



Kajian dan Evaluasi Struktur *Slab Prestressed Precast Modular Concrete*

*I Gusti Lanang Bagus Eratodi¹, Ali Awaludin², Ay Lie Han³, Andreas Triwiyono²

¹Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Pendidikan Nasional, Denpasar

²Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

³Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

^{*}eratodi@undiknas.ac.id

Received: 4 Januari 2020 Revised: 14 Mei 2020 Accepted: 5 Juni 2020

Abstract

Prestressed precast modular concrete slabs function rigid pavement, supporting vehicle loads above it on subgrade with relatively low bearing capacity. This slab measures 2000 x 850 x 150 mm³ of regular reinforced concrete (old production) or prestressed concrete (new production) quality K-500. After several times of use, damage occurs mainly at the end of the slab in the form of spalling. The objectives of the study and evaluation were: (1) observing damage; (2) material quality data; (3) numerical modeling by taking into account material properties, loading and soil conditions; and (4) providing slab design recommendations including materials and geometrics. The method of study and evaluation of slab damage was done by observing the damage, taking concrete core-case and testing it in the laboratory, and modeling the slab structure with various parameters (soil data, concrete quality and slab geometry). Field observations and analysis results show that concrete slab spalling occurs initially at the edge (850 mm wide) which in turn causes the effectiveness of the pre-tension force to be suboptimal and finally the concrete spalling volume increases. Apart from the frequency of collisions during installation and slab deformation when supporting vehicle loads. Concrete spalling problems also due to inappropriate concrete quality.

Keywords: *Prestressed slab, spalling, precast, modular, core-case*

Abstrak

Slab prestressed precast modular concrete berfungsi rigid pavement, mendukung beban kendaraan di atasnya pada tanah dasar yang daya dukungnya relatif rendah. Slab ini berukuran 2000 x 850 x 150 mm³ dari beton bertulang biasa (produksi lama) atau beton pretension (produksi baru) mutu beton K-500. Dalam pemakaian di lapangan slab ini diharapkan dapat dipasang dan dilepas berulang kali. Setelah beberapa kali pemakaian, terjadi kerusakan terutama pada bagian ujung slab berupa spalling. Tujuan kajian dan evaluasi struktur ini adalah: (1) mengamati kerusakan; (2) mendapatkan data kualitas bahan; (3) melakukan pemodelan secara numeris dengan memperhatikan sifat material, pembebanan dan kondisi tanah; dan (4) memberikan rekomendasi desain slab meliputi bahan dan geometrik. Metode kajian dan evaluasi kerusakan slab dilakukan pengamatan kerusakan, pengambilan core-case beton dan pengujiannya di laboratorium, serta pemodelan struktur slab dengan berbagai parameter (data tanah, mutu beton dan geometri slab). Hasil pengamatan di lapangan dan hasil analisis maka dapat diketahui bahwa spalling beton slab terjadi awalnya pada bagian tepi (sisi lebar 850 mm) yang selanjutnya menyebabkan efektifitas gaya pretension menjadi tidak optimal dan akhirnya volume spalling beton menjadi semakin bertambah. Selain karena frekuensi benturan saat pemasangan dan deformasi slab saat mendukung beban kendaraan. Permasalahan spalling beton juga dikarenakan mutu beton yang tidak sesuai.

Kata kunci: *Slab prestressed, spalling, precast, modular, core-case*

Pendahuluan

Secara umum *slab prestressed precast modular concrete* berfungsi menyerupai *rigid pavement* yaitu mendukung beban kendaraan di atasnya pada tanah dasar yang daya dukungnya relatif rendah. *Slab* ini berukuran 2000 mm x 850 mm x 150 mm, yang terbuat dari beton bertulang biasa (produksi lama) atau beton pretension (produksi baru), dengan mutu beton K-500. Dalam pemakaian di lapangan *slab* ini diharapkan dapat dipasang dan dilepas berulang kali, lihat Gambar 1.



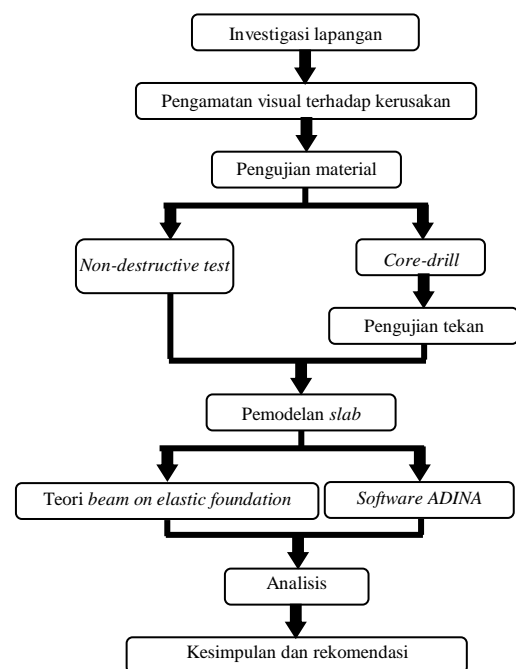
Gambar 1. Slab beton dengan kerusakan *spalling*

