

Simulasi Dinamika Molekul Penghambatan Korosi Besi Dalam PbBi Cair Panas Tinggi dengan Inhibitor Gas Mulia

Molecular Dynamics Study for Inhibition of Iron Corrosion in High-Temperature Liquid PbBi with Noble Gas Inhibitors

Umi Sa'adah^{*)}, Artoto Arkundato, Lutfi Rohman
 Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Jember, Jember
^{*)}Email: umisaadah1702@gmail.com

ABSTRACT

Molecular dynamics is a popular method to observe the movement of interacting molecules. In this study molecular dynamics method was used to observe the phenomenon of iron corrosion and analyze effect of noble gases as a corrosion inhibitor for iron in liquid metal PbBi. Physical quantities are evaluated from the results of this study including: Mean Square Displacement (MSD), the diffusion coefficient, and for the crystal structure is visualized using Ovito program. The iron is placed in the middle high temperature liquid PbBi, the noble gases is injected into the liquid metal. Based on the three kinds of the noble gases (helium, neon, and argon) that injected into the molten metal PbBi, it obtained that Argon is the most effective in inhibiting the corrosion of iron. Argon is able to reduce the corrosion rate of 80.29% iron for temperature of 1023K. One reason to use the noble gas because these gases are difficult to react with other elements.

Keywords: molecular dynamics, corrosion in liquid metals, noble gases, inhibitors

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi merupakan salah satu masalah yang dihadapi oleh semua negara. Banyak kebutuhan hidup manusia yang menggunakan teknologi ditopang oleh energi listrik (Achmad, 1992). Sejauh ini, Indonesia banyak memanfaatkan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) yang mengandalkan air. Ketersediaan air sangat bergantung pada iklim dan cuaca yang seringkali mengalami perubahan sehingga lama-kelamaan PLTA akan dinilai kurang produktif. Selain itu, energi dari batu bara dan minyak bumi juga relatif mempunyai sedikit cadangan sumber energi.

Kelangkaan energi dapat diatasi dengan upaya penyediaan energi baru, misalnya energi nuklir. Penelitian untuk mengembangkan teknologi nuklir terus dilakukan untuk memperoleh keselamatan dan efisiensi tinggi dari alat-alat nuklir yang digunakan (Achmad, 1992). Reaktor nuklir merupakan tempat terjadinya

reaksi inti berantai penghasil panas. Reaksi inti akan menghasilkan energi dalam jumlah yang cukup besar. Energi tersebut berupa energi panas, dimana energi panas ini nantinya dapat digunakan untuk memutar turbin generator sehingga bisa menghasilkan listrik melalui proses konversi energi. Panas dari dalam reaktor dapat dialirkan ke luar menggunakan *coolant* (pendingin). *Coolant* berfungsi sebagai medium pertukaran panas yang biasanya berupa air atau logam cair (Beiser, 1990).

Pada penelitian ini, bahan yang digunakan sebagai coolant adalah logam PbBi cair. PbBi memiliki sifat-sifat kimia dan fisika yang unggul yaitu tidak terlalu reaktif terhadap air dan udara, memiliki titik leleh rendah dan titik didih tinggi, serta konduktivitas termal yang baik (Winter, 1993).

Salah satu hal yang menjadi permasalahan dalam reaktor nuklir cepat yaitu logam cair yang digunakan bersifat sangat korosif terhadap material cladding (pembungkus) bahan bakar

reaktor nuklir. Korosi tersebut perlu dikontrol dan perlu adanya upaya mitigasi agar tidak menyebabkan permasalahan keselamatan reaktor dan kerugian ekonomi. Salah satu upayanya adalah menghambat laju korosi. Model terjadinya korosi dapat digambarkan dengan adanya difusi atom-atom penyusun baja yang menyebar ke arah logam cair dan sebaliknya atom-atom logam cair dapat menembus baja sehingga menimbulkan kerusakan baja (Arkundato *et al.*, 2013a).

