



EVALUASI RANCANGAN PLENUM ELEMEN BAKAR BWR

Bambang Herutomo
Pusat Elemen Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

EVALUASI RANCANGAN PLENUM ELEMEN BAKAR BWR. Telah dilakukan evaluasi rancangan plenum elemen bakar BWR tipe GE-P8x8R. Evaluasi didasarkan atas kemampuan plenum dalam menampung gas hasil belah Xe dan Kr yang terlepas dari matrik bahan bakar UO_2 ; dan sebagai kriteria penerimaan adalah kenaikan tekanan dalam elemen bakar sampai akhir masa pakainya harus tidak melebihi tekanan sistem pendingin teras reaktor. Evaluasi ini meliputi pengaruh derajat bakar dan daya linier terhadap tekanan dalam yang dihasilkan. Untuk elemen bakar yang dioperasikan pada kondisi rancangan, yaitu derajat bakar maksimum 40 MWd/kgU dan daya linier maksimum 440 W/cm, besarnya tekanan dalam yang dihasilkan adalah sekitar 5,971 MPa atau sekitar 82,5% dari tekanan sistem pendingin (7,24 MPa). Berdasarkan kondisi ini, dengan operasi daya linier maksimum 440 W/cm maka derajat bakar maksimum elemen bakar ini dapat ditingkatkan sampai 50 MWd/kgU tanpa perubahan rancangan plenumnya.

ABSTRACT

PLENUM DESIGN EVALUATION OF THE BWR FUEL ELEMENT. *Plenum design of the BWR fuel element - GE-P8x8R have been evaluated. The evaluation is based on the plenum capability to accommodate the fission gas Xe and Kr released from UO_2 fuel matrices; and as acceptance criteria is increasing internal pressure of the fuel element at the end of life should be not greater than pressure of the reactor core coolant system. This evaluation includes the effect of the fuel discharge bumup and the linear power to the generated internal pressure of the fuel elements. For the fuel elements operated at design conditions, i.e. the maximum fuel discharge bumup is 40 MWd/kgU and the maximum linear power is 440 W/cm, the generated internal pressure is about 5.971 MPa or about 82.5% from the coolant system pressure (7.24 MPa). Based on this condition, with the maximum linear power of 440 W/cm then the maximum fuel discharge bumup can be extended up to 50 MWd/kgU without changing their plenum design.*

PENDAHULUAN

Dari berbagai ragam nuklida hasil belah, gas stabil xenon (Xe) dan kripton (Kr) berpengaruh besar terhadap kinerja termomekanik suatu elemen bakar. Sifat tak larut atom-atom Xe dan Kr menyebabkan atom-atom tersebut memiliki kebolehdan yang besar untuk terlepas dari matrik bahan bakar UO_2 , selanjutnya akan mengisi ruang kosong yang ada di dalam elemen bakar seperti retakan, pori terbuka, dan celah antara pelet-kelongsong. Efek nyata dari terlepasnya gas hasil belah tersebut adalah naiknya tekanan dalam elemen bakar. Untuk mereduksi kenaikan tekanan dalam tersebut, suatu ruang kosong (plenum) baik berada di atas maupun di bawah susunan pelet perlu disediakan di dalam elemen bakar.

Kriteria umum dalam merancang plenum (dimensi) adalah kenaikan tekanan dalam akibat terlepasnya gas hasil belah Xe

dan Kr dan gas isian celah dari suatu elemen bakar sampai habis masa pakainya harus lebih kecil dibandingkan dengan tekanan sistem pendingin teras reaktor. Tekanan sistem pendingin adalah sekitar 72 bar untuk BWR dan sekitar 155 bar untuk PWR.

Hasil-hasil evaluasi rancangan plenum elemen bakar BWR tipe standar GE-P8x8R disajikan dalam makalah ini. Dalam hal ini, P adalah singkatan dari *Pre-pressurized* karena elemen bakar tersebut telah diberi tekanan awal oleh gas isian (He) dan R adalah singkatan dari *Retrofit* karena permukaan kelongsong sebelah dalam telah dilapisi dengan zirkonium murni. Spesifikasi umum rancangan elemen bakar ini dapat dilihat pada Tabel 1. Evaluasi yang dilakukan meliputi pengaruh derajat bakar dan daya linier terhadap kenaikan tekanan dalam. Dari hasil evaluasi dapat diketahui batas kemampuan rancangan plenum elemen bakar tersebut.

