

INTERDIFUSI EFEKTIF-FUNGSI KONSENTRASI DI DALAM PADUAN TERNER Ni-Re-X (X=Ru, Co)

Efendi Mabururi

Pusat Penelitian Metalurgi LIPI

Kawasan Puspiptek Serpong Tangerang Selatan Banten

E-mail : effe004@lipi.go.id, efendi_lipi@yahoo.com

Masuk tanggal : 09-04-2013, revisi tanggal : 02-07-2013, diterima untuk diterbitkan tanggal : 17-07-2013

Intisari

INTERDIFUSI EFEKTIF-FUNGSI KONSENTRASI DI DALAM PADUAN TERNER Ni-Re-X (X=Ru, Co). Tulisan ini berkaitan dengan penelaahan perilaku interdifusi unsur refraktori Re dengan unsur-unsur penting lain di dalam *superalloy* berbasis nikel dengan mengases koefisien interdifusi efektif sebagai fungsi konsentrasi, \tilde{D}_i^{eff} di dalam paduan terner Ni-Re-X (X= Ru, Co). Hasil asesmen menunjukkan bahwa harga koefisien interdifusi efektif untuk Re lebih rendah dibandingkan dengan koefisien interdifusi efektif untuk Ru dan Co berdasarkan urutan $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}} < \tilde{D}_{\text{Ru}}^{\text{eff}} < \tilde{D}_{\text{Co}}^{\text{eff}}$. Gradien konsentrasi Re mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap $\tilde{D}_{\text{Ru}}^{\text{eff}}$ atau $\tilde{D}_{\text{Co}}^{\text{eff}}$ dibandingkan dengan pengaruh gradien konsentrasi masing-masing unsur (Ru, Co). Sebaliknya, koefisien interdifusi efektif $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}}$ relatif tidak dipengaruhi oleh gradien konsentrasi Ru dan Co pada masing-masing sistem. Perilaku interdifusi ini merefleksikan bahwa ikatan antar atom Ru-Re atau Co-Re lebih besar dibandingkan ikatan antar atom Ni-Ru atau Ni-Co

Kata kunci : Interdifusi efektif, Superalloy berbasis nikel, Unsur refraktori, Nikel-rhenium, Ruthenium, Kobal

Abstract

CONCENTRATION-DEPENDENT EFFECTIVE INTERDIFFUSION IN Ni-Re-X (X=Ru, Co) TERNARY ALLOYS. This paper is addressed to the study of interdiffusion behaviour of refractory element Re with other important elements in nickel based superalloys by assessing the concentration dependence-effective interdiffusion coefficients \tilde{D}_i^{eff} in the ternary systems of Ni-Re-X (X= Ru, Co). The assesment results showed that the effective interdiffusion coefficient for Re was smaller than that for Ru and Co in the order of $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}} < \tilde{D}_{\text{Ru}}^{\text{eff}} < \tilde{D}_{\text{Co}}^{\text{eff}}$. The concentration gradient of Re had a larger influence on $\tilde{D}_{\text{Ru}}^{\text{eff}}$ and $\tilde{D}_{\text{Co}}^{\text{eff}}$ than the own concentration gradient of Ru and Co, respectively. On the other hand, the effective interdiffusion coefficient of Re, $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}}$ was not influenced by the concentration gradient of Ru and Co in the respective system. This interdiffusion behaviour reflects that the atomic bond of Ru-Re and Co-Re is larger compared to that of Ni-Ru and Ni-Co, respectively.

Key words : Effective interdiffusion, Nickel based superalloys, Refractory element, Nickel-rhenium, Ruthenium, Cobalt

PENDAHULUAN

Superaloy nikel berkristal tunggal digunakan untuk komponen yang beroperasi pada suhu tinggi dan beban yang tinggi serta di dalam lingkungan yang korosif seperti pada aplikasi turbin gas. Di

dalam superaloy nikel berkristal tunggal yang modern terdapat sekitar sepuluh unsur pepadu yang terkandung di dalam paduan untuk memenuhi sifat-sifat mekanik yang dibutuhkan dan untuk menjamin stabilitas struktur mikro pada suhu tinggi. Unsur-unsur ini meliputi Al,

Ti, Cr, Co, Mo, Nb, Ta, W, Re dan Ru. Tiga unsur-unsur terakhir adalah sangat penting di dalam superalloy nikel berkristal tunggal yang modern karena unsur-unsur ini secara dramatis meningkatkan sifat-sifat mekanik dan kestabilan struktur mikro paduan^[1-5].

