

ANALISIS KAPASITAS LENTUR PELAT PRACETAK DAN IMPLIKASINYA TERHADAP KINERJA SAMBUNGAN PELAT-BALOK

Sartika Dewi Usman^{1*}, Rudy Djamaluddin², Fakhruddin²

¹Program Doktor Ilmu Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Gowa, Sulawesi Selatan

²Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Gowa, Sulawesi Selatan

*Email: sartikadewi@ung.ac.id

Abstrak

Sambungan memegang peranan penting dalam kinerja struktural sistem beton pracetak, karena sambungan berfungsi mentransfer gaya geser, momen lentur, dan gaya aksial antar elemen struktur. Perilaku sambungan sangat dipengaruhi oleh kekuatan dan kekakuannya. Penelitian ini merupakan studi analitik numerik yang bertujuan untuk menganalisis kapasitas lentur pelat beton pracetak serta mengevaluasi implikasinya terhadap kinerja sambungan pelat balok. Analisis dilakukan untuk memperoleh kapasitas momen nominal dan kapasitas beban layan pelat. Selain itu, kapasitas geser sambungan dianalisis menggunakan tiga pendekatan, yaitu *Japan Society of Civil Engineers* (2017), *American Association of State Highway and Transportation Officials* (2020), dan *fib Model Code 2020*. Hasil analisis menunjukkan bahwa pelat memiliki kapasitas momen rencana sebesar 9,16 kNm dan kapasitas beban hidup sebesar 2,6 kN/m². Nilai tersebut memenuhi hanya memenuhi kebutuhan untuk bangunan rumah tinggal. Kapasitas geser sambungan yang diperoleh sebesar 18,55 kN, 28,47 kN, dan 50,7 kN, seluruhnya lebih besar dari gaya geser ultimit sebesar 9,16 kN, sehingga secara teoritis aman terhadap kegagalan geser global. Namun, keterbatasan kapasitas lentur pelat berpotensi meningkatkan risiko retak awal dan menurunkan kekakuan sistem, sehingga mengurangi efektivitas transfer momen pada sambungan. Hasil ini menegaskan pentingnya desain terintegrasi guna mencapai kinerja struktur yang aman dan optimal.

Kata kunci: kapasitas geser, kapasitas lentur, pelat pracetak, sambungan,

Abstract

Connections play a crucial role in the structural performance of precast concrete systems, as they are responsible for transferring shear forces, bending moments, and axial forces between structural elements. The behavior of these connections is highly influenced by their strength and stiffness. This study presents a numerical analytical investigation aimed at analyzing the flexural capacity of precast concrete slabs and evaluating its implications for the performance of slab beam connections. The analysis was conducted to determine the nominal moment capacity and service load capacity of the slab. In addition, the shear capacity of the connection was evaluated using three design approaches: Japan Society of Civil Engineers (2017), American Association of State Highway and Transportation Officials (2020), and fib Model Code 2020. The results show that the slab has a design moment capacity of 9.16 kNm and a live load capacity of 2.6 kN/m². This capacity is only sufficient to meet the requirements for residential buildings. The connection shear capacities obtained were 18.55 kN, 28.47 kN, and 50.7 kN, all of which exceeded the ultimate shear force of 9.16 kN, indicating theoretical safety against global shear failure. However, the limited flexural capacity of the slab may increase the risk of early cracking and reduce system stiffness, thereby decreasing the effectiveness of moment transfer at the connection. These findings highlight the importance of an integrated design approach to achieve safe and optimal structural performance.

Keywords: interface shear capacity, flexural capacity, precast slab, slab beam connection,

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi modern mengalami transformasi signifikan dalam beberapa dekade terakhir, ditandai dengan meningkatnya penggunaan sistem pracetak sebagai solusi efisiensi, kecepatan, dan kualitas. Beton pracetak (*precast concrete*, PC) telah banyak diadopsi di berbagai belahan dunia, terutama di kawasan perkotaan dengan kebutuhan pembangunan infrastruktur yang padat dan cepat. Keunggulan utama sistem ini terletak pada proses fabrikasi elemen struktur di pabrik dengan kualitas terkontrol, sehingga pemasangan di lapangan menjadi lebih cepat dan konsisten dibandingkan beton konvensional cor di tempat.

Namun demikian, sambungan antar elemen pracetak masih menjadi titik lemah yang sangat menentukan integritas struktural. Dalam sistem monolitik, kontinuitas material beton dan tulangan memungkinkan distribusi beban yang lebih seragam serta deformasi yang lebih daktil. Sebaliknya, pada sistem pracetak,

sambungan sering kali menghadapi konsentrasi tegangan, kerentanan terhadap retak, dan keterbatasan kapasitas daktilitas (Qian dkk., 2020). Perbedaan mendasar ini menjadikan sambungan sebagai fokus utama penelitian ini.

