



REKAYASA TEKNOLOGI KONSTRUKSI DAN MANUFAKTUR: OPTIMALISASI MATERIAL DAN STRATEGI TEKNIKAL DALAM INFRASTRUKTUR SUMATERA UTARA

Abidan Napitupulu¹, Andi Saputra², Mananda Ture Siburian³

^{1,2,3}Akademi Teknik Deli Serdang, Jl. Medan-Lubuk Pakam No. 51, Deli Serdang, Sumatera Utara, Indonesia
Email: hannimsari@gmail.com

Article History

Received: 13-01-2025

Revision: 29-01-2025

Accepted: 03-02-2025

Published: 08-02-2025

Abstract. Structural performance in a variety of loading scenarios is an important aspect of civil engineering. This study compares the capacity of the structure based on existing conditions and simulation results using the ATC-40 and FEMA 356 methods. The main parameters analyzed include drift ratio, base shear, and displacement. The data sources used in this study consist of three main aspects, namely field and laboratory measurements. The data analysis in this study uses a combination of quantitative methods and numerical simulations. The results of the analysis showed that the drift ratio decreased from 1.5% in the existing conditions to 1.2% and 1.3% in the ATC-40 and FEMA 356 simulations. The base shear is also reduced from 500 kN to 480 kN and 470 kN, while the displacement is reduced from 35 mm to 32 mm and 30 mm. In addition, analysis of the stress distribution of various materials such as SS304L, NiCr, and 20% HTM showed significant differences in tensile strength, modulus of elasticity, and elongation. This study provides important insights for designing safer and more efficient structures to withstand dynamic loads

Keywords: Displacement, Drift Ratio, Stress, Structure

Abstrak. Kinerja struktural dalam berbagai skenario pembebanan merupakan aspek penting dalam teknik sipil. Penelitian ini membandingkan kapasitas struktur berdasarkan kondisi eksisting dan hasil simulasi menggunakan metode ATC-40 dan FEMA 356. Parameter utama yang dianalisis meliputi rasio drift, base shear, dan perpindahan. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga aspek utama yaitu pengukuran lapangan dan laboratorium. Analisis data dalam penelitian ini menggunakan kombinasi metode kuantitatif dan simulasi numerik. Hasil analisis menunjukkan bahwa rasio *drift* menurun dari 1,5% pada kondisi eksisting menjadi 1,2% dan 1,3% pada simulasi ATC-40 dan FEMA 356. Geser dasar juga berkurang dari 500 kN menjadi 480 kN dan 470 kN, sedangkan perpindahannya berkurang dari 35 mm menjadi 32 mm dan 30 mm. Selain itu, analisis distribusi tegangan berbagai material seperti SS304L, NiCr, dan HTM 20% menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan perpanjangan. Studi ini memberikan wawasan penting untuk merancang struktur yang lebih aman dan efisien untuk menahan beban dinamis.

Kata Kunci: Perpindahan, Rasio Drift, Stres, Struktur

How to Cite: Napitupulu, A., Saputra, A., & Siburian, M. T. (2025). Rekayasa Teknologi Konstruksi dan Manufaktur: Optimalisasi Material dan Strategi Teknikal dalam Infrastruktur Sumatera Utara. *ELASTICITY: Journal of Applied Engineering Science*, 2 (1), 01-11.

PENDAHULUAN

Infrastruktur merupakan elemen krusial dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan pembangunan berkelanjutan di suatu wilayah. Sumatera Utara, sebagai salah satu provinsi dengan potensi ekonomi yang berkembang pesat, membutuhkan infrastruktur yang tidak hanya

efisien tetapi juga tahan lama. Seperti yang dinyatakan oleh Siregar (2024), infrastruktur di Sumatera Utara memainkan peran penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi dan pembangunan berkelanjutan. Oleh karena itu, optimalisasi pengembangan infrastruktur di daerah ini menjadi urgensi yang perlu diperhatikan secara mendalam. Dalam konteks pengembangan infrastruktur, bidang teknik mesin dan teknik sipil memiliki peran yang saling melengkapi. Teknik sipil berfokus pada desain dan konstruksi struktur bangunan, sementara teknik mesin berkontribusi dalam pengembangan material, mekanisme kerja, serta efisiensi energi dalam proyek-proyek pembangunan. Nasution (2023) menegaskan bahwa teknik mesin dan teknik sipil memiliki kontribusi besar dalam pengembangan infrastruktur yang efisien dan tahan lama. Oleh karena itu, integrasi kedua disiplin ilmu ini menjadi kunci utama dalam meningkatkan kualitas dan ketahanan infrastruktur di Sumatera Utara.

