



Analisis Komprehensif Degradasi Kekuatan Rekat Pada Antarmuka Struktur Komposit Baja-Beton Dengan Variasi Sistem Konektor Geser

Fransiskus Xaverius Ndale^{1*}, Alfridus Gado², Ireneus Kota³

¹²³ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Flores, Ende

*) Correspondensi: Email: milanonet66@gmail.com

Received: 27 April 2026

Revised: 28 Mei 2026

Accepted: 03 Juni 2026

ABSTRACT

Steel-concrete composite structural systems heavily rely on interface integrity through shear connectors to achieve optimal monolithic action. However, the performance efficiency of these structures is often degraded by the reduction of bond strength due to aggressive environmental factors and long-term mechanical loading. This study aims to evaluate the degradation mechanisms and residual performance of various connector types (such as headed studs, PBL, channels, and hybrid systems) using the Systematic Literature Review (SLR) method with the PRISMA protocol. Based on a synthesis of more than 20 reputable publications (ranging from 2010 to 2025), numerical data from push-out test results were analyzed to compare the residual capacity and failure modes of the specimens. The main findings indicate that corrosion causes a linear decrease in shear capacity due to the reduction of the effective cross-section, where 2% corrosion can reduce the bond strength by up to 80%. In addition, exposure to temperatures above 500°C was found to damage the concrete matrix, reducing the bearing strength by 60%. Comparatively, the hybrid connector system (PBL + Stud) demonstrates the highest resilience, with a group capacity reaching 1940 kN due to the contribution of penetrating rebar. This study recommends the use of hybrid systems or fiber-reinforced concrete in aggressive environments to ensure structural sustainability in accordance with the SNI 1729:2020 standard.

Keywords: *Composite Structures, Shear Connectors, Bond Strength Degradation, Corrosion, SNI 1729:2020.*

ABSTRAK

Sistem struktur komposit baja-beton sangat bergantung pada integritas antarmuka melalui alat penyambung geser (shear connector) untuk mencapai aksi monolitik yang optimal. Namun, efisiensi kinerja struktur ini sering kali terdegradasi oleh penurunan kekuatan rekat (bond strength) akibat faktor lingkungan agresif dan beban mekanis jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi mekanisme degradasi dan performa sisa dari berbagai tipe konektor (seperti headed stud, PBL, kanal, dan sistem hibrida) menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan protokol PRISMA. Berdasarkan sintesis terhadap lebih dari 20 literatur bereputasi (rentang tahun 2010–2025), data numerik dari hasil uji push out dianalisis untuk membandingkan kapasitas sisa dan modus kegagalan spesimen. Temuan utama menunjukkan bahwa korosi mengakibatkan penurunan kapasitas geser secara linear akibat reduksi penampang efektif, di mana korosi sebesar 2% dapat mereduksi kekuatan rekat hingga 80%. Selain itu, paparan suhu di atas 500°C ditemukan merusak matriks beton hingga menurunkan kekuatan tumpuan sebesar 60%. Secara komparatif, sistem konektor hibrida (PBL + Stud) menunjukkan resiliensi tertinggi dengan kapasitas grup mencapai 1940 kN

berkat kontribusi tulangan penembus. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan sistem hibrida atau beton serat pada lingkungan agresif guna menjamin keberlanjutan struktur sesuai standar SNI 1729:2020.

Kata kunci: Struktur Komposit, Konektor Geser, Degradasi Kekuatan Rekat, Korosi, SNI 1729:2020.

PENDAHULUAN

Konstruksi komposit baja dan beton menjadi pilihan utama dalam infrastruktur modern karena mampu menggabungkan daktilitas baja dengan kekakuan tekan beton secara efisien. Sinergi mekanis ini sepenuhnya bergantung pada aksi komposit monolitik yang difasilitasi oleh sistem konektor geser (*shear connector*), baik berupa tipe profil (I,L,T), *headed stud*, *Perfobond Leiste* (PBL), maupun sistem hibrida. Namun, seiring waktu layan, integritas antarmuka ini terancam oleh kegagalan prematur akibat degradasi kekuatan rekat yang dipicu oleh korosi lingkungan klorida dan paparan suhu tinggi akibat kebakaran. Fenomena tersebut secara drastis mereduksi penampang efektif konektor dan melunakkan beton di sekitarnya, sehingga berisiko menghilangkan aksi komposit dan memicu kegagalan struktural yang katastrofik.

