

Perkuatan Pelat Jembatan Dek Baja dengan *Overlay* Beton Bertulang

Made Sukrawa

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran-Bali
E-mail: msukrawa@yahoo.com

I K. Sudarsana

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran-Bali
E-mail: civil2001ca@yahoo.com

I Wayan Dana

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran-Bali
E-mail: iwdana@yahoo.com

Abstrak

Penelitian tentang metode perkuatan pelat jembatan komposit dek baja bergelombang (CSD) telah dilakukan dengan mempertebal pelat menggunakan overlay beton bertulang. Pengujian Laboratorium dalam skala 1:2 dilakukan dengan membuat dan menguji 12 komponen pelat komposit tebal 95 mm, lebar 500 mm dan panjang 2 kali 700 mm berupa pelat menerus satu arah. Tiga pelat kontrol dan 9 pelat dengan perkuatan diuji sampai runtuh, delapan pelat diberikan pembebanan awal sampai terjadi retak awal pada daerah tumpuan tengah untuk menirukan pelat yang sudah retak. Analisis dengan model elemen hingga (MEH) menggunakan program LUSAS v 13.57 juga dilakukan sebagai perbandingan. Perilaku lentur pelat akibat dua beban garis diamati dalam bentuk grafik beban-lendutan pada umur beton overlay 3, 7 dan 28 hari, dengan bahan accelerator pada beton overlay. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan dan kekakuan lentur pelat dengan overlay beton meningkat secara meyakinkan dengan nilai masing-masing 45% dan 100% pada umur overlay 3 hari. Pada umur overlay 3 dan 7 hari kekuatan pelat komposit hampir mencapai kekuatan pelat pada umur 28 hari. Model Elemen Hingga memberikan kekuatan dan kekakuan pelat yang lebih besar dari hasil pengujian laboratorium, namun perilaku kedua pelat mirip, dimana, pada pembebanan yang lebih tinggi kekakuan pelat menurun.

Kata-kata Kunci: Perkuatan, overlay beton, pelat jembatan, dek baja, lendutan, kekakuan.

Abstract

Research on strengthening method of bridge deck with corrugated steel deck by increasing its thickness using reinforced concrete overlay was conducted by casting and testing 12 slab specimens with total thickness of 95 mm, width 500 mm and length 2 times 700 mm, which is a 1:2 scale of continuous one way slab. Three control slabs and 9 strengthened slabs were tested until failure, 8 slabs were preloaded until initial crack occurs on the middle support region to simulate cracked deck. Finite element model (FEM) using LUSAS v 13.57 was also done as comparison. Slab behavior under two strip loadings was recorded as load-deformation graph at concrete overlay age of 3, 7, and 28 days, with accelerator in concrete overlay. Test result showed that the strength and stiffness of deck with concrete overlay improved by 45% and 100%, respectively, at concrete overlay age of 3 days. Interestingly enough, at the overlay age of 3 and 7 days, the strength of composite slab almost reach its 28 days strength. Finite Element Model showed that the deck strength and stiffness are larger than those of the test results, however, their behavior is similar in which, at higher load level, the stiffness of the slab reduce noticeably.

Keywords: Strengthening, concrete overlay, bridge deck, steel deck, deflection, stiffness.

1. Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Banyak jembatan mengalami kerusakan terutama pada pelat lantai kendaraannya, seperti keretakan akibat lentur dan geser yang pada akhirnya berkembang

membentuk lubang. Disamping menimbulkan ketidaknyamanan bagi pengguna jalan, kerusakan pelat ini bahkan sering menjadi penyebab kecelakaan. Dari sekitar 32.000 buah jembatan pada Jalan Nasional dan Jalan Propinsi di Indonesia, sebanyak 3.000 buah diantaranya berupa jembatan rangka batang baja dimana 50% lantai kendaraannya mengalami

kerusakan (Hidayat, 2003). Ciri utama pelat jembatan rangka yang mengalami kerusakan ini adalah digunakannya pelat beton dengan dek baja (*corrugated steel deck*, CSD) dengan panjang bentang 1400 mm, mutu beton f_c' 30 MPa, dan ketebalan beton minimum 70 mm. Pelat semacam ini mengalami kegagalan geser dua arah akibat beban terpusat roda truk (Sukrawa, 2003).

Kerusakan akibat geser dua arah lebih dimengerti setelah ditemukannya teori aksi pelengkungan yang kompleks pada pelat jembatan yang dibebani roda kendaraan (Sukrawa, 2000). Menurut teori ini, moda keruntuhan pelat adalah geser dua arah, bukan lentur. Oleh karena itu, dibutuhkan ketebalan pelat yang mampu menahan geser dua arah akibat efek beban roda kendaraan. Sebagai perbandingan, bagian paling tipis dari pelat beton dengan dek baja di Indonesia adalah 90 mm (Sukrawa, 2003) sedangkan peraturan perencanaan jembatan AASHTO menentukan ketebalan pelat minimum 175 mm (Barker and Puckett, 1997).

Penanganan kerusakan pelat dapat berupa penggantian atau perkuatan. Dengan pertimbangan efisiensi dan keterbatasan anggaran maka alternatif perkuatan akan lebih menguntungkan. Perkuatan dapat dilakukan dengan penambahan balok pendukung atau penambahan ketebalan pelat. Dalam penelitian ini diusulkan penggunaan overlay beton bertulang sebagai perkuatan pelat. Keberhasilan metode ini pada pelat tanpa dek baja sudah banyak dilaporkan, termasuk diantaranya penelitian pendahuluan yang dilakukan di Laboratorium Struktur FT Unud (Suasira, dkk., 2010), sedangkan pada pelat dengan dek baja metode ini relatif belum teruji. Terkait dengan pelaksanaan perkuatan di lapangan, makin cepat jembatan dibuka untuk lalu lintas, makin sedikit kerugian masyarakat akibat penutupan jembatan selama perbaikan. Dari penelitian sebelumnya diketahui bahwa kekuatan geser *interface* antara beton lama dan beton baru terbentuk pada tiga hari pertama pada benda uji yang dikeringkan dengan kelembaban (Choi et al., 1999a). Faktor waktu pelaksanaan yang singkat dan pemakaian bahan *accelerator* pada overlay beton juga belum banyak dilaporkan sehingga menarik untuk diteliti.