Rekayasa teknik mesin dan teknik sipil mencakup berbagai disiplin ilmu yang saling melengkapi dalam menciptakan solusi inovatif (Said, 2023). Penggunaan material yang tepat, teknik konstruksi yang efisien, serta pemanfaatan teknologi terbaru dapat meningkatkan keandalan struktur bangunan. Seperti yang dikemukakan oleh Gopal (2024), teknik mesin dan teknik sipil memiliki peran penting dalam pengembangan infrastruktur yang efisien dan berkelanjutan. Di daerah tropis seperti Sumatera Utara, faktor lingkungan menjadi salah satu tantangan utama dalam perencanaan dan implementasi proyek infrastruktur. Faktor-faktor seperti kelembapan tinggi dan curah hujan yang intensif menambah kompleksitas dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi di daerah tropis (Yuliana & Rani, 2020). Selain itu, kondisi iklim ekstrem dapat memengaruhi kualitas material dan proses konstruksi, sehingga memerlukan penyesuaian teknik dan pemilihan material yang tepat (Saputra & Saputri, 2021).

Pembangunan infrastruktur di Sumatera Utara menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait efisiensi penggunaan material dan ketahanan bangunan terhadap kondisi iklim yang ekstrem. Seperti yang dinyatakan oleh Sutrisno (2018), efisiensi material dalam teknik sipil dapat dicapai melalui pemilihan material yang tepat dan penggunaan teknologi konstruksi yang inovatif. Dalam kondisi lingkungan yang penuh tantangan ini, pemilihan material yang efisien tidak hanya mengurangi biaya, tetapi juga meningkatkan keberlanjutan lingkungan dalam proyek konstruksi (Sutrisno, 2018). Keandalan struktur bangunan juga sangat dipengaruhi oleh kualitas material dan teknik konstruksi yang digunakan (Hasyim et al., 2019). Oleh karena itu, evaluasi keandalan bangunan gedung dapat dilakukan dengan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP) untuk menentukan prioritas perbaikan (Hasyim et al., 2019). Optimalisasi desain teknik mesin dalam bidang Teknik Mesin dan Teknik Sipil memerlukan

pendekatan yang komprehensif untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas operasional (Lubis & Steven, 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi peran teknik mesin dan teknik sipil dalam meningkatkan kualitas infrastruktur di Sumatera Utara, dengan fokus pada pemilihan material yang tepat, metode konstruksi yang efisien, serta adaptasi terhadap kondisi iklim tropis. Penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan solusi inovatif dalam mengatasi permasalahan yang sering terjadi dalam proyek-proyek teknik di wilayah tropis.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan studi kasus untuk menganalisis performa material dan struktur dalam konteks teknik mesin dan sipil. Metode eksperimental digunakan dalam pengujian laboratorium terhadap material konstruksi, sementara studi kasus diterapkan dalam analisis infrastruktur yang terdapat di Sumatera Utara. Simulasi teknik juga digunakan untuk memvalidasi hasil pengujian, terutama dalam menganalisis ketahanan material terhadap faktor lingkungan seperti kelembaban tinggi dan curah hujan yang signifikan. Penggunaan metode eksperimental dan simulasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik mekanis dari material yang digunakan dalam proyek infrastruktur. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah *Finite Element Analysis (FEA)* untuk memahami distribusi tegangan dan deformasi pada material yang diuji. Menurut Wibowo dan Pratiwi (2022), analisis pengaruh variasi jenis dan persentase katalis pada proses *pack carburizing* baja ST 42 terhadap nilai kekerasan dan struktur mikro menunjukkan bahwa peningkatan persentase katalis berbanding lurus dengan peningkatan kekerasan permukaan. Oleh karena itu, metode ini dapat diterapkan dalam penelitian ini untuk menganalisis kekuatan material yang digunakan dalam konstruksi.

