

KINETIKA TRANSFORMASI FASA PEMANASAN TETAP PADA KASUS PENGGETASAN TEMPER BAJA STAINLESS ZERON-25 (SAF - 2507)

Reza Fadhila dan Azwar Manaf

Program Studi Ilmu Material, Program Pascasarjana
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Indonesia

Diterima : 2 September 2002

; Disetujui : 31 Oktober 2002

ABSTRAK

Telah dilakukan suatu studi tentang kinetika pembentukan fasa endapan karena perlakuan pemanasan tetap pada tiga temperatur berbeda masing-masing 800, 850 dan 900 °C terhadap baja stainless SAF 2507. Pengamatan mikrostruktur material baik dengan mikroskop optik maupun elektron menunjukkan bahwa perlakuan pemanasan tersebut menyebabkan terbentuknya fasa karbida pada batas butir antara fasa ferrite dan austenite menjadikan material tiga fasa. Diamati bahwa untuk ke tiga temperatur pemanasan jumlah fraksi volume fasa ferrite tidak berubah secara berarti dan dapat dianggap tetap. Hal ini berbeda dengan dua fasa lainnya yaitu fasa austenit menunjukkan penurunan dan fasa karbida menunjukkan peningkatan. Dengan demikian dipastikan bahwa fasa karbida terjadi hasil transformasi fasa austenit. Kinetika transformasi fasa dilakukan dengan menggunakan persamaan kinetik Avrami untuk membangun kurva transformasi fasa austenit menjadi karbida untuk ketiga temperatur pemanasan yang dipelajari. Besarnya fraksi volume fasa karbida yang terbentuk ditentukan dengan teknik XRD berkisar antara 6,0 % sampai dengan 20,0 % tergantung kepada waktu dan temperatur pemanasan. Data eksperimental fraksi volume transformasi pada tiga temperatur berbeda ini digunakan untuk menentukan parameter kinetika transformasi fasa antara lain konstanta orde reaksi (n) rata-rata sama dengan satu, nilai energi aktivasi (Q^*) sekitar 307 kJ/mol pada temperatur diatas 850°C dan 304 kJ/mol untuk temperatur dibawah 850°C. Berdasarkan nilai konstanta-konstanta ini dibangun kurva isembrittlement teoretik baja SAF 2507 yang lengkap.

THE KINETICS OF ISOTHERMAL PHASE TRANSFORMATION IN TEMPERED EMBRITTLEMENT STAINLESS STEEL ZERON-25 (SAF - 2507) : The kinetics study of phase transformation in stainless steel SAF 2507 heat-treated at 800, 850 and 900 °C have been done. Either observation of microstructure for treated materials by an optical or electron microscope confirmed the formation of carbide phase at grain boundaries between ferrite and austenite lead to three phase materials. It is further observed that for the three treated temperatures there were no significant change in volume fraction of ferrite phase found and thus it may be assumed constant. However, this was not the case for two other phases in which volume fraction of carbide phase show an increase and followed by a decrease in volume fraction of austenite phase. It is then concluded that the carbide transformed from austenite. The number of volume fraction of carbide phase determined by XRD methods were ranged from 6.0 % to 20.0 % depends on time and temperature of treatments. An Avrami equation for kinetic study of phase transformation were successively used for construction of phase transformation curves from which some kinetic parameters of phase transformation were successfully derived, among them the average constant rate reaction (n) equals to about one, the activation energy below 850°C is 304 and for 850°C above is 307 kJ/mol. With kinetics constants above, the complete IT diagram for isembrittlement of stainless steel SAF 2507 was successfully built theoretically.

Keywords : phase transformation, temper embrittlement, isothermal transformation, rate of reaction

I. PENDAHULUAN

Baja stainless zeron 25, SAF 2507 banyak digunakan oleh industri untuk penggunaan material pada tangki, bejana tekan, pipa dan bahkan konstruksi bangunan dan jembatan.

