

ANALISA TEGANGAN DAN REGANGAN PADA PONDASI PERKERASAN PORUS DENGAN SKALA SEMI LAPANGAN DAN SOFTWARE ANSYS

Desy Dwi Rachmawati, Fazri Rochmawati Dewi, Ludfi Djakfar, Wisnumurti
Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
Jalan M.T. Haryono 167 Malang 65145, Jawa Timur-Indonesia
E-mail: desy512.dwi@gmail.com, fazri.rd@gmail.com

ABSTRAK

Kerusakan jalan yang terjadi di Indonesia sebagian besar disebabkan berkurangnya daerah resapan air yang menyebabkan banjir di jalan raya. Salah satu upaya pencegahan masalah tersebut yaitu digunakan variasi perkerasan porus. Perkerasan porus merupakan salah satu variasi dari aspal konvensional dimana perkerasan ini direncanakan dapat mengalirkan air ke lapisan tanah di bawahnya karena mempunyai susunan ikatan agregat yang seragam. Hal ini menyebabkan perkerasan porus mempunyai kekuatan yang lebih rendah dibanding aspal konvensional. Maka, diperlukan penelitian tentang perilaku perkerasan porus berupa tegangan dan regangan pada lapisan *surface*, *base* dan *subbase* perkerasan porus ketika diberi beban.

Penelitian ini untuk mengetahui tegangan dan regangan yang terjadi pada pondasi perkerasan porus saat beban berjalan dan beban berhenti dengan menggunakan skala semi lapangan yang dibaca setiap lintasan hingga 1000 lintasan dan direpresentasikan dengan kondisi sesungguhnya. Selain pengukuran skala semi lapangan, dilakukan pengukuran dengan pendekatan numerik metode elemen hingga menggunakan *software* ANSYS saat beban berhenti dengan memberhentikan beban setiap 50 lintasan.

Hasil pengukuran tegangan perkerasan porus menggunakan skala semi lapangan diketahui bahwa tegangan yang terjadi saat beban berjalan dan beban berhenti bernilai maksimum tepat dibawah beban roda, dan besar nilai tegangan semakin berkurang dengan bertambahnya jarak atau kedalaman dengan beban roda dan nilai tegangan semakin meningkat sebanding bertambahnya jumlah lintasan baik saat beban berjalan ataupun berhenti. Sedangkan hasil dari regangan perkerasan porus menggunakan skala semi lapangan berbanding terbalik dengan nilai tegangan yaitu semakin menurun dengan bertambahnya jumlah lintasan beban saat berjalan ataupun berhenti. Selain itu diketahui hasil nilai pengukuran regangan dan regangan mempunyai pola grafik naik turun akibat pengukuran yang tidak dilakukan secara kontinyu sehingga material perkerasan mengalami relaksasi dengan proses kembalinya material ke bentuk semula. Untuk hasil pengukuran nilai tegangan dan regangan perkerasan porus menggunakan *software* ANSYS didapatkan besar nilai tegangan dan regangan semakin berkurang dengan bertambahnya jarak atau kedalaman dengan beban roda serta *software* ANSYS kurang sesuai untuk pengukuran saat beban berjalan dengan waktu lintasan yang lama karena memerlukan proses simulasi yang panjang.

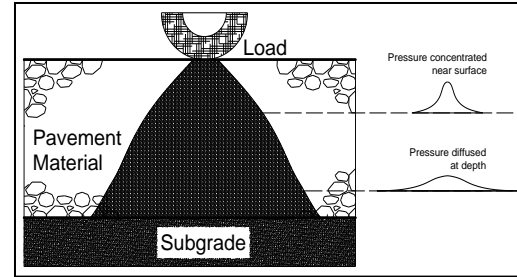
Kata kunci : Tegangan, Regangan, Perkerasan Porus, Skala Semi Lapangan, *software* ANSYS

1. Latar Belakang

Keadaan peningkatan pembangunan infrastruktur sejalan dengan peningkatan pertumbuhan penduduk yang tidak merata dalam setiap wilayah di Indonesia. Hal ini memberikan dampak kepada kota besar maupun kecil yaitu terjadinya urbanisasi secara signifikan. Adanya urbanisasi menyebabkan peningkatan daya dukung lingkungan sehingga memicu adanya pengalihan fungsi lahan yang awalnya merupakan daerah resapan air. Pengalihan fungsi daerah resapan air menjadi obyek pembangunan infrastruktur mengakibatkan terjadinya banjir lokal yang dapat mengakibatkan kerusakan pada perkerasan lentur jalan raya. Tipikal utama dari perkerasan lentur konvensional yaitu sangat rentan terhadap air yang menggenangi permukaan jalan sehingga memicu timbulnya spot-spot lubang pada jalan. Salah satu upaya pencegahan atas permasalahan tersebut yaitu penggunaan variasi perkerasan lentur menggunakan aspal porous dengan bahan tambahan *gilsonite*. Dalam penelitian ini akan dianalisis tegangan dan regangan yang terjadi pada struktur pondasi perkerasan porous akibat beban berhenti dan berjalan dengan menggunakan skala semi lapangan dan *software* ANSYS.

2. Rumusan Masalah

- 1) Bagaimana pengukuran tegangan dan regangan pada struktur pondasi perkerasan porous skala semi lapangan yang diberi beban berjalan dan beban berhenti?