Di dalam paduan yang kompleks seperti ini, informasi tentang perilaku unsur-unsur pemadu sangat dibutuhkan untuk dapat menjelaskan peristiwa-peristiwa suhu tinggi yang dialami oleh paduan. Dalam hal ini, kecepatan interdifusi merupakan salah satu data yang penting yang harus diestimasi. Sebagai contoh terjadinya deformasi mulur (*creep*) tergantung dari kecepatan pengaturan secara difusi pada inti dislokasi dan pembesaran ukuran terarah fasa γ atau *rafting* membutuhkan transportasi masa pada skala periodisasi fasa γ ^[6-8]. Kemudian telah ditunjukkan pula bahwa kinetika perbesaran (*coarsening*) fasa γ pada superalloy berbasis nikel yang mengandung Ru dan atau Re dikontrol oleh difusi^[9]. Sementara itu beberapa hasil percobaan mengenai interdifusi di dalam paduan nikel terner telah dipublikasikan oleh penulis^[9-12].

Untuk paduan terner, penentuan empat difusivitas matriks (\tilde{D}_{11}^3 , \tilde{D}_{22}^3 , \tilde{D}_{12}^3 dan \tilde{D}_{21}^3) dibutuhkan dua jenis kopel difusi yang memiliki profil konsentrasi yang berpotongan pada konsentrasi tertentu. Dibutuhkan kopel difusi dalam jumlah yang banyak untuk menentukan ketergantungan koefisien interdifusi terhadap konsentrasi unsur. Untuk menggantikan empat difusivitas matriks pada sistem terner, Dayananda^[13] mengembangkan metode dengan menentukan koefisien interdifusi efektif rata-rata setiap unsur pada selang komposisi tertentu dari profil konsentrasi dari hanya satu kopel difusi. Ketergantungan terhadap konsentrasi dari koefisien interdifusi efektif ini dapat dilakukan dengan menentukan koefisien ini pada beberapa selang komposisi yang kecil di dalam suatu profil konsentrasi. Tulisan ini akan melaporkan perilaku

interdifusi Re dengan Ru dan Co di dalam paduan nikel terner dengan mengases koefisien interdifusi efektif sebagai fungsi konsentrasi yang dikembangkan oleh Dayananda^[13].

Penentuan Koefisien Interdifusi Efektif

Di dalam penelitian ini, penentuan koefisien interdifusi efektif dilakukan dengan mengadopsi metoda yang dikembangkan oleh M. Dayananda dkk^[13]. Di dalam sistem paduan terner, koefisien interdifusi efektif didefinisikan oleh persamaan (1) dan dihubungkan dengan elemen-elemen matrik difusifitas^[13]:

$$\tilde{D}_i^{\text{eff}} = \tilde{D}_{ii}^k + \tilde{D}_{ij}^k \frac{\partial C_j / \partial x}{\partial C_i / \partial x} \quad \dots\dots\dots(1)$$

di mana i atau $j=1,2$ menyatakan komponen-komponen terlarut dan $i \neq j$, sedangkan $k (\neq i, j)$ menyatakan komponen pelarut. \tilde{D}_{ii}^k menyatakan koefisien interdifusi mayor, \tilde{D}_{ij}^k menyatakan koefisien interdifusi minor. $\frac{\partial C_i}{\partial x}$ and $\frac{\partial C_j}{\partial x}$ masing-masing menyatakan gradien konsentrasi komponen i dan j . Koefisien interdifusi mengandung koefisien interdifusi mayor dan minor dan mengilustrasikan multi-interaksi difusi dari komponen-komponen di dalam sistem difusi.

Penentuan koefisien interdifusi efektif rata-rata untuk sebuah selang komposisi yang kecil Δc di dalam profil konsentrasi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut^[13]:

$$\tilde{D}_{i,\Delta c}^{\text{eff}} = \frac{\tilde{J}_i(x_1)(x_1 - x_0) - \tilde{J}_i(x_2)(x_2 - x_0)}{C_i(x_2) - C_i(x_1)} + \frac{\int_{C_i(x_1)}^{C_i(x_2)} (x - x_0)^2 dC_i}{2t(C_i(x_2) - C_i(x_1))} \quad (2)$$

di mana $\tilde{J}_i(x_1)$ dan $\tilde{J}_i(x_2)$ masing-masing menyatakan fluks interdifusi komponen i pada posisi x_1 dan x_2 di dalam daerah difusi, x_0 menyatakan posisi

bidang matano, t untuk waktu difusi, $C_i(x_1)$ dan $C_i(x_2)$ masing-masing menyatakan konsentrasi pada x_1 dan x_2 .