Struktur pracetak melibatkan fabrikasi elemen-elemen struktur seperti balok, kolom, dan pelat di luar lokasi konstruksi, diikuti dengan perakitan di lokasi. Sistem ini menawarkan keuntungan dalam hal kecepatan konstruksi, pengurangan tenaga kerja di lapangan, dan peningkatan kualitas karena produksi yang terkontrol (Karthikeyan et al., 2019)

Distribusi beban adalah aspek krusial dalam desain struktur, terutama pada sistem pracetak di mana transfer beban antar elemen sangat bergantung pada kualitas sambungan. Penelitian telah menunjukkan bahwa distribusi beban pada jembatan prategang pracetak dapat bervariasi dan mungkin tidak selalu sesuai dengan asumsi desain standar. Faktor-faktor seperti panjang bentang, konfigurasi pembebanan, dan kondisi dukungan mempengaruhi faktor distribusi lateral beban pada jembatan pelat berongga (Zhao dkk., 2025). Studi juga mengkaji distribusi beban terkonsentrasi pada lantai komposit kayu-beton, yang dapat memberikan wawasan mengenai perilaku serupa pada lantai pracetak (Monteiro dkk., 2020). Selain itu, perilaku lentur pelat semi-pracetak yang diperkuat dengan batang FRP prategang juga telah dieksplorasi untuk memahami karakteristik beban-defleksi (Madqour dkk., 2021).

Efisiensi sambungan sangat vital dalam menjamin kinerja struktural yang memadai dari sistem pracetak. Sambungan ini bertanggung jawab untuk mentransfer gaya geser, momen, dan aksial antar elemen, yang mana perilaku sambungan sangat tergantung pada kekuatan dan kekakuannya. Perilaku mekanik struktur pracetak mencakup responsnya terhadap berbagai jenis pembebanan, mode kegagalan, dan pengaruh detail desain.

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji perilaku sambungan pada struktur beton pracetak, sebagian besar studi masih berfokus pada pengujian eksperimental atau evaluasi lokal pada elemen sambungan tanpa mengaitkannya secara langsung dengan kapasitas elemen pelat sebagai komponen utama dalam sistem struktur. Padahal, kapasitas lentur pelat memiliki peran penting dalam menentukan efektivitas transfer momen dan perilaku komposit pada sambungan pelat-balok. Namun, kajian yang mengintegrasikan kapasitas elemen pelat dengan kinerja sambungan serta efisiensi desain masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas lentur pelat pracetak serta mengevaluasi implikasinya terhadap kinerja sambungan dalam sistem struktur.

2. KAJIAN PUSTAKA

Struktur beton pracetak semakin banyak digunakan dalam berbagai aplikasi infrastruktur karena keunggulannya dalam efisiensi waktu konstruksi, kontrol kualitas, serta pengurangan biaya. Namun demikian, kinerja struktur pracetak sangat bergantung pada efektivitas sistem sambungan antar elemen, yang sering menjadi titik lemah dalam mentransfer gaya dan menjaga integritas struktur secara keseluruhan. Penelitian Huang dkk., (2014) menyelidiki perilaku slab pracetak terapung pada sistem transit kereta api melalui uji beban statis dan analisis numerik. Hasil menunjukkan bahwa perpindahan slab memenuhi kebutuhan aktual, dengan pola retakan yang terjadi secara sistematis mulai dari keempat sudut, kemudian di tengah slab, dan berakhir dekat pengikat. Peningkatan lebar retakan berlangsung lambat di awal, namun meningkat signifikan saat beban mencapai 10 kali beban gandar standar, yang memengaruhi sifat beton. Namun, penelitian ini terbatas pada slab pendek dengan beban statis, sehingga perlu dilanjutkan dengan uji beban dinamis dan evaluasi sambungan antar slab untuk representasi kondisi sebenarnya.

Menjawab kebutuhan tersebut, Crabtree dkk.,(2021) melakukan pengujian beban hidup pada jembatan slab pracetak datar untuk mengevaluasi distribusi beban transversal dan efisiensi sambungan longitudinal. Hasil menunjukkan bahwa sambungan geser tidak efektif dalam mentransfer beban antar slab yang berdekatan, sehingga setiap slab cenderung berfungsi secara independen. Faktor distribusi momen eksperimental yang diperoleh adalah 0,51, lebih rendah dari rekomendasi minimum 0,55 untuk perhitungan momen, menunjukkan potensi kurangnya kinerja sambungan dalam distribusi beban.

Dengan mengaitkan kedua hasil ini, terlihat bahwa uji beban statis dan analisis retakan dari Huang dkk. memberikan dasar penting tentang perilaku mekanis slab pendek, sementara temuan Crabtree dkk. melengkapi dengan perspektif distribusi beban dan efisiensi sambungan pada kondisi beban hidup dan dinamis. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan uji beban dinamis serta evaluasi sambungan antar slab guna memastikan keamanan struktural dan optimalisasi fungsi slab pracetak dalam aplikasi nyata, terutama dalam sistem transportasi dan jembatan. Kombinasi kedua studi ini memberikan gambaran komprehensif tentang kebutuhan pengujian dan pengembangan slab pracetak yang lebih aman dan efektif.

Dari dua penelitian sebelumnya, perlu untuk memperhitungkan komponen struktur lainnya seperti dalam penelitian Vidjeapriya & Jaya, (2013). Investigasi eksperimental dilakukan pada dua jenis sambungan balok-kolom beton mekanis sederhana yang dikenai pembebanan siklik balik. Hasilnya dibandingkan dengan kinerja sambungan balok-kolom monolitik referensi. Kapasitas menahan beban spesimen PC-DS (dengan pengaku ganda) lebih tinggi daripada spesimen PC-SS (dengan pengaku tunggal). Disipasi energi kumulatif spesimen monolitik secara signifikan lebih tinggi daripada spesimen pracetak.