Keunggulan dari SAF 2507 adalah dapat bertahan terhadap penggetasan (*embrittlement*) pada temperatur tinggi dibanding baja duplex lainnya. Fakta lapangan menunjukkan bahwa baja duplex umumnya mengalami proses desensitasi di batas butir sebagai salah satu penyebab penggetasan

temper (Dieter, 1986). Penggetasan temper ini terjadi pada baja paduan yang dipanaskan ataupun didinginkan secara perlahan-lahan dalam rentang temperatur 400-600 °C dan selalu diikuti oleh penurunan sifat mekanik (*mechanical-properties*). Peristiwa ini tentunya akan menjadi penting pada penggunaan baja stainless pada temperatur tinggi seperti tabung pemanas, bejana uap, pipa gas dsb yang tidak dapat mengalami pendinginan cepat untuk mencegah terjadinya penggetasan pada selang temperatur tersebut. Terjadinya penggetasan temper dapat ditinjau dari pengukuran temperatur peralihan isothermalnya dan pengujian mikrostruktur dipandang dari kinetika transformasi fasa fasa yang terjadi.

Selama proses transformasi fasa terjadi banyak proses pada skala atom, misalnya pada pembentukan embrio, *nuclei*, difusi dan migrasi atom dari satu kisi ke kisi kristal lainnya (Jena, 1992). Pada dasarnya, model kinetika transformasi fasa pada temperatur tetap dapat diambil sebagai acuan untuk mempelajari proses transformasi/ pembentukan fasa baru dari fasa yang ada sebagai suatu fungsi dari waktu (Pati, 1971). Dalam banyak kasus ditemukan bahwa fraksi fasa transformasi yang terjadi mengikuti suatu kurva berbentuk S atau yang biasa dikenal sebagai kurva *sigmoidal*. Kurva sigmoidal ini merupakan ciri khas proses nukleasi dan pertumbuhan yang menandakan bahwa transformasi mengalami masa inkubasi, tahap percepatan dan tahap perlambatan; dimana kinetika proses mengikuti persamaan Avrami (Scott, 1983; Sun, 1996). Proses rekristalisasi ataupun reaksi pengendapan banyak ditemukan juga mengikuti pola yang sama pada berbagai temperatur dengan skala waktu yang berbeda (Ghosh, 1986). Berdasarkan kurva-surve sigmoidal yang menggambarkan transformasi fasa pada temperatur-temperatur tetap dapat diturunkan beberapa parameter kinetik transformasi.

Pada kertas kerja ini dibicarakan penentuan parameter kinetik transformasi fasa endapan dari fasa austenit karena efek pemanasan pada temperatur tetap baja SAF 2507. Berdasarkan parameter kinetik yang diperoleh kemudian dibuat suatu kurva transformasi fasa yang lengkap.

II. PROSEDUR EKSPERIMEN

Sampel-sampel pengujian diperoleh dengan cara memotong material SAF 2507 berbentuk batangan bulat berdiameter – 25,4 cm (1 inchi) dengan mesin potong presisi untuk mendapatkan sampel uji masing-masing memiliki ketebalan 2 cm. Potongan tersebut selanjutnya dibagi atas 4 bagian. Semua sampel uji menjalani perlakuan pemanasan pada temperatur 1100°C selama 1 jam dan dilanjutkan dengan pencelupan kedalam air agar tersensitasi. Setelah proses sensitasi, sampel menjalani proses pemanasan dalam dapur pemanas thermolyne 6000 yang

dapat diprogram. Temperatur pemanasan dipilih 800, 850 dan 900 °C dengan lama pemanasan divariasi dari 2 menit sampai dengan 60 menit agar diperoleh fraksi fasa transformasi berbeda. Untuk tujuan observasi mikrostruktur, semua sampel terlebih dahulu dibuatkan pegangan (*mounting*) dari campuran resin dan katalis yang menghasilkan sampel dalam pegangan padat dan keras. Permukaan sampel selanjutnya dihaluskan dengan kertas penghalus berukuran 250 sampai dengan 2000 mesh. Untuk mendapatkan permukaan yang bebas goresan maka proses penghalusan dilanjutkan dengan menggunakan pasta diamond ukuran 1 mikron dan diakhiri dengan polesan pasta alumina yang dimulai dari ukuran 0,3 mikron sampai dengan 0,05 mikron. Untuk melihat batas butir, sampel dietsa dengan menggunakan larutan etsa villela modifikasi yaitu campuran dari 20cc HCl, 10 cc asam nitrat, 1 gram asam picrat dan 50 ml air. Waktu etsa antara selang 10 sampai 15 detik. Pengambilan foto struktur-mikro sampel dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Zeiss dan perangkat lunak KS 300 ver 3.0. Untuk mendukung analisa terhadap struktur mikro, dilakukan analisa dengan menggunakan Scanning Electron Microscope, SEM JEOL JSM-5310 LV yang dilengkapi dengan penganalisa energi sinar x. Disamping pengamatan struktur mikro seperti tersebut diatas, juga dilakukan pengujian dengan X-ray Diffractometer (XRD) untuk tujuan identifikasi fasa dan penentuan fraksi fasa volume fasa material. Penentuan fraksi volume fasa yang ada dilakukan dengan bantuan program GSAS.

