

ALTERNATIF SOLUSI PEMBANGUNAN PERKERASAN JALAN PADA SUBGRADE BERDAYA DUKUNG RENDAH

Hary Christady Hardiyatmo

ABSTRAK: Sistem perkerasan harus dirancang tahan-lama, sehingga tidak mengalami kerusakan prematur akibat pengaruh lingkungan. Perkerasan yang terletak pada tanah-dasar yang teletak pada tanah fondasi (timbunan) lunak atau ekspansif, sering mengalami deformasi yang berlebihan oleh beban kendaraan berat maupun oleh penurunan konsolidasi akibat berat sendiri timbunan. Demikian pula, bila tanah-dasar mengalami gerakan naik turun akibat kembang-susut tanah di bawahnya oleh berubahnya musim. Akibat kembang-susut tanah- dasar yang tidak seragam, perkerasan menjadi bergelombang tidak teratur. Masalah juga timbul bila perkerasan jalan terendam air banjir. Rendaman air banjir, menyebabkan material pembentuk perkerasan maupun tanah-dasar menjadi berkurang daya dukungnya. Alternatif solusi perkerasan jalan yang tahan terhadap pengaruh banjir dan beban berlebihan adalah perkerasan jalan dengan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dan Sistem Pelat Terpaku. Perkerasan ini, kecuali tahan terhadap pengaruh genangan air banjir, bila digunakan pada tanah-dasar ekspansif, memberikan ketahanan jangka panjang dan menjaga kerataan permukaan perkerasan terhadap pengaruh kembang-susut tanah dasar.

Kata Kunci: perkerasan, tanah-dasar, Sistem Cakar Ayam modifikasi, Sistem Pelat Terpaku

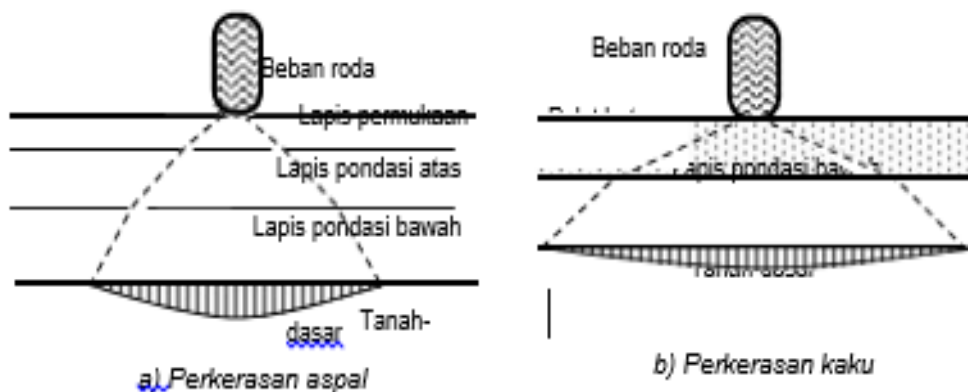
I. PENDAHULUAN

Fungsi perkerasan adalah (1) untuk memberikan struktur yang kuat dalam mendukung beban lalu-lintas; (2) untuk memberikan permukaan rata bagi pengendara; (3) untuk memberikan kekesatan atau tahanan gelincir di permukaan perkerasan; (4) untuk mendistribusikan beban kendaraan ke tanah-dasar secara memadai, sehingga tanah-dasar terlindung dari tekanan yang berlebihan; (5) untuk melindungi tanah-dasar dari pengaruh buruk perubahan cuaca.

Dalam tinjauan yang terkait dengan tanah-dasar (subgrade), struktur perkerasan jalan berfungsi untuk mendistribusikan beban kendaraan melalui sistem lapisan material yang diletakkan di atas tanah-dasar, sehingga melindungi tanah-dasar tersebut dari tekanan yang berlebihan dan pengaruh buruk perubahan cuaca. Pada Gambar 1 ditunjukkan beda penyebarantegangan yang disebabkan oleh beban roda kendaraan, pada material yang homogen. Tegangan terbesar terjadi di bagian atas dan berkurang

dengan kedalamannya. Pada sistem perkerasanaspal (lentur), lapisan perkerasan di bagianatas, karena menerima tegangan yang lebih tinggi, maka harus dipilih material yang mempunyai kualitas lebih baik daripada di bagian bawah. Pada perkerasan beton,karena tekanan di bawah pelat beton sudah kecil,maka di bawah pelattersebutcukup digunakan lapis pondasi bawah yang kualitas materialnya lebih rendah dari lapis pondasi (base).Susunan yang demikian ini memungkinkan penggunaan secara lebih ekonomis dari material yang tersedia.

