

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN TUGAS	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTTO	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xxiv
INTISARI	xxvii
ABSTRACT	xxviii
I. PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Perumusan Masalah	4
I.3. Batasan Masalah	5

I.4.	Tujuan Penelitian	5
I.5.	Manfaat Penelitian	5
II.	TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1.	Bunyi dari Bundengan	6
II.1.1.	Bunyi yang Menyerupai <i>Gong</i>	6
II.1.2.	Persepsi Nada	7
II.2.	Simulator Bundengan	8
II.2.1.	Simulator Senar	8
II.2.2.	Simulator Kowangan	9
II.2.3.	Simulator Pelat Bambu (<i>Kendangan</i>)	10
II.3.	Pemodelan Numerik pada Alat Musik Lain	11
II.4.	Kontribusi Penelitian Penulis terhadap Proses Konservasi Bundengan	12
III.	DASAR TEORI	13
III.1.	Gerakan Harmonik Sederhana	13
III.2.	Persamaan Gelombang 1 Dimensi	15
III.2.1.	Senar Tanpa Beban Titik Massa	15
III.2.2.	Senar Dengan Beban Titik Massa	17
III.3.	Osilasi Paksa	17
III.4.	Efek Kondisi Batas dengan Impedansi Mekanik Tertentu	19
III.4.1.	Senar dengan Massa pada Ujungnya	20
III.4.2.	Senar dengan Resistansi pada Ujungnya	21
III.5.	Metode Numerik	24
III.5.1.	Metode Euler	24
III.5.2.	Tabel Butcher	25
III.5.3.	Interpolasi	28

IV. PELAKSANAAN PENELITIAN	30
IV.1. Alat dan Bahan Penelitian	30
IV.2. Tata Laksana Penelitian	30
IV.2.1. Studi Literatur	31
IV.2.2. Pembuatan Simulator	31
IV.2.3. Melakukan Simulasi dengan Variasi Nilai Impedansi Mekanik pada Kondisi Batas	41
IV.3. Rencana Analisis Hasil	42
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
V.1. Perbandingan dan Pemilihan Bahasa Pemrograman dengan Durasi Eksekusi Paling Singkat	44
V.1.1. Pengaturan Simulator Bahasa Pemrograman	44
V.1.2. Proses Optimasi Bahasa Pemrograman	46
V.1.3. Hasil Simulasi dan Pembahasan Pemilihan Bahasa Pemrograman	49
V.2. Perbandingan dan Pemilihan Metode Numerik dengan Akurasi Terbaik	51
V.2.1. Metode Numerik	51
V.2.2. Penyusunan Kode Simulator Metode Runge–Kutta	53
V.2.3. Hasil Simulasi dan Pembahasan Metode Numerik Runge–Kutta	56
V.2.4. Pembahasan untuk Penyebab Perbedaan Frekuensi Dasar	60
V.2.5. Pembahasan untuk Uji Diskritisasi	62
V.3. Perbandingan dan Pemilihan Metode Simulasi dengan Durasi Ek- sekusi Paling Singkat	64
V.3.1. Pengaturan Metode Simulasi	64
V.3.2. Hasil Simulasi dan Pembahasan Metode Simulasi	66

V.4.	Validasi Simulator terhadap Hasil Analitik Kondisi Batas Impedansi Mekanik	68
V.4.1.	Pengaturan Simulator untuk Validasi Kondisi Batas Impedansi Mekanik	68
V.4.2.	Hasil Validasi dan Pembahasan untuk Kondisi Batas Massa . . .	70
V.4.3.	Hasil Validasi dan Pembahasan untuk Kondisi Batas Resistansi	71
V.5.	Validasi Simulator terhadap Simulator Sebelumnya	73
V.5.1.	Pengaturan untuk Validasi terhadap Simulator Sebelumnya . . .	74
V.5.2.	Hasil Validasi dan Pembahasan untuk Validasi terhadap Simulator Sebelumnya	76
V.6.	Variasi Nilai Impedansi Mekanik pada Kondisi Batas	80
V.6.1.	Pengaturan Simulasi Variasi Nilai Impedansi Mekanik	81
V.6.2.	Hasil Simulasi dan Pembahasan untuk Variasi Nilai Impedansi Mekanik	83
VI.	KESIMPULAN DAN SARAN	92
VI.1.	Kesimpulan	92
VI.2.	Temuan Tambahan	93
VI.3.	Saran	93
	DAFTAR PUSTAKA	95
	LAMPIRAN	
A.	Tautan	99
A.1.	Kode Sumber	99
A.2.	Animasi Simulasi	99
B.	Penurunan dan Penjelasan Persamaan	100

