

Simulasi Pengaruh Variasi Dimensi Panel Pelat Beton Terhadap Konstelasi Tegangan pada Perkerasan Beton

Muhammad Saleh Far Far^{1*}, Suprpto Siswosukarto¹ Latif Budi Suparma¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: salehfar2020@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Perkerasan jalan beton memiliki banyak parameter penting yang harus diperhatikan, salah satunya yaitu dimensi ukuran panel pelat beton. Dimensi panel pelat beton sangat menentukan kinerja perkerasan beton. Penentuan dimensi ukuran panel pelat beton harus memperhatikan perbandingan lebar pelat dengan panjang tidak boleh lebih dari 1,25.

Studi ini menganalisis perbandingan ukuran panel perkerasan kaku menurut peraturan yang ada, yaitu 2,75 m x 2,75 m; 2,75 m x 5 m; dan 5 m x 5,5 m. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis perbedaan tebal perkerasan kaku yang terbagi menjadi 20, 25 dan 30 cm. Penelitian ini menggunakan simulasi dengan *software* Abaqus untuk menentukan daya dukung model perkerasan kaku dengan beban kendaraan terhadap variasi dimensi panel dan ketebalan pelat perkerasan.

Pembebanan tengah (*interior loading*) yang menyebabkan konstelasi tegangan terbesar untuk semua variasi model panel searah sumbu Szz atau sumbu transversal, namun nilai tegangannya masih di bawah *Modulus of Rupture*. Plat model M2 dengan dimensi 2,75 m x 5 m dengan perbandingan panjang dan lebar lebih dari 1,25 cenderung memiliki tegangan yang lebih besar. Tegangan yang terjadi pada pelat dipengaruhi oleh ketebalan pelat tersebut. Tegangan geser yang terjadi akibat pembebanan sudut pada model M2 dengan dimensi 2,75 m x 5 m dengan tebal pelat 20 cm memiliki nilai tegangan yang cukup besar sehingga telah melebihi tegangan geser yang diijinkan.

Kata kunci: Beton, Panel Pelat Beton, Westergaard.

1 PENDAHULUAN

Prasarana transportasi darat memiliki peranan penting dalam sektor perhubungan guna menunjang kebutuhan sehari-hari masyarakat di negara ini. Hal tersebut terlihat dengan adanya kenaikan panjang jalan dari tahun ke tahun. Penambahan panjang jalan tersebut didasari salah satunya oleh kebutuhan masyarakat yang semakin meningkat. Kebutuhan yang terus meningkat dengan ditandai bertambahnya panjang jalan berakibat pada pembebanan (volume lalu lintas dan beban sumbu) yang terus meningkat, sehingga jalan harus mampu mendukung baik dari aspek kapasitas maupun daya dukung. Guna mendukung kebutuhan yang terus meningkat, maka perkerasan jalan harus memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan.

Pada perkerasan jalan beton terdapat parameter yang sangat penting untuk diperhatikan yaitu dimensi ukuran panel pelat beton. Dimensi panel pelat beton merupakan faktor penting yang berhubungan dengan kinerja perkerasan beton. Penentuan dimensi ukuran panel pelat beton harus memperhatikan perbandingan lebar pelat dengan panjang tidak boleh lebih dari 1,25 (AASHTO, 1993). Berdasarkan Portland Cement Association (1984) dan Indian Roads Congress (2015) di dalam penelitian Vishwakarma & Ingle (2018), ukuran standar panel dari perkerasan kaku adalah 3.5 m x 4.5 m. Berdasarkan ACI 302.1R-15 (2015) juga memberikan ketentuan lebar panel perkerasan kaku dengan ukuran 3,6 m - 4,3 m dan panjang panel biasanya sekitar 3,6 m - 6,1 m. Vishwakarma & Ingle (2018), melakukan penelitian menggunakan metode elemen hingga yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh ukuran panel pelat dan jari-jari atau radius relative kekakuan pada tegangan tepi kritis. Gupta (2022) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh berbagai parameter pada karakteristik desain beton panel pendek perkerasan dengan ukuran mulai dari 0,5 m x 0,5 m sampai 2 m x 2 m menggunakan FEM 2-D dan 3-D dengan program ANSYS dan KENSLAB.

Hilyanto & Setiawan (2013) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengukur besarnya lendutan dan tegangan total tanah akibat variasi posisi pembebanan. Penelitian ini menggunakan Plaxis 3D dalam menganalisis besarnya lendutan dan tegangan total tanah akibat pembebanan pusat, ujung, dan tepi pelat. Selain itu, dalam penelitian ini terdapat variasi ketebalan dan mutu beton. Model pelat yang digunakan berukuran 6 m x 3 m. Variasi ketebalan pelat beton pada penelitian ini di antaranya 15 cm, 25 cm, dan 35 cm dan mutu beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah f_c' 20, 25 dan 30 MPa.

