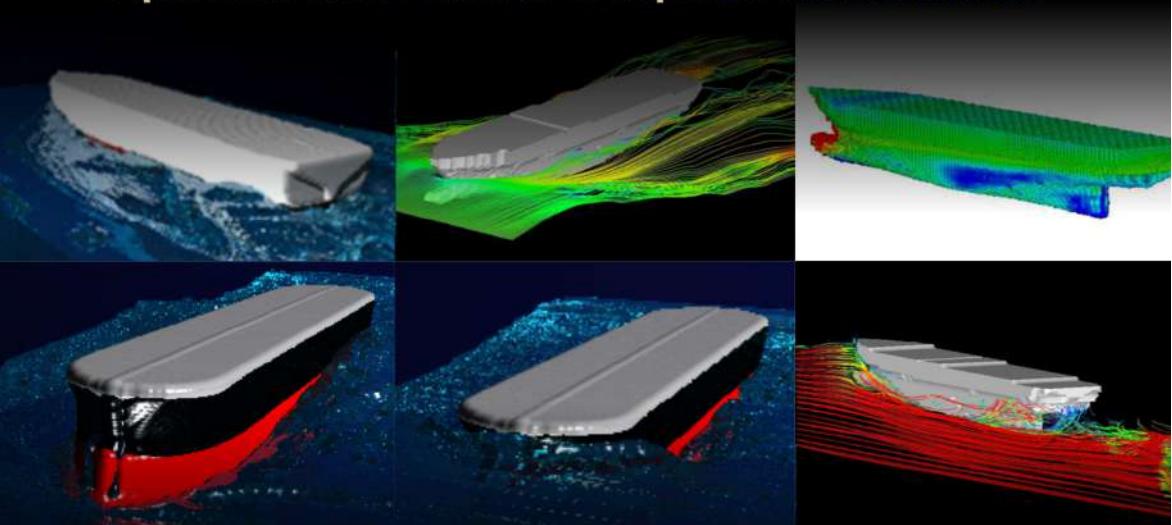


Interaksi Struktur Apung - Fluida

Aplikasi Pada Teknik Perkapalan dan Kelautan



INTERAKSI STRUKTUR APUNG-FLUIDA
APLIKASI PADA TEKNIK PERKAPALAN DAN KELAUTAN

INTERAKSI STRUKTUR APUNG-FLUIDA
APLIKASI PADA TEKNIK PERKAPALAN DAN KELAUTAN

Suandar Baso
Andi Dian Eka Anggriani
Andi Ardianti

Penerbit



UPT Unhas Press

INTERAKSI STRUKTUR APUNG-FLUIDA

APLIKASI PADA TEKNIK PERKAPALAN DAN KELAUTAN

Penulis

Suandar Baso

Andi Dian Eka Anggriani

Andi Ardianti

Tata Letak

Muhammad Ihlasul Amal

ISBN 978-979-530-304-6

Cetakan I 2021

Penerbit

UPT Unhas Press

Keanggotaan

IKAPI No.002/SSL/01 dan APPTI

Alamat Penerbit

Gedung UPT Unhas Press, Kampus Unhas Tamalanrea

Jalan Perintis Kemerdekaan KM 10, Makassar, Sulawesi Selatan

HP/WA: +62 8229 9555 591 — Email: unhaspress@gmail.com

Laman: unhaspress.unhas.ac.id

Hak Cipta ©Suandar Baso, dkk. *All rights reserved.* Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak isi buku ini, baik sebagian maupun seluruhnya dalam bentuk apapun tanpa izin tertulis dari penulis/penerbit.

Kata Pengantar

Segala puji bagi Allah SWT., Tuhan semesta raya. Shalawat dan salam semoga tetap berlimpah kepada Nabi Agung junjungan kita, Nabi Muhammad SAW., keluarga, sahabat dan seluruh umatnya hingga akhir zaman.

Pembaca yang budiman, buku ini kami hadirkan dengan judul “Interaksi Struktur Apung-Fluida: Aplikasi pada Teknik Perkapalan dan Kelautan”. Buku ini disusun dari hasil studi-studi berkaitan dengan interaksi struktur apung-fluida, sehingga sangat sesuai peruntukkan mahasiswa, perkerajaan, dan industri yang konsen di bidang perkapalan dan kelautan.

Di dalam buku ini, metode numerik yakni skema Euler dan partikel Lagrange telah dikembangkan untuk dapat menghasilkan sebuah solusi-solusi yang akurat pada aplikasi di bidang perkapalan dan kelautan dimana menyajikan persamaan-persamaan yang digunakan, verifikasi hasil numerik, prediksi tahanan kapal di air tenang dan di gelombang, prediksi gerak kapal di gelombang, dan investigasi perilaku hidrodinamika dan hidroelastisitas kapal dan struktur apung lainnya di gelombang. Juga, solusi-solusi numerik yang telah dihasilkan telah divalidasi di mana menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen. Metode numerik yang telah dikembangkan dapat dijadikan sebagai perangkat *computational fluid dynamics* (CFD) untuk digunakan di bidang perkapalan dan kelautan.

Terakhir, semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Tentunya masih banyak kekurangan dalam penyusunan buku ini, oleh karena itu saran dan masukan selalu kami harapkan untuk menjadikan buku ini lebih baik lagi.

Ucapan terima kasih kami haturkan kepada semua pihak yang membantu terselesainya buku ini. Semoga Allah mencatatnya sebagai tanaman yang selalu tumbuh dan dapat kita panen buahnya di akhirat nanti, Aamiin.

Tim Penyusun

Daftar Isi

Kata Pengantar — v

Daftar Isi — vii

Daftar Gambar — xiii

Daftar Tabel — xxiii

#1 Pendahuluan — 1

1.1. Latar Belakang — 1

1.1.1. Permukaan Bebas Nonlinear pada Rekayasa
Maritim — 2

1.1.2. Gerak dan Hidroelastisitas Kapal — 6

1.1.3.	Aplikasi <i>Computational Fluid Dynamics</i> Untuk Interaksi Fluida-Struktur Apung	— 10
1.2.	Tujuan dan Ruang Lingkup	— 14
#2	Metode Numerik	— 17
2.1.	Skema Euler dengan Partikel Lagrange	— 18
2.1.1.	Susunan Kisi Euler dengan Partikel Lagrange	— 18
2.1.2.	Sifat Fisik Partikel Lagrange	— 21
2.1.3.	Evolusi Waktu Partikel Lagrange	— 23
2.1.4.	Pendistribusian Ulang Partikel Permukaan Bebas	— 23
2.1.5.	Fungsi Densitas Partikel SPH Pada Kisi	— 29
2.2.	Persamaan-Persamaan Umum Aliran Multifase (<i>Governing Equations for Multiphase Flow</i>)	— 29
2.2.1.	Persamaan Diferensial	— 29
2.2.2.	Model Aliran Turbulen	— 32
2.2.3.	Teknik Pembagian Waktu (<i>Time Splitting Technique</i>)	— 33
2.2.4.	Skema Tipe-M dari Metode CIP	— 33
2.3.	Persamaan Umum untuk Fase Padat	— 35
2.3.1.	Metode SPH	— 35
2.3.2.	Fungsi Penghalusan (<i>Smoothing Function</i>)	— 39

2.3.3.	Persamaan Umum Fase Padat	—	40
2.3.4.	Persamaan Benda Elastis-plastis	—	44
2.3.5.	3 Dimensi (3D) Gerak Benda Solid dengan Partikel SPH	—	55
2.3.6.	Solusi Terpisah dari Gerak Benda Padat-Deformasi Elastis	—	59
2.4.	Prosedur Komputasi	—	60
#3	Verifikasi Metode Numerik	—	63
3.1.	Disket Zalesak (<i>Zalesak's Disk</i>)	—	64
3.2.	Medan Pusaran Tunggal (<i>Single Vortex Field</i>)	—	65
3.3.	Tiga Dimensi (3D) Bidang Deformasi	—	67
#4	Metode Eksperimen	—	71
4.1.	Pengujian Tahanan Kapal di Air Tenang	—	72
4.1.1.	Model Kapal	—	72
4.1.2.	Pengaturan Peralatan Pengujian (<i>Experimental Set-up</i>)	—	74
4.2.	Pengujian Gerak Kapal di Gelombang	—	74
4.2.1.	Model Kapal	—	75
4.2.2.	Pengaturan Peralatan Pengujian (<i>Experimental Set-up</i>)	—	76
4.3.	Pengujian <i>Water Entry</i>	—	79
4.3.1.	Model Elastis Berbentuk Silinder	—	79
4.3.2.	Model Elastis Berbentuk Persegi		

4.4.	Pengujian Jatuh Bebas (<i>Dropping Test</i>) Model Kapal Elastis	— 86
#5	Aplikasi Pada Tahanan Kapal di Air Tenang	— 93
5.1.	Aplikasi Pada Tahanan Kapal Tanker	— 94
5.1.1.	Kondisi Awal Komputasi	— 94
5.1.2.	Hasil dan Pembahasan	— 95
5.2.	Aplikasi Pada Tahanan Kapal Perikanan	— 98
5.2.1.	Kondisi Awal Komputasi	— 98
5.2.2.	Hasil dan Pembahasan	— 99
5.3.	Aplikasi Pada Tahanan Kapal Feri Penumpang Cepat	— 106
5.3.1.	Kondisi Awal Komputasi	— 106
5.3.2.	Hasil dan Pembahasan	— 108
#6	Aplikasi Pada Gerak Kapal di Gelombang Nonlinear	— 111
6.1.	Propagasi Gelombang	— 112
6.2.	Aplikasi Pada Gerak Kapal Tanker	— 114
6.2.1.	Kondisi Awal Komputasi	— 114
6.2.2.	Hasil dan Pembahasan	— 116
6.3.	Aplikasi Pada Gerak Kapal Perikanan	— 124
6.3.1.	Kondisi Awal Komputasi	— 124
6.3.2.	Hasil dan Pembahasan	— 126

6.4.	Aplikasi Pada Gerak Kapal Feri Penumpang Cepat	—	126
6.4.1.	Kondisi Awal Komputasi	—	126
6.4.2.	Metode <i>Strip Theory</i>	—	129
6.4.3.	Hasil dan Pembahasan	—	131
#7	Aplikasi Pada Perilaku Hidroelastis	—	137
7.1.	Aplikasi pada <i>Water Entry</i> dengan <i>Splashing</i>	—	138
7.1.1.	Benda Apung Silinder Elastis	—	138
7.1.2.	Benda Persegi Panjang Elastis	—	146
7.1.3.	Badan Kapal Elastis	—	153
7.2.	Benturan Kapal (<i>Ship Slamming</i>) di Gelombang	—	157
7.2.1.	Aplikasi Pada Kapal Tanker	—	160
7.2.2.	Aplikasi Pada Kapal Perikanan	—	163
7.2.3.	Aplikasi Pada Kapal Feri Penumpang Cepat	—	168
#8	Penutup	—	177
	Daftar Pustaka	—	181

Daftar Gambar

- Gambar 1.1** a). Aliran permukaan bebas gelombang secara aktual, b). Hasil komputasi aliran permukaan bebas — 3
- Gambar 1.2** a). Gerak kapal di gelombang; b). Hasil komputasi gerak kapal di gelombang. — 7
- Gambar 1.3** a). Efek hidroelastisitas yang dialami oleh kapal di kondisi lautan; b). Hasil komputasi terkait hidroelastisitas kapal — 8
- Gambar 1.4** Gambaran beberapa teknik penangkapan (*capturing technique*) terkait dengan keakuratan dan efek-efek nonlinear — 12
- Gambar 2.1** Letak dan distribusi partikel Lagrange pada susunan kisi

- Euler — 20
- Gambar 2.2** Ilustrasi skema Euler dengan partikel Lagrange — 20
- Gambar 2.3** Ilustrasi skema model fungsi densitas kisi dan partikel — 22
- Gambar 2.4** Salah satu contoh distribusi partikel pada kasus *water entry (water entry problem)* sebuah benda padat berbentuk bulat — 25
- Gambar 2.5** Ilustrasi distribusi partikel di sekitar permukaan bebas — 25
- Gambar 2.6** Ilustrasi skema distribusi fungsi Kernel (*Kernel function*) — 28
- Gambar 2.7** Integrasi waktu untuk teknik pembagian waktu (*time splitting technique*) — 33
- Gambar 2.8** Skema distribusi fungsi Kernel (*Kernel function*) — 36
- Gambar 2.9** Radius pengaruh area dari kontinum partikel — 37
- Gambar 3.1** Kasus diskret Zalesak dengan jumlah 4 partikel dalam satu sel di permukaan — 65
- Gambar 3.2** Kasus diskret Zalesak dengan jumlah 16 partikel dalam satu sel di permukaan — 65
- Gambar 3.3** Solusi dari metode CIP — 66
- Gambar 3.4** Solusi metode numerik dengan 4 partikel dalam satu sel pada permukaan — 67
- Gambar 3.5** Solusi metode numerik dengan 16 partikel dalam satu sel pada permukaan — 67
- Gambar 3.6** Solusi metode CIP pada bentuk bola — 69
- Gambar 3.7** Solusi metode numerik untuk bentuk bola dengan

- jumlah 8 partikel dalam satu sel di permukaan — 69
- Gambar 3.8** Solusi metode numerik untuk bentuk bola dengan jumlah 64 partikel dalam satu sel di permukaan — 69
- Gambar 3.9** Solusi metode CIP untuk bentuk kelinci — 70
- Gambar 3.10** Solusi metode numerik untuk bentuk kelinci dengan jumlah 8 partikel — 70
- Gambar 3.11** Solusi metode CIP untuk bentuk kuda — 70
- Gambar 3.12** Solusi metode numerik untuk bentuk kuda dengan jumlah 8 partikel — 70
- Gambar 4.1** Model kapal feri penumpang cepat — 73
- Gambar 4.2** Rencana garis lambung kapal feri penumpang cepat — 73
- Gambar 4.3** Desain pengujian dan pengukuran tahanan kapal di tangki saluran sirkulasi air — 75
- Gambar 4.4** Model kapal ikan — 76
- Gambar 4.5** Kolam tarik (*towing tank*) milik Hiroshima University — 78
- Gambar 4.6** *Load cell* terhubung ke model kapal — 78
- Gambar 4.7** Model elastis berbentuk silinder dan titik pengukuran regangan (*strain*) pada bagian model — 81
- Gambar 4.8** Desain struktur pengujian dan peralatan pendukung — 81
- Gambar 4.9** Ukuran dan bentuk model elastis — 83
- Gambar 4.10** Model elastis berbentuk persegi panjang — 84
- Gambar 4.11** Skema pengujian berdasarkan teori jatuh bebas (*free fall theory*), V_0 : kecepatan; β : *Deadrise angle* — 85
- Gambar 4.12** Penempatan dan posisi sensor *strain* (S1, S2, S3) dan *pressure* (P1, P2, P3) — 86

- Gambar 4.13** Model kapal feri penumpang cepat dan alat pengukuran yang terpasang — 89
- Gambar 4.14** Skema pengujian jatuh bebas model kapal berdasarkan teori jatuh bebas (*free fall theory*) — 89
- Gambar 4.15** Struktur dan peralatan pengujian (*dropping test*) — 90
- Gambar 4.16** Penepatan dan lokasi sensor tekanan dan regangan — 91
- Gambar 5.1** Model kapal tanker yang terdiri dari sejumlah partikel SPH — 94
- Gambar 5.2** Perambatan gelombang yang dihasilkan oleh kapal tanker (Tipe A) — 97
- Gambar 5.3** Tahanan total per satuan waktu untuk kapal tanker (Tipe A) — 97
- Gambar 5.4** Badan kapal perikanan direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH — 99
- Gambar 5.5** Perbandingan tahanan total kapal perikanan antara hasil komputasi dan hasil eksperimen — 100
- Gambar 5.6** Rata-rata *volume error* pada fase air untuk setiap angka Froude Fr yang terjadi saat proses komputasi — 100
- Gambar 5.7** Perbandingan permukaan air di sepanjang badan kapal perikanan antara hasil komputasi dan eksperimen (hasil perbandingan pada $Fr = 0.338$) — 102
- Gambar 5.8** Distribusi tekanan di lambung kapal perikanan dari hasil komputasi; (a) dan (b) $Fr = 0.1023$, (c) dan (d) $Fr = 0.3774$ — 103
- Gambar 5.9** Gambar permukaan air dan arah aliran di sekitar lambung kapal perikanan, hasil komputasi pada $Fr = 0.3774$ — 103
- Gambar 5.10** Distribusi kecepatan aliran di sekitar lambung belakang

- kapal perikanan, hasil komputasi pada $Fr = 0.3774$ — 104
- Gambar 5.11** Propagasi aliran vortex (*vortex flow*) di sekitar badan kapal perikanan untuk angka Froude $Fr = 0.3774$ — 107
- Gambar 5.12** Kapal feri direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH pada simulasi komputasi tahanan kapal — 108
- Gambar 5.13** Perbandingan nondimensi tahanan total kapal feri penumpang cepat antara hasil komputasi dan eksperimen — 109
- Gambar 6.1** Propagasi gelombang reguler di tangki gelombang numerik — 113
- Gambar 6.2** Perbandingan elevasi permukaan gelombang reguler antara hasil komputasi dan teori gelombang (*wave theory*) — 113
- Gambar 6.3** Kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair per satuan waktu — 114
- Gambar 6.3** Kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair per satuan waktu — 115
- Gambar 6.5** Tangkapan gambar (animasi) gerak kapal tanker di gelombang dari hasil komputasi — 117
- Gambar 6.6** Perbandingan nondimensi gerak *heave* kapal tanker di gelombang antara hasil komputasi, eksperimen, dan *strip theory* — 119
- Gambar 6.7** Perbandingan nondimensi gerak *pitch* kapal tanker di gelombang antara hasil komputasi, eksperimen, dan *strip theory* — 119
- Gambar 6.8** Distribusi tekanan pada permukaan lambung kapal tanker di gelombang — 121
- Gambar 6.9** Hasil komputasi tekanan impak per satuan waktu yang dialami di bagian depan kapal tanker akibat kejadian bantingan (*slamming event*) — 122

- Gambar 6.10** Kesalahan volume (*volume error*) pada fase air per satuan waktu selama proses komputasi — 123
- Gambar 6.10** Kesalahan volume (*volume error*) pada fase air per satuan waktu selama proses komputasi — 123
- Gambar 6.12** Kapal perikanan direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH — 125
- Gambar 6.13** Perbandingan hasil parameter nondimensi amplitudo gerak *heave* antara hasil komputasi dan eksperimen — 127
- Gambar 6.14** Perbandingan hasil parameter nondimensi amplitudo gerak *pitch* antara hasil komputasi dan eksperimen — 127
- Gambar 6.15** Rencana garis badan kapal feri penumpang cepat — 128
- Gambar 6.16** Amplitudo gerak *heave* kapal feri penumpang cepat per satuan waktu pada kondisi $Fr = 0.45$, $\lambda/L = 1.4$, dan $H_w = 0.03$ — 132
- Gambar 6.17** Perbandingan nondimensi gerak *heave* antara hasil numerik dan *strip theory* pada kondisi $Fr = 0.45$ dan $H_w = 0.03$ — 133
- Gambar 6.18** Perbandingan nondimensi gerak *pitch* antara hasil numerik dan *strip theory* pada kondisi $Fr = 0.45$ dan $H_w = 0.03$ — 133
- Gambar 6.19** Tangkapan gambar gerak kapal feri penumpang cepat di gelombang reguler pada kondisi $Fr = 0.45$, $H_w = 0.03$, dan $\lambda/L = 0.5$ — 135
- Gambar 6.20** Tekanan impact yang bekerja pada lambung kapal feri penumpang cepat dengan adanya kejadian bantingan (*slamming event*) pada kondisi $Fr = 0.45$, $H_w = 0.03$, dan $\lambda/L = 0.5$ — 136
- Gambar 7.1** Tangkapan gambar benda elastis berbentuk silinder elastis selama proses eksperimen menggunakan kamera berkecepatan tinggi — 140
- Gambar 7.2** Regangan per satuan waktu yang terjadi

pada bagian dalam benda silinder elastis selama proses eksperimen — 141

Gambar 7.3 Frekuensi dominan regangan dari hasil eksperimen — 141

Gambar 7.4 Kondisi awal model silinder elastis yang terdiri dari sejumlah partikel SPH dan titik pengukuran di bagian dalam model — 142

Gambar 7.5 Proses masuk ke dalam air model silinder elastis dari hasil numerik — 143

Gambar 7.6 Perbandingan posisi vertikal benda silinder elastis selama proses masuk ke dalam air antara hasil numerik dan eksperimen — 144

Gambar 7.6 Perbandingan posisi vertikal benda silinder elastis selama proses masuk ke dalam air antara hasil numerik dan eksperimen — 144

Gambar 7.8 Frekuensi dominan regangan dari hasil numerik — 145

Gambar 7.9 Bidang regangan internal pada model silinder elastis selama proses masuknya ke dalam air — 145

Gambar 7.10 Hubungan antara tekanan maksimum dan sudut *deadrise* β , dan perbandingan antara hasil eksperimen — 147

Gambar 7.10 Hubungan antara tekanan maksimum dan sudut *deadrise* β , dan perbandingan antara hasil eksperimen — 147

Gambar 7.12 Regangan internal dan tegangan per satuan waktu di ukur pada S_2 dan komponen xx (β 2.5 derajat) — 150

Gambar 7.13 Perbandingan regangan per satuan waktu antara hasil numerik dan eksperimen ($\beta = 15$ derajat) — 151

Gambar 7.14 Bidang regangan internal dan distribusi tekanan dari benda apung elastis selama proses masuk ke dalam air ($\beta = 2.5$

- derajat) — 152
- Gambar 7.15** Regangan per satuan waktu yang diukur pada titik pengukuran S2 — 154
- Gambar 7.16** Response tekanan dan regangan untuk sudut *deadrise* $\beta = 11$ derajat pada setiap titik pengukuran; a). Model kaku (*rigid*), b) Model elastis (*elastic*) — 154
- Gambar 7.17** Perbandingan tipikal *profile* air dengan fenomena *splashing* antara hasil eksperimen dan numerik pada sudut *deadrise* $\beta = 2$ derajat — 158
- Gambar 7.18** Perbandingan regangan per satuan waktu antara hasil eksperimen dan numerik pada setiap titik pengukuran S1, S2, dan S3 — 159
- Gambar 7.19** Distribusi tekanan impact pada permukaan badan model kapal elastis selama kejadian *slamming* dan *whipping* — 160
- Gambar 7.20** Distribusi partikel SPH merepresentasikan model kapal tanker — 161
- Gambar 7.21** Tangkapan gambar gerak kapal tanker di gelombang reguler diperoleh dari hasil numerik — 162
- Gambar 7.22** Distribusi deformasi dan regangan kapal tanker elastis yang mengalami *hogging* dan *sagging* diperoleh dari hasil numerik — 162
- Gambar 7.23** Regangan per satuan waktu yang dialami oleh geladak dan dasar kapal saat terjadinya *hogging* dan *sagging* — 163
- Gambar 7.24** Titik pengukuran regangan internal pada badan kapal perikanan elastis yang direpresentasikan oleh partikel SPH — 164
- Gambar 7.24** Titik pengukuran regangan internal pada badan kapal perikanan elastis yang direpresentasikan oleh partikel SPH — 165
- Gambar 7.26** Regangan internal yang dialami oleh kapal perikanan atas perilaku hidroelastisitas diperoleh dari hasil

numerik — 166

Gambar 7.27 Regangan internal yang terjadi di kapal perikanan pada setiap titik pengukuran; a). Bagian dasar kapal, b). Bagian tengah kapal, dan c). Bagian belakang kapal — 167

Gambar 7.28 Lokasi titik pengukuran regangan — 169

Gambar 7.29 Tangkapan gambar gerak kapal terkait dengan efek elastisitas di gelombang — 170

Gambar 7.30 Tekanan per satuan waktu pada titik pengukuran 1; $Fr = 0.32$ dan $\lambda = 0.5$ meter — 171

Gambar 7.31 Regangan per satuan waktu pada titik pengukuran 5; $Fr = 0.45$ dan $\lambda = 1.0$ meter — 171

Gambar 7.32 Distribusi tekanan maksimum di titik pengukuran 1, 2, dan 3; (a) $Fr = 0.32$; (b) $Fr = 0.45$ — 173

Gambar 7.33 Regangan maksimum di titik pengukuran 4, 5, dan 6; (a) $Fr = 0.32$, (b) $Fr = 0.45$ — 174

Gambar 7.34 Perbandingan nondimensi amplitudo gerak *heave* (a) dan gerak *pitch* (b) antara kapal kaku dan elastis — 175

Daftar Tabel

Tabel 4.1 Ukuran utama kapal dan model kapal feri penumpang cepat	—	73
Tabel 4.2 Ukuran utama kapal dan model kapal ikan	—	75
Tabel 4.3 Kondisi gelombang (<i>wave conditions</i>)	—	79
Tabel 4.4 Spesifikasi model elastis	—	83
Tabel 5.1 Ukuran utama model kapal pada kondisi komputasi dan eksperimen	—	95
Tabel 5.2 Perbandingan tahanan total antara hasil eksperimen dan hasil numerik	—	96
Tabel 5.3 Kondisi awal komputasi	—	98

Tabel 5.4	Ukuran utama model kapal perikanan	—	98
Tabel 5.5	Ukuran utama kapal dan model kapal feri penumpang cepat	—	108
Tabel 6.1	Ukuran utama model kapal tanker	—	116
Tabel 6.2	Kondisi gelombang	—	116
Tabel 6.3	Ukuran utama kapal perikanan, model untuk eksperimen, dan model untuk komputasi	—	125
Tabel 6.4	Kondisi gelombang	—	125
Tabel 6.5	Ukuran utama kapal dan model kapal feri penumpang cepat	—	128
Tabel 7.1	Kondisi awal komputasi	—	169

#1

Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Studi-studi tentang interaksi antara gelombang dan kapal atau struktur apung lain telah menjadi perhatian dan dilakukan secara luas saat ini. Selain itu, efek-efek permukaan bebas secara nonlinear (*nonlinear free surface*) menjadi pertimbangan penting pada gerakan kapal atau struktur apung lain yang berlebihan, beban gelombang yang ekstrem, dan struktur elastis yang terdeformasi.

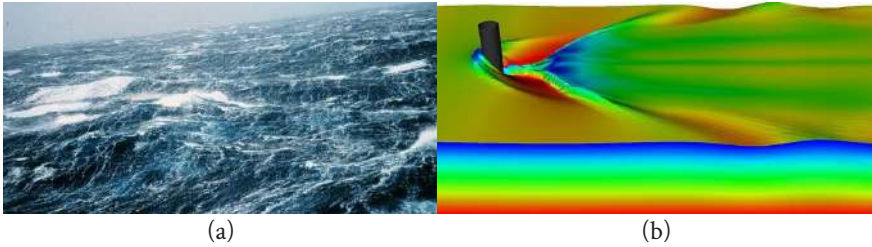
Pada buku ini, metode numerik yang dikembangkan dibahas secara detail yakni skema Eulerian dengan partikel Lagrange agar mampu digunakan untuk mengkomputasi dengan keakuratan yang ting-

gi efek secara nonlinear dari masalah interaksi struktur apung-fluida (*fluid structure interaction*) dengan aliran permukaan bebas (*free surface flow*) di bidang teknik perkapalan dan kelautan. Metode numerik yang dikembangkan secara konseptual merupakan perangkat lunak yang baru sebagai *computational fluid dynamic* (CFD) yang akan dibahas pada bagian-bagian selanjutnya untuk menunjukkan hubungan antara keakuratan dan efek nonlinear. Di sini, rekayasa maritim mengacu pada teknik perkapalan dan kelautan [1]. Untuk itu, objek utama dalam pembahasan-pembahasan menggunakan metode numerik yang dikembangkan difokuskan pada evaluasi kinerja kapal di bawah interaksi antara gelombang-kapal dengan aliran permukaan bebas nonlinear.

Tidak seperti studi-studi yang lain, studi yang dibahas pada buku ini secara umum dapat dikategorikan dalam tiga bagian yang terkait dan secara bersamaan yakni analisis permukaan bebas nonlinear, gerak kapal di gelombang (*seakeeping*), dan hidroelastisitas kapal serta struktur apung yang lain. Pada Bab 1 ini, gambaran singkat tentang terminologi dan pengembangan mengenai permukaan bebas nonlinear, gerak kapal di gelombang (*seakeeping*), dan hidroelastisitas kapal dibahas pada bagian berikut di bawah ini.

1.1.1. Permukaan Bebas Nonlinear pada Rekayasa Maritim

Dalam fisika, sebuah permukaan bebas (*free surface*) merupakan permukaan fluida yang berhubungan dengan tegangan normal tegak lurus yang konstan dan tegangan geser paralel yang nol seperti batas antara dua fluida yang homogen [2]. Kemudian, aliran permukaan bebas (*free surface flow*) merupakan aliran yang dipengaruhi oleh gaya gravitasi dari suatu fluida di bawah permukaan bebas (*free surface*). Gambar 1.1 memperlihatkan aliran permukaan bebas nonlinear (*non-linear free surface flows*).



Gambar 1.1 a). Aliran permukaan bebas gelombang secara aktual, b). Hasil komputasi aliran permukaan bebas
 Sumber: http://cdn4.wn.com/pd/b1/bd/2bea94a7c2502af891a79a091fc0_grande.jpg; www.tafsm.org/PROJ/FSF/cylflow.html

Aliran permukaan bebas nonlinear, hubungannya dengan penggunaan metode penangkapan antarmuka (*interface capturing*), sulit dihasilkan karena hal ini merupakan masalah yang kompleks dalam rangka menjaga ketajaman antarmuka udara-air yang dapat ditoleransi dan untuk menangani gerakan permukaan bebas (*moving free surface*) dan lapisan batas benda padat (*solid boundary layer*). Selain itu, keakuratan prediksi untuk gerak dan beban selama tekanan air bekerja bukanlah persoalan yang mudah. Sebaliknya, persoalan ini seringkali menggunakan pendekatan proses pemecahan (*fragmentation*) dan penggabungan yang tidak stabil.

Beberapa contoh aliran permukaan bebas nonlinear yang kasar dikaitkan pada persoalan pecahan gelombang (*wave breaking*), air di dek (*water on deck*), gerak air yang tidak teratur dengan percikan (*sloshing*) dalam tangki. Persoalan-persoalan tersebut berdampak besar pada studi rekayasa perkapalan dan kelautan. Oleh karena itu, para peneliti memiliki beberapa upaya dan solusi untuk mendemonstrasikan aliran permukaan bebas nonlinear dengan berbagai bentuk atau geometri kompleks dengan cara menggunakan metode numerik dan eksperimen. Sebagaimana metode volume fluid [3], metode level set [4], metode CIP [5] dan skema Eulerian lainnya telah digunakan untuk mensimulasi secara numerik persoalan tang-

kan antarmuka (*interface capturing*) pada kisi cartesian tetap (*fixed cartesian grid*). Selain itu, metode alternatif simulasi gerak fluida juga telah digunakan berbasis partikel seperti metode *smoothed particle hydrodynamics* (SPH) [6] dan metode *moving particle semi-implicit* (MPS) [7], di mana kedua metode ini merupakan skema Lagrangian yang dapat dimampatkan (*compressible*) dan tidak dapat dimampatkan (*incompressible*) yang memiliki fleksibilitas dan ketahanan yang memungkinkan menghasilkan penyelesaian aliran permukaan bebas yang kompleks.

Namun, masing-masing metode yang telah disebutkan sebelumnya memiliki kelebihan dan kekurangan. Diskritisasi skema Eulerian dapat menyebabkan disipasi numerik yang signifikan di area kelengkungan tinggi atau wilayah lain yang kurang terselesaikan di dekat antarmuka (*interface*) yang memiliki perbedaan fase. Hal ini juga ditunjukkan bahwa skema Eulerian memiliki masalah terkait hilangnya massa semisal pada komputasi gelombang pecah (*breaking wave*) dalam tiga dimensi dan gelembung udara dengan tegangan permukaan (*surface tension*). Keterbatasan pada kisi (*grid*) yang relatif kasar juga merupakan faktor permasalahan di mana dengan kisi yang kasar, skema Euler cenderung kehilangan begitu banyak massa hal ini ditunjukkan dengan adanya bagian filamen fluida menghilang setelah gelombang pecah (*breaking wave*) terjadi.

Sementara, penangkapan antarmuka (*interface capturing*) pada skema Lagrange tidak dapat menghitung gerakan dan tekanan dinamis secara akurat. Masalah mendasar lain dari skema Lagrangian yakni distorsi lokasi elemen yang terkomputasi di mana menghasilkan deskripsi antarmuka yang tidak akurat. Langkah-langkah penghalusan, merepresentasikan, dan penempatan ulang sebuah objek sangat diperlukan untuk memperbaiki kekurangan dan untuk menjaga akurasi skema Lagrange tersebut.

Beberapa tahun terakhir, dengan adanya kemajuan pesat perangkat keras komputer dan teknik komputasi, beberapa metode penangkapan untuk aliran multifase telah dikembangkan dalam rangka mengatasi berbagai masalah sulit, antara lain metode-metode tersebut yakni *Particle Level Set* [8], metode *Lagrangian Particle Level Set* [9], metode CLSVOF [10][11][12][13], dan metode PLIC-VOF [14]. Metode-metode ini memberikan hasil yang mengesankan, terutama pada metode *Particle Level Set* yang telah dikembangkan [15][16][17] untuk menangkap aliran multifase dan mempertahankan diskontinu di seluruh fase yang berbeda. Namun, metode tersebut masih sulit untuk membuat permukaan halus dari partikel. Untuk itu, partikel diperlukan sangat banyak untuk mendapatkan permukaan yang lebih halus. Namun kemudian, ada beberapa upaya telah dilakukan untuk meningkatkan konservasi massa menggunakan skema Eulerian [18] [19] [20].

Dari beberapa penjelasan di atas, kombinasi skema Eulerian dengan partikel Lagrange akan dibahas lebih lanjut pada buku ini sebagai metode numerik yang baru dan dikembangkan. Skema Eulerian dengan partikel Lagrange dikombinasikan dengan upaya menyempurnakan keunggulan dan juga mengurangi kekurangan untuk kedua skema tersebut. Partikel Lagrange yang tak bermassa ditempatkan ke dalam kisi Euler dan digerakkan sesuai dengan bidang kecepatan untuk menangkap antarmuka (*interface*) multifase. Dalam kerangka kerja partikel, fungsi densitas (*density function*) yang menggambarkan antarmuka antara beda fase dikoreksi menggunakan fungsi Kernel (*Kernel function*) pada metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH).

Simulasi menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) yang sebelumnya telah dikembangkan untuk menghasilkan dan memprediksi permukaan bebas nonlinear (*nonlinear free surface*) yang dikaitkan dengan interaksi antara kapal dan gelombang nonlinear dan juga pe-

ristiwa bantingan kapal (*ship slamming*) serta efek hidroelastisitas dijelaskan pada sub bab 1.1.3.

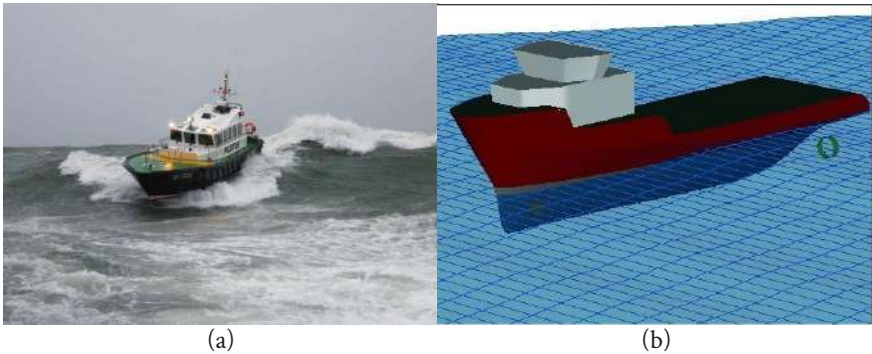
1.1.2. Gerak dan Hidroelastisitas Kapal

Prediksi yang akurat tentang perilaku gerak kapal merupakan persyaratan penting baik untuk desain maupun pengoperasian kapal. Oleh karena itu, gerak kapal diprediksi untuk memahami gerakan yang diinduksi oleh gelombang, percepatan, dan hambatan tambahan. Pada Gambar 1.2 memperlihatkan kondisi gerak kapal di laut sesungguhnya dan hasil komputasi.

Pengaruh gelombang pada gerak kapal sesungguhnya signifikan secara nonlinear. Berawal dari sini, simulasi numerik telah dibuat dan dikembangkan untuk memprediksi pengaruh gelombang tersebut terhadap gerak kapal. Studi-studi tentang gerak kapal secara awal dipelajari oleh Froude [22], dan kemudian Kriloff [23] melakukan studi gerak heave dan pitch pada sebuah kapal. Selanjutnya, Lewis [24] mengasumsikan lambung kapal sebagai lambung yang ramping (*slender body*) di mana asumsi tersebut digunakan pada pendekatan teori strip (*strip theory*) untuk menghitung gaya-gaya hidrodinamika. Sementara, persamaan Navier-Stokes dan persamaan kontinuitas menggambarkan semua fenomena yang dihasilkan oleh gerak kapal dari hasil interaksi antara kapal dan gelombang. Namun, beberapa kendala telah ditemukan dalam menyelesaikan fluktuasi aliran turbulen di lapisan batas badan kapal (*boundary layer*). Dengan kendala tersebut, teori strip (*strip theory*) pertama kali dikembangkan oleh Korvin-Kroukovsky [25] menggunakan konsep teori badan ramping (*slender body theory*) dalam aerodinamika, dan kemudian dikembangkan oleh Newman [26, 27] dalam hidrodinamika kapal. Gerak dua dimensi dari sebuah benda silinder (*circular cylinder*) setengah terbenam pertama kali diperoleh dengan menggunakan metode numerik [28]. Kemudian, metode *green*

function telah disederhanakan untuk menyelesaikan frekuensi yang tidak teratur (*irregular frequency*) pada rentang frekuensi tinggi [29] dan kemudian digeneralisasikan [30].

Di lautan, kapal yang bergerak maju di gelombang dapat dipengaruhi oleh beban gelombang ke permukaan badan kapal dalam waktu yang sangat singkat. Selain itu, beban gelombang yang bekerja pada lambung kapal juga dapat menimbulkan beban dampak yang tinggi terhadap struktur kapal dan juga mempercepat terjadinya kegagalan fatik.



Gambar 1.2 a). Gerak kapal di gelombang; b). Hasil komputasi gerak kapal di gelombang.

Sumber: <http://www.ship-technology.com/projects/hos-iron-horse/images/2-hos-iron-horse.jpg>; <http://www.formsys.com/maxsurf/msproducts/seakeeper>

Dengan kemajuan studi gerak kapal, berbagai pendekatan teoritis untuk menghitung respon gerak kapal di gelombang telah digunakan dan diterapkan pada proses perancangan kapal seperti teori benda-ramping (*slender-body theory*), teori terpadu, *unified theory*, *enhanced unified theory*, metode panel 3D (*3D panel method*), dan metode panel Rankin (*Rankin panel method*). Meskipun metode-metode tersebut cukup akurat untuk mengevaluasi kinerja gerak kapal, namun metode-metode tersebut sulit untuk diterapkan untuk menganalisis gerak kapal dan respons struktural pada kondisi gelombang yang ekstrim dengan beberapa perilaku nonlinear. Beberapa perilaku nonlinear yakni

slamming, *green water*, *violent sloshing*. Dan sampai saat ini, beberapa perilaku tersebut masih selalu menjadi pertimbangan yang penting dalam pengembangan metode numerik.



Gambar 1.3 a). Efek hidroelastisitas yang dialami oleh kapal di kondisi lautan; b). Hasil komputasi terkait hidroelastisitas kapal

Sumber: <http://www.strangepolice.com/images/content/137295.jpg>; <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/369/1947.cover-expansion>

Fenomena *slamming* sebagaimana disebutkan sebelumnya, fenomena ini menjadi perhatian di aplikasi-aplikasi rekayasa perkapalan dan kelautan. Selama interaksi antara badan kapal dan gelombang, beban impuls bertekanan tinggi akan terjadi di mana hal ini dapat mengakibatkan kerusakan lokal dan bahkan global pada struktur kapal atau bangunan apung lainnya.

Selain beban hidrodinamika diakibatkan oleh kondisi *slamming*, perilaku hidroelastisitas pada kapal juga terjadi sebagai pengaruh interaksi antar gelombang dan kapal. Contoh pengaruh hidroelastisitas yang dialami kapal di lautan dan hasil komputasi hidroelastisitas kapal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.3. Selain itu, beberapa penelitian terkait dengan hidroelastisitas kapal telah dilakukan antara lain teori aliran potensial linier struktur apung fleksibel [31], yang kemudian disederhanakan untuk studi gerak kapal [27, 32], kondisi batas linier secara umum untuk hidroelastisitas struktur terapung

[33, 34, 35] di mana struktur tersebut diasumsikan benda kaku (*rigid body*).

Namun pada faktanya, kapal di lautan sesungguhnya bukan struktur yang kaku. Dalam artian, kapal atau struktur apung lainnya memiliki sifat elastis. Dengan kondisi tersebut, kapal atau struktur apung lainnya akan mengalami regangan dan tegangan karena kelenturan strukturnya. Berdasarkan referensi [36], konsep bahwa kapal dapat dimodelkan sebagai struktur balok elastis pertama kali diberikan oleh Inglis [37], dan kemudian pertama kali istilah hidroelastisitas diberikan oleh Heller dan Abramson [38] di mana menyatakan bahwa tekanan fluida yang bekerja pada struktur memodifikasi keadaan dinamisnya dan sebaliknya juga struktur kembali ke kondisi semula sehingga gerak dan distorsi struktur mengganggu medan tekanan di sekitarnya.

Selama 40 tahun terakhir, Faltinsen [39, 40] telah memberikan definisi yang jelas tentang istilah hidroelastisitas kapal. Hidroelastisitas merupakan hasil interaksi fluida-struktur di mana tekanan air bekerja pada struktur apung, dan kemudian struktur apung mengalami perubahan bentuk. Pada saat yang sama kecepatan deformasi struktur apung mempengaruhi tekanan pada air. Banyak studi telah dilakukan tentang hidroelastisitas kapal di kondisi gelombang, namun umumnya studi-studi tersebut mempertimbangkan fenomena permukaan bebas (*free surface*) dari hasil interaksi antara gelombang dan kapal elastis yang lemah.

Desain kapal yang mempertimbangkan efek hidroelastisitas sangat diperlukan untuk menjamin keselamatan di laut. Oleh karena itu, untuk memprediksi kinerja kapal di gelombang beserta efek hidroelastisitas, pengembangan sebuah perangkat pendesainan kapal berupa *computational fluid dynamics* (CFD) sangat diperlukan. Selain itu pula, perangkat pendesainan yang dikembangkan juga dapat mempertimbangkan dan memperhitungkan secara akurat efek nonlinear di seki-

tar kapal antara lain percikan air (*water splashing*), aliran turbulen (*turbulent flow*), gerak nonlinear, *slamming*, pemecahan gelombang (*wave breaking*), limpahan air di dek kapal (*green water on deck*), dan tekanan *sloshing*.

1.1.3. Aplikasi *Computational Fluid Dynamics* Untuk Interaksi Fluida-Struktur Apung

Sub bab ini membahas pengembangan CFD dalam menyelesaikan persoalan-persoalan hidrodinamika dan hidroelastisitas kapal dengan aliran permukaan bebas nonlinear di sekitar kapal. Setelah Navier (1827) dan Stokes (1845) memberikan persamaan umum aliran fluida, tantangan menghasilkan solusi dari persamaan umum aliran fluida tersebut telah mengambil perhatian para ilmuwan teknik, fisikawan, dan matematikawan. Di bidang Teknik perkapalan dan kelautan, *computational fluid dynamics* (CFD) pertama kali didemonstrasikan pada tahun 1990-an. Pada tahun tersebut, aplikasi CFD untuk hambatan atau tahanan kapal dan gerak kapal menjadi subjek penelitian yang sering dilakukan. Kemudian, pengembangan CFD diharapkan dapat membawa kemajuan untuk persoalan-persoalan *slamming* dan water-entry di mana hal ini telah menunjukkan kemajuan dengan adanya penelitian yang intensif di awal tahun 1999.

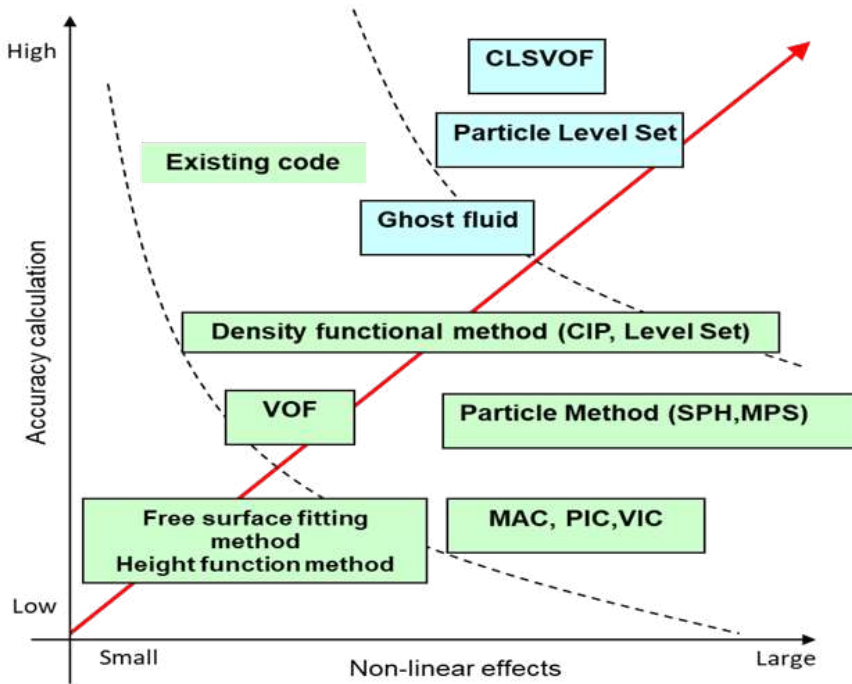
Sekarang ini, sudah banyak penelitian yang sedang berlangsung dikerjakan di bidang teknik perkapalan dan kelautan dan telah diusahakan untuk menghasilkan perangkat CFD menjadi perangkat yang memiliki tingkat ketelitian untuk menangkap permukaan bebas pada fenomena nonlinear, akurasi untuk estimasi hambatan, beban gelombang, termasuk gelombang kejut (*shock wave*), solusi untuk masalah interaksi fluida-struktur apung dengan perilaku ketidaklinearan (deformasi elastis dan perilaku patahan lambung kapal), dan pengurangan beban dan waktu komputasi. Aplikasi CFD

yang ada saat ini untuk di bidang teknik perkapalan dan kelautan antara lain NeoShip [41], COMET [42], HORUS [43], TUMMAC [44], SURF (45), NEPTUNE [46], RIAM-CMEN [47], WISDAM [48], NEPTUN [49], BAGUS [50], CFDSHIP-IOWA [51], dan lain-lain.

Beberapa metode atau teknik penangkapan untuk aliran multifase telah dikembangkan untuk mengatasi berbagai persoalan-persoalan yang sulit di mana metode-metode tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.4. Selain itu, beberapa metode numerik yang menggunakan persamaan Navier-Stokes dengan penangkapan permukaan bebas (*free surface capturing*) telah diperkenalkan antara lain metode volume fluida (VOF) untuk menyelesaikan fluida dengan dua densitas (*two-density fluid*) [3, 52], persamaan Euler dan metode VOF [53] untuk menyelesaikan tekanan air pada sebuah benda silinder dan penampang *bow flare*, *bow flare slamming* dengan berbagai variasi sudut *flare* [54], *water entry* sebuah benda berbentuk baji (*wedge*), silinder dan kerucut [55], dan penyelesaian *water entry* menggunakan metode Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) [6, 56, 57]. Deuff dkk. [58] memberikan skema penggabungan SPH-SPH struktur fluida untuk menyelesaikan *water entry* sebuah benda baji berbentuk V.

Selain itu, di bidang rekayasa perkapalan dan kelautan, para peneliti telah mengembangkan beberapa perangkat CFD [41-51 dan 57-63]. Ada beberapa hasil numerik yang divalidasi secara kualitatif terkait dengan dinamika kapal nonlinear dan beban impak [64], namun, solusi dengan berbagai fenomena yang dihasilkan oleh metode numerik yang ada sekarang ini masih tetap divalidasi sesering mungkin.

Selain teknik komputasi yang telah dikembangkan pada persoalan penangkapan (*capturing*) aliran multifase, juga salah satu hal yang menarik yakni *slamming* yang dapat diprediksi secara akurat menggu-



Gambar 1.4 Gambaran beberapa teknik penangkapan (*capturing technique*) terkait dengan keakuratan dan efek-efek nonlinear

nakan teknik komputasi. Sebagai gambaran, ketika kapal yang bergerak maju dengan kecepatan tinggi di gelombang, maka beban impak gelombang akan dialami oleh permukaan kapal dalam waktu yang singkat. Salah satu beban impak gelombang yang bekerja pada lambung kapal yakni *slamming* yang dapat menyebabkan kegagalan fatik dan menurunkan kinerja kapal.

Pengembangan teknik-teknik CFD untuk memprediksi secara akurat efek hidrodinamika dan hidroelastisitas pada benda apung dibutuhkan sejalan dengan upaya besar dan nyata. Hal ini memberikan gambaran bahwa beberapa pendekatan numerik dan eksperimen telah dikembangkan, di mana juga diawali dengan hasil penelitian von Karman [65] dan Wagner [66], antara lain investigasi *water entry* benda baji dengan variasi sudut dan kondisi batas gravitasi

nonlinear [67, 68], eksperimen bidang permukaan pada air dan efek udara yang masuk antara permukaan bebas dan benda [69], perbandingan tekanan tumbukan maksimum baji simetris antara hasil eksperimen dan beberapa hasil numerik [70], dan validasi antara hasil eksperimen dan numerik terkait beban *slamming* pada penampang baji dua dimensi dan tidak simetris berdasarkan metode *boundary element* [71, 72]. Selain itu, pengaruh separasi aliran (*flow separation*) karena tekanan tidak simetris juga diteliti oleh Zhao dan Faltinsen [73]. Namun, semua investigasi numerik yang telah dilakukan tidak dapat menangani aliran secara baik, dan efek hidroelastisitas yang disebabkan oleh udara yang terperangkap (*trapped air*), bantalan udara (*air cushion*), dan respons aliran air pada benda elastis sulit dipecahkan dengan lebih jelas.

Pada aplikasi untuk persoalan *slamming*, beberapa peneliti telah menginvestigasi perilaku *slamming* pada kapal secara lebih ekstensif, dan istilah hidroelastisitas dinyatakan dengan jelas oleh Faltinsen [39, 40]. Bereznitski dkk. telah memformulasikan hidroelastisitas dan memodelkan *slamming* menggunakan model numerik [74, 75, 76]. Selanjutnya, Tajima dan Yabe [77] mensimulasikan sebuah kapal yang mengalami dampak *slamming* dengan menggunakan metode CIP. Juga, Faltinsen [78] telah menggambarkan water entry sebuah baji menggunakan teori lempeng ortotropik hidroelastis, dan menginvestigasi secara teoritis tiga dimensi pada dek kapal hidroelastis yang mengalami dampak *slamming* [39, 74, 79].

Dari pembahasan secara keseluruhan di atas, meskipun ada beberapa alat simulasi yang dapat memprediksi tekanan air akibat interaksi benda apung dan gelombang, namun masih terdapat beberapa kesulitan dalam menghitung dan mengkomputasi permukaan bebas, dan juga keakuratan yang sangat terbatas dalam validasi hasil.

1.2. Tujuan dan Ruang Lingkup

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas pada sub bab-sub bab sebelumnya, skema Eulerian yang dikombinasi dengan partikel Lagrange [80, 81, 82] sangat penting untuk dikembangkan dan diperluas penggunaannya. Model ini memiliki dua jenis partikel Lagrange yakni SPH dan partikel permukaan bebas (*free surface particle*) pada kisi Eulerian (*Eulerian grid*) untuk mengoreksi kesalahan pelacakan antarmuka (*interface capturing*). Kedua jenis partikel Lagrange ditempatkan dan digerakkan dengan akurasi tinggi untuk menangkap permukaan bebas di bawah wilayah yang terselesaikan oleh kisi Eulerian. Dimana sebelumnya, metode numerik dalam model tersebut telah diterapkan pada beberapa masalah interaksi struktur apung dan fluida seperti penangkapan antarmuka (*interface capturing*), dam breaking, wave breaking di perairan dangkal, water entry termasuk tekanan impact, sloshing 2D dan 3D. Kemudian, hasil metode numerik ini telah sesuai dengan hasil eksperimen dan teknik penangkapan antarmuka (*interface capturing*) juga sangat akurat untuk menghitung aliran multifase.