Menurut penelitian Arkundato *et al.* (2013b), korosi besi yang diletakkan di tengah logam cair dapat dihambat dengan menginjeksikan oksigen. Oksigen dibawa ke permukaan baja untuk membentuk lapisan pelindung melalui konveksi dan difusi. Transport massa oksigen dapat menentukan kinematika proses simulasi. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan simulasi dinamika molekul. Metode dinamika molekul ini diterapkan dengan mempelajari pergerakan molekul-molekul yang saling berinteraksi. Program yang digunakan pada simulasi dinamika molekul disebut program Molecular Dynamics (MOLDY) (Refson, 2001). Berdasarkan simulasi tersebut, atom-atom oksigen yang diinjeksikan dalam jumlah tertentu mampu menghambat korosi besi hingga laju korosi yang sangat rendah (Arkundato *et al.*, 2013b).

Unsur-unsur yang terdapat di alam selain oksigen sangatlah banyak, misalnya gas mulia. Unsur-unsur dalam gas mulia sangat stabil dan sukar bereaksi (Keenan *et al.*, 1992). Pada penelitian ini, sebagai studi awal simulasi bukan menggunakan objek baja melainkan besi (Fe). Besi memiliki struktur yang lebih sederhana dibandingkan dengan struktur baja. Selain itu, besi juga merupakan komponen utama penyusun baja (Linsley, 2004).

Pada dasarnya simulasi dinamika molekul dimulai dengan menentukan konfigurasi awal atom-atom bahan yang ditinjau. Masing-masing atom tersebut akan saling berinteraksi satu sama lain dimana interaksi tersebut disebabkan oleh gaya yang mempengaruhinya. Gaya yang bekerja

pada sekumpulan sistem tertutup adalah gaya interaksi yang diturunkan dari fungsi potensial (Refson, 2001).

Fungsi potensial yang digunakan dalam program MOLDY dalam penelitian ini menggunakan potensial Lennard-Jones. Potensial, merupakan model fisis sederhana yang berguna untuk menjelaskan interaksi antar atom, molekul, atau ion (Kittel, 2005).

$$U(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (1)$$

ε dan σ adalah parameter potensial masing-masing dengan dimensi energi dan jarak.

MOLDY merupakan program komputer yang digunakan untuk simulasi dinamika molekul suatu material baik cair, padat, maupun gas (Refson, 2001). Tujuan simulasi dinamika molekul adalah menghasilkan trayektori molekul-molekul dalam waktu tertentu. Setiap waktu, molekul-molekul dalam simulasi memiliki posisi dan momentum tertentu. Berdasarkan hasil trayektori tersebut dapat dihitung besaran-besaran fisis yang ingin diketahui menggunakan persamaan tertentu.

Interaksi pasangan antar atom dapat berupa atom yang sejenis maupun atom yang berbeda jenis (Tabel 1). Untuk interaksi pasangan atom yang sejenis antara lain:

1. Fe-Fe, Pb-Pb
2. Bi-Bi
3. He-He, Ne-Ne, Ar-Ar
4. Adapun interaksi pasangan atom yang berbeda jenis adalah Fe-Pb, Fe-Bi, Fe-He, Fe-Ne, Fe-Ar, Pb-Bi, Pb-He, Pb-Ne, Pb-Ar, Bi-He, Bi-Ne, dan Bi-Ar.

Pada Tabel 1 maka nilai-nilai parameter potensial untuk Fe-Fe, Pb-Pb, Bi-Bi menggunakan seperti pada penelitian Arkundato *et al.*, sedangkan untuk nilai He-He, Ne-Ne dan Ar-Ar menggunakan data Griebel *et al.* (2007).