Utomo (2017) melakukan penelitian yang bertujuan guna mengevaluasi rigid pavement pada jalan tol Solo-Ngawi ruas Colomadu-Karanganyar dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element*) dengan idealisasi *Plate on Elastic Foundation* (PoEF) dan *3-Dimension Solid* (3DS) dengan alat bantu *software* SAP 2000 dan Abaqus. Mahfuda et al., (2023) melakukan penelitian yang bertujuan mengkaji pengaruh gradien temperatur yang terjadi pada pelat beton perkerasan kaku. Jenis penelitian ini adalah analisis numerik menggunakan menggunakan *software* Abaqus dengan model 3D *Solid*. H2O

2 METODOLOGI

Studi yang dilakukan menganalisis perbandingan ukuran panel beton dengan ukuran 2,75 m x 2,75 (model M1); 2,75 m x 5 m (model M2); dan 5 m x 5,5 (model M3) menggunakan elemen tiga dimensi (3DS) sebagai implementasi perkerasan kaku. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis perbedaan tebal perkerasan kaku yang terbagi menjadi 20, 25 dan 30 cm. Penelitian ini diharapkan dapat memperdalam pemahaman tentang dampak pengaruh variasi dimensi model panel pelat beton pada perkerasan kaku. Elemen yang digunakan adalah hexahedral dan tetrahedral. Unsur-unsur ini dicampur dalam model mesh untuk memberikan solusi akurasi tinggi dan mengurangi kompleksitas komputasi yang membuat analisis waktu simulasi bisa lebih efektif dan efisien. Beban yang digunakan adalah beban statik dari roda kendaraan sesuai dengan hasil survey kendaraan yang melintas oleh DPUPKP Kabupaten Sleman. Parameter lain yang belum terdapat di dalam data diasumsikan dengan menggunakan pendekatan matematis dan teknis. Penelitian ini menggunakan di Kabupaten Sleman berupa jalan dengan perkerasan kaku yang memiliki panjang 1,2 km dan lebar 5,5 m. Adapun ketebalan lapisan perkerasan kaku yang digunakan terdiri dari lapisan subgrade (2,5 m) dimana ditentukan melalui Teori Boussinesq, lapisan subbase (10 cm), dan pelat perkerasan kaku (20, 25, dan 30 cm).

2.1 Parameter Perkerasan Kaku

Konstruksi pelat perkerasan kaku biasanya terdiri dari bahan baku agregat dan menggunakan semen sebagai bahan pengikatnya, sehingga memiliki tingkat kekakuan yang relatif tinggi, sehingga dikenal dan disebut sebagai perkerasan kaku (Manual Desain Perkerasan, 2017). Komponen yang digunakan dalam perkerasan kaku, antara lain (Aly, 2004):

- Tanah dasar adalah bagian permukaan badan jalan yang dipersiapkan untuk menerima konstruksi di atasnya, yaitu konstruksi perkerasan..
- Lapisan *subbase* adalah lapisan konstruksi perkerasan kaku yang terletak di antara subgrade dan pelat beton semen. Fungsi utama lapisan *subbase* adalah sebagai lantai kerja yang rata dan seragam, menahan pumping, menahan perubahan volume, dan lain-lain.
- Tulangan pelat beton mempunyai fungsi tulangan pelat beton adalah untuk mencengkeram beton agar tidak retak dan tidak menahan momen atau garis lintang yang akan diterima pelat beton.
- Tulangan sambungan pada perkerasan beton terbagi menjadi dua yaitu tulangan sambungan memanjang (*tie bar*) dan tulangan sambungan melintang (*dowel*).

Selain itu, beban yang digunakan di dalam penelitian ini mengacu pada kelas jalan dan hasil survey dari hasil survey DPUPKP Kabupaten Sleman 2021. Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 05/PRT/M/2018 tentang jalan yang dapat dilalui Kendaraan Bermotor dengan lebar tidak melebihi 2.100 (dua ribu seratus) milimeter, panjang tidak melebihi 9.000 (sembilan ribu) milimeter, tinggi tidak melebihi 3.500 (tiga ribu lima ratus) milimeter, dan MST 8 (delapan) ton.

Kedalaman tanah ditentukan dengan menggunakan rumus Boussinesq, dimana tanah diasumsikan seragam, elastis, isotropik dan homogen (Hardiyatmo, 2015). Dengan beban yang digunakan adalah beban tapak roda kendaraan yang diubah menjadi bentuk persegi panjang, maka luas beban yang digunakan pada teori Boussinesq digunakan beban dengan bentuk persegi panjang.