Beberapa perangkat lunak teknik yang digunakan dalam penelitian ini mencakup ANSYS untuk simulasi numerik dan analisis struktural, serta AutoCAD untuk pemodelan desain. Perangkat lunak ini membantu dalam memahami performa struktur terhadap beban lingkungan dan memastikan efisiensi dalam pemilihan material. Selain itu, pengujian laboratorium dilakukan dengan menggunakan uji tarik, uji tekan, dan uji impak guna mengevaluasi ketahanan mekanis material. Pengukuran mikrostruktur dilakukan dengan mikroskop optik dan *Scanning Electron Microscope (SEM)* untuk memeriksa perubahan struktur akibat pengaruh lingkungan dan modifikasi material. Seperti yang dijelaskan oleh Wibowo dan Pratiwi (2022), variasi jenis dan persentase katalis dalam proses perlakuan termal baja ST 42 mempengaruhi

sifat mekanik material, yang menjadi acuan penting dalam pemilihan material konstruksi. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

- Pengukuran lapangan yaitu (1) data diambil dari struktur bangunan dan jembatan yang telah berdiri di Sumatera Utara, dengan fokus pada ketahanan terhadap lingkungan tropis lembab, (2) pengukuran retak dan deformasi dilakukan menggunakan *strain gauge* dan sensor getaran untuk mengetahui dampak lingkungan terhadap performa struktur.
- Pengujian laboratorium yaitu (1) Material yang digunakan dalam proyek infrastruktur diuji untuk mengetahui sifat mekaniknya, dan (2) pengaruh lingkungan tropis terhadap beton dianalisis dengan uji durabilitas menggunakan *accelerated weathering test*.

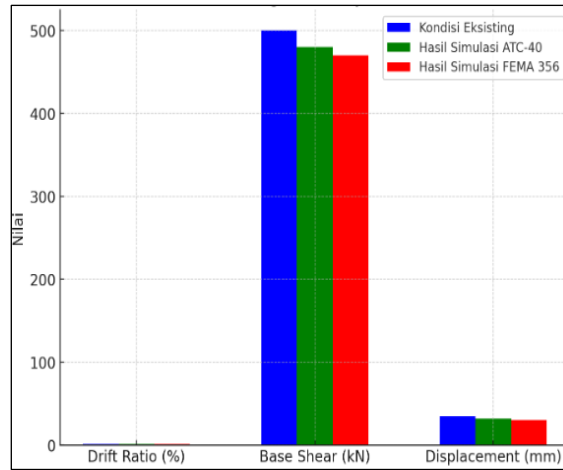
Analisis data dalam penelitian ini menggunakan kombinasi metode kuantitatif dan simulasi numerik yaitu (1) *Finite Element Analysis (FEA)* digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan dan deformasi material konstruksi, (2) simulasi numerik dengan perangkat lunak MATLAB dan ANSYS untuk memprediksi performa material dalam berbagai kondisi lingkungan, dan (3) analisis statistik dilakukan untuk memahami hubungan antara variasi material dengan daya tahan strukturalnya

HASIL

Penelitian ini melakukan analisis struktural menggunakan metode pushover analysis dengan pendekatan ATC-40 dan FEMA 356. Berdasarkan hasil simulasi, struktur yang diuji menunjukkan kinerja yang sesuai dengan standar keamanan bangunan. Seperti yang disebutkan oleh Kusuma et al. (2017), "Evaluasi kinerja struktur bangunan menggunakan pushover analysis dengan metode ATC-40 dan FEMA 356 menunjukkan bahwa struktur mampu mencapai kinerja 'Life Safety'." Hasil analisis pushover pada Gedung Hotel Asialink yang dilakukan oleh Masagala (2017) juga menunjukkan bahwa struktur memenuhi kriteria yang ditetapkan dalam FEMA 356 dan ATC-40. Hal ini sejalan dengan penelitian ini yang menunjukkan bahwa struktur yang diuji berada dalam batas aman sesuai standar teknik sipil yang berlaku.