- 2) Bagaimana pengukuran tegangan dan regangan pada struktur pondasi perkerasan porous menggunakan *software* ANSYS?
- 3) Bagaimana perbandingan hasil tegangan dan regangan antara pengukuran skala semi lapangan dengan pengukuran menggunakan *software* ANSYS?

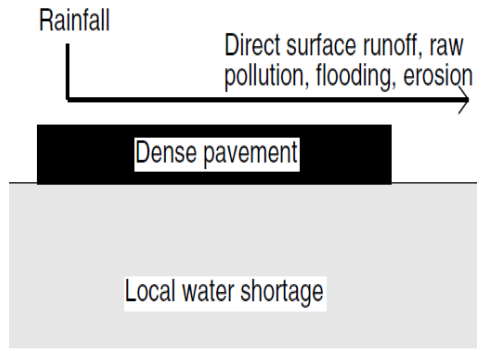
3. Tujuan

- 1) Mengukur tegangan dan regangan pada struktur pondasi perkerasan porous skala semi lapangan yang diberi beban berjalan dan beban berhenti
- 2) Mengukur tegangan dan regangan pada struktur pondasi perkerasan porous menggunakan *software* ANSYS
- 3) Membandingkan hasil tegangan dan regangan antara pengukuran skala semi lapangan dengan pengukuran menggunakan *software* ANSYS

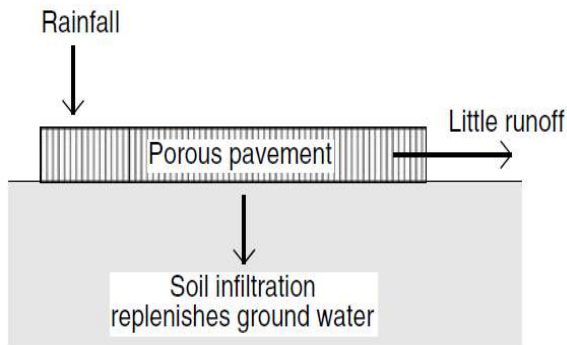
4. Tinjauan Pustaka

4.1 Perkerasan Porus (*Porous Pavement*)

Perkerasan Porus merupakan salah satu variasi dari aspal konvensional dimana memiliki spesifikasi khusus. Perkerasan ini direncanakan mampu merembeskan aliran air ke dalam lapisan tanah di bawahnya. Perkerasan porous tersusun atas agregat-agregat dengan ukuran yang sama yang saling mengikat satu sama lain dengan pengikat aspal sehingga terdapat ruang kosong untuk aliran air dan udara.



(a)



(b)

Gambar 1 Perilaku Perkerasan dalam Mengalirkan Air Hujan Perkerasan

Konvensional (a) dan Perkerasan Porus (b)

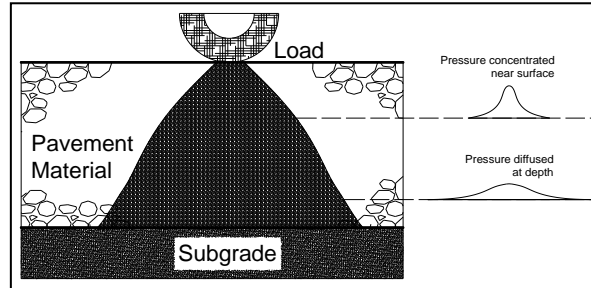
Sumber : Bruce K. Ferguson (2005)

Bagian-bagian perkerasan porus :

1. Lapisan permukaan
2. Lapisan pondasi (base dan subbase)
3. Lapisan tanah dasar

4.2 Tegangan dan Regangan pada Lapisan Perkerasan

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.



Gambar 2 Penyebaran Beban Lalu Lintas pada Kedalaman Perkerasan.

Sumber K. Ferguson (2005)

4.3 Pemodelan Perkerasan Semi Lapangan

Pemodelan skala semi lapangan merupakan salah satu metode analitis yang dilakukan di lapangan menggunakan skala tertentu untuk merepresentasikan kondisi sesungguhnya yang terjadi di lapangan sehingga hasil uji yang diperoleh dapat digunakan.

4.4 Metode Elemen Hingga (Finite Element Method) menggunakan ANSYS

Konsep dasar metode elemen hingga adalah mendiskretisasi atau membagi suatu struktur menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang jumlahnya berhingga, kemudian melakukan analisis gabungan terhadap elemen – elemen kecil tersebut sehingga dapat diperoleh nilai pendekatan numerik.

ANSYS adalah sebuah *software* analisis elemen hingga dengan kemampuan menganalisa dengan cakupan yang luas untuk berbagai jenis masalah (Tim Langlais, 1999). ANSYS mampu memecahkan persamaan differensial dengan cara memecahnya menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Tahapan pemodelan ANSYS :

- 1) Preprocessing (penentuan material, mendefinisikan bentuk geometri)
- 2) Solusi (penentuan beban, tumpuan, meshing, dan penentuan output analisa)

3) Postprocessing (hasil analisa berupa tabel dan diagram kontur)

5. Metodologi Penelitian

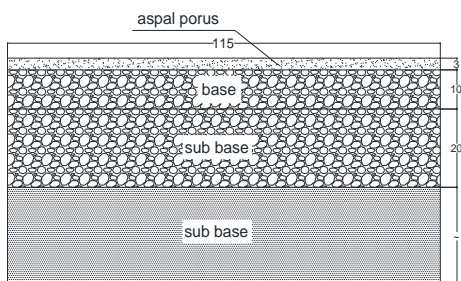
5.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Pengukuran tegangan dan regangan pondasi perkerasan porus dengan skala semi lapangan dilaksanakan bulan April hingga selesai di tempat parkir Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