Namun, kedua spesimen pracetak menunjukkan disipasi energi yang memuaskan dibandingkan dengan spesimen monolitik. Faktor daktilitas perpindahan spesimen monolitik lebih tinggi daripada spesimen pracetak. Spesimen PC-DS menunjukkan kehilangan kekakuan awal yang lebih besar dibandingkan spesimen ML dan PC-SS. *Pinching* yang lebih besar diamati pada spesimen pracetak. Hal ini disebabkan oleh lokasi retak yang telah ditentukan sebelumnya pada daerah sambungan. Dibandingkan kedua spesimen pracetak, spesimen PC-DS menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik daripada spesimen PC-SS. Spesimen pracetak PC-DS juga menunjukkan perilaku yang memuaskan dibandingkan dengan spesimen monolitik ML. Sambungan PC-DS yang diusulkan adalah sambungan kering sederhana yang dapat digunakan untuk konstruksi rangka penahan momen bertingkat rendah.

Peningkatan performa struktur pracetak melalui optimasi elemen sambungan dan prestressing dikembangkan oleh Qian dkk., (2020). Hasilnya menunjukkan bahwa, sebagai tipe konstruksi PC inovatif, rangka PTPC memiliki performa sangat baik dalam mengurangi keruntuhan progresif. Rangka PTPC mampu mengembangkan kapasitas deformasi besar yang diinginkan serta kapasitas beban akhir pada tahap deformasi besar.

Tegangan prategang yang lebih tinggi efektif dapat meningkatkan beban puncak pertama rangka karena meningkatkan tegangan prakompresif pada beton. Namun, tegangan prategang efektif yang lebih tinggi juga dapat menyebabkan patah tendon lebih dini serta mengurangi kapasitas deformasi dan beban akhirnya. Oleh karena itu, untuk rangka PTPC, untuk menghindari risiko keruntuhan progresif disarankan mendesain tegangan prategang efektif kurang dari 0,65 fpu.

Di sisi lain, Kang dkk., (2022). memfokuskan pada peningkatan kapasitas geser dan performa daktilitas pelat prategang, menemukan bahwa pengaturan jumlah dan distribusi tendon prategang secara signifikan mempengaruhi kekuatan geser dan ketahanan retak. Penelitian ini menemukan kekuatan geser meningkat signifikan, PT slabs (TS1–TS3) menunjukkan peningkatan 53–87% dibanding kontrol (S1). TS1 (20 tendon, layout terkonsentrasi) lebih efektif daripada TS2 (20 tendon, layout terdistribusi). TS3 (40 tendon) menghasilkan peningkatan tertinggi (87%) namun peningkatannya tidak linear karena distribusi gaya prategang tidak merata. Untuk retakan & deformasi pelat PT memiliki lebih sedikit retakan lebar di dekat kolom dibanding kontrol, displacement ultimit meningkat, artinya daktilitas lebih baik.

Melalui pendekatan eksperimental dan analisis numerik berbasis elemen hingga, (Nguyen dkk., 2023) berhasil menunjukkan kesesuaian antara hasil uji dan simulasi, serta mengusulkan persamaan empiris baru untuk memprediksi kapasitas lentur sambungan loop vertikal. Temuan ini memberikan kontribusi penting dalam memahami mekanisme transfer gaya dan pola keruntuhan pada sambungan berbasis mortar, khususnya pada kondisi panjang penyaluran yang terbatas

Dari beberapa penelitian di atas, diperlukan pengembangan inovasi pada struktur pracetak beton, khususnya sambungan pelat pracetak dan balok, serta pengujian lanjutan, mengingat keterbatasan pada penelitian sebelumnya.

Kapasitas geser balok pada daerah sambungan menjadi faktor kunci dalam menjamin kinerja struktur pracetak. Menurut Park Robert dan Paulay Thomas, kegagalan geser harus dihindari dengan memastikan bahwa kapasitas geser elemen lebih besar dari kapasitas lenturnya. Selain itu, fib Model Code 2020 menekankan bahwa pada sistem pracetak, diskontinuitas pada sambungan dapat menyebabkan konsentrasi tegangan geser yang lebih tinggi dibandingkan sistem monolitik.

Perhitungan kapasitas geser pada elemen beton bertulang telah mengalami perkembangan signifikan dari pendekatan empiris menuju pendekatan berbasis mekanika (*mechanics-based models*). Beberapa standar internasional seperti JSCE, AASHTO LRFD, dan fib Model Code 2020 mengadopsi pendekatan yang berbeda, namun memiliki dasar konseptual yang serupa dalam memodelkan mekanisme geser.

