Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X **(Printed)**
6 (1) 2026, Page: 4882-4894

Peran Sambungan Dalam Mekanisme Transfer Beban Sistem Panel Beton Pracetak Pada Bangunan

Putu Didik Sulistiana[1*], Putu Ayu Priska Dewi[2]
[1]Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas Warmadewa
[2]Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
*Corresponding Author: didik.sulistiana@warmadewa.ac.id

Published: Januari, 2026

ABSTRAK

Perkembangan konstruksi panel beton pracetak menunjukkan potensi signifikan dalam meningkatkan efisiensi waktu, mutu, dan keberlanjutan pembangunan. Namun, kinerja struktural sistem ini sangat dipengaruhi oleh perilaku panel dan terutama oleh sistem sambungan yang menghubungkan antar panel menjadi satu kesatuan bangunan. Penelitian ini mengkaji perilaku struktural panel beton pracetak dan mengevaluasi kinerja berbagai tipe sambungan berdasarkan hasil kajian eksperimental dan numerik. Metode yang digunakan berupa analisis konseptual terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu yang mengkaji respons panel dan sambungan beton pracetak terhadap beban lateral dan seismik. Pembahasan difokuskan pada karakteristik perilaku panel, klasifikasi sambungan, serta perbandingan kinerja sambungan berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan pemodelan numerik. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem sambungan berperan dominan dalam menentukan kapasitas, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi struktur. Sambungan berbasis gesekan dengan mekanisme disipasi energi menunjukkan kinerja unggul dalam mereduksi respons seismik, sedangkan sambungan basah cenderung mendekati perilaku monolit.

***Kata kunci**: panel beton pracetak; sambungan struktural; perilaku seismik;*

ABSTRACT

The development of precast concrete panel construction demonstrates significant potential for improving construction time efficiency, quality, and sustainability. However, the structural performance of such systems is strongly influenced by the behavior of the panels and, more critically, by the connection systems that integrate individual panels into a unified structural system. This study investigates the structural behavior of precast concrete panels and evaluates the performance of various connection types based on findings from experimental and numerical studies. The adopted methodology consists of a conceptual analysis of previous research addressing the response of precast concrete panels and connections under lateral and seismic loading. The discussion focuses on panel behavior characteristics, connection classification, and comparative performance assessment of different connection systems based on laboratory test results and numerical modeling. The findings indicate that connection systems play a dominant role in governing structural capacity, ductility, and energy dissipation capability. Friction-based connections incorporating energy dissipation mechanisms exhibit superior performance in reducing seismic response, whereas wet connections tend to approach monolithic behavior.

***Keywords**: precast concrete panels; structural connections; seismic behavior;*

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Atibution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi pracetak dan modular telah menjadi salah satu strategi utama dalam menjawab tuntutan efisiensi, kualitas, dan keberlanjutan pada industri konstruksi modern. Metode konstruksi pracetak dan konstruksi di luar lokasi (*off-site construction*) terbukti mampu mempercepat waktu pelaksanaan, meningkatkan kendali mutu, serta mengurangi limbah dan emisi karbon secara signifikan dibandingkan metode konvensional (*cast-in-situ*) (Sah et al., 2024; Lakshmidevi et al., 2025). Dalam konteks tersebut, panel beton pracetak baik sebagai komponen struktural maupun

fasad bangunan memegang peranan penting karena kemampuannya menggabungkan kinerja struktural, ketahanan terhadap kebakaran, dan efisiensi termal.

Secara historis, panel beton pracetak telah digunakan sebagai dinding geser pada bangunan bertingkat rendah hingga menengah, khususnya di wilayah Eropa Timur dan Asia, dengan mekanisme tahanan lateral yang didominasi oleh perilaku geser panel (Todut et al., 2014). Studi eksperimental menunjukkan bahwa panel dinding beton pracetak bertulang konvensional cenderung mengalami kegagalan geser yang dipengaruhi oleh rasio aspek, tingkat tulangan, dan keberadaan bukaan dinding, di mana bukaan berukuran besar secara signifikan menurunkan kekakuan dan kapasitas lateral meskipun meningkatkan kapasitas deformasi (Todut et al., 2014). Temuan ini mengindikasikan bahwa kinerja sistem panel tidak hanya ditentukan oleh kekuatan material panel, tetapi juga oleh cara panel tersebut berinteraksi dan terhubung dengan elemen struktural lainnya.

Seiring berkembangnya sistem konstruksi pracetak, fokus penelitian bergeser dari perilaku panel tunggal menuju mekanisme transfer beban melalui sambungan. Sambungan antar panel dan antara panel dengan elemen struktur utama terbukti menjadi komponen kunci yang mengendalikan respons seismik sistem secara keseluruhan. Penelitian eksperimental dan numerik pada sistem panel dinding pracetak bertingkat rendah menunjukkan bahwa sambungan baut kering memiliki pengaruh dominan terhadap kekakuan awal, kapasitas lateral, serta mekanisme kerusakan struktur (Guo et al., 2019a; Guo et al., 2019b). Dalam banyak kasus, kerusakan struktur tidak diawali oleh kegagalan panel, melainkan oleh pelemahan sambungan akibat pelonggaran baut, geser relatif antar panel, dan degradasi kontak gesek.

Perilaku serupa juga diamati pada bangunan panel pracetak dengan konsep perancangan untuk pembongkaran (*design for deconstruction*), di mana sambungan baut berperan sebagai jalur utama transfer gaya vertikal dan lateral. Studi uji kuasi-statik menunjukkan bahwa sistem tersebut memiliki integritas struktural yang baik dan kapasitas deformasi yang besar, namun rasio simpangan antar lantai yang terukur sering kali melebihi ketentuan peraturan akibat kontribusi perpindahan geser dan rotasi kaku pada sambungan (Xiong et al., 2021). Hal ini menegaskan bahwa kriteria deformasi berbasis peraturan konvensional belum sepenuhnya merepresentasikan mekanisme kerja sistem panel pracetak modern yang dikendalikan oleh sambungan.

Selain sambungan baut, berbagai inovasi sambungan terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi transfer gaya dan keandalan seismik. Sambungan tipe alveolar (*alveolar-type joints*) menunjukkan bahwa peningkatan luas kontak, rasio tekan aksial, dan mutu mortar dapat meningkatkan kapasitas geser dan kekakuan sistem, serta memungkinkan pengembangan model konstitutif geser–slip yang akurat untuk analisis struktur global (Xiao et al., 2023). Sementara itu, sambungan basah dengan kunci mekanis (*castellated keys*) mampu menghasilkan perilaku histeretik dan daktilitas yang sebanding dengan dinding beton cor di tempat, khususnya ketika mutu beton pada zona sambungan ditingkatkan (Wang et al., 2023).