Setelah beberapa kali pemakaian, terjadi kerusakan terutama pada bagian ujung *slab*, berupa *spalling*. *Spalling* bisa disebabkan karena benturan saat pengangkutan dan pemasangan, mutu beton, gaya yang terjadi pada bidang kontak/persinggungan antara satu *slab* dengan lainnya akibat deformasi/perbedaan penurunan, ataupun bentuk dan ukuran bagian tepi *slab* yang menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan akibat persinggungan. Agar kerusakan ini bisa diketahui penyebabnya, maka diperlukan investigasi dan kajian yang cukup detil tentang penyebab kerusakan, sehingga akan didapatkan rekomendasi penyelesaian permasalahan ini.

Penelitian Johannes *et al.* (2017) tentang efektifitas penambahan serat baja Dramix terhadap karakteristik mekanik beton diusulkan pada perbaikan sifat mekanika pada *slab* dengan kerusakan *spalling* ini. Tujuan kajian ini adalah (1) mengamati kerusakan; (2) mendapatkan data kualitas bahan; (3) melakukan pemodelan/simulasi secara numeris dengan memperhatikan sifat material, pembebanan dan kondisi tanah; (4) mencari penyebab utama dari kegagalan yang terjadi selama ini; (5) mengkaji usulan *slab prestress concrete* berserat dan tidak berserat, dan (6) memberikan rekomendasi desain *slab* meliputi bahan dan geometrik *slab*.

Metode Kajian dan Evaluasi

Dalam rangka investigasi kerusakan *slab*, dilakukan pengamatan kerusakan di lapangan, pengambilan *core-case* beton dan pengujiannya di laboratorium, serta pemodelan struktur *slab* dengan berbagai parameter (data tanah, mutu beton dan geometri *slab*) sehingga dapat diketahui akar permasalahannya (Martin *et al.*, 2007). Secara singkat, kegiatan sesuai Gambar 2 dapat diuraikan sebagai berikut: (1) pengamatan visual kerusakan di lapangan dilakukan untuk mengetahui letak, bentuk, tingkat dan sebaran kerusakan pada *slab*. Alat yang digunakan antara lain kamera dan microcrackmeter untuk mengetahui lebar retak jika terjadi. (2) pengujian terdiri dari pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) dengan alat *Schmidt Rebound Hammer* dan pengambilan sampel *core-drill/core-case* beton untuk dilakukan pengujian tekan di laboratorium. Keduanya bertujuan untuk mendapatkan gambaran tentang homogenitas dan perkiraan kualitas beton di lapangan. (3) analisis numerik dilakukan dengan cara memodelkan struktur *slab* sebagai *beam* di atas dukungan elastik (*beam on elastic foundation*) kemudian dianalisis secara klasik (menggunakan *beam on elastic foundation theory*) dan dengan bantuan software ADINA (Bathe, 2010) dengan memperhatikan beberapa variasi kondisi tanah, bentuk dan ukuran (geometri) *slab*, tumbukan atau kondisi kontak antara *slab* satu dengan lainnya saat mendukung beban kendaraan di atasnya, sifat material hasil pengujian lapangan dan pembebanan yang terjadi.



Gambar 2. Flow chart metode kajian dan evaluasi

Pengujian tekan beton *core-case slab existing*

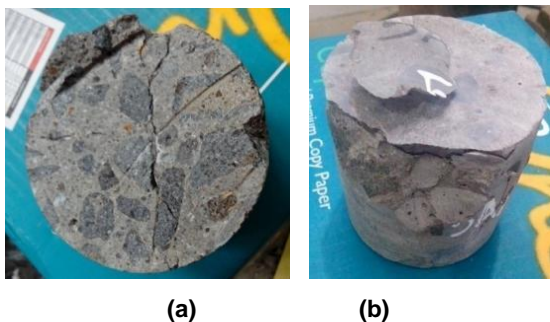
Pengujian tekan sesuai SNI-03-2492-2002 untuk memastikan kuat tekan *slab* beton yang digunakan sesuai dengan kuat tekan rencana yakni mutu beton K-500 ($f_c' = 41$ MPa). Pengujian ini dilakukan terhadap beberapa sampel *core-case* yang berasal dari *slab* produksi lama dan baru dari PT. VICO Indonesia. Hasil pengujian tekan *core-case* beton dapat dilihat pada Tabel 1.

Hasil pengujian tekan *core-case slab* beton pada Tabel 1 mengacu Martin *et al.*, 2007 dapat dilihat bahwa seluruh sampel beton *core-case* memiliki kuat tekan lebih kecil dari pada kuat tekan rencana K-500 ($f_c' = 41$ MPa). Berdasarkan data uji tekan tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa mutu beton pada *slab* yang diuji adalah antara K-350 sampai dengan K-400.

