

## PENGARUH RADIASI $\alpha$ TERHADAP KEKUATAN TARIK Fe-15Cr-20Ni PADA SUHU TINGGI

Budi Briyatmoko  
Pusat Elemen Bakar Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

PENGARUH RADIASI  $\alpha$  TERHADAP KEKUATAN TARIK Fe-15Cr-20Ni PADA SUHU TINGGI. Dengan menggunakan siklotron, telah dilakukan injeksi helium sampai 100 ppm pada dua spesimen baja austenit Fe-15Cr-20Ni yang telah mengalami perlakuan panas dan lainnya pengerjaan dingin. Kemudian dilakukan uji tarik pada suhu kamar untuk spesimen yang telah diinjeksi helium dan mengalami perlakuan panas pasca iradiasi. Demikian juga telah dilakukan uji tarik pada suhu tinggi untuk spesimen yang telah diiradiasi dan semua hasilnya dibandingkan dengan hasil yang diperoleh dari uji tarik dari spesimen kontrol yang tidak dikenakan radiasi. Telah ditunjukkan bahwa untuk spesimen yang telah mengalami iradiasi dan pengerjaan panas, kekuatan tarik dan pertambahan panjangnya menjadi berkurang dengan adanya kenaikan suhu. Tingkah-laku ini dapat diduga sebagai efek helium yang mengakibatkan terjadinya kegetasan bahan dan hal ini tidak dijumpai pada spesimen yang mengalami pengerjaan dingin.

### ABSTRACT

THE INFLUENCE OF  $\alpha$  RADIATION ON TENSILE STRENGTH OF Fe-15Cr-20Ni AT HIGH TEMPERATURE. With a cyclotron, helium implantation have been done to 100 ppm for two specimens of solution annealed and cold worked austenitic stainless steel Fe-15Cr-20Ni. Subsequently, tensile tests for Post Irradiation Annealed specimens at room temperature were conducted. Also, tensile tests for implanted specimens at high temperature were performed and all of the results were compare with the results from He-free control specimens. It was found that in implanted Solution Annealed specimen, tensile strength and elongation were decreased with increasing temperature. This phenomenon can be suggest as Helium embrittlement effect and it was not found in Cold Worked specimen.

### PENDAHULUAN

Baja austenit dipilih sebagai komponen inti pada reaktor cepat FBR (Fast Breeder Reactor) karena memiliki beberapa sifat unggulan diantaranya tahan terhadap korosi dan tahan suhu tinggi.[1]

Dalam hal pengaruh radiasi, baja austenit jenis SS 304 dengan komposisi Fe-18Cr-8Ni dan SS 316 dengan komposisi Fe-16Cr-10Ni masih kurang tahan terhadap swelling ( pembengkakan ) akibat radiasi.[2] Pengurangan swelling dapat ditempuh dengan menaikkan kandungan Ni.[3] Oleh karena itu perlu dipikirkan model paduan dari jenis baja austenit dengan kandungan Ni yang tinggi seperti Fe-15Cr-15Ni, Fe-15Cr-20Ni dan seterusnya.

Namun perlu dipikirkan pula adanya He yang dihasilkan dari reaksi antara Ni dan neutron cepat menurut reaksi ( $n_p, \alpha$ ) dan reaksi antara kandungan B dengan neutron thermal menurut reaksi ( $n_{th}, \alpha$ ). He yang dihasilkan tersebut akan mengakibatkan terjadinya embrittlement ( kegetasan ) pada logam.[2]

Dalam penelitian ini, telah dipilih paduan Fe-15Cr-20Ni untuk dipelajari kekuatannya pada suhu tinggi dan pengaruh radiasi  $\alpha$  terhadap perubahan kekuatan tariknya.

### PERCOBAAN

#### Komposisi bahan

Komposisi bahan Fe-15Cr-20Ni yang dipakai dalam penelitian ini tercantum dalam Tabel 1.

#### Spesimen

#### Bentuk dan ukuran spesimen

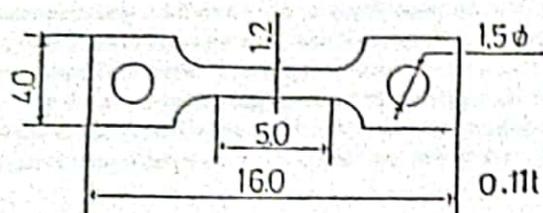
Spesimen yang dipakai untuk uji tarik berbentuk pelat tipis dengan ukuran panjang ( gauge length ) 5 mm, lebar 1,2 mm dan tebal 0,11 mm. Bentuk dari spesimen ditunjukkan dalam Gambar 1.

#### Jenis spesimen

Jenis spesimen yang dipakai ada dua macam yaitu spesimen S.A. (Solution Annealed), yaitu spesimen yang dikenakan perlakuan

Tabel 1. Komposisi bahan Fe-15Cr-20Ni  
(% berat)

Fe	Cr	Ni	C	Si	Mn
bal.	15,01	20,17	0,0061	≤0,005	≤0,001
P	S	Al	N	O	Co
0,0009	0,002	0,002	0,0017	0,0087	0,003
Cu					
≤0,001					



SPESIMEN

Gambar 1. Bentuk dan ukuran spesimen  
Fe-15Cr-20Ni (dalam mm)

panas dan spesimen C.W. (20% Cold Worked), yaitu spesimen yang dikenakan pengerjaan dingin sebesar 20%.

Spesimen S.A. diperoleh dari pelat dengan ketebalan 0,3 mm yang di- "roll" menjadi 0,11 mm pada suhu ruang. Pelat tipis 0,11 mm ini, kemudian dicetak dengan ukuran seperti tersebut diatas, dan akhirnya dikenakan pengerjaan panas. Pengerjaan panas dilakukan pada suhu 1293 K selama 2 menit dalam kondisi hampa, kemudian dilakukan pendinginan dengan udara. Ukuran butir yang diperoleh adalah 20  $\mu$ m.

