

**ANALISIS TEGANGAN, REGANGAN, DAN DEFORMASI PADA
PERKERASAN LENTUR PORUS DAN KONVENSIONAL DENGAN
SKALA SEMI LAPANGAN**

**NASKAH TERPUBLIKASI
TEKNIK SIPIL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RATU EKA RIYANA
NIM. 145060109111003**

**VRISCHA NATALIA ARUNG
NIM. 145060109111004**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2017**

ANALISIS TEGANGAN, REGANGAN, DAN DEFORMASI PADA PERKERASAN LENTUR PORUS DAN KONVENSIONAL DENGAN SKALA SEMI LAPANGAN

(Comparison of Stress, Strain, and Deformation between Porous and Conventional Pavement under Accelerated Load)

Ratu Eka Riyana, Vrischa Natalia Arung, Ludfi Djakfar, Yulvi Zaika

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan Mayjen Haryono 167 Malang 65145 – Telp (0341) 567886

E-mail: ratu.riyana@yahoo.com, vrischa_arung@yahoo.com

ABSTRAK

Seiring dengan banyaknya kebutuhan dan pembangunan jalan, maka banyak pula ruang terbuka hijau yang kegunaannya beralih fungsi sehingga menimbulkan berbagai masalah lingkungan, yaitu berkurangnya daerah resapan air. Beralihnya fungsi daerah resapan air dapat mengakibatkan terjadinya genangan atau banjir lokal yang dapat merusak perkerasan lentur jalan raya. Salah satu upaya pencegahan atas permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan perkerasan lentur porus. Perkerasan ini memiliki struktur lapisan pori yang lebih besar atau angka permeabilitasnya lebih tinggi dibandingkan dengan perkerasan konvensional sehingga memungkinkan air lebih cepat mengalir ke lapisan bawah. Namun, hal ini menyebabkan kekuatan dari perkerasan tersebut akan terpengaruh. Mengingat pentingnya mengetahui pengaruh tegangan, regangan, dan deformasi terhadap perkerasan porus dan konvensional, maka perlu dilakukan penelitian terhadap dua jenis perkerasan tersebut dengan metode skala semi lapangan dan fokus pada peningkatan kinerja jumlah lintasan. Skala semi lapangan merupakan metode analitis yang dapat dilakukan di lapangan menggunakan skala tertentu yang mampu merepresentasikan kondisi sesungguhnya yang terjadi di lapangan, baik pada beban, material, maupun ketebalannya sehingga hasil uji yang diperoleh dapat digunakan. Dari hasil pengukuran, didapat bahwa nilai tegangan dan regangan cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya jumlah lintasan. Sedangkan, deformasi yang terjadi pada permukaan aspal akibat beban roda yang melintas semakin bertambah besar seiring dengan bertambahnya jumlah lintasan.

Kata kunci : Tegangan, Regangan, Deformasi, Perkerasan Lentur Porus, Perkerasan Lentur Konvensional, Skala Semi Lapangan.

ABSTRACT

Due to the many needs and the construction of highway cause various environmental problems, such as reduced water absorbs. Reduced water absorbs can cause puddles or local flood that can undermine highway of flexible pavement. One prevention on the problem is by using porous pavement. The course of porous pavement has higher void space and permeability than conventional pavement that allows water to drain through the pavement rather than running off. However, it cause the strength of the pavement will be affected. Given the the importance of knowing the effect of stress, strain, and deformation of the porous pavement and conventional, needs to be done the study or research of the two types of pavement under accelerated load and focus on improving the number of performance. Accelerated load is an analytical method that can be performed in the field using a certain scale that is able to represent the real conditions that occur in the field, both on the load, material, and its thickness so that the test results obtained can be used. From the measurement results, obtained that stress and strain values tend to decrease with the raising number of passes. Meanwhile, the deformation that occurs on the surface of the asphalt due to load the wheels that pass more increases with the raising number of passes.

Keywords : Stress, Strain, Deformation, Porous Pavement, Conventional Pavement, Accelerated Load

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Jenis perkerasan lentur yang digunakan di Indonesia pada umumnya adalah perkerasan konvensional dengan standar Bina Marga. Tipikal utama dari perkerasan lentur konvensional ini adalah kemampuannya dalam meloloskan air kurang baik sehingga pada musim hujan jalan rentan terhadap kerusakan dan dapat mengakibatkan terjadinya genangan atau banjir. Salah satu upaya pencegahan atas permasalahan tersebut adalah menggunakan aspal porous. Aspal porous adalah campuran aspal generasi baru dalam perkerasan lentur yang memperbolehkan air mengalir kedalam lapisan atas secara vertikal dan horizontal sehingga dapat mengurangi genangan air dan limpasan air akibat air hujan yang jatuh di permukaan perkerasan jalan.

