



Analisis Numerik *Long Duration Sloshing Single-Phase* dan *Two-Phase* Pada Tangki Prismatik Menggunakan Metode *Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*

Ariq Fadhlurrahman R¹⁾, Andi Trimulyono¹⁾, Parlindungan Manik¹⁾

¹⁾Laboratorium Hidrodinamika

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}e-mail : ariqrahardjo@gmail.com, anditrimulyono@gmail.com, parlindungan_manik@live.undip.ac.id

Abstrak

Simulasi CFD memiliki peran yang sangat penting dalam bidang perkapalan sehingga banyak metode baru yang diciptakan untuk dapat menyelesaikan setiap faktor permasalahan yang ada pada industri perkapalan maupun pelayaran. Salah satu metode baru dalam bidang CFD adalah *smoothed particle hydrodynamics (SPH)*, metode ini menggunakan partikel sebagai pengganti mesh dalam memecahkan permasalahan *free surface flow*. Dalam penelitian ini dilakukan simulasi 2D untuk kasus fenomena *sloshing* gerakan roll dan sway pada tangki kapal LNG tipe membran dengan durasi simulasi 60 detik, simulasi tersebut dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi metode SPH pada *long duration sloshing*. Dilakukan juga perbandingan tekanan pada rasio pengisian 12.5%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%, 75%, dan 87.5% untuk mengetahui batas aman rasio pengisian tangki, selanjutnya dilakukan perbandingan antara simulasi *single-phase* dengan *two-phase* untuk mengetahui pengaruh fasa udara pada fenomena *sloshing* menggunakan metode SPH. Hasil dari penelitian ini menampilkan perbandingan nilai rata-rata tekanan dan rata-rata puncak tekanan antara eksperimen dengan simulasi SPH yang memiliki tren hasil sama untuk tekanan impak. Tekanan statis menunjukkan hasil yang akurat dimana selisih dengan hasil analitik 2.9 persen.

Kata Kunci : *sloshing, SPH, single-phase, two-phase, long duration simulation*

1. PENDAHULUAN

Sloshing yang terjadi pada kapal pembawa LNG merupakan fenomena yang berbahaya karena ketika sebuah kapal mengalami osilasi eksternal yang mendekati frekuensi natural tangki yang dibawanya, *violent sloshing* dapat terjadi dan dapat menyebabkan kerusakan pada tangki dikarenakan pergerakan *violent fluid* yang menghasilkan benturan bertekanan tinggi pada dinding tangki. Benturan bertekanan tinggi ini dapat menyebabkan ledakan ketika cairan yang diangkut mudah menguap, seperti minyak yang diangkut menggunakan kapal.

Belakangan ini terdapat metode baru yang memiliki kemampuan dalam menghasilkan visualisasi yang baik dan kemudahan dalam pembuatan model karena tidak melalui proses *mesh*.

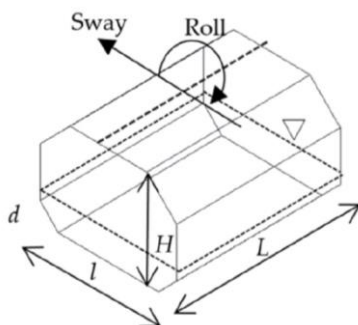
Metode tersebut adalah *smoothed particle hydrodynamics (SPH)* atau biasa disebut dengan *particle methods* yang kita juga ketahui sebagai *mesh-free computational fluid dynamics*. Metode ini sudah banyak diaplikasikan pada permasalahan *sloshing* karena *particle methods* merupakan *fully Lagrangian* dan menggunakan pendekatan *mesh-free*, sehingga proses *meshing* tidak diperlukan dan permukaan bebas yang terdeformasi secara signifikan dapat ditangkap secara intuitif tanpa perlakuan khusus [1]. Penelitian mengenai penggunaan metode SPH pada aliran permukaan bebas pertama kali dikerjakan oleh Monaghan, *et al.* [2].

Beberapa tahun terakhir metode SPH banyak digunakan dalam permasalahan aliran permukaan bebas. Penelitian mengenai *long duration simulation* untuk kasus *sloshing* dengan rasio

pengisian yang rendah pernah dilakukan oleh Green dan Peiro, *et al.* [3]. Selain penggunaan pada kasus *sloshing* metode SPH juga digunakan dalam kasus-kasus yang melibatkan aliran seperti pada penelitian *breaking wave* di pantai yang telah dilakukan oleh Makris, *et al.* [4]. Metode SPH juga dapat digunakan untuk memprediksi *impact force* pada *coastal structure* seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Wei, *et al.* [5].

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kemampuan metode SPH dalam melakukan *long duration simulation* pada fenomena *sloshing*. Tangki yang dimodelkan adalah tangki kapal LNG tipe membran yang diskalakan 1:125 seperti ditampilkan pada gambar 1, yang merupakan model eksperimen dari Trimulyono, *et al.* [1]. Untuk mengetahui rasio pengisian yang paling berbahaya, dilakukan perbandingan tekanan dari setiap rasio pengisian seperti ditampilkan pada tabel 1. Selanjutnya dilakukan simulasi *sloshing* pada gerakan *sway* dan *roll* dengan variasi frekuensi dan amplitudo mengikuti eksperimen yang telah dilakukan oleh Trimulyono, *et al.* [1] seperti ditampilkan pada tabel 2.

Penelitian ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari penelitian yang telah dilakukan oleh Trimulyono, *et al.* [1]. Pada penelitian tersebut waktu simulasi selama 30 detik sedangkan pada penelitian ini waktu simulasi mencapai 60 detik yang dimana penggunaan metode SPH pada durasi tersebut tidak umum digunakan, penelitian mengenai *long duration sloshing* juga dilakukan oleh Green, *et al.* [3] dengan durasi mencapai 300 detik. Pada penelitian ini dilakukan *sensitive parameters check* untuk mendapatkan parameter yang memiliki pengaruh terhadap keakuratan hasil. Hasil simulasi divalidasi dengan membandingkan simulasi dengan eksperimen yang dilakukan oleh Trimulyono, *et al.* [1]



Gambar 1. Geometri Tangki

Tabel 1. Dimensi dari tangki prismatik (dalam satuan meter)

No.	Nama	Ukuran	Satuan
1	Tinggi (H)	0.21	m
2	Lebar (l)	0.30	m
3	Panjang (L)	0.38	m
4	Ketinggian air (d)	0.02625 (12.5%)	m
5	-	0.0525 (25%)	m
6	-	0.07875 (37.5%)	m
7	-	0.1050 (50%)	m
8	-	0.13125 (62.5%)	m
9	-	0.1575 (75%)	m
10	-	0.18375 (87.5%)	m

Tabel 2. Kondisi Eksperimen

Gerak Eksternal	Frekuensi (Hz)	Amplitudo (mm/deg)
Sway	1.08	0.82, 1.63, 3.26,
	1.34	6.52
Roll	1.04	1.09, 2.17, 4.33,
	1.30	8.66

2. METODE

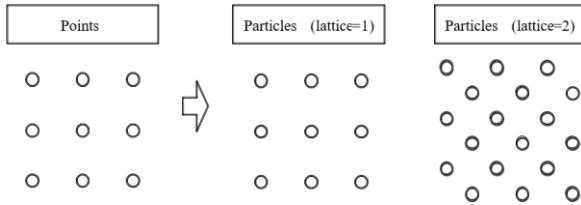
Penelitian ini dikerjakan dengan menggunakan *software open source* DualSPHysics [6]. DualSPHysics merupakan *software* yang dapat memodelkan SPH menggunakan bahasa pemrograman C++ dan CUDA. Terdapat struktur pemrograman XML di DualSPHysics yang terdiri dari *casedef* dan *execution*, dalam *casedef* terdapat *code* untuk memodelkan SPH sebagai berikut, pertama *constantsdef* yang mengatur konstanta berdasarkan kondisi simulasi, kedua dilakukan pengaturan *mkconfig* untuk konfigurasi label antara *boundaries* dengan fluida, ketiga dilakukan pembuatan *geometry definition* untuk menentukan dimana objek akan dibuat, keempat dilakukan pembuatan *geometry mainlist* untuk membuat model tangki dan fluida, dan kelima dilakukan pengaturan *motion* atau gerakan pada tangki. Setelah dilakukan *casedef*, dilakukan pengaturan *execution* untuk mengatur parameter komputasi. Penjelasan lebih lanjut dapat dilihat pada *guide* DualSPHysics [7].

2.1. Pengaturan *constantadef*

constantadef merupakan *code* untuk mengatur konstanta yang dibutuhkan dalam komputasi metode SPH. pengaturan konstanta dilakukan berdasarkan kondisi simulasi yang dibutuhkan, terdapat beberapa parameter didalam *constantadef* sebagai berikut.

2.1.1 Lattice

Lattice merupakan *code* yang mengatur tipe penciptaan partikel dalam DualSPHysics. SPH mendiskritisasi fluida atau struktur kondisi batas dari susunan titik-titik yang merupakan awal mula partikel. Gambar 2 menunjukkan bahwa tiap jumlah *lattice* menentukan jumlah partikel yang mengisi tiap titik-titik. Pada penelitian ini digunakan jumlah *lattice* = 1 untuk meminimalisir jumlah partikel yang berpengaruh terhadap waktu komputasi [7].



