

PENGARUH BANTALAN KARET TERHADAP MOMEN YANG TERJADI PADA *LINK SLAB* BETON

Andi Rahmat¹, Andreas Triwiyono², Muslikh³

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, INDONESIA
Email: andirahmat1990@yahoo.com

²Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, INDONESIA
Email: andreas.triwiyono@ugm.ac.id

³Department of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, INDONESIA
Email: muslikhjtsl@ugm.ac.id

ABSTRACT

The link slab concrete connecting two span girders which is used as a substitute of expansion joints has been designed as a continuous part of the deck slab and the bottom surface of link debonded to the top surfaces of end girders. In practical retrofitting and replacement of expansion joints are found that the top surfaces of end girders are attached to the rubber pads before cast-in-place of the link slab. Hence there are purely as a tie between the link slab to the rubber pads and the rubber pads to the top surfaces of girders. Therefore this condition needs to be studied by numerical simulation in order to obtain the effect of rubber pads instalation to moments of link slab concrete. Analysis is conducted using Abaqus. Girders, deck slabs, steel bearing, hard rubber pads, and soft rubber pads are modeled as solid 3D. Traffic loads based on SNI 1725:2016 Loads for bridges are applied on the structural system of the link slab concrete. The results show that the installation of the hard rubber pads under the link slab can reduce the magnitude of moments compared to the link slab without rubber pads. This is indicated by the percentage reduction moments between 39,20-83,42% on LS-1, LS-2, and LS-3 hard rubber pads with thickness 10 mm, 20 mm and 30 mm. While on the link slab with the soft rubber pads is found that moments are greater at the very thick pads This is indicated by the percentage difference in moments between 198,26 – 244,58% on LS-1, LS-2, and LS-3 soft rubber pads with thickness 10 mm, 20 mm and 30 mm.

Keywords: *link slab, 3D-solid, moment, hard rubber pads and soft rubber pads*

PENDAHULUAN

Permasalahan yang muncul pada jembatan yang mempunyai lebih dari bentang yang menggunakan *expansion joint* adalah seiring berjalannya waktu maka *expansion joint* tersebut akan mengalami kelelahan dan penurunan kekuatan yang berakhir dengan terjadinya retak. Pada saat terjadi retak maka akan terbentuk celah kecil yang akan mengakibatkan air hujan masuk ke dalam celah tersebut. Hal ini akan mengakibatkan korosi pada balok dan perletakan jembatan. Permasalahan yang ada ini akan memberikan ketidaknyamanan bagi pengguna jalan dan

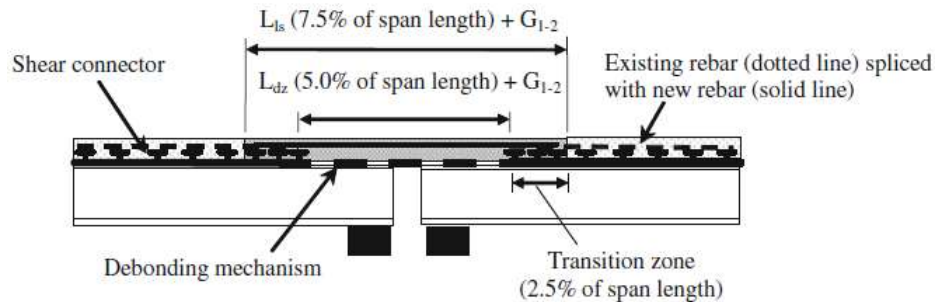
dapat mengakibatkan kegagalan struktur bila dibiarkan terjadi korosi terus menerus. Untuk menyelesaikan masalah tersebut maka penggunaan *link slab* dapat menjadi suatu alternative penyelesaian masalah yang timbul akibat kerusakan pada *expansion joint* (Sugiharjdo dkk, 2010).

Hong, Yu (2014) menyatakan sistem *link slab* dapat memberikan manfaat pada pelat lantai jembatan menerus, penyempurnaan desain dan detail dari link slab itu sendiri diperlukan untuk mengoptimalkan jembatan ini sistem dek dan memastikan jangka panjang kinerja. Bahan dengan kapasitas

regangan tarik tinggi, seperti beton serat (FRC), dapat digunakan untuk aplikasi di link slab untuk meningkatkan kekuatan, daya tahan dan karakteristik retak *link slab*.

Qian dkk (2009) menyajikan pendekatan inovatif untuk merancang transisi zona antara segmen pelat lantai beton dan *link slab* dengan bahan *engineered cementitious composite* yang mudah terdeformasi dan berdampingan dengan pelat lantai jembatan komposit girder baja. Pusat *link slab* yang semua konektor geser antara gelagar dan

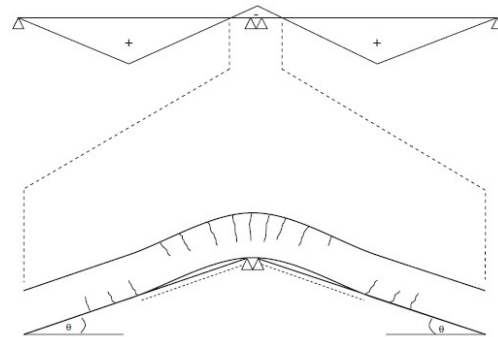
geladak dilepas untuk mencegah aksi komposit antara gelagar dan pelat lantai (Gambar 1). Bersamaan dengan pelepasan *shear connectors*, mekanisme debonding mekanis didapatkan pada *top flange* gelagar untuk selanjutnya mencegah transfer geser antara gelagar dan pelat lantai. Mekanisme *debonding* ini dapat berupa standar *roofing tar paper* (untuk digunakan dengan balok baja) atau *plastic sheeting* (untuk digunakan dengan balok beton pracetak).