Sedangkan spesimen C.W. diperoleh dengan cara menge- "roll" pelat 0,3 mm menjadi 0,14 mm pada suhu ruang. Pelat tipis 0,14 mm ini, kemudian dikenakan perlakuan panas dengan kondisi seperti yang dilakukan pada spesimen S.A., dan hasilnya di- "roll" lagi menjadi 0,11 mm pada suhu kamar, dan akhirnya pelat tipis 0,11 mm ini dicetak dengan ukuran sama dengan ukuran spesimen S.A.

#### Radiasi $\alpha$ (He)

Dengan menggunakan siklotron yang dilengkapi penurun tenaga jenis Rotating Degradar, partikel  $\alpha$  (He) yang mempunyai energi

36 MeV diinjeksikan ke dalam spesimen pada suhu ruang. Konsentrasi He yang diperoleh adalah 100 ppm (dicapai dalam 12 jam) dan rata-rata perpindahan setiap atom di dalam spesimen atau dpa (displacement per atom) adalah 0,04.

#### Perlakuan panas pasca iradiasi ( Post Irradiation Annealing)

Untuk melihat pengaruh radiasi lebih jauh lagi, maka perlu dilakukan perlakuan panas (annealing) pada spesimen pasca iradiasi. Annealing dilakukan dengan menggunakan tungku listrik pada suhu 623, 773 dan 923 K pada kondisi hampa selama 30 menit.

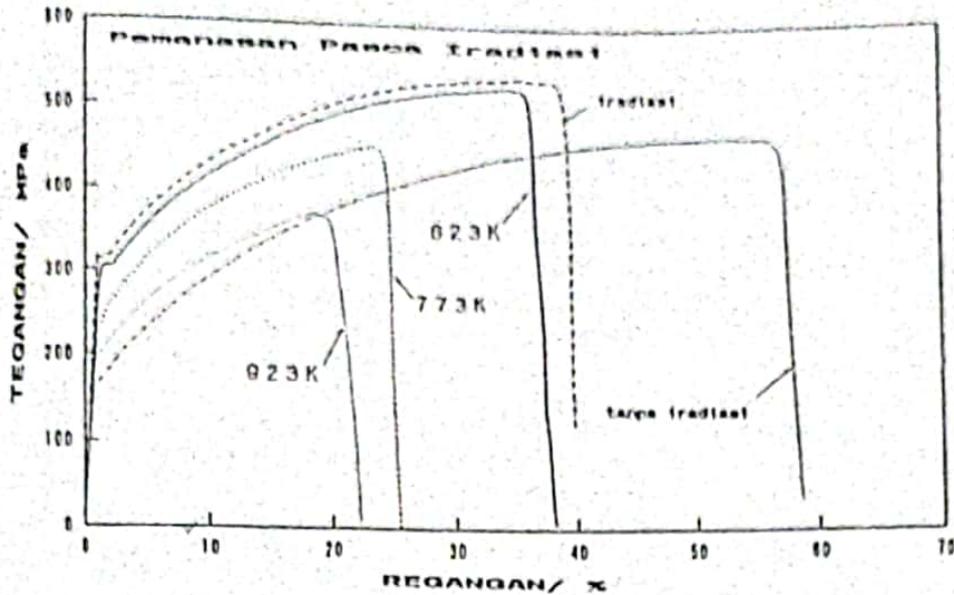
#### Uji tarik ( Tensile Test)

Uji tarik dilakukan dengan menggunakan mesin tipe Instron. Untuk spesimen yang telah diiradiasi, uji tarik dilakukan pada suhu 296, 623, 773 dan 923 K. Sedangkan untuk spesimen yang telah mengalami perlakuan panas setelah diiradiasi, uji tarik hanya dilakukan pada suhu kamar ( 296 K). Kemudian untuk spesimen kontrol, yaitu spesimen yang tanpa dikenakan radiasi, uji tarik dilakukan pada suhu 296, 623, 773 dan 923 K. Semua uji tarik dilakukan dalam kondisi hampa (  $4,0 \times 10^{-5}$  Torr ) dengan percepatan tarik (strain rate)  $3,33 \times 10^{-4}$  per detik.