Gambar 2. Visualisasi pengaruh jumlah *lattice*

2.1.2 Persamaan Momentum

Metode SPH memecahkan persamaan *Lagrangian* secara numerik dari pengaturan persamaan *Navier-Stokes* yang berfungsi dalam mengatur pergerakan fluida berupa perubahan pada momentum (kecepatan) fluida. Berikut bentuk *Lagrangian* dari pengaturan persamaan *Navier-Stokes* [1].

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho\nabla v \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + g + \tau, \quad (2)$$

$$\frac{Dr}{Dt} = v, \quad (3)$$

D/Dt merupakan turunan material, ρ adalah massa jenis, P adalah tekanan, v adalah kecepatan, g adalah percepatan gravitasi (yang diatur dalam *code*: *gravity*), dan τ mewakili istilah difusi. Persamaan momentum yang dipecahkan dalam SPH, dapat dilihat pada persamaan (4) untuk fasa air dan persamaan (5) untuk fasa udara [1].

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a \cdot \rho_b} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g \quad (4)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a \cdot \rho_b} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + g - 2a\rho_a^2 \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} \nabla_a W_{ab}, \quad (5)$$

2.1.3 Rhop0

rhop0 merupakan *code* yang digunakan untuk mengatur nilai massa jenis dari fluida. Massa jenis memiliki pengaruh dalam perhitungan tekanan pada DualSPHysics, pengaruh dapat dilihat pada

persamaan (6) dan (7) yang dilambangkan dengan ρ_0 . Pada penelitian ini digunakan massa jenis air untuk menyesuaikan fluida yang digunakan pada eksperimen.

2.1.4 Hswl

hswl merupakan *code* yang digunakan untuk mengatur nilai maksimum ketinggian permukaan air atau *surface water level*. *Hswl* memiliki pengaruh dalam perhitungan *speedsystem*, pada penelitian ini nilai *hswl* = 0 sehingga kecepatan system dihitung secara otomatis berdasarkan persamaan (8).

2.1.5 Gamma

gamma merupakan *code* untuk mengatur nilai γ yang mendefinisikan *speed of sound* pada setiap perbedaan densitas dan konstanta politropik. Pada penelitian ini digunakan *gamma* = 7 mengikuti penelitian yang sudah ada sebelumnya [1]. Nilai *gamma* memiliki pengaruh terhadap perhitungan tekanan pada DualSPHysics. Pengaruh tersebut didasari atas sifat *weakly compressible smoothed particle hydrodynamics* (WCSPH) pada DualSPHysics. Berikut turunan persamaan tekanan pada DualSPHysics [1].

$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (6)$$

$$P = b \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] + X - a\rho^2 \quad (7)$$

2.1.6 Speedsystem

speedsystem merupakan *code* yang digunakan untuk mengatur nilai maksimum dari *speedsystem*, nilai dari *speedsystem* ditentukan secara *default* dari nilai *sloshing propagation* yang digunakan. Berikut persamaan untuk menghitung nilai *speedsystem* [6].

$$speedsystem = \sqrt{g \cdot h_{swl}} \quad (8)$$

2.1.7 Coefsound

coefsound merupakan *code* yang digunakan dalam mengatur koefisien *speed of sound* untuk mendapatkan nilai *speedsound* yang dapat dilihat pada persamaan (9) [6].

2.1.8 Speedsound

speedsound merupakan *code* untuk mengatur parameter *speed of sound* yang digunakan dalam metode SPH. Berikut persamaan untuk menghitung nilai *speedsound* [6].

$$c_s = coef_{sound} \cdot \sqrt{g \cdot h_{swl}} \quad (9)$$

2.1.9 Coefh

Smoothing length (h) dapat didefinisikan sebagai jarak jangkauan suatu partikel untuk dapat berinteraksi dengan partikel lain didalam jangkauannya atau neighboring particles. Besarnya nilai smoothing length dipengaruhi nilai coefh sebagaimana ditampilkan pada persamaan smoothing length dalam 2D berikut [7].

$$h = coefh \cdot \sqrt{dp} \quad (10)$$

Smoothing length berpengaruh terhadap pergerakan partikel, semakin besar smoothing length semakin besar juga jarak partikel, jarak yang terlalu besar dapat membatasi pergerakan partikel sedangkan jarak yang berdekatan dapat memperbanyak interaksi antar partikel sehingga dapat memberikan hasil lebih akurat namun memiliki waktu komputasi yang lebih lama, maka dibutuhkan nilai coefh yang optimal untuk mendapatkan hasil yang akurat dengan waktu komputasi yang rendah. Untuk mendapat hasil optimal dilakukan studi konvergensi pada nilai coefh yang berbeda, diantaranya 0.95, 1.0, 1.2, dan 1.5. Studi konvergensi dilakukan dengan menganalisa tekanan dinamis sloshing gerakan sway pada $A = 6,52$ mm dan $f = 1,08$ Hz untuk setiap nilai coefh. Hasil studi konvergensi ditampilkan pada grafik sebagai berikut.

2.1.10 Cflnumber

cflnumber merupakan *code* yang digunakan untuk mengatur nilai CFL, nilai CFL digunakan dalam mengalikan nilai Δt yang merupakan nilai kenaikan waktu pada tiap *time step* untuk menghitung nilai Δt_f , perhitungan tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut [8].

$$\Delta t_f = CFL \cdot \min(\Delta t_f, \Delta t_{cv}), \quad (11)$$

$$\Delta t_f = \frac{\min}{a} \left(\sqrt{\frac{h}{|f_a|}} \right), \quad (12)$$

$$\Delta t_{cv} = \frac{\min}{a} \frac{h}{C_s + \frac{\max}{b} \left| \frac{h v_{ab} \cdot r_{ab}}{(r_{ab}^2 + \eta^2)} \right|}, \quad (13)$$

2.2. Pengaturan mkconfig

Mk merupakan label yang digunakan dalam menentukan perintah suatu objek yang dibuat, selain itu *mk* digunakan untuk menerapkan fitur seperti *movement* dan *rigid motion* secara spesifik pada setiap titik penempatan partikel. *Mkconfig*

merupakan *code* yang digunakan dalam mengatur nilai *mk*, pada penelitian ini label *mk* untuk boundary particle sebanyak 240 label dan fluida sebanyak 10 label, nilai tersebut digunakan berdasarkan petunjuk *software* DualSPHysics.

2.3. Pembuatan geometry

Proses pembuatan geometry terdiri dari *geometry definition* dan *geometry mainlist*. *Geometry definition* merupakan domain dimana partikel akan dibuat, sedangkan *geometry mainlist* merupakan perintah untuk membuat geometri tangki dan fluida. Perintah dalam membuat geometri dilakukan dengan menggunakan kordinat x , y , dan z . Model tangki yang digunakan pada penelitian ini merupakan tangki prismatic untuk mewakili bentuk tangki kapal LNG tipe membran. Tangki tersebut diskalakan 1:125 berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan oleh Trimulyono *et al* [1]. Pembuatan model tangki prismatic menggunakan *software* DualSPHysics dibentuk melalui *code* yang tersusun pada tahap *geometry definition* dan *geometry mainlist*.

2.3.1. Geometry definition

Tahap *geometry definition* memiliki parameter *dp*, *positionmin*, dan *positionmax*. *dp* dapat didefinisikan sebagai jarak partikel, sedangkan *positionmin* dan *positionmax* merupakan domain dimana partikel akan dibuat, sehingga pembuatan *geometry* hanya dapat dibuat sebatas domain yang telah ditentukan. Gambar 3 menampilkan pengaturan *geometry definition* pada *script XML*.

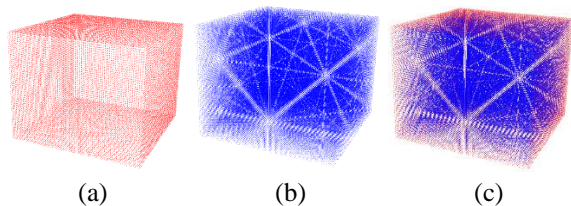
```
<geometry>
  <definition dp="0.0008" units_comment="metres (m)">
    <pointmin x="0.18" y="-1" z="-0.2" />
    <pointmax x="0.18" y="1" z="0.5" />
  </definition>
```

Gambar 3. Geometry-definition

2.3.2. Geometry mainlist

Tahap ini memiliki beberapa parameter yang perlu diperhatikan sebagaimana ditampilkan pada gambar 5. *Setshapemode* merupakan perintah untuk mendefinisikan operasi gambar, terdapat beberapa operasi gambar dalam *setshapemode* yaitu *dp/real* dan *fluid/bound/void*. Operasi gambar tersebut ditentukan berdasarkan kondisi dari kasus yang diamati, pada penelitian ini digunakan operasi gambar tangki yaitu *dp* dan *bound*, *code* tersebut menggambarkan interaksi antara partikel dengan dinding tangki. *dp* digunakan untuk menyesuaikan koordinat tangki terhadap jarak partikel karena pada kasus *sloshing* tangki bergerak sehingga perlu diperhatikan gap antar partikel dengan dinding

tangki, sedangkan *bound* digunakan untuk mengatur *boundary condition* tangki. Selanjutnya dilakukan pengaturan pada *setdrawmode*, pada tahap tersebut dilakukan pengaturan *mode* gambar yang digunakan, pengaturan disesuaikan berdasarkan kasus, pada penelitian ini gambar terdiri dari tangki yang terletak pada bagian luar (*face*) dan fluida pada bagian dalam tangki (*solid*) sehingga kedua *mode* gambar tersebut terbentuk dalam satu *mode* gambar “*full*”, visualisasi dari mode gambar tersebut dapat dilihat pada gambar 4. *Geometry* tangki dapat dibuat melalui *software* lain yang dapat melakukan penyimpanan VTK, untuk dapat diaplikasikan pada XML digunakan *code drawfilevtk*. Pada studi ini perintah *drawfilevtk* digunakan untuk membuat geometri seperti terlihat pada gambar 5. Untuk membuat partikel digunakan perintah *fillbox*.