Bedasarkan Huang (2004), ada tiga metode yang dapat digunakan untuk tegangan dan lendutan pada perkerasan beton, yaitu: rumus bentuk tertutup, diagram pengaruh, dan program komputer elemen hingga. Dalam penelitian ini, teori yang digunakan dalam formulasi bentuk tertutup untuk menganalisis pembebanan adalah teori analisis Westergaard. Dalam teori Westergaard pada dasarnya hanya berlaku untuk pelat yang sangat besar dengan beban roda tunggal diterapkan di dekat sudut, di bagian dalam pelat pada jarak yang cukup jauh dari tepi mana pun, dan di dekat tepi jauh sudut mana pun.

2.2 Metode Elemen Hingga

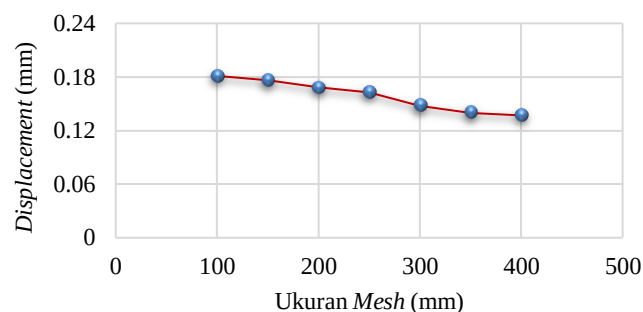
Metode Elemen Hingga (FEM) adalah metode numerik untuk mendapatkan solusi dari permasalahan diferensial, baik persamaan diferensial (persamaan diferensial biasa) maupun persamaan diferensial parsial (persamaan diferensial parsial) (Hajar & Pathur Razi, 2018). Proses inti dari FEM adalah membagi masalah yang kompleks menjadi bagian-bagian atau elemen-elemen yang lebih kecil yang darinya solusi yang lebih sederhana dapat diturunkan dengan mudah. Suatu struktur memiliki modulus elastisitas (E), modulus geser (G), luas penampang (A), panjang (L) dan inersia (I) (Suhendro, 2000). Berdasarkan Bathe (2014), akurasi hasil solusi akan meningkat jika terus menyempurnakan hasil elemen hingga mesh, yaitu jika kondisi elemen harus lengkap, dan elemen dan mesh harus kompatibel pada konvergensi monoton. Penyempurnaan mesh dilakukan dengan membagi elemen yang digunakan sebelumnya menjadi dua elemen atau lebih. Dengan menggunakan elemen yang lebih halus, kita dapat mencapai konvergensi yang lebih baik, yang berarti solusi numerik akan lebih dekat dengan solusi eksak.

Dalam studi ini tegangan yang ditimbulkan pada perkerasan kaku dibandingkan dengan standar yang berlaku. Untuk melakukan perbandingan tersebut digunakan parameter yang ditentukan oleh standar SNI 2847:2019. Pertama, untuk membandingkan tegangan tarik normal, maka digunakan *Modulus of Rupture* (MoR) yang ditentukan dalam standar. MoR adalah nilai kekuatan lentur maksimum (tegangan maksimum) yang dapat ditahan oleh perkerasan kaku sebelum runtuh (kegagalan tarik). Nilai MoR yang digunakan adalah 3,57 MPa. Tegangan geser yang dihasilkan dari analisa pelat dibandingkan dengan nilai tegangan geser ijin dari beton. Nilai tegangan geser ijin dari beton pada penelitian ini adalah sebesar 0,9603 MPa.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Konvergensi

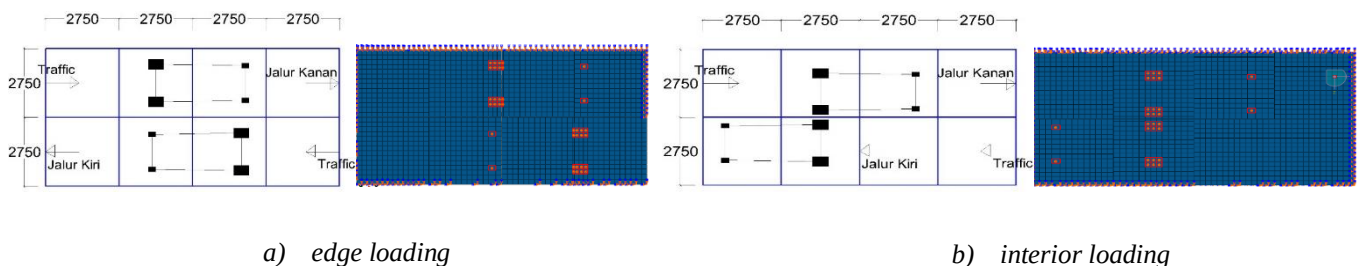
Hasil konvergensi ditunjukkan pada Gambar 1 untuk menentukan persentase selisih setiap *mesh*. Berdasarkan Gambar 1, *mesh* dengan ukuran yang lebih kecil menunjukkan hasil yang lebih akurat jika dibandingkan dengan ukuran *mesh* yang lebih besar. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan *mesh size* 200 mm sesuai dengan percobaan *mesh* yang telah dilakukan sebelumnya oleh peneliti.