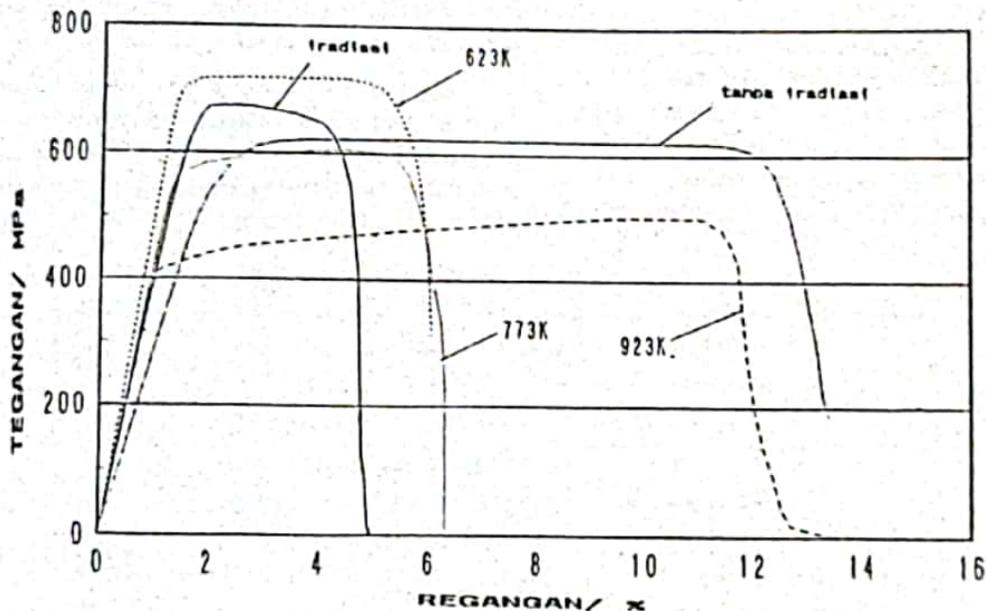
## HASIL PENELITIAN

#### Uji tarik pada suhu ruang.

Pada Grafik 1 dan 2 ditunjukkan adanya hubungan antara tegangan-regangan (stress-strain) sebagai fungsi suhu pemanasan pasca iradiasi (post irradiation annealing temperature) dari hasil uji tarik pada suhu ruang, masing- masing untuk spesimen S.A. dan C.W. Untuk perbandingan, spesimen yang belum dikenakan iradiasi (unirradiated specimen) juga ditampilkan. Untuk spesimen S.A., sebelum dikenakan iradiasi, ditunjukkan adanya pemanjangan (uniform elongation) sebesar 51,7%. Kemudian setelah dikenakan iradiasi, terjadi kenaikan nilai tegangan tarik (tensile stress) sedangkan pemanjangannya berkurang menjadi 33,9%. Suhu yang tertulis dalam grafik adalah suhu pemanasan pasca iradiasi. Makin tinggi suhu pemanasan, tegangannya ( $\sigma$ ) makin mendekati tegangan spesimen yang tidak diiradiasi (spesimen kontrol). Sedangkan nilai perpanjangannya ( $\epsilon$ ) makin jauh berkurang jika dibandingkan dengan perpanjangan spesimen tanpa iradiasi. Untuk spesimen C.W., makin tinggi suhu pemanasan, tegangannya makin berkurang sampai di bawah tegangan



Grafik 1. Hubungan antara tegangan- regangan sebagai fungsi suhu pemanasan pasca iradiasi untuk spesimen S.A.



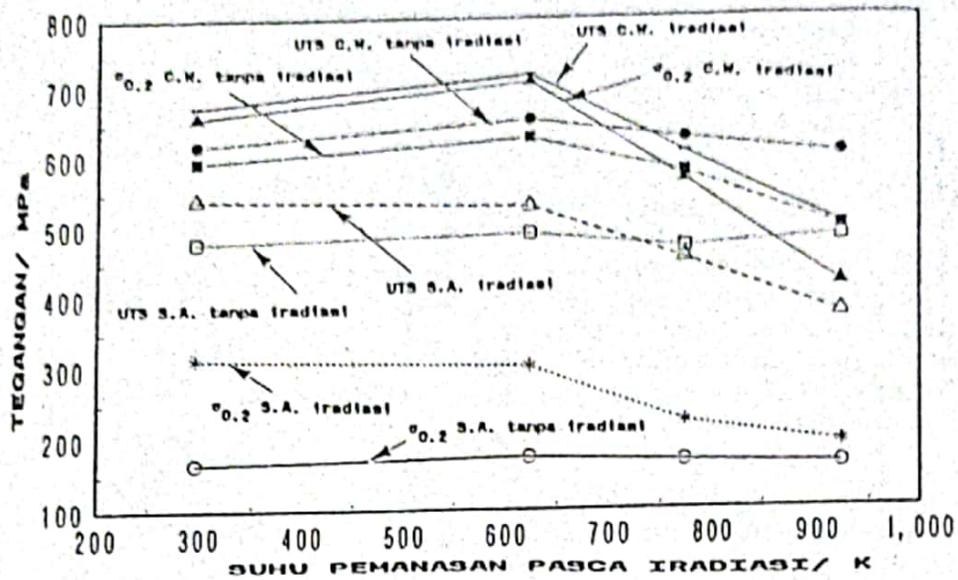
Grafik 2. Hubungan antara tegangan- regangan sebagai fungsi suhu pemanasan pasca iradiasi untuk spesimen C.W.

spesimen kontrol (unirradiated specimen). Sedangkan nilai perpanjangannya makin bertambah besar sesuai dengan kenaikan suhu.

Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada tegangan elastik (yield stress,  $\sigma_{0,2}$ ) dan tegangan tarik (ultimate tensile stress, UTS).

Seperti ditunjukkan pada Grafik 3, untuk spesimen S.A. sebelum diiradiasi (unirradiated

S.A.), nilai tegangan elastik ( $\sigma_{0,2}$ ) dan tegangan tarik (ultimate tensile stress, UTS) pada umumnya tidak tergantung suhu. Tetapi setelah dikenakan iradiasi (irradiated S.A.), nilai tegangan elastik dan tegangan tariknya makin berkurang sesuai dengan kenaikan suhu pemanasan pasca iradiasi. Sedangkan untuk spesimen C.W., sebelum dikenakan iradiasi (unirradiated C.W.), nilai

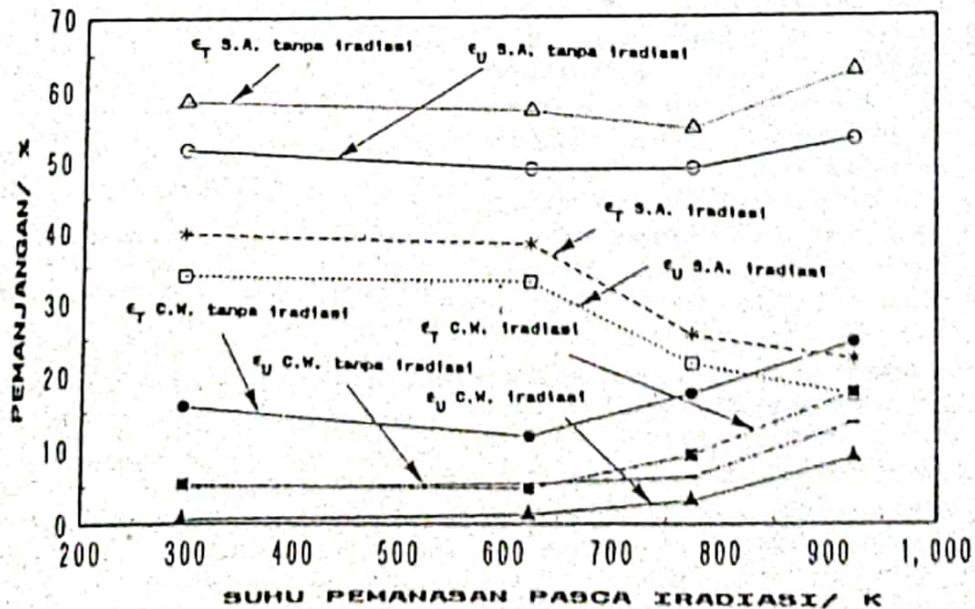


Grafik 3. Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada tegangan elastik ( $\sigma_{0,2}$ ) dan tegangan tarik (UTS) untuk spesimen S.A. dan C.W.