Gambar 4. Pengaturan *setdrawmode* (a) *face*, (b) *solid*, dan (c) *full*

```
<commands>
<mainlist>
<setshapemode>dp | bound</setshapemode>
<setdrawmode mode="full" />
<setmkbound mk="50" />
<drawfilevtk file="TANK.vtk"/>
<setmkbound mk="2" />
<drawpoint x="0.18" y="0.4" z="0.25" />
<setmkbound mk="3" />
<drawpoint x="0.18" y="-0.2" z="0.25" />
<setmkbound mk="4" />
<drawpoint x="0.18" y="-0.2" z="-0.2" />
<setmkbound mk="7" />
<drawpoint x="0.18" y="0.4" z="-0.2" />
<setmkbound mk="8" />
<drawpoint x="0.18" y="-0.32" z="0.05" />
<setmkbound mk="9" />
<drawpoint x="0.18" y="-0.32" z="0.25" />
<setmkbound mk="11"/>
<drawpoint x="0.18" y="0.4" z="0.2" />
<setmkbound mk="12"/>
<drawpoint x="0.18" y="0.4" z="0.2" />
<setmkbound mk="13"/>
<drawpoint x="0.2" y="-0.2" z="0.3" />
<setmkbound mk="15" />
<drawpoint x="0.6" y="0.4" z="-0.2" />
<setmkbound mk="60" />
<drawpoint x="0.18" y="0.39" z="0.05" />
<setmkbound mk="70" />
<drawpoint x="0.18" y="0.39" z="0.152" />
<setmkfluid mk="0" />
<fillbox x="0.18" y="0.2" z="0.01">
  <modefill>void</modefill>
  <point x="0.17" y="0" z="0" />
  <size x="0.38" y="0.32" z="0.0525" />
</fillbox>
<shapeout file="" reset="true"/>
</mainlist>
</commands>
```

Gambar 5. *Geometry-Mainlist*

2.4. Pengaturan *motion*

Tahap ini merupakan tahapan untuk mengatur gerakan tangki, dalam pengaturan *motion* terdapat parameter seperti ditampilkan pada gambar 6. *Code objreal* merupakan *code* untuk mendefinisikan suatu gerakan terhadap partikel dengan label *mk* yang dituju. *Code begin* digunakan untuk menentukan waktu mulai gerakan dan berakhirnya gerakan dan *code mvrotfile* digunakan untuk kasus gerakan rotasi, gerakan rotasi diambil dari data eksperimen yang sudah ada dengan format *txt* dan menyesuaikan satuan dari gerak rotasi yang digunakan [1]. Jika menggunakan gerakan rotasi perlu diperhatikan juga pusat rotasi dari tangki yang diatur dalam *code axisp*.

```
<motion>
  <objreal ref="50">
    <begin mov="1" start="0.00" finish="100" />
    <mvrotfile id="1" duration="100" angleunits="degrees">
      <file name="sloshingfix.txt"/>
      <axisp1 x="-0.3" y="0.15" z="0.353" />
      <axisp2 x="0.6" y="0.15" z="0.353"/>
    </mvrotfile>
  </objreal>
</motion>
```

Gambar 6. Motion XML script

2.5. Pengaturan *execution*

Tahapan ini merupakan tahapan yang berpengaruh terhadap hasil simulasi. Sebagian parameter dari pengaturan *execution* pada penelitian ini mengambil referensi dari penelitian yang sudah dilakukan oleh Trimulyono *et al.* [1]. Terdapat beberapa parameter yang perlu disesuaikan pada pengaturan *execution* penelitian ini seperti penggunaan *simple precision* untuk mengurangi waktu komputasi yang terlalu besar, namun hal tersebut juga dapat mengurangi akurasi hasil komputasi. Selain itu dilakukan pengaturan waktu simulasi dengan *code TimeMax* yang menyesuaikan waktu pada data eksperimen. Pada simulasi penelitian ini *post processing calculation* dilakukan setiap 0.01 yang diatur dalam *code TimeOut*. Gambar 7 menampilkan skrip bagian *execution*, Gambar 8 merupakan skrip untuk *solver* dalam menjalankan program, dan gambar 9 adalah skrip untuk menjalankan program dan *post processing*.

```
63 | <objreal ref="50">
64 |   <begin mov="1" start="0.00" finish="100" />
65 |   <mvrotfile id="1" duration="100" angleunits="degrees">
66 |     <file name="sloshingfix.txt"/>
67 |     <axisp1 x="-0.3" y="0.15" z="0.353" />
68 |     <axisp2 x="0.6" y="0.15" z="0.353"/>
69 |   </mvrotfile>
70 | </objreal>
71 | </motion>
72 | </casedef>
73 | <execution>
74 |   <parameters>...</parameters>
100 | </execution>
101 | </case>
```

Gambar 7. Contoh skrip XML pada bagian parameter

```

1 #echo off
2
3 rem "name" and "dirout" are named according to the testcase
4
5 set name=CaseSloshingMotion
6 set dirout=%name%.out
7
8 rem "executables" are renamed and called from their directory
9
10 set dirbin=../../bin/windows
11 set gencase="%dirbin%/GenCase4_win64.exe"
12 set dsphliquidgascpu="%dirbin%/DualSPHysics4.0_LiquidGasCPU_win64.exe"
13 set dsphliquidgasgpu="%dirbin%/DualSPHysics4.0_LiquidGas_win64.exe"
14 set boundaryvtk="%dirbin%/BoundaryVTK4_win64.exe"
15 set partvtk="%dirbin%/PartVTK4_win64.exe"
16 set partvtkout="%dirbin%/PartVTKOut4_win64.exe"
17 set measuretool="%dirbin%/MeasureTool4_win64.exe"
18 set computeforces="%dirbin%/ComputeForces4_win64.exe"
19 set isosurface="%dirbin%/IsoSurface4_win64.exe"
20 set flowtool="%dirbin%/FlowTool4_win64.exe"
21 set floatinginfo="%dirbin%/FloatingInfo4_win64.exe"
22

```

Gambar 8. Contoh solver dalam windows batch file

```

38 gencase! %name! Def %dirout%!name! -save:all
39 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
40
41 dsphliquidgasgpu! -gpu %dirout%!name! %dirout! -svres
42 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
43
44 set dirout2=%dirout%\particles
45 mkdir %dirout2%
46 partvtk! -dirin %dirout! -savevtk %dirout2%\PartFluid -onlytype:-all,+fluid -vars:+press,mk
47 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
48
49 partvtk! -dirin %dirout! -savevtk %dirout2%\PartTank -onlytype:-all,+moving
50 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail
51
52 set dirout2=%dirout%\measuretool
53 mkdir %dirout2%
54
55 measuretool! -dirin %dirout! -pointpos Pl.csv -onlytype:-all,+fluid -vars:-all,+press,+kcorr
56 if not "%ERRORLEVEL%" == "0" goto fail

```

Gambar 9. Contoh skrip pada windows batch file

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ditampilkan dengan menganalisa perbandingan tekanan antara eksperimen dengan simulasi SPH. Dilakukan perbandingan tekanan hidrostatik dan hidrodinamis sebagai acuan dalam membandingkan hasil eksperimen dengan simulasi SPH. Perbandingan tekanan hidrodinamis dilakukan dengan membandingkan *sloshing* pada kondisi *single-phase* dan *two-phase*.

3.1. Static Pressure

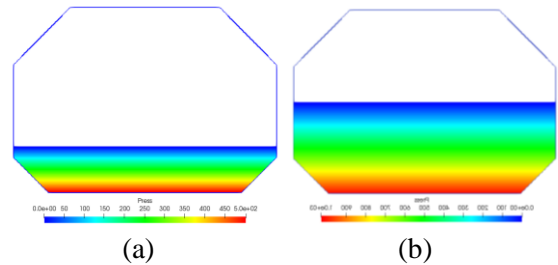
Dalam kondisi diam tangki mengalami tekanan hidrostatik, hal tersebut juga dapat dijadikan acuan untuk membanding eksperimen dengan hasil simulasi SPH. Untuk dapat mengetahui tekanan hidrostatik yang terjadi pada kondisi eksperimen dapat menggunakan persamaan tekanan berikut.

$$P = \rho \cdot g \cdot h \text{ (Pa)} \quad (14)$$

Perhitungan tekanan hidrostatik dilakukan pada setiap rasio pengisian 25% (0.0525 m) dan juga 50% (0.1050 m). Sedangkan untuk tekanan hidrostatik pada simulasi SPH dapat diketahui melalui hasil simulasi yang ditampilkan pada *software paraview* (gambar 6). Berikut hasil perhitungan tekanan hidrostatik hasil eksperimen menggunakan persamaan 23.

$$\begin{aligned}
 P_{25\%} &= 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.0525 \\
 &= 514.5 \text{ Pa} \\
 P_{50\%} &= 1000 \cdot 9.8 \cdot 0.1050 \\
 &= 1029 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

Gambar 10 menampilkan hasil tekanan hidrostatik yang menunjukkan bahwa pada rasio pengisian 25% tekanan hidrostatik 500 Pa dan pada rasio pengisian 50% tekanan hidrostatik 1000 Pa.



