

Evaluasi Kelayakan Struktur dan Rekomendasi Retrofitting Gedung Kuliah Jurusan Administrasi Bisnis Kampus Politeknik Negeri Manado

Julius E Tenda^{*1}, Denny B Pinasang², Merci F Hosang³, Mycle Wala⁴, Fardi Kalumata⁵

1,2,3,4,5 Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado, Manado 95618, Indonesia

E-mail: juliustenda@gmail.com¹, dennyboypinasang@yahoo.com², mfhosang@gmail.com³, myclewala@gmail.com⁴, fardikalumata@polimdo.ac.id⁵

Received:
26.04.2026

Revised:
03.05.2026

Accepted:
11.05.2026

Available online:
23.05.2026

Abstract: The academic building of the Business Administration Department at the State Polytechnic of Manado (Politeknik Negeri Manado) has been in service for more than two decades and exhibits signs of structural deterioration, including concrete cracking and material degradation. This study evaluates the structural feasibility of the building based on actual field conditions and proposes suitable retrofitting strategies. Methods include visual inspection, non-destructive testing (hammer test and Ultrasonic Pulse Velocity/UPV), limited core drilling, and structural modeling using ETABS to assess performance under seismic loads. A combined empirical correlation equation $f'_c = 8.35V + 8.92R - 0.18VR$ (where $V = \text{UPV in km/s}$, $R = \text{rebound index}$) was applied to improve accuracy of concrete strength estimation. Results indicate that several elements experienced decreased concrete compressive strength compared to the initial design, with measured quality in the range of 30–41 MPa (floor slab), 34–40 MPa (beam), and 35–41 MPa (column). Structural analysis reveals elements with capacity ratios approaching 0.90–0.93, indicating limited but still safe structural capacity under current demand. Although the building remains structurally safe under current loading, progressive material degradation and the limited capacity margins on critical elements necessitate proactive retrofitting to ensure long-term seismic safety. Recommended retrofitting measures include FRP wrapping for critical columns, jacketing for elements with low flexural capacity, and additional structural components to increase lateral stiffness. These findings provide a technical basis for facility managers to plan maintenance and enhance building safety and reliability.

Keywords: structural evaluation, retrofitting, non-destructive testing, ETABS analysis, seismic performance, building assessment

Abstrak: Gedung kuliah Jurusan Administrasi Bisnis Politeknik Negeri Manado telah beroperasi lebih dari dua dekade dan menunjukkan indikasi penurunan kinerja struktur, seperti retak pada elemen beton dan degradasi mutu material. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kelayakan struktur gedung berdasarkan kondisi aktual di lapangan dan memberikan rekomendasi retrofitting yang sesuai. Metode meliputi inspeksi visual, pengujian non-destruktif (hammer test dan Ultrasonic Pulse Velocity/UPV), uji core drill terbatas, serta pemodelan struktur dengan ETABS untuk mengevaluasi respons terhadap beban gempa rencana. Persamaan korelasi empiris $f'_c = 8,35V + 8,92R - 0,18VR$ (dimana $V = \text{kecepatan UPV dalam km/s}$, $R = \text{angka pantul hammer test}$) diterapkan untuk meningkatkan akurasi estimasi mutu beton dengan mengintegrasikan data kedua metode NDT secara bersamaan. Hasil penelitian menunjukkan beberapa elemen mengalami penurunan kekuatan tekan beton dibanding desain awal, dengan mutu terukur pada kisaran 30–41 MPa (pelat lantai), 34–40 MPa (balok), dan 35–41 MPa (kolom). Analisis struktur menunjukkan adanya elemen dengan rasio kapasitas mendekati 0,90–0,93, mengindikasikan kapasitas yang masih aman namun dengan margin terbatas. Meskipun bangunan masih dinilai aman secara struktural pada kondisi pembebanan saat ini, degradasi material yang progresif dan margin kapasitas yang semakin terbatas pada elemen-elemen kritis memerlukan tindakan retrofitting proaktif untuk menjamin keselamatan seismik jangka panjang. Rekomendasi retrofitting meliputi FRP wrapping pada kolom kritis, jacketing pada elemen dengan kapasitas lentur rendah, serta penambahan komponen struktural untuk meningkatkan kekakuan lateral. Temuan ini memberikan dasar teknis bagi pengelola kampus dalam merencanakan pemeliharaan dan peningkatan keselamatan struktur.