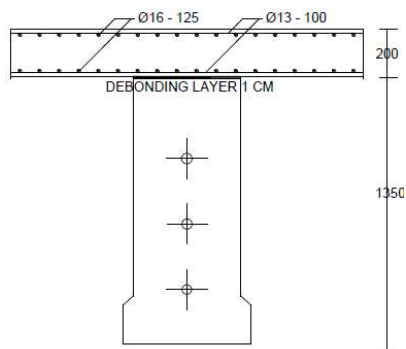
Gambar 1. Skema ECC Link Slab

Sementara aksi komposit dipertahankan pada bentang yang berdekatan, *debonding* dalam *link slab* ini memungkinkannya berfungsi lebih efisien sebagai engsel antara dua bentang yang berdekatan saat mereka membelokkan (Gambar 2).

Sugihardjo (2009) memodelkan *link slab* dengan cara elemen hingga *3D solid* dan elemen portal pada jembatan beton prategang bentang 22, 25, 31, 34, dan 40 meter dengan bantuan *software* SAP 2000. Bahan yang di gunakan adalah beton normal. Dari hasil analisis numerik disimpulkan bahwa ketebalan *link slab* minimal 200 mm, ijin tulangan kurang dari $0.4\sigma_y$. Zona *debonding* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



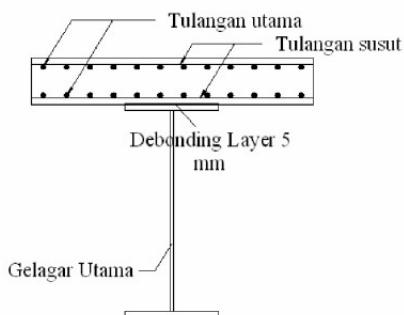
Gambar 2. Distribusi momen bentang jembatan dan mekanisme *hinging link slab*, Qian dkk (2009)



Gambar 3. Penampang tipikal dan penulangan *link slab* (bentang jembatan 22 m), Sugihardjo dan Supani (2009)

Pada penelitian yang lain, dengan metode analisis numerik menggunakan SAP2000 pada Sugihardjo dkk (2010) mendapatkan zona nirlekat (zona *debonding*) berkisar antara 5,5 – 14,5 % pada penggunaan *link slab* dengan bahan beton normal pada jembatan komposit dengan bentang 12, 16, 20, 25 dan 30 m. Zona nirlekat ini ditunjukkan pada Gambar 4.

Menurut Mothe (2006) peningkatan rasio panjang nirlekat menjadikan momen lokal pada *link slab* menurun. Kondisi ini dapat terjadi karena fakta bahwa *link slab* pendek lebih kaku pada lentur dan karenanya mereka menghasilkan lebih banyak kesinambungan dalam sistem yang mengarah ke momen terbesar dalam slab.



Gambar 4. Posisi *debonding layer*, Sugihardjo dkk (2010)

Pada beberapa pekerjaan *retrofitting* jembatan di Indonesia ditemukan peng-

gunaan bantalan berbahan karet untuk menggantikan standar *roofing tar paper* dan *plastic sheeting* pada zona *debonding* menurut Qian dkk (2009). Penggunaan bantalan ini memungkinkan terjadi aksi komposit antara *link slab*, bantalan karet dan gelagar jembatan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian dengan pendekatan numerik dengan bantuan *software* ABAQUS untuk mendapatkan informasi penting pengaruh bantalan karet terhadap momen yang terjadi pada *link slab*.

METODE PENELITIAN

Analisis numerik *link slab* berupa pemodelan elemen hingga dengan bantuan *software* ABAQUS v.6.14-3. Pembebanan berupa beban lalu lintas pada dua bentang gelagar seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Link slab dimodelkan sebagai pelat menerus dari pelat lantai jembatan yang ditempatkan pada permukaan atas ujung gelagar yang berdekatan seperti pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gelagar dan *link slab* menjadi suatu sistem model yang pada area ujung permukaan bawah gelagar diletakkan di atas *bearing* baja dengan perletakan sederhana, rol-sendi-sendi-rol.

Metode elemen hingga (*finite element analysis*) merupakan metode numerik yang menggunakan sistem diskretisasi elemen. Sistem diskretisasi mensyaratkan pembagian elemen-elemen menjadi komponen yang kecil. Pembagian elemen (*meshing*) dilakukan dengan pada ukuran yang berbeda-beda. Semakin banyak jumlah elemen akurasi pemodelan semakin baik. Kontrol akurasi pemodelan ini disebut konvergensi.

Data Perencanaan

1. Data Gelagar Beton Prategang

Dimensi gelagar beton prategang dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gelagar yang dimodelkan terdiri atas 2 gelagar dengan ukuran yang

sama yaitu panjang 30,6 m dan tinggi 1,7 m. Data ini merupakan profil WIKA PCI girder. (Victorianto, 2018).

Material yang digunakan untuk gelagar adalah beton f_c' 40 MPa (Victorianto, 2018). Modulus elastisitas beton ditentukan dengan rumus $w^{1.5} \cdot 0,043 \sqrt{f_c'}$ (SNI 2847-2013) sehingga E_c gelagar adalah 35019 MPa. Rasio poisson untuk beton adalah 0,2 (Gere dan Timoschenko, 1990).

2. Data Link Slab

Dimensi *link slab* ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Panjang *link slab* adalah 4,79 m diperoleh dari $0,075 \cdot (L_{sp1} + L_{sp2}) + \text{GAP}$ (Li dkk, 2003). Tebal *link slab* adalah 0,25 m mengikuti tebal pelat lantai jembatan profil komposit WIKA PCI girder (Victorianto, 2018). Lebar *link slab* adalah 1,2 m merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Sugihardjo dkk (2010). Nilai GAP diasumsikan 0,2 m.

Material *link slab* adalah beton f_c' 25 MPa, 30 MPa dan 35 MPa yang didesain menggunakan beton normal sehingga modulus elastisitas ditentukan dengan E_c sebesar $4700 \sqrt{f_c'}$ (SNI 2847-2013) sehingga berturut-turut untuk E_c beton f_c' 25 MPa, 30 MPa, dan 35 MPa adalah 23500 MPa, 25743 MPa dan 27805 MPa. Rasio poisson untuk beton adalah 0,2 (Gere dan Timoschenko, 1990).

