQ adalah lamanya untuk sistem beroperasi.

Kedua, ketersediaan sumber daya menjadi faktor penting. Sistem DAQ harus memiliki sumber daya handal atau didukung oleh pasokan listrik yang stabil, atau dilengkapi dengan sumber daya cadangan seperti generator, baterai, atau panel surya. Ketiga, dari sisi transmisi data perlu ditentukan apakah data akan disimpan secara lokal atau dikirim ke lokasi lain.

Hal ini berpengaruh pada kapasitas penyimpanan serta sistem transmisi data yang digunakan. Keempat, akses terhadap sistem juga perlu dirancang dengan baik, terutama jika sistem harus dapat dipantau atau dikendalikan dari jarak jauh.

Disamping itu, dibutuhkan akses kepada sistem untuk mengubah paramater akuisisi sistem tersebut.

Tidak kalah penting pembentukan sistem akuisisi data perlu diputuskan apakah sistem hanya akan mengumpulkan data mentah atau juga melakukan pengolahan data secara langsung. Sebuah sistem langkah-langsung (*straightforward*) akan mencukupi jika yang diperlukan adalah mengumpulkan data dari proses. Tetapi, sebuah CPU akan diperlukan dalam sistem jika dibutuhkan pengerjaan fungsi khusus, seperti penyaringan (*filtering / windowing*), dan operasi lainnya.

Terakhir, jumlah dan karakteristik kanal masukan juga harus diperhatikan, termasuk kecepatan pengambilan data, jenis sinyal, sinkronisasi, serta rentang pengukuran. Dengan mempertimbangkan semua aspek ini, sistem akuisisi data dapat dirancang sesuai kebutuhan dan bekerja secara efektif.

Masa Depan Sistem Akuisisi Data

Akuisisi data merupakan suatu sistem yang diperlukan dalam sistem instrumentasi di berbagai kegiatan teknik untuk mengambil, menampilkan, maupun mengolah data dari sensor yang terdapat pada komponen sistem instrumentasi.

Ke depan, perkembangan teknologi seperti internet (IoT) dan penyimpanan berbasis *cloud* akan membuat sistem ini semakin terhubung dan mampu bekerja secara *real-time*. Di saat yang sama, kemampuan mengolah data dalam jumlah besar akan terus meningkat, sehingga proses pemantauan menjadi lebih efisien dan minim kesalahan manusia.

Sistem akuisisi data bisa membantu dalam meningkatkan efisiensi. Data yang tersedia dapat digunakan untuk mengoptimalkan proses pengukuran dan pemantauan, serta mengurangi waktu dan biaya yang dibutuhkan.

Namun, perkembangan sistem akuisisi data juga membawa beberapa tantangan. Salah satu tantangan utama adalah privasi dan keamanan data. Pengelolaan harus memastikan bahwa data yang dikumpulkan dan analisis tidak bocor atau disalahgunakan.

Dengan perkembangan teknologi yang sangat pesat, sistem akuisisi data pada masa depan akan semakin canggih dan lebih mudah dalam pengumpulan, analisis, dan pengambilan keputusan berdasarkan data.

Macet: Warisan Kegagalan Perencanaan Jalan Perkotaan

Kemacetan bukan sekadar soal jumlah kendaraan, melainkan cermin kegagalan merancang jalan perkotaan

Oleh: Syafiyah Veronika, S.T.

Balai Sistem Jaringan dan Lingkungan Jalan



Sumber: pexels.com/Pamanjoe

Macet yang Dianggap Takdir

Setiap pagi, hampir semua aktivitas masyarakat dimulai dengan ironi yang sama. Ribuan kendaraan bergerak serempak, tetapi nyaris tidak berpindah tempat.

Banyak orang berangkat lebih pagi untuk menghindari macet, tetapi ternyata yang lain juga juga berpikir hal yang sama. Akhirnya, kemacetan dianggap rutinitas harian selayaknya takdir yang harus dilalui.

Kemacetan sering dipandang sebagai konsekuensi alami dari urbanisasi. Banyak faktor penyebab kemacetan, seperti kecelakaan lalu lintas atau bencana. Namun peningkatan jumlah penduduk yang tidak dibarengi dengan penyesuaian tata guna lahan dan jaringan jalan selalu menjadi alasan klasik. Yang menjadi pertanyaan: *benarkah kemacetan semata-mata karena terlalu banyak kendaraan, atau ada yang keliru sejak tahap perencanaan jaringan jalan?*

Pada kenyataannya, kemacetan tidak bisa kita anggap sebagai takdir. Kemacetan merupakan hasil pilihan, pilihan bagaimana kita merancang kota, pilihan bagaimana kita membagi fungsi jalan dan pilihan bagaimana kita menentukan prioritas ruang publik.

Salah Kaprah Memahami Penyebab Kemacetan

Layaknya sebuah hal yang sudah dinormalisasi, ketika macet terjadi, penyebab yang paling sering dijadikan kambing hitam adalah volume kendaraan. Statistik pertumbuhan penggunaan transportasi pribadi seperti mobil dan motor kerap dijadikan dalih tunggal. Padahal faktanya, banyak kota dengan jumlah kendaraan tinggi tetapi tetap mampu menjaga arus lalu lintas yang lancar dan tidak terjebak dalam kemacetan kronis.

Jepang, Singapura, Uni Emirat Arab dan Korea Selatan adalah contoh negara dengan volume kendaraan tinggi tapi minim mengalami kemacetan. Kondisi ini berkat investasi besar pada transportasi publik massal yang efisien, infrastruktur jalan yang terintegrasi dan sistem *grid* kota.

Jalan bukan sekedar ruang beraspal tempat kendaraan melintas. Jalan merupakan bagian dari sebuah sistem jaringan yang harus selaras. Ketika sistem ini gagal, kemacetan bukan lagi

anomali, melainkan konsekuensi logis yang tidak terhindarkan. Hal ini membuat kita harus mengulik kembali konsep **sistem jaringan jalan** sebagai faktor utama dalam memahami masalah kemacetan.

Apa Itu Sistem Jaringan Jalan dan Mengapa Krusial?

Menurut Undang-undang Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2022 tentang Perubahan Kedua Atas Undang-undang Nomor 38 Tahun 2004 Tentang Jalan, Sistem Jaringan Jalan adalah satu kesatuan ruang jalan yang saling menghubungkan dan mengikat pusat kegiatan/pusat pertumbuhan dan simpul transportasi wilayah yang berada dalam pengaruh pelayanannya dalam satu hubungan hierarki.

Dalam perencanaan transportasi, sistem jaringan jalan memiliki hierarki yang jelas. Berdasarkan Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Republik Indonesia Nomor 03/PRT/M/2024 tentang Pedoman Penetapan Fungsi Jalan dan Status Jalan diperjelas bahwa terdapat empat fungsi jalan yakni arteri, kolektor, lokal dan lingkungan, yang masing-masing memiliki peran dan ketentuannya masing-masing.

Misalnya, jalan arteri dirancang untuk pergerakan jarak jauh dengan kecepatan yang relatif tinggi dan hambatan yang minimal. Jalan kolektor berfungsi mengumpulkan dan membagi arus lalu lintas dari dan menuju jalan lokal. Jalan lokal dan lingkungan sendiri berfungsi untuk melayani akses langsung ke permukiman dan aktivitas harian. Permasalahan mulai muncul ketika fungsi hierarki jalan tersebut tidak dipenuhi.

Sejatinya sistem jaringan jalan dapat kita analogikan seperti sistem peredaran darah manusia. Jalan arteri ibarat pembuluh darah besar, jalan kolektor sebagai pembuluh darah sedang dan jalan lokal sebagai kapiler.

Jika pembuluh besar dipenuhi aktivitas yang seharusnya terjadi di kapiler, maka aliran darah akan tersumbat. Penyumbatan pada salah satu pembuluh akan berdampak pada seluruh sistem organ. Begitu pula dengan sistem jaringan jalan, ketika fungsi jalan tidak sesuai dengan perannya, kemacetan menjadi sulit dihindari.

Analogi ini menunjukkan bahwa memperlebar satu ruas jalan tidak serta-merta menyelesaikan masalah kemacetan. Sama seperti memperbesar satu pembuluh darah tidak akan memperbaiki sistem peredaran secara keseluruhan. Yang dibutuhkan adalah jaringan yang sehat, berhirarki jelas dan berfungsi sesuai perannya.

Akar Masalah: Ketika Hirarki Jalan Tidak Berfungsi

Sayangnya, kondisi yang terjadi mayoritas di perkotaan. Kelas jalan sering kali tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Alih-alih menjadi alur pergerakan utama yang efisien, seringkali jalan arteri berubah menjadi ruang serba guna seperti tempat parkir liar, lokasi pedagang kaki lima, titik naik-turun penumpang, sampai akses langsung ke ratusan bangunan.

Aktivitas tersebut mungkin tampak sepele. Namun jika terjadi secara bersamaan, dampaknya dapat menimbulkan hambatan samping yang tinggi dan berujung meningkatkan konflik lalu lintas. Ironisnya, ketika jalan arteri tidak lagi mampu menampung arus kendaraan dengan baik, beban lalu lintas justru dialihkan ke jalan-jalan lokal melalui jalur alternatif sebagai dalih “jalan tikus”.

Simpul Masalah Bernama Persimpangan



Sumber: [pexels.com/Dapur Melodi](https://pexels.com/Dapur-Melodi)

Persimpangan pun diibaratkan layaknya dua sisi mata pisau. Di satu sisi, dihadirkan sebagai pengatur lalu lintas agar mengurai kemacetan, tapi tidak jarang juga justru sebagai titik paling rentan macet. Masalah umum penyebab terjadinya kemacetan pada persimpangan ialah jarak antar simpang yang terlalu dekat, desain tidak seimbang dengan volume lalu lintas yang ada, serta terlalu banyak akses langsung menuju jalan utama. Akibatnya mudah ditebak, antrian yang mengular, tundaan meningkat, dan kemacetan yang menjalar ke ruas-ruas lain.

Masalah sistem jaringan jalan juga tidak dapat dipisahkan dari persoalan tata guna lahan. Pembangunan yang tidak sesuai dengan tata guna

lahan seperti pusat perbelanjaan, apartemen, dan sekolah yang dibangun pada koridor arteri seperti yang terjadi di Bekasi, serta minimnya integrasi antara perencanaan jalan dan perencanaan kota juga kerap mengakibatkan bangkitan dan tarikan lalu lintas tidak terkendali sehingga jalan dipaksa menanggung fungsi yang bukan perannya.

Apalagi jika perencanaan jalan dan perencanaan tata ruang yang sering berjalan sendiri-sendiri. Jalan dibangun tanpa mempertimbangkan lahan, sementara izin bangunan diterbitkan tanpa memperhitungkan dampaknya terhadap jaringan jalan. Kemacetan pun menjadi harga yang harus dibayar oleh publik.

Tata Guna Lahan yang Menghancurkan Jaringan Jalan



Sumber: cms.disway.id/ Dimas Rafi

Ketergantungan Mobil dan Jalan yang Tak Pernah Cukup

Selama puluhan tahun, banyak kota mengadopsi paradigma pembangunan yang berorientasi pada kendaraan pribadi. Jalan diperlebar, *flyover* dibangun, dan ruang kota dikorbankan demi memperlancar arus mobil. Namun hasilnya kerap mengecewakan.

Fenomena ***induced demand*** menunjukkan bahwa penambahan kapasitas jalan justru mendorong peningkatan penggunaan kendaraan. Jalan yang awalnya lancar kembali macet dalam waktu singkat. Kota terjebak dalam lingkaran setan pembangunan jalan tanpa akhir.

Di saat yang sama, pejalan kaki, pesepeda, dan pengguna angkutan umum sering terpinggirkan. Jalan kehilangan fungsi sosialnya sebagai ruang publik yang aman dan inklusif. Dalam konteks ini, kemacetan sebenarnya menjadi sinyal kegagalan pendekatan yang terlalu berfokus pada kendaraan pribadi.

Pengamat transportasi sekaligus Ketua Bidang Advokasi dan Kemasyarakatan Transportasi Indonesia (MTI) periode 2022-2025, Djoko Setijowarno pernah mengatakan bahwa ;

“Di Jakarta yang bikin macet itu banyaknya pengguna motor, keluar dari tempat manapun, hunian manapun pasti lebih memilih menggunakan motor. Padahal transportasi umum sudah cukup banyak. Pengguna motor itu merusak tatanan untuk transportasi umum”

Dalam hal ini Pak Djoko bermaksud untuk menjelaskan bahwa, peralihan moda transportasi pribadi ke transportasi umum dapat menjadi salah satu solusi menekan angka terjadinya kemacetan.

Belajar dari Kota yang Berhasil Melawan Macet

Beberapa kota dunia menunjukkan bahwa kemacetan bukan nasib yang tak terelakkan. Kuncinya bukan sekedar menambah jalan, melainkan membenahi sistem jaringan.

Kota-kota tersebut memperjelas fungsi tiap jenis jalan, membatasi akses langsung ke jalan arteri, memperkuat jaringan kolektor, dan mengintegrasikan perencanaan jalan dengan tata guna lahan. Selain itu, angkutan umum dan moda *non-motorized* diprioritaskan, bukan sekedar menjadi pelengkap. Hasilnya bukan hanya lalu lintas yang lebih lancar, tetapi kota yang lebih manusiawi.

Survei *World Economic Forum* (WEF), sejumlah negara menempati posisi teratas dalam hal kualitas jalan. Penilaian ini diukur lewat *Quality of Road Infrastructure* (QRI) dengan skala 1 sampai 7, angka tertinggi menunjukkan jalan yang efisien, nyaman, dan memiliki sistem mobilitas tinggi. Singapura menduduki peringkat pertama dengan skor QRI 6,45.

Keberhasilan ini didukung oleh sistem jalan yang efisien, manajemen lalu lintas berbasis teknologi, serta kebijakan kepemilikan kendaraan pribadi melalui sistem *Electronic Road Pricing* (ERP) dan kuota kendaraan. Infrastruktur jalan di Singapura dirawat dengan baik, bersih, dan terintegrasi dengan transportasi publik, mencerminkan disiplin serta efisiensi tinggi dalam tata kota.



Sumber: pexels.com/Willian Justen

Belanda juga termasuk negara yang memperoleh skor QRI 6,18 yang memiliki peraturan yang hampir serupa dengan Indonesia yaitu memiliki sistem jalan bertingkat, mulai dari jalan arteri hingga jalan akses yang diatur berdasarkan volume lalu lintas. Namun penerapan yang disiplin dan teratur menunjukkan keberhasilan pada keseimbangan antara pembangunan dan kelestarian lingkungan.

Macet adalah Pilihan Kebijakan

Pada akhirnya, kemacetan bukanlah fenomena alam. Hal ini adalah produk kebijakan, hasil dari keputusan yang diambil atau diabaikan selama bertahun-tahun.

Selama jalan diperlakukan sebagai ruang bebas tanpa fungsi yang jelas, selama tata ruang dan transportasi berjalan terpisah, dan selama solusi instan lebih dipilih daripada pembenahan sistemik, kemacetan akan terus berulang.

Kemacetan tidak pernah netral, selalu berpihak pada sistem yang dibiarkan berjalan apa adanya, dan merugikan masyarakat yang harus menanggung dampaknya setiap hari.

Pertanyaannya bukan lagi *mengapa kota kita macet*, melainkan **apakah kita berani mengakui bahwa kemacetan adalah cermin dari sistem jaringan jalan yang salah arah dan berani memperbaikinya akar masalahnya?**





Apapun yang dilakukan
oleh seseorang itu,

“ Hendaknya dapat bermanfaat bagi dirinya sendiri, bermanfaat bagi bangsanya, dan bermanfaat untuk manusia di dunia pada umumnya

- Ki Hajar Dewantara -

COLLOIDAL NANO SILICA UNTUK MENINGKATKAN KINERJA BETON

Oleh : N. Retno Setiati

Balai Geoteknik Terowongan dan Struktur

38

Beton memang dikenal kuat, tetapi di lingkungan tropis seperti Indonesia, kekuatannya bisa menurun lebih cepat akibat korosi dan kelembapan tinggi. Inilah tantangan besar dalam dunia konstruksi dan sekaligus alasan mengapa inovasi teknologi terus dikembangkan untuk membuat beton lebih tahan lama.

Mengenal Inovasi Nano untuk Beton yang Lebih Tahan Lama

Beton merupakan material utama untuk konstruksi bangunan, baik di darat maupun di lingkungan perairan. Kekuatan beton dan perancangan mutu beton sebenarnya bisa dirancang sesuai dengan kebutuhan konstruksi, mulai dari kekuatan sesuai rencana, nilai kekedapan tinggi, dan daya tahan terhadap beban maupun pengaruh lingkungan yang bersifat korosif.

Perkembangan teknologi beton bersifat dinamis, seperti di Indonesia tidak kalah dengan luar negeri. Pembuatan rancangan campuran beton sangat tergantung dari ketersediaan material lokal serta kondisi alam negara kita.

Indonesia dengan iklim tropis dan kelembapan tinggi memiliki lingkungan dengan tingkat korosifitas tinggi.

Kondisi ini mempercepat penurunan kekuatan beton dan memperpendek umur bangunan. Dalam mengantisipasi permasalahan tersebut, perlu adanya terobosan teknologi yang dikembangkan untuk meningkatkan kualitas dan kinerja beton. Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah penerapan *colloidal nano silica* (CNSH). Teknologi ini bekerja dengan meningkatkan kepadatan dan kekuatan beton, sehingga tahan terhadap kerusakan akibat lingkungan.

Meski potensinya besar, penerapan teknologi *colloidal nano silica* belum umum digunakan di Indonesia, khususnya pada konstruksi jembatan yang masih tergolong terbatas terutama karena keterbatasan sumber daya dan dukungan teknologi, seperti belum adanya Lembaga advokasi menangani penerapan CNSH.

Colloidal nano silica merupakan suspensi cair yang mengandung *silicon dioxide* (SiO_2), air ion (*ionized water*), katalis penetrasi (*penetrating catalyst*), dan penghambat korosi (*corrosion inhibitor*).

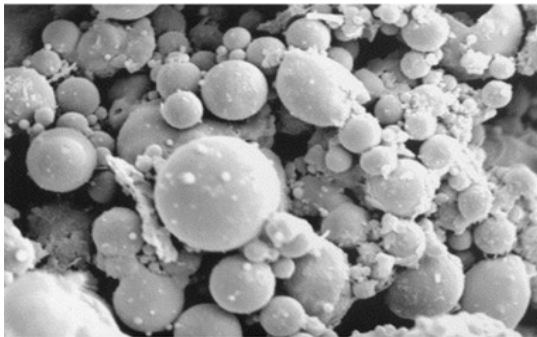
Ukuran molekulnya berkisar antara (1 – 100) nm. Kriteria bahan *colloidal nano silica* ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Sifat karakteristik *colloidal nano silica*

No.	Keterangan	Kriteria	Metode Uji
1	Kandungan CNSH	> 95%	Metode Penyerapan Atom Elektrotermal (<i>standard methods 3113B</i>)
2	Berat Jenis	1,11	Pengukuran volume, masa, kerapatan, viskositas. Cara uji berat jenis relatif, berat jenis dan kerapatan (cairan yang homogen (SNI 19-4956:1998)
3	Derajat Keasaman (pH)	12 ± 2	Standard Test Method for On-Line Measurement of pH (ASTM D6569-23)
4	Titik Didih	212°F/100°C	Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using Boiling Water (ASTM D3625-24)

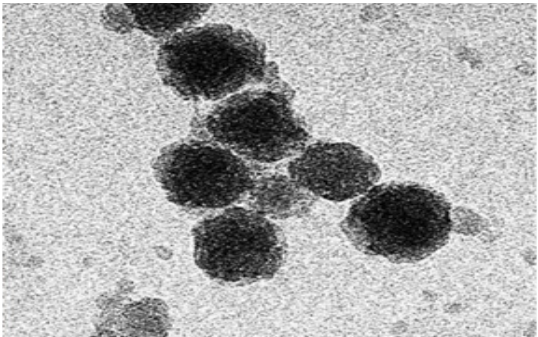
Sumber : CNSA:2008

Ketika partikel kecil tersebut ditambahkan dalam campuran beton segar, partikel ini dapat mengisi celah antara partikel yang lebih besar sehingga menghasilkan beton yang lebih padat dan kuat.



Gambar 1(a). Ukuran partikel fly ash

Selain itu, partikel ini memiliki reaktivitas yang lebih tinggi dengan bahan semen dalam beton, menghasilkan hidrasi yang lebih cepat dan efisien.



