

# Simulasi Relokasi Aliran Fluida Tak Termampatkan Menggunakan Metode *Moving Particle Semi-Implicit (MPS)*

Muhammad Ilham<sup>1,a)</sup>, Yacobus Yulianto<sup>1,b)</sup> dan Asril Pramutadi Andi Mustari<sup>2,c)</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung 40132, Indonesia

<sup>2</sup>Kelompok Keahlian Fisika Nuklir dan Biofisika, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung 40132, Indonesia

<sup>a)</sup> yacyulianto@gmail.com (corresponding author)

<sup>b)</sup> muhilham99@gmail.com

<sup>c)</sup> pramutadi@fi.itb.ac.id

## Abstrak

**ABSTRAK.** Fenomena aliran fluida dapat diaplikasikan hingga pada kasus reaktor nuklir. Penelitian ini dilakukan untuk melihat bentuk gerak aliran fluida dan interaksinya pada permukaan padat, yang disimulasikan dengan metode MPS. Dilakukan beberapa variasi parameter, yakni massa jenis dan viskositas fluida, ditambah gerak jatuh air dengan halangan. Variasi ini dilakukan untuk melihat hubungan antara parameter dan gerak jatuh fluida dan percikannya. Adapun pada simulasi ini, dilakukan validasi dengan melakukan eksperimen menggunakan alat sederhana. Didapat hasil pada MPS mendekati kondisi riil eksperimen.

*Kata-kata kunci:* pemodelan fluida, permukaan padat, metode MPS.

## PENDAHULUAN

Nuklir merupakan salah satu alternatif energi terbarukan yang dapat mengatasi masalah kekurangan energi dunia sehingga mulai dilirik oleh negara-negara besar. Amerika dan Jepang telah memakai teknologi nuklir sejak dulu untuk memenuhi kebutuhan energinya. Kecelakaan pembangkit listrik tenaga nuklir *Chernobyl* menjadi salah satu faktor mengapa masyarakat belum sepenuhnya menyetujui pemakaian energi nuklir. Faktor keamanan reaktor nuklir menjadi hal penting yang harus dikembangkan setiap waktunya.

Kecelakaan reaktor TMII-2 memberikan pelajaran penting dalam pergerakan fluida hasil pelelehan bahan bakar nuklir (*molten fuel*) pada teras. Kecelakaan reaktor BWR Fukushima menjadi fenomena penting dalam menganalisa bagaimana pergerakan atau relokasi fluida *molten fuel* dalam teras ketika menuju ke *plenum* bawah. Melelehnya bahan bakar dan batang kendali menyebabkan terjadi kegagalan sistem pada teras reaktor [3-8]. Hasil pelelehan ini kemudian bergerak kebawah teras menuju *plenum* bawah yang menyebabkan kerusakan pada teras bawah.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mensimulasikan fenomena gerak aliran atau relokasi fluida yakni dengan metode *Moving Particle Semi-implicit (MPS)*. Metode MPS pertama kali diperkenalkan oleh Koshizuka dan Oka [1]. Metode ini merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk

menganalisis aliran permukaan bebas cairan tak-termampatkan tanpa menggunakan *mesh grid*. Metode MPS ini sangat baik dalam mensimulasikan dan menganalisis pergerakan *molten fuel* di dalam teras reaktor.

Ada beberapa referensi penelitian terkait aliran fluida menggunakan metode MPS. Penelitian untuk memprediksi laju penetrasi hasil pelelehan bahan bakar Uranium di teras reaktor pada suhu tinggi menggunakan simulasi metode MPS [3-4]. Simulasi pada penetrasi pelelehan pada eksperimen CAFÉ pada suhu 1200°C dianalisis menggunakan metode MPS dua dimensi [6]. Penelitian dalam mensimulasikan interaksi eutektik lelehan uranium dengan permukaan campuran besi pada kecelakaan teras reaktor [5].

Telah banyak penelitian terkait gerak fluida pada kasus pelelehan teras reaktor menggunakan metode MPS, namun sebagian besar penelitian tersebut masih menganalisis interaksi antara lelehan teras dengan permukaan padat. Kurangnya penelitian tentang simulasi untuk kasus relokasi aliran dari inti teras menuju *plenum* bawah dengan penambahan halangan.

Tujuan penelitian ini yakni menggunakan metode MPS dua dimensi dalam mensimulasikan proses relokasi fluida dari ketinggian tertentu untuk cairan air dan minyak serta interaksinya dengan permukaan padat. Hasil pada simulasi MPS ini akan divalidasi dengan melakukan eksperimen sederhana untuk gerak jatuh bebas fluida ke dalam wadah untuk melihat pergerakan dan percikannya. Digunakan dua jenis fluida untuk melihat pengaruh viskositas dalam interaksi dengan permukaan. Penambahan halangan (*obstacle*) pada gerak jatuh bebas untuk melihat interaksinya dengan permukaan padat. Didapat hasil simulasi pada MPS mendekati keadaan nyata eksperimen.

## MODEL FISIS DAN METODE NUMERIK

### Rumusan Umum

Persamaan umum untuk cairan tak-termampatkan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes dapat menjelaskan pergerakan dari suatu fluida seperti cairan dan gas. Persamaan-persamaan ini menyatakan perubahan momentum partikel-partikel fluida bergantung kepada gaya viskositas internal dan gaya viskositas tekanan eksternal yang bekerja pada fluida.

Adapun persamaan untuk kekekalan massa:

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 \quad (1)$$

Dan untuk hukum kekekalan momentum:

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho}P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{g} \quad (2)$$

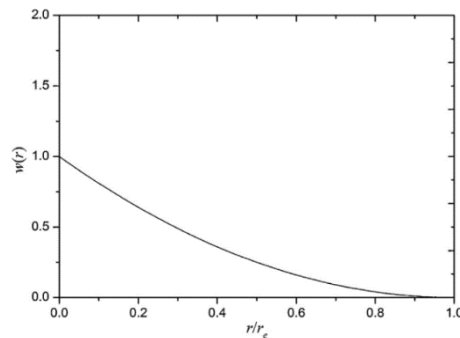
di mana  $\rho$  adalah kerapatan,  $t$  adalah waktu,  $\vec{u}$  adalah vektor kecepatan,  $\nabla$  adalah gradient,  $P$  adalah tekanan,  $\nu$  adalah viskositas kinematik, dan  $\vec{g}$  adalah gaya gravitasi.