Meskipun studi eksperimental individual terhadap jenis konektor tertentu sudah banyak dilakukan, penelitian yang mensintesis data multiparameter mengenai dampak destruktif lingkungan ekstrem ini masih sangat terbatas. Oleh karena itu, rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada analisis mekanisme degradasi rekat secara mikroskopis dan makroskopis, serta evaluasi sensitivitas berbagai sistem konektor saat dihadapkan pada korosi dan paparan termal. Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan protokol PRISMA untuk membandingkan resiliensi sistem konektor konvensional versus sistem hibrida secara komprehensif, memberikan landasan kritis bagi perancangan infrastruktur jangka panjang yang tangguh.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis karakteristik penurunan performa antarmuka baja beton dan mengevaluasi keandalan kalkulasi kapasitas geser nominal (Q_n) berdasarkan standar regulasi SNI 1729:2020 pada kondisi material pasca degradasi. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan tingkat resiliensi mekanis termasuk kapasitas geser, kekakuan, dan daktilitas antara berbagai variasi sistem konektor. Melalui pendekatan ini, perilaku struktural dari tiap-tiap sistem konektor di bawah pengaruh variabel korosi dan termal dapat dipetakan secara jelas melalui visualisasi kurva hubungan beban dan gelincir (*load slip curve*).

Sintesis dan landasan empiris penelitian ini dibangun berdasarkan beberapa studi pionir terdahulu yang relevan. Di antaranya adalah penelitian Lahamukang et al. (2014) yang menemukan bahwa konektor profil tipe-I memiliki kapasitas geser tertinggi (15,22 kN) dibanding tipe-T dan L, serta studi Kuang et al. (2014) yang mengungkapkan bahwa reduksi diameter *stud* akibat korosi sebesar 2% dapat menyapakan hingga 80% kekuatan rekatnya. Sebagai pembandingan sistem modern, penelitian Shallal (2019) membuktikan tingginya kekakuan dan kapasitas konektor PBL (608,34 kN) pada pipa persegi, sementara Zheng & Zhao (2022) menunjukkan bahwa integrasi sistem hibrida (PBL + Stud) mampu menghasilkan kapasitas grup ekstrem hingga 1940 kN melalui perpaduan sifat kaku dan daktil.

Metodologi penelitian ini sepenuhnya menerapkan protokol PRISMA untuk menjamin transparansi, validitas, dan replikasibilitas dalam proses sintesis data literaturnya. Proses ekstraksi data difokuskan secara ketat pada artikel jurnal ilmiah bereputasi yang menyajikan hasil uji *push out* eksperimental laboratoris dan validasi simulasi numerik berbasis *Finite Element Analysis* (FEA). Melalui metode SLR ini, data kuantitatif berupa tingkat reduksi material dan titik-titik kritis pada kurva *load slip* kondisi terdegradasi akan diekstraksi dan dianalisis secara mendalam untuk merumuskan kesimpulan yang komprehensif.