III. HASIL DAN DISKUSI

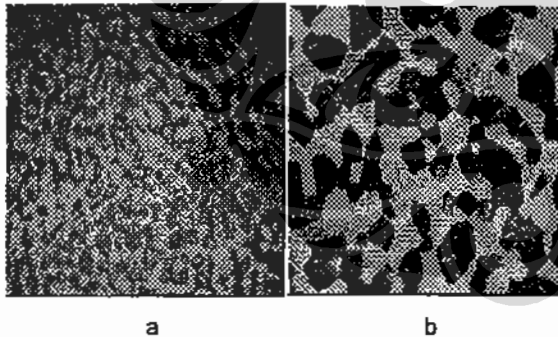
Hasil pengukuran komposisi kimia material SAF 2507 dilakukan dengan X-ray fluorescence, XRF ditunjukkan pada Tabel I :

Tabel I. Komposisi kimia SAF 2507

Elemen	Persentase Berat (% berat)
Fe	63-65
Cr	25-26
Mn	0.7-0.8
Mo	-
Ni	6-7
Si	0.5-1.7
C	-
N	-

Terlihat bahwa hampir seluruh logam penyusun dominan pada baja berhasil dideteksi, kecuali untuk logam-logam ringan seperti C, N dan Mo. Nilai fraksi kandungan masing-masing elemen tersebutpun hampir sangat bersesuaian dengan komposisi baja SAF 2507 yang diberikan oleh data sheet material yang diberikan yaitu : 62,5% Fe, 25% Cr, 1% Mn, 3,8% Mo, 7% Ni serta C 0,01%.

Komposisi material sebagaimana tertera pada Tabel 1 merupakan komposisi baja stainless pada umumnya yaitu memiliki unsur penyusun dominann Fe, Cr dan Ni. Dengan komposisi terukur tersebut maka dengan mengacu kepada diagram fasa sistem Fe-Cr-N, baja SAF 2507 ini benar masuk kategori baja anti karat dua fasa (baja duplex) dengan fasa-fasa stabil utama adalah fasa ferrit (α) dan fasa austenit (γ). Kedua fasa terlihat jelas pada hasil pengamatan dengan mikroskop optik (Gambar 1). Kedua fasa didalam material terdistribusi merata dengan orientasi acak. Secara visual fasa (α) pada Gambar 1a berwarna terang, sedangkan fasa (γ) berwarna gelap. Jumlah ferrite dan austenite yang hadir dalam kostituen terlihat pula hampir sebanding. Jadi dapat dikatakan bahwa material pada kondisi ini belum mengalami penggetasan (*embrittlement*), karena tidak terdapatnya bukti adanya fasa lain selain fasa ferrit (α) dan fasa austenit (γ). Tidak demikian halnya pada sampel setelah mengalami pemanasan pada temperatur 1100^o C selama selang waktu 60 menit (Gambar 1b).