1.2 Keutamaan penelitian

Di Indonesia terdapat lebih dari 3000 jembatan rangka batang baja dengan pelat lantai kendaraan berupa dek metal yang disamping berfungsi sebagai tulangan positif juga berfungsi sebagai perancah permanen. Bentangan jembatan adalah bervariasi dari 35 meter sampai 60 meter, dengan menggunakan profil H dilapis galvanis sebagai komponen utamanya.

Sebagian kegagalan pelat lantai kendaraan pada jembatan rangka batang baja merupakan kesalahan sistemik karena pelat dirancang berdasarkan teori lentur

dimana, akibat beban lalu-lintas, pelat mengalami momen lentur dan gaya lintang. Beban lalu lintas menurut Bridge Management System (BMS) adalah berupa beban lajur D atau beban truk "T". Beban D terdiri dari beban merata (UDL), q sebesar 8 kPa dan beban garis (KEL) dengan intensitas 44 kN per meter, sedangkan beban truk berupa kendaraan semi-trailer terdiri dari 3 sumbu dengan berat masing-masing sebesar 50 kN pada sumbu depan dan 225 kN pada sumbu tengah dan belakang (BMS, 1992). Dengan asumsi lentur, akibat beban lalu lintas diperlukan ketebalan beton kurang dari 100 mm, karena momen inersia dek baja yang besar. Pelat yang tipis seperti ini akan mengalami kegagalan geser dua arah. Sebagai catatan, pengecekan geser dua arah akibat beban roda menurut BMS memerlukan tebal pelat minimum 120 mm (Sukrawa, 2003). Untuk itu diperlukan pelat yang lebih tebal untuk menahan beban lalu-lintas.

Mempertebal pelat jembatan yang sudah ada memerlukan metode tertentu. Salah satu metode yang sudah banyak diteliti adalah dengan menggunakan *overlay* dengan bahan beton bertulang. Aksi komposit antara beton lama dengan *overlay* beton dapat diperoleh dengan pemakaian bonding agent, penambahan penghubung geser (*shear connector*), dan persiapan permukaan pelat lama berupa tekstur. Semua metode di atas sudah diteliti secara ekstensif untuk pelat beton bertulang biasa, dengan hasil yang sangat memuaskan dimana kekuatan pelat dengan penebalan *overlay* hampir sama dengan kekuatan pelat monolit dengan ketebalan yang sama (Lemieux, et al. 2005). Namun demikian, pelat jembatan dengan dek baja yang diperkuat dengan *overlay* beton relatif belum diketahui perilakunya sedangkan potensinya untuk diaplikasikan di Indonesia sangat besar dalam penghematan biaya dan waktu pelaksanaan.

Secara teori, potensi penambahan kekuatan pelat yang dipertebal dengan *overlay* beton sangat rasional. Namun demikian, sebelum diaplikasikan di lapangan, perlu dilakukan pengujian-pengujian dalam skala yang lebih kecil di laboratorium. Untuk itu perlu dilakukan penelitian laboratorium dengan membuat spesimen dalam skala kecil untuk diuji beban dan diamati perilakunya. Terkait dengan waktu pelaksanaan, benda uji yang dibuat direncanakan memiliki kekuatan tinggi pada usia muda dengan menambahkan bahan *accelerator*, penahan geser, dan perawatan dengan penggenangan air.

2. Rancangan Eksperimen

2.1 Properti material

Rencana mutu beton pelat dasar adalah f_c' 25 MPa, sedangkan mutu beton untuk perkuatan *overlay* dibuat lebih tinggi yakni f_c' 35 MPa untuk meningkatkan daya lekat *interface*. Berdasarkan hasil rancangan campuran

beton diperoleh proporsi campuran untuk 1 m³ beton pelat dasar dengan perbandingan berat 460 kg semen : 873 kg pasir : 608 kg kerikil (1 : 1,90 : 1,32) dengan faktor air semen 0,53. Sedangkan perbandingan berat untuk beton f_c' 35 MPa adalah 561 kg semen : 786 kg pasir : 592 kg kerikil (1 : 1,4 : 1,06) dengan faktor air semen 0,45. Dalam campuran ini digunakan agregat halus pasir Karangasem dengan agregat kasar berupa batu pecah ukuran maksimum 15 mm. Untuk mempercepat pengerasan beton overlay digunakan bahan tambahan berupa *accelerator* jenis SikaCim dengan proporsi campuran 300 ml/sak semen.

Tulangan longitudinal pelat dasar menggunakan baja polos dengan diameter masing-masing 6 mm dan 4,8 mm dengan tegangan leleh f_y sebesar 250 MPa. Untuk dek baja digunakan Smartdek BMT 1 mm dengan f_y 550 MPa dan tulangan wiremesh M5 dengan f_y 550 MPa.

2.2 Benda uji pelat

Pada penelitian ini digunakan 4 (empat) jenis benda uji, PK, PP3H, PP7H dan PP28H, masing-masing terdiri dari 3 (tiga) buah pelat satu arah menerus di atas tiga perletakan. Angka 3, 7 dan 28 menunjukkan umur beton overlay saat pengujian. PK berupa pelat kontrol tanpa overlay, sedangkan PP adalah pelat dengan perkuatan *overlay* beton. Masing-masing pelat diberikan beban awal sampai retak pertama sebelum diperkuat untuk mensimulasikan pelat lama yang sudah rusak, sedangkan masing-masing satu pelat tanpa beban awal sebagai perbandingan. *Overlay* direncanakan setebal 70 mm sesuai dengan ketebalan rencana lapisan aus yang diatur dalam peraturan perencanaan jembatan (BMS, 1992). Semua benda uji, PK, PP3H, PP7H dan PP28H akan diuji ulang sampai runtuh pada umur beton overlay 28 hari.