### Metode Moving Particle Semi-implicit (MPS)

Metode MPS merupakan suatu metode yang berbasis partikel (bukan *mesh grid*) untuk menganalisis fluida tak-termampatkan (Koshizuka dan Oka, 1996). Interaksi partikel didefinisikan berdasarkan posisinya terhadap partikel yang dijadikan acuan. Diagram skematik untuk tetangga terdekat dari partikel  $i$  ditunjukkan pada Gambar 1. Dengan menggunakan konsep *Weight function* atau fungsi bobot berdasar kepada jarak  $r$ , maka pergerakan partikel dapat dihitung dari gaya interaksi antara dua partikel terdekat. Fungsi bobot yang umum digunakan dalam metode MPS adalah

$$w(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r}{r_e}\right)^2 & 0 \leq r < r_e \\ 0 & r_e \leq r \end{cases} \quad (3)$$

di mana  $r$  merupakan jarak antara dua partikel dan  $r_e$  merupakan jangkauan efektif dari interaksi partikel. Jika jarak antar partikel lebih besar dari zona jangkauan efektif dari interaksi partikel, maka gungsi bobot menjadi nol (Koshizuka dan Oka, 1996).



Gambar 20. Grafik fungsi bobot [1]

Kerapatan jumlah partikel, yang sebanding dengan kerapatan cairan, pada posisi partikel  $i$  dapat didekati dengan

$$n_i = \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) \quad (4)$$

di mana  $r_i$  dan  $r_j$  merupakan vektor posisi dari partikel  $i$  dan  $j$ . Model Gradient, Divergensi dan Laplacian dapat didiskritisasi dengan menggunakan:

$$\langle \nabla \phi \rangle_{ij} = \frac{(\phi_j - \phi_i)(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} \quad (5)$$

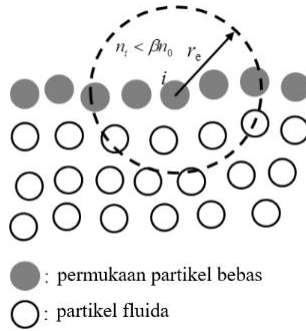
$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) \frac{(\phi_j - \phi_i)(r_j - r_i)}{|r_j - r_i|^2} \quad (6)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) (\phi_j - \phi_i) \quad (7)$$

di mana  $d$  merupakan jumlah dimensi,  $n^0$  merupakan kerapatan jumlah partikel yang sesuai untuk sistem tak-termampatkan, dan  $\lambda$  merupakan parameter yang dipilih agar hasil yang diperoleh sebanding dengan solusi analitik. Nilai  $\lambda$  dapat didekati dengan menggunakan persamaan:

$$\lambda = \frac{\sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) |r_j - r_i|^2}{\sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|)} \cong \frac{\int_v w(r) r^2 dv}{\int_v w(r) dv} \quad (8)$$

Kerapatan partikel total dibuat konstan untuk menjaga kondisi tak-termampatkan, namun akan berkurang untuk partikel yang berada pada permukaan bebas.



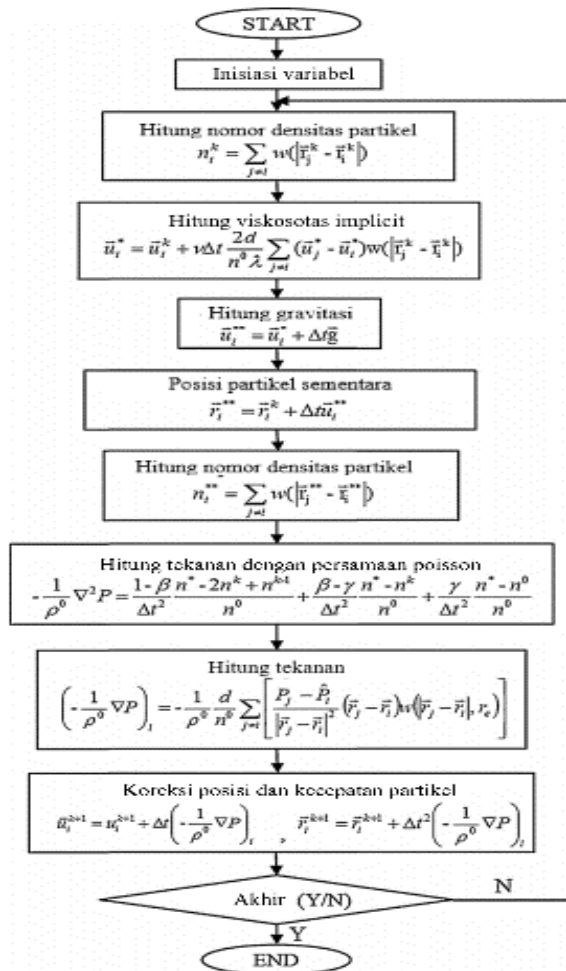
Gambar 21. Batas pengaruh partikel bebas

Dalam kondisi seperti ini, kerapatan partikel dapat digunakan dalam mengidentifikasi partikel yang berada pada permukaan bebas. Partikel yang memenuhi persamaan 9 dianggap sebagai partikel dalam permukaan bebas, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.

Partikel yang memenuhi kondisi:

$$n < \beta n^0_i \tag{9}$$

Dimana  $\beta$  bernilai konstanta dan kurang dari satu.



Gambar 22. Algoritma proses MPS

Secara umum dalam memecahkan model persamaan metode *semi-implicit* dalam kasus gerak partikel fluida, dapat digambarkan menjadi algoritma dasar yang dipakai dalam program MPS seperti gambar 3 di atas.

## SIMULASI DAN EKSPERIMEN

### Eksperimen

Penelitian ini menggunakan fluida air dan minyak. Terdapat dua kasus percobaan, pertama untuk gerak jatuh fluida lintasan bebas, kedua pada gerak jatuh fluida yang diberi penghalang (*obstacle*) berbentuk pipa L. Wadah relokasi fluida berbentuk kotak dengan ukuran panjang, lebar, dan tinggi yakni 165 mm, 30 mm dan 40 mm secara berurutan. Botol sebagai sumber fluida berbentuk silinder, mengecil di bagian bawah dan tidak memiliki alas.