Gambar 1(b). Ukuran partikel CNSH

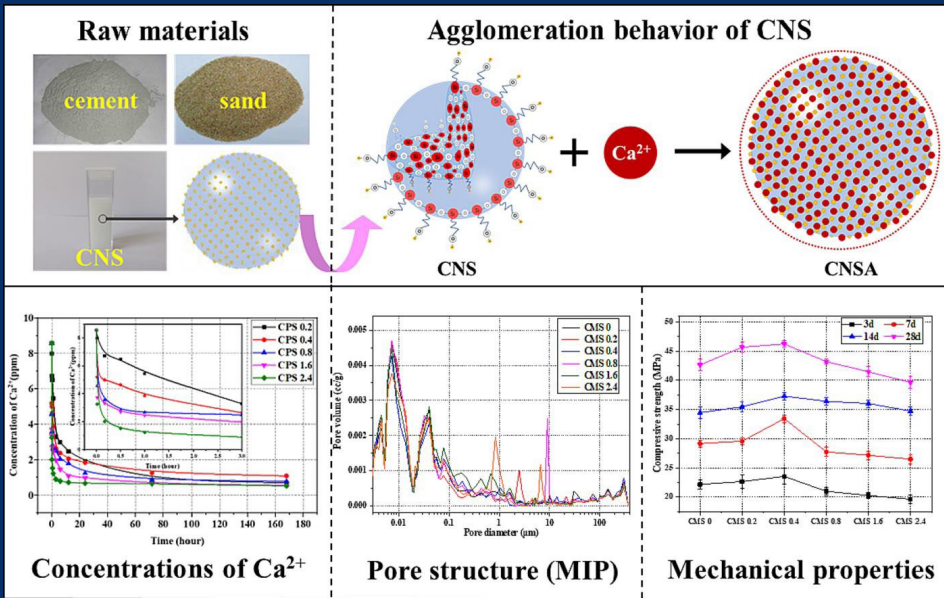
Gambar 1. Perbandingan ukuran partikel fly ash dan CNSH

Ukuran partikel CNSH lebih kecil dibandingkan dengan bahan tambah lain (seperti *fly ash*). Seperti pada Gambar 1, ukuran terkecil *fly ash* adalah 10 mikron meter, sedangkan CNSH adalah 100 nano meter (100 kali lebih kecil dari pada partikel *fly ash*). Tidak hanya sebagai bahan

campuran, CNSH memiliki fungsi sebagai bahan pelindung (*coating*) pada beton eksisting dan bahan tambah pada beton segar. Ukuran partikel dan luas permukaan merupakan faktor penting yang perlu dipertimbangkan ketika menggunakan *colloidal nano silica* dalam beton.

Ukuran partikel yang lebih kecil dan luas permukaan yang lebih tinggi dapat menghasilkan beton yang lebih kuat, tahan lama, dan dapat dikerjakan. Kemampuannya juga dapat menembus pori-pori beton dengan optimal sehingga dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam menambah efisiensi pepadatan, membentuk ikatan, dan meningkatkan kekuatan beton.

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan Rollins A etc. (2016), *colloidal nano silica* yang dicampur akan bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam beton membentuk gel kalsium-silikat-hidrat (C – S – H).

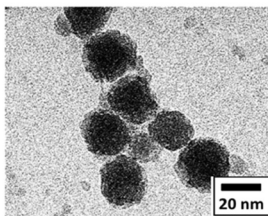


Gambar 2. Reaksi CNSH dalam beton (Yang Tao etc, 2023)

Proses reaksi CNSH dalam beton memperlihatkan gel kalsium-silikat-hidrat (C-S-H) yang terbentuk berfungsi meningkatkan kedekatan beton

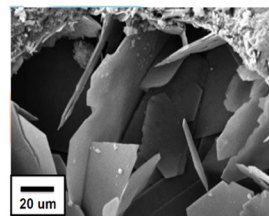
sehingga durabilitas semakin baik. Reaksi terbentuknya kalsium-silikat-hidrat ditunjukkan dalam Gambar 3.

Colloidal Silica (CS)



+

Calcium Hydroxide (CH)



Gambar 3. Reaksi terbentuknya C-S-H

Dalam proses pembentukan kalsium-silikat-hidrat (C-S-H), *colloidal nano silica* berperan penting dalam meningkatkan kualitas beton. Menurut Yang Tao dkk. (2023), material ini mampu mempercepat proses hidrasi dan reaksi pozolanik, sehingga beton lebih cepat mencapai kekuatan optimal. Selain itu, penggunaannya juga terbukti dapat meningkatkan kekuatan beton bertulang, menjaga kelembapan permukaan, serta mengurangi risiko retak atau penyusutan.

Tak hanya itu, beton menjadi lebih keras, tahan terhadap gesekan (abrasi), dan lebih terlindungi dari korosi pada tulangnya. Menariknya lagi, material ini bersifat ramah lingkungan karena tidak beracun. Secara keseluruhan, penggunaan *colloidal nano silica* memberikan peningkatan kinerja beton yang signifikan, baik dari sisi kekuatan maupun ketahanannya dalam jangka panjang.

Di Indonesia sendiri, teknologi ini sudah mulai diterapkan, misalnya pada proyek dermaga dan Jembatan Suramadu. Hal ini menunjukkan bahwa inovasi berbasis nano memiliki potensi besar untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang lebih tahan lama dan berkelanjutan di masa depan.



Gambar 4. Aplikasi *colloidal nano silica* pada konstruksi beton

Cara Penerapan *Colloidal Nano Silica* pada Beton

Colloidal nano silica dapat diaplikasikan sebagai lapis pelindung korosi beton eksisting dan sebagai bahan tambah pada campuran beton segar. Berdasarkan skh interim SKh.1.8.23, metodologi penerapan pekerjaan *colloidal nano silica* sebagai lapis pelindung terhadap korosi terdiri dari :

1) Pekerjaan persiapan permukaan beton

- Sebelum melaksanakan pekerjaan, Penyedia Jasa harus membersihkan seluruh permukaan beton dari kontaminasi cat, kotoran, debu atau lapisan sebelumnya menggunakan *high pressure water* dengan tekanan antara (2000 – 3000) psi.
- Apabila ditemukan retakan dengan lebar lebih kecil dari 0,10 mm tidak diperlukan perbaikan terlebih dahulu. Kecuali untuk lebar retak lebih besar dari 0,10 mm harus dilakukan perbaikan terlebih dahulu sesuai dengan Seksi 8.1 dari Spesifikasi Umum.
- Kerusakan beton berupa *spalling* harus diperbaiki sesuai dengan Seksi 8.2 dari Spesifikasi Umum.

2) Aplikasi *colloidal nano silica* sebagai lapis pelindung pada permukaan beton

- Permukaan beton yang sudah dibersihkan harus dibasahi dengan air tawar 1 (satu) hari sebelum aplikasi *colloidal nano silica* agar beton berada dalam kondisi lembap (diukur dengan menggunakan alat *concrete moisture meter*). Aplikasi *colloidal nano silica* tidak diperbolehkan dilaksanakan pada saat angin kencang, akan turun hujan, dan permukaan beton yang telah disiapkan dalam keadaan kering.

- Aplikasi *colloidal nano silica* harus dilakukan dengan menggunakan alat *airless sprayer* dengan diameter selang 3/8 inci dan ukuran *nozzle* (0,017 – 0,019) inci dengan kekuatan tekanan (1500 – 2000) psi.

- Aplikasi untuk lapisan pelindung dilakukan dengan penyemprotan 1 liter bahan *colloidal nano silica* untuk minimum 2 (dua) lapis pada 3 m² luas permukaan beton.

- Tahapan aplikasi pelapisan *colloidal nano silica* dilakukan sesuai dengan ketentuan pabrik pembuat produk.

Untuk penerapan *colloidal nano silica* sebagai lapis pelindung, perlu dilakukan pengujian klorida pada kedalaman (5 – 10) mm, sebelum dan setelah pelapisan *colloidal nano silica* pada umur 28 hari. Hasil uji harus mempunyai nilai yang sama dan sampel uji diambil sebanyak tiga titik lokasi secara acak sesuai dengan ketentuan ASTM C1152-20 (*Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*).

Jika digunakan sebagai bahan tambahan pada beton segar, metode pelaksanaan pekerjaannya adalah sebagai berikut :

- Jumlah *colloidal nano silica* pada campuran beton segar sebanyak 2 liter per meter kubik beton (2 liter/m³).

- Proses pencampuran bahan *colloidal nano silica* dilakukan setelah truk *mixer* tiba di lokasi pekerjaan dengan waktu pencampuran selama minimum 2 (dua) menit.

- Benda uji beton segar yang diambil dari truk dilakukan sesuai dengan SNI 2458- 2008.

Dalam proses penerapan *colloidal nano silica*, baik sebagai lapisan pelindung maupun bahan tambahan beton segar, digunakan beberapa peralatan pendukung. Mulai dari peralatan kerja umum seperti *hand tools* atau *power tools*, hingga alat pembersih bertekanan tinggi (sekitar 3000 psi) untuk memastikan permukaan beton benar-benar bersih.

Proses aplikasi dilakukan menggunakan *airless sprayer* dengan spesifikasi tertentu (diameter selang 3/8", ukuran *nozzle* 0,017 – 0,019 inci, kekuatan tekanan 1500 - 2000 psi) agar material dapat tersebar merata dan meresap optimal. Selain itu, digunakan pula alat pengukur kelembapan beton (*concrete moisture meter*) untuk memastikan kondisi permukaan beton berada pada tingkat kelembapan yang sesuai sebelum pelapisan dilakukan.

Dampak Penerapan *Colloidal Nano Silica* pada Beton

Penggunaan CNSH sebagai lapis pelindung dapat mencegah struktur beton eksisting dari korosi. Pencegahan struktur beton eksisting terhadap korosi dilakukan dengan penyemprotan bahan CNSH sebanyak dua lapis. Salah satu contoh penerapannya dilakukan pada konstruksi dermaga Pelabuhan Gresik. Pelaksanaan pekerjaan dilakukan dalam dua tahap, yaitu persiapan permukaan beton yang akan dilapis dan penyemprotan bahan CNSH seperti ditunjukkan dalam Gambar 5(a) dan 5(b).



5(a) Pelaksanaan persiapan pekerjaan



5(b) Pelaksanaan persiapan pekerjaan

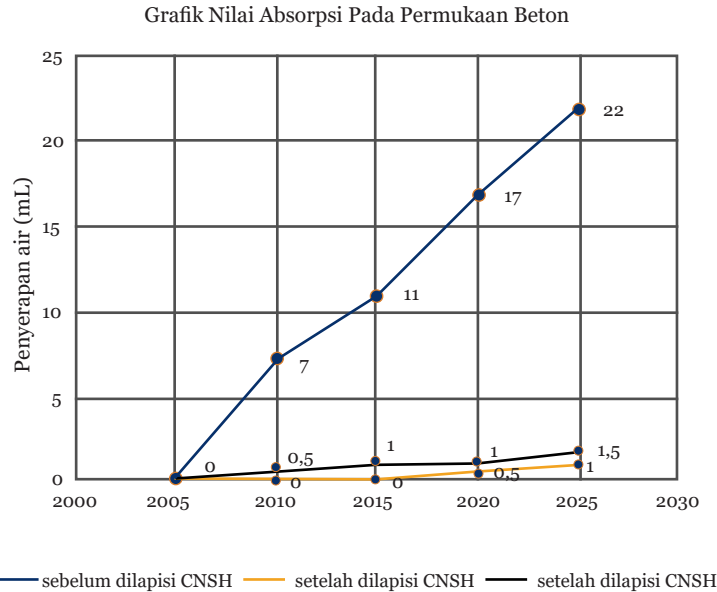
Gambar 5. Penerapan CNSH pada struktur dermaga

Berdasarkan Gambar 5, metode penerapan CNSH sebagai lapis pelindung mengacu pada bagian metodologi dari kajian ini. Setelah penerapan dilakukan, proses pengamatan dan monitoring kinerja dilakukan secara periodik. Beberapa parameter yang dapat digunakan dalam monitoring kinerja CNSH ini diantaranya:

1. Monitoring penyerapan air pada permukaan beton mengacu ke BS 1881-122 2011 (*Water Absorption Test For Concrete*)
2. Monitoring potential tulangan beton sesuai ASTM C876-22 (*Standard test method for corrosion potential of uncoated reinforcing steel in concrete*)

3. Monitoring kandungan klorida sesuai ASTM C1218/C1218M – 20 (*Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*)

Dalam studi kasus ini, parameter yang dipilih dalam analisis monitoring menggunakan metode penyerapan air pada permukaan beton (BS 1881-122 2011 (*Water Absorption Test For Concrete*)). Hasil monitoring penerapan teknologi *colloidal nano silica* pada struktur dermaga ditunjukkan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Grafik hubungan nilai absorpsi pada permukaan beton terhadap waktu

Gambar 6. menunjukkan nilai absorpsi (tingkat penyerapan air) pada permukaan beton struktur dermaga dalam kondisi sebelum dan sesudah dilapisi CNSH. Secara detail besarnya angka yang ditunjukkan dalam Gambar 6 tersebut dapat dijabarkan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Besaran hubungan tingkat penyerapan air pada permukaan beton untuk kondisi sebelum dan setelah dilapisi CNSH

No.	Waktu (Tahun)	Nilai absorpsi (<i>water absorption</i>) (mL)		
		Sebelum dilapisi CNSH	Setelah dilapisi CNSH (2012)	Setelah dilapisi CNSH (2016)
1	2005	0	0	0
2	2010	7	0	0,5
3	2015	11	0	1
4	2020	17	0,5	1
5	2025	22	1	1,5

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 2, pada tahun 2010, nilai absorpsi beton tanpa lapis CNSH sebesar 7 mL lebih besar dari beton dengan lapis CNSH (0 – 0,5 mL). Peningkatan nilai absorpsi di tahun 2015 untuk beton tanpa CNSH sebesar 11 m (terdapat peningkatan nilai absorpsi sebesar 57%). Sedangkan beton dengan lapis CNSH hanya terjadi peningkatan nilai absorpsi sebesar 0,5 mL.

Pada tahun 2025, peningkatan nilai absorpsi untuk beton tanpa CNSH menjadi 22 mL, sedangkan beton dengan CNSH hanya berkisar antara (1-1,5) mL. Peningkatan nilai absorpsi secara keseluruhan selama periode 20 tahun (2005 – 2025) antara beton tanpa CNSH 15 kali lebih besar dibandingkan dengan beton yang dilapisi CNSH.

Semakin tinggi nilai absorpsi maka beton akan semakin tidak kedap sehingga menyebabkan beton menjadi terkorosi. Beton dengan lapis CNSH memiliki tingkat kededapan yang sangat tinggi dibandingkan beton tanpa CNSH.

Selain sebagai lapis pelindung, CNSH dapat berfungsi sebagai bahan tambah beton. Fungsi CNSH sebagai bahan tambah beton diantaranya meningkatkan proses hidrasi beton, meningkatkan kededapan beton, dan meningkatkan kuat tekan beton.

Solusi Inovatif Ketahanan Beton

Pada akhirnya, kekuatan beton tidak hanya ditentukan oleh kemampuannya menahan beban, tetapi juga oleh ketahanannya terhadap lingkungan. Beton dengan sifat *impermeable* sangat rentan terhadap gangguan korosi. Air dan zat korosif yang masuk ke dalam beton dapat merusak tulangan di dalamnya dan mempercepat penurunan kualitas struktur. Penanggulangan korosi terhadap tulangan di dalam beton dapat dihindari jika beton memiliki tingkat kededapan yang baik.

Penggunaan CNS menawarkan solusi yang menjanjikan. Material ini tidak hanya dapat digunakan sebagai lapisan pelindung pada beton yang sudah ada, tetapi juga sebagai bahan tambahan pada beton segar untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahannya.

Penerapan CNSH sebagai lapisan pelindung telah dilakukan pada struktur tiang Dermaga di lingkungan yang sangat korosif. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa selama 20 tahun, beton tanpa lapisan CNSH mengalami peningkatan daya serap air hingga 15 kali lebih besar dibandingkan beton yang dilapisi CNSH. Tingginya daya serap ini membuat beton lebih mudah mengalami korosi.

Sebaliknya, penggunaan CNSH terbukti mampu menjaga beton tetap lebih kedap dan tahan terhadap kerusakan. Selain digunakan sebagai pelapis, pencegahan korosi juga dapat dilakukan sejak awal dengan menambahkan CNSH ke dalam campuran beton segar. Dengan manfaat tersebut, CNSH berpotensi menjadi salah satu inovasi penting dalam meningkatkan kualitas dan keberlanjutan konstruksi beton di Indonesia.

Menaklukkan Batuan Vulkanik Lemah: Tantangan dan Strategi Desain Adaptif Terowongan untuk Infrastruktur di Indonesia

Oleh : Eka Dhamayanti

Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Timur – Bali

46

Pembangunan infrastruktur di Indonesia, tidak hanya jalan tol Trans-Sumatera, jalur kereta api, maupun bendungan, kini memasuki era pembangunan bawah permukaan (terowongan) yang masif. Terowongan bukan lagi sekadar pelengkap, melainkan solusi strategis infrastruktur di masa depan untuk mengatasi keterbatasan topografi, meningkatkan konektivitas jalan tol, jalur kereta api, hingga efisiensi bendungan. Namun, tantangan yang dihadapi tidak sederhana. Indonesia berada di jalur “*Ring of Fire*” dengan dominasi batuan vulkanik yang heterogen, rapuh, dan mudah lapuk akibat iklim tropis.

Bagi para insinyur, kondisi ini adalah “zona abu-abu”. Desain terowongan yang terlalu konservatif akan memboroskan anggaran negara. Sebaliknya, desain yang terlalu hemat dapat membahayakan keselamatan konstruksi. Lalu, bagaimana menemukan titik keseimbangan yang optimal?

Artikel ini membahas kerangka desain terpadu yang menggabungkan metode empiris dan analisis

numerik, berdasarkan studi kasus Terowongan Pengelak Bendungan Jatinegara Jawa Tengah dan Terowongan Tol Cisumdawu. Pada kedua lokasi ini, batuan memiliki kualitas rendah (RMR rendah) dan berperilaku seperti tanah, sehingga berisiko tinggi terhadap kestabilan terowongan.

Di Jatinegara, tantangan utama adalah terbatasnya data bawah permukaan pada tahap perencanaan. Untuk mengatasinya, dibutuhkan analisis gabungan yang dapat memahami kondisi bawah permukaan di sekitar lokasi terowongan akan dibangun. Strategi ini berhasil memetakan variasi batuan secara lateral menjadi lima zona geoteknik. Tanpa integrasi ini, desain berisiko tidak sesuai dengan kebutuhan, seperti memasang dukungan berat di tempat yang stabil, atau sebaliknya, memasang dukungan ringan di zona yang rapuh.

Setelah memetakan zona geoteknik, langkah krusial selanjutnya adalah menentukan metode penggalian dan sistem penyangga yang paling efektif. Meskipun klasifikasi empiris seperti RMR sangat berguna untuk penentuan sistem penyangga dan metode penggalian, kita tetap membutuhkan validasi kuantitatif guna memprediksi deformasi

massa batuan secara akurat. Di sinilah peran Metode Elemen Hingga (FEM) sebagai instrumen validasi numerik. Simulasi ini bertindak sebagai validasi yang memodelkan interaksi antara batuan dan sistem penyangga sebelum konstruksi fisik dimulai. Melalui simulasi, insinyur dapat memprediksi pergerakan batuan (*displacement*) dan memastikan sistem penyangga yang dipilih benar-benar aman dari kegagalan struktur. Metode ini memungkinkan pemilihan sistem penyangga yang proporsional sesuai kebutuhan di lapangan dan menghindari potensi keruntuhan yang dapat mengakibatkan biaya perbaikan yang jauh lebih besar di masa depan.

Urgensi Klasifikasi *Rock Mass Rating* (RMR)

Untuk memahami kondisi batuan, digunakan sistem *Rock Mass Rating* (RMR) yang dikembangkan Bieniawski (1989). RMR menilai kualitas geoteknik batuan berdasarkan parameter seperti kekuatan batuan utuh, RQD, kondisi diskontinuitas, dan air tanah. Nilai RMR menjadi acuan utama dalam menentukan metode penggalian (misalnya *ripping* atau *digging*) serta kebutuhan sistem penyangga. Dengan pendekatan ini, desain terowongan tidak hanya aman secara struktur, tetapi juga lebih efisien dan sesuai dengan kondisi batuan di lapangan.