Kegiatan ini dimaksudkan sebagai salah satu wahana untuk meningkatkan kemampuan rancang-bangun elemen bakar reaktor daya khususnya bagi penulis maupun PEBN-BATAN pada umumnya. Seperti diketahui, hasil studi kelayakan PLTN yang dilakukan NEWJEC merekomendasikan bahwa fabrikasi elemen bakar paling layak didomestikkan dibanding kegiatan lain dalam lingkup daur bahan bakar. Oleh karena kegiatan rancang-bangun merupakan salah satu kegiatan yang sangat vital mengingat adanya keterkaitan yang erat dengan kinerja yang diharapkan dari rancangan elemen bakar tersebut maka kegiatan rancang-bangun elemen bakar perlu dikuasai sedini mungkin.

METODE

Besarnya tekanan dalam elemen bakar baik yang berasal dari gas isian (He) maupun dari gas hasil belah (Xe dan Kr) yang terlepas dari matrik bahan bakar dihitung dengan menggunakan persamaan gas ideal, yaitu :

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (1)$$

P adalah tekanan (atm), n adalah gram-mol gas, R adalah tetapan gas ideal (82,06 cm³atm/g-mol K), T adalah temperatur gas (K), dan V adalah volum gas (cm³).

Untuk mengerjakan persamaan (1) di atas, suatu kombinasi yang konservatif telah diambil, yaitu

- ♦ panjang plenum dan diameter dalam diambil harga minimumnya,
- ♦ ekspansi kelongsong akibat temperatur operasi diabaikan,
- ♦ celah antara pelet-kelongsong diabaikan,
- ♦ volum plenum dikoreksi dengan volum komponen-komponen yang ada di dalam plenum (pegas dan penangkap hidrogen) dan
- ♦ temperatur gas (plenum) diambil harga rata-rata antara temperatur permukaan pelet dengan temperatur permukaan dalam kelongsong.

Jumlah gas hasil belah yang terlepas dari matrik bahan bakar dihitung berdasarkan jumlah gas yang digenerasi dikalikan dengan fraksi gas yang terlepas. Jumlah gas yang digenerasi tergantung pada derajat bakar dan fraksi gas yang terlepas tergantung pada temperatur bahan bakar.

Tabel 1 : Data Elemen Bakar GE-P8x8R

1	Panjang aktif elemen bakar (in)	:	145,24
2	Diameter elemen bakar (in)	:	0,483
3	Tebal kelongsong (in)	:	0,032
4	Diametrikal lebar celah (in)	:	0,009
5	Diameter pelet (in)	:	0,410
6	Densitas pelet UO ₂	:	95% densitas teori
7	Tekanan gas isian pada STP (atm)	:	3
8	Fraksi panjang aktif plenum dengan panjang aktif elemen bakar	:	8%

Dengan asumsi bahwa setiap reaksi pembelahan dihasilkan energi sebesar 200 MeV, densitas teoritis UO₂ adalah 10,95 g/cm³, dan *yield* pembentukan gas hasil belah Xe dan Kr sebesar 0,3 maka jumlah gram-mol gas hasil belah yang digenerasi per-volume bahan bakar adalah ^[4]:

$$N = 0.013 \times B \times f \quad (2)$$

N adalah jumlah gas hasil belah (gram-mol/m³ bahan bakar), B adalah derajat bakar (MWd / tonU), f adalah fraksi densitas UO₂ (0,95).

Untuk menghitung fraksi gas hasil belah yang terlepas digunakan model dua daerah temperatur yang cukup konservatif dan telah digunakan secara luas oleh General Electric dalam merancang elemen bakar, yaitu sebesar 4% untuk $T < 3000$ °F dan 100 % untuk $T > 3000$ °F. Sehingga total fraksi gas hasil belah yang terlepas adalah :

$$F = \frac{1,0 \times R_p^2 + 0,04 \times (R_f^2 - R_p^2)}{R_f^2} \quad (3)$$

R_p adalah jari-jari bahan bakar yang memiliki $T > 3000$ °F dan R_f adalah jari-jari pelet bahan bakar.

Dari persamaan (2) dan (3) di atas, jumlah gram-mol gas hasil belah yang terlepas untuk seluruh volume bahan bakar adalah :

$$n = F \times N \times V_f \quad (4)$$

V_f adalah volume bahan bakar (m³).