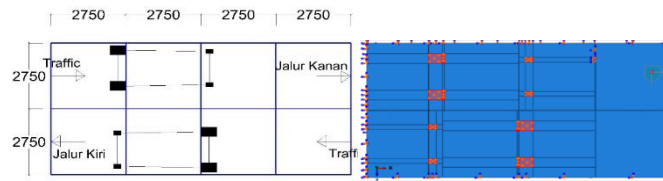


Gambar 1. Hasil uji konvergensi

3.2 Analisis Beban Kendaraan

Posisi pembebanan juga mempengaruhi beban kendaraan yang digunakan. Westergaard di dalam Huang (2004) teori *corner*, *interior* dan *edge loading* menentukan variasi pembebanan, yang dapat dilihat pada Gambar 2.

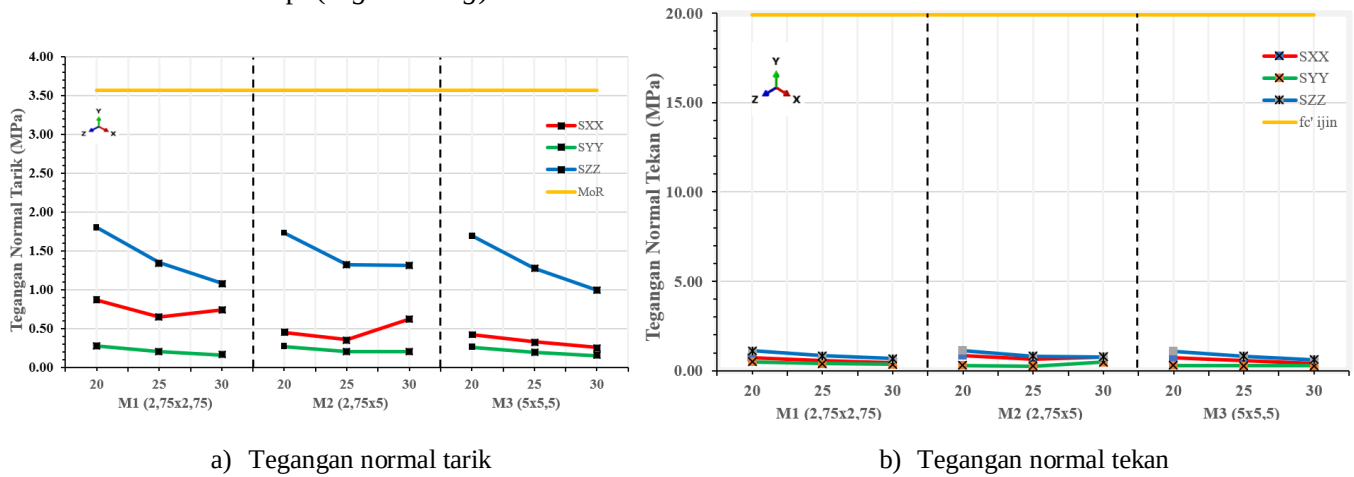




c) corner loading

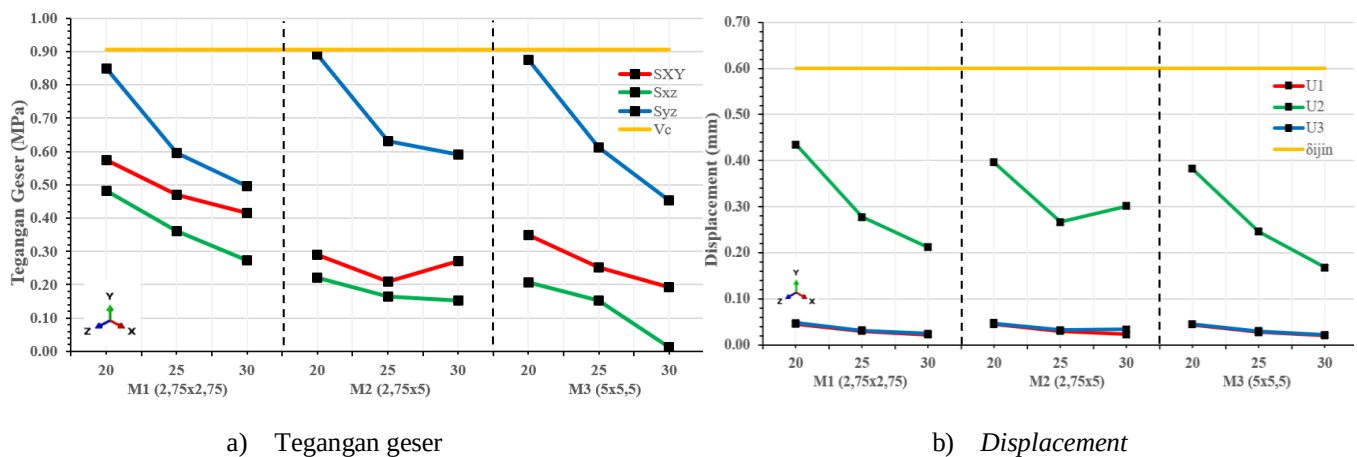
Gambar 2. Posisi pembebanan berdasarkan Westergaard (a) edge loading (b) interior loading (c) corner loading

