

ANALISIS GETARAN ELEMEN BAKAR UJI UNTUK REAKTOR NUKLIR SERBA GUNA G.A. SIWA BESSY TIPE PELAT BERINTI DISPERSI U_3Si_2/Al

Suwardi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir -BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong, Tangerang

ABSTRAK

ANALISIS GETARAN ELEMEN BAKAR UJI UNTUK REAKTOR NUKLIR SERBA GUNA G.A. SIWA BESSY TIPE PELAT BERINTI DISPERSI U_3Si_2/Al . Di dalam makalah ini disajikan analisis dinamika getaran terimbas aliran pendingin pada berkas elemen bakar Reaktor Serba Guna GA Siwabessy (RSG-GAS) terdiri dari 21 pelat sejajar. Analisis berdasarkan pada anggapan bahwa defleksi semua pelat dalam berkas adalah sama. Sistem persamaan diferensial pada pelat dan fluida pendingin dikembangkan dan diselesaikan dengan transformasi Fourier, sehingga diperoleh hubungan antara frekuensi alami dan kecepatan aliran. Dari hubungan ini diformulasikan kecepatan kritis untuk ketidakstabilan statis dan kecepatan resonan vortex. Penerapan pada elemen bakar RSG telah dilakukan dengan menggunakan data terbuka yang diperoleh dari pengukuran, sedangkan bagi yang tidak ditemukan dilakukan dengan pendekatan konservatif pada data sejenis. Hasil analisis menunjukkan bahwa batas minimum kecepatan alir untuk mencapai frekwensi alami pelat elemen bakar RSG dalam teras adalah sebesar 281 m/s. Nilai ini berada jauh di atas disain pengoperasian 8 m/s. Kecepatan minimum untuk resonan vortex tumpah (*vortex shedding resonance*) adalah 5.7 m/s untuk pelat-pelat terkelam (tersambung-padu) sempurna pada dinding perakitan. Jadi desain pendinginan elemen bakar RSG jauh dari kecepatan kritis ketidakstabilan, sehingga tidak perlu analisa lebih rinci. Kecepatan resonansi *shedding vortex* dalam analisis ini lebih rendah dari desain kecepatan aliran pendingin, karena selisihnya kecil ada baiknya dilakukan analisis dengan model yang lebih rinci.

Kata kunci: Elemen bakar nuklir, tipe pelat sejajar, U_3Si_2/Al , analisis getaran.

ABSTRACT

ANALYSIS OF FUEL PLATES VIBRATION INDUCED BY COOLANT FLOW ON NUCLEAR FUEL ELEMENT FOR GA SIWABESSY (RSG-GAS) MULTI PURPOSE REACTOR PLATE TYPE THAT WERE U_3Si_2/Al CORE CONTENT. The assumption of the analysis was that deflection of all plates be identical. The differential equation system on plates and coolant, were solved by Fourier transform, to obtain the relationship between natural frequencies and flow velocity. The critical velocity for static instability and vortex's resonant velocity have been formulated from his relationship. Implementing the relations on RSG fuel element was done by use of open data of measurement and by conservative approach of existing data in case no data available. The results shows that limits of critical natural frequencies of RSG fuel element in the core is 281 m/s, that lies

far beyond operation design of 8 m/s. The minimum vortex's resonant velocity is 5.7 m/s plates firmly attached on assembly wall. Design of cooling system for fuel nuclear element in the RSG core is so far from evaluated instability critical velocity, so it is not necessarily further analysis. The velocity of vortex shedding resonance in this analysis is lower compared to design velocity of coolant, so it is recommended to analyze by better approach to compare with this work.