Hal ini didasarkan pada ketentuan SNI-03-2492-2002 yang mensyaratkan nilai terendah hasil uji tekan beton *core-case* adalah minimal sama dengan $0,75f_c'$ dan nilai rata-rata dari tiga sampel beton *core-case* adalah minimal sama dengan $0,85f_c'$. Sampel beton *core-case* dapat dilihat pada Gambar 3 di mana terdapat satu sampel dari *slab* lama (kode 1A) yang sudah retak sehingga tidak dapat diuji tekan.

Tabel 1. Hasil pengujian tekan *core-case slab* beton

No	Kode benda uji	Berat volume (Kg/m ³)	Kuat tekan (MPa)	Keterangan
1	2A	2216,0	27,2	Beton lama ↓ Beton baru
2	5A2	2273,0	32,9	
3	8A	2403,5	32,1	
4	9A	2454,0	24,8	
5	9B	2405,8	36,1	
6	10A2	2436,0	34,0	
7	10A1	2395,0	34,4	
8	10B	2381,2	21,8	Beton baru



Gambar 3. Sampel *core-case*: (a) sampel yang sudah retak sehingga tidak diuji (kode 1A); (b) sampel setelah diuji (kode 5A2)

Pemodelan numeris *slab*

Analisis numeris didasarkan pada *Teori Beam on Elastic Foundation*. Pada teori ini *slab* beton dianggap sebagai balok yang diletakkan pada bidang dengan dukungan elastik (tanah), (Dinev, 2012). Untuk keperluan analisis, data utama yang diperlukan meliputi: nilai dukungan elastik tanah, ukuran *slab* dan jenis kendaraan yang akan melintas di atas *slab* tersebut. Nilai dukungan elastik tanah dapat diperoleh berdasarkan hasil pengujian langsung di lapangan di mana terdapat hubungan antara beban dengan deformasi/ lendutan tanah sampai dengan nilai beban tertentu (nilai tekanan roda dari kendaraan yang diperhitungkan). Karena data tersebut tidak tersedia, maka nilai dukungan elastik tanah pada studi ini diambil berdasarkan nilai yang terdapat pada Tabel 2. (Bowles, 1997) berikut yaitu sebesar 15.000 kN/m³ (jenis tanah *clayey soil* dengan $q_a \leq 200$ kPa).

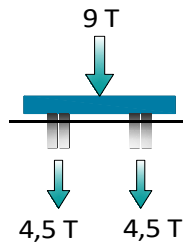
Tabel 2. Nilai konstanta dukungan elastik tanah

Jenis tanah	Konstanta dukungan elastik (kN/m ³)
<i>Loose sand</i>	4.800 – 16.000
<i>Medium dense sand</i>	9.600 – 80.000
<i>Dense sand</i>	64.000 – 128.000
<i>Clayey medium dense sand</i>	32.000 – 80.000
<i>Silty medium dense sand</i>	24.000 – 48.000
<i>Clayey soil</i> :	
$q_a \leq 200$ kPa	12.000 – 24.000
$200 < q_a \leq 800$ kPa	24.000 – 48.000
$q_a > 800$ kPa	> 48.000

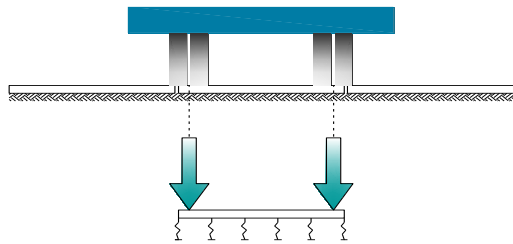
Dimensi *slab* yang dimodelkan adalah sama dengan dimensi yang ada yaitu: panjang 2000 mm; lebar 850 mm; dan tebal 150 mm. Tipe kendaraan yang diperhitungkan adalah *lowboy* dengan beban roda 9 Ton (Sari, 2014). Analisis dilakukan pada dua tipe pembebanan, yaitu *one-point loading* dan *symetrically loading*. Untuk *one-point loading*, terdapat dua kondisi pembebanan yaitu beban diletakkan di tengah bentang dan beban diletakkan pada salah satu ujung *slab*. Kondisi pembebanan tersebut disesuaikan dengan lebar gandar kendaraan (*lowboy*) dan panjang (bentang) *slab* beton yang digunakan. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4, 5 dan 6. (Bina Marga, 2017).

Dari hasil analisis menggunakan *Beam on Elastic Foundation Theory* didapatkan gaya dalam berupa momen lentur dan deformasi *slab* maksimum sebagai berikut: (1) defleksi *slab* maksimum = 6,619 mm; (2) rotasi *slab* maksimum = 0,0108 rad;

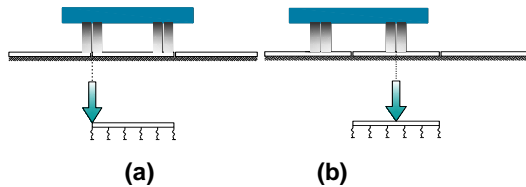
(3) deformasi lateral *slab* = 0,8 mm (pada bagian tepi); dan (4) momen lentur maksimum = 22,23 kNm (per lebar *slab* 0,85 m).