3. Data Pelat Lantai

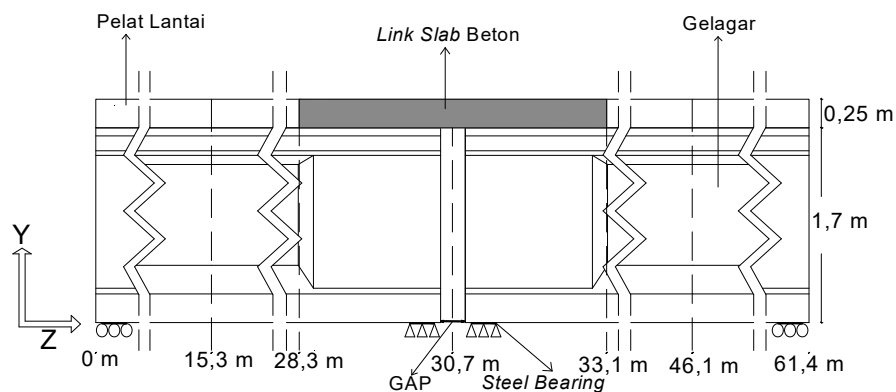
Dimensi pelat lantai jembatan ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Panjang pelat lantai pada 1 bentang gelagar adalah 28,3 m. Diperoleh dari panjang gelagar ($L_{sp1} - (0,5 \times \text{panjang link slab} + 0,5 \times \text{GAP})$).

Material pelat lantai jembatan adalah beton f_c' 25 MPa (Victorianto, 2018) yang didesain menggunakan beton normal sehingga modulus elastisitas ditentukan dengan E_c sebesar $4700 \sqrt{f_c'}$ (SNI 2847-2013) yaitu 23500 MPa. Rasio poisson untuk beton adalah 0,2 (Gere dan Timoschenko, 1990).

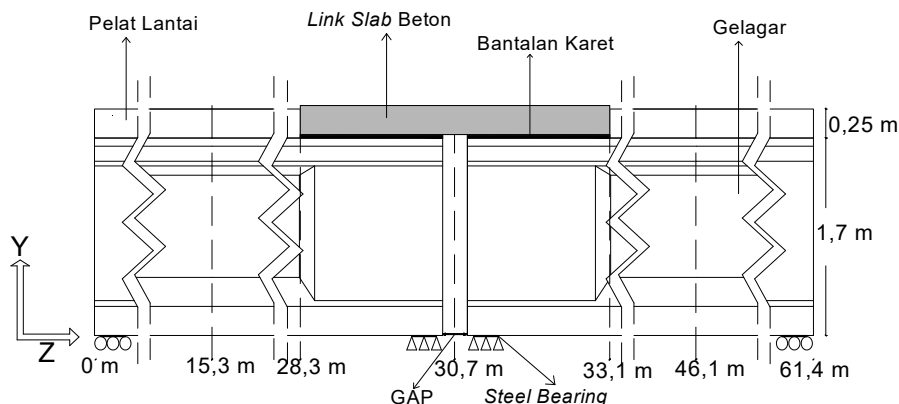
4. Data Bantalan Karet

Bantalan karet terdiri dari 3 jenis geometrik dimana penampang bantalan memiliki luas yang sama, 229,5 cm x 60 cm dengan masing-masing ketebalan 1 cm, 2 cm dan 3 cm. Panjang bantalan karet 229,5 cm diperoleh dari 0,5 panjang *link slab* dikurangi dengan 0,5 GAP. Lebar bantalan karet diperoleh dari lebar *top flange* gelagar.

Material karet yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 2 jenis yaitu *hard rubber* dan *soft rubber*. Modulus elastisitas *hard rubber* adalah $2,3 \times 10^9$ Pa dan *soft rubber* adalah $0,005 \times 10^9$ Pa (Karnopp, dkk. 2012 Seymour dan Raymond (1990) menyatakan



Gambar 5. Skema *Link Slab* beton tanpa bantalan karet



Gambar 6. Skema *Link Slab* beton dengan bantalan karet

poisson ratio ideal untuk elastomer adalah 0,5 dan polimer gelas sekitar 0,33. Dalam penelitian ini *poisson ratio* untuk bantalan karet dipakai 0,4 karena *software* Abaqus tidak bisa memproses analisis jika menggunakan *poisson ratio* ideal untuk bantalan karet.

5. Data *Steel Bearing*

Letak *steel bearing* pada struktur pemodelan ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Diasumsikan panjang = 0,4 m, lebar = 0,4 m, dan tebal = 0,01 m.

Material *steel bearing* adalah baja jenis *metals-52100 bearing steel* dengan modulus elastisitas (E) = 210000 MPa (Cotell dkk, 1994). Rasio poisson untuk baja adalah 0,3 (Gere dan Timoschenko, 1990)

Parameter Pemodelan Elemen Struktur

Parameter pemodelan elemen struktur pada ABAQUS dalam penelitian ini menggunakan model elemen *3D solid linear* untuk seluruh komponen.

Gambar tampak 2D pemodelan struktur yang dimodelkan pada ABAQUS v.6.14 dapat ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Gambar 5 adalah tampilan 2D dari komponen-komponen struktur desain *link slab* beton tanpa bantalan karet.

Gambar 6 adalah tampilan 2D dari komponen-komponen *link slab* beton dengan bantalan karet.

Variasi Pemodelan *Link Slab*

Dari detail pemodelan *link slab* berdasarkan geometri dan sifat bahan maka ditentukan variasi pemodelan dari kombinasi pemodelan *link slab* tanpa dan dengan bantalan karet seperti pada Tabel 1.

Link slab beton merupakan variable tetap dalam penelitian ini yang dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan kuat tekannya (f_c') yaitu 25, 30 dan 35 MPa.

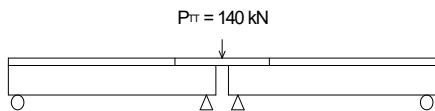
Link slab beton $f_c' = 25$ MPa disimbolkan dengan *LS-1*. *Link slab* beton $f_c' = 30$ MPa disimbolkan dengan *LS-2*. *Link slab* beton $f_c' = 35$ MPa disimbolkan dengan *LS-3*.