Di sisi lain, beberapa penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas sambungan secara berlebihan justru dapat memicu transfer gaya yang tidak diinginkan dan meningkatkan risiko kerusakan panel, terutama pada sistem panel non-struktural atau panel fasad bangunan. Studi pascagempa di Italia mengungkap bahwa kegagalan panel fasad pracetak sering kali disebabkan oleh ketidakmampuan sambungan untuk mengakomodasi perpindahan relatif struktur utama selama gempa (Del Monte et al., 2019). Oleh karena itu, konsep sambungan yang memungkinkan pemisahan komponen perpindahan dalam bidang melalui mekanisme geser terkendali semakin banyak mendapat perhatian.

Pendekatan lebih lanjut dikembangkan melalui perangkat disipasi energi berbasis gesekan (*friction-based dissipative devices*), di mana sambungan dirancang untuk membatasi gaya maksimum sekaligus mendisipasikan energi gempa melalui perilaku histeretik yang stabil (Dal Lago et al., 2017). Hasil uji skala penuh menunjukkan bahwa perangkat ini mampu melindungi struktur utama dari kerusakan, mengendalikan rasio simpangan global, serta memungkinkan pemulihan pascagempa melalui penyetelan ulang gaya prategang sambungan. Temuan ini memperluas paradigma desain sambungan dari sekadar elemen penghubung menjadi elemen pengendali respons struktur.

Dalam konteks keberlanjutan dan industrialisasi konstruksi, panel beton pracetak khususnya panel beton sandwich pracetak semakin banyak digunakan sebagai elemen bangunan karena keunggulan struktural, termal, dan ketahanan api yang dimilikinya (Sah et al., 2024). Namun demikian, kajian

menunjukkan bahwa adopsi luas sistem ini masih dibatasi oleh kurangnya pemahaman terhadap kinerja struktural sistem secara menyeluruh, terutama terkait mekanisme sambungan dan transfer beban antar panel (Sah et al., 2024).

Isu tersebut menjadi semakin krusial ketika panel-panel pracetak diintegrasikan ke dalam sistem modular komposit tiga dimensi. Pada bangunan modular beton, sambungan antar modul berperan langsung dalam menjamin kontinuitas struktural, efisiensi transfer beban, dan ketahanan seismik sistem (Lakshmidevi et al., 2025). Berbagai studi menunjukkan bahwa sambungan hibrida yang mengombinasikan elemen baut, grout, dan baja struktural dapat meningkatkan disipasi energi hingga 30%, namun masih menghadapi tantangan dalam hal daktilitas global, keandalan di bawah beban dinamis, serta konsistensi kinerja antar siklus gempa (Lakshmidevi et al., 2025).

Berdasarkan tinjauan tersebut, dapat disimpulkan bahwa mekanisme transfer beban pada sistem panel beton pracetak sangat ditentukan oleh karakteristik dan strategi desain sambungan, baik pada level panel tunggal, rakitan panel, maupun sistem bangunan modular secara keseluruhan. Meskipun berbagai penelitian eksperimental dan numerik telah dilakukan, kajian yang menyintesis perilaku panel dan sambungan dalam satu kerangka konseptual yang utuh masih terbatas. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk membahas secara sistematis mekanisme transfer beban pada panel beton pracetak yang dirangkai membentuk bangunan, dengan menekankan peran sambungan sebagai pengendali utama respons struktural.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kajian literatur dan analisis konseptual untuk membahas perilaku struktural panel beton pracetak dan sistem sambungannya. Metode ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme kerja panel dan sambungan beton pracetak, khususnya dalam merespons beban lateral dan seismik, berdasarkan hasil-hasil penelitian terdahulu.

Kajian dilakukan dengan menelaah berbagai publikasi ilmiah yang membahas pengujian eksperimental dan analisis numerik panel beton pracetak serta sambungannya, kemudian mengaitkan temuan-temuan tersebut secara tematik untuk membangun alur pembahasan yang logis dan terintegrasi.

Data dan Sumber Kajian

Data penelitian berupa informasi teknis yang diperoleh dari publikasi ilmiah terkait panel beton pracetak dan sambungan strukturalnya. Literatur yang digunakan mencakup studi eksperimental dan numerik yang membahas karakteristik panel, jenis sambungan, mekanisme transfer gaya, serta respons struktur terhadap beban lateral atau seismik. Data yang diambil meliputi konfigurasi sistem, metode pengujian, respons struktural utama, dan temuan penting yang relevan dengan tujuan kajian.

Metode Analisis

Analisis dilakukan secara kualitatif dengan menelaah dan membandingkan hasil-hasil penelitian terdahulu. Fokus analisis diarahkan pada perilaku struktural panel beton pracetak sebagai elemen sistem bangunan, peran dan karakteristik berbagai tipe sambungan panel, serta kesesuaian antara hasil pengujian eksperimental dan pemodelan numerik yang digunakan dalam studi-studi tersebut. Hasil analisis kemudian disintesis untuk mengidentifikasi pola perilaku umum dan kecenderungan kinerja sistem panel beton pracetak dalam kondisi pembebanan lateral.

Alur metode penelitian secara umum ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan tahapan kajian dari pengumpulan literatur hingga sintesis pembahasan.



Gambar 1. Diagram alir metode penelitian.

Teknik Penyajian Hasil

Hasil kajian disajikan dalam bentuk pembahasan deskriptif-analitis yang terstruktur, dilengkapi dengan tabel perbandingan untuk memperjelas hubungan antara pendekatan eksperimental dan numerik yang dibahas. Penyajian difokuskan pada keterkaitan antara tipe sambungan, mekanisme kerja struktural, dan implikasinya terhadap kinerja sistem panel beton pracetak.

Batasan Penelitian

Penelitian ini tidak melakukan pengujian laboratorium maupun pemodelan numerik secara langsung. Pembahasan dibatasi pada analisis konseptual berdasarkan literatur yang tersedia, sehingga hasil kajian ditujukan sebagai referensi pemahaman dan dasar pengembangan penelitian lanjutan terkait sistem panel beton pracetak.

PEMBAHASAN

Evolusi dan Tipologi Panel Beton Pracetak

Perkembangan panel beton pracetak tidak terlepas dari tuntutan global terhadap percepatan konstruksi, efisiensi sumber daya, dan peningkatan kualitas bangunan, khususnya pada sektor hunian massal, fasilitas publik, dan bangunan dengan kebutuhan waktu konstruksi yang sangat singkat. Sejumlah kajian menunjukkan bahwa sistem pracetak mengalami transformasi dari sekadar pengganti metode pengecoran di tempat menjadi sistem struktural terintegrasi yang mencakup desain elemen, sambungan, proses fabrikasi, transportasi, dan perakitan di lapangan (Martins et al., 2023; Kolbeck et al., 2023).