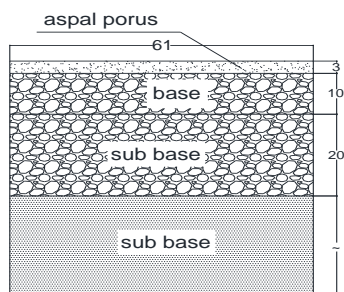
5.2 Persiapan Material

Material yang akan digunakan sebagai pondasi berasal dari Desa Ngoro Kecamatan Japaran Kabupaten Pasuruan dengan nilai CBR 81% dan gradasi agregat variasi X4 mengikuti pengujian Malik, Khusnul (2013). Sedangkan untuk aspal porus digunakan aspal dengan karakteristik aspal mengikuti penelitian dari Ramadhan dan Burhanuddin (2014) yaitu aspal porus dengan campuran *gilsonit* sebesar 8%.

5.3 Dimensi Model Struktur Perkerasan dengan Skala Semi Lapangan



Gambar 3 Struktur Perkerasan Porus Skala Semi Lapangan Potongan Memanjang



Gambar 4 Struktur Perkerasan Porus Skala Semi Lapangan Potongan Melintang

5.4 Pengembangan Alat

a. Loading test



Gambar 5 Mesin Penguji

b. Strain gauge dan strain meter



Gambar 6 Strain Gauge



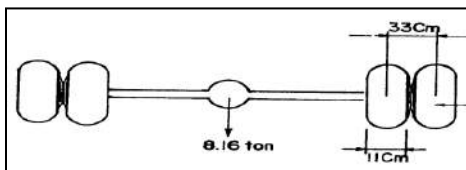
Gambar 7 Strain Meter dan Cable Switch

c. Alat Pengukur Tegangan



Gambar 8 Alat Pengukur Tegangan

5.5 Penentuan Beban



Gambar 9 Sumbu Standar di Lapangan
Sumber: Sukirman (1999)

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

Tegangan sebesar 17 kg/cm² yang terjadi di lapangan digunakan sebagai acuan untuk menentukan beban yang diberikan pada pengukuran regangan. Bidang kontak roda yang digunakan pada pengukuran skala semi lapangan yaitu sebesar 1 cm x 1cm sehingga diperoleh nilai beban yang akan digunakan pada pemodelan semi lapangan yaitu:

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

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

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

5.6 Pelaksanaan Pengukuran Tegangan dan Regangan

Langkah-langkah pengukuran dijelaskan seperti berikut ini:

- 1) Menghubungkan mesin penguji dan alat penghitung lintasan dengan sumber listrik
- 2) Menjalankan mesin sehingga beban berjalan di atas perkerasan
- 3) Membaca nilai tegangan dan regangan setiap titik pada alat pengukur tegangan dan strain meter setiap 50 lintasan
- 4) Mengulangi langkah ke-2 hingga 1000 kali lintasan
- 5) Meletakkan beban yang sama di atas lokasi alat pengukur tegangan dan strain gauge, lalu dibiarkan diam
- 6) Membaca nilai tegangan dan regangan yang terjadi

5.7 Pengukuran Tegangan dan Regangan Perkerasan Porus dengan Software ANSYS

Tabel 1 Dimensi Model Struktur Perkerasan pada ANSYS

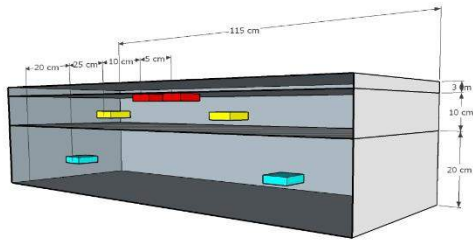
Potongan	Lapisan	Dimensi (cm)
Arah Memanjang	Aspal Porus	115
	Base	115
	Subbase	115
	Tanah Dasar	~
Arah Melintang	Aspal Porus	61
	Base	61
	Subbase	61
	Tanah Dasar	~
Ketebalan	Aspal Porus	3
	Base	10
	Subbase	20
	Tanah Dasar	~