Dalam perencanaan struktur perkerasan aspal porous, selain material bahan penyusunnya, terdapat pula aspek lain yang perlu diperhatikan, yaitu perilaku perkerasan dalam menerima beban yang ditunjukkan dengan tegangan, regangan, dan deformasi. Untuk mengetahui tegangan, regangan, dan deformasi pada perkerasan porous dan konvensional, maka peneliti ingin melakukan pengujian pada dua perkerasan tersebut dengan metode skala semi lapangan dan fokus pada peningkatan kinerja jumlah lintasan. Dengan dasar tersebut, maka penyusun akan mengangkat topik dalam tugas akhir ini dengan judul “Analisis Tegangan, Regangan, dan Deformasi pada Perkerasan Lentur Porus dan Konvensional dengan Skala Semi Lapangan.”

Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- 1) Bagaimana perilaku tegangan dan regangan pada lapisan perkerasan lentur porous dan konvensional skala semi lapangan yang diberi beban berjalan dan beban berhenti?
- 2) Apakah terdapat perbedaan deformasi yang signifikan antara perkerasan lentur porous dengan konvensional?

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

- 1) Mengukur tegangan dan regangan pada pondasi perkerasan dengan skala semi lapangan yang diberikan beban berjalan dan beban berhenti.
- 2) Mengevaluasi perilaku tegangan, regangan, dan deformasi pada perkerasan lentur porous dan konvensional dalam skala model semi lapangan, serta melihat perbedaan di antara kedua perkerasan lentur tersebut.

TINJAUAN PUSTAKA

Perkerasan Porus (*Porous Pavement*)

Perkerasan porous atau perkerasan tembus air adalah perkerasan yang direncanakan dengan menggunakan bahan material yang mampu meloloskan aliran air ke dalam lapisan tanah di bawahnya (Steven dan Kurt, 1985).

Perkerasan Konvensional

Perkerasan konvensional memiliki sifat kedap terhadap air, sehingga air tidak mudah meresap ke lapisan di bawahnya

Tegangan dan Regangan pada Perkerasan Lentur

Konsep penyaluran beban pada perkerasan yaitu beban menyebar ke bawah sejauh ketebalan perkerasan. Pengaruh beban akan semakin kecil seiring dengan bertambahnya kedalaman. Tegangan dan regangan yang diterima oleh perkerasan akibat beban mengalami pengurangan dan pada akhirnya tidak merasakan pengaruh beban tersebut sehingga nilai tegangan dan regangan yang terjadi dapat diabaikan.

Pemodelan Perkerasan Skala Semi Lapangan

Pemodelan perkerasan porous skala semi lapangan menggunakan konsep metode analitis. Metode analitis menggunakan beberapa langkah yaitu:

- 1) Mengasumsi bentuk perkerasan
- 2) Menetapkan beban
- 3) Memperkirakan material yang akan digunakan
- 4) Menganalisa tegangan, regangan, dan lendutan pada titik kritis
- 5) Membandingkan hasil yang diperoleh dengan tegangan ijin
- 6) Apabila belum memenuhi, maka diulangi kembali langkah 3, 4, dan 5 hingga didapatkan desain yang sesuai
- 7) Mempertimbangkan aspek ekonomi

METODOLOGI PENELITIAN

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli 2016 hingga selesai di tempat parkir jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Pengujian Material

Pengujian terhadap material meliputi pengujian analisa saringan, pemadatan standar, dan CBR.

Karakteristik Perkerasan Lentur

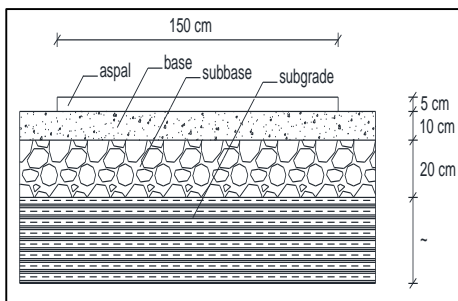
Dalam campuran aspal porous ini, digunakan agregat dengan gradasi standar *British* dengan tambahan zat *additive gilsonite HMA modifier grade* sebagai zat yang dapat memperbaiki kinerja aspal.

Aspal porus yang digunakan adalah aspal porus dengan karakteristik aspal mengikuti penelitian yang telah dilakukan Ramadhan dan Burhan (2014), yaitu kadar aspal sebesar 5,75% dan kadar *gilsonite* optimum sebesar 8% dari kadar aspal optimum. Adapun pemodelan aspal konvensional yang digunakan adalah menggunakan standar Bina Marga.

Pada perkerasan lentur porus dan konvensional, lapisan pondasi yang digunakan merupakan lapis perkerasan konvensional. Agregat batu pecah yang digunakan sebagai lapisan *base* dan *subbase* berasal dari kecamatan Ngoro, Mojokerto. Sedangkan, tanah dasar yang digunakan adalah tanah yang berada pada lapangan parkir Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya dengan jenis tanah pasir berlempung.