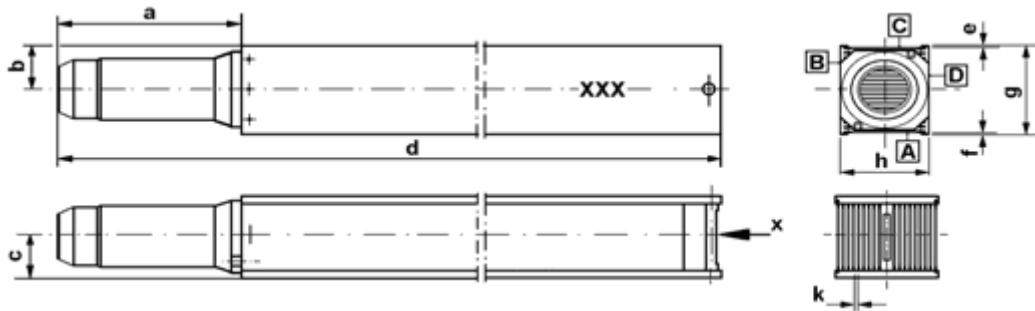
Key word: Nuclear fuel element, equal plate type, U_3Si_2 / Al, vibration analysis.

PENDAHULUAN

RSG-G.A.S. merupakan reaktor nuklir untuk bermacam fungsi penelitian dan produksi radioisotop. Reaktor nuklir ketiga di Indonesia ini dirancang berdaya 30 MW. Walaupun dayanya 1/10 atau 1/20 daya reaktor PLTN, tetapi densitas daya 4 kali lebih besar daripada densitas daya PLTN. RSG-GAS bermoderator dan berpendingin air tekanan atmosfer dengan kedalaman kolom air 13 m, dan berbahan bakar tipe pelat sejajar. Elemen bakar tersusun dalam teras dengan posisi vertikal. Konfigurasi teras RSG berisi elemen bakar, elemen kendali, dan fasilitas iradiasi. Desain elemen bakar RSG-GAS berisi 21 pelat elemen bakar (PEB) berdaging U_3O_8 /Al atau U_3Si_2 /Al dengan pengayaan 19.75(+0.2/-05)% U-235 dengan tingkat muat atau densitas 2.96 gU/ml. Tampak pandangan dari luar untuk desain elemen bakar maupun elemen bakar uji (EBU) ditunjukkan pada gambar-1 dan-2. Generasi kedua elemen bakar RSG menggunakan jenis bahan bakar U_3Si_2 terdispersikan dalam Al (U_3Si_2 /Al) yang sangat stabil. Bahan bakar dibuat dengan teknik metalurgi serbuk, sedangkan pembentukan Pelat Elemen Bakar (PEB) dilakukan dengan proses pengerolan. Inti Elemen Bakar (IEB) U_3Si_2 -Al terdiri dari serbuk bakar U_3Si_2 dan serbuk matriks Al yang dicampur hingga homogen. Perbandingan berat antara serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al berbeda-beda, bergantung pada

tingkat muat uraniumnya, dalam hal ini untuk RSG fraksi volume yang digunakan-telah mendapatkan lisensi BAPETEN- adalah U_3Si_2 ~26%, sedangkan untuk 4.8 dan 5.2 % yang telah dikembangkan fabrikasinya masih perlu uji iradiasi.. Campuran homogen serbuk U_3Si_2 dan serbuk Al (Al 1100) dipres pada tekanan tinggi menjadi IEB, selanjutnya dibungkus menggunakan pelat tutup dan pelat bingkai (Al-Mg2), dirol panas pada suhu 425°C (4 tahap) dan rol dingin beberapa tahap hingga membentuk PEB. Disain elemen bakar nuklir RSG tipe pelat adalah 21 pelat elemen bakar disusun sejajar posisi memanjang arah vertikal dengan jarak konstan. Al 1100 ukuran komersial sangat bagus sifat-sifat mudah mampu dibentuk mampu dilas dan tahan korosi, yield 12000 - 24000 psi. AlMg2 nama teknik paduan Al dengan 2% Mg ini dapat di proses termal, sifat-sifat termal mekanikal, dan ketahanan korosi bagus dan mampu machining serta yield lebih tinggi mencapai 39.000 psi^[1].

