

ANALISIS NON-LINIER PENAMPANG PILAR JEMBATAN BETON BERTULANG YANG TERBEBANI DIPERKUAT DENGAN JAKET BETON

(NON-LINEAR SECTION ANALYSIS OF LOADED REINFORCED CONCRETE BRIDGE PIER RETROFITTED BY CONCRETE JACKETING)

Daniel Dixon Octora

Balai Pelaksanaan Jalan Nasional XX Provinsi Kalimantan Barat
Jl. Veteran No. 01, Kel. Parit Tokaya, Kec. Pontianak Selatan, Pontianak 78121, Kalimantan Barat
e-mail: danielsimarmata@gmail.com

Diterima: 27 Juli 2019; direvisi: 29 Oktober 2019; disetujui: 18 Desember 2019.

ABSTRAK

Dalam banyak praktik desain, asumsi yang sering digunakan pada perkuatan elemen struktur beton sering mengabaikan kondisi elemen struktur beton yang telah terbebani (initial load). Elemen struktur beton yang terbebani oleh beban eksisting mengakibatkan penampang eksisting telah mengalami regangan sebelum perkuatan diaplikasikan. Makalah ini akan mengkaji parameter tersebut dalam analisis non-linier penampang beton bertulang yang diperkuat dengan metode jaket beton. Penampang pilar hollow akan dianalisis sebagai contoh, dimana parameter initial load dipertimbangkan dalam dua kondisi yaitu di atas dan di bawah titik leleh penampang eksisting. Analisis non-linier penampang perkuatan dilakukan dengan mengembangkan suatu paket program komputer yang disusun dalam bahasa program Matlab dengan pendekatan fiber section untuk memperoleh kurva hubungan momen-kurvatur yang diperoleh dengan tercapainya kondisi keseimbangan gaya dengan asumsi bahwa penampang eksisting memiliki kekakuan yang sama akibat adanya perkuatan sementara sebelum aplikasi jaket dan ikatan sempurna terjadi pada hubungan antarmuka beton lama-baru. Perbandingan kapasitas dan daktilitas penampang perkuatan akan dianalisis pada kondisi dimana parameter initial load dihitung dibandingkan dengan pendekatan monolit. Objek penelitian diterapkan pada jembatan Cisomang yang terletak pada ruas tol Cipularang, dimana pada tahun 2016, pilar jembatan mengalami retak dikarenakan pergeseran fondasi akibat akumulasi pergerakan tanah pada sungai Cisomang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaruh parameter initial load terhadap kapasitas penampang tidak signifikan jika dibandingkan dengan pendekatan monolit ($\leq 7\%$).

Kata Kunci: jaket beton, pemrograman, Matlab, initial load, momen-kurvatur, pilar jembatan.

ABSTRACT

In many design practices, assumptions that are used in retrofitting concrete structural elements often ignore the condition of initial load. The concrete structural elements which are loaded by the existing load causing initial strain on the existing cross-section before retrofit is applied. This research will study this parameter in the non-linear section analysis of concrete cross-sections retrofitted by concrete jacketing. A hollow column cross-section is examined as an example, wherein the parameter of initial load considered in two conditions which are above and below the yield point of existing section. The non-linear section analysis was performed by developing a computer package program created in Matlab language code with a fiber section approach to obtain the moment-curvature relationship which is obtained by achieving a force equilibrium condition, assuming that the existing cross-section have similar stiffness due to temporary repair applied before jacketing application and a perfect bond between the concrete and the reinforcing steel. The retrofitted cross-section capacity and ductility will be carried out in conditions wherein the initial load approach is calculated compared with the monolithic approach. The object of this research is applied on Cisomang Bridge were located on Cipularang Highway, in which on 2016, the pier of this bridge was cracked because of the foundation shift caused by the accumulation of soil movement of the Cisomang river. The results showed that initial load parameters did not significantly affect cross-sectional capacity when compared with the monolithic approach ($\leq 7\%$).

Key words: concrete jacketing, programming, Matlab, initial load, moment-curvature, bridge pier.

PENDAHULUAN

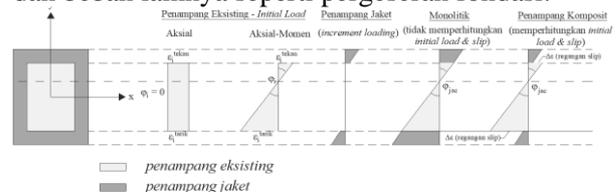
Saat ini jalan merupakan moda transportasi utama yang dipergunakan oleh masyarakat Indonesia dibandingkan dengan moda transportasi lainnya (laut dan udara). Hal tersebut dapat dilihat secara langsung bahwa 90% transportasi barang dan lebih dari 95% transportasi orang di Indonesia menggunakan jalan sebagai moda transportasinya (Chen and Duan 2014). Jembatan yang merupakan bagian dari jaringan jalan memiliki peran yang sangat penting sebagai penghubung antara dua titik yang terhalang oleh adanya rintangan seperti sungai, rel kereta api ataupun jalan raya.

Selama umur layan jembatan, elemen struktur jembatan dapat mengalami kerusakan/penurunan kekuatan yang diakibatkan oleh berbagai faktor seperti gempa, pergeseran fondasi yang diakibatkan pergerakan tanah, degradasi material akibat waktu, perubahan peraturan (*code*) dengan persyaratan yang lebih ketat, sehingga menyebabkan struktur tersebut dianggap tidak lagi memenuhi persyaratan.

Salah satu kejadian kerusakan yang terjadi pada beberapa jembatan di Indonesia adalah pada jembatan Cisomang. Jembatan Cisomang merupakan bagian dari ruas jalan tol Cikampek-Padalarang yang terletak pada KM 100+700. Jembatan ini memiliki panjang 252,127 meter dengan konfigurasi tujuh bentang yang ditopang oleh dua abutmen (A1 dan A2) dan enam buah pilar (P0, P1, P2, P3, P4, dan P5) dengan ketinggian pilar tertinggi mencapai 46,451 meter. Selama kurang lebih lima belas tahun beroperasi, jembatan Cisomang mengalami pergeseran fondasi akibat adanya masalah pergerakan tanah *clay shale*. Akumulasi dari pergerakan tanah tersebut menyebabkan terjadinya deformasi pada beberapa pilar (arah longitudinal dan transversal), dengan deformasi terbesar terjadi pada pilar P2 dalam arah longitudinal sebesar 57,02 sentimeter (LAPI ITB 2017). Dampak dari deformasi tersebut menyebabkan kerusakan berupa retak struktur dan *cover spalling* pada pilar P0, P1, P2, dan P5. Kerusakan pada elemen terpenting jembatan tersebut dapat berdampak fatal pada kestabilan sistem struktur selama masa layan jembatan, sehingga diperlukan perkuatan untuk dapat mengembalikan kekuatan dan daktilitasnya. Beberapa upaya perkuatan telah dilakukan pada

kerusakan elemen struktur jembatan, salah satunya adalah perkuatan dengan metode jaket beton yang diaplikasikan pada beberapa pilar jembatan.

Metode jaket beton adalah salah satu teknik perkuatan yang saat ini banyak digunakan dalam praktik rekayasa untuk memperbaiki penampang beton yang telah rusak dan meningkatkan kekuatan serta daktilitasnya. Pembesaran dimensi dan penambahan tulangan di sekeliling penampang eksisting dapat meningkatkan efek kekangan dan kekuatan elemen tersebut. Metode ini sering dijadikan pilihan dalam melakukan perkuatan struktur, hal tersebut didasari pada dua alasan. Pertama, pada umumnya aplikasi perkuatan dengan metode jaket beton lebih murah dibandingkan dengan metode perkuatan yang lainnya. Kedua, pada aplikasi perkuatan struktur pilar jembatan metode ini memiliki nilai lebih jika diterapkan pada lingkungan basah. Berdasarkan alasan tersebut, metode perkuatan jaket beton lebih sering digunakan untuk perkuatan pilar jembatan di sungai atau laut. Hal penting yang perlu dipertimbangkan di dalam aplikasi perkuatan dengan metode jaket beton yaitu *initial strain* akibat adanya gaya eksisting pada struktur karena beban gravitasi atau dikatakan *initial load*, dimana sering diabaikan dalam desain *jacketing* yaitu dengan tidak mempertimbangkan adanya efek struktur yang terbebani pada elemen struktur yang diperkuat atau dikatakan kedua material memiliki profil regangan ultimit yang sama (lihat Gambar 1). Asumsi tersebut yang sering diaplikasikan pada desain dan/atau evaluasi perkuatan struktur bangunan seperti yang dilakukan pada kasus jembatan Cisomang, dimana hal tersebut bertolak belakang dengan realitas yang terjadi sebenarnya, yaitu elemen struktur pilar eksisting telah mengalami regangan akibat beban eksisting dalam bentuk gaya aksial tekan dengan/tanpa adanya momen, dan beban lainnya seperti pergeseran fondasi.



