

**ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN KAPASITAS KACA
MONOLITIK DAN KACA LAMINASI PADA *BALUSTRADA* KACA
BANGUNAN PUBLIK TERHADAP *SOFT BODY IMPACT***

TUGAS AKHIR



Disusun oleh:

Nisa Rahmaa Azizah

1222004021

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS BAKRIE
JAKARTA
2026**

PENYATAAN ORISINALITAS

Tugas Akhir ini adalah hasil karya saya sendiri, serta semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama: Nisa Rahmaa Azizah

NIM: 1222004021

Tanda Tangan:

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, flowing letters that appear to be 'Nisa' followed by a surname.

Tanggal: 10 September 2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Nisa Rahmaa Azizah

NIM : 1222004021

Program Studi : Teknik Sipil

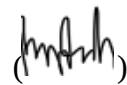
Fakultas : Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer

Judul Skripsi : ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN KAPASITAS KACA
MONOLITIK DAN KACA LAMINASI PADA *BALUSTRADE* KACA
BANGUNAN PUBLIK TERHADAP *SOFT BODY IMPACT*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Dr. Ir. Budianto Ontowirjo, MSc.



Pembimbing 2 : Muhammad Nuzulul Furqan S.T., M.Sc.



Pembahas 1 : Teuku Muhammad Rasyif, S.T., M.T., Ph.D.



Pembahas 2 : Muhammad Daffa Fachrur Reza S.T., MSc.



Ditetapkan di Jakarta

10 September 2026

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Analisis Numerik Perbandingan Kapasitas Kaca Monolitik dan Kaca Laminasi pada *Balustrade* Kaca Bangunan Publik terhadap *Soft Body Impact*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie.

Selama penyusunan skripsi ini penulis memperoleh bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan hormat dan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Ir. Sofia W. Alisjahbana, M.Sc., Ph.D., selaku Rektor Universitas Bakrie;
2. Ibu Fatin Adriati, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Bakrie;
3. Bapak Dr. Ir. Budianto Ontowirjo, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Skripsi I, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan serta masukan selama penyusunan skripsi ini;
4. Bapak Muhammad Nuzulul Furqan, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Skripsi II, yang telah memberikan bimbingan, saran, dan motivasi hingga skripsi ini terselesaikan;
5. Seluruh dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Bakrie yang telah membagikan ilmu, pengalaman, dan wawasan selama masa perkuliahan;
6. Kedua orang tua penulis yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan moral dan material;
7. Seluruh keluarga besar penulis atas doa, perhatian, dan motivasinya;
8. Rekan-rekan mahasiswa serta seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu atas bantuan dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan penelitian ini pada masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat dan menjadi referensi bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang Teknik Sipil, khususnya mengenai perilaku struktur kaca pada *balustrade* bangunan publik akibat beban *soft body impact*.

Jakarta, 10 September 2026

Penulis

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Sebagai sivitas akademik Universitas Bakrie, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nisa Rahmaa Azizah
NIM 1222004021
Fakultas : Teknik dan Ilmu Komputer
Jenis Tugas Akhir : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Bakrie **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN KAPASITAS KACA MONOLITIK DAN KACA LAMINASI PADA BALUSTRADE KACA BANGUNAN PUBLIK TERHADAP *SOFT BODY IMPACT*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Bakrie berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta untuk kepentingan akademis. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 10 September 2026

Yang menyatakan



Nisa Rahmaa Azizah

ANALISIS NUMERIK PERBANDINGAN KAPASITAS KACA MONOLITIK DAN KACA LAMINASI PADA *BALUSTRADE* KACA BANGUNAN PUBLIK TERHADAP *SOFT BODY IMPACT*