Gambar 23. Alat dan bahan eksperimen sederhana  
Data densitas dan viskositas yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini.

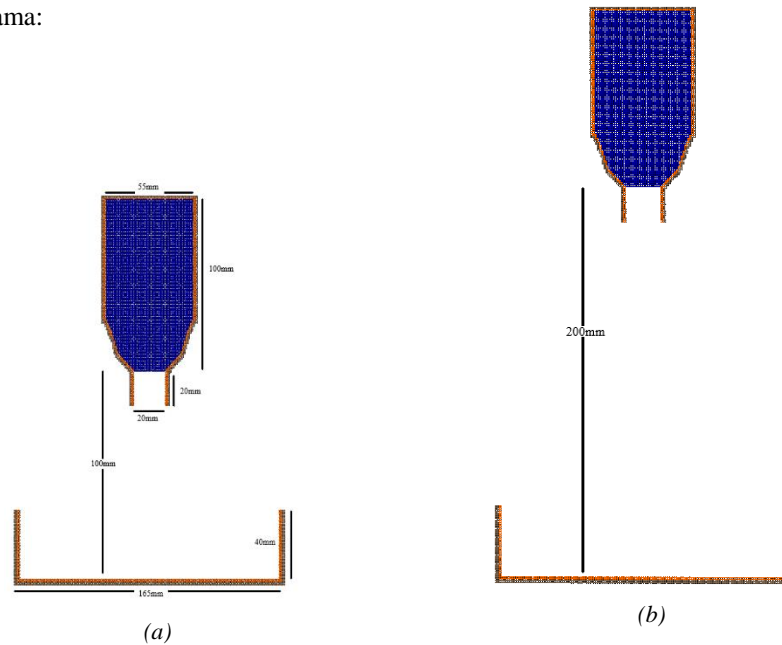
Tabel 1. karakteristik fluida yang digunakan

Material	Kasus gerak fluida	
	Fluida I	Fluida II
	Minyak goreng	Air biasa
Kerapatan ( $\text{kg/m}^3$ )	890,13	1000
Viskositas kinematik ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	54,89	1,004

### Simulasi

Jumlah partikel total pada tiap simulasi sekitar 8000 partikel. Simulasi dilakukan pada dua dimensi, untuk mendesain simulasi digunakan program excel.

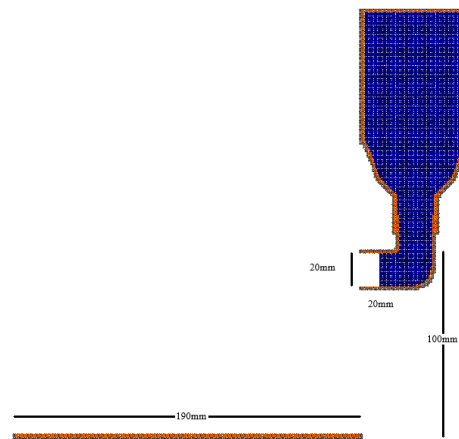
Kasus pertama:



Gambar 24. Desain simulasi untuk gerak jatuh bebas fluida tanpa halangan (a) beda jarak 10 cm (b) 20 cm

Pada eksperimen dan simulasi, dilakukan dua jenis percobaan yakni untuk gerak jatuh bebas fluida tanpa halangan (gambar 5) dan dengan adanya halangan yang berbentuk pipa berbentuk L (gambar 6). Pada percobaan pertama, dilakukan variasi ketinggian botol dengan permukaan. Variasi ini dilakukan untuk melihat hubungan ketinggian dengan bentuk fluida ketika mengenai permukaan padat.

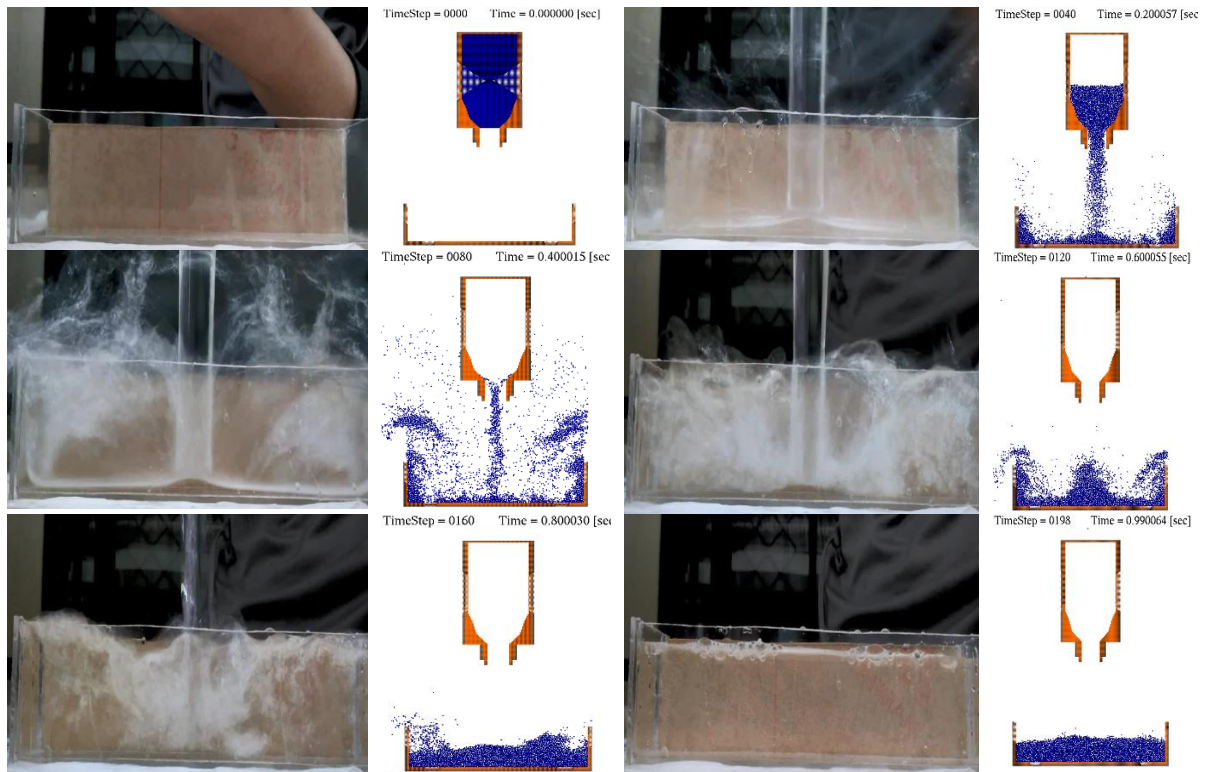
Kasus kedua:



Gambar 25. Desain simulasi untuk gerak jatuh fluida dengan halangan  
Percobaan gerak jatuh fluida dengan halangan, menggunakan dua jenis fluida yakni air dan minyak. Jarak antar sumber dan permukaan yang dipakai adalah 10bcm dengan panjang permukaan yakni 19 cm.