Secara umum, kapasitas geser nominal dinyatakan sebagai kontribusi beton dan tulangan geser, dengan mempertimbangkan interaksi antara gaya geser, momen, dan deformasi elemen. Berbeda dengan JSCE, spesifikasi AASHTO LRFD mengadopsi pendekatan berbasis *Modified Compression Field Theory* (MCFT) dalam menghitung kapasitas geser. fib Model Code 2020 memperkenalkan pendekatan yang lebih maju berbasis mekanika, yang merupakan pengembangan dari teori medan tekan (*compression field theory*) dan

model retak geser. Model ini mengintegrasikan pendekatan fisik terhadap perilaku beton retak dengan konsep *level of approximation* (LoA), yang memungkinkan penggunaan model dengan tingkat kompleksitas berbeda sesuai kebutuhan desain.

Untuk kapasitas geser antarmuka JSCE (2017) menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_{cwd} = (\tau_c + p \tau_s \sin^2 \theta - \alpha p f_y \sin \theta \cos \theta) A_c \quad (1)$$

Dimana :

$$\tau_c = \mu f' c^b (\alpha p f_y - \sigma_n)^{1-b} \quad (2)$$

$$\tau_s = \frac{0,08 f_y}{\alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = 0,75 \{1 - 10(p - 1,7 \sigma_n / f_y)\} \quad (4)$$

Untuk kapasitas geser antarmuka AASHTO (2020) menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$V_{ni} = c A_c + \mu (A_{vf} f_y + P_c) \quad (5)$$

Untuk kapasitas geser antarmuka fib Model Code 2020 menggunakan persamaan :

$$\tau_u = \tau_c + \mu (\sigma_n + K_1 \rho f_y) + K_2 \rho \sqrt{f_{c,cube} f_y} \quad (6)$$

Dengan :

V = kapasitas sambungan geser

P atau ρ = rasio kekuatan

θ = sudut antara interface dan tulangan ($\theta = 90^\circ$ dalam penelitian ini)

f_y = kekuatan leleh tulangan

A_c = luas permukaan

μ = koefisien gesek

$f' c$ = kekuatan beton

b = koefisien yang mewakili pengaruh kekasaran permukaan ($b=0,5$)

σ_n = tegangan tekan rata-rata

c = factor kohesi

A_{vf} = luas tulangan pada interface

P_c = gaya tekan

τ_c = tegangan interlocking

$K1$ = faktor Interaksi

$K2$ = faktor reduksi untuk aksi dowel

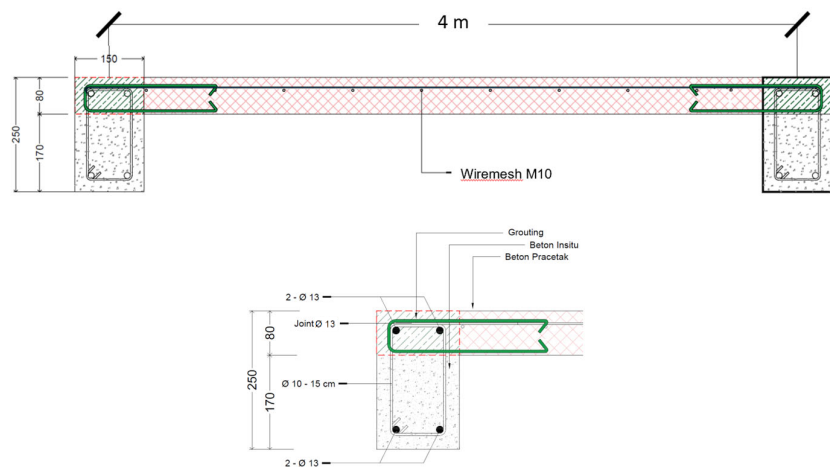
Tabel 1. Nilai Konstanta dalam AASHTO dan fib MC2020

Pedoman	Kekasaran Permukaan	τ_c (MPa)	μ	c (MPa)	K1	K2
AASHTO	Halus	-	0,6	0,17	-	-
	Kasar	-	0,1	1,93	-	-
fib MC2010	Halus	0,5-1,5	0,5-0,7	-	0,5	1,1
	Kasar	1,5-2,5	0,7-1,0	-	0,5	0,9

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis berbasis studi literatur dan perhitungan teoritis untuk mengevaluasi kinerja sambungan pada sistem pelat pracetak balok beton. Tahapan penelitian diawali dengan kajian literatur terhadap berbagai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan perilaku struktur beton pracetak, khususnya pada aspek kapasitas lentur, distribusi beban, dan efisiensi sambungan, sebagai dasar dalam memahami mekanisme perilaku struktur dan mengidentifikasi kesenjangan penelitian.

Selanjutnya, dilakukan penentuan parameter desain pelat yang dianalisis, meliputi tebal pelat sebesar 80 mm, mutu beton sebesar 35 MPa, serta tulangan menggunakan wiremesh M10. Bentang pelat diasumsikan sepanjang 4 m untuk merepresentasikan kondisi umum struktur lantai. Tulangan Loopbar yang digunakan pada sambungan pelat pracetak ke balok adalah D13. Berdasarkan parameter tersebut, dilakukan analisis kapasitas lentur pelat menggunakan pendekatan blok tekan ekuivalen sesuai dengan ketentuan standar desain beton bertulang yakni SNI 2847:2019. Kapasitas momen nominal yang diperoleh kemudian dikalikan dengan faktor reduksi kekuatan untuk mendapatkan kapasitas momen rencana.