METODE

Metodologi penelitian ini diterapkan secara sistematis dengan sepenuhnya mengadopsi protokol PRISMA yang terbagi ke dalam empat tahapan utama. Tahap pertama adalah identifikasi, yang dilakukan melalui pencarian literatur secara komprehensif pada basis data jurnal bereputasi seperti Sinta, Scopus, dan MDPI. Selanjutnya, pada tahap skrining, artikel yang telah dikumpulkan disaring secara ketat berdasarkan relevansi judul, abstrak, serta ketersediaan data numerik yang valid mengenai kapasitas geser (P_u). Tahap ketiga adalah penilaian kelayakan, di mana peninjauan teks lengkap (*full text review*) dilakukan secara mendalam untuk memastikan bahwa metodologi eksperimen yang digunakan adalah uji tekan standar (*push out test*) yang sesuai dengan regulasi Eurocode 4. Melalui proses seleksi bertahap tersebut, tahap inklusi menetapkan sebanyak 20 literatur terpilih yang memenuhi seluruh kriteria untuk diekstraksi dan diolah datanya lebih lanjut. Setelah literatur final ditetapkan, proses ekstraksi data dilakukan dengan mengelompokkan parameter ke dalam variabel input dan variabel output. Variabel input yang dikumpulkan dari studi terdahulu mencakup karakteristik fisik dan lingkungan ekstrem, yaitu tipe konektor, mutu kuat tekan beton (f_c), tingkat korosi material, dan temperatur paparan suhu tinggi. Sementara itu, variabel output difokuskan pada metrik performa struktural pasca degradasi, yang meliputi kapasitas beban puncak (P_u), tingkat kekakuan (K_s), serta karakteristik modus kegagalan yang terjadi pada antarmuka komponen komposit. Seluruh data kuantitatif dari variabel-variabel ini kemudian disintesis untuk memetakan perilaku mekanis sistem konektor secara komprehensif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Data Pengujian Numerik dan Eksperimental

Berdasarkan data kuantitatif yang dihimpun melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR), karakteristik mekanis serta modus kegagalan dari masing-masing sistem konektor geser menunjukkan variasi performa yang sangat kontras. Integrasi data multiparameter ini mempermudah pemetaan kapasitas beban sisa (*residual capacity*) dari antarmuka komposit yang telah mengalami degradasi lingkungan maupun mekanis.

Tabel 1. Kinerja Alat Penyambung Geser Baja-Beton

Peneliti (Tahun)	Tipe Konektor	Mutu Beton (f_c)	Beban Puncak (P_u)	Kegagalan Dominan / Karakteristik
Lahamukang (2014)	<i>I-Type Connector</i>	20 MPa	15,22 kN	<i>Pure Shear Failure</i>
Lahamukang (2013)	<i>Headed Stud</i>	20 MPa	33,83 kN	<i>Stud Bending</i>
Shallal (2019)	PBL (<i>Square</i>)	55 MPa	608,34 kN	<i>High Stiffness</i>
Zheng/Zhao (2022)	Hibrida (PBL + Stud)	35,6 MPa	1940 kN (Grup)	<i>Symmetrical Cracks</i>
Kuang (2014)	<i>Corroded Stud</i>	30 MPa	Reduksi 57% – 80%	<i>Interface Debonding</i>

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Analisis Komparatif Performa Konektor dalam Kondisi Ideal

1. Konektor Konvensional (*I-Type* vs. *Headed Stud*): Pada tingkat mutu beton dasar yang identik ($f_c=20\text{MPa}$), penggunaan *Headed Stud* menghasilkan kapasitas beban puncak sebesar 33,83 kN, yang berarti dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan dengan *I-Type Connector* yang hanya mencapai 15,22 kN. Perbedaan signifikan ini dipengaruhi secara langsung oleh modus kegagalan intrinsik masing-masing komponen. *I-Type* mengalami

kegagalan geser murni (*Pure Shear Failure*) yang cenderung mendadak, sedangkan *Headed Stud* mengalami tekuk (*Stud Bending*) yang memberikan kontribusi daktilitas lebih baik sebelum runtuh.

2. Sistem Konektor Modern (PBL vs. Hibrida): Konektor *Perfobond Leiste* (PBL) tipe persegi yang dipadukan dengan beton mutu tinggi ($f'_c=55\text{MPa}$) mampu menghasilkan kapasitas geser masif hingga 608,34 kN disertai dengan karakteristik kekakuan awal yang tinggi (*High Stiffness*). Di sisi lain, lompatan performa ekstrem ditunjukkan oleh sistem Hibrida (kombinasi PBL dan Stud) yang mampu mencapai kapasitas grup hingga 1940 kN pada mutu beton 35,6 MPa dengan pola retak yang simetris (*Symmetrical Cracks*). Kombinasi ini berhasil memadukan sifat kaku dari PBL dan sifat daktil dari *stud*.