Panas yang dihasilkan oleh reaksi nuklir dan proses lanjutan pada inti elemen bakar keluar dari bahan bakar secara transfer konduksi melalui matriks daging bahan bakar (Al 1100) kelongsong (AlMg2) kemudian secara konveksi oleh air pendingin -yang juga berfungsi sebagai moderator energi neutron- pada sistim pendingin primer. Sistim pendingin primer ini didinginkan oleh sistim pendingin sekunder melalui penukar panas.

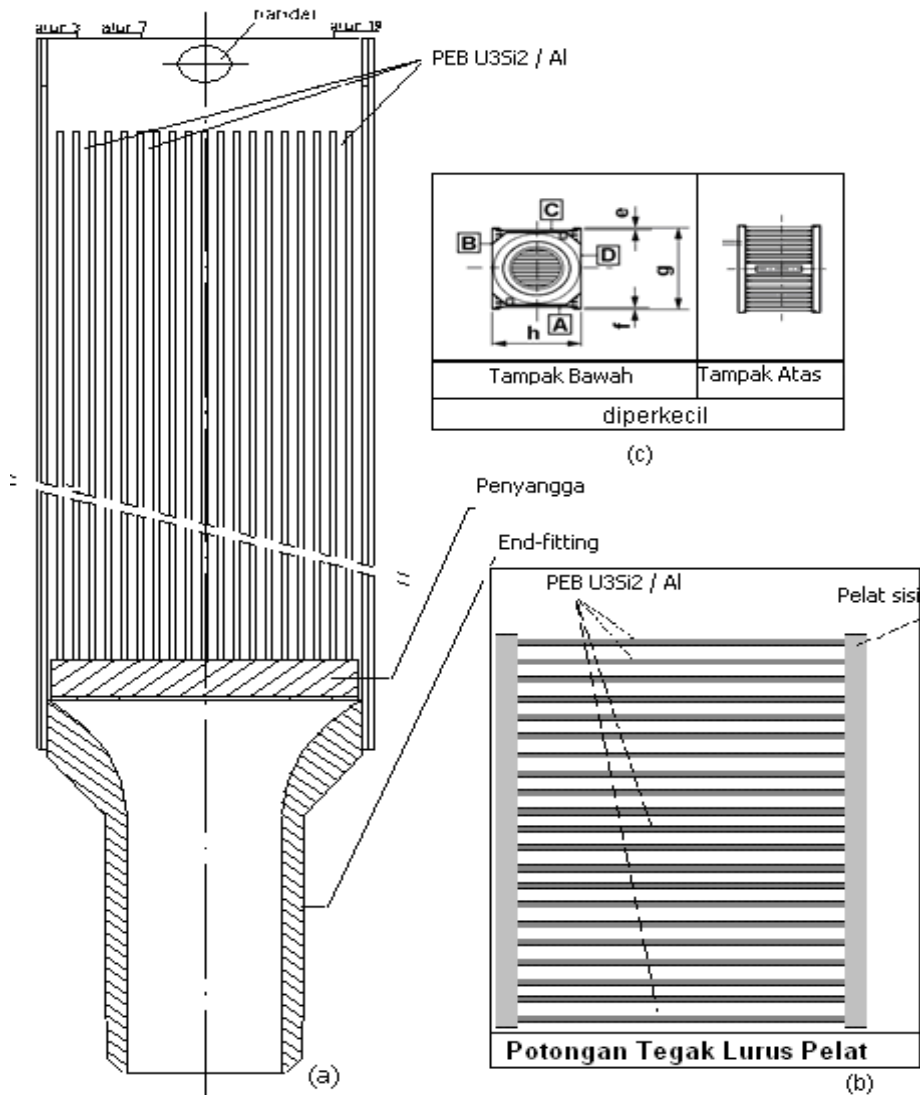


Gambar 1. Pandangan tampak luar elemen bakar nuklir RSG-GAS, dari kanan atas searah jarum jam: arah bawah dan atas serta arah muka dan samping^[2]

Pelat didesain cukup tipis dengan tujuan temperatur maksimal pada pusat pelat selalu memenuhi syarat keselamatan, dan kekuatan mekaniknya masih cukup untuk mengungkung bahan radioaktif agar tidak tersebar masuk ke sistim pendingin serta praktis dalam fabrikasi.