tegangan elastik dan tegangan tariknya berkurang sesuai dengan kenaikan suhu. Kemudian setelah dikenakan iradiasi (irradiated C.W.), nilai tersebut makin jauh berkurang sesuai dengan kenaikan suhu pemanasan pasca iradiasi. Tetapi nilai tegangan elastik dan tegangan tarik ini masih lebih tinggi dari nilai tersebut untuk spesimen S.A.

Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada nilai pemanjangan (elongation).

Dalam Grafik 4 ditunjukkan hubungan antara pemanjangan dan suhu pemanasan pasca iradiasi. Untuk spesimen S.A., sebelum diiradiasi, nilai pemanjangan yang merata (uniform elongation,  $\epsilon_U$ ) dan nilai pemanjangan keselu-



Grafik 4. Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada pemanjangan spesimen S.A. dan C.W.

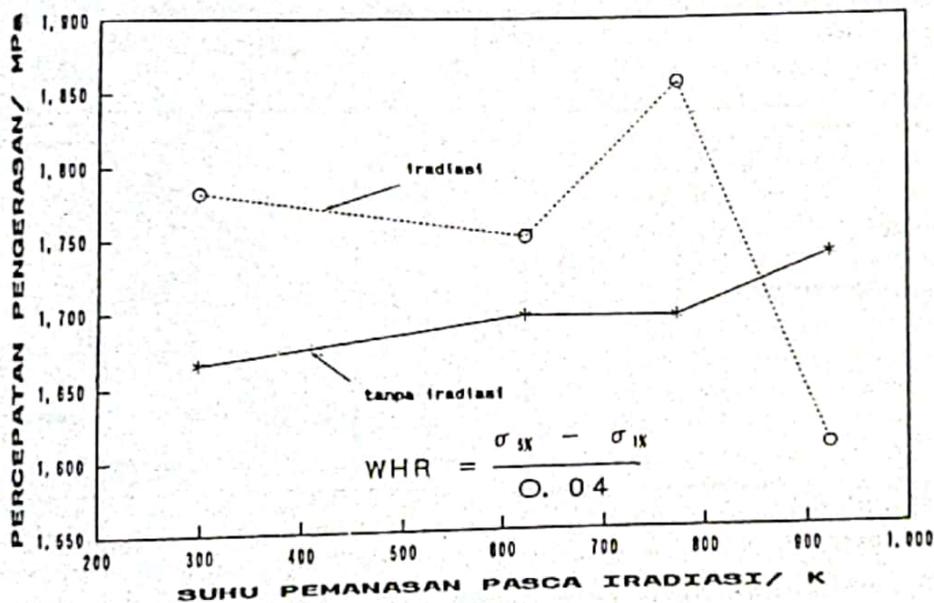
ruhan (total elongation,  $\epsilon_T$ ) pada umumnya tidak tergantung pada suhu pemanasan, tetapi setelah dikenakan iradiasi, nilai tersebut mengalami penurunan sesuai dengan kenaikan suhu. Sedangkan untuk spesimen C.W., dengan dikenakan radiasi, nilai pemanjangan yang merata dan nilai pemanjangan keseluruhan, keduanya mengalami penurunan. Kemudian setelah dikenakan pemanasan, baik untuk spesimen yang belum diiradiasi maupun yang sudah diiradiasi, nilai pemanjangan yang merata dan nilai pemanjangan keseluruhan, keduanya mengalami kenaikan. Kalau dibandingkan, nilai pemanjangan spesimen S.A. tetap lebih tinggi dari pada nilai tersebut untuk spesimen C.W..

*Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada work hardening rate (percepatan pengerasan).*

Dalam Grafik 5a dan 5b ditunjukkan hu-

*Uji tarik pada suhu tinggi.*

Dalam Grafik 6 diperoleh hubungan antara tegangan-regangan hasil uji tarik pada suhu tinggi untuk spesimen S.A. sebelum diiradiasi. Disini terlihat bahwa, makin tinggi suhu uji tarik maka nilai tegangan elastik dan tegangan tariknya dan juga nilai pemanjangannya makin berkurang, tetapi pada suhu 923 K nilai pemanjangannya bertambah besar. Untuk spesimen S.A. yang dikenakan iradiasi, hubungan tegangan-regangannya ditunjukkan dalam Grafik 7. Sebagai perbandingan, dalam grafik tersebut juga ditampilkan grafik untuk spesimen yang belum dikenakan iradiasi. Disini terlihat bahwa, makin tinggi suhu uji tarik nilai tegangan elastik dan tegangan tariknya dan juga nilai pemanjangannya mengalami penurunan jauh lebih kecil dari pada nilai tersebut untuk spesimen tanpa iradiasi.