Pada tahap awal, panel beton pracetak dikembangkan dalam bentuk panel dinding masif (*solid precast wall panels*) yang berfungsi sebagai elemen struktural utama pemikul beban gravitasi dan lateral. Sistem ini banyak digunakan pada konstruksi pascaperang di Eropa Timur dan Uni Soviet, dengan pendekatan produksi massal dan standardisasi tinggi. Meskipun memberikan kecepatan konstruksi yang signifikan, sistem panel masif tersebut memiliki keterbatasan pada fleksibilitas arsitektural, performa termal, dan adaptabilitas terhadap tuntutan bangunan modern (Kolbeck et al., 2023).

Seiring meningkatnya kesadaran terhadap efisiensi energi dan keberlanjutan, pengembangan panel beton pracetak kemudian bergeser menuju panel ringan dan panel berlapis (*sandwich panels*). Panel beton sandwich, yang terdiri dari dua lapisan beton (*wythes*) yang dipisahkan oleh material insulasi, dikembangkan untuk mengatasi kelemahan utama panel masif, yaitu rendahnya kinerja termal. Kajian literatur terbaru menunjukkan bahwa *precast concrete sandwich panels* (PCSP) mampu menggabungkan

keunggulan struktural beton dengan performa termal tinggi, ketahanan api, serta umur layanan yang panjang, menjadikannya solusi dominan untuk penutup bangunan berkelanjutan (Sah et al., 2024).

Dalam konteks struktural, panel beton pracetak dapat diklasifikasikan menjadi panel non-komposit dan panel komposit, bergantung pada kemampuan konektor geser dalam mentransfer gaya antara lapisan beton. Panel non-komposit umumnya dirancang agar lapisan beton bekerja secara independen, sedangkan panel komposit memungkinkan aksi komposit parsial atau penuh sehingga kedua lapisan berkontribusi terhadap kapasitas lentur dan geser. Namun, berbagai penelitian menekankan bahwa pengembangan aksi komposit sangat bergantung pada jenis dan konfigurasi konektor, yang sekaligus memengaruhi kinerja termal dan daktilitas sistem (Sah et al., 2024; Martins et al., 2023).

Selain evolusi pada penampang panel, perkembangan panel beton pracetak juga ditandai oleh pergeseran paradigma sistem konstruksi, dari sistem panel konvensional menuju sistem modular dan modularisasi tingkat lanjut. Dalam pendekatan ini, panel tidak lagi dipandang sebagai elemen tunggal, melainkan sebagai bagian dari sistem modular terstandarisasi dengan antarmuka sambungan yang terdefinisi secara ketat. Konsep modularisasi memungkinkan terjadinya *mass customisation*, yaitu kombinasi antara produksi massal dan fleksibilitas desain, yang sangat relevan untuk bangunan bertingkat menengah hingga tinggi (Kolbeck et al., 2023).

Kajian lain menegaskan bahwa integrasi panel beton pracetak ke dalam sistem modular dan volumetrik mampu meningkatkan produktivitas konstruksi hingga 40–50%, sekaligus mengurangi limbah material dan emisi karbon secara signifikan dibandingkan konstruksi konvensional (Lakshmidevi et al., 2025). Namun demikian, keberhasilan sistem modular sangat bergantung pada keandalan sambungan panel, baik dalam mentransfer gaya struktural maupun dalam mengakomodasi toleransi fabrikasi dan perakitan.

Dari sisi aplikasi struktural, panel beton pracetak umumnya digunakan sebagai dinding pemikul beban (*load-bearing walls*) yang bekerja sebagai elemen penahan gaya lateral akibat gempa dan angin. Penelitian eksperimental pada dinding geser pracetak menunjukkan bahwa panel dengan rasio aspek tertentu dapat berperilaku dominan lentur, geser, atau kombinasi keduanya, serupa dengan dinding beton cor di tempat, namun dengan konsentrasi respons nonlinier yang lebih dominan pada daerah sambungan (Todut et al., 2014; Martins et al., 2023). Hal ini menegaskan bahwa tipologi panel tidak dapat dipisahkan dari strategi perancangan sambungan.

Lebih lanjut, tren terkini dalam pengembangan panel beton pracetak juga mengarah pada optimalisasi keberlanjutan, melalui pengurangan berat struktur, pemanfaatan beton berkinerja tinggi dan rendah semen, serta pengembangan sistem yang memungkinkan pembongkaran dan penggunaan kembali (*design for disassembly*). Pendekatan ini menempatkan panel beton pracetak tidak hanya sebagai elemen struktural, tetapi juga sebagai komponen dalam siklus hidup bangunan yang berkelanjutan (Sah et al., 2024; Martins et al., 2023).

Perilaku Struktural Panel Beton Pracetak di Bawah Beban Lateral dan Gempa

Perilaku struktural panel beton pracetak di bawah beban lateral, khususnya gempa, merupakan isu kunci yang membedakan sistem pracetak dari struktur beton cor di tempat. Berbagai studi eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa meskipun panel beton pracetak dapat mencapai kapasitas kekuatan yang sebanding dengan sistem monolitik, mekanisme deformasi, disipasi energi, dan distribusi kerusakan sangat dipengaruhi oleh konfigurasi panel dan karakteristik sambungannya (Todut et al., 2014; Martins et al., 2023).

Mekanisme Kerja Panel sebagai Dinding Geser Pracetak

Panel beton pracetak yang digunakan sebagai dinding struktural umumnya bekerja sebagai dinding geser (*shear walls*) dalam sistem penahan gaya lateral. Seperti pada dinding beton konvensional, perilaku panel pracetak dikendalikan oleh rasio aspek tinggi terhadap panjang (H/L), tingkat pembebanan aksial, serta distribusi dan rasio tulangan. Panel dengan rasio aspek rendah cenderung berperilaku dominan geser, sedangkan panel ramping menunjukkan mekanisme lentur yang lebih menonjol (Todut et al., 2014).

Namun demikian, hasil pengujian eksperimental memperlihatkan bahwa pada panel pracetak, lokalisasi deformasi dan kerusakan sering terkonsentrasi di zona sambungan, bukan pada badan panel itu sendiri. Todut et al. (2014) menunjukkan bahwa panel pracetak dengan bukaan mengalami

penurunan kekakuan dan kapasitas geser yang signifikan, disertai peningkatan deformasi pasca-retak, yang mempertegas peran kritis detail sambungan dalam mengendalikan respons seismik.

Respons Nonlinier, Retak, dan Mode Kegagalan

Secara umum, respons nonlinier panel beton pracetak di bawah beban siklik ditandai oleh terbentuknya retak diagonal, kerusakan beton pada zona tekan di dasar dinding, serta leleh tulangan tarik. Pada sistem pracetak, retak awal sering muncul lebih dini dibandingkan dinding monolitik akibat adanya diskontinuitas material dan antarmuka sambungan (Song et al., 2020).

Studi komparatif antara dinding pracetak dan monolitik menunjukkan bahwa meskipun kapasitas ultimit dapat relatif setara, degradasi kekakuan dan kapasitas pasca-puncak pada panel pracetak cenderung lebih cepat, terutama pada sistem dengan sambungan yang bersifat *emulated* (meniru monolitik) tetapi memiliki keterbatasan panjang penyaluran tulangan (Song et al., 2020). Kondisi ini berimplikasi pada meningkatnya simpangan lantai dan potensi konsentrasi kerusakan lokal pada gempa kuat.