Gambar 1. Profil regangan penampang dengan perkuatan jaket beton (Octora 2019)

Makalah ini membahas hasil kajian tentang perilaku non-linier penampang pilar jembatan dengan perkuatan jaket beton yang memperhitungkan adanya parameter *initial load*. Efek *slip* pada hubungan antarmuka beton lama-baru diasumsikan memiliki ikatan penuh. Evaluasi juga dilakukan terhadap perbandingan kapasitas dan daktilitas penampang jika asumsi perhitungan tidak meninjau adanya parameter *initial load* (monolit).

KAJIAN PUSTAKA

Pada saat ini, analisis non-linier pada struktur bangunan khususnya pada jembatan telah memberikan hasil yang akurat karena kemampuannya dalam mengevaluasi perilaku inelastik dari struktur akibat beban gempa. Dalam desain struktur terhadap beban gempa, struktur jembatan diperbolehkan mengalami beberapa tingkat kerusakan tanpa mengalami keruntuhan. Untuk mengontrol dan mengevaluasi tingkat kerusakan, analisis non-linier di luar batasan elastis sangat diperlukan. Analisis non-linier merupakan hal yang kompleks dan memerlukan banyak asumsi penyederhanaan.

Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi perilaku non-linier suatu struktur/jembatan. Faktor-faktor tersebut meliputi sifat non-linieritas material, non-linieritas geometri atau analisis orde kedua (p -delta), perilaku non-linier dari interaksi fondasi-tanah, efek *time-dependent* pada susut dan rangkai, dan lain sebagainya. Dalam makalah ini hanya non-linieritas material dan penampang saja yang akan dibahas.

Non-Linier Material

Struktur beton bertulang terbuat dari material beton dan baja, kedua material tersebut memiliki perilaku fisik dan mekanik yang berbeda. Beton merupakan material komposit yang terbuat dari kumpulan agregat (halus dan kasar) yang terikat secara kimiawi oleh produk hidrasi semen Portland. Walaupun beton terbuat dari bahan yang bersifat linier elastik, namun kenyataannya hubungan tegangan-regangannya cenderung bersifat non-linier, bahkan pada saat menahan beban yang kecil sekalipun (Imran dan Zulkifli 2014). Hal ini disebabkan oleh adanya retak-retak yang terbentuk antara bidang agregat dan beberapa faktor lainnya seperti riwayat pembebanan, efek jangka panjang,

perilaku plastisitas akibat friksi internal, dan lain-lain. Material beton lemah dalam tarik sehingga material beton digunakan bersama-sama dengan material baja tulangan yang berfungsi untuk menahan tegangan tarik. Material baja berperilaku linier dalam rentang tegangan kerja sampai dengan tegangan lelehnya. Perilaku non-linier struktur yang disebabkan oleh non-linier material dapat didefinisikan dalam bentuk kurva hubungan tegangan-regangan, dimana untuk struktur beton bertulang terbagi menjadi tiga bagian yaitu pada selimut beton (*unconfined concrete*), inti beton atau beton terkekang (*confined concrete*), dan baja tulangan.

Model material yang digunakan untuk memperoleh kurva hubungan tegangan-regangan penampang beton bertulang dengan perkuatan jaket beton harus memperhitungkan efek kekangan yang disebabkan oleh tulangan transversal eksisting dan tulangan transversal jaket, dan model material yang dipakai untuk memperhitungkan hal tersebut mengadopsi model Mander, Priestley and Park (1988) yang telah ditunjukkan kesesuaian perilakunya pada penelitian yang dilakukan oleh Ong et al. (2004).

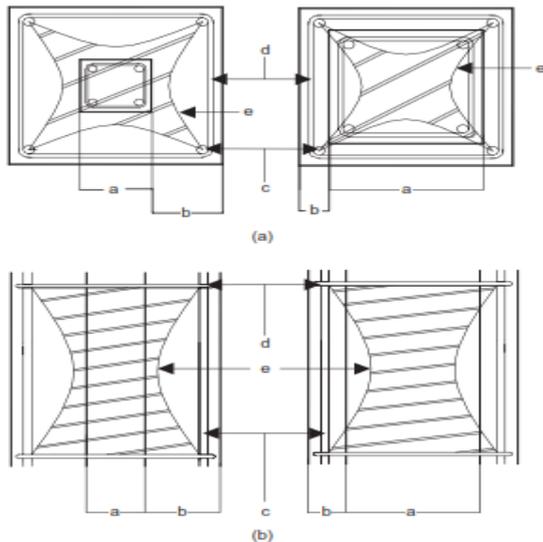
Koefisien Kekangan Efektif Penampang Beton dengan Perkuatan Jacket Beton

Tegangan kekangan lateral maksimum penampang dengan jaket beton dihitung dengan anggapan bahwa inti beton (*core*) dikekang oleh kekangan eksisting dan jaket, dimana keduanya diasumsikan leleh. Selanjutnya, tegangan kekangan lateral efektif dihitung dengan menghitung luasan beton terkekang efektif baik dalam arah bidang (*plan*) maupun vertikal (*elevation*). Luasan beton terkekang efektif pada penampang jaket dipengaruhi oleh dua kondisi, yaitu kondisi dimana posisi parabola atau luas inti beton yang secara tidak efektif terkekang (lihat Gambar 2). Pada inti beton terkekang, tegangan kekangan lateral efektif yang diperoleh dari kekangan eksisting dan jaket dapat dihitung sebagai berikut:

$$f'_{l,core} = \frac{1}{2} k_{e,ex} \rho_{s,ex} f_{yh,ex} + \frac{1}{2} k_{e,jac} \rho_{s,jac} f_{yh,jac} \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan:

- $f'_{l,core}$: tegangan kekangan lateral efektif total
- k_e : koefisien kekangan efektif.
- ρ_s : rasio volume tulangan transversal terhadap inti beton terkekang.
- f_{yh} : tegangan leleh tulangan transversal.
- ex : pada penampang eksisting.
- jac : pada penampang jaket beton.



- a. Penampang asli (eksisting)
- b. Jaket beton
- c. Tulangan longitudinal
- d. Tulangan transversal (senggang)
- e. Parabola yang menggambarkan efek kekangan akibat tulangan transversal terluar

Gambar 2. Dua susunan parabola yang mungkin merepresentasikan kekangan efektif terhadap kekangan jaket: (a) arah bidang (*plan*), (b) arah vertikal (*elevation*) (Ong, et al. 2004)

Pada penampang dengan perkuatan jaket beton berbentuk persegi panjang, luas inti beton yang secara tidak efektif terkekang dipengaruhi dalam arah bidang dan vertikal. Kekangan efektif dalam arah bidang (*plan*) dapat diperoleh dengan mengurangi luas beton terkekang dengan jumlah parabola yang merepresentasikan luas inti beton yang secara tidak efektif terkekang. Formulasi efek kekangan dengan dua kondisi kemungkinan susunan parabola dalam arah bidang dan vertikal (Gambar 2a) diekspresikan sebagai berikut:

1. Kondisi pertama terjadi, maka efek pengekanan akan menjadi maksimum. Rasio luasan inti beton terkekang efektif diformulasikan sebagai berikut:

$$\lambda=1 \dots\dots\dots(2)$$

2. Kondisi kedua terjadi, maka rasio λ dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{A_{cc,jac} - \sum_{i=1}^n \frac{2w'_{i,jac}m}{3}}{A_{cc,jac}} \dots\dots\dots(3)$$

Kondisi yang sama juga diasumsikan terjadi untuk kekangan efektif dalam arah vertikal (Gambar 2b), dua kondisi yang dapat terjadi adalah sebagai berikut:

3. Kondisi pertama terjadi, maka kekangan jaket (tulangan transversal jaket) tidak akan memberikan efek kekangan pada inti beton (*core*). Sehingga luasan efektif *confined core* diformulasikan sebagai berikut:

$$A_e = \lambda b_c d_c \dots\dots\dots(4)$$

4. Jika parabola bersinggungan dengan inti beton bagian dalam (*inner core*), luasan efektif *confined core* diformulasikan sebagai berikut:

$$A_e = \lambda \left[1 - \left(\frac{s'_j}{2b_c} - 2m \right) \right] \left[1 - \left(\frac{s'_j}{2d_c} - 2m \right) \right] \dots\dots\dots(5)$$

Berdasarkan formulasi pada persamaan (2)-(5), maka koefisien kekangan efektif penampang jaket, $k_{e,jac}$ untuk bentuk penampang persegi panjang diformulasikan sebagai berikut:

$$k_{e,jac} = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{\lambda \left[1 - \left(\frac{s'_j}{2b_c} - 2m \right) \right] \left[1 - \left(\frac{s'_j}{2d_c} - 2m \right) \right]}{A_c (1 - P_{cc})} \dots\dots\dots(6)$$

Keterangan (Persamaan 2-6):

- λ : rasio luasan inti beton terkekang efektif.
- m : adalah tinggi parabola di dalam inti beton terkekang yang diambil sebesar $1/4 w'_{i,jac}$
- $w'_{i,jac}$: panjang dasar dari parabola di pinggiran beton terkekang.
- A_e : luas inti beton terkekang efektif.
- A_{cc} : luas inti beton terkekang tidak termasuk luas tulangan longitudinal
- $A_{cc,jac}$: luas inti beton terkekang tidak termasuk luas tulangan longitudinal *jacket*
- s'_j : jarak bersih tulangan transversal jaket

- b_c : dimensi inti beton dalam arah-x
- d_c : dimensi inti beton dalam arah-y
- ρ_{cc} : rasio luas tulangan longitudinal terhadap luas inti beton terkekang

Persamaan (6) diformulasikan untuk kondisi kedua, jika kondisi pertama yang terjadi, maka koefisien kekangan efektif penampang jaket, $k_{e,jac}$ akan maksimum atau bernilai 1.

Regangan maksimum tekan beton terkekang pada penampang dengan perkuatan jaket beton mengadopsi persamaan Priestley, Seible and Calvi (1996) dengan mempertimbangkan efek dari kekangan eksisting dan jaket dapat dihitung dengan formulasi sebagai berikut:

$$\epsilon_{cu} = 0,004 + \frac{1,4\rho_{s,ex}f_{yh,ex}\epsilon_{su,ex}}{f'_{cc,ex}} + \frac{1,4\rho_{s,jac}f_{yh,jac}\epsilon_{su,jac}}{f'_{cc,jac}} \quad (7)$$

Keterangan:

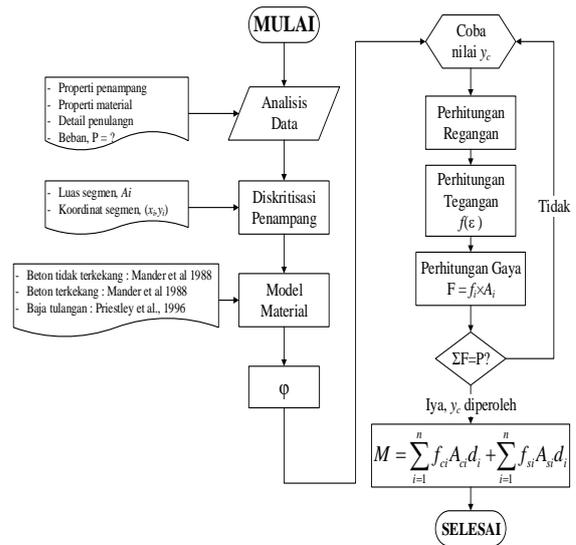
- ϵ_{cu} : regangan maksimum tekan beton terkekang penampang dengan jaket
- ρ_s : rasio volume tulangan transversal terhadap inti beton terkekang.
- f_{yh} : tegangan leleh tulangan transversal.
- ϵ_{su} : regangan tarik maksimum baja tulangan
- f'_{cc} : tegangan tekan maksimum beton terkekang
- ex : pada penampang eksisting.
- jac : pada penampang jaket beton

Non-Linier Penampang

Proses perhitungan analisis non-linier penampang untuk memperoleh kurva hubungan momen-kurvatur (M- ϕ) dibagi menjadi beberapa bagian yaitu analisis data, diskritisasi penampang, model material, analisis tegangan, analisis gaya, dan solusi persamaan kesetimbangan gaya sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 3.

Analisis Tegangan

Pada dasarnya algoritme perhitungan dalam menentukan hubungan momen-kurvatur (M- ϕ) pada penampang beton dengan perkuatan jaket beton dapat menggunakan diagram alir perhitungan yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 (Octora 2019).



Gambar 3. Diagram alir algoritme perhitungan dalam menentukan hubungan M- ϕ (Octora 2019)

Hal yang menjadi dasar perbedaan terletak pada model material untuk material beton terkekang pada penampang dengan perkuatan jaket beton, dimana kekangan efektif pada penampang dihitung dengan meninjau kekangan yang disebabkan oleh kekangan eksisting dan jaket. Disamping hal tersebut, dengan memperhitungkan elemen struktur yang terbebani akibat beban eksisting (*initial load*), maka pada bagian perhitungan analisis tegangan untuk setiap segmen penampang eksisting harus dihitung dengan memodifikasi nilai regangan yang telah memperhitungkan regangan awal (*initial strain*) akibat beban eksisting.

Parameter *initial load* pada analisis non-linier penampang dengan jaket beton dihitung dengan memodifikasi nilai regangan pada penampang eksisting, dimana nilai regangan pada penampang eksisting untuk setiap peningkatan nilai ϕ harus ditambahkan dengan regangan awal, sedangkan pada segmen penampang jaket nilai regangan pada setiap peningkatan nilai ϕ ditambahkan dengan nol (penampang jaket tidak terdapat *initial strain*). Formulasi matematis untuk penjelasan tersebut yaitu sebagai berikut:

Penampang/segmen eksisting

$$\epsilon_{s,ex} [i] = \{(y_c - y_s [i]) \times \phi [i]\} + \epsilon_{initial} \dots \dots \dots (8)$$

Penampang/segmen *jacket*

$$\epsilon_{s,jac} [i] = \{(y_c - y_s [i]) \times \phi [i]\} + 0 \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

- $\epsilon_s [i]$: regangan tiap segmen pada kurvatur ke-i.
- y_c : sumbu netral penampang yang dihitung dari serat penampang terluar.
- $y_s [i]$: jarak tiap segmen pada kurvatur ke-i.
- $\phi [i]$: kurvatur ke-i.
- $\epsilon_{initial}$: regangan awal penampang sebelum aplikasi jaket beton.
- ex : pada penampang eksisting.
- jac : pada penampang jaket.

Analisis Gaya

Besarnya gaya dapat diperoleh dengan mengubah tegangan pada setiap segmen menjadi gaya, hal tersebut dilakukan dengan formulasi matematis sebagai berikut:

$$F[i]=\sigma [i]\times A [i] \dots\dots\dots(10)$$

Keterangan:

- F[i] : besarnya gaya tekan atau tarik pada setiap segmen beton atau tulangan yang nilainya dapat bernilai positif atau negatif tergantung dari regangan pada segmen tersebut.
- $\sigma [i]$: besarnya gaya tekan atau tarik pada setiap segmen beton atau tulangan.
- A[i] : luas setiap segmen beton atau tulangan.

Solusi Numerik Persamaan Kesetimbangan

Solusi persamaan kesetimbangan gaya dilakukan untuk memperoleh nilai y_c (sumbu netral atau posisi regangan nol) pada setiap nilai ϕ . Jika diperoleh kesetimbangan gaya, maka dilanjutkan dengan perhitungan momen.

Penyelesaian solusi akar dari persamaan kesetimbangan dilakukan dengan menggunakan metode numerik/iterasi yaitu metode bagi paruh atau *bisection* dengan menetapkan dua nilai awal y_c . Dengan nilai-nilai tersebut, sumbu netral penampang (y_{cr}) dapat diperoleh.