Tabel. 1. Parameter LJ

Interaksi pasangan	ϵ (eV)	σ (Å)	Interaksi pasangan	ϵ (eV)	σ (Å)
Fe-Fe	0,4007	2,3193	Fe-Ne	0,0840	1,5954
Pb-Pb	0,1910	3,1888	Fe-Ar	0,1546	1,9004
Bi-Bi	0,0590	3,0500	Pb-Bi	0,1061	3,1194
He-He	0,0009	2,6400	Pb-He	0,0547	1,4155
Ne-Ne	0,0030	2,7900	Pb-Ne	0,0985	1,4905
Ar-Ar	0,0103	3,4000	Pb-Ar	0,1812	1,7955
Fe-Pb	0,2766	2,7540	Bi-He	0,0535	1,4155
Fe-Bi	0,1538	2,6846	Bi-Ne	0,0963	1,4245
Fe-He	0,0467	1,5204	Bi-Ar	0,1772	1,7295

Menurut Bolind et al. (dalam Arkundato et al., 2013b), korosi yang terjadi dalam suatu logam didefinisikan sebagai degradasi/kerusakan struktur logam yang ditunjukkan oleh perubahan posisi atom-atom penyusunnya. Hal ini terjadi karena adanya interaksi antara logam dengan lingkungan di sekitarnya. Contoh logam yang mudah mengalami korosi adalah besi. Sebagaimana pada reaktor nuklir, kerusakan besi disebabkan oleh pendingin logam cair yang mengelilinginya dengan temperatur yang tinggi. Fenomena kerusakan besi dapat diamati dengan menggunakan konsep difusi.

Difusi adalah kecenderungan molekul untuk menyebar ke seluruh bagian medium atau wadah yang menampungnya (Fried dan Hademenos, 2005). Berikut ini penjelasan penentuan koefisien difusi dalam fenomena korosi besi. Salah satu kuantitas makroskopik yang penting dalam dinamika molekul adalah Mean Square Displacement (MSD). MSD merupakan besaran fisis yang dapat dihitung untuk menentukan nilai difusi besi menggunakan relasi Einstein. Pada temperatur tinggi atom-atom dalam sistem bergerak setiap saat. Dalam dinamika molekuler ini berarti merupakan iterasi dari pemecahan persamaan differensial dengan jumlah timestep tertentu. Dengan demikian perpindahan kuadrat dari atom-atom setiap saat dapat dirata-ratakan. Kuantitas ini dapat dikaitkan dengan perhitungan koefisien difusi. Persamaan untuk Mean Square

Displacement (MSD) adalah sebagai berikut (Kupryazhkin et al., 2008),

$$MSD = \langle |\vec{R}(t) - \vec{R}(0)|^2 \rangle \quad (2)$$

Dengan $\vec{R}(t)$ adalah posisi atom saat t , $\vec{R}(0)$ adalah posisi atom saat $t = 0$. Koefisien difusi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Tilley, 2013),

$$D = \lim_{t \rightarrow \infty} MSD/6t \quad (3)$$

Berdasarkan persamaan 3 dapat diketahui bahwa koefisien difusi berbanding lurus dengan nilai MSD. Semakin besar nilai MSD maka nilai koefisien difusi juga semakin besar.

METODE

Pembuatan model sistem simulasi

Sistem simulasi dimodelkan dalam bentuk kubus berdimensi $123 \times 123 \times 123 \text{ \AA}^3$ dimana besi (Fe) diletakkan di tengah logam PbBi cair yang diinjeksi dengan gas mulia. Jumlah atom Fe adalah 10745 atom dan logam cair tersusun atas 18309 (45%) atom Pb dan 22374 (55%) atom Bi. Variasi jumlah atom gas mulia yang diinjeksikan ke dalam logam PbBi cair antara lain: 0 (0%) atom, 226 (0,55%) atom, 340 (0,83%) atom, 450 (1,09%) atom, 674 (1,63%) atom, 906 (2,18%) atom, 1132 (2,71%) atom, dan 1348 (3,21%) atom.

Running simulasi

Simulasi dijalankan di komputer dengan cara memasukkan variabel-variabel dalam input simulasi. Program yang digunakan untuk *running* simulasi adalah program MOLDY.

Analisis Hasil Simulasi

Hasil *running* simulasi dianalisis menggunakan kurva MSD, koefisien difusi, dan visualisasi struktur kristal besi (menggunakan program OVITO). Besar reduksi (penurunan) laju korosi besi dihitung berdasarkan nilai koefisien difusi.