STUDI KASUS: TEROWONGAN CISUMDAWU DAN TEROWONGAN PENGELAK BENDUNGAN JATINEGARA

Meskipun berbeda fungsi, Terowongan Cisumdawu (jalan tol) dan Terowongan Pengelak Bendungan Jatinegara menghadapi tantangan geologi yang identik, yaitu batuan breksi vulkanik

dengan tingkat pelapukan yang tinggi. Di Terowongan Cisumdawu, terowongan sepanjang 472 meter menembus breksi vulkanik tufaan (formasi Subang) dengan tingkat pelapukan tinggi dan massa batuan yang tergolong buruk hingga sangat buruk (RMR rendah). Sementara Terowongan Jatinegara, sepanjang 439 meter ini mengidentifikasi breksi andesitik sebagai unit dominan. Kekuatan tekan (UCS) sangat rendah (3.7–7.3 MPa), RQD rendah (10–30%), dan sangat lapuk. Zona ini diklasifikasikan buruk (RMR rendah).

Secara geoteknik, batuan breksi vulkanik lebih mirip “tanah” daripada “batuan”. Material ini rapuh, tidak kohesif, dan memiliki kecenderungan *soil-like behavior* (perilaku mirip tanah), yang sangat berbahaya bagi stabilitas bukaan terowongan.

ANALISIS KOMPREHENSIF DESAIN TEROWONGAN JATINEGARA

Untuk memahami kondisi batuan vulkanik ini, pendekatan standar tidak cukup. Diperlukan sebuah alur kerja (*workflow*) investigasi yang komprehensif. Studi kasus Terowongan Pengelak Bendungan Jatinegara dapat memberikan contoh alur kerja dalam tiga tahap krusial.

Tahap I: Integrasi Data (Menyelesaikan Ambiguitas Prediksi Batuan Bawah Permukaan)

Terowongan pengelak Bendungan Jatinegara saat ini masih dalam tahap perencanaan, bahkan belum dilakukan *land clearing*. Tantangan utama pada tahap perencanaan yaitu keterbatasan data kondisi bawah permukaan dan tingginya ketidakpastian.

Data pengeboran yang tersedia berasal dari beberapa periode berbeda, yaitu tahun 2015, 2017, dan 2024, dengan hasil interpretasi yang belum sepenuhnya selaras. Karena itu, untuk mendapatkan gambaran kondisi bawah permukaan yang lebih akurat, diperlukan upaya mengintegrasikan seluruh data yang ada, sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih utuh terhadap kondisi geologi di lokasi terowongan. Untuk mengatasi hal ini, dilakukan integrasi seluruh data yang ada, bukan sekadar memilih satu sumber dan mengabaikan yang lain.

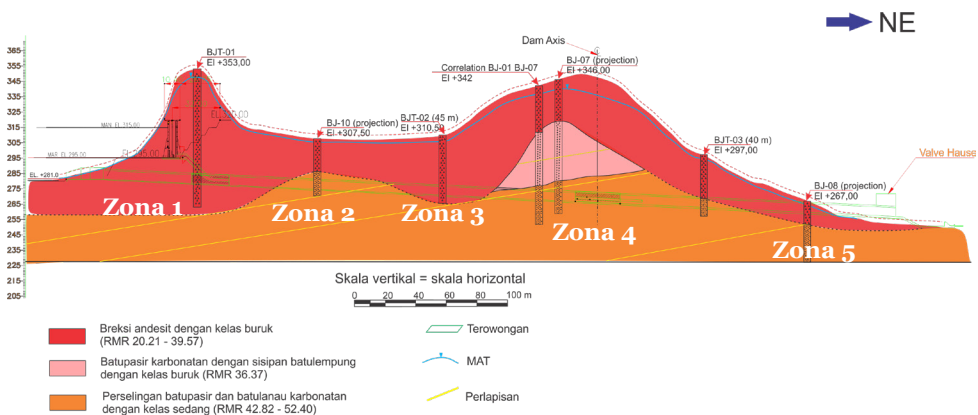
Proses dimulai dengan pemetaan geologi permukaan dengan memetakan singkapan di permukaan untuk memahami variasi litologi, tingkat pelapukan, dan struktur regional. Selanjutnya, analisis titik bor multi tahun dengan menganalisis log bor tahun 2017 dan 2024 secara berdampingan, terutama yang paling relevan dengan lokasi trase terowongan. Data tersebut kemudian dikorelasikan dengan cara menarik korelasi stratigrafi antara temuan di permukaan dengan data bor.

Proses ini menghasilkan integrasi dari data permukaan dan bawah yang lebih komprehensif terkait kondisi bawah permukaan pada terowongan yang akan dibangun. Hasil korelasi

data litologi dan tingkat pelapukan kemudian dianalisis menggunakan metode empiris yaitu klasifikasi massa batuan berdasarkan metode *Rock Mass Rating* (RMR). Metode RMR memberikan informasi terkait kualitas massa batuan (baik/buruk) yang berguna dalam tahapan selanjutnya yaitu penentuan sistem penyangga dan metode penggalian secara empiris.

Berdasarkan hasil korelasi antara data permukaan dan bawah permukaan, lintasan terowongan kemudian dibagi menjadi lima zona geoteknik (Gambar 1). **Zona 1, 3, dan 5** didominasi oleh breksi andesitik dengan kualitas batuan yang tergolong buruk. Sementara itu, **Zona 2 dan 4** terdiri dari batupasir-batulanau karbonatan dengan kualitas yang relatif lebih baik, yaitu kategori sedang.

Tanpa integrasi data ini, desain akan sulit ditentukan. Integrasi ini menjadi awal/pedoman bagi perencana untuk menentukan sistem penyangga dan metode penggalian yang sesuai dengan karakteristik massa batuan yang dilalui, dan sesuai dengan tujuan akhir bahwa tahapan ini berkontribusi terhadap optimalisasi desain terowongan yang memenuhi standar keamanan.



Sumber: Dhamayanti (2025)

Gambar 1. Penampang melintang sepanjang trase terowongan pengelak Bendungan Jatinegara dan penilaian kualitas massa batuan RMR (Bieniawski, 1989)

Tahap II: Karakterisasi Penggalian (Menjawab: “Bagaimana Metode Penggalian yang Tepat?”)

Setelah jenis dan kualitas batuan teridentifikasi ketika proses penggalian terowongan, pertanyaan selanjutnya adalah bagaimana metode penggalian yang tepat? Apakah perlu *blasting* (peledakan), *ripping* (alat berat), atau cukup *digging* (eksavator) ? Dari hasil klasifikasi massa batuan pada tahap sebelumnya sepanjang trase Terowongan Jatinegara dibagi menjadi lima zona geoteknik berbeda.

Pemilihan metode penggalian dilakukan dengan mengacu pada rekomendasi Bieniawski (1989).

Pendekatan empiris ini membantu menentukan metode penggalian yang paling sesuai dengan karakter massa batuan, sekaligus memberikan panduan sistem penyangga yang dibutuhkan untuk menjaga stabilitas terowongan.

Rekomendasi metode penggalian dan sistem penyangga tersebut kemudian dirangkum dalam Tabel 1 sebagai acuan desain pada tahap perencanaan berikutnya

Tabel 1. Rekomendasi metode penggalian dan sistem penyangga berdasarkan klasifikasi RMR (Bieniawski, 1989)

Zona terowongan	Kelas kualitas massa batuan	Metode penggalian	Sistem penyangga	
Zona 1 (STA 0+040 – 0+165)	Buruk	Metode bagian atas dan berjenjang (<i>top heading and bench</i>) dengan panjang galian 1,5 – 3 m, memasang penyangga bersamaan dengan penggalian 10 m dari muka galian	<i>Rock bolts</i> (diameter 20 mm, <i>grouting</i> penuh)	<i>Rock bolts</i> sistematis panjang 4 m, jarak 1,5 - 2 m, kecuali STA 0+300 – 0+332) jarak 1 – 1,5 m
Zona 3 (STA 0+225 – 0+316)			<i>Shotcrete</i>	Tebal 50 - 100 mm pada atap dan 30 mm pada sisi samping
Zona 5 (STA 0+435 – 0+479)			<i>Steel Sets</i>	Tidak perlu

Tabel 1. Rekomendasi metode penggalian dan sistem penyangga berdasarkan klasifikasi RMR (Bieniawski, 1989)

Zona terowongan	Kelas kualitas massa batuan	Metode penggalian	Sistem penyangga	
Zona 2 (STA 0+165 – 0+225) Zona 4 (STA 0+316 – 0+435)	Sedang	Metode bagian atas dan berjenjang (<i>top heading and bench</i>) dengan panjang galian 1,5 – 3 m, memasang penyangga setelah penggalian 10 m dari muka galian Kecuali STA 0+300 – 0+332) sistem penyangga dipasang bersamaan dengan penggalian 10 m dari muka galian	<i>Rock bolts</i> (diameter 20 mm, <i>grouting</i> penuh)	<i>Rock bolts</i> sistematis panjang 4 m, jarak 1,5 - 2 m, kecuali STA 0+300 – 0+332) jarak 1 – 1,5 m
			<i>Shotcrete</i>	Tebal 50 - 100 mm pada atap dan 30 mm pada sisi samping
			<i>Steel Sets</i>	Tidak perlu

Sumber: Dhamayanti (2025)

Penelitian ini juga mengkaji studi “*Excavatability*” atau tingkat kemudahan penggalian. Penilaian *excavatability* dilakukan secara empiris pada setiap zona dengan menggunakan kombinasi parameter, meliputi *Rock Mass Rating* (RMR), *Geological Strength Index* (GSI), *Fracture Index* (If), dan *Point Load Strength Index* (Is50).

Indikator-indikator tersebut menjadi dasar utama dalam menentukan tingkat kesulitan penggalian. Penelitian ini membandingkan empat metode empiris berbeda dari berbagai studi sebelumnya yaitu Abdullatif and Cruden, Pettifer & Fookes, Tsiambaos & Saroglou, Dagdelenler (Tabel 2, Gambar 2, Gambar 3, Gambar 4).

Hasil analisis menunjukkan kesimpulan yang konsisten, meskipun menggunakan metode yang berbeda (lihat Tabel 3). **Zona 1, 3, dan 5** yang didominasi breksi andesit dengan kualitas buruk tergolong sulit digali (*hard digging*). Sementara itu, **zona 2 dan 4** yang terdiri dari perselingan batupasir–batulanau dengan kualitas sedang relatif lebih mudah ditangani, yaitu masuk kategori *easy ripping*.

Tabel 2. Penilaian *excavability* berdasarkan nilai RMR (Abdullatif and Cruden, 1983)

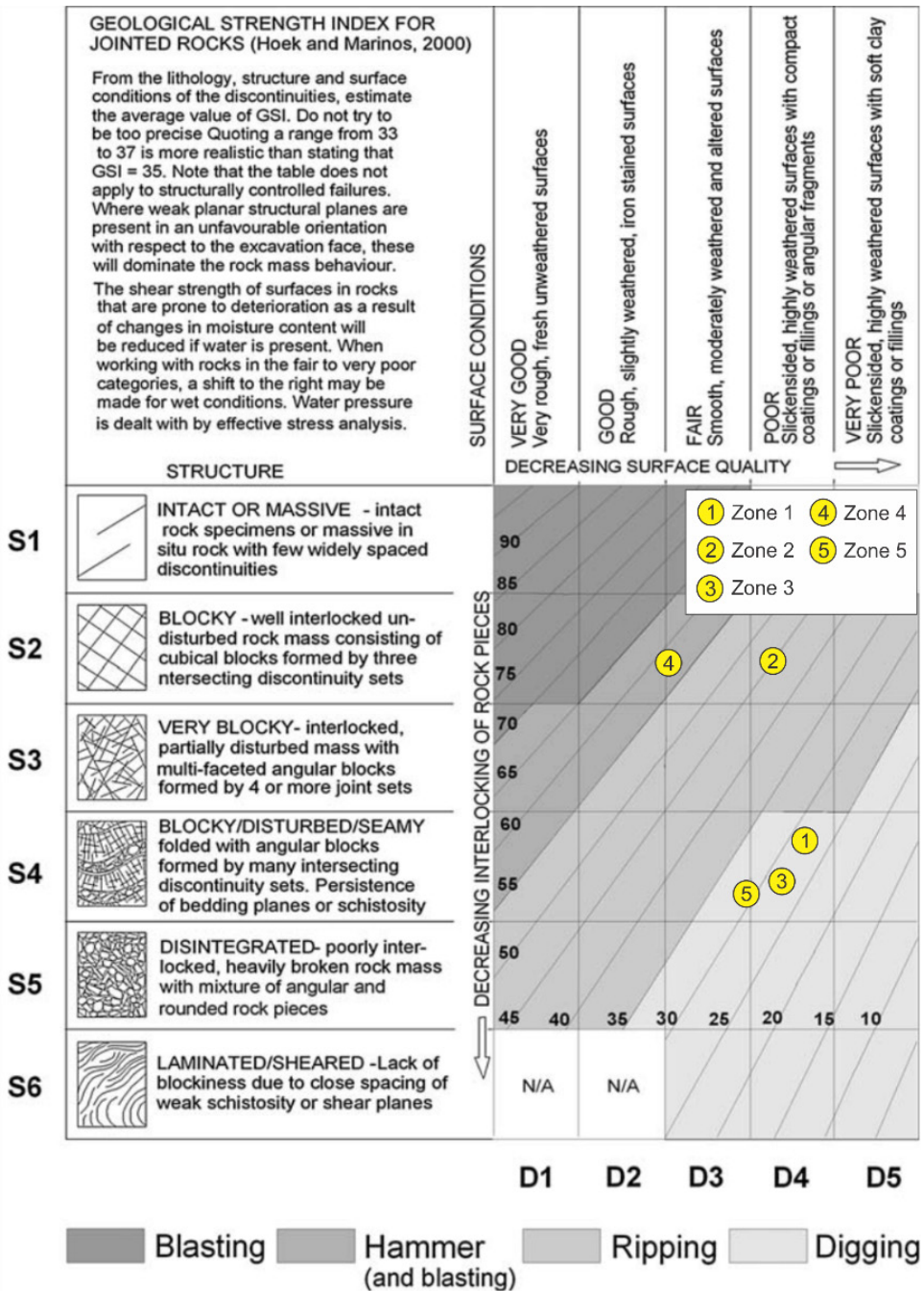
Zona terowongan	Litologi dominan	Nilai RMR	Kelas kualitas massa batuan	Kelas <i>excavability</i>
Zona 1 (STA 0+040 – 0+165)	Breksi andesit	38	Buruk	<i>Ripping</i>
Zona 2 (STA 0+165 – 0+225)	Perselingan batupasir karbonatan dan batulanau karbonatan	40.5	Sedang	<i>Ripping</i>
Zona 3 (STA 0+225 – 0+316)	Breksi andesit	38.2	Buruk	<i>Ripping</i>
Zona 4 (STA 0+316 – 0+435)	Perselingan batupasir karbonatan dan batulanau karbonatan	40.57 – 50.71	Sedang	<i>Ripping</i>
Zona 5 (STA 0+435 – 0+479)	Breksi andesit	34.17	Buruk	<i>Ripping</i>

Sumber: Dhamayanti (2025)

51

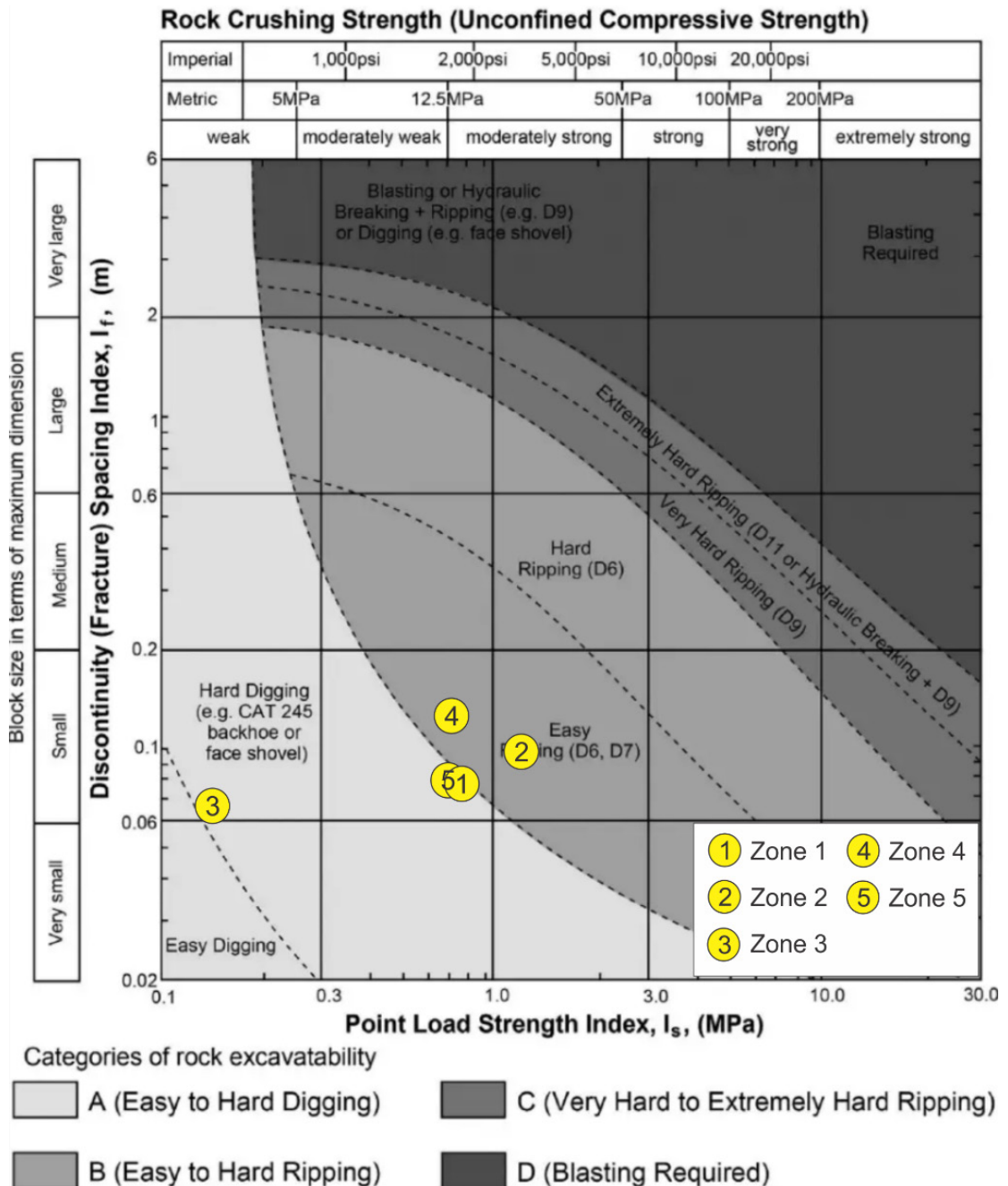


Untuk memahami kondisi batuan vulkanik ini, pendekatan standar tidak cukup. Diperlukan sebuah alur kerja (workflow) investigasi yang komprehensif.