Dimensi Model Struktur Perkerasan

Struktur perkerasan terdiri dari lapisan permukaan (*surface*) berupa aspal porus dengan bahan tambahan *gilsonite* dan aspal konvensional, *base* berupa LPA, *subbase* berupa LPB, dan *subgrade* berupa tanah dengan karakteristik pasir berlempung.



Gambar 1 Struktur Perkerasan Skala Semi Lapangan Potongan Memanjang

Ketebalan yang digunakan pada perkerasan semi lapangan berdasarkan ketebalan pada umumnya sehingga pengukuran tegangan, regangan, dan deformasi ini dinamakan pengukuran dengan skala semi lapangan.

Pengembangan Alat

a. Mesin Penguji



Gambar 2 Mesin Penguji

b. Strain Gauge



Gambar 3 Strain Gauge

c. Strain Meter dan Cable Switch



Gambar 4 Strain Meter

d. Strain Meter dan Cable Switch



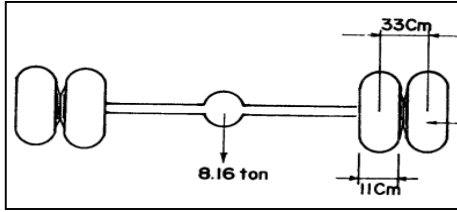
Gambar 5 Alat Pengukur Tegangan

e. Strain Meter dan Cable Switch



Gambar 6 Jangka Sorong Digital

Penentuan Beban



Gambar 7 Sumbu Standar di Lapangan
Sumber: Sukirman (1999)

Berikut ini merupakan tegangan yang terjadi berdasarkan sumbu standar di lapangan :

$$\sigma = \frac{\frac{8160}{4}}{11 \times 11} = 16,86 \frac{kg}{cm^2} \sim 17 \frac{kg}{cm^2}$$

Bidang kontak roda yang digunakan pada pengukuran skala semi lapangan yaitu sebesar 1 cm x 1cm sehingga diperoleh nilai beban yang akan digunakan yaitu:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

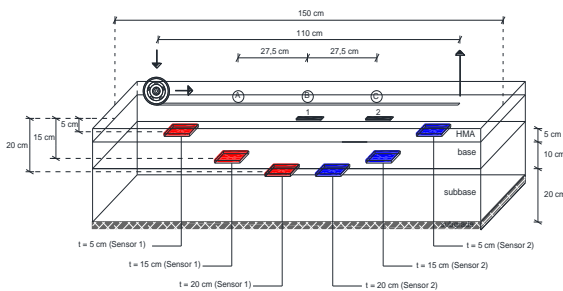
$$17 = \frac{P}{1 \times 1}$$

$$P = 17 \text{ kg}$$

Dari hasil tersebut, mesin pengujian direncanakan akan membawa beban sebesar 17 kg, namun pada penelitian ini digunakan beban sebesar 20 kg sebagai asumsi beban kendaraan dalam keadaan *overload*.

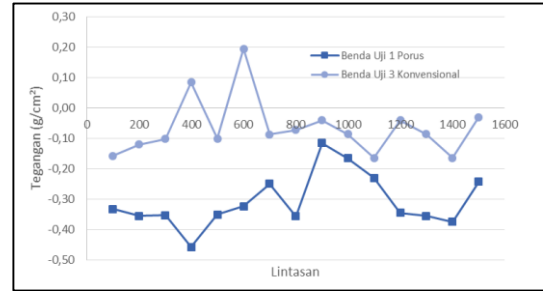
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Tegangan Dinamis pada Lapisan Pondasi

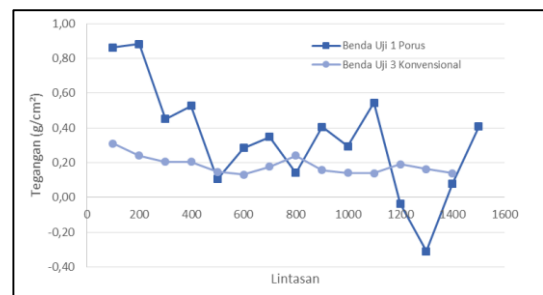


Gambar 8 Lokasi Alat Pengukur Tegangan

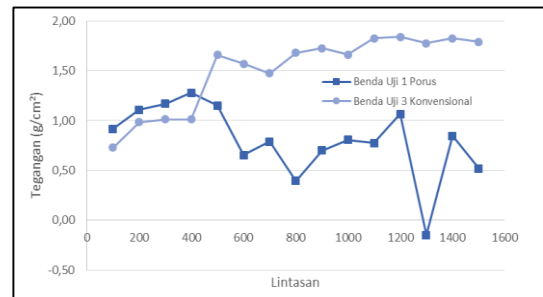
- 1) Perbandingan Benda Uji 1 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 3 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 9 Tegangan Dinamis Akibat Beban di Titik A



