

PENGARUH FOSFOR TERHADAP KUAT TANGGUH BAJA FERITIK SEBAGAI MATERIAL BEJANA TEKAN REAKTOR NUKLIR

Sri Nitiswati, Piping Supriatna, Sumijanto, Alim Mardhi dan Anni Rahmat

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN
Gedung 80 PUSPIPTEK Serpong, 15310
e-mail:nitis99@yahoo.com

ABSTRAK

PENGARUH FOSFOR TERHADAP KUAT TANGGUH BAJA FERITIK SEBAGAI MATERIAL BEJANA TEKAN REAKTOR NUKLIR. Unsur fosfor (P) didalam baja feritik yang digunakan sebagai material bejana tekan reaktor nuklir harus dibatasi karena dalam jumlah tertentu, unsur P dapat mengakibatkan pengetasan batas butir sehingga kuat tangguhannya menurun, yang berarti pula keandalan dan integritas bejana tekan juga menurun. Perlu dilakukan suatu penelitian tentang pengaruh P terhadap kuat tangguh baja feritik, dengan mengoptimasi kandungan fosfornya. Tujuannya adalah mendapatkan kandungan P optimal yang berpengaruh terhadap kuat tangguh baja feritik. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan serangkaian pengujian mekanik terhadap baja feritik yang mengandung 6 (enam) variasi kandungan unsur P. Pengujian mekanik meliputi impak *charpy v-notch* dengan jumlah benda uji masing-masing 3 buah untuk setiap varian dan setiap temperatur uji, pengukuran kekerasan dengan jumlah benda uji masing-masing 1 buah untuk setiap varian, uji tarik dengan jumlah benda uji masing-masing 3 buah untuk setiap varian, dan analisis bidang patahan serta melakukan evaluasi terpadu terhadap hasil-hasil pengujian. Berdasarkan hasil penelitian dan analisis disimpulkan bahwa baja feritik dengan kandungan unsur P optimal 0,0132% berat mempunyai kuat tangguh/ketangguhan patah yang sifatnya rapuh pada temperatur -32°C .

Kata kunci : kuat tangguh, baja feritik, bejana tekan nuklir.

ABSTRACT

EFFECT OF PHOSPHORUS ON FRACTURE TOUGHNESS OF FERRITIC STEEL AS NUCLEAR REACTOR PRESSURE VESSEL MATERIAL. Phosphorus (P) content in ferritic steel utilized as nuclear reactor pressure vessel material must be limited, because amount of certain P can caused intergranular embrittlement therefore decrease in toughness, it means reactor pressure vessel integrity and reliability also decrease. Research on effect of P on fracture toughness of ferritic steel needs to be performed through optimized of P content. Objective of the research is to obtain optimal P content that influence on fracture toughness of ferritic steel. The method was used through a series of mechanical testing to ferritic steel that contained 6 (six) P as variables. Mechanical testing covered *charpy v-notch* impact with amount of specimen was 3 pieces for each test temperature and variant, hardness measurement with amount of specimen was 1 piece for each variant, tensile test with amount of specimen was 3 pieces for each variant, analysis of fracture facet and evaluation of all test results. As conclusion that ferritic steel with optimal P content of 0.0132 % (weight) has brittle fracture toughness in -32°C .

Keyword : fracture toughness, ferritic steel, nuclear pressure vessel.

PENDAHULUAN

Roadmap sektor industri energi nuklir yang terdapat didalam Buku Putih yang dikeluarkan oleh Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia menjelaskan bahwa salah satu program jangka menengah (tahun 2011-2015) adalah litbang keselamatan PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir)^[1]. BATAN sebagai satu-satunya institusi litbang nuklir sekaligus diharapkan menjadi *Technical Support Organization* (TSO) harus berperan untuk ambil bagian dalam program tersebut. Salah satu caranya dengan melakukan penelitian dan

pengembangan yang mendukung *roadmap* tersebut, yaitu keselamatan PLTN dari sudut pandang materialnya. Bejana tekan adalah salah satu komponen utama PLTN dan satu-satunya komponen yang tidak mempunyai *back-up*, sehingga keandalan dan integritasnya harus benar-benar terjaga sepanjang umur reaktor. Baja feritik adalah jenis baja karbon rendah yang digunakan sebagai material bejana tekan reaktor nuklir jenis PWR. Sebagai material bejana tekan maka harus memenuhi beberapa persyaratan, salah satunya adalah jumlah kandungan unsur fosfor (P) harus dibatasi. Hal ini disebabkan karena pada jumlah tertentu unsur P dapat