Nisa Rahmaa Azizah

ABSTRAK

Penelitian ini membandingkan kaca monolitik dan kaca laminasi PVB pada sistem *balustrade* kaca bangunan publik terhadap pembebanan *soft body impact*. Penelitian bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan respons struktur kedua jenis kaca berdasarkan tegangan maksimum, lendutan maksimum, faktor keamanan, serta pengaruh variasi susunan dan jumlah lubang sambungan *point-fixed*. Analisis dilakukan menggunakan model analitis numerik tereduksi berbasis sistem kontak dua derajat kebebasan, dengan pengimpak ban ganda EN 12600 bermassa 50 kg dan panel kaca dimodelkan sebagai sistem satu derajat kebebasan yang diselesaikan menggunakan metode integrasi numerik Newmark- β . Kekakuan kaca laminasi diperhitungkan menggunakan pendekatan tebal efektif Wölfel Bennison sesuai EN 16612:2019, sedangkan distribusi lendutan dan tegangan dihitung menggunakan teori balok Euler Bernoulli dan konsentrasi tegangan di sekitar lubang dianalisis menggunakan solusi Kirsch. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada tebal kaca total yang setara dan pembebanan *soft body impact* dari tinggi jatuh 450 mm, kaca laminasi PVB menghasilkan lendutan yang relatif sama dengan kaca monolitik dengan perbedaan sebesar $-3,9\%$ hingga $+0,9\%$, tetapi menghasilkan tegangan maksimum yang lebih rendah sebesar $9,9\%$ – $13,5\%$. Faktor keamanan terhadap tegangan lentur desain 100 MPa berada pada rentang $0,25$ – $1,65$ untuk hasil model langsung dan $0,60$ – $4,00$ setelah dikoreksi berdasarkan rasio validasi. Dari 24 konfigurasi yang dianalisis, hanya empat konfigurasi dua baris yang memenuhi kriteria kekuatan sekaligus, yaitu L3-H2, L3-H3, M3-H2, dan L3-H4, dengan faktor keamanan masing-masing sebesar 1,15; 1,06; 1,03; dan 1,02. Namun, seluruh konfigurasi tidak memenuhi batas lendutan situasi layan sebesar 20 mm sehingga sistem yang ditinjau dikendalikan oleh lendutan. Secara keseluruhan, kaca laminasi menunjukkan keunggulan terhadap kaca monolitik dalam pengendalian tegangan akibat *soft body impact*, sedangkan konfigurasi sambungan dua baris lebih berpengaruh terhadap peningkatan kekakuan dan pengurangan lendutan dibandingkan penambahan jumlah baut pada satu baris.

Kata kunci: kaca monolitik, kaca laminasi, *balustrade* kaca, *soft body impact*, *point-fixed*, analisis numerik.

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE COMPARATIVE CAPACITY OF MONOLITHIC
AND LAMINATED GLASS IN GLASS BALUSTRADES OF PUBLIC BUILDINGS
UNDER SOFT BODY IMPACT**

Nisa Rahmaa Azizah

ABSTRACT

This study compares monolithic glass and PVB laminated glass used in glass balustrade systems of public buildings subjected to soft body impact loading. The study aims to analyze and compare the structural response of both glass types in terms of maximum stress, maximum deflection, safety factor, and the influence of variations in the arrangement and number of point-fixed connection holes. The analysis was performed using a reduced analytical numerical model based on a two degree of freedom contact system, consisting of a 50 kg EN 12600 twin wheel impactor and a glass panel modeled as a single-degree-of-freedom system solved using the Newmark- β numerical integration method. The stiffness of laminated glass was determined using the effective thickness approach of Wölfel Bennison in accordance with EN 16612:2019, while the deflection and stress distributions were calculated using Euler Bernoulli beam theory, and stress concentration around the connection holes was evaluated using the Kirsch solution. The results show that for equivalent total glass thickness and soft body impact loading from a 450 mm drop height, PVB laminated glass produces deflections that are relatively similar to those of monolithic glass, with differences ranging from -3.9% to $+0.9\%$, while producing consistently lower maximum stresses by $9.9\text{--}13.5\%$. The safety factor against the design bending stress of 100 MPa ranges from $0.25\text{--}1.65$ for the direct model results and from $0.60\text{--}4.00$ after correction based on the validation ratio. Of the 24 configurations analyzed, only four two-row configurations simultaneously satisfy the strength criterion, namely L3-H2, L3-H3, M3-H2, and L3-H4, with safety factors of 1.15, 1.06, 1.03, and 1.02, respectively. However, none of the configurations satisfies the serviceability deflection limit of 20 mm, indicating that the investigated system is governed by deflection. Overall, laminated glass demonstrates an advantage over monolithic glass in reducing stress under soft body impact, while the two-row connection arrangement has a greater influence on increasing structural stiffness and reducing deflection than increasing the number of bolts within a single row.