Bantalan *hard rubber* dan *soft rubber* merupakan variabel tidak tetap yang divariasikan berdasarkan ketebalan yaitu ketebalan 1 cm, 2 cm dan 3 cm.

Identifikasi Model Elemen Hingga Struktur

Analisis numerik dengan metode elemen hingga adalah solusi pendekatan dengan membagi komponen struktur desain menjadi bagian-bagian kecil (*meshing*) dalam jumlah tertentu. Dengan metode ini akurasi solusi meningkat seiring dengan

peningkatan jumlah elemen. Proses ini lebih dikenal sebagai proses konvergensi. Untuk mendapatkan hubungan konvergensi ini sistem *link slab* dibebani pada bagian tengah *link slab* seperti pada Gambar 7, pada beberapa jenis ukuran mesh.



Gambar 7. Pembebanan tengah bentang *link slab*

Tabel 1. Variasi pemodelan desain *link slab*

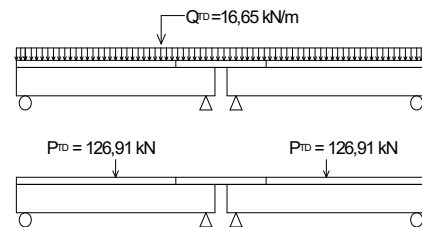
No	Nama	Keterangan
1	M1001	LS1-tanpa bantalan karet
2	M1002	LS2-tanpa bantalan karet
3	M1003	LS3-tanpa bantalan karet
4	M1111	LS1-bantalan <i>hard rubber</i> 1 cm
5	M1121	LS1-bantalan <i>hard rubber</i> 2 cm
6	M1131	LS1-bantalan <i>hard rubber</i> 3 cm
7	M1112	LS2-bantalan <i>hard rubber</i> 1 cm
8	M1122	LS2-bantalan <i>hard rubber</i> 2 cm
9	M1132	LS2-bantalan <i>hard rubber</i> 3 cm
7	M1113	LS3-bantalan <i>hard rubber</i> 1 cm
8	M1123	LS3-bantalan <i>hard rubber</i> 2 cm
9	M1133	LS3-bantalan <i>hard rubber</i> 3 cm
10	M1211	LS1-bantalan <i>hard rubber</i> 1 cm
11	M1221	LS1-bantalan <i>hard rubber</i> 2 cm
12	M1231	LS1-bantalan <i>hard rubber</i> 3 cm
13	M1212	LS2-bantalan <i>hard rubber</i> 1 cm
14	M1222	LS2-bantalan <i>hard rubber</i> 2 cm
15	M1232	LS2-bantalan <i>hard rubber</i> 3 cm
16	M1213	LS3-bantalan <i>hard rubber</i> 1 cm
17	M1223	LS3-bantalan <i>hard rubber</i> 2 cm
18	M1233	LS3-bantalan <i>hard rubber</i> 3 cm

Hasil dari konvergensi berupa ukuran pembagian elemen sehingga didapatkan

jumlah elemen untuk pada masing-masing jenis pemodelan.

Skema Pembebanan Link Slab

Skema pembebanan pada link slab ditunjukkan pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Skema pembebanan pada *link slab* akibat beban lalu lintas pada dua bentang gelagar PCI girder

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Konvergensi Pemodelan Struktur

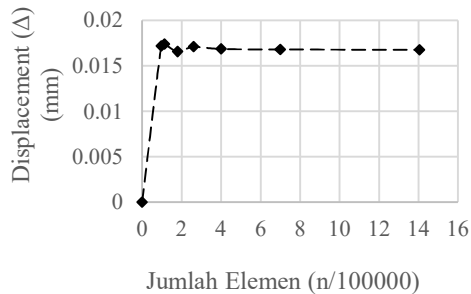
Dari variasi jumlah elemen didapatkan *displacement* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2 diperoleh grafik hubungan antara jumlah elemen dengan *displacement* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Dari Gambar 9 dan Tabel 2 ditunjukkan bahwa perubahan ukuran mesh menjadi lebih kecil membuat jumlah elemen (n) menjadi semakin banyak dan *displacement* berangsur-angsur mendekati nilai konstan pada ukuran mesh 0,06 m dengan persentase kesalahan sebesar -1,4%.

Tabel 2. *Displacement* pada 1 titik permukaan bawah *link slab* akibat pembebanan P_{TT}

Ukuran mesh (m)	Jumlah elemen (n)	<i>displacement</i> (Δ) (mm)	% kesalahan
0	0	0	-
0.1	96760	0.01721	100.00
0.09	113434	0.01738	0.96
0.08	180739	0.01657	-4.91
0.07	261172	0.01708	3.01
0.06	400376	0.01685	-1.40
0.05	699496	0.01680	-0.27
0.04	1405370	0.01676	-0.26

Ukuran mesh yang digunakan untuk variasi pemodelan *link slab* dipilih 0,05 m dengan

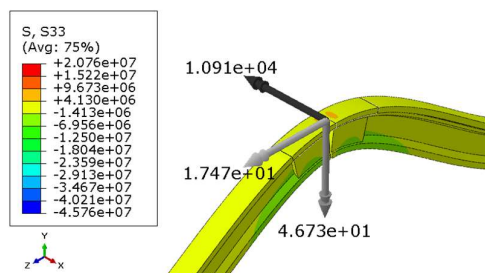
jumlah elemen 699496. Persentase kesalahan ukuran mesh ini adalah -0,27%.



Gambar 9. Grafik hubungan antara jumlah elemen *meshing* dengan *displacement*

2. Tinjauan Momen Pada Variasi Pemodelan *Link Slab*

Dalam pemodelan ini, pengaruh beban mati dan gaya prategang gelagar *PCI* diabaikan dengan alasan pada saat dilakukan pengecoran *link slab*, beban mati gelagar telah bekerja. Salah satu hasil pembacaan momen pada *link slab* akibat mekanisme pembebanan lalu lintas (Gambar 8) ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Momen yang terjadi pada *Link Slab* di antara dua bentang girder jembatan.