Pada buku ini, metode numerik (skema Eulerian dengan partikel Lagrange) yang dikembangkan dan diaplikasikan akan dibahas berdasarkan hasil-hasil penelitian dengan tujuan dapat menghitung dengan tingkat keakuratan yang tinggi pada persoalan interaksi struktur apung-fluida dengan aliran permukaan bebas (*free surface flow*) nonlinear di bidang teknik perkapalan dan kelautan. Untuk itu, Bab 2 menyajikan uraian skema numerik yang dikembangkan di mana untuk fase fluida menggunakan persamaan kekekalan massa (*mass conservation*), persamaan Navier-Stokes termampatkan dan persamaan kontinuitas (*continuity*), serta persamaan adveksi (*advection*). Teknik penangkapan aliran multifase (*multiphase flow capturing*) dan partikel permukaan bebas (*free surface particle*) juga dibahas secara rinci. Untuk fase padat, partikel SPH sebagai representasi suatu benda atau struktur

apung digunakan dan terkait dengan gerak benda atau struktur apung tersebut. Kemudian, persamaan untuk menyelesaikan persoalan hidroelastisitas benda atau struktur apung juga dibahas.

Berdasarkan tujuan penelitian ini untuk memperoleh pengembangan metode numerik yaitu skema Euler terkopel dengan partikel Lagrangian sebagai model, Bab 2 menyajikan uraian skema numerik yang dikembangkan. Di sini, teknik menangkap aliran multifase juga dijelaskan secara rinci. Kemudian untuk fasa fluida diatur persamaan kekekalan massa, persamaan Navier-Stokes mampat dan persamaan kontinuitas, serta persamaan adveksinya. Selanjutnya untuk fase padat, partikel SPH yang mewakili suatu benda atau struktur diperlakukan untuk menangkap geraknya. Disini, persamaan untuk menyelesaikan kasus hidroelastisitas juga disajikan. Metode numerik yang dikembangkan ini telah diverifikasi sebelum diaplikasi pada persoalan-persoalan di bidang teknik perkapalan dan kelautan. Verifikasi metode numerik tersebut dilakukan dengan membandingkan hasilnya dengan metode CIP sebagai studi benchmark pada aplikasi rotasi benda kaku untuk disket Zalesak (Zalesak's disk), medan pusaran tunggal (*single vortex field*), dan bidang deformasi tiga dimensi. Verifikasi metode numerik tersebut akan dibahas pada Bab 3.

Untuk memvalidasi hasil yang diperoleh dari metode numerik yang dikembangkan, eksperimen yang sesuai dengan kondisi simulasi numerik dilakukan antara lain pengujian water entry benda silinder dan persegi panjang elastis, uji jatuh (*dropping test*) model kapal elastis, hambatan atau tahanan kapal, dan gerak kapal di gelombang. Pengaturan, prosedur, dan pelaksanaan eksperimen untuk semua pengujian yang dijelaskan sebelumnya akan lebih detail dibahas pada Bab 4.

Bab 5 membahas metode numerik yang dikembangkan dan diterapkan untuk memprediksi dan mengevaluasi hambatan atau tahanan kapal antara lain aplikasi pada tahanan kapal tanker, kapal feri

penumpang cepat, dan kapal perikanan. Selain itu, pembahasan juga diarahkan kemampuan metode numerik yang dikembangkan dalam memprediksi efek dan fenomena interaksi nonlinear antara fluida dan struktur apung.

Bab 6 membahas penggunaan metode numerik yang dikembangkan pada aplikasi gerak kapal di gelombang nonlinear. Diawali dengan verifikasi, metode numerik yang dikembangkan digunakan untuk memverifikasi hasil simulasi gerak gelombang dengan hasil eksperimen dan teori gelombang. Selanjutnya, metode numerik yang dikembangkan diterapkan pada gerak kapal-kapal tanker, feri penumpang cepat, dan kapal perikanan. Pembahasan selanjutnya, hasil numerik yakni amplitudo gerak heave dan pitch dibandingkan dengan hasil eksperimen dan hasil teori strip (*strip theory*). Selain itu, tahanan gelombang tambahan (*added wave resistance*) kapal tanker juga diprediksi dan hasilnya juga dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Keakuratan metode numerik untuk memprediksi beberapa pengaruh interaksi struktur atau bangunan apung elastis-fluida terhadap perilaku hidroelastisitas pada kondisi *slamming*, *whipping*, dan lain-lain sangat diperlukan untuk digunakan pada proses perancangan atau pelaksanaan struktur atau bangunan apung. Bab 7, metode numerik yang dikembangkan ini diperluas penggunaannya untuk mampu menghitung efek hidroelastisitas yang berhubungan dengan efek hidrodinamika pada struktur atau bangunan apung. Perilaku hidroelastisitas dari model kapal elastis seperti tanker, feri penumpang cepat, dan kapal perikanan diinvestigasi menggunakan metode numerik yang dikembangkan. Pada bab ini pula, beberapa pengujian dilakukan dan perbandingan hasil numerik dengan hasil eksperimen akan dibahas. Akhirnya, kesimpulan dari studi-studi yang telah dilakukan dan tantangan studi ke depan akan didiskusikan pada Bab 8.

#2

Metode Numerik

Metode numerik yang dikembangkan diupayakan dapat menyelesaikan sebuah masalah atau kasus interaksi antara fluida dan struktur bangunan apung di mana metode numerik ini didasari pada kombinasi penggunaan kisi metode Euler dan metode partikel Lagrange. Metode numerik ini [80, 81, 82] sebagai sebuah model yang dapat menyelesaikan secara akurat kesalahan-kesalahan pada penangkapan dan penelusuran antarmuka (*interface capturing and tracking*). Di bab ini, metode numerik yang dikembangkan berdasar pada penggunaan kisi (*grid*) metode Euler dan metode partikel Lagrange dengan cara mengkombinasi keuntungan-keuntungan dan mengkompensasi kekurangan-kekurangan pada kedua metode tersebut.

Selain itu, pengembangan metode numerik ini dimaksudkan untuk meningkatkan kegunaannya dengan tingkat akurasi hasil yang tinggi pada kemampuan memprediksi dan menginvestigasi secara simultan efek-efek hidrodinamika dan hidroelastisitas akibat interaksi antara kapal dan gelombang yang diaplikasikan pada tahanan kapal (*ship resistance*) dan gerak kapal (*ship motions*) di gelombang tidak linear. Teknik-teknik, tahapan-tahapan, dan persamaan-persamaan yang digunakan pada metode numerik yang dikembangkan, yakni metode skema Euler (*Euler scheme*) dan metode partikel Lagrange, dijelaskan secara detail berikut di bawah ini.

2.1. Skema Euler dengan Partikel Lagrange

2.1.1. Susunan Kisi Euler dengan Partikel Lagrange

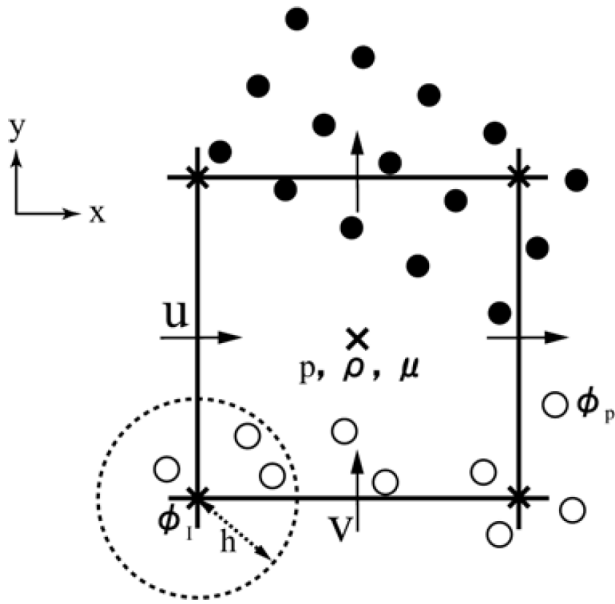
Skema Euler dengan partikel Lagrange dipresentasikan untuk melacak secara tepat pergerakan dari batas-batas dari tiga fase yaitu gas, cair dan padat dimana nilai fungsi kerapatan (*density function*) fase-I ϕ_I diatur dalam skema ini ($0 \leq \phi_I \leq 1$; I = 1: fase gas, I = 2: fase cair, I = 3: fase padat). Gambar 2.1 menunjukkan lokasi dan distribusi partikel Lagrange dalam susunan kisi (*grid*) Euler. Susunan kisi-kisi dari *Marker-and-Cell* (MAC) yang bertahap digunakan untuk merepresentasikan kecepatan (U, V), densitas ρ , dan koefisien viskositas μ , serta tekanan (*pressure*) dalam kisi-kisi komputasi Cartesian. Komponen kecepatan didefinisikan pada permukaan sel dari kisi, sementara tekanan ditentukan di tengah sel. Fungsi densitas (*density function*) ϕ_I disimpan di simpul-simpul kisi-kisi dimana nilainya disimpan selama proses aliran (*flow advection*). Urutan waktu pertama yang eksplisit, metode langkah pecahan (*fractional step method*) yang memanfaatkan metode proyeksi kecepatan (*velocity projection method*), digunakan untuk memajukan bidang kecepatan dan tekanan dalam waktu.

Dua jenis partikel Lagrange yang telah disebutkan sebelumnya adalah *Smoothed Particle Hydrodynamic* (SPH) [6] dan partikel permukaan bebas (*free surface particle*). Kedua jenis partikel Lagrange tersebut ditempatkan dan ditarik dengan tingkat akurasi yang tinggi untuk menangkap permukaan bebas di bawah wilayah yang diselesaikan dengan kisi Euler. Dengan maksud tersebut, biaya komputasi dari metode yang dikembangkan ini dapat dikurangi dengan beberapa cara antara lain partikel-partikel hanya diletakkan di dekat antarmuka (*interface*) di mana fungsi kerapatan (*density function*) terputus dalam penggunaan area penempatan (*bandwidth*) tertentu, dan diameter semua partikel adalah setengah dari ukuran kisi dan juga konstan selama penghitungan.

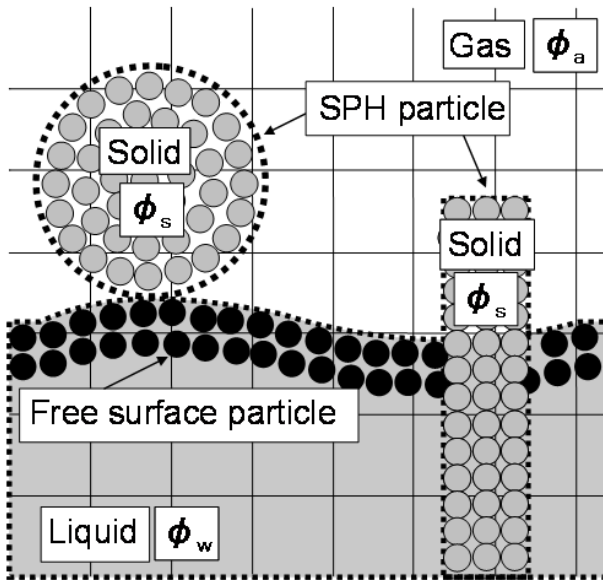
Jumlah partikel penanda tanpa massa (*massless marker particles*) ditempatkan 8 atau 64 per kisi partikel dalam tiga dimensi (3D). Partikel ini secara pasif digerakkan bersamaan dengan aliran dan digunakan baik untuk melacak informasi dari karakteristik aliran dan untuk membangun kembali fungsi kepadatan (*density function*) di daerah yang kurang terselesaikan di mana massa atau informasi sering hilang.

Skema model diilustrasikan pada Gambar 2.2. Partikel SPH pada skema ini dipresentasikan sebagai benda padat (*solid object*) dilambangkan dengan bundar abu-abu dan partikel permukaan bebas (*free surface particles*) dilambangkan dengan bulat hitam yang memiliki sifat fisik seperti kepadatan (*density*) dan kecepatan (*velocity*). Benda padat diciirikan oleh kepadatan dan jari-jarinya untuk mengkomputasi gerakan dan deformasi elastis. Kemudian, partikel SPH membutuhkan percepatan (*acceleration*), kecepatan (*velocity*) dan letak (*position*).

Partikel permukaan bebas (*free surface particle*) yang didefinisikan pada kisi Euler terletak di dekat permukaan bebas (*free surface*) untuk menangkap secara akurat antarmuka (*interface*) antara berbagai fase seperti pada permukaan air. Partikel permukaan be-



Gambar 2.1 Letak dan distribusi partikel Lagrange pada susunan kisi Euler



Gambar 2.2 Ilustrasi skema Euler dengan partikel Lagrange

bas memiliki fungsi kepadatan ϕ_P (*density function*) untuk mengkarakterisasi sifat fisik pada setiap fase. Metode konvensional sebagaimana diberikan oleh Enright dkk. [8] dan Hu et al. [47], berbeda dibandingkan dengan model ini. Dalam metode yang diberikan tersebut, partikel di kedua sisi antarmuka diletakkan menggunakan *particle level set method*, sementara partikel permukaan bebas (*free surface particle*) pada metode yang dikembangkan ini ditempatkan secara tepat hanya di satu sisi permukaan bebas (*free surface*) untuk mengurangi biaya dan waktu komputasi dalam proses pendistribusian ulang partikel permukaan bebas (*free surface particle*) selama proses penempatan ulang.

2.1.2. Sifat Fisik Partikel Lagrange

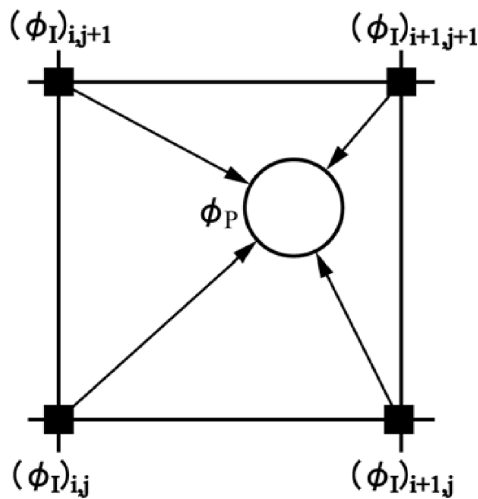
Kecepatan partikel permukaan bebas (*free surface particle*) diperoleh dengan cara menginterpolasi kecepatan yang didefinisikan pada permukaan dari kisi sel tetangga sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1. Selanjutnya, fungsi kepadatan (*density function*) partikel ϕ_P yang didefinisikan pada partikel diinterpolasi dari fungsi kepadatan (*density function*) yang didefinisikan pada titik simpul pada kisi ϕ_P seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Hal tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan metode interpolasi persamaan linier eliminasi Gaussian (*Gaussian elimination*). Interpolasi bilinear dan trilinear juga digunakan untuk menginterpolasi kuantitas fisik (*physical quantity*) f_s pada partikel permukaan bebas yang telah diselesaikan dengan menggunakan operasi matriks dalam tiga dimensi sebagai berikut:

$$f_{isg} = a_0 + a_1 x_{isg} + a_2 y_{isg} + a_3 z_{isg} \quad 2.1$$

$$\begin{pmatrix} 8 & \sum x_i & \sum y_i & \sum z_i \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i \\ \sum y_i & \sum y_i x_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i \\ \sum z_i & \sum z_i x_i & \sum z_i y_i & \sum z_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum f_i \\ \sum f_i x_i \\ \sum f_i y_i \\ \sum f_i z_i \end{pmatrix} \quad 2.2$$

Dimana g merupakan kisi-kisi dan s merupakan partikel. Dengan penyederhanaan seperti ini, jumlah partikel dapat dikoreksi dalam satu kisi (*grid*) dengan menggunakan persamaan tersebut.

Selain itu, partikel Lagrange (partikel SPH dan partikel permukaan bebas) digunakan untuk mempertahankan fungsi kepadatan (density function) partikel ϕ_P selama proses komputasi. Dengan kata lain, fungsi densitas ϕ_I disimpan di titik simpul kisi di mana nilainya disimpan selama pergerakan aliran. Oleh karena itu, pendistribusian partikel Lagrange, pada kenaikan waktu tertentu seumpama setiap 100 langkah, persamaan (2.8) dapat digunakan untuk mengoreksi fungsi kepadatan/densitas ϕ_I ($I = 1$: Udara, $I = 2$: Air, dan $I = 3$: Kapal) yang merupakan karakter aliran multifase.



Gambar 2.3 Ilustrasi skema model fungsi densitas kisi dan partikel

2.1.3. Evolusi Waktu Partikel Lagrange

Lokasi partikel pada permukaan bebas (*free surface*) diintegrasikan dengan menggunakan metode evolusi akurat Runge-Kutta orde empat, berikut di bawah ini persamaan evolusi:

$$\frac{dx^-_P}{dt} = u^-(x^-_P) \quad 2.3$$

Di mana x^-_P merupakan lokasi partikel dan $u^-(x^-_P)$ merupakan kecepatan partikel yang diselesaikan dengan menginterpolasi kecepatan partikel dari tetangga/sebelah permukaan sel sebuah kisi.

Kemudian persamaan (2.3) diselesaikan dengan menggunakan metode Runge-Kutta orde empat dari persamaan (2.4) sampai pada persamaan (2.8) sebagai berikut:

$$u^{n+1} = u^0 + 2u^1 + 2u^2 + u^3 \quad 2.4$$

$$u^0 = u^n \quad 2.5$$

$$u^1 = u^0 + \frac{1}{2} \Delta t f(u^0) \quad 2.6$$

$$u^2 = u^0 + \frac{1}{2} \Delta t f(u^1) \quad 2.7$$

$$u^3 = u^0 + \frac{1}{2} \Delta t f(u^2) \quad 2.8$$

Sedangkan partikel SPH yang ditempatkan di area fase padat akan bergerak menggunakan persamaan gerak kaku (*rigid motion*) pada metode SPH yang akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

2.1.4. Pendistribusian Ulang Partikel Permukaan Bebas

Dalam domain multifase, partikel permukaan bebas (*free surface particle*) bergerak selama proses komputasi. Untuk menangkap antarmuka (*interface capturing*) secara akurat selama proses kompu-

tasi, pendistribusian ulang partikel permukaan bebas diperlukan secara berkala untuk menambah dan menghapus partikel. Gambar 2.4 menunjukkan salah satu contoh pendistribusian partikel untuk kasus sebuah benda bulat yang masuk ke dalam air (*water entry problem*) secara 2 dimensi (2D) [80]. Partikel yang berada di dekat permukaan bebas (*free surface*) telah ditandai dengan fungsi kepadatan (*density function*). Dengan menggunakan proses pendistribusian ulang, efisiensi dan stabilitas komputasi juga dapat meningkat. Jarak sebuah partikel dari permukaan bebas dapat diukur dengan menggunakan fungsi set level (*Level Set Function*) $\psi(x, y, z)$ ($-\infty < \psi < +\infty$) sebagai metode Level set (*Level Set Method*). Fungsi set level (*Level Set Function*) $\psi(x, y, z)$ hanya digunakan untuk membangun kontur dalam domain komputasi, dan tidak diarahkan untuk melacak antarmuka antara fase yang berbeda.

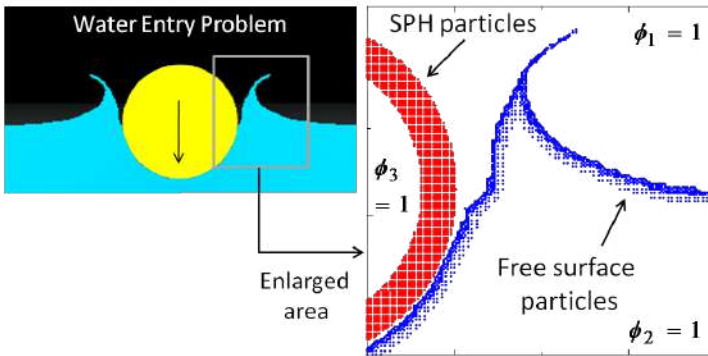
Kontur segmen (*level set contour*) dibangun dalam domain komputasi. Antarmuka (*interface*) yang diwakili oleh fungsi set level = 0 dikenali oleh fungsi kepadatan (*density function*) ϕ_I yang telah didefinisikan pada kisi-kisi. Gradien $\partial \phi_I / \partial x_i$ dari fungsi kepadatan ϕ_I pada ruang memiliki nilai maksimum di dekat antarmuka (*interface*). Oleh karena itu, antarmuka (*interface*) pada waktu tertentu dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\delta \phi_I}{\delta x_i} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \geq \frac{f_{crt}}{(dx, dy, dz)} \quad 2.9$$

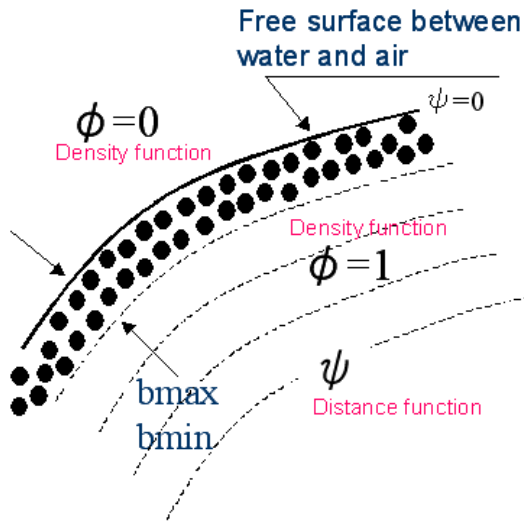
$$\left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\delta \phi_I}{\delta y_i} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \geq \frac{f_{crt}}{(dx, dy, dz)} \quad 2.10$$

$$\left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\delta \phi_I}{\delta z_i} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \geq \frac{f_{crt}}{(dx, dy, dz)} \quad 2.11$$

Di mana f_{crit} merupakan parameter yang bergantung pada ukuran kisi-kisi, dimana pada studi ini untuk penggunaan yang efektif, nilai dipertimbangkan sebesar 0.1. Area (*bandwidth*) α juga diatur menjadi dua kali ukuran kisi-kisi untuk memastikan efisiensi dan akurasi komputasi.



Gambar 2.4 Salah satu contoh distribusi partikel pada kasus *water entry* (*water entry problem*) sebuah benda padat berbentuk bulat



Gambar 2.5 Ilustrasi distribusi partikel di sekitar permukaan bebas

Setelah membangun kontur segmen (*level set contour*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.5, partikel permukaan bebas (*free surface particle*) didistribusikan kembali di dalam wilayah dimana jarak dari antarmuka saat ini berada dalam area partikel (*bandwidth*), yakni sekitar dua jarak kisi-kisi untuk memastikan efisiensi dan akurasi komputasi, dari aliran permukaan bebas (*free surface flow*). Selain itu, fungsi kepadatan (*density function*) $\phi_I = 0.5$ atau lebih menandakan permukaan bebas (*free surface*) pada kondisi terbaru.

Setelah pendistribusian ulang partikel permukaan bebas (*free surface particle*), partikel akan tertarik ke antarmuka pada lokasi terbaru dimana ditentukan oleh fungsi level set (*level set function*) dengan menggunakan teknik yang dikembangkan oleh Enright et al. [8]. Lokasi sebelumnya dari partikel $x_{p,old}$ sebelum ditarik, diganti dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{x}_{p,new} = \bar{x}_{p,old} + \lambda(\psi_{goal} - \psi(\bar{x}_p))\bar{N}(\bar{x}_p) \quad 2.12$$

Di mana $x_{p,new}$ merupakan lokasi baru partikel dan $\lambda = 1$. $\psi(\bar{x}_p)$ merupakan *level set function* pada setiap lokasi partikel diperoleh dari teknik interpolasi dimana dijelaskan sebelumnya secara detail pada bagian 2.1.3.

$\bar{N}(\bar{x}_p)$ dan ψ_{goal} didefinisikan sebagai berikut:

$$\bar{N}(\bar{x}_p) = \frac{\nabla\psi}{|\nabla\psi|} \quad 2.13$$

$$\psi_{goal} = \begin{cases} b_{max} (|\psi_{x_p}^-| > b_{max}, \psi(x_p^-) > 0) \\ -b_{max} (|\psi_{x_p}^-| > b_{max}, \psi(x_p^-) < 0) \\ b_{min} (|\psi_{x_p}^-| > b_{min}, \psi(x_p^-) > 0) \\ -b_{min} (|\psi_{x_p}^-| > b_{min}, \psi(x_p^-) < 0) \end{cases} \quad 2.14$$

$$\begin{cases} b_{max} = \alpha \max(dx, dy, dz) \\ b_{min} = \beta \max(dx, dy, dz) \end{cases} \quad 2.15$$

Dimana, b_{max} dan b_{min} masing-masing merupakan area maksimum dan minimum, α dan β adalah jari-jari partikel pada setiap kisi (dx, dy, dz). Untuk mengkomputasi secara baik domain dinamika fluida, $\alpha = 2.0$ dan $\beta = 0.1$ hingga 0.75 dipertimbangkan untuk digunakan.

Untuk menangkap dan menelusuri antarmuka (*interface capturing and tracking*) yang lebih baik dan akurat setelah proses penarikan, partikel dimasukkan ke dalam kisi di lokasi di mana kondisi berikut terpenuhi:

$$\alpha = \psi(x, y, z) < \gamma \quad 2.16$$

Di mana, γ bergantung pada kondisi aliran dan disetel ke 4 hingga 6 kali ukuran kisi. Selama proses komputasi, sebuah partikel dihapus dari domain komputasi ketika $\psi_{x_p} < 0$. Proses pendistribusian ulang hanya dilakukan ketika kesalahan volume melebihi batasan kondisi.

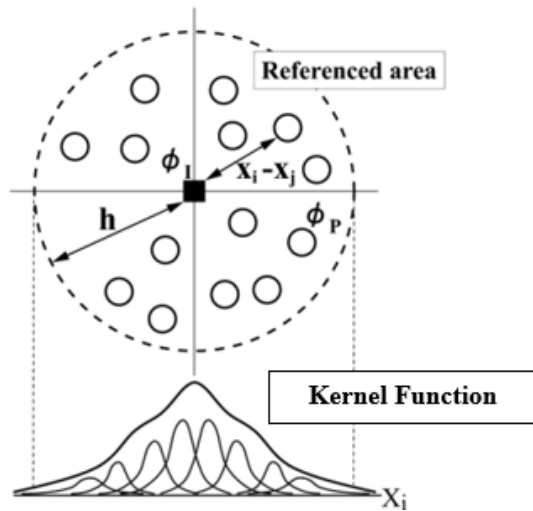
a. Fungsi Densitas Partikel Permukaan Bebas Pada Kisi

Fungsi densitas (*density function*) yang didefinisikan pada partikel Φ_p digunakan untuk mengoreksi kesalahan fungsi densitas pada kisi. Pada pengembangan metode numerik ini, koreksi kesalahan

fungsi densitas diselesaikan dengan menggunakan fungsi Kernel (*Kernel function*) sebagaimana diagram skematik dari fungsi Kernel ditunjukkan pada Gambar 2.6. Fungsi Kernel adalah fungsi interpolasi untuk mengevaluasi fungsi bobot besaran fisik dengan partikel N dalam radius pengaruh h . Persamaan fungsi Kernel (2.17) diberikan sebagai berikut:

$$W(x_s, h) = \frac{1}{h^n} f\left(\frac{x_s}{h}\right), x_s = |x_i - x_j| \quad 2.17$$

Di mana, n merupakan banyaknya dimensi, h merupakan jari-jari area acuan. Selain itu, berbagai efek fisik partikel sangat terkait dengan ukuran kisi. Untuk mempertimbangkan efisiensi komputasi, setiap tahapan interpolasi dari fungsi densitas sebuah partikel ke kisi tidak dilakukan. Ini hanya dilakukan pada interval beberapa langkah saja.



Gambar 2.6 Ilustrasi skema distribusi fungsi Kernel (*Kernel function*)

2.1.5. Fungsi Densitas Partikel SPH Pada Kisi

Dalam ruang dan waktu, densitas fluida ρI , kecepatan uI dan tekanan pI diperoleh dengan menggunakan metode CIP dan posisi partikel SPH x_s dan kecepatan partikel didapatkan dengan menggunakan metode SPH. Integrasi numerik untuk metode SPH dan metode CIP dibuat dengan menggunakan persamaan umum pada masing-masing metode. Deviasi kisi fase padat antara posisi-posisi partikel SPH diselesaikan dengan menggunakan metode SPH dan distribusi fungsi densitas diperoleh juga dengan menggunakan metode CIP. Oleh karena itu, fungsi densitas partikel padat dimodifikasi dalam kisi berdasarkan posisi partikel yang diperoleh melalui metode SPH. Persamaan (2.18) digunakan untuk mendefinisikan fungsi densitas benda padat pada kisi yang mengandung sejumlah partikel SPH dalam satu kisi pada tipe Euler dimana jumlah volume molekul dan partikel ($V_{s,k}$) SPH dalam satu kisi dibagi dengan volume satu partikel.

$$f_i = \frac{\sum V_{s,k}^{N+1}}{\Delta V_{c,ijk}} \quad 2.18$$

2.2. Persamaan-Persamaan Umum Aliran Multifase (*Governing Equations for Multiphase Flow*)

2.2.1. Persamaan Diferensial

Dalam studi ini, metode CIP dikombinasi dengan *Unified Procedure* (C-CUP) digunakan untuk pemecahan permasalahan berbasis tekanan (*pressure-based solver*). Metode C-CUP adalah teknik analisis fluida yang dikemukakan oleh Yabe [5] dimana sebuah ruang dan benda diwakili oleh fungsi kepadatan/densitas (*density function*).

Teknik pemisahan untuk deformasi yang besar untuk kasus permukaan bebas (*free surface problem*) merupakan kasus penting karena masih sulit sampai saat ini. Namun dengan penggunaan metode ini, kasus aliran multifase udara-cair tersebut dapat mudah ditangani dan dianalisis.

Dalam metode numerik yang dikembangkan ini, persamaan-persamaan umum (*governing equations*) untuk fase fluida terdiri dari persamaan kekekalan massa, persamaan Navier-Stokes tak termampatkan (*incompressible Navier-Stokes equation*) dan persamaan kontinuitas (*continuity equation*), fungsi densitas I-fase ϕ_I ($0 \leq \phi_I \leq 1$), dan persamaan adveksi (*advection equation*). Persamaan-persamaan tersebut diekspresikan sebagai berikut:

$$\frac{\delta \bar{\mu}_i}{\delta x_i} = 0 \quad 2.19$$

$$\frac{\delta \bar{\mu}_i}{\delta t} + \delta \bar{\mu}_i \frac{\delta \bar{\mu}_i}{\delta x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \bar{P}}{x_j} - \frac{\delta \tau_{ij}}{\delta x_j} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\delta^2 \bar{\mu}_i}{\delta x_j \delta x_j} + g_i + \bar{F}_{fsi} \quad 2.20$$

$$\frac{\delta \phi_i}{\delta t} + \bar{\mu}_j \frac{\delta \phi_I}{\delta x_j} = 0 \quad 2.21$$

Di mana I-fase merupakan fase udara ($I = 1$), fase cair ($I = 2$) dan fase padat ($I = 3$), g_i merupakan percepatan gravitasi, F_{fsi} merupakan istilah dari interaksi fluida struktur (*fluid-structure interaction term*), τ_{ij} merupakan istilah dari tegangan SGS (*SGS stress term*). Untuk mengurangi parameter model, tegangan SGS diselesaikan dengan menggunakan model dinamika SGS (DSM) yang diperkenalkan oleh Germano [83]. Untuk lebih detail, penjelasan terkait hal ini diberikan oleh Mut-suda et al. [84].

Fungsi densitas (*density function*) ϕ_I ($0 \leq \phi_I \leq 1$) digunakan untuk menentukan sifat fisik benda yang berbeda. Tujuan lainnya, dapat

digunakan untuk melacak antarmuka antara kepadatan yang berbeda seperti air, udara, dan benda padat, yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\phi_I = \begin{cases} 1 & \text{occupied} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad 2.22$$

Di sisi lain, langkah tidak bergerak (non-adveksi) diselesaikan dengan menggunakan metode beda hingga orde dua (*second-order finite difference method*), dan kondisi lompatan yang terperinci (*specified jump condition*) sebuah tekanan yang ditentukan dan juga diselesaikan dengan menggunakan persamaan Poisson (*Poisson equation*) seperti yang diberikan sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \left(\frac{\nabla P^{n+1}}{\rho^*} \right) = \frac{\nabla \cdot \mu^*}{\Delta t} \quad 2.23$$

Di mana * menunjukkan nilai fisik setelah langkah adveksi. P merupakan tekanan fase padat yang diperoleh pada persamaan tersebut di atas dan digunakan untuk menyelesaikan deformasi padat. Berdasarkan komponen kecepatan, fungsi pelacakan antarmuka (*interface tracking*) dari fungsi densitas (*density function* ϕ_I) dihitung menggunakan langkah adveksi.

Selanjutnya densitas dan viskositas dapat diturunkan dengan menggunakan fungsi densitas (*density function* ϕ_I) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\rho = \sum_{I=1}^3 \rho_I \phi_I \quad 2.24$$

$$\mu = \sum_{I=1}^3 \mu_I \phi_I \quad 2.25$$

2.2.2. Model Aliran Turbulen

Pada metode numerik yang dikembangkan ini, aliran turbulen (*turbulent flow*) akan terjadi pada laju aliran tinggi. Oleh karena itu, teknik untuk menangani dan memprediksi beberapa efek aliran turbulen dimodelkan dalam metode numerik ini. Germano dkk. [83] mengidentifikasi sejumlah studi menggunakan model Smagorinsky di mana penggunaan konstanta Smagorinsky C_s yang berbeda-beda untuk konfigurasi aliran yang berbeda. Dalam upaya untuk memformulasi pendekatan yang lebih universal untuk model SGS ini, sebuah model dinamis Smagorinsky telah dilakukan dengan menggunakan dua filter. Mengacu pada Germano dkk. [83], pada metode numerik yang dikembangkan ini, simulasi pusaran arus yang besar (*Large Eddy Simulation/LES*) diimplementasikan untuk memodelkan aliran turbulen (*turbulent flow*). Persamaan-persamaan yang digunakan berikut berikut di bawah ini:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{ij} = -2(C\Delta^2) |\overline{S}| \overline{S}_{ij} \quad 2.26$$

$$C = \frac{1}{2\Delta^2} \frac{L_{ij} M_{ij}}{M_{ij} \overline{M}_{ij}} \quad 2.27$$

Di mana τ_{ij} merupakan tensor tegangan (*stress tensor*), Δ merupakan ukuran grid, \overline{S}_{ij} merupakan laju tensor regangan (*rate strain tensor*), L_{ij} merupakan tensor tegangan turbulen yang terselesaikan (*resolved turbulent stress tensor*), C merupakan konstanta Smagorinsky, dan subgrid skala tegangan τ_{ij} harus diekspresikan menggunakan model M_{ij} yang diberikan sebagai berikut:

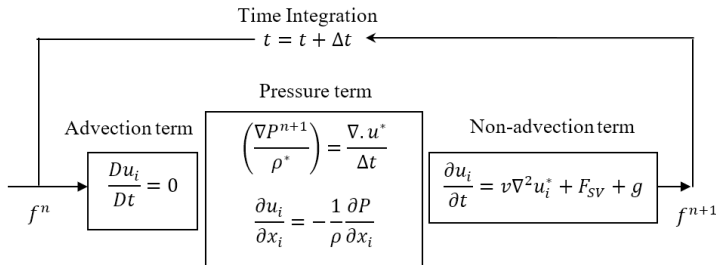
$$M_{ij} = 2\Delta^2 (|\overline{S}| \overline{S}_{ij} - a^2 |\overline{S}| \overline{S}_{ij}) \quad 2.28$$

$$\alpha = \frac{\widehat{\Delta}}{\Delta}$$

2.29

2.2.3. Teknik Pembagian Waktu (*Time Splitting Technique*)

Persamaan-persamaan yang digunakan akan diselesaikan dengan menggunakan teknik pembagian sebagaimana diketahui dengan jelas yakni teknik multifase konvensional. Teknik ini sangat cocok untuk menyelesaikan aliran multifase tanpa merusak densitas di seluruh antarmuka (*interface*). Adveksi atau pergerakan aliran dihitung dengan menggunakan metode CIP [5, 85], sementara non-adveksi dihitung menggunakan beda hingga orde dua. Selanjutnya tekanan diselesaikan dengan menggunakan persamaan Poisson (*Poisson equation*). Berikut di bawah ini merupakan skema integrasi waktu adveksi, kondisi lompatan tekanan, dan non-adveksi.



Gambar 2.7 Integrasi waktu untuk teknik pembagian waktu (*time splitting technique*)

2.2.4. Skema Tipe-M dari Metode CIP

Langkah adveksi dihitung dengan menggunakan metode CIP yang diberikan oleh Takewaki dan Yabe [5, 85]. Profil spasial dari fungsi densitas antara kisi yang berdekatan diselesaikan dengan menggunakan fungsi interpolasi kubik (*cubic interpolated function*). Metode CIP merupakan metode yang mempunyai algoritma yang kurang difusif dan stabil untuk menyelesaikan persamaan adveksi. Kemudian,

skema Tipe-M dari metode CIP diselesaikan dengan menggunakan akurasi urutan orde tiga dalam ruang dan waktu (*third-order accuracy in time and space*) [85].

Bentuk dua dimensi metode tersebut dijelaskan berikut di bawah ini. Persamaan evolusi waktu sebuah kuantitas fisik f dan nilai diferensial g dinyatakan sebagai berikut:

$$f_i^{n+1} = CIP1D(f, \delta_x f_i, f_{iup}, \delta_x f_{iup}, x = X) \quad 2.30$$

$$g_i^{n+1} = \frac{\delta}{\delta_x} CIP1D(f, \delta_x f_i, f_{iup}, \delta_x f_{iup}, x = X) \quad 2.31$$

Di mana CIP1D merupakan aplikasi untuk algoritma metode CIP. Untuk langkah pertama, persamaan-persamaan (2.32) sampai dengan (2.35) digunakan untuk menghitung adveksi arah x sebagai berikut:

$$A_{i1,\eta} = CIP1D(f_{i1,j1}, \delta_y f_{i1,j1}, f_{i1,j1+1}, \delta_y f_{i1,j1+1}, y = \eta) \quad 2.32$$

$$\delta_y A_{i1,\eta} = \frac{\delta}{\delta_y} CIP1D(f_{i1,j1}, \delta_y f_{i1,j1}, f_{i1,j1+1}, \delta_y f_{i1,j1+1}, y = \eta) \quad 2.33$$

$$\delta_y A_{i1,\eta} = FDM1D(\delta_x f_{i1,j1}, \delta_x f_{i1,j1+1}, y = \eta) \quad 2.35$$

Selanjutnya, untuk langkah kedua digunakan persamaan berikut di bawah untuk menghitung arah adveksi y yang dinyatakan pada persamaan (2.36) sampai dengan (2.38) sebagai berikut:

$$T_{\xi,\eta} = CIP1D(f_{i1,\eta}, \delta_x A_{i1,\eta}, A_{i1+1,\eta}, \delta_x A_{i1+1,\eta}, x = \xi) \quad 2.36$$

$$\delta_y T_{\xi, \eta} = FDM1D(\delta_y A_{i1, \eta}, \delta_y A_{i1+1, \eta}, x = \xi) \quad 2.37$$

$$\delta_y T_{\xi, \eta} = \frac{\delta}{\delta y} CIP1D(A_{i1, \eta}, \delta_x A_{i1, \eta}, A_{i1+1, \eta}, \delta_x A_{i1+1, \eta}, x = \xi) \quad 2.38$$

Selain itu, untuk kasus tiga dimensi sebagai langkah ketiga, sebuah adveksi arah z dapat dihitung seperti arah y sebagaimana dijelaskan sebelumnya. Metode CIP tipe-M diterapkan untuk menghitung kecepatan dan fungsi densitas ϕ_i (*density function*).

2.3. Persamaan Umum untuk Fase Padat

2.3.1. Metode SPH

Skema Euler dengan partikel Lagrange yang digunakan untuk menghitung gerakan dan deformasi struktur [6] diterapkan pada ruang fase padat yang didiskritisasi dengan menggunakan metode SPH. Metode SPH bekerja dengan membagi sejumlah partikel yang disebut objek ke objek, dengan algoritma aproksimasi untuk hal-hal pengaturan. Di sini, gerak partikel diperlakukan sebagai kelompok gerakan partikel yang terisolasi. Oleh karena itu, konversi persamaan Kernel (Kernel equation) terhadap besaran fisik $\phi(x)$ pada posisi x dalam ruang diberikan sebagai berikut:

$$\phi(x) = \int \phi(x') \delta(x - x') d \quad 2.39$$

Di mana integrasi meliputi seluruh ruang yang mewakili fungsi delta $\delta(x - x')$. Fungsi delta (*delta function*) dapat diperoleh dan digantikan dengan sebuah lebar yang sesuai untuk komputasi numerik h (area) dengan W yang tepat sebagaimana diberikan pada persamaan berikut:

$$\phi(x) = \int \phi(x') W(x - x', h) dx' \quad 2.40$$

Di sisi kanan pada persamaan di atas (2.40), fungsi Kernel W diperoleh dengan menghitung rata-rata besaran fisik partikel. W adalah interpolasi fungsi Kernel $(x - x', h)$ yang memiliki dua properti sebagaimana pada persamaan berikut:

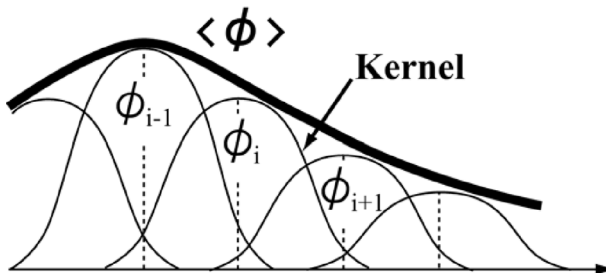
$$\int W(x, h) dx = 1 \quad 2.41$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x - x', h) = \delta(x - x') \quad 2.42$$

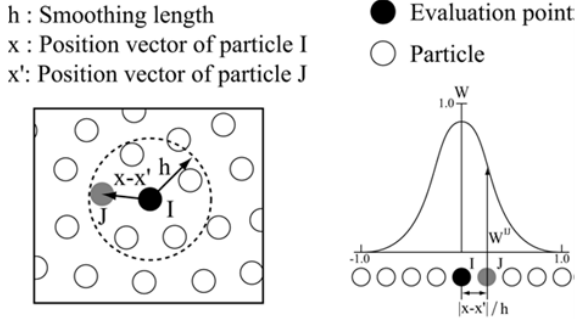
$$W(x, h) = 0, |x| \geq h \quad 2.43$$

Di mana batasan (*limit*) diartikan sebagai batas dari interpolasi integral yang sesuai. Hal ini sangat jelas bahwa fungsi Kernel terkait dengan subjek integral tunggal.

Gambar 2.8 menunjukkan distribusi fungsi Kernel dimana kuantitas fisiknya terdistribusi dengan baik di area referensi h . Kemudian, Gambar 2.9 menunjukkan bidang kontinum partikel. Pengevalu-



Gambar 2.8 Skema distribusi fungsi Kernel (*Kernel function*)



Gambar 2.9 Radius pengaruh area dari kontinum partikel

asian interaksi partikel disajikan ke interaksi antara partikel I dengan partikel J lainnya dengan panjang h .

Untuk merepresentasikan persamaan gerak partikel (2.40) dibutuhkan bentuk diferensial, $\phi(x)$ diperoleh dengan mengganti dengan ∇ sebagai berikut:

$$\nabla \cdot \phi(x) = \int \nabla \cdot \phi(x') W(x - x', h) dx' \quad 2.44$$

Dengan menerapkan teorema Gauss (*Gauss theorem*) pada persamaan tersebut di atas maka:

$$\nabla \cdot \phi(x) = - \int \phi(x') \nabla W(x - x', h) dx' \quad 2.45$$

Volume partikel J dalam setiap dx' , massa m^j dan massa jenis ρ^j pada posisi x' dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$dx' = \frac{m^j}{\rho^j} \quad 2.46$$

Kemudian, persamaan-persamaan tersebut di atas dapat didiskritkan sebagai berikut:

$$\int \phi(x') dx' = \int \frac{\phi(x')}{\rho} \rho dx' = \sum_{j=1}^N \left(\frac{\phi(x^j)}{\rho^j} \right) m^j \quad 2.47$$

Elemen integral di sisi kiri pada persamaan 2.47 dihasilkan dengan jumlah secara keseluruhan partikel dalam jumlah komponen yang terbatas. Indeks penjumlahan J sampai jumlah N partikel menunjukkan label partikel. Partikel memiliki massa jenis ρ^j , massa m^j , dan posisi x' . Hubungan persamaan 2.40 dan 2.45 dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\phi(x) = \sum_{j=1}^N \left(\frac{m^j}{\rho^j} \right) \phi(x^j) W(x - x^j, h) \quad 2.48$$

$$\nabla \cdot \phi(x) = - \sum_{j=1}^N \left(\frac{m^j}{\rho^j} \right) \phi(x^j) \nabla W(x - x^j, h) \quad 2.49$$

Parameter kontinuitas dari persamaan 2.49 dihasilkan oleh turunan pertama dari bidang partikel dan fungsi $\phi(x^j)$ untuk menjamin *gradien spasial* dari kontinuitas fungsi Kernel pada titik mana pun. Algoritma SPH dievaluasi berdasarkan gradien spasial sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan 2.49.

Selanjutnya, metode SPH digunakan untuk memperkirakan solusi interpolasi fungsi Kernel W . Fungsi ini diinterpolasi ke titik pusat dari evaluasi beberapa besaran fisik pada posisi partikel dengan radius pengaruh h . Ada banyak interpolasi dari fungsi Kernel W . Pada pengembangan numerik ini, fungsi Kernel W yang umum digunakan sebagaimana persamaan diadopsi sebagai berikut:

$$W = \frac{a}{h^d} f(s) \quad 2.50$$

Di mana $f(s)$ merupakan fungsi yang menghaluskan (*smooth function*), s merupakan titik yang dievaluasi dalam jarak partikel J dari $r = |x - x^j|$ dibagi dengan radius pengaruh h . Sementara, a merupakan faktor normalisasi, d merupakan jumlah dimensi. Spesifik fungsi $f(s)$ dijelaskan di bagian berikut di bawah ini.

2.3.2. Fungsi Penghalusan (*Smoothing Function*)

Pengembangan metode numerik ini mengadopsi fungsi Spline pangkat tiga. Berikut ini adalah persamaan fungsi penghalusan yang digunakan dalam analisis struktur elastis. Fungsi Spline pangkat tiga diberikan sebagai berikut:

$$f(s) = \begin{cases} \frac{2}{3}(1 - 6s^2 + 6s^3), & 0 \leq s < 0.5 \\ \frac{4}{3}(1 - s)^3, & 0.5 \leq s < 0,5 \\ 0, & 1 \geq s \end{cases} \quad 2.51$$

Sementara parameter a sebagaimana diberikan pada persamaan berikut:

$$f(s) = \begin{cases} 2, & d = 1 \\ \frac{60}{7\pi}, & d = 2 \\ \frac{12}{\pi}, & d = 3 \end{cases} \quad 2.52$$

Kemudian, bentuk diferensial dari fungsi Kernel diberikan oleh persamaan berikut:

$$\frac{\delta W}{\delta s} = \frac{a}{h^{d+1}} \begin{cases} (-8s + 12s^2), & 0 \leq s < 0.5 \\ (-4 + 8s - 4s^{2s}), & 0.5 \leq s < 1 \\ 0, & 1 \leq s \end{cases} \quad 2.53$$

2.3.3. Persamaan Umum Fase Padat

Persamaan yang mengatur untuk fase padat adalah persamaan kontinu dan gerak sebagaimana diberikan berikut di bawah ini:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} &= -\rho \frac{\delta U_i}{\delta x_i} \\ &= -\frac{\delta(\rho U_i)}{\delta x_i} + U_i \frac{\delta \rho}{\delta x_i} \end{aligned} \quad 2.54$$

$$\frac{dU_i}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\delta \sigma_{ij}}{\delta x_i} + g_i + F_{fsi} \quad 2.55$$

Di mana, ρ merupakan densitas, U_i merupakan kecepatan, x_i dan x_j adalah vektor komponen masing-masing arah-i dan arah-j, σ_{ij} merupakan tensor tegangan (*stress tensor*) benda padat dan F_{fsi} merupakan interaksi fluida-benda padat. Di sini, kontinu didiskritkan dengan menggunakan metode SPH sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} &= -\sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} \rho^j U_i^j W(x^I - x^j, h) + \\ &U_i \sum_{j=1}^N \frac{m^j}{\rho^j} \rho^j U_i^j W(x^I - x^j, h) \\ &= \sum_{j=1}^N m^j (U_i^I - U_i^j) \nabla W(x^I - x^j, h) \end{aligned} \quad 2.56$$

Kemudian, persamaan 2.55 diperluas ke tahapan pertama sebagai berikut:

$$\frac{dU_i}{dt} = \frac{\delta}{\delta x_i} \frac{\sigma_{ij}}{\rho} + \frac{\sigma_{ij}}{\rho^2} \frac{\delta \rho}{\delta x_j} + F_{fsi} \quad 2.57$$

Persamaan 2.57 di atas, hukum kekekalan momentum didiskritkan dengan menggunakan metode SPH sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{dU_i}{dt} &= \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} \frac{\sigma_{ij}^J}{\rho^J} \nabla W(x^I - x^J, h) + \\ &\quad \frac{\sigma_{ij}^I}{(\rho^I)^2} \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} \rho^J \nabla W(x^I - x^J, h) + F_{fsi} \\ &= \sum_{J=1}^N m^J \left(\frac{\sigma_{ij}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{ij}^I}{(\rho^I)^2} \right) \nabla W(x^I - x^J, h) + F_{fsi} \end{aligned} \quad 2.58$$

a. Viskositas Buatan

Dalam metode SPH, viskositas buatan dimasukkan untuk mencegah getaran. Viskositas buatan ini menekan beban getaran diterapkan dalam persamaan tegangan dan gerak. Pada metode numerik yang dikembangkan ini, viskositas buatan Π yang diberikan oleh metode Monaghan dipertimbangkan untuk digunakan. Sehingga, persamaan gerak menjadi persamaan berikut di bawah ini:

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_{J=1}^N m^J \left(\frac{\sigma_{ij}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{ij}^I}{(\rho^I)^2} \Pi^{IJ} \delta_{ij} \right) \nabla W(x^I - x^J, h) + F_{fsi} \quad 2.59$$

Kemudian, viskositas buatan Π^{IJ} diberikan dengan persamaan berikut di bawah ini:

$$\Pi^{IJ} = \frac{-a\bar{c}\mu^{IJ} + b(\mu^{IJ})^2}{\bar{\rho}^{IJ}} \quad 2.60$$

$$\mu^I = \frac{h(U^I - U^J)\sqrt{(x^I - x^J)^2 + (y^I - y^J)^2}}{(x^I - x^J)^2 + (y^I - y^J)^2 + kh^2} \quad 2.61$$

$$\bar{c} = \frac{1}{2}(c^I + c^J) \quad 2.62$$

$$\bar{\rho}^I = \frac{1}{2}(\rho^I + \rho^J) \quad 2.63$$

Di mana a , b , k merupakan parameter-parameter viskositas buatan. c^I dan c^J merupakan kecepatan partikel pada posisi I dan J .

b. *Artificial Stress*

Dalam metode SPH, partikel tidak stabil ketika berada dalam keadaan tegang [86, 87]. Hal ini disebabkan ketika jarak antar partikel terlalu menyebar dalam kondisi tegangan, dan juga tidak ada interferensi timbal balik antara partikel-partikel. Sehingga, pada akhirnya, hal ini menjadi masalah yang dapat menyebabkan kerusakan. Oleh karena itu, metode numerik yang dikembangkan ini, metode Gray et al. [88] digunakan untuk mempertimbangkan tegangan buatan R (*artificial stress R*). Kemudian, Monaghan [89] mengembangkan metode Gray, kemudian tegangan buatan diaplikasikan pada benda elastis dengan cairan dalam kondisi tegang. Berdasarkan penjelasan tersebut, persamaan gerak dapat diekspresikan sebagai berikut di bawah ini:

$$\frac{dU_i}{dt} = \sum_{J=1}^N m^J \left(\frac{\sigma_{ij}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{ij}^I}{(\rho^I)^2} \Pi^{IJ} \delta_{ij} + (R_{ij}^I + R_{ij}^J) f^{IJ} \right) \nabla W(x^I - x^J, h) + F_{jsi} \quad 2.64$$

Selanjutnya, Tegangan buatan R_{ij}^I (*artificial stress R_{ij}^I*) diberikan pada persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned}
R_{xx}^I &= \overline{R}_{xx}^I \cos^2 \theta^I + \overline{R}_{yy}^I \sin^2 \theta^I \\
R_{yy}^I &= \overline{R}_{xx}^I \sin^2 \theta^I + \overline{R}_{yy}^I \cos^2 \theta^I \\
R_{xy}^I &= (\overline{R}_{xx}^I + \overline{R}_{yy}^I) \cos \theta^I \sin \theta^I
\end{aligned}
\tag{2.65}$$

Di mana θ^I dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$\tan 2\theta^I = \frac{2\sigma_{xy}^I}{\sigma_{xx}^I - \sigma_{yy}^I}
\tag{2.66}$$

Jika $\sigma_{xx}^I = \sigma_{yy}^I$, maka diperoleh $\sigma^I = 45$ karena angka penyebut sama dengan nol. Selanjutnya, \overline{R}_{xx}^I dan \overline{R}_{yy}^I merupakan faktor koreksi sebagaimana diberikan sebagai berikut:

$$\overline{R}_{ii}^I = \begin{cases} -\varepsilon \frac{\ddot{\sigma}_{ii}^I}{(\rho^I)^2} & \overline{\sigma}_{ii}^I > 0 (Tension) \\ 0, & \overline{\sigma}_{ii}^I \leq 0 (Tension) \end{cases}
\tag{2.67}$$

Faktor koreksi \overline{R}_{xx}^I berlaku hanya dalam keadaan tegang ketika ($\overline{\sigma}_{ii}^I > 0$). Juga, ε merupakan parameter yang mengontrol besar kecilnya tegangan buatan (*artificial stress*). Dalam metode numerik yang dikembangkan ini, nilai ε diberikan 0.3 sebagaimana telah diimplementasikan oleh Monaghan. Tegangan normal $\overline{\sigma}_{ii}^I$ pada bidang putar atau rotasi diberikan oleh persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
\overline{\sigma}_{xx}^I &= \sigma_{xx}^I \cos^2 \theta^I + \sigma_{xy}^I 2 \cos \theta^I \sin \theta^I + \sigma_{yy}^I \sin^2 \theta^I \\
\overline{\sigma}_{yy}^I &= \sigma_{xx}^I \sin^2 \theta^I + \sigma_{xy}^I 2 \cos \theta^I \sin \theta^I + \sigma_{yy}^I \cos^2 \theta^I
\end{aligned}
\tag{2.68}$$

Gaya f^{IJ} sama dengan 1 ketika jarak awal Δp antara partikel menjauh dan memengaruhi radius h menjadi nol atau lebih jauh.