## HASIL

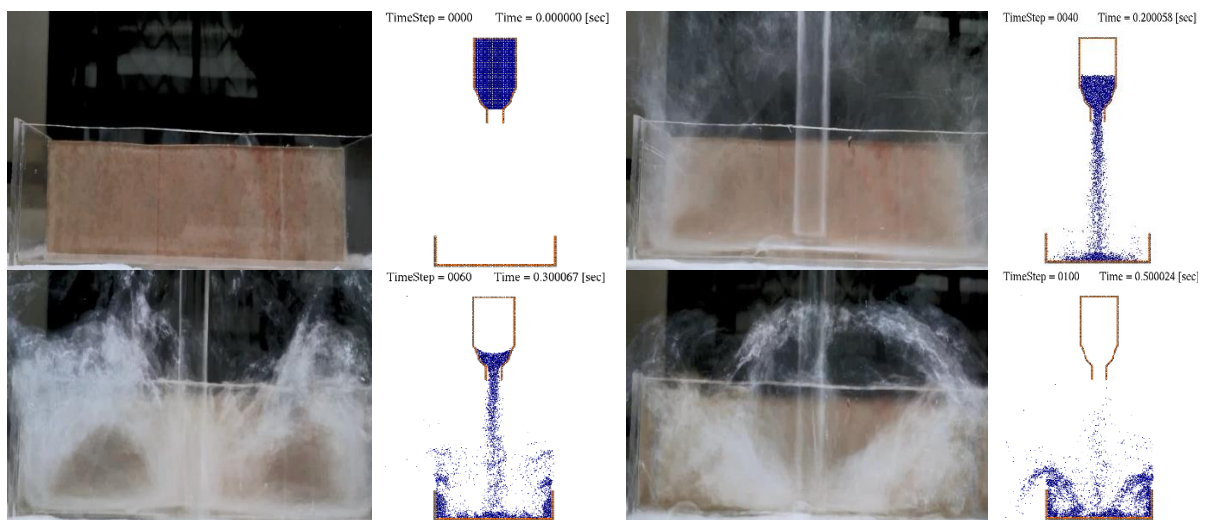
### Gerak jatuh bebas fluida (fluida air dengan jarak 10 cm)

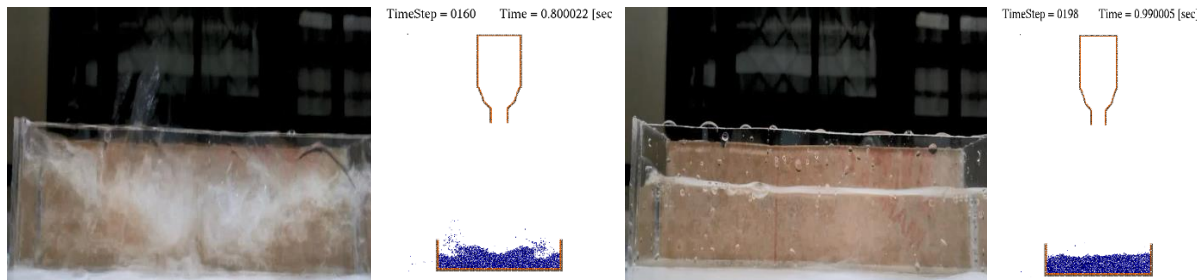


Gambar 26. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen untuk kasus gerak jatuh bebas air dengan ketinggian 10 cm

Pada gambar 7, untuk keseluruhan bentuk percikan air pada eksperimen dan simulasi menyerupai. Pada detik ke-0,2, bentuk gerak jatuh air pada eksperimen dan simulasi sangat mirip yakni membentuk silinder, air jatuh memenuhi wadah dan menyebar ke dinding wadah. Percikan air di detik ke-0,4 hingga detik 0,6 pada eksperimen terlihat menyebar dan mengarah ke atas dan luar wadah serta membentuk huruf “V” yang juga diperlihatkan oleh hasil simulasi. Diakhir detik ke-0,8 simulasi dan eksperimen, gerak air beresilasi dalam wadah hingga mencapai kestabilan yang ditunjukkan pada detik ke-1.