6.4 Data Hasil Pengukuran Skala Semi Lapangan

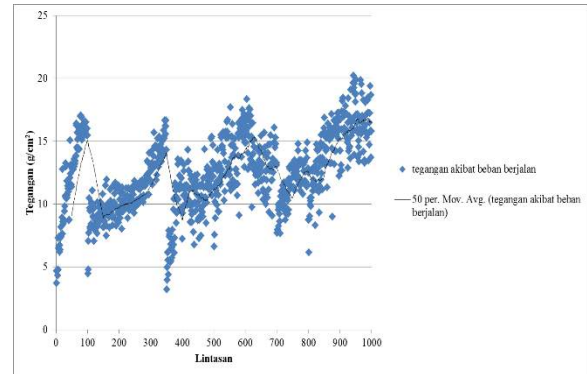
1) Tegangan saat Beban Berjalan

6. Hasil dan Pembahasan

6.1 Pengukuran Tegangan dengan Skala Semi Lapangan

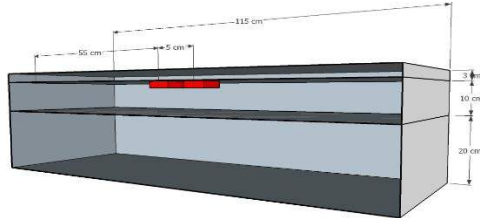


Gambar 10 Potongan Melintang Kedalaman 6 Titik Lokasi Alat Pengukur Tegangan

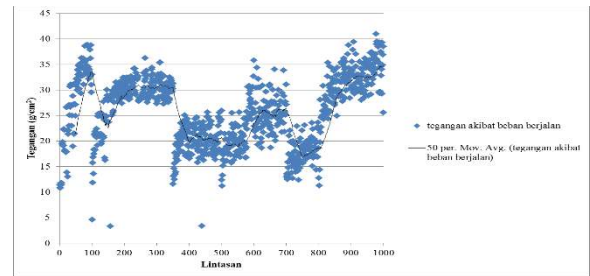


Gambar 14 Hubungan Tegangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik 1 Bawah Aspal Porus

6.2 Pengukuran Regangan dengan Skala Semi Lapangan



Gambar 11 Potongan Melintang Kedalaman 2 Titik Lokasi *Strain Gauge*

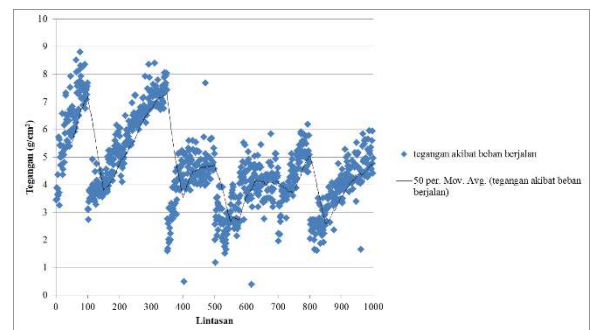


Gambar 15 Hubungan Tegangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik 2 Bawah Aspal Porus

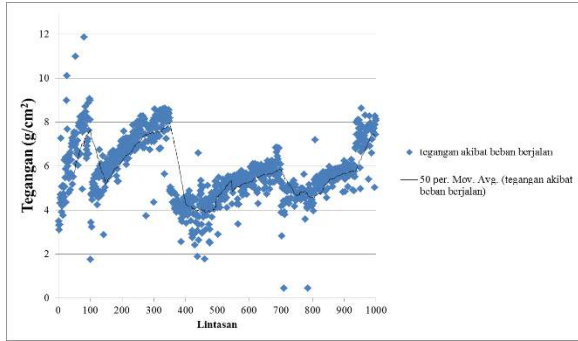
6.3 Pengukuran Lendutan dengan Skala Semi Lapangan



Gambar 12 Peletakkan 5 Titik Lokasi Pengukuran Lendutan

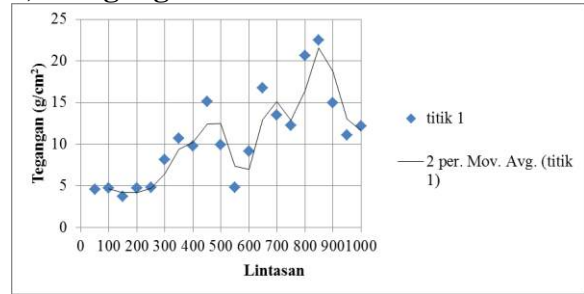


Gambar 16 Hubungan Tegangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik 1 Kedalaman 5 cm

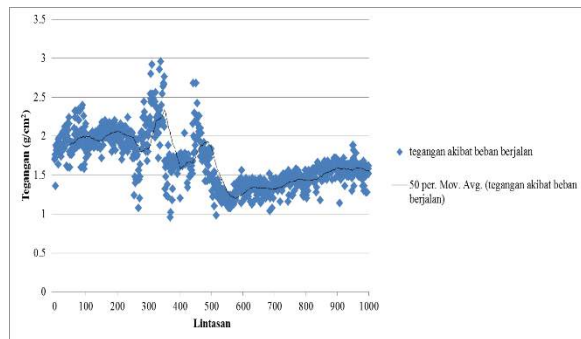


Gambar 17 Hubungan Tegangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik 2 Kedalaman 5 cm

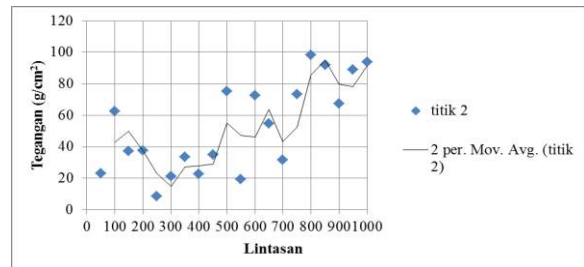
2) Tegangan saat Beban Berhenti



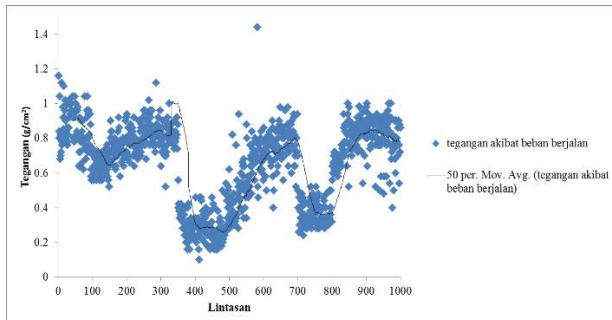
Gambar 20 Hubungan Tegangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik 1 Bawah Aspal Porus