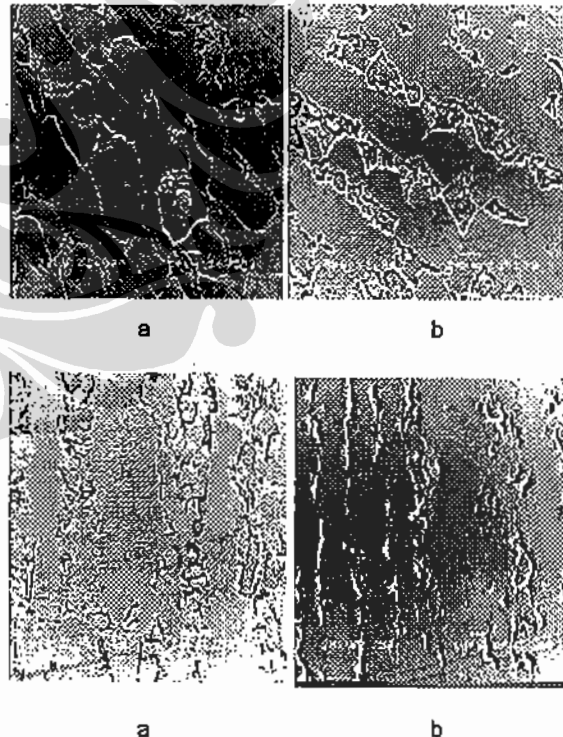


Gambar 1. Fotomikro material SAF 2507
a). Mikrostruktur awal, b). Mikrostruktur setelah pemanasan 1100^oC selama 1 jam dilanjutkan dengan pencelupan kedalam air

Berdasarkan mikrostruktur sebagaimana terlihat pada gambar 1b telah terjadi pemicuan sejumlah unsur pepadu fasa austenite secara merata dan berkumpul pada batas butir (*grain boundary*). Perilaku semacam ini telah banyak ditemukan pada baja dimana sebelum material mengalami pengendapan karbida pada batas butir maka terlebih dahulu mengalami segregasi unsur-unsur pepadu pada salah satu fasa yang ada (Thomas, 1990; Christian, 1990). Pada kondisi ini fraksi

volume fasa ferrit (α) dan fasa austenit (γ) untuk kasus baja SAF 2507 tetap tidak mengalami perubahan yaitu masih sebanding.

Pada Gambar 2 ditunjukkan contoh mikrostruktur yang berkembang terhadap sederetan sampel yang mengalami perlakuan panas pada beberapa temperatur pemanasan berbeda selama selang waktu yang bervariasi. Berbeda dengan dua contoh mikrostruktur sebelumnya, maka dalam kasus ini, fasa ke tiga hadir pada batas butir antara fasa ferrit dan fasa austenite. Terlihat pula jumlah fraksi volume fasa endapan berubah terhadap waktu dan temperatur temper. Disamping itu menarik pula untuk diperhatikan bahwa fasa endapan di dalam sampel memiliki tempat yang disenangi (*preferential sites*) dimana endapan tersebut cenderung lahir pada batas butir antara fasa ferrit (α) dan fasa austenit (γ). Tidak pada batas butir antara fasa (α) dan fasa (γ) atau juga antara fasa (γ) dan fasa (γ). Seperti diketahui bahwa batas butir merupakan daerah yang relatif tidak stabil dibanding daerah lainnya didalam material misalnya didalam butir sendiri karena pada batas butir ketaraturan atom-atom butir telah berkurang. Dengan perkataan lain, energi pada batas butir relatif lebih tinggi.



Gambar 2. Fotomikro material SAF 2507 menunjukkan evolusi fasa endapan setelah perlakuan pemanasan. a. 750^oC, 60 menit; b. 800^oC, 45 menit; c. 850^oC, 15 menit dan d. 900^oC, 45 menit

Jadi jelaslah bahwa adanya tempat yang disenangi untuk endapan yaitu batas butir antara fasa (α) dan fasa (γ) menunjukkan energi pada batas butir antara kedua fasa tersebut lebih tinggi dibandingkan energi masing-masing kedua batas butir lainnya. Kehadiran fasa ketiga juga berhasil diidentifikasi dengan XRD karena jumlahnya yang signifikan dan teridentifikasi sebagai karbida dengan jenis fasa $(Fe,Cr)_7C_3$.