Gambar 1. Detail sambungan pelat pracetak dan balok

Kapasitas momen tersebut selanjutnya dikonversi menjadi kapasitas beban merata untuk mengevaluasi kemampuan pelat dalam memikul beban layan. Hasilnya dibandingkan dengan persyaratan beban hidup berdasarkan SNI 1727:2020 untuk berbagai fungsi bangunan, seperti rumah tinggal, kantor, dan sekolah. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai tingkat keamanan struktur serta rasio utilisasi yang terjadi.

Selain itu, dilakukan analisis terhadap implikasi kapasitas pelat terhadap kinerja sambungan pracetak, khususnya dalam aspek transfer momen, kekakuan sistem, dan potensi terjadinya perilaku non-komposit. Untuk meningkatkan kinerja struktur, dilakukan evaluasi terhadap beberapa alternatif desain dengan variasi rasio tulangan, baik melalui perubahan diameter maupun jarak tulangan. Setiap variasi dianalisis untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan kapasitas lentur dan kinerja sambungan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Kapasitas Lentur Pelat

Dalam sistem struktur beton pracetak, kapasitas lentur pelat tidak hanya berfungsi sebagai parameter kekuatan elemen, tetapi juga berperan penting dalam menentukan efektivitas transfer momen pada sambungan pelat-balok. Berdasarkan data desain pelat, dilakukan analisis kapasitas momen nominal untuk mengevaluasi kemampuan pelat dalam memikul beban layan.

Pelat yang dianalisis memiliki tebal 80 mm, mutu beton ($f_c = 35$) MPa, serta tulangan $\varnothing 10$ mm dengan jarak 150 mm. Dari konfigurasi tersebut diperoleh tinggi efektif pelat sekitar ($d = 50$) mm dan luas tulangan tarik sebesar $A_s = 549,5 \text{ mm}^2$

Berdasarkan pendekatan blok tekan ekuivalen, diperoleh kapasitas momen nominal pelat:

$$M_n = 10,178 \text{ kN.m}$$

Dengan faktor reduksi kekuatan ($\phi = 0.9$), maka kapasitas momen rencana adalah:

$$\phi M_n = 0,9 \times 10,178 = 9,16 \text{ kN.m}$$

Korelasi dengan Beban Hidup (Load Capacity)

Untuk pelat satu arah dengan tumpuan sederhana, hubungan antara beban merata dan momen maksimum mengikuti:

$$M_u = \frac{w_u L^2}{8}$$

Dengan asumsi bentang pelat ($L = 4$) m, maka beban merata maksimum yang dapat dipikul:

$$w_u = \frac{8\phi M_n}{L^2} = \frac{8 \times 9,16}{4^2} = 4,58 \text{ kN/m}^2$$

Sehingga kapasitas beban total pelat adalah sekitar:

$$w_{total} = 4,6 \text{ kN/m}^2$$

Jika dikurangi beban mati (*self weight* pelat = $2,0 \text{ kN/m}^2$), maka kapasitas beban hidup menjadi:
= $2,6 \text{ kN/m}^2$

Interpretasi terhadap Fungsi Bangunan

Dalam analisis struktur bangunan, interpretasi fungsi bangunan memainkan peran penting untuk memastikan keselamatan dan kinerja yang optimal sesuai ketentuan standar nasional. Berikut disajikan interpretasi fungsi bangunan berdasarkan perbandingan hasil perhitungan pembebanan dengan persyaratan pada SNI 1727 : 2020

Tabel 1. Evaluasi Kapasitas Pelat terhadap Kebutuhan Beban (SNI 1727 : 2020)

Fungsi Bangunan	Beban Hidup Standar (kN/m ²)	Kapasitas Pelat (kN/m ²)	Rasio Utilitas (LL/Capacity)	Evaluasi
Rumah tinggal	2,0	2,6	0,77	Aman
Sekolah / ruang kelas	2,5	2,6	0,96	Mendekati batas
Kantor	3,0	2,6	1,15	Tidak memenuhi

Hasil ini menunjukkan bahwa pelat cukup aman untuk rumah tinggal tetapi untuk kantor dan sekolah karena kapasitas sudah mendekati batas.

4.2 Implikasi terhadap Kinerja Sambungan Pracetak

Tahapan ini membahas implikasi dari kapasitas yang telah dianalisis terhadap kinerja sambungan pada sistem pelat pracetak balok beton. Evaluasi ini menjadi penting untuk mengetahui sejauh mana kapasitas yang tersedia mampu menjamin perilaku struktur yang aman, terutama dalam menahan beban kerja maupun beban ultimit. Untuk menghitung kapasitas geser menggunakan tiga buah persamaan yaitu persamaan JSCE, AASHTO, dan fib Model Code 2020.