Gambar 4. Konfigurasi tekanan gandar *lowboy*



Gambar 5. Asumsi kondisi pembebanan simetris (*symmetrically loading*)



Gambar 6. Asumsi kondisi pembebanan terpusat (*one-point loading*): (a) beban di salah satu ujung; (b) beban di tengah.

Berdasarkan momen lentur sebesar 22,23 kNm, analisis kapasitas lentur *slab* dapat dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan tekan atau tarik maksimum yang terjadi pada *slab*. Oleh karena data gaya pretension yang diberikan pada tendon baja tidak diketahui, maka diasumsikan nilai gaya pretension sebesar 50 kN atau sekitar 60% dari kuat tarik izin tendon (88 kN). Sesuai hasil tes *core-case*, mutu beton ditetapkan K-350 ($f_c' = 24$ MPa). Pada sisi bawah *slab* akan menerima tegangan tarik sebesar 0,69 MPa (setelah dikurangi dengan tegangan yang diakibatkan oleh gaya pretension pada tendon). Walaupun nilai tegangan tarik ini kecil, keberadaannya tetap menjadi salah satu penyebab retak pada *slab* selain akibat gaya tumbukan atau benturan saat mengalami deformasi. Untuk *slab* yang digunakan secara berulang-ulang, maka nilai tegangan tarik pada beton perlu dibatasi, yaitu tidak lebih besar dari 20% nilai kuat tarik beton. Jadi nilai kuat tarik beton yang diperlukan minimal adalah 3,5 MPa.

Beton serat

Beton bertulang diteliti dan diobservasi, diteliti, retak dan spalling atau lepasnya bagian beton pada *slab* umumnya terjadi pada bagian tepi dari sisi lebar (sisi 850 mm). Pada bagian tepi ini terdapat 16 tendon pretension yang dipasang ke arah memanjang (sejajar dengan sisi 2000 mm). Pengaruh gaya pretension pada tendon baru efektif setelah jarak tertentu dari tepi *slab* (prinsip distribusi gaya pretension pada bagian ujung). Oleh karena itu, *slab* beton bagian tepi sisi lebar umumnya memiliki kekuatan tidak sebaik bagian tengah. Namun demikian, berdasarkan tingkat kerusakan akibat beban kendaraan justru pada bagian tepi inilah yang mendapatkan tingkat kerusakan atau deformasi terbesar.

Salah satu upaya untuk meningkatkan perilaku kekuatan beton pada bagian tepi adalah dengan cara penempatan besi siku pada *slab* bagian sisi atas maupun sisi bawah. Hanya saja penambahan besi siku ini dikhawatirkan akan menyulitkan proses pemasangan *slab* dan membuat permukaan *slab* tidak rata (pada bagian tepi lebih tinggi). Upaya lainnya adalah dengan cara mengganti sebagian beton (beton pada bagian tepi) dari beton normal diganti dengan beton serat karena beton serat memiliki ketahanan kejut yang lebih baik dibandingkan dengan beton normal (beton tanpa serat).

Beton tergolong sebagai material getas. Untuk meningkatkan daktilitas beton, salah satu cara yang dapat digunakan adalah menambahkan serat/fiber ke dalam adukan beton, yang lebih dikenal dengan beton serat (*fiber concrete*). Salah satu serat yang dapat digunakan adalah serat baja (*steel fiber*). (Mypalm Network, 2019). Serat baja yang ditambahkan dalam beton dapat meningkatkan kemampuan beton dalam mendistribusikan tegangan yang bekerja akibat beban luar dan mengendalikan mekanisme kehadiran retak atau *spalling* (lihat Gambar 7). Hal tersebut membuat beton dapat memiliki ketahanan lebih baik terhadap benturan, kejut/*impact*, abrasi, dan *fatigue*.



Gambar 7. Perubahan karakteristik beton setelah ditambah serat (beton serat).

Berdasarkan jumlah kandungan serat dalam 1 m³ volume beton, beton serat dapat dibedakan menjadi tiga kelompok yaitu: (1) Volume fraksi rendah (<1%); (2) Penambahan *fiber* difungsikan untuk mengurangi pertumbuhan retak akibat proses kembang-susut beton dari *slab* atau lapis perkerasan yang ter-*eksposed*. (3) Volume fraksi sedang (1% - 2%); (4) Penambahan *fiber* volume fraksi sedang diperlukan untuk meningkatkan ketahanan modulus patah (*modulus rupture*), keteguhan patah (*fracture toughness*), dan ketahanan kejut/benturan (*impact resistance*). Selain itu, penambahan *fiber* dengan volume fraksi sedang dapat meningkatkan ketahanan struktur terhadap spalling dan meningkatkan kemampuan absorpsi energi (*energy absorption*) (Djamaluddin, 2008); (5) Volume fraksi tinggi (>2%); dan (6) Penambahan *fiber* volume fraksi tinggi umumnya dilakukan untuk mendapat beton dengan kategori *ultra-high-performance fiber reinforced concrete* yang memiliki perilaku *strain hardening* tinggi atau peningkatan kekuatan *post-elastic respon*. (Denarié, 2011).