Gambar 10. Tampilan tekanan hidrostatik pada tangki dengan rasio pengisian (a) 25% dan (b) 50%

Dari hasil perhitungan diatas dapat dilihat perbedaan tekanan hidrostatik antara eksperimen dengan simulasi SPH menggunakan persamaan persentase berikut.

$$P = \left| \frac{P_{Exp} - P_{SPH}}{P_{SPH}} \right| \times 100\% \quad (15)$$

$$P_{25\%} = \left| \frac{514.5 - 500}{500} \right| \times 100\%$$

$$P_{25\%} = 2.9\%$$

$$P_{50\%} = \left| \frac{1029 - 1000}{1000} \right| \times 100\%$$

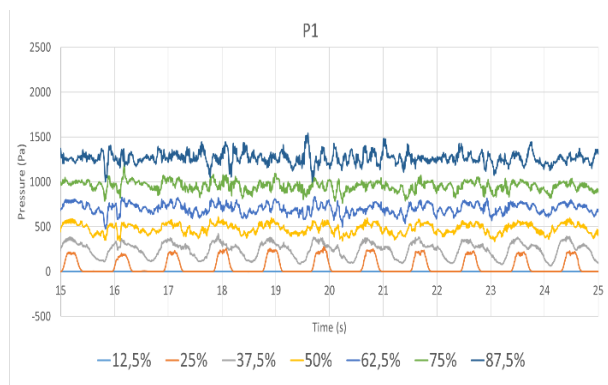
$$P_{50\%} = 2.9\%$$

Perhitungan diatas menampilkan selisih atau perbedaan dari tekanan hidrostatik pada kondisi simulasi SPH dengan hasil analisa analitik yang menunjukkan perbedaan 2.9%.

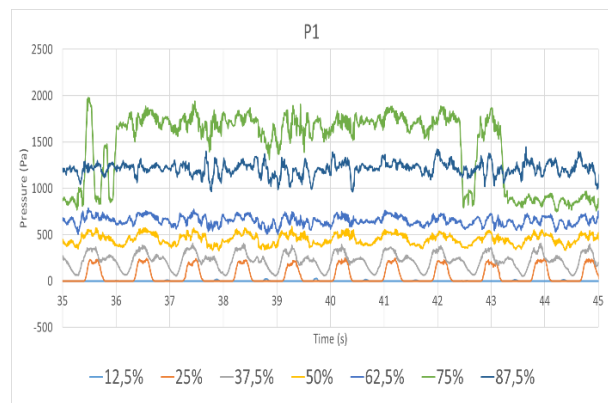
3.2. Dynamic Pressure

Simulasi dilakukan pada rasio pengisian 12.5%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%, 75%, dan 87.5% untuk mengetahui perbedaan karakteristik pada setiap rasio pengisian menggunakan metode SPH. Berdasarkan regulasi BKI vol. IX tahun 2019 bagian I mengenai aturan kapal yang membawa muatan *liquefied gas*, disebutkan pada section 15.3 bahwa batas pengisian adalah 98% pada suhu

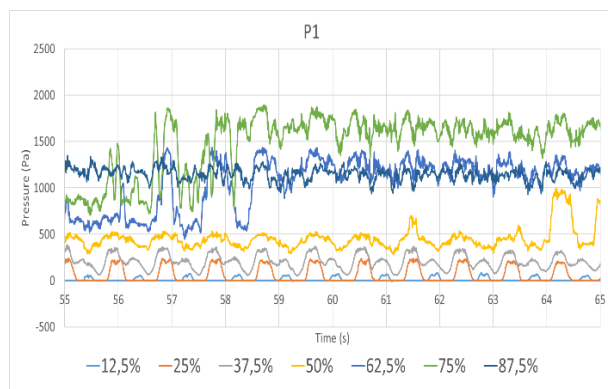
tertentu. Berikut ditampilkan hasil simulasi SPH dari setiap rasio pengisian.



(a)



(b)



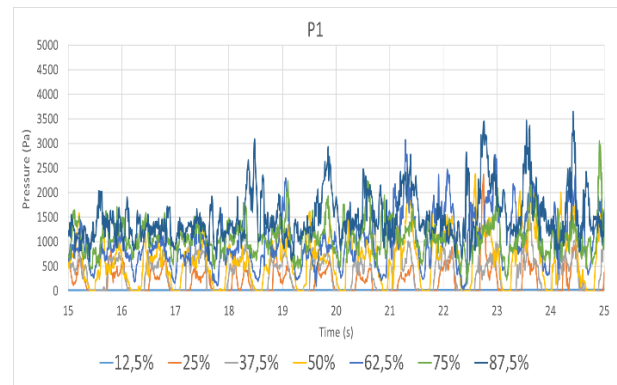
(c)

Gambar 11. Perbandingan tekanan pada gerakan sway dengan kondisi *single-phase* (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

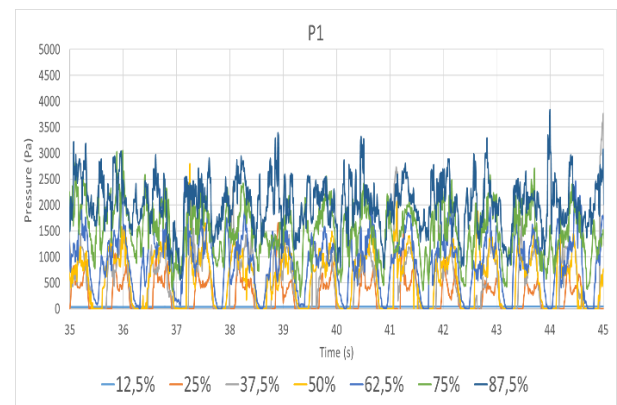
Tabel 3. Nilai tekanan setiap rasio pengisian pada gerakan *sway*

<i>h</i>	Mean (Pa)			
	15-25 s	35-45 s	55-65 s	75 s
12.5%	0.01	0.89	10.68	2.17
25%	58.99	59.57	58.72	52.80
37.5%	244.92	221.32	204.95	225.41
50%	480.42	452.59	450.06	507.30
62.5%	703.96	651.66	1061.00	804.46
75%	953.88	1469.43	1478.96	1173.05

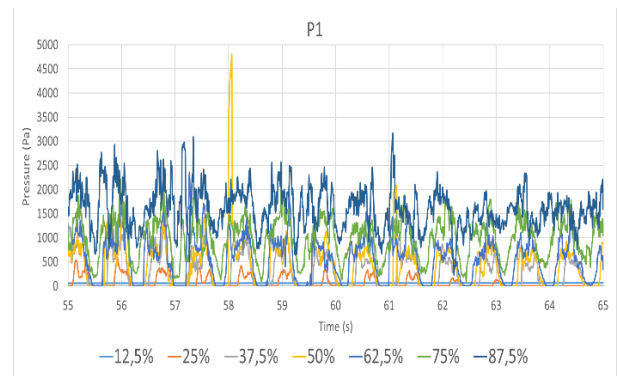
87.5% 1263.53 1211.60 1146.56 1210.88



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Perbandingan tekanan pada gerakan roll dengan kondisi *single-phase* (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

Tabel 4. Nilai tekanan setiap rasio pengisian pada gerakan *roll*

<i>h</i>	Mean (Pa)			
	15-25 s	35-45 s	55-65 s	80 s
12.5%	23.58	1.50	0.00	5.85
25%	193.35	230.99	67.08	140.98
37.5%	332.73	527.54	312.89	363.33
50%	647.50	583.40	426.44	537.55
62.5%	1018.74	916.33	572.75	800.93
75%	1086.74	1510.30	992.79	1194.17

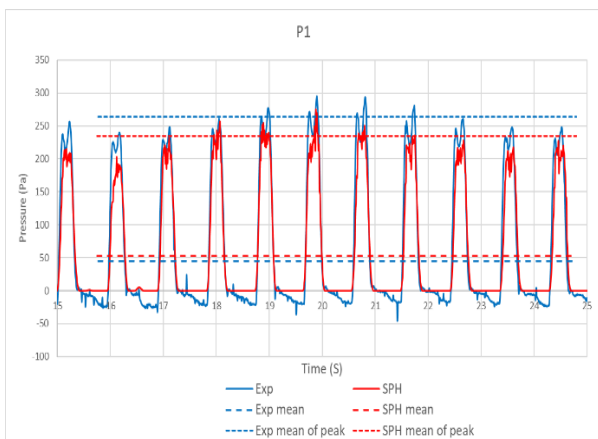
Hasil diatas menunjukkan bahwa semakin besar rasio pengisian semakin besar juga tekanan yang dihasilkan sebagaimana ditampilkan pada tabel 3 dan 4 namun tekanan yang dihasilkan dari simulasi SPH menampilkan konsistensi hasil yang baik selama 60 detik pada rasio pengisian $\leq 50\%$ seperti ditampilkan pada gambar 11 dan 12. Selanjutnya dilakukan validasi dengan membandingkan tekanan dinamis antara hasil eksperimen dengan simulasi SPH. perbandingan dilakukan berdasarkan perbedaan kondisi *single-phase* dan *two-phase* pada simulasi SPH dengan nilai frekuensi yang mendekati frekuensi natural tangki. Nilai frekuensi natural didapat dari persamaan berikut [9].

$$\omega_n = \frac{\sqrt{i\pi g \tanh\left(\frac{i\pi d}{l}\right)}}{l} \quad (16)$$