Persamaan 2.56 dan persamaan kekekalan massa pada persamaan 2.64 merupakan persamaan gerak, di mana komponen persamaan tersebut ditampilkan dalam dua dimensi sebagai berikut:

$$\frac{dp}{dt} = \sum_{J=1}^N m^J \left[(U_x^I - U_x^J) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x} + (U_y^I - U_y^J) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta y} \right] \quad 2.69$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_x}{dt} = \sum_{J=1}^N m^J \left[\left(\frac{\sigma_{xx}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{xx}^I}{(\rho^I)^2} + \Pi^{IJ} + (R_{xx}^I + R_{xx}^J) f^{IJ} \right) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_x} \right. \\ \left. + \left(\frac{\sigma_{xy}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{xy}^I}{(\rho^I)^2} + (R_{xy}^I + R_{xy}^J) f^{IJ} \right) \frac{\delta W^{IJ}}{dx_y} \right] \\ + F_{fsi} \end{aligned} \quad 2.70$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_y}{dt} = \sum_{J=1}^N m^J \left[\left(\frac{\sigma_{yy}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{yy}^I}{(\rho^I)^2} + \Pi^{IJ} + (R_{yy}^I + R_{yy}^J) f^{IJ} \right) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_x} \right. \\ \left. + \left(\frac{\sigma_{yx}^J}{(\rho^J)^2} + \frac{\sigma_{yx}^I}{(\rho^I)^2} + (R_{yx}^I + R_{yx}^J) f^{IJ} \right) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_x} \right] \\ + F_{fsi} \end{aligned} \quad 2.71$$

2.3.4. Persamaan Benda Elastis-plastis

a. Persamaan konstitutif tipe inkremental untuk deformasi tinggi pada benda plastis-elastis

Model konstitutif pada suatu bahan merupakan seperangkat persamaan yang berkaitan dengan tegangan-regangan. Regangan merupakan ukuran deformasi yang dinormalisasi dalam bentuk perpindahan antara partikel pada sebuah benda yang relatif terhadap panjang acuan, sehingga deformasi memiliki satuan panjang.

Pada pengembangan metode numerik ini, deformasi besar benda *elastoplastic* dipertimbangkan terjadi. Benda padat berubah di setiap langkah perhitungan. Perubahan tersebut harus terlihat dengan meng-

gunakan persamaan tipe tambahan atau kenaikan konstitutif (*incremental-type constitutive equation*). Hubungan antara kenaikan tegangan dan kenaikan regangan dalam deformasi elastis-plastis sebuah benda secara umum dalam bentuk sebagai berikut:

$$\delta\sigma = D^{ep} d\epsilon \quad 2.73$$

Kemudian, untuk kasus deformasi besar perlu dilakukan modifikasi persamaan 2.73 sebagai berikut:

$$\delta\sigma = D^{ep} d\epsilon \quad 2.74$$

Di mana d merupakan *Jaumann rate*, D^{ep} merupakan *elastoplastic matrix*, dan $d\epsilon$ merupakan waktu penambahan *strain*.

b. *Deviatoric stress*

Tensor tegangan s (*stress tensor*) dapat diekspresikan sebagai jumlah komponen hidrostatis dan deviasi komponen. Tensor tegangan hidrostatis atau tensor tegangan volumetrik atau tensor tegangan normal rata-rata cenderung untuk mengubah volume benda yang tertekan. Komponen deviator disebut tensor deviator tegangan yang cenderung mendistorsi sebuah benda. Tekanan hidrostatis p diwakili oleh persamaan $p = -J_1/3$, $\sigma_x + p = \sigma'_x$, $\sigma_y + p = \sigma'_y$ dan $\sigma_z + p = \sigma'_z$.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma'_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma'_x & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma'_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{pmatrix} \quad 2.75$$

Di mana σ'_x , σ'_y , dan σ'_z merupakan diagonal dari komponen tegangan deviator S .

c. Jaumann stress rate

Deformasi plastis-elastis merupakan fenomena yang direpresentasikan oleh tipe struktur. Persamaan konstitutif elastoplastik dinyatakan dengan menggunakan laju tegangan (*stress rate*). Dalam penelitian ini laju tegangan merupakan turunan spasial (ruang) dari material sebuah benda. Untuk merepresentasikan laju tegangan yang terjadi pada material benda, *Jaumann rate* digunakan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\dot{\sigma} = \dot{\sigma} - W \cdot \sigma + \sigma \cdot W \tag{2.76}$$

Di mana W merupakan *spin tensor*, $\dot{\sigma}$ merupakan turunan tegangan material (*differential Lagrange*), $\dot{\sigma}$ merupakan turunan tegangan Jaumann (*Jaumann stress derivative*). Turunan tegangan Jaumann (*Jaumann stress derivative*) digunakan untuk memastikan material *frame-indifference* sehubungan dengan rotasi.

Tensor gradien kecepatan L (*velocity gradient tensor*) diwakili oleh *spin tensor* dan *stretching tensor* D dan W sebagaimana diekspresikan pada persamaan berikut:

$$L = D + W \tag{2.77}$$

$$D = \frac{1}{2}(L + L^T) \tag{2.78}$$

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_i}{\delta x_j} + \frac{\delta v_j}{\delta x_i} \right) = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad 2.79$$

$$W = \frac{1}{2} (L + L^T) \quad 2.80$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\delta v_i}{\delta x_j} + \frac{\delta v_j}{\delta x_i} \right) = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad 2.81$$

Diskrit dari *spin tensor* dan *stretching tensor* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} \left[(U_i^I - U_i^J) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_j} + (U_j^I - U_j^J) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_i} \right] \quad 2.82$$

$$W_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{J=1}^N \frac{m^J}{\rho^J} \left[(U_i^I - U_i^J) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_j} + (U_j^I - U_j^J) \frac{\delta W^{IJ}}{\delta x_i} \right] \quad 2.83$$

Selain itu, hubungan antara laju Jaumann pada persamaan 2.74 dengan kenaikan secara normal $d\sigma_{ij}$ dinyatakan dengan ke dalam persamaan berikut:

$$d\sigma'_{ij} = d\sigma_{ij} - d\omega_{ik} \sigma_{kj} + \sigma_{ik} d\omega_{kj} \quad 2.84$$

d. Matriks *Elastoplastic D^{eP}*

Tegangan deviator (*deviatoric stress*) terjadi akibat deformasi plastis. Pada metode numerik yang dikembangkan ini mengadopsi teori analisis FEM (*finite element method*) untuk menyelesaikan regangan plastis. Tegangan deviator S diasumsikan sebanding dengan laju regangan $\dot{\epsilon}$ deformasi plastis sebagaimana diberikan pada persamaan berikut:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\lambda} S \quad 2.85$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx}^p & \dot{\epsilon}_{xy}^p & \dot{\epsilon}_{xz}^p \\ \dot{\epsilon}_{xy}^p & \dot{\epsilon}_{yy}^p & \dot{\epsilon}_{yz}^p \\ \dot{\epsilon}_{xz}^p & \dot{\epsilon}_{yz}^p & \dot{\epsilon}_{zz}^p \end{bmatrix} = \dot{\lambda} \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} \quad 2.86$$

Atau variasi regangan dalam waktu dt , dengan mempertimbangkan penambahan regangan $d\epsilon^p$ sebagaimana diberikan pada persamaan berikut:

$$d\epsilon = d\lambda S \quad 2.87$$

Pada pengembangan metode numerik ini, sebuah koefisien $d\lambda$ dideskripsikan di mana tergantung pada kondisi material, yang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$d\lambda = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\sigma} \quad 2.88$$

Selanjutnya, persamaan 2.88 dapat dipisahkan untuk setiap komponen sebagaimana diberikan pada persamaan sebagai berikut ini: biasanya dipisahkan untuk setiap komponen sebagai berikut:

$$\frac{d\epsilon_{xx}^p}{S_{xx}} = \frac{d\epsilon_{yy}^p}{S_{yy}} = \frac{d\epsilon_{zz}^p}{S_{zz}} = \frac{d\epsilon_{xy}^p}{S_{xy}} = \frac{d\epsilon_{yz}^p}{S_{yz}} = \frac{d\epsilon_{xz}^p}{S_{xz}} = d\lambda \quad 2.89$$

Tegangan deviator S (*deviatoric stress* S) didefinisikan pada persamaan sebagai berikut:

$$S = \sigma - p \quad 2.90$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{xy} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{xz} & S_{yz} & S_{zz} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & -p \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - p & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - p & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad 2.91$$

Di mana p merupakan tegangan hidrostatis yang dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan berikut di bawah ini:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \frac{J_1}{3} \quad 2.92$$

Di mana, J_1 merupakan fungsi yang pertama (*first invariant*). Selanjutnya, fungsi pertama J_1 , fungsi kedua J_2 , dan fungsi ketiga J_3 diberikan oleh persamaan masing-masing berikut ini:

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z - 3p = 0 \quad 2.93$$

$$J_2 = -\frac{1}{2}(S_{xx}^2 + S_{yy}^2 + S_{zz}^2) - S_{xy}^2 - S_{yz}^2 - S_{xz}^2 \quad 2.94$$

$$\begin{aligned} J_3 &= S_{xx}S_{yy}S_{zz} + 2S_{xy}S_{yz}S_{xz} - S_{xx}S_{yz}S_{yz} - S_{yy}S_{xy}S_{xz} \\ &\quad - S_{zz}S_{xy}S_{xy} \end{aligned} \quad 2.95$$

Untuk pengaplikasian fluida plastik-elastis dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method/FEM*), persamaan

2.96 sampai dengan 2.101 dapat digunakan. Hukum aliran Lois Levy Mises digunakan untuk mengekspresikan regangan elastis (*elastic strain*) yang terkait dengan deformasi elastik-plastis. Selain itu, persamaan Prandtl-Reuss merupakan persamaan laju regangan elastis dari hukum Hooke. Persamaan tersebut berasal dari hukum aliran potensial plastik von Mises dan laju regangan plastik.

$$d\epsilon_{xx} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} S_{xx} + \frac{1}{E} \{d\sigma_x - v(d\sigma_y + d\sigma_z)\} \quad 2.96$$

$$d\epsilon_{yy} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} S_{yy} + \frac{1}{E} \{d\sigma_y - v(d\sigma_x + d\sigma_z)\} \quad 2.97$$

$$d\epsilon_{zz} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} S_{zz} + \frac{1}{E} \{d\sigma_z - v(d\sigma_x + d\sigma_y)\} \quad 2.98$$

$$d\epsilon_{xy} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} S_{xy} + \frac{2(1+v)}{E} d\tau_{xy} \quad 2.99$$

$$d\epsilon_{yz} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} S_{yz} + \frac{2(1+v)}{E} d\tau_{yz} \quad 2.100$$

$$d\epsilon_{xz} = \frac{3}{2} \frac{d\bar{\epsilon}}{\bar{\sigma}} S_{xz} + \frac{2(1+v)}{E} d\tau_{xz} \quad 2.101$$

Persamaan 2.102 sampai dengan 2.107 mengekspresikan secara rinci komponen-komponen regangan plastik, berikut di bawah ini:

$$d\epsilon_{xx} = \frac{d\bar{\epsilon}}{Y} \left\{ \sigma_x - \frac{1}{2}(\sigma_y + \sigma_z) \right\} + \frac{1}{E} \{d\sigma_x - v(d\sigma_y + d\sigma_z)\} \quad 2.102$$

$$d\varepsilon_{yy} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{Y} \left\{ \sigma_y - \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_x) \right\} + \frac{1}{E} \{ d\sigma_y - \nu(d\sigma_z + d\sigma_x) \} \quad 2.103$$

$$d\varepsilon_{zz} = \frac{d\bar{\varepsilon}}{Y} \left\{ \sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right\} + \frac{1}{E} \{ d\sigma_z - \nu(d\sigma_x + d\sigma_y) \} \quad 2.104$$

$$d\varepsilon_{xy} = 3 \frac{d\bar{\varepsilon}}{Y} \tau_{xy} + \frac{2(1+\nu)}{E} d\tau_{xy} \quad 2.105$$

$$d\varepsilon_{yz} = 3 \frac{d\bar{\varepsilon}}{Y} \tau_{yz} + \frac{2(1+\nu)}{E} d\tau_{yz} \quad 2.106$$

$$d\varepsilon_{xz} = 3 \frac{d\bar{\varepsilon}}{Y} \tau_{xz} + \frac{2(1+\nu)}{E} d\tau_{xz} \quad 2.107$$

Di mana Y menunjukkan nilai kritis material (tegangan leleh) yang merupakan nilai spesifik material. Ekuivalen kenaikan tegangan $\bar{\sigma}$ diberikan oleh persamaan berikut:

$$d\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3\bar{\sigma}} \{ S_{xx} d\sigma_x + S_{yy} d\sigma_y + S_{zz} d\sigma_z + 2(\tau_{xy} d\tau_{xy} + \tau_{yz} d\tau_{yz} + \tau_{xz} d\tau_{xz}) \} \quad 2.108$$

Bila persamaan 2.108 di atas diubah menjadi kecepatan dalam bentuk matriks, maka persamaan diberikan sebagai berikut:

$$\{\dot{\varepsilon}\} = [C]\{\dot{\sigma}\} = ([C^e + C^p])[\{\dot{\sigma}\}] \quad 2.109$$

$$[C^e] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 02(2+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \quad 2.110$$

$$[C^e] = \frac{9}{4} \frac{1}{H' \sigma^2} \begin{bmatrix} S_{xx}^2 & S_{xx}S_{yy} & S_{xx}S_{zz} & 2S_{zz}\tau_{xy} & 2S_{xx}\tau_{yz} & 2S_{xx}\tau_{xz} \\ S_{xx}S_{yy} & S_{yy}^2 & S_{yy}S_{zz} & 2S_{yy}\tau_{xx} & 2S_{yy}\tau_{yz} & 2S_{yy}\tau_{xz} \\ S_{xx}S_{zz} & S_{yy}S_{zz} & S_{zz}^2 & 2S_{zz}\tau_{xy} & 2S_{zz}\tau_{yz} & 2S_{zz}\tau_{xz} \\ 2S_{xx}\tau_{xy} & 2S_{yy}\tau_{xy} & 2S_{zz}\tau_{xy} & 4\tau_{xy}^2 & 4\tau_{xy}\tau_{yz} & 4\tau_{xy}\tau_{xz} \\ 2S_{xx}\tau_{yz} & 2S_{yy}\tau_{yz} & 2S_{zz}\tau_{yz} & 4\tau_{xy}\tau_{yz} & 4\tau_{yz}^2 & 4\tau_{yz}\tau_{xz} \\ 2S_{xx}\tau_{xz} & 2S_{yy}\tau_{xz} & 2S_{zz}\tau_{xz} & 4\tau_{xy}\tau_{xz} & 4\tau_{yz}\tau_{xz} & 4\tau_{xz}^2 \end{bmatrix} \quad 2.111$$

Selain itu, hubungan terbalik dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\{\dot{\sigma}\} = [D^{ep}]\{\dot{\epsilon}\}([D^e] + [D^p])\{\dot{\epsilon}\} \quad 2.112$$

Di mana D^{ep} merupakan matriks elastis-plastik, dan bentuk umumnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad 2.113$$

$$= [D^e] - \frac{[D^e] \frac{\delta g}{\delta \sigma} \left| \frac{\delta f}{\delta \sigma} \right| [D^e]}{\frac{H'}{c} + \left| \frac{\delta f}{\delta \sigma} \right| [D^e] \left\{ \frac{\delta g}{\delta \sigma} \right\}} \quad 2.114$$

Di mana, ν mewakili nilai poin, $[D^e]$ merupakan matriks elastisitas, dan $[D^p]$ adalah matriks yang mewakili suku plastisitas.

Matriks elastis D^e dari matriks isotropik dapat dituliskan sebagai berikut:

$$[D^e] = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad 2.115$$

Kemudian, matriks D^p diberikan berikut di bawah ini:

$$[D^p] = \frac{9G^2}{(H' + 3G)\bar{\sigma}^2} \begin{bmatrix} S_{xx}^2 & S_{xx}S_{yy} & S_{xx}S_{zz} & S_{xx}\tau_{xy} & S_{xx}\tau_{yz} & S_{xx}\tau_{xz} \\ S_{xx}S_{yy} & S_{yy}^2 & S_{yy}S_{zz} & S_{yy}\tau_{xx} & S_{yy}\tau_{yz} & S_{yy}\tau_{xz} \\ S_{xx}S_{zz} & S_{yy}S_{zz} & S_{zz}^2 & S_{zz}\tau_{xy} & S_{zz}\tau_{yz} & S_{zz}\tau_{xz} \\ S_{xx}\tau_{xy} & S_{yy}\tau_{xy} & S_{zz}\tau_{xy} & \tau_{xy}^2 & \tau_{xy}\tau_{yz} & \tau_{xy}\tau_{xz} \\ S_{xx}\tau_{yz} & S_{yy}\tau_{yz} & S_{zz}\tau_{yz} & \tau_{xy}\tau_{yz} & \tau_{yz}^2 & \tau_{yz}\tau_{xz} \\ S_{xx}\tau_{xz} & S_{xx}\tau_{xz} & S_{xx}\tau_{xz} & \tau_{xy}\tau_{xz} & \tau_{yz}\tau_{xz} & \tau_{xz}^2 \end{bmatrix} \quad 2.116$$

Di mana, S_{ij} merupakan tegangan deviator (*deviatoric stress*), G didefinisikan dengan $\frac{E}{2}(1+\nu)$, tahanan deformasi merupakan kemiringan kurva $H' = \frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}}$, dan jumlah pengerasan kerja yakni $d\bar{\sigma} = H d\bar{\epsilon}$.

e. Kriteria Luluh von Mises (von Mises yield)

Kriteria luluh von Mises merupakan bagian dari teori plastisitas yang paling baik diterapkan pada benda padat, seperti logam. Hal ini menunjukkan bahwa peluluhan material dimulai saat invarian tegangan deviator kedua J_2 mencapai nilai kritis k . Invarian tegangan deviator pertama J_1 selalu nol. Oleh karena itu, hal ini dapat disebut J_2 -plastisitas (J_2 -plasticity) atau J_2 teori aliran (J_2 flow theory) sebagaimana diekspresikan pada persamaan 2.117. Sebelum mencapai titik luluh, respons material diasumsikan elastis.

$$F(J_2) = \frac{1}{2} \{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)\} - Y^2 \quad 2.117$$

$$F(J_2) = \begin{cases} 0 & : \text{Boundry state} \\ < 0 & : \text{Elastic state} \end{cases} \quad 2.118$$

Di mana benda yang luluh Y memiliki nilai kritis (tegangan leleh) yang merupakan nilai spesifik material.

Selanjutnya, bagian kanan pada persamaan 2.117 dapat dikembangkan menjadi persamaan sebagai berikut:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)\}^{1/2} \quad 2.119$$

Persamaan ini juga dapat disebut tegangan ekuivalen yang merupakan parameter di mana mewakili besarnya tegangan tensor dan luluh material yang mencapai σ_0 . Pada kondisi luluh von Mises, tegangan ekuivalen σ (tegangan efektif) mencapai tegangan luluh Y . Selain

itu, metode numerik yang dikembangkan ini menerapkan algoritma penggabungan deformasi elastik dan deformasi.

2.3.5. 3 Dimensi (3D) Gerak Benda Solid dengan Partikel SPH

Pada bagian ini, gerakan tiga dimensi (3D) benda padat diselesaikan dengan menggunakan informasi yang diperoleh dari partikel SPH. Oleh karena itu, gerak 3D kapal atau bangunan lainnya yang direpresentasikan pada deskripsi gerak translasi dan rotasi dari pusat gravitasi yang diselesaikan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\delta^2 x_{s,k}}{\delta t^2} = \frac{F_{s,k}}{m_i} - F_{fsi} \quad 2.120$$

$$I \frac{\delta \omega_i}{\delta t} = T_i \quad 2.121$$

$$\frac{\delta \theta_i}{\delta t} = \omega_i \quad 2.122$$

Di mana, θ_i merupakan sudut rotasi, ω_i merupakan kecepatan sudut, T_i merupakan torsi, I merupakan momen inersia, dan F_{fsi} merupakan komponen interaksi struktur-fluida. Selain itu, pusat gravitasi kapal atau bangunan apung lainnya dapat diperoleh dengan menyelesaikan momen inersia partikel SPH, dan dapat dihitung dengan menggunakan teori Baraff [90].

a. Algoritma

Dalam metode numerik yang dikembangkan ini, lokasi benda padat dapat berupa sebuah kapal atau benda apung lainnya digambarkan dengan sebuah vektor yang menunjukkan translasi benda terse-

but dari posisi sebelumnya dan rotasi dalam ruang dan waktu t . Rotasi sebuah benda apung atau kapal diterjemahkan ke dalam matriks rotasi $3 \times 3 R(t)$. Selain itu, pusat gravitasi kapal atau bangunan apung lainnya dapat diperoleh dengan menyelesaikan momen inersia partikel SPH, dan dapat dihitung dengan menggunakan teori Baraff [90]. Berdasarkan pada teori ini, tensor inersia I dan pusat massa benda r_g , gerak tiga dimensi (3D) sebuah kapal atau benda apung lainnya dapat diselesaikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$r_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n r_i \quad 2.123$$

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m |r_i - r_g|^2 \quad 2.124$$

Di mana N merupakan koordinat pusat gravitasi benda kaku (*rigid body*). r_g merupakan posisi pusat gravitasi, I merupakan momen inersia, r_i merupakan posisi partikel SPH ke- i dan m massa partikel.

Pada proses komputasi, momen inersia diatur pada kondisi awal. Oleh karena itu, koordinat kecepatan setiap partikel SPH di setiap langkah waktu dapat dilacak dengan menggunakan matriks rotasi dan besaran sudut rotasi dari pusat gravitasi. Untuk menghindari fenomena kunci Gimbal lock atau kehilangan satu derajat kebebasan gerak dalam tiga dimensi, quaternion digunakan sebagai pengganti matriks rotasi.

Integrasi waktu dari posisi sebuah kapal atau benda apung lainnya dapat didefinisikan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{r}_i^j = \hat{r}_i^{k+1} - r_i^k \quad 2.125$$

$$r_g^{k+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{r}_i^{k+1} \quad 2.126$$

$$r'_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{r}'_i \quad 2.127$$

$$\theta' = \omega dt = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^N m \hat{r} x (r_i^k - r_g^{k+1}) \quad 2.128$$

$$r'_i = r'_g + R^{-1} (r_i^k - r_g^{k+1}) \quad 2.129$$

$$u_i^{k+1} = \frac{r'_i}{\Delta t} \quad 2.130$$

$$r_i^{k+1} = r_i^k + r'_i \quad 2.131$$

Di mana R^{-1} merupakan kebalikan dari matriks rotasi.

b. Persamaan Kuaternion (*Quaternion*)

Dalam metode numerik yang dikembangkan ini, persamaan kuaternion (*quaternion*) digunakan untuk merepresentasikan perilaku benda padat. Kuaternion mewakili sumbu translasi dan sumbu rotasi dalam ruang tiga dimensi (3D) di mana dimungkinkan untuk mengekspresikan sumbu rotasi dan rotasi objek ke segala arah dari posisi asalnya. Selain itu, besaran rotasi dapat dihitung pada setiap langkah simulasi dan selalu dilakukan pembaruan informasi putaran. Kuaternion q yang dinormalisasi dapat mencegah akumulasi kesalahan dengan menerapkan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{q} = \frac{q}{|q|} \quad 2.132$$

Sudut rotasi dengan simbol θ , sumbu rotasi $a = (a_x, a_y, a_z)$ merupakan kuaternion q yang mewakili rotasi sebagaimana diberikan oleh persamaan 2.133 sebagai berikut:

$$q = (q_x, q_y, q_z, s) = \left(a_x \sin \frac{\theta}{2}, a_y \sin \frac{\theta}{2}, a_z \sin \frac{\theta}{2}, \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad 2.133$$

Kemudian, matriks rotasi R direpresentasikan pada persamaan 2.134 sebagai berikut:

$$R = \begin{pmatrix} 1 - 2q_y^2 - 2q_z^2 & 2q_x q_y - 2s q_z & 2q_x q_z - 2s q_y \\ 2q_x q_y - 2s q_z & 1 - 2q_x^2 - 2q_z^2 & 2q_y q_z - 2s q_x \\ 2q_x q_z - 2s q_y & 2q_y q_z - 2s q_x & 1 - 2q_x^2 - 2q_y^2 \end{pmatrix} \quad 2.134$$

Di mana s merupakan skalar dan q_x , q_y , dan q_z masing-masing merupakan komponen vektornya pada sumbu x , y , dan z .

c. Momen Inersia

Momen Inersia merupakan ukuran ketahanan benda padat terhadap perubahan rotasi yang dialami. Dalam metode numerik yang dikembangkan ini, momen inersia akan dihitung setiap waktu. Selain itu, perhitungan momen inersia pada setiap waktu juga dipertimbangkan dalam metode numerik ini untuk mengurangi proses komputasi yang tidak efisien dan lama. Kemudian momen inersia I pada waktu t diwakili oleh matriks rotasi R pada waktu t , dan momen inersia awal I_0 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I = R(t)I_0R(t)^T \quad 2.135$$

Momen inersia I^t pada waktu t merupakan invers matriks dari momen inersia pada saat awal I_0^{-1} yang diselesaikan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I^{-1} = R(t)I_0^{-1}R(t)^T \quad 2.136$$

2.3.6. Solusi Terpisah dari Gerak Benda Padat-Deformasi Elastis

Kondisi batas kecepatan pada benda padat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$u_b = \phi_3 \bar{u}_{xs} + (1 - \phi_3)u_g \quad 2.137$$

Di mana u_b merupakan kecepatan pada kisi Eulerian dimana partikel SPH ditempatkan pada permukaan benda, ϕ_3 merupakan fungsi densitas fasa padat, \bar{u}_s merupakan kecepatan partikel SPH pada tiap kisi, dan u_g merupakan kecepatan pada permukaan kisi. Persamaan ini berarti bahwa kondisi batas tanpa slip (*no-slip boundary condition*) diberlakukan pada permukaan kapal atau benda apung lainnya.

Dalam metode numerik yang dikembangkan ini, untuk mempertimbangkan waktu komputasi dan untuk memastikan stabilitas numerik, komponen deformasi elastis dari gerakan benda elastis dihitung secara terpisah dengan komponen gerak benda padat. Hal ini dapat diselesaikan dengan membuat sebuah algoritma. Pertama-tama, persamaan 2.59 yang diatur dalam domain komputasi digunakan untuk menentukan kecepatan u_i^k dan mengkoordinasikan semua partikel

SPH r_i^k . Selanjutnya, persamaan dari 2.125 sampai dengan persamaan 2.129 digunakan untuk menghitung gerak translasi dan rotasi benda elastis. Persamaan 2.130 dan 2.131 digunakan untuk mendapatkan kecepatan dan koordinat gerakan benda padat.

Persamaan 2.138 dan 2.139 berikut disajikan di bawah ini menunjukkan pemisahan komponen kecepatan dan komponen koordinat benda elastis sebagai berikut:

$$V_{i,El} = V_i - V_{i,Rig} \quad 2.138$$

$$r_{i,El} = r_i - V_{i,Rig} \quad 2.139$$

Dari persamaan di atas, $V_{i,El}$ dan $r_{i,El}$ dapat diperoleh yang merepresentasikan komponen transformasi koordinat dengan kecepatan benda padat. Langkah selanjutnya adalah menghitung tegangan internal benda elastis dengan melakukan substitusi persamaan.

Dalam algoritma ini, persamaan 2.111 digunakan untuk menghitung momen inersia selama proses perhitungan di setiap langkah dan untuk menunjukkan deformasi benda elastis yang mengalami perubahan pada setiap saat dengan posisi. Persamaan 2.116 tidak dapat diadopsi. Oleh karena itu, setiap langkah yang diekspresikan pada persamaan 2.107 perlu dilakukan perhitungan momen inersia.

2.4. Prosedur Komputasi

Prosedur komputasi dalam skema tipe Euler dengan partikel Lagrange dapat dibagi menjadi tiga kerja utama. Bagian pertama melacak antarmuka udara-cair (*interface tracking of gas-fluid*) di kisi-kisi, menentukan fungsi kepadatan partikel ϕP (*particle density function*

ϕP) di permukaan bebas (*free surface*) menggunakan fungsi kepadatan ϕI (*density function*) yang tersimpan di titik pertemuan antara kisi-kisi. Kemudian, metode CIP digunakan untuk menjalankan fungsi densitas ϕI , kecepatan v , dan evolusi waktu tekanan p . Metode CIP berlaku untuk fase padat-cair yang solusinya dibagi menjadi langkah-langkah yang dipisahkan oleh waktu antara lain langkah adveksi (*advection*) dan langkah non-adveksi (*non- advection*).

Properti fisik densitas dan viskositas selalu diperbaharui yang diturunkan dengan menggunakan fungsi densitas ϕI yang tersimpan di titik pertemuan antara kisi-kisi dengan juga fungsi kepadatan partikel ϕP (*particle density function ϕP*). Selain itu, fungsi densitas ϕI dipertahankan selama langkah maju sebuah aliran, dan fungsi densitas ϕI yang bergerak melalui antara kisi-kisi dan partikel sebagaimana dijelaskan di atas sebelumnya dilakukan pada kenaikan waktu tertentu misal setiap 100 langkah.

Pada bagian lain, prosedur ini digunakan untuk menentukan dan memperoleh evolusi waktu dari partikel permukaan bebas (*free surface particles*), aliran, pendistribusian ulang partikel, tegangan partikel SPH padat/elastis, regangan, dan kecepatan. Dalam prosedur ini, fungsi densitas digunakan untuk mengoreksi viskositas dan densitas. Selain itu, kecepatan partikel SPH diinterpolasi menggunakan kecepatan yang ditentukan pada permukaan kisi-kisi sel. Selain itu, untuk mengatasi kasus penggabungan benda padat-fluida, perlu dilakukan langkah waktu yang proporsional antara di daerah fluida dan di daerah padat dengan cara menambah waktu kisi dari 1/2 menjadi 1/100 jam.

#3

Verifikasi Metode Numerik

Pada bab ini, metode numerik yang telah dikembangkan sebagaimana dipaparkan secara detail pada Bab 2, tingkat akurasi dan kegunaannya akan diverifikasi. Partikel Lagrangian yang tak bermassa (*massless Lagrangian marker particles*) ditempatkan ke dalam kisi Eulerian (*Eulerian grid*) dan diarahkan sesuai dengan kecepatan untuk menangkap dan memvisualkan antarmuka (*interface*) atau permukaan (*free surface*). Pada kerangka partikel (*particle framework*), fungsi kepadatan (*density function*) yang menggambarkan antarmuka (*interface*) antara berbagai fase benda dapat dikoreksi menggunakan fungsi Kernel (*Kernel function*) pada metode *smoothed particle hydrodynamics* (SPH). Untuk memverifikasi metode numerik yang dikem-

bangkan tersebut, semburan (*pouring*) dan percikan (*splashing*) fluida pada kejadian *breaking wave* disimulasikan dan dievaluasi secara kuantitatif pada kasus-kasus dua (2D) dan tiga dimensi (3D). Sebagai langkah awal, metode numerik ini akan diverifikasi dengan kasus aliran permukaan bebas antara lain rotasi benda kaku untuk disket Zalesak (*Zalesak's disk*), medan pusaran tunggal (*single vortex field*), dan bidang deformasi tiga dimensi. Adapun simulasi kasus-kasus tersebut dijelaskan berikut di bawah ini.

3.1. Disket Zalesak (*Zalesak's Disk*)

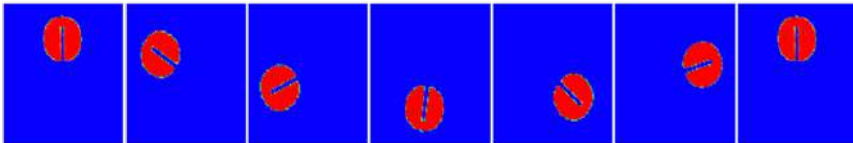
Rotasi benda kaku dari piringan Zalesak telah menunjukkan beberapa keuntungan dari metode numerik yang diaplikasikan pada bidang pusaran (*vortex field*) dengan kondisi yang konstan sebagaimana telah diusulkan oleh Zalesak [91]. Studi yang berpatokan pada kasus ini (*benchmark*), metode numerik yang dikembangkan pada studi ini dapat mengidentifikasi kesalahan difusi dari metode penelusuran dan pengambilan antarmuka (*interface capturing and tracking*). Pada kasus ini, untuk bidang kecepatan, persamaan kecepatan diberikan sebagai berikut:

$$u = \frac{\pi}{314}(50 - y) \quad 3.1$$

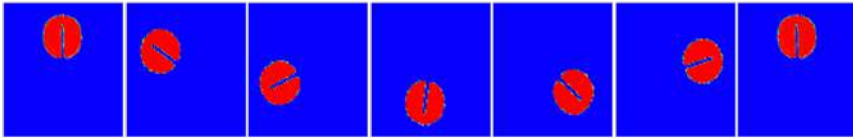
$$v = \frac{\pi}{314}(x - 50) \quad 3.2$$

Di mana u merupakan kecepatan pada arah sumbu y , v merupakan kecepatan pada arah sumbu x , dan π merupakan nilai radian pada sudut 180 derajat. Disket telah menempuh satu kali perputaran dalam waktu 628 detik. Disket yang berlubang memiliki ordinat posisi lubang (50, 75) dengan radius 15, lebar 3, dan panjang 25. Gambar 3.1 dan 3.2

menunjukkan perbandingan solusi dari metode numerik berdasarkan jumlah partikel yang berbeda. Di mana, jumlah partikel pada Gambar 3.1 adalah 1240 dan pada Gambar 4.2 sebesar 3196. Pada kedua kasus ini, metode numerik yang telah dikembangkan masih dapat mempertahankan bentuk awal disket setelah menempuh satu kali rotasi.



Gambar 3.1 Kasus disket Zalesak dengan jumlah 4 partikel dalam satu sel di permukaan



Gambar 3.2 Kasus disket Zalesak dengan jumlah 16 partikel dalam satu sel di permukaan

3.2. Medan Pusaran Tunggal (*Single Vortex Field*)

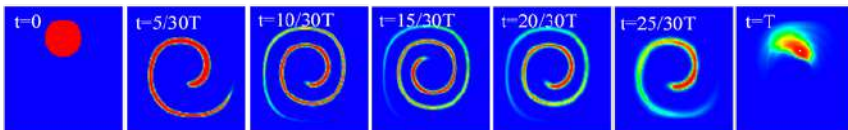
Untuk membuktikan kemampuan menangkap filamen tipis yang terjadi pada aliran yang mengalami peregangan (*stretching*) dan pembagian ruas-ruas (*tearing*), persoalan sebuah pusaran dalam pusaran (*vortex-in-vortex*) telah dipertimbangkan untuk disimulasi menggunakan metode yang telah dikembangkan, di mana kasus ini telah sebelumnya diperkenalkan oleh Bell et al. [92]. Sebuah domain komputasi yang digunakan memiliki lingkaran berjari-jari 0.15 yang ditempatkan pada ordinat (0, 5, 0.75). Persamaan bidang peregangan (*stretching fields*) untuk dua dimensi diberikan sebagai berikut:

$$u(x,y) = -2 \sin^2(\pi x) \sin(\pi y) \cos(\pi y) g(t) \tag{3.3}$$

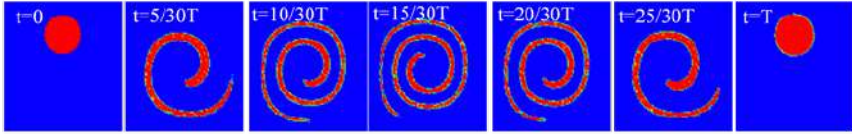
$$v(x, y) = 2 \sin^2(\pi x) \sin(\pi y) \cos(\pi y) g(t) \quad 3.4$$

Di mana $g(t)$ sama dengan $\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)$, dan bidang aliran dimodulasi dalam waktu dalam satu periode $T=10$. Dimensi kisi yang digunakan yakni 100×100 pada domain kisi sel. Pada periode $T=10$, medan kecepatan pada kondisi terputar kembali. Sehingga, bidang kecepatan meregangkan lingkaran menjadi struktur filamen.

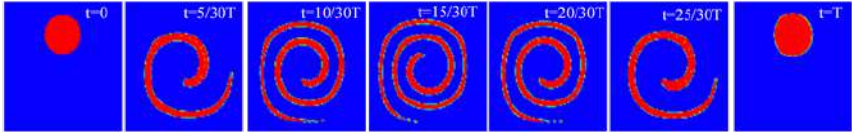
Gambar 3.3, 3.4, dan 3.5 menunjukkan perbandingan antara solusi CIP dan solusi metode numerik, yang telah dikembangkan. Untuk menangkap dan menelusuri antarmuka (*interface capturing and tracking*) dengan fungsi kepadatan (*density function*), sejumlah 1173 partikel yang telah digunakan dari solusi metode numerik yang telah dikembangkan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.4 dan 2565 partikel ditunjukkan pada Gambar 3.5. Berdasarkan pada gambar-gambar tersebut, solusi metode numerik memulihkan filamen yang tipis dengan sangat baik sampai ekor filamen sebagaimana kurang terselesaikan dengan baik menggunakan metode lain. Selain itu, kemampuan metode numerik yang telah dikembangkan dalam pemodelan antarmuka (*interface model*) yang mengalami peregangan secara substansial memperlihatkan hasil yang cukup baik. Peran partikel dalam membantu untuk memelihara antarmuka (*interface*) dapat dilihat pada hasil-hasil tersebut.



Gambar 3.3 Solusi dari metode CIP



Gambar 3.4 Solusi metode numerik dengan 4 partikel dalam satu sel pada permukaan



Gambar 3.5 Solusi metode numerik dengan 16 partikel dalam satu sel pada permukaan

3.3. Tiga Dimensi (3D) Bidang Deformasi

Pada bagian ini, kemampuan metode numerik yang telah dikembangkan didemonstrasikan untuk menangkap deformasi tiga dimensi (3D deformation). LeVeque [93] telah mengusulkan bidang kecepatan yang menggabungkan deformasi pada bidang x - y dengan deformasi pada bidang x - z di mana persamaan bidang deformasi tiga dimensi diberikan sebagai berikut:

$$u(x, y, z) = 2 \sin^2(\pi x) \sin(2\pi y) \sin(2\pi z) g(t) \quad 3.5$$

$$v(x, y, z) = -\sin(2\pi x) \sin^2(\pi y) \sin(2\pi z) g(t) \quad 3.6$$

$$w(x, y, z) = -\sin(2\pi x) \sin(2\pi y) \sin^2(\pi z) g(t) \quad 3.7$$

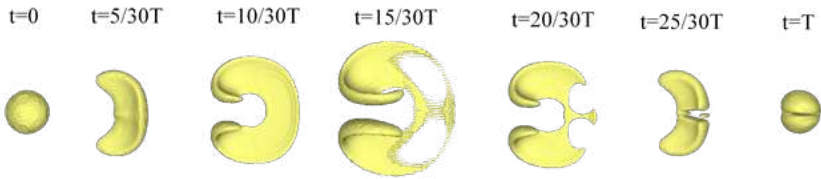
Di mana $g(t)$ sama dengan $\cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)$, dan bidang aliran dimodulasi dalam waktu dalam satu periode $T=3$. Sebuah bola dengan radius

0.15 ditempatkan di dalam domain komputasi pada koordinat (0.35, 0.35, 0.35) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.7 dan 3.8. Dimensi kisi yang digunakan yakni $100 \times 100 \times 100$ pada domain kisi sel. Pada waktu $T=3$, bidang kecepatan pada kondisi terputar kembali. Selain bentuk bola, juga bentuk lain telah disimulasi antara lain bentuk kelinci dan kuda dengan menggunakan metode numerik yang telah dikembangkan. Solusi metode numerik kemudian dibandingkan dengan solusi metode CIP.

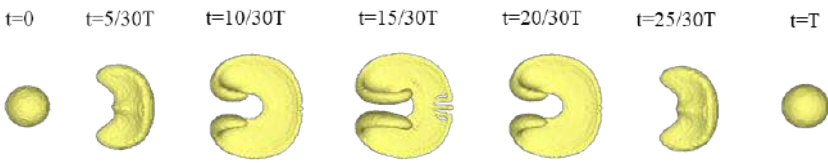
Gambar 3.6, 3.7 dan 3.8 berturut-turut menunjukkan solusi metode CIP dan metode numerik yang telah dikembangkan. Untuk metode numerik, jumlah partikel yang digunakan sebanyak 45123 sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.7, dan 261955 sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.8. Meskipun antarmuka (*interface*) menghilang di bagian tertentu yang tidak terselesaikan dengan bagus, namun bagian tersebut sangat kecil dan secara keseluruhan mampu kembali dengan baik ke bentuk awal. Dengan penambahan jumlah partikel, permukaan akhir bola setelah berevolusi selama satu periode telah ditangkap dan ditelusuri dengan sangat sempurna ke kondisi bentuk awal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.8. Hal ini menandakan bahwa metode numerik yang telah dikembangkan dapat mengatasi lapisan permukaan tipis mengalami peregangan secara maksimum.

Gambar 3.9 sampai dengan 3.12 menunjukkan verifikasi metode numerik yang telah dikembangkan untuk menggambarkan bentuk atau geometri yang kompleks seperti bentuk kelinci dan kuda. Bentuk ini juga telah disimulasikan sebelumnya [94]. Jumlah partikel yang telah digunakan sebanyak 35947 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.10, dan sebanyak 63128 partikel sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.12. Untuk kasus-kasus ini, bidang deformasi tiga dimensi disamakan dengan kondisi pada kasus bentuk bola. Berdasarkan pada

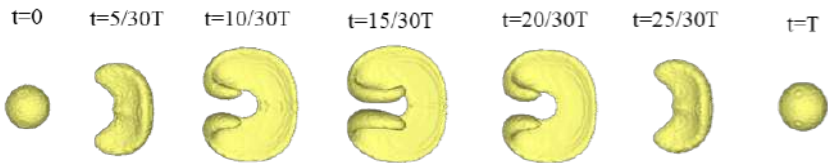
Gambar 3.6, 3.9, dan 3.11, solusi metode CIP tidak dapat menangkap secara detail bentuk atau geometri bola, kelinci, dan kuda. Di sisi lain, solusi metode numerik dapat menyelesaikan geometri dengan baik walaupun kehilangan volume dengan jumlah yang sangat sedikit pada bola, kelinci, dan kuda sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.7, 3.8, 3.10, dan 3.12.



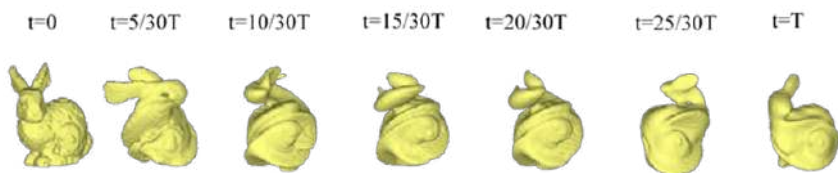
Gambar 3.6 Solusi metode CIP pada bentuk bola



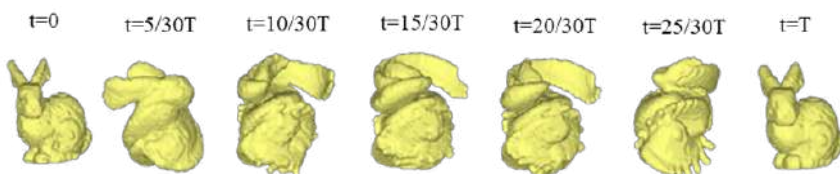
Gambar 3.7 Solusi metode numerik untuk bentuk bola dengan jumlah 8 partikel dalam satu sel di permukaan



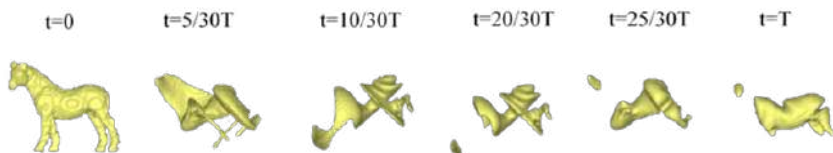
Gambar 3.8 Solusi metode numerik untuk bentuk bola dengan jumlah 64 partikel dalam satu sel di permukaan



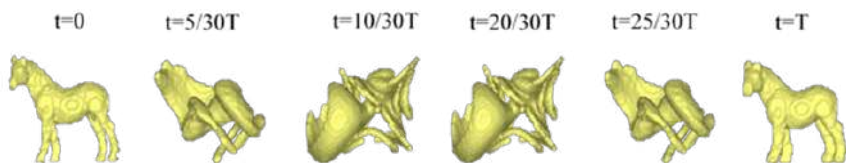
Gambar 3.9 Solusi metode CIP untuk bentuk kelinci



Gambar 3.10 Solusi metode numerik untuk bentuk kelinci dengan jumlah 8 partikel



Gambar 3.11 Solusi metode CIP untuk bentuk kuda



Gambar 3.12 Solusi metode numerik untuk bentuk kuda dengan jumlah 8 partikel

#4

Metode Eksperimen

Metode numerik yang telah dijelaskan secara rinci di Bab 2 digunakan untuk studi hidrodinamika kapal dan hidroelastisitas kapal. Oleh karena itu, solusi-solusi dari hasil numerik yang akan diperoleh harus divalidasi dengan hasil-hasil eksperimen.

Pada bab ini, beberapa pelaksanaan pengujian (eksperimen) dijelaskan secara lebih detail antara lain tahanan kapal (*ship resistance*) di air tenang, gerak kapal (*ship motions*) di gelombang, distribusi tekanan hidrodinamika (*impact pressure distribution*) pada lambung kapal melalui *water entry test*, dan distribusi tekanan pada lambung kapal melalui pengujian benda jatuh di permukaan air (*dropping test*). Pengujian tahanan di air tenang di-

lakukan di tangki saluran sirkulasi air (*circulating water channel tank*). Gerak kapal di gelombang dilaksanakan di kolam tarik (*towing tank*). Sementara distribusi tekanan hidrodinamika pada bangunan apung, pengujian benda apung masuk ke dalam air (*water entry test*) untuk benda elastis berbentuk silinder (*elastic cylinder model*) dan persegi panjang yang elastis (*elastic rectangular model*) dilakukan di tangki gelombang yang berukuran kecil (*small wave tank*). Selanjutnya, untuk pengujian model kapal yang dijatuhkan ke permukaan air (*dropping test*), skema pengujian didesain dan dilaksanakan di tangki gelombang yang berukuran sedang (*medium size of wave tank*). Pada pengujian ini, untuk mempertimbangkan gerak elastis (*elastic motion*) dari sebuah model kapal, badan dari model kapal dibagi dalam empat bagian dan setiap bagian badan model disambung menggunakan plat strip dari metal sebagai konstruksi penghubung (*backbone attachment*) antara bagian model kapal tersebut.

4.1. Pengujian Tahanan Kapal di Air Tenang

Pengujian tahanan kapal (*ship resistance test*) di air tenang pada sebuah model kapal tanpa alat penggerak (*propeller*) dilakukan di tangki saluran sirkulasi air (*circulating water channel tank*) milik Hiroshima University. Tujuan pengujian ini yakni untuk mengukur besaran tahanan kapal dan untuk memvisualisasikan profil gelombang (*wave profile*) di sepanjang model kapal. Hasil-hasil pengujian model yang diperoleh kemudian digunakan untuk memvalidasi hasil-hasil numerik yang telah dikembangkan. Model kapal, desain pengujian, pengaturan peralatan pengujian (*experimental set-up*), dan pelaksanaan pengujian akan dijelaskan pada bagian berikut di bawah ini.

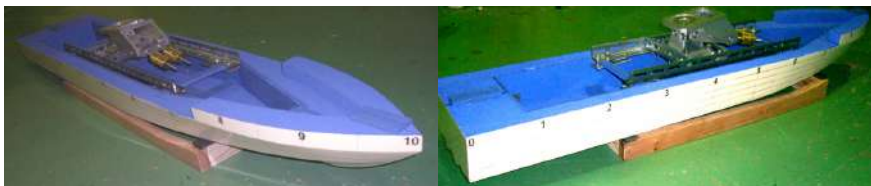
4.1.1. Model Kapal

Sebuah model kapal sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.1 merupakan tipe kapal feri penumpang cepat (*high-speed passenger*

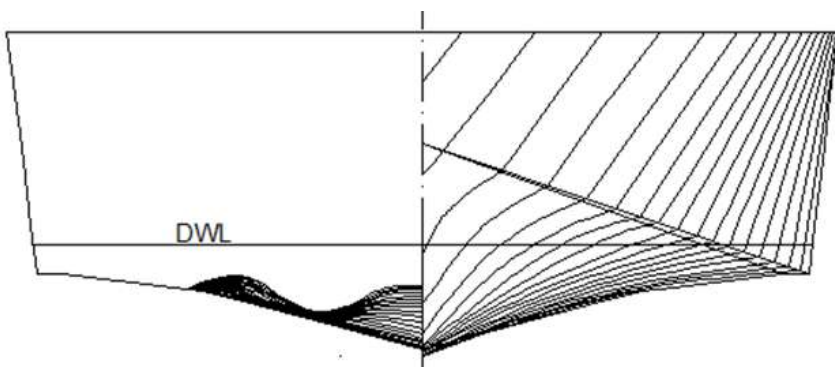
ferry). Ukuran model kapal tersebut telah diskalakan dan disesuaikan dengan dimensi tangki saluran sirkulasi air (*circulating water channel tank*). Model kapal tersebut telah dibuat dari kombinasi material kayu dan busa uretan (*urethane*). Rencana garis lambung kapal (*body lines plan*) telah ditunjukkan pada Gambar 4.2. Ukuran utama kapal (*ship main dimensions*) dan model kapal telah disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Ukuran utama kapal dan model kapal feri penumpang cepat

Deskripsi Ukuran Utama	Kapal	Model Kapal
Panjang keseluruhan/Loa (meter)	45	1.5
Lebar/B (meter)	9.6	0.3
Tinggi/H (meter)	3.5	0.116
Sarat/T (meter)	1.2	0.04



Gambar 4.1 Model kapal feri penumpang cepat



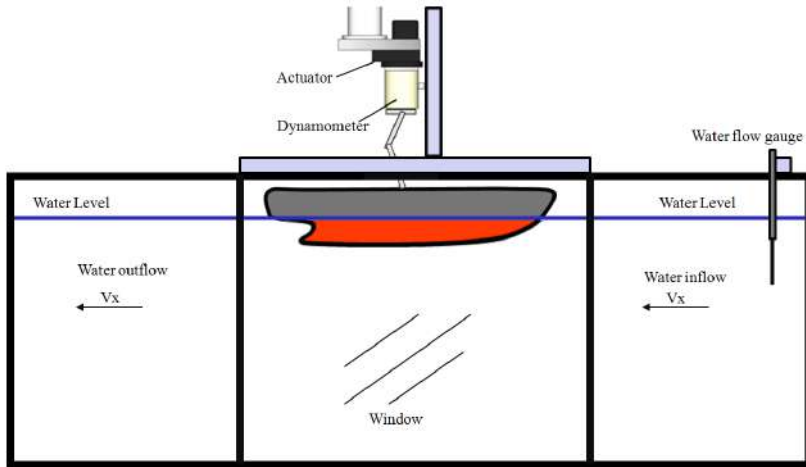
Gambar 4.2 Rencana garis lambung kapal feri penumpang cepat

4.1.2. Pengaturan Peralatan Pengujian (*Experimental Set-up*)

Pengujian tahanan kapal di air tenang dengan menggunakan model kapal feri penumpang cepat dilaksanakan di tangki saluran sirkulasi air (*circulating water channel tank*). Pada pengujian model di tangki tersebut, model dalam keadaan tidak bergerak dan kemudian air dialirkan satu arah berlawanan dengan arah model kapal dengan kecepatan air tertentu. Posisi model kapal dan sarat kapal (T) dalam keadaan tetap, namun, model kapal dalam keadaan bebas bergerak di tempat yang memungkinkan model kapal mengalami kondisi miring memanjang (*trim condition*) dan miring melintang (*heeling/rolling condition*). Pada model kapal, peralatan pengukur tahanan kapal (*resistance actuator* dan *dynamometer*) dipasang di atas model kapal dan terhubung dengan perangkat komputer. Monitor data (*PLC data logging*) yang telah terpasang digunakan untuk menginput kecepatan air yang mengalir ke dalam tangki dan kecepatan air juga diukur secara tersendiri menggunakan alat ukur (*water flow gauge*). Ukuran tangki saluran sirkulasi air (*circulating water channel tank*) milik Hiroshima University yakni panjang 9.7 meter, lebar 1.4 meter, tinggi 3.8 meter, dan kecepatan maksimum 1.2 m/sec. Area pengukuran yakni panjang 4 meter, lebar 1.4 meter, dan kedalaman air (*water depth*) 0.9 meter. Adapun, desain pengujian (eksperimen) dan pengukuran ditampilkan pada Gambar 4.3.