Dengan diperolehnya nilai y_{cr} maka dapat diketahui $F(y_{cr})$, iterasi dilakukan dengan menggunakan persyaratan yaitu jika $F(y_{cr})\times F(y_{c1}) < 0$, maka $y_{c2} = y_{cr}$; jika tidak, maka $y_{c1} = y_{cr}$. Iterasi terus dilakukan sampai diperoleh nilai eror yang besarnya kurang dari toleransi yang ditetapkan atau nilai $F(y_{cr}) = 0$. Nilai toleransi ditetapkan sebesar 10^{-8} .

$$y_{cr} = \frac{(y_{c1} + y_{c2})}{2} \dots\dots\dots(11)$$

Keterangan:

- y_{cr} : sumbu netral penampang.
- y_{c1} : asumsi pertama besaran sumbu netral penampang, bernilai 0 (nol).
- y_{c2} : asumsi kedua besaran sumbu netral penampang, bernilai $d/2$.
- d : tinggi efektif penampang, diukur dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik
- $F(y_{cr})$: total gaya, nilai sumbu netral adalah y_{cr} .
- $F(y_{c1})$: total gaya, nilai sumbu netral adalah y_{c1} .

HIPOTESIS

Analisis non-linier penampang dengan memperhitungkan kondisi elemen struktur yang terbebani (*initial load*) akan memberikan kapasitas penampang yang lebih kecil jika dibandingkan dengan analisis menggunakan pendekatan monolit.

METODOLOGI

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini disajikan dalam tiga bagian utama yaitu sebagai berikut:

1. Analisis sebelum aplikasi jaket beton
 - a. Melakukan permodelan dan analisis struktur jembatan (eksisting) untuk memperoleh beban eksisting (P) yang bekerja pada pilar jembatan.
 - b. Analisis non-linier penampang eksisting (tanpa perkuatan) dengan *input* beban P untuk memperoleh kurva hubungan momen-kurvatur penampang eksisting.
2. Penentuan Parameter *Initial Load*

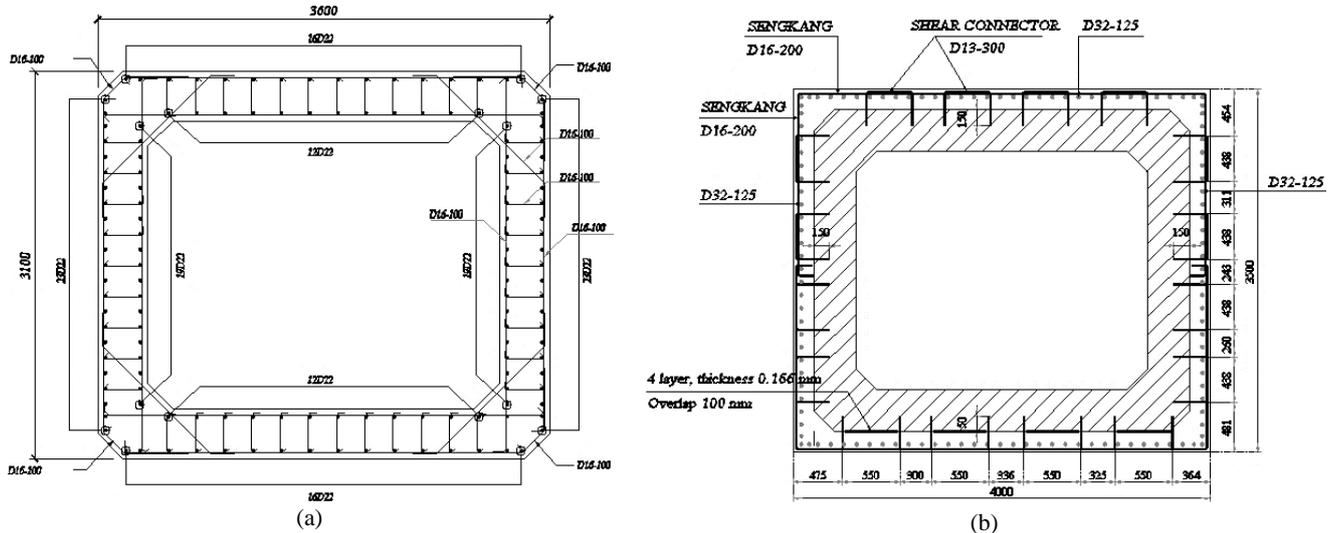
Melakukan analisis non-linier statis dengan *load control* beban gravitasi dan deformasi pilar jembatan untuk memperoleh parameter *initial load* dalam bentuk nilai momen inisial/kurvatur inisial, dimana dari perolehan nilai tersebut akan dapat diketahui nilai regangan awal (*initial strain*) pilar jembatan.
3. Analisis setelah aplikasi jaket beton

Setelah parameter *initial load* diperoleh, maka dilakukan analisis non-linier penampang dengan perkuatan jaket beton menggunakan diagram alir algoritme perhitungan dalam menentukan hubungan M- ϕ sesuai Gambar 3 yang proses perhitungannya dilakukan dengan memodifikasi nilai regangan sesuai dengan persamaan (8)-(9).

HASIL DAN ANALISIS

Untuk menunjukkan algoritme perhitungan yang formulasinya telah diturunkan pada bagian sebelumnya, analisis non-linier penampang dengan perkuatan jaket beton yang memperhitungkan kondisi elemen terbebani (*initial load*) akan dilakukan pada pilar P2

jembatan Cisomang. Perkuatan penampang pilar P2 jembatan Cisomang dilakukan dengan tebal material *jacket* sebesar 200 mm. Properti material beton dan baja tulangan yang digunakan menggunakan mutu yang sama dengan mutu material eksisting. Gambar 4 dan Tabel 1 menunjukkan geometri penampang dan properti material pilar P2.



Gambar 4. Geometri Penampang P2: (a) eksisting, (b) dengan perkuatan jaket beton

Tabel 1. Parameter Geometri Penampang dan Properti Material

Parameter	Deskripsi	Dimensi	Satuan
B	lebar penampang eksisting	3100	mm
H	tinggi penampang eksisting	3600	mm
$t_{c,ex}$	selimut beton eksisting	50	mm
$t_{c,j}$	selimut jaket beton	50	mm
t_w	tebal dinding <i>hollow</i>	400	mm
t_j	tebal jaket beton	200	mm
$D_{b,ex}$	diameter tulangan longitudinal eksisting	22	mm
$D_{b,j}$	diameter tulangan longitudinal jaket	32	mm
$d_{t,ex}$	diameter tulangan transversal eksisting	16	mm
s	spasi vertikal tulangan transversal eksisting	100	mm
$d_{t,j}$	diameter tulangan transversal jaket	16	mm
s_j	spasi vertikal tulangan transversal jaket	200	mm
f'_c	kuat tekan beton	30	MPa
f_y	kuat leleh baja tulangan	420	MPa
E_c	modulus elastisitas beton	$4700\sqrt{f'_c}$	MPa
E_s	modulus elastisitas baja tulangan	200000	MPa

Tabel 2. Properti Kekuatan Ekspektasi Material

Properti Material	Kekuatan Ekspektasi
Baja Tulangan, BjTS 420	
- kuat leleh ekspektasi, f_{ye}	$1,1f_y$
- kuat tarik ekspektasi, f_{sue}	$1,1f_{su}$
Beton	
- kuat tekan beton ekspektasi, f_{ce}'	$1,3f_c'$

Sumber: Caltrans SDC ver. 1.7 (2013)

Analisis non-linier penampang akan dilakukan dengan menggunakan properti

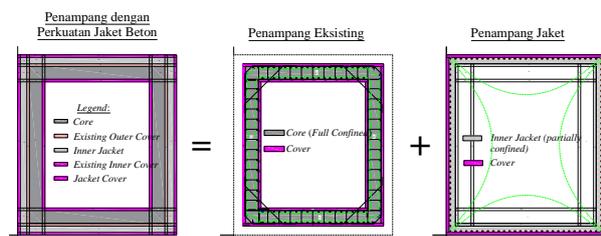
material yang didasarkan pada kekuatan material ekspektasi (*expected material strength*), untuk lebih akurat/realistis dalam menggambarkan kapasitas dan perilaku dari struktur (Caltrans 2013, PEER 2008). Besaran nilai yang dipakai dalam kekuatan ekspektasi material beton dan baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.