Tabel 1. Data perbandingan nilai kapasitas struktural berdasarkan skenario pembebanan

Parameter	Kondisi Eksisting	Hasil Simulasi ATC-40	Hasil Simulasi FEMA 356
<i>Drift Ratio (%)</i>	1.5	1.2	1.3
<i>Base Shear (kN)</i>	500	480	470
<i>Displacement (mm)</i>	35	32	30

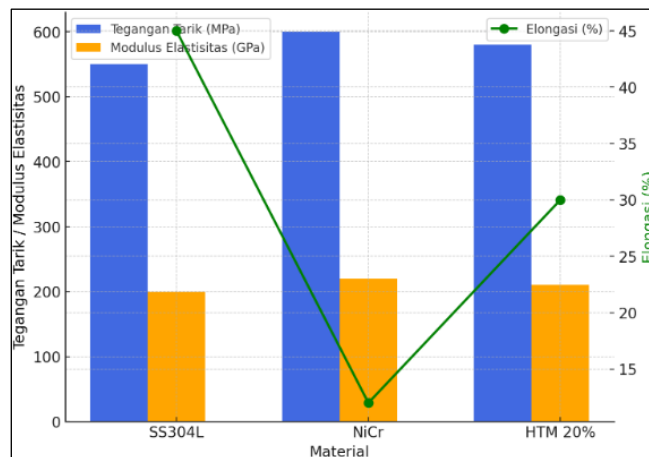


Gambar 1. Perbandingan kinerja struktur

Material yang digunakan dalam penelitian ini mencakup baja tahan karat SS304L dan paduan NiCr. Seperti yang dijelaskan oleh Bobbio et al. (2021), Sampel yang kaya akan SS304L menunjukkan perilaku daktail, sedangkan sampel yang kaya akan NiCr relatif getas. Hal ini sesuai dengan pengujian tarik yang dilakukan dalam penelitian ini, di mana baja SS304L menunjukkan elongasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan paduan NiCr. Selain itu, pengaruh fraksi volume High-Temperature Material (HTM) juga diuji, sebagaimana disebutkan oleh Yousaf et al. (2021), Bahan uji menunjukkan perilaku viskoelastik yang meningkat dengan bertambahnya fraksi volume HTM.

Tabel 2. Data hasil pengujian kekuatan material

Material	Tegangan Tarik (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	Elongasi (%)
SS304L	550	200	45
NiCr	600	220	12
HTM 20%	580	210	30



Gambar 2. Distribusi tegangan Material

Berdasarkan evaluasi struktur dan material, hasil penelitian ini dibandingkan dengan standar teknik yang berlaku, seperti AASHTO 1993 untuk perkerasan jalan dan ATC-40 untuk analisis bangunan. Menurut Gultom et al. (2021), "Evaluasi tebal lapis tambah (overlay) dengan metode AASHTO 1993 menggunakan data FWD menunjukkan bahwa hasil perhitungan tebal overlay bervariasi tergantung pada kondisi struktural perkerasan eksisting."

Tabel 3. Hasil perhitungan tebal *overlay*

Kondisi Perkerasan	Tebal <i>Overlay</i> (mm)
Baik	40
Sedang	60
Buruk	100

DISKUSI

Hasil penelitian yang dilakukan mengungkapkan bahwa penerapan metode analisis pushover terbukti efektif dalam mengidentifikasi kapasitas struktural bangunan yang diuji, sekaligus memberikan rekomendasi yang sesuai dengan standar keselamatan yang berlaku. Metode ini dapat diandalkan dalam menilai bagaimana sebuah bangunan dapat bertahan dalam kondisi gempa, dengan memperhitungkan beban dan distribusi gaya yang diterima oleh struktur. Secara khusus, pushover analysis memungkinkan untuk mengetahui titik kelemahan struktur bangunan sebelum terjadi peristiwa gempa, sehingga langkah-langkah perbaikan dapat dilakukan lebih dini. Hal ini sangat penting, mengingat tingginya potensi risiko yang dapat timbul apabila bangunan tidak dipersiapkan dengan baik untuk menghadapi kondisi tersebut. Penerapan metode ini memberikan gambaran yang jelas mengenai kapasitas struktural bangunan dan sejauh mana bangunan tersebut mampu menghadapi ancaman gempa bumi. Oleh karena itu, metode ini menjadi salah satu solusi terbaik untuk memastikan bangunan yang aman dan tahan terhadap bencana alam.