Daktilitas dan Disipasi Energi

Daktilitas merupakan parameter krusial dalam kinerja seismik. Berbagai penelitian eksperimental menunjukkan bahwa panel beton pracetak dapat mencapai tingkat daktilitas yang memadai, bahkan melampaui dinding monolitik, apabila sambungan dirancang untuk memungkinkan deformasi terkendali. Studi pada dinding pracetak dengan sambungan dowel vertikal menunjukkan peningkatan daktilitas hingga lebih dari 40% dibandingkan dinding monolitik, meskipun dengan pengorbanan kecil pada kapasitas disipasi energi total (Karthikeyan et al., 2023).

Sebaliknya, panel pracetak dengan sambungan kaku atau sambungan yang membatasi pergeseran relatif antar panel cenderung menunjukkan perilaku histeretik yang sempit, dengan disipasi energi yang lebih rendah dan potensi terjadinya kegagalan getas pada zona sambungan (Sun et al., 2018). Hal ini menegaskan bahwa daktilitas panel pracetak tidak hanya ditentukan oleh elemen panel, tetapi terutama oleh mekanisme deformasi yang diizinkan oleh sambungan.

Pengaruh Bukaan dan Diskontinuitas Geometri

Dalam penerapan aktual, panel beton pracetak sering dilengkapi dengan bukaan untuk pintu, jendela, atau utilitas, yang secara signifikan memengaruhi perilaku seismik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa bukaan besar menyebabkan penurunan kekakuan lateral dan kapasitas geser, sekaligus mengubah pola retak dan mekanisme aliran gaya dalam panel (Todut et al., 2014).

Pada panel pracetak, efek ini diperparah oleh adanya sambungan horizontal dan vertikal, sehingga interaksi antara bukaan dan sambungan dapat memicu konsentrasi tegangan lokal. Oleh karena itu, desain panel pracetak dengan bukaan memerlukan pendekatan yang lebih konservatif, *termasuk penguatan lokal* atau strategi sambungan yang mampu mendistribusikan deformasi secara lebih merata (Martins et al., 2023).

Panel Pracetak dalam Sistem Modular dan Bangunan Bertingkat

Dalam konteks sistem modular dan bangunan bertingkat menengah hingga tinggi, panel beton pracetak tidak bekerja secara individual, melainkan sebagai bagian dari sistem struktural terintegrasi. Studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa interaksi antar panel melalui sambungan vertikal dan horizontal sangat menentukan kinerja global bangunan, termasuk distribusi rasio simpangan antar lantai dan mekanisme disipasi energi (Lakshmidevi et al., 2025; Sun et al., 2018).

Pendekatan modular memungkinkan kontrol kualitas yang lebih baik pada elemen panel, namun juga menuntut keandalan sambungan sebagai elemen struktural utama. Kegagalan sambungan berpotensi menyebabkan hilangnya kerja komposit antar panel, yang secara drastis menurunkan kekakuan dan kapasitas lateral sistem (Kolbeck et al., 2023).

Implikasi terhadap Desain Seismik Panel Beton Pracetak

Berdasarkan temuan eksperimental dan analitis, dapat disimpulkan bahwa perilaku seismik panel beton pracetak bersifat *connection-dominated*, di mana performa global sistem lebih ditentukan oleh sambungan dibandingkan oleh kapasitas panel itu sendiri. Oleh karena itu, penerapan prinsip desain berbasis kapasitas, pengendalian mekanisme keruntuhan, serta pemilihan tipe sambungan yang sesuai menjadi krusial untuk memastikan kinerja seismik yang andal.

Peran dan Klasifikasi Sambungan Panel Beton Pracetak

Dalam sistem panel beton pracetak, sambungan bukan sekadar elemen penghubung geometris, melainkan komponen struktural utama yang mengontrol transfer gaya, mekanisme deformasi, serta kapasitas disipasi energi di bawah beban lateral dan gempa. Berbeda dengan struktur beton cor di tempat yang bersifat kontinu, sistem pracetak secara *inheren* mengandung diskontinuitas, sehingga kinerja seismik sistem sangat bergantung pada perilaku sambungannya (Martins et al., 2023).

Peran Struktural Sambungan dalam Sistem Panel Pracetak

Hasil kajian eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa sambungan pada sistem panel beton pracetak memiliki peran struktural yang sangat krusial dalam memastikan kinerja keseluruhan struktur. Sambungan berfungsi sebagai media utama transfer gaya aksial dan geser antar panel serta sebagai jalur penyaluran gaya menuju fondasi, sehingga kontinuitas sistem struktural dapat terjaga. Selain itu, sambungan berperan dalam mengendalikan deformasi relatif antar elemen pracetak, khususnya pada kondisi pembebanan lateral dan siklik, yang sangat menentukan stabilitas dan kenyamanan struktur. Pada tingkat respons nonlinier, sambungan juga berkontribusi dalam penyediaan daktilitas dan kemampuan disipasi energi, terutama ketika struktur mengalami pembebanan gempa kuat.

Berbagai studi melaporkan bahwa mekanisme kegagalan pada sistem pracetak hampir selalu diawali atau dikendalikan oleh kerusakan yang terjadi pada zona sambungan, bukan oleh kehancuran badan panel itu sendiri (Todut et al., 2014; Sun et al., 2018). Temuan ini menegaskan bahwa sambungan merupakan komponen kunci dalam desain sistem pracetak dan dapat dipandang sebagai *structural fuse*, yaitu elemen yang secara sengaja dirancang untuk mengalami deformasi inelastik terlebih dahulu guna melindungi elemen panel utama dari kegagalan getas.

Klasifikasi Sambungan: *Wet dan Dry Connections*

Secara umum, sambungan panel beton pracetak diklasifikasikan menjadi *wet connections* atau sambungan basah dan *dry connections* atau sambungan kering, dengan karakteristik mekanisme kerja dan kinerja seismik yang berbeda.

a. ***Wet Connections* (Sambungan Basah)**

Sambungan basah memanfaatkan beton cor di tempat atau grout untuk menyatukan tulangan antar panel sehingga perilaku struktural yang dihasilkan mendekati sistem monolitik. Jenis sambungan ini banyak diterapkan pada bangunan bertingkat di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi karena mampu memberikan kekakuan awal dan kapasitas lateral yang relatif besar, menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata, serta meniru mekanisme kerja dinding beton cor di tempat. Karakteristik tersebut menjadikan sambungan basah sering dipandang sebagai solusi konservatif dalam desain sistem panel pracetak untuk beban seismik.