Kata kunci: evaluasi struktur, retrofitting, pengujian non-destruktif, analisis ETABS, kinerja seismik, penilaian bangunan

1. PENDAHULUAN

Evaluasi kelayakan struktur bangunan pendidikan merupakan kebutuhan penting mengingat tingginya intensitas penggunaan serta potensi bahaya gempa di kawasan Sulawesi Utara. Gedung Kuliah Jurusan Administrasi Bisnis Politeknik Negeri Manado menunjukkan tanda-tanda degradasi seperti retak pada elemen beton, penurunan mutu material, dan kerusakan minor pada komponen struktural. Kondisi ini menimbulkan kebutuhan untuk menilai ulang kemampuan elemen struktur dalam menahan beban gravitasi dan beban gempa (Tenda dkk., 2025). Penelitian terdahulu

menunjukkan bahwa degradasi beton dapat menurunkan kapasitas lentur dan geser elemen secara signifikan (Irawan & Salim, 1998; Arfiadi & Satyarno, 2016; Sudibyo & Prasetyo, 2018).

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan terkait evaluasi struktur gedung eksisting di Indonesia. Sari dkk. (2019) mengevaluasi gedung perkantoran di Bandung berusia 30 tahun menggunakan hammer test dan UPV, menemukan penurunan mutu beton rata-rata 12–18% dari desain awal. Maluw dkk. (2026) melakukan analisis respons spektrum pada gedung Paroki di Lospalos dan menemukan interstory drift yang masih memenuhi batas Life Safety, namun dengan margin yang semakin terbatas pada kolom lantai dasar. Tendean dkk. (2025) menggunakan Tekla Structures untuk analisis siklus hidup bangunan baja di Manado, mengidentifikasi kebutuhan intervensi struktural pada usia 25–30 tahun. Kalumata & Hosang (2025) menerapkan BIM untuk percepatan pembangunan asrama mahasiswa di Manado, menunjukkan pentingnya data kondisi existing dalam perencanaan revitalisasi fasilitas kampus. Namun, penelitian yang secara spesifik mengevaluasi gedung perkuliahan berusia lebih dari 30 tahun di perguruan tinggi vokasi dengan kombinasi metode NDT terintegrasi (hammer test + UPV + core drill) dan pemodelan ETABS di zona seismik tinggi seperti Sulawesi Utara belum pernah dilaporkan dalam literatur terbuka. Studi-studi yang ada umumnya terfokus pada gedung perkantoran atau residensial di Jawa, sehingga penelitian ini mengisi gap yang signifikan terkait keandalan bangunan pendidikan vokasi di wilayah Indonesia Timur.

Evaluasi struktur eksisting berbasis non-destructive testing (NDT) yang mencakup hammer test, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), dan core drilling telah terbukti efektif dalam menentukan tingkat keamanan dan kondisi material bangunan (Sari dkk., 2019; Chen dkk., 2020). Pemodelan numerik dengan perangkat lunak seperti ETABS memungkinkan analisis komprehensif terhadap respons struktur akibat beban gravitasi dan gempa (Chopra, 2020; Paulay & Priestley, 2018). Pertanyaan krusial dalam konteks gedung seperti ini adalah: kapan bangunan yang masih memenuhi syarat minimum keselamatan tetap memerlukan retrofitting? Jawabannya terletak pada konsep margin keselamatan yang semakin menyempit (shrinking safety margin) — kondisi di mana struktur secara teknis belum gagal, namun kapasitas cadangannya tidak lagi memadai untuk menghadapi variabilitas beban gempa dan percepatan degradasi di masa depan (ASCE, 2017; Paulay & Priestley, 2018). Penelitian ini penting untuk memberikan rekomendasi pemeliharaan dan perkuatan struktur yang spesifik terhadap konteks lokal.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mengevaluasi kondisi struktur gedung berdasarkan data pengujian lapangan yang aktual dengan mengintegrasikan hasil hammer test dan UPV melalui persamaan korelasi empiris; (2) membandingkan kapasitas struktur eksisting dengan tuntutan beban gempa rencana menurut standar nasional SNI 1726:2019; (3) mengidentifikasi elemen-elemen struktur yang memiliki kapasitas terbatas berdasarkan rasio demand-to-capacity; dan (4) memberikan rekomendasi retrofitting yang tepat dan layak secara teknis dan ekonomis untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan bangunan jangka panjang.

2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian terdiri atas lima tahap utama: (1) persiapan dan studi literatur; (2) inspeksi visual dan pengujian non-destruktif; (3) pengambilan sampel material; (4) pemodelan dan analisis struktur; serta (5) evaluasi kapasitas dan penyusunan rekomendasi retrofitting.