menyebabkan penggetasan material sehingga kuat tanggunya menurun. Jika kuat tanggunya menurun, maka keandalan dan integritas bejana tekan sebagai tempat berlangsungnya reaksi pembelahan menurun sehingga dapat mengancam keselamatan operasi PLTN^[2]. Di negara-negara yang sudah mengoperasikan PLTN seperti Amerika, Jepang dan Korea, penelitian terkait pengaruh unsur-unsur perangsang seperti P, Ni (nikel), Cu (*copper*) dan S (*sulfur*) didalam baja feritik masih terus dilakukan dan dikaji khususnya untuk pengembangan material-material baru. Hal ini dapat dibuktikan dengan penggunaan SA302 Grade B sebagai material bejana tekan PLTN pada dekade tahun 70 an, telah bergeser dan diganti dengan SA533 Grade B pada dekade tahun 80 an, dan pada dekade tahun 90 an menggunakan SA508 Grade B kelas 1 dan saat ini yang banyak digunakan adalah SA508 Grade B kelas 2^[3]. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh penulis adalah meneliti pengaruh P, Ni dan Cu terhadap sifat mekanik baja feritik, sedangkan optimasi terkait kandungan unsur P belum dilakukan oleh penulis^[4]. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu penelitian tentang keandalan kuat tangguh baja feritik, dengan mengoptimasi kandungan fosfornya. Tujuannya adalah mendapatkan kandungan P optimal yang berpengaruh terhadap kuat tangguh baja feritik. Metode yang digunakan adalah dengan melakukan serangkaian pengujian

mekanik terhadap baja feritik yang mengandung 6 (enam) variasi kandungan unsur P dalam rentang 0,007% sampai dengan 0,03% (% berat). Dilanjutkan dengan analisis bidang patahan serta melakukan evaluasi terpadu terhadap hasil-hasil pengujian dan optimasi untuk mengetahui sejauhmana P berpengaruh terhadap keandalan dan kuat tangguh baja feritik. Pengujian mekanik meliputi impak *charpy v-notch*, pengukuran kekerasan dan pengujian tarik. Diharapkan hasil penelitian dapat digunakan sebagai acuan persyaratan kandungan fosfor optimal dalam baja feritik sebagai material bejana tekan PLTN jenis PWR.

TATA KERJA

Material :

Pada penelitian ini digunakan baja feritik hasil produksi industri dalam negeri dengan 6 variasi kandungan P, dinotasikan sebagai varian A sampai dengan varian F. Komposisi kimia baja feritik ditunjukkan pada Tabel 1. Yang dimaksud lain-lain adalah impuritas. Baja feritik dibuat dengan cara "*investment casting*" (*lost wax*). Selanjutnya dilakukan pengerolan dan rekristalisasi pada temperatur 950⁰C selama 1 jam dan kemudian dianil (*annealing*) pada temperatur 600⁰C selama 2 jam. Terakhir dilakukan pendinginan dalam tungku.

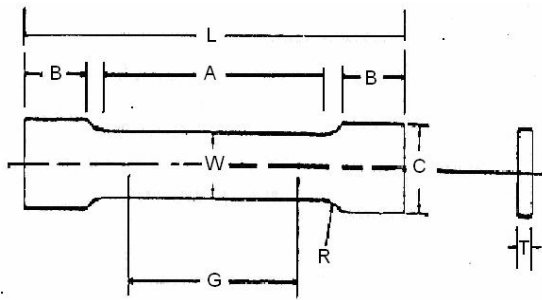
Tabel 1. Komposisi Kimia Baja Feritik (% berat) ^[5]

Varian	P	Cu	Ni	C	S	Mo	Fe	Lain-lain
A	0,0075	0,151	0,347	0,1713	0,0036	0,510	97,5	Sisanya
B	0,0132	0,222	0,593	0,2102	0,0038	0,498	97,1	Sisanya
C	0,0168	0,256	0,581	0,1961	0,0048	0,502	97,1	Sisanya
D	0,0195	0,311	0,601	0,1965	0,0052	0,508	97,0	Sisanya
E	0,0232	0,379	0,627	0,2098	0,0055	0,500	97,0	Sisanya
F	0,0267	0,384	0,590	0,2187	0,0038	0,522	96,9	Sisanya

Benda uji :