Gambar 10 merupakan model *link slab* tanpa bantalan karet M1001. Momen yang digunakan untuk pengolahan data adalah momen tengah bentang arah x. Hasil momen M1001 dari pemodelan dalam satuan N.m yaitu 10910 N atau 10,91 kN.m. Momen pemodelan *link slab* tanpa dan dengan bantalan karet seluruhnya ditinjau pada tengah bentang *link slab*.

3. Perbandingan Reduksi Momen *Link Slab* Tanpa dan Dengan Bantalan Karet

a. Reduksi Momen Pada *LS-1*

1) *LS-1* bantalan *hard rubber* 10 mm

Pada *LS-1 hard rubber* 10 mm mampu mereduksi momen negatif *LS-1* tanpa karet sebesar 39,20 %. Adapun momen tereduksi termasuk momen negatif. Untuk *LS-1* bantalan *hard rubber* 20 mm mereduksi momen sebesar 57,47 % dan *LS-3* bantalan *hard rubber* 30 mm dapat mereduksi momen sebesar 69,59 %. Persentase reduksi momen ini dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Persentase reduksi momen pada *LS 1-hard rubber*

Tebal (mm)	M ₀ kN.m	M ₁ kN.m	Selisih M ₀ -M ₁ kN.m	$\left(\frac{M_0 - M_1}{M_0}\right) \times 100$ %
10	-10.9	-6.627	-4.273	39.20
20	-10.9	-4.636	-6.264	57.47
30	-10.9	-3.315	-7.585	69.59

Dari Tabel 3, M₀ adalah momen yang terjadi akibat beban lalu lintas pada *link slab* tanpa bantalan karet sedangkan M₁ adalah momen yang terjadi pada *link slab* setelah penambahan bantalan karet *hard rubber* pada zona transisi *link slab* dengan gelagar beton prategang. Kemudian dari hasil perhitungan persentase pada Tabel 3 diperoleh hubungan antara tebal bantalan karet *hard rubber* dengan perubahan momen yang terjadi seperti grafik pada Gambar 11.

Pada Gambar 11, dapat dilihat bahwa semakin tebal karet *hard rubber* semakin besar reduksi momen yang terjadi. Reduksi momen yang terkecil terjadi pada *LS-1* bantalan *hard rubber* sebesar 39,2 % sedangkan reduksi momen yang terbesar adalah pada *LS-1* bantalan *hard rubber* 30 mm sebesar 69,59 %.

2) *LS-1* bantalan *soft rubber*

Pada *LS* bantalan *soft rubber* 10 mm, momen yang terjadi setelah pembebanan memiliki selisih sebesar 205,87 %. Dengan menganggap terbaliknya momen negatif

menjadi momen positif dengan selisih 200 % maka momen awal tidak mengalami perubahan besar momen jika dibandingkan dengan perubahan momen. Oleh karena perubahan momen yang terjadi sebesar 205,87 maka dengan mengurangi persentase ini dengan 200 % diperoleh 5,87 % sebagai tambahan momen yang terjadi. Angka 5,87% ini juga dapat diperoleh dengan mengabaikan jenis momen negatif atau positif sehingga selisih dapat diperoleh dan didapatkan persentase tambahan 5,87%. Perhitungan persentasi ini dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Persentase perubahan momen pada LS 1- bantalan *soft rubber*

Tebal (mm)	M ₀ (kN.m)	M ₁ (kN.m)	Selisih M ₀ -M ₁ (kN.m)	$\left(\frac{M_0 - M_1}{M_0}\right) \times 100$ %
10	-10,9	11,54	-22,44	205,87
20	-10,9	11,38	-22,28	204,40
30	-10,9	10,71	-21,61	198,26

Dari Tabel 4, M₀ adalah momen yang terjadi akibat beban lalu lintas pada *link slab* tanpa bantalan karet sedangkan M₁ adalah momen yang terjadi pada *link slab* setelah penambahan bantalan karet *soft rubber* pada zona transisi *link slab* dengan gelagar beton prategang. Kemudian dari hasil perhitungan persentase pada Tabel 5 diperoleh hubungan antara tebal bantalan karet *soft rubber* dengan perubahan momen yang terjadi seperti grafik pada Gambar 12.

Dari Gambar 12, dapat dilihat bahwa semakin tebal karet *soft rubber* semakin besar kemungkinan reduksi momen yang akan terjadi. Reduksi momen *link slab* bantalan karet *soft rubber* terjadi pada kondisi ΔM < 200 %. Dari Gambar 9 dapat dilihat bahwa bantalan karet *soft rubber* dengan ΔM di bawah 200% adalah bantalan karet tebal 30 mm sebesar 198,26 %. Dengan mengabaikan jenis momen positif atau negatif diperoleh reduksi momen yang kecil yaitu 1,74 %.

b. Reduksi Momen pada LS-2

1) LS-2 bantalan *hard rubber*

Pada LS-2 bantalan *hard rubber* 10 mm mampu mereduksi momen negatif LS-2 tanpa karet sebesar 43,35 %. Adapun momen tereduksi termasuk momen negatif. Untuk bantalan karet *hard rubber* 20 mm mereduksi momen sebesar 63,31 % dan bantalan karet *hard rubber* 30 mm dapat mereduksi momen sebesar 76,17 %. Persentase reduksi momen ini dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Persentase momen pada LS-2 *hard rubber*

Tebal (mm)	M ₀ (kN.m)	M ₁ (kN.m)	Selisih M ₀ -M ₁ (kN.m)	$\left(\frac{M_0 - M_1}{M_0}\right) \times 100$ %
10	-9.738	-5.517	-4.221	43.35
20	-9.738	-3.573	-6.165	63.31
30	-9.738	-2.321	-7.417	76.17

Pada Tabel 5, M₀ adalah momen yang terjadi akibat beban lalu lintas pada *link slab* tanpa bantalan karet sedangkan M₁ adalah momen yang terjadi pada *link slab* setelah penambahan bantalan karet *hard rubber* pada zona transisi *link slab* dengan gelagar beton prategang. Kemudian dari hasil perhitungan persentase pada Tabel 5 diperoleh hubungan antara tebal bantalan karet *hard rubber* dengan perubahan momen yang terjadi seperti grafik pada Gambar 11.