4.2. Pengujian Gerak Kapal di Gelombang

Pengujian gerak kapal (*ship motion test*) di gelombang dilaksanakan di kolam tarik (*towing tank*) milik Hiroshima University. Pada pengujian ini, gerak kapal yang diukur yakni gerak translasi secara vertikal (*heaving motion*) dan gerak rotasi secara memanjang (*pitching motion*).



Gambar 4.3 Desain pengujian dan pengukuran tahanan kapal di tangki saluran sirkulasi air

4.2.1. Model Kapal

Model kapal yang digunakan pada pengujian ini yakni tipe kapal ikan (*fishing boat*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4. Ukuran utama kapal dan model kapal disajikan pada Tabel 4.2. Ukuran model ini telah diskalakan dan disesuaikan dengan dimensi kolam tarik (*towing tank*). Model kapal telah dibuat dari kombinasi material kayu dan busa uretan (*urethane*).

Tabel 4.2 Ukuran utama kapal dan model kapal ikan

Deskripsi Ukuran Utama	Kapal	Model Kapal
Panjang keseluruhan/Loa (meter)	26.60	1.928
Panjang antara garis tegak/Lpp (meter)	20.75	1.50
Panjang garis air/Lwl (meter)	22.20	1.605
Lebar/B (meter)	4.10	0.296
Sarat/T (meter)	1.70	0.123
Koefisien bentuk/Cb		0.921
Angka Froude/Fn		0.384
Angka Reynold/Re		2.8x10 ⁶



Gambar 4.4 Model kapal ikan

4.2.2. Pengaturan Peralatan Pengujian (*Experimental Set-up*)

Model kapal ditarik di kolam tarik (*towing tank*) menggunakan kereta penarik (*towing carriage*) dan kemudian pengukuran gerak kapal dan gaya-gaya hidrodinamika dapat dilakukan. Kereta penarik berjalan pada dua rel yang berada di kedua sisi tangki penarik di mana kereta penarik ini terhubung ke komputer dan perangkat lain agar dapat dikendalikan. Gambar 4.5 memperlihatkan kolam tarik (*towing tank*) milik Hiroshima University. Kolam tarik terdiri dari dua kolam yakni kolam utama dengan ukuran (panjang \times lebar \times kedalaman air) 80 meter \times 8 meter \times 3.5 meter + 20 meter \times 10 meter \times 3.5 meter, dan kolam pendukung (*trimming tank*) dengan ukuran 3 meter \times 3 meter \times 1 meter + 3 meter \times 1 meter \times 1 meter. Kolam tarik ini juga dilengkapi dengan peralatan pembangkit gelombang (*wave*

maker). Kereta penarik (*towing carriage*) memiliki spesifikasi dengan ukuran (panjang × lebar) yakni 8.061 meter × 9.0 meter, berat 20 ton, kecepatan maksimum 3 meter/detik, akselerasi $\pm 0.01G$ sampai dengan ± 0.08 (dapat diatur), dan motor penggerak 15kW sejumlah 4 unit.

Prosedur pengujian gerak kapal disusun secara ringkas sebagai berikut:

1. Persiapan model kapal.
2. Pengukuran berat model kapal.
3. Pengukuran awal radius rotasi (*gyration radius*) dan momen inersia dengan menggunakan peralatan (*inertia moment apparatus*).
4. Persiapan perangkat komputer dan peralatan pendukung lainnya.
5. Kalibrasi gelombang (*wave calibration*).
6. Pengaturan dan peletakan model kapal pada tinggi yang sama antara air dan sarat model kapal. Pemberat (*adjustable weight tool*) dapat digunakan dan posisi pemberat kemudian diukur dari jarak titik pusat gravitasi (*centre gravity point*) model kapal.
7. Menghubungkan model kapal dengan *load cell* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.6.
8. Kalibrasi gerak kapal (*motion calibration*).
9. Pelaksanaan pengujian gerak kapal. Model kapal diuji dengan berbagai kondisi gelombang sebagaimana disajikan pada Tabel 4.3. Panjang gelombang (λ) pada kondisi eksperimen dapat dibuat dalam ratio panjang gelombang terhadap panjang garis air sebuah model kapal untuk mengkarakteristikkan perilaku gerak kapal di atas gelombang. Rasio tersebut dalam bentuk tak berdimensi.



Gambar 4.5 Kolam tarik (*towing tank*) milik Hiroshima University



Gambar 4.6 *Load cell* terhubung ke model kapal

Tabel 4.3 Kondisi gelombang (*wave conditions*)

λ /Lwl	Panjang Gelombang (meter)	
	Kondisi aktual	Kondisi eksperimen
0.5	10.375	0.75
0.72	14.94	1.08
0.94	19.505	1.41
1.3	26.975	1.95
1.76	36.520	2.64
2.25	46.688	3.375
2.66	55.195	3.99
3.37	69.928	5.055

4.3. Pengujian *Water Entry*

4.3.1. Model Elastis Berbentuk Silinder

Pada bagian ini, pengujian *water entry* pada model elastis berbentuk silinder dilaksanakan dengan tujuan untuk menginvestigasi distribusi tekanan air dan respon struktur yang dialami oleh model elastis berbentuk silinder tersebut. Kemudian, hasil-hasil yang diperoleh pada pengujian ini akan digunakan untuk memvalidasi hasil-hasil numerik. Pelaksanaan pengujian dilakukan di tangki gelombang berukuran kecil (*small wave tank*) milik Hiroshima University.

a. Model Fisik

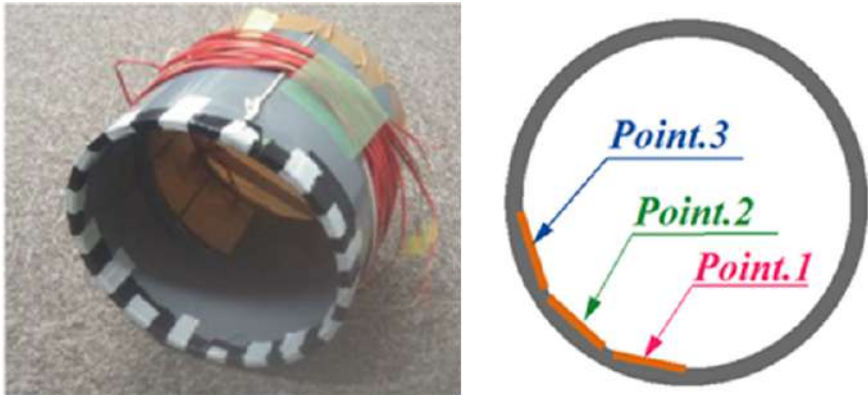
Sebuah model fisik yang elastis berbentuk silinder yang digunakan pada pengujian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.7. Pada bagian dalam model dipasang sensor (*piezoelectric*) yang dikombinasi dengan bahan PVDF (*polyvinylidene difluoride*) yang memiliki kemampuan piezoelektrisitas dan pyroelektrisitas. Sensor yang terhubung dengan komputer digunakan untuk mengukur dan memperoleh

regangan (*strain*) yang terjadi pada model di mana diwakili pada tiga titik pengukuran sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.7. Ukuran diameter model yakni 15 cm, panjang model yakni 13.5 cm, dan tebal model yakni 1.5 cm. Selain itu, modulus Young model yakni 3400 MPa, rasio Poisson sebesar 0.38, dan kepadatan (*density*) sebesar 1700 kg/m³.

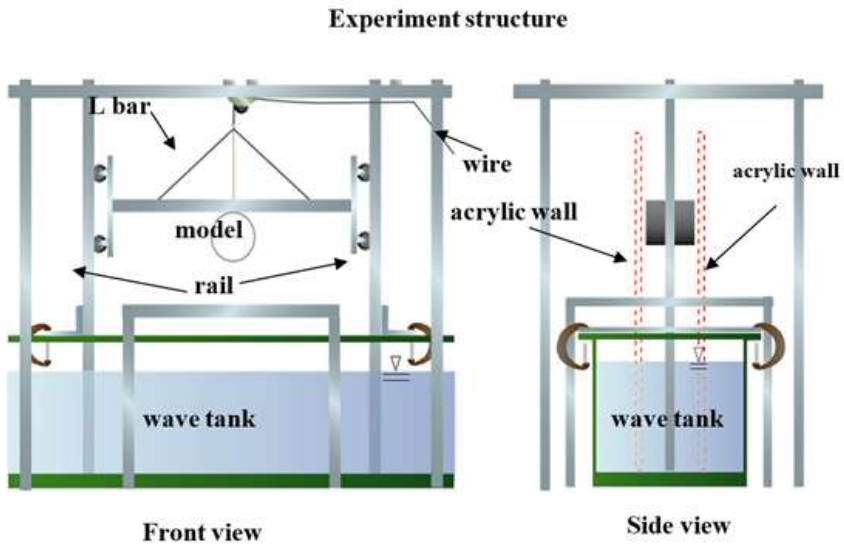
b. Pengaturan Eksperimen (*Experimental set-up*)

Gambar 4.8 menunjukkan desain struktur pengujian yang didasari pada teori jatuh bebas (*free fall theory*) di mana posisi dan gerakan model ditahan menggunakan dua buah kereta (*guide rails*) dan profil L bar yang dipasang di dua sisi pada struktur pengujian. Peralatan pendukung ini digunakan untuk mendapatkan data pengujian yang akurat dan presisi. Profil L bar dan kereta ditahan oleh sebuah tali kawat berbahan *stainless* sebelum profil L bar dan kereta dilepas dan dijatuhkan secara bebas. Setelah pengaturan awal pengujian dilakukan, tali kawat dilepaskan dan kemudian model akan jatuh bebas hingga pada permukaan air. Untuk terhindar dari gangguan saat model berinteraksi dengan air dikarenakan interaksi yang sangat kuat, dinding berbahan akrilik dipasang di dua sisi sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.8. Pada pengujian ini, kecepatan jatuh relatif sebuah model sebesar 2.8 m/s.

Sebuah kamera berkecepatan tinggi (*high-speed camera*) digunakan untuk memvisualkan gerakan model dan aliran permukaan air dengan percikan air (*water splashing*). Kecepatan kamera yang digunakan sebesar 1000 fps (*frames per second*). Hasil tangkapan kamera akan digunakan untuk menganalisis aliran permukaan air dengan percikan air menggunakan teknik-teknik velosimetri gambar partikel (*particle image velocimetry/PIV*) dan velosimetri pelacakan partikel (*particle tracking velocimetry/PTV*).



Gambar 4.7 Model elastis berbentuk silinder dan titik pengukuran regangan (*strain*) pada bagian model



Gambar 4.8 Desain struktur pengujian dan peralatan pendukung

4.3.2. Model Elastis Berbentuk Persegi Panjang

Pengujian *water entry* pada model elastis berbentuk persegi panjang dilaksanakan dengan tujuan untuk menginvestigasi distribusi tekanan air dan respon struktur yang dialami oleh model elastis berbentuk persegi panjang. Kemudian, hasil-hasil yang diperoleh

pada pengujian ini akan digunakan untuk memvalidasi hasil-hasil numerik. Pada pengujian ini, struktur pengujian, peralatan pengukuran, dan prosedur pengujian sama dengan pengujian model elastis berbentuk silinder sebagaimana dijelaskan pada sub-bab sebelumnya.

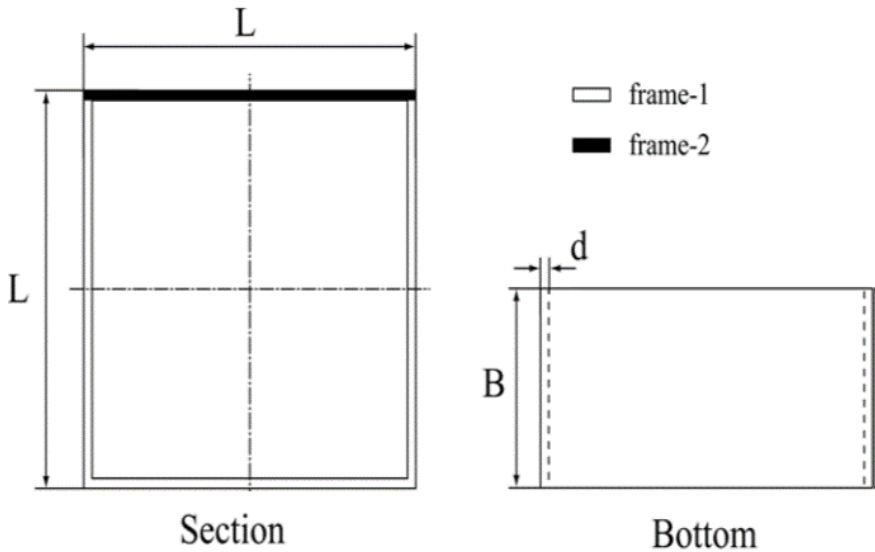
a. Model Fisik

Pada pengujian ini, skema bentuk dan dimensi model elastis disajikan pada Gambar 4.9. Selanjutnya, Gambar 4.10 menunjukkan sejumlah empat model elastis berbentuk persegi panjang yang digunakan dalam pengujian. Model memiliki penampang persegi panjang di mana Model 1 merupakan model berbahan aluminium dengan kekakuan tinggi, Model 2 adalah model akrilik yang hanya memiliki kekakuan tinggi pada permukaan atas dengan rangka aluminium, Model 3 adalah model akrilik dengan kekakuan rendah, dan Model 4 adalah model dengan kekakuan rendah yang menggunakan karet dengan akrilik di bingkai atas. Adapun ukuran masing-masing model yang digunakan disajikan pada Tabel 4.4. Persamaan 4.1 digunakan untuk mempertimbangkan aturan kesamaan kekakuan (*similarity rules of stiffness*). Kondisi kekakuan rendah pada Model 1 mirip dengan kondisi kekakuan baja dengan panjang sisi 16 cm. Kemudian model dengan kekakuan tinggi Model 1 dipertimbangkan lebih tinggi dari kondisi tersebut. Dimana E adalah modulus elastisitas, I adalah momen inersia, α adalah skala rasio, m adalah model, dan s menunjukkan nilai aktual.

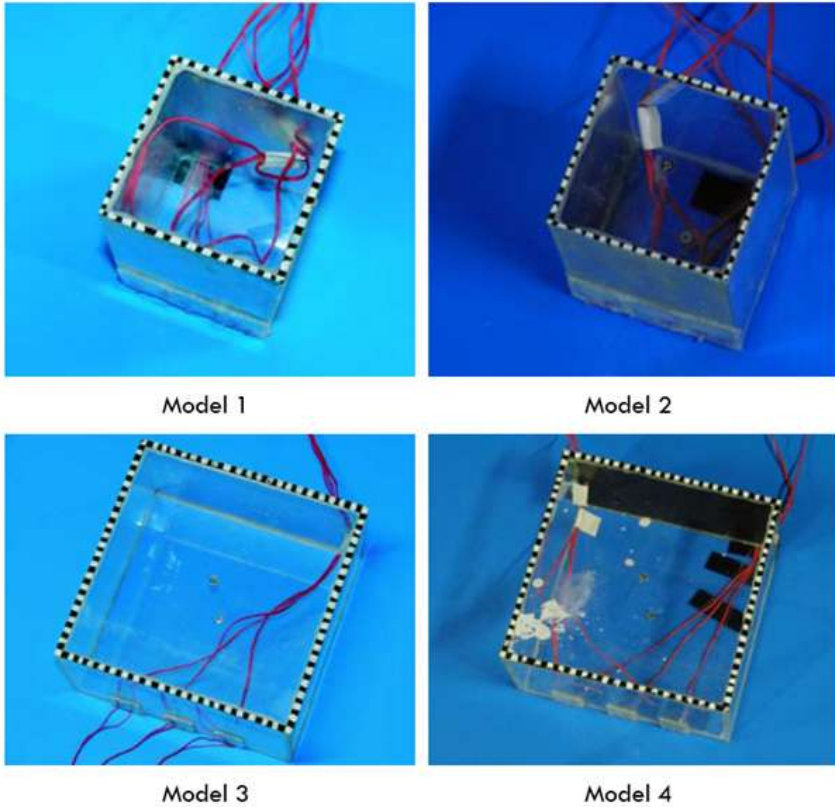
$$E_m I_m = \alpha^5 E_s I_s \quad 4.1$$

Tabel 4.4 Spesifikasi model elastis

Deskripsi	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Bahan bingkai 1	aluminium	aluminium	akrilik	akrilik
Bahan bingkai 2	aluminium	akrilik	akrilik	karet
Panjang sisi/L (mm)	80	80	200	200
Tebal/d (mm)	2	2	5	5
Tinggi/B (mm)	100	100	100	100
Berat (kg)	0.189	0.159	0.518	0.559
Modulus elastisitas bingkai 1 (GPa)	69	3.14	69	3.14
Ratio Poisson bingkai 1	0.345	0.35	0.345	0.35
Kepadatan (density) (kg/m ³)	3029	2548	1328	1433



Gambar 4.9 Ukuran dan bentuk model elastis

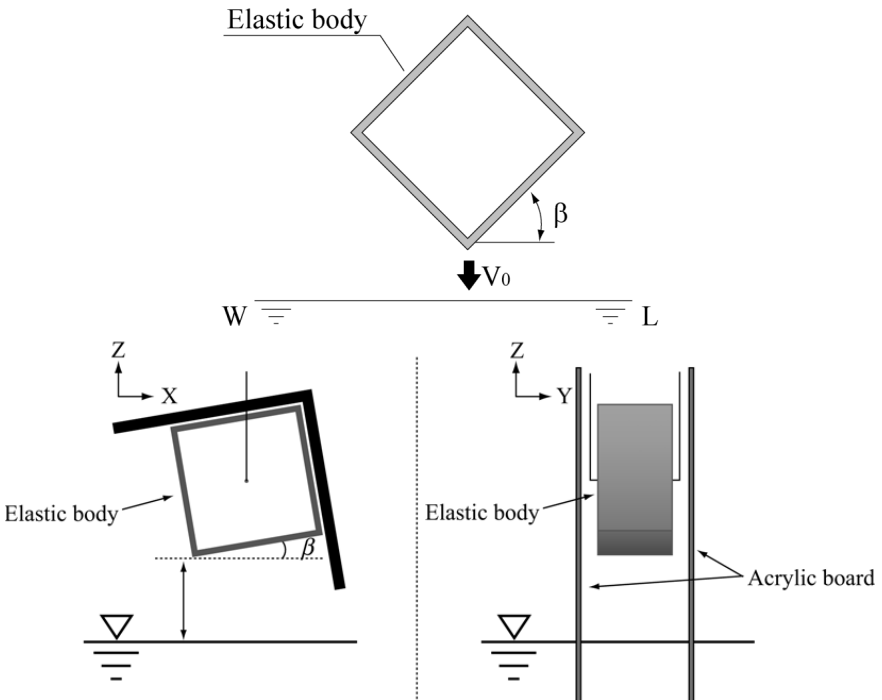


Gambar 4.10 Model elastis berbentuk persegi panjang

b. Pengaturan Eksperimen (*Experimental set-up*)

Pengujian didesain berdasarkan pada teori jatuh bebas (*free fall theory*) sebagaimana ditunjukkan dalam skema pada Gambar 4.11. Model elastis pada kondisi awal ditopang oleh struktur rangka berkaki empat. Tekanan, tegangan, dan regangan diukur dengan menggunakan sensor *piezoelectric* yang terletak di bagian bawah rangka model elastis dan dihubungkan ke perangkat komputer. Dari Gambar 4.12, penempatan sensor dipertimbangkan dan ditentukan berdasarkan pengaruh perbedaan penempatan sehubungan dengan aliran permukaan bebas. Tujuannya adalah untuk menangkap dan kemudian mengana-

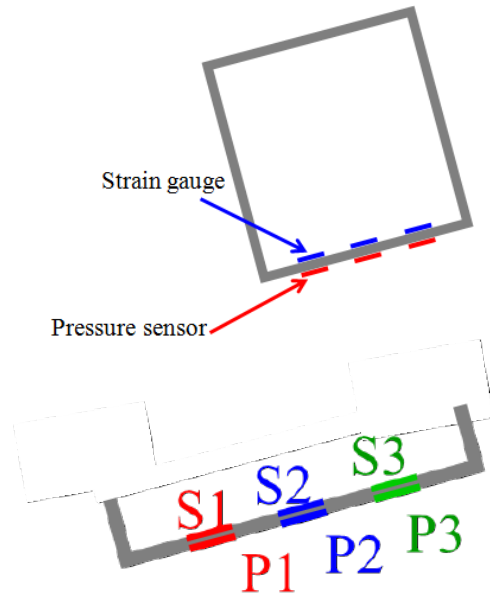
lisis aliran dan tendensi permukaan bebas, tekanan impact air, respons struktur sepanjang kerangka bawah dari benda elastis pada setiap waktu. Tiga lokasi penempatan sensor ditetapkan di bagian bawah P1 dan S1, di tengah P2 dan S2, dan di atas P3 dan S3.



Gambar 4.11 Skema pengujian berdasarkan teori jatuh bebas (*free fall theory*), V_0 : kecepatan; β : Deadrise angle

Sensor S1, S2, dan S3 merupakan posisi pengukuran regangan, sementara P1, P2, dan P3 menunjukkan posisi sensor untuk pengukuran tekanan air. Juga pada pengujian ini, sebuah kamera berkecepatan tinggi (*high-speed camera*) digunakan untuk memvisualkan gerakan model dan aliran permukaan air dengan percikan air (*water splashing*). Kecepatan kamera yang digunakan sebesar 1000 fps (*frames per second*). Hasil tangkapan kamera akan digunakan untuk menganalisis aliran

permukaan air dengan percikan air menggunakan teknik-teknik velosimetri gambar partikel (*particle image velocimetry/PIV*) dan velosimetri pelacakan partikel (*particle tracking velocimetry/PTV*).



Gambar 4.12 Penempatan dan posisi sensor *strain* (S1, S2, S3) dan *pressure* (P1, P2, P3)

4.4. Pengujian Jatuh Bebas (*Dropping Test*) Model Kapal Elastis

Ketika sebuah kapal bergerak di gelombang dengan *amplitude* gerak translasi secara vertikal (*heave motion*) dan gerak rotasi secara memanjang (*pitch motion*) yang besar, dasar kapal (*ship bottom*) tersebut akan mengalami gerakan keluar masuk ke dalam air. Hal ini menandakan bagian haluan kapal (*ship bow*) dan bagian bawah kapal (*ship bottom*) akan mengalami peristiwa bantingan (*slamming*). Oleh karena itu, melalui pengujian ini, asumsi sederhana dibuat dengan penjelasan bahwa tekanan benturan air (*water impact pressure*), respon regangan

(*strain response*), dan respons tegangan (*stress response*) yang dihasilkan oleh peristiwa bantingan (*slamming*) dapat diukur dengan melakukan uji jatuh sebuah benda elastis. Dengan asumsi tersebut pula, pengujian jatuh model kapal kaku dan elastis dilaksanakan di tangki gelombang milik Universitas Hiroshima dengan tujuan utamanya adalah untuk menginterpretasi hubungan antara gerakan elastis (*elastic motion*) dan tekanan impact (*impact pressure*) akibat peristiwa bantingan (*slamming*).

a. Model Kapal

Model kapal yang dibuat yakni kapal dengan tipe kapal feri penumpang cepat sebagaimana diperlihatkan pada 3.16. Ukuran utama kapal dan model kapal disajikan pada Tabel 4.1 di mana model kapal yang digunakan sama dengan model kapal yang digunakan pada pengujian tahanan kapal di air tenang. Model kapal ini dibuat dari kombinasi material kayu dan busa uretan (*urethane*). Untuk pertimbangan gerak elastis (*elastic motion*), lambung model kapal dipotong menjadi empat bagian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.13. Hal ini juga dimaksudkan untuk membuat model kapal dengan sifat lambung yang elastis (*elastic ship model*). Potongan model kapal terdiri dari potongan lambung haluan (*ship bow hull*), lambung tengah (*ship midship hull*), dan lambung buritan (*ship stern hull*).

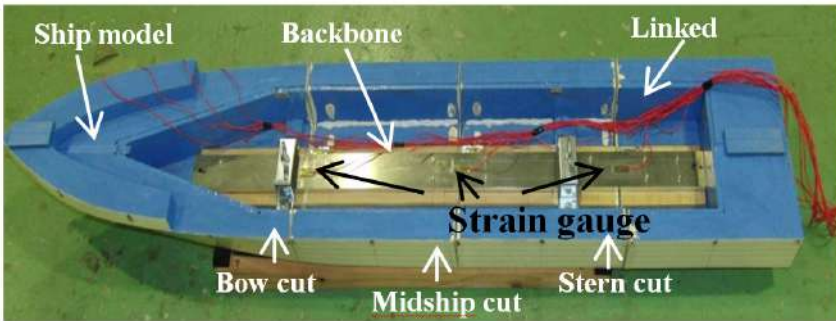
Bagian lambung model yang terpisah disambung menjadi satu kesatuan lambung model kapal menggunakan plat strip dari metal sebagai konstruksi penghubung (*backbone attachment*) antara bagian model kapal. Kekakuan lentur EI konstruksi penghubung sebesar 351 N/m^2 dan kepadatan sebesar 243 kg/m^3 . Sementara, untuk membandingkan gerak elastis dan deformasi antara model kapal yang kaku dan model kapal yang elastis, model kapal yang kaku dimaksudkan sebagai model kapal yang tidak terdiri dari bagian-bagian lambung yang tersambung.

b. Pengaturan Eksperimen (*Experimental set-up*)

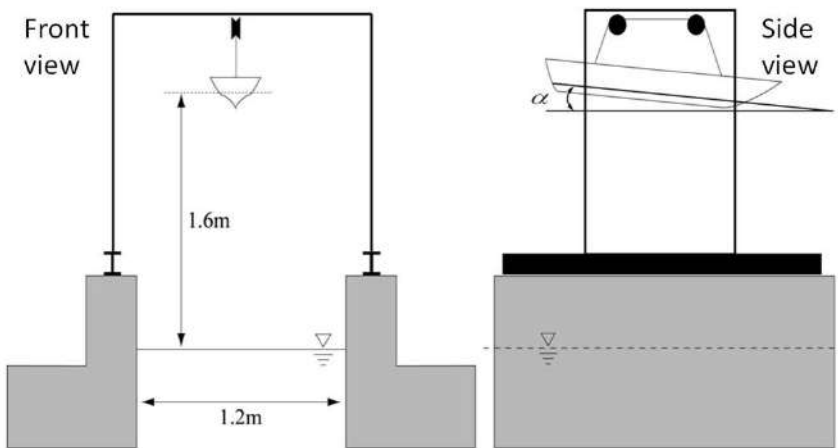
Pengujian didesain berdasarkan pada teori jatuh bebas (*free fall theory*) sebagaimana skema pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15. Kecepatan jatuh model kapal dijaga dalam keadaan tetap (konstan). Pada Gambar 4.16, sensor-sensor tekanan (*pressure sensors*) diletakkan di bagian bawah model kapal (*ship model bottom*) yakni P1, P2, P3, P4, P5, P6 dan P7, di mana sensor yang digunakan yakni piezoelectric untuk mengukur tekanan pada frekuensi tinggi dan fluktuasi waktu yang singkat. Sementara, sensor regangan (*strain pressure*) yang kedap air yakni S1, S2 dan S3 diletakkan di plat strip (*backbone attachment*). Selain sensor regangan (*strain sensor*) diletakkan di plat strip (*backbone attachment*), sensor regangan juga dipasang dan diletakkan di permukaan lambung dalam pada model kapal yakni S1_local, S2_local, dan S3_local sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.16. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan regangan lokal (*local strain*) pada setiap potongan haluan (*ship bow hull*), lambung tengah (*ship mid-ship hull*), dan lambung buritan (*ship stern hull*) yang tidak berhubungan dengan respon keseluruhan (*global response*) pada lambung kapal seperti *phenomena whipping*. Data regangan lokal yang didapatkan akan diinterpretasi dengan data regangan pada S1, S2 dan S3.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.15, model kapal, struktur pengujian, dan peralatan yang digunakan untuk pelaksanaan pengujian. Struktur pengujian (*dropping tower structure*) didukung oleh struktur rangka terdiri dari empat kaki. Pada pengujian, sudut *deadrise* β (*deadrise angle*) model kapal didefinisikan sebagai sudut tumbukan antara permukaan air dan kapal pada kondisi miring (*inclined condition*) sebelum lambung kapal masuk ke dalam air. Sudut kemiringan (*inclined angle*) haluan model kapal yang diinginkan diatur dan dijaga dengan tali kawat sebelum dijatuhkan. Setelah penyetulan awal, tali kawat dipotong dan model kapal dengan bebas jatuh menyentuh permukaan

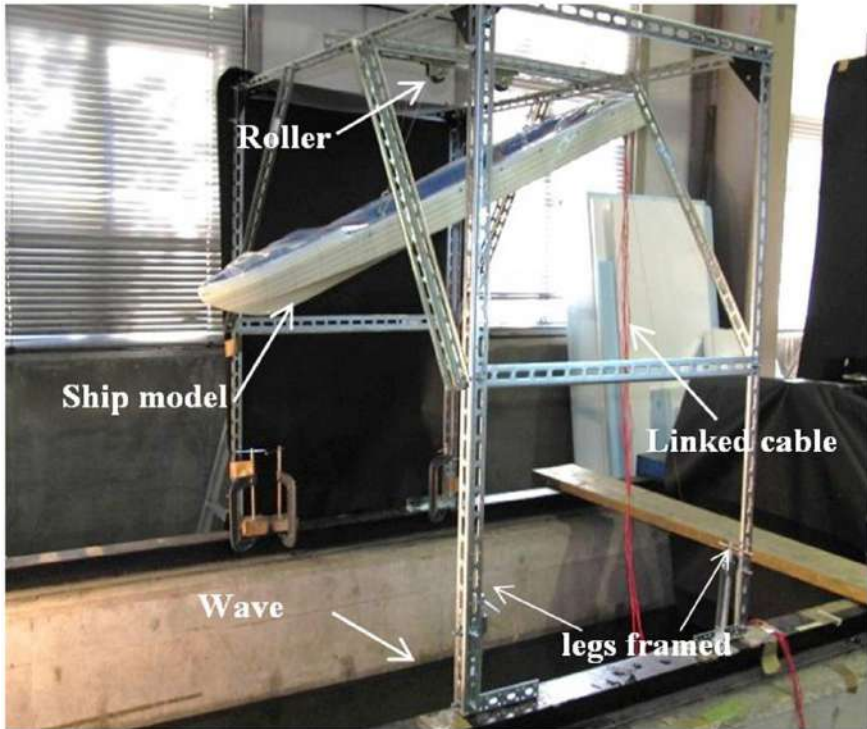
air dan masuk ke dalam air. Pada pengujian ini pula, sebuah kamera berkecepatan tinggi (*high-speed camera*) digunakan untuk memvisualkan gerakan model kapal selama proses jatuh bebas dan sudut *deadrise* β divisualkan secara ketat. Kecepatan kamera yang digunakan sebesar 1000 fps (*frames per second*).



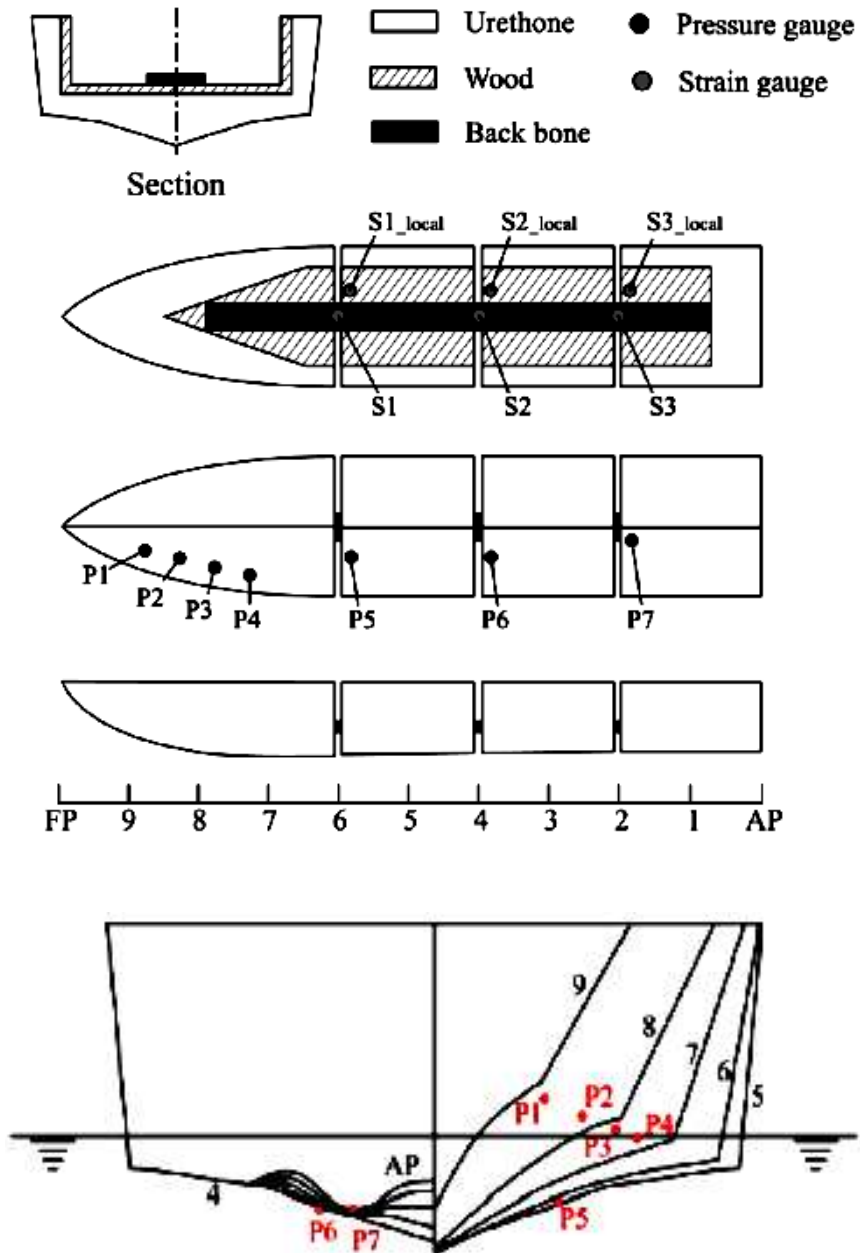
Gambar 4.13 Model kapal feri penumpang cepat dan alat pengukuran yang terpasang



Gambar 4.14 Skema pengujian jatuh bebas model kapal berdasarkan teori jatuh bebas (*free fall theory*)



Gambar 4.15 Struktur dan peralatan pengujian (*dropping test*)



Gambar 4.16 Penempatan dan lokasi sensor tekanan dan regangan

#5

Aplikasi Pada Tahanan Kapal di Air Tenang

Pada bab ini, tahanan kapal di air tenang diprediksi menggunakan metode numerik dan melalui eksperimen. Solusi numerik diperoleh dari penggunaan metode numerik yang dikembangkan yakni skema Euler partikel Lagrange dari penggabungan metode SPH dan metode CIP sebagaimana telah dijelaskan secara rinci pada Bab 2. Kemudian, metode numerik yang dikembangkan ini akan diaplikasikan pada kasus prediksi tahanan kapal di air tenang di mana hasil komputasi (numerik) ini akan dikomparasi dan divalidasi dengan hasil eksperimen. Eksperimen tahanan kapal di air tenang dilakukan di tangki saluran sirkulasi air (*circulating water channel tank*) di mana prosedur eksperimen telah dijelaskan lebih rinci pada Bab 4.

Metode numerik yang dikembangkan akan diaplikasi pada prediksi tahanan kapal tanker, kapal perikanan, dan kapal feri berkecepatan tinggi. Kondisi komputasi untuk masing-masing aplikasi akan dijelaskan pada bab ini. Kemudian, perbandingan tahanan kapal antara hasil numerik dan hasil eksperimen juga akan dibahas secara rinci.

Selain itu, kesalahan volume pada fase air dikontrol untuk memverifikasi konservasi air selama proses komputasi. Selain itu, profil permukaan air, distribusi tekanan di sepanjang kapal, dan distribusi kecepatan di sekitar badan kapal juga diteliti dan dibahas.

5.1. Aplikasi Pada Tahanan Kapal Tanker

5.1.1. Kondisi Awal Komputasi

Prediksi tahanan kapal tanker di air tenang akan dijelaskan di bagian ini. Kondisi komputasi dibuat sama seperti pada kondisi eksperimen sebagaimana disajikan pada Tabel 5.1. Angka Froude Fr (*Froude number Fr*) dan angka Reynolds Re (*Reynolds number Re*) dinormalisasi oleh kecepatan dan panjang kapal tanker. Dua tipe yang digunakan dalam simulasi komputasi yaitu Tipe A dan Tipe B yang bentuknya sedikit berbeda di bagian depan kapal yang spesifik pada bagian *bulbous bow*. Hal ini dilakukan dengan maksud metode numerik ini mampu membedakan bentuk desain terkait dengan pola aliran dan tahanan kapal walaupun pada bagian yang sangat sulit



Gambar 5.1 Model kapal tanker yang terdiri dari sejumlah partikel SPH

Tabel 5.1 Ukuran utama model kapal pada kondisi komputasi dan eksperimen

Deskripsi Ukuran	Satuan	Ukuran
<i>Length between perpendiculars (Lbp)</i>	meter	4.0
<i>Width (B)</i>	meter	0.645
<i>Draft (d)</i>	meter	0.258
<i>Ship speed (V)</i>	m/s	0.875
<i>Froude number (Fr)</i>		0.1385
<i>Reynolds number (Re)</i>		3.5×10^6

Gambar 5.1 memperlihatkan gambar model kapal tanker yang terdiri dari sejumlah partikel SPH. Dalam model, model tanker diwakili oleh sejumlah besar partikel SPH yang dilacak dengan menggunakan metode berbasis partikel SPH. Ukuran kisi adalah $0.0025 \sim 0.015$ Lbp dan jari-jari partikel permukaan bebas $0.00125 \sim 0.005$ Lbp. Jumlah total partikel permukaan bebas (*free surface particle*) yang terletak di dekat permukaan bebas (*free surface*) adalah 600000. Jari-jari partikel SPH adalah 0.00125 Lbp dan jumlah totalnya 180000 untuk model tanker. Kondisi ukuran dan jumlah partikel telah diverifikasi pada penelitian sebelumnya dimana kondisi tersebut untuk simulasi komputasi mampu bekerja dengan baik.

5.1.2. Hasil dan Pembahasan

Gambar 5.2 memperlihatkan perubahan permukaan air di sekitar model kapal tanker (Tipe A) yang bergerak di air tenang. Dalam kasus ini, kondisi batas aliran masuk dan keluar pada kolam diberlakukan masing-masing di hulu dan hilir. Pergerakan model kapal tanker Tipe B juga disimulasi secara komputasi dalam kondisi yang sama dengan Tipe A. Gambar 5.3 menggambarkan tahanan total pada setiap waktu yang bekerja pada model kapal tanker. Tahanan total terdiri dari tahanan gesek dan tahanan tekanan dimana dinormalisasi oleh panjang model tanker Lbp, lebar B, dan draft d.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tahanan total yang diperoleh hampir sepenuhnya stabil selama waktu simulasi komputasi berjalan.

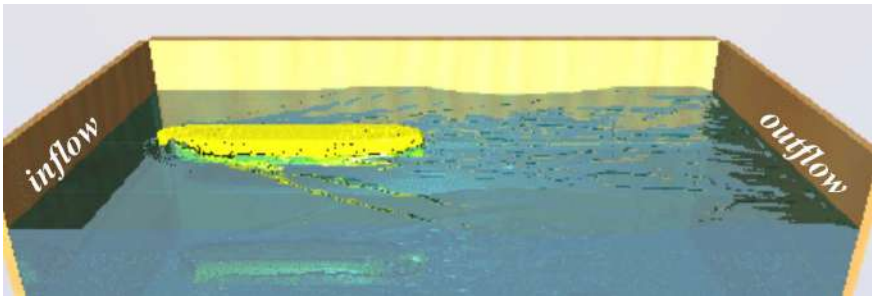
Tabel 5.2 menunjukkan perbandingan tahanan total (non-dimensi/normalisasi) antara hasil numerik dan hasil eksperimen. Pada metode numerik yang dikembangkan, tahanan total terdiri dari tahanan tekanan dan hambatan gesek yang diperoleh dari fungsi densitas ϕ_I (*density function ϕ_I*) dengan mempertimbangkan posisi garis air. Baik model tipe A dan tipe B memiliki hasil numerik yang sangat sesuai dengan hasil eksperimen dengan memberikan perbedaan sangat kecil berkisar pada besaran 1 hingga 5%. Sementara, perbedaan nilai tahanan total dari hasil numerik antara tipe A dan tipe B hanya sekitar 0.1%. Hal ini disebabkan adanya perbedaan kecil pada bentuk haluan (*bow*) model tanker antara kedua tipe tersebut, selain itu, alasan lain yakni ukuran kisi, jumlah, dan ukuran partikel permukaan bebas. Sehingga, metode numerik yang dikembangkan ini telah mampu membedakan hasil tahanan total walaupun perbedaan kecil pada bentuk haluan (*bow*) model kapal tanker.

Tabel 5.2 Perbandingan tahanan total antara hasil eksperimen dan hasil numerik

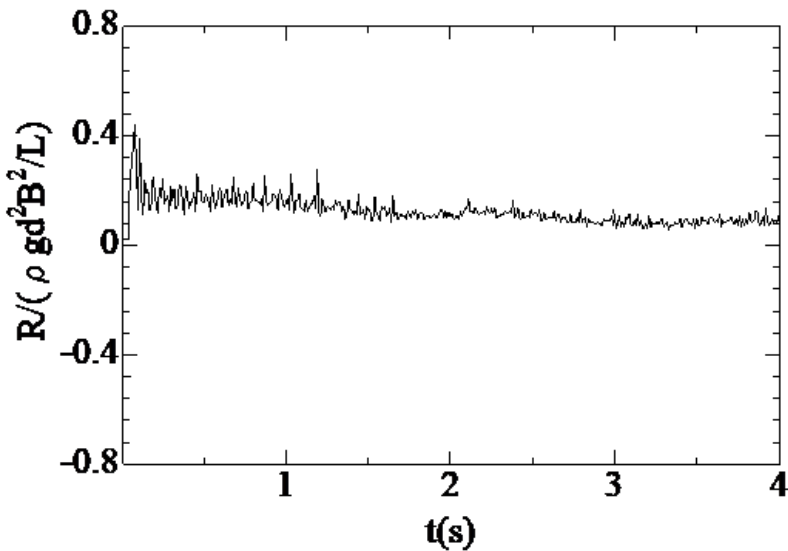
Type model	Nondimensi Tahanan Total	
	Hasil Eksperimen	Hasil Komputasi
Type A	0.1032	0.1047
Type B	0.1101	0.1046

Selain itu, hasil tahanan total yang diperoleh merupakan skala parametrik dari pengaruh hidrodinamika dalam komputasi, selanjutnya nondimensi tahanan total yang disajikan pada Tabel 5.2 dapat digunakan untuk mengkonversi ke dalam skala kapal sesungguhnya

untuk memperoleh tahanan total kapal pada kedua kapal tanker tersebut. Oleh karena itu, berdasarkan hasil perbandingan antara hasil metode numerik dan hasil eksperimen sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, metode numerik yang dikembangkan ini dapat diterima untuk memperkirakan dan mengevaluasi tahanan total kapal di air tenang.



Gambar 5.2 Perambatan gelombang yang dihasilkan oleh kapal tanker (Tipe A)



Gambar 5.3 Tahanan total per satuan waktu untuk kapal tanker (Tipe A)

5.2. Aplikasi Pada Tahanan Kapal Perikanan

5.2.1. Kondisi Awal Komputasi

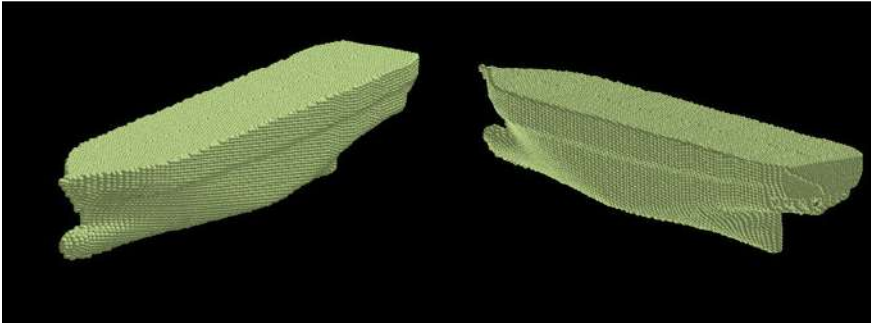
Metode numerik ini juga telah diterapkan pada tahanan kapal perikanan di air tenang dengan berbagai kenaikan kecepatan yang digambarkan ke dalam angka Froude Fr (*Froude number*) dari 0.1023 sampai dengan 0.4070. Kapal perikanan diletakkan pada aliran air yang seragam (*uniform flow*) di mana dipengaruhi oleh kondisi batas aliran masuk dan arus keluar (*inflow and outflow boundary condition*). Gambar 5.4 memperlihatkan salah satu contoh susunan atau distribusi partikel SPH pada badan kapal perikanan. Sementara, Tabel 5.3 menyajikan kondisi awal komputasi. Pada kondisi awal komputasi, dimensi model kapal sama dengan kondisi eksperimen di mana ukuran utama kapal disajikan Tabel 5.4.

Tabel 5.3 Kondisi awal komputasi

Deskripsi	Ukuran
Ukuran kisi dx, dy, dz	0.01Lbp
Partikel permukaan bebas	
a. Jari-jari	0.0025Lbp
b. Jumlah	222264
Partikel SPH	
a. Jari-jari	0.0025Lbp
b. Jumlah	21998
Angka Reynolds (Rn)	$4.1 \times 10^5 \sim 1.27 \times 10^6$
Angka Froude (Fr)	0.1023~0.4070

Tabel 5.4 Ukuran utama model kapal perikanan

Deskripsi	Ukuran
Panjang antara dua garis tegak/Lbp (m)	1.5000
Panjang garis air/Lwl (m)	1.6492
Lebar kapal/B (m)	0.3066
Rasio L/B	4.892
Koefisien bentuk/Cb	0.7155

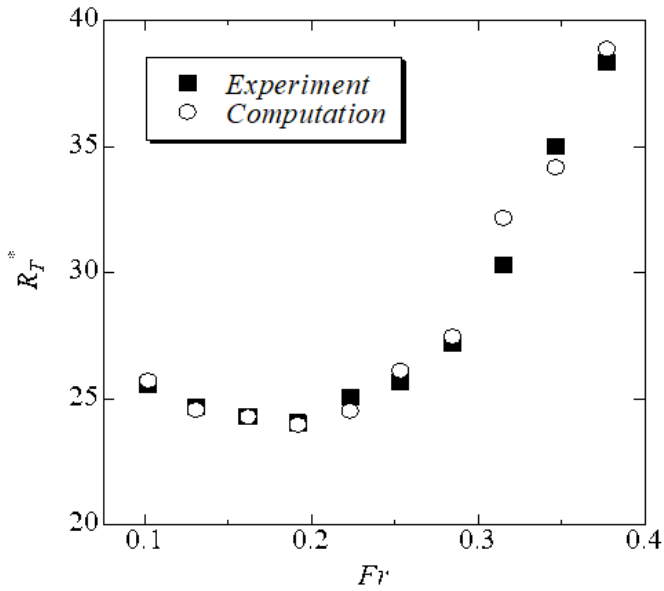


Gambar 5.4 Badan kapal perikanan direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH

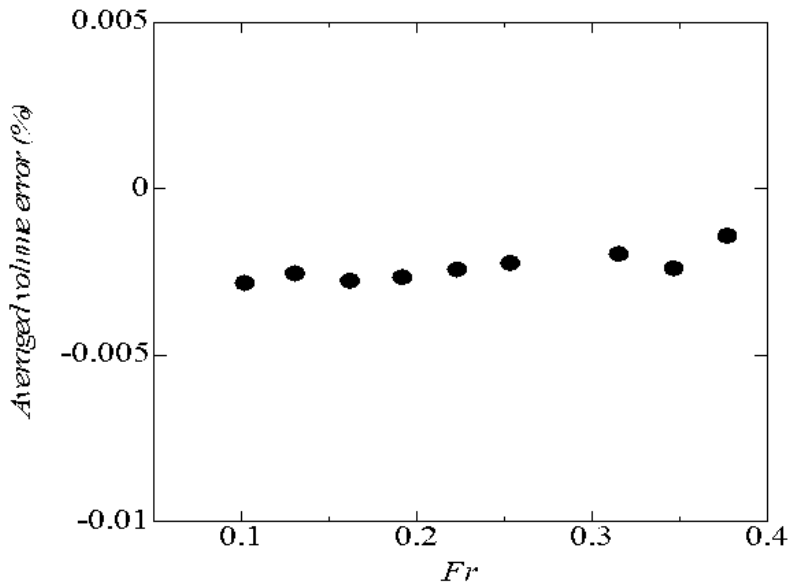
5.2.2. Hasil dan Pembahasan

Di sini, tahanan total kapal perikanan dijelaskan berdasarkan hasil yang telah diperoleh dari metode numerik dan eksperimen. Melalui eksperimen, pengujian tahanan kapal perikanan dilakukan di tangki sirkulasi air (*circulating water channel tank*), dan hasil eksperimen ini akan dibandingkan dengan hasil komputasi yang dihitung oleh model numerik yang dikembangkan. Gambar 5.5 memperlihatkan perbandingan tahanan total R_T^* (nondimensi) antara hasil komputasi dan hasil eksperimen. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, pada metode numerik yang dikembangkan ini, tahanan total yang diperoleh terdiri dari tahanan gesek (*frictional resistance*) dan tahanan tekanan (*pressure resistance*).

Tahanan gesek (*frictional resistance*) dihitung menggunakan fungsi densitas ϕ_f (*density function ϕ_f*) dengan mempertimbangkan garis air (*draft line*) dan koefisien tahanan untuk lapisan batas turbulen pelat datar (*flat plate turbulent boundary layer*) berdasarkan rumus Schoenherr. Nondimensi tahanan total di sini didefinisikan sebagai $R/(1/2\rho v^2 \nabla^{2/3})$ dimana R adalah gaya *drag* yang bekerja pada permukaan badan kapal perikanan, v adalah kecepatan kapal, dan ∇ adalah volume carena kapal.