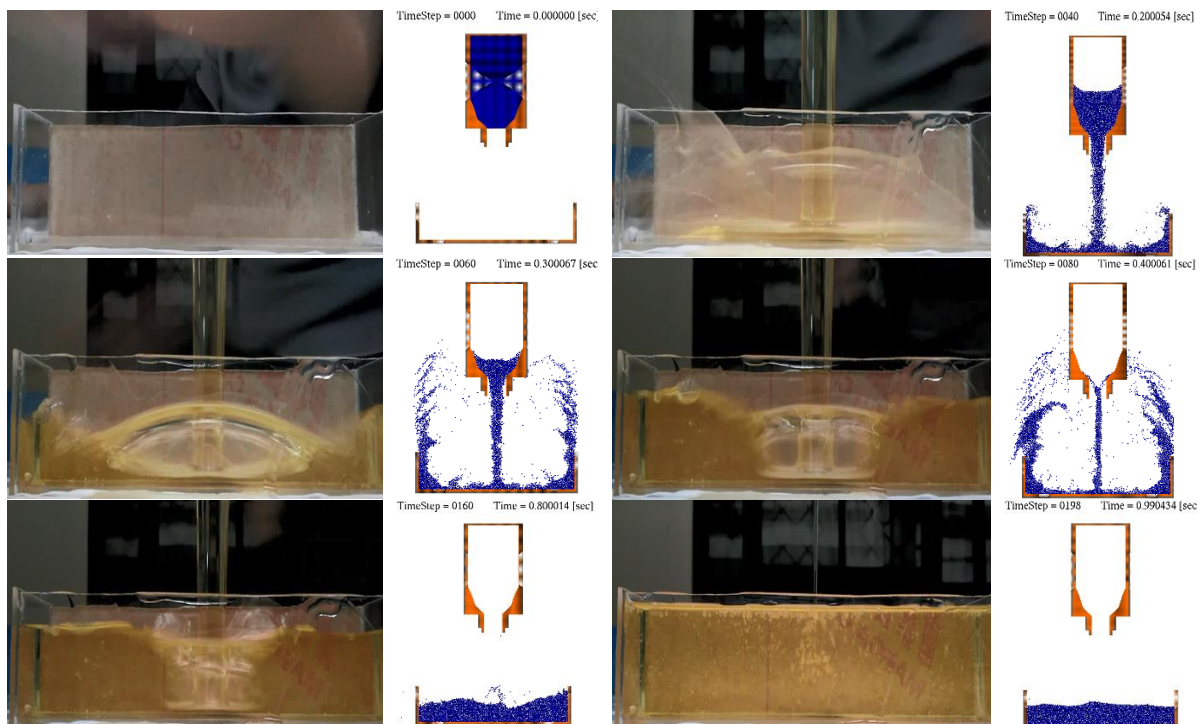
**Gerak jatuh bebas fluida (fluida air dengan jarak 20 cm)**





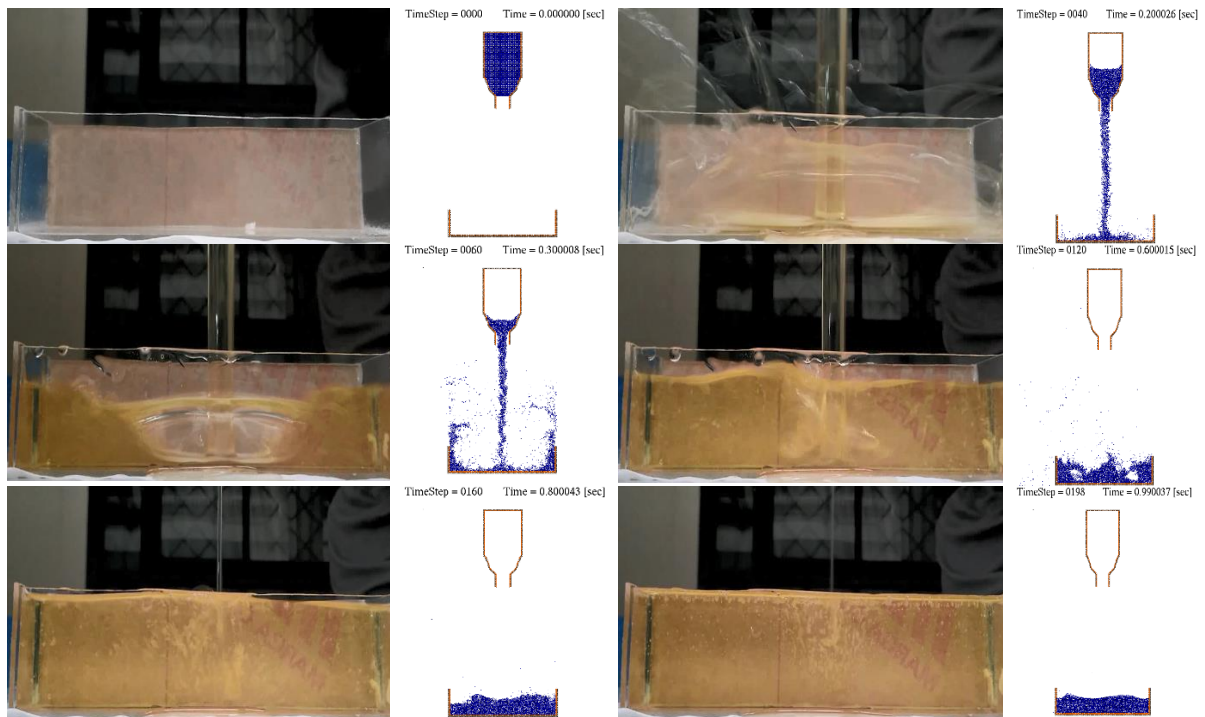
Gambar 27. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen untuk kasus gerak jatuh bebas air dengan ketinggian 20cm. Seperti pada hasil sebelumnya, gambar 8 di atas menampilkan hasil yang serupa antara eksperimen dan simulasi. Detik 0,2 air turun memenuhi bagian tengah wadah. Ketika ketinggian botol di naikan hingga 20 cm, detik ke-0,4 terlihat percikan air yang lebih tinggi dengan ketinggian tertentu dan volume air yang keluar wadah lebih banyak dibanding kasus sebelumnya pada gambar 7. Detik ke-0,6 pada eksperimen adanya percikan air yang berbentuk cembung atau mangkuk terbalik tepat di atas wadah, sedangkan pada simulasi tidak terlihat hasil tersebut. Terlihat pada simulasi, jumlah air pada sumber lebih cepat habis dibanding eksperimen. Di detik ke-0,8 hingga 1, air beresilasi hingga mencapai kestabilan.