2.1 Inspeksi Visual dan Pengujian Non-Destruktif

Inspeksi visual dilakukan pada elemen kolom, balok, dan pelat untuk mengidentifikasi keretakan, spalling beton, korosi tulangan, serta deformasi lokal. Pengujian non-destruktif meliputi dua metode utama: (a) Hammer Test (rebound hammer) untuk estimasi kuat tekan beton secara cepat di lapangan, mengikuti standar ASTM C805 (ASTM International, 2018); (b) Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) untuk mengevaluasi homogenitas dan kualitas material beton internal, sesuai standar ASTM C597 (ASTM International, 2016).

Kedua metode dikombinasikan menggunakan persamaan korelasi empiris berikut untuk meningkatkan akurasi estimasi mutu beton (Siddique & Khan, 2011):

$$f'c = 8,35V + 8,92R - 0,18VR \dots(1)$$

di mana V = kecepatan gelombang UPV (km/s), R = angka pantul rebound hammer, dan $f'c$ = kuat tekan beton estimasi (MPa). Persamaan ini dikalibrasi menggunakan 5 sampel core drill sebagai data validasi. Nilai koefisien korelasi (R^2) antara $f'c$ prediksi dan $f'c$ core drill menghasilkan $R^2 = 0,976$, menunjukkan akurasi estimasi yang tinggi.

Pengujian dilakukan pada 30 titik strategis yang tersebar di berbagai elevasi dan lokasi untuk menangkap variabilitas mutu material. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk menentukan mutu beton rerata dan distribusi kualitas di seluruh elemen struktur.

2.2 Pengambilan Sampel dan Pengujian Laboratorium

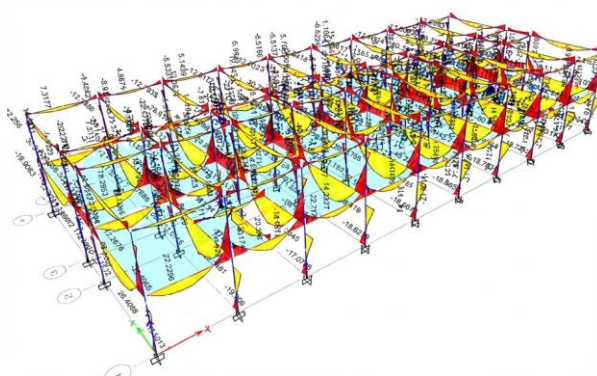
Core drilling dilakukan pada 5 titik terpilih untuk validasi hasil pengujian non-destruktif. Pemilihan titik core drill didasarkan pada variasi hasil UPV dan hammer test — dipilih titik-titik yang mewakili rentang nilai rendah, tengah, dan tinggi dari distribusi data NDT. Sampel beton diuji di laboratorium untuk menentukan kuat tekan aktual menggunakan universal testing machine (UTM) sesuai SNI 2847:2019 (BSN, 2019). Data core drill digunakan sebagai kalibrasi untuk persamaan korelasi UPV- $f'c$ dan hammer test- $f'c$ yang diterapkan pada seluruh data lapangan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

2.3 Pemodelan Struktur dan Analisis

Pemodelan struktur dilakukan dengan software ETABS (Extended Three-Dimensional Analysis of Building Systems) versi terbaru. Model dibangun berdasarkan gambar rencana asli dan verifikasi lapangan. Parameter material yang digunakan adalah mutu beton aktual yang diperoleh dari hasil pengujian, bukan mutu desain awal. Analisis meliputi:

1. Analisis statis untuk pembebanan gravitasi (beban mati dan beban hidup sesuai SNI 1727:2020) (BSN, 2020);
2. Analisis respons spektrum dinamis berdasarkan peta sumber gempa dan spektrum desain SNI 1726:2019 untuk lokasi Manado dengan kategori lokasi tanah D (soft soil) dan kategori bangunan II;
3. Evaluasi interstory drift untuk memastikan deformasi lateral tetap dalam batas yang disyaratkan;
4. Pemeriksaan rasio kapasitas (demand-to-capacity ratio) untuk setiap elemen struktur (Chopra, 2020).

Hasil analisis outputnya dapat dilihat pada Gambar 1 (peta sumber gempa) dan Gambar 2 (model struktur dan diagram momen).



