

# Pengaruh Rol Gencet Pelat-Pelat Elemen Bakar Reaktor Serba Guna – G.A. Siwabessy

Suwardi

PTBN-BATAN, Kawasan PUSPIPTEK Gd.20, Tangerang-15310

**ABSTRAK.** - PENGARUH ROL GENCET PELAT-PELAT ELEMEN BAKAR REAKTOR SERBA GUNA – G.A. SIWABESSY. Untuk mempermudah penyiapan uji pasca iradiasi prototip elemen bakar U3Si2 dengan densitas bahan bakar lebih tinggi, dipertimbangkan pemasangan pelat elemen bakar pada bingkai tanpa penggencetan. Selain itu lebar alur pemasangan ditambah agar memudahkan penarikan pelat setelah diiradiasi. Prototip elemen bakar RSG-GAS terdiri dari 21 pelat dipasang sejajar pada bingkai dengan lebar celah pendingin (jarak antar pelat) 2.55 +/- 0.25 mm. Evaluasi dilakukan untuk pengoperasian dengan laju alir pendingin 46 m<sup>3</sup>/j/eleman bakar, suhu 44-70 oC sementara suhu pelat 80 - 125 oC. Makalah ini meninjau getaran pelat; frekuensi alami dan amplitudo, berdasarkan pendekatan masalah yang digunakan oleh Kim dan Davis. Perbedaan desain dan proses fabrikasi menghasilkan perbedaan frekuensi alami dan amplitudo untuk elemen bakar dengan dan tanpa pengerolan gencet.

**Katakunci:** pelat elemen bakar, rol gencet, getaran

**ABSTRACT - EFFECT OF SWAGGING OF FUEL PLATE CONSTRUCTION USED IN G.A. SIWABESSY. MULTIPURPOSE REACTOR.** In order to facilitate PIE irradiation preparation of high density U3Si2 fuel of plate type, assembling the plates into bundle without swagging has been evaluated. In addition, wider path for inserting the plates has been considered for easier pulling-out. The fuel element of RSG GAS consisting of 21 plates, assembled in parallel on frames, having gap between plate 2.55 +/- 0.25 mm for coolant canal. The evaluation has been done for reactor operation with coolant flow rate of 46 m<sup>3</sup>/hr at temperature of 44 - 70 oC, while the temperature of plates is about 80 - 125 oC. The paper presents the dynamic evaluation i.e., plate vibration; natural frequency and amplitude, according to problem approaching that utilized by Kim and Davis. The difference design and manufacture process resulting difference natural frequency between fuel element with and without swagging.

**Keywords:** pelat elemen bakar, rol gencet, getaran

## I. PENDAHULUAN

Batan telah menguasai fabrikasi elemen bakar tipe pelat. Pada RSG yaitu berkas elemen bakar terdiri 21 pelat dengan densitas daging bahan bakar 2.96 g U/cm<sup>3</sup>, baik jenis bahan bakar aluminida, oksida maupun silisida dalam Al. Pengembangan lanjut teknik fabrikasi elemen bakar U3Si2 dengan densitas lebih tinggi telah dapat mencapai 5.2 g U/ml, namun masih diperlukan pengujian iradiasi dan pasca iradiasi. Dalam rangka penyiapan uji pasca iradiasi, untuk memudahkan pengambilan pelat teriradiasi dengan radioaktivitas tinggi dari rakitan, maka dalam

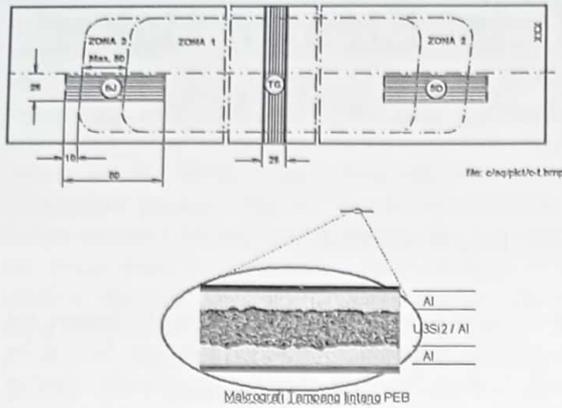
perakitan, pelat hanya disisipkan tanpa dilakukan rol gencet pada kontak antara pelat dan bingkai. Selain itu alur sisipan pada bingkai diperlebar dripada ukuran standar. Dalam reaktor, berkas elemen bakar didinginkan dengan air aliran paksa berkecepatan ~ 8 m/s. Oleh karena itu pada proses perakitan yang telah diijinkan digunakan, pelat dibuat menyatu dengan bingkai menggunakan roll gencet agar terjadi ikatan metalurgis berkekuatan ikat > 27 N/mm