Mengacu pada Laporan Pengujian Efektifitas Penambahan Serat Baja Dramix Terhadap Karakteristik Mekanik Beton pada Johannes *et al.* (2017), dapat diketahui bahwa penambahan serat baja dramix sebanyak 20 kg dan 30 kg per 1 m³ beton menghasilkan kuat tarik belah sebesar 3,09 MPa, dan 3,42 MPa. Oleh karena itu, untuk *slab* beton dengan nilai kuat tarik belah minimal 3,5 MPa, maka jumlah fraksi serat dramix yang diperlukan adalah 40 kg per 1 m³ beton. (Brochure Dramix, 2019)

Spesifikasi usulan *slab*, sebagai berikut: (1) *slab* beton (K500), dimensi: 2000 mm x 850 mm x 150 mm, ukuran agregat maksimum = 20 mm, faktor air-semen, $f = 0,4 - 0,5$; (2) serat baja, tipe: halus, volume fraksi serat = 40 kg/m³, rasio panjang-diameter serat, $l/d = 75$; (3) *strand* baja, jumlah *strand* = 16 (2 lapis, 8 *strand* per lapis), diameter *strand* = 9,8 mm (BS 5896); (4) beban putus minimal yang diijinkan = 88 kN, gaya pretension per *strand* = 50 kN; dan (5) pengujian dan nilai minimum yang dibutuhkan: (a) Beton serat: kuat tekan minimum $f_c' = 43,6$ MPa, kuat belah minimum $f_{ct} = 3,8$ MPa, beton normal (tanpa serat), dan kuat tekan minimum $f_c' = 42$ MPa. Pada usulan ini, penambahan serat pada beton hanya dilakukan pada *slab* bagian ujung, yaitu sejarak 300 mm dan gambar detail struktur seperti dapat dilihat pada Gambar 21.

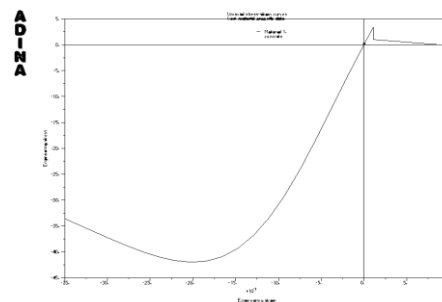
Pemodelan numeris *slab* usulan

Secara umum, *slab* dimodelkan sebagai elemen (2-D) *plane-strain* dengan dukungan elastik (*spring*)

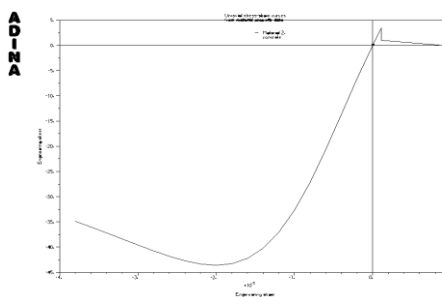
yang berasal dari tanah di bawahnya. Model *slab* kemudian dibebani secara perlahan-lahan hingga dapat diketahui ada atau tidaknya elemen *spring* yang menerima gaya tarik. Selanjutnya kontak definisi kontak elemen (*contact problem modeling*) dimodelkan dalam *slab* ini (Siminiati, 2002). Mengingat dukungan tanah di bawah *slab* hanya dapat menerima gaya tekan saja, maka elemen *spring* yang menerima gaya tarik akan di-*release*. Dengan *software* ADINA bisa juga dimodelkan *contact problems* antara dua struktur untuk mendapatkan gaya-gaya dalam atau tegangan yang terjadi akibat persinggungan *slab* di lapangan yang dibebani tidak secara bersamaan. (Bathe *et al.*, 2010).

Material

Pada analisis numerikal *slab* ini dimodelkan dua jenis bahan utama, yaitu beton dan tanah. Beton *slab* itu sendiri dimodelkan menjadi dua jenis juga, yaitu beton normal dan beton berserat. Kriteria kegagalan beton dalam model material ini mengadopsi penelitian Bathe and Ramaswamy (1979). Model ini sudah dikalibrasi dengan uji eksperimental seperti yang pernah dilakukan Ernst and Sohn (1973) dalam Triwiyono (2019), grafik kriteria kegagalan beton tampak pada Gambar 8. pemodelan bahan beton *slab* tanpa serat dan dengan serat seperti pada Gambar 9. Pemodelan berupa hubungan tegangan-regangan sesuai Gambar 8 dan 9 digunakan pada pemodelan beton di analisa numerikal kajian ini.