Benda uji tarik dibuat berdasarkan standar ASTM E8M, benda uji impak *charpy v-notch* berdasarkan standar ASTM E23 dan benda uji untuk pengukuran kekerasan berdasarkan standar ASTM E92. Jumlah benda uji tarik masing-masing 3 buah untuk setiap varian, benda uji impak *charpy v-notch* jumlahnya masing-masing 3 buah untuk setiap varian dan setiap temperatur uji dan benda uji untuk pengukuran kekerasan masing-masing 1 buah untuk setiap varian. Gambar benda uji tarik, benda uji impak *charpy*

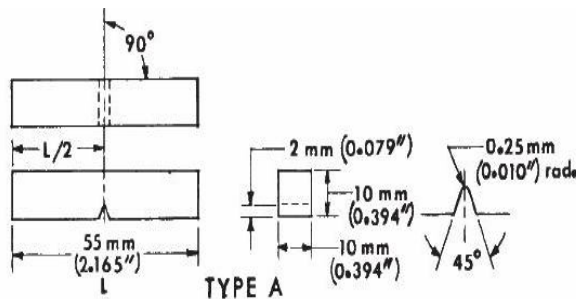
v-notch dan benda uji kekerasan berturut-turut ditunjukkan pada Gambar 1 sampai dengan Gambar 3.



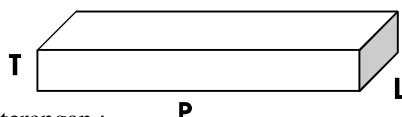
Keterangan :

- G = Panjang gage ($25,0 \pm 0,1\text{mm}$)
- W = Lebar ($6,0 \pm 0,1\text{mm}$)
- T = Tebal (6 mm)
- R = Jari-jari fillet (6 mm)
- L = Panjang total (100 mm)
- A = Panjang bagian reduce (32 mm)
- B = Panjang bagian grip (30 mm)
- C = Lebar bagian grip (10 mm)

Gambar 1. Benda uji tarik (subsize specimen)^[6]



Gambar 2. Benda uji impak charpy v-notch^[6]



Keterangan :

- P = Panjang (25 mm)
- L = Lebar (10 mm)
- T = Tebal (5 mm)

Gambar 3. Benda uji kekerasan^[6]

Prosedur :

Pengujian tarik, impak *charpy v-notch* dan pengukuran kekerasan dilakukan di laboratorium uji mekanik-Bidang Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir, PTRKN-BATAN.

Pengujian tarik dilakukan pada temperatur ruang untuk ke enam varian (varian A s.d. varian F) dengan tujuan untuk memperoleh kuat luluh (Y_s), *ultimate tensile strength* (UTS) dan kuat tarik pada saat material putus (σ). Setiap pengujian dilakukan dengan kecepatan *cross head* konstan 2 mm/menit dan beban maksimum 10kN. Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali untuk setiap varian.

Pengujian impak *charpy v-notch* dilakukan pada temperatur -150°C , -100°C , -50°C , temperatur ruang, temperatur 50°C , 100°C dan 150°C untuk ke enam varian dengan tujuan untuk memperoleh temperatur transisi dari ulet ke rapuh (*ductile to brittle transition temperature*). Pengujian pada suhu minus (dibawah 0°C) dilakukan dengan menambahkan nitrogen cair ke dalam kontainer tempat mengkondisikan benda uji. Pengujian dilakukan masing-masing 3 kali untuk setiap varian dan setiap temperatur uji.

Pengukuran kekerasan dilakukan pada temperatur ruang untuk ke enam varian dengan tujuan untuk memperoleh kekerasan material. Pengukuran dilakukan sebanyak 5 titik untuk setiap varian. Data hasil uji mekanik meliputi uji tarik yang direpresentasikan dengan kuat luluh (Y_s), *ultimate tensile strength* (UTS) dan kuat tarik (σ), uji impak *charpy v-notch* yang direpresentasikan dengan temperatur transisi serta kekerasan material di tunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Hasil Pengujian Baja Feritik

Varian	Y_s (MPa)	UTS (MPa)	σ (MPa)	Temperatur Transisi ($^\circ\text{C}$)	Kekerasan Rata-Rata (Hv)
A	136,442	526,723	332,005	9	212,8
B	167,181	543,110	395,557	- 32	183,4
C	223,316	656,845	430,254	- 2	196,9
D	448,782	496,644	350,315	- 9	179,2
E	169,938	603,793	412,952	7	197,9
F	230,465	490,376	302,907	- 30	181,1

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian tarik :

Secara umum kuat luluh (Y_s), *ultimate tensile strength* (UTS) dan kuat tarik (σ_s) baja feritik akan meningkat sebanding dengan kandungan P nya. Dalam hal ini varian A sampai dengan varian D masih konsisten dengan kandungan P nya, yaitu kandungan P semakin tinggi kuat luluh (Y_s), *ultimate tensile strength* (UTS) dan kuat tarik (σ_s) varian A sampai dengan varian D meningkat. Kandungan Ni (nikel) yang signifikan didalam varian E dan F telah menurunkan kuat luluh (Y_s) material.