Deformasi tanah-dasar yang berlebihan mengakibatkan penurunan atau kenaikan tanah secara tidak seragam, sehingga menyebabkan ketidak-rataan permukaan perkerasan dan ketidak-nyamananlalu-lintas kendaraan. Selain itu,akibat dukungan tanah fondasi di bawah tanah-dasar yang kurang kuat, oleh beban lalu lintas dapat menyebabkan gerakan naik turun berlebihan mengurangi umur layan perkerasan jalan.



Gambar 1. Penyebaran tekanan pada perkerasan aspal dan beton.

Jika perkerasan semakin tebal, maka luas penyebaran tekanan ke tanah-dasar semakin melebar, sehingga tekanan ke tanah-dasar semakin kecil. Dengan pengertian ini, jika tanah- dasar daya dukungnya rendah, maka akan dibutuhkan perkerasan yang lebih tebal atau kaku. Selain itu, material perkerasan yang kuat atau kaku juga akan menyebarkan tekanan roda dengan penyebaran tegangan yang lebih luas, sehingga tekanan ke tanah-dasar di bawahnya menjadi lebih kecil. Jika tekanan akibat beban lalu-lintas pada komponen lapis perkerasan atau tanah-dasar terlalu tinggi atau berlebihan, maka potensi kerusakan perkerasan juga akan tinggi.

II. FAKTOR-FAKTOR PENYEBAB RUSAKNYA PERKERASAN

Umumnya perkerasan jalandiinginkan berumur sangat panjang. Hanya sayangnya, hal ini tidak pernah terjadi, dan sering terjadi kerusakan terjadi pada waktu yang

sangat cepat setelah jalan tersebut selesai dibangun. Perkerasan jalan dibangun dengan maksud untuk mengurangi tegangan yang berlebihan pada tanah-dasar yang berada di bawah struktur perkerasan. Untuk itu, dibutuhkan bahan yang diletakkan di atas tanah-dasar guna menyebarkan tekanan roda kendaraan tersebut, sehingga tekanan ke tanah-dasar menjadi kecil.

Umumnya, perkerasan jalan mengalami kerusakan dini, diakibatkan oleh:

- 1) Beban kendaraan lebih besar dari yang diperkirakan.
- 2) Volume kendaraan (terutama untuk kendaraan berat) lebih tinggi dari yang diperkirakan.
- 3) Perkerasan terlalu tipis.
- 4) Bahan pembentuk perkerasan tidak memenuhi syarat.
- 5) Pelaksanaan pembangunan buruk.
- 6) Drainase buruk, sehingga perkerasan sering tergenang air.

Pada prinsipnya sistem perkerasan harus dirancang tahan-lama, sehingga tidak mengalami kerusakan prematur akibat pengaruh lingkungan.

a. Pengaruh Beban Kendaraan

Ketika beban roda kendaraan bekerja di atas perkerasan, perkerasan tersebut akan melendut. Pada kondisi ini, bagian atas perkerasan bekerja tegangan tekan dan di bawahnya bekerja tegangan tarik. Akibat beban yang berulang-ulang, suatu saat nanti perkerasan akan mengalami retak-retak akibat kelelahan (*fatigue*). Selain itu, perkerasan juga cepat rusak bila besarnya beban maupun jumlah lalu-lintas berlebihan. Beban yang berlebihan ini, menyebabkan tegangan tarik di bagian bawah lapis perkerasan yang melebihi kuat tarik dari bahan perkerasan. Semakin besar beban roda dan semakin tipis perkerasan, semakin besar pula tegangan yang bekerja pada perkerasan, sehingga potensi retaknya perkerasan juga menjadi semakin besar. Untuk beban kendaraan yang berlebihan atau terlalu besar, maka kerusakan akan terjadi pada jumlah pengulangan beban kendaraan yang lebih sedikit. Kerusakan akibat kelelahan ini dapat berwujud retakan atau alur-alur (cekungan). Jadi, perkerasan yang dibebani dengan beban truk besar, akan lebih mudah mengalami kerusakan akibat kelelahan tersebut.