Initial load yang direpresentasikan sebagai *initial curvature* diasumsikan dalam

dua kondisi, yaitu kondisi pada saat *initial curvature* berada di bawah dan di atas *curvature yield* penampang eksisting (tanpa perkuatan).

Model Diskritisasi Penampang dengan Jacket Beton

Penampang dengan perkuatan jacket beton didiskritisasi dalam empat bagian yaitu inti beton, selimut beton eksisting bagian luar, jacket beton, dan selimut beton (selimut beton eksisting bagian dalam dan selimut jacket beton) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diskritisasi penampang dan luasan beton terkekang efektif pada penampang dengan jacket beton

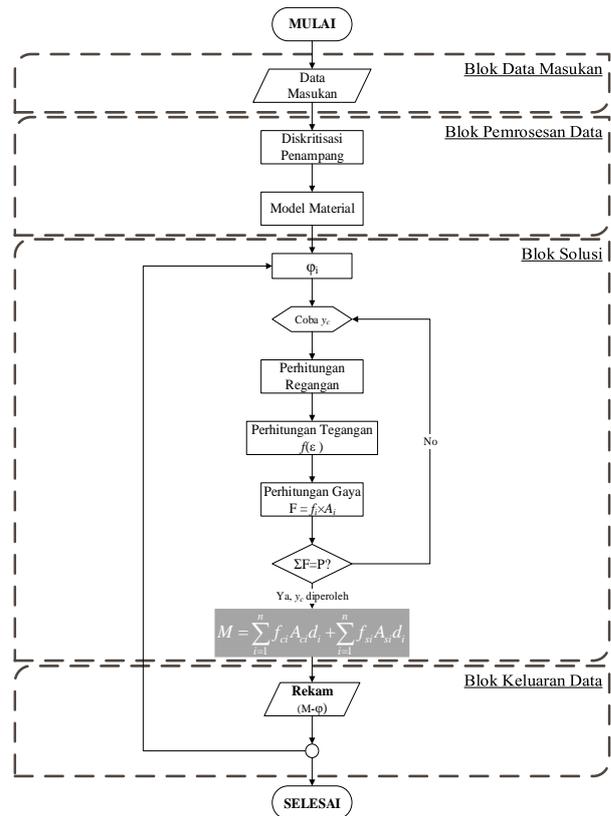
Detail penjelasan dari ilustrasi diskritisasi penampang disajikan sebagai berikut:

1. Inti beton (*core*), dikekang oleh kekangan eksisting dan jacket;
2. Selimut beton eksisting bagian luar (*existing outer cover*), dikekang oleh kekangan jacket;
3. Jacket beton (*Inner jacket*), dikekang oleh kekangan jacket;
4. Selimut beton (*existing inner cover & jacket cover*), beton tidak terkekang.

Organisasi Pemrograman dan Asumsi

Organisasi pemrograman dilakukan dengan membagi program yang terdiri atas satu program utama (*main program*) dan beberapa program (*sub programs*). Hal tersebut dilakukan terutama untuk memudahkan dalam hal proses kompilasi dan pencarian kesalahan program (*debugging process*). Tugas dari program utama adalah untuk memanggil pekerjaan yang dilakukan oleh sub-sub program. Sub program terdiri atas dua jenis, yaitu *script* dan *function*. *Script* mengerjakan satu jenis pekerjaan berskala besar, sedangkan *function* hanya mengerjakan pekerjaan sederhana dengan menerima beberapa parameter dan mengembalikan satu nilai parameter berdasarkan nama *function* itu sendiri.

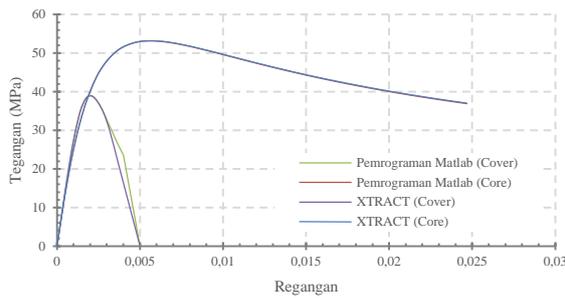
Asumsi penting yang dipakai dalam analisis adalah kekakuan penampang eksisting diasumsikan tetap sesuai dengan perbaikan retak dengan *grouting* yang dilakukan sebelum aplikasi jacket beton. Efek perkuatan sementara pada penampang pilar menggunakan metode *fiber reinforced plastic (FRP)* jacket tidak akan diperhitungkan karena pada penampang bukan lingkaran, efek kekangan harus diasumsikan untuk diabaikan jika rasio dimensi penampang $(b:h) \geq 2$ dan dimensi penampang $(b/h) \geq 900$ mm (ACI Committee 440.2R-08 2008).



Gambar 6. Blok program algoritme perhitungan dalam menentukan hubungan M-φ

Validasi Program

Validasi akan dilakukan dengan membandingkan hasil analisis pada penampang beton eksisting (tanpa jacket beton) dengan keluaran yang dihasilkan oleh program Xtract sebagai dasar kevalidan algoritme pada analisis penampang pilar dengan perkuatan jacket beton.



Gambar 7. Perbandingan kurva hubungan tegangan-regangan hasil pemrograman Matlab dan Xtract

Tabel 3. Perbandingan parameter penting pada hubungan tegangan-regangan

Parameter	Matlab	Xtract	Deviasi
f_{cc} , tegangan max beton terkekang (MPa)	53,17	53,22	0,09%
ϵ_{cc} , regangan pada saat f_{cc}	0,005632	0,005646	-0,25%
ϵ_{cu} , regangan ultimit	0,024687	0,024670	0,07%

Terdapat perbedaan kurva hubungan tegangan-regangan material beton tidak terkekang (*cover*) antara hasil pemrograman Matlab dan Xtract (Gambar 7). Hal tersebut disebabkan perbedaan persamaan dalam mendefinisikan hubungan tegangan-regangan material beton. Pada Xtract, tegangan mengalami penurunan secara linier dimulai pada saat beton telah mencapai $\epsilon_{cu} = 0,003$ (regangan beton ultimit tidak terkekang),

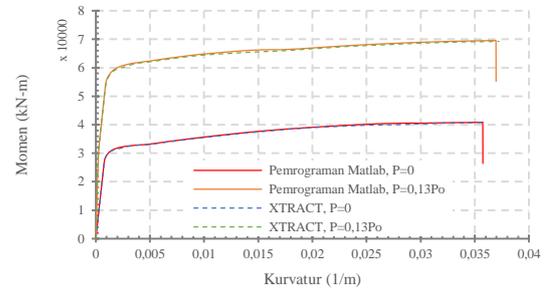
Tabel 4. Perbandingan parameter penting pada hubungan tegangan-regangan

Parameter	Mayor ($P = 0, 13P_0$)			Minor ($P = 0, 13P_0$)		
	Program Matlab	Xtract	Deviasi (%)	Program Matlab	Xtract	Deviasi (%)
ϕ_y	0,000889	0,000893	-0,48	0,001025	0,001030	-0,46
ϕ_u	0,036940	0,037220	-0,75	0,043610	0,043880	-0,62
M_y	53914,27	53600	0,59	42805,99	42550	0,60
M_u	69607,15	69310	0,43	58476,65	58210	0,46

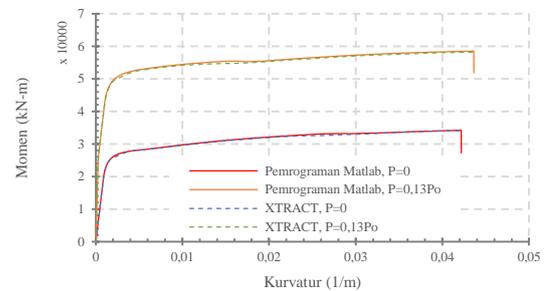
Kurva hubungan momen-kurvatur yang dihasilkan dari program yang telah disusun sangat mendekati kurva yang diperoleh dari program Xtract (Gambar 8). Perbandingan hasil titik-titik penting pada kurva tersebut juga menunjukkan hasil yang cukup dekat pada kedua arah sumbu penampang dengan perbedaan terbesar sebesar $\leq 0,75\%$ (Tabel 4), sebanding dengan perbedaan kecil hasil tegangan-regangan.