Mengacu pada hasil penelitian sebelumnya (Choi et al. 1999, Choi et al. 1999a, Gillium et al. 2001, dan Lemieux et al. 2005) dan penelitian awal yang telah dilakukan di Laboratorium Struktur FT Unud (Suasira

et al., 2010), untuk memperoleh lekatan yang kuat antara pelat lama dengan *overlay* maka digunakan penghubung geser berupa baut mutu sedang (f_y 200 MPa) ukuran diameter 10 mm panjang 50 mm. Jumlah baut untuk satu benda uji direncanakan 8 buah dan pemasangannya disebar merata (**Gambar 1**). Disamping itu, permukaan pelat lama juga dikasarkan dengan gerinda dan dilapisi dengan *bonding agent* jenis Adibon sebelum beton *overlay* dicor. Dengan demikian diharapkan terjadi aksi komposit penuh antara pelat lama dengan beton *overlay* sehingga bekerja sebagai satu kesatuan dalam menahan beban (Sabnis, 1979).

Perawatan terhadap model pelat beton dilakukan dengan penggenangan air (*water ponding*) selama 3 hari untuk meminimalkan penguapan air sehingga proses pengikatan dan hidrasi berlangsung optimal.

Pelat beton dengan dek baja pada jembatan rangka baja direncanakan sebagai pelat satu arah dengan balok memanjang sebagai tumpuan. Untuk mengamati perilaku pelat pada daerah momen positif dan momen negatif maka pelat direncanakan menerus dengan panjang bentang pelat diambil 1,4 m dengan ukuran dek baja: tinggi 100 mm, tebal 2 mm. Dalam pengujian di laboratorium digunakan benda uji skala kecil untuk menyesuaikan dengan kondisi alat uji yang ada di Laboratorium Struktur FT Unud. Untuk itu dipilih faktor skala panjang S_L, sebesar 2 (dua). Dengan demikian faktor skala untuk syarat-syarat kesamaan (*similitude requirement*) lainnya (Sabnis et al., 1983) disesuaikan dengan dimensi akhir seperti pada **Tabel 1**. Dimensi pelat model direncanakan dengan mengalikan dimensi pelat prototipe dengan faktor skala 1/2.

Rasio antara prototipe yang telah diskala dengan struktur model harus sedapat mungkin mendekati atau sama dengan nilai 1 (Satu). Beberapa rasio yang tidak dapat bernilai satu karena keterbatasan bahan yang ada di pasaran seperti baja tulangan, maka yang diskala bukanlah diameternya, melainkan luasnya.

Tabel 1. Dimensi komponen pelat prototipe dan model skala 1:2

Komponen	Prototipe	Prototipe skala 1:2	Model	Rasio
(1)	(2)	(3)	(4)	(3)/(4)
Panjang pelat (mm)	2800	1400	1400	1
Lebar pelat (mm)	1000	500	500	1
Tebal pelat total (mm)	190	95	95	
Tebal beton (mm)	90	45	44	1,02
Tinggi dek baja (mm)	100	50	51	0,99
Tebal dek baja (mm)	2	1	1	1
Tebal <i>overlay</i> (mm)	70	35	35	1,00
Tulangan Atas	D16-355		5 - Ø 6	
Dua arah (mm ²)	566.372	141,59	141,6	1,00
Tulangan Bawah	D16-560		5 - Ø 4,8	
Dua arah (mm ²)	359.039	89,76	90,63	0,99
Tulangan <i>Overlay</i>	M10-150	M5-150	M5-150	1
Penghubung geser Baut	8 D10	8 D5	8 D5	1

Akibat keterbatasan sarana yang ada maka dalam penelitian ini digunakan *distorted model* dengan mengabaikan pengaruh berat sendiri dan geometri dek baja. Namun demikian, hasil akhir yang diperoleh diharapkan masih mewakili mengingat efek beban luar jauh lebih besar dari efek berat sendiri pelat.

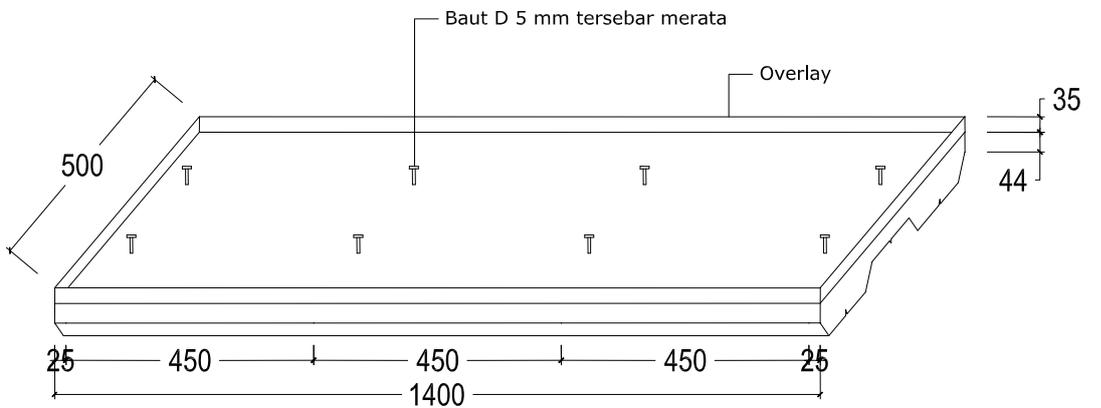
Gambar 1 menunjukkan dimensi pelat uji dengan panjang 1400 mm, lebar 500 mm dan tebal 95 mm. Tebal *overlay* direncanakan 35 mm (70 mm pada skala penuh) mengacu pada tebal lapisan aus yang diatur dalam peraturan perencanaan (BMS, 1992). Garis tengah perletakan pinggir direncanakan 25 mm dari tepi pelat untuk memperhitungkan pengaruh lebar sayap balok memanjang yang menumpu pelat. Baut penghubung geser dipasang dalam dua baris, terdiri dari empat baut per baris, dengan luas bidang pengaruh yang merata. Adapun dimensi baut ini mengacu pada penelitian sebelumnya (Suasira, dkk., 2010 dan Choi et al, 1999). **Gambar 2** menunjukkan potongan melintang pelat dengan detail penulangan pada pelat dasar dan pada lapisan *overlay*.