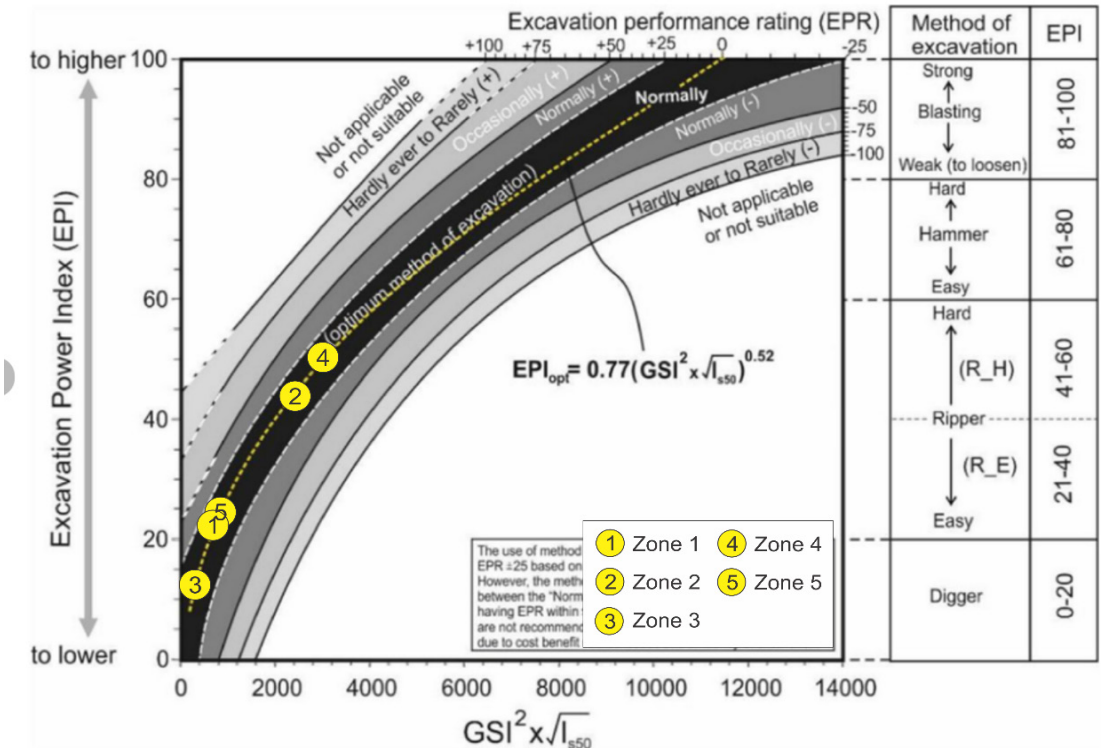
Sumber: Dhamayanti (2025)

Gambar 2. Penilaian *excavatability* berdasarkan grafik menurut Tsiambaos & Saroglou (2010)



Sumber: Dhamayanti (2025)

Gambar 3. Penilaian *excavability* berdasarkan grafik menurut Pettifer & Fookes graph (1994)



Gambar 4. Penilaian efisiensi berdasarkan sistem EXCASS

Tabel 3. Rangkuman penilaian excavability

Zona	Abdullatif and Cruden (1983)	Tsiambaos and Saroglou (2010)	Pettifer and Fookes (1994)	Excass system (Dagdelenler, 2020)
1	Ripping	Digging	Hard Digging	Easy Ripper
2	Ripping	Ripping	Easy Ripping	Medium Ripper
3	Ripping	Digging	Hard Digging	Digger
4	Ripping	Hammer (and blasting)	Easy Ripping	Hard Ripper
5	Ripping	Digging	Hard Digging	Easy Ripper

*Sumber: Dhamayanti (2025)

Hasil akhir pada tahapan kedua ini memberikan pedoman secara empiris terkait metode penggalian dan sistem penyangga yang direkomendasikan berdasarkan klasifikasi RMR menurut Bieniawski (1989). Namun, tahapan ini masih memiliki kelemahan, yaitu belum dapat dikonfirmasi apakah rekomendasi empiris ini dapat menahan beban dan mempertahankan struktur bangunan terowongan sesuai standar keamanan (*safety*) selama masa layan terowongan. Untuk menjawab hal tersebut, diperlukan tahap lanjutan berupa validasi menggunakan analisis numerik. Pendekatan ini menjadi penting, terutama karena terowongan masih dalam tahap perencanaan dan belum dilakukan penggalian.

Tahap III: Validasi Numerik (Menguji Metode Penggalian dan Desain Sistem Penyangga Sebelum Dibangun)

Ini adalah tahap paling kritis. Kita sudah tahu jenis batuan dan kualitas massa batuan (Tahap I) dan metode penggalian serta sistem penyangga (Tahap II) yang direkomendasikan secara empiris. Sekarang, apakah metode penggalian dan sistem penyangga yang diperoleh dari analisis dengan metode empiris tersebut benar efektif dan memenuhi kriteria desain?

Dalam perencanaan dan desain terowongan, khususnya pada tahap pra-konstruksi, prediksi deformasi atau perpindahan massa batuan (*displacement*) menjadi salah satu komponen utama untuk menentukan kestabilan dan keandalan metode penggalian serta sistem penyangga yang akan digunakan. *Displacement* yang berlebihan selama penggalian dapat menyebabkan deformasi pada pelapis terowongan, kerusakan permanen pada massa batuan, atau

bahkan kegagalan struktur. Menurut *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE, 2007) (Tabel 4), prediksi *displacement* harus dilakukan sebelum penggalian dimulai dengan mempertimbangkan jenis batuan, kualitas massa batuan, metode penggalian yang direncanakan, dan kondisi batas (*boundary condition*) dari situs proyek. Prediksi ini diperlukan untuk:

- Menentukan jenis sistem penyangga awal (*initial support*) yang memadai,
- Menyesuaikan metode penggalian agar sesuai dengan sifat deformasi batuan,
- Meminimalkan risiko deformasi berlebih dan potensi keruntuhan.

Tabel 4. Nilai *displacement* maksimal yang diizinkan berdasarkan kualitas batuan (JSCE, 2007)

Kategori batuan/ tanah	Besarnya deformasi yang diizinkan (cm)
B	0
CI	0
CII	0
DI	0
DII	10

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) merupakan pendekatan numerik yang digunakan secara luas dalam rekayasa geoteknik untuk memecahkan permasalahan mekanika kontinu, termasuk deformasi tanah dan batuan di sekitar terowongan. Dalam konteks teknik terowongan, FEM mampu menganalisis distribusi tegangan, deformasi (*displacement*), dan kestabilan massa batuan dengan mempertimbangkan heterogenitas dan ketidaklinieran sifat material.

FEM bekerja dengan membagi domain kontinu (massa batuan atau tanah) menjadi elemen-elemen kecil berbentuk segitiga, segiempat, atau elemen isoparametrik yang saling terhubung pada simpul (*nodes*). Setiap elemen memiliki fungsi bentuk (*shape function*) yang menggambarkan hubungan antara *displacement* di simpul dengan seluruh elemen. Dengan pendekatan ini, kondisi deformasi dan tegangan dapat dihitung secara lokal dan digabungkan menjadi validasi dari sistem geoteknik yang kompleks.

Secara matematis, pendekatan FEM didasarkan pada prinsip keseimbangan gaya internal dan eksternal serta hukum konstitutif material. Persamaan dasar yang digunakan dalam FEM adalah bentuk diskret dari:

$$[K]\{u\} = \{F\}$$

di mana:

- $[K]$: matriks kekakuan (*stiffness matrix*),
- $\{u\}$: vektor perpindahan (*displacement vector*),
- $\{F\}$: vektor gaya (*force vector*).

Solusi dari sistem ini memberikan distribusi *displacement* di setiap titik simpul, dari mana tegangan (σ) dan regangan (ϵ) dapat diturunkan dengan menggunakan hubungan tegangan-regangan sesuai model elastis, elastoplastik, atau nonlinier tergantung jenis batuan yang dimodelkan. Dalam penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah model Hoek-Brown yaitu model nonlinier berbasis parameter GSI dan distorsi massa batuan.

Tahapan umum dalam penerapan FEM untuk analisis terowongan meliputi:

1. Penyusunan geometri

Pembuatan model geometri 2D atau 3D dari lintasan terowongan dan lingkungan batuan sekitarnya.

2. Pembuatan mesh

Diskretisasi area analisis menjadi elemen-elemen kecil. Kerapatan mesh biasanya diperbesar di area kritis seperti *crown* dan *springline*.

3. Definisi sifat material

Penentuan parameter kekuatan dan kekakuan batuan, seperti modulus elastisitas (E), *Poisson's ratio* (ν), kohesi (c), sudut gesek dalam (ϕ), dan GSI.

4. Penetapan kondisi batas dan beban:

Meliputi tegangan awal (*in-situ stress*), beban tanah, tekanan air tanah, dan beban dinamis (jika ada).

5. Simulasi tahapan konstruksi (*Staged Excavation*)

Pemodelan urutan penggalian dan instalasi sistem penyangga secara bertahap.

6. Analisis output

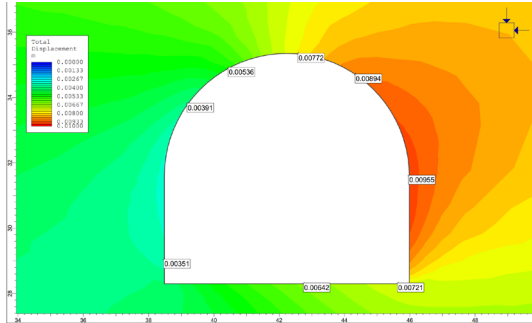
Hasil simulasi mencakup distribusi *displacement*, tegangan, zona plastis, dan faktor keamanan lokal (*Strength factor*).

Salah satu keunggulan utama FEM adalah kemampuannya dalam menganalisis parameter kunci dalam stabilitas terowongan, yaitu *displacement*. FEM memprediksi distribusi perpindahan di seluruh domain model, baik konvergensi di dinding terowongan, deformasi dasar (*heave*), maupun *settlement* di atas permukaan.

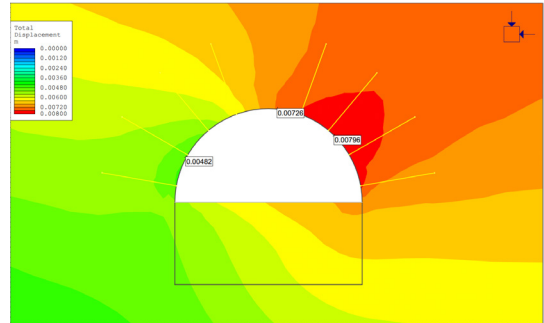
Nilai ini digunakan untuk mengevaluasi potensi deformasi berlebih, efisiensi sistem penyangga, dan dampaknya terhadap struktur sekitar.

Tabel 5. Hasil analisis *displacement* terowongan pada zona 1 dengan kekuatan desain RMR

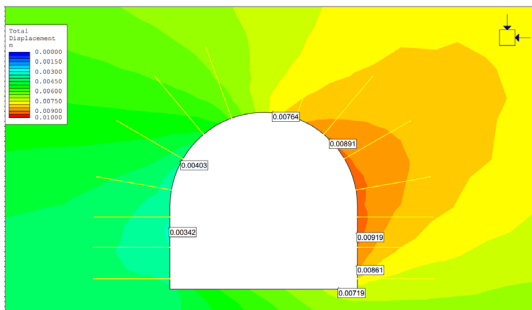
Tanpa Penyangga



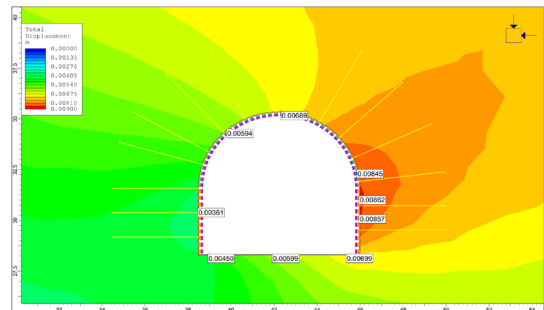
Penggalian atas (*top*) dan pemasangan *rockbolt*



Penggalian bawah (*bench*) dan pemasangan *rockbolt*



Pemasangan sistem penyangga permanen (*shotcrete, steel set*)



*Sumber: Dhamayanti (2025)

Meskipun klasifikasi empiris menggunakan RMR sangat baik untuk desain awal, kita tetap perlu melakukan validasi kuantitatif. Metode empiris memang berguna, tetapi tidak selalu mampu memprediksi besarnya deformasi atau redistribusi tegangan secara akurat.

Untuk itu, penelitian ini menggunakan pendekatan numerik, khususnya Metode Elemen Hingga 2D (*2D Finite Element Method, FEM*). Penelitian ini memodelkan penampang representatif dari terowongan, dengan fokus pada kondisi terburuk di Zona 1.

Model ini digunakan untuk menguji skenario dan mengevaluasi kriteria utama untuk desain yang aman yaitu *total displacement* berada dalam batas yang dapat diterima, yaitu kurang dari 10 cm. Hasil untuk Zona 1, yaitu zona batuan dengan kualitas massa batuan buruk berdasarkan klasifikasi RMR.

Pada model tanpa penyangga, terlihat deformasi yang signifikan, terutama di atap dan dinding kanan, dengan *displacement* hingga 0,89 cm, mendekati 1 cm.

Analisis menunjukkan bahwa terowongan tanpa penyangga ini masih stabil. Pada skenario berikutnya dimana sistem penyangga lengkap telah terpasang sesuai rekomendasi terjadi perubahannya sangat jelas. *Total displacement* berkurang secara signifikan; misalnya, *displacement* di *crown* turun dari 0,89 cm menjadi 0,69 cm. Jadi, pemodelan numerik ini sangat penting. Pemodelan ini menegaskan bahwa terowongan dengan sistem penyangga memiliki *total displacement* yang lebih kecil dibandingkan tanpa menggunakan sistem penyangga.

Tahap ini membantu mengurangi risiko sekaligus menekan biaya. Melalui simulasi, kita bisa memastikan pergerakan batuan tetap berada dalam batas aman, misalnya di bawah 10 cm sesuai standar JSCE. Validasi ini juga membantu menghilangkan ketidakpastian dalam desain, sehingga sejak tahap perencanaan sudah dapat dipastikan bahwa desain cukup aman untuk dilaksanakan. Namun, hasil ini tetap perlu dicek kembali saat penggalian berlangsung, karena kondisi batuan yang sebenarnya baru terlihat di lapangan. Dengan kata lain, analisis numerik menjadi alat terbaik pada tahap perencanaan untuk menghasilkan desain yang paling optimal.

Hasil Akhir Desain

Hasil validasi numerik ini menjadi dasar keputusan akhir desain, khususnya untuk Zona 1 yang teridentifikasi sebagai breksi vulkanik dengan kualitas massa batuan buruk. Sistem penyangga yang direkomendasikan kombinasi *rock bolts* 4–5 m dengan *shotcrete* 100–150 mm terbukti secara efektif mampu membatasi *displacement* hingga 0,69 cm. Angka ini memenuhi standar JSCE yang

menetapkan batas maksimal deformasi jauh di atas hasil validasi tersebut, sehingga menjamin stabilitas struktur pada zona yang sensitif terhadap beban ini. Desain ini menawarkan optimasi biaya dibandingkan pendekatan konservatif penuh dengan tetap memastikan faktor keamanan minimal tercapai. Rekomendasi teknis tersebut telah diserahkan kepada konsultan perencana untuk ditindaklanjuti dalam tahap *Detailed Engineering Design* (DED).

IMPLIKASI DAN REKOMENDASI (CETAK BIRU UNTUK PROYEK MASA DEPAN)

Pengalaman dari terowongan Pengelak Bendungan Jatinegara memberikan pelajaran berharga. Untuk memastikan kesuksesan proyek terowongan (baik jalan maupun air) di masa depan, kita tidak bisa lagi menempatkan geologi di pinggiran. Berikut adalah rekomendasi langkah-langkah, yang harus menjadi tahapan penting dalam pembangunan infrastruktur bawah permukaan.

a. Tahapan Perencanaan

Tahap perencanaan menjadi penentu utama, bahkan menyumbang sekitar 80% keberhasilan pembangunan terowongan. Jika tahap ini keliru, risiko kegagalan saat konstruksi akan sangat besar. Kajian geologi tidak boleh sekedar formalitas, tetapi mencakup pemetaan geologi teknik detail guna mengidentifikasi litologi dan pelapukan di sepanjang trase, sebagaimana telah diilustrasikan pada pembagian zona geoteknik. Data historis wajib diintegrasikan dengan data terbaru untuk membangun model geologi yang andal. Selain itu, pemodelan numerik (FEM) diwajibkan untuk memvalidasi desain sistem penyangga dan memprediksi deformasi sebelum konstruksi fisik dimulai.

b. Tahapan Pelaksanaan (Konstruksi)

Konstruksi terowongan dipahami sebagai proses dinamis Desain yang telah disusun tidak bersifat kaku, melainkan terus disesuaikan dengan kondisi nyata di lapangan. Prinsip “*Design as You Go*” diterapkan agar desain dukungan dapat disesuaikan (dipertebal atau ditipiskan) berdasarkan kondisi batuan yang terekspos saat penggalian.

Pemetaan muka terowongan (*face mapping*) secara rutin menjadi instrumen vital untuk memvalidasi apakah zona batuan yang ditemui sesuai dengan prediksi awal. Selain itu, instrumen monitoring dipasang untuk memantau pergerakan tanah secara *real-time*. Jika pergerakan melebihi ambang batas aman, evaluasi ulang terhadap sistem dukungan segera dilakukan.

c. Tahapan Pasca Konstruksi dan Masa Layan (Menjaga Aset Strategis)

Ujian sesungguhnya bagi infrastruktur strategis adalah pada fase operasional yang direncanakan mencapai 50-100 tahun. Pelajaran dari Cisumdawu menunjukkan bahwa stabilitas portal dan lereng sekitarnya tetap menjadi tantangan seumur hidup, bahkan setelah konstruksi selesai.

Manajemen aset dilakukan melalui monitoring deformasi berkelanjutan untuk memastikan terowongan tidak mengalami pengecilan atau penurunan (konvergensi) yang signifikan.

Sistem drainase juga diinspeksi secara rutin karena sumbatan pada saluran dapat meningkatkan tekanan air pori yang berisiko menghancurkan lining beton dari belakang. Seluruh data pemantauan ini digunakan untuk memperbarui model kondisi aset secara berkala.

DESAIN ADAPTIF ADALAH SEBUAH SIKLUS

Dua terowongan di lokasi berbeda Cisumdawu dan Jatinegara memberikan pelajaran yang sama, menghadapi batuan vulkanik lemah di Indonesia tidak cukup hanya mengandalkan beton dan baja, tetapi membutuhkan pemahaman geologi yang terintegrasi sepanjang siklus proyek.

Keberhasilan proyek infrastruktur bawah permukaan di masa depan bergantung pada pergeseran paradigma. Geologi sebagai “syarat” administrasi di awal, melainkan geologi sebagai inti dari pengambilan keputusan desain dan manajemen aset.

Alur kerja yang terbukti efektif dikenal sebagai *Siklus Desain Adaptif*. Pendekatan ini menempatkan desain sebagai proses yang terus berkembang, dari perencanaan hingga masa operasional.

Tahap Perencanaan, langkah utama dimulai dari integrasi data untuk membangun model geologi yang andal, dilanjutkan dengan karakterisasi kondisi batuan untuk menentukan metode konstruksi, serta validasi desain melalui analisis numerik (FEM).

Tahap Pelaksanaan, validasi model geologi secara *real-time* melalui pemetaan muka terowongan (*Face Mapping*) dan instrumentasi konstruksi. Tahap Masa Layan, memastikan umur rencana tercapai melalui monitoring jangka panjang (lereng portal, drainase, deformasi) dan pemeliharaan berbasis data.

Tabel 6. Roadmap Pengembangan Siklus Desain Adaptif Terowongan

Fase	Alat Kunci	Output Utama	Durasi Estimasi
Perencanaan	Integrasi data, RMR, FEM	Zonasi + desain sistem penyangga	3-6 bulan
Pelaksanaan	<i>Face mapping</i> , monitoring <i>real-time</i>	Validasi dan adaptasi desain di lapangan	Selama konstruksi
Masa Layan	Monitoring lereng, drainase, deformasi	Pemeliharaan preventif dan korektif	50-100 tahun

Setiap langkah dalam siklus ini memberikan umpan balik ke langkah lainnya. Hanya dengan menerapkan siklus adaptif inilah kita dapat memastikan setiap terowongan yang kita bangun, baik untuk jalan tol maupun infrastruktur air. Siklus ini tidak hanya fungsional, tetapi juga aman, efisien, dan berkelanjutan hingga 100 tahun ke depan.



Sistem penyangga yang direkomendasikan kombinasi rock bolts 4–5 m dengan shotcrete 100–150 mm terbukti secara efektif mampu membatasi displacement hingga 0,69 cm.



Carilah kebenaran, tuntutan kebenaran
laksanakan kebenaran dalam masyarakat

Sehingga senantiasa menjadi
pegangan dalam segala tindakan

- Bung Hatta -

LAPORAN PROYEK

Mengurangi Paket Kritis di Bina Marga dengan Ilmu Pengadaan Jasa Konstruksi dari Filipina

Oleh: Punto Budiharto, S.T, M.T

Direktorat Preservasi Jalan dan Jembatan Wilayah I

62

Proyek konstruksi jalan sering kali menghadapi berbagai tantangan di lapangan. Salah satu persoalan yang kerap muncul dalam proyek konstruksi di lingkungan Ditjen Bina Marga adalah keterlambatan pelaksanaan pekerjaan.

Keterlambatan ini sering membuat suatu proyek masuk kategori paket kritis, bahkan beberapa paket berujung pada pemutusan kontrak. Kondisi ini tentu tidak hanya menghambat penyelesaian pembangunan, tetapi juga berpotensi menimbulkan kerugian dari sisi waktu, biaya, maupun manfaat bagi masyarakat.

Data Direktorat Kepatuhan Intern yang dipaparkan dalam Rapat Kerja 21 Agustus 2024 menunjukkan gambaran yang cukup menarik. Dari 2210 paket kontraktual tender dan non tender di lingkungan Ditjen Bina Marga, terdapat 157 paket yang sempat kritis (7,10%).

Selain itu, sepanjang Tahun Anggaran 2022 s.d 2024 terdapat 62 paket yang mengalami putus kontrak. Beberapa penyebab paket putus kontrak diidentifikasi sebagai berikut:

1. Penyedia jasa kurang kompeten (keterbatasan peralatan dan SDM),
2. Permasalahan keuangan penyedia jasa (*cashflow*) terutama pada paket-paket dengan penawaran rendah,
3. Penyedia jasa berasal dari luar daerah sehingga mobilisasi SDM, alat dan bahan tidak mudah,
4. Faktor internal yakni pihak pemilik pekerjaan (PPK) kurang sigap dalam memonitor paket-paket berpotensi kritis.