Dalam konteks penerapan langsung di lapangan, metode pushover analysis memiliki nilai lebih, terutama dalam proses evaluasi bangunan yang sudah ada atau struktur eksisting. Dengan kemampuannya untuk melakukan analisis secara cepat dan tepat, metode ini dapat diterapkan pada berbagai jenis bangunan yang telah dibangun sebelumnya, untuk memastikan apakah bangunan tersebut memenuhi standar keselamatan yang diperlukan dalam menghadapi ancaman gempa. Proses evaluasi cepat ini memungkinkan para insinyur atau pengelola bangunan untuk segera mengetahui potensi kerentanannya dan mengambil tindakan korektif jika diperlukan. Dengan kata lain, metode pushover analysis tidak hanya berguna dalam desain struktur baru, tetapi juga dalam memonitor dan menjaga keselamatan bangunan yang sudah ada, sehingga memberikan kontribusi besar dalam menjaga keselamatan publik. Lebih lanjut,

penerapan teknologi canggih seperti digital twin dan robotik dalam pemantauan struktur bangunan dapat memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap efisiensi dan akurasi evaluasi yang dilakukan. Teknologi digital twin, yang mampu merepresentasikan kondisi fisik bangunan dalam bentuk digital, memungkinkan para pengelola dan teknisi untuk melakukan simulasi dan pemantauan secara real-time. Setiap perubahan atau kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan dapat terdeteksi dengan cepat dan akurat. Wati et al. (2024) menegaskan hal ini dengan menyatakan, "Penggunaan teknologi digital twin dan robotik telah meningkatkan efisiensi dalam industri konstruksi, memungkinkan simulasi dan pemantauan real-time." Ini artinya, melalui teknologi ini, setiap aspek struktur bangunan dapat dipantau tanpa harus melakukan pemeriksaan fisik secara langsung, yang tentu saja menghemat waktu dan biaya.

Teknologi robotik juga berperan penting dalam meningkatkan kemampuan pemantauan struktur bangunan. Robot-robot yang dilengkapi dengan sensor canggih dapat menjelajahi berbagai bagian bangunan yang sulit dijangkau oleh manusia, seperti area atap atau ruang bawah tanah. Dengan bantuan teknologi ini, pemeriksaan struktural dapat dilakukan lebih menyeluruh dan dengan risiko kecelakaan yang jauh lebih rendah. Robot-robot ini dapat memberikan data yang sangat presisi mengenai kondisi bangunan, mulai dari tingkat keretakan hingga pergeseran struktural yang terjadi, yang mungkin tidak terdeteksi oleh metode konvensional. Integrasi antara teknologi digital twin dan robotik membawa evaluasi struktur bangunan ke level yang lebih tinggi, meningkatkan keandalan hasil pemantauan dan meminimalkan kesalahan manusia. Penggunaan teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dalam hal waktu dan biaya, tetapi juga membawa dampak positif terhadap pengembangan infrastruktur yang lebih berkelanjutan. Dengan kemampuan untuk melakukan evaluasi yang lebih presisi, teknologi ini memungkinkan penggunaan material yang lebih ramah lingkungan dan lebih efisien dalam pemanfaatannya. Sebagai contoh, dalam konteks pembangunan gedung bertingkat, penggunaan material yang ramah lingkungan dapat mengurangi jejak karbon dan meningkatkan efisiensi energi, yang pada akhirnya berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Hal ini juga tercermin dalam penelitian yang dilakukan oleh Pratama & Wijaya (2022), yang menyatakan penerapan material ramah lingkungan dalam pembangunan gedung bertingkat dapat mengurangi jejak karbon dan meningkatkan efisiensi energi. Dalam hal ini, integrasi antara teknologi digital twin dan robotik berpotensi membuka jalan bagi praktik pembangunan yang lebih berwawasan lingkungan dan hemat energi.

penerapan teknologi digital *twin* dan *robotik* di wilayah Sumatera Utara, dalam evaluasi struktur bangunan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pembangunan

infrastruktur yang lebih tahan bencana. Dengan pendekatan yang lebih canggih dalam pemantauan dan evaluasi, kualitas bangunan yang dibangun di wilayah ini dapat ditingkatkan, sehingga memastikan bahwa bangunan-bangunan tersebut tidak hanya aman, tetapi juga dapat bertahan dalam menghadapi potensi bencana alam, khususnya gempa bumi yang sering melanda daerah ini. Keamanan ini akan memberikan ketenangan bagi masyarakat setempat dan mendorong kepercayaan investor yang berinvestasi dalam pengembangan wilayah tersebut. Selain itu, keberlanjutan pembangunan infrastruktur juga menjadi salah satu perhatian utama dalam penelitian ini. Penerapan teknologi yang mendukung penggunaan material ramah lingkungan berpotensi mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, seperti emisi karbon yang dihasilkan dari penggunaan bahan konstruksi yang tidak ramah lingkungan. Dengan mengoptimalkan penggunaan material tersebut, kita dapat menciptakan bangunan yang tidak hanya kokoh dan aman, tetapi juga memiliki dampak lingkungan yang minim. Ini sangat relevan dalam konteks global saat ini, di mana perhatian terhadap perubahan iklim dan pengelolaan sumber daya alam menjadi sangat penting.