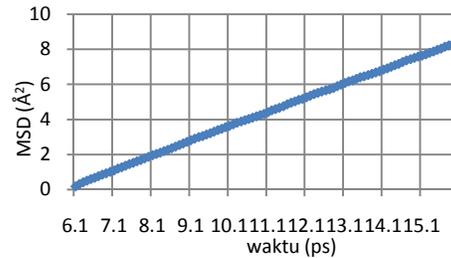
$$\text{reduksi} = \left| \frac{D_{\text{awal}} - D_{\text{terbaik}}}{D_{\text{awal}}} \right| \times 100\%$$

Dengan D_{awal} adalah koefisien difusi besi ketika konsentrasi gas mulia 0%, D_{terbaik} koefisien difusi besi yang paling kecil (m^2/s)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Atom-atom dalam sistem simulasi tidak keseluruhan diam pada suatu tempat tetapi beberapa atom bergerak secara terus-menerus, terutama atom-atom dalam material cair dan gas. Pembatasan waktu pada sistem simulasi digunakan untuk membatasi periode gerak atom. Rata-rata perpindahan atom dikenal dengan istilah *Mean Square Displacement* (MSD). Pada kurva MSD, sumbu x menunjukkan waktu yang dibutuhkan atom untuk bergerak selama simulasi berlangsung. Satuan waktu pergerakan atom adalah ps . Sumbu y menunjukkan MSD yaitu perpindahan atom dalam skala luasan. Satuan MSD adalah \AA^2 .

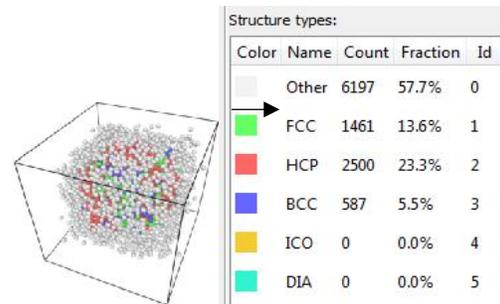
Gambar 1 menunjukkan nilai MSD besi dalam logam PbBi cair sebelum diinjeksi gas mulia. Berdasarkan gambar 1 terlihat bahwa ketika simulasi dijalankan selama 6ps, nilai MSD masih mendekati nol. Sedangkan ketika waktu simulasi mencapai 16ps, nilai MSD mengalami kenaikan sekitar 9\AA^2 .



Gambar 1. Kurva MSD sebelum injeksi gas mulia

Pada penelitian ini, pergerakan atom yang dilihat melalui analisis data MSD dan koefisien difusi mampu mengubah struktur kristal besi. Salah satu hal yang mempengaruhi perubahan struktur tersebut adalah pemberian temperatur yang tinggi (1023K) pada sistem simulasi. Temperatur ini dibuat konstan karena temperatur bukan merupakan besaran yang ditinjau dalam sistem simulasi.

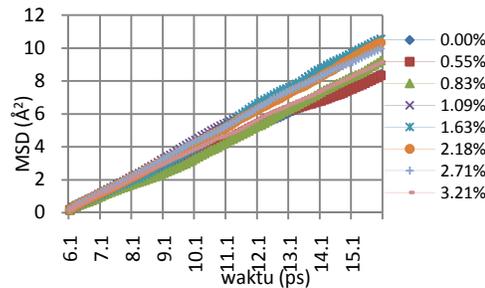
Perubahan struktur kristal besi dapat dilihat melalui posisi atom-atom penyusunnya. Bentuk dan jumlah struktur kristal besi divisualisasikan menggunakan program OVITO (Gambar. 2).



Gambar 2. Visualisasi struktur kristal besi dalam logam PbBi cair sebelum diinjeksi gas mulia

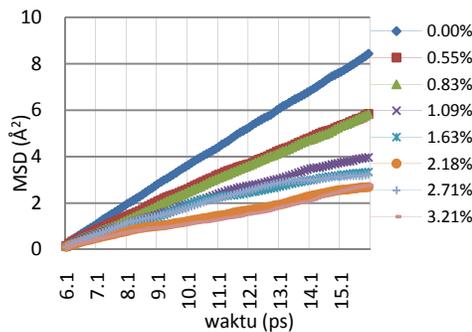
Pada temperatur 1023K struktur kristal besi adalah BCC. Jadi struktur kristal besi yang

ditinjau dari hasil *running* simulasi adalah struktur BCC. Korosi dapat dihambat *sepenuhnya* jika struktur kristal besi masih utuh berbentuk BCC.