b. Pengaruh Air

Material pembentuk perkerasan jalan, umumnya sangat dipengaruhi oleh faktor kelembaban (kadar air) dan lingkungan. Kadar air yang berlebihan akibat tergenang air terlalu lama di dalam struktur perkerasan, umumnya akan berakibat buruk pada kinerja perkerasan. Hal ini, karena kenaikan kelembaban atau kadar air akan mereduksi kekuatan dan kekakuan material granuler (tak terikat), pengembangan tanah-dasar. Selain itu, material granuler (lapis pondasi dan pondasi bawah) menjadi terkotori oleh butiran halus dari tanah-dasar yang terpompa ke atas bersama air. Pembasahan relatif lama pada tanah-dasar mengurangi daya dukung tanah dasar, yang dengan demikian juga mengurangi kinerja jangka panjang struktur perkerasan.

Pada tanah-dasar, kelembaban atau kadar air mempengaruhi (FHWA, 2006):
1) Kedudukan tegangan, yaitu oleh pengaruh isapan dan tekanan air pori. Material berbutir kasar dan halus, dapat mempunyai modulus pada kondisi kering sampai lima kali, dari ketika material tersebut basah. Terutama, modulus lempung sangat dipengaruhi oleh perubahan kadar air (bila kadar air naik, modulusnya turun).

2) Susunan tanah melalui gangguan sementasi antara partikel-partikel tanah.

Besarnya lendutan akibat beban lalu-lintas pada perkerasan juga dipengaruhi oleh kelembaban atau kadar air dari tanah-dasar dan komponen pembentuk perkerasan. Tanah-dasar yang semakin basah akan berpengaruh buruk pada perkerasan di atasnya, karena daya dukungnya akan turun. Penurunan daya dukung ini mengakibatkan lendutan perkerasan menjadi berlebihan jika dilalui kendaraan, terutama kendaraan berat. Penurunan daya dukung akibat pembasahan ini akan sangat dominan pada tanah-tanah yang mengandung lempung. Untuk tanah-tanah granuler (pasir) penurunan daya dukung tidak signifikan.

Material terikat aspal tidak secara langsung dipengaruhi air. Tetapi, kadar air yang berlebihan dapat menyebabkan butiran-butiran dalam campuran aspal menjadi lepas-lepas, atau berpengaruh pada penurunan integritas jangka panjang dari material yang diikat dengan semen.

Kekakuan dan kekuatan material granuler yang lepas-lepas (tidak terikat) dan tanah-dasar sangat besar bergantung pada kadar air dalam material. Kekakuan material tak terikat tersebut akan berkurang jika kadar air bertambah. Infiltrasi air hujan ke dalam struktur perkerasan atau tanah-dasar juga akan merubah sifat-sifat materialnya. Material tanah atau agregat yang lebih basah akan mempunyai daya dukung (CBR, modulus reaksi tanah-dasar, kuat geser) yang lebih rendah.

Pengaruh merusak dari air pada komponen lapis perkerasan dan tanah-dasar adalah (AASHTO, 1993):

a. Air dalam permukaan aspal dapat merusak aspal, mengurangi modulus dan menghilangkan kekuatannya. Penjenuhan dapat mereduksi modulus aspal (saat kering) hingga 30%-nya atau lebih. Kenaikan kelembaban (kadar air) dalam agregat lapis pondasi dan pondasi bawah granuler, dapat mengurangi sebagian kekakuan material tersebut hingga 50%-nya atau lebih. Pada lapis pondasi dirawat aspal (asphalt treated base, ATB), kenaikan kelembaban dapat mengurangi modulus hingga 30%, dan menambah kemudahan tererosi pada lapis pondasi dirawat semen atau kapur.

b. Penjenuhan tanah-dasar berbutir halus dapat menyebabkan berkurangnya modulus hingga 50%. Dengan demikian kelembaban atau kadar air di sekitar lapis perkerasan, mempunyai pengaruh penting dalam kinerja perkerasan tersebut. Kekakuan dan kekuatan material granuler yang lepas-lepas (tidak terikat) dan tanah-dasar sangat besar bergantung pada kadar air material.