Validasi juga dilakukan untuk mengetahui kevalidan idealisasi bilinear pada kurva hubungan momen-kurvatur. Hal tersebut penting dikarenakan idealisasi bilinear pada

sedangkan pada pemrograman Matlab yang disusun, asumsi penurunan linier dimulai pada saat beton telah mencapai regangan $2\epsilon_{co} = 0,004$ (Mander, Priestley and Park 1988).



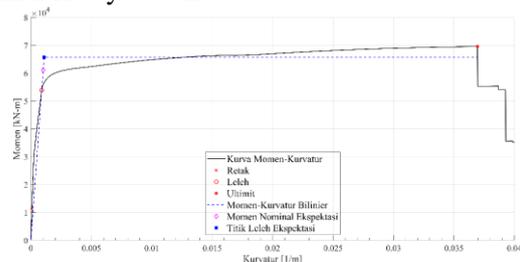
(a)



(b)

Gambar 8. Perbandingan kurva hubungan momen-kurvatur: (a) arah mayor, (b) arah minor

kurva hubungan momen-kurvatur tersebutlah yang digunakan nantinya sebagai *input* data dalam analisis kinerja struktur jembatan menggunakan analisis *pushover*/analisis non-linier riwayat waktu.



Gambar 9. Idealisasi bilinear kurva momen-kurvatur (arah mayor, $P=0,13P_0$)

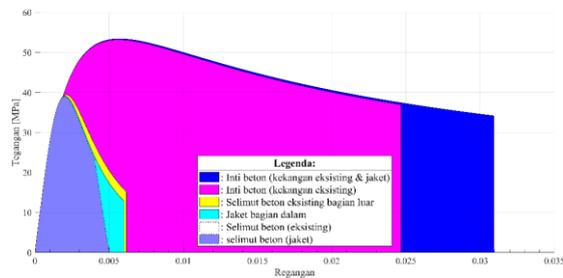
Tabel 5. Perbandingan hasil idealisasi bilinear

Parameter	Matlab	Xtract	Error
ϕ_p , idealisasi titik kurvatur (1/m)	0.001083	0.001104	-1,86%
M_p , idealisasi titik momen (kN-m)	65707.12	66230	-0,79%

Perbandingan hasil analisis perhitungan idealisasi kurva hubungan momen-kurvatur pada program yang telah disusun dengan hasil dari program Xtract menunjukkan hasil yang cukup dekat dengan persentase perbedaan yang relatif kecil yaitu sebesar -1,86% untuk nilai kurvatur leleh ekuivalen dan sebesar -0,79% untuk nilai momen leleh ekuivalen (Tabel 5).

Tegangan-Regangan Penampang dengan Jacket Beton

Pada Gambar 10 terlihat bahwa terjadi kenaikan besarnya tegangan dan regangan maksimum pada inti beton (f_{cc} dan ϵ_{cc}) dengan perkuatan jacket beton dibandingkan dengan penampang eksisting, hal tersebut disebabkan karena kontribusi tambahan tegangan lateral yang disumbangkan oleh tulangan transversal jacket.



Gambar 10. Kurva hubungan tegangan-regangan material beton dengan jacket beton

Kenaikan tegangan yang terjadi pada inti beton (f_{cc}) tidak signifikan terjadi dikarenakan luasan efektif inti beton yang tidak terkekang oleh tulangan transversal jacket pada arah bidang penampang beton cukup besar, hal tersebut diakibatkan tidak adanya ikatan tambahan (*ties*) pada tulangan transversal.

Tabel 6. Tegangan maksimum (sesuai Gambar 10)

Diskritisasi Penampang	f_{cc} (MPa)
Inti beton (kekangan eksisting)	53,1670
Inti beton (kekangan eksisting & jacket)	53,4344
Selimit beton eksisting bagian luar	39,4226
Jaket bagian dalam	39,0681
Selimit beton (selimit beton eksisting bagian dalam & selimit jacket beton)	f_{cc}

f_{cc} : tegangan maksimum beton terkekang penampang eksisting (tanpa perkuatan jacket beton)

Momen-Kurvatur Penampang dengan Jacket Beton Memperhitungkan Initial Load

Pada bagian ini, analisis hubungan momen-kurvatur dilakukan dengan dua skenario yaitu kondisi yang menggambarkan parameter inisial (direpresentasikan dalam bentuk momen inisial, M_i) berada di bawah atau di atas kondisi leleh penampang eksisting sebelum jacket beton dilakukan. Berikut disajikan hasil pemrograman yang diperoleh dengan mengasumsikan pada penampang tidak terjadi *slip* (ikatan penuh pada penampang terjadi).

Skenario-1

- Arah = Mayor
- Beban Aksial = 18150 kN
- Momen Inisial (M_i) = 30000 kN-m
($M_i \leq M_{y-pre-jacket}$: Tabel 4)
- Interface slip = diabaikan

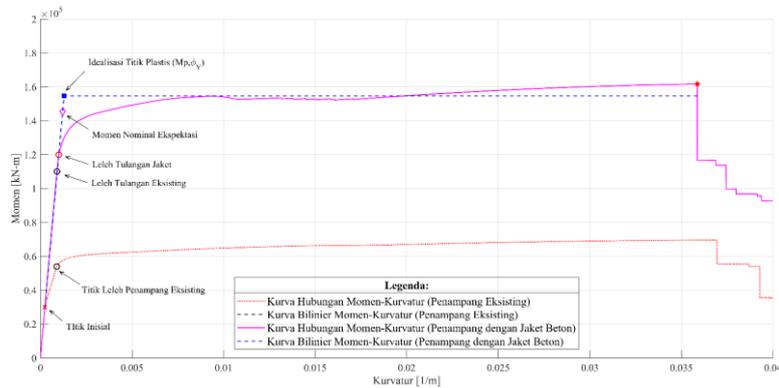
Skenario-2

- Arah = Mayor
- Beban Aksial = 18150 kN
- Momen Inisial (M_i) = 60000 kN-m
($M_i > M_{y-pre-jacket}$: Tabel 4)
- Interface slip = diabaikan

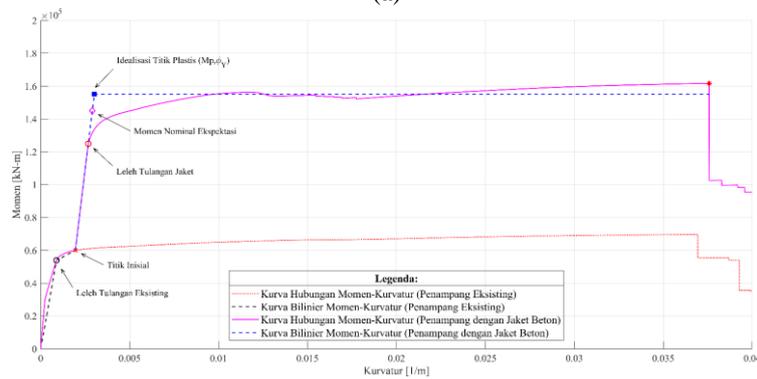
PEMBAHASAN

Titik Leleh dan Ultimit

Pada kondisi $M_i \leq M_{y-pre-jacket}$ (Gambar 11.a), terdapat dua titik leleh (*yield*) pada kurva hubungan momen-kurvatur yaitu pada saat tulangan longitudinal eksisting dan tulangan jacket mencapai regangan leleh. Sedangkan untuk kondisi $M_i > M_{y-pre-jacket}$ (Gambar 11.b), titik leleh (*yield*) ditentukan oleh regangan leleh pada tulangan jacket longitudinal. Titik ultimit pada kurva hubungan momen-kurvatur penampang dengan perkuatan jacket beton ditentukan dengan membandingkan regangan maksimum tulangan longitudinal jacket dan regangan maksimum inti beton, mana yang mencapai terlebih dahulu, dimana pada kasus ini titik ultimit ditentukan oleh tercapainya regangan maksimum pada tulangan longitudinal jacket.



(a)



(b)

Gambar 11. Kurva hubungan momen-kurvatur dengan perkuatan jacket beton: (a) skenario-1, (b) skenario 2

Kapasitas dan Daktilitas Penampang

Dapat dilihat secara jelas pada Gambar 11.a dan Gambar 11.b, terjadi peningkatan kapasitas pada penampang dengan perkuatan jacket beton sebesar lebih dari dua kali kekuatan penampang eksisting yang ditabulasikan pada Tabel 7.