Masalah yang dipelajari dari jenis rakitan bahan bakar ini adalah aliran pendingin yang mempengaruhi getaran PEB yang berpelat tipis dan panjang tersusun sejajar. Banyak percobaan telah dilakukan untuk mendeskripsikan aliran yang

mempengaruhi getaran dan ketidakstabilan rakitan bahan bakar pelat sejajar, yang diringkas oleh Davis dan Kim, 1991^[3] seperti yang dicontohkan pada Gambar 3. Untuk meningkatkan hasil analisis, Davis dan Kim mengembangkan satu model interaksi struktural fluida untuk struktur berpelat tunggal. Dengan model ini, dapat diperoleh satu kecepatan kritis statis dan satu kecepatan resonan. Model Davis-Kim ini tidak mempertimbangkan interaksi di antara dua pelat berdekatan, yang perlu dipertimbangkan untuk alur antar pelat yang sangat sempit.



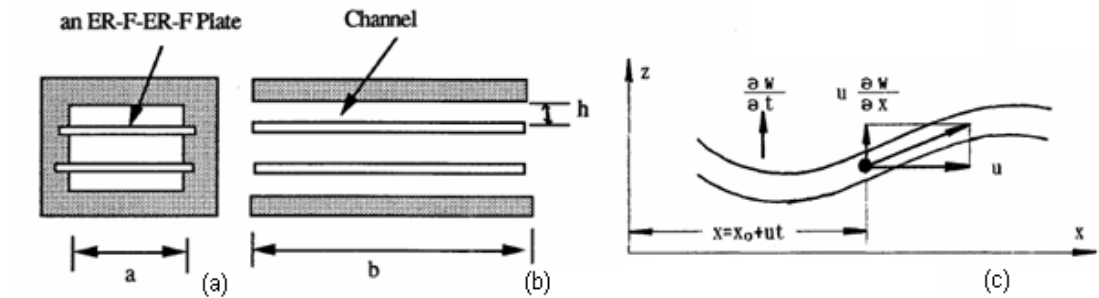
Gambar 2. Tampak potongan memanjang tegak lurus lebar pelat(a) dan tegak lurus panjang pelat (b) dan tampak luar kedua ujung (c)^[2]

TEORI

• Pemodelan dinamika pelat

Pada tulisan ini, disajikan analisa getaran dan ketidakstabilan dari rakitan bahan bakar pelat sejajar terimbas aliran dilakukan dengan model yang dikembangkan oleh Davies^[3]. Model ini, berdasarkan pada asumsi bahwa: (a). pelat sejajar dengan dua ujung sisi tebal bebas, pada Gambar.3(a). tampak lebar = a sedangkan dua ujung sisi tebal memanjang tersambung sempurna pada Gambar 3(b) tampak panjang saluran =

b (b) semua pelat punya pembelokan yang sama pada setiap saat seperti Gambar 3(c). Asumsi ini mudah diterima apabila bahan bakar pelat adalah sangat tipis dan alur di antara mereka adalah sangat sempit, seperti pada Gambar 4 untuk nilai $b/a \gg$ dan $b/h \gg$. Anggapan ini adalah amat layak, terutama untuk pelat dekat pusat rakitan. Dari model ini dapat diperoleh hubungan antara kecepatan aliran pendingin pada alur sempit selalu tetap pada arah bujur.