Meskipun demikian, berbagai penelitian menunjukkan bahwa sambungan wet tidak sepenuhnya identik dengan sistem monolitik. Antarmuka antara beton lama dan beton baru kerap berperan sebagai zona lemah yang memicu terbentuknya retak awal, mempercepat degradasi kekakuan, serta menyebabkan konsentrasi kerusakan pada pembebanan siklik dengan intensitas gempa besar (Song et al., 2020). Di samping itu, penerapan sambungan basah cenderung mengurangi keunggulan utama sistem pracetak dari sisi percepatan konstruksi, kontrol mutu lapangan, serta fleksibilitas terhadap pembongkaran atau modifikasi struktur di masa layanan.

b. ***Dry Connections* (Sambungan Kering)**

Sambungan kering mengandalkan elemen mekanis seperti baja, baut, dan angkur untuk menyatukan panel beton pracetak tanpa melibatkan pengecoran beton di lokasi. Pendekatan ini memungkinkan proses pemasangan yang lebih cepat dan sederhana, disertai dengan tingkat kontrol mutu fabrikasi yang lebih baik karena sebagian besar pekerjaan dilakukan di lingkungan pabrik. Selain itu, sambungan kering memberikan peluang untuk bongkar-pasang elemen struktural serta mendukung prinsip keberlanjutan siklus hidup bangunan melalui kemudahan perawatan, perbaikan, atau adaptasi fungsi di masa mendatang.

Meskipun pada tahap awal pengembangannya sambungan kering sering dipandang kurang sesuai untuk wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi, berbagai penelitian mutakhir menunjukkan bahwa dengan perencanaan dan perincian desain yang tepat, sistem ini mampu mencapai respons seismik yang stabil dan daktail. Bahkan, beberapa studi melaporkan bahwa

kinerja sambungan kering tertentu dapat menyamai atau melampaui sistem sambungan basah, khususnya dalam hal kemampuan deformasi inelastik yang terkontrol dan disipasi energi pada pembebanan siklik (Guo et al., 2019; Martins et al., 2023).

Sambungan Berbasis Gesekan (*Friction-Based Connections*)

Sambungan berbasis gesekan merupakan salah satu inovasi penting dalam pengembangan sistem sambungan kering pada panel beton pracetak. Mekanisme utama sambungan ini didasarkan pada transfer gaya lateral melalui gaya gesek yang dikontrol oleh gaya prategang pada baut, sehingga respons struktural dapat dirancang agar gaya maksimum yang diteruskan ke panel berada dalam batas yang terkendali. Pendekatan tersebut memungkinkan terjadinya disipasi energi melalui mekanisme slip yang terkontrol, sekaligus memberikan perlindungan terhadap elemen beton utama dari potensi kerusakan getas pada kondisi pembebanan gempa kuat.

Berbagai studi eksperimental pada *friction-based dissipative devices* menunjukkan respons histeretik yang stabil dengan bentuk kurva mendekati persegi panjang, yang mengindikasikan kemampuan disipasi energi yang tinggi serta degradasi kekakuan yang relatif terkendali sepanjang siklus pembebanan (Dal Lago et al., 2017). Selain itu, sistem sambungan berbasis gesekan juga memperlihatkan kemampuan pemulihan posisi sebagian melalui proses pengencangan ulang baut setelah terjadinya gempa besar. Karakteristik ini menjadikan sambungan berbasis gesekan sangat relevan dalam kerangka konsep *repairable structures*, di mana kerusakan struktural dapat dilokalisasi dan kinerja bangunan pascagempa dapat dipulihkan secara efisien.

Sambungan Dowel Vertikal

Sambungan dowel vertikal merupakan salah satu bentuk sambungan semi-kaku yang umum diterapkan pada sistem panel dinding beton pracetak. Mekanisme kerja sambungan ini didasarkan pada transfer gaya geser dan momen melalui tulangan baja yang ditanam dan digrouting pada zona sambungan antar panel, sehingga memungkinkan terjadinya interaksi struktural yang cukup efektif antar elemen pracetak. Hasil berbagai pengujian eksperimental menunjukkan bahwa sambungan dowel vertikal mampu memberikan kapasitas lateral yang mendekati perilaku dinding beton monolitik, disertai dengan tingkat daktilitas yang relatif lebih tinggi akibat terjadinya slip dan rotasi lokal pada area sambungan. Selain itu, pola kerusakan yang dihasilkan cenderung lebih terkontrol karena konsentrasi deformasi terjadi pada zona sambungan, bukan pada badan panel.

Meskipun demikian, dibandingkan dengan sistem sambungan disipatif berbasis gesekan, sambungan dowel vertikal umumnya menunjukkan kemampuan disipasi energi yang lebih rendah. Sambungan ini juga rentan terhadap terjadinya penghancuran beton lokal di sekitar tulangan dowel apabila detail perkuatan dan kualitas grouting tidak dirancang secara memadai (Karthikeyan et al., 2023). Oleh karena itu, efektivitas sambungan dowel vertikal sangat bergantung pada konfigurasi detail sambungan, mutu material, serta strategi perkuatan lokal yang diterapkan dalam desain.

Sambungan Baut (*Bolted Connections*)

Sambungan baut, khususnya yang dikombinasikan dengan pelat baja dan konektor dengan konfigurasi khusus, telah berkembang pesat sebagai salah satu solusi sambungan kering untuk sistem dinding geser beton pracetak. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sambungan baut yang dirancang sebagai *friction-type joint* mampu mendorong beberapa panel pracetak untuk bekerja secara kooperatif sehingga perilaku struktural yang dihasilkan menyerupai sistem dinding monolitik. Selain itu, sambungan ini terbukti efektif dalam mengurangi deformasi relatif vertikal antar panel secara signifikan, serta mampu menyediakan kapasitas lateral dan kekakuan yang relatif stabil hingga melewati kondisi pasca-puncak pembebanan.

Sun et al. (2018) memperkenalkan konsep *monolithic coefficient* sebagai parameter untuk mengevaluasi tingkat kerja sama struktural antar panel dalam sistem pracetak. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sambungan baut dengan perancangan yang optimal dapat mencapai nilai koefisien yang mendekati sistem monolitik. Meskipun demikian, potensi terjadinya kerusakan beton lokal di sekitar zona sambungan masih menjadi isu penting yang memerlukan perhatian khusus, terutama melalui penerapan detail perkuatan tambahan guna memastikan kinerja dan keandalan jangka panjang sistem sambungan baut.

Sambungan Disipatif dan Implikasinya terhadap Desain Seismik

Sambungan disipatif dirancang secara eksplisit untuk berperan sebagai lokasi utama terjadinya disipasi energi selama kejadian gempa, baik melalui mekanisme gesekan, deformasi plastis elemen baja, maupun kombinasi dari keduanya. Berbeda dengan sambungan konvensional yang berupaya mempertahankan perilaku elastis, sistem sambungan disipatif memungkinkan pengendalian gaya maksimum yang diteruskan ke panel beton pracetak, sehingga kerusakan struktural utama dapat direduksi secara signifikan. Pendekatan ini secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan runtuh (*collapse prevention*) serta menjaga integritas elemen struktural utama pada kondisi gempa kuat.