Bidang Matano adalah sebuah bidang yang membagi jumlah massa yang sama untuk berdifusi melintasinya ke sebelah kiri dan ke sebelah kanan dari posisi awal^[14]. Bidang Matano dan fluks interdifusi masing-masing dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\int_{C_i^-}^{C_i^+} (x - x_0) dC_i = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\tilde{J}_i = \frac{1}{2t} \int_{C_i^+ \text{ or } C_i^-}^{C_i(x)} (x - x_0) dC_i \quad \dots\dots\dots(4)$$

Dari persamaan (2) dapat kita lihat bahwa dengan membuat selang yang cukup kecil antara x_1 and x_2 , koefisien interdifusi efektif sebagai fungsi konsentrasi dapat ditentukan.

Sedangkan untuk sistem biner, koefisien interdifusi \tilde{D} diestimasi menggunakan metoda of Sauer dan Freise^[15] melalui penggunaan persamaan berikut:

$$\tilde{D} = (1/2t)(dx/dY_i) \left[(1 - Y_i) \int_{-\infty}^x Y_i dx + Y_i \int_x^{+\infty} (1 - Y_i) dx \right] \quad \dots(5)$$

di mana $Y_i = (C_i - C_i^-)/(C_i^+ - C_i^-)$ adalah komposisi ternormalisasi, C_i^- dan C_i^+ adalah masing-masing komposisi batas bawah dan batas atas dari kopel difusi.

PROSEDUR PERCOBAAN

Bahan

Pada penelitian interdifusi ini digunakan sistem paduan biner Ni-Re, paduan terner Ni-Re-Ru dan paduan terner Ni-Re-Co. Untuk percobaan interdifusi pada sistem paduan biner digunakan satu buah kopel difusi sedangkan untuk sistem paduan terner digunakan dua buah kopel difusi. Satu buah kopel difusi terdiri dari dua buah pelat paduan dengan komposisi berbeda yang digabung sampai permukaan kedua pelat merapat. tanpa celah.

Komposisi (% mol) kopel difusi untuk masing-masing sistem paduan dan kondisi anil difusi ditunjukkan dalam Tabel 1.

Langkah-Langkah Percobaan

Paduan untuk kopel difusi dibuat dari campuran logam-logam murninya yang dilebur di dalam tungku peleburan busur listrik (*Arc Melting Furnace*) dengan atmosfer gas argon kemurnian tinggi (*high purity argon*) dan diocetak dalam bentuk ingot kancing (*button ingot*). Ingot dipotong menjadi bentuk pelat dan dianil pada suhu 1250 °C selama 120 jam untuk homogenisasi komposisi dan memperbesar ukuran butir. Ukuran butir rata-rata pelat yang telah dianil adalah sekitar 1000 μm untuk nikel murni dan 400 μm untuk nikel paduan.

Untuk mendapatkan permukaan yang memenuhi persyaratan untuk proses difusi, pelat diratakan permukaannya dengan mesin gerinda, dipoles dengan kertas ampelas SiC sampai ukuran 2000 dan dipoles dengan sluri intan sampai ukuran 0,25 μm serta diakhiri dengan pencucian oleh aseton di dalam pembersih ultrasonik dan dikeringkan. Setelah itu kopel difusi disusun dari dua buah pelat yang berbeda komposisinya seperti ditunjukkan oleh Tabel 1.

Pada antarmuka pelat diletakkan fiber alumina dengan diameter beberapa mikron yang berfungsi sebagai tanda posisi awal bidang difusi. Kopel difusi kemudian diset di dalam pemegang (*holder*) yang terbuat dari molibdenum. Setelah tersusun, kopel difusi kemudian dimasukkan ke dalam ampul kuarsa dan diisi dengan gas argon. Ampul yang sudah terisi kopel difusi dimasukkan ke dalam tungku muffle untuk dilakukan anil difusi pada suhu dan waktu tertentu sesuai yang ditunjukkan oleh Tabel 1. Setelah anil difusi selesai, ampul didinginkan (*quenching*) dengan memecahkannya di dalam air. Kopel difusi kemudian dipotong melintang, dipoles dan dilakukan pengukuran profil konsentrasi unsur-unsur pada arah tegak lurus dengan antarmuka difusi dengan

menggunakan *energy dispersive x-ray spectrometer* (EDX) yang tergabung dengan alat *scanning electron microscope* (SEM). Penentuan koefisien interdifusi efektif dilakukan pada profil konsentrasi yang dihasilkan dengan menggunakan metoda yang dikembangkan oleh Dayananda^[13] seperti yang diuraikan pada bagian sebelumnya.