B.1.	Kondisi Batas Senar dengan Massa pada Ujungnya	100
B.2.	Kondisi Batas Senar dengan Resistansi pada Ujungnya	102
B.3.	Penjelasan Metode DP5(4) dengan Ukuran Langkah Waktu Adaptif	106
B.3.1.	Inisiasi Awal	106
B.3.2.	Penghitungan Nilai y_{i+1} dan e_{est}	108
B.3.3.	Penghitungan Nilai Δt_{i+1}	108
B.3.4.	Penjelasan Interpolasi Berdasarkan <i>Dense Output</i>	110
B.3.5.	Penjelasan Algoritma Penyimpanan Solusi Hasil Interpolasi	111
C.	Data Hasil Simulasi	113
C.1.	Data Durasi Eksekusi pada Perbandingan dan Pemilihan Bahasa Pemrograman dengan Durasi Eksekusi Paling Singkat	113
C.2.	Data Hasil Simulasi Perbandingan Metode Integrasi Numerik	117
C.3.	Grafik Amplitudo Getaran Senar untuk Validasi terhadap Kondisi Batas Resistansi	127
C.4.	Grafik Tambahan untuk Variasi Impedansi Mekanik	129

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Hasil pengukuran sinyal akustik pada <i>bundengan</i> [1, 10].	8
Tabel 3.1.	Tabel Butcher secara umum [17].	26
Tabel 3.2.	Ekspansi dari tabel Butcher umum.	26
Tabel 3.3.	Tabel Butcher untuk metode Euler [17].	27
Tabel 3.4.	Tabel Butcher untuk metode Runge-Kutta orde 4 [17].	27
Tabel 4.1.	Daftar alat dan bahan penelitian.	30
Tabel 4.2.	Tabel Butcher untuk metode RK21 [17].	35
Tabel 4.3.	Tabel Butcher untuk metode RK31 [17].	35
Tabel 4.4.	Tabel Butcher untuk metode RK41 [17].	36
Tabel 4.5.	Tabel Butcher untuk metode RK5 [17].	36
Tabel 4.6.	Tabel Butcher untuk metode Dormand–Prince (DP5(4)) [17].	36
Tabel 4.7.	Tabel Butcher untuk metode dengan estimasi galat	37
Tabel 5.1.	Hasil perhitungan nilai akar rerata kuadrat galat hasil perhitungan dengan metode numerik tertentu pada permasalahan 1, 2, dan 3. Permasalahan tersebut memiliki solusi berupa fungsi polinomial dengan nilai derajat polinomial 2, 3, dan 4 secara berurutan untuk 3 permasalahan tersebut.	57
Tabel 5.2.	Akar rerata kuadrat galat metode DP5(4)a dan DP5(4)ai ketika digunakan untuk menyelesaikan permasalahan 1, 2, dan 3.	58
Tabel 5.3.	Hasil perhitungan permasalahan 4 untuk $T = 10$ [N], dengan $\Delta t = 1/44.100$, dan durasi simulasi 1 [s].	59
Tabel 5.4.	Hasil perhitungan permasalahan 4 untuk $T = 20$ [N], dengan $\Delta t = 1/44.100$, dan durasi simulasi 1 [s].	59