2.3 Instrumentasi dan uji pembebanan

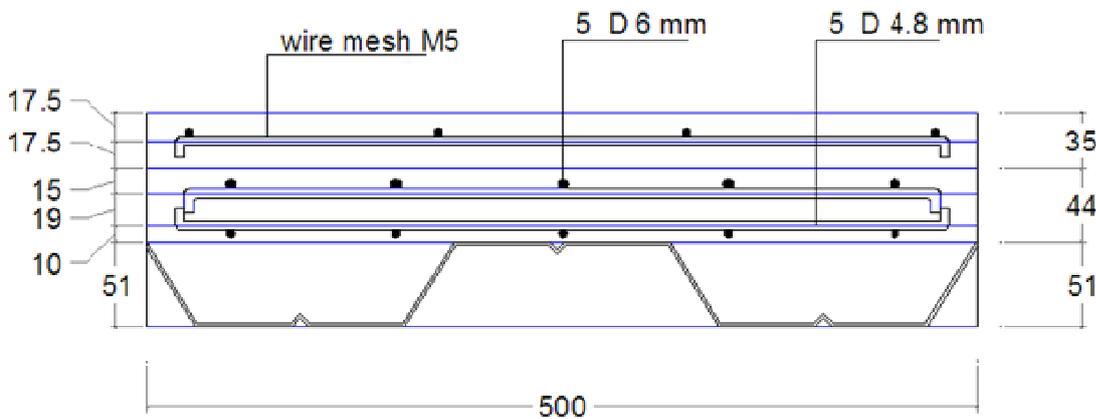
Lendutan pelat diukur dengan *dial gauge* dan dicatat untuk setiap peningkatan pembebanan sebesar 1 kN. Skema pengujian lentur pelat dengan perkuatan *overlay*

dapat dilihat pada **Gambar 3**. Setup pengujian yang dilakukan bukan untuk geser dua arah, melainkan lentur dan geser satu arah karena keterbatasan alat yang tersedia. Namun demikian, pengaruh penebalan *overlay* tetap teramati dengan baik. Alat ukur *dial gauge* dipasang di bawah beban pada bentang pelat untuk mengukur lendutan yang terjadi. Pengukuran lebar retak dilakukan menggunakan alat *crack detector* dengan ketelitian 0,01 mm. Pengukuran dilakukan pada level tulangan tarik pada daerah momen negatif yakni pada perletakan tengah. Selain itu juga dilakukan pencatatan terhadap pola retak yang terjadi dan perkembangan penjalaran retak untuk tiap-tiap level pembebanan.

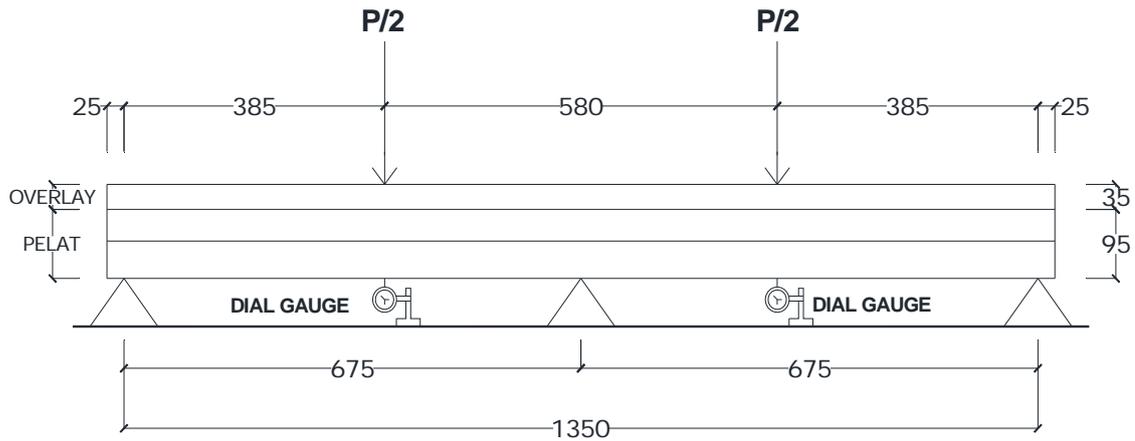
Dalam pengujian di Laboratorium, beban yang digunakan adalah dua beban garis sebagai simulasi dari beban roda kendaraan. Posisi beban disesuaikan dengan alat uji lentur yang tersedia di Laboratorium. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan penambahan beban 1 kN per tahap. Pembebanan dihentikan karena kapasitas alat uji sudah tercapai sedangkan pelat belum runtuh.