Diketahui :

$$D_{loopbar} = 13 \text{ mm}$$

$$b_{balok} = 150 \text{ mm}$$

$$h_{balok} = 80 \text{ mm}$$

$$f'_c = 35 \text{ MPa}$$

$$b = 0,5$$

$$\sigma_n = 0 \text{ N/mm}$$

$$f_y = 400 \text{ MPa}$$

$$\theta = 90^0$$

$$A_{vf} = A_s = 132,665 \text{ mm}^2$$

$$P_c = 0 \text{ N}$$

$$A_c = b \times h = 150 \times 80 = 12.000 \text{ mm}^2$$

$$P = \rho = A_s/A_c = 132,665/12.000 = 0,011$$

$$\alpha = 0,75 \left\{ 1 - 10 \left(0,011 - 1,7 \frac{0}{400} \right) \right\} = 0,667$$

$$\tau_c = 0,1 \times 35^{0,5} (0,67 \times 0,011 \times 400 - 0)^{1-0,5} = 1,018 \text{ MPa}$$

$$\tau_s = 0,08 \frac{400}{0,667} = 47,76 \text{ MPa}$$

Kapasitas geser antar muka JSCE:

$$\begin{aligned} V_{cwd} &= (\tau_c + p \tau_s \sin^2 \theta - \alpha p f_y \sin \theta \cos \theta) A_c \\ &= (1,018 + 0,011 \times 47,76 \sin^2 90 - 0,67 \times 0,011 \times 400 \times \sin 90 \times \cos 90) \times 12.000 \\ &= 18.552 \text{ N} = 18,55 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas geser antar muka AASHTO :

$$\begin{aligned} V_{ni} &= c A_c + \mu (A_{vf} f_y + P_c) \\ &= 1,93 \times 12.000 + 0,1 (132,665 \times 400 + 0) \\ &= 28.467 \text{ N} = 28,47 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kapasitas geser antar muka fib Model Code 2020 :

$$\begin{aligned} \tau_u &= \tau_c + \mu (\sigma_n + K_1 \rho f_y) + K_2 \rho \sqrt{f_c \text{ cube } f_y} \\ &= 1,5 + 0,7 (0 + 0,5 \times 0,011 \times 400) + 0,9 \times 0,011 \sqrt{35 \times 400} \\ &= 4,23 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$= 4,23 \text{ MPa} \times 12.000 \text{ mm}^2 = 50.708,4 \text{ N} = 50,7 \text{ kN}$$

Perhitungan kapasitas geser dari ketiga metode menghasilkan nilai yang berbeda, dimana metode JSCE menggunakan pendekatan semi empiris yang mempertimbangkan kontribusi kohesi beton, gesekan, serta pengaruh tulangan melalui sudut retak (θ). Nilai yang dihasilkan cenderung moderat karena pendekatan ini lebih konservatif dan tidak secara eksplisit mempertimbangkan kondisi regangan.

Sebaliknya, metode AASHTO menghasilkan kapasitas yang lebih besar karena memasukkan kontribusi tambahan dari gaya normal dan tulangan geser melalui parameter friksi (μ). Pendekatan ini secara tidak langsung mengakomodasi efek penguncian mekanis (*mechanical interlock*), sehingga memberikan estimasi kapasitas yang lebih tinggi.

Sementara itu, fib Model Code 2020 menggunakan pendekatan berbasis mekanika yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan kontribusi kohesi beton, tegangan normal, rasio tulangan, interaksi material beton dan baja. Pendekatan ini mampu menangkap perilaku geser secara lebih realistis, terutama pada kondisi retak dan deformasi tinggi.

Nilai kapasitas geser ultimate dari sambungan berdasarkan nilai beban merata maksimum $w_u = 4,58 \text{ kN/m}^2$ yaitu :

$$V_u = \frac{w_u \cdot L}{2} = 9,16 \text{ kN}$$

Jika dibandingkan antara kapasitas dan gaya geser ultimit, diperoleh rasio keamanan sebagai berikut:

Tabel 2. Perbandingan kapasitas geser dan gaya geser ultimit

Metode	Kapasitas Geser (kN)	V_u (kN)	Rasio (V_n/V_u)	Evaluasi
JSCE	18,55	9,16	2,03	Aman
AASHTO	28,47	9,16	3,11	Sangat aman
fib MC 2020	50,7	9,16	5,53	Sangat aman

Berdasarkan hasil perbandingan antara kapasitas geser nominal dan gaya geser ultimit, seluruh metode (JSCE, AASHTO, dan fib Model Code 2020) menunjukkan bahwa nilai kapasitas geser lebih besar dibandingkan gaya geser yang bekerja ($V_u = 9,16 \text{ kN}$). Hal ini mengindikasikan bahwa secara teoritis sambungan berada dalam kondisi aman terhadap kegagalan geser global (*shear failure*).

Namun demikian, dalam konteks struktur beton pracetak, kondisi aman terhadap kapasitas nominal tidak serta-merta menjamin bahwa kegagalan tidak akan terjadi. Hal ini disebabkan oleh adanya potensi mode kegagalan lain yang lebih dominan, yaitu kegagalan slip pada bidang kontak (*interface slip failure*).

Kegagalan geser global terjadi apabila gaya geser ultimit melampaui kapasitas geser elemen, yang biasanya ditandai dengan retak diagonal pada balok, keruntuhan tiba-tiba (*brittle failure*), dan kehilangan kapasitas secara instan. Berdasarkan hasil analisis rasio V_n/V_u berada pada kisaran 2,0 – 5,53, hal ini menunjukkan bahwa kegagalan geser global tidak menjadi mode kegagalan yang dominan. Dengan demikian, dari sisi kapasitas struktur, balok dan sambungan memiliki cadangan kekuatan yang cukup terhadap kegagalan geser.