Tabel 5.5.	Hasil perhitungan permasalahan 4 untuk $T = 30$ [N], dengan $\Delta t = 1/44.100$, dan durasi simulasi 1 [s].	59
Tabel 5.6.	Hasil perhitungan permasalahan 4 untuk $T = 40$ [N], dengan $\Delta t = 1/44.100$, dan durasi simulasi 1 [s].	59
Tabel 5.7.	Hasil perhitungan permasalahan 4 untuk $T = 50$ [N], dengan $\Delta t = 1/44.100$, dan durasi simulasi 1 [s].	59
Tabel 5.8.	Hasil variasi jumlah diskritisasi elemen senar.	63
Tabel 5.9.	Frekuensi analitik dan frekuensi hasil simulasi untuk validasi kondisi batas massa serta rasio frekuensi terbesar dan beda frekuensi relatif terbesar antara 2 frekuensi tersebut.	72
Tabel 5.10.	Koefisien peluruhan amplitudo getaran senar akibat variasi parameter R_L	72
Tabel 5.11.	Perbandingan beberapa puncak frekuensi getaran hasil eksekusi simulator, di mana f_1 adalah hasil simulasi Sedjati dan f_2 adalah hasil simulasi penulis.	78
Tabel 5.12.	Batasan Eksplorasi	82
Tabel 5.13.	Durasi stabil eksekusi simulator dengan sel bagian atas adalah getaran senar tanpa hambatan udara dan bagian bawah adalah getaran senar dengan hambatan udara, di mana sel kosong adalah parameter yang tidak disimulasikan karena membutuhkan durasi simulasi lebih lama daripada 1 [jam], tanda T berarti parameter tersebut tidak dapat disimulasikan karena membutuhkan $\Delta t \leq 10^{-16}$, dan sel berwarna merah adalah sel dengan durasi stabil simulasi $< 1,00$ [s]. Nilai $m_L/m_s = 0$ dan $R_L/(\mu\gamma) = 0$ pada tabel ini diwakili dengan $\log(m_L/m_s)$ dan $\log(R_L/(\mu\gamma))$ sama dengan -10	83

Tabel 5.14. Pengaruh nilai m_L/m_s terhadap $(R_L/(\mu\gamma))_{ref}$	90
Tabel C.1. Durasi eksekusi kode dalam [s].	113
Tabel C.1. (lanjutan) Durasi eksekusi kode dalam [s].	114
Tabel C.1. (lanjutan) Durasi eksekusi kode dalam [s].	115
Tabel C.1. (lanjutan) Durasi eksekusi kode dalam [s].	116
Tabel C.2. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 1 menggunakan implementasi langsung. Pada permasalahan ini, metode Euler tidak dapat mencapai hasil yang akurat.	117
Tabel C.3. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 2 menggunakan implementasi langsung. Pada permasalahan ini, metode Euler, Sedjati, dan RK21 tidak dapat mencapai hasil yang akurat.	118
Tabel C.3. (lanjutan) Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 2 menggunakan implementasi langsung. Pada permasalahan ini, metode Euler, Sedjati, dan RK21 tidak dapat mencapai hasil yang akurat.	119
Tabel C.4. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 3 menggunakan implementasi langsung. Pada permasalahan ini, metode Euler, Sedjati, RK21, dan RK31 tidak dapat mencapai hasil yang akurat.	120
Tabel C.4. (lanjutan) Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 3 menggunakan implementasi langsung. Pada permasalahan ini, metode Euler, Sedjati, RK21, dan RK31 tidak dapat mencapai hasil yang akurat.	121
Tabel C.5. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 1 menggunakan pustaka DifferentialEquations.jl.	122

Tabel C.6. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 2 menggunakan pustaka DifferentialEquations.jl.	123
Tabel C.7. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 3 menggunakan pustaka DifferentialEquations.jl.	124
Tabel C.8. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 1 menggunakan metode integrasi numerik DP5(4) dengan ukuran langkah waktu adaptif dan pengaturan galat 10^{-6}	124
Tabel C.9. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 2 menggunakan metode integrasi numerik DP5(4) dengan ukuran langkah waktu adaptif dan pengaturan galat 10^{-6}	125
Tabel C.10. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 3 menggunakan metode integrasi numerik DP5(4) dengan ukuran langkah waktu adaptif dan pengaturan galat 10^{-6}	125
Tabel C.11. Hasil perhitungan amplitudo solusi untuk permasalahan 1, 2, dan 3 menggunakan metode integrasi numerik DP5(4) dengan langkah waktu adaptif yang diinterpolasi.	126

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. <i>Bundengan</i> beserta bagian komponen-komponen penyusunnya, yaitu (a) <i>kowangan</i> , (b) pelat bambu, dan (c) senar dan bandulan.	2
Gambar 1.2. Sub permasalahan dari pelarasan <i>bundengan</i> [2].	3
Gambar 2.1. Pengaruh posisi bandulan terhadap durasi getaran [11].	6
Gambar 3.1. Skema sistem pegas bermassa [14].	13
Gambar 3.2. Proyeksi gerak melingkar terhadap gerak dari sistem pegas bermassa [14].	14
Gambar 3.3. Segmen senar dengan tegangan T [7].	16
Gambar 3.4. Osilator harmonik teredam dengan gaya penggerak $f(t)$ [7].	17
Gambar 3.5. Interpolasi linier [16].	28
Gambar 4.1. Diagram alir tata laksana penelitian.	30
Gambar 4.2. Diagram alir pembuatan simulator	32
Gambar 4.3. Skema diskritisasi elemen spasial dan elemen waktu, di mana (1) garis hitam-merah menunjukkan segmen senar bermassa Δm_s yang jumlahnya sama dengan jumlah elemen spasial, $n_s = n_x - 1$ dan (2) diskritisasi elemen waktu dimulai dari 0, karena $t = 0$ merupakan kondisi awal dari senar <i>bundengan</i> saat mulai dipetik.	33
Gambar 4.4. Diagram alir validasi simulator	40
Gambar 5.1. Hasil simulasi stabil untuk $n_t = 100.000$	44