Analisa GSAS telah digunakan terutama untuk penentuan fraksi volum fasa yang terdapat di dalam material. Untuk sampel-sampel hasil pemanasan dengan temperatur dan waktu pemanasan yang variatif didapat fraksi volum fasa-fasa seperti diringkas pada Tabel II berikut :

fraksi volume relatif austenite dan karbida seperti tercantum pada Tabel III. Tersedianya data transformasi fasa pada tiga temperatur tetap berbeda sebagai fungsi waktu transformasi memungkinkan penentuan konstanta K dan n persamaan Johnson-Mehl-Avrami (Sun N.X.; 1996) :

$$Y_T(t) = 1 - \exp[-K t^n] \quad (1)$$

$Y_T(t)$ adalah fraksi fasa transformasi pada temperatur tetap selama waktu, t ; K adalah konstanta laju transformasi dan n adalah konstanta.

Tabel II. Fraksi volume fasa hasil analisa GSAS

Proses Tempering (Temperatur dan waktu)	Fraksi volum fasa		
	Ferite	Austenite	Karbida
900°C selama 15 menit	71,65 %	22,04 %	6,31 %
900°C selama 30 menit	70,89 %	18,35 %	10,76 %
900°C selama 45 menit	70,21 %	15,51 %	14,28 %
900°C selama 60 menit	69,58 %	15,26 %	15,16 %
850°C selama 02 menit	74,52 %	25,48 %	-
850°C selama 05 menit	74,29 %	16,67 %	9,04 %
850°C selama 15 menit	74,01 %	13,61 %	12,38 %
850°C selama 20 menit	72,40 %	11,38 %	16,22 %
800°C selama 15 menit	72,63 %	27,37 %	-
800°C selama 30 menit	70,63 %	22,72 %	6,65 %
800°C selama 45 menit	69,43 %	20,29 %	10,28 %
800°C selama 60 menit	69,17 %	16,02 %	14,81 %

Bila diperhatikan seksama data fraksi volume fasa-fasa yang terdapat dalam sampel seperti pada Tabel II, dapat dikatakan meskipun secara tidak tegas, bahwa fraksi volume ferrit hampir tidak berubah pada nilai sekitar $\approx 70\%$. Tidak demi kian halnya dengan fraksi fasa austenite dan karbida. Fraksi volume fasa austenit di dalam sampel secara sistematis berkurang jumlahnya, disertai dengan peningkatan jumlah fraksi volume senyawa karbida sejalan dengan selang waktu pemanasan yang bertambah untuk setiap temperatur pemanasan. Jadi hasil ini menegaskan kembali bahwa pembentukan fasa karbida berasal dari fasa austenite dimana proses pemanasan (*tempering*) menyebabkan berlangsungnya transformasi fasa austenite menjadi karbida yang mengendap pada batas butir menjadikan material tiga fasa. Bila kedua fraksi fasa (austenit dan karbida) yang menjalani proses transformasi di dalam materi tiga fasa tersebut dinormalisir maka diperoleh

Hasil evaluasi persamaan 1 dengan menggunakan data yang tersedia dalam Table III ditunjukkan pada Tabel IV. Nilai n pada tiga temperatur tetap berbeda ternyata mendekati nilai 1 cukup sesuai untuk proses transformasi fasa yang terjadi pada daerah batas butir (Jena, 1992).

Nilai K bergantung pada temperatur proses transformasi. Untuk ketiga temperatur pemanasan, nilai K terbesar terjadi pada temperatur 850°C yaitu temperatur transformasi dengan laju tertinggi. Dengan demikian temperatur transisi kritis transformasi ada pada jangkau temperatur diantara 800 °C dan 900 °C. Dengan konstanta-konstanta kinetik K dan n pada ketiga temperatur berbeda tersebut memungkinkan ditentukannya beberapa parameter kinetik transformasi lainnya seperti energi aktivasi, Q dan konstanta laju transformasi tidak bergantung temperatur, K_0 .