Kekerasan Material :

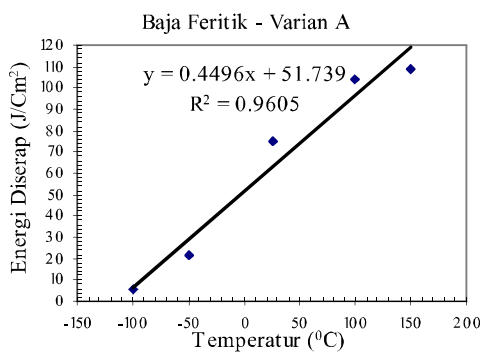
Kekerasan material sangat dipengaruhi oleh kandungan unsur-unsur perangsang didalam baja feritik, diantaranya unsur P dan Ni. Kekerasan material meningkat sebanding dengan kandungan P. Hal ini tidak dikehendaki karena semakin tinggi kandungan P tingkat kegetasannya akan semakin tinggi pula. Penambahan Ni kedalam varian A sampai dengan varian F akan menurunkan kekerasan material. Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa kekerasan material menurun dengan kenaikan unsur Ni. Hal ini konsisten dengan sifatnya bahwa Ni adalah unsur pelembut Ni^[7,8].

Temperatur transisi :

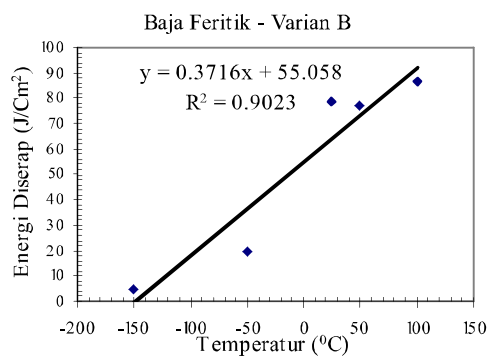
Yang dimaksud dengan temperatur transisi dari ulet ke rapuh adalah temperatur yang berhubungan dengan setengah dari energi maksimum (*upper self energy*) dan energi

minimum (*lower self energy*) yang diserap benda uji untuk patah terhadap temperatur uji (linier)^[2]. Untuk mendapatkan energi maksimum dan minimum yang diserap, maka pengujian impak *charpy v-notch* dilakukan pada variasi temperatur dari -150°C, -100°C, -50°C, temperatur ruang, temperatur 50°C, 100°C dan 150°C.

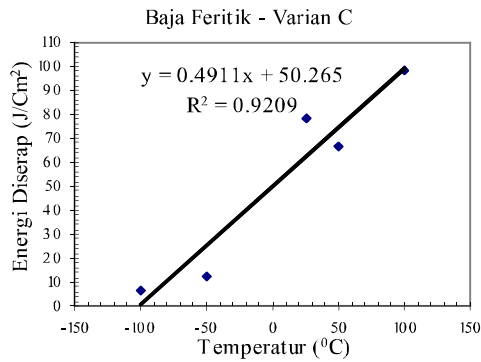
Temperatur transisi ini merupakan representasi kuat tangguh/ketangguhan patah (*fracture toughness*) material pada kondisi patah rapuh (*brittle fracture*) Temperatur transisi telah ditentukan dan dievaluasi untuk ke enam varian. Untuk baja feritik varian A, energi maksimum yang diserap yaitu 109 J/Cm² dicapai pada suhu +150°C dan energi minimum yang diserap dicapai pada suhu -100°C. Baja feritik varian B, D dan F energi maksimum yang diserap berturut-turut yaitu 86,5 J/Cm², 97 J/Cm² dan 89,7 J/Cm² dicapai pada suhu +100°C dan energi minimum yang diserap dicapai pada suhu -150°C. Baja feritik varian C dan E, energi maksimum yang diserap berturut-turut yaitu 98,5 J/Cm² dan 90,5 J/Cm² dicapai pada suhu +100°C dan energi minimum yang diserap dicapai pada suhu -100°C. Kurva hasil pengujian impak *charpy v-notch* baja feritik varian A sampai dengan varian F (energi diserap vs. temperatur) yang dilakukan pada berbagai variasi temperatur dari -150°C sampai dengan suhu +150°C untuk menentukan temperatur transisi ditampilkan berturut-turut dari Gambar 4a. sampai dengan Gambar 4f.