Pada Gambar 11, dapat dilihat bahwa semakin tebal karet *hard rubber* semakin besar reduksi momen yang terjadi. Reduksi momen yang terkecil terjadi pada *link slab* bantalan karet *hard rubber* sebesar 43,35 % sedangkan reduksi momen yang terbesar adalah pada *link slab* bantalan karet *hard rubber* 30 mm sebesar 76,17 %.

2) LS-2 bantalan *soft rubber*

Pada LS-2 bantalan *soft rubber* 10 mm, momen yang terjadi setelah pembebanan memiliki selisih sebesar 224,05 %. Dengan menganggap terbaliknya momen negatif menjadi momen positif dengan selisih 200 % maka momen awal tidak mengalami

perubahan besar momen jika dibandingkan dengan perubahan momen. Oleh karena perubahan momen yang terjadi sebesar 224,05 % maka dengan mengurangi persentase ini dengan 200 % diperoleh 24,05 % sebagai tambahan momen yang terjadi. Angka 24,05% ini juga dapat diperoleh dengan mengabaikan jenis momen negatif atau positif sehingga selisih dapat diperoleh dan didapatkan presentase tambahan 24,05 %. Perhitungan persentasi ini dapat di lihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Persentase perubahan momen pada LS 2-*soft rubber*

Tebal (mm)	M ₀ kN.m	M ₁ kN.m	Selisih M ₀ -M ₁ kN.m	$\left(\frac{M_0 - M_1}{M_0}\right) \times 100$ %
10	-9.738	12.08	-21.818	224.05
20	-9.738	11.9	-21.638	222.20
30	-9.738	11.17	-20.908	214.71

Pada Tabel 6 di atas, M₀ adalah momen yang terjadi akibat beban lalu lintas pada *link slab* tanpa bantalan karet sedangkan M₁ adalah momen yang terjadi pada *link slab* setelah penambahan bantalan karet *soft rubber* pada zona transisi *link slab* dengan gelagar beton prategang. Kemudian dari hasil perhitungan persentase pada Tabel 7 diperoleh hubungan antara tebal bantalan karet *soft rubber* dengan perubahan momen yang terjadi seperti grafik pada Gambar 12.

Dari Gambar 12, dapat dilihat bahwa semakin tebal karet *soft rubber* semakin besar tambahan momen yang terjadi. Penambahan *soft rubber* pada LS-2 membuat momen awal (momen negatif) menjadi momen positif dan pada semua jenis tebal *soft rubber* momen yang terjadi > 200 %. Tambahan momen terbesar terjadi pada pada karet *soft rubber* tebal 10 mm sebesar 24,818 % sedangkan pada *soft rubber* tebal 20 mm dan 30 mm terjadi tambahan momen sebesar 22,2% dan 14,71 %. Dengan hasil ini dapat dikatakan bahwa semakin tipis tebal *soft rubber* semakin besar tambahan momen yang terjadi.

c. Reduksi Momen pada LS-3

1) LS-3 bantalan *hard rubber*

Pada *Link Slab* beton 30 MPa bantalan karet *hard rubber* 10 mm mampu mereduksi momen negatif *Link Slab* beton 35 MPa tanpa karet sebesar 47,92 %. Adapun momen tereduksi termasuk momen negatif. Untuk bantalan karet *hard rubber* 20 mm mereduksi momen sebesar 69,76 % dan bantalan karet *hard rubber* 30 mm dapat mereduksi momen sebesar 83,42 %. Persentase reduksi momen ini dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Persentase momen pada LS 3-*hard rubber*

Tebal (mm)	M ₀ kN.m	M ₁ kN.m	Selisih M ₀ -M ₁ kN.m	$\left(\frac{M_0 - M_1}{M_0}\right) \times 100$ %
10	-8.687	-4.524	-4.163	47.92
20	-8.687	-2.627	-6.06	69.76
30	-8.687	-1.44	-7.247	83.42

Pada Tabel 7 di atas, M₀ adalah momen yang terjadi akibat beban lalu lintas pada *link slab* tanpa bantalan karet sedangkan M₁ adalah momen yang terjadi pada *link slab* setelah penambahan bantalan karet *hard rubber* pada zona transisi *link slab* dengan gelagar beton prategang. Kemudian dari hasil perhitungan persentase pada Tabel 7 diperoleh hubungan antara tebal bantalan karet *hard rubber* dengan perubahan momen yang terjadi seperti grafik pada Gambar 11. Dari Gambar 11, dapat dilihat bahwa semakin tebal karet *hard rubber* pada LS-3 semakin besar reduksi momen yang terjadi. Reduksi momen yang terkecil terjadi pada *link slab* bantalan *hard rubber* tebal 10 mm sebesar 47,92 % sedangkan reduksi momen yang terbesar adalah pada *link slab* bantalan karet *hard rubber* 30 mm sebesar 83,42 %.

2) LS-3 bantalan *soft rubber*

Pada LS-3 bantalan *soft rubber* 10 mm, momen yang terjadi setelah pembebanan memiliki selisih sebesar 244,58 % terhadap

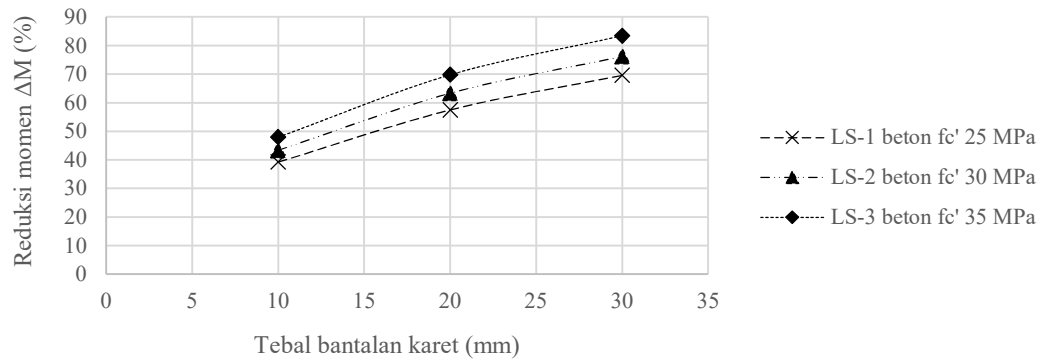
LS-3 tanpa bantalan Selisih ini membuat posisi LS-3 bantalan *soft rubber* berada pada area momen positif dan LS-3 tanpa bantalan berada pada area momen negatif. Perhitungan persentasi ini dapat di lihat pada Tabel 8.