Mekanisme Degradasi Antarmuka Baja-Beton

Catatan Kritis Durabilitas: Faktor lingkungan ekstrem terbukti memiliki dampak destruktif yang jauh lebih radikal terhadap kekuatan rekat dibandingkan dengan akumulasi beban mekanis statis biasa.

1. Dampak Kebencanaan Korosi: Penurunan diameter efektif alat penyambung akibat korosi bertindak sebagai pelemah utama integritas struktur komposit. Korosi ringan sebesar 2% saja sudah mampu menyalakan hingga 80% kekuatan rekat awal pada antarmuka. Pada kondisi korosi lanjut, spesimen mengalami kehilangan kapasitas geser berkisar antara 57% hingga 80% akibat fenomena *Interface Debonding*, di mana hilangnya lekatan total memaksa runtuhnya aksi monolitik komposit secara prematur.
2. Dampak Paparan Termal Suhu Tinggi: Ketika struktur dihadapkan pada skenario kebakaran dengan suhu di atas 500°C , terjadi dehidrasi kimia secara masif pada senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) di dalam matriks beton. Pelemahan termal ini mereduksi kekuatan tumpuan (*bearing strength*) beton di sekitar konektor hingga mencapai 60%. Akibatnya, beton pelindung di sekitar konektor melunak dengan cepat dan memicu kegagalan getas, terutama pada aplikasi beton mutu tinggi.

Evaluasi Relevansi Regulasi SNI 1729:2020

Berdasarkan regulasi spesifikasi bangunan gedung baja struktural SNI 1729:2020, perhitungan teoritis kapasitas geser nominal (Q_n) dirumuskan dengan melibatkan parameter luas penampang konektor (A_{sa}), kuat tekan beton (f'_c), dan modulus elastisitas beton (E_c):

$$Q_n = 0,5A_{sa}\sqrt{f'_c \cdot E_c} \dots\dots\dots(1)$$

Namun, hasil analisis data SLR dalam penelitian ini mengungkap adanya celah keamanan sisa (*residual safety margin*) yang kritis. Formula normatif di atas berasumsi bahwa seluruh material berada dalam kondisi prima tanpa cacat. Ketika degradasi lingkungan terjadi, korosi secara drastis mereduksi nilai A_{sa} , sementara paparan termal merusak nilai f'_c . Oleh karena itu, kalkulasi standar SNI 1729:2020 berisiko menjadi tidak konservatif jika diterapkan pada infrastruktur pasca degradasi tanpa adanya modifikasi koefisien reduksi lingkungan. Dalam kondisi inilah sistem hibrida (PBL + Stud) memberikan solusi proteksi ganda: PBL menahan deformasi awal melalui kekakuannya, sedangkan *headed stud* menjamin struktur tidak langsung runtuh secara katastrofik pada tahap plastis.

Kontribusi Penelitian

Berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh, penelitian ini memberikan kontribusi teoritis maupun praktis yang signifikan bagi perkembangan teknik struktur:

Kontribusi Metodologis Kontemporer: Penelitian ini menjadi salah satu referensi yang mengintegrasikan data multiparameter secara komprehensif terkait dampak simultan korosi dan paparan termal menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan protokol PRISMA yang ketat. Hal ini menghasilkan pemetaan resiliensi yang valid, objektif, dan dapat direplikasi oleh peneliti selanjutnya.

Penyempurnaan Rekomendasi Desain Infrastruktur: Melalui karakteristik kurva hubungan beban dan gelincir (*load slip curve*), studi ini menyajikan pemetaan perilaku mekanis yang jelas mengenai superioritas sistem hibrida (PBL + Stud). Hasil ini menjadi landasan praktis bagi para insinyur perencana untuk beralih dari konektor konvensional ke sistem hibrida atau mengaplikasikan beton serat pada konstruksi di lingkungan agresif demi menjamin keberlanjutan umur layan struktur.