Gambar 5.5 Perbandingan tahanan total kapal perikanan antara hasil komputasi dan hasil eksperimen



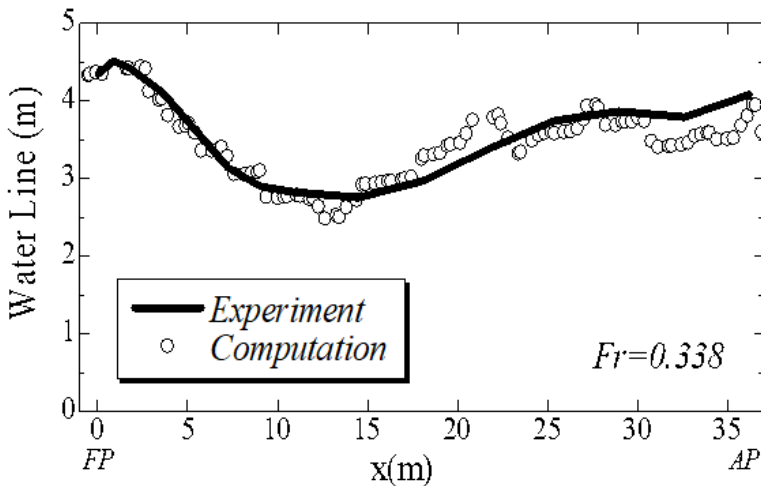
Gambar 5.6 Rata-rata *volume error* pada fase air untuk setiap angka Froude Fr yang terjadi saat proses komputasi

Sebagaimana disajikan pada Gambar 5.5, kecenderungan tahanan total kapal yang dihasilkan dari komputasi, yang dilambangkan dengan tanda lingkaran, tahanan total menurun dari $Fr = 0.1$ sampai dengan $Fr = 0.2$ di awal, dan selanjutnya tahanan total meningkat seiring dengan peningkatan Fr sampai $Fr = 0.4$. Dibandingkan dengan hasil eksperimen, tahanan total hasil komputasi pada $Fr = 0.3154$ dan 0.3468 cukup berbeda antara hasil eksperimen yang ditandai dengan kotak hitam, di mana tahanan total hasil komputasi pada $Fr = 0.3154$ lebih besar dari tahanan total hasil eksperimen, sedangkan tahanan total hasil komputasi pada $Fr = 0.3468$ lebih rendah dari hasil eksperimen.

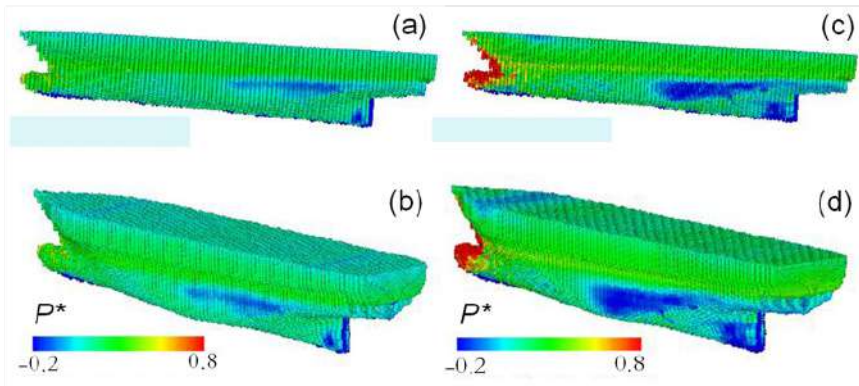
Di sisi lain, untuk verifikasi kestabilan proses komputasi dari metode numerik yang dikembangkan ini, Gambar 5.6 memperlihatkan volume error pada fase air sepanjang proses komputasi di mana volume error memiliki nilai yang sangat kecil dengan rata-rata -0.003% dan stabil selama proses komputasi untuk setiap kenaikan angka Froude Fr . Dalam arti lain, volume air berkurang sangat kecil selama proses komputasi. Namun, pada angka Froude Fr yang tinggi nilai ini semakin mendekati nol yang menandakan bahwa metode numerik yang dikembangkan ini dapat menjaga kestabilan volume air selama proses komputasi. Dua jenis partikel Lagrange dapat mengoreksi kesalahan fungsi densitas (*density function*) pada langkah adveksi pada kisi Eulerian. Angka negatif yang diberikan oleh *volume error* menandakan kekurangan volume air, sebaliknya angka positif menandakan bertambahnya volume air.

Berkurangnya volume air selama proses komputasi dikarenakan metode numerik yang dikembangkan ini terkadang sensitif terhadap fluktuasi kesalahan volume air. Hal ini disebabkan oleh ukuran dan jumlah partikel yang diletakkan pada permukaan bebas (*free surface*). Selain itu, alasan yang lain adalah bahwa beberapa fenomena kompleks pada permukaan bebas seperti percikan air (*water splashing*), pecahan gelombang (*breaking wave*), dan lain-lain.

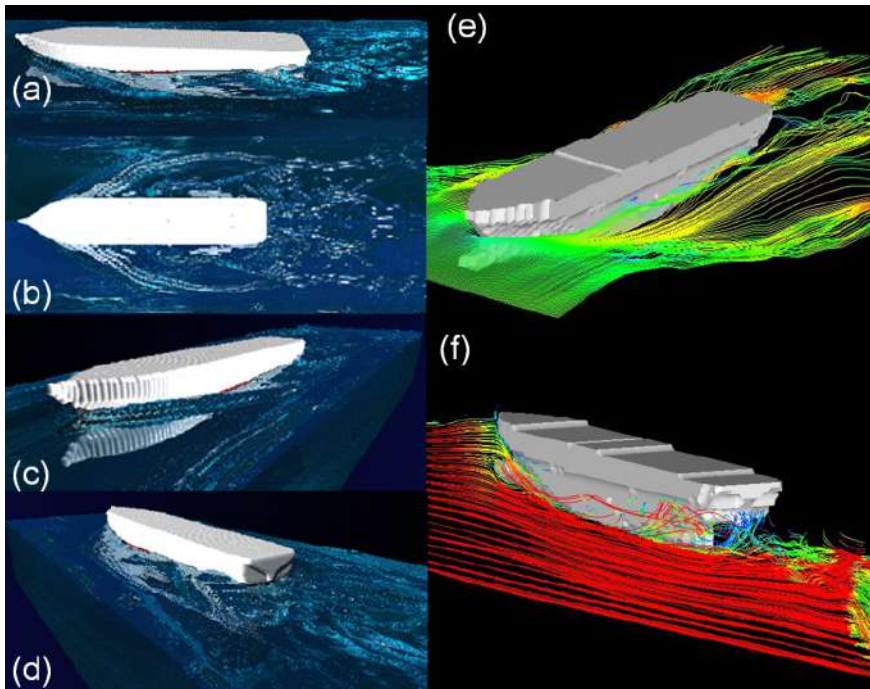
Perbandingan permukaan air (*free surface*) atau profile gelombang (*wave profile*) di sekitar badan kapal dan di sepanjang badan kapal antara hasil komputasi dan hasil eksperimen diperlihatkan pada Gambar 5.7. Tanda lingkaran merupakan hasil komputasi yang diperoleh dari pelacakan partikel permukaan bebas (*free surface particle*). Berdasarkan hasil perbandingan, hasil komputasi terlihat sangat memuaskan dan sesuai dengan hasil eksperimen yang ditandai oleh garis hitam. Namun, perbedaan profil gelombang terjadi sedikit di bagian tengah dan belakang kapal. Perbedaan tersebut terutama disebabkan oleh gangguan gerakan permukaan bebas yang disebabkan oleh tekanan dinamis dari interaksi nonlinier yang kuat antara air dan udara. Selain itu, hubungan antara ukuran kisi dan jari-jari partikel pada permukaan bebas tidak bekerja dengan baik di badan kapal di mana bentuk kompleks badan kapal seperti kapal perikanan ini. Oleh karena itu, pemodelan dengan metode numerik yang dikembangkan ini harus lebih diteliti di masa depan khususnya kajian pada distribusi secara optimal partikel permukaan bebas dengan jari-jari berbeda di bagian kapal yang memiliki bentuk kompleks.



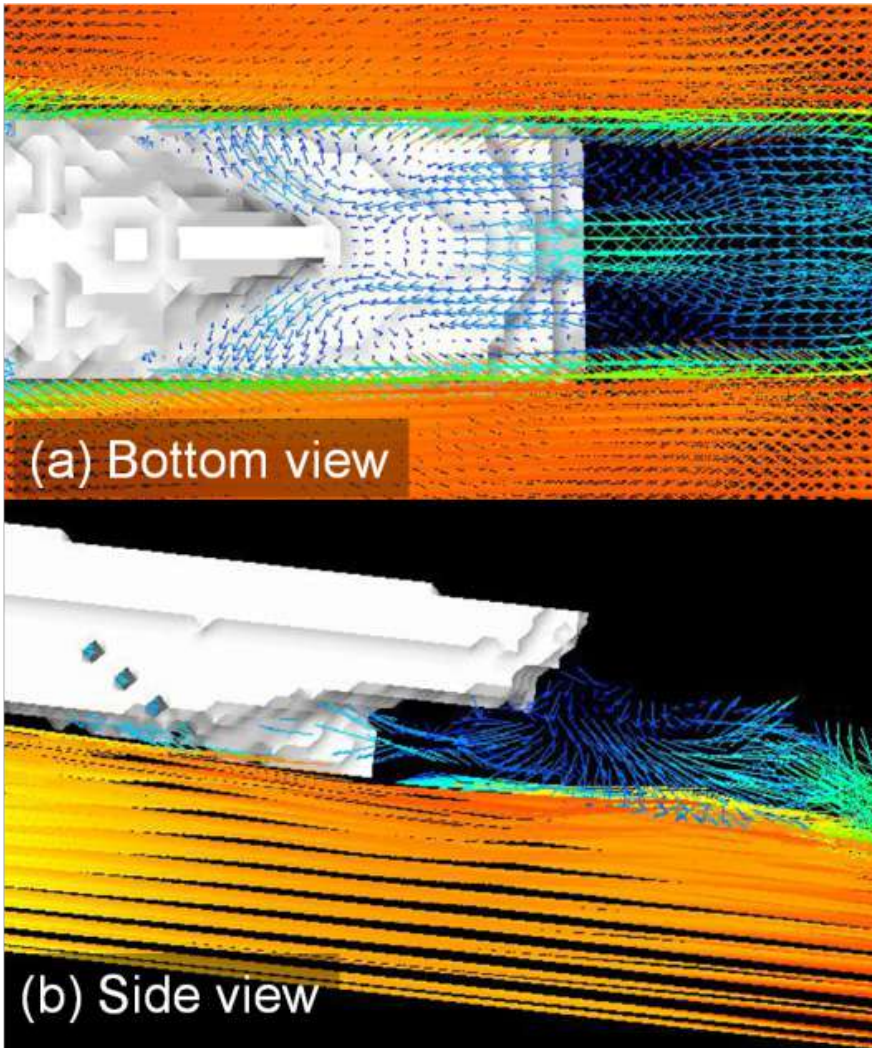
Gambar 5.7 Perbandingan permukaan air di sepanjang badan kapal perikanan antara hasil komputasi dan eksperimen (hasil perbandingan pada $Fr = 0.338$)



Gambar 5.8 Distribusi tekanan di lambung kapal perikanan dari hasil komputasi; (a) dan (b) $Fr = 0.1023$, (c) dan (d) $Fr=0.3774$



Gambar 5.9 Gambar permukaan air dan arah aliran di sekitar lambung kapal perikanan, hasil komputasi pada $Fr = 0.3774$



Gambar 5.10 Distribusi kecepatan aliran di sekitar lambung belakang kapal perikanan, hasil komputasi pada $Fr = 0.3774$

Gambar 5.8 memperlihatkan distribusi tekanan yang dialami lambung kapal perikanan. Di sini, nondimensi tekanan P^* tanpa tekanan statis didefinisikan sebagai $P_x / (1/2\rho v^2)$. Tekanan dapat dihitung yang dialami oleh partikel SPH sebagai representasi lambung kapal. Tekanan meningkat secara bertahap di bagian depan dan *bulbous bow* kapal dengan

peningkatan kecepatan atau angka Froude Fr . Pada kecepatan rendah atau Fr rendah, tekanan di dekat haluan tidak mengalami tekanan yang besar sebagaimana ditunjukkan pada angka Froude rendah $Fr = 0.1023$ pada Gambar 5.8 (a) dan (b), sementara tekanan tinggi terjadi pada $Fr = 0.3774$ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.8 (c) dan (d). Tekanan negatif juga dialami pada bagian buritan kapal di mana tekanan negatif terjadi lebih besar pada $Fr = 0.3774$.

Dari hasil animasi komputasi, beberapa gambar aliran permukaan bebas (*free surface flow*) dan pemisahan aliran (*flow separation*) di sekitar lambung kapal perikanan telah diambil dan ditampilkan pada Gambar 5.9. Aliran permukaan bebas (*free surface flow*) didefinisikan oleh fungsi densitas (*density function*) dan partikel permukaan bebas (*free surface particle*). Partikel permukaan bebas, terutama di bagian samping dan belakang kapal perikanan terlihat sangat jelas sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.9 (a, b, c, dan d) di mana metode numerik yang dikembangkan ini dapat menangkap deformasi secara rinci pada permukaan bebas (*free surface*) atau kontur aliran pada kisi Euler. Pemisahan aliran (*flow separation*) yang didefinisikan oleh arah aliran yang teridentifikasi terjadi pada bagian tengah dan buritan kapal perikanan sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.9 (e dan f). Namun, pemisahan aliran (*flow separation*) sangat besar terjadi di bagian buritan di mana aliran yang terpisah di bagian bawah buritan mengarah naik di bagian belakang buritan.

Untuk menginvestigasi pemisahan aliran (*flow separation*), Gambar 5.10 memperlihatkan medan kecepatan air di sekitar bagian buritan kapal. Sirkulasi aliran yang kuat dihasilkan di bagian bawah buritan sebagaimana ditunjukkan tampak bawah pada Gambar 5.10 (a), dan aliran pusaran (*vortex flow*) yang rumit juga ditunjukkan di bagian belakang buritan sebagaimana ditunjukkan tampak samping pada Gambar 5.10 (b). Struktur tiga dimensi (3D) kecepatan aliran di sekitar buritan kapal

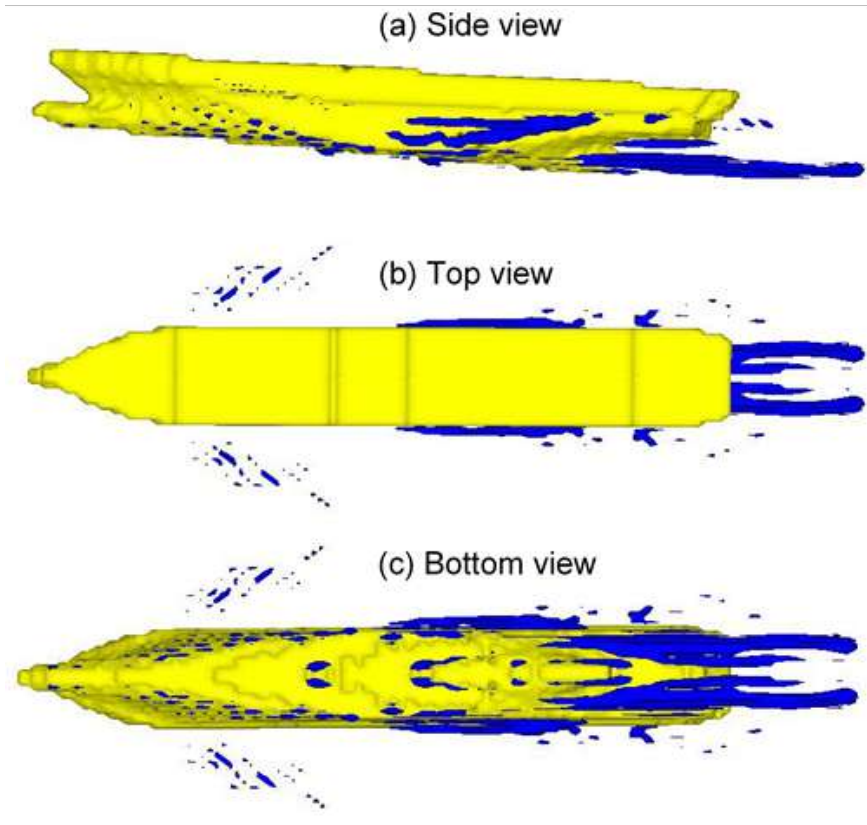
yang diperlihatkan pada Gambar 5.9 dan 5.10 diperoleh dari informasi gerakan permukaan bebas dan perbedaan spasial tahanan air.

Untuk mengekstraksi struktur pusaran (*vortex structure*) secara tiga dimensi (3D) yang terjadi di sekitar lambung kapal perikanan, kepadatan enstrofi (*enstrophy density*) yang didefinisikan sebagai integral dari kuadrat pusaran (*vortex*) dalam medan kecepatan secara tiga dimensi (3D) diperlihatkan pada Gambar 5.11. Berdasarkan gambar tersebut, terdapat tiga bagian perambatan aliran pusaran (*vortex flow*) yang terjadi di sepanjang bada kapal, yakni di haluan kapal, di tengah kapal, dan di belakang kapal. Menurut besarnya, propagasi aliran pusaran (*vortex flow*) terjadi sangat kecil di bagian haluan kapal, sementara yang terbesar terjadi di belakang kapal. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk haluan kapal dapat dengan lancar mengalirkan aliran air dengan sedikit gangguan akibat interaksi antara lambung kapal dan aliran air di bawah permukaan air, sedangkan pada bagian lain merambat lebih banyak aliran pusaran selama interaksi, terutama di belakang buritan kapal perikanan. Selain itu, struktur aliran permukaan bebas yang terdiri dari pecahan dan percikan air (*water breaking and splashing*), gelembung udara (*air bubble*), dan tetesan air (*water droplet*) dipengaruhi oleh kecepatan air di permukaan bebas. Sehingga, struktur pusaran (*vortex structure*) di bagian tengah dan belakang kapal lebih kompleks. Gerakan aliran di permukaan bebas dipengaruhi oleh hasil interaksi antara bentuk lambung kapal dan aliran pusaran di bawah permukaan air.

5.3. Aplikasi Pada Tahanan Kapal Feri Penumpang Cepat

5.3.1. Kondisi Awal Komputasi

Pada bagian ini, aplikasi pada tahanan kapal feri penumpang cepat menggunakan metode numerik yang dikembangkan ini dijelaskan. Pada



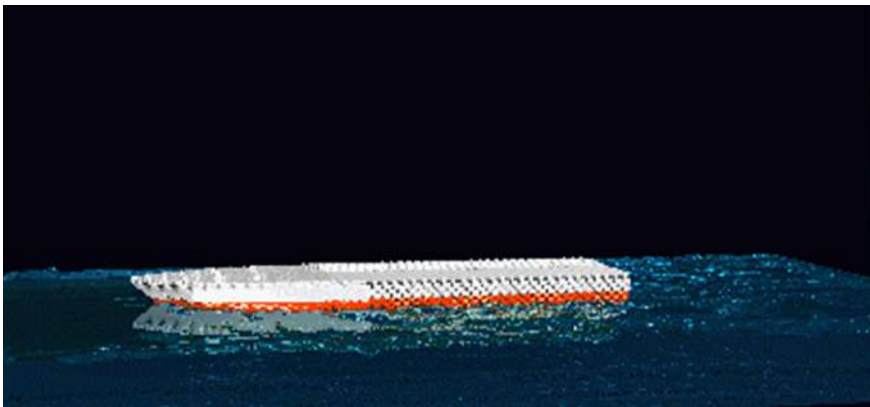
Gambar 5.11 Propagasi aliran vortex (*vortex flow*) di sekitar badan kapal perikanan untuk angka Froude $Fr = 0.3774$

kondisi awal komputasi, jumlah partikel yang terletak di permukaan bebas air yakni 192676, dan jumlah partikel SPH yang mewakili badan model kapal sebanyak 58610. Dalam proses komputasi, tahanan kapal disimulasi selama 40000 langkah waktu, yang mengartikan bahwa data tahanan kapal diperoleh selama 4 detik. Model kapal feri diletakkan di tengah pada domain komputasi dengan alira air yang seragam (*uniform flow*) yang dipengaruhi oleh arus masuk dan arus keluar kondisi batas (*inflow and outflow boundary condition*) di mana aliran air berlawanan arah dengan arah haluan kapal feri sebagaimana ditunjukkan pada Gambar

5.12. Di sini, kecepatan air diasumsikan sama dengan kecepatan kapal feri, dan kecepatan kapal atau kecepatan aliran pada simulasi komputasi ini diberikan berkisar antara $Fr = 0.07$ sampai dengan 0.25. Selain itu, pada kondisi komputasi, dimensi model kapal feri dibuat sama dengan dimensi model kapal pada eksperimen sebagaimana disajikan pada Tabel 5.5. Kondisi awal komputasi lain seperti ukuran kisi, ukuran partikel, dan lain-lain disamakan dengan aplikasi lainnya sebagaimana dijelaskan sebelumnya.

Tabel 5.5 Ukuran utama kapal dan model kapal feri penumpang cepat

Deskripsi Ukuran Utama	Ukuran (m)	
	Kapal	Model
Panjang keseluruhan kapal/ Loa	45	1.5
Lebar kapal/ B	9.6	0.3
Tinggi kapal/ H	3.5	0.116
Sarat kapal/ T	1.2	0.04

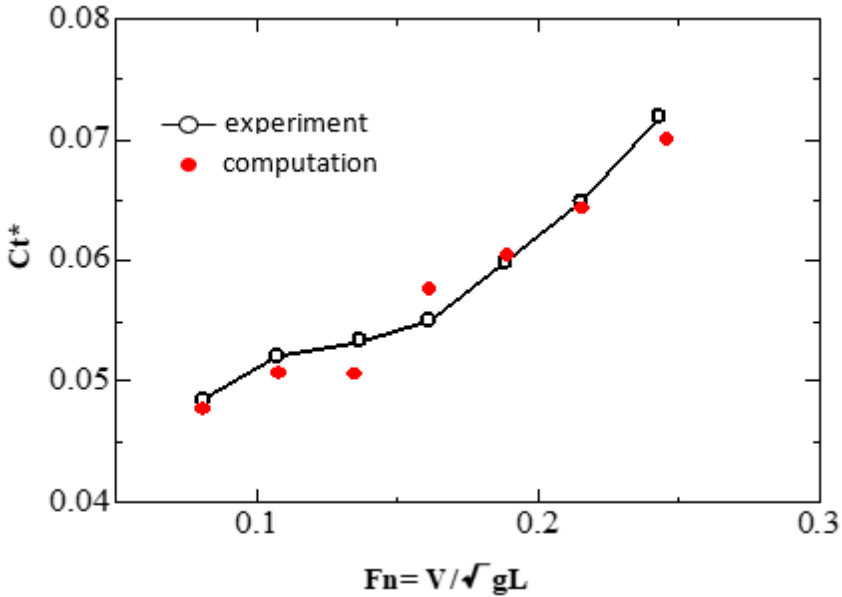


Gambar 5.12 Kapal feri direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH pada simulasi komputasi tahanan kapal

5.3.2. Hasil dan Pembahasan

Tahanan total terdiri dari tahanan gesek dan tahanan tekanan, dan tahanan total kapal dibuat ke dalam besaran nondimensi atau koe-

fisien tahanan total kapal C_t^* dengan cara dinormalisasi terhadap densitas air ρ , kecepatan V dan permukaan basah kapal S . Selama proses komputasi, simulasi tahanan kapal se penuh dalam kondisi stabil.



Gambar 5.13 Perbandingan nondimensi tahanan total kapal feri penumpang cepat antara hasil komputasi dan eksperimen

Gambar 5.13 menunjukkan hasil perbandingan tahanan total di air tenang antara hasil komputasi yang ditandai dengan lingkaran merah dan eksperimen yang ditandai dengan lingkaran putih. Dari gambar tersebut, nondimensi tahanan total yang didapatkan dari komputasi lebih rendah dibandingkan dengan hasil eksperimen pada $Fr = 0.137$, sebaliknya nondimensi tahanan total lebih tinggi pada $Fr = 0.162$. Selain itu, berdasarkan hasil komputasi, kecenderungan tahanan total pada kisaran Fr dari 0.107 sampai dengan 0.162 mengalami penurunan, kemudian kecenderungan tahanan total meningkat secara signifikan pada batas $0.107 \geq Fr \geq 0.188$. Kurva kecenderungan dari hasil komputasi tersebut merupakan fenomena yang umum bagi

metode numerik termasuk metode numerik yang dikembangkan ini, sensitivitas pada kasus ini disebabkan oleh ukuran dan jumlah partikel pada permukaan bebas di mana tidak dapat menangani fenomena yang terjadi akibat interaksi antara kapal dan air dengan lancar. Perbedaan nilai tahanan total anatar hasil komputasi dan eksperimen yakni kurang dari 2%. Juga terlihat pada gambar tersebut, nilai tahanan total yang lain cukup dekat seiring peningkatan angka Froude Fr . Hal ini dapat dinyatakan bahwa hasil komputasi secara keseluruhan sangat sesuai dengan hasil eksperimen.

Aplikasi-aplikasi yang dilakukan di atas menggunakan metode numerik yang dikembangkan, skema Euler dengan partikel Lagrange, memaparkan solusi-solusi yang sangat memuaskan di mana solusi-solusi komputasi yang dihasilkan telah dibandingkan dengan solusi-solusi eksperimen. Lingkup kajian pada bab ini sangat relevan dengan dunia pendidikan dan industri untuk perekayasaan perkapalan dan kelautan. Sehingga, metode numerik yang dikembangkan ini mampu menyelesaikan keinginan-keinginan dunia pendidikan dan industri pada kajian-kajian dan pendesainan terkait kapal dan bangunan apung lainnya.

#6

Aplikasi Pada Gerak Kapal di Gelombang Nonlinear

Pada bab ini, kinerja gerak kapal di gelombang nonlinear dengan fenomena pecahan gelombang (*breaking wave*) telah diprediksi, diselidiki, dan dievaluasi dengan menggunakan metode numerik yang dikembangkan ini. Metode numerik yang dikembangkan kemudian akan diaplikasi pada kinerja gerak kapal tanker, kapal perikanan dan kapal feri penumpang cepat yang dibahas pada masing-masing sub-bab 6.2, 6.3 dan 6.4. Dalam pembahasan, solusi-solusi dari metode numerik yang dikembangkan ini kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen dan hasil *Strip theory* (gaya dan gerakan ditentukan dengan menggunakan hasil dari koefisien hidromekanik dan beban gelombang terintegrasi sepanjang panjang kapal secara numerik). Selain itu, ta-

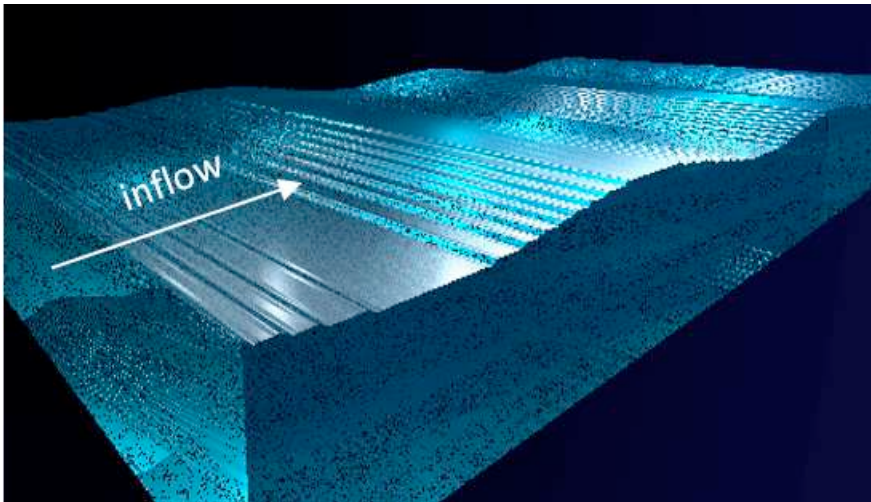
hanan gelombang tambahan (*added wave resistance*), dampak bantingan (*slamming*), dan distribusi tekanan (*pressure distribution*) juga diselidiki pada bab ini. Sebelum pengaplikasian pada tahanan kapal-kapal dilakukan, kinerja gerakan dalam gelombang nonlinear untuk semua kapal, metode numerik yang dikembangkan ini secara pertama-tama akan diaplikasikan pada propagasi atau perambatan gelombang dan kemudian diverifikasi sebagaimana dijelaskan berikut di bawah ini.

6.1. Propagasi Gelombang

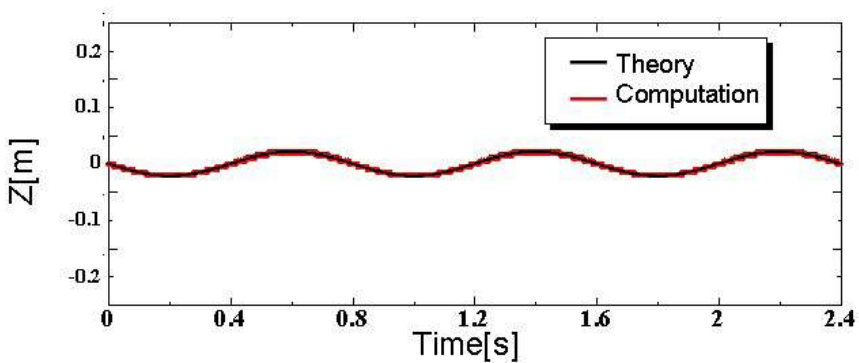
Pada bagian ini, akurasi metode numerik yang dikembangkan akan diinvestigasi dan diuji pada aplikasi propagasi gelombang (*wave propagation*) dengan pertimbangan dan perhitungan kestabilan volume air. Kemudian, propagasi gelombang yang dibuat menggunakan metode numerik yang dikembangkan akan digunakan dalam aplikasi dan evaluasi pada kinerja gerak kapal di gelombang atau seakeeping. Dari hasil simulasi yang telah diperoleh, propagasi gelombang reguler di sebuah tangki gelombang numerik (*numerical wav tank*) dapat dilihat pada Gambar 6.1.

Pada propagasi gelombang reguler, tinggi gelombang awal (*initial wave height*) yang diterapkan di tangki gelombang numerik yakni 5 cm dengan periode gelombang 0.8 detik. Selanjutnya, Gambar 6.2 memperlihatkan perbandingan elevasi gelombang per satuan waktu antara hasil teori gelombang (*wave theory*) dan hasil metode numerik yang dikembangkan. Kondisi elevasi gelombang yang ditampilkan pada Gambar 6.2 diambil pada bagian tengah tangki gelombang numerik. Selain itu, Gambar 6.3 memperlihatkan variasi temporal (*temporal variation*) terhadap kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair. Kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair yang ditunjukkan pada sumbu vertikal (y) merupakan persentase perubahan volume cair pada kondisi awal. Tinggi gelombang reguler yang telah dihasilkan di mana hasilnya tidak berkurang sepanjang waktu tanpa difusi dan disipasi secara numerik, dan hal

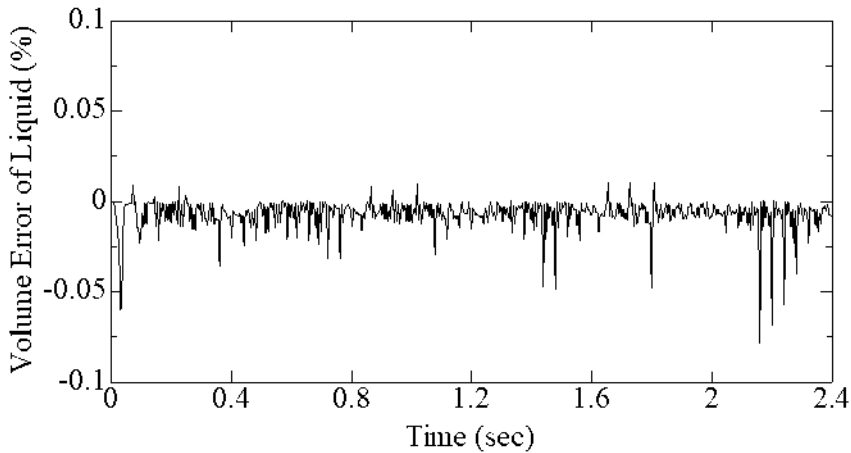
ini mengartikan bahwa propagasi gelombang sangat stabil. Metode numerik yang dikembangkan ini mampu mengoreksi kesalahan numerik untuk fase adveksi dengan menggunakan partikel permukaan bebas (*free surface partikel*) sebagaimana diberikan oleh persamaan 2.49 pada Bab 2. Oleh karena itu kesalahan volume fase cair tidak meningkat selama waktu simulasi komputasi di mana nilai maksimumnya hanya berkisar pada $7.6 \times 10^{-2}\%$ dan rata-rata sekitar $7.31 \times 10^{-3}\%$.



Gambar 6.1 Propagasi gelombang reguler di tangki gelombang numerik



Gambar 6.2 Perbandingan elevasi permukaan gelombang reguler antara hasil komputasi dan teori gelombang (*wave theory*)



Gambar 6.3 Kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair per satuan waktu

Pada metode numerik yang dikembangkan ini, fenomena seperti gelombang pecah (*wave breaking*), bantingan (*slamming*), resonansi fluída dalam tangki (*sloshing*), dan tekanan benturan dinding (*wall impact pressure*), kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair telah diinvestigasi dan dipastikan berfungsi dengan baik. Sehingga, metode numerik yang dikembangkan ini dapat menjaga antarmuka (*interface*) yang lebih tajam dari berbagai kondisi fase dan juga mampu mengendalikan kesalahan volume (*volume error*) air.

6.2. Aplikasi Pada Gerak Kapal Tanker

6.2.1. Kondisi Awal Komputasi

Gambar 6.4 menampilkan lambung kapal tanker direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH. Sementara, Tabel 6.1 menyajikan ukuran utama model kapal tanker. Angka Froude Fr dan angka Reynolds Re dinormalisasi dengan kecepatan dan panjang tanker. Sama halnya dengan pembahasan pada Bab 5, Tipe A dan Tipe B kapal tanker memiliki bentuk yang sedikit berbeda di bagian depan halu-

an (*bow*). Tabel 6.2 menampilkan kondisi gelombang yang dipropagasi di tangki gelombang numerik (*numerical wave tank*) dari $\lambda/Lbp = 0.25$ sampai dengan 1.25 dengan tinggi gelombang $Hw/Lbp = 0.02$. Batas periodik (*periodic boundary*) baik di hulu (*upstream*) maupun di hilir (*downstream*) diberlakukan dengan kecepatan gelombang untuk mengurangi biaya komputasi. Hasil numerik selama empat sampai enam periode gelombang atau enam jumlah gelombang dipropagasi di tangki gelombang numerik (*numerical wave tank*) untuk menghindari beberapa gangguan akibat refleksi dan difraksi gelombang.



Gambar 6.3 Kesalahan volume (*volume error*) pada fase cair per satuan waktu

Kecepatan tanker yang diberlakukan pada kondisi awal sebesar 0.875 m/detik. Arah propagasi gelombang diberlakukan yakni arah datang melawan arah kapal (*hedding wave*) maka gerakan *heave* dan *pitch* dapat diperoleh, dan amplitudo gerakan yang didapatkan akan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Ukuran kisi sebesar 0.0025 ~ 0.015 *Lbp* dan jari-jari partikel permukaan bebas (*free surface particle*) sebesar 0.00125 ~ 0.005 *Lbp*. Jumlah total partikel permukaan bebas yang diletakkan di permukaan bebas sebanyak 600000 di mana jumlah maksimum partikel dapat dibuat sebanyak 1000000 untuk kasus periode gelombang yang lebih panjang.

Jari-jari partikel SPH yang merepresentasikan lambung kapal sebesar 0.00125 *Lbp* dan jumlah total partikel sebanyak 180000. Selain itu, badan kapal yang diwakili sejumlah partikel memiliki gerak rotasi. Sehingga, momen inersia untuk gerakan *pitch* di gelombang dapat diperoleh dengan mengintegrasikan setiap densitas partikel (*particle density*) dari jarak jari-jari girasi (*jari-jari of gyration*) di sumbu lokasi partikel.

Tabel 6.1 Ukuran utama model kapal tanker

Deskripsi Ukuran	Satuan	Ukuran Model
Panjang antara dua garis tegak/ L_{bp}	m	4.0
Lebar/ B	m	0.645
Sarat/ T	m	0.258
Kecepatan kapal/ V	m/s	0.875
Angka Froude/ Fr	-	0.1385
Angka Reynolds/ Re	-	3×10^6

Tabel 6.2 Kondisi gelombang

Deskripsi	Rasio	Nilai
Tinggi gelombang	H_w/L_{pp}	0.02
Panjang gelombang	λ/L_{pp}	0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.65, 0.8, 1.0, 1.25 (jumlah kasus sebanyak 10)

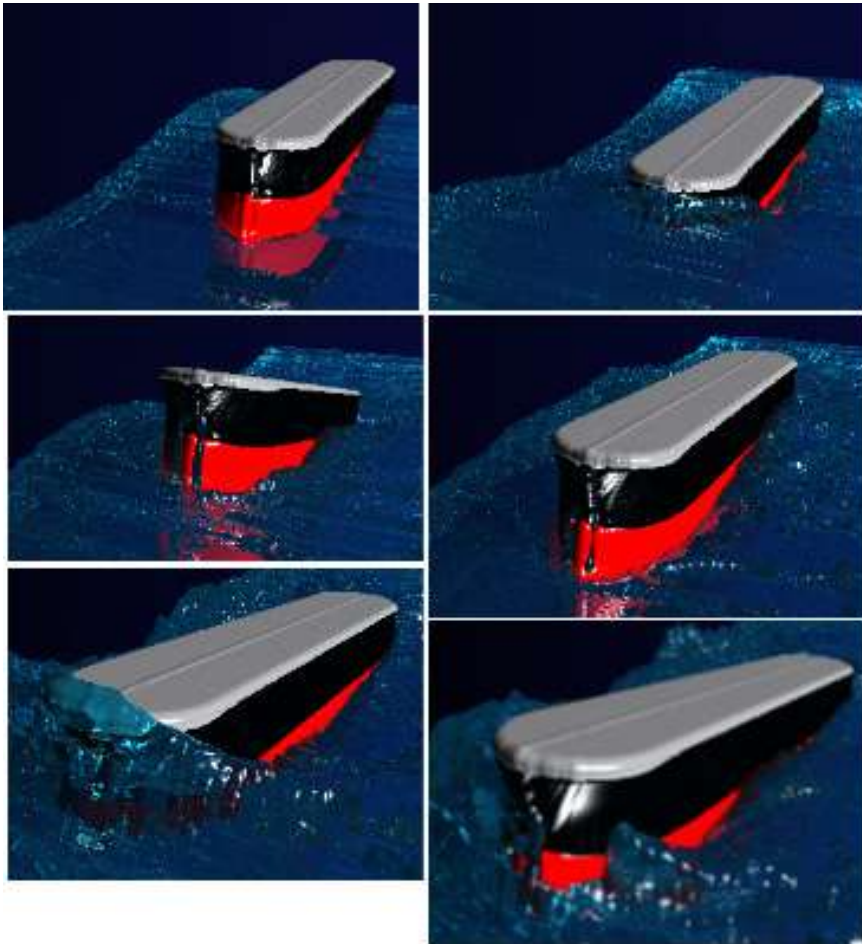
6.2.2. Hasil dan Pembahasan

Gambar 6.5 memperlihatkan selain gambar gerakan kapal tanker di gelombang, tangkapan gambar gerakan tanker di gelombang reguler dan fenomena seperti percikan air (*water splashing*), pecahan gelombang (*breaking wave*), bantingan/benturan (*slamming*), dan limpahan air di atas dek kapal (*water on deck*) atau green water akibat interaksi kapal-gelombang yang dihasilkan oleh metode numerik yang dikembangkan juga diperlihatkan. Untuk menghindari gangguan dari refleksi dan difraksi gelombang, tangki gelombang diatur lebih panjang dan lebar. Juga, simulasi komputasi dilakukan setengah bagian dari domain tangka gelombang dan kapal karena badan kapal yang simetris untuk mengurangi waktu komputasi.

Validasi amplitudo gerak kapal tanker di gelombang, gerak heave dan pitch, dilakukan dengan membandingkan antara hasil komputasi, eksperimen, dan *strip theory* sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6.6 dan 6.7. Sumbu horizontal (x) merupakan rasio (parameter non-dimensi) panjang gelombang λ dan panjang kapal L_{bp} (L). Nilai yang

diwakili oleh lingkaran berwarna putih merupakan hasil komputasi, lingkaran hitam merupakan hasil eksperimen, dan garis hitam merupakan hasil *strip theory*. Ketiga hasil yang diperoleh memiliki kondisi awal yang sama.

Parameter nondimensi gerak *heave* didefinisikan sebagai H_v/H_w , dimana H_v merupakan amplitudo gerak *heave*, H_w merupakan tinggi gelombang, dan K merupakan jumlah gelombang. Sementara, non-

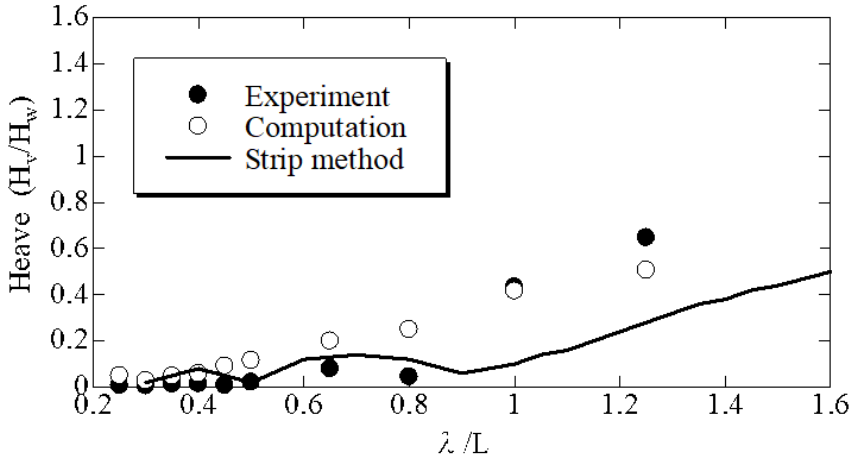


Gambar 6.5 Tangkapan gambar (animasi) gerak kapal tanker di gelombang dari hasil komputasi

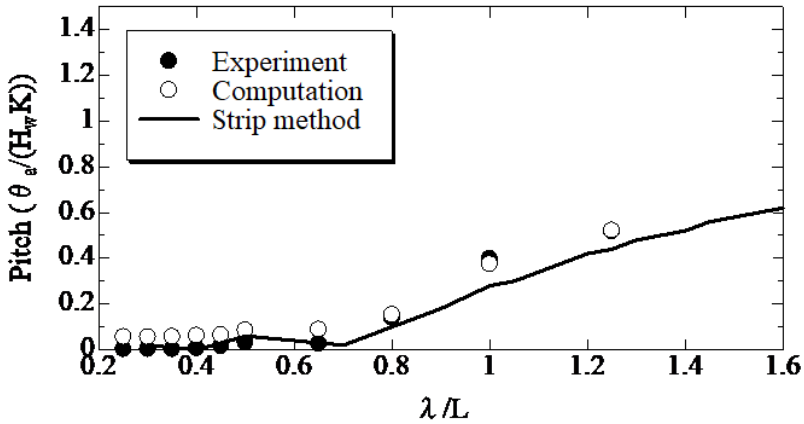
dimensi *pitch* didefinisikan sebagai $\theta/(H_w * 2\pi/\lambda)$ di mana θ merupakan amplitudo gerak *pitch*. Berdasarkan hasil dari ketiga metode tersebut sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6.6, nondimensi gerak *heave* yang dihasilkan dari komputasi memiliki nilai yang hampir sama dengan hasil *strip theory*, sementara nilai yang dihasilkan oleh eksperimen lebih kecil dari hasil kedua metode tersebut pada $\lambda/L \leq 0.4$. Nilai nondimensi gerak *heave* hasil komputasi lebih tinggi dari hasil eksperimen dan *strip theory* pada rentang $0.4 < \lambda/L < 0.1$, dan hasil komputasi sama dengan hasil eksperimen pada $\lambda/L = 1.0$, serta nilai eksperimen memiliki nilai yang tinggi daripada kedua metode tersebut dengan perbedaan yang lebih kecil dibanding dengan hasil komputasi pada $\lambda/L > 1.0$.

Berdasarkan Gambar 6.7, untuk perbandingan nondimensi amplitudo gerak *pitch* $\theta/(H_w * 2\pi/\lambda)$ kapal tanker, hasil komputasi memiliki nilai yang lebih tinggi dari hasil eksperimen dan *strip theory* pada rentang λ/L sama dengan 0.24 sampai 0.65, namun pada $\lambda/L \geq 0.8$ hasil komputasi secara keseluruhan hampir sama dengan hasil eksperimen dan di atas hasil *strip theory*. Secara keseluruhan, hasil komputasi baik gerak *heave* maupun *pitch* memiliki perbedaan yang kecil dengan hasil eksperimen. Selain itu, kecenderungan hasil komputasi untuk setiap kenaikan λ/L hampir sama dengan kecenderungan hasil eksperimen.

Gambar 6.8 memperlihatkan distribusi tekanan air (*water pressure distribution*) yang bekerja di permukaan badan kapal tanker saat mengalami kejadian fenomena bantingan/benturan (*slamming*). Di sini, gaya tekan merupakan distribusi tekanan yang bekerja pada kapal tanker yang direpresentasikan oleh partikel SPH. Berdasarkan Gambar 6.8, tekanan impulsif yang signifikan ekstrem terjadi di daerah haluan dan buritan kapal tanker. Hasil ini menunjukkan bahwa gaya hidrodinamika yang tidak stabil yang bekerja pada par-



Gambar 6.6 Perbandingan nondimensi gerak *heave* kapal tanker di gelombang antara hasil komputasi, eksperimen, dan *strip theory*

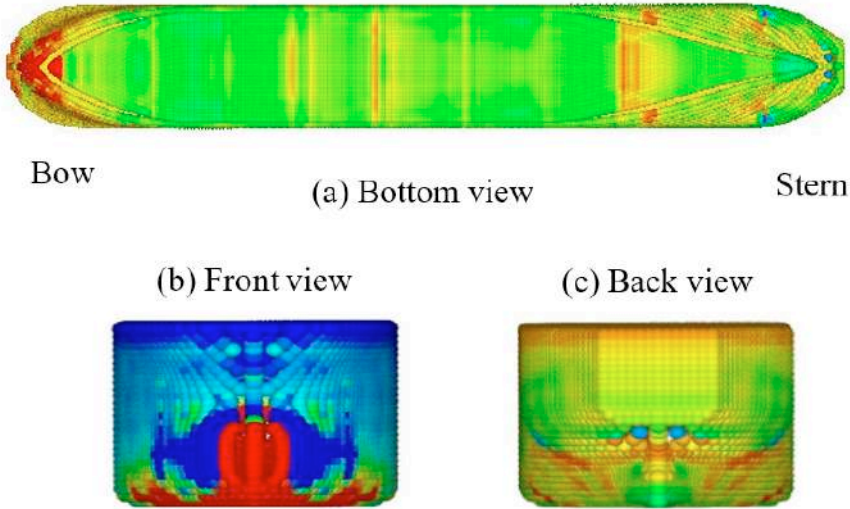


Gambar 6.7 Perbandingan nondimensi gerak *pitch* kapal tanker di gelombang antara hasil komputasi, eksperimen, dan *strip theory*

tikel SPH dapat dihitung dengan menggunakan metode numerik yang dikembangkan ini, sebagaimana juga telah diaplikasi menggunakan metode numerik sebelumnya yang diberikan oleh Mutsuda dkk. [82]. Namun, tekanan impak yang disebabkan oleh kejadian benturan atau bantingan (*slamming*) dengan pecahan gelombang

(*wave breaking*) harus diselidiki lebih lanjut secara eksperimen di masa depan.

Selanjutnya, Gambar 6.9 memperlihatkan tekanan impact dalam satuan waktu di gelombang nonlinear dari hasil komputasi akibat fenomena bantingan atau benturan (*slamming*) yang terjadi pada bagian depan kapal tanker. Tekanan impulsif terjadi secara periodik pada Tipe B. Hal ini dikarenakan permukaan bagian depan (haluan) pada Tipe B tidak memiliki bentuk yang halus dibandingkan dengan Tipe A, sehingga gelombang yang bekerja langsung pada permukaan kapal tanker. Di sisi lain, tekanan impulsif tidak terjadi pada Tipe A yang memiliki bentuk haluan yang agak halus. Pada aplikasi ini, kapal tanker memiliki fleksibilitas yang sangat tinggi untuk setiap bentuk kompleks karena representasi dari kumpulan partikel SPH. Ini berarti bahwa perbedaan antara penurunan tekanan impact bantingan (*slamming impact pressure*) yang tidak stabil akibat perubahan bentuk haluan kapal tanker dapat dievaluasi menggunakan metode yang dikembangkan. Keakuratan tekanan impact (*impact pressure*) akibat bantingan (*slamming*) akan divalidasi di masa depan. Gambar 6.10 memperlihatkan kesalahan volume (*volume error*) fase cair dalam satuan waktu dihasilkan selama proses komputasi. Di sini, kesalahan volume (*volume error*) pada sumbu vertikal merupakan persentase perubahan volume air pada kondisi awal. Kesalahan volume fase cair menunjukkan kurang dari 0.05%, dan rata-ratanya adalah 0.01%. Ini menandakan bahwa konservasi volume menggunakan metode yang dikembangkan ini jauh lebih tinggi dibandingkan dengan skema Euler lainnya. Hal ini dikarenakan kedua jenis partikel Lagrange tersebut, yaitu partikel SPH dan partikel permukaan bebas (*free surface particle*), dapat mengoreksi difusi dan disipasi numerik pada langkah adveksi pada kisi (*grid*) Euler dan berperan penting dalam menjaga volume air.

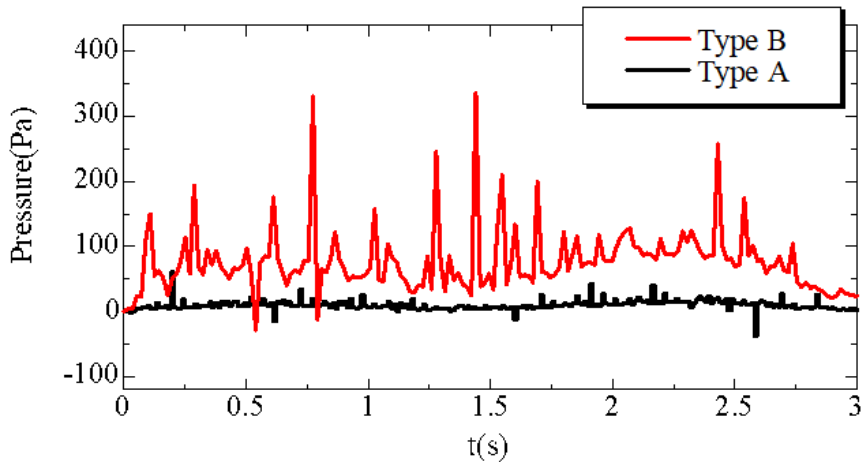


Gambar 6.8 Distribusi tekanan pada permukaan lambung kapal tanker di gelombang

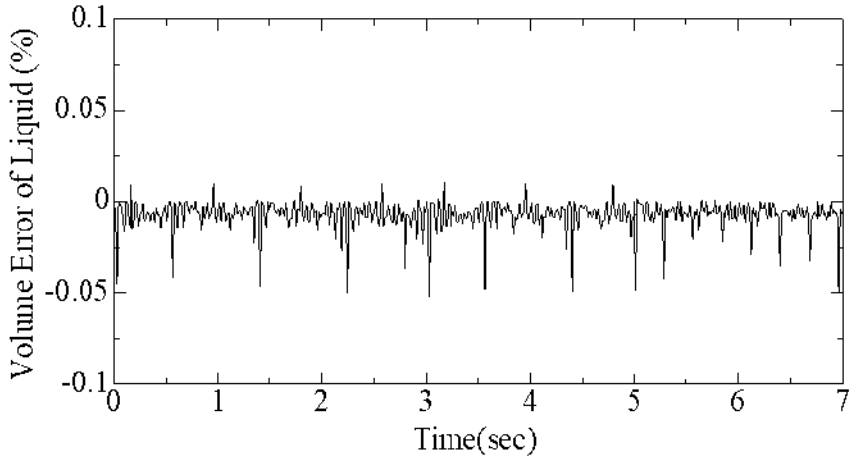
Gambar 6.11 menunjukkan perbandingan tahanan gelombang tambahan (*added wave resistance*) antara hasil numerik yang dikembangkan, eksperimen, dan *strip theory*. Tahanan gelombang tambahan diperoleh dari pengurangan antara tahanan total kapal di gelombang dengan tahanan kapal di air tenang. Untuk pembahasan terkait tahanan gelombang tambahan, tahanan gelombang tambahan dibuat dalam parameter nondimensi yang didefinisikan sebagai $\Delta R / (\rho g (H_w / 2)^2 B^2 / L)$, di mana dinormalisasi dengan tinggi gelombang H_w , panjang kapal L dan lebar kapal B . Sebagaimana ditunjukkan Gambar 6.11, sumbu horizontal (x) merupakan rasio antara panjang gelombang λ dan panjang kapal L . Nilai yang ditandai dengan lingkaran dan segitiga masing-masing merupakan hasil komputasi dan eksperimen di mana lingkaran-lingkaran hitam dan segitiga hitam merupakan hasil eksperimen, sementara lingkaran hitam dan segitiga hitam merupakan hasil komputasi. Selain itu, garis hitam merupakan hasil *strip theory*.