3.2.1 Analisis beban tepi (edge loading)



Gambar 3. Tegangan normal (a) tarik dan (b) tekan pada edge loading

Distribusi tegangan normal tarik (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz}) dari Gambar 3a menunjukkan bagaimana gaya tarik bekerja di setiap arah sampel yang diuji. Setiap arah tegangan normal tarik memiliki nilai yang berbeda, yang dapat menunjukkan sifat mekanik model. Tegangan tarik arah S_{yy} (warna hijau) pada penampang M1 memiliki nilai konstelasi tegangan yang besar, dengan nilai paling besar pada pelat tebal 20 cm yaitu 0,2778 MPa, namun masih dibawah nilai *Modulus of Rupture* sebesar 7,78%. Dari Gambar 3b terlihat pengaruh variasi dimensi (panjang x lebar) pada Model M1, M2, dan M3 yang masing-masing memiliki dimensi yang berbeda, tegangan normal tekan pada pelat bervariasi. Dan juga model dengan dimensi yang lebih kecil yaitu M1 dan M2 memiliki tegangan normal tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan M3.

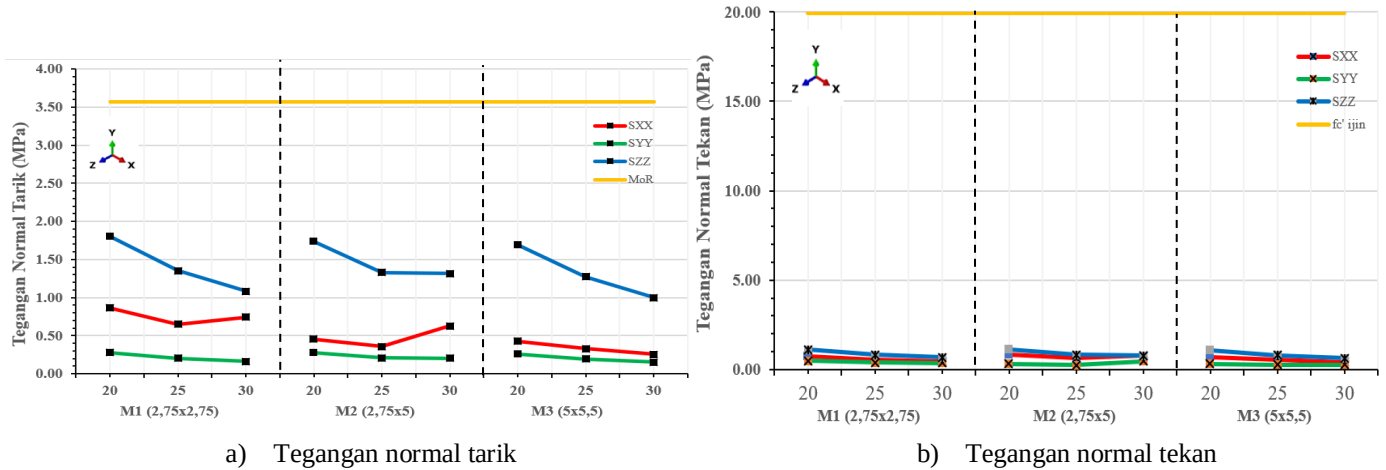


Gambar 4. (a) Tegangan geser dan (b) displacement pada edge loading

Dari Gambar 4a dapat diketahui bahwa tegangan geser (S_{xy} , S_{xz} , dan S_{yz}) pada permukaan pelat dipengaruhi oleh variasi panjang x lebar pelat. Dan pada model M1 dengan tebal 20 cm memiliki nilai tegangan geser maksimum pada arah S_{xz} (warna hijau) sebesar 0,4827 MPa masih dibawah nilai tegangan geser ijin sebesar 53,26%. Temuan pola konstelasi tegangan ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Vishwakarma & Ingle (2018)