Dari Tabel 8, M_0 adalah momen yang terjadi akibat beban lalu lintas pada *link slab* tanpa bantalan karet sedangkan M_1 adalah momen yang terjadi pada *link slab* setelah penambahan bantalan karet *soft rubber* pada zona transisi *link slab* dengan gelagar beton prategang. Kemudian dari hasil perhitungan persentase pada Tabel 8

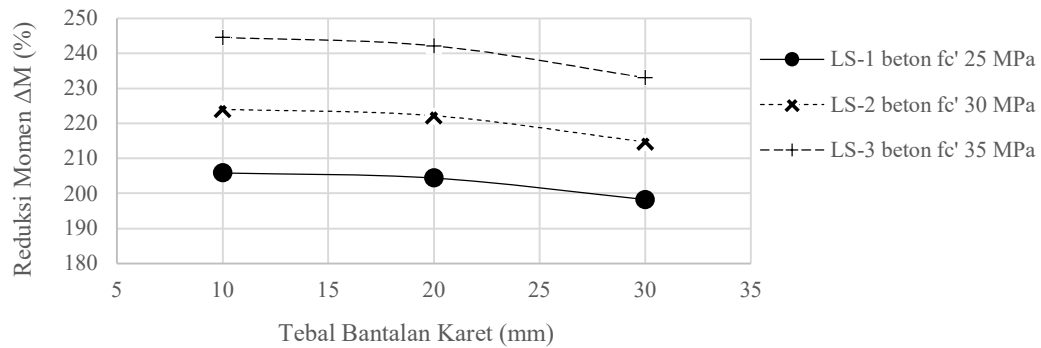
diperoleh hubungan antara tebal bantalan karet *soft rubber* dengan perubahan momen yang terjadi seperti grafik pada Gambar 12.

Tabel 8. Persentase perubahan momen pada LS- 3

Tebal (mm)	M_0 (kN.m)	M_1 (kN.m)	Selisih M_0-M_1 (kN.m)	$\left(\frac{M_0 - M_1}{M_0}\right) \times 100$ %
10	-8.687	12.56	-21.247	244.58
20	-8.687	12.35	-21.037	242.17
30	-8.687	11.56	-20.247	233.07



Gambar 11. Hubungan antara tebal karet *hard rubber* dengan perubahan momen yang terjadi pada LS-1, LS-2, dan LS-3



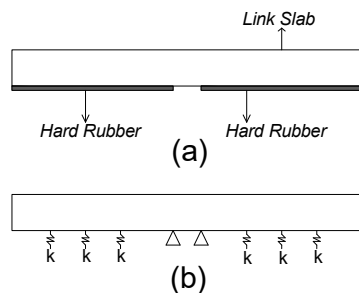
Gambar 12. Hubungan antara tebal karet *soft rubber* dengan perubahan momen yang terjadi pada *Link Slab* beton LS-1, LS-2, dan LS-3

Dari Gambar 12, dapat dilihat bahwa semakin tipis karet *soft rubber* semakin besar tambahan momen yang terjadi. Penambahan *soft rubber* pada LS-3 membuat momen awal (momen negatif)

menjadi momen positif dan pada semua jenis tebal *soft rubber* momen yang terjadi > 200 %. Tambahan momen terbesar terjadi pada pada karet *soft rubber* tebal 10 mm sebesar 44,58 % sedangkan pada *soft*

rubber tebal 20 mm dan 30 mm terjadi tambahan momen sebesar 42,17 % dan 33,07 %. Dengan hasil ini dapat dikatakan Desain *link slab* beton tanpa bantalan karet dalam penelitian ini terjadi aksi komposit antara permukaan bawah *link slab* dengan permukaan atas *top flange* gelagar di antara jarak sta (arah z) 28,3 m – 30,6 m dan 30,8 m – 33,1 m. Daerah 30,6 m – 30,8 m adalah area gap antar gelagar.

Gambar 13 (a) adalah detail penempatan *hard rubber* pada permukaan bawah *link slab* dengan jarak sta 28,3 m – 30,6 m dan 30,8 m. sedangkan Gambar 13 (b) adalah mekanisme bantalan *hard rubber* yang bersifat sebagai *spring* dan bagian *link slab* jarak 30,6 m dan 30,8 m dianggap berlaku sebagai perletakan sendi-sendi. Perilaku ini juga berlaku pada *link slab* tanpa bantalan karet.



Gambar 13. Analisis *link slab* beton dengan bantalan *hard rubber* setelah mekanisme pembebanan seperti pada Gambar 8.

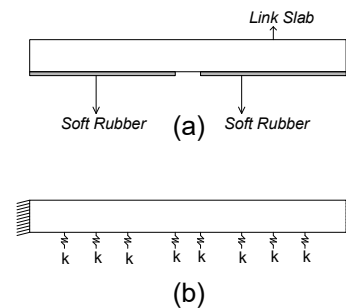
Kondisi ini mengakibatkan momen yang terjadi pada area sepanjang gap adalah momen positif. Penambahan bantalan *hard rubber* mengakibatkan momen positif ini tereduksi dan semakin tebal bantalan *hard rubber* semakin besar reduksi momen yang diperoleh.

Jika dibandingkan dengan penelitian oleh Qian dkk (2009) *link slab* tanpa dan dengan bantalan karet tidak berlaku seperti engsel antara dua bentang yang berdekatan.