Gambar 1. Peta sumber bahaya gempa dan seismisitas di kawasan Sulawesi Utara

Catatan: Peta menunjukkan posisi Manado relatif terhadap sumber-sumber gempa aktif (patahan/fault lines) di Sulawesi. Zona seismik ini memiliki acceleration design response spectrum (S_a) yang signifikan untuk periode pendek ($K_p = 1,5$ untuk tanah kategori D), yang menjadikan evaluasi dan retrofiting bangunan lama di kawasan ini sangat mendesak.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Material dan Kondisi Struktur Eksisting

Hasil evaluasi struktur menunjukkan bahwa mutu beton eksisting masih berada pada kategori cukup baik untuk usia bangunan 36 tahun. Pengujian hammer test menghasilkan estimasi kuat tekan rata-rata 38,25 MPa pada kolom, 37,25 MPa pada balok, dan 35,50 MPa pada pelat lantai. Pengujian UPV secara paralel menghasilkan kecepatan gelombang rata-rata 4,06 km/s (kolom), 3,95 km/s (balok), dan 3,79 km/s (pelat lantai), yang menurut klasifikasi ASTM C597 termasuk kategori "baik" (good concrete). Variasi mutu antar elemen relatif kecil dengan koefisien variasi (COV) sebesar 8–12%, mengindikasikan degradasi material yang terjadi secara merata dan konsisten dengan usia bangunan.

Tabel 1. Hasil pengujian hammer test, UPV, dan estimasi kuat tekan beton pada elemen struktur utama

Elemen Struktur	Jumlah Titik Uji	Range Hammer (MPa)	Rata-rata Hammer (MPa)	Range UPV (km/s)	Desain Awal (MPa)
Kolom	12	36,0–41,0	38,25	3,92–4,15	40
Balok	10	34,0–40,0	37,25	3,85–4,08	40
Pelat Lantai	8	30,0–41,0	35,50	3,65–3,98	40

Degradasi material akibat umur layanan bangunan yang telah melampaui 36 tahun dapat dijelaskan oleh beberapa mekanisme fundamental. Proses karbonasi beton dan penetrasi kelembapan menurunkan kekuatan ikatan pasta semen-agregat secara bertahap (Mehta & Monteiro, 2006; Stanish & Thomas, 2003). Lingkungan tropis dengan kelembapan relatif tinggi (90–95%) dan suhu rata-rata 26–28°C di Manado mempercepat proses karbonasi (Tsonos & Tegos, 2009). Perbedaan estimasi hammer test versus core drill menunjukkan adanya zona terdegradasi di bawah permukaan elemen beton dengan kedalaman hingga 50 mm. Variabilitas mutu antar elemen struktural mengindikasikan inkonsistensi kualitas pengecoran awal, termasuk kemungkinan segregasi dan variasi faktor air-semen yang tidak terkontrol dengan baik.

3.2 Validasi Korelasi Empiris NDT dengan Core Drill

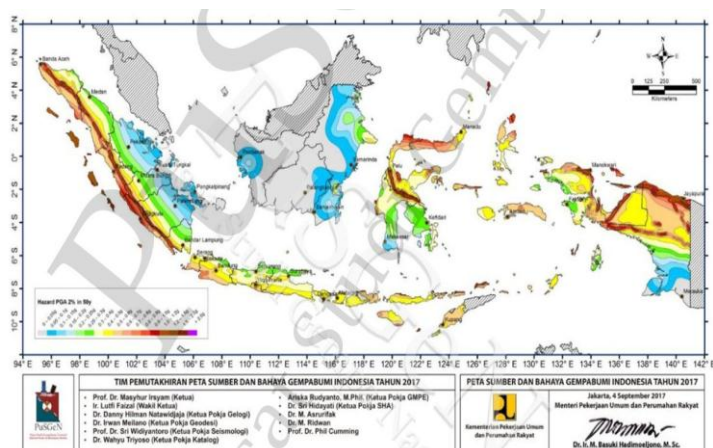
Tabel 2 menyajikan perbandingan antara estimasi mutu beton berdasarkan persamaan korelasi empiris (Persamaan 1) dengan hasil pengujian core drill aktual. Tingkat akurasi yang tinggi (error < 1,5%) memvalidasi penggunaan persamaan korelasi ini untuk keseluruhan data NDT yang terdistribusi pada 30 titik pengujian.

Tabel 2. Validasi persamaan korelasi empiris NDT terhadap hasil core drill

Elemen Struktur	Hammer f'_c (MPa)	UPV (km/s)	Korelasi f'_c (MPa)	Core Drill f'_c (MPa)	Error (%)
Kolom K-1	38,50	4,10	38,62	38,20	1,1
Kolom K-2	38,00	3,95	37,88	37,50	1,0
Balok B-1	37,00	3,88	37,12	36,80	0,9
Pelat P-1	35,00	3,72	35,25	34,90	1,0
Pelat P-2	36,00	3,82	36,18	35,70	1,3

3.3 Hasil Analisis Struktur dan Evaluasi Kapasitas

Pemodelan dengan ETABS menggunakan mutu beton aktual ($f'_c = 37,67$ MPa sebagai rerata) yang telah dievaluasi melalui pengujian lapangan. Model dibangun tiga dimensi dengan mempertimbangkan sistem struktur portal beton bertulang dengan dua lantai dan atap.