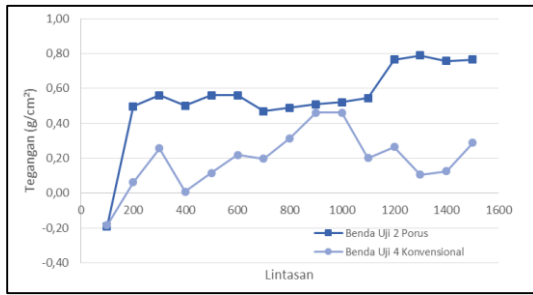
Gambar 10 Tegangan Dinamis Akibat Beban di Titik B



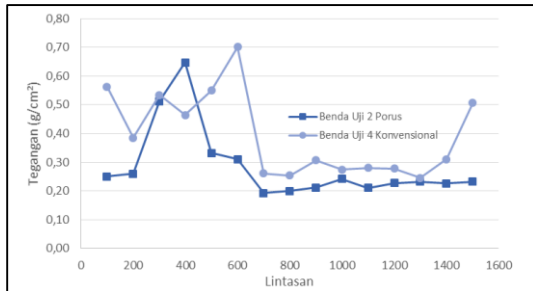
Gambar 11 Tegangan Dinamis Akibat Beban di Titik C

Gambar 9 hingga Gambar 11 menunjukkan bahwa 2 dari 3 titik acuan pada benda uji 4 perkerasan lentur konvensional memiliki nilai rata-rata tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji 2 perkerasan lentur porus, yaitu pada titik acuan A dan C.

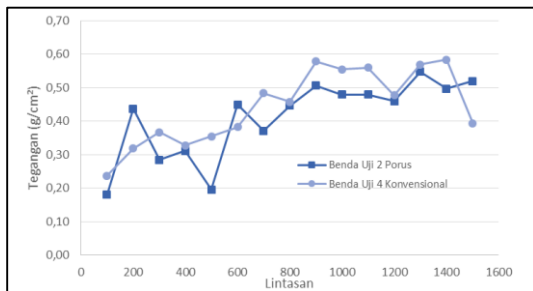
- 2) Perbandingan Benda Uji 2 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 4 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 12 Tegangan Dinamis Akibat Beban di Titik A



Gambar 13 Tegangan Dinamis Akibat Beban di Titik B

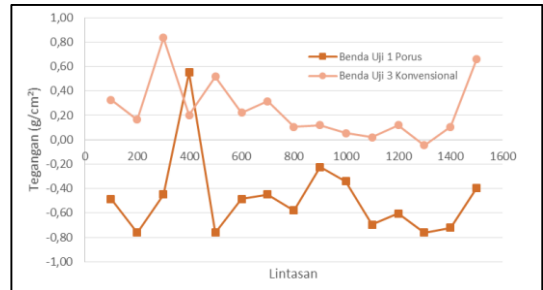


Gambar 14 Tegangan Dinamis Akibat Beban di Titik C

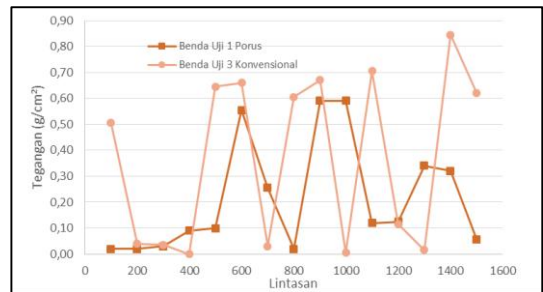
Gambar 12 hingga Gambar 14 menunjukkan bahwa 2 dari 3 titik acuan pada benda uji 4 perkerasan lentur konvensional memiliki nilai rata-rata tegangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji 2 perkerasan lentur porus, yaitu pada titik acuan B dan C.

Hasil Pengukuran Tegangan Statis pada Lapisan Pondasi

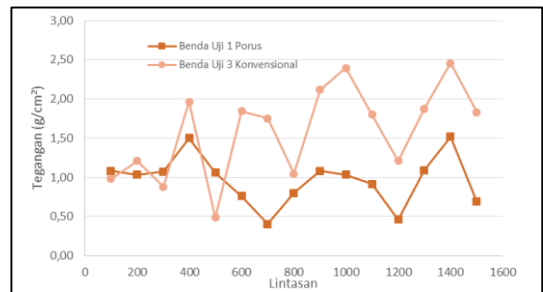
- 1) Perbandingan Benda Uji 1 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 3 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 15 Tegangan Statis Akibat Beban di Titik A