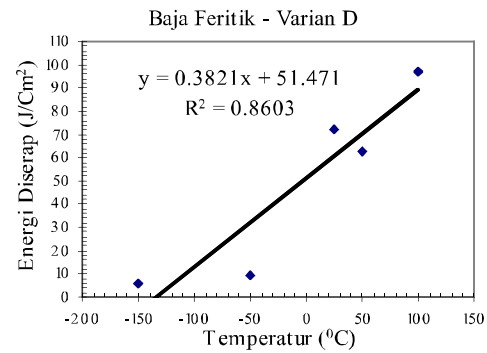
Gambar 4a. Kurva energi diserap (J/Cm²) vs. Temperatur (°C), varian A



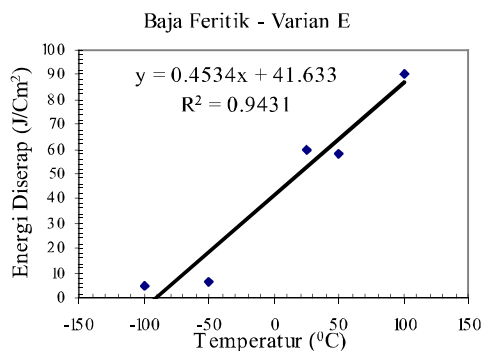
Gambar 4b. Kurva energi diserap (J/Cm²) vs. Temperatur (°C), varian B



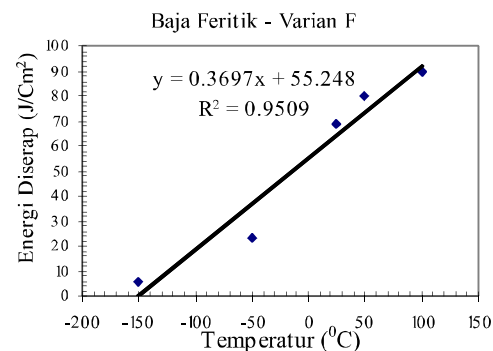
Gambar 4c. Kurva energi diserap (J/Cm²) vs. Temperatur (°C), varian C



Gambar 4d. Kurva energi diserap (J/Cm²) vs. Temperatur (°C), varian D



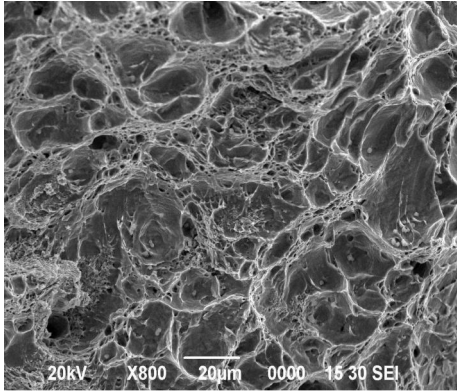
Gambar 4e. Kurva energi diserap (J/Cm²) vs. Temperatur (°C), varian E



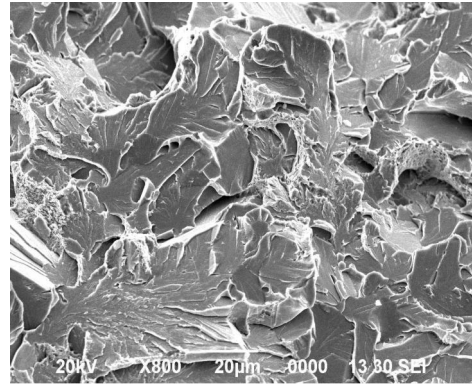
Gambar 4f. Kurva energi diserap (J/Cm²) vs. Temperatur (°C), varian F