Dalam perancangan perkerasan, usaha penanganan masalah air yang harus diperhatikan, adalah:

- 1) Mencegah masuknya air ke dalam perkerasan.
- 2) Penyediaan drainase jalan yang baik untuk mengalirkan air secara cepat meninggalkan struktur perkerasan.

c. Pengaruh Temperatur

Variasi temperatur di permukaan perkerasan menghasilkan gradien temperatur di sepanjang ketebalannya. Gradien temperatur ini mempengaruhi perilaku perkerasan, baik perkerasan aspal maupun perkerasan beton. Pada perkerasan aspal, temperatur mereduksi modulus dari beton aspal, sehingga mempengaruhi karakteristik kelelahan dan deformasi plastis (yaitu perkerasan mengalami deformasi permanen akibat beban kendaraan yang berulang-ulang). Pada perkerasan kaku, gradien temperatur menimbulkan tegangan termal yang menyebabkan pelat beton melengkung, sehingga mengurangi daya dukung perkerasan terhadap beban lalu-lintas yang berulang-ulang. Di malam hari, di bagian tepi-tepi perkerasan beton terangkat ke atas, dan di siang hari, bagian tengah perkerasan mencembung ke atas. Bagian perkerasan yang cenderung naik ke atas ini membuat daya dukung pelat beton berkurang. Hal ini, karena kontak yang baik antara dasar pelat beton dengan material di bawahnya menjadi berkurang, ketika pelat beton terangkat.

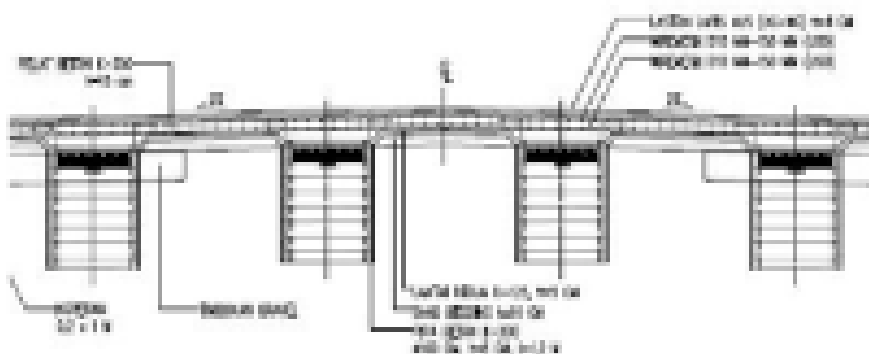
Tipe perkerasan yang tahan terhadap pengaruh beban berlebihan, tahan terhadap pengaruh air dan temperatur ini adalah perkerasan beton dengan Sistem Cakar Ayam dan Sistem Pelat Terpaku.

III. SISTEM CAKAR AYAM MODIFIKASI

Di Indonesia, banyak perkerasan jalan harus dibangun melaluid daerah yang tanahnya lunak atau mengalami kembang susut oleh perubahan musim. Pada daerah yang tanahnya lunak, perkerasan jalan bila dilalui kendaraan umumnya bersifat membal/bergetar, sehingga mengakibatkan beban tambahan bagi perkerasan yang mengurangi umur layan perkerasan. Pada tanah-dasar (subgrade) yang mengalami kembang susut, perkerasan menjadi bergelombang, pecah-pecah tidak beraturan akibat perubahan volume oleh berubahnya kadar air saat musim hujan. Masalah kerusakan jalan juga sering timbul akibat beban kendaraan yang berlebihan. Perancangan perkerasan konvensional umumnya didasarkan pada beban gandar standar sekitar 8,16 ton atau 10 ton saja. Dalam perancangan, umumnya di dasarkan pada asumsi bahwa tanah dasar sudah stabil, sehingga tebal komponen struktur perkerasan hanya didasarkan pada daya dukung tanah dasar yang dinyatakan oleh nilai CBR atau modulus reaksi subgrade vertikal.

Penyelesaian dari masalah tanah-dasar tersebut adalah dengan menggunakan perkerasan Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM). Struktur perkerasan beton dengan Sistem CAM, dirancang mampu mendukung beban kendaraan yang berat, tanah-dasar yang mengalami penurunan konsolidasi dan tanah-dasar yang mengalami kembang-susut oleh perubahan musim.