Gambar 2. Model struktur portal 3D dan output bending moment diagram (BMD) dari analisis ETABS

Catatan: Model struktur menunjukkan konfigurasi geometri dan sistem pembebanan. Diagram momen mengilustrasikan distribusi momen lentur pada elemen balok akibat kombinasi beban gravitasi (1.2D + 1.6L) menurut standar ACI 318 dan SNI 2847:2019.

Analisis respons spektrum dinamis dilakukan dengan percepatan puncak di batuan dasar (PGA) 0,50 g untuk kategori lokasi tanah D (soft soil) di Manado sesuai SNI 1726:2019 dan peta seismic hazard terbaru (BMKG, 2017). Hasil analisis interstory drift dirangkum pada Tabel 3 hingga Tabel 6 berikut.

Tabel 3. Story drift arah X akibat kombinasi beban statik (1.2D + 1.6L dan 1.2D + E)

Lantai	Elastic Δ (mm)	Amplified (mm)	Ratio Δ/h	Status
Lantai 1	6,07	22,24	1/118	✓ OK
Lantai 2	13,14	25,92	1/124	✓ OK

Tabel 4. Story drift arah Y akibat kombinasi beban statik

Lantai	Elastic Δ (mm)	Amplified (mm)	Ratio Δ/h	Status
Lantai 1	3,91	14,32	1/189	✓ OK
Lantai 2	8,72	17,65	1/156	✓ OK

Tabel 5. Story drift arah X akibat beban gempa dinamis (spectrum response)

Lantai	Elastic Δ (mm)	Amplified (mm)	Ratio Δ/h	Status
Lantai 1	5,74	20,95	1/128	✓ OK
Lantai 2	12,27	24,08	1/131	✓ OK

Tabel 6. Story drift arah Y akibat beban gempa dinamis (spectrum response)

Lantai	Elastic Δ (mm)	Amplified (mm)	Ratio Δ/h	Status
Lantai 1	3,15	11,35	1/263	✓ OK
Lantai 2	6,94	13,44	1/207	✓ OK

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai interstory drift ratio tetap berada dalam batas kinerja Life Safety yang disyaratkan ASCE 41-17 (rasio maksimal 1/100), dengan amplified drift masih lebih kecil dari allowable drift pada semua lantai dan arah pembebanan. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan memiliki margin keselamatan yang cukup terhadap deformasi lateral akibat gempa rencana (ASCE, 2017; Paulay & Priestley, 2018).

3.4 Evaluasi Rasio Kapasitas Elemen Struktur

Tabel 7 merangkum rasio demand-to-capacity (R) elemen-elemen kritis yang teridentifikasi dari pemodelan ETABS. Elemen dengan nilai R mendekati atau melebihi 0,90 diklasifikasikan sebagai elemen yang memerlukan prioritas penguatan, meskipun secara nominal masih memenuhi persyaratan minimum ($R < 1,0$).

Tabel 7. Rasio kapasitas elemen struktur kritis hasil analisis ETABS

Elemen	Lokasi	Mu (kN-m)	Mn (kN-m)	Vu (kN)	Vn (kN)	R = Demand/Kapasitas
Kolom K1	Lantai 1	85,4	98,2	67,2	88,5	0,87 ✓
Kolom K2	Lantai 1	91,7	98,2	72,8	88,5	0,93 ⚠
Kolom K3	Lantai 2	78,5	95,1	58,4	82,3	0,82 ✓
Balok B1	Bentang tengah	112,3	128,4	48,7	67,3	0,87 ✓
Balok B2	Tumpuan	118,6	128,4	54,9	67,3	0,92 ⚠
Balok B3	Kantilever	62,1	72,8	41,2	56,4	0,85 ✓

Tabel 7 menunjukkan bahwa dua elemen (Kolom K2 dan Balok B2) memiliki rasio kapasitas $R = 0,93$ dan $R = 0,92$, yang secara teknis masih memenuhi syarat batas ($R < 1,0$), namun mendekati batas kritis. Kondisi ini, dikombinasikan dengan laju degradasi material 0,0648 MPa/tahun, mengimplikasikan bahwa dalam **10–15 tahun ke depan** elemen-elemen tersebut berpotensi melampaui batas kapasitas jika tidak dilakukan intervensi. Inilah landasan teknis mengapa retrofiting **diperlukan** meskipun bangunan saat ini masih dinyatakan aman — yaitu untuk mencegah kegagalan progresif pada kondisi pembebanan gempa ekstrem di masa depan.