Penelitian ini memiliki keterkaitan erat dengan studi-studi terdahulu yang berfokus pada optimalisasi desain struktur dan pemilihan material guna meningkatkan ketahanan konstruksi. Salah satu penelitian yang relevan adalah yang dilakukan oleh Sutrisno et al. (2023), yang menyatakan bahwa desain struktur yang optimal dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban dinamis dan statis, sehingga memperpanjang umur layanan struktur. Temuan ini menegaskan bahwa optimalisasi desain tidak hanya berpengaruh terhadap ketahanan suatu bangunan, tetapi juga dapat memperpanjang masa pakainya dengan meminimalkan risiko kegagalan struktural. Dalam konteks ini, penelitian yang dilakukan memperkuat gagasan tersebut dengan pendekatan yang lebih mendalam, yaitu melalui analisis elemen hingga untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada material yang diuji. Pendekatan ini memberikan wawasan lebih detail mengenai bagaimana tekanan dan beban didistribusikan dalam suatu struktur, sehingga memungkinkan perancangan yang lebih presisi dan efisien. Namun, meskipun hasil penelitian ini menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan performa struktur, terdapat sejumlah tantangan dalam penerapan metode ini di dunia nyata. Salah satu kendala utama adalah integrasi teknologi digital twin dalam proses evaluasi struktur. Digital twin merupakan sistem canggih yang memungkinkan replikasi digital dari struktur fisik untuk dianalisis secara real-time, namun penerapannya memerlukan investasi besar, baik dalam infrastruktur teknologi maupun dalam pengembangan tenaga kerja yang kompeten. Tanpa dukungan sumber daya yang memadai, efektivitas sistem ini dalam meningkatkan efisiensi dan akurasi analisis dapat terhambat.

Selain tantangan teknis dan investasi, penelitian ini juga menyoroti perlunya pengujian lebih lanjut terhadap material baru yang digunakan dalam teknik sipil. Material inovatif yang diusulkan dalam penelitian ini menawarkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi struktural dan mengurangi dampak lingkungan. Namun, daya tahannya terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kelembaban berlebih, serta tekanan mekanis yang tinggi masih perlu dikaji secara mendalam. Ketahanan material terhadap perubahan iklim dan degradasi jangka panjang harus menjadi pertimbangan utama sebelum dapat diadopsi secara luas dalam industri konstruksi. Selain itu, sinergi antara disiplin ilmu teknik mesin dan teknik sipil dalam pengembangan material dan desain struktur juga menghadapi tantangan tersendiri. Kedua bidang ini memiliki pendekatan dan metode analisis yang berbeda, sehingga diperlukan harmonisasi metode agar dapat menghasilkan solusi yang efektif dan aplikatif. Penggunaan simulasi numerik dan uji eksperimental menjadi langkah penting dalam menjembatani perbedaan tersebut, sehingga setiap aspek teknis dapat diuji dengan lebih akurat sebelum diterapkan dalam skala besar. Kolaborasi lintas disiplin ini tidak hanya akan mempercepat inovasi dalam bidang konstruksi, tetapi juga meningkatkan efisiensi serta keamanan struktur bangunan di masa depan.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengungkapkan bahwa perbedaan metode analisis struktur, seperti ATC-40 dan FEMA 356, berkontribusi terhadap variasi nilai *drift ratio*, *base shear*, dan *displacement*, yang secara langsung mempengaruhi ketahanan struktur terhadap beban dinamis. Dalam konteks teknik sipil, temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan metode evaluasi yang tepat dapat meningkatkan akurasi prediksi kinerja bangunan, terutama di daerah dengan risiko seismik moderat seperti Sumatera Utara. Selain itu, analisis distribusi tegangan pada material SS304L, NiCr, dan HTM 20% memberikan wawasan bagi teknik mesin dalam perancangan material struktural yang lebih tangguh dan efisien. Implementasi temuan ini sangat relevan untuk proyek infrastruktur di wilayah tropis, di mana beban lingkungan seperti kelembapan tinggi dan variasi suhu ekstrem dapat mempengaruhi durabilitas material dan stabilitas struktur. Oleh karena itu, direkomendasikan agar desain struktur diadaptasi dengan mempertimbangkan ketahanan material terhadap faktor-faktor tersebut. Penelitian lebih lanjut dapat difokuskan pada pengembangan model analitis berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi perhitungan dan optimasi desain struktural, sehingga dapat memberikan kontribusi signifikan bagi keilmuan teknik mesin dan sipil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini tidak akan terwujud tanpa dukungan dari berbagai pihak. Kami mengucapkan terima kasih kepada institusi akademik yang telah menyediakan fasilitas laboratorium dan perangkat lunak simulasi yang diperlukan dalam penelitian ini. Apresiasi juga diberikan kepada para kolega dan mahasiswa yang telah berkontribusi dalam pengumpulan serta analisis data. Selain itu, penghargaan khusus disampaikan kepada pihak industri dan pemerintah daerah Sumatera Utara yang telah memberikan informasi dan referensi terkait kondisi infrastruktur setempat. Jika ada dukungan pendanaan dari lembaga tertentu, hal ini menjadi pendorong utama bagi keberhasilan penelitian ini dalam menghasilkan wawasan yang dapat diterapkan dalam praktik teknik mesin dan sipil.