Dari Gambar 4a, diketahui bahwa setengah dari energi maksimum yang diserap adalah 54,5 J/Cm², sehingga dapat ditentukan temperatur transisi varian A adalah 9°C. Ini artinya varian A mempunyai kuat tangguh/ketangguhan patah yang sifatnya rapuh pada temperatur 9°C. Dengan cara yang sama dapat ditentukan pula temperatur transisi dari ulet ke rapuh masing-masing untuk varian B, C, D, E dan varian F seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 4b, sampai dengan Gambar 4f. Dari Tabel 2 dapat dievaluasi bahwa kandungan P terendah adalah varian A mempunyai temperatur transisi 9°C. Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti lainnya menyebutkan bahwa temperatur transisi dari ulet ke rapuh naik bila kandungan P juga naik^[9]. Pada Tabel 2 ditunjukkan bahwa temperatur transisi varian B, C, D, E dan F turun dibawah temperatur transisi varian A meskipun kandungan P nya lebih tinggi dibanding dengan kandungan P didalam varian A. Hal ini disebabkan kandungan Cu dan Ni didalam varian

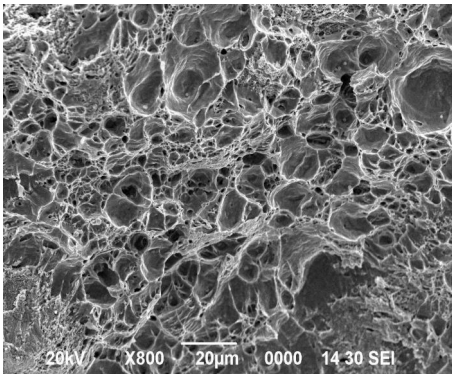
B sampai dengan varian F lebih tinggi dari pada varian A. Penambahan kandungan Cu dan Ni menurunkan temperatur transisi, hal ini berarti bahwa penambahan Cu dan Ni mencegah segregasi P pada batas butir atau dengan kata lain varian B sampai dengan varian F mempunyai kuat tangguh (ketangguhan patah) yang lebih baik dibanding dengan varian A karena temperatur transisinya dibawah temperatur transisi varian A. Temperatur transisi varian C, D dan E lebih tinggi atau naik diatas temperatur transisi varian B. Hal ini disebabkan selain kandungan P nya lebih tinggi juga kandungan sulfur (S) varian C, D dan E lebih tinggi dari pada varian B. Hal ini konsisten bahwa penambahan S akan menaikkan temperatur transisi^[9]. Gambar 5a, sampai dengan Gambar 10b, adalah mikroskopi bidang patahan (*fracture facet*) hasil uji impak *charpy v-notch* yang diuji pada temperatur -50°C dan temperatur ruang, untuk semua baja feritik dari varian A sampai dengan varian F.



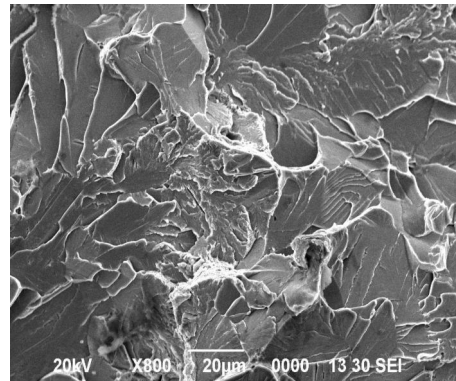
Gambar 5a. Mikroskopi bidang patahan varian A, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur ruang – *dimple* (perbesaran 800x)



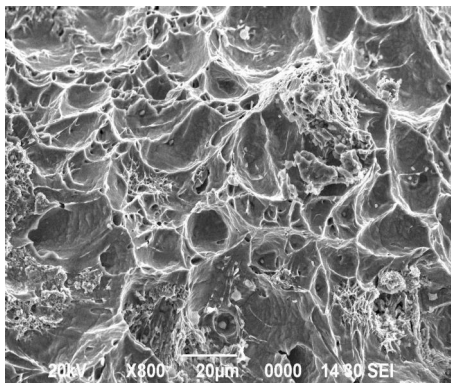
Gambar 5b. Mikroskopi bidang patahan varian A, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur -50°C – *intergranular fracture* (IGF) (perbesaran 800x)



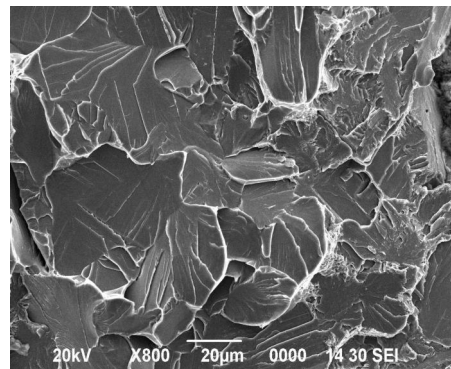
Gambar 6a. Mikroskopi bidang patahan varian B hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur ruang – *dimple* (perbesaran 800x)