Gambar 8. Pemodelan bahan beton *slab* tanpa serat



Gambar 9. Pemodelan bahan beton *slab* dengan serat

Material beton

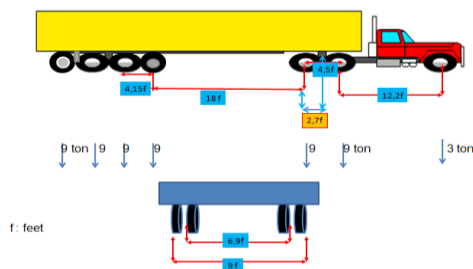
Model beton normal yang digunakan didefinisikan sebagai berikut (dapat dilihat Gambar 8): (1) kuat tekan (f_c') sebesar 42 MPa; (2) *density* sebesar $2,349 \text{ t/m}^3$; (3) modulus elastisitas sebesar 30.459 MPa; dan kuat tekan ultimit ($0,8 \times f_c'$) sebesar 33,6 MPa. Model beton berserat yang digunakan didefinisikan sebagai berikut (dapat dilihat Gambar 9): (1) kuat tekan (f_c') sebesar 43,6 MPa; (2) *density* sebesar $2,440 \text{ t/m}^3$; (3) Modulus elastisitas sebesar 31.034 MPa; (4) Kuat tekan ultimit ($0,8 \times f_c'$) sebesar 34,88 MPa

Material tanah

Tanah pendukung dibawah *slab* di asumsikan sebagai dukungan spring, nilai konstanta sebesar 15.000 kN/m^3 .

Pembebanan

Pembebanan dimodelkan dengan asumsi beban gandar sumbu kendaraan seperti tampak pada Gambar 10. Beban gandar sumbu maksimum diaplikasikan pada *slab* sebesar 9 ton pada jarak $4,15 \text{ feet} = 125 \text{ cm}$. (Andrianto, 2015)



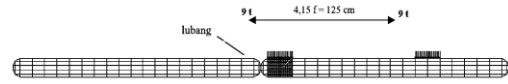
Sumber: Andrianto, 2015

Gambar 10. Beban gandar sumbu kendaraan pengguna *slab*

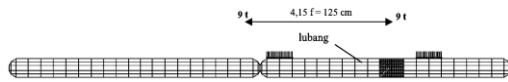
Model dan Hasil Analisis

Pemodelan numerikal dimodelkan 2D *plane stress* dan beban (*force*) *line* dalam bentuk beberapa variasi beban dan lubang *slab*: (1) beban tipe 1 lubang tipe 1 (B1L1), sesuai Gambar 11 (2 posisi beban *line* 200 mm dan lubang diameter 200 mm ada di bawah beban atau tepi *slab*); (2) beban tipe 1 lubang tipe 2 (B1L2), sesuai Gambar 12 (2 posisi beban *line* 200 mm dan lubang diameter 200 mm ada tengah-tengah *slab*); (3) beban tipe 2 lubang tipe 1 (B2L1), sesuai Gambar 13 (3 posisi beban *line* 200 mm dan lubang diameter 200 mm ada di bawah beban atau tepi *slab*); (4) beban tipe 2 lubang tipe 2 (B2L2), sesuai Gambar 14 (3 posisi beban *line* 200 mm dan lubang diameter 200 mm ada tengah-tengah *slab*); (5) beban tipe 3 lubang tipe 1 (B3L1), sesuai Gambar 15 (beban *line* 500

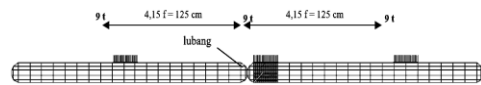
mm di tepi *slab* dan lubang diameter 200 mm ada di bawah beban atau tepi *slab*); dan (6) beban tipe 3 lubang tipe 2 (B3L2), sesuai Gambar 16 (beban *line* 500 mm di tepi *slab* dan lubang diameter 200 mm ada tengah-tengah *slab*). Lubang diameter 200 mm ini adalah tempat pengait saat mobilisasi dan pergeseran posisi *slab*.