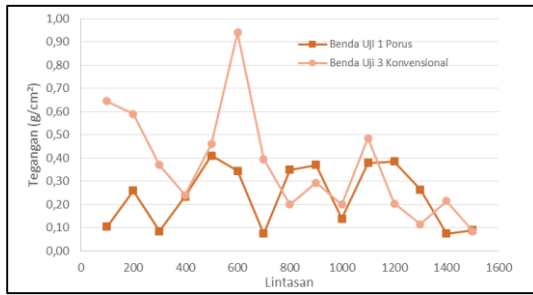
Gambar 16 Tegangan Statis Akibat Beban di Titik B



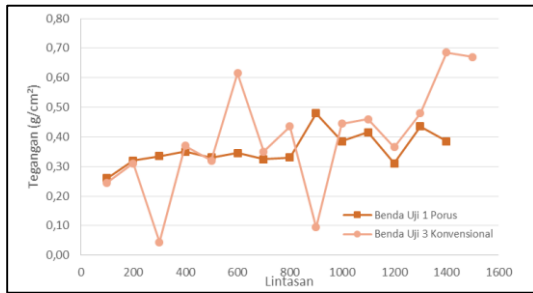
Gambar 17 Tegangan Statis Akibat Beban di Titik C

Gambar 15 hingga Gambar 17 menunjukkan bahwa benda uji 3 perkerasan lentur konvensional memiliki nilai rata-rata tegangan yang lebih tinggi pada titik tinjau A, B, dan C, dibandingkan dengan benda uji 1 perkerasan lentur porus.

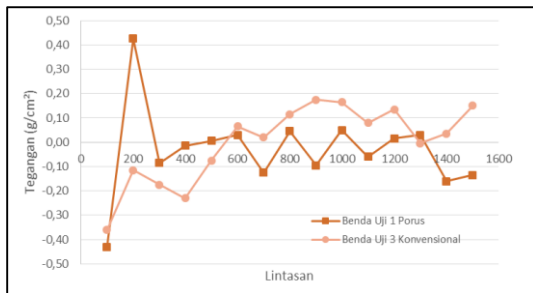
- 2) Perbandingan Benda Uji 2 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 4 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 18 Tegangan Statis Akibat Beban di Titik A



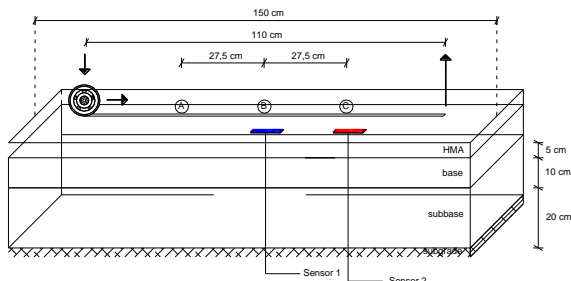
Gambar 19 Tegangan Statis Akibat Beban di Titik B



Gambar 20 Tegangan Statis Akibat Beban di Titik C

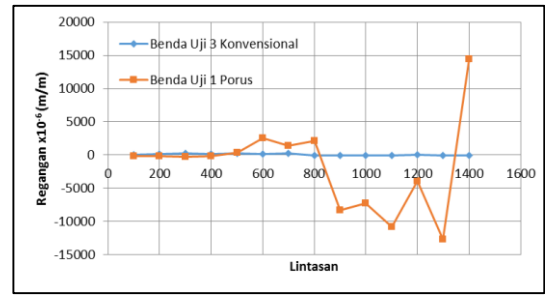
Gambar 18 hingga Gambar 20 menunjukkan bahwa benda uji 4 perkerasan lentur konvensional memiliki nilai rata-rata tegangan yang lebih tinggi pada titik tinjau A, B, dan C, dibandingkan dengan benda uji 2 perkerasan lentur porus.

Hasil Pengukuran Regangan Dinamis pada Perkerasan Lentur

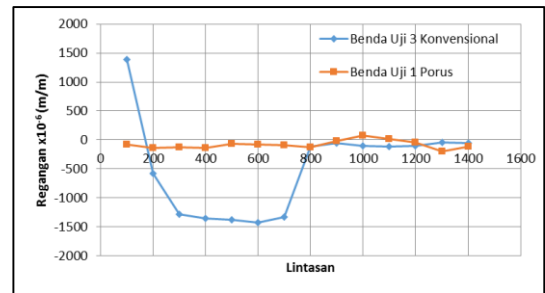


Gambar 21 Lokasi Alat Pengukur Regangan

- 1) Perbandingan Benda Uji 1 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 3 Perkerasan Lentur Konvensional



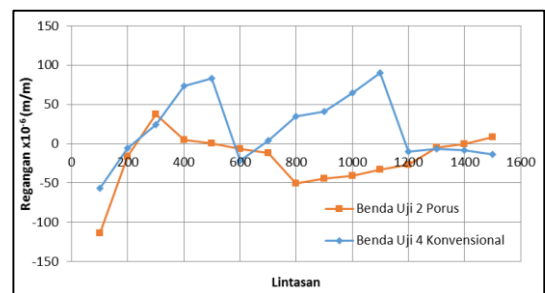
Gambar 22 Regangan Akibat Beban Dinamis di Titik B