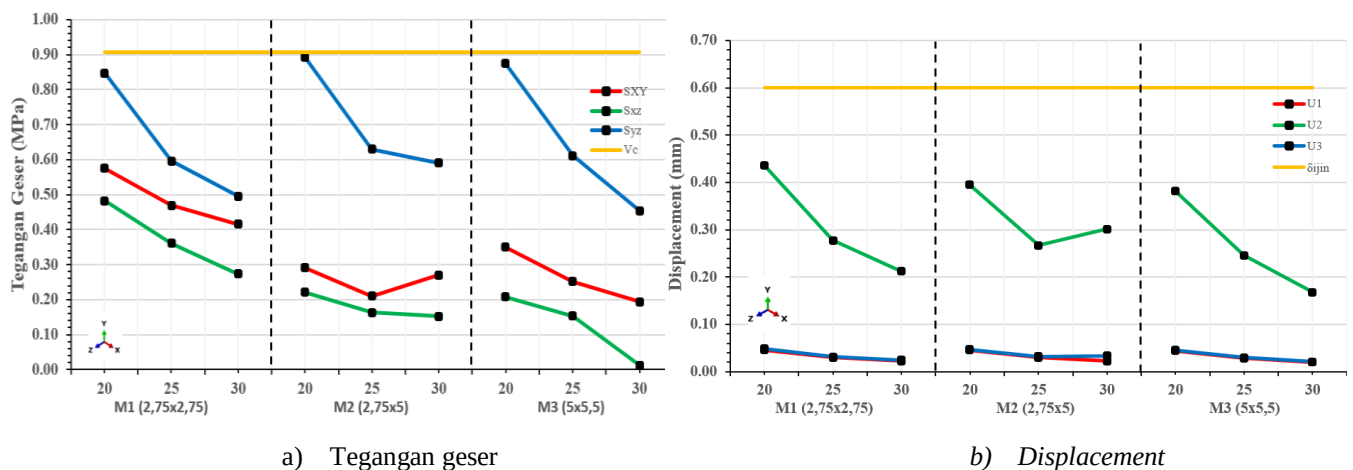
dan Gupta (2022). Dari Gambar 4b dapat disimpulkan bahwa displacement (U_1 , U_2 , U_3) cenderung bervariasi dengan perubahan dimensi ketebalan masing-masing model (M_1 , M_2 , dan M_3). Terlihat pada Gambar 4b. bahwa perpindahan arah U_2 (warna hijau) pada model M_1 cenderung lebih tinggi sebesar 0,4358 MPa dibandingkan arah U_1 dan U_3 pada beberapa variasi ketebalan dan dimensi model.

3.2.2 Analisis beban interior (*interior loading*)



Gambar 5. Tegangan normal (a) tarik dan (b) tekan pada *interior loading*

Distribusi tegangan normal tarik (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz}) pada Gambar 5a menunjukkan sejauh mana gaya tarik bekerja pada setiap arah pada sampel yang diuji. Setiap arah tegangan tarik normal (S_{xx} , S_{yy} , S_{zz}) memiliki nilai yang berbeda dan dapat memberikan gambaran sifat mekanik dari masing-masing model. Terjadi sedikit peningkatan konstelasi tegangan tarik arah S_{yy} (warna hijau) pada penampang M_1 dengan tebal 20 cm memiliki nilai tegangan sebesar 0,3397 MPa, namun masih dibawah nilai *Modulus of Rupture* sebesar 9,51%. Distribusi tegangan normal tekan pada arah yang berbeda (S_{xx} , S_{yy} , dan S_{zz}) pada pelat ditunjukkan pada Gambar 5b. Pada sumbu x, y, dan z distribusi tegangan normal tekan lebih kecil daripada tegangan normal tarik. Tegangan tekan searah S_{yy} pada penampang M_1 mengalami peningkatan menjadi 0,6028 MPa, namun masih jauh dibawah nilai kuat tekan beton (f'_c) sebesar 1,82 %.