Secara tipikal, perkerasan Cakar Ayam Modifikasi, terdiri dari pelat tipis beton bertulang tebal 15-17 cm yang diperkaku dengan pipa-pipa beton berdiameter 120 cm, tebal 8 cm, dan panjang pipa 150-200 cm, yang tertanam pada lapisan tanah-dasar (subgrade), dengan jarak pipa-pipa berkisar 2,0-2,50 m (Gambar 2). Di bawah pelat beton, terdapat lapisan lantai kerja tebal 10-15 cm (terbuat dari beton mutu rendah) dan lapisan sirtu tebal 30-40 cm yang berfungsi, terutama, sebagai perkerasan sementara selama masa pelaksanaan, dan agar permukaan tanah-dasar dapat rata sehingga pelat beton Cakar Ayam dapat dibuat di atasnya. Pipa-pipa beton tersebut, disebut cakar.



Gambar 2. Sistem Cakar Ayam Modifikasi di Padangan Bojonegoro.

Sistem Cakar Ayam lebih cocok digunakan sebagai perkerasan jalan. Dalam mendukung beban, Sistem Cakar Ayam mengandalkan interaksi antara pelat beton-cakar dan tanah di sekitarnya. Bila Sistem Cakar Ayam digunakan untuk mendukung beban statis dan permanen yang relatif berat (beban bangunan gedung tinggi) yang terletak pada tanah lempung lunak, fungsi cakar dalam mereduksi lendutan pelat menjadi tidak optimal. Karena bila cakar secara permanen berotasi, maka akan menyebabkan tanah di sekitar cakar mengalami konsolidasi, yang menyebabkan pelat melendut secara berangsur-angsur sesuai dengan berjalannya waktu. Kecuali itu, lendutan pelat dan rotasi cakar juga akan dipengaruhi oleh konsolidasi sekunder atau rayapan (creep), yang juga akan menyebabkan pengaruh yang sama. Jika digunakan dalam bangunan gedung, Sistem Cakar Ayam akan mirip dengan fondasi sumuran, yaitu memerlukan pelat pilecap yang relatif tebal guna memenuhi syarat ketahanan terhadap gaya geser pada pelat dan sekaligus menjamin kekakuan fondasi agar tidak terjadi penurunan tak seragam yang berlebihan.

Sistem Cakar Ayam Modifikasi (CAM) merupakan pengembangan lebih lanjut dari Sistem Cakar Ayam Prof. Sedyatmo. Pengembangan yang telah dilakukan didasarkan pada evaluasi hasil-hasil penelitian yang dilakukan secara intensif sejak tahun 1990 oleh tim pengembangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi. Perubahan bahan cakar yang semula dibuat dari bahan pipa beton diameter 1,20 m, panjang 2 m dan tebal 8 cm, digantikan dengan pipa baja yang sangat ringan (berat sekitar 35 kg) dengan tebal 1,4 mm, diameter berkisar 0,60- 0,80 m dan panjang 1,0-1,2 m. Pipa baja ini harus galvanis dan dilapisi dengan bahan pelindung anti karat (coaltar). Bahan cakar yang lebih ringan mempermudah dan mempercepat pelaksanaan. Untuk perkerasan di bandara dengan beban berat (seperti beban pesawat), maka cakar yang digunakan tetap dari beton, dengan dimensi yang menyesuaikan dengan beban yang direncanakan. Pengembangan yang lain adalah terkait dengan metode analisis, perancangan, metode pelaksanaan, serta metode evaluasi perkerasan (Suhendro, 1992; Suhendro, 1993)..

Aplikasi Sistem Cakar Ayam Modifikasi telah dilakukan untuk perkerasan jalan Tol Detour jalan Prof. Sedyatmo Cengkareng, jalan Tol di Makasar, ruas jalan di Pantura Indramayu, jalan di atas tanah ekspansif di Padangan Bojonegoro dan lain-lain. Untuk aplikasi sebagai landasan penumpukan peti kemas (Container Yard) telah dilakukan di Palaran- Samarinda. Sistem Cakar Ayam Modifikasi yang dikombinasikan dengan struktur jembatan ringan telah diterapkan pada jalan di atas timbunan ringan di Jalan Simpang Batang-Lubuk Gaung propinsi Riau (Gambar 3).

Bila perkerasan jalan dengan Sistem Cakar Ayam diletakkan di atas timbunan yang mengalami penurunan konsolidasi yang berlebihan, maka sistem perkerasan ini dapat meminimalkan penurunan tidak seragam, sehingga menjaga kerataan permukaan jalan beton, contohnya Sistem Cakar Ayam pada Jalan Tol Prof. Sedyatmo, yaitu tol menuju Bandara Sukarno Hatta, Cengkareng.