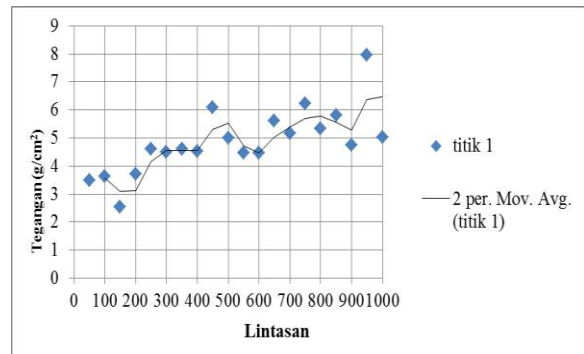
Gambar 18 Hubungan Tegangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik 1 Kedalaman 20 cm



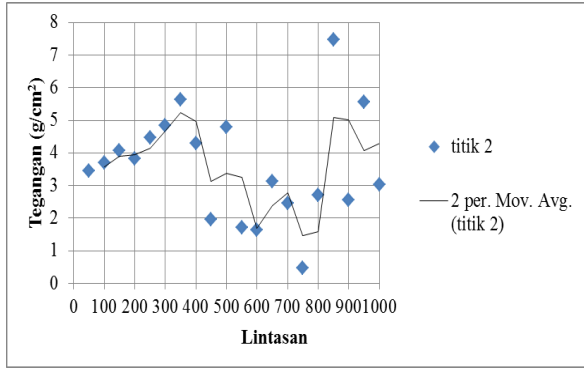
Gambar 21 Hubungan Tegangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik 2 Bawah Aspal Porus



Gambar 19 Hubungan Tegangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik 2 Kedalaman 20 cm

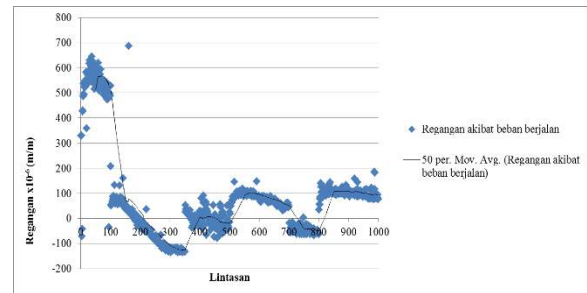


Gambar 22 Hubungan Tegangan akibat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik 1 Kedalaman 5 cm

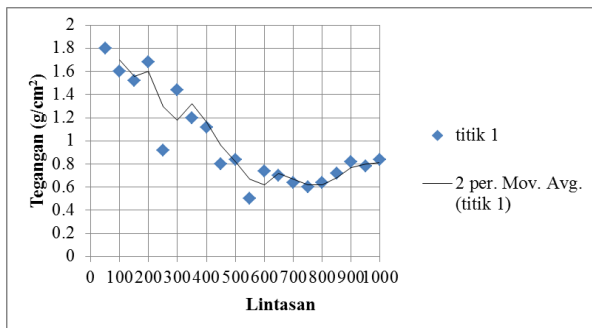


Gambar 23 Hubungan Tegangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik 2 Kedalaman 5 cm

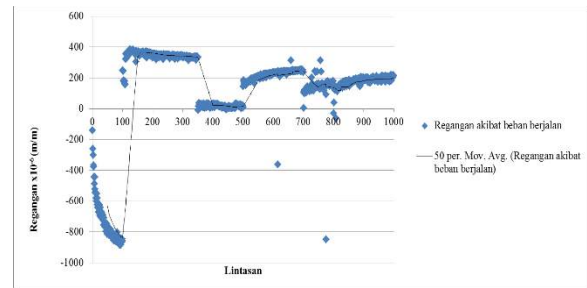
3) Regangan saat Beban Berjalan



Gambar 26 Hubungan Regangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik A

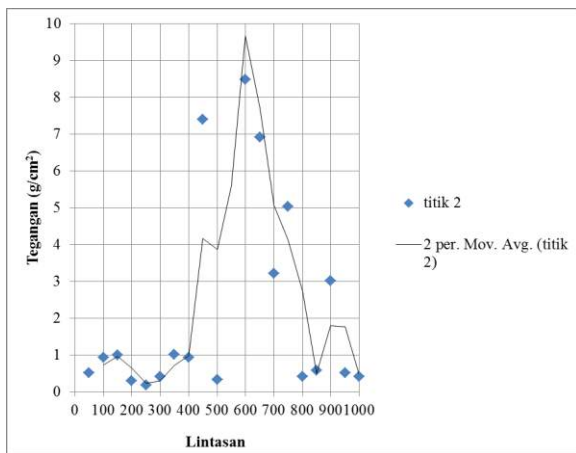


Gambar 24 Hubungan Tegangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik 1 Kedalaman 20 cm