Gambar. 3 Kurva MSD dengan inhibitor Helium

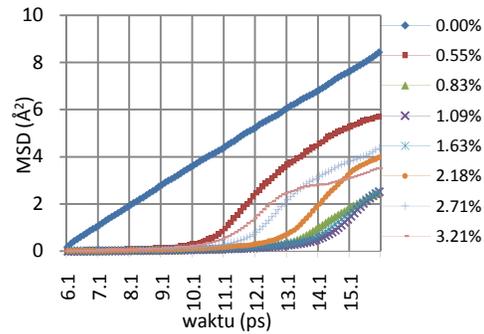
Gambar 3 merupakan kurva MSD dari besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair dengan 7 variasi konsentrasi Helium. Berdasarkan gambar 2 diperoleh bahwa kemiringan kurva MSD yang paling rendah ditunjukkan oleh konsentrasi Helium 0,55% dengan nilai kemiringan sebesar 0,816. Laju korosi yang rendah digambarkan oleh kemiringan kurva MSD yang paling rendah (Arkundato *et al.*, 2013b).



Gambar. 4. Kurva MSD dengan inhibitor Neon.

Gambar 4 merupakan kurva MSD besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair dengan 7 variasi konsentrasi Neon. Berdasarkan gambar tersebut, kemiringan kurva MSD paling rendah ditunjukkan oleh konsentrasi Neon 3,21%. Hal ini berarti korosi besi dapat dihambat dengan menginjeksikan gas Neon ke dalam logam PbBi cair dengan konsentrasi 3,21%. Jika dibandingkan dengan Helium, maka kemiringan kurva MSD besi dalam logam PbBi cair dengan

injeksi Neon lebih rendah daripada kemiringan kurva MSD besi dengan injeksi Helium. Jadi dapat diasumsikan bahwa Neon cukup baik dalam menghambat korosi besi dalam logam PbBi cair.

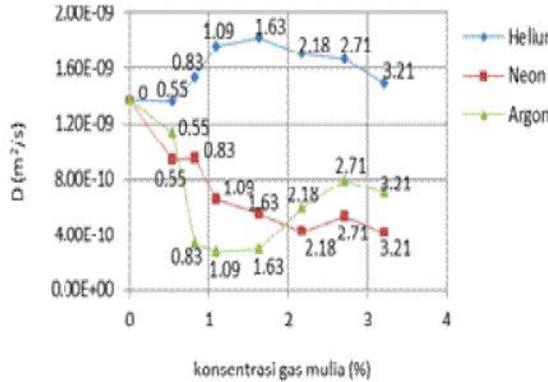


Gambar. 5 Kurva MSD dengan inhibitor Argon

Gambar 5 merupakan kurva MSD dari besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair dengan 7 variasi Argon. Berdasarkan gambar tersebut, ketika atom bergerak dengan interval waktu 6ps-12ps kemiringan kurva MSD sangat rendah bahkan mendekati nilai nol. Adapun kemiringan kurva MSD yang paling rendah ditunjukkan oleh konsentrasi Argon 1,09% dimana nilai kemiringan kurva MSD besi adalah 0,162. Kemiringan kurva MSD besi dengan kandungan Argon yang berbeda memiliki nilai yang lebih rendah daripada kemiringan kurva MSD besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair sebelum diinjeksi gas mulia. Jika dibandingkan dengan Helium dan Neon, kemiringan MSD besi dengan kandungan Argon juga memiliki nilai kemiringan lebih rendah.