Gambar 14 (a) adalah detail penempatan *soft rubber* pada permukaan bawah *link*

bahwa semakin tipis tebal *soft rubber* semakin besar tambahan momen yang terjadi.

slab dengan jarak sta 28,3 m – 30,6 m dan 30,8 m. sedangkan Gambar 14 (b) adalah mekanisme bantalan *soft rubber* yang bersifat sebagai *spring* dan bagian *link slab* pada sta 28,3 m dan 31,1 m dianggap berlaku sebagai perletakan sendi-sendi. Kondisi ini mengakibatkan momen tengah bentang *link slab* (area *link slab* di atas gap) berada pada momen negatif yang jika ditinjau besarnya lebih besar dibandingkan dengan *link slab* tanpa dan dengan bantalan karet.



Gambar 14. Analisis *link slab* beton dengan bantalan *soft rubber* setelah mekanisme pembebanan seperti pada Gambar 8.

Dari hasil pemodelan *link slab* dengan bantalan *soft rubber* jika dibandingkan dengan penelitian oleh Qian dkk (2009) *link slab* berlaku seperti engsel antara dua bentang yang berdekatan.

Dari penelitian ini penggunaan bantalan *hard rubber* dapat mereduksi momen yang terjadi akibat pembebanan. Dengan demikian bantalan *hard rubber* dianggap memberikan manfaat secara tinjauan numerik dengan metode elemen hingga.

Untuk tinjauan penggunaan *hard rubber* lebih jauh disarankan untuk dilakukan pengujian laboratorium agar dapat dijadikan pembandingan sehingga faktor keamanan penggunaan bantalan karet dan

dijadikan pertimbangan design *link slab* pada sistem jembatan semi-menerus.

KESIMPULAN

Dari hasil pemodelan bahwa penambahan bantalan *hard rubber* pada variasi tebal dapat mereduksi besar momen negatif dibandingkan dengan tanpa bantalan karet. Hal ini ditunjukkan oleh persentase reduksi momen sebesar 39,20 % untuk tebal bantalan karet 10 mm, 57, 47% untuk tebal bantalan 20 mm, dan 69, 59% pada *link slab* beton fc' 25 MPa. Untuk *link slab* beton fc' 30 MPa bantalan karet *hard rubber* berturut-turut untuk tebal bantalan 10 mm, 20 mm, dan 30 mm terjadi persentase reduksi sebesar 43,35 %, 63,31 % dan 76,17 %. Untuk *link slab* beton fc' 35 MPa bantalan karet *hard rubber* terjadi reduksi sebesar 47,92%, 69,76 % dan 83,42 % untuk tebal karet 10 mm, 20 mm, dan 30 mm.

Pada bantalan karet *soft rubber* untuk tebal antara 10 mm sampai 30 mm terjadi perilaku semakin tipis bantalan karet semakin besar tambahan momen yang terjadi. Hal ini ditunjukkan oleh persentase momen yang terjadi sebesar 205, 87%, 204, 4% dan 198, 26 % untuk tebal bantalan karet *soft rubber* 10 mm, 20 mm dan 30 mm pada *link slab* beton fc' 25 MPa. Pada *link slab* beton fc' 30 MPa terjadi selisih momen sebesar 224,05%, 222,2 % dan 214,71 % untuk tebal bantalan karet *soft rubber* 10 mm, 20 mm dan 30 mm. Sedangkan untuk *link slab* beton 35 MPa terjadi selisih momen sebesar 244,58 %, 242,17 % dan 233,07 %. Selisih yang besar ini diakibatkan pengaruh perpindahan area momen dari momen positif (kondisi awal) menjadi momen negative setelah penambahan bantalan *soft rubber*.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standarisasi Nasional, (2016). "SNI 1725: 2016 *Pembebanan Untuk*

Jembatan". Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

Badan Standarisasi (2013). "SNI 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung". Jakarta: Badan Standarisasi Nasional

Cotell, C. M., Sprague, J. A., Smidt, Jr. F. A., (1994) "*ASM HANDBOOK VOLUME 5 Surface Engineering*". *The ASM International Handbook Committee*.

Hong, Yu., (2014). "*Analysis and Design of Link Slabs in Jointless Bridges with Fibre-Reinforced Concrete*". Waterloo-Ontario-Canada: University of Waterloo.

Karnoop, D.C., Margolis, D.L., Rosenberg, R.C. (2012). "*System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechanics Systems, Fifth Edition*". John Wiley & Sons, Inc.: Canada.

Li, V.C., Fisher G., Kim, Y., Lepech, M., Qian, S., Weimann, M. dan Wang,S. (2003). "*Durable Link Slabs for Jointless Bridge Decks Based on Strain-Hardening Cementitious Composites*". University of Michigan.

Mothe, Ram Naren., (2006). "*Partial continuity in prestressed concrete girder bridges with jointless decks*". India : The Department of Civil and Environmental Engineering B.E., Osmania University.

Qian, S., D. Michael, Y. Lepech, Y. Kim, and V.C Li. (2009). "ACI Structural Journal. *Introduction of Transition Zone Design for Bridge Deck Link Slabs Using Ductile Concrete*". 1, V. 106, No. 1, January-February 2009: 96-105.

Seymour and Raymond, B. 1990. "*Engineering Polymer*

Sourcebook". McGraw-Hill :
United States.

- Sugihardjo, H and Supani. (2009).
*"Introduction of Repairing and
Joining Methods for Simply-
Supported Prestressed Bridges
Using Link Slab"*. 1st International
on rehabilitation and Maintenance
in Civil Engineering (ICRMCE),
Solo: 66-73.
- Sugihardjo, H., Pisceca, B., dan Irawan, F.
(2010). *"Studi Penggunaan Link
Slab Pada Jembatan Komposit"*.
Surabaya: Institut Teknologi
Surabaya.
- Victorianto, E. (2018). *"Optimasi Jembatan
Integral Beton Pracetak Prategang
I-Girder Untuk Jalan Raya"*.
Universitas Gadjah Mada,
Yogyakarta.