Tabel 1. Kopel difusi dan kondisi anil difusi

Sistem Paduan	Kopel Difusi (% mol)	Suhu dan Waktu Anil Difusi
Ni-Re-Ru	Ni/Ni8Ru5Re Ni8Ru/Ni5Re	1250°C, 72 Jam
Ni-Re-Co	Ni/Ni15Co5Re Ni15Co/Ni5Re	1250°C, 72 Jam
Ni-Re	Ni/Ni5Re	1250°C, 72 Jam

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menganalisa perilaku interdifusi efektif Re dengan Ru dan Co di dalam paduan nikel terner ini dibuat dua jenis kopel difusi untuk masing-masing sistem paduan, yang dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh gradien konsentrasi terhadap koefisien interdifusi efektif, yaitu gradien konsentrasi searah (*co-current*) dan gradien konsentrasi berlawanan (*counter-current*). Gambar 1 menampilkan tipikal kurva profil konsentrasi yang terukur untuk unsur terlarut (Re dan Ru) di dalam masing-masing kopel difusi sistem Ni-Re-Ru setelah anil difusi pada suhu 1250 °C selama 72 jam. Prosedur di dalam Daftar Pustaka^[16] digunakan untuk melakukan fit kurva profil konsentrasi yang terukur tersebut. Hasil *fitting* ditampilkan dalam bentuk kurva garis pada Gambar 1 yang dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

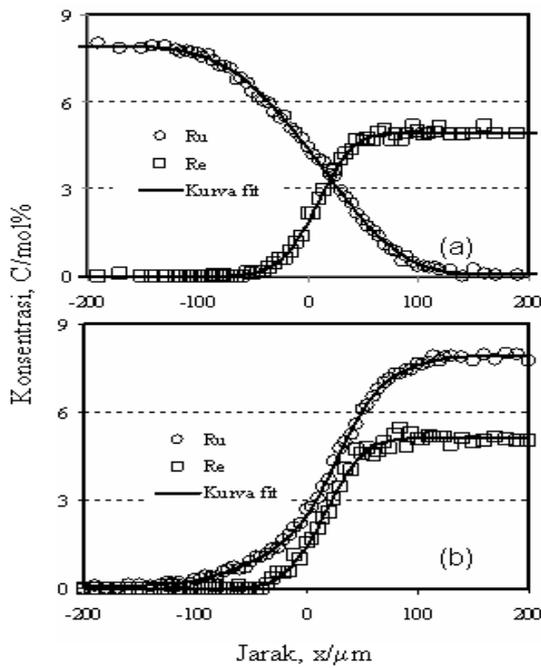
$$C_i(x) = C_i^- + \frac{C_i^+ - C_i^-}{2} [1 + \operatorname{erf}(y)], \quad \dots(6)$$

di mana y merupakan fungsi polinomial yang merepresentasikan data konsentrasi terukur. Penentuan persamaan polinomial y ini sangat penting karena akan

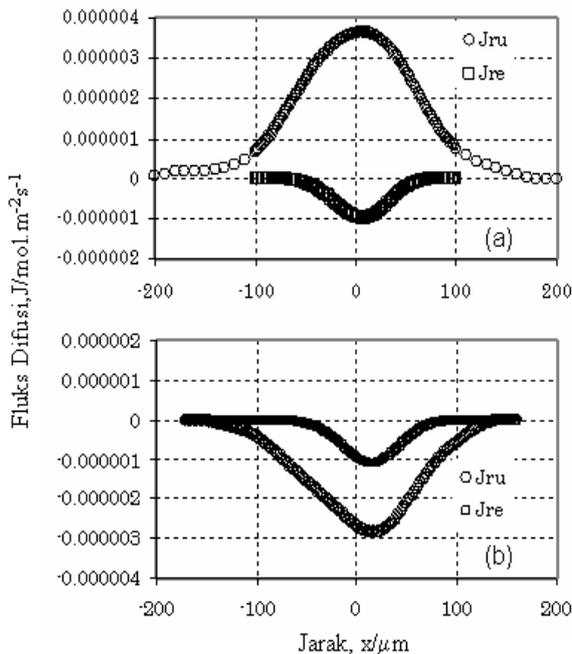
menentukan tingkat kesimetrian kurva $C_i(x)$ yang akan menentukan tingkat ketergantungan koefisien interdifusi efektif terhadap konsentrasi. Semakin asimetri kurva $C_i(x)$, maka koefisien interdifusi efektif semakin tergantung pada perubahan konsentrasi unsur.

Gambar 2 menampilkan tipikal fluks difusi (\tilde{J}_i) untuk Re dan Ru di dalam masing-masing kopel difusi pada sistem Ni-Re-Ru yang ditentukan dari kurva konsentrasi pada Gambar 1 dengan menggunakan Persamaan (4). Fluks difusi ini menyatakan jumlah atom unsur (dalam mol) yang mengalir melalui bidang tertentu (dalam meter persegi) dalam waktu satu detik. Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa kurva fluks difusi untuk Ru jauh lebih besar dibandingkan dengan untuk Re, yang menunjukkan bahwa pada luas bidang yang sama dan waktu yang sama jumlah atom Ru yang mengalir jauh lebih banyak (sekira 3 sampai 3,5 kali) dibandingkan dengan jumlah atom Re. Dari data ini dapat diestimasi bahwa Ru berdifusi lebih cepat dan memiliki koefisien interdifusi yang lebih besar dari pada Re.