Berbagai studi menegaskan bahwa perkembangan sistem panel beton pracetak di wilayah dengan tingkat kegempaan tinggi sangat bergantung pada inovasi sambungan disipatif yang tidak hanya memiliki kapasitas daktilitas dan disipasi energi yang memadai, tetapi juga mudah dirakit di lapangan dan memungkinkan proses perbaikan pascagempa yang efisien. Oleh karena itu, sambungan disipatif dipandang sebagai komponen kunci dalam strategi desain seismik modern, yang mengintegrasikan prinsip *capacity design*, *damage control*, dan *repairability* sebagai bagian dari pendekatan kinerja (*performance-based seismic design*) (Guo et al., 2019; Dal Lago et al., 2017; Martins et al., 2023).

Evaluasi Kinerja Sambungan Berdasarkan Studi Eksperimental dan Numerik

Evaluasi kinerja sambungan panel beton pracetak memerlukan pendekatan terpadu antara pengujian eksperimental dan pemodelan numerik, mengingat kompleksitas mekanisme transfer gaya, degradasi kekakuan, serta interaksi nonlinier antara beton, baja, dan antarmuka sambungan. Studi-studi mutakhir menunjukkan bahwa ketergantungan pada satu pendekatan saja tidak memadai untuk menggambarkan perilaku seismik sistem pracetak secara komprehensif.

Temuan Utama dari Studi Eksperimental

Pengujian eksperimental pada sambungan panel beton pracetak umumnya dilakukan melalui uji siklik kuasi-statik dengan kontrol gaya atau perpindahan untuk merepresentasikan respons struktur terhadap beban gempa. Parameter kinerja utama yang dievaluasi dalam pengujian tersebut meliputi kapasitas lateral, daktilitas, kemampuan disipasi energi, degradasi kekakuan, serta mode kerusakan yang berkembang selama siklus pembebanan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi mekanisme respons nonlinier yang dominan pada sistem panel pracetak.

Hasil pengujian secara konsisten menunjukkan bahwa inisiasi kerusakan hampir selalu terkonsentrasi pada zona sambungan, sementara badan panel relatif tetap utuh hingga tahap pembebanan lanjut (Todut et al., 2014; Karthikeyan et al., 2023). Pada sambungan basah, meskipun kekakuan awal yang dihasilkan relatif tinggi, retak pada antarmuka antara beton lama dan beton baru cenderung muncul lebih dini, yang selanjutnya mempercepat degradasi kekakuan dan membatasi daktilitas efektif sistem secara keseluruhan (Song et al., 2020). Sebaliknya, sambungan kering modern, khususnya sambungan baut dan sambungan berbasis gesekan, menunjukkan kurva histeresis yang stabil dengan mekanisme slip yang terkontrol, sehingga mampu menghasilkan disipasi energi yang signifikan tanpa memicu kerusakan beton yang ekstensif pada panel utama (Dal Lago et al., 2017; Guo et al., 2019).

Eksperimen pada sambungan baut vertikal lebih lanjut memperlihatkan bahwa perancangan sambungan yang tepat memungkinkan beberapa panel pracetak bekerja secara kooperatif menyerupai perilaku dinding beton monolitik. Fenomena ini ditunjukkan oleh penurunan deformasi relatif antar panel yang signifikan serta peningkatan kapasitas lateral sistem secara keseluruhan (Sun et al., 2018). Meskipun demikian, potensi terjadinya kerusakan beton lokal di sekitar konektor baja tetap menjadi isu kritis, terutama pada fase pasca-puncak pembebanan, sehingga memerlukan perhatian khusus dalam perincian desain dan strategi perkuatan.

Perbandingan Perilaku Sambungan Berdasarkan Jenisnya

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental yang dilaporkan dalam berbagai studi, kinerja sambungan panel beton pracetak menunjukkan perbedaan karakteristik yang jelas bergantung pada jenis sambungan yang digunakan. Sambungan basah umumnya unggul dalam hal kekakuan dan kekuatan awal, namun cenderung mengalami mekanisme keruntuhan yang lebih getas akibat terkonsentrasinya kerusakan pada antarmuka antara beton lama dan beton baru. Kondisi ini membatasi kemampuan

deformasi inelastik sistem serta mempercepat degradasi kekakuan pada pembebanan siklik intensitas tinggi.

Sambungan dowel vertikal menunjukkan perilaku yang relatif seimbang antara kekuatan dan daktilitas, di mana mekanisme slip dan rotasi lokal pada zona sambungan memungkinkan terjadinya deformasi inelastik yang lebih terkendali. Meskipun demikian, kemampuan disipasi energi pada sambungan ini umumnya masih terbatas dan sangat dipengaruhi oleh kualitas grout, konfigurasi batang dowel, serta detail tulangan di sekitar sambungan. Variasi kecil pada parameter-parameter tersebut dapat menghasilkan perbedaan respons seismik yang signifikan.

Sebaliknya, sambungan baut yang dirancang sebagai *friction-type* joints menunjukkan tingkat daktilitas dan disipasi energi yang lebih tinggi. Mekanisme gesekan yang dikontrol melalui gaya prategang baut memungkinkan pembatasan gaya internal yang diteruskan ke panel beton, sehingga kerusakan struktural utama dapat dilokalisasi pada elemen sambungan. Pada tingkat yang lebih lanjut, sambungan disipatif berbasis gesekan secara konsisten memperlihatkan respons histeretik yang paling stabil di antara berbagai tipe sambungan yang ditinjau. Karakteristik ini menjadikannya kandidat unggulan untuk sistem panel pracetak tahan gempa yang mengadopsi konsep damage control dan performance-based design.

Secara keseluruhan, temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa mekanisme deformasi sambungan, bukan semata-mata kapasitas nominal yang direncanakan, merupakan indikator utama dalam menentukan kinerja seismik sistem panel beton pracetak.

Kontribusi Studi Numerik dalam Evaluasi Kinerja Sambungan

Pemodelan numerik, khususnya yang berbasis f*inite element analysis* (FEA), memainkan peran yang sangat krusial dalam evaluasi kinerja sambungan panel beton pracetak. Pendekatan ini memungkinkan penjelasan mekanisme internal struktur yang sulit diamati secara langsung melalui pengujian eksperimental, seperti distribusi tegangan lokal, perkembangan retak mikro, serta interaksi kompleks pada antarmuka sambungan. Selain itu, pemodelan numerik memberikan fleksibilitas untuk melakukan studi parametrik yang tidak praktis atau terlalu mahal jika dilakukan secara eksperimental, sekaligus berfungsi sebagai sarana untuk memvalidasi dan menggeneralisasi hasil uji laboratorium ke berbagai konfigurasi desain dan kondisi pembebanan.