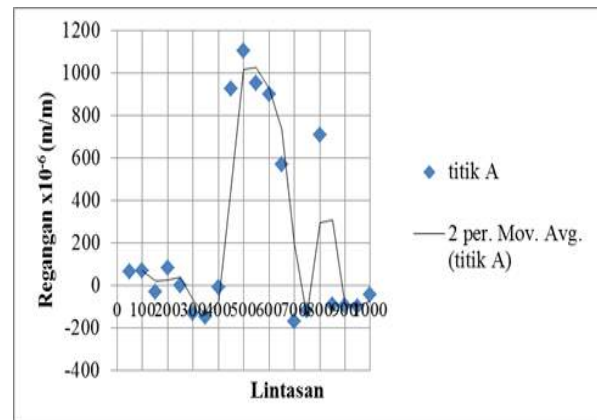


Gambar 27 Hubungan Regangan saat Beban Berjalan dan Lintasan pada Titik B

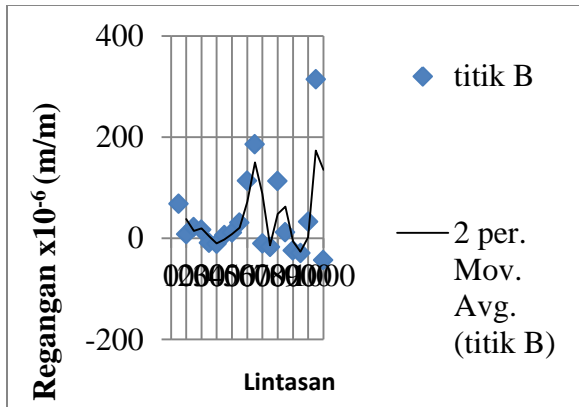
4) Regangan saat Beban Berjalan



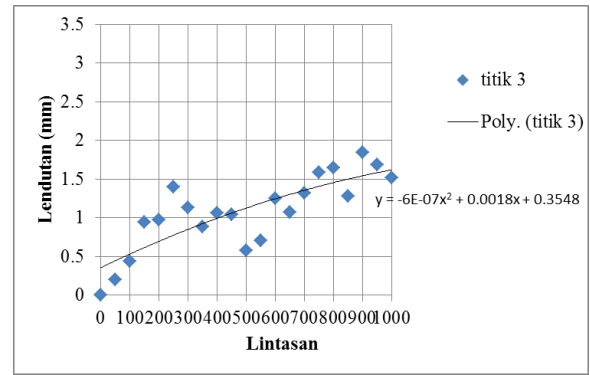
Gambar 25 Hubungan Tegangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik 2 Kedalaman 20 cm



Gambar 28 Hubungan Regangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik A

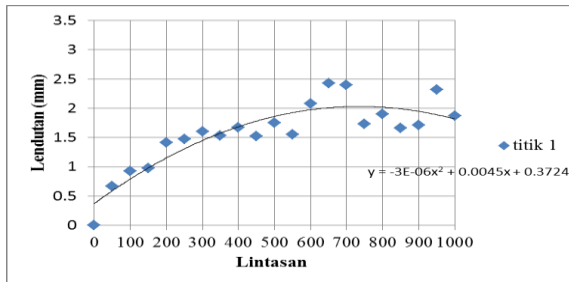


Gambar 29 Hubungan Regangan saat Beban Berhenti dan Lintasan pada Titik B

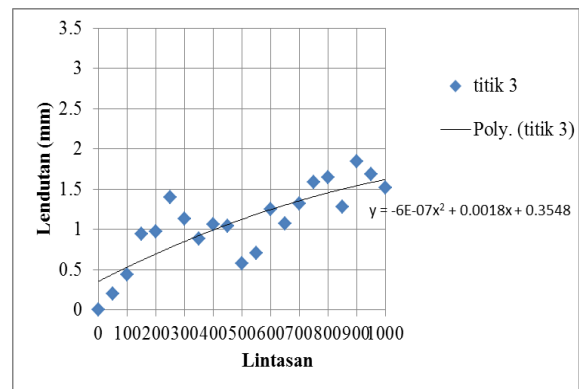


Gambar 32 Hubungan Lendutan dan Lintasan pada Titik 3

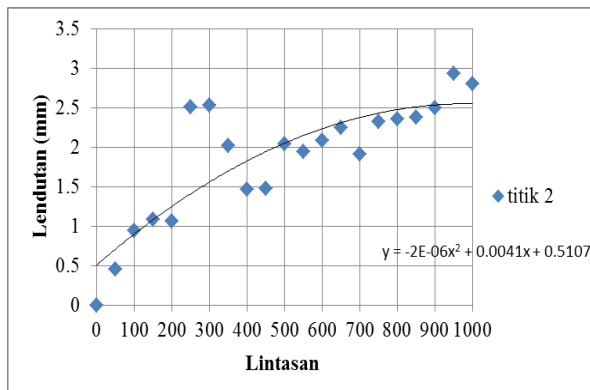
5) Lendutan



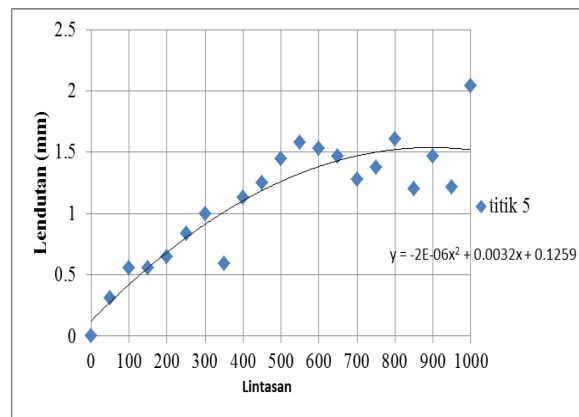
Gambar 30 Hubungan Lendutan dan Lintasan pada Titik 1