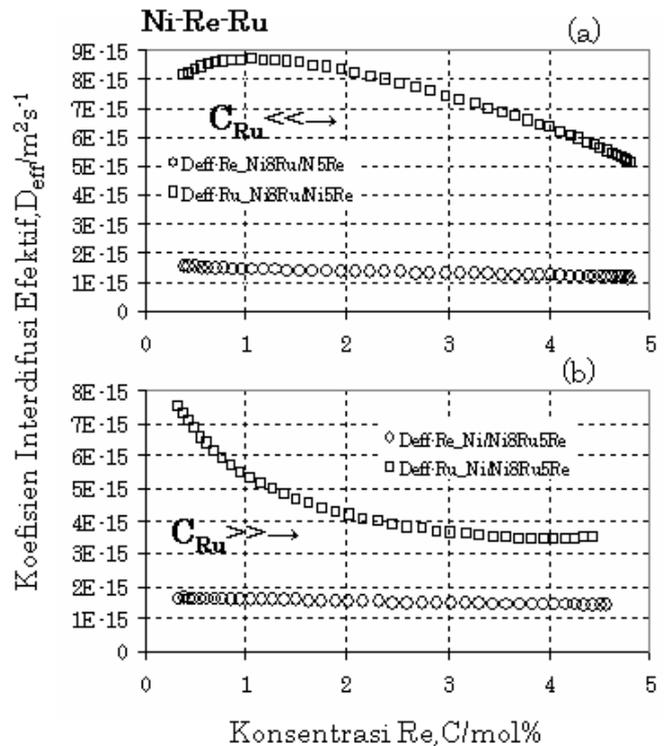
Koefisien interdifusi efektif diestimasi menggunakan persamaan (2), (3) dan (4) untuk setiap selang komposisi yang sangat kecil sepanjang kurva profil konsentrasi. Untuk masing-masing sistem, koefisien interdifusi efektif suatu unsur ditentukan di dalam dua jenis kopel difusi dengan tujuan untuk mengetahui ketergantungannya terhadap gradien konsentrasi searah (*co-current*) dan gradien konsentrasi berlawanan (*counter-current*) dengan unsur yang lain. Sebagai contoh kopel difusi *counter-current* Ni8Ru/Ni5Re pada sistem Ni-Ru-Re (Gambar 1.a), konsentrasi Ru meningkat dengan menurunnya konsentrasi Re, sedangkan pada kopel difusi *co-current* Ni/Ni8Ru5Re (Gambar 1.b), konsentrasi Ru meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi Re.



Gambar 1. Profil konsentrasi Re dan Ru di dalam kopel difusi (a) Ni8Ru/Ni5Re and (b) Ni/Ni8Ru5Re setelah anil difusi pada 1250 °C selama 72 jam



Gambar 2. Fluks difusi Re dan Ru di dalam kopel difusi (a) Ni8Ru/Ni5Re and (b) Ni/Ni8Ru5Re setelah anil difusi pada 1250 °C selama 72 jam

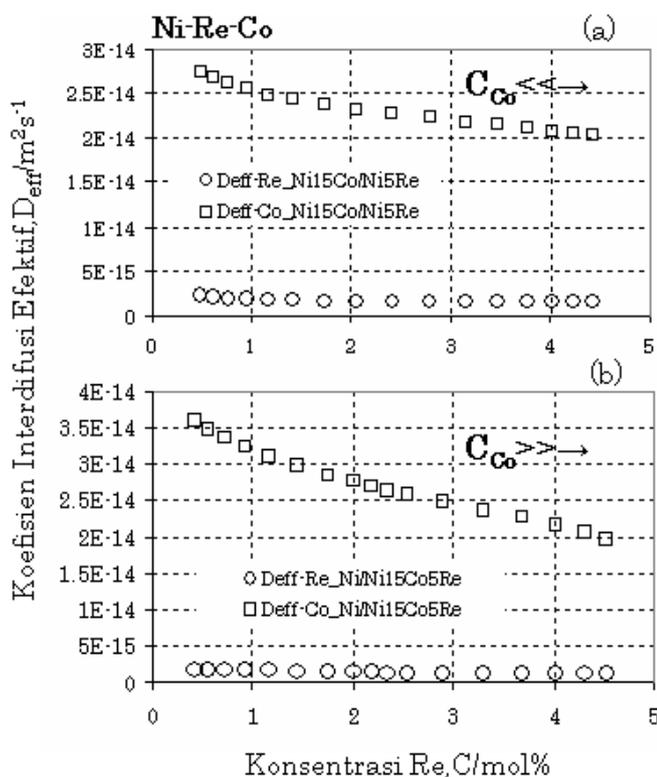


Gambar 3. Koefisien interdifusi efektif Re dan Ru di dalam kopel difusi (a) Ni5Re/Ni8Ru and (b) Ni/Ni5Re8Ru setelah anil difusi pada 1250 °C selama 72 jam