Analisis data hasil simulasi selain menggunakan MSD juga menggunakan koefisien difusi. Hasil trayektori pergerakan atom setelah dilakukan simulasi dapat digunakan untuk menghitung nilai koefisien difusi dalam menganalisis korosi besi dalam logam PbBi cair. Nilai koefisien difusi secara tidak langsung telah menggambarkan laju difusi. Laju difusi berbanding lurus dengan laju korosi besi. Semakin rendah nilai koefisien difusi maka semakin rendah laju korosi besi. Sebaliknya semakin tinggi nilai koefisien difusi maka semakin tinggi pula laju korosi besi (Arkundato *et al.*, 2013b). Menurut persamaan Arrhenius,

koefisien difusi merupakan perbandingan antara MSD dan waktu simulasi (Tilley, 2013).



Gambar. 6. Kurva koefisien difusi

Gambar 6 menunjukkan nilai koefisien difusi besi yang direpresentasikan melalui kurva. Logam PbBi cair yang diinjeksi Helium memiliki koefisien difusi paling kecil dengan nilai $1,36 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ dimana konsentrasi helium adalah **0,55%**. Hasil analisis data menggunakan koefisien difusi pada helium ini sesuai dengan analisis data menggunakan kurva MSD. Laju korosi besi yang dapat direduksi oleh Helium hanya sebesar **0,73%**. Reduksi ini dihitung dengan membandingkan nilai koefisien difusi besi sebelum diinjeksi gas mulia dan nilai koefisien difusi yang paling rendah. Konsentrasi $> 0,55\%$ justru menaikkan tingkat korosi besi. Jadi dapat diasumsikan bahwa Helium sangatlah kurang efektif dalam menghambat korosi besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair.

Logam PbBi cair yang diinjeksi gas Neon memiliki koefisien difusi paling kecil dengan nilai $4,16 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ dimana konsentrasi Neon adalah **3,21%**. Reduksi laju korosi besi yang diinjeksi Neon pada konsentrasi **3,21%** adalah **69,64%**. Pada konsentrasi **2,18%** juga memiliki koefisien difusi yang cukup kecil yaitu $4,21 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Reduksi laju korosi besi yang diinjeksi Neon pada konsentrasi **2,18%** adalah **69,27%**. Perbandingan reduksi korosi besi antara konsentrasi **3,21%** dan **2,18%** memiliki selisih yang cukup kecil. Jadi berdasarkan perhitungan reduksi dan analisis koefisien difusi, korosi besi dapat dihambat dengan menginjeksikan Neon dalam rentang konsentrasi

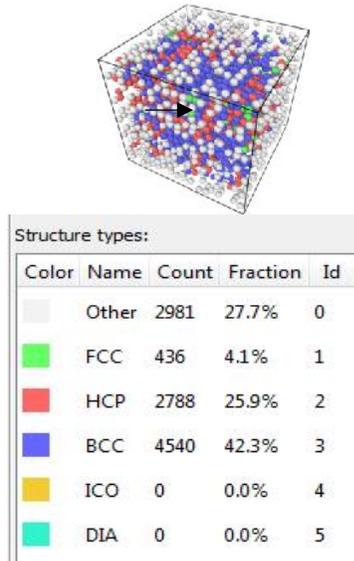
2,18% – 3,21% ke dalam logam PbBi cair. Pada konsentrasi tersebut, reduksi korosi besi yang diperoleh adalah **69,27% – 69,64%**. Jadi dapat dikatakan bahwa Neon cukup efektif dalam menghambat korosi besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair.

Berdasarkan gambar 6 ditunjukkan bahwa koefisien difusi paling rendah ketika diberi injeksi Argon dengan konsentrasi **1,09% – 1,63%**. Pada interval tersebut terjadi penghambatan laju korosi yang cukup stabil. Dari gambar 5 dapat dikelompokkan menjadi tiga daerah penghambatan korosi besi antara lain: (1) injeksi Argon di bawah konsentrasi **1,09%** menunjukkan koefisien difusi masih tergolong tinggi, (2) injeksi Argon di antara konsentrasi **1,09% – 1,63%** menunjukkan terjadi penghambatan korosi secara maksimum, (3) injeksi Argon di atas konsentrasi **1,63%** muncul kembali kenaikan laju korosi. Jadi korosi besi dalam logam PbBi cair dapat dihambat dengan menginjeksikan konsentrasi Argon paling sedikit **1,09%** dan paling banyak **1,63%**.