Perbandingan menunjukkan bahwa hasil komputasi lebih tinggi sedikit dari hasil eksperimen pada $0.25 \leq \lambda/L < 0.65$, sementara hasil *strip theory* lebih tinggi dari kedua hasil komputasi maupun eksperimen. Selanjutnya, nilai tahanan gelombang dari hasil komputasi lebih hampir sama dengan hasil eksperimen pada $\lambda/L \geq 0.65$ baik kapal Tipe A dan B, sementara hasil *strip theory* sangat berbeda dibandingkan dengan kedua hasil komputasi dan eksperimen. Berdasarkan pembahasan ini, walaupun perbedaan kecil terjadi antara hasil numerik yang dikembangkan ini dibandingkan dengan hasil eksperimen, hasil numerik (komputasi) secara keseluruhan menunjukkan hasil yang sangat baik dan sesuai dengan hasil eksperimen. Perbedaan hasil yang kecil antara hasil numerik dengan hasil eksperimen disebabkan oleh distorsi lokasi interaksi antara kapal tanker dengan gelombang.

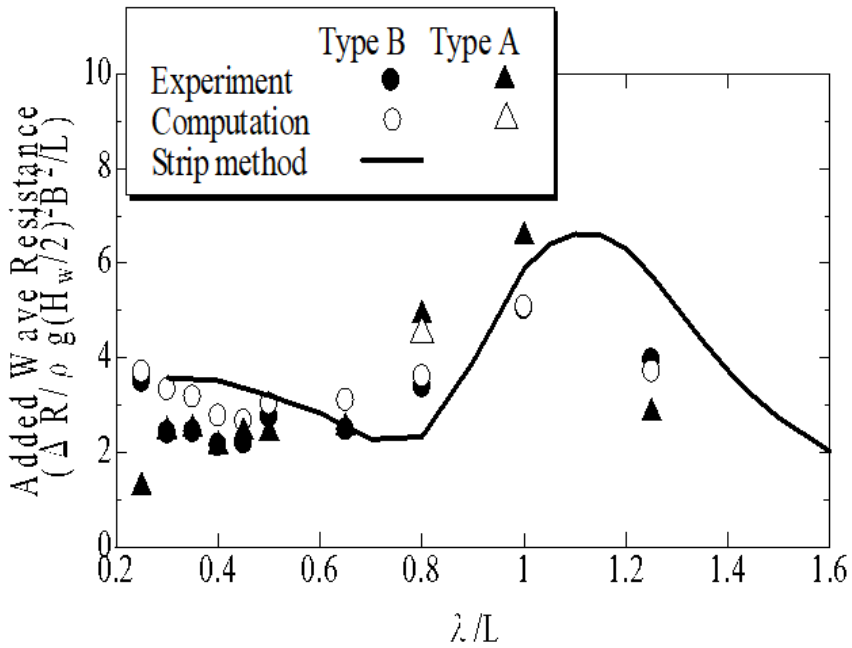
Oleh karena itu prosedur penghalusan (*smoothing*), pengaturan kisi-kisi (*remeshing*), dan pengaturan partikel dan distribusinya (*reseeding*) pada metode numerik yang dikembangkan ini baik di



Gambar 6.9 Hasil komputasi tekanan impact per satuan waktu yang dialami di bagian depan kapal tanker akibat kejadian bantingan (*slamming event*)



Gambar 6.10 Kesalahan volume (*volume error*) pada fase air per satuan waktu selama proses komputasi



Gambar 6.10 Kesalahan volume (*volume error*) pada fase air per satuan waktu selama proses komputasi

badan kapal, di partikel permukaan bebas (*free surface particle*), dan saat interaksi kapal dengan gelombang perlu dikembangkan untuk menghindari masalah tersebut dan untuk menjaga keakuratan hasil numerik yang dikembangkan ini.

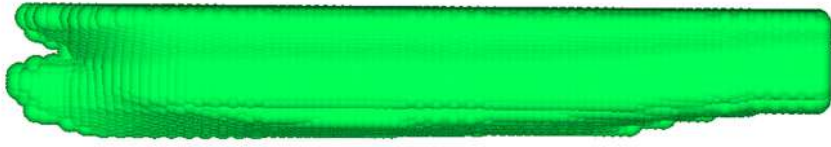
6.3. Aplikasi Pada Gerak Kapal Perikanan

6.3.1. Kondisi Awal Komputasi

Pada sub bab ini, gerak *heave* dan *pitch* kapal perikanan di gelombang reguler disimulasi yang kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil eksperimen pada kondisi yang sama. Gambar 6.12 menunjukkan lambung kapal perikanan yang direpresentasikan oleh sejumlah besar partikel SPH (*SPH particle*).

Tabel 6.3 menyajikan ukuran utama kapal perikanan. Angka Froude Fr dan angka Reynolds Re dinormalisasi dengan kecepatan dan panjang kapal. Sementara, Tabel 6.4 menyajikan kondisi gelombang yang digunakan dalam simulasi komputasi dimana tinggi gelombang reguler yakni $H_w/Lbp = 0.06$ dan panjang gelombang pada rentang $H_w/Lbp = 0.5$ sampai dengan 3.37.

Kecepatan kapal perikanan pada simulasi komputasi telah dipertimbangkan pada $Fn = 0.384$ di kondisi awal. Ukuran kisi (*grid*) ditetapkan sebesar $0.0025 \sim 0.015 Lbp$, dan jari-jari partikel permukaan bebas juga ditetapkan sebesar $0.00125 \sim 0,005 Lbp$. Jumlah total partikel permukaan bebas yang terletak di dekat permukaan bebas yakni 446304. Kemudian, jari-jari partikel SPH sebagai representasi kapal perikanan ditetapkan sebesar $0.00125 Lbp$, dan jumlah partikel secara keseluruhan yakni 25080.



Gambar 6.12 Kapal perikanan direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH

Tabel 6.3 Ukuran utama kapal perikanan, model untuk eksperimen, dan model untuk komputasi

Deskripsi Ukuran	Ukuran Kapal (m)		
	Aktual	Model eksperimen	Model Komputasi
Panjang keseluruhan/ <i>Loa</i>	26.60	1.928	1.00
Panjang antara garis tegak/ <i>Lbp</i>	20.75	1.50	0.748
Panjang garis air/ <i>Lwl</i>	22.20	1.605	0.847
Lebar/ <i>B</i>	4.10	0.296	0.156
Sarat/ <i>d</i>	1.70	0.123	0.07
Koefisien bentuk/ <i>Cb</i>		0.921	
Angka Froude <i>Fn</i>		0.384	
Angka Reynolds <i>Re</i>		2.8x10 ⁶	

Tabel 6.4 Kondisi gelombang

λ/L	Panjang Gelombang (m)			Periode Gelombang (detik)		
	Aktual	Eksp.	Komp.	Aktual	Eksp.	Komp.
0.5	10.375	0.75	0.39	2.579	0.693	0.5
0.72	14.94	1.08	0.56	3.095	0.832	0.6
0.94	19.505	1.41	0.73	3.536	0.951	0.68
1.3	26.975	1.95	1	4.158	1.118	0.8
1.76	36.520	2.64	1.4	4.838	1.301	0.95
2.25	46.688	3.375	1.75	5.471	1.471	1.06
2.66	55.195	3.99	2	5.948	1.599	1.13
3.3	69.92	5.05	-	6.695	1.80	-

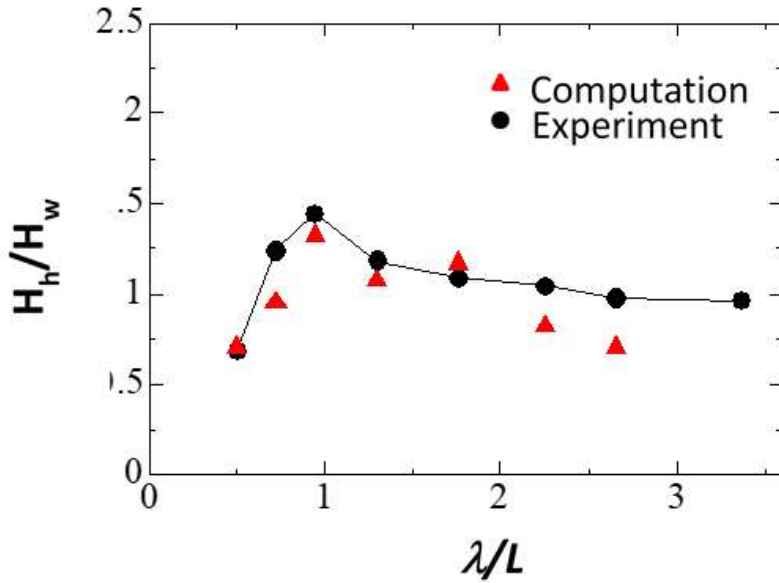
6.3.2. Hasil dan Pembahasan

Gambar 6.13 dan 6.14 menunjukkan perbandingan parameter nondimensi gerak heave dan pitch antara hasil numerik (komputasi) dan eksperimen. Nondimensi gerak heave didefinisikan sebagai H_v/H_w dimana H_v merupakan amplitudo gerak heave dan H_w merupakan tinggi gelombang. Sementara, nondimensi gerak pitch didefinisikan sebagai $\theta/(H_w * 2\pi/\lambda)$ dimana θ merupakan amplitudo gerak pitch. Pada gambar-gambar tersebut, sumbu horizontal merupakan rasio antara panjang gelombang untuk panjang kapal (λ/L). Tanda segitiga merah dan tanda lingkaran hitam masing-masing merupakan hasil numerik (komputasi) dan hasil eksperimen. Dari kedua gambar tersebut, amplitudo gerak heave pada $\lambda/L = 1.76$ menunjukkan bahwa hasil numerik (komputasi) lebih besar dari hasil eksperimen, demikian halnya dengan amplitudo gerak pitch pada $\lambda/L = 2.25$ juga lebih besar dari hasil eksperimen. Selain itu, hasil numerik (komputasi) amplitudo gerak heave dan pitch yang lain memiliki hasil yang kurang dari hasil eksperimen. Namun demikian, secara keseluruhan, hasil numerik memperlihatkan kecenderungan yang konsisten dengan hasil eksperimen untuk semua rasio λ/L . Juga, hasil numerik memperlihatkan nilai yang sangat dekat dengan hasil eksperimen. Perbedaan yang telah diperoleh akan diperbaiki ke depan untuk lebih meningkatkan keakurasian hasil metode numerik yang dikembangkan ini dengan cara meningkatkan prosedur koreksi kesalahan.

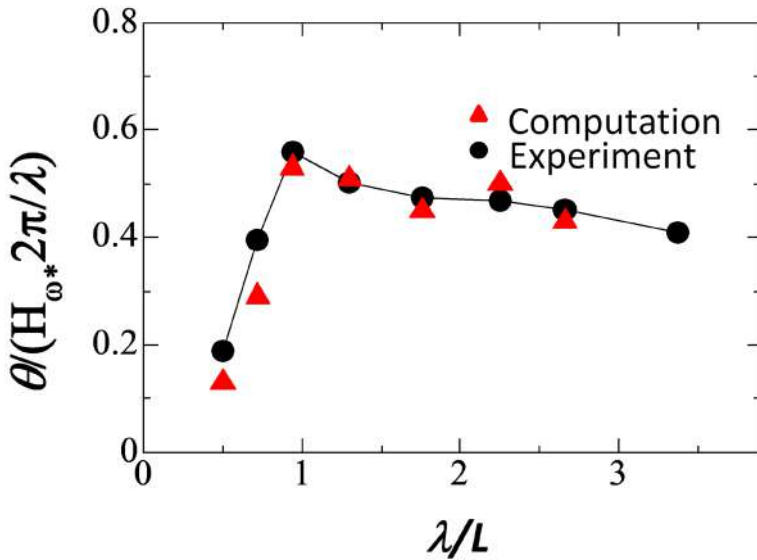
6.4. Aplikasi Pada Gerak Kapal Feri Penumpang Cepat

6.4.1. Kondisi Awal Komputasi

Kecepatan kapal feri penumpang cepat dipertimbangkan yakni dalam angka Froude Fn 0.45 dan juga angka Reynolds Re sekitar 1.4×10^6 untuk kondisi awal komputasi. Bentuk lambung kapal feri pe-



Gambar 6.13 Perbandingan hasil parameter nondimensi amplitudo gerak *heave* antara hasil komputasi dan eksperimen

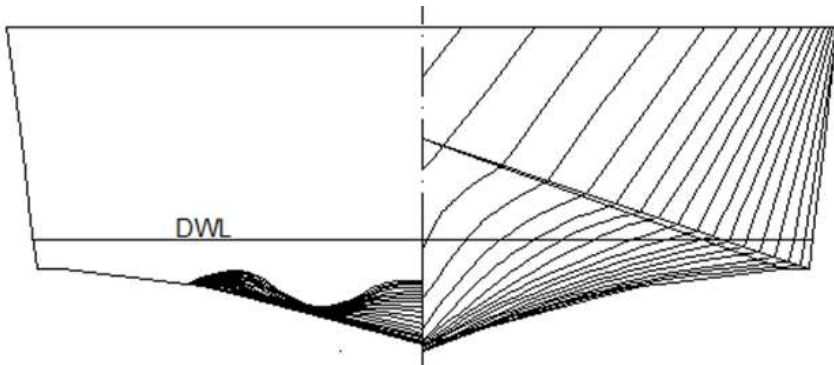


Gambar 6.14 Perbandingan hasil parameter nondimensi amplitudo gerak *pitch* antar hasil komputasi dan eksperimen

numpang cepat tersebut merupakan jenis lambung tunggal (*monohull*). Ukuran utama kapal disajikan pada Tabel 6.5. Sementara, rencana garis badan kapal (*body lines plan*) diperlihatkan pada Gambar 6.15.

Tabel 6.5 Ukuran utama kapal dan model kapal feri penumpang cepat

Deskripsi Ukuran	Ukuran (m)	
	Aktual	Model
Panjang keseluruhan/ <i>Loa</i>	45	1.5
Lebar/ <i>B</i>	9.6	0.3
Tinggi/ <i>H</i>	3.5	0.116
Sarat/ <i>T</i> (DWL)	1.2	0.04



Gambar 6.15 Rencana garis badan kapal feri penumpang cepat

Kondisi gelombang reguler yang diatur pada kondisi awal komputasi, tinggi gelombang yakni $H_w/Lbp = 0.03$ dengan rentang panjang gelombang (dalam rasio panjang gelombang dan panjang kapal) yakni $\lambda/Lbp = 0.5$ sampai dengan 2.0 sehingga terdapat sepuluh kasus berdasarkan λ/Lbp yang dilakukan di simulasi komputasi ini. Ukuran kisi, jari-jari partikel permukaan bebas dan partikel SPH telah disamakan dengan ukuran yang digunakan pada pengaplikasian gerak kapal perikanan yang telah dijelaskan sebelumnya. Jumlah total partikel permukaan bebas (*free surface particle*) yang diletakkan hanya di permukaan bebas (*free surface*) yakni 542000. Untuk mendapatkan beberapa jum-

lah periode gerakan kapal fery di gelombang, domain komputasi dibuat relatif besar dan panjang untuk menghindari gangguan refleksi dan difraksi gelombang. Sehingga, tiga sampai enam periode gelombang diterapkan untuk menginvestigasi gerak kapal feri. Kondisi batas pada domain komputasi secara periodik baik di hulu maupun di hilir hanya diterapkan oleh kecepatan gelombang dan gerakan permukaan bebas untuk mengurangi biaya komputasi. Jumlah total partikel SPH yang merepresentasikan badan kapal feri yakni 58610.

6.4.2. Metode *Strip Theory*

Pada sub bab ini, metode *strip theory* akan dijelaskan, dan metode ini akan digunakan dalam menghitung gerak kapal feri penumpang cepat. Hasil perhitungan menggunakan metode ini akan dibandingkan dengan hasil metode numerik yang dikembangkan. Metode *strip theory* juga telah dikembangkan secara numerik. Penjelasan metode *strip theory* yang dikembangkan secara numerik sebagai berikut di bawah ini.

Gerak kapal yang didiskusikan pada bagian ini hanya berfokus pada gerak berpasangan *heave* dan *pitch* (*coupled heave and pitch motions*) menggunakan metode *strip theory* di mana bahasan terkait dengan metode ini mengacu pada beberapa referensi [95, 96, 97, dan 98]. Dikaitkan dengan hukum Newton (*Newton law*), pada setiap kondisi semua gaya vertikal yang bekerja di kapal berada dalam kesetimbangan dinamis. Oleh karena itu persamaan *heave* dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$m\ddot{z} = \sum F \tag{5.2}$$

dan gerak *pitch* diekspresikan sebagai berikut:

$$I\ddot{\theta} = \sum M \tag{5.3}$$

dimana m merupakan masa kapal, \ddot{z} merupakan percepatan gerak *heave*, $\sum F$ merupakan jumlah dari berbagai gaya fluida yang bekerja di kapal yakni gaya hidrodinamika secara vertikal (*vertical hydrodynamic forces*) serta gaya eksitasi gelombang (*wave excitation force*), $\ddot{\theta}$ merupakan percepatan gerak *pitch*, I merupakan momen inersia gerak *pitch*, dan $\sum M$ merupakan jumlah momen yang bekerja di kapal disebabkan gerakan relatif antara kapal dan gelombang.

Fluktuasi permukaan air akan menyebabkan adanya gaya pengganggu yang terus menerus bekerja pada badan kapal di mana dikenal sebagai gaya eksitasi (*exciting force*). Nilai gaya eksitasi ini sama dengan jumlah percepatan, kecepatan, dan posisi antara bagian-bagian (*strip*) dan permukaan air dikalikan dengan konstanta masing-masing, di mana persamaan dapat diberikan sebagai berikut:

$$m\ddot{z} = F = a_z(-\ddot{z} + \ddot{\xi}) + (-\dot{z} + \dot{\xi}) + c(-z + \xi) \quad 5.4$$

$$m\ddot{z} + a_z(-\ddot{z} + \ddot{\xi}) + b(-\dot{z} + \dot{\xi}) + c(-z + \xi) = 0 \quad 5.5$$

$$(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz = a_z\ddot{\xi} + b\dot{\xi} + c\xi \quad 5.6$$

dimana a_z merupakan massa tambahan (*added mass*), b merupakan koefisien gaya redaman (*damping force coefficient*), c merupakan koefisien gaya pengembali (*restoring force coefficient*), z merupakan posisi vertikal, dan \dot{z} merupakan kecepatan vertikal. Sementara, $\ddot{\xi}$, $\dot{\xi}$, dan ξ masing-masing merupakan akselerasi absolut, kecepatan absolut, dan posisi absolut permukaan air.

Dari persamaan dasar di atas, dengan menggunakan beberapa asumsi yang digunakan dalam mengintegrasikan persamaan-persamaan-

an tersebut, persamaan umum gerak berpasangan *heave* dan *pitch* dapat diberikan sebagai berikut:

$$(m + a_z)\ddot{z} + b\dot{z} + cz + d\ddot{\theta} + e\dot{\theta} + h\theta = F(t) \quad 5.7$$

Di mana d , e , dan h merupakan komponen untuk gerak berpasangan (*coupling terms*). $\dot{\theta}$ dan θ masing-masing merupakan besaran yang sesuai untuk gerak *pitch* yakni kecepatan dan posisi.

Selanjutnya, solusi akhir dari persamaan gerak, setelah amplitudo gerak dan perbedaan fase diperoleh untuk \bar{z} and $\bar{\theta}$, diberikan oleh persamaan berikut ini:

$$\bar{z} = z_a e^{i\delta} = z_a (\cos \delta + i \sin \delta) \quad 5.8$$

$$\bar{\theta} = \theta_a e^{i\varepsilon} = \theta_a (\cos \varepsilon + i \sin \varepsilon) \quad 5.9$$

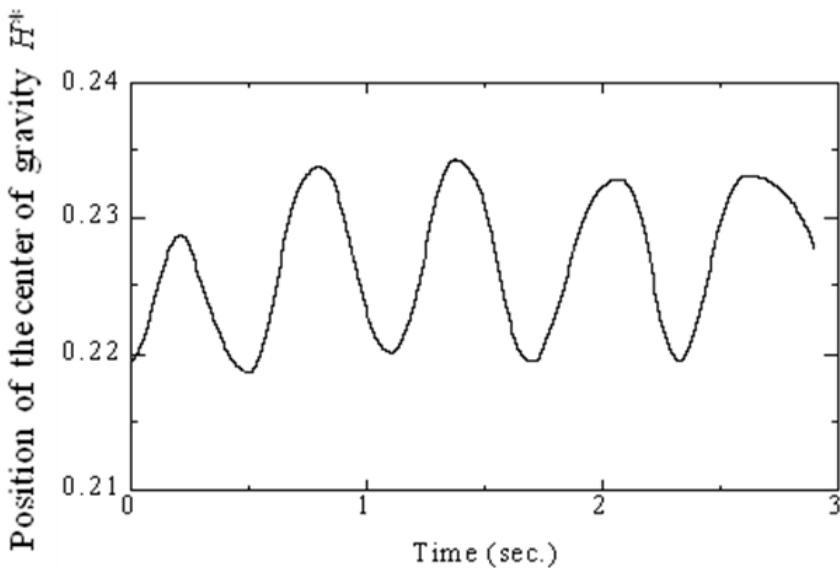
Di mana z_a dan δ masing-masing merupakan amplitudo gerak vertikal (*heave*) dan fase lag. Kemudian, θ_a dan ε merupakan besaran yang sesuai untuk gerak *pitch* yakni masing-masing amplitudo *pitch* dan fase lag untuk gerak *pitch*.

6.4.3. Hasil dan Pembahasan

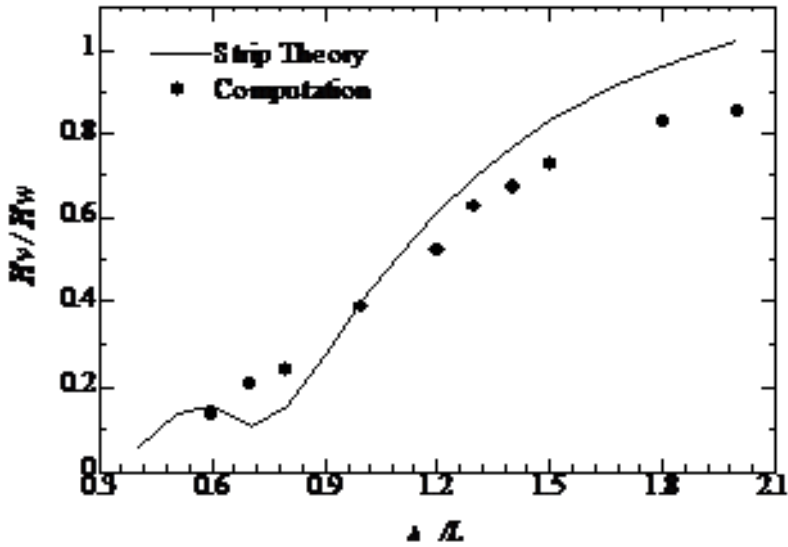
Aplikasi metode numerik yang dikembangkan ini pada gerak kapal feri penumpang cepat di gelombang reguler telah dilakukan dan demikian halnya dengan investigasi gerak. Seperti disebutkan pada Bab 2 sebelumnya, gerakan tiga dimensi (3D) kapal feri penumpang cepat dapat dideskripsikan sebagai gerak translasi dan rotasi pusat gravitasi (titik berat) kapal feri menggunakan metode *quaternion*.

Gambar 6.16 merupakan salah satu contoh amplitudo gerak heave per satuan waktu pada $Fn = 0.45$, $\lambda/L = 1.4$, dan tinggi gelombang $H_w = 0.03$ meter. Terlihat bahwa hasil numerik cukup stabil selama proses simulasi komputasi tanpa adanya pengaruh gangguan dan refleksi pada kondisi batas secara periodik (*periodic boundary condition*).

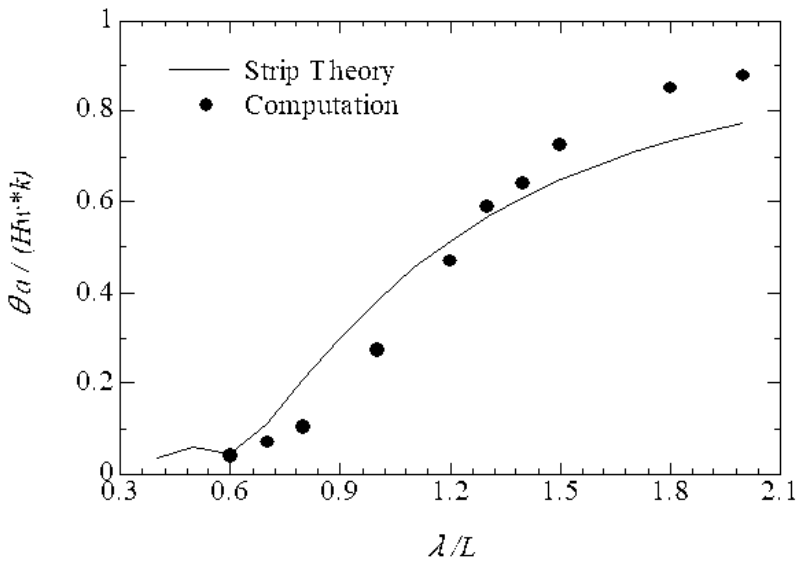
Gambar 6.17 dan 6.18 memperlihatkan perbandingan gerak heave dan pitch antara hasil numerik dan *strip theory*. Kecenderungan hasil numerik terlihat konsisten dengan hasil strip theory sepanjang λ/L . Semua hasil numerik baik gerak heave dan pitch terlihat memiliki perbedaan yang kecil dibandingkan dengan hasil strip theory. Parameter gerak yang digunakan dalam pembahasan ini merupakan parameter nondimensi, untuk gerak heave, nondimensi amplitudo gerak heave dari hasil numerik lebih tinggi dari hasil strip theory pada $\lambda/L = 0.7$ sampai dengan 0.9, sementara terlihat lebih rendah pada $\lambda/L = 1.0$ sampai dengan 2.0. Selain itu, untuk gerak pitch, nondimensi amplitu-



Gambar 6.16 Amplitudo gerak heave kapal feri penumpang cepat per satuan waktu pada kondisi $Fr = 0.45$, $\lambda/L = 1.4$, dan $H_w = 0.03$



Gambar 6.17 Perbandingan nondimensi gerak *heave* antara hasil numerik dan *strip theory* pada kondisi $Fr = 0.45$ dan $H_w = 0.03$



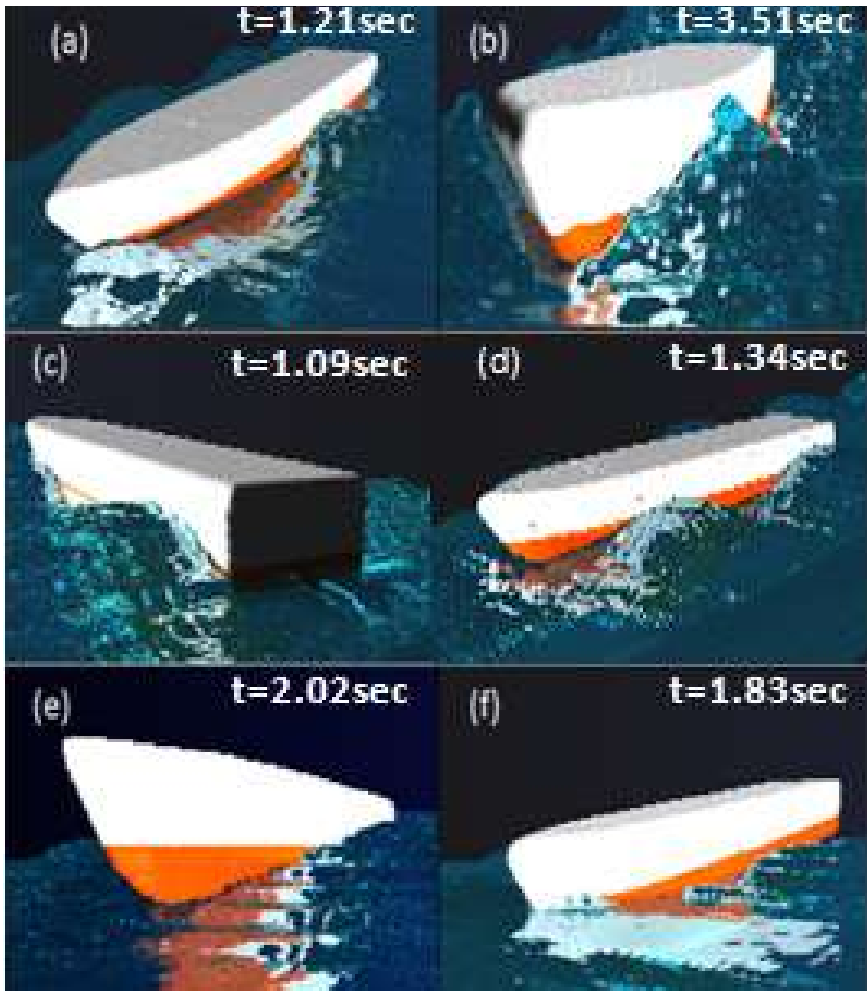
Gambar 6.18 Perbandingan nondimensi gerak *pitch* antara hasil numerik dan *strip theory* pada kondisi $Fr = 0.45$ dan $H_w = 0.03$

do gerak pitch dari hasil numerik lebih rendah dari hasil strip theory pada $\lambda/L = 0.7$ sampai dengan 1.2, sebaliknya lebih tinggi pada $\lambda/L = 1.3$ sampai dengan 2.0. Perbedaan-perbedaan kecil yang diperoleh akan kemudian diperbaiki ke masa depan dengan cara meningkatkan prosedur koreksi kesalahan metode numerik untuk menjaga dan meningkatkan akurasi metode numerik yang dikembangkan ini.

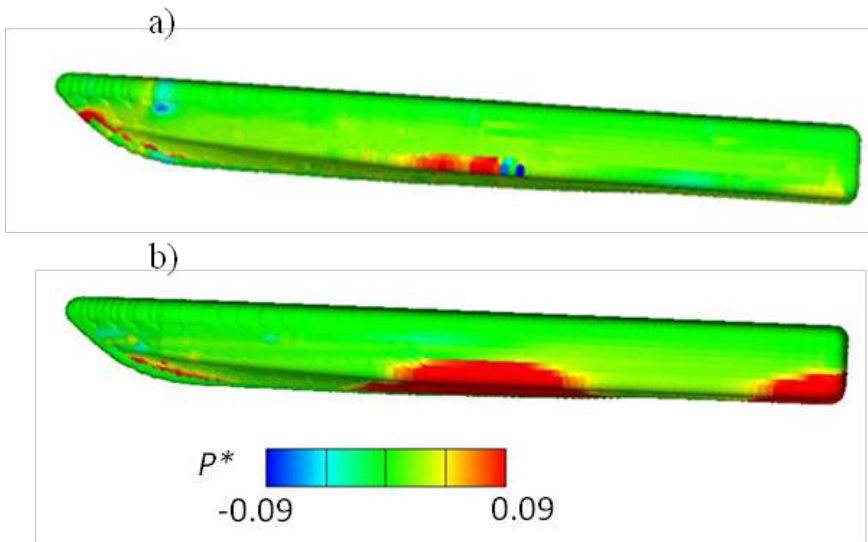
Selain itu, dari hasil numerik, beberapa fenomena gerak feri penumpang cepat berkecepatan tinggi akibat interaksi kapal dan gelombang diperoleh sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6.19 (a), (b) dan (c). Dari gambar tersebut, beberapa fenomena nonlinear diperlihatkan antara lain seperti gelombang pecah (*breaking wave*) dan percikan air (*water splashing*) di sekitar lambung kapal. Selain itu, fenomena bantingan pada bagian bawah dan haluan kapal feri (*bottom and bow slamming*) di gelombang telah terjadi pada simulasi gerak kapal ini.

Gaya hidrodinamik yang tidak stabil (*unsteady hydrodynamic force*) atau tekanan impak yang bekerja pada lambung kapal, sebagai salah satu contoh pada kasus $H_w = 0.03$, $\lambda/L = 0.5$, diperlihatkan pada Gambar 6.20. Berdasarkan gambar tersebut, parameter nondimensi tekanan P^* didefinisikan sebagai $P/(1/2\rho v^2)$. Haluan kapal feri memiliki posisi yang berbeda secara relatif terhadap permukaan air selama kapal feri bergerak dalam gelombang reguler sebagaimana juga diperlihatkan pada Gambar 6.19 (e dan f). Haluan kapal feri mengalami tekanan impak sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.20 (a) saat haluan kapal mencapai puncak gelombang. Sebaliknya, sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 6.20 (b), tekanan impak akibat kejadian bantingan (*slamming event*) bekerja di bagian tengah dan buritan kapal feri, dan tekanan impak meningkat setelah puncak gelombang dipropagasi oleh haluan kapal feri. Keakuratan tekanan impak yang bekerja pada kapal akibat kejadian bantingan (*slamming event*) akan divalidasi lebih lanjut ke depan dengan hasil eksperimen sebagai salah

satu upaya meningkatkan akurasi metode numerik yang dikembangkan ini.



Gambar 6.19 Tangkapan gambar gerak kapal feri penumpang cepat di gelombang reguler pada kondisi $Fr = 0.45$, $H_w = 0.03$, dan $\lambda/L = 0.5$



Gambar 6.20 Tekanan impak yang bekerja pada lambung kapal feri penumpang cepat dengan adanya kejadian bantingan (*slamming event*) pada kondisi $Fr = 0.45$, $H_w = 0.03$, dan $\lambda/L = 0.5$

#7

Aplikasi Pada Perilaku Hidroelastis

Metode numerik yang dikembangkan telah digunakan untuk memprediksi tahanan dan gerak kapal dalam gelombang reguler sebagaimana telah didiskusikan pada Bab 5 dan 6. Pada bab ini, aplikasi metode numerik yang dikembangkan ini diperluas untuk dapat menginvestigasi perilaku hidroelastisitas pada bangunan apung. Sehingga, aplikasi metode numerik yang dikembangkan ini diarahkan dengan tujuan untuk memperoleh interpretasi-interpretasi hidroelastisitas kapal akibat dampak benturan (*slamming impact*). Perilaku hidroelastisitas pada bangunan apung yang diselidiki akan terkait dengan perilaku hidrodinamika. Pada penjelasan berikut di bawah ini, kajian tentang perilaku hidroelas-

tisitas yang terkait dengan perilaku hidrodinamika benda terapung dibagi menjadi dua tahapan.

Kajian pertama ditujukan untuk memperoleh interpretasi-interpretasi pengaruh hidroelastisitas beberapa model apung antara lain model atau benda berbentuk silinder elastis, model berbentuk persegi panjang elastis, dan model kapal yang memiliki lambung elastis. Selain, investigasi perilaku hidroelastisitas dilakukan dengan menggunakan metode numerik yang dikembangkan, eksperimen sesuai dengan parameter yang digunakan di metode numerik juga dilaksanakan di tangki gelombang (wave tank) milik Hiroshima University. Penjelasan terkait eksperimen telah dijelaskan secara rinci pada Bab 4.

Kajian kedua atau selanjutnya, perilaku hidroelastisitas kapal yang bergerak di gelombang akan diinvestigasi secara numerik. Namun, investigasi secara eksperimen perilaku hidroelastisitas kapal yang bergerak di gelombang akan dilakukan di masa depan dan ini merupakan upaya kami dalam rangka memvalidasi hasil numerik yang dikembangkan. Kajian hidroelastisitas kapal menjadi studi yang berkembang saat ini dan ke masa depan. Oleh karena itu, metode numerik yang dikembangkan ini sangat memungkinkan selalu dikembangkan untuk diaplikasikan lebih dalam lagi terkait hidroelastisitas kapal dan menghasilkan interpretasi-interpretasi yang lebih akurat lagi.

7.1. Aplikasi pada *Water Entry* dengan *Splashing*

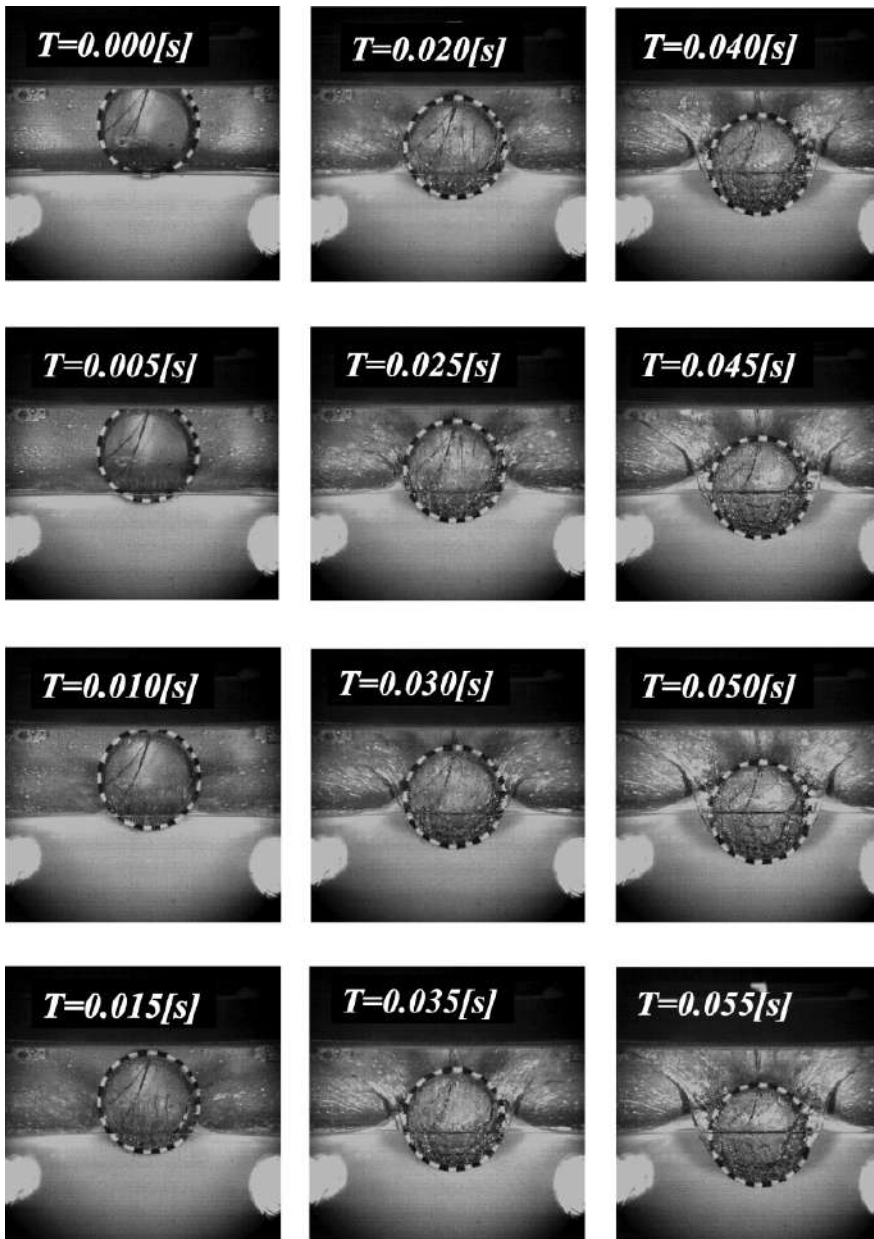
7.1.1. Benda Apung Silinder Elastis

Benda apung berbentuk silinder elastis yang terbuat dari plastik *polyvinylchloride* sebagai model untuk eksperimen telah diuji sesuai dengan kasus *water entry* (masuk ke dalam air) dengan *splashing* (percikan air), dan hasilnya akan digunakan untuk memvalidasi hasil metode numerik yang dikembangkan. Pada sub bab 4.3.1, model fisik dan peng-

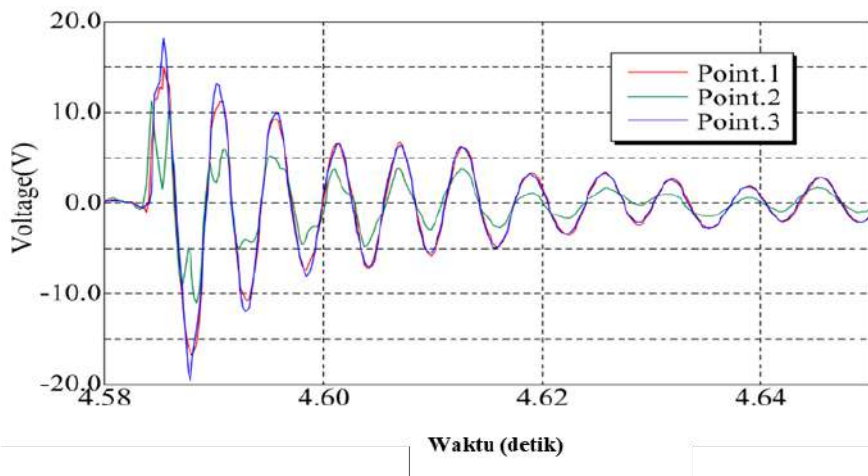
aturan eksperimen (*experimental set-up*) untuk benda apung silinder elastis telah dibahas secara rinci. Gambar 7.1 menunjukkan tangkapan gambar dari proses benda masuk ke dalam air (*water entry*) yang diambil dari kamera berkecepatan tinggi pada saat eksperimen. Gambar 7.2 memperlihatkan regangan (*strain*) per satuan waktu yang terjadi pada permukaan bagian dalam benda silinder elastis. Regangan yang terjadi merupakan osilasi redaman yang sesuai dengan frekuensi natural benda silinder elastis yang terendam. Spektrum frekuensi regangan selama proses benda silinder elastis masuk ke dalam air ditunjukkan pada Gambar 7.3. Pada eksperimen ini, frekuensi dominan terjadi di sekitar 175Hz.

Sementara investigasi secara numerik, proses masuknya benda silinder elastis dua dimensi (2D) akan disimulasi secara komputasi dengan kondisi awal komputasi untuk benda tersebut diilustrasikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.4. Model silinder elastis secara numerik terdiri dari partikel SPH dengan jumlah secara keseluruhan sebanyak 1885 dan jari-jari partikel 0.31 mm. Partikel permukaan bebas (*free surface particle*) yang diletakkan di permukaan bebas dengan jumlah secara keseluruhan 7224 dan jari-jari partikel 0.75 mm. Ukuran kisi yakni 3 mm dan jumlah keseluruhan kisi-kisi yakni 120000 untuk dua dimensi (2D). Titik pengukuran pada model silinder elastis sebanyak 12 titik (mulai Pt.1 sampai dengan Pt.12) dan terletak di permukaan bagian dalam model silinder elastis sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.4.

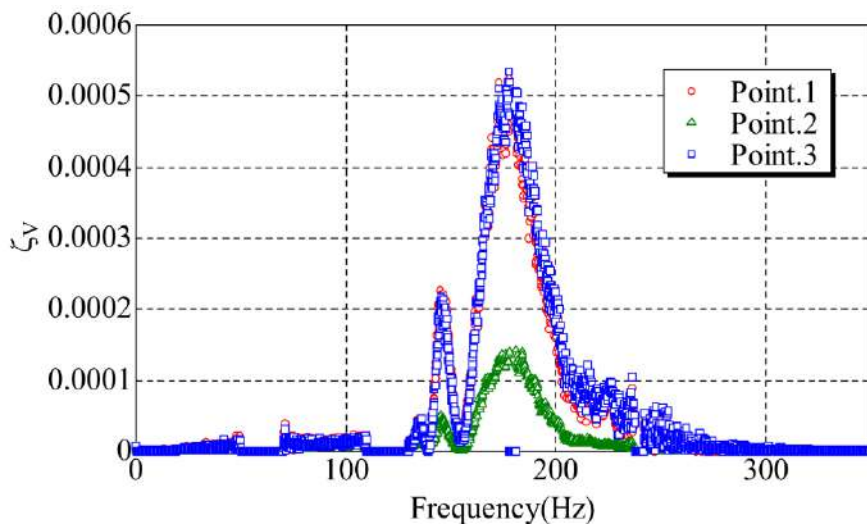
Gambar 7.5 memperlihatkan kondisi proses model silinder elastis masuk ke dalam air tenang. Pada gambar tersebut, percikan air (*water splashing*) sangat jelas terlihat yang berasal dari lapisan tipis antara model silinder elastis dan air di mana semakin dalam model silinder elastis masuk ke dalam air, percikan air semakin besar. Juga, hal ini dapat dibandingkan secara visual kecenderungan percikan air (*water*



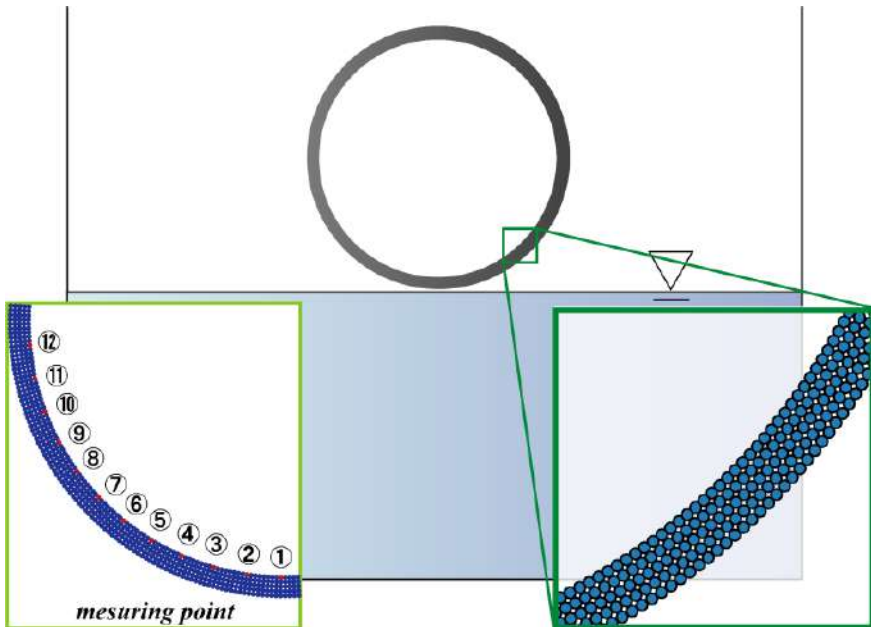
Gambar 7.1 Tangkapan gambar benda elastis berbentuk silinder elastis selama proses eksperimen menggunakan kamera berkecepatan tinggi



Gambar 7.2 Regangan per satuan waktu yang terjadi pada bagian dalam benda silinder elastis selama proses eksperimen



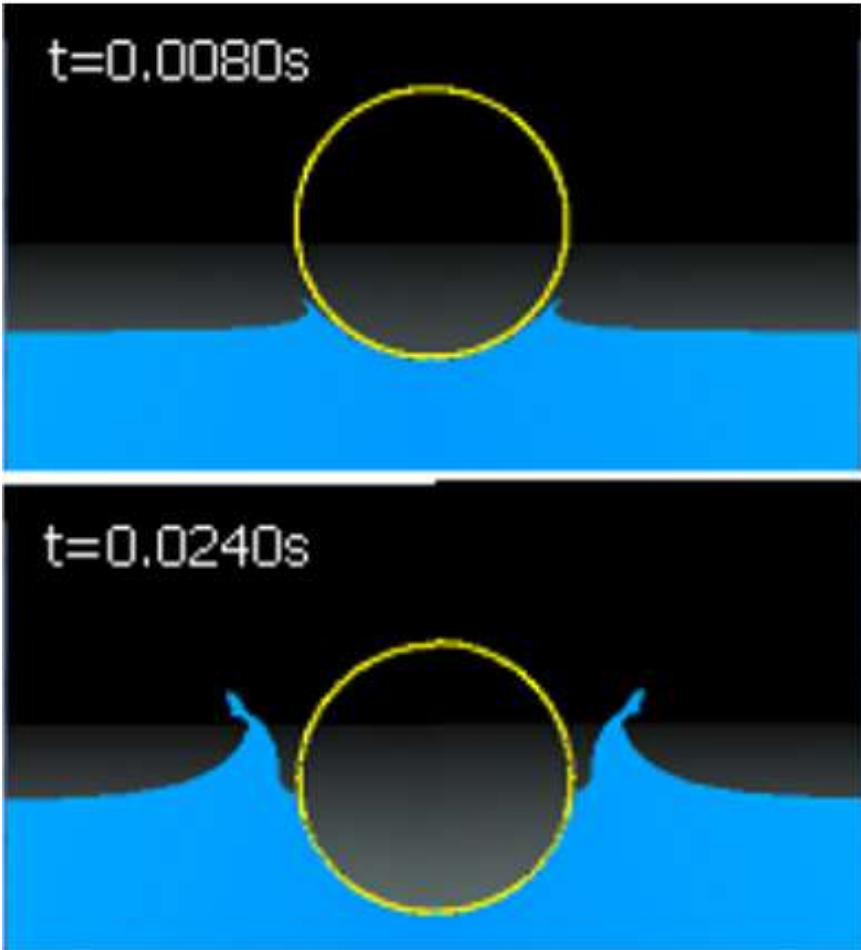
Gambar 7.3 Frekuensi dominan regangan dari hasil eksperimen



Gambar 7.4 Kondisi awal model silinder elastis yang terdiri dari sejumlah partikel SPH dan titik pengukuran di bagian dalam model

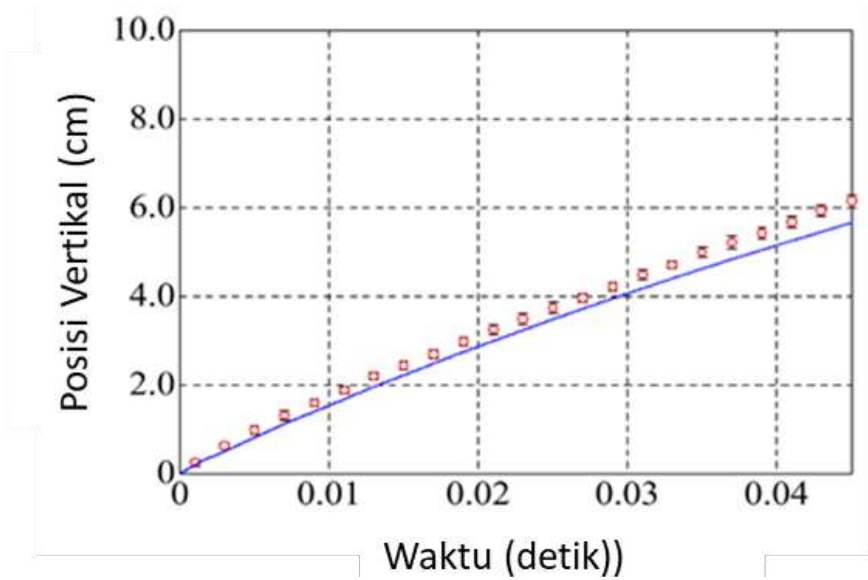
splashing) antara hasil numerik dan hasil eksperimen sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.1.

Selanjutnya, Gambar 7.6 memperlihatkan perbandingan posisi vertikal benda silinder elastis antara hasil eksperimen dan numerik di mana hasil perbandingan menunjukkan perbedaan yang sangat kecil. Gambar 7.7 memperlihatkan regangan per satuan waktu dari hasil numerik pada permukaan dalam model silinder elastis selama proses masuk ke dalam air. Frekuensi yang dominan ditunjukkan pada Gambar 7.8 di mana besarnya sekitar 180Hz di mana memberi perbedaan sebesar 5Hz dengan hasil eksperimen sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.3. Selain itu, regangan internal pada model silinder elastis selama proses masuk ke dalam air juga diperlihatkan pada Gambar. 7.9. Regangan internal yang dialami oleh model silinder elastis selama proses masuk ke dalam air sangat cepat dan singkat yang terjadi dalam ruang dan waktu.