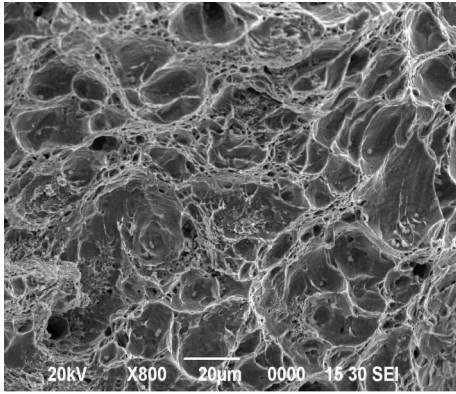
Gambar 6b. Mikroskopi bidang patahan varian B, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur -50°C – *intergranular fracture* (IGF) (perbesaran 800x)



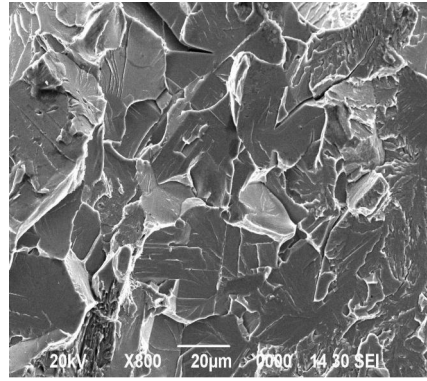
Gambar 7a. Mikroskopi bidang patahan varian C, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur ruang – *dimple* (perbesaran 800x)



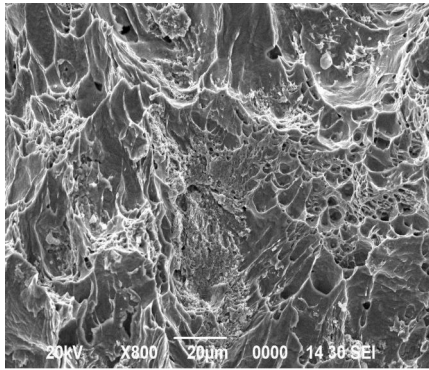
Gambar 7b. Mikroskopi bidang patahan varian C, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur -50°C – *intergranular fracture* (IGF) (perbesaran 800x)



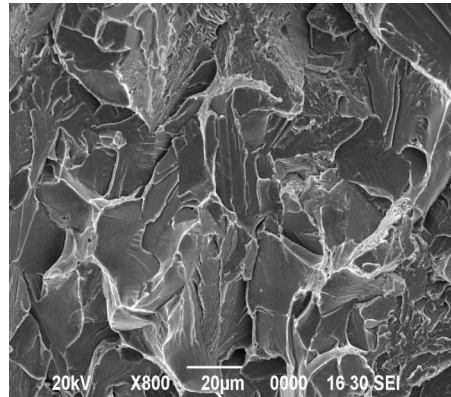
Gambar 8a. Mikroskopi bidang patahan varian D, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur ruang – *dimple* (perbesaran 800x)



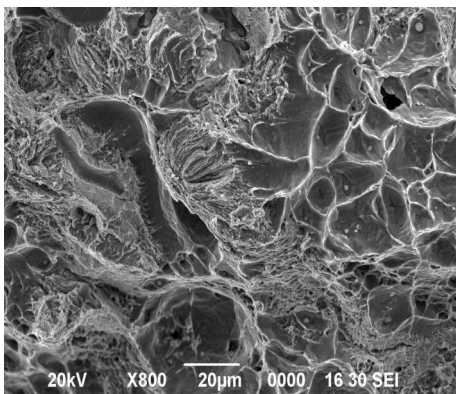
Gambar 8b. Mikroskopi bidang patahan varian D, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur -50°C – *intergranular fracture* (IGF) (perbesaran 800x)



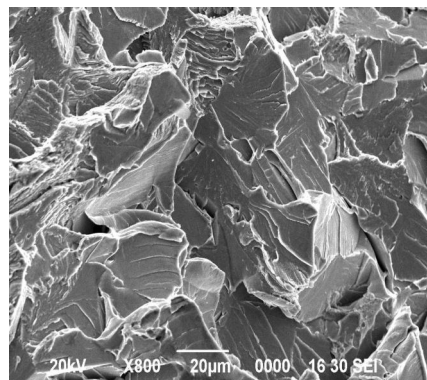
Gambar 9a. Mikroskopi bidang patahan varian E, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur ruang – *dimple* (perbesaran 800x)