**Gerak jatuh bebas fluida (fluida minyak dengan jarak 10 cm)**



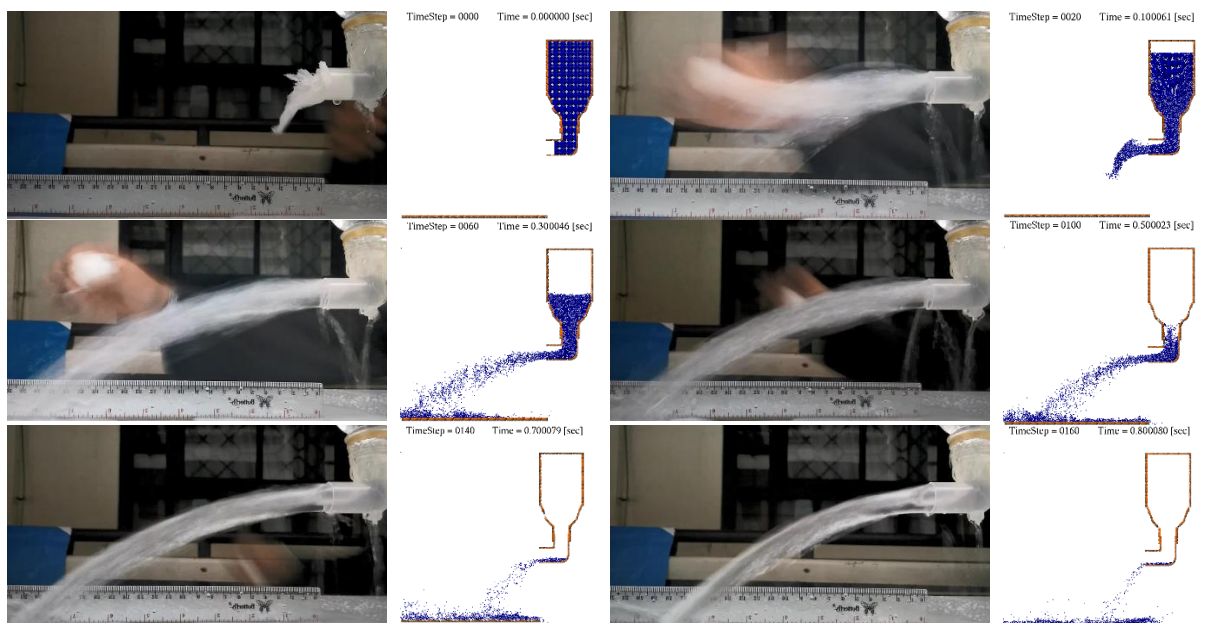
Gambar 28. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen untuk kasus gerak jatuh bebas minyak dari ketinggian 10 cm. Pada gambar 9 menunjukkan kasus fluida minyak dengan ketinggian 10 cm. Hasil yang didapat pada eksperimen menunjukkan percikan minyak yang tergolong rendah dan memiliki gerakan yang halus, tidak seperti hasil pada air. Pada simulasi, terlihat percikan yang cukup tinggi, namun gerak fluida yang lebih halus dibanding hasil simulasi dengan air pada kasus sebelumnya. Pada detik ke-0,6, terlihat jelas adanya percikan minyak berbentuk cembung atau seperti mangkuk terbalik tepat berada di tengah-tengah wadah, yang tidak ditunjukkan pada hasil simulasi.

**Gerak jatuh bebas fluida (fluida minyak dengan jarak 20 cm)**



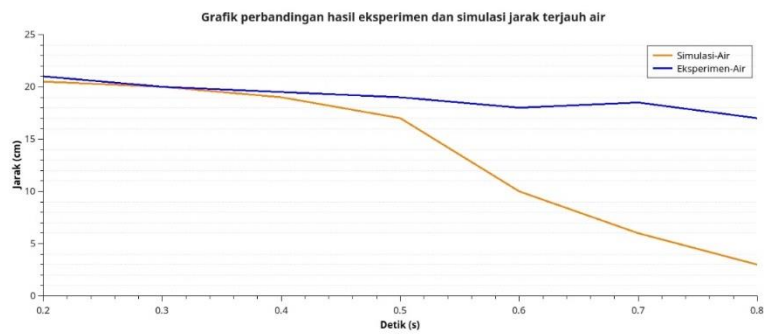
Gambar 29. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen untuk kasus gerak jatuh bebas minyak dari ketinggian 20 cm Pada gambar 10, percikan minyak terlihat lebih tinggi di detik awal eksperimen dan simulasi dibanding dengan hasil gambar 9. Terlihat juga percikan minyak berbentuk mangkuk terbalik di detik ke-0,4. Hasil pada simulasi menunjukkan kemiripan dengan eksperimen, namun di detik ke-0,6 terlihat adanya percikan besar yang tidak ditunjukkan hasil eksperimen.

**Gerak jatuh fluida dengan halangan (pipa L fluida air)**



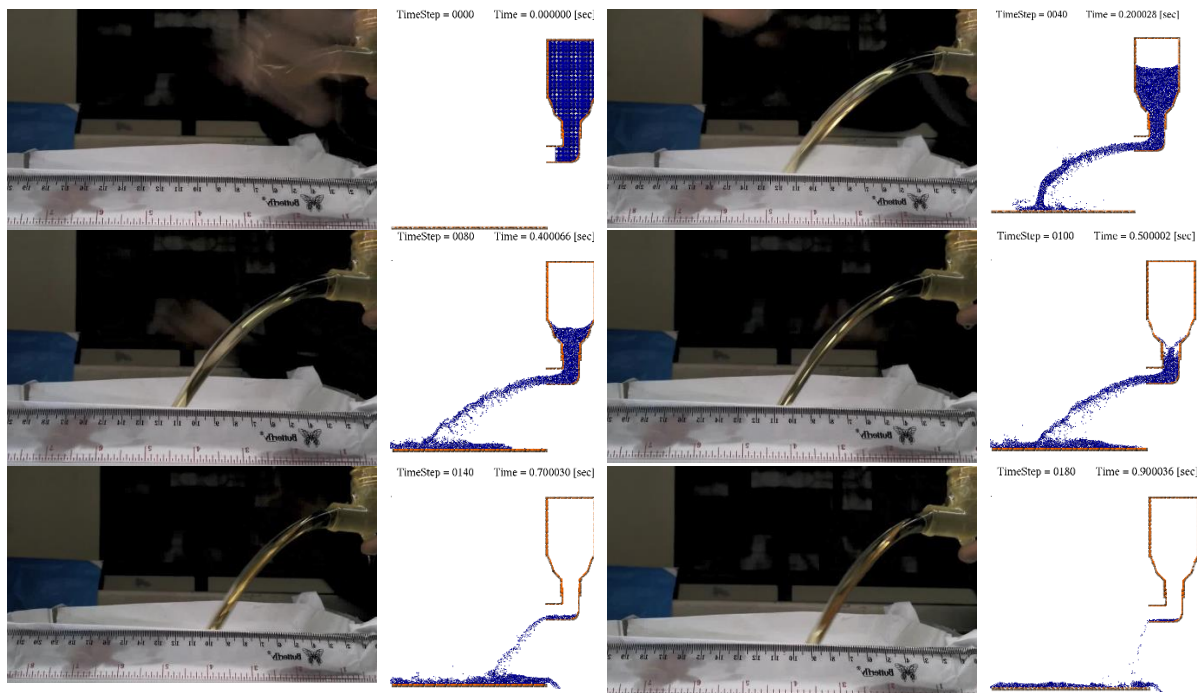
Gambar 30. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen kasus gerak jatuh berhalangan fluida air Gambar 11 menunjukkan kasus gerak jatuh fluida air dengan halangan. Ketika penutup dibuka, gerak awal air keluar pipa pada eksperimen dan simulasi menunjukkan kesamaan bentuk. Di detik ke-0,2, minyak terpancar keluar dengan bentuk menurun dan terlihat pancaran air menjadi lebih deras di detik 0,6. Jarak terjauh air ketika tepat menyentuh permukaan yakni sekitar 20 cm, dimana hasil ini juga didapat pada simulasi yakni