Meskipun aman terhadap shear failure, sambungan pelat–balok pracetak memiliki potensi kegagalan lain yang lebih kritis, yaitu slip pada bidang kontak antar elemen. Mode kegagalan ini terjadi akibat ketidaksempurnaan ikatan antara pelat dan balok, rendahnya kohesi beton pada interface, keterbatasan mekanisme pengunci (*shear key / roughness*) dan deformasi relatif antar elemen

Slip failure ditandai dengan pergeseran relatif antara pelat dan balok, terbentuknya retak sejajar bidang sambungan, dan penurunan kekakuan sistem secara bertahap. Fenomena ini sering terjadi pada struktur pracetak karena tidak adanya kontinuitas monolitik, sehingga transfer gaya sangat bergantung pada kualitas sambungan.

Selain itu, hubungan antara kapasitas dan kinerja sambungan juga memberikan gambaran mengenai efektivitas desain yang digunakan serta potensi perbaikan yang dapat dilakukan. Untuk memperjelas keterkaitan tersebut, disajikan rangkuman implikasi kapasitas terhadap kinerja sambungan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 3. Implikasi Kapasitas terhadap kinerja Sambungan

Parameter	Interpretasi
Kapasitas pelat rendah	Retak awal terjadi lebih epat
Rasio utilisasi tinggi (>0,9)	Risiko <i>overloading</i> meningkat
Tidak memenuhi beban sekolah	Perlu redesign (tebal/tulangan)
Dampak ke sambungan	Transfer momen tidak optimal
Perilaku sistem	Cenderung tidak komposit

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 3, kapasitas beban hidup pelat sebesar $2,6 \text{ kN/m}^2$ menunjukkan bahwa pelat masih memenuhi persyaratan untuk bangunan rumah tinggal, namun berada pada kondisi batas untuk bangunan kantor dan tidak memenuhi untuk bangunan sekolah. Rasio utilisasi yang mendekati satu (0,96) pada bangunan kantor mengindikasikan bahwa pelat bekerja hampir pada kapasitas maksimumnya, sehingga memiliki margin keamanan yang terbatas.

Kondisi ini berimplikasi langsung terhadap kinerja sambungan pada sistem pracetak. Pelat yang bekerja mendekati kapasitasnya cenderung mengalami retak lebih awal, yang dapat mengurangi kekakuan sistem dan menurunkan efektivitas transfer momen pada sambungan pelat-balok. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa keterbatasan kapasitas pelat dapat menyebabkan perilaku non-komposit pada sistem pracetak. Hal ini menyebabkan penurunan kekakuan system, distribusi momen menjadi tidak merata, dan konsentrasi tegangan pada sambungan

Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian (Crabtree dkk., 2021) yang menunjukkan bahwa slab pracetak cenderung bekerja secara independen akibat rendahnya efisiensi sambungan dalam mentransfer momen. Penelitian (Zhao dkk., 2025) menunjukkan bahwa kapasitas lentur pelat sangat dipengaruhi oleh detail sambungan, khususnya pada sistem headed bar, di mana interaksi antara pelat dan sambungan menentukan distribusi gaya internal.

Selain itu, studi oleh (Park & Paulay, 1975) serta (Nilson dkk., 2010) menegaskan bahwa kapasitas lentur merupakan parameter utama dalam menentukan daktilitas dan pola keruntuhan elemen beton bertulang. Dalam konteks pracetak, keterbatasan kapasitas ini menjadi lebih kritis karena adanya diskontinuitas pada sambungan. Penelitian oleh (Wang dkk., 2022) dan (Qian dkk., 2020) juga menunjukkan bahwa degradasi pelat secara langsung menyebabkan penurunan kapasitas sambungan, terutama dalam hal disipasi energi dan kekakuan struktur. Secara teoritis, kapasitas lentur pelat beton bertulang dapat dianalisis menggunakan pendekatan blok tekan ekuivalen sebagaimana direkomendasikan dalam standar desain seperti SNI 2847 : 2019.

Dalam konteks struktur pracetak diskontinuitas pada sambungan dapat mengurangi efektivitas transfer momen, sehingga kapasitas lentur elemen individu (seperti pelat) menjadi lebih dominan dalam menentukan respons global struktur. Hal ini juga diperkuat oleh penelitian terbaru oleh (Kang dkk., 2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas lentur melalui pretegang dapat secara signifikan meningkatkan kinerja sambungan, baik dari segi kekuatan maupun daktilitas.

Berdasarkan hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa pelat pelat pracetak tidak mengalami kegagalan lentur maupun kegagalan geser, karena seluruh nilai kapasitas yang diperoleh masih lebih besar dibandingkan beban yang bekerja. Hal ini menunjukkan bahwa desain pelat dan sambungan berada dalam kondisi aman secara struktural.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas lentur pelat pracetak sangat menentukan kinerja struktural secara keseluruhan, khususnya dalam efektivitas transfer momen pada sambungan pelat balok. Pelat dengan kapasitas rendah cenderung mengalami retak lebih awal yang berdampak pada penurunan kekakuan sistem.
2. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa kapasitas beban hidup pelat sebesar $2,6 \text{ kN/m}^2$ hanya memenuhi untuk bangunan rumah tinggal, namun berada pada kondisi batas untuk bangunan kantor dan tidak memenuhi untuk bangunan sekolah. Hal ini menunjukkan bahwa desain awal belum optimal untuk fungsi bangunan dengan beban sedang hingga tinggi.