Gambar 1. Posisi baut penahan geser, tampak isometris



Gambar 2. Detail penulangan benda uji dengan perkuatan overlay



Gambar 3. Skema pengujian laboratorium, posisi beban dan instrumentasi

2.4 Pemodelan elemen hingga

Pembuatan model elemen hingga (MEH) pelat jembatan dengan Program LUSAS dilakukan dengan memperhitungkan perilaku *nonlinier* material dengan elemen *solid 3-D (volume)* untuk material beton dan deck baja, sedangkan baja tulangan dimodelkan sebagai elemen batang (*bar element*). Kompatibilitas elemen-elemen ini diperoleh dengan memberikan deskritisasi (*meshing*) sehingga antara elemen *solid* dan batang bertemu pada element joint (Lusas Theory Manual, 2004). Dalam pemodelan ini properti material seperti beton, dek baja dan baja tulangan yang digunakan dalam analisis MEH disesuaikan dengan hasil pengujian laboratorium dengan memanfaatkan fitur yang ada pada LUSAS v13.57. Baja tulangan dimodel sebagai material isotropic dengan memasukkan modulus elastisitas dan rasio Poisson. Untuk beton digunakan material non linier, disamping modulus elastisitas dan rasio Poisson, juga dimasukkan model *Cracking Concrete* berupa kuat tarik dan regangan pada akhir kurva *softening*.

Gambar 4 menunjukkan model LUSAS dari pelat jembatan yang dimodelkan setengah bentang dengan memanfaatkan kondisi simetri pada perletakan tengah. Pembebanan dilakukan dengan *nonlinear incrementation* dengan beban maksimum 250 kN.

3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian sampel silinder dilakukan setelah beton pelat dasar berumur 28 hari dengan kuat tekan rata-rata sebesar 35,45 MPa sedangkan nilai kuat tekan rata-rata beton overlay pada umur 3, 7, dan 28 hari berturut-turut adalah sebesar 25,87 MPa, 30,80 MPa dan 40,66 MPa. Pada umur awal 3 dan 7 hari kuat tekan beton masing-masing mencapai 63,64 % dan 75,76 % dari nilai pada umur 28 hari. Berdasarkan nilai-nilai ini tampak bahwa kuat tekan rencana sebesar 25 MPa untuk beton pelat dasar dan 35 MPa untuk beton *overlay* terlampaui. Perbedaan ini tidak

berpengaruh negatif karena perbandingan dilakukan untuk kondisi kuat tekan benda uji yang sama. Hasil pengujian pembebanan awal dan pelat setelah diperkuat dijelaskan berikut ini.

3.1 Pembebanan awal (*pre-loading*)

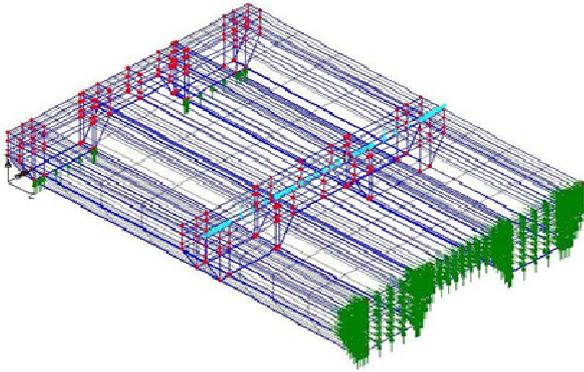
Pembebanan awal diberikan pada 8 spesimen pelat sedangkan 4 pelat tidak diberikan beban awal sebagai perbandingan. Pembebanan awal pada umur 28 hari ini bertujuan untuk memperoleh kemampuan pelat menerima beban sampai terjadi retak pertama dan sebagai representasi dari pelat lama yang sudah mengalami retak sebelum diperkuat dengan lapisan overlay. Secara teori, berdasarkan analisa penampang, beban retak dari pelat uji adalah 27,7 kN.

Dari uji *pre-loading* ini diperoleh beban retak bervariasi antara 25 kN sampai 37 kN, dengan lendutan bervariasi dari 1,1 mm sampai 1,4 mm. Posisi retak awal pada masing-masing pelat terjadi pada daerah momen negatif, yakni pada sisi atas pelat di atas perletakan tengah. Foto proses pembebanan dan pembacaan lendutan pelat tanpa perkuatan (PK) dapat dilihat pada **Gambar 5**.

3.2 Pengujian pelat dengan dan tanpa perkuatan overlay

3.2.1 Moda kegagalan

Kegagalan pelat diawali dengan delaminasi dek baja diikuti dengan retak pada daerah momen negatif. Moda kegagalan ini terjadi pada semua benda uji. Delaminasi terjadi dimulai pada bagian tepi pelat karena lebar spesimen terlalu kecil dibandingkan dengan kondisi yang kontinyu pada jembatan aslinya. Disamping itu, jarak perletakan dari tepi pelat yang terlalu dekat (250 mm) juga potensial menyebabkan delaminasi ini.



Gambar 4. Model 3D Pelat setengah bentang



Gambar 5. Foto pembebanan dan pembacaan lendutan pelat kontrol (PK)

3.2.2 Uji beban-lendutan

Pelat tanpa perkuatan diuji penuh pada saat beton pelat dasar berumur 28 hari. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan kecepatan 1 kN per menit, sedangkan lendutan yang terjadi diukur menggunakan *dial gauge* pada 4 titik simetri yakni pada bentang kiri dan kanan. Hubungan beban dan lendutan hasil eksperimen untuk masing – masing pelat uji dapat dilihat pada kurva hubungan Beban - Lendutan **Gambar 6-9**.