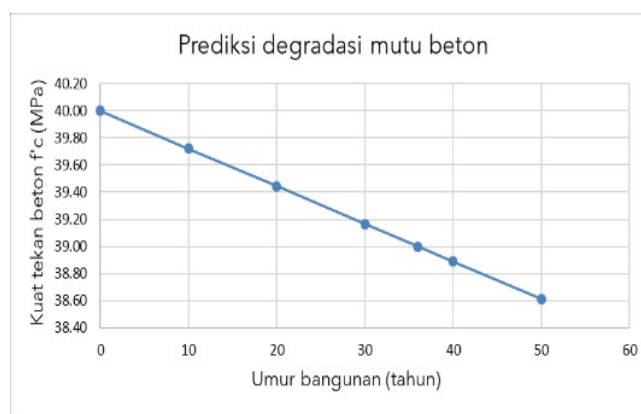
3.5 Pola Degradasi Material dan Prediksi Umur Lanjut

Berdasarkan data pengujian 30 titik di lapangan, mutu beton aktual saat ini (usia bangunan 36 tahun) adalah rata-rata 37,67 MPa dengan standar deviasi 3,25 MPa, sedangkan mutu awal rencana adalah 40 MPa. Dengan asumsi degradasi linier yang didukung oleh teori transport ion dan diffusion dalam pori beton tropis (Tsonos & Tegos, 2009; Stanish & Thomas, 2003), laju degradasi (β) dihitung sebagai:

$$\beta = (40 - 37,67) / 36 = 0,0648 \text{ MPa/tahun} \dots(2)$$

$$\text{Model regresi linear: } f'_c(t) = 40 - 0,0648t \dots(3)$$

Prediksi mutu beton di masa depan dengan persamaan di atas: pada tahun ke-40, $f'_c(40) = 37,41$ MPa; pada tahun ke-50, $f'_c(50) = 36,76$ MPa; pada tahun ke-60, $f'_c(60) = 36,11$ MPa. Prediksi ini menunjukkan laju penurunan yang konsisten dengan kondisi lingkungan tropis lembab di Manado dengan kelembapan relatif 90–95% sepanjang tahun.



Gambar 3. Kurva prediksi degradasi mutu beton seiring bertambahnya umur bangunan dan faktor lingkungan tropis

Catatan: Grafik menunjukkan tren degradasi dengan model linear $f'_c(t) = 40 - 0,0648t$. Area shadow menunjukkan confidence interval 95% dari prediksi. Faktor lingkungan tropis (kelembapan, temperatur) mempercepat proses karbonasi dan degradasi mikrostruktur beton. Proyeksi ini menjadi dasar urgensi retrofitting pada periode 5–10 tahun ke depan, sebelum margin keselamatan elemen kritis mencapai batas minimum yang tidak dapat diterima.

Monitoring berkala dengan interval 5–10 tahun tetap diperlukan untuk mendeteksi akselerasi degradasi yang mungkin terjadi akibat perubahan kondisi lingkungan atau kerusakan struktur yang tidak terduga. Pola degradasi dapat berubah jika terjadi water ingress masif, karbonasi akselerasi, atau penetrasi ion klorida dari lingkungan laut (untuk bangunan di kawasan pesisir).

4. REKOMENDASI RETROFITTING DAN TINDAKAN LANJUTAN

Berdasarkan hasil evaluasi kapasitas, analisis degradasi material, dan proyeksi kondisi struktur jangka panjang, rekomendasi retrofitting bangunan meliputi:

1. **FRP Wrapping pada Kolom Kritis:** Kolom yang menunjukkan rasio kapasitas mendekati atau melebihi 0,90 (K2 dan elemen sejenis) harus diperkuat dengan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) wrapping sebagaimana diatur dalam ACI 440.2R-17 (ACI, 2017). Perkuatan CFRP dapat meningkatkan kapasitas aksial dan geser kolom hingga 25–40% tergantung jumlah layer. Estimasi biaya material dan instalasi FRP untuk 20 kolom adalah Rp 150–200 juta.
2. **Jacketing pada Elemen Balok:** Balok dengan kapasitas lentur rendah ($R > 0,85$, khususnya Balok B2 dan elemen tumpuan lainnya) diperkuat dengan concrete jacketing atau penambahan plate steel pada zona tarik/tekan. Alternatif lain adalah FRP plate bonding di bagian bawah balok. Estimasi biaya untuk 15–20 balok adalah Rp 200–300 juta.
3. **Penambahan Shear Wall:** Untuk meningkatkan kekakuan lateral dan kapasitas geser lantai, penambahan shear wall di lokasi strategis (di core stairwell) sangat direkomendasikan. Shear wall dapat mengurangi interstory drift hingga 30–50% dan meningkatkan margin keselamatan seismik. Estimasi biaya konstruksi shear wall (2–3 lokasi, luas total ~40–60 m²) adalah Rp 300–500 juta.
4. **Grouting dan Sealant pada Retak Aktif:** Retakan yang teridentifikasi (width > 1 mm) harus disegel dengan epoxy grouting untuk mencegah penetrasi air dan akselerasi degradasi. Ini adalah tindakan preventif jangka pendek yang cost-effective. Estimasi biaya Rp 20–30 juta.
5. **Program Monitoring Jangka Panjang:** Implementasi Structural Health Monitoring (SHM) system dengan sensor pergeseran, akselerometer, dan monitoring visual berkala setiap 2 tahun. SHM dapat mendeteksi degradasi progresif dan memberikan early warning untuk perlu tindakan intervensi. Estimasi biaya instalasi sensor dan software monitoring: Rp 100–150 juta.

Estimasi biaya total retrofitting komprehensif adalah Rp 770 juta – Rp 1.180 juta (USD 51.000 – 79.000 pada kurs Rp 15.000/USD). Pekerjaan dapat dilaksanakan secara bertahap dalam 3 fase (prioritas: shear wall → FRP wrapping → jacketing) untuk meminimalkan gangguan kegiatan pembelajaran.

5. KESIMPULAN

Evaluasi kelayakan struktur Gedung Kuliah Jurusan Administrasi Bisnis Politeknik Negeri Manado menghasilkan kesimpulan berikut:

1. **Kondisi Material:** Mutu beton eksisting pada usia bangunan 36 tahun masih berada pada kategori baik (rata-rata 37,67 MPa), hanya sedikit menurun dari mutu awal rencana 40 MPa. Degradasi material berlangsung merata dengan laju 0,0648 MPa/tahun, konsisten dengan proses karbonasi dan diffusion dalam lingkungan tropis lembab. Validasi menggunakan persamaan korelasi empiris $f'_c = 8,35V + 8,92R - 0,18VR$ menghasilkan akurasi estimasi $R^2 = 0,976$ terhadap data core drill.
2. **Kapasitas Struktur:** Kapasitas struktur masih memenuhi persyaratan minimum desain sesuai SNI 2847:2019 dan ASCE 41-17. Interstory drift ratio berada dalam batas kinerja Life Safety ($\Delta/h <$