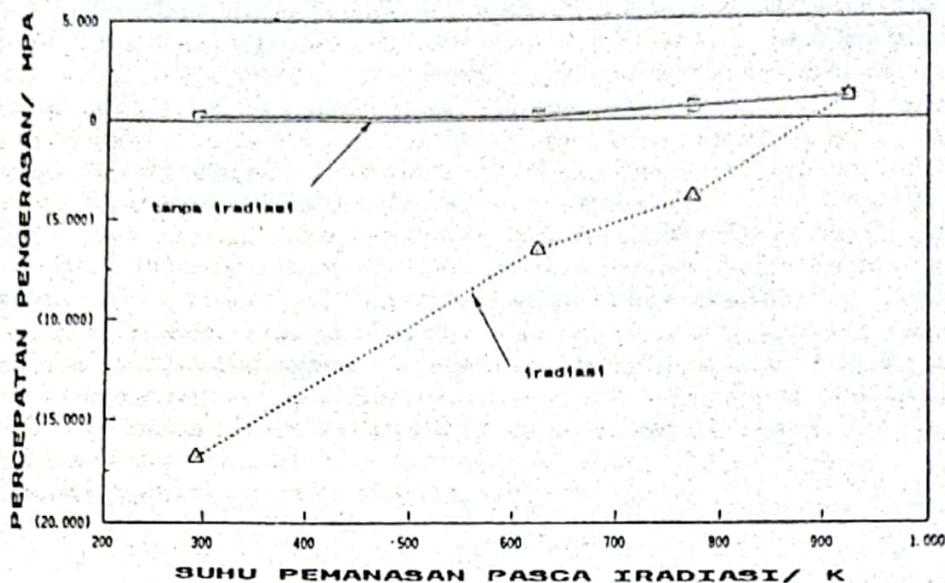


Grafik 5a. Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada percepatan pengerasan (work hardening rate) untuk spesimen S.A.

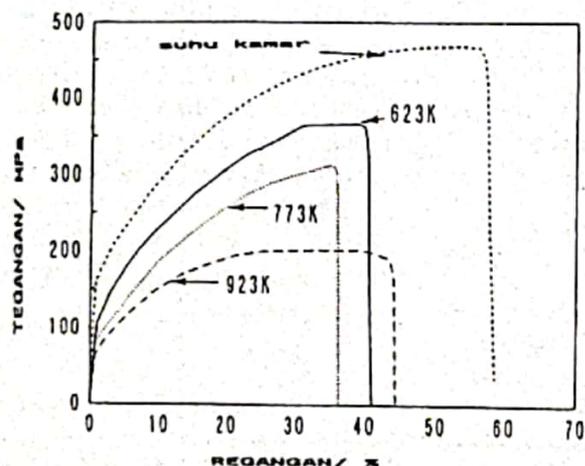
bungan antara percepatan pengerasan dan suhu pemanasan pasca iradiasi. Untuk spesimen S.A. (Grafik 5a), dengan dikenakan iradiasi, nilai percepatan pengerasannya menjadi tinggi, tetapi pada suhu 923 K nilai tersebut menjadi lebih kecil dari pada sebelum diiradiasi. Sedangkan untuk spesimen C.W. (Grafik 5b), dengan dikenakan iradiasi, nilainya menjadi lebih kecil dari pada saat sebelum dikenakan iradiasi, tetapi pada suhu 923 K nilainya sama dengan nilai pada spesimen tanpa iradiasi.

*Pengaruh suhu uji tarik pada tegangan elastis dan tegangan tarik.*

Dalam Grafik 8 diperoleh hubungan antara suhu uji tarik dengan tegangan elastik ( $\sigma_{0,2}$ ) dan tegangan tarik (UTS) untuk spesimen S.A.. Di sini terlihat bahwa makin tinggi suhu, nilai tegangan elastik untuk spesimen yang telah diiradiasi ( $\sigma_{0,2}$  iradiasi), makin mendekati nilai tegangan elastik untuk spesimen kontrol tanpa iradiasi ( $\sigma_{0,2}$  tanpa iradiasi). Sedangkan untuk



Grafik 5b. Pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada percepatan pengerasan untuk spesimen C.W.

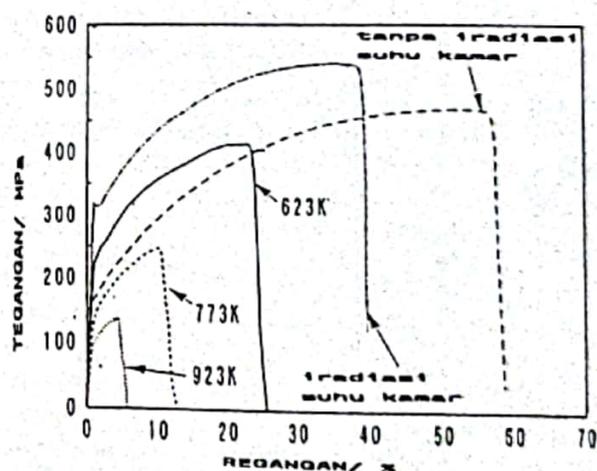


Grafik 6. Hubungan tegangan-regangan sebagai fungsi suhu uji tarik untuk spesimen S.A. sebelum diiradiasi.

tegangan tariknya (UTS), pada suhu 773 K nilainya lebih rendah dari spesimen kontrol.

Pengaruh suhu uji tarik pada pemanjangan yang merata (uniform elongation,  $\epsilon_u$ ) dan pemanjangan secara keseluruhan (total elongation,  $\epsilon_T$ ).

Dalam Grafik 9 diperoleh hubungan antara suhu uji tarik dengan pemanjangan dari spesimen S.A.. Di sini terlihat bahwa pemanjangan untuk spesimen yang dikenakan iradiasi nilainya lebih kecil dari pada nilai untuk spesimen

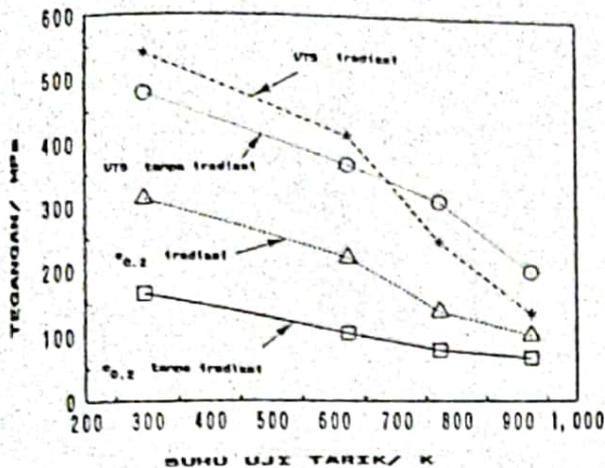


Grafik 7. Hubungan tegangan-regangan sebagai fungsi suhu uji tarik untuk spesimen S.A. setelah diiradiasi.