Berbagai masalah yang dialami penyedia jasa di lapangan, mulai dari keterbatasan kompetensi, masalah likuiditas (*cash flow*), penawaran harga yang terlalu rendah, hingga kesulitan lainnya sebenarnya tidak muncul begitu saja. Kondisi tersebut adalah konsekuensi dari proses perencanaan dan pengadaan yang belum sepenuhnya optimal. Oleh karena itu, perlu dipertimbangkan adanya indikator evaluasi dalam proses tender untuk memastikan bahwa penyedia jasa yang terpilih dalam mengerjakan proyek konstruksi memiliki kehandalan dan kualitas yang memadai.

Untuk memperkaya wawasan, kita dapat melihat praktik yang diterapkan salah satu negara tetangga, yakni Filipina. Konstruksi pekerjaan umum di negara Filipina dilaksanakan oleh DPWH (*Department of Public Work and Highways*). Lembaga ini bertanggung jawab melaksanakan proyek pekerjaan umum dan menjalin kontrak dengan penyedia jasa melalui pemberi kerja *District Engineer* (serupa PPK) di wilayah kerja masing-masing.

Dalam proses pengadaan proyek konstruksi, DPWH menggunakan sejumlah dokumen standar, salah satunya DPWH *Manual of Procedures for The Procurement of Locally Funded Infrastructure Projects Through Public Bidding* yang dapat diakses secara terbuka pada tautan <https://dpwh.gov.ph/dpwh/sites/default/files/volume%203.pdf>. Dokumen tersebut memuat berbagai ketentuan serta istilah yang digunakan dalam proses tender, dimana istilah ini sering juga digunakan di Indonesia, seperti

- ABC (*Approved Budget of Contract*) atau HPS (Harga Perkiraan Sendiri).
- BAC (*Bidding and Award Committee*) atau Panitia Tender / Pokja
- BIR (*Bureau of Internal Revenue*) atau Lembaga Pajak Pemerintah
- BD (*Bidding Document*) atau Dokumen Tender

Secara umum, proses penawaran, evaluasi, hingga penetapan pemenang tender yang dilakukan oleh DPWH tidak jauh berbeda dengan yang diberlakukan di Indonesia. Dokumen penawaran dari peserta tender akan dievaluasi dalam 3 (tiga) aspek meliputi legal, teknis dan finansial. Aspek legal meliputi verifikasi kelengkapan dokumen perizinan badan hukum peserta tender, NPWP, dan sebagainya. Selanjutnya aspek teknis meliputi verifikasi atas usulan personel inti, ketersediaan peralatan utama, jaminan penawaran, serta bukti pengalaman mengerjakan proyek sejenis.

Sementara itu pada aspek finansial, peserta tender harus menyampaikan rincian harga penawaran RAB yang tidak boleh melebihi ABC (HPS), laporan keuangan perusahaan yang telah diaudit oleh BIR (*Bureau of Internal Revenue*) dan bukti lunas pajak tahun sebelumnya.

Seperti di Indonesia, proses tender pun sudah menggunakan proses elektronik atau GEPS (*Government E-Procurement System*). Proses ini memungkinkan proses pengadaan berlangsung lebih transparan dan terdokumentasi dengan baik.

Lalu, apa yang menarik dari pengadaan proyek konstruksi di Filipina untuk dipelajari? Meskipun secara umum tidak jauh berbeda dengan Indonesia, terdapat beberapa pendekatan yang dinilai lebih ketat dalam memastikan penyedia jasa yang memenangkan tender, di antaranya:

1. Kapasitas likuiditas peserta tender yang diukur dari NFCC

NFCC atau *Net Financial Contracting Capacity* adalah indikator yang digunakan untuk menilai kemampuan finansial perusahaan dalam mengerjakan proyek konstruksi, terutama terkait ketersediaan arus kas yang memadai. Secara sederhana NFCC dapat dihitung dengan cara:

NFCC = (Aset Lancar – Kewajiban Lancar) * Koefisien – Seluruh nilai proyek yang sedang berjalan termasuk proyek yang sudah dimenangkan namun belum dimulai

Nilai NFCC yang dihasilkan harus lebih besar daripada nilai HPS proyek yang akan ditenderkan. Koefisien yang digunakan juga berbeda-beda tergantung pada lama pelaksanaan proyek. Untuk proyek dengan masa pelaksanaan hingga satu tahun ditetapkan sebagai nilai K = 10, proyek dengan durasi satu hingga dua tahun menggunakan nilai K = 15, sedangkan proyek tahun jamak dengan durasi lebih dari dua tahun menggunakan nilai K = 20.

Sebagai ilustrasi, apabila suatu proyek memiliki nilai HPS sebesar Rp200 miliar dengan masa konstruksi selama 18 bulan, sementara perusahaan peserta tender memiliki aset lancar Rp40 miliar, kewajiban lancar Rp10 miliar, dan sedang mengerjakan proyek lain senilai Rp100 miliar, maka NFCC dari perusahaan peserta tender yang bersangkutan adalah sebesar:

$$\text{NFCC} = (\text{Rp } 40 \text{ Milyar} - \text{Rp } 10 \text{ Milyar}) \times 15 - \text{Rp } 100 \text{ Milyar}$$

$$\text{NFCC} = \text{Rp } 350 \text{ Milyar} > \text{HPS} = \text{Rp } 200 \text{ Milyar}$$

Berdasarkan hasil tersebut, perusahaan memiliki nilai NFCC yang memadai untuk mengerjakan proyek dengan HPS Rp 200 Milyar. Selanjutnya, peserta tender diwajibkan menyerahkan ringkasan laporan aset dan kewajiban badan usaha berdasarkan laporan pajak penghasilan dan laporan keuangan yang telah diaudit. Dokumen tersebut harus disahkan dengan cap “DITERIMA/APPROVED” oleh BIR atau lembaga yang berwenang dan terakreditasi lainnya.

Secara umum model NFCC belum diterapkan di Indonesia karena kendala laporan keuangan teraudit yang belum digunakan secara luas oleh penyedia jasa. Hanya penyedia jasa yang sudah *go-public* dan perusahaan besar saja yang memiliki laporan keuangan tahunan. Meski demikian, model serupa sebenarnya pernah digunakan dalam evaluasi penawaran paket-paket skala besar yang dibiayai pinjaman asing seperti World Bank, ADB, dan sebagainya.

Dalam proyek-proyek tersebut dikenal indikator AACTO (*Average Annual Construction Turnover*) yang mengukur Perputaran Modal Konstruksi Tahunan Rata-Rata dalam 5 (lima) tahun terakhir. Indikator tersebut harus yang harus dipenuhi calon peserta tender sekaligus mengisi daftar aktivitas pekerjaan konstruksi yang telah dilaksanakan selama 5 (lima) tahun terakhir.

Nilai AACTO inilah yang menjadi tolok ukur kemampuan *cash flow* penyedia jasa.

Kedepannya untuk calon peserta tender paket konstruksi skala kecil dan menengah dapat dimulai dengan melampirkan rekening koran 3 – 12 bulan terakhir, dan mengisi daftar paket yang sedang dilaksanakan secara mandiri. Setidaknya dapat diperkirakan kemampuan likuiditas dari penyedia jasa yang bersangkutan.

2. Kemampuan dasar yang ditetapkan 2x NPT (Nilai Pengalaman Tertinggi)

Dokumen tender mensyaratkan peserta tender harus memiliki pengalaman pekerjaan konstruksi sejenis dengan nilai kontrak setidaknya 50% dari nilai HPS pada paket yang ditenderkan. Dengan demikian apabila digunakan rumus Kemampuan Dasar (KD) maka $\text{KD} = 2 \times \text{NPT}$ (Nilai Pengalaman Tertinggi). Aturan DPWH Filipina sebenarnya lebih ketat daripada yang berlaku di Indonesia yang memakai rumus $\text{KD} = 3 \times \text{NPT}$.

3. CPES Rating

Indikator lain yang digunakan DPWH Filipina dalam menilai kualitas kontraktor adalah *rating* CPES (*Constructors Performance Evaluation System*) yang laporan berkalanya tiap semester dapat diakses lewat tautan <https://www.gppb.gov.ph/constructors-performance-evaluation-system-cpes-report/>.

CPES adalah sistem penilaian seragam yang digunakan di Filipina untuk mengevaluasi kinerja penyedia jasa pada proyek infrastruktur pemerintah. Penilaian ini dilakukan oleh tim khusus dari pemerintah dan didasarkan pada beberapa aspek dengan bobot yang berbeda tergantung pada jenis proyek antara lain:

Penilaian Selama Konstruksi (TOTAL 100%)

- Kualitas pengerjaan (*workmanship*) bobot 40%
- Ketepatan waktu (*time*) bobot 15%
- Kualitas bahan (*materials*) bobot 30%
- Fasilitas (*facilities*) bobot 3%
- Keselamatan dan Kesehatan Lingkungan (*HSE*) bobot 7%
- Pengerahan sumber daya (*resource deployment*) bobot 5%

Penilaian Setelah Konstruksi (TOTAL 100%)

- Kualitas pengerjaan (*workmanship*) bobot 50%
- Ketepatan waktu (*time*) bobot 20%
- Kualitas bahan (*materials*) bobot 30%

Rating Kinerja

- Istimewa : $> 96\%$
- Sangat Memuaskan : $89\% \leq 96\%$
- Memuaskan : $82\% \leq 89\%$
- Kurang Memuaskan : $75\% \leq 82\%$
- Buruk : $< 75\%$

Detail lebih lanjut terhadap peraturan dan metode penilaian *Rating CPES* dapat diakses dalam tautan http://construction.gov.ph/wp-content/uploads/2021/02/CPES_ImpGuidelines042315v2.pdf. *Rating CPES* digunakan dalam evaluasi penawaran, pemantauan kinerja sampai serah terima pekerjaan.

Peringkat yang memuaskan akan sangat membantu penyedia jasa untuk memperoleh kembali proyek di masa depan. *Rating CPES* ini dapat diakses publik dan dapat digunakan oleh siapapun yang memerlukan informasi terhadap kinerja suatu penyedia jasa / kontraktor.

Di Indonesia sesungguhnya telah dikembangkan model serupa bernama SIKaP (Sistem Informasi Kinerja Penyedia) yang dapat dioptimalkan penggunaannya untuk penilaian kinerja penyedia jasa.

Dalam SIKaP khusus pekerjaan konstruksi, penilaian dilakukan oleh Pejabat Pembuat Komitmen (PPK) meliputi aspek kualitas pekerjaan fisik terpasang (25%), kesehatan dan keselamatan kerja (25%), administrasi pekerjaan (15%), ketepatan waktu dan biaya (15%), pemeliharaan (10%) dan kesesuaian kualifikasi, jumlah dan waktu penugasan tenaga ahli (10%) dengan total bobot 100%.

Selanjutnya skor *rating* penyedia jasa adalah Sangat Baik (91 – 100%), Baik (81 – 90%), Cukup/Sedang (71 – 80%) dan Kurang (1 – 60%). Kedepannya, adanya SIKaP ini dapat dimanfaatkan lebih intensif.

Penilaian dapat dilakukan oleh Tim dari Balai Besar/Balai atau Tim Teknis dari direktorat khusus sekaligus menjadi laporan monev. Penilaian bukan oleh pemberi kerja (PPK) proyek yang bersangkutan untuk menjaga independensi dan menghindari subjektivitas. Hasil penilaian direkapitulasi dan diumumkan kepada publik dalam situs resmi.

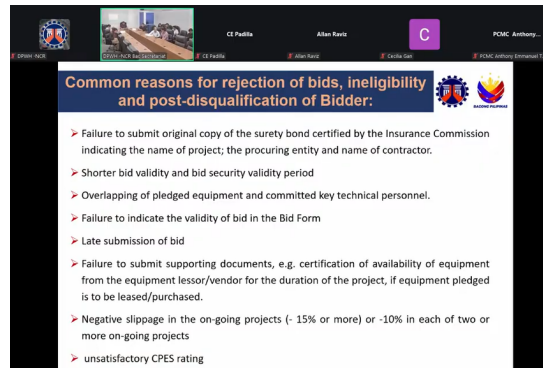
NAME OF CONSTRUCTOR	LICENSE NO.	PROJECT	DATE OF EVALUATION	IMPL. AGENCY	CONTRACT AMOUNT (Php. Bn)	DATE DURATION	STATUS	WMS	MTL	TIME	FAC	ESH	RDR	CPES VISIT RATING	FINAL RATING	QUALITATIVE DESCRIPTION
1 Beatus Builders Corp.	43709	25G0040 - Off-Carriageway Improvement - Paving of Shoulders - Mandurao - Sn Miguel - Almodan - Maasin - Cabatuan Rd - K0023-089 - K0023-890	06/04/2025	DPWH	34,624.491	132	O	0.3690	0.3000	0.1470	0.0240	0.0430	0.0330	91.60%	-	On-Going
10 Builders and Development Corporation	44851	24C0002 - Rehabilitation of Flood Control Structure at Palmera Phase IV, Barangay Sta. Monica	03/30/2025	DPWH	29,399.753	501	O	0.3840	0.2410	0.1500	0.0300	0.0260	0.0500	88.10%	-	On-Going
11 Diamond Eagle Construction	33328	25CH005 - Preventive Maintenance - Secondary Roads - Pagsanjan - Lucban Rd, K0093+000 - K0094+000	04/30/2025	DPWH	41,534.219	76	C	0.4730	0.1340	0.3000				90.70%	90.70%	Very Satisfactory
11 Diamond Eagle Construction	33328	Flood Management Program - Construction/Maintenance of Flood Control Mitigation Structures and Drainage Systems - Construction/Maintenance of Flood Mitigation Structures and Drainage Systems - Construction/Rehabilitation of Flood Structures along Right Side Downstream of Gating-Gating River at Gating-Gating Bridge	09/05/2019	DPWH	19,060.891	240	C	0.4850	0.1330	0.3000				91.80%	91.80%	Very Satisfactory
11 Diamond Eagle Construction / Bhenlabien Builders Construction (JV)	33328 / JV-17-2345	Local Infrastructure program - Flood Control and Drainage - Flood Control Structures/Facilities - Construction/Rehabilitation of a Grouted Slope Protection along Petang Creek from RSBS up to Roseville Subd.	09/06/2019	DPWH	38,090.250	360	C	0.4760	0.1330	0.3000				90.90%	90.90%	Very Satisfactory
11-16 Construction	2198	2024-HO-EGPIP-05 - Construction of Solar Powered Driven Pumps Irrigation Projects with AI-Assisted Monitoring System and Fertigation	08/04/2025	NIA	118,356.798	240	O	0.3834	0.3000	0.0180	0.0240	0.0467	0.0500	82.21%	-	On-Going
		2024-MARIS-FGPIP-06 - Construction of														

Gambar 1 Tampilan Laporan Semester CPES dan Penilaian Kinerja Kontraktor

4. Verifikasi ketat atas bukti rekam jejak pengalaman peserta tender

DPWH Filipina menetapkan aturan dalam persyaratan teknis dokumen tender bahwa bukti kinerja dari pengalaman sejenis baik dari kontrak pemerintah maupun swasta yang dimiliki peserta tender tidak boleh mengalami kondisi berikut:

- Mengalami deviasi minus mencapai 15% dalam satu kontrak proyek atau deviasi minus mencapai 10% dalam masing-masing dua kontrak proyek atau lebih.
- Penyedia jasa gagal untuk memulai dan menyelesaikan pekerjaan perbaikan atas Cacat Mutu dan Kekurangan Volume.
- Kualitas pekerjaan di bawah standar atau kinerja yang tidak memuaskan mengacu kepada syarat dan ketentuan kontrak saat diadakan inspeksi.
- Hasil CPES Rating yang buruk



Gambar 2 Pre-Bid Conference
suatu Paket Konstruksi di Filipina

Parameter di atas dapat mengugurkan peserta tender jika tidak terpenuhi. Panitia Tender dari DPWH Filipina bahkan dapat mengadakan inspeksi dan klarifikasi terhadap proyek sejenis yang pernah dikerjakan oleh kontraktor. Panitia Tender juga akan berkomunikasi langsung dengan pemberi kerja sebelumnya untuk memperoleh testimoni atas kualitas dan komitmen penyedia jasa dalam menyelesaikan proyek tersebut.

Di Indonesia model seperti ini secara garis besar belum diterapkan. Meskipun dalam dokumen evaluasi teknis memang terdapat ketentuan bahwa Panitia Tender dapat melakukan klarifikasi kepada peserta apabila terdapat hal yang kurang

kelas atau ragu. Panitia Tender juga dapat meminta peserta untuk memperlihatkan dokumen asli pendukung penawaran teknis. Hasil klarifikasi dapat menggugurkan penawaran.

Namun dalam praktiknya, ketentuan ini masih cenderung subjektif dan hanya menilai keabsahan dokumen saja, bukan memverifikasi kualitas pekerjaan secara langsung. Akibatnya, penilaian kualitas peserta tender lebih banyak didasarkan pada dokumen yang dilampirkan saja sebagai bukti pengalaman pekerjaan, tanpa ada kewajiban untuk evaluasi lebih lanjut terhadap rekam jejak pekerjaan tersebut.

5. Aturan yang ketat dan tegas atas kontrak kritis

DPWH Filipina memiliki aturan ketat untuk paket pekerjaan yang mengalami kontrak kritis. Dalam Direct Order No. 193 Tahun 2016 yang ditandatangani oleh Secretary of DPWH dan dapat diakses dalam tautan https://www.dpwh.gov.ph/dpwh/sites/default/files/issuances/DO_193_s2016.pdf diberlakukan aturan sebagai berikut:

- a. Deviasi minus (*Negative Slippage*) mencapai 5% atau lebih dianggap sebagai “*Early Warning Stage*” dan penyedia jasa harus segera merancang program percepatan per dua mingguan untuk mengatasi masalah penyebab keterlambatan dengan merinci faktor 5 M (*money, manpower, materials, machinery* dan *management*) serta menetapkan target waktu penyelesaian kontrak kritis.
- b. Apabila deviasi minus masih berlanjut mencapai 10% atau lebih maka dianggap “*ICU Stage*” dan memerlukan perhatian intensif. Penyedia jasa harus memberikan program percepatan lebih detil dalam skala mingguan. Pemberi kerja juga sudah harus memperkirakan kemungkinan kontrak berakhir dan rencana berikutnya.

- c. Deviasi minus mencapai 15% atau lebih maka kontrak dianggap berakhir atau “*Terminal Stage*”. Sisa pekerjaan yang belum tuntas diambil alih oleh pemberi kerja dan akan diadakan administrasi lanjutan untuk menentukan penyedia jasa lain yang dianggap mampu serta negoisasi pembayaran pekerjaan yang sudah terlaksana dengan penyedia jasa yang putus kontrak.

Dengan ketentuan tersebut, penanganan kontrak kritis di DPWH Filipina dapat dikatakan lebih ketat dan tegas dibandingkan di Indonesia. Di Ditjen Bina Marga sendiri, berdasarkan SOP/UPM/DJBM-110 Rev:02, paket pekerjaan dianggap kontrak kritis apabila deviasi minus diatas 10% atau lebih (diatas 5% untuk paket dengan progress 70% keatas). Padahal di DPWH Filipina sudah masuk dalam fase “*ICU*” atau sudah gawat. Selain itu, proses penanganan paket kritis di Indonesia cukup Panjang karena harus melalui *Show Cause Meeting* (SCM) Tahap I, II dan III. Jika penyedia jasa gagal dalam rencana aksi hasil SCM Tahap I, mereka masih diberikan kesempatan untuk SCM Tahap II dan III, meskipun deviasi minus sudah semakin tinggi mencapai puluhan persen.

Pendekatan seperti ini memiliki kekurangan apabila seluruh tahapan SCM gagal dan akhirnya tetap mengalami putus kontrak, maka waktu yang telah terpakai menjadi cukup panjang. Akibatnya, ada risiko paket pekerjaan sulit diselesaikan pada Tahun Anggaran berjalan dan terpaksa dilanjutkan menggunakan alokasi Tahun Anggaran berikutnya serta menjadi paket mangkrak untuk beberapa waktu. Filipina memang masih negara berkembang dengan kondisi yang mirip Indonesia. Namun, upaya DPWH alias Kementerian PU Filipina dalam menerapkan standar yang ketat pada proses seleksi penyedia jasa untuk berkontrak dalam pekerjaan konstruksi patut diapresiasi. DPWH Filipina selain meninjau aspek formal seperti kelengkapan legalitas, dokumen teknis dan data finansial, juga memperhatikan aspek kemampuan likuiditas (*cashflow*) dan reputasi valid penyedia jasa di lapangan.