Berbagai penelitian mengadopsi model beton nonlinier, seperti *Concrete Damage Plasticity* (CDP), untuk merepresentasikan perilaku retak tarik, penghancuran beton tekan, serta degradasi kekakuan yang terjadi selama pembebanan siklik. Model ini umumnya dikombinasikan dengan elemen kontak dan hukum gesekan yang sesuai untuk merepresentasikan interaksi pada antarmuka sambungan, termasuk efek slip dan transfer gaya geser antar elemen pracetak (Sun et al., 2018; Karthikeyan et al., 2023). Hasil simulasi numerik yang diperoleh menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik dengan data eksperimental dalam memprediksi kapasitas lateral maksimum, pola retak dan lokasi kerusakan dominan, serta evolusi kekakuan dan kemampuan disipasi energi sistem sepanjang siklus pembebanan.

Meskipun demikian, beberapa studi juga mencatat adanya kecenderungan model numerik untuk mengestimasi kekakuan awal secara berlebihan apabila aspek-aspek praktis seperti toleransi sambungan, slip awal, dan ketidaksempurnaan geometrik tidak dimodelkan secara eksplisit. Temuan ini menegaskan pentingnya kalibrasi model numerik yang cermat dan realistis agar hasil simulasi dapat merepresentasikan perilaku aktual sistem sambungan panel beton pracetak secara lebih akurat (Todut et al., 2014; Martins et al., 2023).

Evaluasi Parametrik dan Sintesis Eksperimental–Numerik terhadap Kinerja Sambungan

Analisis parametrik berbasis pemodelan numerik menunjukkan bahwa kinerja sambungan panel beton pracetak sangat sensitif terhadap sejumlah parameter desain utama, seperti koefisien gesekan pada sambungan baut, besarnya gaya prategang baut, ketebalan serta konfigurasi pelat baja, dan jarak serta diameter konektor. Variasi parameter-parameter tersebut secara langsung memengaruhi kekakuan awal, kapasitas lateral, mekanisme slip, serta pola distribusi deformasi pada zona sambungan. Sebagai contoh, peningkatan koefisien gesekan hingga nilai tertentu terbukti mampu meningkatkan kekakuan dan kapasitas lateral sistem, namun setelah melewati ambang tertentu pengaruhnya menjadi tidak signifikan terhadap peningkatan kinerja struktural secara keseluruhan (Sun et al., 2018). Temuan ini menegaskan bahwa peningkatan kinerja sambungan tidak selalu dicapai melalui pembesaran dimensi atau peningkatan kekuatan material semata, melainkan memerlukan pendekatan desain berbasis kinerja

(*performance-based design*) yang mempertimbangkan mekanisme deformasi dan disipasi energi secara eksplisit.

Sintesis antara hasil studi eksperimental dan simulasi numerik lebih lanjut menunjukkan bahwa sambungan pada sistem panel beton pracetak tidak dapat diperlakukan sebagai elemen sekunder, melainkan harus dimodelkan dan dirancang sebagai komponen nonlinier utama yang mengendalikan respons seismik sistem secara keseluruhan. Pendekatan numerik yang telah divalidasi melalui data eksperimental terbukti mampu merepresentasikan perilaku global struktur dengan tingkat akurasi yang tinggi, baik dalam memprediksi kapasitas lateral, evolusi kekakuan, maupun mekanisme kerusakan dominan. Dalam konteks ini, sistem sambungan disipatif berbasis gesekan dan baut secara konsisten menunjukkan keseimbangan yang paling optimal antara kekuatan, daktilitas, dan ketahanan pascagempa, terutama ketika dirancang untuk membatasi kerusakan pada elemen sambungan dan memfasilitasi proses perbaikan.

Dengan demikian, evaluasi kinerja sambungan yang mengintegrasikan pengujian eksperimental dan simulasi numerik merupakan fondasi utama dalam pengembangan sistem panel beton pracetak yang aman, tangguh terhadap gempa, serta berkelanjutan dari perspektif kinerja struktural dan siklus hidup bangunan.

Tabel 1 merangkum perbandingan utama antara hasil uji eksperimental dan hasil analisis numerik (FEA) pada berbagai tipe sambungan panel beton pracetak yang dikaji

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Sambungan Panel Beton Pracetak Berdasarkan Studi Eksperimental dan Numerik

Aspek Evaluasi	Temuan Eksperimental	Temuan Numerik (FEA)	Artikel Pendukung
Lokasi Kerusakan Dominan	Kerusakan terkonsentrasi di zona sambungan (retak geser, crushing lokal beton, slip antarmuka)	Lokasi kerusakan terprediksi dengan baik melalui CDP dan elemen kontak	Todut et al. (2014); Guo et al. (2019); Sun et al. (2018); Karthikeyan et al. (2023)
Kapasitas Lateral Maksimum	Mendekati atau sedikit lebih rendah dari sistem monolitik (−2% hingga −10%) tergantung tipe sambungan	Prediksi kapasitas lateral deviasi umumnya <10% dari hasil uji	Sun et al. (2018); Guo et al. (2019); Xiong et al. (2021)
Kekakuan Awal	Lebih rendah dari dinding monolitik akibat slip awal dan toleransi sambungan	Cenderung *overestimate* jika slip awal tidak dimodelkan	Todut et al. (2014); Martins et al. (2023)
Daktilitas	Tinggi pada sambungan baut dan gesekan ($\mu > 4$); lebih rendah pada wet connection	Daktilitas terprediksi baik jika hukum slip–geser dikalibrasi	Dal Lago et al. (2017); Guo et al. (2019); Song et al. (2020)
Disipasi Energi	Histeresis stabil pada friction-based & bolted connections; pinching pada wet connections	Pola histeresis dapat direplikasi dengan nonlinear spring/contact model	Dal Lago et al. (2017); Xiong et al. (2021); Sun et al. (2018)
Degradasi Kekakuan	Bertahap dan terkendali pada sambungan kering; cepat pada sambungan basah	Sensitif terhadap parameter CDP dan friction coefficient	Song et al. (2020); Martins et al. (2023)
Pengaruh Parameter Sambungan	Koefisien gesekan, gaya prategang, dan detail baja sangat berpengaruh	Studi parametrik efektif mengevaluasi sensitivitas desain	Sun et al. (2018); Guo et al. (2019); Dal Lago et al. (2017)

Aspek Evaluasi	Temuan Eksperimental	Temuan Numerik (FEA)	Artikel Pendukung
Kooperasi Antar Panel	Sambungan baut vertikal mampu membuat panel bekerja hampir monolitik	Terverifikasi melalui reduksi deformasi relatif antar panel	Sun et al. (2018); Xiong et al. (2021)
Reparabilitas Pascagempa	Tinggi pada sistem gesekan dan baut (kerusakan beton terbatas)	Numerik menunjukkan kerusakan terkonsentrasi dan terkendali	Dal Lago et al. (2017); Martins et al. (2023)

KESIMPULAN

Penelitian ini membahas secara komprehensif sistem panel beton pracetak dengan fokus pada perilaku struktural dan kinerja sambungan berdasarkan sintesis literatur eksperimental dan numerik. Berdasarkan hasil kajian, dapat disimpulkan bahwa panel beton pracetak merupakan solusi konstruksi yang semakin relevan dalam konteks kebutuhan percepatan pembangunan, efisiensi konstruksi, serta pengendalian mutu, khususnya di wilayah dengan risiko seismik menengah hingga tinggi. Namun demikian, kinerja struktural sistem panel pracetak sangat ditentukan oleh jenis, konfigurasi, dan mekanisme kerja sambungan antar panel.