sekitar 19 cm. Pada detik selanjutnya, hasil gerak terjauh air pada hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan kesamaan. Hasil pada simulasi lebih cepat dibanding dengan eksperimen.

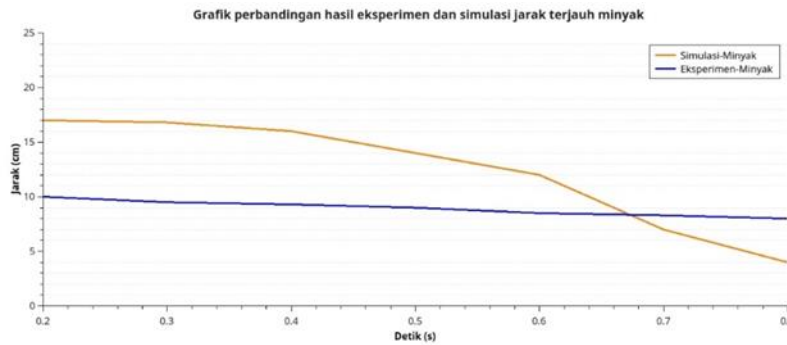


Gambar 31. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen kasus gerak jatuh berhalangan fluida air  
 Gambar 12 menunjukkan perbandingan jarak terjauh gerak jatuh air pipa L untuk simulasi dan eksperimen. Terlihat hasil pada grafik menunjukkan kesamaan dari detik 0,2 hingga selanjutnya, dengan perbedaan nilai yang sangat kecil. Pada detik ke-0,6, kedua hasil mulai memiliki perbedaan dengan hasil simulasi yang mulai menurun. Hasil pada simulasi lebih cepat dibanding dengan eksperimen.

**Gerak jatuh fluida dengan halangan (pipa L fluida minyak)**



Gambar 32. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen kasus gerak jatuh berhalangan fluida minyak  
 Pada percobaan yang sama pada gambar 11, gambar 10 menunjukkan kasus gerak jatuh pada fluida minyak. Hasil awal juga menunjukkan kesamaan bentuk (detik ke-0,2) yakni ketika penutup dilepas. Jarak terjauh minyak menyentuh permukaan pada eksperimen yakni berkisar 10 cm, setengah dari hasil yang didapat untuk kasus air. Hasil yang didapat pada simulasi yakni sekitar 15 cm, yang menunjukkan perbedaan yang tidak terlalu signifikan.



Gambar 33. Perbandingan hasil simulasi dengan eksperimen kasus gerak jatuh berhalangan fluida minyak Gambar 14 menunjukkan perbandingan jarak terjauh pada fluida minyak untuk hasil simulasi dan eksperimen. Terlihat perbedaan awal pada jarak terjauh minyak hingga 6 cm, dimana nilai pada eksperimen lebih kecil dibanding simulasi, hasil ini juga terlihat pada gambar 11. Grafik eksperimen menunjukkan nilai yang cukup konstan dari waktu ke waktu. Hasil pada simulasi menunjukkan penurunan nilai yang cukup besar.

## DISKUSI

Pada kasus gerak jatuh air dengan jarak 10 cm (gambar 7), secara umum bentuk percikan air pada hasil simulasi sangat mirip dengan hasil pada eksperimen. Adapun bentuk percikan air di eksperimen membentuk huruf “V” yang juga diperoleh pada simulasi.

Ketika jarak botol dengan permukaan ditambah hingga 20 cm (gambar 8), hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan percikan air yang lebih banyak dan volume air yang keluar wadah juga lebih besar, sesuai dengan hubungan antara ketinggian dengan energi potensial dari fluida itu sendiri. Semakin tinggi suatu sumber maka semakin besar energi potensialnya, sehingga percikan air juga akan semakin besar. Pada detik ke-0,6 di eksperimen, terlihat adanya percikan cembung pada air namun tidak terlihat pada simulasi, ini dikarenakan adanya perbedaan dimensi. Adapun simulasi dilakukan pada dua dimensi yakni gerak air hanya pada sumbu x dan y, sedangkan pada eksperimen adanya gerak air juga pada sumbu z (depan dan belakang) sehingga menimbulkan bentuk percikan yang tidak dihasilkan simulasi.

Pada fluida minyak untuk kasus gerak jatuh fluida berjarak 10 cm (gambar 9), terlihat percikan yang lebih sedikit dan gerakan yang lebih halus. Hal ini karena nilai viskositas minyak jauh lebih besar dibanding dengan air yang berhubungan dengan kecepatan alir fluida. Pada simulasi terdapat percikan minyak yang cukup besar dibanding eksperimen, dikarekan adanya pengaruh faktor *surface tension* pada minyak di eksperimen. Pada simulasi ini kode MPS yang digunakan belum dilengkapi dengan modul *surface tension*. Penambahan jarak 10 cm dari sebelumnya (gambar 10), menunjukkan percikan minyak yg lebih besar pada awal percobaan akibat pengaruh energi potensial fluida. Terlihat juga hasil percikan cembung minyak pada eksperimen yang tidak ditunjukkan pada simulasi, perbedaan dimensi berperan penting dalam hal tersebut.