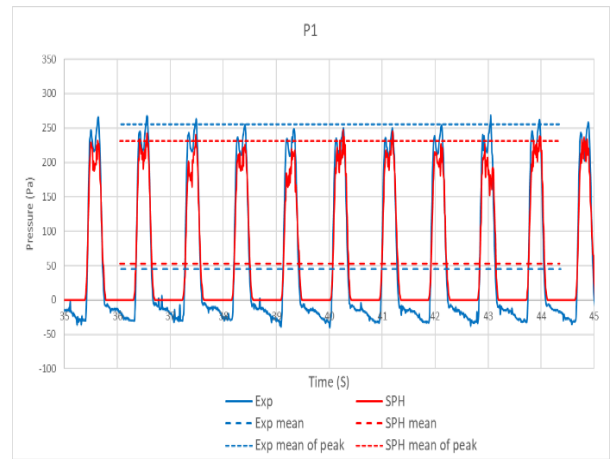
$$\frac{\omega_n'^2}{\omega_n^2} = 1 - \frac{\delta_1 \delta_2^{-1} \sinh^2\left(\frac{\pi i \delta_2}{l}\right) - \delta_1 \delta_2^{-1} \sin^2\left(\frac{\pi i \delta_1}{l}\right)}{\pi i \sinh\left(\frac{2\pi i d}{l}\right)} \quad (17)$$

3.2.1. Filling Ratio 25% Sway

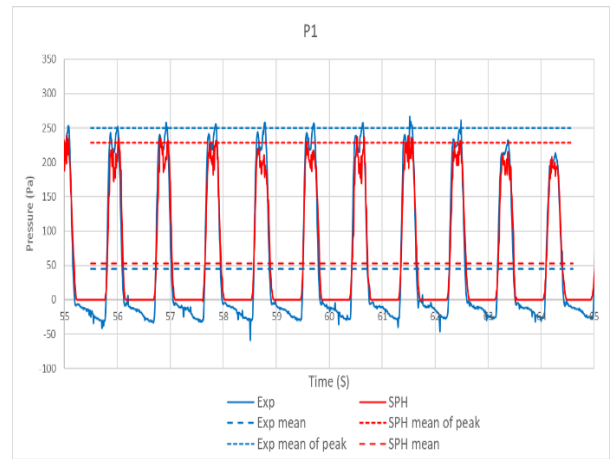
Gambar 11 menampilkan perbandingan antara hasil simulasi SPH dengan eksperimen pada kondisi *single-phase*. Jika dilihat dari rata-rata puncak tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata puncak tekanan 231 Pa lebih rendah dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 256 Pa, sedangkan untuk rata-rata tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata tekanan 53 Pa lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata tekanan 45 Pa.



(a)



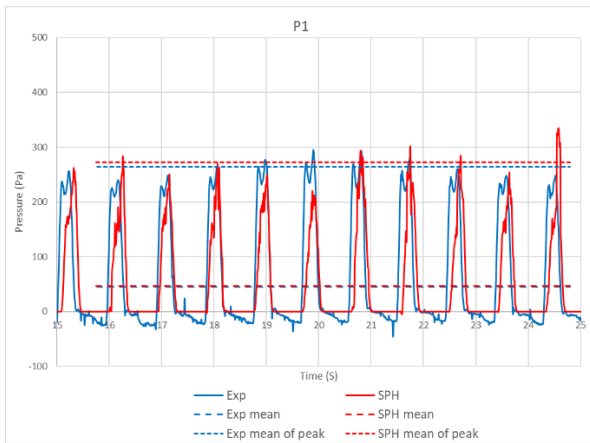
(b)



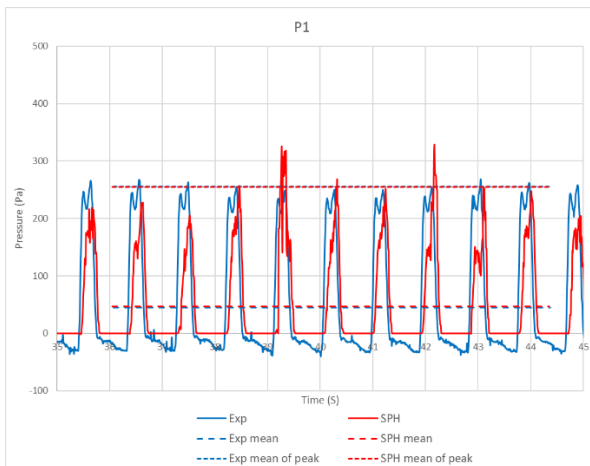
(c)

Gambar 11. Perbandingan tekanan pada kondisi *single-phase* dengan frekuensi 1.08 Hz dan amplitudo 6.52 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

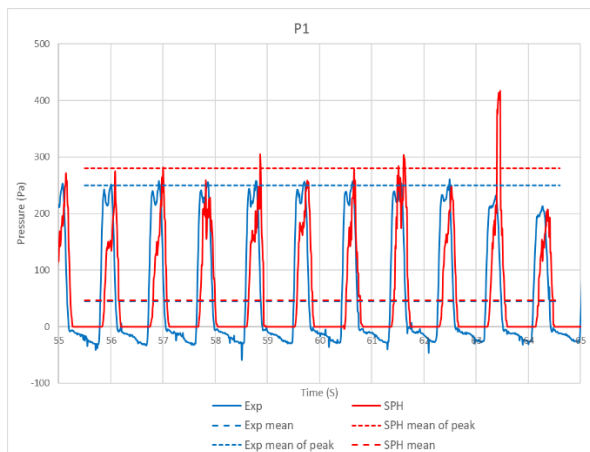
Gambar 12 menampilkan perbandingan antara hasil simulasi SPH dengan eksperimen pada kondisi *two-phase*. Jika dilihat dari rata-rata puncak tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata puncak tekanan 269 Pa lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 256 Pa, sedangkan untuk rata-rata tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata tekanan 47 Pa lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata tekanan 45 Pa.



(a)



(b)



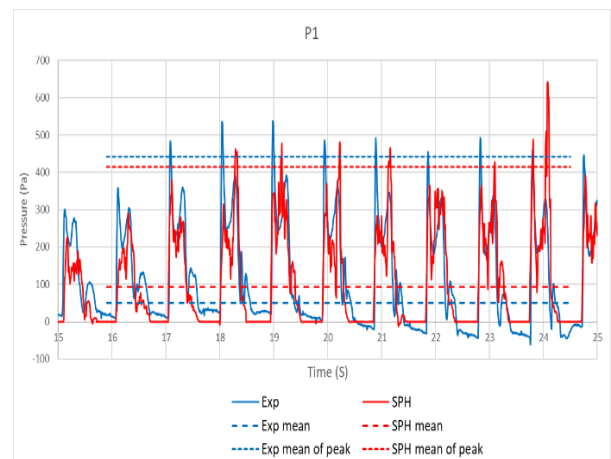
(c)

Gambar 12. Perbandingan tekanan pada kondisi *two-phase* dengan frekuensi 1.08 Hz dan amplitudo 6.52 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

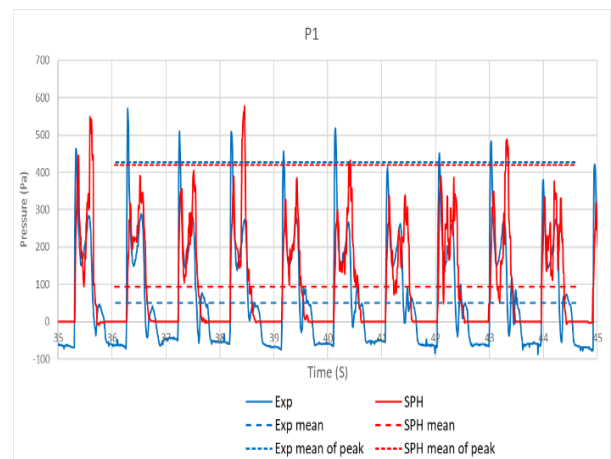
3.2.2. Filling Ratio 25% Roll

Gambar 13 menampilkan perbandingan antara hasil simulasi SPH dengan eksperimen pada kondisi *single-phase*. Jika dilihat dari rata-rata puncak tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata puncak tekanan 496 Pa lebih tinggi

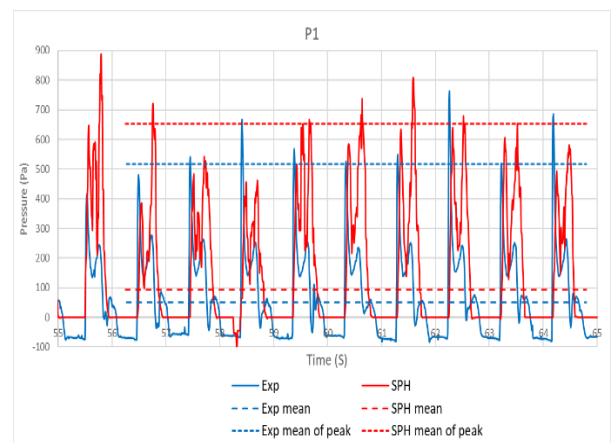
dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 457 Pa, sedangkan untuk rata-rata tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata tekanan 93 Pa lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata tekanan 64 Pa.