Beberapa praktik penting yang diterapkan di Filipina menjadi referensi bagi Ditjen Bina Marga PU sebagai upaya meminimalkan risiko paket-paket kritis bahkan sampai putus kontrak yang menjadi isu klasik setiap tahun. Secara garis besar terdapat 3 (tiga) langkah positif dalam memastikan keberhasilan pekerjaan konstruksi. Pertama, dokumen tender yang mensyaratkan kemampuan likuiditas calon penyedia jasa (NFCC), nilai Kemampuan Dasar yang lebih ketat dan bukti rekam jejak pengalaman pekerjaan sejenis yang dikonfirmasi langsung ke pemberi kerjanya.

Kedua, dokumen kontrak yang mensyaratkan aturan tegas dalam penanganan kontrak kritis. Ketiga, sistem penilaian CPES *Rating* yang berkesinambungan, transparan dan dapat diakses semua pihak. Kombinasi kebijakan tersebut membantu menyaring penyedia jasa yang memiliki kapasitas finansial memadai untuk mengerjakan proyek sehingga mereduksi masalah

klasik kontrak kritis akibat alasan *cash flow*. Selanjutnya, CPES *Rating* membangun sistem reputasi penyedia jasa yang andal, terpercaya serta memudahkan pengguna jasa. Verifikasi langsung kepada pemberi kerja sebelumnya memastikan bahwa penyedia jasa memang memiliki rekam jejak menuntaskan pekerjaan sejenis. Terakhir, aturan tegas terhadap kontrak kritis menjamin proyek selesai tepat waktu dan penyedia jasa serius mengerjakan paket terkontrak.

Bagi Indonesia, khususnya di lingkungan Ditjen Bina Marga, praktik-praktik tersebut dapat menjadi referensi penting dalam memperkuat sistem pengadaan jasa konstruksi. Dalam jangka panjang, harapannya adalah setiap tender jasa konstruksi di Bina Marga hanya diikuti oleh para penyedia jasa yang kompeten yang dibuktikan dari sistem *rating*, rekam jejak dan kemampuan finansial

Tabel 1 Ringkasan Perbandingan Sistem Pengadaan Jasa Konstruksi Indonesia vs Filipina

No.	Tolok Ukur	Indonesia	Filipina
1	K e m a m p u a n Likuiditas	- Secara umum tidak dievaluasi - Hanya dievaluasi pada paket-paket tertentu (dibiayai pinjaman asing)	Diberlakukan indikator NFCC untuk seluruh paket yang ditenderkan
2.	Kemampuan Dasar	KD = 3 x NPT (Nilai Pengalaman Tertinggi)	KD = 2 x NPT (Nilai Pengalaman Tertinggi)
3.	Sistem Rating Nasional	Mulai diberlakukan dalam SIKaP namun belum optimal	Diberlakukan CPES secara menyeluruh dan dapat diakses publik
4.	Verifikasi Rekam Jejak Pengalaman Proyek Sejenis	Pokja menilai dokumen bukti pengalaman saja, klarifikasi teknis bersifat opsional.	Pokja wajib verifikasi kepada pemberi kerja sebelumnya untuk membuktikan kualitas dan ketepatan waktu.
5.	Perlakuan terhadap kontrak kritis	- Kontrak kritis bila deviasi negatif $\geq 10\%$. - Diberlakukan SCM I, II, dan III. Apabila gagal SCM I maka lanjut SCM II dan seterusnya. - Pengakhiran kontrak dipertimbangkan bila gagal SCM III.	- Kontrak kritis bila deviasi negatif $\geq 5\%$, - Kontrak kritis stadium ICU bila deviasi negatif $\geq 10\%$, - Kontrak berakhir apabila deviasi negatif $\geq 15\%$,

Retak Refleksi pada Perkerasan Beraspal yang Menggunakan Lapis Fondasi Tanah Semen

Oleh: **Silvester Fransisko**

Balai Bahan dan Perkerasan Jalan

Kerusakan perkerasan jalan merupakan salah satu masalah yang seringkali terjadi di lapangan. Selain akan menghambat kegiatan perekonomian, kerusakan perkerasan jalan dapat menyebabkan ketidaknyamanan berkendara dan bahkan dapat menjadi penyebab terjadinya kecelakaan, terutama pada jalan-jalan bervolume lalu lintas tinggi.

Pada perkerasan jalan beraspal (*flexible pavement*) kerusakan yang terjadi, seperti retak lelah (*fatigue cracking*) maupun retak akibat kerusakan pada lapis fondasi atau tanah dasar.

Salah satu upaya untuk mengurangi kerusakan tersebut dengan menggunakan lapis fondasi tanah atau agregat yang distabilisasi dengan semen (*cement-stabilized base*, CSB). Lapisan ini memiliki sifatnya yang lebih kuat dan kaku, sehingga mampu mempertahankan kinerjanya pada kondisi jenuh dan area penyebaran beban lalu lintasnya yang lebih luas.

Lapis CSB dapat mengurangi retak lelah dan retak akibat kerusakan lapis fondasi atau tanah dasar. Namun, di balik keunggulannya, lapis CSB juga bisa menjadi sumber retak susut dan berpotensi menimbulkan retak refleksi pada lapis permukaan beraspal.

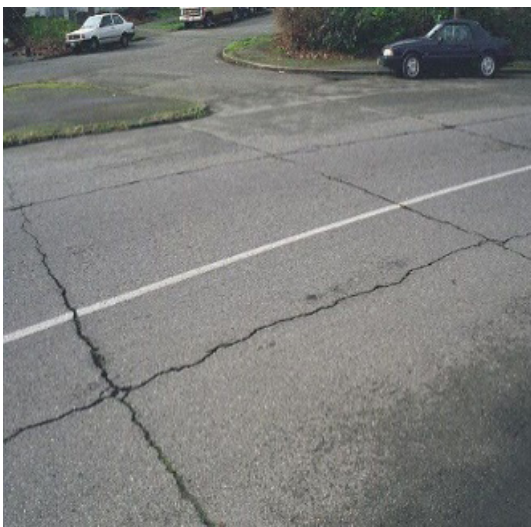
Dalam banyak kasus, retak refleksi awalnya hanya berupa retakan berukuran kecil lebar retakan kurang dari 3 mm dan tidak mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap kinerja perkerasan (Gambar 1).

Akan tetapi, apabila retakannya besar lebar retakan lebih dari 6 mm (Gambar 2), permukaan perkerasan menjadi lebih kasar dan dapat menyebabkan kerusakan perkerasan secara keseluruhan.

Retakan berukuran besar memungkinkan infiltrasi air dan mengakibatkan terjadi pemompaan (*pumping*) material lapis tanah dasar. Hasil dari sejumlah penelitian menunjukkan bahwa masalah pada lapis CSB adalah retakan akibat penyusutan dan infiltrasi air, menyebabkan hilangnya *interlock* antar agregat pada area retakan, pemisahan lapisan dan kerusakan perkerasan di sepanjang celah.



Gambar 1. Retak refleksi berukuran kecil



Gambar 2. Retak refleksi berukuran besar

Retak Susut

Retak susut adalah retak yang disebabkan oleh penyusutan. Pada lapis CSB, retak susut terjadi akibat proses hidrasi semen, perubahan suhu dan pengeringan. Retak susut umumnya berupa retak-retak melintang berukuran kecil pada interval 2,4 m – 6,0 m.

Pada area yang luas, seperti jalan dengan banyak lajur atau tempat parkir, retak susut dapat berbentuk blok persegi panjang dengan sisi persegi panjang 2,4 m – 6,0 m atau lebih.

Jumlah penyusutan terbesar terjadi pada awal umur rencana (dalam beberapa bulan pertama). Ketika lapis CSB mengalami penyusutan, gerakan penyusutannya dilawan oleh gesekan dari lapisan di bawahnya. Akibatnya, terjadi konsentrasi tegangan pada lapis CSB yang mengalami penyusutan tersebut. Karena lapis CSB memiliki kekuatan tarik yang terbatas, terutama sebelum tercapai masa perawatan yang cukup, gaya akibat penyusutan dapat menimbulkan retak. Retakan yang terjadi bukan disebabkan oleh lemahnya kekuatan struktural, tetapi lebih merupakan karakteristik alami dari lapis CSB.

Retak susut pada lapis CSB tidak berbahaya bagi struktur perkerasan selama retakannya kecil. Retakan kecil dengan *interlock* antar partikel yang baik tidak akan menimbulkan retak refleksi pada lapis permukaan beraspal. Kalaupun terjadi, retak refleksi pada lapis permukaan beraspal yang dihasilkan biasanya kecil juga.

Beberapa penelitian terdahulu sesuai yang dilaporkan Adaska dan Luhr, menunjukkan bahwa retak susut pada lapis CSB terutama disebabkan oleh penyusutan akibat pengeringan daripada akibat hidrasi semen atau perubahan suhu. Tingkat penyusutan akibat pengeringan ini dipengaruhi oleh sejumlah faktor, yaitu jenis material tanah, tingkat kepadatan dan perawatan, kadar semen dan perubahan kadar air.

Jenis Material Tanah

Lapis CSB yang menggunakan material tanah berbutir halus (misalnya tanah lempung) mengalami penyusutan yang lebih besar daripada menggunakan material tanah berbutir kasar (*granular*).

Namun retakan yang terjadi pada lapis CSB yang menggunakan material tanah berbutir halus tersebut biasanya lebih halus dengan jarak yang lebih dekat. Sebaliknya, pada lapis CSB yang menggunakan material tanah berbutir kasar, penyusutannya lebih kecil tetapi retakan yang terjadi lebih besar dengan jarak sekitar 2,4 m – 6,0 m atau lebih.

Material tanah berbutir halus memiliki luas permukaan yang lebih besar dan biasanya membutuhkan kadar air yang lebih tinggi untuk tujuan pemadatan dibandingkan dengan material tanah berbutir kasar. Selain itu, untuk mencapai kekuatan dan daya tahan yang memadai, kebutuhan semen untuk material tanah berbutir halus umumnya 2% – 5% lebih tinggi daripada yang dibutuhkan untuk material tanah berbutir kasar. Kedua faktor tersebut berkontribusi pada kebutuhan kadar air pemadatan yang lebih tinggi untuk tanah berbutir halus dan konsekuensinya, potensi penyusutan akibat pengeringan menjadi lebih tinggi.

Pemadatan

Material lapis CSB yang dipadatkan dengan baik mampu mengurangi potensi penyusutan yang lebih kecil. Hal ini karena partikel tanah/agregat dikemas erat atau padat dengan sedikit ruang untuk mengalami penyusutan tinggi. Pemadatan yang baik juga mengarah pada *interlock* antar partikel dan dukungan struktural yang lebih baik meskipun terjadi retakan. Sebaliknya, jika pemadatan yang kurang baik (tidak tercapai kepadatan sesuai yang diperlukan), lapisan akan memiliki rongga yang tinggi. Kondisi ini memberi ruang yang lebih tidak terbatas untuk menjalani gerakan sehingga menghasilkan penyusutan yang lebih tinggi dan retakan yang lebih lebar.

Penelitian Bhandari (1973), yang dikutip Adaska dan Luhr, menunjukkan bahwa metode pemadatan sangat berpengaruh terhadap tingkat penyusutan. Material lapis CSB yang dipadatkan sesuai metode pemadatan berat (*modified proctor*) mengurangi penyusutan lebih dari 50% dibandingkan dengan metode pemadatan ringan (*standard proctor*). Selain itu, kadar air optimum material lapis CSB yang dipadatkan sesuai metode pemadatan berat biasanya lebih kecil daripada kadar air optimum material lapis CSB yang dipadatkan sesuai metode pemadatan ringan, yang juga membantu mengurangi penyusutan.

Meningkatkan kepadatan dan mengurangi kadar air pemadatan dapat mengurangi penyusutan. Jumlah penyusutan lapis CSB paling kecil terjadi pada kondisi kepadatan tertinggi dan kadar air terendah dalam praktiknya, banyak spesifikasi mensyaratkan kepadatan minimal sekitar 95% dari kepadatan maksimum (metode pemadatan ringan), dengan kadar air hingga sedikit di atas kondisi optimum. Namun, jika pengendalian retak susut menjadi prioritas utama, standar ini sering diperketat, misalnya dengan meningkatkan kepadatan hingga sekitar 98% (metode pemadatan berat) dan membatasi kadar air agar tidak melebihi kondisi optimum.

Selain tingkat kepadatan, metode pemadatan juga berpengaruh terhadap potensi retak susut. Hasil pengujian di laboratorium menunjukkan bahwa material CSB yang dipadatkan dengan cara getar cenderung mengalami penyusutan lebih besar dibandingkan dengan metode statis atau remas.

Karena itu, jika pengendalian retak susut menjadi perhatian utama, penggunaan alat pemadat seperti *sheepsfoot roller* atau *pneumatic tyre roller* lebih disarankan dibandingkan alat pemadat getar (*vibratory roller*). Pendekatan ini dinilai lebih efektif dalam menjaga stabilitas lapisan dan mengurangi risiko retakan.

Perawatan

Setelah lapis CSB dihampar dan dipadatkan, material akan mulai kehilangan kadar air akibat proses penguapan. Jika hal ini tidak dikendalikan, material akan cepat mengering, sehingga penyusutan menjadi lebih besar. Selain itu, kurangnya air juga dapat menghambat proses hidrasi semen, yang pada akhirnya menurunkan kekuatan akhir lapisan. Pada material dengan kandungan tanah lempung tinggi, kondisi ini bisa diminimalkan dengan menjaga kelembapan selama masa perawatan. Kelembapan yang terjaga membantu proses reaksi antara tanah dan semen berjalan lebih optimal, sehingga potensi penyusutan dapat berkurang.

Periode perawatan yang lebih lama juga terbukti memberikan manfaat. Meskipun proses hidrasi semen dapat menimbulkan penyusutan tambahan, secara keseluruhan tingkat penyusutan justru menurun. Di sisi lain, perawatan yang lebih panjang mampu meningkatkan kekuatan tekan dan tarik lapisan CSB. Hasil penelitian terkait pengaruh kondisi perawatan terhadap pola retak lapis CSB, menunjukkan bahwa memperpanjang periode perawatan dapat menghasilkan retakan yang lebih kecil dengan jarak retak lebih dari dua kali dibandingkan dengan jarak retak dari lapis CSB yang dirawat sesuai standar. Jarak retakan yang lebih jauh dari lapis CSB yang diperpanjang periode perawatannya menunjukkan terjadi peningkatan kekuatan dan pengurangan penyusutan akibat pengeringan.

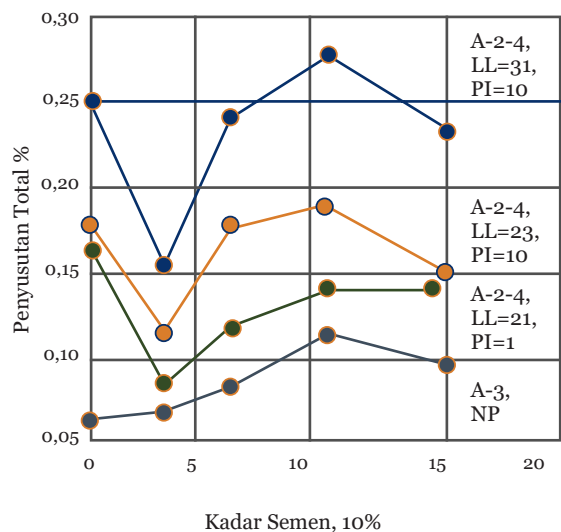
Kadar Semen

Meskipun hidrasi semen berkontribusi lebih sedikit terhadap penyusutan daripada kehilangan kadar air (pengeringan), jumlah pemakaian semen yang berlebihan dapat memperburuk retakan.

Hal ini terjadi dalam dua cara:

- Peningkatan jumlah pemakaian semen menyebabkan konsumsi air yang lebih besar selama proses hidrasi sehingga meningkatkan penyusutan, dan
- Jumlah pemakaian semen yang tinggi menyebabkan kekakuan dan kekuatan yang dihasilkan lebih tinggi (berlebihan) baik kekuatan tarik maupun kekuatan tekan. Kekuatan tarik yang lebih tinggi menghasilkan retakan yang berjarak lebih jauh namun ukuran retakan individunya lebih lebar.

Gambar 3 menunjukkan bahwa jumlah semen yang digunakan berpengaruh langsung terhadap tingkat penyusutan. Penelitian George (1968) yang dikutip oleh Adaska dan Luhr memperlihatkan bahwa untuk tanah berpasir non-plastis (A-3), penambahan 3% semen mengurangi penyusutan tetapi kemudian meningkat kembali sesuai meningkatnya jumlah pemakaian semen.



Gambar 3. Pengaruh semen terhadap penyusutan

Retak Refleksi dan Pengendalian

Retakan pada lapis fondasi, apa pun penyebabnya, dapat mengakibatkan terjadi konsentrasi tegangan dan retak pada lapis permukaan beraspal. Retakan pada lapis permukaan beraspal ini mengikuti pola yang sama dengan retakan pada lapis fondasi, sehingga dikenal sebagai retak refleksi (Gambar 4). Satu-satunya cara untuk memastikan bahwa retakan pada lapis permukaan beraspal merupakan retak refleksi, diperlukan pengujian dengan pengambilan contoh inti (*core*). Melalui cara ini, kondisi retakan dapat diamati secara langsung pada lapis fondasi dan lapisan aspal di titik yang sama. Jika pola retaknya serupa, maka dapat dipastikan bahwa retakan tersebut merupakan retak refleksi.



Gambar 4. Proses pembentukan retak refleksi pada lapis permukaan beraspal

Telah dijelaskan sebelumnya, lapis CSB umumnya mengalami retak susut akibat proses hidrasi semen, perubahan suhu dan pengeringan. Retak susut pada lapis CSB tidak selalu mengakibatkan retak refleksi pada lapis permukaan beraspal, dan walaupun terjadi, retak refleksi pada lapis permukaan beraspal yang dihasilkan biasanya kecil jika retakan pada lapis CSB kecil.

Lalu, apakah retak refleksi yang terjadi selalu merupakan masalah? Jawabannya tidak selalu. Dampaknya sangat bergantung pada ukuran retakan yang terjadi. Jika retak refleksi yang terjadi berukuran kecil (kurang dari 3 mm), transfer beban yang cukup biasanya tersedia melalui *interlock* antar partikel untuk menjaga

struktur perkerasan tetap berfungsi. Karena retakannya kecil, intrusi air ke lapisan fondasi dan tanah dasar juga kecil atau sedikit dan umumnya tidak bermasalah. Namun, jika retak refleksi yang terjadi berukuran besar (lebih dari 6 mm), retakan tersebut dapat mengakibatkan transfer beban yang buruk dan menyebabkan terjadi kerusakan struktur. Selain itu, retak refleksi yang besar pada lapis permukaan beraspal memberikan jalan bagi air untuk memasuki perkerasan. Hal tersebut dapat mengakibatkan permukaan perkerasan menjadi lebih kasar, kerusakan (*faulting*) lapis fondasi atau *pumping* dari material tanah dasar. Oleh karena itu, retakan yang besar pada lapis CSB harus dihindari untuk memastikan perkerasan tetap kuat dan bertahan lama, dan permukaannya tetap halus.

Secara umum, metode atau cara pengendalian retak refleksi akibat retak pada lapis CSB dibagi menjadi dua kategori, yaitu mengurangi retakan besar pada lapis CSB dan menyediakan lapisan bahan bersifat fleksibel di antara lapis CSB dengan lapis permukaan beraspal.

Mengurangi Retakan Besar pada Lapis CSB

Penggunaan lapis CSB telah diterapkan pada ratusan ribu hingga jutaan kilometer jalan dan terbukti memberikan kinerja yang sangat baik. Namun, seperti halnya pekerjaan konstruksi lainnya, keberhasilan tersebut sangat bergantung pada metode pelaksanaan yang tepat serta pengendalian kualitas yang baik selama proses pembangunan. Dengan prosedur yang benar, lapis CSB dapat berfungsi optimal sekaligus meminimalkan risiko munculnya retakan lebar yang dapat memengaruhi kinerja perkerasan.

Prosedur pelaksanaan dan pengendalian kualitas menjadi kunci dalam memastikan hasil yang optimal. Salah satu hal penting yang perlu diperhatikan adalah proses stabilisasi harus dilakukan dalam waktu yang tepat, idealnya tidak lebih dari dua jam, agar semen belum mengalami hidrasi sebelum pemadatan akhir selesai. Dengan demikian, kualitas lapisan dapat tetap terjaga sesuai yang diharapkan. Adapun prosedur tersebut:

a) Pemadatan material lapis CSB sebaiknya dilakukan pada kadar air optimum atau sedikit di bawahnya. Jika kandungan air terlalu tinggi, material akan lebih mudah mengalami pengeringan berlebih yang berpotensi menimbulkan retak susut yang besar.