Koefisien interdifusi efektif unsur-unsur sebagai fungsi dari konsentrasi Re pada sistem Ni-Re-Ru dan Ni-Re-Co masing-masing ditunjukkan oleh Gambar 3, dan 4. Pada masing-masing sistem tersebut dapat dilihat bahwa koefisien interdifusi efektif untuk Re, \tilde{D}_{Re}^{eff} , memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan koefisien interdifusi efektif \tilde{D}_{Co}^{eff} dan \tilde{D}_{Ru}^{eff} . Koefisien interdifusi keempat unsur ini dapat diurutkan berdasarkan urutan $\tilde{D}_{Re}^{eff} < \tilde{D}_{Ru}^{eff} < \tilde{D}_{Co}^{eff}$.

Dari Gambar 3 dan 4 dapat dievaluasi pengaruh gradien konsentrasi suatu unsur terhadap koefisien interdifusi efektif unsur yang lain. Dari kurva-kurva tersebut terlihat bahwa koefisien interdifusi efektif \tilde{D}_{Ru}^{eff} dan \tilde{D}_{Co}^{eff} menurun pada kedua kopel difusi untuk masing-masing sistem yang dievaluasi dengan tingkat penurunan yang semakin besar berdasarkan urutan $\tilde{D}_{Co}^{eff}, \tilde{D}_{Ru}^{eff}$. Ini berarti \tilde{D}_{Ru}^{eff} dan \tilde{D}_{Co}^{eff} tidak tergantung dari naik dan turunnya

konsentrasi unsur masing-masing, di mana konsentrasi unsur naik pada kopel difusi *counter-current* (gradien konsentrasi berlawanan) pada Gambar 3.a dan 4.a, dan konsentrasi unsur turun pada kopel difusi *co-current* (gradien konsentrasi searah) pada Gambar 3.b dan 4.b. Sebaliknya \tilde{D}_{Ru}^{eff} dan \tilde{D}_{Co}^{eff} konsisten menurun pada kedua kopel difusi dengan meningkatnya konsentrasi Re pada masing-masing sistem. Ini berarti bahwa gradien konsentrasi Re mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap \tilde{D}_{Ru}^{eff} dan \tilde{D}_{Co}^{eff} dibandingkan dengan pengaruh gradien konsentrasi masing-masing unsur (Ru, Co).



Gambar 4. Koefisien interdifusi efektif Re dan Co di dalam kopel difusi (a) Ni5Re/Ni15Co and (b) Ni/Ni5Re15Co setelah anil difusi pada 1250 °C selama 72 jam

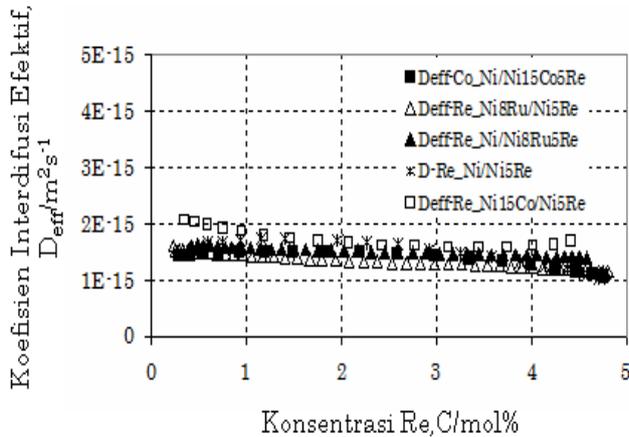
Gambar 5 menampilkan koefisien interdifusi efektif Re di dalam kopel difusi sistem ternier Ni-Re-Ru dan Ni-Re-Co. Koefisien interdifusi Re di dalam kopel difusi sistim biner Ni-Re juga ditampilkan untuk perbandingan. Dari gambar tersebut

dapat dilihat bahwa koefisien interdifusi efektif Re, \tilde{D}_{Re}^{eff} di dalam semua kopel difusi menurun dengan konsisten dengan meningkatnya konsentrasi Re. Dapat diamati bahwa tidak ada perbedaan \tilde{D}_{Re}^{eff} yang berarti antara kopel difusi *counter-current* dan kopel difusi *co-current* pada masing-masing sistem. Lebih jauh dapat diamati pula bahwa koefisien interdifusi Re di dalam sistem biner Ni-Re memiliki nilai yang relatif sama dengan koefisien interdifusi efektif \tilde{D}_{Re}^{eff} di kopel difusi sistem ternier. Dari sini dapat dikatakan bahwa kecepatan interdifusi efektif \tilde{D}_{Re}^{eff} relatif tidak dipengaruhi oleh masing-masing gradien konsentrasi Ru dan Co.