Berdasarkan **Gambar 6** dapat dilihat bahwa tanpa perkuatan overlay pelat mampu menahan beban maksimum sampai 115 kN dengan lendutan maksimum 9,5 mm. Pelat dengan dan tanpa pembebanan awal memiliki kekuatan dan kekakuan yang relatif sama. Penurunan kekakuan diamati pada pembebanan sekitar 65 kN. Dibandingkan dengan beban truk 100 kN dengan faktor beban hidup dan pembebanan dinamik sebesar 2,6 diperoleh nilai beban batas sebesar 260 kN pada pelat skala penuh. Pada model skala 1:2 nilai ini sama dengan 65 kN. Dengan demikian dalam kondisi baik, pelat semacam ini masih mampu menahan beban roda truk tanpa tambahan beban mati. Dalam hal ini, faktor kompensasi berat sendiri pelat tidak diperhitungkan. Adapun efek berat sendiri pelat jauh lebih kecil dibandingkan efek beban luar.

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan beban-lendutan pada pelat dengan perkuatan *overlay* yang diuji pada umur beton *overlay* 3 hari, dengan grafik untuk pelat kontrol sebagai pembandingan. Tampak jelas bahwa dengan perkuatan *overlay* diperoleh peningkatan kekuatan dan kekakuan dimana, pada nilai lendutan 5 mm kekuatan pelat meningkat dari 95 kN menjadi 140 kN (47,37%). Pada beban 80 kN lendutan pelat berkurang dari 2 mm menjadi 1 mm atau kekakuan pelat meningkat sampai 100%. Dalam pengujian ini pembebanan dihentikan sampai 145 kN karena kapasitas maksimum alat pembebanan hampir tercapai (150 kN). Penurunan kekakuan terjadi pada pembebanan sekitar 90 kN, meningkat sekitar 38,5% dibandingkan dengan pelat kontrol.

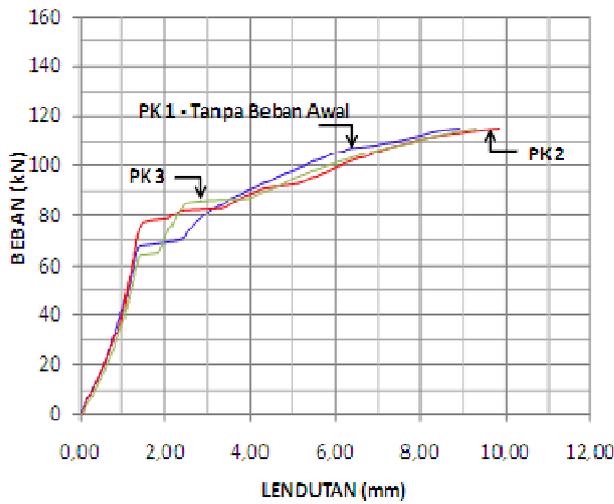
Gambar 8 dan **9** juga menunjukkan peningkatan kekuatan dan kekakuan pelat dengan *overlay* dibandingkan dengan pelat kontrol. Pada umur beton *overlay* 7 hari diperoleh peningkatan kekuatan yang hampir sama dengan pelat dengan umur *overlay* 3 hari. Pada umur *overlay* 28 hari diperoleh peningkatan kekuatan maksimum sebesar 52,63% dengan peningkatan kekakuan maksimum lebih besar dari 200%.

Tampak pula dari **Gambar 7-9** bahwa peningkatan kekuatan dan kekakuan pelat tidak terpengaruh oleh adanya retak awal akibat pembebanan awal. Ini berarti bahwa metode perkuatan *overlay* ini dapat diaplikasikan pada pelat jembatan yang sudah mengalami retak.

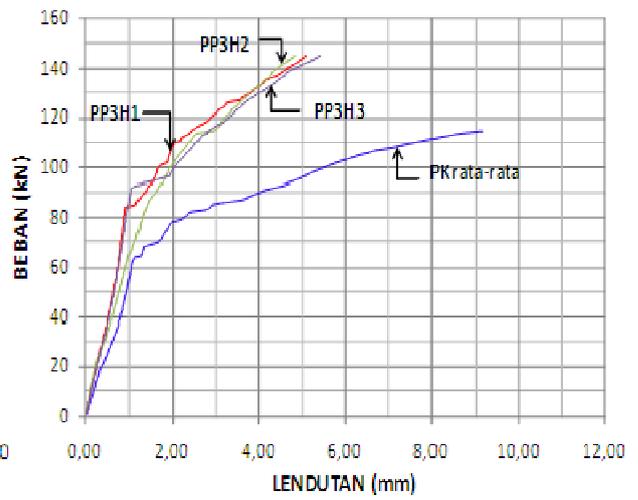
Perbandingan antara **Gambar 7**, **Gambar 8** dan **Gambar 9** menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan beton *overlay* dari 3 hari ke 7 hari tidak banyak mempengaruhi kekuatan pelat komposit. Kekuatan pelat komposit mengalami peningkatan sebesar 5% dari umur beton *overlay* 3 hari ke 28 hari. Hal ini merupakan indikasi bahwa, pada umur beton *overlay* 3 hari, pelat jembatan yang diperkuat dengan *overlay* beton dapat dibuka untuk lalu lintas tanpa perlu menunggu sampai 7 hari, apalagi sampai 28 hari seperti kebiasaan selama ini. Namun demikian, pengaruh pembebanan siklik dan durabilitas masih perlu dipertimbangkan.