Hasil kajian menunjukkan bahwa perilaku struktural panel beton pracetak di bawah beban lateral dan gempa secara umum mampu mencapai kapasitas dan daktilitas yang sebanding dengan struktur beton monolit, apabila sambungan dirancang dengan mekanisme transfer gaya yang memadai. Studi eksperimental secara konsisten menempatkan zona sambungan sebagai lokasi dominan terjadinya kerusakan, baik dalam bentuk retak geser, slip, kerusakan beton setempat, maupun degradasi kekakuan akibat pembebanan siklik. Variasi parameter seperti rasio gaya aksial, mutu material sambungan, serta detail komponen sambungan terbukti berpengaruh signifikan terhadap kapasitas, daktilitas, dan kemampuan disipasi energi sistem.

Dari sisi klasifikasi sambungan, sambungan basah umumnya memberikan kekakuan awal dan kapasitas lateral yang lebih tinggi, tetapi memiliki keterbatasan dalam aspek konstruktabilitas, kontrol mutu lapangan, dan potensi perilaku getas pada kondisi setelah mencapai kapasitas maksimum. Sebaliknya, sambungan kering termasuk sambungan berbasis baut, dowel, gesekan, dan komponen disipasi menawarkan fleksibilitas konstruksi, kemudahan perakitan dan pembongkaran, serta potensi perilaku seismik yang lebih terkendali melalui mekanisme slip dan disipasi energi, meskipun dengan kekakuan awal yang relatif lebih rendah. Tidak terdapat satu tipe sambungan yang unggul secara mutlak, sehingga pemilihan sistem sambungan harus disesuaikan dengan tujuan desain, tingkat risiko seismik, dan konteks sistem struktural secara keseluruhan.

Kajian ini juga menegaskan peran penting analisis numerik sebagai alat validasi dan pengembangan desain sambungan panel beton pracetak. Model elemen hingga dengan representasi nonlinier beton, tulangan, dan mekanisme kontak mampu mereplikasi respons global struktur, khususnya pada tahap elastik hingga mendekati kapasitas maksimum. Meskipun demikian, perbedaan antara hasil numerik dan eksperimental masih sering dijumpai pada kondisi setelah mencapai kapasitas maksimum, akibat keterbatasan model dalam menangkap kerusakan lokal dan degradasi siklik secara realistis. Oleh karena itu, pendekatan terpadu antara pengujian eksperimental dan pemodelan numerik tetap diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih akurat terhadap perilaku sambungan.

Secara keseluruhan, Penelitian ini menyimpulkan bahwa pengembangan sistem panel beton pracetak di wilayah seismik memerlukan perhatian khusus pada desain sambungan sebagai elemen kunci kinerja struktural. Sintesis literatur yang disajikan memberikan dasar konseptual dan teknis yang kuat bagi perancang dan peneliti untuk memahami kelebihan, keterbatasan, serta implikasi pemilihan tipe sambungan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan desain, pemodelan, dan penelitian lanjutan terkait sistem panel beton pracetak yang aman, efisien, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Dal Lago, B., Negro, P., Dal Cin, A., & Franchin, P. (2017). Seismic response of precast structures with friction-based dissipative devices. *Engineering Structures, 147*, 404–417. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.005

Del Monte, E., Ragni, L., & Zona, A. (2019). Seismic performance of precast concrete cladding panels: Damage mechanisms observed after recent Italian earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering, 17*(8), 4443–4468. https://doi.org/10.1007/s10518-019-00630-1

Guo, T., Guo, Z., Liu, J., & Li, Z. (2019a). Seismic behavior of precast concrete wall structures with bolted dry connections. *Engineering Structures, 181*, 192–206. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.003

Guo, T., Guo, Z., Liu, J., & Li, Z. (2019b). Experimental and numerical study on seismic performance of precast concrete wall systems with bolted connections. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 121*, 236–249. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.018

Karthikeyan, K., Santhi, M. H., & Kumaran, G. S. (2023). Study on vertical dowel connections in precast walls. *Advances in Civil Engineering, 2023*, Article 6270570. https://doi.org/10.1155/2023/6270570

Kolbeck, S., Schlicke, D., & Fischer, O. (2023). Modular concrete construction systems: Structural behavior and connection design concepts. *Structural Concrete, 24*(2), 1568–1583. https://doi.org/10.1002/suco.202200211

Lakshmidevi, P., Jayaraman, K., & Ghosh, S. (2025). Structural performance of modular precast concrete buildings under seismic loading: A review and synthesis. *Journal of Building Engineering, 87*, 108073. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108073

Martins, R., do Carmo, R., Costa, H., & Júlio, E. (2023). A review on precast structural concrete walls and connections. *Advances in Structural Engineering, 26*(14), 2600–2620. https://doi.org/10.1177/13694332231191073

Sah, S., Bui, T. T., & Lim, J. B. P. (2024). Precast concrete sandwich panels: Structural performance, thermal behavior, and sustainability aspects. *Journal of Building Engineering, 79*, 107741. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107741

Song, B., Du, D., Li, W., Wang, S., Wang, Y., & Feng, D. (2020). Analytical investigation of the differences between cast-in-situ and precast beam–column connections under seismic actions. *Applied Sciences, 10*(22), 8280. https://doi.org/10.3390/app10228280

Sun, J., Qiu, H., & Jiang, H. (2018). Lateral load behaviour of a rectangular precast shear wall involving vertical bolted connections. *Advances in Structural Engineering, 21*(13), 2003–2016. https://doi.org/10.1177/1369433218807685

Todut, C. M., Dan, D., & Stoian, V. (2014). Experimental investigation on precast reinforced concrete wall panels with openings subjected to lateral loads. *Engineering Structures, 65*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.023

Wang, Z., Liu, J., Li, Z., & Guo, T. (2023). Seismic performance of precast concrete shear walls with castellated wet connections. *Structures, 48*, 1152–1166. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.067

Xiao, Y., Li, Z., Guo, T., & Wang, Y. (2023). Shear behavior and constitutive modeling of alveolar-type joints in precast concrete walls. *Engineering Structures, 275*, 115210. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115210

Xiong, Z., Li, Z., Guo, T., & Wang, Y. (2021). Experimental investigation on precast concrete buildings designed for deconstruction under seismic loading. *Engineering Structures, 241*, 112468. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112468