(a)



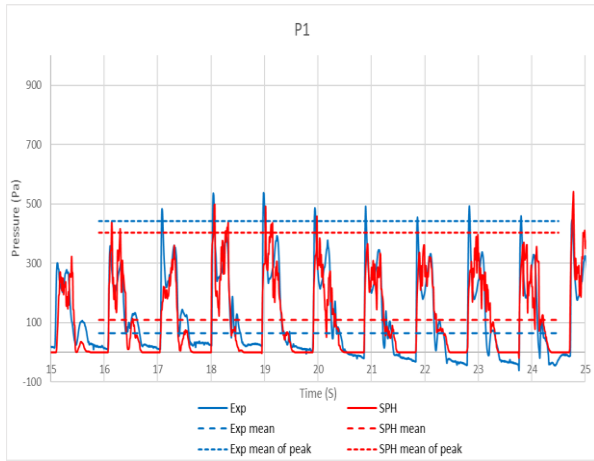
(b)



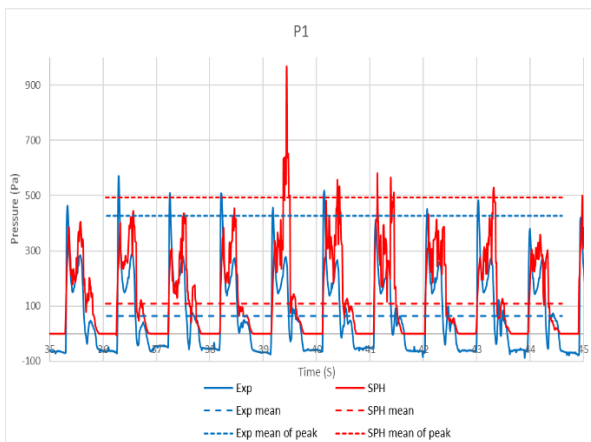
(c)

Gambar 13. Perbandingan tekanan pada kondisi *single-phase* dengan frekuensi 1.04 Hz dan amplitudo 8.66 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

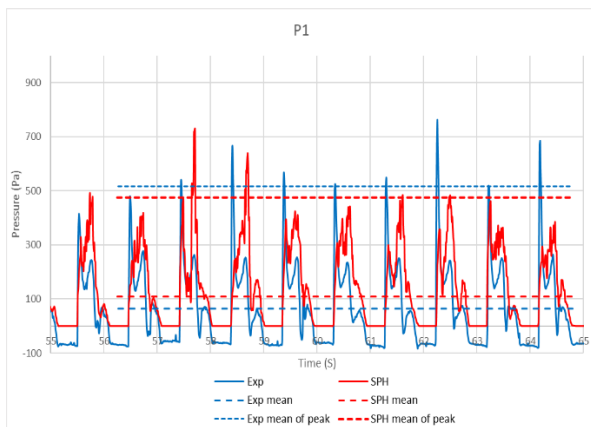
Gambar 14 menampilkan perbandingan antara hasil simulasi SPH dengan eksperimen pada kondisi *two-phase*. Jika dilihat dari rata-rata puncak tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata puncak tekanan 462 Pa lebih rendah dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 457 Pa, sedangkan untuk rata-rata tekanan simulasi SPH menampilkan hasil rata-rata tekanan 109 Pa lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimen dengan rata-rata tekanan 64 Pa.



(a)



(b)



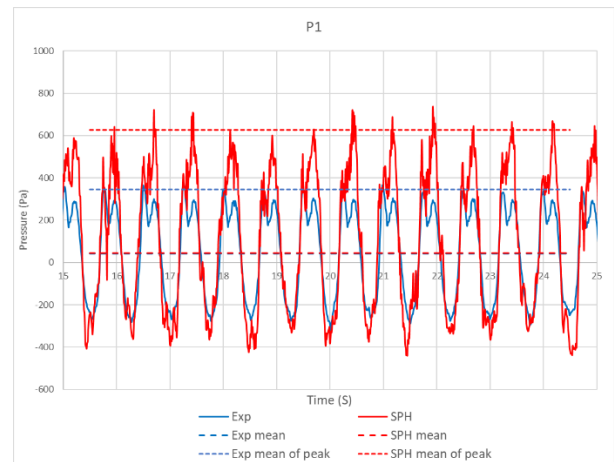
(c)

Gambar 14. Perbandingan tekanan pada kondisi *two-phase* dengan frekuensi 1.04 Hz dan

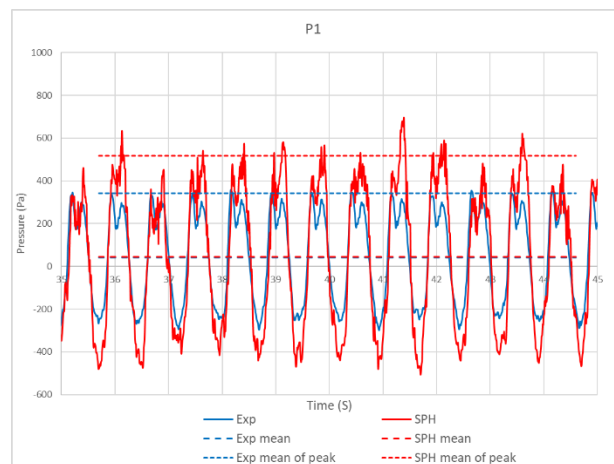
amplitudo 8.66 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

3.2.3. Filling Ratio 50% Sway

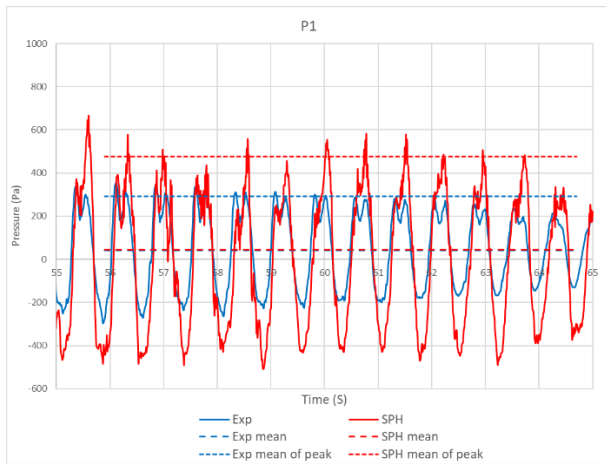
Gambar 15 menampilkan perbandingan antara hasil simulasi *single-phase* SPH dengan eksperimen pada gerakan *sway* dengan rasio pengisian 50%. Jika dilihat dari rata-rata puncak tekanan, simulasi SPH memiliki rata-rata puncak tekanan 540 Pa jauh lebih besar dari eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 336 Pa. Apabila dilihat dari rata-rata tekanan, simulasi SPH menampilkan tekanan 44,76 Pa lebih tinggi dari eksperimen dengan tekanan 41,43 Pa.



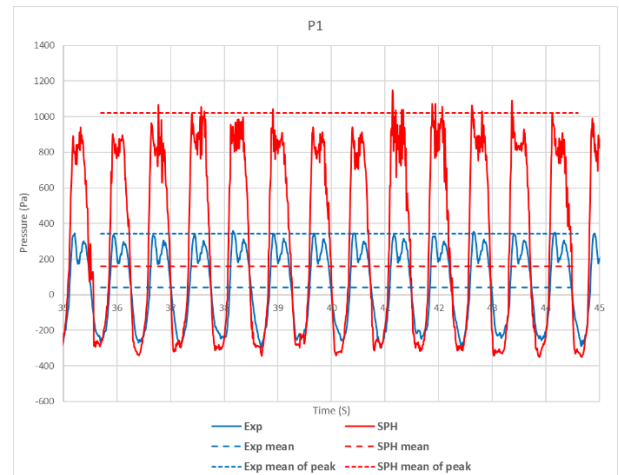
(a)



(b)



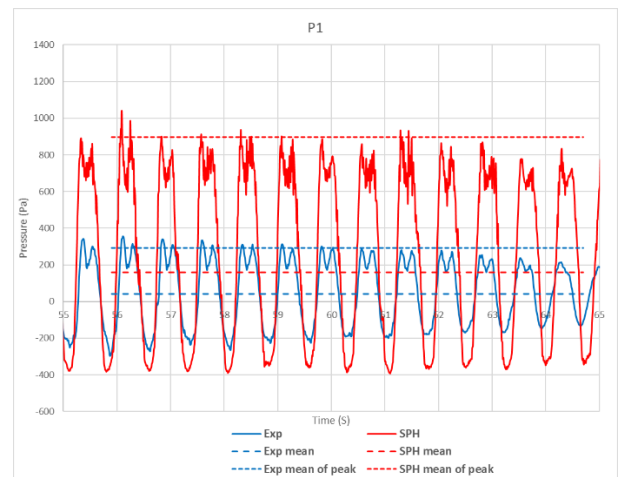
(c)



(b)

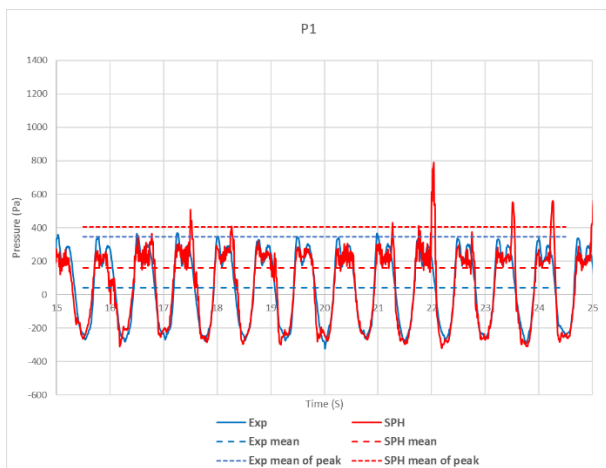
Gambar 15. Perbandingan tekanan pada kondisi *single-phase* dengan frekuensi 1.34 Hz dan amplitudo 6.52 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

Gambar 16 menampilkan hasil perbandingan nilai tekanan antara simulasi SPH dengan eksperimen. Dapat dilihat bahwa pada simulasi SPH memiliki tren dan akurasi yang kurang baik dengan nilai rata-rata puncak tekanan simulasi SPH 774 Pa, lebih besar dari eksperimen dengan tekanan 336 Pa, sedangkan untuk nilai rata-rata tekanan simulasi SPH menampilkan hasil 159,67 Pa, lebih tinggi dari eksperimen dengan tekanan 41,43 Pa.