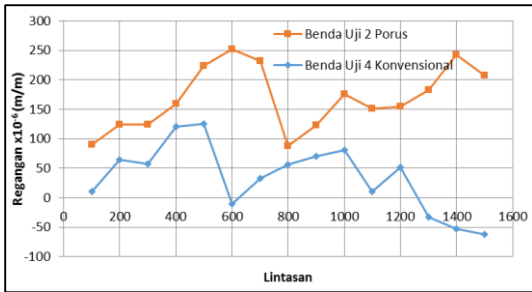
Gambar 23 Regangan Akibat Beban Dinamis di Titik C

Gambar 22 menunjukkan bahwa di titik B, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur konvensional cenderung lebih kecil daripada perkerasan lentur porus. Namun, pada Gambar 23 menunjukkan bahwa di titik C, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur porus cenderung lebih besar daripada perkerasan lentur konvensional.

- 2) Perbandingan Benda Uji 2 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 4 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 24 Regangan Akibat Beban Dinamis di Titik B

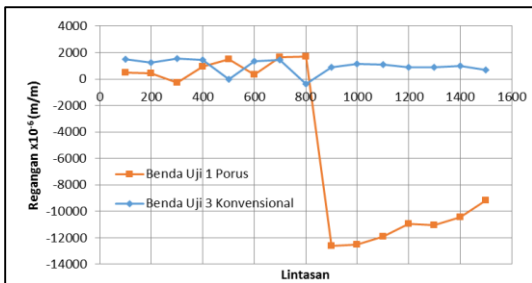


Gambar 25 Regangan Akibat Beban Dinamis di Titik C

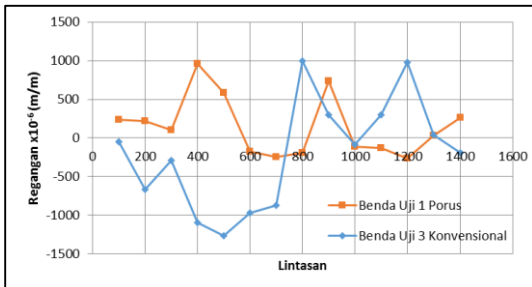
Gambar 24 menunjukkan bahwa di titik B, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur konvensional cenderung lebih kecil daripada perkerasan lentur porus. Namun, pada Gambar 25 menunjukkan bahwa di titik C, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur porus cenderung lebih besar daripada perkerasan lentur konvensional.

Hasil Pengukuran Regangan Statis pada Perkerasan Lentur

- 1) Perbandingan Benda Uji 1 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 3 Perkerasan Lentur Konvensional



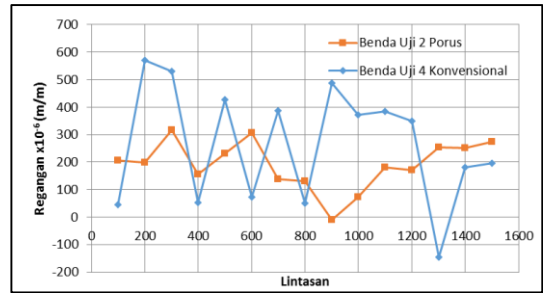
Gambar 26 Regangan Akibat Beban Statis di Titik B



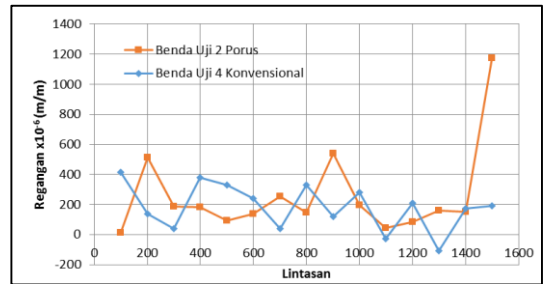
Gambar 27 Regangan Akibat Beban Statis di Titik C

Gambar 26 menunjukkan bahwa di titik B, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur konvensional cenderung lebih besar daripada perkerasan lentur porus. Namun, pada Gambar 27 menunjukkan bahwa di titik C, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur porus cenderung lebih besar daripada perkerasan lentur konvensional.

- 2) Perbandingan Benda Uji 2 Perkerasan Lentur Porus dan Benda Uji 4 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 28 Regangan Akibat Beban Statis di Titik B



Gambar 29 Regangan Akibat Beban Statis di Titik C

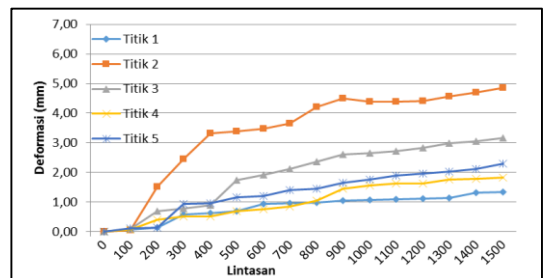
Gambar 28 dan Gambar 29 menunjukkan bahwa di titik B dan C, nilai rata-rata regangan yang terjadi pada perkerasan lentur konvensional cenderung lebih besar daripada perkerasan lentur porus.