Gambar 9b. Mikroskopi bidang patahan varian E, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur -50°C – *intergranular fracture* (IGF) (perbesaran 800x)



Gambar 10a. Mikroskopi bidang patahan varian F, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur ruang – *dimple* (perbesaran 800x)



Gambar 10b. Mikroskopi bidang patahan varian F, hasil uji impak *charpy v-notch* pada temperatur -50°C – *intergranular fracture* (IGF) (perbesaran 800x)

Gambar 5a, 6a, 7a, 8a, 9a dan 10a adalah mikroskopi bidang patahan hasil uji impak *charpy v-notch* baja feritik untuk varian A sampai dengan varian F yang diuji pada temperatur ruang. Model patahannya adalah *dimple* yang bersifat ulet. Sedangkan Gambar 5b, 6b, 7b, 8b, 9b dan 10b adalah mikroskopi bidang patahan hasil uji impak *charpy v-notch* baja feritik untuk varian A sampai dengan varian F yang diuji pada temperatur -50°C . Model patahannya adalah *intergranular fracture* (IGF) yang bersifat rapuh.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan terhadap baja feritik dengan enam varian P diketahui bahwa P sangat berperan terhadap kuat tangguh material, sehingga kandungan P didalam baja feritik sebagai material bejana tekan reaktor nuklir harus diperhitungkan dengan cermat. Dari ke enam varian A sampai dengan varian F, disimpulkan bahwa baja feritik dengan kandungan unsur P optimal 0,0132 % berat (varian B) mempunyai kuat tangguh/ketangguhan patah yang sifatnya rapuh pada temperatur -32°C .

DAFTAR PUSTAKA

1. Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia, "Buku Putih Mengenai Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan Untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Baru Tahun 2025", Tahun 2006.
2. VIKRAM, N.S, et.al, "Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components", Elsevier, 1993.
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, "Integrity of Reactor Pressure Vessel in Nuclear Power Plants: Assessment on Irradiation Embrittlement Effects in Reactor Pressure Vessel Steels", TECDOC-xxx, November 26, 2007.
4. SRI NITISWATI, HISTORI, "Pengaruh Perangsang Fosfor, Tembaga dan Nikel Terhadap Sifat Mekanik Logam Paduan Jenis Feritik", Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir X, ISSN No.:1410-0533, Serpong, 15-17 Pebruari, 2005.
5. TRIEKA AIMEX, "Data Analisis Komposisi Kimia Varian A s.d. F", Juli 2009.

6. AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIAL,"Metals Test Methods and Analytical Procedures", Volume 03.01, 2000.
7. ERHART H, et.al."Equilibrium Segregation of Phosphorus at Grain Boundaries of Fe-P, Fe-C-P, Fe-Cr-P, and Fe-C-Cr-P Alloys", Metal Science, Vol. 15, September 1981.
8. SRI NITISWATI, NISHIYAMA.Y, "Efek Temperatur Iradiasi Netron Pada Penggetasan Antar Butir Dari Logam-Logam Paduan Jenis Feritik", Prosiding Seminar Nasional Ke-10 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, ISSN 0854-2910, 7 Desember 2004.
9. LEE, D.Y.LEE, at.al., "The Influence of Alloying Elements on Impurity Induced Grain Boundary Embrittlement", Metallurgical Transactions A, Vol.15, July 1984.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

1. Untuk mendapatkan temperatur transisi yang dilakukan dengan pengujian *charpy V-Notch*, apakah kurva yang dihasilkan selalu linear?
2. Temperatur transisi varian E adalah 7°C . Apa artinya? Dan bagaimana hubungannya dengan varian B yang temperatur transisinya -32°C ?

(Gatot Wurdianto – BATAN)

Jawaban:

1. Kurva energi diserap (J/cm^2) vs Temperatur ($^{\circ}\text{C}$) selalu linear.
2. Temperatur transisi varian E adalah 7°C , artinya varian E memiliki kuat tangguh / ketangguhan patah yang sifatnya rapuh pada temperatur 7°C . Hubungan dengan varian B yang temperatur transisinya -32°C adalah varian E bersifat lebih rapuh dari pada varian B karena varian E akan mengalami patah rapuh pada suhu 7°C . Sedangkan varian B akan mengalami patah rapuh pada suhu -32°C , sehingga dapat dikatakan bahwa varian B lebih baik dari pada varian E.