Keywords: monolithic glass, laminated glass, glass balustrade, soft body impact, point-fixed, numerical analysis.

DAFTAR ISI

PENYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Balustrade Kaca.....	6
2.2 Spesifikasi Material	7
2.2.1 Kaca Struktural	8
2.2.2 Kaca Monolitik	9
2.2.3 Kaca Laminasi dan Interlayer.....	10
2.2.4 Stainless Steel.....	10
2.2.5 Aluminium	11
2.2.6 Sistem Angkur dan Sambungan.....	11
2.3 Metodologi Desain <i>Balustrade</i> Kaca.....	12
2.3.1 Persyaratan Arsitektural pada Balustrade Kaca.....	13
2.3.2 Kondisi Batas Struktur	17
2.3.3 Kombinasi Pembebanan	19
2.4 Perbandingan Standar Pembebanan dan Batas Lendutan	20
2.5 Penelitian Terdahulu dan Research Gap	23
BAB III METODE PENELITIAN.....	27
3.1 Kerangka Umum Penelitian	27
3.2 Analisis Respons Dinamik Balustrade Kaca.....	27
3.2.1 Persamaan Gerak Sistem Kontak Dua Derajat Kebebasan	27

3.2.2 Parameter Pengimpak EN 12600.....	28
3.2.3 Massa Ekuivalen.....	29
3.2.4 Momen Inersia dan Kekakuan Ekuivalen	29
3.2.5 Kekakuan Rotasi Kelompok Baut Point-Fixed	30
3.2.6 Frekuensi Alami dan Redaman.....	31
3.2.7 Integrasi Numerik Newmark- $\beta\beta$	31
3.3 Tebal Efektif Kaca Laminasi.....	32
3.4 Analisis Deformasi Spasial	33
3.5 Analisis Tegangan Lentur	34
3.6 Konsentrasi Tegangan di Sekitar Lubang Baut	34
3.7 Kriteria Evaluasi	35
3.8 Data Awal dan Studi Parametrik	36
3.9 Verifikasi dan Validasi Model.....	40
3.10 Diagram Alir Penelitian	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
4.1 Verifikasi dan Validasi Model Numerik.....	43
4.1.1 Konvergensi Langkah Waktu dan Kekekalan Energi.....	43
4.1.2 Verifikasi Model Pengimpak terhadap EN 12600.....	45
4.1.3 Verifikasi Kasus Batas Tebal Efektif.....	46
4.1.4 Validasi terhadap Data Eksperimental	48
4.2 Hasil Analisis Numerik.....	50
4.2.1 Karakteristik Dinamik Struktur	50
4.2.2 Respons Dinamik terhadap Waktu.....	51
4.2.3 Deformasi dan Distribusi Tegangan.....	52
4.2.4 Pengaruh Karakteristik <i>Soft Body Impact</i>	59
4.3 Pengaruh Variasi Susunan dan Jumlah Lubang <i>Point-Fixed</i>	60
4.3.1 Pengaruh Susunan Baut: Transisi Satu Baris ke Dua Baris	60
4.3.2 Pengaruh Jumlah Baut pada Susunan Dua Baris	62
4.3.3 Perubahan Distribusi dan Konsentrasi Tegangan	63
4.3.4 Mekanisme Respons Struktur.....	65
4.4 Perbandingan Kinerja Kaca Monolitik dan Kaca Laminasi.....	66
4.4.1 Perbandingan pada Tebal Kaca Setara.....	66
4.4.2 Penjelasan Mekanika Struktur	66
4.4.3 Evaluasi Keamanan dan Kemampuan Layan	67
4.4.4 Pengaruh Tingkat Energi Impak dan Sensitivitas Parameter	70
4.5 Pembahasan.....	71