Adanya ketergantungan fraksi gas yang terlepas dengan temperatur mengharuskan diketahuinya distribusi radial temperatur di dalam pelet bahan bakar, dan perhitungan biasanya dilakukan dari luar (kelongsong) ke arah dalam (pusat bahan bakar). Untuk satu dimensi perpindahan panas dalam kondisi mantap, distribusi radial temperatur adalah sebagai berikut :

a. Temperatur permukaan dalam kelongsong

$$T_{ci} = T_{co} + \frac{q'}{2\pi k_c} \ln\left(\frac{R_{co}}{R_{ci}}\right) \quad (5)$$

b. Temperatur permukaan pelet bahan bakar

$$T_{fs} = T_{ci} + \frac{q'}{2\pi R_f} \frac{1}{H_g} \quad (6)$$

c. Distribusi temperatur di dalam pelet bahan bakar

$$\int_{T_{fs}}^T k_f(T) dT = \frac{q'}{4\pi} \left[1 - \left(\frac{r}{R_f}\right)^2 \right] \quad (7)$$

T_{co} adalah temperatur permukaan luar kelongsong, T_{ci} adalah temperatur permukaan dalam kelongsong, T_{fs} adalah temperatur permukaan pelet bahan bakar, T_{fr} adalah temperatur di dalam pelet bahan bakar pada jari-jari r , q' adalah daya linier bahan bakar, k_c adalah konduktivitas panas kelongsong, k_f adalah konduktivitas panas bahan bakar, H_g adalah konduktansi celah pelet-kelongsong, R_{co} adalah jari-jari luar kelongsong, R_{ci} adalah jari-jari dalam kelongsong, R_f adalah jari-jari pelet bahan bakar.

Harga konduktivitas panas UO_2 dan zircaloy yang digunakan di dalam perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2. Sedangkan harga konduktansi celah (H_g) diambil harga tetap sepanjang waktu, yaitu sebesar 1000 Btu/jam-ft- $^{\circ}F$ sesuai rekomendasi acuan ^{(1), (2) dan (3)}.

Tabel 2 : Konduktivitas panas UO_2 dan Zircaloy

<p>1. Konduktivitas panas UO_2 (W/m K)</p> $k_{UO_2} = 1,73073 \left[\frac{A + E_p}{C + T_f} + BT_r^3 + \frac{A}{C + T_M} \left(\frac{T_R}{T_M + 460} \right)^3 \right]$ <p> T_f = Temperatur $^{\circ}F$ T_R = Temperatur $^{\circ}R$ T_M = Temperatur lebur UO_2, $^{\circ}F$ $E_p = (1-2,5p)/0,875$ $p = 1,0 - f_{TD}$, f_{TD} adalah fraksi densitas teori $A = 3,9781 \cdot 10^3$ $B = 6,0236 \cdot 10^{-12}$ $C = 692,61$ $T_M = 3077,0 - 3,2024 \cdot 10^{-3} Bu$ (K) Bu = derajat bakar (MWd/tonU) </p> <p>2. Konduktivitas Panas Zircaloy (W/m.K)</p> $K_{zry} = 7,21 + T [2,18 E - 2 - T (1,54 E - 5 - T \times 7,93 E - 9)]$ <p>T = temperatur K</p>
--

HASIL DAN BAHASAN

Elemen bakar BWR tipe GE-P8x8R adalah tipe elemen bakar standar General Electric. Tipe elemen bakar ini dirancang untuk operasi pada daya linier maksimum sebesar 440 W/cm dan derajat bakar maksimum sebesar 40 MWd/kgU.

Untuk mengevaluasi kemampuan plenumnya dalam menampung gas-gas hasil belah Xe dan Kr yang terlepas dari matrik bahan bakar, beberapa kasus perhitungan dengan berbagai variasi kondisi operasi telah dilakukan, yaitu sebagai fungsi kenaikan derajat bakar dan daya linier. Dalam perhitungan, temperatur permukaan luar kelongsong yang digunakan adalah 296,11°C yang merupakan tipikal rata-rata pada awal hidup (*BOL-Begining Of Life*) temperatur permukaan luar kelongsong untuk BWR. Berdasarkan hasil studi di PLTN BWR Oyster Creek-USA, temperatur rata-rata kelongsong naik sekitar 1,4°C per 10 MWd/kgU^[2], maka masukan temperatur permukaan luar kelongsong yang digunakan dalam perhitungan akan dikoreksi dengan kenaikan tersebut, yaitu diambil harga rata-rata antara temperatur BOL dan EOL (*End Of Life*).