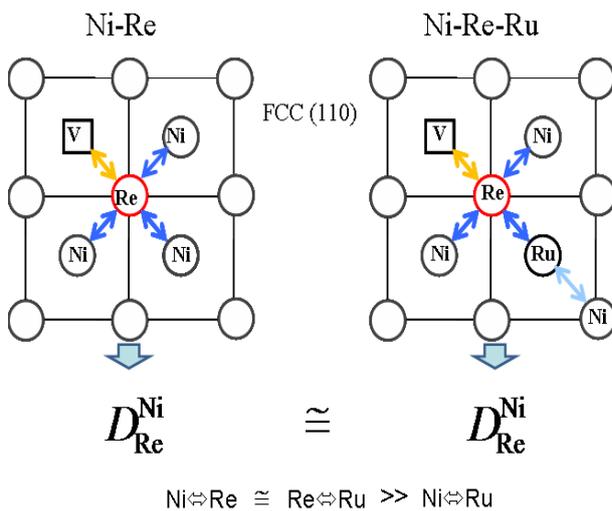
Perilaku interdifusi dalam penelitian ini dapat diilustrasikan dengan mekanisme difusi kekosongan kisi (*vacancy-assisted diffusion*) karena unsur-unsur yang terkait membentuk larutan padat di dalam nikel^[14]. Gambar 6 menampilkan secara skematik difusi atom sistem Ni-Re dan Ni-Re-Ru di dalam kristal FCC (110). Dari gambar tersebut dipahami bahwa difusi akan terjadi apabila ada perpindahan atom menuju kekosongan kisi di sebelahnya.

Dengan mempertimbangkan bahwa energi migrasi kekosongan kisi terkait juga dengan ikatan antar atom di sebelahnya, maka perilaku interdifusi unsur-unsur ini dapat merefleksikan secara kualitatif ikatan antar atom yang terkait. Hasil percobaan pada sistem Ni-Re-Ru menunjukkan bahwa kecepatan interdifusi efektif Ru dipengaruhi oleh gradien konsentrasi Re, sedangkan kecepatan interdifusi efektif Re relatif tidak berubah dengan adanya Ru di dalam paduan. Hasil ini merefleksikan secara kualitatif bahwa ikatan antar atom Ni-Re atau Ru-Re lebih besar dibandingkan ikatan antar atom Ru-Re, sedangkan ikatan antar atom Ni-Re relatif sebanding dengan ikatan antar atom Ru-Re. Hasil penelitian sebelumnya yang telah dilaporkan penulis^[9] mendukung hal ini yang menunjukkan adanya fenomena

difusi menanjak (*uphill diffusion*) sebagai akibat penurunan potensial kimia pada interaksi Ru-Re dan Co-Re di dalam paduan nikel, yang merefleksikan ikatan antar atom yang stabil secara termodinámika.



Gambar 5. Koefisien interdifusi efektif Re di dalam semua kopel difusi sistem terner Ni-Re-X (X=Ru, Co) dan biner Ni-Re



Gambar 6. Skematik difusi atom sistem Ni-Re dan Ni-Re-Ru di dalam kristal FCC (110)

Seperti diketahui bahwa keberadaan unsur refraktori (khususnya Re) di dalam superalloy nikel meningkatkan kapabilitas suhu tinggi secara signifikan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Re memiliki difusifitas yang sangat rendah yang merupakan faktor yang penting dalam peningkatan stabilitas struktur mikro

pada suhu tinggi. Akan tetapi jumlah unsur ini di dalam superalloy nikel dibatasi oleh adanya segregasi unsur ini pada konsentrasi yang tinggi yang mengakibatkan terjadinya pembentukan fasa TCP (*topologically close packed*) pada eksposur suhu tinggi^[17-18]. Fasa ini getas dan menurunkan kekuatan *creep* suhu tinggi. Dari studi ini dapat diketahui bahwa keberadaan Ru dan Co dapat meningkatkan kelarutan Re di dalam superalloy nikel karena ikatan antar atom Ru-Re dan Co-Re yang stabil secara termodinámika. Sehingga kombinasi unsur-unsur Re-Ru-Co menjadi penting dalam meningkatkan kapabilitas suhu tinggi superalloy berbasis nikel yang modern.