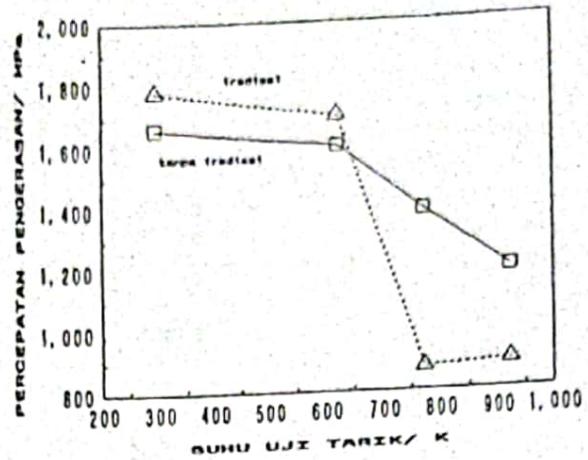
kontrol tanpa iradiasi. Kondisi ini tidak berubah meskipun dengan menaikkan suhu uji tarik.

Pengaruh suhu uji tarik pada percepatan pengerasan.

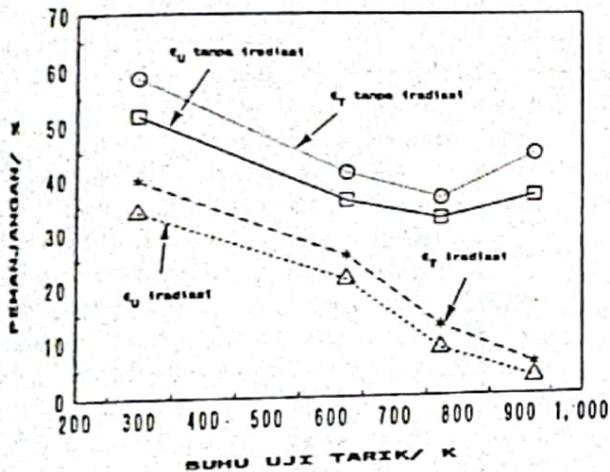
Dalam Grafik 10 diperoleh hubungan antara suhu uji tarik dan percepatan pengerasan dari spesimen S.A.. Dengan bertambahnya suhu maka percepatan pengerasan dari spesimen yang telah dikenakan iradiasi dan spesimen kontrol, keduanya mengalami penurunan. Pada suhu sekitar 700 K, nilai tersebut untuk



Grafik 8. Pengaruh suhu uji tarik pada tegangan elastik ( $\sigma_{0.2}$ ) dan tegangan tarik (UTS) untuk spesimen S.A.



Grafik 10. Pengaruh suhu uji tarik pada percepatan pengerasan (work hardening rate) untuk spesimen S.A.



Grafik 9. Pengaruh suhu uji tarik pada pemanjangan yang merata (uniform elongation,  $\epsilon_U$ ) dan pemanjangan secara keseluruhan (total elongation,  $\epsilon_T$ ) untuk spesimen S.A. yang telah diiradiasi maupun yang belum diiradiasi

spesimen yang telah dikenakan iradiasi mengalami penurunan drastis.

## PEMBAHASAN

### Pengaruh radiasi pada karakteristik uji tarik.

Seperti telah diketahui bahwa cacat yang ditimbulkan akibat radiasi dapat mengeraskan bahan (hardening). [4] Begitu pula dalam penelitian ini, untuk spesimen yang telah dikenakan iradiasi, kekuatan tariknya menjadi bertambah. Untuk spesimen S.A., dengan dikenakan uji tarik pada suhu kamar, tegangan

elastisnya naik menjadi 312.9 MPa (Tabel 2). Sedangkan sebelum dikenakan iradiasi, nilai tersebut hanya 165.4 MPa. Jadi mengalami kenaikan 89%. Untuk spesimen C.W., kenaikan tersebut hanya sebesar 11%, yaitu menjadi 658.2 MPa dari 593.8 MPa. Kalau dibandingkan secara keseluruhan, sebelum diiradiasi maupun setelah diiradiasi, nilai tegangan elastik untuk spesimen C.W. lebih tinggi dari pada spesimen S.A. Demikian juga untuk nilai tegangan tariknya. Hal ini dikarenakan pada spesimen C.W., karena telah mengalami pengerjaan dingin maka terjadi *strain hardening* (pengerasan karena regangan), dan ini menyebabkan terjadinya kenaikan nilai tegangan elastis dan tegangan tariknya. [5] Tetapi akibatnya, nilai perpanjangannya menjadi lebih rendah, hal ini terlihat dalam Tabel 2. Dalam hal ini terlihat bahwa pengaruh radiasi pada spesimen C.W. lebih kecil dari pada spesimen S.A., karena dislokasi yang dihasilkan oleh pengerjaan dingin dapat bersifat sebagai pencegah Bergeraknya cacat yang dihasilkan dari radiasi, (defect trapping). [6]

### Pengaruh pemanasan pasca iradiasi pada karakteristik uji tarik.

Pengaruh pemanasan pasca iradiasi pada spesimen S.A. dan spesimen C.W. menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu makin tinggi suhu pemanasan maka nilai tegangan elastik dan tegangan tariknya menjadi berkurang. Untuk spesimen S.A., pada suhu 623 K, nilai tegangan elastiknya masih sama dengan nilai tersebut pada waktu belum dipanaskan (as irradiated), yaitu sekitar 301 MPa (grafik 3). Dengan menaikkan suhu pemanasan pasca