Gambar 3. Aplikasi Sistem Cakar Ayam Modifikasi di Jalan Simpang Batang-Lubuk Gaung propinsi Riau.

IV. SISTEM PELAT TERPAKU

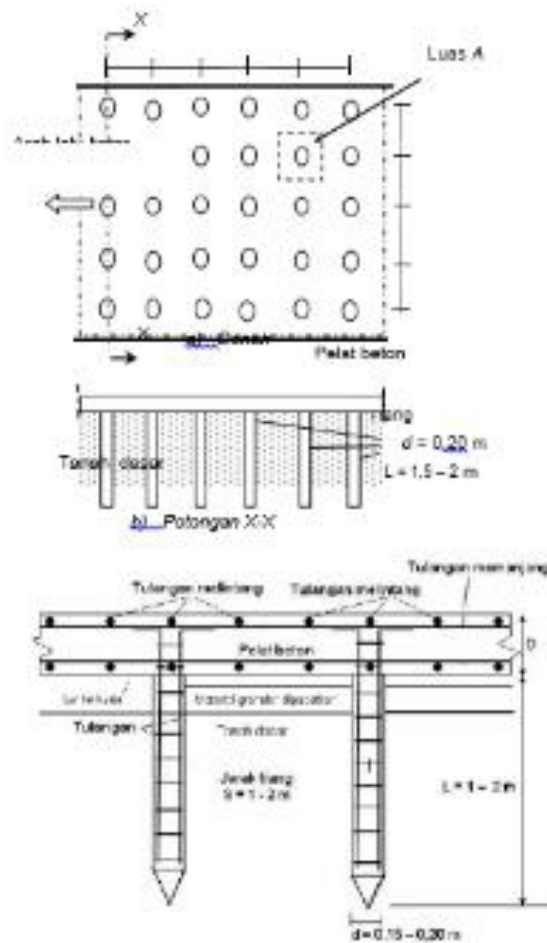
Sistem Pelat Terpaku (Nailed Slab System) yang diusulkan oleh Hary Christady

Hardiyatmo (2008) adalah suatu perkerasan beton bertulang (tebal antara 12–20 cm) yang didukung oleh tiang-tiang beton mini (panjang 150–200 cm dan diameter 15–20 cm). Tiang-tiang dan pelat beton dihubungkan secara monolit dengan bantuan tulangan-tulangan. Interaksi antara pelat beton-tiang-tanah di sekitarnya menciptakan suatu perkerasan yang lebih kaku, yang lebih tahan terhadap deformasi tanah.

Dasar pemikiran dari fungsi tiang dalam Sistem Pelat Terpaku pada dasarnya sama seperti Sistem Cakar Ayam. Suatu pelat beton yang dipaku atau diangker pada tanah, bila dibebani berulang-ulang, maka kontak antara tanah-dasar di bawahnya dan pelat akan lebih terjaga, dibandingkan dengan pelat yang hanya diletakkan di atas tanah.

Karena bidang kontak antara pelat dan tanah terjamin selalu rapat, maka pelat perkerasan beton akan terjaga kinerja jangka panjangnya. Selain itu, kenaikan kapasitas dukung tanah-dasar akibat pengaruh dukungan tiang-tiang pada pelat akan mengurangi kebutuhan tebal perkerasan beton dan memperkaku sistem perkerasan. Pada sistem perkerasan konvensional, di mana pelat tidak dipaku ke dalam tanah, oleh akibat beban berulang lalu-lintas, maka di bawah pelat cenderung mudah sekali terbentuk rongga-rongga di antara pelat dan tanah. Rongga-rongga ini akan mengurangi kontribusi dukungan tanah-dasar terhadap pelat bila pelat dibebani, akibatnya pelat mudah retak atau pecah. Dari hasil uji laboratorium, Hardiyatmo et al. (2008) menunjukkan bahwa oleh akibat beban, lendutan pelat tanpa tiang lebih besar dibandingkan dengan pelat yang diperkuat dengan tiang, baik untuk beban statis maupun dinamis.