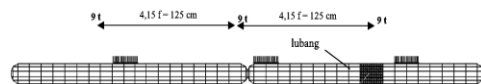
Gambar 11. Beban tipe 1 dan lubang tipe 1 (B1L1)



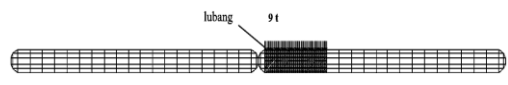
Gambar 12. Beban tipe 1 dan lubang tipe 2 (B1L2)



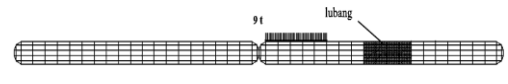
Gambar 13. Beban tipe 2 dan lubang tipe 1 (B2L1)



Gambar 14. Beban tipe 2 dan lubang tipe 2 (B2L2)



Gambar 15. Beban tipe 3 dan lubang tipe 1 (B3L1)



Gambar 16. Beban tipe 3 dan lubang tipe 2 (B3L2)

Hasil tegangan yy (σ_{yy}), tegangan zz (σ_{zz}), dan lendutan arah vertikal (Δz) analisis numerikal masing-masing variasi pemodelan dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4. Tegangan maksimum terjadi pada area dengan simbol " Δ " dan tegangan minimum terjadi pada simbol "*" sesuai yang tampak pada Gambar 17, 18, 19, dan 20. Pada Tabel 3, dapat diketahui bahwa tegangan tarik maksimum yang terjadi pada *slab* adalah sebesar 3,685 MPa. Nilai tegangan tersebut lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai tegangan tekan yang diakibatkan oleh pretension pada tendon baja, yaitu 6,60 MPa (dengan catatan terdapat 16 tendon

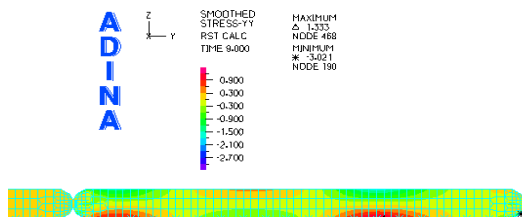
dengan gaya pretension per satu tendon adalah 55 kN). Superposisi dua nilai tegangan ini menunjukkan semua elemen beton pada *slab* mengalami tegangan tekan saja. Tentu hal ini akan sangat menguntungkan karena beton berkinerja sangat baik ketika mendukung tegangan tekan. *Slab* yang diusulkan masih dapat berkinerja baik karena kuat tariknya (3,80 MPa) masih lebih besar dari pada yang dibutuhkan (3,685 MPa).

Tabel 3. Hasil analisis numeris beton *slab* dalam beberapa variasi model

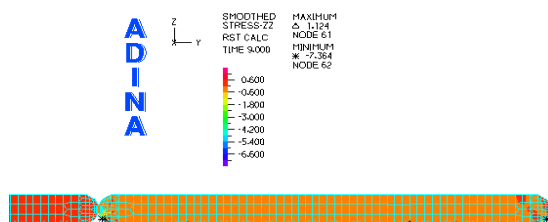
No.	Variasi model	Tegangan minimum (σ), MPa	
		σ_{yy}	σ_{zz}
1	B1L1	3,021 (-)	7,364 (-)
2	B1L2	3,097 (-)	6,810 (-)
3	B2L1	3,021 (-)	7,364 (-)
4	B2L2	3,094 (-)	6,808 (-)
5	B3L1	5,505 (-)	12,49 (-)
6	B3L2	4,890 (-)	11,08 (-)

Tabel 4. Hasil analisis numeris beton *slab* dalam beberapa variasi model terhadap tegangan masimum dan lendutan maksimum

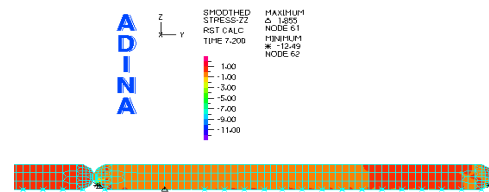
No.	Variasi model	Tegangan maksimum (σ), MPa		Δz maksimum (mm)
		σ_{yy}	σ_{zz}	
1	B1L1	1,333 (+)	1,124 (+)	0,503
2	B1L2	1,368 (+)	0,975 (+)	0,356
3	B2L1	1,406 (+)	1,124 (+)	0,354
4	B2L2	1,405 (+)	0,974 (+)	0,506
5	B3L1	3,685 (+)	1,855 (+)	2,990
6	B3L2	2,835 (+)	1,652 (+)	1,391



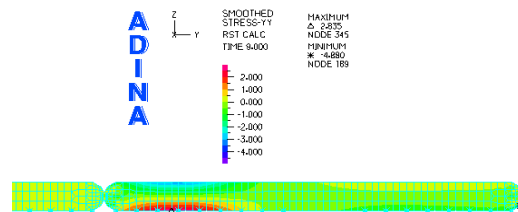
Gambar 17. Tegangan YY di daerah sisi *slab* berhimpitan