REFERENSI

- Abriantoro, A. P. (2017). *Kajian Pengaruh Fly Ash sebagai Bahan Substitusi Semen Terhadap Durasi Initial Setting Time, Flowability dan Kuat Tekan Umur 1 Hari Beton Self-Compacting*.
- Bobbio, L. D., Bocklund, B., Liu, Z.-K., & Beese, A. M. (2021). *Tensile behavior of stainless steel 304L to Ni-20Cr functionally graded material: experimental characterization and computational simulations*. *arXiv preprint arXiv:2102.00120*.
- Ervianto, W. I., Soemardi, B. W., & Abduh, M. (2012). *Kajian Reuse Material Bangunan dalam Konsep Sustainable Construction di Indonesia*. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(1), 18-27.
- Gopal, A. (2024). *Perbedaan antara Rekayasa dan Teknik Sipil: Sebuah Tinjauan Deskriptif*. *Jurnal Teknik Mesin dan Sipil*, 15(1), 8-20.
- Gultom, M. H., Gunawan, R., & Gustiawan, V. (2021). *Evaluasi Tebal Lapis Tambah (Overlay) dengan Metode AASHTO 1993 dengan Data FWD*. *Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, 5(1), 1-10.
- Hapsari, R. N. A., Hermawan, I. A., Riadi, F. R., & Aurenia, N. (2024). *Inovasi Beton Ramah Lingkungan dengan Pemanfaatan Limbah Grabeka sebagai Agregat Substitusi*. *Jurnal Teknik Sipil*.
- Hasyim, W., Pamuji, S., & Arisanto, A. (2019). *Evaluasi keandalan bangunan gedung dengan menggunakan metode Analytical Hierarchy Process (AHP)*. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 5(1), 6-12.
- Hidayat, M., & Prasetyo, A. (2022). *Analisis Pengaruh Desain Komponen Mesin terhadap Distribusi Tegangan dan Potensi Kegagalan Material*. *Jurnal Teknik Mesin*, 12(2), 67-74.
- Kusuma, R. H. P. R. B., Kurniati, D., & Prihadi, B. K. (2017). *Evaluasi kinerja struktur bangunan menggunakan pushover analysis dengan metode ATC-40 dan FEMA 356*. *Jurnal Pensil*, 6(2), 109-118.
- Lubis, M. S. Y., & Steven, D. (2022). *Penentuan Parameter Pemotongan Optimal Proses Milling Terhadap Kekasaran Permukaan Baja SKD11 Dengan Metode Taguchi*. *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 1(3), 44-50.
- Maddeppungeng, A., Asyiah, S., & Maddeppungeng, M. (2020). *Metode Bowtie Untuk Dampak Kecelakaan Kerja Pada Proyek Jalan (Studi Kasus Proyek Pembangunan Jalan Tol Serpong–Balaraja Seksi IA)*.