Gambar 3. Ilustrasi model interaksi pelat sejajar 2 sisi bebas dan 2 sisi terikat (ER-F-ER-F) dalam aliran fluida: tampang lintang (a) dan tampang bujur (b) struktur, dan diagram kesetimbangan mekanik (c)^[3]

Persamaan tanggapan pelat oleh beda tekanan fluida dengan menggunakan teori klasik pelat tipis elastis^[3] adalah:

$$D \cdot (\nabla_t)^4 W + M \cdot \frac{\delta^2 W}{\delta t^2} = -p \tag{1}$$

D adalah kekakuan flextural terhadap penekukan dari pelat tunggal, w adalah defleksi pelat, M ialah massa pelat per satuan luas, sedangkan P adalah beda tekanan fluida.

Dengan hukum kekekalan momentum seperti ilustrasi Gambar.3.c, daya gerak air pendingin mengalir di sekitar pelat-pelat dapat digambarkan melalui persamaan,

$$p = M_c \cdot \left(\frac{\delta}{\delta t} + u \cdot \frac{\delta}{\delta x} \right)^2 \cdot W \tag{2}$$

dengan notasi: M_c adalah massa air pendingin persatuan luas saluran, u adalah beda laju/kecepatan alir dalam saluran.

Dengan substitusi persamaan 2 ke persamaan 1, dapat diperoleh persamaan gabungan untuk pelat-pelat dan pendingin, yaitu:

$$D \cdot (\nabla_t)^4 W + (M + M_c) \cdot \frac{\delta^2 W}{\delta t^2} + 2M_c \cdot u \cdot \frac{\delta^2 W}{\delta t \cdot \delta x} + M_c \cdot u^2 \cdot \frac{\delta^2 W}{\delta x^2} = 0$$

• SOLUSI UNTUK FREKUENSI ALAMI (3)

Dengan mempergunakan transformasi Fourier untuk Persamaan (3) pada x, w, t, persamaan eigen diperoleh seperti berikut

$$D \left(k_m^2 + k_n^2 \right)^2 - \left[(M + M_c) \cdot \omega_{mn}^2 - 2M_c \cdot u \cdot k_m \cdot \omega_{mn} - (M_c k_m^2 \cdot u^2) \right] = 0$$

dimana k_m adalah bilangan moda gelombang arah bujur, k_n adalah bilangan moda gelombang arah samping, ω_{mn} adalah frekuensi alami. Untuk nilai k_m ≥ 0, k_n ≥ 0, ω_{mn} ≥ 0 dan u ≥ 0, Persamaan (4) dapat ditulis ulang seperti

$$\omega_{mn}^2 + \frac{2 \cdot M_c}{M + M_c} \cdot k_m \cdot u \cdot \omega_{mn} + \frac{M_c}{M + M_c} \cdot k_{mn}^2 \cdot u^2 - \frac{M}{M + M_c} \cdot \omega_{x, mn}^2 = 0 \tag{5}$$

dengan :

$$\omega_{mn}^x = \sqrt{\frac{D}{M} \cdot (k_m^2 + k_n^2)} \quad (6)$$

ω_{mn}^* adalah frekuensi alami dari pelat di ruang hampa.

Persamaan (5) mendeskripsikan hubungan antara frekuensi alami dan kecepatan aliran pendingin.

• **Kecepatan kritis untuk ketidakstabilan statis**

Dengan mematok $\omega_{mn}^2 = 0$ pada persamaan (5), kecepatan kritis untuk ketidakstabilan statis diperoleh seperti di bawah.

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{M}{M_c} \cdot \frac{\omega_{mn}^x}{k_m}} \quad (7)$$

Substitusi dengan persamaan (5) dapat mengubahnya menjadi:

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{D}{M_c} \cdot \left(k_m + \frac{k_n^2}{k_m} \right)} \quad (8)$$

U_{cr} mencapai minimum ketika $k_m \sim k_n$ dan k_n mencapai minimum. Kemudian diperoleh pendekatan kecepatan aliran kritikal statis

minimum (*minimum static critical flow velocity*).

$$u_{cr} \approx 2 \cdot \sqrt{\frac{D}{M_c}} \cdot k_n \quad (9)$$

Pada kecepatan aliran kritis ini, pelat mungkin mengalami pembengkokan besar sementara di situ tidak ada getaran.