Sistem Pelat Terpaku cocok digunakan untuk perkerasan yang tanah-dasarnya dipengaruhi oleh penurunan tidak seragam, karena interaksi tanah-tiang-pelat membuat pelat lebih kaku, sehingga mengurangi terjadinya beda penurunan permukaan perkerasan (menciptakan permukaan perkerasan beton yang selalu rata). Pelat terpaku juga memungkinkan digunakan pada jalan yang tanah-dasarnya berpotensi kembang-susut dan mengalami getaran yang kuat oleh beban lalu-lintas berat. Naik-turunnya tanah-dasar tereduksi oleh kekakuan yang diciptakan oleh interaksi antara pelat beton, tiang-tiang dan tanah dalam zona terkurung tiang-tiang.



c) Detail potongan

Gambar 5. Perkerasan beton dengan Sistem Pelat Terpaku (Hardiyatmo, 2008).

Hardiyatmo (2011) mengusulkan dua cara perancangan Sistem Pelat Terpaku. Cara pertama, tebal pelat beton dihitung berdasarkan prosedur AASHTO (1993). Perancangan dengan menggunakan metoda AASHTO ini dilakukan dengan cara yang sama seperti pada perancangan perkerasan kaku tipe bertulang bersambung dan tipe beton bertulang kontinyu. Perancangan dengan cara ini mengacu pada beban gandar standar 18 kip (8,16 ton). Dalam cara ini, tulangan-tulangan pada pelat beton dianggap hanya berfungsi sebagai tulangan susut dan tiang-tiang berfungsi sebagai menaikkan modulus reaksi tanah dasar.

Cara kedua, perancangan pelat beton Sistem Pelat Terpaku dilakukan dengan cara yang lazim dilakukan dalam perancangan pelat beton secara struktural. Dalam cara ini, hitungan dilakukan dengan menggunakan metode beam on elastic foundation, atau metode elemen hingga. Keuntungan dari cara ini, besarnya beban gandar kendaraan rancangan bisa lebih besar dari beban gandar standar AASHTO.

Lendutan, momen, gaya lintang dan geser pons dihitung, kemudian dirancang tebal beton dan dimensi tulangnya.

Dalam perancangan Sistem Pelat Terpaku, dibutuhkan nilai modulus reaksi tanah dasar oleh pengaruh pemasangan tiang di bawah pelat perkerasan. Hardiyatmo (2011) melakukan analisis kenaikan modulus reaksi tanah dasar akibat pengaruh tiang dengan meninjau keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada pelat yang didukung oleh sebuah tiang. Tambahan kekuatan tanah oleh tiang, bergantung pada tahanan tiang yang termobilisasi. Penentuan tahanan tiang yang termobilisasi relatif sulit, karena tahanan gesek tiang tidak akan timbul jika tidak ada gerakan relatif antara tiang dan tanah di sekitarnya. Hasil penelitian uji beban pelat yang didukung tiang pada lempung lunak yang dilakukan oleh Hardiyatmo (2010), menunjukkan bahwa diameter pelat-beban dan dimensi tiang berpengaruh besar terhadap kenaikan modulus reaksi tanah-dasar.

Dalam aplikasi Sistem Pelat Terpaku pada tanah-dasar yang tidak stabil akibat kembang susut tanah, maka Hardiyatmo (2013) melakukan uji pelat yang didukung tiang yang diletakkan pada tanah yang mengalami pengembangan. Dalam penelitian ini, besarnya kenaikan pelat dan gaya angkat tiang diamati. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa dimensi tiang mempengaruhi kenaikan pelat. Penelitian tersebut masih terus dilanjutkan untuk keperluan menentukan dimensi tiang yang cocok agar saat tanah mengembang, perkerasan kaku dengan Sistem Pelat Terpaku masih berfungsi dengan baik.

Keuntungan penggunaan perkerasan dengan Sistem Cakar Ayam Modifikasi dan Sistem Pelat Terpaku, adalah:

- 1) Keduatipeperkerasanmemberikan kekakuan tinggi, sehingga tahan terhadap deformasi tanah dasar (penurunan tak seragam dan getaran akibat kendaraan).
- 2) Keduatipeperkerasanmampu mendukung lalu-lintas berat dan volume tinggi. Perancangan dapat didasarkan pada beban kendaraan maksimum yang diinginkan, yang melebihi beban gandar standar untuk perkerasan konvensional.
- 3) Karenacakar atautiang-tiang selalu menjaga agar pelat beton tetap dalam kontak yang baik dengan material di bawahnya, maka umur perkerasan menjadi lebih panjang.
- 4) Pemeliharaan sangat kecil, sehingga mengurangi kebutuhan biaya pemeliharaan di kemudian hari.
- 5) Keduatipeperkerasandibangun tanpa sambungan-sambunganakan mengurangi biaya pemeliharaan pada sambungan. Selain itu, penetrasi air masuk ke dalam lapis pondasi maupun tanah-dasar sangat kecil, karena tidak ada sambungan melintang, dan retak yang terjadi selalu tertutup rapat oleh adanya tulangan memanjang dan melintang.
- 6) Walaupun biaya awal lebih tinggi dari perkerasan beton maupun aspal sistem konvensional, namun biaya total selama masa pelayanan lebih rendah.
- 7) Dapat menyelesaikan masalah perkerasan jalan di atas tanah-dasar yang ekspansif (mudah mengembang).