Karena itu, kadar air optimum harus ditentukan berdasarkan hasil pengujian pemadatan di laboratorium. Idealnya, kadar air material lapis CSB selama pemadatan harus berada dalam kisaran nol hingga sedikit di bawah (minus 2%) dari kadar air optimum.

b) Mengurangi persentase tanah lempung dalam material CSB. Karena tanah lempung menampung lebih banyak air dan umumnya dipadatkan pada kadar air yang lebih tinggi, maka potensi retak susutnya lebih tinggi.

Pencampuran dengan material berbutir (*granular*) dapat membantu mengurangi persentase tanah lempung dalam material lapis CSB. Untuk kondisi dimana penggunaan tanah lempung tidak dapat dihindari dan pencampuran dengan bahan tambah (aditif) mungkin mahal, pemantauan kadar air selama pemadatan sangatlah penting.

c) Jumlah pemakaian semen yang tepat. Semen yang cukup harus ditambahkan ke dalam material tanah untuk mencapai sifat teknik yang diinginkan. Pemakaian semen yang berlebihan tidak diperlukan, tidak ekonomis, dan dapat menyebabkan retak tambahan.

Pengujian laboratorium harus dilakukan untuk mengevaluasi sifat teknik yang diinginkan, termasuk pengujian kekuatan tekan bebas, pengujian ketahanan terhadap *wet-dry*, dan batas Atterberg (batas cair, batas plastik, indeks plastisitas).

Umumnya, kekuatan tekan bebas setelah proses perawatan 7 hari sekitar 21 – 28 kg/cm² memberikan daya dukung, daya tahan, dan sifat penyusutan yang baik.

d) Menggunakan bahan tambah (aditif). Berbagai bahan tambah, seperti gipsum, kapur dan *fly ash*, termasuk bahan-bahan kimia non konvensional (bahan kimia yang diproduksi khusus sebagai aditif untuk campuran tanah dengan semen), dapat digunakan untuk mengurangi potensi penyusutan lapis CSB. Penggunaan bahan tambah dapat mengurangi kebutuhan air, membantu dalam proses pencampuran, memperpanjang waktu pencampuran, dan dapat mengurangi jumlah pemakaian semen.

e) Pemadatan material lapis CSB yang memadai. Material lapis CSB yang dipadatkan dengan baik (sampai mencapai tingkat kepadatan yang lebih tinggi, minimum 98% dari kepadatan kering maksimum laboratorium mengurangi potensi penyusutan karena partikel tanah/agregat dikemas erat atau padat dengan sedikit ruang untuk mengalami penyusutan tinggi.

Pemadatan yang baik juga mengarah pada *interlock* antar partikel dan dukungan struktural yang lebih baik jika retakan berkembang. Selain itu, pemadatan material lapis CSB dengan energi pemadatan yang lebih tinggi (sesuai metode pemadatan berat), dan dengan alat pemadat kaki kambing (*sheepsfoot roller*) atau alat pemadatan roda karet (*pneumatic tyre roller*) juga dapat mengurangi potensi penyusutan.

f) Melakukan perawatan segera setelah pemadatan akhir. Permukaan lapis CSB harus tetap lembab dengan cara disiram air sampai diberikan penutup seperti lembaran plastik, terpal, aspal emulsi (*prime coat*) atau *chip seal*. Lapis CSB tidak boleh dibiarkan mengering sepenuhnya, bahkan untuk waktu yang singkat. Setelah diberi lapis penutup, penyiraman air tidak diperlukan lagi.

g) Menunda penghamparan lapis permukaan beraspal. Jika penghamparan lapis permukaan aspal ditunda untuk jangka waktu tertentu (14 hingga 28 hari), memungkinkan lebih banyak waktu untuk setiap retak susut berkembang. Penghamparan lapis permukaan beraspal setelah sebagian besar penyusutan terjadi dapat mengakibatkan retak susut berkurang dan/atau lebih tipis pada lapis permukaan beraspal karena aspal akan cenderung menutupi retakan yang sudah terbentuk.

Cara ini dapat dikombinasikan dengan penggunaan *chip seal* sesuai poin f). *Chip seal* dapat diterapkan segera setelah lapis CSB dipadatkan atau paling lambat 1 hari setelah dipadatkan, untuk menutup permukaan lapis CSB dan menyediakan permukaan lapis CSB yang dapat dilewati lalu lintas. Lapis permukaan beraspal kemudian dapat dihamparkan berbulan-bulan (atau bahkan bertahun-tahun) setelah *chip seal* digunakan, tergantung pada lalu lintas dan tingkat keausan permukaan.

h) *Precrack*. Metode ini masih relatif baru, tetapi telah menunjukkan hasil yang sangat baik hingga saat ini. Prosedurnya adalah melakukan pemadatan kembali lapis CSB dengan beberapa lintasan *vibro roller*, 1 – 2 hari setelah pemadatan akhir, (Gambar 5).

Ini menyediakan jaringan retak rambut yang berjarak dekat pada lapis CSB, untuk menghilangkan tegangan penyusutan pada awal umur rencana dan memberikan pola retak yang akan meminimalkan pengembangan retak susut yang lebih luas. Selanjutnya, karena *precrack* dilakukan segera setelah pemadatan akhir, retak mikro tidak akan mempengaruhi kapasitas struktural perkerasan secara keseluruhan karena retakan akan terkendali dan lapis CSB akan terus meningkat kekuatannya seiring waktu.



Gambar 5. Metode *precrack* dan tipikal jaringan retak rambut

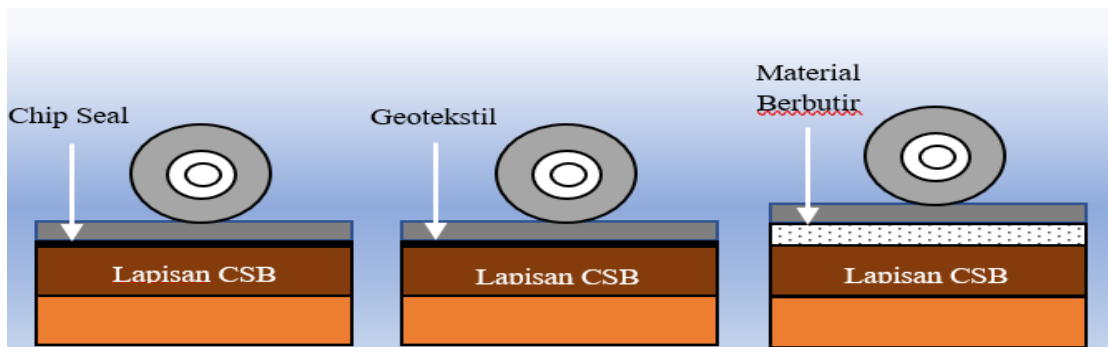
Menyediakan Lapisan Peredam Tegangan

Metode lain yang dapat digunakan untuk mengendalikan retak refleksi adalah menyediakan lapisan bahan bersifat fleksibel di antara lapis CSB dengan lapis permukaan beraspal. Lapisan ini berfungsi meredam konsentrasi tegangan yang dihasilkan dari retakan pada lapis CSB (Gambar 6). Beberapa metode yang umum digunakan antara lain:

a) Lapisan *chip seal*. Fleksibilitas tambahan dari lapisan *chip seal* akan membantu mengurangi konsentrasi tegangan pada lapis permukaan beraspal. Lapisan *chip seal* ini juga menyediakan permukaan sementara yang sangat baik selama konstruksi untuk pengendalian lalu lintas.

b) Geotekstil. Geotekstil memberikan fleksibilitas dan bertindak untuk mencegat atau menahan retakan tanpa membiarkannya melewati geotekstil tersebut.

c) Material berbutir tanpa pengikat dengan ketebalan 50 – 100 mm. Penggunaan material berbutir tanpa pengikat ini menambah struktur tambahan dalam perkerasan, dan akan mencegat propagasi retakan hingga ke lapisan permukaan beraspal.



Gambar 6. Desain penggunaan lapis peredam tegangan

Penanganan Retak Refleksi

Lalu apa yang bisa dilakukan apabila retak refleksi tetap terjadi walaupun telah dilakukan upaya pengendalian? Tidak semua retak refleksi akibat retak susut pada lapis SCB memerlukan penanganan. Untuk jalan-jalan bervolume lalu lintas rendah hingga sedang,

retak refleksi berukuran kecil (< 3 mm) pada lapis permukaan beraspal tidak mempunyai pengaruh yang cukup signifikan terhadap kinerja perkerasan, dan dapat dibiarkan tanpa tindakan atau penanganan khusus. Namun, apabila retak refleksi lebih luas atau lebih besar (> 6 mm), atau jika perkerasan mendukung volume lalu lintas yang tinggi, penutupan (*sealing*) retak refleksi harus dilakukan,

antara lain dengan menggunakan aspal emulsi, untuk mengurangi intrusi air ke lapis fondasi dan tanah dasar, dan apabila retakan pada lapis CSB memburuk, prosedur perbaikan yang lebih luas akan diperlukan, termasuk pembongkaran atau penghancuran bagian sambungan yang rusak dan mengisinya kembali dengan bahan yang sesuai, pembongkaran dan penggantian material CSB pada lokasi retak, dan perbaikan tanah dasar jika terjadi intrusi air dan *pumping*.

Retak Terkendali, Jalan Tetap Andal

Retak susut pada lapis CSB merupakan hal yang wajar terjadi akibat proses hidrasi semen, perubahan suhu dan pengeringan. Namun, tidak selalu mengakibatkan retak refleksi pada lapis permukaan beraspal. Jika retakan refleksi yang dihasilkan tidak selalu menimbulkan kerusakan pada perkerasan secara keseluruhan.

Masalah akan muncul ketika retak refleksi berukuran besar (> 6 mm), karena menyebabkan permukaan perkerasan menjadi lebih kasar dan intrusi air melalui retakan dapat merusak lapis fondasi dan/atau *pumping* dari material tanah dasar.

Oleh karena itu, prosedur pelaksanaan pekerjaan lapis CSB yang tepat, desain yang tepat dan kontrol kualitas melalui strategi meminimalkan retak dan jika diperlukan dilakukan *sealing*, dapat mengurangi pengaruh retak refleksi terhadap kinerja perkerasan menggunakan lapis fondasi tanah semen.

George, K.P. (1968). *Shrinkage characteristics of soil-cement mixtures. Highway Research Record*, 255, 42–58.

// Penggunaan lapis CSB telah diterapkan pada ratusan ribu hingga jutaan kilometer jalan dan terbukti memberikan kinerja yang sangat baik.



Pembangunan infrastruktur bukan
sekedar membangun jalan dan jembatan

// tetapi membangun harapan
serta membuka kesempatan bagi
kesejahteraan rakyat

-Ir. Soekarno-

ARTIKEL TOKOH

Merangkai Jalan Tol dan Mendorong Inovasi Pembiayaan Infrastruktur, Kisah Dr. Herry Trisaputra Zuna

Oleh: Dr. Ir. Alfa Adib Ash Shiddiqi, S.T., M.Sc.

Direktorat Jalan Bebas Hambatan

Jejak Pemikiran dan Dedikasi Seorang Arsitek Pembiayaan Jalan Tol Indonesia

Di balik bentangan jalan tol yang kini menghubungkan kota-kota dan menggerakkan perekonomian nasional, ada kerja panjang yang sering luput dari perhatian. Bukan hanya soal beton dan aspal, tetapi juga tentang perumusan kebijakan, desain pembiayaan, hingga keberanian mengambil keputusan strategis. Di sanalah peran seorang tokoh kunci balik transformasi tersebut, seorang insinyur teknik sipil dengan pandangan jauh melampaui aspek teknis.

Karier profesionalnya dimulai sebagai insinyur teknik sipil bidang transportasi, lalu berkembang dengan bekal ilmu ekonomi dan manajemen. Kombinasi ini membentuk cara pandangnya yang unik terhadap infrastruktur. Baginya infrastruktur bukan sekadar objek teknis, melainkan instrumen keadilan sosial dan pengungkit pertumbuhan ekonomi.

Sejak awal perjalanan kariernya, ia terlibat langsung dalam berbagai proyek strategis berskala besar yang didanai oleh pinjaman luar negeri. Mulai dari Jembatan Cikapayang di Bandung, proyek *Urban Arterial Road Improvement* di Jabodetabek, Jembatan Suramadu yang menghubungkan Jawa dan Madura, hingga Jalan Tol Akses Tanjung Priok.

Perjalanan tersebut, menumbuhkan kesadaran mendalam bahwa ketimpangan wilayah di Indonesia tidak terlepas dari keterbatasan infrastruktur. Dari sinilah tumbuh keyakinan bahwa teknik sipil bukan sekadar disiplin ilmu, melainkan alat transformasi nasional. Infrastruktur, baginya, adalah fondasi konektivitas sekaligus kunci pemerataan pembangunan di Indonesia.

Pendidikan sebagai Fondasi Cara Berpikir

Perjalanan intelektualnya banyak dibentuk oleh pengalaman belajar di Institut Teknologi Bandung (ITB). Di kampus ini, ia tidak hanya mempelajari teknik sipil, tetapi juga cara berpikir sistemik dan berbasis bukti.

Namun perjalanan akademiknya tidak tanpa tantangan. Ia menyelesaikan pendidikan Teknik Sipil pada 1992, Manajemen pada 1993, dan Magister Sistem dan Teknik Jalan Raya pada 1994, di saat banyak rekan seangkatannya telah bekerja penuh waktu.

Keinginannya untuk melanjutkan studi doctoral di luar negeri harus berhadapan dengan realitas



Baginya, sebuah solusi teknik yang baik harus memenuhi tiga syarat utama: layak secara teknis, *feasible* secara ekonomi, dan dapat diterima secara institusional.

Disiplin berpikir ini kemudian menjadi dasar dalam setiap keputusan yang diambilnya, terutama dalam merancang kebijakan pembiayaan infrastruktur. Ia menolak dogmatisme, memilih kebijakan berbasis data, dan selalu terbuka terhadap inovasi.

birokrasi dan tuntutan pekerjaan sebagai ASN di Kementerian Pekerjaan Umum. Keputusan realistis pun ia ambil dengan menempuh program doctoral di Universitas Indonesia. Namun, tantangan sesungguhnya bukan hanya soal lokasi studi, melainkan bagaimana menjembatani teori global dengan realitas Indonesia.

Dalam disertasinya, ia mengembangkan model kualitas pelayanan jalan tol yang lebih ringkas namun representatif terhadap kepentingan pengguna. Model tersebut dirancang SMART (*Specific, Measurable, Achievable, Relevant, dan Time-based*) agar mudah diukur dan meminimalkan potensi sengketa. Model ini menjadi semakin relevan seiring meningkatnya tuntutan pengguna jalan tol dan kebutuhan dasar penyesuaian tarif yang adil dan transparan.

Dari Operasi ke Keberlanjutan

Perjalanannya dari Badan Pengatur Jalan Tol (BPJT) menuju peran strategis di bidang pembiayaan infrastruktur mengubah perspektifnya secara fundamental. Jika di BPJT fokus utamanya adalah *delivery* dan operasi, maka di ranah pembiayaan fokusnya bergeser pada *sustainability* dan scalability.

Ia menyadari bahwa persoalan utama infrastruktur Indonesia bukan semata kekurangan proyek, melainkan keterbatasan desain pembiayaan yang mampu menarik modal jangka panjang secara berkelanjutan. Bagi dirinya, kunci utama yang selalu dipegang dalam setiap pengambilan keputusan adalah kepastian dan keberlanjutan. Menurutnya, investor, publik, dan pemerintah sama-sama membutuhkan kepastian, baik dari sisi regulasi, pendapatan, maupun tata kelola. Kebijakan yang baik adalah kebijakan yang mampu membangun kepercayaan (*trust*), sehingga kerjasama dapat berlangsung berkelanjutan.

Salah satu capaian yang paling ia banggakan adalah penguatan ekosistem jalan tol nasional melalui kombinasi kebijakan inovatif. Mulai dari *Viability Gap Funding* dalam bentuk Dukungan Konstruksi (Dukon), penjaminan pemerintah, hingga pembiayaan kreatif.

Pendekatan ini mentransformasi jalan tol dari proyek berbasis APBN menjadi *platform* investasi jangka panjang. Dalam kurun waktu lima tahun, pengembangan jalan tol mencapai 1.850 km dengan 1.250 km di antaranya berhasil diselesaikan, menjadi sebuah pencapaian bersejarah.

Terobosan penting lainnya adalah pembentukan Lembaga Manajemen Aset Negara (LMAN) yang memberikan talangan dana pengadaan tanah, dikombinasikan dengan skema *land capping*. Ia juga terlibat dalam kebijakan penugasan BUMN (khususnya PT Hutama Karya) untuk membangun Jalan Tol Trans Sumatera.



Meski secara finansial belum sepenuhnya layak, proyek ini dipandang sebagai investasi jangka panjang untuk mendorong pertumbuhan ekonomi regional. Di sisi lain, inovasi pembiayaan seperti *cross-subsidy*, Pembayaran Berkala Berbasis Layanan (PBBL), dan skema lainnya menjadi kunci keberhasilan program ini.

Tak hanya pada aspek pembiayaan, ia juga mendorong perubahan di level operasional. Salah satunya adalah percepatan elektronifikasi transaksi jalan tol. Perubahan dari pembayaran tunai ke sistem uang elektronik secara penuh, beserta integrasi sistem yang menghapus transaksi ganda.

Inovasi tersebut berhasil diselesaikan hanya dalam lima bulan dan secara signifikan mengurangi kemacetan di gerbang tol. Jika transformasi Kereta Api identik dengan sosok Ignasius Jonan, maka transformasi transaksi elektronik jalan tol akan diingat menjadi salah satu *legacy* Herry Trisaputra Zuna.

Menatap Masa Depan Infrastruktur

Dari pengalamannya, ia menarik satu pelajaran besar, infrastruktur adalah kerja kolaboratif. Tanpa keselarasan antara pemerintah, badan usaha jalan tol, investor, dan masyarakat, keberlanjutan proyek mustahil dicapai.

Ia juga mencermati perubahan iklim investasi jalan tol dalam satu dekade terakhir yang semula berorientasi *project-driven*, kini bergeser menjadi *portfolio-driven*. Investor kini memandang jalan tol sebagai aset jangka panjang, bukan sekadar proyek konstruksi.

Ke depan, ia meyakini *Availability Payment* (AP), *Minimum Revenue Guarantee* (MRG), *blended finance*, dan sekuritisasi aset eksisting sebagai instrumen pembiayaan yang paling siap untuk *di-scale-up*. Jalan tol harus diperlakukan sebagai *financial asset*, bukan hanya *physical asset*. Pengelolaan portofolio, *refinancing*, dan *value capture* akan menjadi kunci masa depan.



Tiga tren utama yang ia soroti adalah integrasi ESG dan *green financing*, digitalisasi (termasuk MLFF, data trafik, *preventive maintenance*, dan AI), serta *asset recycling* dan *securitization*. Dalam konteks ini, peran *sovereign fund* dan lembaga pembiayaan khusus menjadi krusial sebagai *anchor investor* dan *risk absorber*.

Pesan Kepemimpinan dan Generasi Muda

Dalam kepemimpinan, ia memegang teguh tiga prinsip yakni integritas, keberanian mengambil keputusan, dan kesediaan mendengar. Menurutnya, seorang pemimpin harus siap tidak populer demi keputusan yang benar.

Kepada generasi muda Kementerian PUPR, pesannya jelas, “kuasai aspek teknis, finansial, dan kebijakan sekaligus. Infrastruktur masa depan bersifat lintas disiplin. Berpikirlah global, namun selalu bertindak kontekstual untuk Indonesia”.

Dari perjalanan panjangnya, satu hal menjadi terang adalah membangun infrastruktur bukan hanya soal membangun jalan, tetapi tentang membangun harapan, keadilan, dan masa depan bangsa.

“ Dari pengalamannya, ia menarik satu pelajaran besar, infrastruktur adalah kerja kolaboratif.



BINEKAPEDIA

PENGUNAAN ALAT DCP UNTUK PENGUJIAN KEKUATAN PEKERJAAN STABILISASI TANAH

Oleh: Silvester Fransisko

Balai Bahan dan Perkerasan Jalan

Dalam pekerjaan jalan, pemadatan tanah menjadi tahap penting untuk memperbaiki atau meningkatkan kekuatan tanah yang dipadatkan tersebut. Selama ini, kualitas hasil pemadatan dinilai dari sifat fisik seperti tingkat kepadatan, kadar air, dan ketebalan.