(c)

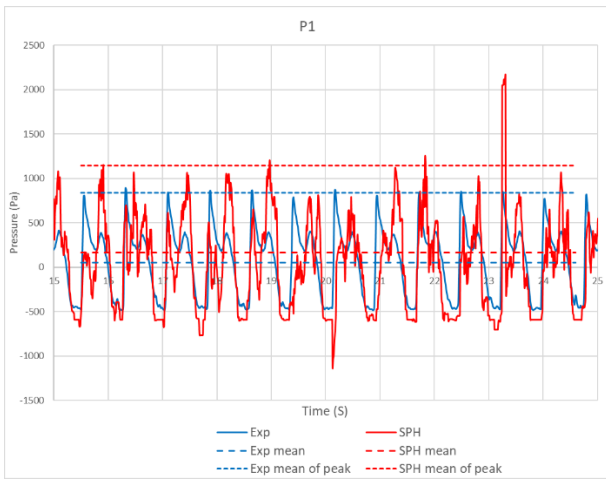
Gambar 16. Perbandingan tekanan pada kondisi *two-phase* dengan frekuensi 1.34 Hz dan amplitudo 6.52 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.



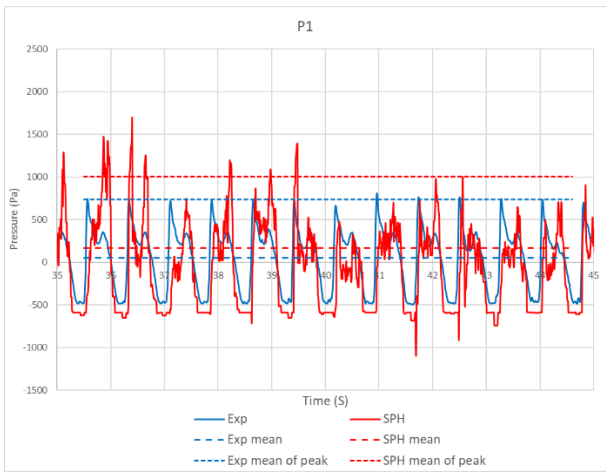
(a)

3.2.4. Filling Ratio 50% Roll

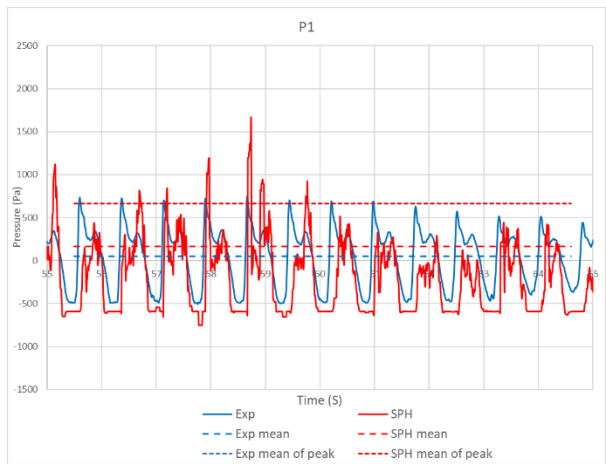
Gambar 17 menampilkan perbandingan antara hasil simulasi *single-phase* SPH dengan eksperimen pada gerakan *roll* dengan rasio pengisian 50%. Dilihat dari rata-rata puncak tekanan, pada kondisi ini simulasi SPH memiliki rata-rata puncak tekanan 1145 Pa jauh lebih tinggi dari eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 838 Pa. Sedangkan pada kondisi ini rata-rata tekanan simulasi SPH menampilkan tekanan 165,35 Pa lebih tinggi dari eksperimen dengan tekanan 52 Pa.



(a)



(b)

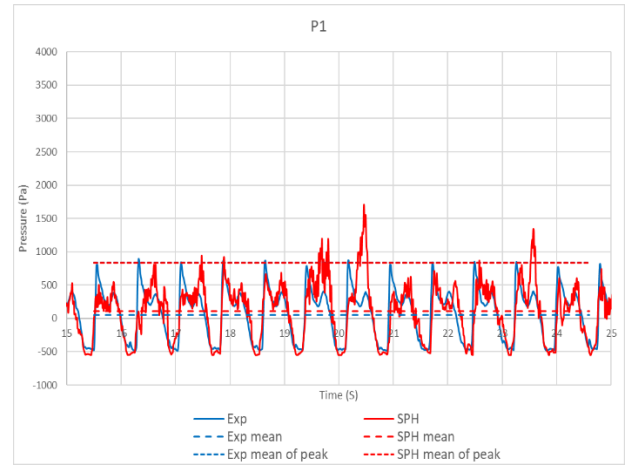


(c)

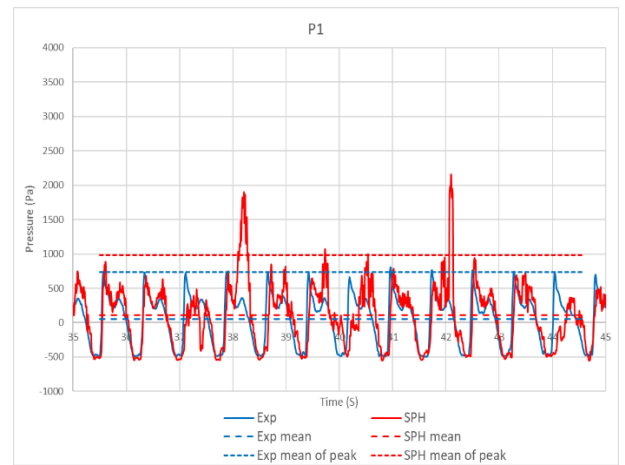
Gambar 17. Perbandingan tekanan pada kondisi *single-phase* dengan frekuensi 1.30 Hz dan amplitudo 8.66 pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

Gambar 18 menampilkan hasil perbandingan tekanan antara simulasi *two-phase* SPH dengan eksperimen. Jika dilihat dari nilai rata-rata puncak tekanan, simulasi *two-phase* SPH menampilkan hasil rata-rata puncak tekanan 1084

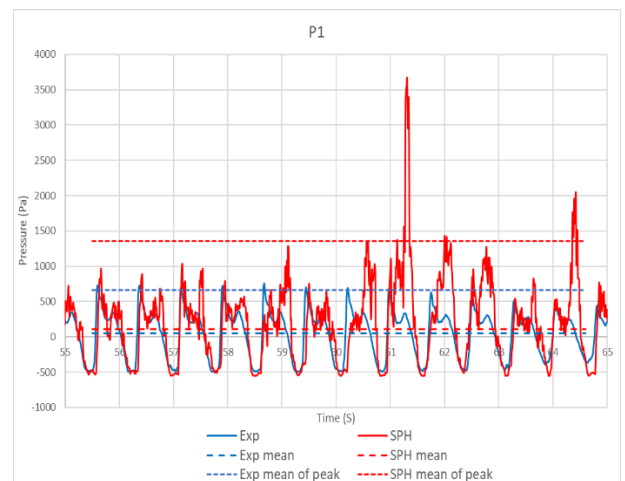
Pa lebih besar dari eksperimen dengan rata-rata puncak tekanan 838 Pa. Sedangkan pada nilai rata-rata tekanan simulasi *two-phase* SPH justru menampilkan nilai yang lebih tinggi dengan rata-rata tekanan 110 Pa dari eksperimen dengan rata-rata tekanan 52 Pa.



(a)



(b)



(c)

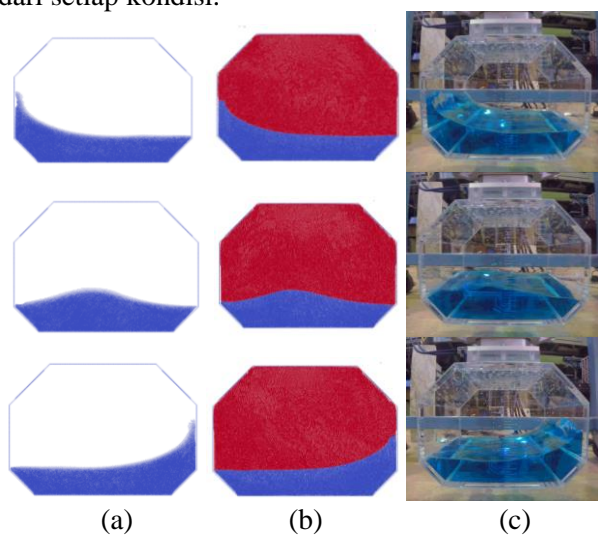
Gambar 18. Perbandingan tekanan pada gerakan *roll* dengan frekuensi 1.30 Hz dan amplitudo 8.66

pada waktu (a) 15 – 25 detik, (b) 35 – 45 detik, (c) 55 – 65 detik.