- Gambar 5.2. Rerata durasi eksekusi kode untuk permasalahan getaran senar *bundengan* dengan *bandulan* berupa titik elemen massa, dengan pengulangan sebanyak 50 kali dan *error bar* mewakili deviasi standar. Eksekusi dengan Scilab untuk $n_t = 100.000$ hanya dilakukan untuk 5 kali pengulangan, karena tiap pengulangan memerlukan durasi eksekusi sekitar 238 [s]. 50
- Gambar 5.3. Selisih $|\sin(\theta) - \tan(\theta)|$ akibat pengaruh amplitudo pemetikan dengan garis biru menunjukkan $|\sin(\theta) - \tan(\theta)| = 10^{-6}$. 62
- Gambar 5.4. Skema peningkatan performa dalam bentuk durasi eksekusi yang lebih singkat ketika *multithreading* dibandingkan dengan *single threading* [34]. 65
- Gambar 5.5. Rerata durasi eksekusi kode untuk variasi pada jumlah *thread* dan jumlah segmen senar, n_s , dengan pengulangan sebanyak 5 kali dan *error bar* pada grafik ini mewakili deviasi standar dari 5 pengulangan tersebut. 66
- Gambar 5.6. Kondisi batas dengan ujung tetap pada $x = 0$ serta gabungan massa dan peredam pada $x = L$, di mana massa dan peredam tersebut hanya bisa bergerak secara transversal (sumbu-y). . . 69
- Gambar 5.7. Spektrum frekuensi getaran senar akibat variasi parameter kondisi batas massa m_L , di mana tiap grafik memiliki *offset* yang berbeda. 71
- Gambar 5.8. Lokasi elemen senar di dalam simulator penulis berdasarkan indeks *array*, di mana lokasi tersebut dituliskan dalam bentuk notasi $x[\text{indeks}]$ 74
- Gambar 5.9. Diagram gaya bebas yang menunjukkan gaya yang bekerja pada bagian ujung kanan dari *bandulan* [5]. 76

Gambar 5.10. Spektrum frekuensi getaran senar berdasarkan variasi rasio parameter H/D	77
Gambar 5.11. Hasil simulasi yang tidak stabil ketika nilai $H/D = 2,6$	77
Gambar 5.12. Spektrum frekuensi getaran hasil simulasi Sedjati ketika diberi variasi nilai H/D , di mana puncak yang ditandai dengan warna merah adalah puncak ke-4 untuk H/D sebesar 2,0 hingga 2,5 secara berurutan dari bagian atas [5].	79
Gambar 5.13. Lokasi elemen senar dan kondisi batas di dalam simulator penulis berdasarkan indeks <i>array</i> , di mana lokasi tersebut dituliskan dalam bentuk notasi $x[\text{indeks}]$	80
Gambar 5.14. Pengaruh rasio m_L/m_s terhadap pergeseran frekuensi puncak, di mana (a) adalah getaran tanpa hambatan udara dan (b) adalah getaran dengan hambatan udara. Garis tren menghubungkan nilai $R_L/(\mu\gamma)$ yang sama.	84
Gambar 5.15. Pengaruh rasio $R_L/(\mu\gamma)$ terhadap pergeseran frekuensi puncak, di mana (a) adalah getaran tanpa hambatan udara dan (b) adalah getaran dengan hambatan udara. Garis tren menghubungkan nilai m_L/m_s yang sama.	85
Gambar 5.16. Pengaruh rasio m_L/m_s terhadap rasio amplitudo saat $t = 0,05$ [s] terhadap amplitudo awal, di (a) adalah getaran tanpa hambatan udara dan (b) adalah getaran dengan hambatan udara. Garis tren menghubungkan nilai $R_L/(\mu\gamma)$ yang sama.	86