KESIMPULAN

Perilaku interdifusi unsur refraktori Re dengan unsur-unsur penting lain di dalam *superalloy* berbasis nikel telah ditelaah dengan mengases koefisien interdifusi efektif sebagai fungsi konsentrasi, \tilde{D}_i^{eff} di dalam paduan terner Ni-Re-X (X= Ru,Co). Beberapa kesimpulan dari penelaahan ini adalah:

1. Pada masing-masing sistem Ni-Re-X (X=Ru,Co) koefisien interdifusi efektif untuk Re, $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}}$, memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan koefisien interdifusi efektif unsur lainnya berdasarkan urutan $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}} < \tilde{D}_{\text{Ru}}^{\text{eff}} < \tilde{D}_{\text{Co}}^{\text{eff}}$.
2. Gradien konsentrasi Re mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap $\tilde{D}_{\text{Ru}}^{\text{eff}}, \tilde{D}_{\text{Co}}^{\text{eff}}$ dibandingkan dengan pengaruh gradien konsentrasi masing-masing unsur (Ru, Co).
3. Kecepatan interdifusi efektif $\tilde{D}_{\text{Re}}^{\text{eff}}$ relatif tidak dipengaruhi oleh gradien konsentrasi Ru dan Co pada masing-masing sistem.
4. Hasil asesmen interdifusi efektif merefleksikan secara kualitatif bahwa ikatan antar atom Ru-Re atau Co-Re

lebih besar dibandingkan ikatan antar atom Ni-Ru atau Ni-Co

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini didukung secara finansial oleh JSPS (Japan Society for The Promotion of Sciences). Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Y. Murata dan Prof. M. Morinaga dari Universitas Nagoya, Jepang atas bimbingannya dalam penelitian ini serta M. Hattori dan N. Goto atas bantuannya dalam percobaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Carron and T. Khan, *Aerosp. Technol.*, 3 : 513-523.
- [2] K. Matsugi, Y. Murata, M. Morinaga and N. Yukawa. 1992. *Superalloys*, TMS, Warrendale, PA, pp.307-316.
- [3] T. Hino, et al. 1998. *Materials for Adv. Power Eng.* Forschungszentrum Julich Publisher, Julich, pp. 1129.
- [4] R. Darolia, D. F. Lahrman and R. D. Field. 1998. *Superalloys*, TMS, Warrendale, PA pp. 255-264.
- [5] D. Blavette, P. Caron, T. Khan . 1986. *Scripta Metall.*, 20 : 1395-1400.
- [6] T. M. Pollock and A. S. Argon. 1992. *Acta Metall. Mater.*, 40: 1-30.
- [7] N. Matan, D. C. Cox, C. M. F. Rae and R. C. Reed. 1999. *Acta Mater.*, 47 : 2031.
- [8] C.L.Fu, R. Reed, A. Janotti and M. Kremar. 2004. *Superalloys*, TMS, Warrendale PA, pp.867-875.
- [9] E. Mabruri, Shingo Sakurai, Yoshinori Murata, Toshiyuki Koyama and Masahiko Morinaga. 2004. *Mater. Trans.*, 49 (4) pp.792 – 799.
- [10] E. Mabruri, S. Sakurai, Y. Murata, T. Koyama and M. Morinaga. 2008. *Mater. Trans.*, 49 (6) 1441-1445.
- [11] E. Mabruri, M. Hattori, K. Hasuike, T. Kunieda, Y. Murata, and M. Morinaga. 2006. *Mater. Trans.*, 47 (5) 1408-1411.
- [12] E. Mabruri, S. Sakurai, Y. Murata, T. Koyama and M. Morinaga. 2007. *Mater. Trans.*, 48 (10) 2718-2723.
- [13] M.A. Dayananda and D.A. Behnke. 1991. *Scripta Metall. et Mater.*, 2187-2191.
- [14] M. E. Glicksman. 2000. *Diff. in Sol.*, John Wiley and Son.
- [15] F. Sauer and V. Freise. 1962. *Z. Elektrochem.*, 66 : 353-363.
- [16] T. Ikeda, A. Almazouzi, H. Numakura, M. Koiwa, W. Sprengel, and H. Nakajima. 1998. *Acta Mater.*, 46 (15) 5369-5376.
- [17] C.M.F. Rae and R.C. Reed. 2001. *Acta Mater.*, 49 : 4113-4125.
- [18] A. C. Yeh and S. Tin. 2006. *Metall. Mater. Trans.*, 37A : 2621-2631.

RIWAYAT PENULIS

Efendi Mabruri, Lulus Sarjana Teknik Pertambangan ITB tahun 1995, Master Teknik Material ITB tahun 2002 dan Doctor of Engineering bidang Materials Science and Engineering Nagoya University, Jepang tahun 2008. Bekerja sebagai peneliti sejak tahun 1996 dan sekarang sebagai Kepala Bidang Konservasi Bahan di Pusat Penelitian Metalurgi LIPI.