ANALISIS NUMERIK RESPONS DINAMIK PELAT PERKERASAN KAKU ORTHOTROPIK BERTUMPUAN SEMI-RIGID AKIBAT CUBIC NEGATIVE PHASE BEBAN LEDAKAN

TUGAS AKHIR

MUHAMMAD KEVIN AFIQ AL GHAZALI

1222004004

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS BAKRIE

2026

ANALISIS NUMERIK RESPONS DINAMIK PELAT PERKERASAN KAKU ORTHOTROPIK BERTUMPUAN SEMI-RIGID AKIBAT CUBIC NEGATIVE PHASE BEBAN LEDAKAN

TUGAS AKHIR

MUHAMMAD KEVIN AFIQ AL GHAZALI

1222004004

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER

UNIVERSITAS BAKRIE

2026

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya sendiri, dan seluruh sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : **Muhammad Kevin Afiq Al Ghazali**

NIM : **1222004004**

Tanda Tangan :

Tanggal : **24 Agustus 2026**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh :

Nama : Muhammad Kevin Afiq Al Ghazali

NIM : 1222004004

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik dan Ilmu Komputer

Judul Skripsi : Analisis Numerik Respons Dinamik Pelat Perkerasan Kaku Orthotropik Bertumpuan Semi-Rigid Akibat *Cubic Negative Phase* Beban Ledakan

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

Dewan Penguji :

Pembimbing 1 : Prof. Ir. Sofia W. Alisjahbana, M.Sc., Ph.D. ( )

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

Penguji 1 : Dr. Mohammad Ihsan, S.T., M.T., M.Sc. ( )

Penguji 2 : Muhammad Daffa Fachrur Reza, S.T., M.Sc. ( )

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : Agustus 2026

UNGKAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul " Analisis Numerik Respons Dinamik Pelat Perkerasan Kaku Orthotropik Bertumpuan Semi-Rigid Akibat *Cubic Negative Phase* Beban Ledakan".

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil. Penelitian ini membahas respons dinamik pelat perkerasan kaku akibat beban ledakan *cubic negative phase* dengan mempertimbangkan fase positif dan fase negatif serta variasi ketebalan pelat. Analisis dilakukan untuk mengetahui respons berupa lendutan, momen lentur, dan tegangan pada pelat.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan motivasi.
2. Prof. Ir. Sofia W. Alisjahbana, M.Sc., Ph.D. selaku Rektor Universitas Bakrie dan selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama penyusunan skripsi.
3. Fatin Adriati S.T., M.T., IPP. Selaku ketua program studi teknik sipil dan dosen pembimbing akademik yang telah membantu selama proses perkuliahan berlangsung.
4. Muhammad Nuzulul Furqan, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan selama penyusunan skripsi.
5. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama masa perkuliahan.
6. Teman-teman serta semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan penelitian ini.

Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya di bidang teknik sipil, khususnya mengenai respons dinamik pelat perkerasan kaku terhadap beban ledakan.

Jakarta, Agustus 2026

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

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

Nama : Muhammad Kevin Afiq Al Ghazali

NIM : 1222004004

Program Studi : Teknik Sipil

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 Respons Dinamik Pelat Perkerasan Kaku Orthotropik Bertumpuan Semi-Rigid Akibat Cubic Negative Phase Beban Ledakan"

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.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : Agustus 2026

Yang menyatakan

(Muhammad Kevin Afiq Al Ghazali)

ANALISIS NUMERIK RESPONS DINAMIK PELAT PERKERASAN KAKU ORTHOTROPIK BERTUMPUAN SEMI-RIGID AKIBAT CUBIC NEGATIVE PHASE BEBAN LEDAKAN

Muhammad Kevin Afiq Al Ghazali

ABSTRAK

Perkerasan kaku pada infrastruktur vital berpotensi menerima beban ledakan yang menimbulkan tekanan pada fase positif dan tarikan pada fase negatif yang umumnya diabaikan dalam analisis. Penelitian ini bertujuan menganalisis respons dinamik pelat perkerasan kaku orthotropik bertumpuan *semi-rigid* akibat *cubic negative phase* beban ledakan serta mengevaluasi peran tebal pelat dalam memitigasinya. Pelat dimodelkan sebagai pelat orthotropik tipis berukuran 6 m × 4 m dengan mutu beton K-300 di atas lapisan pendukung elastis, dengan beban ledakan setempat di tengah bentang. Fase negatif dinyatakan sebagai fungsi kubik dengan tekanan puncak 17,79 kPa selama 2 ms, sedangkan fase positif 44,48 kPa selama 1 ms. Penyelesaian dilakukan dengan *Modified Bolotin Method* dan integral Duhamel yang dihitung secara numerik untuk 25 kombinasi mode getar pada tebal pelat 0,15 m; 0,25 m; dan 0,30 m. Hasil analisis menunjukkan respons fase negatif melampaui fase positif pada pelat yang relatif tipis. Pada h = 0,25 m lendutan maksimum naik dari 9,65 μm menjadi 12,66 μm dan tegangan lentur maksimum naik dari 0,240 MPa menjadi 0,741 MPa. Penambahan tebal pelat menurunkan lendutan akibat fase negatif hingga 79,5% dan menggeser kondisi *governing* menjadi fase positif pada h = 0,30 m. Pengabaian fase negatif berisiko menghasilkan estimasi respons yang tidak konservatif.