Hal yang menarik dapat dilihat juga pada Gambar 11.a, dimana untuk kondisi perkuatan dilakukan pada saat tulangan longitudinal eksisting belum mencapai leleh ($M_i \leq M_{y-pre-jacket}$), terjadi kenaikan yang signifikan pada M_{y-ex} (momen leleh tulangan longitudinal eksisting) sampai sebesar ≥ 2 kalinya. Peningkatan juga terjadi pada ϕ_{y-ex} (kurvatur leleh tulangan longitudinal eksisting) sebesar 12%.

Daktilitas kurvatur penampang dengan perkuatan jacket beton jika dibandingkan dengan penampang eksisting mengalami penurunan sebesar $\pm 3\%$ untuk kondisi $M_i \leq M_{y-pre-jacket}$, sebaliknya untuk kondisi $M_i > M_{y-pre-jacket}$ mengalami kenaikan sebesar $\pm 1,7\%$. Hal tersebut terjadi dikarenakan adanya faktor *shifting* akibat adanya parameter *initial load* dimana tulangan longitudinal jacket belum mengalami tegangan pada saat interaksi parsial

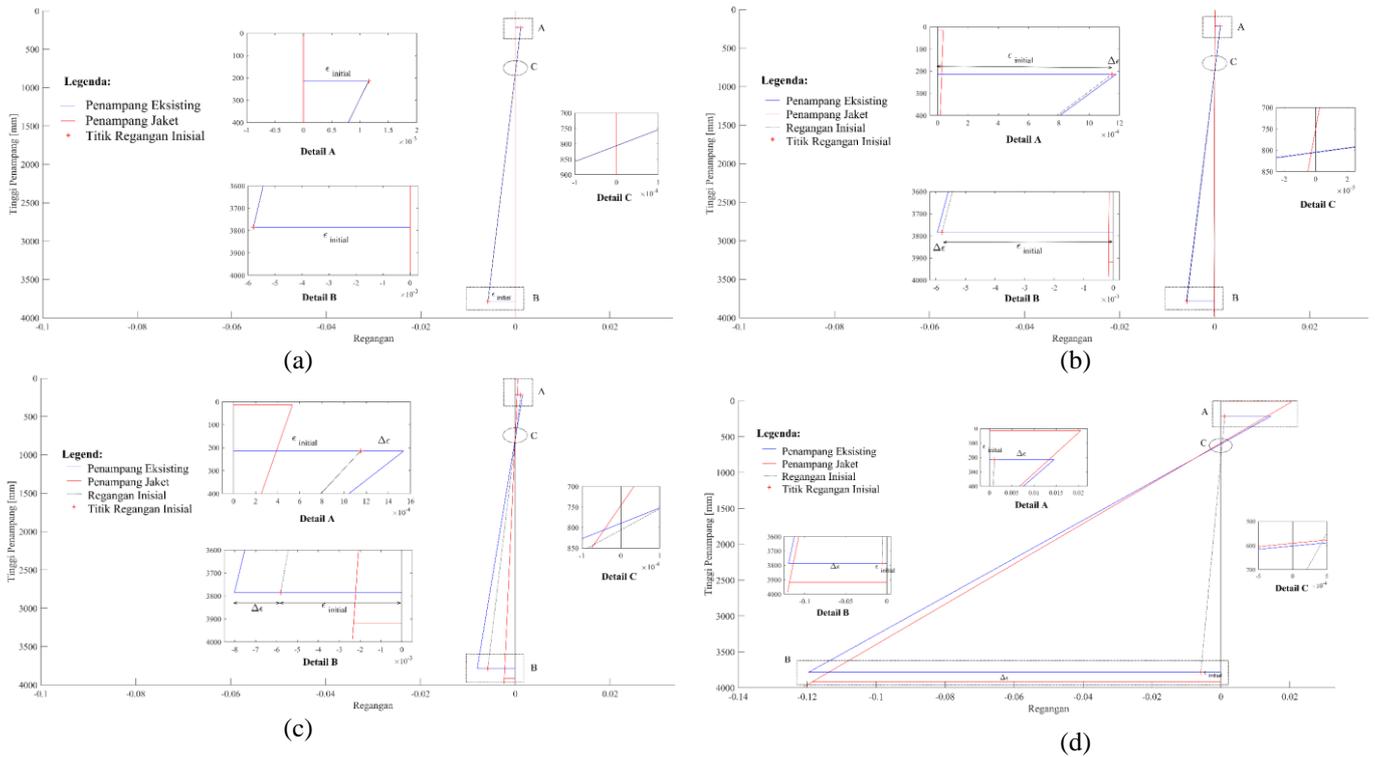
antara inti beton eksisting dan jacket beton dimulai.

Tabel 7. Perbandingan kapasitas penampang dengan perkuatan jacket beton

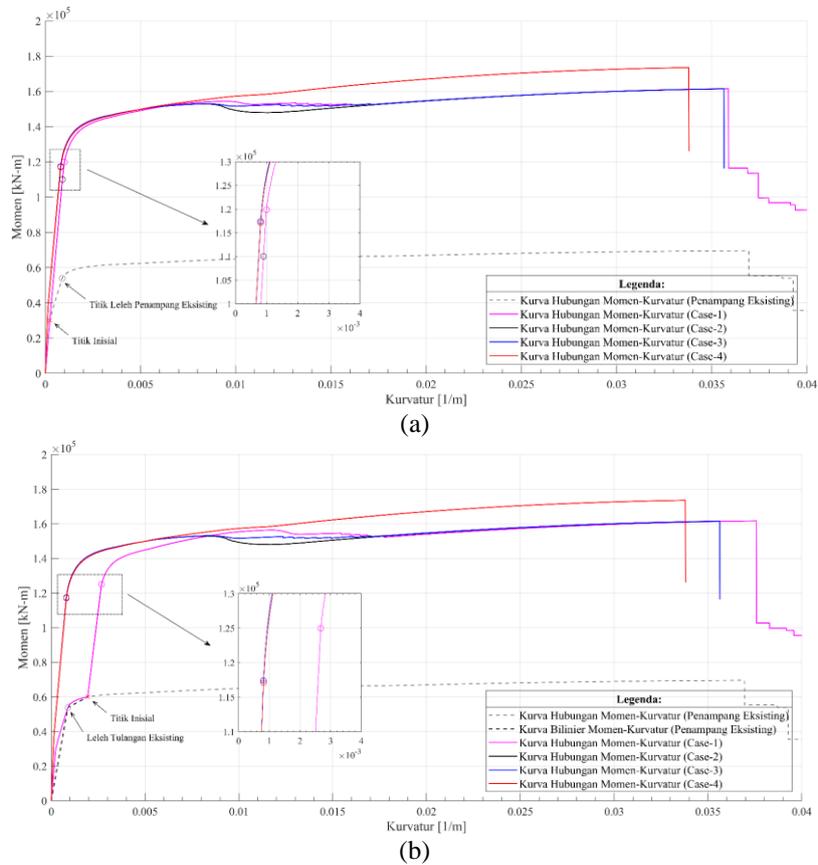
Parameter	Perbandingan Kapasitas Penampang dengan Perkuatan Jacket Beton		
	Penampang Eksisting	$M_i \leq M_{y(pre-jacket)}$	$M_i > M_{y(pre-jacket)}$
ϕ_y (1/m)	0,000889	0,000998	0,002676
M_y (kN-m)	53914,27	119890,32	124966,46
ϕ_u (1/m)	0,036940	0,035870	0,037577
M_u (kN-m)	699607,15	161598,79	161650,75

Profil Regangan

Pada Gambar 12 diilustrasikan profil regangan di beberapa titik pada kurva hubungan momen-kurvatur penampang dengan perkuatan jacket beton memperhitungkan parameter *initial load* dan asumsi *slip* tidak terjadi. Pada titik inisial, dapat dilihat bahwa regangan yang terjadi hanya pada penampang eksisting, sedangkan pada penampang jacket belum terjadi regangan. Setelah aplikasi jacket beton diterapkan, pada setiap penambahan kurvatur ($\Delta\phi$), mulai terjadi regangan pada penampang jacket, diikuti penambahan regangan ($\Delta\epsilon$) pada penampang eksisting.