Hasil Pengukuran Deformasi pada Permukaan Perkerasan Lentur



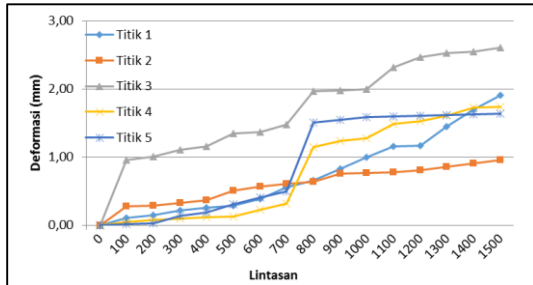
Gambar 30 Lokasi Pengukuran Lendutan

- 1) Benda Uji 1 Perkerasan Lentur Porus



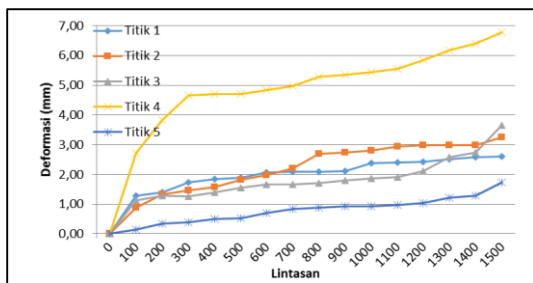
Gambar 31 Hubungan antara Deformasi dengan Jumlah Lintasan

2) Benda Uji 2 Perkerasan Lentur Porus



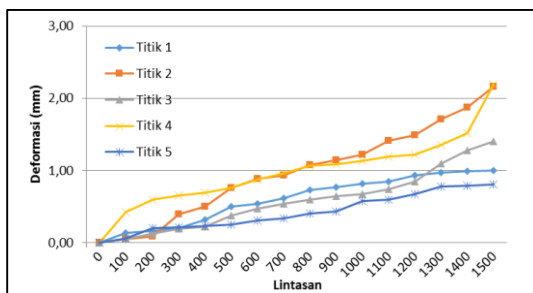
Gambar 32 Hubungan antara Deformasi dengan Jumlah Lintasan

3) Benda Uji 3 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 33 Hubungan antara Deformasi dengan Jumlah Lintasan

4) Benda Uji 4 Perkerasan Lentur Konvensional



Gambar 34 Hubungan antara Deformasi dengan Jumlah Lintasan

Dari hasil pengukuran deformasi yang dilakukan terhadap 4 Benda Uji dapat dilihat bahwa besarnya deformasi dari setiap titik tinjau pengukuran cenderung mengalami peningkatan nilai deformasi. Hal ini membuktikan bahwa semakin lama suatu material dibebani maka deformasi atau lendutan yang terjadi pada permukaan perkerasan lentur akan semakin besar.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan di atas, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Tegangan dan regangan cenderung mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya jumlah lintasan. Hal ini disebabkan karena perkerasan yang diberikan beban secara terus menerus akan menjadi lebih kaku karena rongga/ pori yang

terdapat dalam perkerasan akan memampat atau memadat, sehingga menyebabkan tegangan yang terjadi semakin kecil.

- 2) Pola dan nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada benda uji 1 dan 2 perkerasan lentur porus cenderung berbeda. Begitu pula pada benda uji 3 dan 4 perkerasan lentur konvensional. Adapun nilai regangan pada benda uji 1 dan 3 cenderung lebih tinggi dibandingkan pada benda uji 2 dan 4. Hal ini disebabkan karena pada benda uji 1 dan 3, alat *loading test* mengalami kerusakan sehingga menimbulkan hentakan yang tinggi pada saat beban jatuh roda.
- 3) Tegangan dan regangan yang terjadi pada perkerasan lentur porus pada awalnya cenderung lebih besar dibandingkan pada perkerasan lentur konvensional. Hal ini disebabkan karena perkerasan porus memiliki persentase rongga atau ruang kosong yang lebih tinggi dibandingkan perkerasan konvensional yang mengakibatkan kurangnya *interlocking*. Namun seiring dengan bertambahnya jumlah lintasan, tegangan dan regangan yang terjadi pada perkerasan lentur porus menjadi cenderung lebih kecil dibandingkan pada perkerasan lentur konvensional.
- 4) Tegangan yang terjadi pada lapis pondasi merupakan tegangan tekan dimana nilai maksimum berada tepat di bawah roda dan akan semakin berkurang seiring dengan jaraknya terhadap beban roda. Namun pada beberapa kondisi, tegangan maksimum yang terjadi tidak tepat berada di bawah roda, dan tegangan yang terjadi berupa tegangan tarik yang bernilai negatif.
- 5) Tegangan dengan skala semi lapangan akibat beban dinamis cenderung lebih besar daripada tegangan akibat beban statis. Tegangan dinamis menjadi lebih besar terjadi karena respon tegangan yang terjadi pada titik tertentu mempengaruhi tegangan yang terjadi di sekitarnya, sehingga saat diberikan beban secara terus menerus seperti pada beban dinamis, tegangan yang terjadi cenderung bertambah besar dibandingkan saat beban dalam keadaan diam (beban statis).
- 6) Regangan dengan skala semi lapangan akibat beban statis cenderung lebih besar daripada regangan akibat beban dinamis. Hal ini disebabkan karena beban statis bekerja hanya pada satu titik sehingga menimbulkan respon regangan yang lebih besar.
- 7) Deformasi yang terjadi pada permukaan aspal akibat beban roda yang melintas semakin bertambah besar seiring dengan bertambahnya jumlah lintasan.