3. Sambungan aman terhadap kegagalan geser global dimana hasil perbandingan menunjukkan rasio V_n/V_u sebesar 2,0 - 5,53 untuk seluruh metode (JSCE, AASHTO, dan fib MC), yang mengindikasikan bahwa sambungan memiliki cadangan kekuatan yang cukup terhadap shear failure.
4. Mode kegagalan dominan bergeser ke slip (*interface failure*). Meskipun aman secara geser, keterbatasan kapasitas pelat menyebabkan retak awal dan deformasi, yang meningkatkan potensi slip pada bidang sambungan. Hal ini menunjukkan bahwa kegagalan struktur pracetak lebih dikontrol oleh mekanisme interface dibandingkan kapasitas geser nominal.
5. Berdasarkan hasil analisis, bahwa pelat pracetak tidak mengalami kegagalan lentur maupun kegagalan geser pada sambungan, karena seluruh nilai kapasitas yang diperoleh masih lebih besar dibandingkan beban yang bekerja. Hal ini menunjukkan bahwa desain pelat dan sambungan berada dalam kondisi aman secara struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2020). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.)*. American Association of State Highway and Transportation Officials. <https://store.transportation.org/Page/PDFDownloadUserGuide>
- Crabtree, B., Ross, B. E., Cousins, T. E., & Ziehl, P. (2021). Live-Load Testing of Flat Precast Slab Bridge to Determine Joint Efficiency and Distribution Factors for Moment. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(1), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0001543](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001543)
- Fédération internationale du béton (fib). (2020). *Fib Model Code for Concrete Structures 2020*. <https://shop.fib-international.org/publications/model-codes/model-code-2020/>
- Huang, Z., Chen, G., Lian, S., & Chen, X. (2014). Static Mechanical Strength Characteristics and Concrete Cracks Situation of the Precast Floating Slab. *CICTP 2014*, 1753–1758. <https://doi.org/10.1061/9780784413623.169>
- JSCE Standard Specifications for Concrete Structures-2017: Design. (2017). <https://www.jsce-int.org/node/882>
- Kang, S.-M., Na, S.-J., Hwang, H.-J., & Kang, T. H.-K. (2022). Punching Shear Strength of Post-Tensioned Transfer Slab-Column Connections. *Journal of Structural Engineering*, 148(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003383](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003383)
- Karthikeyan, K., Helen Santhi, M., & Chidambaram, C. R. (2019). Behaviour of horizontal connections in precast walls under lateral loading. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(3), 436–440. <https://doi.org/10.35940/ijrte.C4217.098319>
- Madqour, M., Fawzy, K., & Hassan, H. (2021). Experimental and analytical investigations of reinforced concrete beams strengthened by different CFRP sheet schemes. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 15(56), 123–136. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.56.10>
- Monteiro, S., Dias, A., & Lopes, S. (2020). Distribution of Concentrated Loads in Timber-Concrete Composite Floors: Simplified Approach. *Buildings*, 10(2), 32. <https://doi.org/10.3390/buildings10020032>
- Nguyen, Q., Maki, T., Mutsuyoshi, H., & Ishihara, Y. (2023). *Flexural Behavior of Precast Concrete Slab Connections using Loop Steel Bars and Mortar*. 21(June), 436–449. <https://doi.org/10.3151/jact.21.436>
- Nilson, A. H., Dolan, C. W., & Darwin, D. (2010). *Design of Concrete Structures*. McGraw-Hill Education.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). “Reinforced Concrete Structures” by R. Park and T. Paulay, 769 pp., illus. In *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* (Vol. 8). <https://doi.org/10.5459/bnzsee.8.4.291>
- Qian, K., Liang, S.-L., Feng, D.-C., Fu, F., & Wu, G. (2020). Experimental and Numerical Investigation on Progressive Collapse Resistance of Post-Tensioned Precast Concrete Beam-Column Subassemblages. *Journal of Structural Engineering*, 146(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002714](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002714)
- SNI 1727 : 2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur lain. <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12927-sni17272020>
- SNI 2847 : 2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung (2019). <https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/12731-sni28472019>
- Vidjeapriya, R., & Jaya, K. P. (2013). Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(4), 402–414. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000324](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000324)
- Wang, H., Barbagallo, F., Marino, E. M., & Pan, P. (2022). Optimal design of the connection between RC slab and precast pre-stressed beam to column joint. *Engineering Structures*, 270(August).

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114893>

Zhao, Q., Wang, L., Yuan, L., Zhao, W., Watanabe, T., Kawaguchi, T., & Takeda, H. (2025). Experimental Study and Multiscale Finite-Element Analysis on the Flexural Behavior of Precast Bridge Slabs with Headed Bar Joints. *Journal of Bridge Engineering*, 30(5), 1–17. <https://doi.org/10.1061/jbenf2.beeng-7107>