4.5.1 Persamaan dengan Penelitian Terdahulu.....	71
4.5.2 Perbedaan dengan Penelitian Terdahulu	71
4.5.3 Kontribusi Penelitian.....	72
4.6 Implikasi Penelitian	72
4.6.1 Implikasi terhadap Desain <i>Balustrade</i> Kaca	72
4.6.2 Implikasi terhadap Struktur Kaca dan Bangunan Publik	73
4.6.3 Implikasi terhadap Pengembangan Standar Desain Nasional	73
4.6.4 Implikasi terhadap Penelitian Selanjutnya	73
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran.....	75
5.2.1 Saran Akademis	75
DAFTAR PUSTAKA.....	77
LAMPIRAN	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Geometri panel balustrade dan tata letak lubang point-fixed	37
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian	42
Gambar 4.1 Verifikasi numerik: konvergensi langkah waktu dan kekekalan energi.....	44
Gambar 4.2 Verifikasi model pengimpak ban ganda EN 12600	45
Gambar 4.3 Verifikasi kasus batas tebal efektif kaca laminasi	46
Gambar 4.4 Validasi model terhadap uji soft body impact Kozłowski (2019).....	48
Gambar 4.5 Respons dinamik terhadap waktu akibat impact EN 12600.....	50
Gambar 4.6 Distribusi lendutan dan tegangan utama maksimum pada empat kasus terpilih	53
Gambar 4.7 Distribusi lendutan kaca monolitik untuk seluruh konfigurasi lubang.....	54
Gambar 4.8 Distribusi lendutan kaca laminasi untuk seluruh konfigurasi lubang.....	55
Gambar 4.9 Distribusi tegangan utama maksimum kaca monolitik untuk seluruh konfigurasi lubang	56
Gambar 4.10 Distribusi tegangan utama maksimum kaca laminasi untuk seluruh konfigurasi lubang	57
Gambar 4.11 Pengaruh jumlah lubang point-fixed terhadap kekakuan, lendutan, dan tegangan.....	63
Gambar 4.12 Perbandingan kaca monolitik dan kaca laminasi pada tebal kaca setara...	65
Gambar 4.13 Peta faktor keamanan 24 kasus	66
Gambar 4.14 Studi sensitivitas tingkat energi impact dan kekakuan sambungan	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Material yang umum digunakan pada sistem balustrade kaca.....	8
Tabel 2.2 Tinggi minimum balustrade berdasarkan jenis penggunaan	14
Tabel 2.3 Daftar periksa perancangan dan verifikasi balustrade kaca	17
Tabel 2.4 Nilai pembebanan balustrade berdasarkan aplikasi	20
Tabel 2.5 Perbandingan ketentuan pembebanan dan batas lendutan antarstandar.....	21
Tabel 2.6 Beban garis balustrade berdasarkan jenis okupansi dan standar	21
Tabel 2.7 Ringkasan penelitian terdahulu dan research gap.....	23
Tabel 3.1 Sifat material yang digunakan.....	36
Tabel 3.2 Geometri panel dan parameter sambungan	37
Tabel 3.3 Variasi konfigurasi kaca yang dianalisis.....	38
Tabel 3.4 Variasi susunan dan jumlah lubang point-fixed	38
Tabel 3.5 Parameter beban soft body impact.....	39
Tabel 3.6 Parameter integrasi numerik dan model distribusi.....	39
Tabel 3.7 Matriks studi parametrik (24 kasus)	39
Tabel 4.1 Hasil uji konvergensi langkah waktu	43
Tabel 4.2 Karakteristik pengimpak ban ganda EN 12600 pada target kaku.....	44
Tabel 4.3 Verifikasi kasus batas tebal efektif kaca laminasi	45
Tabel 4.4 Validasi model terhadap uji soft body impact Kozłowski (2019)	47
Tabel 4.5 Karakteristik dinamik konfigurasi kaca	48
Tabel 4.6 Hasil analisis numerik seluruh 24 kasus	50
Tabel 4.7 Pengaruh susunan baut: transisi H1 (satu baris) ke H2 (dua baris)	59
Tabel 4.8 Pengaruh jumlah baut pada susunan dua baris: H2 ke H4.....	60
Tabel 4.9 Perbandingan kaca monolitik dan kaca laminasi pada tebal kaca setara	64
Tabel 4.10 Pemeriksaan situasi layan terhadap beban garis 1,5 kN/m.....	67