Tabel 2. Data hasil uji tarik

Suhu perla- kuan panas (K)	Tegangan elastik (MPa)				Tegangan tarik (MPa)				Pertambahan panjang yang merata (%)*				Pertambahan panjang keseluruhan (%)				Percepatan pengerasan (MPa)			
	tanpa iradiasi		iradiasi		tanpa iradiasi		iradiasi		tanpa iradiasi		iradiasi		tanpa iradiasi		iradiasi		tanpa iradiasi		iradiasi	
	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W	S.A	C.W
269	165,4	593,8	312,9	658,2	478,8	618,1	540,0	674,0	51,7	5,3	33,9	0,6	15,8	39,7	4,9	1665,3	207,0	1781,4	-16821,0	
623	173,9	626,1	301,2	707,2	490,0	652,6	525,9	717,7	48,8	4,7	32,8	1,2	57,0	38,1	5,4	1695,0	175,0	1750,2	-6541,0	
773	168,0	577,9	223,4	566,9	470,2	625,6	464,4	605,9	48,9	9,2	21,6	3,1	54,4	25,6	6,3	1694,8	605,0	1855,2	-3880,0	
923	162,3	498,1	191,3	416,8	484,7	602,2	373,5	501,6	53,0	17,7	17,4	8,9	62,2	24,5	13,5	1736,3	1070,0	1605,6	1077,5	

iradiasi, nilai tersebut menjadi berkurang, dan pada suhu 923 K, tegangan elastiknya hampir sama dengan nilai tersebut untuk keadaan sebelum diiradiasi. Hal ini dapat diduga bahwa pada suhu 923 K, sebagian cacat yang dihasilkan pada waktu iradiasi telah menghilang karena panas (annealed out). Hal ini terlihat pada pemeriksaan mikro, bahwa densitas cacat berkurang dari  $3,2 \times 10^7/\text{cm}$  menjadi  $2,0 \times 10^6/\text{cm}$  [7]. Kemudian untuk pengaruh suhu pemanasan pada perpanjangan dari spesimen S.A., seperti ditunjukkan pada Grafik 4, dengan bertambahnya suhu pemanasan pasca iradiasi, maka nilainya menjadi berkurang. Pada suhu 923 K, nilai dari pemanjangan yang merata hanya sekitar 17%. Karakteristik ini hampir sama dengan yang dijumpai pada baja austenit SS316 yang diiradiasi dengan menggunakan siklotron pada suhu 1023 K dengan konsentrasi 7,5 ppm. [8] Untuk spesimen C.W., pada suhu pemanasan pasca iradiasi 623 K, nilai dari tegangan elastis dan tegangan tariknya kalau dibandingkan dengan nilai tersebut pada waktu belum dipanaskan, mengalami sedikit kenaikan. Kemudian dengan bertambahnya suhu pemanasan pasca iradiasi, nilai tersebut menjadi berkurang, dan pada suhu 923 K, nilai tersebut di bawah nilai dari spesimen C.W. sebelum diiradiasi, tetapi masih jauh di atas nilai dari spesimen S.A. sebelum diiradiasi. Seperti terlihat dalam Grafik 3, berkurangnya nilai tegangan elastis dan tegangan tarik dari spesimen C.W. lebih besar dari pada yang dijumpai pada spesimen S.A.. Hal ini dapat diduga bahwa selain beberapa cacat yang dihasilkan iradiasi hilang karena pemanasan, juga dimungkinkan ada beberapa dislokasi yang dihasilkan dari pengerjaan dingin telah hilang (recovered). Sedangkan pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada perpanjangan dari spesimen C.W., dalam Grafik 4 ditunjukkan bahwa dengan bertambahnya suhu maka nilai perpanjangannya bertambah. Pada suhu 923 K, nilai tersebut hampir sama dengan nilai pada spesimen S.A.. Dalam hal ini, pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada perpanjangan dari spesimen S.A. dan spesimen C.W. adalah berlawanan. Berkurangnya pemanjangan pada spesimen S.A. dengan adanya pertambahan suhu pemanasan pasca iradiasi, dapat disebabkan karena bergesernya partikel helium ke batas butir, sehingga menyebabkan terjadinya kegetasan. Sedangkan pada spesimen C.W., dengan naiknya suhu pemanasan pasca iradiasi, nilai pemanjangan tetap bertambah meskipun masih jauh

dibawah nilai dari spesimen S.A. yang belum dikenakan iradiasi.

Sifat lain yang dipengaruhi oleh suhu pemanasan pasca iradiasi adalah percepatan pengerasan (work hardening rate). Percepatan pengerasan disini dihitung berdasarkan pada perbedaan antara nilai tegangan (stress) pada regangan (strain) 1% dan 5% dibagi 0.04 dengan unit MPa. Dalam grafik 5a, untuk spesimen S.A., dengan dikenakan iradiasi maka nilai dari percepatan pengerasannya menjadi lebih tinggi dari pada nilai tersebut untuk keadaan sebelum diiradiasi. Hal ini karena cacat yang dihasilkan selama iradiasi dapat menghambat jalannya dislokasi selama dikenakan uji tarik (irradiation hardening). Kemudian dengan dikenakan pemanasan pasca iradiasi, beberapa cacat tersebut menghilang karena panas (annealed out), sehingga nilai dari percepatan pengerasannya menurun. Dalam Grafik 5b, (untuk spesimen C.W.), dengan dikenakan iradiasi, diperoleh nilai percepatan pengerasan yang lebih kecil dari pada nilai tersebut pada waktu sebelum diiradiasi. Hal ini disebabkan karena pada spesimen C.W. yang telah mengalami pengerjaan dingin kemudian dikenakan iradiasi, maka spesimen ini benar-benar mengalami pengerasan (pengerasan ganda), sehingga dalam grafik tegangan-regangan grafiknya pendek dan lebih pendek dari batasan 1% dan 5% untuk perhitungan nilai percepatan pengerasan. Berbeda dengan spesimen S.A., dengan bertambahnya suhu pemanasan pasca iradiasi, maka nilai percepatan pengerasan dari spesimen C.W. mengalami kenaikan.