Untuk mengevaluasi efek tiadanya ikatan metalurgis antara pelat elemen bakar dengan bingkai serta alur awal sama akhir lebih lebar terhadap keselamatan pengujian iradiasi, maka desain ini akan dilakukan evaluasi berdasarkan pandangan getaran pelat tipis terimbas aliran air.

Sebagaimana diketahui penghalangan aliran fluida oleh pelat dapat menyebabkan terjadinya vortex pada fluida dan getaran pada pelat. Salah satu kegagalan konstruksi pelat oleh aliran fluida yang sangat terkenal adalah runtuhnya jembatan gantung di Tacoma Washington yang membentang ~ 2000 m waktu konstruksi 2 tahun dan baru 4 bulan digunakan oleh publik. Jembatan ini dijuluki Gerti Congklang karena suka berayun oleh angin, tetapi runtuh saat angin baru mencapai ~ 64 km/jam, yaitu pada jam 11 tgl Nopember 1940. Evaluasi kegagalan ini menyatakan kegagalan oleh kesalahan desain. Dalam analisis itu video dan data teknis lain telah banyak dipelajari di dunia. Bilangan Reynold dan dimensi bentangan jembatan mirip dengan pelat elemen bakar RSG GAS.

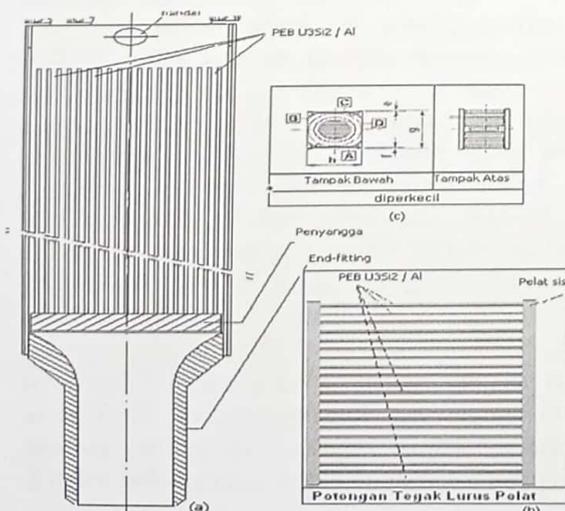
Dalam teknologi reaktor komersial, getaran terimbas aliran fluida telah menempati prioritas penanganan. Khususnya terkait dengan jenis korosi dan aus oleh fretting terkait getaran terimbas aliran air, yang merupakan persoalan kinerja elemen bakar reaktor daya.

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 jauh 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 ditunjukkan pada gambar 1 dan 2.



Gambar-1. Pelat elemen bakar nuklir RSG-GAS dengan 3 posisi pengukuran ketebalan, serta posisi zona daging [2]

Elemen bakar RSG menggunakan jenis bahan bakar  $U_3Si_2$  terdispersikan dalam Al ( $U_3Si_2$ -Al) yang sangat stabil dan berdensitas tinggi. 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 pada RSG fraksi volume  $U_3Si_2$  ~40%. 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-2Mg), dirol panas pada suhu  $425^\circ C$  (4 tahap) dan dirol 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 kontan. Al 1100: aluminum murni kualitas komersial sangat bagus sifat-sifat mudah 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].



Gambar-2. Tampak potongan memanjang tegak lurus lebar pelat(a) dan tegak lurus panjang pelat (b) dan tampak luar, serta (c) zoom Gb.2.c.b[2]

Analisis dari masalah interaksi zalir-struktur dari kepentingan besar pada beberapa rekayasa seperti bidang nuklir, mekanik, laut dan ilmu penerbangan. Pada kasus hubungan struktur dengan satu medium zalir terbatas, pembebanan reaktif yang alir dapat berpengaruh significant mempengaruhi tanggapan struktur.