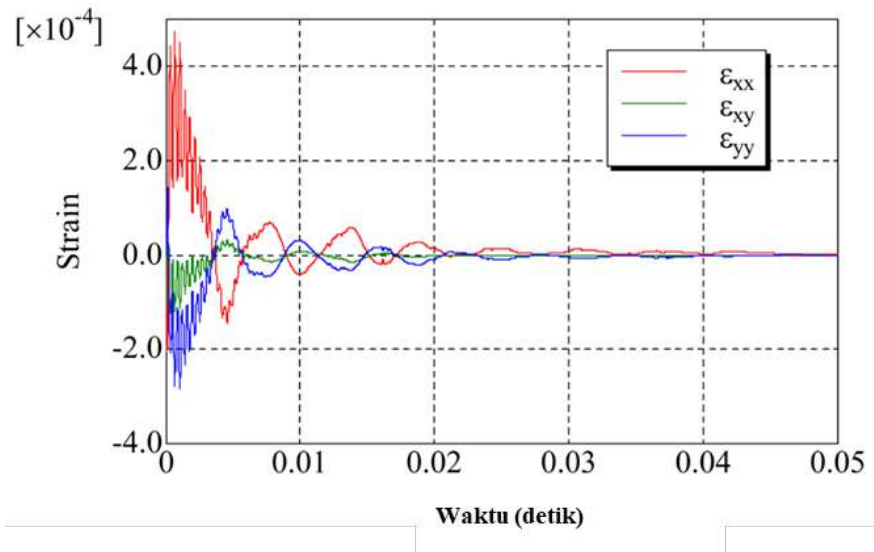


Gambar 7.5 Proses masuk ke dalam air model silinder elastis dari hasil numerik

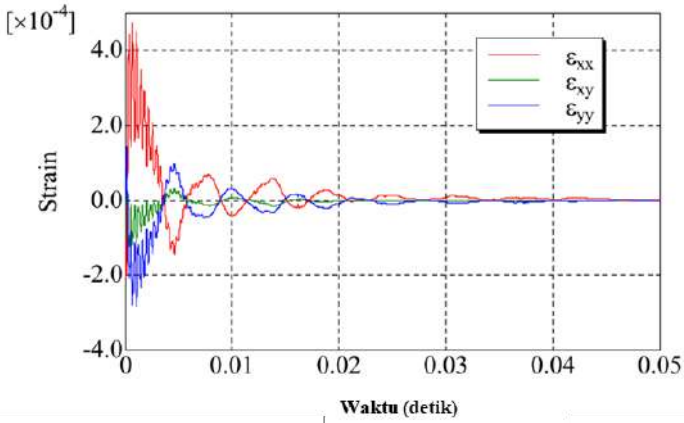
Sebagaimana dengan pembahasan di atas, hasil dari metode numerik yang dikembangkan secara keseluruhan sangat sesuai dengan hasil eksperimen. Hal ini menandakan bahwa metode numerik yang dikembangkan ini mampu diaplikasikan pada benda apung elastis yang berbentuk silinder dan memiliki hasil yang akurat.



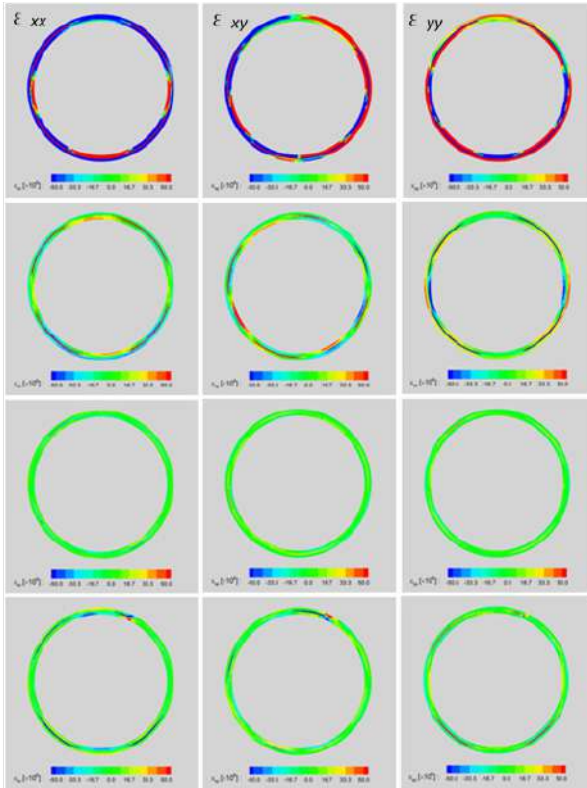
Gambar 7.6 Perbandingan posisi vertikal benda silinder elastis selama proses masuk ke dalam air antara hasil numerik dan eksperimen



Gambar 7.6 Perbandingan posisi vertikal benda silinder elastis selama proses masuk ke dalam air antara hasil numerik dan eksperimen



Gambar 7.8 Frekuensi dominan regangan dari hasil numerik



Gambar 7.9 Bidang regangan internal pada model silinder elastis selama proses masuknya ke dalam air

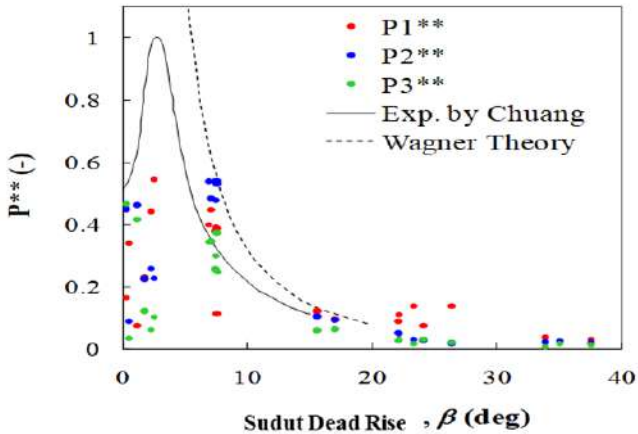
7.1.2. Benda Persegi Panjang Elastis

Untuk memperoleh interpretasi hubungan antara tekanan impulsif dan deformasi dari benda apung elastis, benda apung elastis yang akan digunakan pada eksperimen dan komputasi yakni berbentuk persegi panjang dan terbuat dari bahan akrilik. Pada sub bab 4.3.2, model fisik dan pengaturan eksperimen (*experimental set-up*) untuk benda apung persegi panjang (*rectangular*) elastis telah dibahas secara rinci. Hasil eksperimen terkait dengan tekanan impact (*impact pressure*) benda apung akrilik akan dikonfirmasi dengan hasil eksperimen yang diberikan oleh Chuang S.L. [69] seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.10. Pada eksperimen Chuang S.L. [69], benda apung yang digunakan yakni bersifat kaku (*solid*). Nondimensi tekanan impact maksimum P^{**} didefinisikan sebagai parameter standar yang berkaitan dengan sensor piezoelektrik (*piezoelectric sensor*). Pada Gambar 7.10, P1 yang ditandai dengan titik berwarna merah adalah titik pengukuran terletak di bagian bawah benda apung akrilik, P2 merupakan titik pengukuran diletakkan pada tengah di bagian bawah benda apung akrilik dan ditandai dengan titik berwarna biru, dan P3 merupakan titik pengukuran dengan posisi paling atas di bawah benda apung akrilik dan ditandai dengan titik berwarna hijau sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.16 dan penjelasan ini telah diberikan juga pada sub bab 4.3.2.

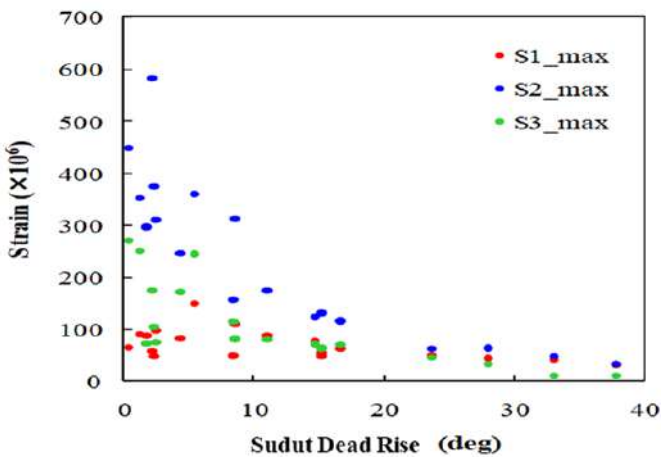
Berdasarkan Gambar 7.10, tekanan maksimum meningkat seiring menurunnya sudut *deadrise* β benda apung persegi panjang, dan tekanan impact secara tiba-tiba mengalami penurunan di sekitar sudut *deadrise* $\beta = 0$. Sebagaimana hasil eksperimen yang telah diperoleh, kecenderungan hasil eksperimen yang dilakukan telah menunjukkan hasil yang konsisten dengan hasil eksperimen yang diberikan oleh Chuang S.L. [69].

Pada Gambar 7.11, regangan yang diukur pada bagian dalam benda apung persegi panjang elastis cenderung mengalami penurunan

an seiring peningkatan sudut *deadrise* β . Selain itu, gambar tersebut menunjukkan bahwa tekanan impulsif tidak terjadi pada sudut *deadrise* yang kecil $\beta \approx 5$ derajat, sedangkan regangan maksimum meningkat dengan adanya momen tekuk (*bending moment*) yang besar disebabkan oleh tekanan impact pada benda elastis, hal ini khususnya terjadi pada titik pengukuran S2.



Gambar 7.10 Hubungan antara tekanan maksimum dan sudut *deadrise* β , dan perbandingan antara hasil eksperimen



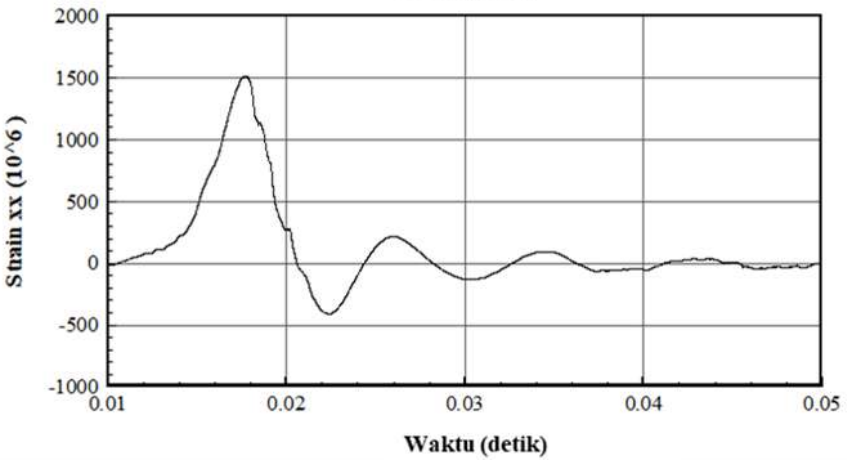
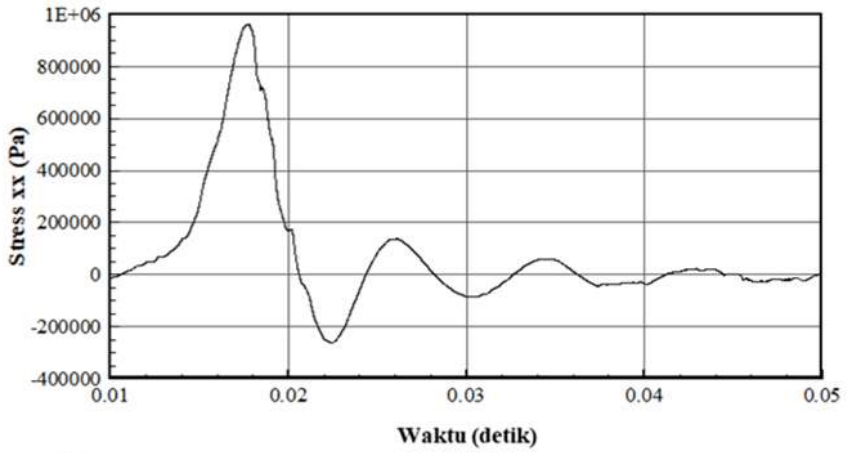
Gambar 7.10 Hubungan antara tekanan maksimum dan sudut *deadrise* β , dan perbandingan antara hasil eksperimen

Di sini, kondisi komputasi dalam dua dimensi (2D) disamakan dengan kondisi eksperimen. Sejumlah partikel SPH sebagai representasi benda apung elastis berbentuk persegi panjang digunakan untuk memperoleh informasi tentang tekanan, tegangan, dan regangan yang terjadi di benda apung tersebut. Dalam hal ini titik tekanan, tegangan, dan regangan didefinisikan ke dalam empat komponen yaitu komponen xx , xy , yx dan yy . Ukuran kisi (*grid*) yang digunakan pada kondisi awal komputasi yakni 2 mm, dan jari-jari partikel permukaan bebas adalah 0.25 mm. Jumlah total partikel permukaan bebas yang diletakkan di permukaan bebas adalah 6024. Sementara, jari-jari partikel SPH sebagai representasi benda apung elastis berbentuk persegi panjang yakni 0.25 mm dengan jumlah total partikel SPH sebanyak 3900. Kondisi awal komputasi ini telah digunakan pada studi numerik yang lain dimana kondisi tersebut dapat bekerja dengan baik. Langkah waktu komputasi dipertimbangkan yakni 5.0×10^{-4} detik untuk fase cair dan 2.5×10^{-5} detik untuk fase benda apung elastis. Rasio densitas antara air dan udara yakni 800 dan rasio viskositas yakni 55 pada kondisi awal komputasi. Selain itu, modulus Young sebesar 69 GPa, dan rasio Poisson adalah 0.35 untuk benda apung elastis. Model numerik yang dikembangkan ini berdasarkan formulasi aliran multifase dapat menghitung secara langsung efek bantalan udara (*air cushion*), dan interaksi antara udara dan air akibat tekanan benturan (*impact pressure*).

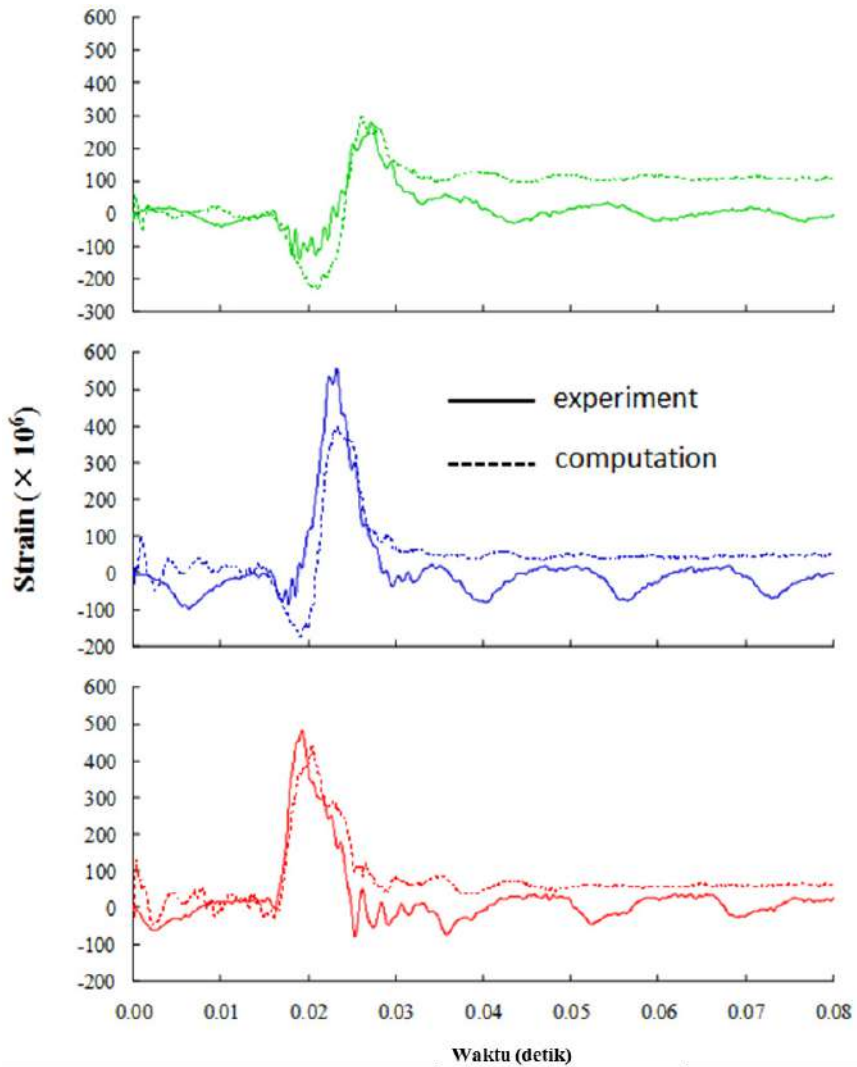
Gambar 7.12 memperlihatkan salah satu contoh hasil tegangan dan regangan per satuan waktu yang dialami oleh benda apung elastis berbentuk persegi panjang pada komponen xx untuk β 2.5 derajat. Komponen xx diukur pada titik tengah S2 di bagian dalam benda apung elastis. Dari gambar tersebut, hasil komputasi menunjukkan besaran yang cukup proporsional antara tegangan dan regangan.

Gambar 7.13, salah satu contoh kasus dengan β 15 derajat, menunjukkan perbandingan regangan per satuan waktu antara hasil numerik yang dikembangkan dan eksperimen pada titik pengukuran S1, S2, dan S3. Dari hasil perbandingan tersebut, hasil numerik menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil eksperimen, dan secara keseluruhan hasil numerik menunjukkan hasil yang memuaskan dan sesuai dengan hasil eksperimen. Namun demikian, hasil numerik setelah kembali ke posisi mengapung atau pada waktu lebih besar dari 0.03 detik relatif datar dan memiliki nilai yang sangat berbeda dengan hasil eksperimen di semua titik pengukuran S1, S2 dan S3. Sebaliknya, hasil eksperimen menunjukkan benda apung elastis tetap berinteraksi dengan permukaan bebas yang mengakibatkan percikan air pada saat proses masuk ke dalam air selanjutnya kembali ke posisi mengapung semula atau waktu lebih besar dari 0.03 detik. Oleh karena itu, interaksi tersebut menghasilkan pantulan gelombang pendek di sepanjang benda apung elastis berbentuk persegi panjang dan tetesan air kecil serta gelembung udara. Persoalan-persoalan ini secara komparatif lemah yang diberikan oleh hasil numerik karena tetesan kecil dan gelembung udara kurang dari ukuran partikel permukaan bebas, sehingga tidak dapat ditangkap oleh model numerik yang dikembangkan ini.

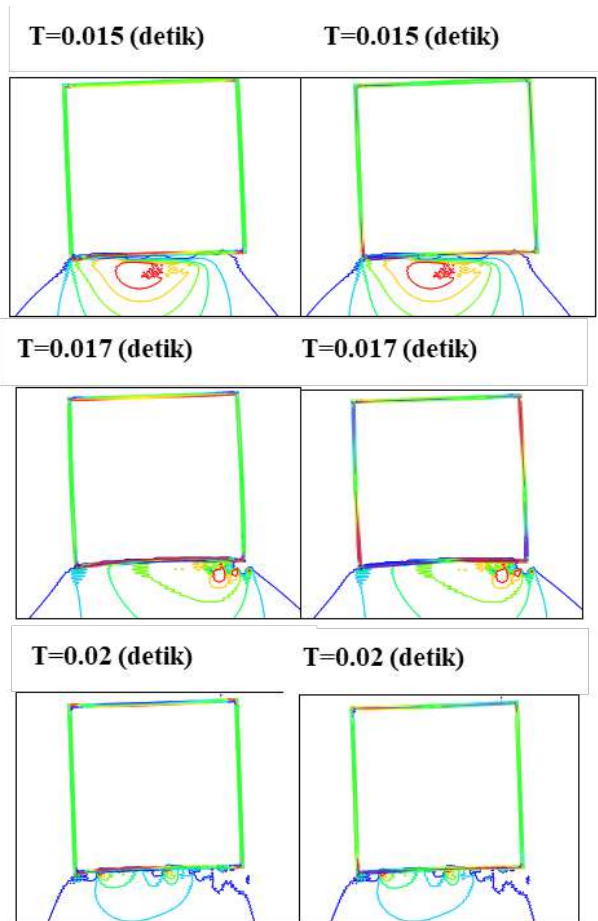
Gambar 7.14 memperlihatkan hubungan antara distribusi spasial regangan internal, tegangan, dan tekanan tumbukan (*impact pressure*) benda apung elastis selama proses masuk ke dalam air. Tegangan dan regangan internal terdistribusi, dan bagian bawah benda apung elastis mengalami deformasi pada $T = 0.017$ detik, dan secara bertahap kembali ke bentuk semula seperti yang ditunjukkan pada $T = 0.02$ detik. Di bagian benda apung elastis yang diperbesar pada $T = 0.015$, tekanan tumbukan air bekerja pada bagian bawah dan kemudian regangan internal terbesar terjadi pada titik tersebut.



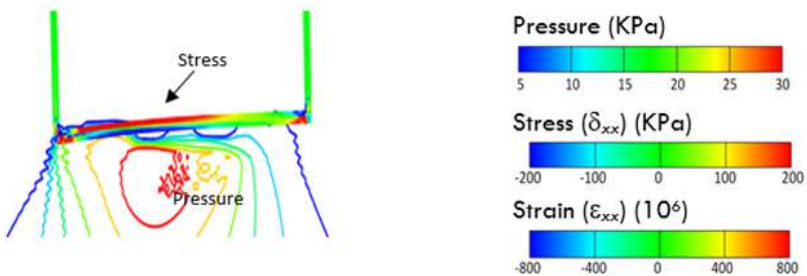
Gambar 7.12 Regangan internal dan tegangan per satuan waktu di ukur pada S2 dan komponen xx (β 2.5 derajat)



Gambar 7.13 Perbandingan rengangan per satuan waktu antara hasil numerik dan eksperimen ($\beta = 15$ derajat)



Enlarged area (T=0.015 detik)



Gambar 7.14 Bidang regangan internal dan distribusi tekanan dari benda apung elastis selama proses masuk ke dalam air ($\beta = 2.5$ derajat)

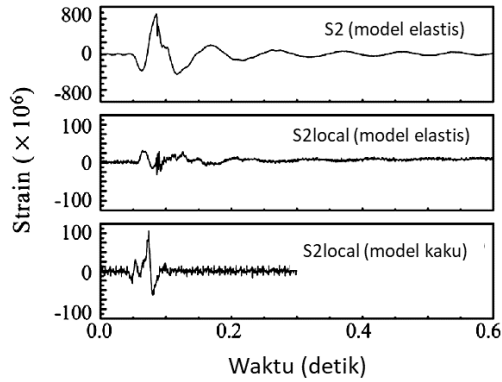
7.1.3. Badan Kapal Elastis

a. Pembahasan Hasil Eksperimen

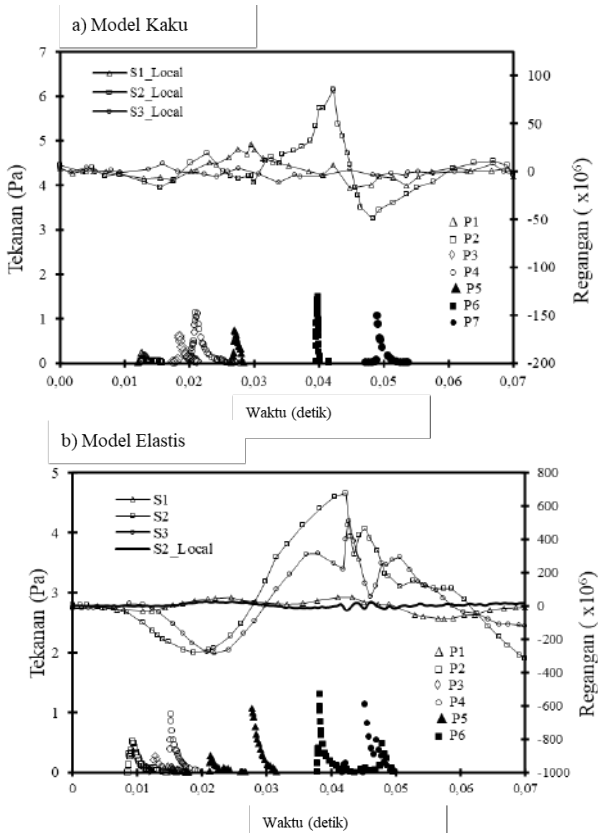
Uji jatuh (*dropping test*) sebuah model kapal kaku dan elastis telah dilakukan di tangki gelombang (*wave tank*). Dari hasil eksperimen, Gambar 7.15 memperlihatkan salah satu contoh regangan per satuan waktu pada titik pengukuran S2 dimana titik pengukuran tersebut juga telah diperlihatkan pada Gambar 4.20 dari Bab 4. Pada pengujian, sudut *deadrise* β yakni 11 derajat dan frekuensi natural regangan terjadi pada tulang punggung (*backbone*) model kapal elastis. Berikut di bawah merupakan pembahasan terkait tahap awal regangan dalam waktu singkat ketika mengalami benturan bagian bawah kapal (*bottom slamming*) dan *whipping*.

Gambar 7.16 memperlihatkan tekanan dengan sudut *deadrise* β 11 derajat yang terjadi pada titik pengukuran P1 hingga P7, regangan pada titik pengukuran S1 hingga S3, dan regangan setempat (regangan lokal) pada masing badan model kapal yang terpisah S1_local hingga S3_local. Tekanan impak lokal telah bekerja pada permukaan kapal saat proses uji jatuh (*dropping test*) berlangsung baik pada model kapal rigid maupun elastis. Regangan pada tulang punggung (*backbone*) dan pada titik-titik *local* (S1_local hingga S3_local) yang dialami oleh model kapal juga dihasilkan dalam waktu yang sangat singkat. Tekanan tertinggi diperoleh pada titik pengukuran P6 atau terjadi di bagian tengah model kapal.

Regangan tertinggi di kedua model juga terjadi di titik pengukuran S2_local dan S2 pada waktu yang hampir bersamaan. Meskipun kecenderungan tekanan per satuan waktu terlihat sama pada kedua model kapal, namun regangan per satuan waktu pada model kapal elastis sangat berbeda dibanding dengan model kapal kaku di mana perbandingan nilai maksimum model kapal elastis tujuh kali lebih besar dari pada model kapal kaku.



Gambar 7.15 Regangan per satuan waktu yang diukur pada titik pengukuran S2



Gambar 7.16 Response tekanan dan regangan untuk sudut *deadrise* $\beta = 11$ derajat pada setiap titik pengukuran; a). Model kaku (*rigid*), b) Model elastis (*elastic*)

b. Perbandingan Antara Hasil Eksperimen dan Numerik

Metode numerik yang telah dikembangkan di mana diaplikasikan pada uji jatuh (*dropping test*) dan masuk ke dalam air (*water entry*) pada benda apung elastis berbentuk silinder dan persegi panjang dalam rangka mengetahui pengaruh hidroelastisitas benda apung telah menunjukkan perbandingan hasil yang sesuai dengan hasil eksperimen sebagaimana dibahas berturut-turut pada sub bab 7.1.2 dan 7.1.3. Untuk alasan ini, metode numerik yang dikembangkan dapat digunakan untuk menyelidiki perilaku hidroelastisitas akibat gerak kapal di gelombang sebagaimana dijelaskan berikut di bawah ini.

Uji jatuh sebuah model kapal elastis telah dikomputasi secara numerik dengan kondisi awal yang sama dengan kondisi eksperimen sebagaimana telah dijelaskan pada sub bab 4.4 dari Bab 4. Pada bagian ini, studi ditekankan terkait dengan masalah elastisitas kapal sebagaimana dijelaskan pada Bab 2 sebelumnya, skema Euler dengan partikel Lagrange sebagai metode numerik untuk multifase, model kapal elastis terkomputasi dengan metode berbasis partikel yakni SPH. Pada metode numerik, kondisi awal komputasi dijelaskan lebih detail di mana ukuran kisi yakni $0.01L_{pp}$ dan jari-jari partikel permukaan bebas yakni $0.0025L_{pp}$. Jumlah total partikel permukaan bebas yang terletak di permukaan bebas sebanyak 127680, dan jumlah total partikel SPH sebagai representasi model kapal elastis sebanyak 29434. Rasio densitas antara udara dan air yakni 800 dan rasio viskositasnya yakni 55 untuk model multifase. Kekakuan lentur EI dan kekakuan kapal masing-masing sebesar 351 Nm^2 dan 243 kg/m^3 . Kecepatan jatuh model sekitar 4.4 m/detik yang telah direkam dengan kamera berkecepatan tinggi. Sudut *deadrise* kapal dipertimbangkan 2 sampai 25 derajat.

Gambar 7.17 memperlihatkan perbandingan tipikal model kapal elastis dan permukaan bebas berdasarkan beberapa tangkapan gambar

(foto) antara hasil eksperimen dan numerik selama proses jatuh bebas dan masuk ke dalam air. Posisi secara vertikal model kapal elastis, percikan air, dan perubahan deformasi permukaan bebas pada setiap penambahan waktu dari 0.001 detik hingga 0.03 detik dapat dilihat pada gambar tersebut. Berdasarkan beberapa tangkapan gambar, hasil numerik secara keseluruhan sesuai dengan hasil eksperimen. Namun, ada sedikit perbedaan di antara kedua hasil tersebut selama proses masuk. Ketika haluan model kapal menyentuh pertama kali permukaan air dan kemudian masuk ke dalam air, percikan air (*water splashing*) di dekat haluan dan pantulan gelombang pendek (*short wave reflection*) yang dihasilkan di sepanjang model terlihat kapal relatif lemah yang diberikan oleh hasil numerik. Hal ini dikarenakan tetesan kecil (*small water droplets*) dan gelembung udara (*air bubbles*) kurang dari ukuran partikel permukaan bebas di mana kondisi ini tidak dapat ditangkap oleh model numerik yang dikembangkan. Oleh karena itu, persoalan ini perlu diatasi dengan menggunakan teknik khusus yang lain pada studi di masa mendatang.

Di lain sisi, pada hasil numerik sebelumnya pada perlakuan benda elastis berbentuk persegi panjang elastis dengan sudut *deadrise* 15 derajat, hasil numerik telah dibandingkan dengan hasil eksperimen dalam tekanan dan regangan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.13 di mana metode numerik yang dikembangkan telah mampu menghitung deformasi elastis dan tekanan benturan, dan hasilnya sesuai dengan hasil eksperimen. Oleh karena itu, perlu difokuskan pada regangan akibat tekanan impak akibat bantingan (*slamming*) dan validasi regangan dengan data eksperimen.

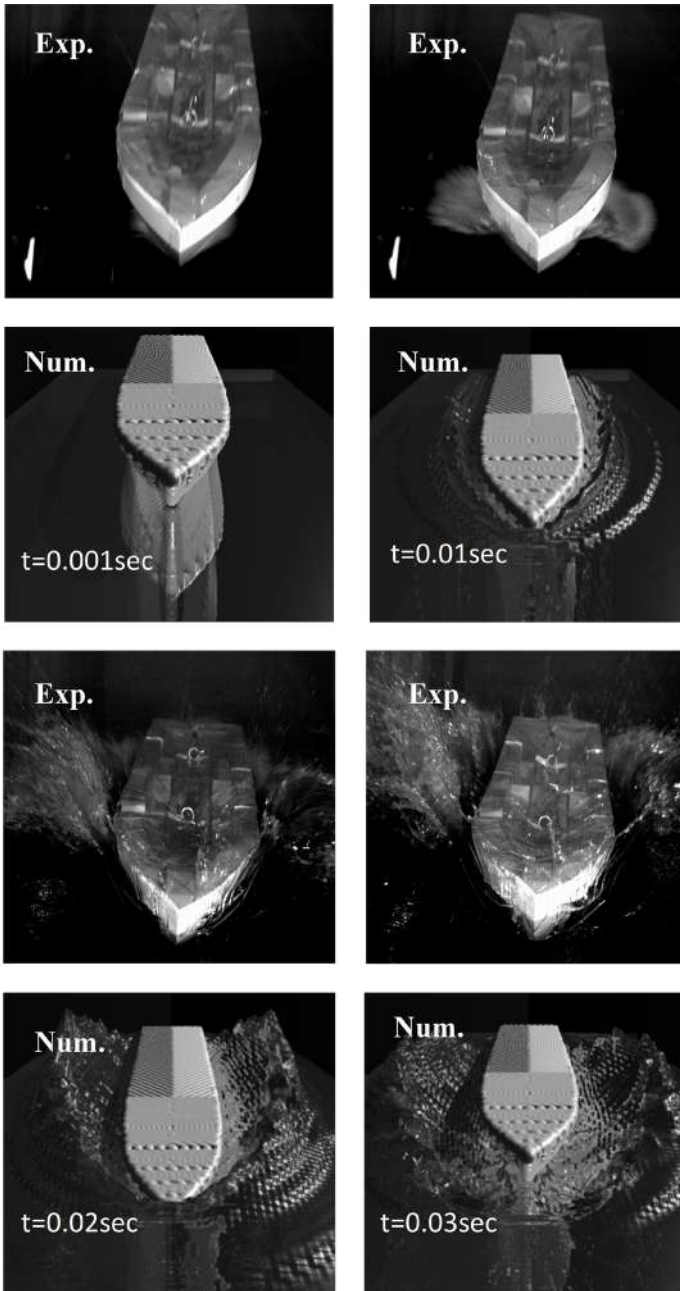
Gambar 7.18 memperlihatkan perbandingan regangan per satuan waktu antara hasil numerik dan eksperimen di titik pengukuran S1, S2 dan S3. Berdasarkan gambar tersebut, hasil numerik secara keseluruhan sesuai dengan hasil eksperimen, dan hasil ini dapat diterima

untuk menginvestigasi interaksi antara gerakan kapal elastis dan gelombang. Namun, regangan per satuan waktu pada titik pengukuran S2 dan S3 memiliki sedikit ketidaksesuaian, terutama pada S3, karena regangan pada bagian buritan disebabkan oleh interaksi yang kuat antara model kapal elastis dan permukaan bebas dengan percikan (*splashing*) selama terjadinya *whipping*.

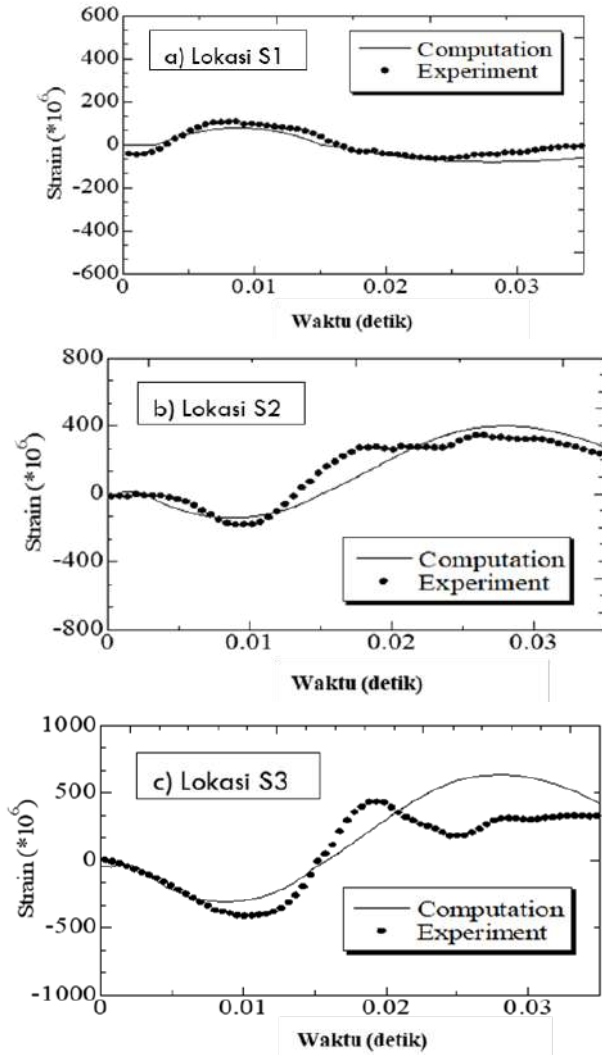
Selain itu, distribusi tekanan impak di permukaan model kapal selama proses masuk ke dalam air telah diperlihatkan pada Gambar 7.19. Tekanan impak lokal pertama kali terjadi di bagian haluan ketika kapal baru saja menyentuh permukaan bebas. Daerah tekanan impak yang tinggi juga dihasilkan pada bagian haluan dan tengah kapal pada 0.02 detik hingga 0.03 detik. Hal ini mengartikan bahwa tekanan impak telah terjadi oleh fenomena bantingan (*slamming*) yang sangat kuat. Untuk analisis desain kapal, *flare* haluan dan bentuk kapal merupakan faktor yang sangat penting dipertimbangkan agar kapal dapat menghindari dan mengurangi efek bantingan (*slamming*). Pada bagian lebih lanjut, penggunaan model numerik yang dikembangkan, gerakan kapal elastis di gelombang reguler akan diaplikasikan dan diinvestigasikan untuk mengkaji tekanan impak yang disebabkan oleh kejadian bantingan (*slamming*), dan respons regangan yang disebabkan oleh beban gelombang dan gerakan vertikal.

7.2. Benturan Kapal (*Ship Slamming*) di Gelombang

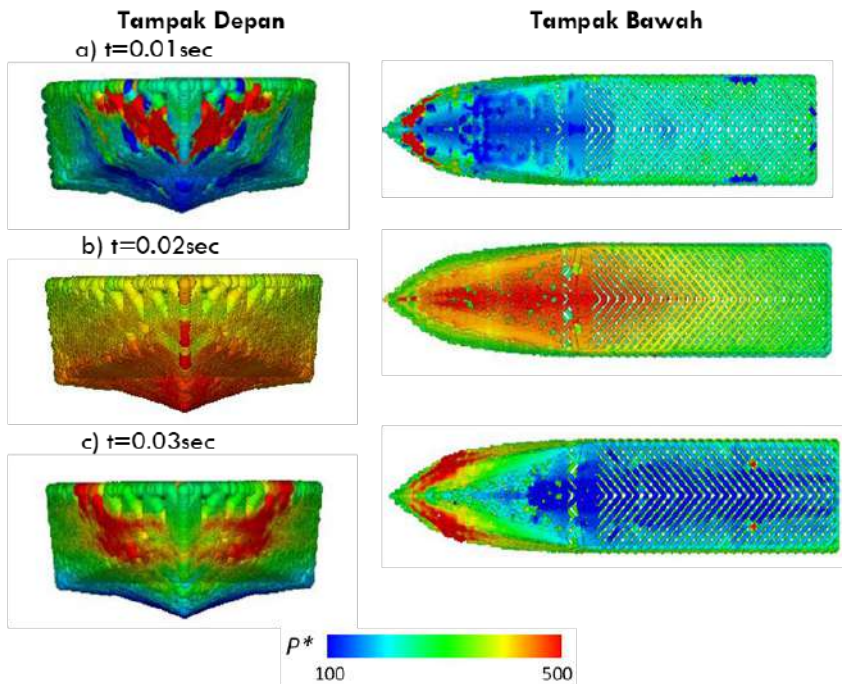
Pada bagian ini, efek hidrodinamika dan hidroelastisitas pada kapal yang memiliki badan bersifat elastis akan dianalisa, dan hal ini ditekankan untuk menganalisis perilaku kapal yang mengalami bantingan atau benturan (*slamming*) di gelombang. Untuk menyelidiki efek hidrodinamika dan hidroelastisitas, metode numerik yang dikembangkan akan diterapkan pada kapal da-



Gambar 7.17 Perbandingan tipikal *profile* air dengan fenomena *splashing* antara hasil eksperimen dan numerik pada sudut *deadrise* $\beta = 2$ derajat



Gambar 7.18 Perbandingan regangan per satuan waktu antara hasil eksperimen dan numerik pada setiap titik pengukuran S1, S2, dan S3



Gambar 7.19 Distribusi tekanan impact pada permukaan badan model kapal elastis selama kejadian *slamming* dan *whipping*

lam kondisi *slamming* di gelombang reguler. Hasil tekanan impact dan regangan internal yang dialami model kapal elastis akan diperoleh. Lebih lanjut, pada bagian ini, beberapa jenis kapal berdasarkan bentuk lambung akan dikomputasi untuk memperjelas dan menginterpretasi efek hidroelastisitas yang dikontribusikan oleh perbedaan bentuk lambung.

7.2.1. Aplikasi Pada Kapal Tanker

a. Kondisi Awal Komputasi

Metode numerik yang dikembangkan telah diaplikasikan pada simulasi gerak kapal elastis di gelombang reguler. Gambar 7.20 memperlihatkan model lambung kapal tanker di mana model kapal tanker

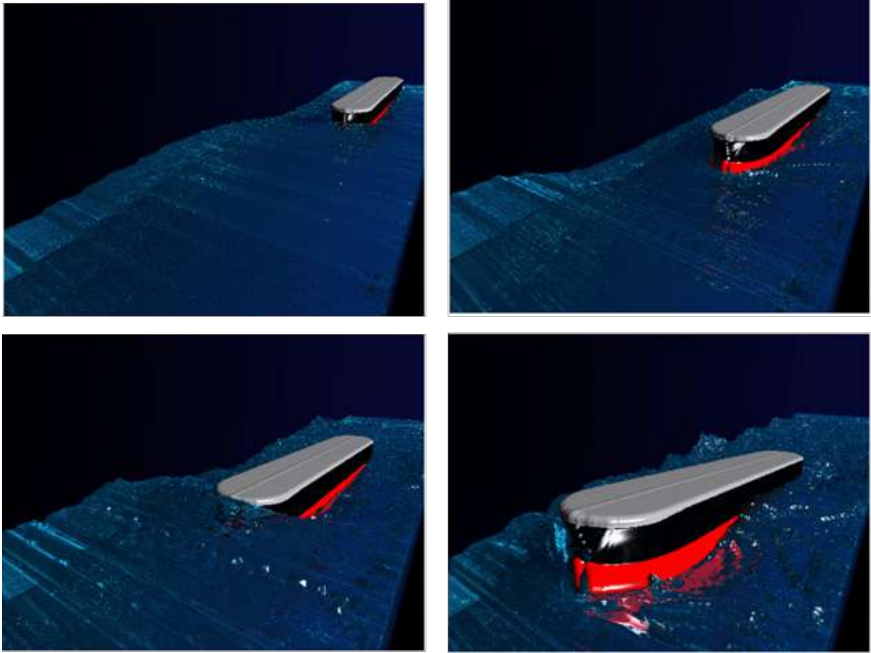
direpresentasikan oleh sejumlah partikel SPH. Jari-jari partikel SPH adalah $0.0025L_{bp}$, dan jumlah total partikel yakni sebesar 26000 untuk model kapal tanker tersebut. Ukuran kisi yakni $0.0025L_{bp}$, dan jari-jari partikel permukaan bebas yakni $0.0025L_{bp}$, serta jumlah total partikel permukaan bebas yang terletak di permukaan bebas yakni 1300000. Untuk kondisi gelombang, tinggi gelombang reguler yakni $H_w/L_{bp} = 0.06$ dan panjang gelombang $\lambda/L_{bp} = 1.0$. Untuk kecepatan kapal, kesamaan kinematika diberlakukan dengan angka Foude Fr yakni 0.226.

b. Hasil dan Pembahasan

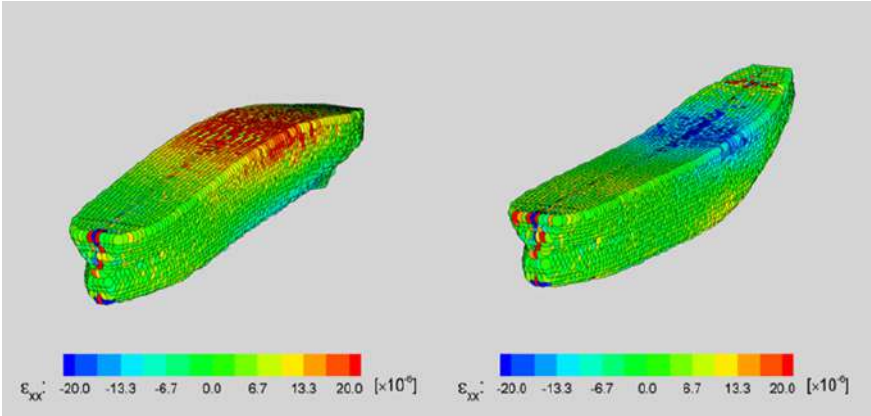
Gambar 7.21 memperlihatkan beberapa tangkapan gambar gerak kapal tanker elastis di gelombang reguler yang diperoleh dari hasil metode numerik. Berdasarkan gambar tersebut, gerak *heave* dan *pitch* kapal tanker di gelombang reguler dapat dengan jelas terlihat, selain itu, fenomena seperti percikan air (*water splashing*), pecahan gelombang (*breaking wave*), bantingan (*slamming*), dan limpahan air di atas geladak (*water on deck*) juga terlihat cukup jelas. Gambar 7.22 memperlihatkan distribusi regangan yang dialami oleh kapal tanker elastis di gelombang reguler. Gerakan *hogging* dan *sagging* telah terjadi di bawah beban dampak akibat fenomena bantingan (*slamming*) dan air di atas geladak (*water on deck/green water*). Selain itu, Gambar 7.23 memperlihatkan regangan per satuan waktu di tiga titik pengukuran berbeda di geladak dan dasar kapal. Regangan dengan frekuensi tinggi dihasilkan oleh gerakan *hogging* dan *sagging*.



Gambar 7.20 Distribusi partikel SPH merepresentasikan model kapal tanker

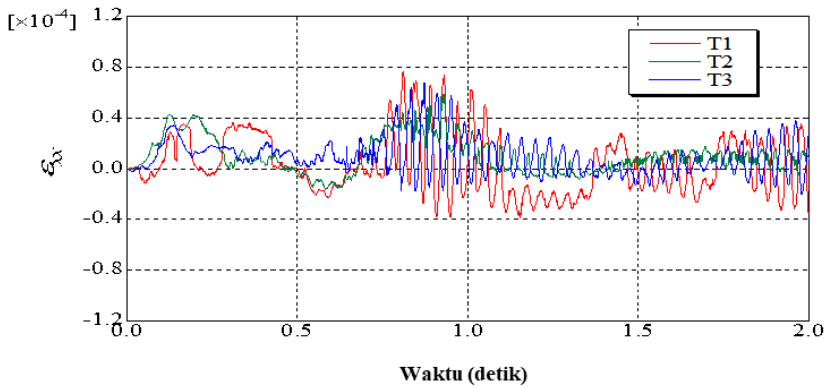


Gambar 7.21 Tangkapan gambar gerak kapal tanker di gelombang reguler diperoleh dari hasil numerik

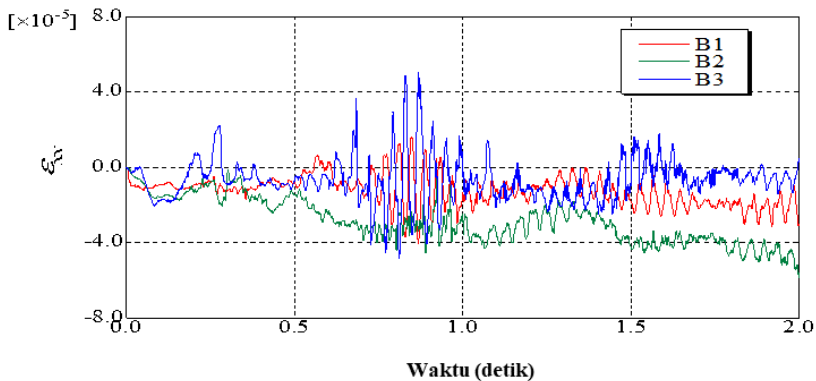


Gambar 7.22 Distribusi deformasi dan regangan kapal tanker elastis yang mengalami *hogging* dan *sagging* diperoleh dari hasil numerik

(a) Geladak kapal



(b) Dasar kapal



Gambar 7.23 Regangan per satuan waktu yang dialami oleh geladak dan dasar kapal saat terjadinya *hogging* dan *sagging*

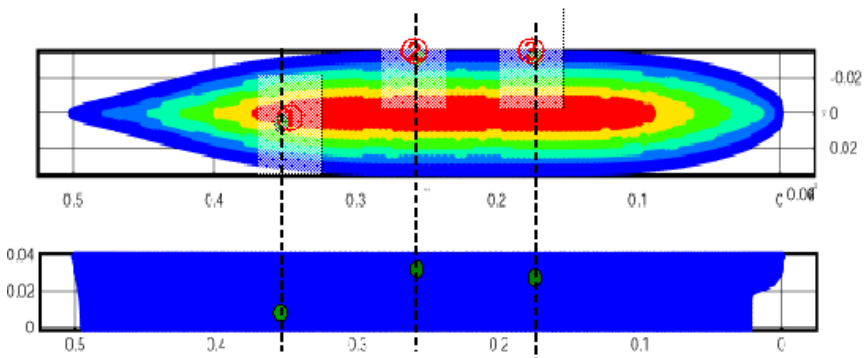
7.2.2. Aplikasi Pada Kapal Perikanan

a. Kondisi Awal Komputasi

Untuk kondisi awal komputasi, tinggi gelombang reguler yakni $H_w/Lbp = 0.06$ dan panjang gelombang $\lambda/Lbp = 1.56$. Batas periodik (*periodic boundary*) baik di hulu maupun di hilir diberlakukan dengan kecepatan gelombang untuk mengurangi biaya komputasi. Empat sam-

pa enam periode gelombang diterapkan di tangki numerik (*numerical wave tank*) untuk analisis dan untuk menghindari beberapa gangguan akibat gelombang refleksi dan difraksi. Sementara itu, kecepatan kapal 1.0 m/detik diberikan pada kondisi awal. Gerak *heave* dan *pitch* dipertimbangkan untuk dihasilkan di metode numerik ini.

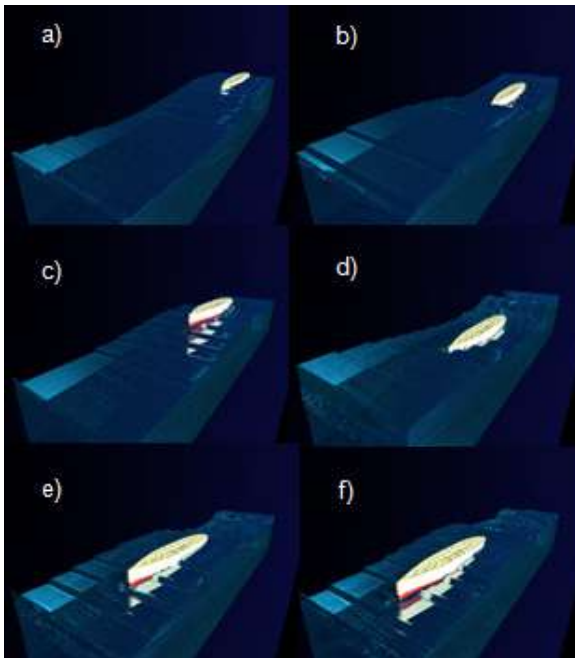
Pada skema Euler dan partikel Lagrange, ukuran kisi (*grid*) yakni $0.01Lbp$ dan jari-jari partikel permukaan bebas yakni $0.005Lbp$. Jumlah total partikel di permukaan bebas yakni 300000. Juga, jumlah maksimum partikel yakni 1000000 untuk periode gelombang panjang. Jari-jari partikel SPH yakni $0.005Lbp$ dan jumlah total partikel yang merepresentasikan kapal perikanan yakni 18000. Kondisi ini berdasarkan penelitian numerik kami sebelumnya untuk bekerja dengan baik. Langkah waktu pada kondisi awal untuk fase cair yakni 10-4 detik dan untuk kapal yakni 10-5 detik. Angka Froude Fr dan angka Reynolds Re dinormalkan (nondimensi) dengan kecepatan dan panjang kapal masing-masing sebesar 0.13 dan 3.0×10^6 . Untuk badan model kapal bersifat elastis, modulus Young yakni sebesar 500 MPa dan rasio Poisson yakni 0.3. Kemudian titik pengukuran regangan yang diwakili oleh partikel SPH terletak di dasar kapal (1), titik tengah kapal (2), dan sisi belakang kapal (3) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.24.