3.3 Perbandingan dengan analisis elemen hingga dan analisis penampang

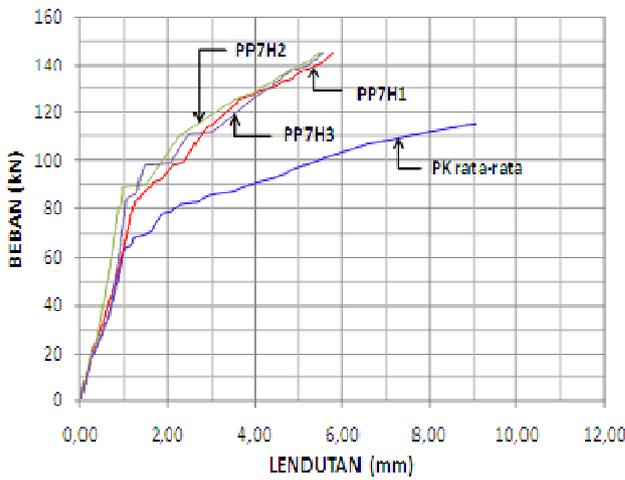
Pemodelan Elemen Hingga dengan Software Lusas v.13.5 dilakukan untuk semua variasi benda uji (PK, PP3H, PP7H, PP28H) untuk mengetahui hubungan beban dan deformasi ($P-\delta$) pada saat pembebanan. Pemodelan 3D dilakukan hanya setengah bentang dari benda uji dengan mempertimbangkan keadaan simetri baik dari dimensi maupun beban. Properti material yang dipergunakan seperti beton, baja tulangan dan dek baja adalah sesuai dengan properti yang terukur pada saat pengujian.



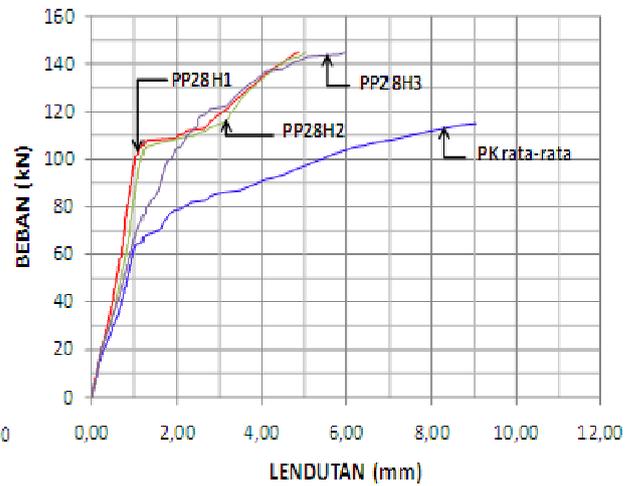
Gambar 6. Pelat kontrol, diuji pada umur 28 hari



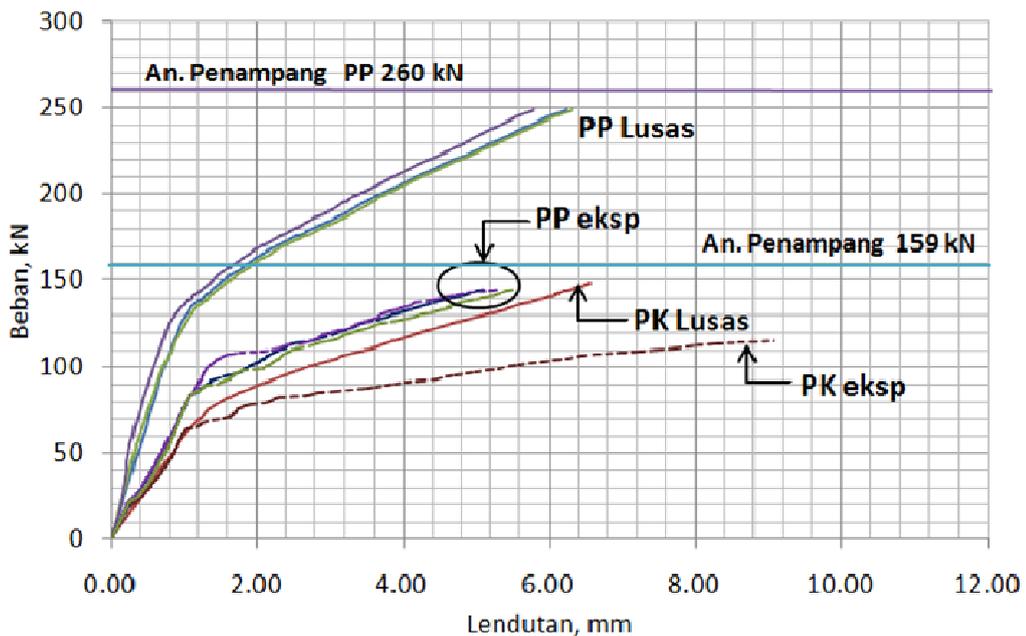
Gambar 7. Pelat dengan overlay, diuji pada umur 3 hari



Gambar 8. Pelat dengan overlay, diuji pada umur 7 hari



Gambar 9. Pelat dengan overlay, diuji pada umur 28 hari



Gambar 10. Perbandingan antara hasil Lusas dengan pengujian laboratorium

Hasil analisis elemen hingga berupa hubungan antara beban dan lendutan disajikan pada **Gambar 10** dengan hasil pengujian laboratorium dan analisa penampang sebagai perbandingan. Dari gambar tampak bahwa pelat model hasil analisis Lusas lebih kuat dan lebih kaku daripada hasil pengujian laboratorium (kurva garis putus-putus). Namun demikian kedua grafik memiliki kecenderungan yang sama yakni setelah mencapai pembebanan tertentu pelat mengalami penurunan kekakuan. Model Lusas lebih kaku dari pelat uji, terutama pada pelat dengan perkuatan *overlay*, karena Lusas menganggap bahwa antara beton dengan dek baja terjadi lekatan yang sempurna sampai runtuh sedangkan dalam pengamatan selama pengujian, bagian tepi dek baja mengalami deformasi lateral yang menyebabkan terjadinya delaminasi dengan beton. Namun demikian, perilaku pelat model mirip dengan pelat uji, dimana pada pembebanan yang lebih tinggi kekakuan pelat menurun. Seandainya pelat uji tidak mengalami delaminasi maka model Lusas akan lebih mendekati model laboratorium.