- 8) Deformasi yang terjadi pada perkerasan lentur porus cenderung lebih besar daripada yang terjadi pada perkerasan lentur konvensional.
- 9) Terdapat perbedaan nilai deformasi yang signifikan antara perkerasan lentur porus dan konvensional.
- 10) Adanya jeda waktu pada pengujian akan berpengaruh pada besarnya tegangan, regangan, dan deformasi.

Untuk lebih menyempurnakan penelitian selanjutnya, maka sebaiknya diperhatikan hal-hal di bawah ini:

- 1) Dapat dilakukan pengembangan alat terkait dengan pengukuran tegangan dengan skala semi lapangan agar sensitivitas alat lebih baik. Hal ini terkait dengan peningkatan jumlah beban yang diberikan terhadap perkerasan.
- 2) Tegangan bernilai negatif (tegangan tarik) terjadi pada 3 (tiga) sensor yang berada dekat dengan titik jatuh roda, dimana saat beban jatuh menyebabkan hentakan pada perkerasan. Sehingga pada penelitian selanjutnya, sebaiknya sensor dipasang lebih jauh dari titik jatuh roda, agar hentakan akibat beban tidak mempengaruhi tegangan yang diterima oleh sensor tersebut.
- 3) Dapat dilakukan pengembangan mesin penguji, terutama jika dilakukan peningkatan jumlah beban dan lintasan yang diberikan terhadap perkerasan sehingga resiko terjadinya kerusakan menjadi lebih kecil.
- 4) Dilakukan evaluasi regangan, tegangan dan deformasi pada lapisan perkerasan yang lain seperti lapisan pondasi atas, lapisan pondasi bawah dan tanah dasar.
- 5) Setelah dilakukan proses pencampuran material, perlu dilakukan pengujian pengendalian mutu campuran beraspal di lapangan untuk mendapatkan hasil yang lebih realistis.

DAFTAR PUSTAKA

- Asphalt Institute. 1989. *The Asphalt Handbook Manual Series no.4, seventh edition*. The Asphalt Institute: Kentucky USA
- Basuki, Rachmad dan Machsus. 2007. *Penambahan Gilsonite Resin pada Aspal Prima 55 untuk meningkatkan Kualitas Perkerasan Hotmix*. Jurnal Aplikasi. 3, (1), 16 – 27.
- Bina Marga. 2006. *Spesifikasi Umum Perkerasan Berbutir Lapis Pondasi Agregat*.
- Bruce K. Ferguson. 2005. *Porous Pavement*. Florida : Taylor and Francis.
- Co. Ltd, UKJokosisworo, Sarjito dan Jajang Sebastian. 2011. *Analisa Fatigue Kekuatan Stern Ramp Door Akibat Beban Dinamis Pada Km. Kirana I dengan Metode Elemen Hingga Diskrit Elemen Segitiga Plane Stress*. Kapal. Vol. 8, No.3, 122.
- Kim, Minkwan. 2007. *Three-Dimensional Finite Element Analysis Of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior*. Disertasi University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Ramadhan, Nizar dan Burhanuddin, Rachmad Reza. 2014. *Pengaruh Penambahan Additive Gilsonite Hma Modifier Grade terhadap Kinerja Aspal Porus*. Skripsi Universitas Brawijaya Malang: tidak diterbitkan
- Sukirman, Silvia. 2003. *Beton Aspal Campuran Panas*. Jakarta: Penerbit GRANIT
- Wang, Jia. 2001. *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements*. Tesis University of Maine at China.
- Wardoyo, Joko. 2003. *Pengaruh Bahan Tambah Gilsonite pada Asphalt Concrete Wearing Course (ACWC1) Terhadap Nilai Properties Marshall dan Modulus Kekakuan*. Tesis Magister Universitas Diponegoro Semarang: tidak diterbitkan.