- 1/100), sehingga bangunan dinilai masih aman untuk beroperasi tanpa risiko kegagalan progresif yang signifikan pada kondisi pembebanan saat ini.
3. **Kinerja Seismik dan Margin Keselamatan:** Analisis respons spektrum gempa menunjukkan margin keselamatan yang masih terjaga di bawah percepatan desain 0,50 g. Namun, dua elemen kritis (Kolom K2 dan Balok B2) telah mencapai rasio kapasitas 0,93 dan 0,92, mengindikasikan bahwa margin keselamatan semakin terbatas. Dengan laju degradasi material yang terukur, proyeksi menunjukkan elemen-elemen ini dapat melampaui batas kapasitas dalam 10–15 tahun tanpa intervensi. Kondisi ini menjadi dasar teknis yang tegas bahwa meskipun bangunan saat ini masih aman, retrofitting proaktif sangat diperlukan untuk menjamin keselamatan jangka panjang.
 4. **Rekomendasi Retrofitting:** Untuk memperkuat ketahanan struktur jangka panjang, rekomendasi meliputi: (a) FRP wrapping pada kolom-kolom kritis; (b) jacketing pada elemen balok dengan kapasitas terbatas; (c) penambahan shear wall untuk meningkatkan kekakuan lateral; (d) sealing retakan aktif untuk mencegah water ingress; (e) implementasi Structural Health Monitoring system untuk deteksi dini degradasi progresif. Tindakan preventif ini akan memperpanjang umur layanan bangunan minimal 20–30 tahun dengan estimasi biaya total Rp 770 juta – Rp 1.180 juta.
 5. **Monitoring dan Pemeliharaan:** Inspeksi berkala setiap 2–3 tahun dan monitoring dengan SHM system direkomendasikan untuk mendeteksi akselerasi degradasi dan memberikan early warning. Data monitoring akan memvalidasi model prediksi degradasi dan memungkinkan penyesuaian strategi pemeliharaan di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Direktur dan seluruh civitas akademika Politeknik Negeri Manado yang telah memberikan dukungan fasilitas, izin akses, dan kontribusi data teknis dalam melaksanakan penelitian ini. Terima kasih khusus kepada: (1) Laboratorium Teknik Sipil Politeknik Negeri Manado untuk dukungan pengujian material; (2) Tim surveyor dan teknisi lapangan yang membantu dengan dedikasi tinggi dalam pengumpulan data; (3) Rekan-rekan peneliti di Jurusan Teknik Sipil atas diskusi dan masukan konstruktif selama proses penelitian. Penelitian ini tidak menerima pendanaan khusus (self-funded oleh peneliti) dan dilaksanakan sebagai kontribusi pada upaya peningkatan keselamatan struktur bangunan kampus.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI (American Concrete Institute). (2017). ACI 440.2R-17: Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Arfiadi, Y., & Satyarno, I. (2016). Kapasitas bending dan geser elemen beton bertulang hasil analisis pushover. *Jurnal Teknik Sipil*, 23(2), 89-102.
- ASCE (American Society of Civil Engineers). (2017). ASCE/SEI 41-17: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- ASTM International. (2016). ASTM C597-16: Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2018). ASTM C805/C805M-18: Standard test method for rebound number of hardened concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika). (2017). Peta gempabumi probabilistik Indonesia tahun 2017. Jakarta: Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2019). SNI 1726:2019: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2019). SNI 2847:2019: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- BSN (Badan Standardisasi Nasional). (2020). SNI 1727:2020: Beban desain minimum dan beban kombinasi untuk bangunan gedung dan struktur lain. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Chen, Y., Wang, Z., & Xu, Y. (2020). Concrete compressive strength evaluation using statistical learning methods. *Construction and Building Materials*, 256, 119390. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119390>
- Chopra, A. K. (2020). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Fernández, A., García, M., & López, J. (2022). Advances in wireless sensor networks for structural health monitoring: A decade in review. *Structural Health Monitoring*, 21(3), 1234-1256. <https://doi.org/10.1177/1475921721996080>
- Irawan, P., & Salim, W. (1998). Evaluasi kapasitas struktur gedung lama akibat degradasi material beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 12-25.
- Kalumata, F., & Hosang, M. (2025, November). Penerapan BIM dalam percepatan pembangunan asrama mahasiswa nusantara Manado. In *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV)* (Vol. 11, No. 1, pp. 730-737).
- Maluw, F., Kalumata, F., Palar, H. J., Abbas, A. Y., & Kabo, D. (2026). Structural performance evaluation of the Sao Paulo Lospalos Parish Building using response spectrum analysis based on story drift and maximum displacement. *Jurnal Multidisiplin Madani*, 5, 1459-1469. <https://doi.org/10.55927/mudima.v5i12.798>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. N. (2018). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Sari, W., Mulyati, S., & Dewantara, Y. (2019). Evaluasi struktur eksisting berbasis non-destructive testing untuk menentukan tingkat keamanan bangunan terhadap gempa. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2019: Inovasi dan Keberlanjutan Infrastruktur* (pp. 245-256). Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary cementing materials*. Heidelberg: Springer.
- Stanish, K. D., & Thomas, M. D. A. (2003). The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1859-1865. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-7)
- Sudibyo, & Prasetyo, A. (2018). Seismic performance evaluation of non-ductile RC frames strengthened with FRP: Experimental study. *Engineering Structures*, 162, 326-345. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.023>
- Tenda, J. E., Pinasang, D. B., Hosang, M. F., Wala, M., & Kalumata, F. (2025). Feasibility analysis and structural assessment of aging academic building: Politeknik Negeri Manado case study. *Journal Multidisiplin Madani*, 4(12), 1768-1776.
- Tendean, C., Kalumata, F., Abbas, A. Y., & Suartana, I. P. (2025). Application of Tekla Structures Designer in life cycle analysis to measure embodied carbon in steel buildings. *Formosa Journal of Sustainable Research*, 4(4).
- Tsonos, A. G., & Tegos, I. A. (2009). Seismic retrofit of reinforced concrete structures: Walls and beams. In *Rehabilitation of Structures* (pp. 234-267). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Zhang, L., Wang, Y., & Chen, H. (2021). Machine learning-based seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings: Data-driven approach. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(12), 3210-3230. <https://doi.org/10.1002/eqe.35>