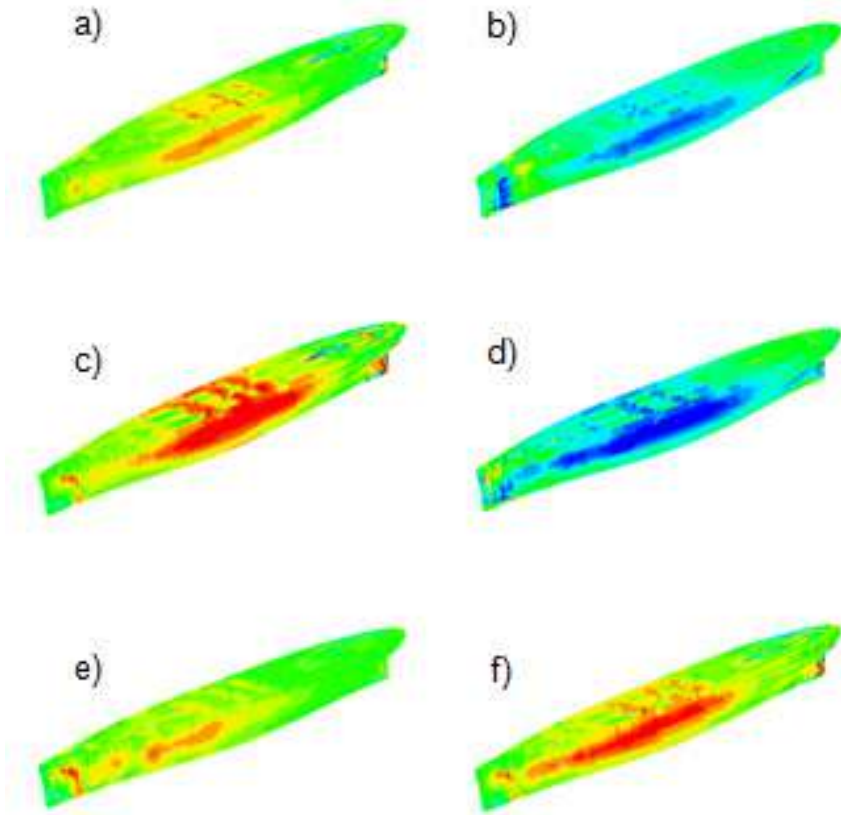
Gambar 7.24 Titik pengukuran regangan internal pada badan kapal perikanan elastis yang direpresentasikan oleh partikel SPH

b. Hasil dan Pembahasan

Beberapa tangkapan gambar gerakan kapal perikanan dengan perilaku hidroelastisitas di gelombang yang diperoleh dari hasil numerik diperlihatkan pada Gambar 7.25. Sementara, Gambar 7.26 memperlihatkan distribusi regangan internal yang bekerja pada setiap titik pengukuran (sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.24). Berdasarkan Gambar 7.26, distribusi regangan internal menginterpretasikan bahwa badan kapal elastis terdeformasi oleh gaya gelombang. Pengulangan gaya gelombang yang bekerja di badan kapal mempengaruhi besaran distribusi spasial dan temporal regangan internal. Selain itu, beban impak air berdampak pada distribusi regangan lokal yang besar. Regangan tinggi telah terjadi pada saat posisi kapal berada pada puncak gelombang, sebaliknya regangan negatif terjadi pada saat berada pada lembah gelombang.

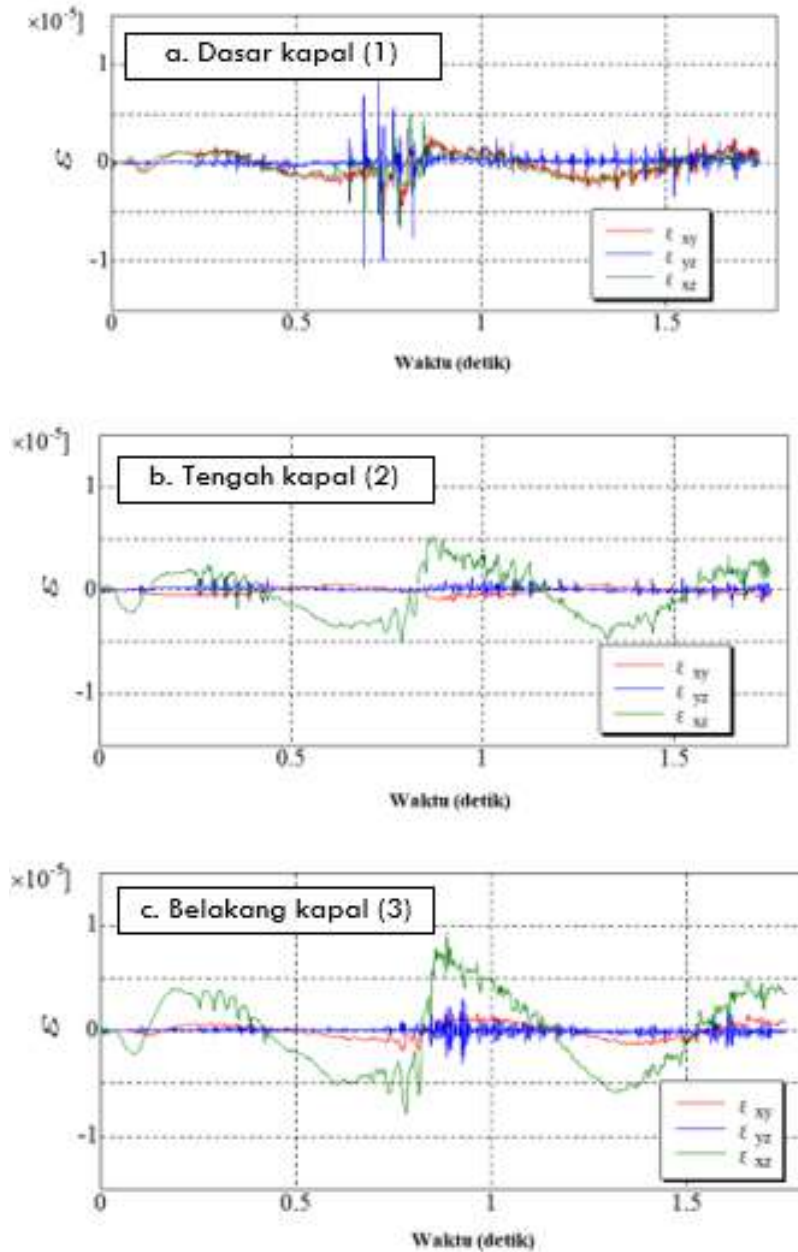


Gambar 7.24 Titik pengukuran regangan internal pada badan kapal perikanan elastis yang direpresentasikan oleh partikel SPH



Gambar 7.26 Regangan internal yang dialami oleh kapal perikanan atas perilaku hidroelastisitas diperoleh dari hasil numerik

Selain itu, Gambar 7.27 memperlihatkan regangan internal per satuan waktu di tiga lokasi pengukuran. Variasi deret waktu dapat ditemukan dengan periode gelombang (satu detik), terutama pada titik pengukuran di depan dan belakang kapal. Namun, komponen lain, dan fluktuasi regangan yang besar serta fase gelombang dapat dilihat pada variasi lokal yang berbeda. Kemudian, gaya gabungan dan beban kejut yang disebabkan oleh gelombang mempengaruhi lambung yang terpuntir dan berubah bentuk secara lokal.



Gambar 7.27 Regangan internal yang terjadi di kapal perikanan pada setiap titik pengukuran; a). Bagian dasar kapal, b). Bagian tengah kapal, dan c). Bagian belakang kapal

7.2.3. Aplikasi Pada Kapal Feri Penumpang Cepat

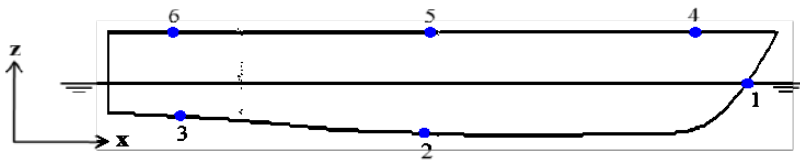
a. Kondisi Awal Komputasi

Pada bagian ini, dimensi dan geometri kapal feri penumpang cepat dengan badan bersifat elastis yang digunakan sama dengan dimensi dan geometri kapal yang digunakan pada pengujian jatuh bebas (*dropping test*) sebagaimana telah dibahas pada sub bab 7.1.3. Juga pada kondisi awal, angka Froude Fr ditetapkan pada besaran 0.32 dan 0.45 yang masing-masing sesuai dengan kecepatan layanan dan kecepatan maksimum pada kondisi kapal sesungguhnya. Kemudian, angka Reynolds Re dengan besaran sekitar 1.4×10^6 . Modulus Young yakni 210 GPa dan rasio Poisson yakni 0.3 sebagai besaran yang menunjukkan badan kapal elastis.

Gelombang reguler diaplikasikan dimana tinggi gelombang datang H_w/Lbp sebesar 0.06. Sebanyak 12 kasus disimulasikan berdasarkan pada perbedaan panjang gelombang λ dan kecepatan kapal V . Tabel 7.1 menyajikan ukuran kisi dan jari-jari partikel permukaan bebas serta partikel SPH sebagai representasi model kapal elastis. Berdasarkan jumlah partikel permukaan bebas, domain komputasi diatur untuk dapat menganalisis secara periodik tekanan impact, regangan, respons tegangan, dan gerak kapal di gelombang reguler.

Pada metode numerik yang dikembangkan ini, tekanan impact (*impact pressure*) dan dampak regangan model kapal elastis yang diwakili oleh partikel SPH dapat dipantau dan dicatat pada setiap penambahan waktu. Masing-masing partikel SPH menghasilkan regangan dalam enam komponen secara tiga dimensi (3D) sumbu lokal pada metode SPH yaitu xx , xy , xz , yy , yz , dan zz sebagaimana telah disebutkan pada sub bab 7.1.3 sebelumnya. Oleh karena itu, terdapat enam lokasi pengukuran pada model kapal elastis, titik pengukuran 1 sampai 6, ditetapkan dan ditempatkan secara memanjang di bagi-

an bawah (dasar) dan geladak model kapal sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.28. Titik pengukuran tersebut terletak pada jarak 100 mm hingga 400 mm dari garis tengah model kapal. Titik pengukuran 1 mengkarakteristikan dan mewakili struktur lambung haluan (*bow flare*), titik pengukuran 2 dan 3 mengkarakteristikan dan mewakili masing-masing struktur dasar (*bottom*) di bagian tengah kapal dan buritan (*stern*), sementara titik pengukuran 4, 5, dan 6 mengkarakteristikan dan mewakili masing-masing struktur geladak di bagian depan, tengah dan belakang model kapal.



Gambar 7.28 Lokasi titik pengukuran regangan

Tabel 7.1 Kondisi awal komputasi

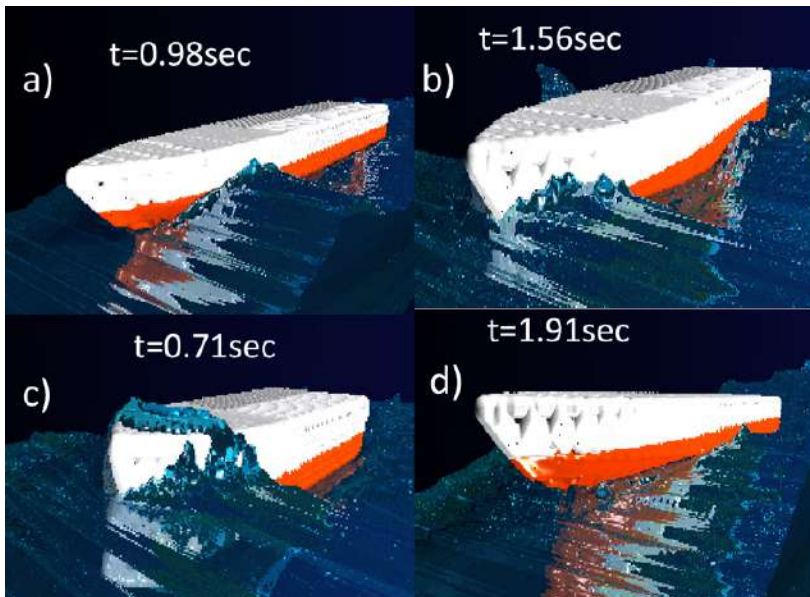
Item	Deskripsi
Ukuran kisi dx, dy, dz	$0.01L_{pp}$
Ukuran partikel permukaan bebas	
Jari-jari/jari-jari	$0.0025L_{pp}$
Jumlah	542000
Ukuran partikel SPH	
Jari-jari/jari-jari	$0.0025L_{pp}$
Jumlah	29306

b. Hasil dan Pembahasan

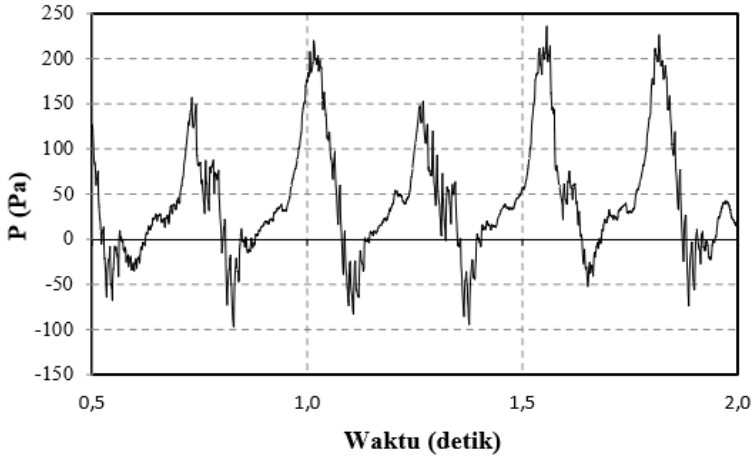
Gambar 7.29 menunjukkan beberapa tangkapan gambar (*snapshot*) gerak kapal di gelombang reguler. Selain itu, beberapa fenomena terekam dengan jelas seperti *bow flare slamming*, *bottom slamming*, limpahan air di geladak (*water on deck*), gelombang yang pecah (*breaking wave*), dan difraksi gelombang (*wave diffraction*). Pada waktu tertentu, air secara tiba-tiba berada dan meluap ke geladak kapal yang sedang

bergerak di kondisi gelombang sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.29 (c). Kemudian, Gambar 7.29 (d) memperlihatkan haluan kapal mendapatkan gaya angkat (*lift force*), dan dampak *bottom slamming* yang diinduksi oleh beban gelombang yang lebih tinggi dan kecepatan kapal ($Fr = 0.45$ dan $\lambda = 1.5$). Fenomena ini juga dapat dianalisa sebagai kontribusi terhadap *response whipping*.

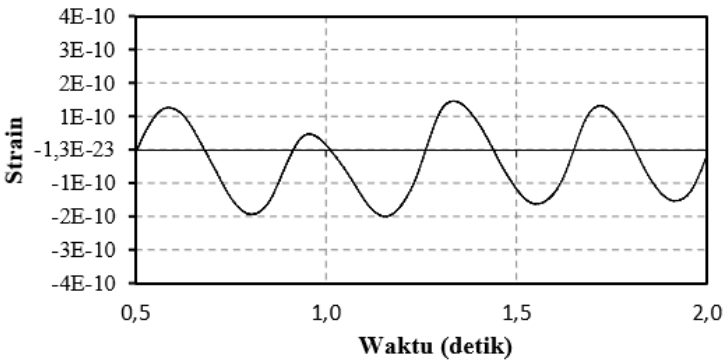
Salah satu contoh tekanan dan regangan per satuan waktu yang diperoleh dan diukur pada titik pengukuran 1 dan 5 sebagaimana masing-masing diperlihatkan pada Gambar 7.30 dan 7.31. Berdasarkan gambar tersebut, tekanan impact yang tinggi telah terjadi dan disebabkan oleh gelombang di mana resultan regangan juga terjadi pada kasus ini. Distribusi tekanan maksimum tidak berdimensi (nondimension) P^* sebagaimana didefinisikan oleh panjang gelombang λ dibagi dengan panjang kapal L_{bp} untuk angka Froude Fr 0.32 dan 0.45 sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 7.32.



Gambar 7.29 Tangkapan gambar gerak kapal terkait dengan efek elastisitas di gelombang



Gambar 7.30 Tekanan per satuan waktu pada titik pengukuran 1; $Fr = 0.32$ dan $\lambda = 0.5$ meter



Gambar 7.31 Regangan per satuan waktu pada titik pengukuran 5; $Fr = 0.45$ dan $\lambda = 1.0$ meter

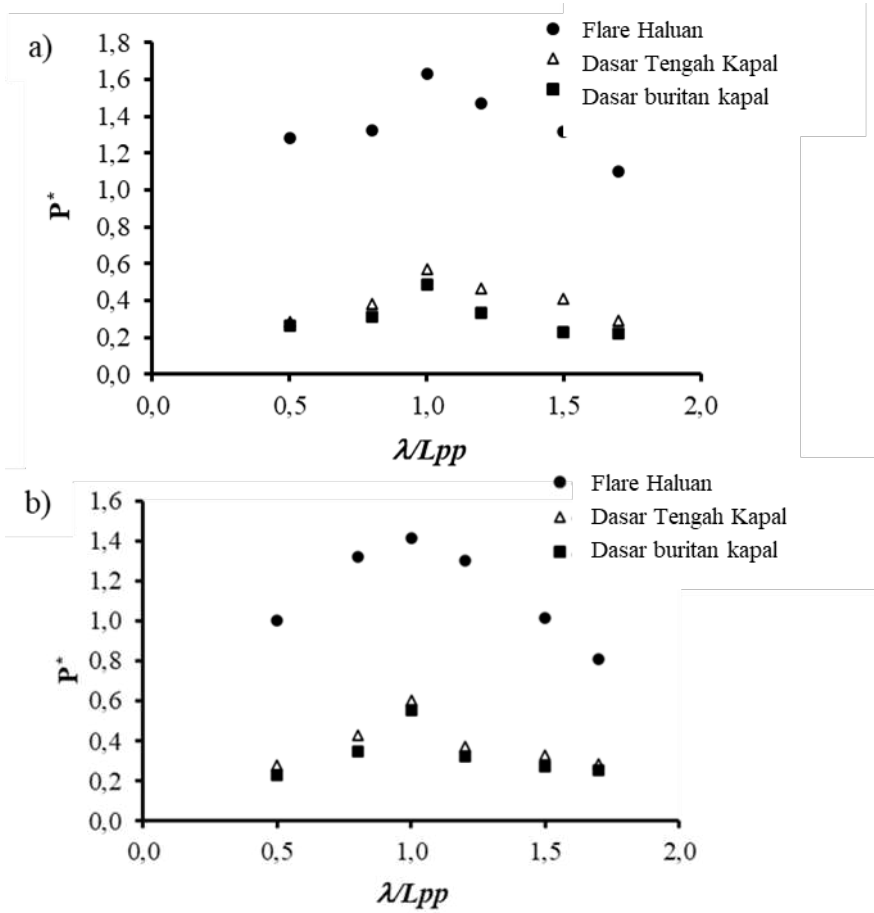
Probabilitas tekanan maksimum untuk kedua angka Froude yang diukur pada semua titik telah dideskripsikan bahwa tekanan maksimum meningkat dengan pertambahan rasio panjang gelombang dengan panjang kapal λ/Lbp atau $0 < \lambda/Lbp \leq 1.0$. Selanjutnya, tekanan menurun secara bertahap dengan penambahan λ/Lbp atau $\lambda/Lbp > 1.0$. Metode numerik yang dikembangkan ini dapat meng-

hitung tekanan maksimum dalam dua kasus berdasarkan angka Froude Fr 0.32 dan 0.45. Perbedaan tekanan maksimum relatif kecil antara dua kasus tersebut dengan bertambahnya panjang gelombang λ sedangkan perbedaan tekanan maksimum relatif lebih besar bila kecepatan kapal bertambah. Kemudian, tekanan impulsif tertinggi diukur dan diperoleh pada *bow flare* pada titik pengukuran 1 ketika $\lambda/L_{pp} = 1.0$. Peristiwa bantingan atau benturan (*slamming event*) terjadi bergantung pada kecepatan kapal, tinggi gelombang, dan panjang gelombang. Dari pernyataan sebelumnya, hal ini menekankan bahwa kecepatan yang lebih tinggi menghasilkan resonansi dari gelombang yang lebih panjang yang kemudian menghasilkan dampak bantingan atau benturan (*slamming response*) yang tinggi. Selain itu, bentuk *bow flare* kapal feri yang bergerak dengan kecepatan tinggi memberikan kontribusi efek hidrodinamika, dan hal ini menjadi aspek penting dalam desain kapal.

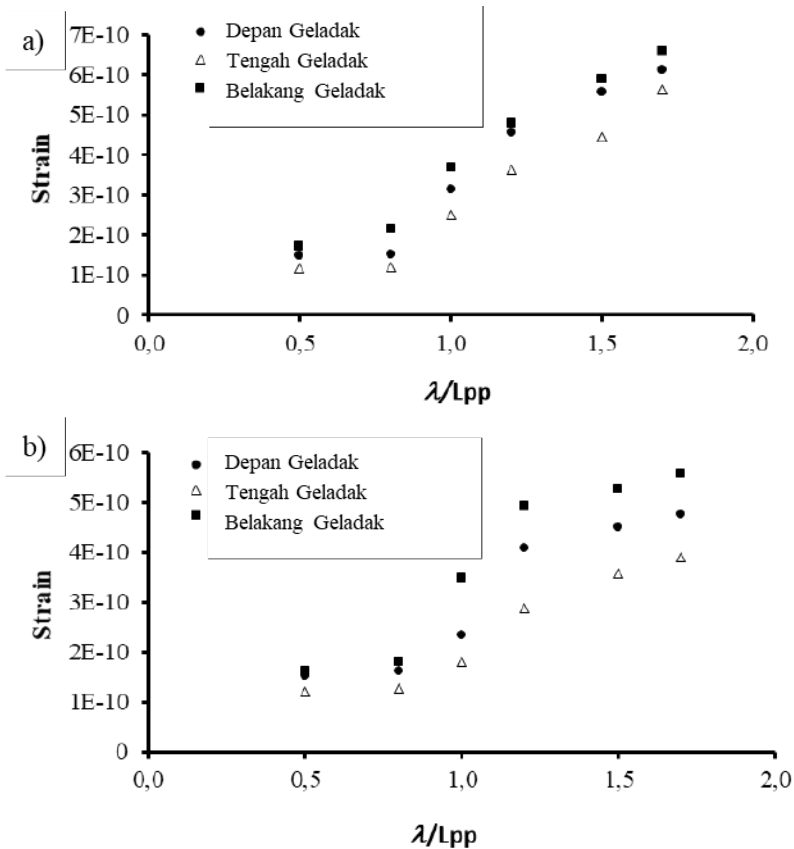
Gambar 7.33 (a) dan (b) masing-masing memperlihatkan distribusi regangan maksimum untuk angka Froude 0.32 dan 0.45. Probabilitas regangan maksimum untuk kedua angka Froude tersebut pada semua titik pengukuran menerangkan regangan maksimum meningkat dengan bertambahnya panjang gelombang λ .

Pada kejadian *slamming* dengan kondisi gelombang $H_w/L_{bp} = 0.06$, dampak hidroelastisitas yang tinggi terjadi pada bagian buritan kapal atau di titik pengukuran 6. Sementara, amplitudo gerakan yang tinggi dapat dilihat pada Gambar 7.34. Nondimensi amplitudo gerak pitch dan heave masing-masing didefinisikan sebagai H_v/H_w dan $\theta_a/(H_w * k)$, di mana H_v merupakan amplitudo gerak heave, H_w merupakan amplitudo gelombang, θ_a merupakan amplitudo gerak pitch dan k merupakan jumlah gelombang. Kemudian, sumbu horizontal merupakan perbandingan panjang gelombang λ dan panjang kapal L_{bp} . Pada kondisi gelombang $H_w/L_{bp} = 0.06$ dipertimbangkan sebagai

kondisi gelombang yang tinggi yang menyebabkan *bow slamming* yang memiliki respons yang tinggi pula.



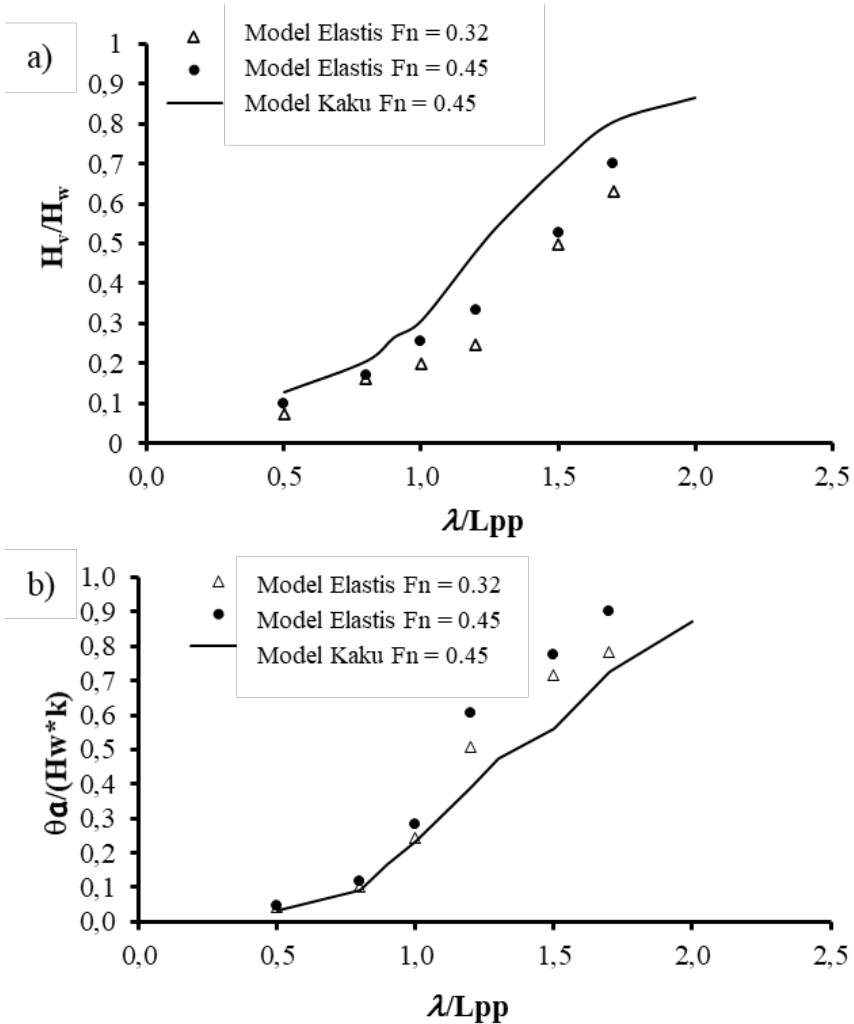
Gambar 7.32 Distribusi tekanan maksimum di titik pengukuran 1, 2, dan 3; (a) $Fr = 0.32$; (b) $Fr = 0.45$



Gambar 7.33 Regangan maksimum di titik pengukuran 4, 5, dan 6; (a) $Fr = 0.32$, (b) $Fr = 0.45$

Pada Gambar 7.34, kedua kecepatan yang tinggi (angka Froude yang tinggi) dan model kapal elastis memperlihatkan amplitudo gerak *pitch* dan *heave* yang tinggi pula dibanding dengan gerak *pitch* dan *heave* kapal kaku (*rigid ship*). Reaksi gerak kapal dengan adanya gelombang pecah (*breaking wave*) di permukaan bebas menghasilkan perilaku hidroelastisitas yang signifikan. Oleh karena itu, besarnya amplitudo gerak *heave* dan *pitch* sangat bergantung pada beban gelombang, perilaku struktur, dan kecepatan kapal. Ini berarti bahwa gerak *heave* dan *pitch* yang tinggi atau besar juga dipengaruhi oleh kejadian *slamming*

yang tinggi. Momen tekuk vertikal yang mempertimbangkan gerak *heave* dan *pitch* akan menjadi studi selanjutnya. Selain itu, hasil numerik kami akan dibandingkan dengan hasil eksperimen secara lebih rinci dan diaplikasi ke beberapa jenis kapal.



Gambar 7.34 Perbandingan nondimensi amplitudo gerak *heave* (a) dan gerak *pitch* (b) antara kapal kaku dan elastis

#8

Penutup

Pada buku ini, metode numerik yang dikembangkan yakni skema Euler dengan partikel Lagrange telah dibahas secara lengkap. Dan kemudian, keakuratan metode numerik yang dikembangkan telah diuji pada aplikasi-aplikasi interaksi struktur atau benda apung dengan fluida, dan fenomena-fenomena dari hasil interaksi tersebut telah jelas diperoleh. Bahkan, keakuratan metode numerik yang dikembangkan pada aplikasi pada perilaku hidrodinamika dan hidroelastisitas struktur atau benda apung ini juga telah diberikan. Hal ini telah membuktikan keakuratan metode numerik tersebut telah divalidasi dengan hasil eksperimen. Beberapa hal terkait dengan pengaplikasian dan keakuratan metode numerik yang dikembangkan secara singkat dijelaskan ini berikut ini.

Metode numerik yang dikembangkan telah diaplikasikan untuk menyelesaikan penangkapan permukaan bebas (*free surface capturing*) pada aliran multifase (*multiphase flow*) antara lain rotasi benda kaku untuk disket Zalesak (*Zalesak's disk*), medan pusaran tunggal (*single vortex field*), dan bidang deformasi tiga dimensi. Hasil metode numerik ini dapat menyelesaikan lapisan permukaan tipis pada kondisi regangan maksimum dan dapat mempertahankan antarmuka (*interface*) dengan kehilangan volume yang sangat sedikit. Selain itu, semua hasil metode numerik menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil numerik lainnya. Oleh karena itu, metode numerik yang dikembangkan ini dapat digunakan untuk menyelesaikan persoalan-persoalan pada aplikasi bidang perkapalan dan kelautan.

Metode numerik yang dikembangkan telah diaplikasikan untuk memprediksi tahanan kapal tanker, perikanan, dan feri penumpang cepat di air tenang dan di gelombang dengan efek nonlinier. Seluruh hasil numerik untuk aplikasi prediksi tahanan kapal telah sesuai dengan hasil eksperimen. Demikian halnya dengan tahanan tambahan kapal di gelombang, hasil numerik menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen dan hasil teori Strip (*Strip theory*). Selain itu, metode numerik ini dapat digunakan juga untuk memprediksi distribusi tekanan, kecepatan medan, dan gerakan permukaan bebas di sekitar kapal perikanan. Sehingga, metode numerik, skema Euler dengan partikel Lagrange, sangat konservatif dimana kesalahan volume (*volume error*) pada fase fluida menunjukkan nilai yang sangat kecil di mana kurang dari 0.003% selama proses komputasi.

Untuk prediksi performa gerak kapal tanker, perikanan, dan feri penumpang cepat di gelombang nonlinear, respons gerak *heave* dan *pitch* telah menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan

hasil eksperimen dan hasil teori Strip (*Strip theory*). Pada fase fluida, kesalahan volume fluida (*volume error*) diperoleh sangat kecil di mana kurang dari 0.05%. Hal ini menandakan metode numerik yang dikembangkan menunjukkan kestabilan selama proses komputasi. Beberapa fenomena yang terjadi disebabkan gerakan kapal di gelombang ditangkap dan diperoleh dengan sangat jelas. Gaya hidrodinamika yang bekerja di kapal saat terjadi benturan (*slamming*) juga telah diperoleh dengan akurat di mana tekanan impulsif yang signifikan yang disebabkan oleh gelombang terjadi di dekat haluan dan buritan kapal tanker dan kapal perikanan. Selain itu, kondisi ini juga terjadi di bagian tengah dan buritan kapal feri penumpang cepat.

Dari investigasi efek hidroelastisitas yang berhubungan dengan efek hidrodinamika pada struktur atau bangunan apung beserta aliran permukaan bebas (*free surface flow*), pecahan gelombang (*wave breaking*), dan percikan air (*water splashing*), metode numerik yang dikembangkan dapat menangani dan memecahkan secara bersamaan antara fenomena fluida nonlinier dan gerak struktur apung dengan perilaku elastisitas. Selain itu, berdasarkan hasil pengujian water entry dari model silinder elastis, benda persegi panjang elastis, dan model kapal dengan gerakan elastis, regangan internal dan tegangan yang dialami oleh model-model tersebut dapat dihitung dan diperoleh di mana hasil numerik telah menunjukkan kesesuaian dengan hasil eksperimen. Pada investigasi gerak kapal di gelombang nonlinear, dampak hidroelastisitas akibat tekanan impulsif paling tinggi terjadi pada bagian haluan kapal sedangkan *response whipping* tertinggi terjadi pada bagian buritan kapal. Tekanan impulsif tertinggi diukur pada kondisi $\lambda/L_{pp} = 1.0$.

Berdasarkan penjelasan di atas, metode numerik yang dikembangkan dapat digunakan pada rekayasa perkapalan dan ke-

lautan dimana memiliki tingkat keakuratan yang sangat tinggi. Untuk itu, pada proses perancangan atau pendesainan struktur atau bangunan apung dalam rangka mendapatkan interpretasi hasil desain, metode numerik yang dikembangkan ini sangat handal digunakan.

Sebagai upaya-upaya di masa depan, efisiensi dan stabilitas komputasi untuk skema Euler dengan partikel Lagrange akan tetap selalu dikembangkan lebih lanjut secara ketat menuju model yang kuat, berguna, dan dapat diterapkan di bidang teknik perkapalan dan kelautan. Oleh karena itu, metode numerik tersebut akan selalu ditingkatkan dan diperluas pengapliasiannya pada beberapa simulasi interaksi gelombang dengan struktur apung atau bangunan benda apung lain pada interaksi yang lebih nonlinear seperti gerak kapal di gelombang samping (*beam wave*), mengikuti gelombang (*following wave*), dan kondisi gelombang tsunami.

Berdasarkan studi tentang aliran permukaan bebas (*free surface flow*) yang nonlinear disebutkan sebelumnya, metode numerik yang telah dikembangkan mempertimbangkan ukuran partikel Lagrange yang kecil untuk menangkap tetesan air dan gelembung udara berukuran kecil. Ini merupakan poin yang penting karena hal ini berkontribusi pada beberapa perbedaan hasil perbandingan antara hasil numerik dan hasil eksperimental yang telah kami peroleh.

Daftar Pustaka

1. Definition of Marine Engineering, Available from: (http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_engineering).
2. Definition of Free surface, Available from: (<http://www.answers.com/topic/free-surface> *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*), McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.
3. Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", *J Com Phys*, Vol. 210(1), pp. 342-367.
4. Osher, S. and R. Fedkiw: Level set methods and dynamic implicit surfaces, *Springer-Verlag*.
5. Takewaki, H. and Yabe, T. (1987). "Cubic-interporated pseudo

- particle (CIP) method-application to nonlinear or multi-dimensional problems", *J. Comput. Phys.*,70, pp.355-372.
6. Gingold R.A. and Monaghan J.J. (1977). "Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars", *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 181, pp.375-389.
 7. Koshizuka, S. and Oka, Y. (1996). "Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid", *Nucl. Sci. Eng.* 123, pp.421-434.
 8. Enright, D., Fedkiw, R., Ferziger, J., and Mitchell, I. (2002). "A hybrid particle level set method for improved interface capturing", *J. Comp. Phys.*, Vol.183, pp.83-116.
 9. Hieber, S.E. and Koumoutsakos, P. (2005). "A lagrangian particle level set method" , *J Comp Phys*, Vol 60(3), pp 391-436.
 10. Sussman, M., Fatemi, E., Smereka, P. and Osher, S. (1998). "An improved level set method for incompressible two-phase flows", *Comput. and Fluid*, 27, pp.663-680.
 11. Jiang, G.S. and Peng, D. (2000) "Weighed ENO schemes for Hamilton-Jacobi E quations", *SIAM, J. Sci. Comput.*, 21, pp.2126-2143.
 12. Sussman, M. and Puckett, E. (2000). "A coupled level set and volume-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows", *J. Comp. Phys.*, 162, pp.301-337.
 13. Sussman, M. (2003). "A second order coupled level set and volume-of-fluid method for computing growth and collapse of vapor bubbles", *J. Comput. Phys.*, 187, pp.110-136.
 14. Lopez, J., Hernandez, J., Gomez, P. and Faura, F. (2005). "An improved PLIC-VOF method for tracking thin fluid structures in incompressible two-phase flows", *J. Comput. Phys.*, 208, pp.51-74, 2005.
 15. Enright, D., Marschner, S. and Fedkiw, R. (2002). "Animation and rendering of complex water surfaces", *ACM Trans. Graph.*

- (*SIGGRAPH Proc.*), 21(3), pp.736-744.
16. Lossaso, F., Gibou, F. and Fedkiw, R. (2004). "Simulating water and smoke with an octree data structure", *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Proc.)*, 23, pp.457-462.
 17. Enright, D., Losasso, F. and Fedkiw, R. (2005). "A fast and accurate semi-Lagrangian particle level set method", *Computers and Structures*, 83, pp.479-490.
 18. Olsson, E and Kreiss, G (2005). "A conservative level set method for two phase plow", *J Comp Physics*, Vol. 210, pp. 225-246.
 19. van der Pijl, S.P., Segal, A., Vuik, C. and Wesseling, P. (2005). "A mass-conserving level-set method for modelling of multi-phase flows", *Int J Numer Meth Fluids*, Vol. 47, pp. 339-361.
 20. Walker, C. and Muller, B. (2010). "A conservative level set method for sharp interface multiphase flow simulation", *Proc V European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCOM CFD 2010)*, Portugal, CD-Rom.
 21. Khayyer, A. and Gotoh, H. (2009). "Wave impact pressure calculations by improved SPH methods", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 19(4), pp. 300-307.
 22. Froude, W. (1861). "On the rolling of ships", *Inst. Nav. Archit.*, Trans.2, pp.180-229.
 23. Kriloff, A. (1896). "A new theory of the pitching motion of ships on waves, and of the stresses produced by this motion", *Inst. Nav. Archit.*, Trans. 37, pp.326-368.
 24. Lewis, F.M. (1929). "The inertia of water surrounding a vibrating ship", *Soc. Nav. Archit. Mar. Eng.*, Trans. 37, pp.1-20.
 25. Korvin-Kroukovsky, B.V. (1955). "Investigation of ship motions in regular waves", Trans. SNAME, vol.63.
 26. Newman, J.N. (1964). "A slender-body theory for ship oscillation in waves", *Jour. of Fluid Mechanics*, vol.18, pp.602-618.
 27. Newman, J.N. (1978). "The theory of ship motions", *Advances in*

- Applied Mechanics*, vol.18, pp.221-283.
28. Ursell, F. (1949). "On the heaving motion of circular cylinder on the surface of a fluid", *Q.J. Mech. Appl. Math.*, vol.2, pp.218-231.
 29. Yeung, R.W. (1973). "A singularity distribution method for free surface flow problems with an oscillating body, University of California Berkeley, *College of Engineering*, Rep. no. NA 73-6.
 30. Andersen, P. and He, W. (1984). "On the calculation of two-dimensional added mass and damping coefficient by simple green's function technique", *DCMA report*, no.287, Technical University of Denmark, Lyngby.
 31. Price, W.G. and Wu, Y. (1985). "Hydroelasticity of marine structures", in *Theoretical and Applied Mechanics*, Eds. F.I. Niordson and N. Olhoff, *Elsevier Science Publishers B.V.*
 32. Newman, J.N. (1994). "Wave effects on deformable bodies", *Applied Ocean Research*, vol.16, pp.47-59.
 33. Xia, J. (1990). "A unified hydroelasticity theory of slender bodies, *CSSRC Report*.
 34. Xia, J. (1994). "Hydroelasticity theories of slender floating structures", *Ph.D. Thesis*.
 35. Xia, J. (1996). "A Hydroelastic body boundary condition of floating structures", *Ship Tech. Research*, vol.43, pp.172-174.
 36. Hidaris, S.E. and Temarel, P. (2009). "Hydroelasticity of ships: recent advances and future trends", *Proc. IMechE*, vol.223 Part M: J. Engineering for the Maritime Environment, pp.305-330.
 37. Inglis, C.E. (1929). "Natural frequencies and modes of vibration in beams of non-uniform mass and section", *Trans. R. Instn. Nav. Architects*, 72, pp.145-166.
 38. Heller, S.R. and Abramson, H.N. (1959). "Hydroelasticity - a new naval science", *J. Am. Soc. Nav. Engrs.*, 71, pp.205-209.
 39. Faltinsen, O.M. (1997). "The effect of hydroelasticity on ship slamming", *Phil. Trans. R. Soc.*, 355, pp.575-591.

40. Faltinsen, O.M. (1998). "Hydroelasticity of high-speed vessels", *Hydroelasticity in Marine Technology, Proc. of the 2nd international Conference*, pp.1-13.
41. NeoShip-Ship CFD from: (http://www.mes.co.jp/english/business/it/it_02.html).
42. Vorhoelster, H. and Krueger, S. (2008). "Wake Field Analysis of a Drifting Ship with RANS-CFD-Methods", *Numerical Towing Tank Symposium*, Brest.
43. CFD-Horus from: (<http://hybridtech.ro/index.htm>).
44. Miyata, H., Nishimura, S. and Masuko, A. (1985). "Finite difference simulation of nonlinear waves generated by ship of arbitrary three-dimensional configuration", *J Comp Phys*, Vol. 60(3), pp. 391-436.
45. Morimoto, K. (2006). "Uncertainty analysis of the Navier-Stokes solver SURF for Two-dimensional steady incompressible flows", *Proc. 2nd Workshop on CFD Uncertainty Analysis*.
46. Hino, T. (1997). "A 3D Unstructured Grid Method for Incompressible Viscous Flows", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 182, pp. 9-15.
47. Hu, C., Faltinsen, O.M. and Kashiwagi, M. (2005). "3-D numerical Simulation of freely moving floating body by CIP method", *Proc 15th Int Offshore and Polar Eng Conf, Seoul, ISOPE*, Vol. 4, pp. 674-679.
48. Zhu, M., Yoshida O., and Miyata, H. (1993). "Verification of the viscous flow-field simulation for practical hull forms by a finite volume method", *Proc of the 6th Int Conf on Numerical Ship Hydrodynamics*, Iowa, pp 469-487.
49. Ship CFD-Neptun from: (<http://www.hsva.de/>).
50. Kodama, Y. (1985). "Computational of 3-D incompressible Navier-Stokes equations for flow around a ship hull using an implicit factor method", *Osaka International Colloquium on Ship Viscous*, Osaka.

51. Stern, F., Paterson, E.G., Tahara, Y. (1996). "CFDSHIP-IOWA: computational fluid dynamics method for surface-ship boundary layers, wakes, and wave fields", *Issue 381 of IIHR report, Iowa Institute of Hydraulic Research, College of Engineering*, The University of Iowa.
52. Ng, C.O. and Kot, S.C. (1992). "Computations of water impact on a two-dimensional flat-bottomed body with a volume-of-fluid method", *Ocean Engineering*, 19, pp.377-393.
53. Arai, M. and Miyauchi, T. (1998). "Numerical study of the impact of water on cylindrical shells, considering fluid-structure interactions", *Practical Design of Ship and Mobile Unit*, pp.59-68.
54. Schumann, C. (1998). "Volume of fluid computations of water entry of bow sections", *Proc. of Euromech.*, pp.274.
55. Kleefsman, K.M.T., Fekken, G. and Veldman, A.E.P.A. (2005). "A Volume-of-fluid based simulation method for water impact problems", *Journal of Comput. Phys.*, pp.363-393.
56. Landrini, M., Colagrossi, A. and Tulin, M.P. (2001). "Numerical studies of wave breaking compared to experimental observations", *Proc. of 4th Num. Towing Tank Sympo.* Humberg (Germany).
57. Oger, G, Doring, M, Alessandrini, B and Ferrant, P (2006). "Two-dimensional SPH Simulations of Wedge Water Entries," *J Comp Physics*, Vol. 213, pp. 803-822.
58. Deuff, J.B., Oger, G., Doring, M., Alessandrini, B. and Ferrant, P. (2006). "SPH analysis of hydrodynamic impact, including hydrodynamic fluid structure coupling", *Hydro-elasticity in Marine Technology*, pp.131-137.
59. Oger, G., Doring, M., Alessandrini, B. and Ferrant, P. (2007). "An improved SPH method : towards higher order convergence", *Journal of Computational Physics*, Vol. 225(2), pp. 1472-1492.
60. Oger, G., Guilcher, P.M., Jacquin, E., Brosset, L., Deuff, J.B. and Le Touzé, D. (2010). "Simulations of hydro-elastic impacts using

- a parallel SPH model", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 20(3), pp. 181-189.
61. Gotoh, H. (2009). "Lagrangian particle method as advanced technology for numerical wave flume", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 19(3), pp. 161-167.
 62. Rudman, M., Cleary, P.W. and Prakash, M. (2009). "Simulation of liquid sloshing in model lng tank using smoothed particle hydrodynamics", *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol. 19(4), pp. 286-294.
 63. Gabriele, B., Iglesias, A.S., Delorme, L. and Botia-Vera, E. (2010). "Smoothed particles hydrodynamics (SPH) simulation of a tuned liquid damper (TLD) with angular motion," *J of Hydraulic Reserach*, Vol. 48, pp. 28-39.
 64. Maruzewski, P., Le Touzé, D. and Oger, G. (2009). "SPH high-performance computing simulations of rigid solids impacting the free surface of water", *J Hydraulic Research*, Vol. 47, pp. 126-134.
 65. Von Karman, T. (1929). "The impact of seaplane floats during landing", *NACA*, TN321, Washington.
 66. Wagner, H. (1932). "U ¨ber stoss-und greitverga ¨nge an der oberflache von flu ¨ssigkeiten", *Zeitschr. F. Angrew. Math. Und Mech.*, Vol.12, No.4, 1932, pp.193-235.
 67. Greenhow, M. and Lin, W.M. (1983). "Nonlinear free surface effects: experiment and theory", Report No.83-19, *Dept. of Ocean Engineering*, MIT.
 68. Greenhow, M. (1987). "Water entry into initially calm water", *Applied Ocean Research*, Vol.9, pp.214-223.
 69. Chuang, S.L. (1967). "Experiment on Slamming of Wedge-Shaped Bodies", *Journal of Ship Research*, 11, pp.190-198.
 70. Eagle, A. and Lewis, R.A. (2003). "A comparison of hydrodynamic impacts prediction methods with two-dimensional drop test data", *Marine Structure*, 16, pp.175-182.

71. Zhao, R. and Faltinsen, O.M. (1993). "Water Entry of two-dimensional bodies", *J. Fluid. Mech.*, Vol. 246, pp.593-612.
72. Zhao, R., Faltinsen, O.M. and Aarnes, J. (1997). "Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without flow separation", *Proc. of 21st Symp. on Naval hydrod.*, pp.408-423.
73. Zhao, R. and Faltinsen, O.M. (1998). "Water entry of arbitrary axisymmetric bodies with and without flow separation", *Proc. of 22nd Symp. on Naval hydrod.*, pp.652-664.
74. Bereznitski, A., Boon, B. and Postnov, V. (2000). "The effect of hydroelasticity on the impact pressure due to bottom slamming on ship structure, *Proc. of 11th International Offshore and Polar Engineers Conference*, Seattle (USA), IV, pp.227-283.
75. Bereznitski, A., Boon, B. and Postnov, V. (2001a). "Hydroelastic formulation in order to achieve more accurate prediction of hydrodynamic loads", *Proc. of 11th International Offshore and Polar Engineers Conference*, Norway, Vol. 4, pp.337-342.
76. Bereznitski, A. and Postnov, V. (2001b). "Hydroelastic model for bottom slamming", *The 8th International Symposium on Practical Design of Ship and Other Floating Structure*, China, Vol. 2, pp.911-917.
77. Tajima, M. and Yabe, T. (1999). "Simulation on slamming of a vessel by CIP method, *J. of the Phys. Soc. Of Japan*, Vol. 68, No. 8, pp.2576-2584.
78. Faltinsen, O. M. (1999), "Water entry of a wedge by hydroelastic orthotropic plate theory", *Journal of Ship Research*, 43, pp.180-193.
79. Faltinsen, O.M. (2001). "Slamming with application to planning vessels, green water loading and sloshing", *hydrodynamics in ship and ocean engineering*, pp.27-58.
80. Mutsuda, H. and Faltinsen, O.M. (2007). "A coupled Eulerian-Lagrangian method for free surface problems", *Proceeding of*

- International Conference on Violent Flow*, pp.227-234.
81. Mutsuda, H. and Shinkura, Y. and Doi, Y. (2008) "An Eulerian scheme with Lagrangian particles for solving impact pressure caused by wave breaking", *Proc. of the 18th International Society of Offshore and Polar Engineers Conference*, Vol.3, pp.162-169.
 82. Mutsuda, H. and Doi, Y. (2009). "Numerical simulation of dynamic response of structure caused by wave impact pressure using an Eulerian scheme with Lagrangian particles, *Proceeding of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, OMAE2009-79736.
 83. Germano (1992) "Turbulence: the filtering approach", *Journal of Fluid Mechanics*, vol.238, pp.325-336.
 84. Mutsuda, H. and Yasuda, T. (2000) "Numerical simulation of turbulent air-water mixing layer within surf-zone", *Proc. of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, pp.755-768.
 85. Yabe, Y., Xiao, F. and Utsumi, T. (2001). "The Constrained Interpolation Profile Method for Multiphase Analysis, " *J Comp Physics*, Vol. 169, pp. 556-569.
 86. Swegle, J.W. (1992) "SPH Behavior in Tension", *Memo, Sandia National Laboratories*.
 87. Randles, P.W. and Libersky L.D. (1996) "Smoothed Particle Hydrodynamics", Some Recent Improvements and Applications. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 139, 375-408.
 88. Gray, J.P., Monaghan, J.J., and Swift, R.P. (2000) "SPH elastic dynamics", *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 190, 6641-6662.
 89. Monaghan, J.J. (2000) "SPH without a tensile instability", *Journal of Computational Physics* 159, 290-311.
 90. Baraff, D. (1997) "An introduction to physically based modelling: Rigid body simulation I-Unconstrained rigid body dynamics",

SIGGRAPH'97 course notes.

91. Zalesak, S.T. (1979). "Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids", *J. Comp. Phys.*, 31(3), 335-362.
92. Bell, J.B., Colella, P., Glaz, H.M. (1989). "A 2nd-order projection method for the incompressible Navier-Stokes equations", *J. Comput. Phys.*, 85(2), pp.257-283.
93. LeVeque, R. (1996). "High-resolution conservative algorithms for advection in incompressible flow", *SIAM J. Numer. Anal.*, 3, pp.627-655.
94. Available from: <http://www.cc.gatech.edu/projects/large_models>.
95. Arribas, F.A. and Fernandes, J.A.C. (2006). "Strip theories applied to the vertical motions of high speed crafts", *Ocean Engineering*, Vol.33, pp.1214-1229.
96. Lewandowski, E.M. (2004). "The dynamics of marine craft: Maneuvring and seakeeping", *World Scientific Publishing*, ISBN 981-02-4755-9s.
97. Faltinsen, O.M. (2005). "Hydrodynamics of high-speed marine vehicles", *Cambridge University Press*, ISBN-13 978-0-521-84568-7.
98. Bhattacharyya, R. (1978). "Dynamics of Marine Vehicles", *John Wiley & Sons*, New York, ISBN 0-471-07206-0.
99. Senjanovic, I., Malenica, S. and Tomasevic, S. (2008). "Investigation of ship hydroelasticity", *Ocean Engineering*, 35: pp.523-535.

Metode kekinian untuk mensimulasi interaksi fluida-struktur sangat berkembang dan dibutuhkan saat ini dalam menyelesaikan kasus-kasus penting pada semua bidang rekayasa dan industri termasuk di bidang rekayasa perkapalan dan kelautan. Buku ini menghadirkan sebuah metode numerik yang masih sangat dikembangkan dan digunakan secara luas. Metode numerik yang dikembangkan, skema Euler dengan partikel Lagrange (Euler scheme with Lagrange particle), dalam buku ini memiliki solusi yang sangat akurat dimana sebelumnya penelusuran dan penangkapan antarmuka (interface tracking and capturing) telah diverifikasi pada kasus-kasus rotasi benda kaku, medan pusaran, dan deformasi tiga dimensi. Kemudian, metode numerik yang dikembangkan ini diaplikasi pada kasus-kasus di bidang teknik perkapalan dan kelautan antara lain tahanan kapal, gerak kapal di gelombang nonlinier, dan perilaku hidroelastisitas benda apung. Solusi-solusi yang dihasilkan metode numerik yang dikembangkan ini telah divalidasi dengan solusi-solusi eksperimen. Oleh karena itu, buku ini sangat penting bagi dunia pendidikan dan industri.



Dr. Eng. Suandar Baso, ST., MT

Dosen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Dosen sejak tahun 2000. Memperoleh gelar Doctor of Engineering di Hiroshima University tahun 2012. Bidang penelitian yang digeluti fokus pada hidrodinamika kapal, Computational Fluid Dynamics (CFD), dan hidroelastisitas kapal.



Andi Dian Eka Anggriani, ST., MT

Dosen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Dosen sejak tahun 2019. Saat ini lanjut studi tingkat doktor di Faculty of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University. Bidang penelitian yang digeluti fokus pada hidrodinamika kapal dan Computational Fluid Dynamics (CFD).



Dr. Eng. Andi Ardianti, ST., MT

Dosen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Dosen sejak tahun 2012. Memperoleh gelar Doctor of Engineering di Hiroshima University tahun 2017. Bidang penelitian yang digeluti fokus pada hidrodinamika kapal, Computational Fluid Dynamics (CFD), dan struktur kapal.



Gedung UPT Unhas Press
Kampus Unhas Tamalanrea, Jl. Perintis Kemerdekaan Km.10
e-mail: unhaspress@gmail.com
Laman: unhaspress.unhas.ac.id
Makassar

ISBN 978-979-530-304-6