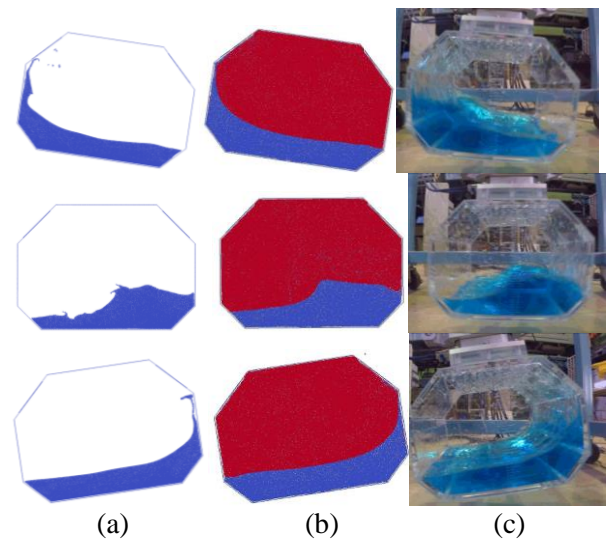
Jika dilihat dari setiap grafik, terdapat perbedaan hasil simulasi SPH antara *single-phase* dan *two-phase* yang menampilkan kecenderungan hampir sama, namun pada simulasi *two-phase* SPH menampilkan ketepatan yang lebih akurat dibandingkan dengan *single-phase*, keakuratan pada kondisi *two-phase* dapat dilihat pada rasio pengisian 25% dengan gerakan *sway* yang memiliki selisih rata-rata tekanan 4,2% dan selisih rata-rata puncak tekanan 4,8% sedangkan pada kondisi *single-phase* selisih rata-rata tekanan 15% dan selisih rata-rata puncak tekanan 10,8%. Hal tersebut membuktikan bahwa fasa udara sangat berpengaruh dalam hasil simulasi *two-phase* SPH karena kondisi simulasi yang hampir menyerupai kondisi eksperimen. Ada pun hasil yang memiliki *error* sangat jauh seperti ditampilkan pada 50% *roll* terjadi akibat penggunaan *simple precision* sehingga tingkat akurasi berkurang, permasalahan dalam konsistensi hasil juga dapat terlihat pada kondisi 50% *sway* yang dimana hasil yang akurat terjadi selama 30 detik awal, hal tersebut memang masih menjadi permasalahan dalam metode ini seperti yang disampaikan oleh Green *et al.* [3].

4.3. Free Surface Evolution

Setelah melalui tahap komputasi dilakukan visualisasi dari data yang dihasilkan, visualisasi tersebut dilakukan dengan menggunakan aplikasi yang dapat membaca *file* dengan format VTK. Pada penelitian ini visualisasi ditampilkan melalui *open source software* ParaView. Berikut hasil visualisasi dari setiap kondisi.

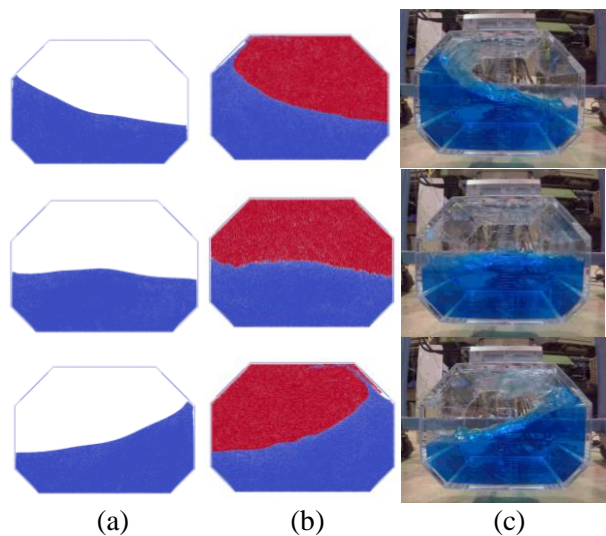


Gambar 19. Perbedaan visualisasi (a) *single-phase* dan (b) *two-phase* pada gerakan *sway* dengan *filling ratio* 25%

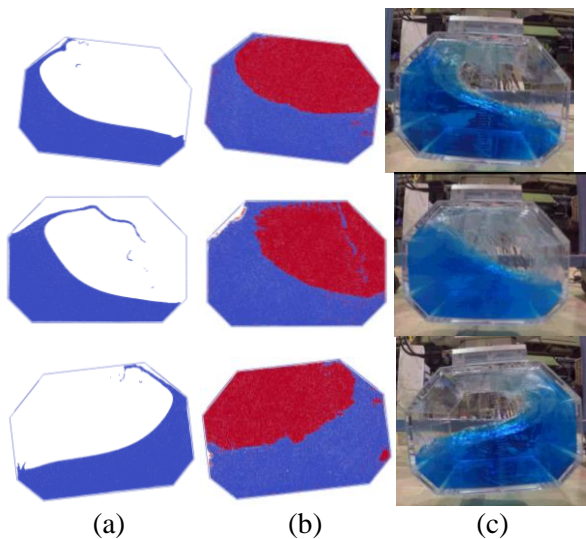


Gambar 20. Perbedaan visualisasi (a) *single-phase* dan (b) *two-phase* pada gerakan *roll* dengan *filling ratio* 25%

Kondisi *two-phase* dengan rasio pengisian 25% menampilkan bentuk fluida yang merambat dinding dengan baik sedangkan pada kondisi *single-phase* fluida yang merambat dinding mudah terlepas, hal tersebut dapat diamati pada gambar 19 dan 20. Rasio pengisian 50% pada gambar 21 dan 22 menampilkan perbedaan yang dapat terlihat lebih jelas. Rasio pengisian 50% dengan kondisi *two-phase* dapat menampilkan rambatan fluida pada dinding yang dapat mencapai bagian atas tangki serta fluida yang menabrak dinding tangki dapat menghasilkan visualisasi dari cipratan air, hal tersebut tidak dapat dihasilkan pada kondisi *single-phase*.



Gambar 21. Perbedaan visualisasi (a) *single-phase* dan (b) *two-phase* pada gerakan *sway* dengan *filling ratio* 50%



Gambar 22. Perbedaan visualisasi (a) *single-phase* dan (b) *two-phase* pada gerakan *roll* dengan *filling ratio* 50%

Two-phase SPH menampilkan bentuk depan fluida merambat keatas yang dapat dipertahankan di sepanjang dinding samping dan menyentuh dinding atas tangki, hal serupa dapat ditemukan juga pada pengamatan eksperimen yang telah dilakukan oleh Trimulyono et. al. [1]. Sebaliknya, untuk single-phase SPH, fluida mudah terlepas dari dinding tangki.

4. KESIMPULAN

Long duration sloshing yang dikerjakan menggunakan simulasi SPH merupakan studi tingkat lanjut dari studi SPH sebelumnya. Dari studi ini dapat diketahui bahwa SPH dapat menghasilkan tekanan hidrostatis yang akurat namun tekanan dinamis memiliki akurasi yang variatif dibandingkan hasil eksperimen. Tekanan dinamis yang dihasilkan pada *long duration sloshing* dengan rasio pengisian 25% dan 50% menggunakan metode SPH memiliki tren yang sama dibandingkan dengan eksperimen yang telah dilakukan oleh Trimulyono et al. [1]. Tekanan statis memiliki selisih 2.9 persen dibandingkan perhitungan analitik. *Free surface evolution* antara simulasi *two-phase* SPH dengan eksperimen memiliki hasil yang mirip dibandingkan *single-phase* SPH yang dapat dilihat dari karakter fluida yang menabrak dan merambat pada dinding tangki. Pada studi ini simulasi dilakukan dengan menyesuaikan spesifikasi GPU yang digunakan, maka banyak penyesuaian dilakukan agar simulasi dapat dilakukan, seperti penggunaan *single-precision* yang berdampak terhadap keakuratan hasil. Dari simulasi yang telah dilakukan, metode SPH direkomendasikan untuk simulasi dengan durasi 30 detik dengan rasio pengisian $\leq 50\%$ untuk dapat menampilkan hasil yang akurat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada laboratorium hidrodinamika kapal Jurusan Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, dosen pembimbing 1 dan dosen pembimbing 2 atas bimbingannya selama pengerjaan jurnal ini serta banyak pihak yang telah membantu dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Trimulyono, H. Hashimoto, and A. Matsuda, "Experimental validation of single- and two-phase smoothed particle hydrodynamics on sloshing in a prismatic tank," *J. Mar. Sci. Eng.*, 2019.
- [2] J. J. Monaghan, "Simulating free surface flows with SPH," *J. Comput. Phys.*, 1994,
- [3] M. D. Green and J. Peiró, "Long duration SPH simulations of sloshing in tanks with a low fill ratio and high stretching," *Comput. Fluids*, 2018.
- [4] C. V. Makris, C. D. Memos, and Y. N. Krestenitis, "Numerical modeling of surf zone dynamics under weakly plunging breakers with SPH method," *Ocean Model.*, 2016.
- [5] A. Barreiro, A. J. C. Crespo, J. M. Domínguez, and M. Gómez-Gesteira, "Smoothed Particle Hydrodynamics for coastal engineering problems," *Comput. Struct.*, 2013.
- [6] A. J. C. Crespo et al., "DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)," *Comput. Phys. Commun.*, 2015.
- [7] DualSPHysics, "Create your own case using the XML file," DualSPHysics, 2016.
- [8] J. J. Monaghan and A. Kos, "Solitary waves on a cretan beach," *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, 1999.
- [9] O. M. Faltinsen, "Sloshing," *Adv. Mech.*, 2017.