Dibandingkan dengan perkerasan Sistem CAM, pembangunan Sistem Pelat Terpaku lebih mudah, karena pemasangan tiang dapat dilakukan dengan alat pancang atau alat bor ringan. Karena biaya pembangunan lebih tinggi, maka perkerasan dengan Sistem Pelat Terpaku cocok dibangun untuk perkerasan jalan yang melewati daerah-daerah yang tanah dasarnya bermasalah. Untuk daerah-daerah yang tanahnya normal, maka cukup dibangun dengan struktur perkerasan yang konvensional. Namun demikian, bila Sistem Cakar Ayam Modifikasi atau Sistem Pelat Terpaku diaplikasikan pada tanah-dasar yang normal, maka akan memberikan perkerasan yang tahan lama, dengan sedikit biaya pemeliharaan, sehingga bila ditinjau dari harga pembangunan awal memang lebih mahal, tapi bila ditinjau terhadap biaya total struktur selama masa pelayanan akan lebih murah.

V. DAFTAR PUSTAKA

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (1993),
- Guide for The Design of Pavement Structures, AASHTO, Washington, DC. Federal Highway Administration (2006), Geotechnical Aspects of Pavements, Reference Manual/Participant Workbook, Publication No. FHWA NHI-05-037, U.S. Dept. of Transportation Federal Highway Administration.
- Hardiyatmo, H.C., (2008), Sistem Cakar Ayam sebagai Alternatif Penyelesaian Masalah Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) pada Tanah Dasar Ekspansif, Seminar Nasional Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana di Indonesia, Magister Pengelolaan Sarana Prasarana UGM, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., (2008). Sistem Pelat Terpaku (Nailed Slab) Untuk Perkuatan pelat beton pada Perkerasan Kaku (Rigid Pavement). Prosiding Seminar Nasional Teknologi Tepat Guna Penanganan Sarana Prasarana, MPSP-FT-UGM, April 2008, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., (2009), Metode Hitungan Lendutan Pelat Dengan Menggunakan Modulus Reaksi Tanah-dasar Ekuivalen untuk Struktur Pelat Fleksibel. *Dinamika Teknik Sipil, Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, Vol.9, No.2, Juli 2009, UMS.
- Hardiyatmo, H.C., Suhendro, B. dan Firdiansyah, (2009), Analisis Lendutan Sistem Cakar Ayam Pada Tanah Ekspansif, Prosiding Seminar Nasional PIT-XIII, HATTI-2009, 5–6 Nopember Denpasar, Bali.
- Hardiyatmo, H.C., (2010), Perancangan Sistem Cakar Ayam Modifikasi Untuk Perkerasan Jalan Raya, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.

- Hardiyatmo, H.C., (2011), Method To Analyze The Deflection Of The Nailed Slab System, International Journal of Civil and Environmental Engineering (IJCEE-IJENS), Vol.11, No.04. Rawalpindi, Pakistan.
- Hardiyatmo, H.C., (2013), Kajian Modulus Reaksi Tanah Dasar Oleh Pengaruh Pemasangan Tiang pada Pasir. Laporan Penelitian, Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, UGM Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., (2014), Perkerasan Jalan Beton Dengan Menggunakan Sistem Pelat Terpaku. Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar pada Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- Hardiyatmo, H.C., (2014), Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah. Edisi-2, Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Suhendro, B., (1992), Laporan Kemajuan ke III, Studi Optimalisasi Formula Cakar Ayam, Jurusan Teknik Sipil Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
- Suhendro, B., (1993), Maintenance Technique and Bearing Capacity Evaluation of Cakar Ayam Rigid Pavement System at Runways and Aprons of Soekarno-Hatta International Airport Jakarta Tahap I, Technical report PT cakar Bumi, Jakarta