Gambar 1. Pemadatan tanah dengan *vibro roller*

Namun, seiring perkembangan teknologi, mulai bergeser. Metode penentuan kualitas yang diterapkan tidak lagi berfokus pada sifat fisiknya tetapi pada sifat teknik (kekuatan) yang dihasilkan. Untuk itu, telah dikembangkan beberapa metode pengujian yang lebih representatif dalam menentukan kekuatan lapisan tanah yang telah dipadatkan, salah satunya pengujian dengan menggunakan alat DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) atau disebut pengujian DCP.

Di Indonesia, pengujian DCP untuk menentukan kekuatan lapisan tanah yang telah dipadatkan, khususnya pada pekerjaan stabilisasi tanah, ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Seksi 5.4. Namun, penerapannya di lapangan masih belum optimal. Salah satu kendalanya adalah belum tersedia model yang jelas untuk menghubungkan nilai UCS (*Unconfined Compressive Strength*) dengan hasil pengujian DCP yang dinyatakan dengan SPR (*Scala Penetration Rate*), serta terbatasnya pemahaman tentang prosedur penentuan hubungan antara UCS dengan SPR.

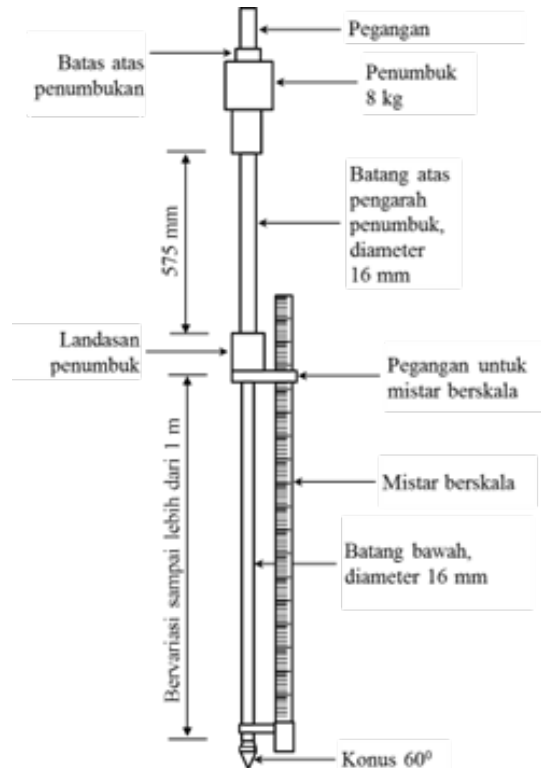
Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut untuk memperjelas penentuan hubungan antara UCS dan SPR, sehingga pengujian DCP dapat digunakan lebih efektif dalam pekerjaan stabilisasi tanah.

Sejarah Pengembangan Alat DCP

Sejak awal tahun 1930-an, uji CBR (*California Bearing Ratio*) dikembangkan untuk pengujian kekuatan tanah di laboratorium, dan digunakan untuk desain perkerasan. Hasil pengujian CBR di laboratorium tidak mencerminkan kondisi sebenarnya yang terjadi di lapangan. Untuk mengatasi hal tersebut, dikembangkan metode pengujian CBR langsung di lapangan menggunakan alat CBR *portable*. Sayangnya, di lapangan, pengujian ini tidak selalu mudah dilakukan. Prosesnya sulit, memakan waktu, dan sering kali membutuhkan truk atau alat berat lainnya sebagai penahan beban penetrasi. Belum lagi, lokasi pengujian harus memiliki akses yang memadai. Akibatnya, pengujian ini jarang digunakan secara langsung, meskipun masih menjadi prosedur desain perkerasan.

Keterbatasan inilah yang kemudian mendorong pengembangan alat DCP, yaitu alat yang dirancang untuk menentukan secara cepat CBR tanah di lapangan. Penggunaan DCP pertama kali diperkenalkan oleh Scala (1956) untuk menentukan CBR lapangan dari tanah kohesif. Metode ini kemudian dikembangkan lebih lanjut di Afrika Selatan dan semakin luas penggunaannya setelah penyempurnaan oleh Kleyn (1975). Sejak saat itu, penelitian ekstensif penggunaan alat DCP telah dilakukan. Sejumlah uji komparatif antara hasil uji DCP dengan nilai CBR, baik di laboratorium maupun di lapangan juga telah dilakukan. Hal tersebut memungkinkan pengembangan model dan korelasi untuk memprediksi nilai CBR lapangan. Sampai saat ini, alat DCP dan penggunaannya telah ditetapkan dalam berbagai standar maupun pedoman. Alat DCP sesuai ASTM D 6951 ditunjukkan pada Gambar 2.

Alat DCP serupa digunakan TRL (*TRL Overseas Road Note 31, 1993*). Konus 60° digunakan dengan pertimbangan lebih kuat dan tahan lama, dapat digunakan untuk tanah berbutir halus dan berbutir kasar (*granular*) dan tanah yang distabilisasi dengan kekuatan yang relatif rendah atau yang dimodifikasi. Alat DCP ini tidak dapat digunakan untuk tanah yang distabilisasi dengan kekuatan tinggi atau material tersemenisasi atau material berbutir yang mengandung sejumlah material tertahan ayakan 50 mm. Di Indonesia, alat DCP ditetapkan dalam Pedoman Cara Uji *California Bearing Ratio* (CBR) dengan *Dynamic Cone Penetrometer* (Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum No. 04/SE/M/2010). Dalam pedoman tersebut ditetapkan dua jenis konus, yaitu konus 60° dan konus 30° . Konus 60° digunakan untuk tanah berbutir halus dan konus 30° digunakan untuk tanah berbutir kasar.



Gambar 2. Alat DCP sesuai ASTM D 6951

Untuk pengujian DCP ini, penumbuk dijatuhkan secara bebas dari ketinggian 575 mm untuk mendorong atau menekan konus yang dipasang pada ujung batang bawah alat DCP ke dalam lapisan tanah yang diuji kekuatannya. Jumlah tumbukan (pukulan) dan penetrasi konus dicatat untuk setiap pengujian, untuk menghitung laju penetrasi dalam mm/tumbukan, dan selanjutnya diplotkan dalam bentuk kurva hubungan antara jumlah tumbukan dan penetrasi.

Laju penetrasi rata-rata dapat digunakan untuk menentukan atau memperkirakan nilai CBR dengan menggunakan korelasi-korelasi yang tersedia. Selain untuk menentukan nilai CBR, hasil pengujian DCP juga dapat digunakan untuk memprediksi jumlah dan ketebalan dari masing-masing lapisan tanah yang diuji dengan mengintepretasi kurva hubungan antara jumlah tumbukan dan penetrasi. Yang harus diperhatikan dalam pengujian DCP ini adalah bahwa alat harus dipegang vertikal dan penumbuk diangkat dengan hati-hati sampai menyetuh batas atas penumbukan, tetapi tidak sampai alat terangkat. Penumbuk dijatuhkan secara bebas tanpa bantuan tangan.

Sejalan dengan perkembangan teknologi, pengujian DCP tidak terbatas pada desain perkerasan. Pengujian ini dimanfaatkan untuk penyelidikan awal, perbaikan dan peningkatan jalan tanpa penutup aspal (jalan berkerikil), pengujian dan pengendalian mutu, rehabilitasi perkerasan, investigasi dan audit, penelitian, evaluasi kinerja perkerasan dan evaluasi pengaruh perubahan kadar air material perkerasan jalan. Setiap penerapan tersebut memiliki karakteristik berbeda, sehingga tetap membutuhkan penelitian tersendiri.

Penggunaan Alat DCP untuk Pengujian Kekuatan Lapisan Material Tanah yang Distabilisasi dan Kendala

Penggunaan alat DCP untuk pengujian kekuatan lapisan tanah yang distabilisasi ditetapkan dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Seksi 5.4. Namun belum sepenuhnya dapat diterapkan, salah satu penyebab utamanya adalah belum tersedianya model atau persamaan yang menunjukkan hubungan antara UCS dengan SPR yang digunakan.

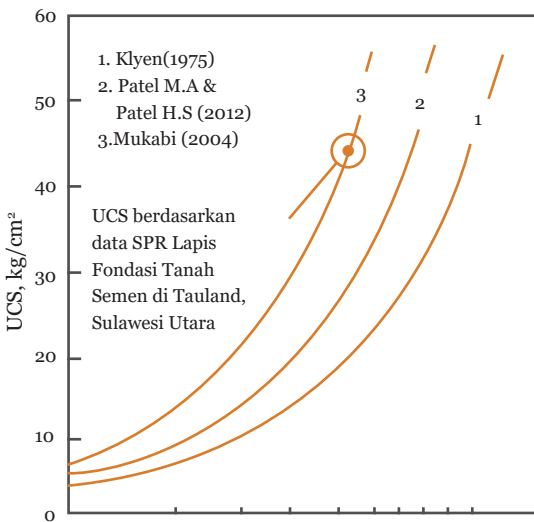
Meskipun, beberapa persamaan hubungan antara UCS (kg/cm^2) dengan SPR (tumbukan/mm) telah dikembangkan (lihat persamaan (1), (2) dan (3)). Namun, persoalannya terletak pada pemilihan rumus yang tepat. Dengan nilai SPR yang sama, hasil perhitungan menggunakan persamaan yang berbeda bisa menghasilkan nilai UCS yang cukup jauh berbeda. Kondisi ini tentu menimbulkan keraguan dalam menentukan kekuatan dari lapisan tanah yang telah distabilisasi tersebut.

Pada pekerjaan percobaan lapangan stabilisasi tanah dengan semen untuk lapis fondasi (lapis fondasi tanah semen) di Talaud Provinsi Sulawesi Utara, menunjukkan bahwa persamaan Mukabi (2004), hasil nilai UCS yang diperoleh dari korelasinya dengan SPR lebih sesuai. Hasilnya mendekati nilai UCS pengujian laboratorium terhadap contoh yang diambil dari hasil pencampuran di lapangan, yaitu sebesar $41,60 \text{ kg/cm}^2$ (Gambar 3).

Meski demikian, karena data yang tersedia sangat terbatas, persamaan Mukabi (2004) belum dapat dijadikan acuan untuk menentukan kekuatan pekerjaan selanjutnya. Karena itu, untuk penggunaan pengujian DCP pada pekerjaan stabilisasi tanah di Indonesia,

diperlukan kajian khusus sesuai kondisi dan metode pengujian DCP maupun UCS yang berlaku.

- **Kleyn (1975):** $UCS = 29SPR^{1,09}$ (1)
- **Mukabi (2004) dalam Mukabi (2016):**
 $UCS = 73,4SPR^{1,15}$ (2)
- **Patel M.A dan Patel H.S (2012):** $UCS = 43,49SPR^{1,09}$ (3)



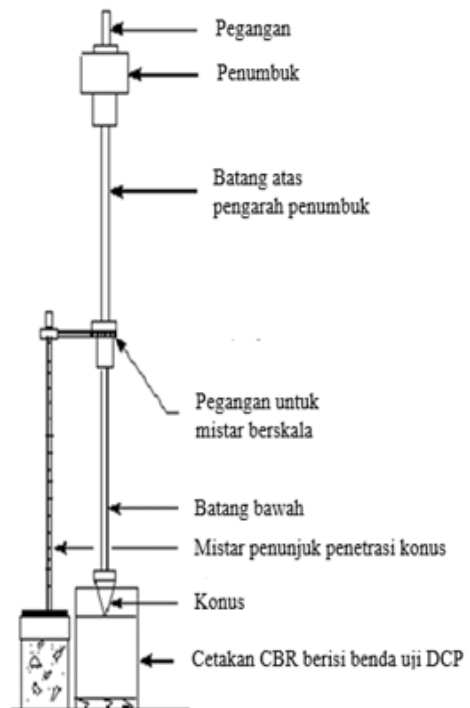
Gambar 3. Kurva hubungan antara UCS dengan SPR

Metode Pengembangan Korelasi antara UCS dengan SPR yang Diusulkan

Untuk menjembatani hubungan antara nilai UCS dan SPR, pendekatan yang digunakan mengacu pada metode Seyman (2003), yang dalam kajiannya mengembangkan korelasi antara CBR dengan DCP. Metode ini kemudian diadaptasi untuk menentukan hubungan antara UCS dengan SPR.

Pengujian dilakukan di laboratorium dengan menggunakan berbagai variasi jenis tanah yang dicampur dengan semen dan air, lalu dipadatkan sesuai kebutuhan. Untuk pengujian DCP, campuran dipadatkan di dalam cetakan CBR (cetakan silinder berdiameter sekitar 150 mm) mengikuti prosedur sesuai SNI 1744 : 2012.

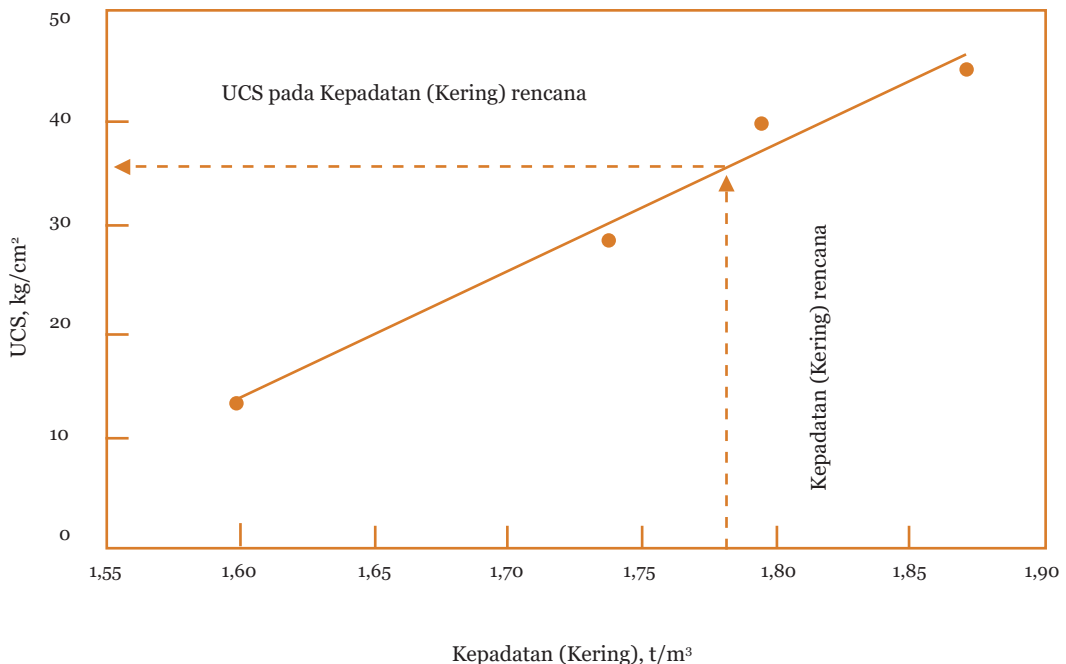
Proses pemadatan dilakukan dengan jumlah tumbukan per lapis yang bervariasi (misalkan 10, 30 dan 65 tumbukan), menggunakan berat penumbuk maupun jumlah lapis sesuai pemadatan ringan (*standard*) dan/atau pemadatan berat (*modified*). Sementara itu, untuk pengujian UCS, campuran dengan kadar air yang sama dipadatkan di dalam cetakan silinder (diameter minimum 70 mm dengan tinggi dua kali diameter) hingga menghasilkan kepadatan sesuai kepadatan benda uji untuk pengujian DCP. Pengujian penetrasi dengan alat DCP (lihat Gambar 4) maupun UCS dilakukan setelah benda uji dirawat selama 3 hari, 7 hari atau 28 hari.



Gambar 4. Pengujian DCP di laboratorium

Hasil pengujian DCP digambarkan dalam kurva hubungan antara jumlah tumbukan dengan penetrasi. Dari kurva tersebut ditentukan nilai DCP dan ditentukan SPR ($SPR = 1/DCP$). Selanjutnya, dengan metode statistik (menggunakan kurva hubungan antara SPR dengan UCS), ditentukan persamaan yang menunjukkan hubungan antara UCS dengan SPR campuran tanah semen.

Karena sangat sulit menyamakan kepadatan benda uji UCS dengan benda uji DCP secara persis, pengujian UCS dilakukan pada minimal tiga benda uji dengan variasi kepadatan. Nilai UCS pada kepadatan rencana (sesuai kepadatan benda uji DCP) ditentukan dengan cara interpolasi (lihat Gambar 5).



Gambar 5. Tipikal kurva hubungan antara kepadatan kering dan UCS

Pengujian DCP menjadi solusi praktis untuk menentukan kekuatan tanah yang telah distabilisasi di lapangan, khususnya lapisan stabilisasi yang tidak membutuhkan kekuatan sangat tinggi. Pengujian ini relatif sederhana, ekonomis, dan cepat, sekaligus mampu memprediksi efektivitas pemadatan, homogenitas pencampuran, hingga ketebalan lapisan tanah yang distabilisasi. Namun, masih terdapat tantangan utama yang terletak pada belum adanya model korelasi yang konsisten antara nilai SPR dari DCP dan UCS yang digunakan sebagai acuan kekuatan

dalam Spesifikasi Umum Bina Marga Seksi 5.4. Perbedaan hasil dari berbagai model yang ada sering menimbulkan keraguan dalam interpretasi data di lapangan.

Untuk itu, diperlukan kajian dan pengembangan model tersendiri yang lebih sesuai dengan kondisi maupun metode pengujian DCP dan UCS yang berlaku di Indonesia. Dengan dukungan kajian laboratorium yang terverifikasi di lapangan, diharapkan pengujian DCP dapat semakin andal sebagai alat evaluasi kekuatan tanah yang praktis dan akurat.

"Persatuan bangsa akan semakin kuat

Ketika pembangunan dapat dirasakan
hingga ke pelosok negeri

- Jenderal Sudirman -



MAS BIN & MBAK EKA

KENAPA PAK, SAYA LIHAT SEPERTI YANG BINGUNG??

BETUL SEKALI BANG BIN, SAYA SEDANG BINGUNG DIKEJAR TARGET UNTUK PEMBUATAN JOB MIX DESIGN. SAYA BINGUNG UNTUK MENGIRIMKAN SAMPEL YANG AKAN DIUJI KARENA TERKENDALA JARAK DAN WAKTU.

LOH KENAPA BINGUNG?

ASPAL

AGREGAT

MEMANG KAMU TAHU EKA SOLUSINYA, DIMANA LOKASI LABORATORIUM BINA MARGA YANG DAPAT MELAKUKAN PENGUJIAN ASPAL DAN MATERIAL AGREGAT?

KENAPA BINGUNG, SEKARANG KAN ADA APLIKASI MANDALA

APA ITU APLIKASI "MANDALA" MBA EKA?!!

"MANDALA" YAITU APLIKASI LAYANAN PENGUJIAN LABORATORIUM JALAN DAN JEMBRATAN YANG DAPAT DIAKSES SECARA DARING OLEH MASYARAKAT. APLIKASI INI MULAI DIBERLAKUKAN SEJAK 5 JANUARI 2026 SEBAGAI BAGIAN DARI TRANSFORMASI DIGITAL LAYANAN PUBLIK YANG DIMILIKI OLEH DIREKTORAT JENDERAL BINA MARGA KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM

BAGAIMANA CARA MENGAKSES MANDALA??

SANGAT MUDAH KITA TINGGAL AKSES ["layanam.binaamarga.pu.go.id/mandala"](https://layanam.binaamarga.pu.go.id/mandala). SELANJUTNYA KITA PILIH DAFTAR, PILIH PENGUJIAN AKAN DILAKUKAN DI BALAI MANA, KEMUDIAN LENGKAPI DOKUMEN, TENTUKAN PENGUJIAN APA SAJA YANG AKAN DILAKUKAN, SELANJUTNYA DILAKUKAN PEMBAYARAN MELALUI E-BILLING PNPB, SETELAH PROSES PEMBAYARAN SELESAI SAMPEL DIKIRIMKAN KE BALAI. DAPAT DIKIRIMKAN LANGSUNG KE BALAI TUJUAN PENGUJIAN ATAU DAPAT JUGA DIKIRIM MELALUI EKSPEDISI, UNTUK SELANJUTNYA DILAKUKAN PENGUJIAN.

UNTUK MENDAPATKAN LAPORAN HASIL PENGUJIANNYA BAGAIMANA EKA??

TENANG, LAPORAN HASIL PENGUJIAN DAPAT LANGSUNG DIUNDUH MELALUI APLIKASI MANDALA TANPA HARUS DATANG KE LABORATORIUM, SEMUA DILAKUKAN SECARA DARING. MUDAH BUKAN!!!

TERIMA KASIH MBA EKA UNTUK INFORMASINYA!



تَقَبَّلُوا مِنْ بِنَامَرْغَا



Segenap Redaksi **Buletin Bineka** Mengucapkan
Selamat Hari Raya

Idul Fitri

1 Syawal 1447 H

Minal aidin **wal faidzin**
Mohon maaf lahir dan batin.