Koefisien difusi paling kecil berada dalam rentang $2,70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} - 2,94 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Konsentrasi Argon sebanyak **1,09%** dapat mereduksi laju korosi besi sebesar **80,29%**. Sedangkan ketika konsentrasi Argon **1,63%** laju korosi besi dapat tereduksi sebesar **78,54%**. Dengan demikian Argon dapat mereduksi laju korosi besi dalam rentang **78,54% – 80,29%**. Perhitungan laju korosi besi tersebut menunjukkan bahwa masih terjadi korosi pada besi meskipun logam PbBi cair di sekitar besi telah diinjeksi gas mulia. Jadi peran gas mulia yang diinjeksikan ke dalam logam PbBi cair ini hanya sebatas menghambat terjadinya korosi besi.

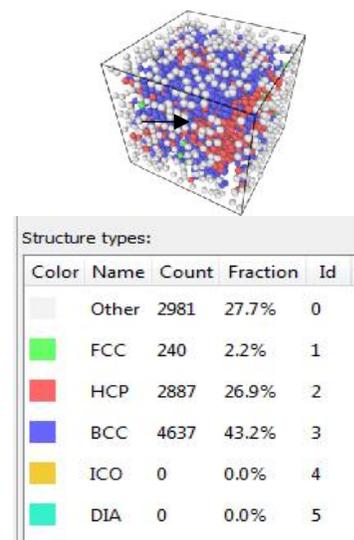
Berdasarkan ketiga analisis data hasil simulasi, struktur kristal besi hanya dapat diamati dengan jelas menggunakan analisis CNA (program OVITO). Hasil penghambatan korosi besi menggunakan analisis CNA memiliki sedikit perbedaan dengan analisis menggunakan kurva MSD dan koefisien difusi. Pada analisis MSD dan

koefisien difusi, korosi besi dapat dihambat secara optimal dengan menginjeksikan Argon pada konsentrasi 1,09% (Gambar. 7).



Gambar. 7. Struktur kristal besi dalam logam PbBi cair dengan konsentrasi Argon 1,09%

Pada analisis CNA, korosi besi dapat dihambat secara optimal dengan menginjeksikan Argon pada konsentrasi 1,63% (Gambar 8).



Gambar. 8. Struktur kristal besi dalam logam PbBi cair dengan konsentrasi Argon 1,63%

Selisih kedua perbedaan konsentrasi ini tidak terlalu jauh ketika dibandingkan dengan keadaan awal besi sebelum diinjeksi gas mulia. Jika struktur kristal (BCC, HCP, dan FCC) pada konsentrasi 1,09% dan 1,63% dijumlahkan dan dirata-ratakan maka diperoleh jumlah struktur kristal yang sama. Ketika dua konsentrasi Argon yang diinjeksikan memiliki jumlah struktur kristal yang sama maka lebih baik menggunakan konsentrasi Argon yang memiliki jumlah lebih kecil. Secara logika, semakin sedikit jumlah konsentrasi yang digunakan maka dapat diasumsikan semakin efisien.

KESIMPULAN

Besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair memiliki tingkat korosi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair setelah diinjeksi gas mulia. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh bahwa besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair sebelum diinjeksi gas mulia memiliki koefisien difusi sebesar $1,37 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Sedangkan besi yang diletakkan di tengah logam PbBi cair setelah diinjeksi gas mulia (Argon) memiliki koefisien difusi sebesar $2,70 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Gas mulia yang diinjeksikan ke dalam logam PbBi cair ada tiga macam, antara lain: Helium, Neon, dan Argon. Dari ketiga macam gas mulia tersebut yang paling efektif dalam menghambat korosi besi adalah Argon. Argon dapat mereduksi laju korosi besi hingga 80,29%. Perolehan hasil simulasi ini belum bisa dikatakan akurat sepenuhnya, karena pada dasarnya simulasi menggunakan metode dinamika molekul hanyalah sebatas pendekatan. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, misalnya simulasi dengan jumlah atom yang lebih banyak, waktu yang lebih lama, atau penelitian secara eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