#### *Pengaruh suhu uji tarik pada karakteristik bahan.*

Untuk spesimen S.A. yang telah dikenakan iradiasi dan dilakukan uji tarik pada suhu 773 K dan 923 K, seperti yang terlihat dalam Grafik 9, terlihat adanya penurunan nilai perpanjangan yang cukup drastis. Hal ini diduga karena terjadinya kegetasan yang diakibatkan oleh helium. Seperti yang dijumpai pada pengaruh suhu pemanasan pasca iradiasi pada nilai tegangan dan regangan, nilai tersebut untuk spesimen S.A. yang telah mengalami iradiasi dan dikenakan uji tarik pada suhu tinggi, nilai tegangannya kembali ke keadaan sebelum diiradiasi, tetapi hal ini tidak dijumpai pada nilai perpanjangannya. Hal ini semakin menguatkan dugaan adanya kegetasan yang disebabkan oleh helium. Karena dengan adanya suhu tinggi maka helium yang ada di matrik berpindah ke batas butir. Hal ini juga terjadi pada stainless

steel yang di radiasi dengan neutron pada suhu 923 K. [9] Untuk spesimen C.W., kejadian seperti tersebut di atas tidak terjadi karena berpindahannya helium dari matrik ke batas butir dihalangi oleh dislokasi yang dihasilkan dari pengerjaan dingin.

#### KESIMPULAN

Dari percobaan di atas diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan mesin uji tarik jenis Instron yang dilengkapi dengan sistem vakum dan sistem pemanas suhu tinggi, material S.A. yang dikenakan pemanasan pasca

iradiasi menunjukkan bahwa dengan makin tinggi suhu, tegangan tariknya cenderung kembali ke keadaan sebelum diiradiasi, tetapi hal ini tidak terjadi pada nilai perpanjangannya. Sifat-sifat tersebut akan makin nampak pada uji tarik yang dilakukan pada suhu tinggi. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh pengaruh helium.

2. Untuk material C.W., pengaruh helium dapat dikurangi karena helium yang bergerak ke batas butir dapat dicegah oleh adanya dislokasi.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Ursu, I., Physics and Technology of Nuclear Materials (1985) 151-154.
2. Olander, D.R., Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements (1976) 418.
3. Bates J.F., and R.W. Powell, Journal of Nuclear Materials 162 (1981) 200.
4. Olander, D.R., Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements (1976) 430.
5. Jastrzebski, Z.D., The Nature and Properties of Engineering Materials (1987) 222.
6. Shino, H., Shiraishi, H., Watanabe, R., Kamitubo, H., Kohno, I., and Shikata, T., Journal of Nuclear Materials 97 (1987) 291.
7. Briyatmoko, B., Pengaruh radiasi pada perubahan struktur mikro dari Fe-15Cr-20Ni, akan diterbitkan.
8. Furuta, T., and Kawasaki, S., Journal of Nuclear Materials 50 (1974) 275.
9. Olander, D.R., Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements (1976) 454.

#### DISKUSI

**Djoko Wasisto:**

1. Apakah semua logam yang terkena radiasi akan mengalami pembengkakan ?
2. Bagaimana jika bukan SS-316 yang digunakan, melainkan 316-L atau 317 ?

**Budi Briyatmoko :**

1. Secara ringkas tidak, tetapi dengan adanya beberapa tambahan unsur, misalnya Ni bisa terjadi, tetapi sifatnya relatif.
2. Pertanyaan kurang jelas. Dalam penelitian ini digunakan model paduan baja SS-316 yang komposisinya telah diubah, yaitu Fe-<sup>15</sup>Cr-<sup>20</sup>Ni.

**Ilias Ginting :**

1. Mengapa digunakan radiasi  $\alpha$  dalam percobaan ini ?
2. Dalam makalah ini tidak terlihat pembuktian adanya dislokasi, apakah dilakukan penelitiannya untuk ini ?
3. Apakah tidak diteliti pengaruh *radiation damage* ?

**Budi Briyatmoko :**

1. Dalam percobaan ini digunakan radiasi  $\alpha$  karena penelitian ini sifatnya simulasi dengan neutron. Bila menggunakan neutron perlu waktu yang lama.
2. Pembuktian adanya dislokasi sudah kami lakukan dengan TEM, tetapi presentasi ini dibatasi, tidak mengentengahkan perihal mikrostrukturnya.

3. Tujuan penelitian yang dilakukan ini justru untuk melihat seberapa jauh pengaruh *radiation damage* pada model baja ini.

**Faizal Riza :**

1. Mohon informasi perbedaan komposisi maupun struktur antara SS-304 dan SS-316.
2. Apakah pernah dicoba mengenai keausan atau penyusutan SS-304, SS-316 bila dibenturkan terus menerus ?

**Budi Briyatmoko :**

1. Komposisi SS-304 pada garis besarnya adalah : Fe-18Cr-8Ni, sedangkan SS-316 adalah : Fe-16Cr-10Ni. Mengenai strukturnya secara mikroskopis tidak bisa ditayangkan disini. Tetapi struktur kristalnya adalah kubik berpusat di badan (BCC) dan kubik berpusat di sisi (FCC).
2. Untuk Pengujian keausan kebetulan saya tidak melakukannya. Sifat penyusutan dua jenis baja ini sudah banyak diterbitkan.

**Djoko Wasisto :**

Mengapa NaClO<sub>3</sub> lebih efektif dari pada MnO<sub>2</sub> dalam proses *recovery* ini ?

**Budi Briyatmoko :**

Pada kondisi yang sama, prosentase pemulihan (*recovery*) yang bisa dihasilkan NaClO<sub>3</sub> lebih besar dari pada MnO<sub>2</sub>. Pada rasio kebutuhan NaClO<sub>3</sub> : MnO<sub>2</sub> = 1 : 5 (hasil percobaan) dan mengacu pada harga NaClO<sub>3</sub> dan MnO<sub>2</sub>, ternyata NaClO<sub>3</sub> lebih murah.