• **Kecepatan resonan**

Pada peristiwa getaran tergugah pual (*vortex*), hubungan di antara frekuensi pual penampilan (*shedding vortex*) ω_s dan ketebalan pelat dinyatakan dengan persamaan (10) (10)

$$W_s = \frac{\pi \cdot S}{h}$$

dimana S adalah bilangan Strouhal, sementara h adalah ketebalan dari pelat. Dengan menyamakan ω_s pada Persamaan (10) ke ω_{mn} pada Persamaan (5), kecepatan resonan pual menumpahkan (*shedding vortex*) (u_{vr}) diperoleh seperti berikut :

$$u_{vr} = \sqrt{\frac{M}{4\pi^2 \cdot S^2 \cdot (M + M_c) + 4\pi \cdot S \cdot M_c \cdot k_m \cdot h + M_c \cdot k_m^2 \cdot h^2}} \cdot \omega_{mn}^x \cdot h$$

$$u_{vr} = \sqrt{\frac{D}{4\pi^2 \cdot S^2 \cdot (M + M_c) + 4\pi \cdot S \cdot M_c \cdot k_m \cdot h + M_c \cdot k_m^2 \cdot h^2}} \cdot \left(k_m^2 + k_n^2 \right) \cdot h \quad (11)$$

Untuk rasio massa lebih besar $(M_c/M_c) \gg 1$ dan moda lebih rendah $k_m \cdot h \ll 1$, maka dapat diperoleh pendekatan bahwa U_{vr} minimum, yaitu ketika k_m dan k_n mereka pada nilai minima. Minimum dari k_m adalah nol,

HASIL DAN BAHASAN

Aplikasi model ini menggunakan data geometri berkas elemen bakar uji (EBU) RSG seperti pada Gambar 2, sebagai berikut: lebar pelat $a = 7.62$ cm, panjang pelat $b = 76.2$ cm, ketebalan pelat $h = 0.127$ cm, ketebalan celah/saluran $hc = 0.254$ cm, serta data sifat-sifat kepadatan/densitas pelat $P = 6.5 \times 10^{-3}$ kg/cm³, kepadatan pendingin $P_c = 1.0 \times 10^{-3}$ kg/cm³ modulus lenting pelat $E = 68.95$ GPa, Rasio Poison, $\nu = 0.3$, dan data desain kecepatan aliran pendingin $u = 10$ m/s, bilangan Reynolds $Re \sim 60,000$, Bilangan Strouhal $S = 0.155$, diperoleh hasil akhir berikut: minimum kecepatan kritis $u_{cr} = 281$ m/s, minimum kecepatan resonan pual menumpahkan $u_{vr} = 5.7$ m/s untuk pelat tersambung padu sempurna ke dinding rakitan.

Untuk data yang didapat, nilai minimum kecepatan kritis diperoleh dengan persamaan (9). Nilai minimum kecepatan resonan pual menumpahkan didapatkan

kemudian minimum dekat dari kecepatan pual pergantian-penanggalan, *shedding vortex*, adalah :

$$u_{vr} \equiv \sqrt{\frac{D}{M + M_c} \cdot \frac{k_n^2 \cdot h}{2 \cdot \pi \cdot S}} \quad (12)$$

dengan persamaan-12. Kedua persamaan ini merupakan pendekatan berdasarkan asumsi awal bahwa k pada nilai-nilai minimum. Kedua persamaan merupakan fungsi aljabar eksplisit dengan variabel dapat ditentukan melalui persamaan-persamaan aljabar sebelumnya yang juga berbentuk fungsi eksplisit.

Kecepatan alir minimum yang dapat menghasilkan getaran resonansi struktur rakitan elemen bakar, istilah pendeknya kecepatan minimum statis kritis u_{cr} , perlu diusahakan tidak pernah terjadi oleh karena resonansi akan mengakibatkan kelelahan pelat lebih cepat, yaitu oleh beban siklis. Kalau desain dan pengoperasian kecepatan alir jauh di bawah kecepatan alir untuk frekuensi statis alami, maka margin keselamatan tinggi.