Dari hasil analisis penampang diperoleh beban maksimum sebesar 159 kN untuk pelat kontrol dan 260 kN untuk pelat perkuatan dengan anggapan terjadi aksi komposit penuh dengan kondisi pelat dasar tanpa tegangan awal. Model Lusas untuk pelat kontrol dan pelat perkuatan menghasilkan beban maksimum masing-masing sebesar 149 kN dan 250 kN dengan anggapan yang sama. Dari angka-angka tersebut tampak bahwa pelat dengan perkuatan *overlay* sekurang-kurangnya 63 % lebih kuat dari pelat kontrol. Hasil uji laboratorium secara umum lebih kecil dari hasil analisis karena pelat uji kurang lebar sehingga terjadi delaminasi, kapasitas alat uji kurang besar dan setup pengujian kurang teliti. Namun demikian efek perkuatan pelat dengan penambahan *overlay* beton teramati dengan jelas, demikian pula efek umur beton *overlay*, dimana efek umur beton *overlay* dimodelkan dengan modulus elastisitas beton yang berbeda-beda sesuai dengan kuat tekannya.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil uji laboratorium dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yaitu:

1. Metode perkuatan pelat dengan *overlay* beton mampu meningkatkan kekakuan dan kekuatan pelat secara meyakinkan. Peningkatan kekuatan minimum sebesar 45% diamati pada umur *overlay* 3 hari dengan peningkatan kekakuan sebesar 100%.
2. Pelat dengan perkuatan *overlay* yang pelat dasarnya diberi pembebanan awal menunjukkan kekuatan dan kekakuan yang sama dengan pelat dasar tanpa pembebanan awal.
3. Dengan penambahan bahan *accelerator*, kuat tekan beton *overlay* pada umur 3 hari mencapai 63,64%

dari kuat tekan pada umur 28 hari. Sedangkan pada umur 7 hari kuat tekan beton *overlay* mencapai 75,76% dari nilai pada umur 28 hari. Namun demikian, kekuatan pelat komposit pada umur *overlay* 3 dan 7 hari hanya 5% lebih kecil dari pelat komposit pada umur 28 hari. Dengan demikian metode perkuatan pelat dengan *overlay* beton dapat menghemat waktu pelaksanaan karena pada umur *overlay* 3 hari jembatan sudah dapat dibuka untuk lalu lintas.

4. Pemodelan Elemen Hingga dengan LUSAS v13.57 memberikan kekuatan dan kekakuan pelat yang lebih besar dari hasil pengujian karena pada pengujian di laboratorium terjadi delaminasi antara dek baja dengan beton sebagai akibat dari setup pengujian yang kurang sempurna (lebar pelat dan jarak perletakan ke tepi pelat kurang memadai), sedangkan pada model LUSAS lekatan antara dek baja dengan beton dianggap sempurna.
5. Perlu penelitian lebih lanjut untuk memperhitungkan efek beban siklik dan durabilitas, dengan menyertakan balok pendukung pelat sebagai bagian dari model uji.

5. Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini terlaksana dengan biaya dari Lembaga Penelitian Universitas Udayana melalui Program Hibah Penelitian Strategis Nasional tahun 2010. Dukungan dari Laboratorium Bahan dan Struktur serta mahasiswa dan staf Jurusan Teknik Sipil, FT, UNUD sangat dihargai.

Daftar Pustaka

- BMS, 1992, Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan. *Bridge Management System*. Jakarta. Departemen Pekerjaan Umum.
- Barker, R.M., and Puckett, J.A., 1997. *Design of Highway Bridges Based on AASHTO LRFD Design Specifications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Choi, D., Jirsa, J.O., and Fowler, D.W., 1999, Shear Transfer across Interface between New and Existing Concretes Using Large Powder-Driven Nails. Technical Paper. *ACI Structural Journal* / March-April. Title No. 96-S20.
- Choi, D., Fowler, D.W., and Jirsa, J.O., 1999, *Interface Shear Strength of Concrete at Early Ages*. *ACI Structural Journal* / May-June. Title No. 96-S37.
- Gillium, A.J., Shahrooz, B.M., and Cole, J.R., 2001, Bond Strength Between Sealed Bridge Decks and Concrete Overlays. *ACI Structural Journal* / November-December. Title No. 98-S83.

- Hidayat, L., 2003, Mengapa Lantai Jembatan Rangka Baja Cepat Rusak. *Seminar Sehari Kerusakan Lantai Jembatan dan Metode Perbaikan*. Balitbang DPU.
- Lemieux, M., Gagne, R., dan Lachemi, M., 2005, Behavior of Overlaid Reinforced Concrete Slab Panels Under Cyclic Loading-Effect of Interface Location and Overlay Thickness. *ACI Structural Journal*/ May-June. Title No. 102-S46.
- Lusas Theory Manual, 2004, *Theory Manual* (Lusas Version 13.57). United Kingdom: Finite Element Analysis Ltd.
- Sabnis, G.M., Harris, H.G., White, R.N., and Mirza, M.S., 1983, *Structural Modeling and Experimental Techniques*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.
- Sabnis, G.M., 1979, *Handbook of Composite Construction Engineering*. Litton Educational Publishing, Inc.
- Sukrawa, M., 2003, *Laporan Perencanaan Perkuatan Jembatan Tukad Bindu di Denpasar dan Jembatan Tukad Yeh Empas di Tabanan - Bali*. Kerjasama Fakultas Teknik dengan Pemprov Bali (Dinas Pekerjaan Umum).
- Sukrawa, M., 2000, *Experimental Investigation of the Behavior of RC Deck Slab with Added Lateral Restraint*. East Lansing-Michigan-USA: Desertasi. Michigan State University.
- Suasira, W., Sukrawa, M., dan Sudarsana, K., 2010, *Pengujian Laboratorium Pelat Beton Bertulang yang Diperkuat dengan Overlay Beton*, Konteks 4 di Sanur-Bali, 2-3 Juni.