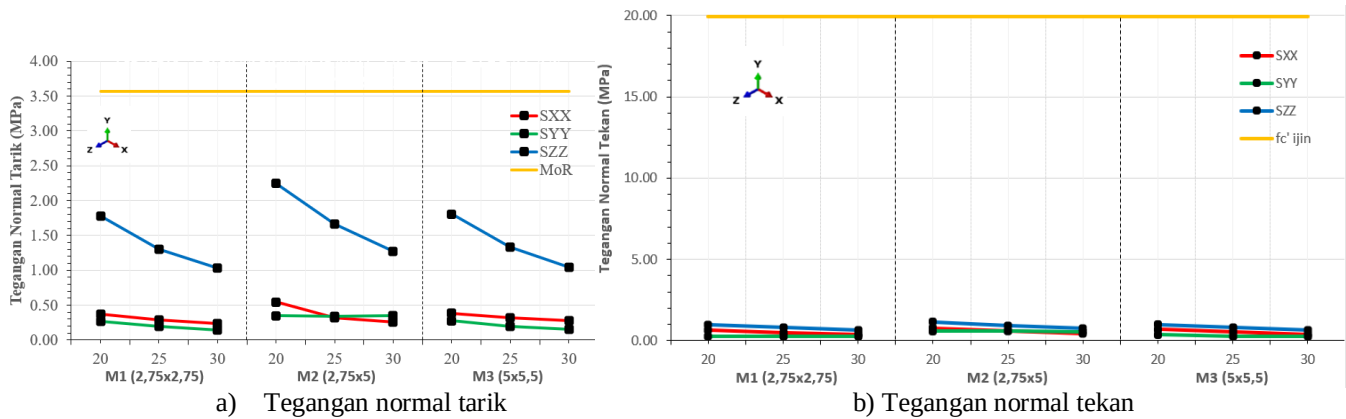


Gambar 6. (a) Tegangan geser dan (b) *displacement* pada *interior loading*

Dari Gambar 6a terlihat bahwa pengaruh variasi dimensi (panjang x lebar) pada pelat beton perkerasan kaku mempengaruhi tegangan geser (S_{xy} , S_{xz} , S_{yz}) yang terjadi pada permukaan pelat. Tegangan geser cenderung berbeda untuk setiap variasi dimensi pelat. Nilai tegangan geser pada model M_1 dan M_2 lebih besar dibandingkan model M_3 . Sedangkan untuk tebal, tegangan geser pada pelat cenderung menurun dengan bertambahnya tebal pelat beton (misalnya tebal pelat bertambah dari 20 cm menjadi 25 cm atau 30 cm). Dari Gambar 6b data yang

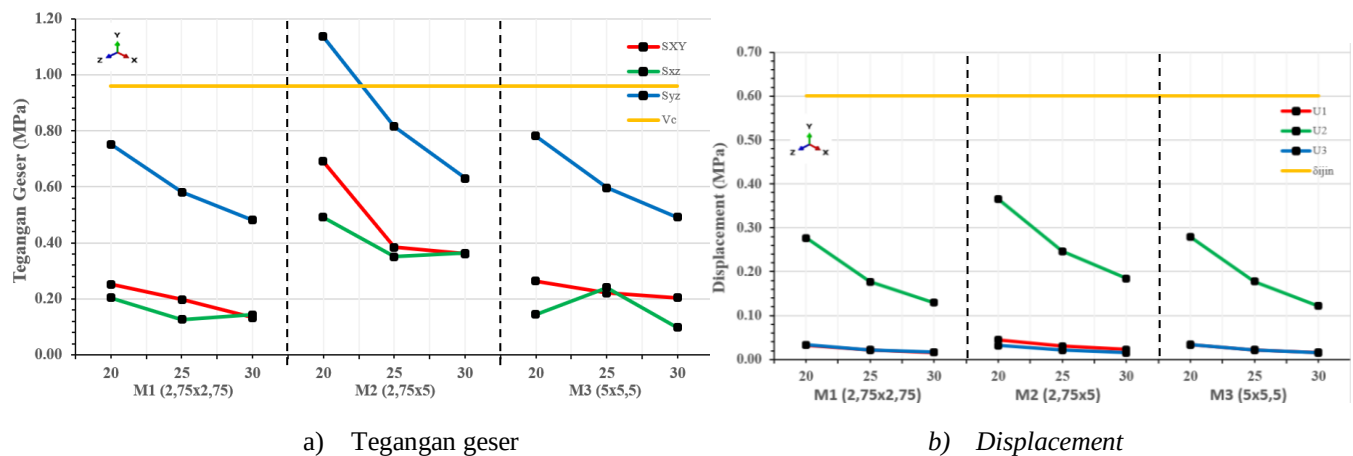
menunjukkan Pengaruh Dimensi Tebal menunjukkan bahwa perpindahan pada arah U2 cenderung lebih tinggi dibandingkan arah U1 dan U3 pada beberapa variasi dimensi dan model ketebalan.