Gambar 12. Profil regangan penampang dengan perkuatan jaket beton: (a) titik inisial, (b) titik inisial+ $\Delta\phi$, (c) titik leleh tulangan jaket, dan (d) titik ultimit



Gambar 13. Perbandingan kurva hubungan M- ϕ dengan pendekatan monolit: (a) skenario-1, (b) skenario-2

Perbandingan dengan Monolit

Pada penelitian ini akan dibandingkan analisis kurva hubungan momen-kurvatur dengan pendekatan monolit (asumsi *initial load* diabaikan). Hal tersebut dilakukan untuk melihat bagaimana pengaruh *initial load* terhadap kapasitas penampang.

Tabel 8. Perbandingan diskritisasi penampang

Diskrit Penampang	w/Initial Load		Monolithic – No slip	
	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
Core	Confined 2	Confined 1	Confined 1	Confined 1
Ex. Outer Cover	Confined 3	Unconfined	Confined 3	Confined 1
Inner Jacket	Confined 3	Unconfined	Confined 3	Confined 1
Ex. Inner Cover	Unconfined	Unconfined	Unconfined	Unconfined
Jacket Cover	Unconfined	Unconfined	Unconfined	Unconfined

- *Confined 1*: dikekang oleh kekangan eksisting
- *Confined 2*: dikekang oleh kekangan eksisting & jaket
- *Confined 3*: dikekang oleh kekangan jaket

Pada Gambar 13.a dan 13.b terlihat bahwa hasil analisis kurva hubungan momen-kurvatur antara *case-1* dan *case-4* menunjukkan perbedaan kapasitas ultimit sebesar $\pm 7\%$, hal tersebut dikarenakan kekakuan penampang eksisting diasumsikan tetap sesuai dengan perbaikan retak yang dilakukan sebelum aplikasi jaket beton. Pendekatan analisis monolit menggunakan *case-4* tidak direkomendasikan, karena akan mengakibatkan kapasitas penampang menjadi *overestimate*. Kapasitas penampang untuk *case-2* dan *case-3* secara garis besar menunjukkan hasil yang tidak berbeda, hal tersebut dikarenakan perbedaan model material yang dipakai untuk diskritisasi pada bagian *outer cover* dan *inner jacket* hanya memiliki perbedaan tegangan sebesar $\leq 1\%$. Berdasarkan hal tersebut, rekomendasi yang aman dan praktis dalam praktik di lapangan adalah menggunakan *case-2*, dimana material jaket beton dimodelkan sebagai beton tidak terkekang (*unconfined*).

Model Sendi Plastis

Sendi plastis pilar dimodelkan dengan kurva *backbone Moment-Rotation Hinge* (FEMA 1997) yang nilainya dihitung dengan cara melakukan integrasi kurvatur sepanjang sendi plastis (L_p). Hal yang perlu diperhatikan terkait parameter *initial load* adalah definisi titik awal (titik A) untuk kedua kondisi inisial. Jika $M_i \leq M_{y-pre-jacket}$, maka definisi titik A adalah titik nol (*zero loading*), sedangkan jika $M_i > M_{y-pre-jacket}$, maka definisi titik A merupakan titik inisial pada kurva hubungan momen-kurvatur atau dikatakan dilakukan

normalisasi terhadap titik inisial. Hal tersebut disebabkan karena keterbatasan *software* penunjang yang digunakan dalam analisis kinerja struktur jembatan (*pushover/analisis non-linier riwayat waktu*) pada penampang perkuatan dengan jaket beton yang tidak memiliki kemampuan pengaturan aplikasi jaket beton mulai diterapkan (*fitur birth and death time*), selain itu asumsi bahwa penampang dengan perkuatan telah memiliki keseimbangan yang baru dimana penampang eksisting telah melewati batas kurvatur leleh sehingga tidak tepat jika pada model sendi plastis elemen struktur dengan perkuatan jaket beton, *input* yang digunakan pada definisi model sendi plastis dimulai pada saat *zero loading*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari pembahasan di muka, dapat disimpulkan bahwa aplikasi perkuatan jaket beton dapat meningkatkan kapasitas penampang eksisting. Pada contoh studi kasus diperoleh peningkatan kapasitas sebesar lebih dari dua kali lipat. Perkuatan jaket beton pada kondisi kerusakan penampang yang telah mengalami kelelahan tulangan eksistingnya, dapat meningkatkan daktilitas penampang perkuatan sebesar $\pm 1,70\%$. Hal tersebut terjadi karena faktor *shifting* akibat adanya parameter *initial load* yang tulangan logitudinal jaketnya belum mengalami tegangan pada saat interaksi parsial antara inti beton eksisting dan jaket beton dimulai. Perbandingan hasil analisis non-linier penampang yang diperkuat dengan jaket beton yang memperhitungkan parameter *initial load* dengan pendekatan monolit menunjukkan perbedaan kapasitas ultimit sebesar $\pm 7\%$ atau dikatakan bahwa efek *initial load* tidak berpengaruh signifikan pada kapasitas penampang. Definisi model sendi plastis pada penampang dengan perkuatan jaket beton yang memperhitungkan parameter *initial load*, harus mempertimbangkan kondisi penampang eksisting pada saat aplikasi jaket beton. Jika penampang eksisting telah melewati batas kurvatur leleh, maka titik inisial merupakan titik awal dari model sendi plastis penampang, namun jika sebaliknya maka definisi model sendi plastis penampang dimulai pada saat *zero loading*. Efek *interface slip* pada kapasitas penampang dapat diasumsikan untuk diabaikan

karena pada umumnya aplikasi perkuatan dengan jaket beton selalu menggunakan salah satu metode kekasaran permukaan (*interface treatment*) dan penggunaan *shear connector*.

Saran

Rekomendasi yang aman dan praktis untuk aplikasi di lapangan dalam hal permodelan hubungan tegangan-regangan pada material jaket adalah dengan memodelkannya sebagai material beton tidak terkekang (*unconfined*). Untuk mendapatkan efektivitas aplikasi perkuatan jaket beton yang maksimum, disarankan sebelum aplikasi jaket dilakukan, sebaiknya perkuatan sementara seperti *grouting* dan/atau Jaket *FRP* dilakukan pada penampang eksisting yang telah mengalami kerusakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jembatan, Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR dan PT. LAPI ITB atas data dukung yang diberikan sehingga penelitian ini dapat dilakukan. Penghargaan dan ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat yang telah memberikan bantuan beasiswa, sehingga penulis berkesempatan dapat melanjutkan pendidikan di Program Magister Teknik Sipil ITB.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 440.2R-08. 2008. *ACI 440.2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Michigan: American Concrete Institute.
- Caltrans. 2013. *Caltrans Seismic Design Criteria version 1.7*. Sacramento, California: California Department of Transportation.
- Chen, Wai-Fah, and Lian Duan. 2014. "Bridge Engineering in Indonesia." In *Handbook of International Bridge Engineering*, by Wiryanto Dewobroto, Lanny Hidayat and Herry Vaza, 951-1016. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC.
- FEMA. 1997. *FEMA-273: NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Imran, Iswandi, dan Ediansjah Zulkifli. 2014. *Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang*. Bandung: ITB Press.

- LAPI ITB. 2017. *Laporan Analisis Struktur Pemeriksaan Jembatan Cisomang*. Bandung: PT. LAPI ITB.
- Mander, J. B., M. J. N. Priestley, and R. Park. 1988. "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete." *ASCE Journal of Structural Engineering* 114 (8): 1804-1826.
- Octora, Daniel Dixon. 2019. *Analisis Perkuatan Pilar Jembatan dengan Metode Jacketing Memperhitungkan Initial Load dan Interface slip*. Bandung: Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
- Ong, K. C. G, Y. C. Kog, C. H. Yu, and A. P. V. Sreekanth. 2004. "Jacketing of reinforced concrete columns subjected to axial load." *Magazine of Concrete Research* 56 (2): 89-98.
- PEER. 2008. *Guidelines for Nonlinear Analysis of Bridge Structures in California*. California: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Priestley, M. J. N., F. Seible, and G. M. Calvi. 1996. *Seismic Design and Retrofit of Bridges: Priestley/Seismic Design and Retrofit of Bridges*. John Wiley & Sons, Inc.