Desain kecepatan alir sebaiknya di bawah kecepatan resonan pual menumpahkan u_{vr} , karena pual tumpah juga memperkuat reaksi pada struktur.

Tabel 1. Data desain elemen bakar dan desain pengoperasian RSG-GAS

Besaran	Notasi	Nilai
Jarak antar pelat	h	< 0.280 (cm)
Lebar pelat	a	7.572 (cm)
Panjang plat	b	62.9 (cm)
b/a	b/a	< 10
h/a	h/a	~ 0.07
Tebal pelat	= thc	0.13 + 0.005
Densitas pelat	Ro_p	$6.5 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$
Densitas fluida	Po_f	$10 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$
Panjang karakteristik = b/Ro_p.Vol	=A/Ro_p	$0.97 \times 10^4 \text{ kg/cm}^3$
Densitas fluida	Po-f	$10 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$
Konstanta Young	E	68.95 GPa
Rasio Poison v	v	0.3
Kecepatan alir	U	8 m/s
Bilangan Reynold	Re	60000
Bilangan Strouhal	St	0.122
Kecepatan minimum batas statis	Ucr	281 m/s
Kecepatan minimum resonansi vortex	Uvr	5.7 m/s

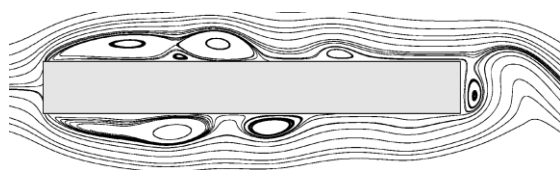
Dengan model Davis dan Kim untuk pelat bahan bakar ini, kecepatan statis kritis untuk bahan bakar rakitan RSG adalah 22 m/s untuk pelat terikat sempurna dan 10 m/s untuk pelat sekedar tertopang, yaitu di bawah dari hasil yang diperoleh di dalam penelitian ini. Kecocokan dari model pelat tunggal pada ketidakstabilan statis juga diverifikasi dalam sederetan test dengan rakitan *mock*^[3]. Dalam hal ini dipertimbangkan pengaruh secara kuantitatif jumlah pelat. Secara kualitatif, jumlah pelat menurunkan nilai kecepatan mengakibatkan kritis (resonansi) dan nilai minimum untuk mengakibatkan pual tumpah.

Kecepatan minimum vortex tumpah diperoleh di makalah ini adalah amat kurang dari "kecepatan resonan tepian" diberikan oleh Davis dan Kim (hanya 20%). Ini disimpulkan bahwa vibrasi tergugah vortex (*vortex-excited vibration*) terjadi jauh lebih awal.

Pual menumpahkan dari pelat bidang datar dan memanjang bertepi persegi dan bersisi ujung didominasi oleh ketidakstabilan benturan lapisan kelupas, ketika lapisan kelupas tunggal terpisah menjadi tidak stabil oleh keberadaan suatu sudut tajam arah muara^[5]. Sementara itu, Guo dkk^[6] mempertimbangkan penanggalan sisi ujung adalah suatu mekanisme kuat menuju terbentuknya osilasi mandiri.

Pembahasan percobaan penanggalan pual dari satu lempeng segi-empat memanjang, ketika arah memanjang sejajar arah aliran (c) adalah jauh lebih besar dibandingkan ketinggiannya (t), memperlihatkan bahwa angka Strouhal $Sr(c)$ meningkat tapak demi tapak sebanding dengan c/t dari 3 ke 12. Penyelidikan suatu fenomena aliran yang dideskripsikan oleh suatu frekuensi f , peneliti dapat mempertimbangkan bahwa bilangan Strouhal $Sr = f l / u$ sebagai suatu frekuensi non-dimensional, bila l dan u adalah berturut-

turut panjang karakteristik dan kecepatan. Untuk fenomena yang dipertimbangkan di dalam makalah ini, $l = c / m$ dan $u \sim 0.5 - 0.6 U$ adalah pilihan alami untuk parameter karakteristik, ketika m dan U adalah berturut-turut jumlah dari pual terbentuk pada sisi lempeng (6 *vortex* pada gambar 4) dan kecepatan aliran tanpa hambatan pelat *freestream* (lihat Gambar 4). Ini secara numerik telah dikonfirmasi untuk angka Reynolds $Re = Ut / \nu > 300$