Pengayaan Basis Data Evaluasi Regulasi Nasional: Penelitian ini memberikan kontribusi evaluatif yang krusial terhadap tingkat keandalan kalkulasi kapasitas geser nominal (Q_n) pada standar SNI 1729:2020. Data penurunan performa pasca degradasi ini dapat dijadikan bahan pertimbangan bagi Badan Standardisasi Nasional (BSN) untuk merumuskan faktor reduksi lingkungan jangka panjang pada pembaruan regulasi bangunan baja struktural di masa mendatang.

KESIMPULAN

Degradasi kekuatan rekat merupakan proses multifaktorial yang dipicu oleh korosi baja dan dehidrasi termal beton. Korosi ringan sebesar 2% memiliki dampak destruktif yang lebih besar terhadap kekuatan rekat daripada akumulasi beban mekanis statis biasa. Sistem konektor hibrida (PBL + Stud) terbukti paling resilien dalam mempertahankan kapasitas sisa struktur di lingkungan agresif karena stabilitas fase pasca puncaknya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang mendalam kepada seluruh pihak serta rekan sejawat akademisi yang telah memfasilitasi, memberikan kritik membangun, dan mendukung penuh jalannya studi tinjauan literatur sistematis ini hingga dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, J. H., Kim, S. H., & Jeong, Y. J. (2008). Shear behaviour of perfobond rib shear connector. *Magazine of Concrete Research*.
- Bingol, A. F., & Gül, R. (2009). Residual bond strength between steel bars and concrete after elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 44(6).
- Deng, W., Xiong, Y., Liu, D., & Zhang, J. (2019). Static and fatigue behavior of shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Hassan, M. K., et al. (2018). Effect of high temperature on bond strength of reinforced concrete. *Engineering Structures*.
- Lahamukang, K. M., Pah, J. J., & Messah, Y. A. (2014). Kuat Geser Komposit Baja-Beton dengan Variasi Bentuk Penghubung Geser. *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1).
- Lee, P. G., Shim, C. S., & Chang, S. P. (2005). Static and fatigue behavior of large stud shear connectors. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Liu, X., Tan, A., & Yao, J. (2018). Explosive spalling of high-strength concrete at elevated

- temperatures. *Journal of Building Engineering*.
- Ma, Q., et al. (2015). *Mechanical properties of concrete at high temperature—A review. Construction and Building Materials*.
- Medberry, S. B., & Shahrooz, B. M. (2002). *Perfobond shear connector for composite construction. Eng. J. AISC*.
- Oguejiofor, E. C., & Hosain, M. U. (1997). *A parametric study of perfobond rib shear connectors. Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Qureshi, J., Lam, D., & Ye, J. (2011). *Effect of shear connector spacing and layout on the capacity. Journal of Constructional Steel Research*.
- Shallal, M. A. (2019). *Push-out Tests for Determining Shear Strength and Stiffness of Perfobond Connector. Al-Qadisiyah Journal*.
- Valente, I., & Cruz, P. J. S. (2004). *Experimental analysis of perfobond shear connection. Journal of Constructional Steel Research*.
- Vianna, J. C., et al. (2013). *Experimental study of perfobond shear connectors. Journal of Constructional Steel Research*.
- Zheng, G., & Zhao, G. (2022). *Comparative study on shear behaviour of composite shear connectors. Buildings*.
- Zheng, C., Yan, L., Liu, L., et al. (2025). *Bond strength and degradation of composite structures. Engineering Structures*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1729:2020: Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*.
- European Committee for Standardization. (2004). *Eurocode 4: EN-1994-1-1: Design of composite steel and concrete structures*.
- Leonhardt, F. (1987). *Perfobond rib shear connector. Vorlesungen über Massivbau*.
- Islam, M. I. (2022). *Perencanaan Elemen Struktur Baja Beton Komposit SNI 1729:2020. Artikel UNRAM*.