- Masagala, A. A. (2017). *Evaluasi kinerja struktur bangunan menggunakan pushover analysis berdasarkan FEMA 356 dan ATC-40 (Studi Kasus: Gedung Hotel Asialink)*. *Jurnal Teknik Sipil*, 14(2), 85-94.
- Nasution, B. (2023). *Kontribusi Teknik Mesin dan Sipil dalam Pengembangan Infrastruktur*. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 11(2), 18-30.
- Pratama, A. F., & Wijaya, K. (2019). *Perkuatan Balok Beton Bertulang Menggunakan Material Komposit Berbasis Serat Karbon*. *Jurnal Rekayasa Struktur*, 5(1), 45-52.
- Pratama, M. A., & Wijaya, R. (2022). *Studi Penerapan Material Ramah Lingkungan dalam Konstruksi Gedung Bertingkat untuk Mengurangi Jejak Karbon dan Meningkatkan Efisiensi Energi*. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(1), 45-52.
- Rahmanto, R. H. (2020). *Simulasi V-bending dengan Variasi Kecepatan Pembebanan terhadap Keausan Dies menggunakan Software Finite Element Method*. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 8(2), 15-22.
- Ribowo, A. B., Niken, C., & Widyawati, R. (2017). *Pengaruh Kondisi Lingkungan Pada Kualitas Beton Studi Kasus RS PTN Universitas Lampung*. *REKAYASA: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*.
- Said, N. (2023). *Sekilas Perbandingan Teknik Mesin dan Teknik Sipil*. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, 11(2), 12-25.
- Saputra, A., & Saputri, U. S. (2021). *Analisa debit banjir rencana dengan metode hidograf satuan sintesis Nakayasu di daerah aliran sungai Cilandir*. *Jurnal TESLINK: Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 3(1), 01-10.
- Sari, D. P., Nugroho, A. S., & Santoso, B. (2023). *Analisis Penggunaan Material Komposit pada Konstruksi Jembatan untuk Meningkatkan Kekuatan Struktural dan Efisiensi Biaya Pemeliharaan*. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), 123-130.
- Sari, R. M., Susanto, T. E., & Wijaya, A. R. (2018). *Pengaruh Penambahan Serat Polipropilena terhadap Sifat Mekanis Beton*. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), 123-130.
- Sesmiwati, F. R., & Ariani, V. (2017). *Review penyebab keterlambatan pada proyek konstruksi*. *Seminar Nasional Strategi Pengembangan Infrastruktur ke-3*.
- Siregar, A. (2024). *Peran Infrastruktur dalam Pembangunan Ekonomi Sumatera Utara*. *Jurnal Teknik Sipil dan Mesin*, 12(1), 10-20.
- Sukawi. (2010). *Pengaruh Iklim Tropis Lembab terhadap Kerusakan Fasade Bangunan Kolonial di Kota Lama Semarang*.
- Sutrisno, A. (2018). *Efisiensi material dalam teknik sipil*. *Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 45-50.
- Sutrisno, A., Wijaya, R., & Santoso, B. (2023). *Pengaruh Desain Struktur terhadap Ketahanan Bangunan Gedung Bertingkat*. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(3), 45-52.
- Wati, D. L., Ranna, P., & Oei, F. J. (2024). *Perkembangan Integrasi Digital Twin dan Robotik di Industri Konstruksi*. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 611-620.
- Wibowo, T. N., & Pratiwi, Y. D. (2022). *Analisis Pengaruh Variasi Jenis Dan Persentase Katalis Pada Proses Pack Carburizing Baja ST 42 Terhadap Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro*. *Creative Research in Engineering (CERIE)*, 2(1), 42-51.
- Yousaf, Z., Morrison, N., & Parnell, W. J. (2021). *Tensile properties of all-polymeric syntactic foam composites: experimental characterization and mathematical modelling*. *arXiv preprint arXiv:2110.04142*.
- Yuliana, N. P. I., & Rani, N. M. (2020). *Analisis penerapan sistem manajemen kesehatan dan keselamatan kerja pada proyek konstruksi pembangunan gedung The Himana Condotel*. *Jurnal Ilmiah MITSU (Media Informasi Teknik Sipil Universitas Wirajaya)*, 8(2), 69-75.