Tabel III. Fraksi volume fasa austenite dan karbida

Proses Tempering (Temperatur dan waktu)	Fraksi volume (%)	
	Austenite	Karbida
900°C selama 15 menit	77,74	22,26
900°C selama 30 menit	63,04	36,96
900°C selama 45 menit	52,06	47,94
900°C selama 60 menit	50,16	49,84
850°C selama 2 menit	100	-
850°C selama 10 menit	64,84	35,16
850°C selama 15 menit	52,37	47,63
850°C selama 20 menit	41,23	58,77
800°C selama 15 menit	100	-
800°C selama 30 menit	77,36	22,64
800°C selama 45 menit	66,37	33,63
800°C selama 60 menit	51,96	48,04

Tabel IV. Nilai konstanta K dan n untuk berbagai temperatur dan waktu pemanasan

Temperatur dan waktu untuk nilai n konstan	Nilai K	Nilai n
800 C {1073 K}	16 . 10 ⁻⁵	1,39
850 C {1123 K}	73 . 10 ⁻⁵	1,04
900 C {1173 K}	24 . 10 ⁻⁵	0,87

Untuk nilai n rata-rata sama dengan 1, kedua besaran kinetik tsb terkait oleh persamaan (2).

$$K = K_0 \exp \{-Q/RT\} \quad (2)$$

dimana R adalah konstanta gas umum dan T adalah temperatur transformasi. Jadi, untuk tiga temperatur transformasi berbeda yaitu masing-masing 800 °C, 850 °C dan 900 °C persamaan 2 dalam skala logaritma dapat dinyatakan seperti persamaan 3, 4 dan 5 :

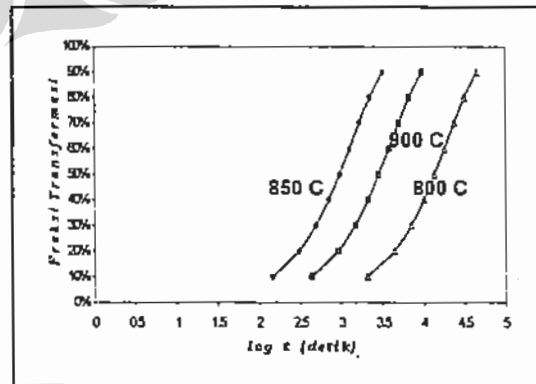
$$\ln K_0 + \{-Q / (8,314 \times 1073)\} \cong \ln 0,00016 \quad (3)$$

$$\ln K_0 + \{-Q / (8,314 \times 1123)\} \cong \ln 0,00073 \quad (4)$$

$$\ln K_0 + \{-Q / (8,314 \times 1173)\} \cong \ln 0,00024 \quad (5)$$

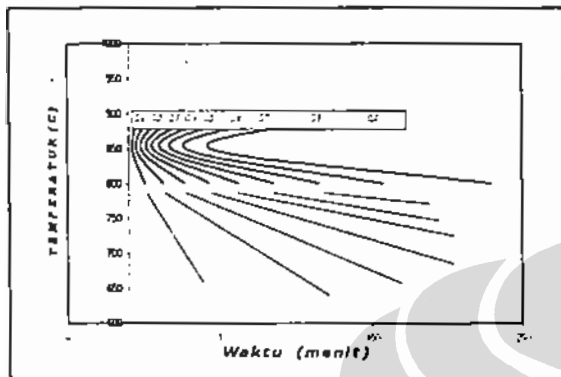
Ketiga persamaan konstanta laju transformasi tersebut menghasilkan nilai rata-rata untuk Q ~ 306 kJ.mol⁻¹ dan konstanta K₀ ~ 8,31x10⁹. Energi aktivasi sebesar 306 kJ.mol⁻¹ yang diperoleh dari percobaan ini mempertegas kembali hasil pengamatan mikrostruktur material dimana fasa karbida sebagai hasil transformasi fasa (γ) cenderung mengambil tempat pada batas butir antara fasa (α) dan fasa (γ) sebagaimana yang telah dibicarakan terdahulu karena berdasarkan pengukuran Ryan et al (Ryan N.D., 1995) besarnya energi aktivasi antara batas butir (γ) - (γ) adalah 164 - 184 kJ/mol dan batas butir antara fasa (α) - (α) 204 - 254 kJ/mol, yaitu lebih rendah dibandingkan energi aktivasi batas butir antara fasa (α) dan fasa (γ).