Kata kunci: pelat perkerasan kaku, pelat orthotropik, *cubic negative phase*, beban ledakan, tebal pelat

ANALISIS NUMERIK RESPONS DINAMIK PELAT PERKERASAN KAKU ORTHOTROPIK BERTUMPUAN SEMI-RIGID AKIBAT CUBIC NEGATIVE PHASE BEBAN LEDAKAN

Muhammad Kevin Afiq Al Ghazali

ABSTRACT

Rigid pavements serving critical infrastructure may be subjected to blast loading that induces positive overpressure and negative-phase suction, which is commonly neglected in analysis. This study analyzes the dynamic response of an orthotropic rigid pavement plate with semi-rigid supports subjected to the cubic negative phase of blast loading and evaluates the role of plate thickness in mitigating it. The plate is a thin orthotropic 6 m × 4 m K-300 concrete slab on an elastic supporting layer, loaded locally at midspan. The negative phase is a cubic function with a peak pressure of 17.79 kPa over 2 ms, while the positive phase reaches 44.48 kPa over 1 ms. Solutions use the Modified Bolotin Method and the Duhamel integral, evaluated numerically for 25 vibration modes at thicknesses of 0.15, 0.25 and 0.30 m. The negative-phase response exceeds the positive-phase response for relatively thin plates. At h = 0.25 m the maximum deflection rises from 9.65 μm to 12.66 μm and the maximum bending stress from 0.240 MPa to 0.741 MPa. Increasing the thickness reduces the negative-phase deflection by 79.5% and shifts the governing condition to the positive phase at h = 0.30 m. Neglecting the negative phase risks unconservative response estimates.

Keywords: *rigid pavement slab, orthotropic plate, cubic negative phase, blast loading, plate thickness*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS ii
HALAMAN PENGESAHAN iii
KATA PENGANTAR iv
ABSTRAK vii
ABSTRACT viii
DAFTAR ISI ix
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR TABEL xi
BAB I Pendahuluan 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 4
1.4 Manfaat Penelitian 5
1.4.1 Manfaat Untuk Mahasiswa 5
1.4.2 Manfaat Untuk Peneliti 5
1.5 Batasan Masalah 5
1.6 Metode Penelitian 6
1.7 Kerangka Pemikiran 7
1.8 Jadwal Penelitian 8
1.9 Sistematika Penulisan 8
BAB II Tinjauan Pustaka 10
2.1 Teori Pelat 10
2.2 Hukum Hooke dan Elastisitas 13
2.3 Teori Lapisan Pendukung 16
2.4 Teori Ledakan 19
2.4.1 Jenis Ledakan 19
2.4.2 Gelombang Ledakan 21
2.4.3 Beban Ledakan Friedlander 24
2.4.4 Beban Ledakan pada Kendaraan 26
BAB III Metode Penelitian 28
3.1 Analisis Getaran Bebas Pelat 28
3.1.1 Penurunan Terhadap Nilai X 29
3.1.2 Penurunan Terhadap Nilai Y 30
3.1.3 Penurunan Terhadap Nilai X dan Nilai Y 30
3.2 Modified Bolotin Method 31
3.2.1 Auxiliary I 32
3.2.2 Auxiliary 2 37
3.3 Respon Dinamik Pelat 41
3.3.1 Solusi Homogen 42
3.3.2 Solusi Partikuler 45
3.3.3 Solusi Total 49
3.4 Fungsi Beban Friedlander 51
BAB IV Analisis Numerik Pelat Lantai 53
4.1 Data dan Parameter Perencanaan 53

4.2 Kekakuan Lentur dan Kekakuan Torsi Pelat....56
4.3 Frekuensi Alami (*Natural Frequency*)....57
4.4 Defleksi Absolut Maksimum....60
4.5 Riwayat Waktu (Time History)....60
4.6 Respons Dinamik Pelat: Perbandingan Fase 1, Fase 2, dan Fase Total (*Governing*)....63
4.7 Visualisasi Medan 3D dan Kontur: Lendutan pada Kondisi Kritis Desain 67
4.8 Respons Dinamik Pelat pada Fase Getaran Bebas (Fase 3): Perbandingan Tiga Variasi Tebal....68
4.9 Visualisasi Tambahan: Medan Lendutan, Momen Lentur, dan Tegangan Lentur pada Fase Negatif (Fase 2) dan Kondisi Kritis Desain....70
4.10 Pemeriksaan terhadap Batasan Masalah....74
4.11 Sintesis Pengaruh Tebal Pelat terhadap Mitigasi Fase Negatif....75
BAB V Kesimpulan dan Saran....76
5.1 Kesimpulan....76
5.2 Saran....77
DAFTAR PUSTAKA....80