Hasil-hasil perhitungan secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah ini. Seperti disebutkan di muka bahwa kriteria perancangan plenum adalah total tekanan dalam suatu elemen bakar sampai akhir masa hidupnya harus lebih kecil dibanding tekanan sistem pendingin teras dan tipikal tekanan sistem pendingin teras pada BWR adalah 7,24 MPa (1050 psi). Dari Tabel 3 di atas terlihat bahwa untuk derajat bakar rancangan (40 MWd/kgU) kriteria akan terlampaui untuk operasi pada daya linier >453 W/cm, dan untuk operasi pada daya linier rancangan (440 W/cm) kriteria akan terlampaui pada derajat bakar >50 MWd/kgU.

Berdasarkan hal ini, secara umum dapat dikatakan bahwa kinerja elemen bakar GE-P8x8R masih dapat ditingkatkan tanpa mengubah rancangan plenumnya (volume). Peningkatan kinerja melalui peningkatan derajat bakar akan banyak memberikan keuntungan, baik teknis maupun ekonomis. Dari segi teknik, dengan derajat bakar tinggi dimungkinkan untuk melakukan pengaturan bahan bakar di dalam teras yang memberikan kebocoran neutron rendah (*LLP - Low Leakage Loading Patern*) sehingga umur bejana tekan reaktor dapat ditingkatkan. Dari segi ekonomi, peningkatan derajat bakar akan menurunkan ongkos bahan bakar. Selain itu, dengan derajat bakar tinggi pengaturan siklus reaktor dapat lebih fleksibel misalnya perpanjangan siklus untuk menaikkan faktor kapasitas pembangkitan daya. Sedangkan peningkatan kinerja dengan jalan meninggikan daya linier pada umumnya dihindari karena akan meningkatkan efek interaksi pelet-kelongsong, meningkatkan laju *creep* dan laju korosi kelongsong yang akan menurunkan keandalan elemen bakar. Oleh karena itu kecenderungan pengoperasian reaktor adalah menurunkan daya linier yang dibangkitkan. Untuk tingkat daya operasi yang sama, penurunan daya linier dilakukan dengan cara memperbanyak elemen bakar dalam rakitannya, misalnya dari rakitan elemen bakar 8x8 dimodifikasi ke 9x9, 10x10, bahkan 11x11.

Perlu dicatat pula bahwa hasil-hasil perhitungan ini sangat konservatif mengingat data masukan derajat bakar maupun daya linier yang digunakan diambil harga maksimumnya yang diaplikasikan sepanjang elemen bakar. Hasil yang konservatif ini sangat diperlukan agar diperoleh batas keselamatan yang cukup dalam pengoperasian elemen bakar. Untuk mengevaluasi kemampuan kelongsong, yaitu regangan tidak boleh melampaui 1%, data tekanan dalam di atas perlu ditambah dengan beban lain seperti tegangan yang berasal dari interaksi pelet-kelongsong.

Tabel 3. Hasil perhitungan

BU	q'	T _{ci}	T _{fs}	T _{fc}	N * V _f	n	P _{gas}	P _{tot}
MWd/kgU	W/cm	o _C	o _C	o _C	g-mol	g-mol	MPa	MPa
40	440,00	298,910	596,126	1795,432	0,155	0,023	5,135	5,971
40	450,00	298,910	602,851	1834,338	0,155	0,027	6,074	6,915
40	460,00	298,910	609,575	1872,806	0,155	0,031	6,997	7,842
40	470,00	298,910	616,297	1910,809	0,155	0,034	7,867	8,716
45	440,00	299,260	596,461	1794,191	0,175	0,026	5,756	6,592
45	450,00	299,260	603,186	1832,970	0,175	0,030	6,814	7,655
45	460,00	299,260	609,909	1871,310	0,175	0,034	7,854	8,699
45	470,00	299,260	616,631	1909,183	0,175	0,039	8,832	9,681
50	440,00	299,610	596,796	1792,911	0,194	0,028	6,371	7,207
50	450,00	299,610	603,520	1831,562	0,194	0,033	7,548	8,389
50	460,00	299,610	610,243	1869,771	0,194	0,038	8,706	9,552
50	470,00	299,610	616,965	1907,513	0,194	0,043	9,791	10,641
55	440,00	299,960	597,131	1791,591	0,214	0,031	6,979	7,816
55	450,00	299,960	603,856	1830,114	0,214	0,036	8,277	9,119
55	460,00	299,960	610,578	1868,189	0,214	0,042	9,552	10,398
55	470,00	299,960	617,300	1905,796	0,214	0,047	10,745	11,595
60	440,00	300,310	597,466	1790,232	0,233	0,034	7,581	8,419
60	450,00	300,310	604,190	1828,620	0,233	0,040	8,999	9,841
60	460,00	300,310	610,912	1866,563	0,233	0,046	10,393	11,240
60	470,00	300,310	617,634	1904,034	0,233	0,051	11,693	12,543

SIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa rancangan plenum elemen bakar BWR tipe GE-P8x8R memiliki margin yang cukup besar dalam menampung gas hasil belah Xe dan Kr yang terlepas dari matrik bahan bakar. Untuk kondisi operasi rancangan, daya linier maksimum 440 W/cm dan derajat bakar maksimum 40 MWd/kgU, tekanan dalam total di dalam elemen bakar adalah 5,971 MPa atau sekitar 82,5% dari tekanan sistem pendingin. Untuk meningkatkan daya gunanya, elemen bakar tersebut masih dapat ditingkatkan dengan derajat bakar maksimum sampai 50 MWd/kgU tanpa merancang ulang plenumnya.

Mengingat pentingnya rancangan dimensi plenum dalam mengakomodasi kenaikan tekanan dalam elemen bakar maka metode perhitungan yang disajikan disarankan untuk digunakan dalam

merancang dimensi plenum elemen bakar eksperimental PEBN yang akan diuji iradiasi di RSG-GAS.

PUSTAKA

- [1]. ROGERS B.N. et.al., *Licensing Topical Report : BWR/6 Fuel Design*, NEDO-20948, General Electric, 1975.
- [2]. ANONAME, *General Electric Reload Fuel Application for Oyster Creek*, NEDO-24195, General Electric, 1979.
- [3]. LAHEY R.T. Jr., MOODY F.J., *The Thermal Hydraulics of A Boiling Water Nuclear Reactor*, American Nuclear Society, 1989
- [4]. WALTAR A.E., REYNOLDS A.B., *Fast Breeder Reactors*, Pergamon Press, 1980, p. 277 - 279.
- [5]. WILLIAMSON H.E., DITMORE D.C., *Current State of Knowledge High Performance BWR Zircaloy-Clad UO₂ Fuel*, NEDO-10173, General Electric, 1970.

TANYA JAWAB

Hasbullah Nasution

- Mohon dijelaskan arti fisis dari Gambar 1 ?
- Dimana posisi titik nol (0) dari elemen bakar ?

Bambang Herutomo

- Temperatur pendingin yang terus naik dari saluran masuk sampai saluran keluar disebabkan fungsi pendingin sebagai pengangkut panas yang dibangkitkan bahan bakar. Profil temperatur permukaan kelongsong dan temperatur pusat bahan bakar sangat dipengaruhi oleh distribusi fluks panas dan pembangkitan panas sepanjang elemen bakar. *Sub nucleate Boiling* terjadi setelah pendingin mencapai 1/3 bagian saluran pendingin. Ketidakstabilan aliran tidak terjadi karena fluks panas yang dibangkitkan lebih rendah dibandingkan dengan fluks panas kritis untuk terjadinya ONB.
- Pada Gambar 1, kedudukan titik nol berada di bagian atas elemen bakar pendingin masuk.

M. Dhandhang Purwadi

- Mengapa terjadi deviasi cukup tinggi pada kehilangan tekanan serta adanya keganjilan yaitu kenaikan temperatur pendingin rendah sedangkan temperatur maksimum permukaan kelongsong lebih besar dibandingkan dengan hasil *Coolod-N* ?
- Apa tujuan pembuatan paket program ini ?

Bambang Herutomo

- Deviasi yang cukup tinggi pada kehilangan tekanan apabila dibandingkan *Coolod-N* kemungkinan disebabkan model yang digunakan belum memperhitungkan perubahan sifat-sifat pendingin dalam saluran dan perubahan tampang lintang aliran akibat *end fitting*. Keganjilan tersebut belum dapat dijelaskan karena model perhitungan program *Coolod-N* belum diperiksa secara teliti.
- Tujuan pembuatan paket program ini adalah meningkatkan kemampuan sumber daya manusia dalam rancang bangun elemen bakar bentuk pelat untuk reaktor tipe MTR. Program ini akan dikembangkan lebih lanjut sehingga diharapkan menjadi kode program.

Sigit

- Dalam model perhitungan yang dibuat, apakah dimasukkan faktor *gap* antar pelat?
Meningat *gap* memegang peranan penting dalam perpindahan panas elemen bakar.

Bambang Herutomo

- *Gap* antar pelat atau lebar saluran pendingin telah dimasukkan dalam perhitungan (lihat Bab II. Metoda Komputasi).