Pada Gambar 3 disajikan kurva transformasi pemanasan tetap untuk baja SAF 2507 menggambarkan fraksi fasa transformasi sebagai fungsi waktu untuk tiga temperatur pemanasan berbeda. Kurva transformasi tersebut dikonstruksi berdasarkan persamaan 1 dengan konstanta K dan n seperti tercantum dalam Tabel IV. Sebagaimana umumnya, kurva transformasi disini mengambil bentuk sigmoidal yang menunjukkan transformasi fasa berjalan dalam suatu rangkaian proses nukleasi fasa baru dan pertumbuhan yang dipercepat dan diperlambat. Meskipun dalam hal ini hanya ada tiga kurva transformasi yang tersedia dari data percobaan, namun bila diasumsikan tidak ada fasa lain yang muncul sebagai hasil transformasi fasa pada jangkau temperatur pemanasan yang lain kecuali fasa karbida sebagaimana yang terjadi pada tiga temperatur pemanasan berbeda tersebut maka secara teori dapat dibuat lebih banyak lagi kurva-kurva transformasi dalam jangkauan temperatur yang lebar. Dengan demikian, dari kurva-kurva transformasi fasa pada berbagai temperatur berbeda kemudian dapat dibangun diagram *isoembrittlement* untuk material yang dipelajari. Diagram teoritik ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Kurva S prediksi SAF 2507 ditemperatur 800°C, 850°C dan 900°C

Kurva *isoembrittlement* seperti pada Gambar 4 dapat memberikan informasi tentang waktu transformasi yang diperlukan untuk mendapatkan jumlah fraksi fasa hasil transformasi tertentu pada suatu temperatur transformasi tertentu. Diagram ini juga sangat berguna untuk memprediksi umur pakai baja SAF 2507 pada aplikasi temperatur tinggi seperti sebagai tabung pemanas.



Gambar 4 Prediksi Isoembrittlement SS SAF 2507

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan investigasi terhadap mikrostruktur material yang menjalani perlakuan pemanasan ini dapat disimpulkan bahwa baja SAF 2507 memiliki 3 fasa masing-masing fasa ferrite, austenite dan karbida $(Cr,Fe)_7C_3$ setelah proses pemanasan. Fasa karbida terbentuk hasil transformasi fasa austenit dan mengendap pada batas butir antara fasa ferrite dan austenite karena energi aktivasi transformasi pada batas butir ini relatif tinggi dibanding energi aktivasi pada batas butir fasa ferrite-ferrite dan austenite-austenite. Dari studi kinetika transformasi fasa terhadap material setelah pemanasan pada 3 temperatur pemanasan berbeda telah berhasil diperoleh beberapa parameter kinetika transformasi antara lain energi aktivasi transformasi fasa sebesar 306 kJ.mol^{-1} , konstanta laju transformasi $K_0 \sim 8,31 \times 10^8$ dan konstanta n rata-rata sama dengan satu. Melalui konstanta-konstanta kinetika transformasi berhasil dibangun kurva teoritik *isoembrittlement* untuk baja SAF 2507.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berhutang budi kepada Program Studi Ilmu Material, program Pascasarjana FMIPA-UI tempat dimana penulis mengecap pendidikan tinggi dan memberikan inspirasi untuk melaksanakan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Jurusan Fisika-UI atas pemakaian peralatan pengukuran dan pengujian. Tanpa itu semua, penelitian ini tidak dapat diselesaikan.

DAFTAR ACUAN

- Christian J.W., 1990, "Theory of Transformation in Metal Alloy", Pergamon Press
- Dieter E.G., 1986, "Mechanical Metallurgy", 3rd ed., Mc Graw Hill, New York.
- Ghosh G & V. Raghavan, 1986, *Mat., Sci. and Eng.*, 65
- Jena A.K., 1992, "Phase Transformation in Material", Prentice Hall, London.
- Pati S.R. & M. Cohen, 1971, *Metal.*, 19, 1327
- Ryan N.D., H.J. McQueen & J.J. Jonas, 1995, "The Deformation Behaviours of Types 30,316 Austenitic Stainless Steel During Hot Torsion", *Canadian Metallurgical Quarterly*
- Scott M.G., 1983, "Crystallization", in *Amorphous Metallic Alloys*, ed. F.E. Luborsky, Butterworth, London
- Sun N.X., X.D. Liu & K. Lu, 1996, *Scripta Materialia*, vol.34 no. 8
- Thomas H.C., 1990, "Mechanical Behaviour of Materials", McGraw Hill, New York.