3.2.3 Analisis beban ujung (*corner loading*)



Gambar 7. Tegangan normal (a) tarik dan (b) tekan pada *corner loading*

Dari Gambar 7a terlihat pengaruh variasi dimensi (panjang x lebar) yaitu pada model M1 dan model M3 konstelasi tegangan normal tarik pada pelat cenderung relatif lebih rendah dibandingkan model M2. Hal ini menunjukkan bahwa pelat dengan dimensi atau perbandingan panjang dan lebar lebih besar dari 1,25 berpotensi mengalami tegangan tarik yang lebih tinggi. Dari Gambar 7b terlihat pengaruh variasi dimensi (panjang x lebar) pada Model M1, M2, dan M3 yang masing-masing memiliki dimensi yang berbeda, tegangan tekan normal pada pelat bervariasi. Model M2 dan M3 memiliki tegangan tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan M1.



Gambar 8. (a) Tegangan geser dan (b) *displacement* pada *corner loading*

Dari Gambar 8a menunjukkan pengaruh variasi dimensi (panjang x lebar) pada Model M1, M2, dan M3 yang masing-masing memiliki dimensi yang berbeda, tegangan gesernya pun bervariasi (S_{xy} , S_{xz} , S_{yz}) Nilai tertinggi terdapat pada model M2 dengan ketebalan 20 cm yaitu sebesar 1,1357, dan nilai tersebut telah melampaui tegangan geser ijin sebesar 0,9603. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tipis suatu pelat maka tegangan tekan akan semakin besar. Dari Gambar 8b menunjukkan variasi dimensi ketebalan dan hasil perpindahan (U_1 , U_2 , U_3) untuk tiga model yang berbeda (M1, M2, M3) dengan variasi ketebalan (20 cm, 25 cm, 30 cm).

4 KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, terlihat adanya korelasi antara dimensi panel perkerasan beton dengan nilai tegangan yang terjadi. Bagian dengan dimensi yang lebih kecil, seperti model M1 (2,75 m x 2,75 m), menunjukkan nilai tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi dimensi yang lebih besar, seperti M2

(2,75 m x 5 m) dan M3 (5 m x 5,5 m). Hal ini menunjukkan bahwa penampang ini berpotensi memikul beban lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Sebagian besar perpindahan yang terjadi dari beberapa model masih di bawah lendutan yang diijinkan, namun terkait kenyamanan, mungkin permukaan perkerasan kaku tidak hancur tetapi berubah bentuk.

REFERENSI

- AASHTO. (1993). *Design of Pavement Structures*.
- ACI 302.1R-15. (2015). *ACI 302.1R-15. Guide to Concrete Floor and Slab Construction Reported by ACI Committee 302* (Vol. 0).
- Aly, M. A. (2004). *Teknologi Perkerasan Jalan Beton-Semen*. Yayasan Pengembang Teknologi dan Manajemen.
- Bathe, K. J. (2014). Finite Element Procedures. In *Englewood Cliffs New Jersey*. <http://www.amazon.com/Finite-Element-Procedures-Part-1-2/dp/0133014584>
- Gupta, A. (2022). Analytical Investigations on Short-Paneled Concrete Pavements Using Finite Element Analysis. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(2), 1755–1770. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00595-x>
- Hajar, I., & Pathur Razi, A. (2018). *Metode Elemen Hingga*. UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT.
- Hardiyatmo, H. C. (2015a). *Mekanika Tanah 2*. Gadjah Mada University Press.
- Hilyanto, R. R., & Setiawan, B. (2013). Simulasi Perilaku Pelat Beton Sebagai Perkerasan Kaku Di Atas Tanah Subgrade Saradan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Matriks Teknik Sipil*, 1(4), 424–431.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design, Second Edition*. Pearson Prentice Hall.
- Indian Roads Congress. (2015). STANDARD SPECIFICATIONS AND CODE OF PRACTICE FOR ROAD BRIDGES. *Irc:5-2015*, 1–89.
- Mahfuda, A., Siswosukarto, S., & Suhendro, B. (2023). The Influence of Temperature Variations on Rigid Pavement Concrete Slabs. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 9(May), 139–150. <https://doi.org/10.22146/jcef.5744>
- Manual Desain Perkerasan. (2017). *MANUAL PERKERASAN JALAN (Revisi Juni 2017)*. 1–34.
- Portland Cement Association. (1984). *PCA Design Procedure for Concrete Highways and Street Pavements-1984. January*. <https://www.researchgate.net/publication/312040049>
- SNI 2847:2019. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. 8, 1–720.
- Suhendro, B. (2000). *Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya*. Fakultas Teknik UGM.
- Utomo, W. B. (2017). Analisis Rigid Pavement dengan Metode Finite Element. In *Prosiding Simposium Forum Studi Transportasi antar Perguruan Tinggi ke-20*. FT UGM.
- Vishwakarma, R. J., & Ingle, R. K. (2018). Effect of Panel Size and Radius of Relative Stiffness on Critical Stresses in Concrete Pavement. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3308-x>