DAFTAR TABEL

Tabel 1.01 Jadwal Penelitian 8

Tabel 3.01 Parameter Beban Friedlander 51

Tabel 4.01 Parameter Pelat 54
Tabel 4.02 Parameter Pondasi Elastis Termodifikasi Pasternak 55
Tabel 4.03 Parameter Beban Ledakan 55
Tabel 4.04 Kekakuan Lentur dan Torsi Pelat untuk Tiga Variasi Tebal.....56
Tabel 4.05 Nilai Frekuensi Alami ω (rad/s) untuk Variasi Tebal Pelat.....58
Tabel 4.06 Defleksi Absolut Maksimum pada Tiap Variasi Tebal Pelat.....60
Tabel 4.07 Lendutan Maksimum dan Minimum untuk Setiap Fase dan Variasi Tebal (μm) 64
Tabel 4.08 Momen Lentur Maksimum Mx dan My untuk Setiap Fase dan Variasi Tebal (N) 65
Tabel 4.09 Tegangan Lentur Maksimum σx dan σy untuk Setiap Fase dan Variasi Tebal (MPa).....65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.01 Ledakan Truk Compressed Natural Gas Sumber : Los Angeles Times 2
Gambar 1.02 Flowchart Metode Penelitian 7

Gambar 2.01 Pelat Isotropik sumber : Huber, 1923 12
Gambar 2.02 Pelat Orthotropik Sumber : Huber,1923 13
Gambar 2.03 Hukum Hooke Sumber : nuclear-power.com 14
Gambar 2.04 Pemodelan Pondasi Winkler 17
Gambar 2.05 Pemodelan Pondasi Pasternak 17
Gambar 2.06 Pemodelan Pondasi Kerr 18
Gambar 2.07 Free Air Burst Sumber : Chung et al., 2015 20
Gambar 2.08 Air Burst Sumber : Chung et al., 2015 21
Gambar 2.09 Surface Burst Sumber : Chung et al., 2015 21
Gambar 2.10 Fase dan Durasi Ledakan Sumber : Departemen Pertahanan AS ... 22

Gambar 3.01 Pelat Lantai Orthotropik dengan Beban Dinamik Transversal 28

Gambar 4.01 Denah Pelat Lantai yang Ditinjau 53
Gambar 4.02 Riwayat Tekanan Beban Ledakan Friedlander (Fase Positif dan Fase Negatif) 56
Gambar 4.03 Ragam Getar Frekuensi Alami untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 59
Gambar 4.04 Riwayat Lendutan Titik Tengah Pelat (Fase 1-3) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 61
Gambar 4.05 Riwayat Lendutan - Fase 1 (Fase Positif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat . 62
Gambar 4.06 Riwayat Lendutan - Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 62
Gambar 4.07 Riwayat Lendutan - Fase 3 (Getaran Bebas) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 63
Gambar 4.08 Perbandingan Lendutan Maksimum untuk Setiap Fase dan Variasi Tebal Pelat 66
Gambar 4.09 Perbandingan Momen Lentur Mx Maksimum untuk Setiap Fase dan Variasi Tebal Pelat 66
Gambar 4.10 Perbandingan Tegangan Lentur σx Maksimum untuk Setiap Fase dan Variasi Tebal Pelat 67
Gambar 4.11 Medan Lendutan 3D pada Kondisi Kritis Desain (Fase Total, Governing) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 68
Gambar 4.12 Kontur Lendutan pada Kondisi Kritis Desain (Fase Total, Governing) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 68
Gambar 4.13 Medan Lendutan 3D pada Fase 3 / Getaran Bebas untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 69
Gambar 4.14 Kontur Lendutan pada Fase 3 / Getaran Bebas untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 69
Gambar 4.15 Medan Momen Lentur Mx pada Fase 1 untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 70
Gambar 4.16 Medan Lendutan 3D pada Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 71
Gambar 4.17 Kontur Lendutan pada Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 71

Gambar 4.18 Kontur Momen Lentur Mx pada Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat..... 71
Gambar 4.19 Kontur Momen Lentur My pada Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat..... 72
Gambar 4.20 Kontur Tegangan Lentur σx pada Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat..... 72
Gambar 4.21 Kontur Tegangan Lentur σy pada Fase 2 (Fase Negatif) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat..... 72
Gambar 4. 22 Kontur Momen Lentur Mx pada Kondisi Kritis Desain (Fase Total, Governing) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 73
Gambar 4.23 Kontur Momen Lentur My pada Kondisi Kritis Desain (Fase Total, Governing) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 73
Gambar 4.24 Kontur Tegangan Lentur σx pada Kondisi Kritis Desain (Fase Total, Governing) untuk Tiga Variasi Tebal Pelat 74