Adeloye, A., Olomola, T., Adebayo, A., Ajibade, P. (2012) : A High Molar Extinction Coefficient Bisterpyridyl Homoleptic Ru(II) Complex with trans-2-Methyl-2-butenic Acid Functionality: Potential Dye for Dye-

- Sensitized Solar Cells, *Int. J. Mol. Sci* 13 (3), pp. 3511-3526.
- Anh, Quan Vo. (2006) : Degradation of the Solar Cell Dye Sensitizer N719 Preliminary Building of Dye-Sensitized Solar Cell, Thesis, Denmark: Roskilde University.
- Chiba, Y., Islam, A., Watanabe, Y., Komiyama, R., Koide, N., dan Han, L.Y. (2006) :Dye sensitized Solar Cells with Conversion efficiency of 11.1%, *Jpn. J. Appl. Phys* (45), L638-L640.
- Durst, R.W., dan Wrolstad, R.E. (2005) :Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-visible Spectroscopy, *Handbook of analytical food chemistry*, pp. 33-45. New York: John Wiley & Sons.
- Ekasari, V., dan Yudoyono, G. (2013) : Fabrikasi DSSC dengan Dye Ekstrak Jahe Merah (*Zingiber Officinale Linn Var, Rubrum*) Variasi Larutan TiO₂ Nanopartikel Berfase Anatase dengan Teknik Pelapisan Spin Coating, *Jurnal Sains dan Seni Pomits*, Vol.2, No.1, (2013), pp. 2337-3520.
- Hardeli, Suwardani, Riky, Fernando, T., Maulidis, Ridwan, S. (2013) :Dye Sensitized Solar Cells (DSSC) Berbasis Nanopori TiO₂ Menggunakan Antosianin dari Berbagai Sumber Alami, *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*, 2013, pp, 155-161.
- Hug, H., Bader, M., Mair, P., Gratzel, T. (2014) : Biophotovoltaics: Natural Pigments in dye-sensitized solar cells, *Applied Energy* (115), pp, 216-225..
- Itani, T. dan Ogawa, M. (2004). History and recent trends of red rice in Japan. *Nippon Sakumotsu Gakkai Kiji* 73: 137-147.
- Lee, J.K., dan Mengjin, Y. (2011) : Progress in Light Harvesting and Charge Injection of Dye-Sensitized Solar Cells, *Material Science and Engineering B* 176, pp. 1142-1160.
- Manan, S. (2009) :Energi Matahari Sumber Energi Alternatif yang Efisien, handal dan ramah lingkungan di Indonesia, Program Diploma III Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang: tidak diterbitkan.
- Maya, S.W.K., dan Gontjang, P. (2012) :Studi Awal Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) dengan Menggunakan Ekstraksi Daun Bayam (*Amaranthus hybridus L.*) Sebagai Dye Sensitized dengan Variasi Jarak Sumber Cahaya Pada DSSC, Surabaya: ITS.
- Smestad, G.P., dan Gratzel, M. (1998) :Demonstrating electron Transfer and Nanotechnology: A Natural Dye-Sensitized Nanocrystalline energy Converter, *J. Chem. Educ* (75), pp. 752-756.
- Soga, T. (2005) :Nanostructured Materials for Solar Energy Conversion, Japan: Elsevier.
- Stuart, B. (2004) :Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications, England: John Wiley & Sons.
- Wongcharee, K., Meeyoo, V., Chavadej, S. (2007) : Dye sensitized solar cell using natural dyes extracted from rose and blue pea flowers, *solar energy materials and solar cells* 91, pp. 566-571.
- Zhou, H., Liqiong, W., Yurong, G., Tingli, M. Dye sensitized solar cell using 20 natural dye as sensitizers, *Journal of Photochemistry and Photobiology A Chemistry* (219), pp. 188-194.