Gambar 33 Hubungan Lendutan dan Lintasan pada Titik 4



Gambar 31 Hubungan Lendutan dan Lintasan pada Titik 2



Gambar 34 Hubungan Lendutan dan Lintasan pada Titik 5

6.5 ANSYS

1) Tegangan

Tabel 2 Hasil Tegangan pada Permodelan *Software* ANSYS

No.	Kedalaman	Titik Analisa	Tegangan (Pa)
1	Di bawah aspal	Titik 1	26776
		Titik 2	27842
2	5 cm	Titik 1	7720.4
		Titik 2	7731.8
3	20 cm	Titik 1	939.78
		Titik 2	921.42

2) Regangan

Tabel 3 Hasil Regangan pada Permodelan *Software* ANSYS

No.	Kedalaman	Titik Analisa	Regangan (m/m)
1	Di bawah aspal	Titik 1	9.6065×10^{-5}
		Titik 2	9.8546×10^{-5}
2	5 cm	Titik 1	2.6427×10^{-5}
		Titik 2	2.6471×10^{-5}
3	20 cm	Titik 1	3.2211×10^{-6}
		Titik 2	3.1584×10^{-6}

3) Lendutan

Tabel 4 Hasil Lendutan menggunakan *Software* ANSYS

No.	Lokasi	Lendutan (m)
1	Titik 1	7.3×10^{-6}
2	Titik 2	7.4541×10^{-6}
3	Titik 3	7.2431×10^{-6}
4	Titik 4	7.4718×10^{-6}
5	Titik 5	6.9756×10^{-6}

6.6 Perbandingan Hasil Skala Semi Lapangan dengan ANSYS

Dari hasil kedua pengukuran tersebut dapat dibandingkan hasil tegangan, regangan dan lendutan yang terjadi pada perkerasan porus yaitu pada lapisan aspal porus, lapisan *base* dan lapisan *subbase* dengan titik lokasi pengukuran yang sama. Hasil yang dibandingkan merupakan hasil pengukuran saat perkerasan dibebani dengan beban berhenti, sedangkan hasil tegangan dan regangan untuk beban berjalan pada permodelan semi lapangan tidak dapat dibandingkan dengan *software* ANSYS karena proses simulasi pada *software* ANSYS dengan waktu gerak beban 1 detik memerlukan waktu yang sangat panjang, sedangkan waktu proses pembebanan berjalan pada penelitian kurang lebih selama 17 detik dalam 1 lintasan. Hasil perbandingan tegangan, regangan dan lendutan antara skala semi lapangan dengan *software* ANSYS disajikan pada Tabel 5 sampai Tabel 7

Tabel 5 Perbandingan Regangan Aspal Porus pada Skala Semi Lapangan dengan *software* ANSYS

Lokasi	Regangan Skala Semi Lapangan dengan Beban berhenti (m/m)	Regangan <i>Software</i> Ansys (m/m)
Titik 1	$31,605 \times 10^{-7}$	9.6065×10^{-5}
Titik 2	5.27×10^{-7}	9.8546×10^{-5}

Tabel 6 Perbandingan Tegangan Perkerasan Porus pada Skala Semi Lapangan dengan *software* ANSYS

Lokasi	Tegangan Skala Semi Lapangan dengan Beban berhenti (Pa)	Tegangan <i>Software</i> ANSYS (Pa)
Bawah aspal porus	30959.594	27309
5 cm (base)	4153.116	7726.1
20 cm (subbase)	1175.004	930.6

Tabel 7 Perbandingan Lendutan Perkerasan Porus pada Skala Semi Lapangan dengan *software* ANSYS

Lokasi	Lendutan Skala Semi Lapangan (m)	Lendutan <i>Software</i> ANSYS (m)
Titik 1	$1,66 \times 10^{-3}$	7.3×10^{-6}
Titik 2	$1,95 \times 10^{-3}$	7.4541×10^{-6}
Titik 3	1.13×10^{-3}	7.2431×10^{-6}
Titik 4	1.56×10^{-3}	7.4718×10^{-6}
Titik 5	1.16×10^{-3}	6.9756×10^{-6}

Pada Tabel 5 sampai 7, hasil tegangan, regangan dan lendutan pada skala semi lapangan dengan *software* ANSYS memiliki nilai yang berbeda. Besarnya perbedaan nilai antara permodelan semi lapangan dan *software* ANSYS cukup jauh. Nilai tegangan dan lendutan hasil pengukuran semi lapangan lebih besar jika dibandingkan dengan pengukuran *software* ANSYS, sedangkan nilai regangan pada pengukuran semi lapangan lebih kecil dibandingkan hasil pada *software* ANSYS. Adanya perbedaan hasil pengukuran tegangan,

regangan maupun lendutan disebabkan oleh perbedaan karakteristik material yang ada pada permodelan semi lapangan dan *software* ANSYS. Dalam analisis dengan ANSYS dibutuhkan data karakteristik material berupa modulus elastisitas, poisson ratio, dan kepadatan (*density*). Modulus elastisitas material diperoleh dari pendekatan empiris menggunakan rumus, yaitu sedangkan poisson ratio diperoleh dari literatur, bukan dari pengujian secara langsung sehingga hal ini kemungkinan menjadi penyebab terjadinya perbedaan nilai antara pengukuran tegangan, regangan dan lendutan dengan metode semi lapangan dan *software* ANSYS.

7. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengukuran nilai tegangan dan regangan pada perkerasan porus menggunakan pemodelan skala semi lapangan didapatkan :
 - a. Tegangan yang terjadi saat beban berjalan dan beban berhenti bernilai maksimum tepat dibawah beban roda, dan besar nilai tegangan semakin berkurang dengan bertambahnya jarak atau kedalaman dengan beban roda.
 - b. Perilaku tegangan yang terjadi saat beban berjalan maupun beban berhenti yaitu nilai tegangan semakin meningkat sebanding bertambahnya jumlah lintasan.
 - c. Perilaku regangan yang terjadi saat beban berjalan dan beban berhenti yaitu nilai regangan semakin menurun dengan bertambahnya jumlah lintasan beban.

- d. Peningkatan dan penurunan nilai hasil pengukuran tegangan dan regangan pada lintasan tertentu ditunjukkan dengan pola grafik yang naik turun disebabkan karena pengukuran yang tidak dilakukan secara kontinyu sehingga material perkerasan mengalami relaksasi dengan proses kembalinya material ke bentuk semula.
2. Pengukuran nilai tegangan dan regangan pada perkerasan porus menggunakan *software* ANSYS didapatkan :
 - a. Tegangan dan regangan yang terjadi saat beban berhenti bernilai maksimum tepat dibawah beban roda, dan besar nilai tegangan dan regangan semakin berkurang dengan bertambahnya jarak atau kedalaman dengan beban roda.
 - b. *Software* ANSYS kurang sesuai jika digunakan untuk menganalisa nilai tegangan dan regangan saat beban berjalan dengan waktu lintasan yang lama karena memerlukan proses simulasi yang panjang.
 3. Perbandingan hasil pengukuran tegangan dan regangan saat beban berhenti antara pengukuran semi lapangan dengan *software* ANSYS :
 - a. Tegangan pada pengukuran semi lapangan lebih besar jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan *software* ANSYS.
 - b. Regangan pada pengukuran semi lapangan lebih kecil jika dibandingkan dengan pengukuran menggunakan *software* ANSYS.
 - c. Hasil pengukuran tegangan dan regangan saat beban berhenti dari pengukuran skala semi

lapangan dan *software* ANSYS didapatkan nilai yang berbeda karena perbedaan karakteristik material dari kedua pengujian tersebut.

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

1. Dapat dilakukan pengembangan alat terkait dengan pengukuran regangan pondasi perkerasan porus pada pemodelan skala semi lapangan.
2. Diperlukan pembacaan yang kontinyu pada pengukuran tegangan dan regangan skala semi lapangan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang lebih baik.
3. Diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk analisa regangan dan tegangan perkerasan porus saat beban berjalan selain menggunakan *software* ANSYS.
4. Parameter sebagai *input* dalam pemodelan *software* ANSYS seperti modulus elastisitas dan *poisson ratio* perlu diuji dengan menggunakan alat standard sehingga nilainya dapat diperoleh berdasarkan hasil pengujian, bukan berdasarkan pendekatan rumus atau literatur sehingga dapat diperoleh nilai yang lebih akurat dan kondisi material yang sesuai dengan pemodelan semi lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amaliyah, Ela Firda dan Widiningrum, Tyas Ayu. 2015. *Analisa Tegangan dan regangan Pada Perkerasan Porus dengan Skala Semi Lapangan dan Software ANSYS Penambahan Additive Gilsonite Hma Modifier Grade terhadap Kinerja Aspal Porus*. Skripsi Universitas Brawijaya Malang: tidak diterbitkan
- Asphalt Institute. 1989. *The Asphalt Handbook Manual Series no.4*,

- seventh edition.* The Asphalt Institute: Kentucky USA
- 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.
- Hutton, David W. 2004. *Fundamentals of Finite Element Analysis.* The McGraw Hill Companies. USA.
- Kim, Minkwan. 2007. *Three-Dimensional Finite Element Analysis Of Flexible Pavements Considering Nonlinear Pavement Foundation Behavior.* Disertasi University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Malik, Khusnul. 2013. *Pengaruh Variasi Gradasi Agregat Batu Pecah Terhadap Daya Dukung Dan Permeabilitas Pada Lapis Pondasi Porous Pavement.* Skripsi Universitas Brawijaya Malang: tidak diterbitkan.
- Ramadhan, Nizar dan Burhanuddin, Rachmad Reza. 2014. *Pengaruh Penambahan Additive Gilsonite Hma Modifier Grade terhadap Kinerja Aspal Porus.* Skripsi Universitas Brawijaya Malang: tidak diterbitkan.
- Shell Bitumen. 1990. *The Shell Bitumen Handbook,* Shell International Petroleum
- Sukirman, Silvia. 2003. *Perkerasan Jalan Raya.* Bandung: Penerbit NOVA
- Wang, Jia. 2001. *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Flexible Pavements.* Tesis University of Maine at China.
- Yoder, Ej & Witczak, MW. 1975. *Principles of Pavement Design, 2nd Edition.* John Wiley & Sons Inc. Canada.
- Anonim. 2015. *UU APBN dan Nota Keuangan.*<http://www.kemenkeu.go.id/Data/nota-keuangan-rapbn-p-tahun-2015/>.Diakses pada 10 April 2015.
- Anonim. 2010. *Pendapat Pakar ITB Soal Kerusakan Jalan Bandung.* <http://www.itb.ac.id/news/2850.xhtml/>.Diakses pada tanggal 10 April 2015.
- Cahyono, Eddy. 2015. *RAPBN-P-2015 dan Pembangunan Infrastruktur.* <http://setkab.go.id/rapbn-p-2015-dan-pembangunan-infrastruktur/>. Diakses pada tanggal 10 April 2015.