Pada gambar 11 kasus gerak jatuh fluida air ada halangan. Terlihat jarak terjauh air pada eksperimen dan simulasi memiliki nilai yang hampir serupa, hasil ini juga diyakinkan pada hasil gambar 12. Gerak air pada eksperimen lebih halus dibanding simulasi. Halus tidaknya suatu simulasi bergantung pada desain dan banyak partikel yang digunakan, di mana dalam kasus ini jumlah partikel yang dipakai tergolong cukup untuk memberikan hasil yang cukup mendekati eksperimen dengan waktu simulasi yang tidak terlalu lama. Adanya perbedaan grafik di akhir waktu simulasi dan eksperimen pada gambar 12 karena perbedaan desain pada saat mensimulasikan sumber fluida, dalam hal ini botol air. Dalam desain simulasi untuk botol, dibuat berbentuk silinder sempurna tanpa adanya celah antara botol dan pipa L, sedangkan pada eksperimen pipa memiliki desain silinder yang mengerucut dimana terdapat celah kecil untuk air keluar pada bagian pertemuan antara botol dan pipa L. Pada saat melakukan eksperimen, terdapat tetesan air yang keluar di celah tersebut, di mana secara umum akan mengurangi tekanan dalam botol yang juga mengurangi kecepatan keluar air pada pipa L.

Pada fluida minyak pada gambar 13, jarak terjauh jatuh minyak menunjukkan nilai yang lebih kecil dibanding air yakni hampir setengahnya, yang dapat dijelaskan dengan perbedaan nilai viskositas dari kedua fluida tersebut. Umumnya ketika nilai viskositas semakin besar, maka nilai kecepatan fluida juga akan menurun yang tentunya dalam kasus ini, menurunkan nilai jarak terjauh dari minyak tersebut. Adanya perbedaan pada hasil jarak terjauh dari eksperimen dan simulasi yang ditunjukkan pada gambar 14, dikarenakan perbedaan dimensi dan desain antara keduanya. Adapun faktor lainnya yakni ketidaksempurnaan ketika melakukan percobaan eksperimen, antara lain kemiringan pipa dan letak botol.

## KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, metode MPS dua dimensi digunakan dalam mensimulasikan proses relokasi fluida dari ketinggian tertentu untuk cairan air dan minyak serta interaksinya dengan permukaan padat. Digunakan dua jenis fluida yakni air dan minyak. Hasil pada simulasi akan diverifikasi dengan hasil yang diperoleh pada eksperimen sederhana.

Hasil yang diperoleh menunjukkan simulasi gerak jatuh fluida yang cukup mendekati dengan hasil eksperimen. Beda ketinggian pada kasus gerak jatuh fluida mempengaruhi ketinggian percikan dan formasi fluida dalam wadah. Beda ketinggian 20 cm antara sumber dan permukaan memberikan percikan fluida yang lebih menyebar dibanding beda 10 cm.

Perbedaan viskositas dan massa jenis dari air dan minyak mempengaruhi kecepatan jatuh dan formasi fluida ketika bersentuhan dengan permukaan padat. Penambahan penghalang pada gerak jatuh fluida juga mempengaruhi formasi gerak dan jarak terjauh fluida ketika menyentuh permukaan. Hasil simulasi pada dua dimensi ini menunjukkan bahwa metode MPS memiliki kemampuan untuk menganalisis perilaku gerak jatuh fluida yang dapat digunakan dalam simulasi skala besar seperti lelehan teras reaktor.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini. Makalah ini didanai oleh Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi ITB 2017 dengan judul 'Analisa Numerik Pada Relokasi Lelehan Struktur Dalam Reaktor Nuklir Saat Terjadi Kecelakaan Dengan Menggunakan Metoda Partikel (Moving Particle semi-implicit)'.

## REFERENSI

1. S. Koshizuka, Y. Oka. Moving particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid. *Nuclear Science and Engineering*, 123: 421-434 (1996).
2. G. Li, Y. Oka, M. Furuya, M. Kondo. Experiments and MPS analysis of stratification behavior of two immiscible fluids. *Nuclear Engineering and Design*, 265: 210-221 (2013).
3. A. Pramutadi, Syeilendra, D. Irwanto. Prediction of Melting Penetration of Armco Iron by Liquid Uranium Using MPS\_LER. *J. Phys.: Conf. Ser.* 799 01201 (2017)
4. A. Pramutadi, A. Yamaji, D. Irwanto. Melting Penetration Simulation of Fe-U System at High Temperature Using MPS\_LER. *J. Phys.: Conf. Ser.* 739 012016 (2016)
5. A. Pramutadi, Y. Oka. Molten Uranium Eutectic Interaction On Iron-alloy by MPS method. *Nuclear Engineering and Design* 278 387-394 (2014)
6. A. Pramutadi, Iksal, Sumiati. MPS simulation on melt penetration of CAFÉ experiment at 1200°C. *Indonesian Journal of Physics Vol. 23. No.1* (2012)
7. A. Pramutadi, M. Takahashi. Study on corrosion of welded steel for LBE-cooled fast reactors. *Progress in Nuclear Energy* 53 1073-1077 (2011)
8. Pramutadi, Y. Oka, M. Furuya, W. Takeo, R. Chen. 3D simulation of eutectic interaction of Pb-Sn system using Moving Particle Semi-implicit (MPS) method. *Annals of Nuclear Energy*, 81: 26-33 (2015).
9. Kawahara, T., Oka, Y., 2012. Ex-vessel molten core padatification behavior by moving particle semi-implicit method. *J. Nucl. Sci. Technol.* 49, 1156-1164.
10. Koshizuka, S., Ikeda, H., Oka, Y., 1999. Numerical analysis of fragmentation mechanisms in vapor explosions. *Nucl. Eng. Des.* 189, 423-433.
11. Shibata, K., Koshizuka, S., Oka, Y., 2004. Numerical analysis of jet breakup behavior using particle method. *J. Nucl. Sci. Technol.* 41, 715-722.
12. Sun, X.S., Sakai, M., Shibata, K., Tochigi, Y., Fujiwara, H., 2012. Numerical modeling on the discharged fluid flow from a glass melter by a Lagrangian approach. *Nucl. Eng. Des.* 248, 14-21.
13. Shibata, K., Koshizuka, S., 2007. Numerical analysis of shipping water impact on a deck using a particle method. *Ocean Eng.* 34, 585-593.

- 
14. Shibata, K., Koshizuka, S., Tanizawa, K., 2009. Three-dimensional numerical analysis of shipping water onto a moving ship using a particle method. J. Mar. Sci. Technol. 14, 214–227.