Makalah ini menyajikan pengaruh ikatan pelat elemen bakar pada dinding/bingkai dari prototipe elemen bakar uji berbahan bakar  $U_3Si_2$  densitas tinggi. Dianalisis konfigurasi pelat elemen bakar pada berkas / elemen bakar uji sebagai SS-F-SS-F (dua sisi lebar bebas, Free, dan dua sisi panjang tertopang sederhana, Simple Supported) untuk perakitan tanpa rol gencet, dan konfigurasi ER-F-ER-F (dua sisi lebar bebas, Free, dan dua sisi panjang terikat elastis, Elastically Restrained) untuk perakitan standar, yaitu pelat terpasang dilakukan rol gencet dengan kekuatan ikat minimum 37 N/mm.

Masalah terpenting pada desain elemen bakar reaktor nuklir seperti ini adalah potensi ketidakstabilan hidrodinamik sehubungan dengan aliran air pendingin selama reaktor operasi. Tanggapan dinamis dari satu lempeng dengan tepi ER-F-ER-F tidak dapat diselesaikan secara pasti karena akibat eigenfunctions tidak dapat dipisahkan, maka didekati dengan menumpukkan di atas kekakuan rotasional terdistribusi ( $K_s$ ) sepanjang tepi (SS). Selain itu, tanggapan dari suatu struktur dalam hubungan dengan suatu zalir tidak dapat diselesaikan secara pasti sehubungan dengan perpasangan intermodal di antara zalir dan struktur.

Tanggapan dinamis dari suatu lempeng dengan tepi ER-F-ER-F dideskripsikan kira-kira oleh suatu solusi dari dua lempeng bertepi SS-F-SS-F, salah satu dibebani oleh gaya external lateral dengan syarat batas homogen dan lempeng lain dirangsang oleh momen garis tersebar sepanjang dua tepi SS yang saling berhadapan. Karenanya tanggapan dinamis suatu lempeng dengan tepi ER-F-ER-F diekspresikan sebagai bentuk deret tak-berhingga berlandaskan fungsi eigen pelat bertepi SS-F-SS-F. Untuk persamaan berpasangan antara pelat dan zalir, digunakan teori lempeng tipis dan persamaan gelombang homogen. Dengan mempergunakan cara transformasi Fourier dan bidang kompleks, pembebanan fluida reaktif ditaksir. Sebenarnya pembebanan reaktif yang alir diteliti pada daerah-frekuensi rendah. Akhirnya frekuensi alami didalam zalir dari satu lempeng dengan tepi ER-F-ER-F ditaksir untuk sistem zalir-struktural yang mempunyai satu sampai lima lempeng. Syarat batas tepi dievaluasi dengan variasi kekakuan rotasional

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

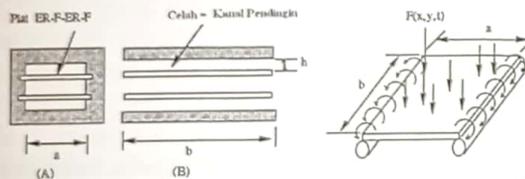
Banyak percobaan telah dilakukan untuk mendeskripsikan aliran yang mempengaruhi getaran

dan ketidakstabilan rakitan bahan bakar pelat sejajar, yang diringkas oleh Davis dan Kim, 1991. Untuk meningkatkan hasil analisis, Davis dan Kim mengembangkan satu model interaksi struktural fluida untuk struktur berpelat tunggal. Dengan model ini, mereka memberikan 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 [7].

## II. TATA KERJA

Analisis getaran dan ketidakstabilan dari rakitan bahan bakar pelat sejajar terimbas aliran dilakukan dengan model yang dikembangkan oleh [3]. Model ini, berdasarkan pada asumsi bahwa: (a). pelat sejajar dengan dua ujung sisi lebar bebas, pada Gb.3(a). tampak lebar = a sedangkan dua ujung sisi panjang tersambung sempurna pada Gb. 3(b) tampak panjang saluran = b (b) semua pelat punya pembelokan yang sama pada setiap saat seperti Gb 3(c). Asumsi ini mendekati nilai benar untuk pelat makin tipis dan celah alur di antara pelat makin sempit, yaitu bila pada Gb.4 untuk nilai  $b/a \gg$  dan  $b/h \gg \gg$ . 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.