Gambar 18. Tegangan ZZ di daerah sisi *slab* berhimpitan



Gambar 19. Tegangan ZZ di daerah sisi *slab* berhimpitan



Gambar 20. Tegangan YY di daerah titik *slab* berhimpitan

Kesimpulan

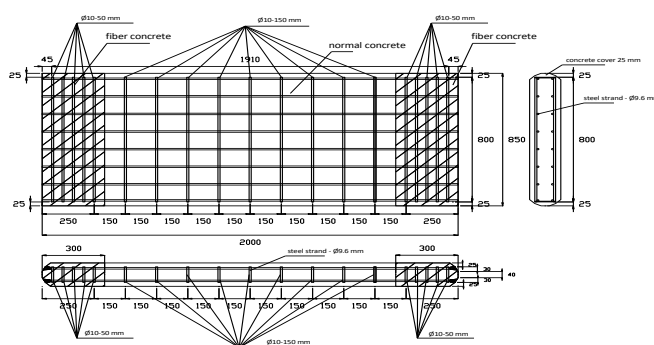
Hasil kajian retak dan atau *spalling* beton *slab* terjadi awalnya pada bagian tepi (sisi lebar 850 mm) yang selanjutnya menyebabkan efektifitas gaya pretension menjadi tidak optimal dan akhirnya volume *spalling* beton menjadi semakin bertambah. Selain karena frekuensi benturan saat pemasangan ataupun karena deformasi *slab* saat mendukung beban kendaraan, permasalahan retak/*spalling* beton juga dikarenakan oleh tidak sesuainya mutu beton. Hasil pengujian *core-case* menunjukkan mutu beton K-350 sampai dengan K-400, sedangkan persyaratan yang diminta adalah K-500.

Saran

Dalam tiap pelaksanaan usulan di atas dilakukan uji mekanik antara lain: uji tekan beton dan uji tarik belah, perlu kajian struktur *slab* global pada beberapa bagian area luas tertentu, dan aplikasi kajian lebih lanjut *slab* pada kondisi tanah dan musim yang berbeda,

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada PT. VICO Indonesia, Muara Badak, Kalimantan Timur. Ucapan terima kasih dapat juga disampaikan kepada pihak-pihak Tim Laboran, Laboratorium Struktur Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, FT, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta yang membantu pelaksanaan penelitian.



Gambar 21. Gambar usulan slab

Daftar Pustaka

- Andrianto, T., (2015, Januari), *Teknik Perencanaan Jalan-Bridge123, Tutorial Pelatihan Bridge*. Surabaya: Universitas Jayabaya, 35-38.
- Bathe, K. J., & Ramaswamy, S. (1979). On three-dimensional nonlinear analysis of concrete structures. *Nuclear Engineering and Design*, 52(3), 385-409.
- Bathe, K. J., Adina R. & D. Inc. (2010, June). *Theory and modeling guide, Volume I: Adina Solids & Structures*. Report ARS 10-7, 71 Elton Avenue Watertown, MA 02472 USA.
- Bowles, J. E. (1997). *Analisis dan desain pondasi jilid 1*. Alih bahasa Pantur Silaban. Jakarta, Indonesia: Erlangga. 473 hlm.
- Brochure Dramix 5D4D3D. (2019). Retrieved August 21, 2019, from <https://vdocuments.mx/brochure-dramix-5d4d3d.html>.
- Denarié, E., & Brühwiler, E. (2011). Strain-hardening ultra-high performance fibre reinforced concrete: deformability versus strength optimization. *Restoration of Buildings and Monuments*, 17(6), 397-410.
- Dinev, D. (2012). Analytical solution of beam on elastic foundation by singularity functions. *Engineering Mechanics*, 19(6), 381-392.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). *Manual desain perkerasan jalan*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Djamaluddin, R. (2008). Post cracking strength of pva fibers reinforced concrete. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 16(1), 26-30.
- Ernst, W. & Sohn. (1973). *Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Beruechsichtigung der zweiachsigen Beanspruchung*. Heft 299 des deuthen Ausschusses fuer Stahlbeton, Berlin.
- Johannes, D., Mangundap, K., Sugiharto, H., & Wijaya, G. B. (2017). Pengaruh penambahan serat baja 4D dramix terhadap kuat tekan, tarik belah, dan lentur pada beton. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 6(2), 40-47.
- Martin, J., Stanton, J., Mitra, N., & Lowes, L. N. (2007). Experimental testing to determine concrete fracture energy using simple laboratory test setup. *ACI Materials Journal*, 104(6), 575-584.
- Mypalm Network. (2019). *Concrete Steel Fiber Indonesia, Serat Baja Beton, Serat Kawat Beton*. Retrieved August 21, 2019, from http://www.filtersindo.com/Concrete_Steel_Fiber.html
- Sari, D. N. (2014). Analisa beban kendaraan terhadap derajat kerusakan jalan dan umur sisa. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 2(4), 615-620.
- Siminiati, D. (2002, January). FEM numerical algorithm on contact problem for non-conform elastic bodies. In *Proceedings of the 11th Scientific International Conference "Achievements in Mechanical and Materials Engineering" AMME* (pp. 495-498). Silesian University of Technology, Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Poland.
- SNI 03-2492-2002. (2002). *Metode Pengambilan Dan Pengujian Beton Inti*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Triwiyono, A., & Eratodi, I. G. L. B. (2019). Investigation of brick masonry with using of bad quality of bricks and reinforced concrete frame. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 258, p. 04008). EDP Sciences, Yogyakarta.