Gambar 4. Model 'stream line' dan pual (*vortex*) yang terbentuk di seputar pelat tunggal dalam aliran fluida (panjang/tebal) =10, $Re=300$)^[4]

Resonansi vortex juga digunakan untuk analisis kegagalan yang dinamakan '*debris fretting*'. Dalam Reaktor berpendingin Air Mendidih (BWR), debris *fretting* merupakan penyebab terbesar kegagalan rakitan bahan bakar (92%) pada kurun 90 abat 20, sementara ESSC (*Enhanced Stress Strain Corrosion*) dan PCI (*Pellet-Cladding Interaction*) hanya penyebab yang menyumbang 3% dan 1%, dan sisanya 4% belum teridentifikasi^[7].

SIMPULAN

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan sebagai berikut :

Kecepatan minimum batas statis jauh lebih tinggi dibandingkan kecepatan desain. Oleh sebab itu, batas ketidakstabilan tidak perlu dipertimbangkan pada perancangan rakitan bahan bakar berpelat sejajar, maupun analisis dengan model yang lebih rinci atau realistis, ini berarti margin keselamatan amat tinggi.

Kecepatan minimum untuk resonansi pual

(*vortex*) menumpahkan kurang dari kecepatan yang didesain, sehingga kecepatan berdasar desain berada di dalam jangkauan dari kecepatan minimum untuk resonansi pual menumpahkan. Oleh sebab itu, fenomenum ini sebaiknya dianalisis dengan model yang lebih rinci, misalnya dengan menggunakan kode metoda elemen hingga, dengan maksud menilai seberapa akurasi analisis sederhana sini. Disamping itu, juga perlu dikaji seberapa besar dampak resonansi yang ditimbulkan belum mandiri (*self-sustainable*) terhadap kelelahan pelat.

DAFTAR PUSTAKA

1. [http : //www.engineersedge.com/Plate Specifications-Engineers Edge.htm](http://www.engineersedge.com/Plate%20Specifications-Engineers%20Edge.htm).2008
2. BRIYATMOKO, B., dkk, "Laporan Analisis Keselamatan Inseri Elemen Bakar Uji U_3Si_2/Al Densitas 4.8 dan 5.2 gU/mL", PTBN-BATAN, 2008, Jakarta.
3. DAVIES, H.G., "Journal of Sound and Vibration", 15(1) : 107-126, 1971.
4. YAKHOT A, NIKITIN, N AND LIU, H, "Vortex Shedding from Rectangular Plates", AIAA JOURNAL, VOL. 42, NO. 7: TECHNICAL NOTES p.1489, 2004.
5. DOAN, R.L., "The Engineering Test Reactor-A Status Report", Nucleonics. (1958) vol. 16: pp. 102-105.
6. DOAN, R.L., "The Engineering Test Reactor-A Status Report", Nucleonics. (1958) vol. 16: pp. 102-105
6. GUO, C.Q. HENG,R.H. AND SUN, D.L., "A Dynamic Model for Flow – Induced Vibration Of Parallel Plate Fuel Assemblies", SMiRT-12/ K. Kussmaul (Editor) 1993 Elsevier Science Publishers B.V. 1 J01/11.

7. KIM, G., "*Hydrodynamic Instabilities of Thin Flat Rectangular Plates Stacked in Parallel and Separated by a Fluid Medium with Applications to*

the Engineering Test Reactor Core Design". Ph.D. Thesis. The Pennsylvania State University, 1991.