Gambar 5.17. Pengaruh rasio $R_L/(\mu\gamma)$ terhadap rasio amplitudo saat $t = 0,05$ [s] terhadap amplitudo awal, di mana (a) adalah untuk getaran tanpa hambatan udara dan (b) adalah getaran dengan hambatan udara. Garis tren menghubungkan nilai m_L/m_s yang sama.	87
Gambar B.1. Kondisi batas dengan ujung tetap pada $x = 0$ dan massa pada $x = L$, di mana massa tersebut hanya bisa bergerak secara transversal (sumbu-y).	100
Gambar B.2. Kondisi batas dengan ujung tetap pada $x = 0$ dan peredam pada $x = L$, di mana peredam tersebut hanya bisa bergerak secara transversal (sumbu-y).	102
Gambar B.3. Diagram alir perhitungan solusi persamaan diferensial menggunakan metode DP5(4) dengan ukuran langkah waktu adaptif.	107
Gambar B.4. Diagram alir algoritma penyimpanan solusi hasil interpolasi.	111
Gambar C.1. Pengaruh variasi parameter R_L terhadap amplitudo getaran senar bagian tengah (<i>mid</i>) dan bagian ujung dengan kondisi batas yang divariasikan (<i>boundary</i>), di mana untuk $R_L/(\mu\gamma) = 10^{-2}$ dan 10^{-1} bagian tengah dan bagian ujung dengan kondisi batas memiliki simpangan yang sama besar sehingga menghasilkan grafik yang menumpuk.	127

Gambar C.2. Puncak frekuensi getaran senar *bundengan* dengan *bandulan* akibat variasi nilai m_L/m_s , di mana dibagi menjadi 3 daerah $R_L/(\mu\gamma)$ untuk nilai $R_L/(\mu\gamma) = [0, 10^{-2}]$, $[10^{-2}, 10^2]$, $[10^2, 10^{10}]$ yang ditunjukkan pada (a) dan (b), (c) dan (d), dan (e) dan (f) secara berurutan. Getaran senar *bundengan* tanpa hambatan udara ditunjukkan pada (a), (c), dan (e), sedangkan untuk getaran dengan hambatan udara ditunjukkan pada (b), (d), dan (f). 129

Gambar C.3. Puncak frekuensi getaran senar *bundengan* dengan *bandulan* akibat variasi nilai $R_L/(\mu\gamma)$, di mana dibagi menjadi 3 daerah m_L/m_s untuk nilai $m_L/m_s = [0, 10^{-2}]$, $[10^{-2}, 10^2]$, $[10^2, 10^{10}]$ yang ditunjukkan pada (a) dan (b), (c) dan (d), dan (e) dan (f) secara berurutan. Getaran senar *bundengan* tanpa hambatan udara ditunjukkan pada (a), (c), dan (e), sedangkan untuk getaran dengan hambatan udara ditunjukkan pada (b), (d), dan (f). 131

Gambar C.4. Rasio amplitudo getaran senar *bundengan* saat $t = 0,05$ [s] terhadap amplitudo pemetikan awal akibat variasi nilai m_L/m_s , di mana dibagi menjadi 3 daerah $R_L/(\mu\gamma)$ untuk nilai $R_L/(\mu\gamma) = [0, 10^{-2}]$, $[10^{-2}, 10^2]$, $[10^2, 10^{10}]$ yang ditunjukkan pada (a) dan (b), (c) dan (d), dan (e) dan (f) secara berurutan. Getaran senar *bundengan* tanpa hambatan udara ditunjukkan pada (a), (c), dan (e), sedangkan untuk getaran dengan hambatan udara ditunjukkan pada (b), (d), dan (f). 133

Gambar C.5. Rasio amplitudo getaran senar *bundengan* saat $t = 0,05$ [s] terhadap amplitudo pemetikan awal akibat variasi nilai $R_L/(\mu\gamma)$, di mana dibagi menjadi 3 daerah m_L/m_s untuk nilai $m_L/m_s = [0, 10^{-2}]$, $[10^{-2}, 10^2]$, $[10^2, 10^{10}]$ yang ditunjukkan pada (a) dan (b), (c) dan (d), dan (e) dan (f) secara berurutan. Getaran senar *bundengan* tanpa hambatan udara ditunjukkan pada (a), (c), dan (e), sedangkan untuk getaran dengan hambatan udara ditunjukkan pada (b), (d), dan (f). 135