Persamaan tanggapan pelat sisi panjang terikat dan sisi lebar bebas (ER-F-ER-F) oleh aliran fluida dengan menggunakan bentuk deret moda normal persamaan (1)



Gambar-3. Model interaksi pelat sejajar 2 sisi bebas dan 2 sisi terikat dalam aliran fluida: tampak melintang (a) dan membujur (b) struktur, dan diagram kesetimbangan mekanik (c) [3]

$$N_{mn}B_{mn}W_{mn} = F_{mn} \quad (1)$$

Dengan  $N_{mn}$  adalah sifat ortogonalitas,  $B_{mn}$  pengaruh massa pelat sebesar

$$B_{mn} = M_p (w_{mn}^2 - w^2) \quad (2)$$

$M_p$  adalah massa pelat,  $w$  frekwensi dan  $W_{mn}$  amplitudo. Fungsi pembebanan normal,  $F_{mn}$  merupakan integral nilai eigen pelat dikalikan fungsi pembebanan samping,  $f(x,y)$ :

$$F_{mn} = \int_0^a \int_0^b \psi_{mn}(x,y) f(x,y) dx dy \quad (2)$$

diekspresikan sebagai satu fungsi eigen ( $J_{mn}$ ) dari satu pelat SS-F-SS-F dan fungsi paksaan cabang samping,  $f(x,y)$ . Fungsi paksaan samping diperlakukan secara terpisah ke dalam dua komponen terimbas kekuatan

oleh aliran bergolak berkembang sepenuhnya, yang mempunyai gerak bebas dan gerak bergantung gaya, serta tekanan akustik.

Getaran pelat dipengaruhi oleh aliran bergolak mungkin menghasilkan geseran dari lapisan fluida pada permukaan pelat, yaitu diasumsikan bergetar sesuai moda vacuum pelat. Ketika fluida pada permukaan lentur dari pelat bergetar pada mode yang sama dari suatu pelat, reaksi fluida memasukkan pengaruh massa tambahan kepada massa pelat total, yaitu dinamai pembebanan fluida. Pembebanan fluida dihubungkan dengan bentuk vacuum dari satu pelat dan punya kontribusi terbesar pada daerah di sekitar moda bilangan gelombang dari pelat.

Telah dikenal perilaku dinamis dari satu pelat di dalam fluida densitas tinggi seperti air itu bahwa berubah sehubungan pengaruh pembebanan fluida. Untuk kasus pelat segi-empat bergetar di air, didalam masa dasa warsa yang lalu sejumlah banyak usaha telah dilakukan untuk menyelidiki akibat pemuatan/pembebanan alir. Davies, Paus dan Leibowitz menaksir akibat pemuatan fluida untuk suatu pelat dengan semua tepi hanya didukung sederhana dengan mempergunakan fungsi modal wavenumber dan fungsi Delta Kronecker [3]. Lomas dan Hayek menghitung tetapan proporsionalitas akibat pemuatan fluida atas suatu pelat dengan tepi sepenuhnya terkelam [4]. Gimán telah menghitung perkiraan tetapan dari proporsionalitas akibat pemuatan fluida suatu pelat dengan tepi SS-F-SS-F. Akibat pemuatan fluida dapat dideskripsikan sebagai koefisien pemasangan antarmoda:

$$J_{mnr} = J_x + iJ_r \quad (3)$$

dimana  $J_x$  adalah komponen reaktif dan  $J_r$  adalah komponen hambatan, sedangkan indice,  $m$ ,  $n$ ,  $q$ , dan  $r$  mewakili bilangan moda. Komponen reaktif merupakan penyokong utama kepada tambahan pengaruh massa pada daerah frekwensi rendah. Tapi komponen hambatan adalah dapat diabaikan pada daerah frekwensi rendah sehubungan dengan efisiensi kecil.

Untuk pelat segi-empat tipis tunggal ER-F-ER-F bergetar didalam fluida terbatas, persamaan dari gerak bebas menjadi :

$$\omega_{mn}^2 - \omega^2 \left( 1 + \frac{2\rho H_{mn} \chi_{mn}}{M_p k_{mn}} \right) = 0 \quad (4)$$

dimana  $H_{mn} = \coth(k_{mn}h)$  adalah parameter ketinggian alur,  $k_{mn}$  adalah bilangan moda gelombang dari suatu pelat ER-F-ER-F,  $h$  adalah ketinggian alur dan  $\chi_{mn}$  adalah tetapan dari proporsionalitas untuk efek/akibat pemuatan fluida pada satu pelat dengan tepi SS-F-SS-F. Oleh karenanya, frekuensi alami didalam fluida ( $w_{mn}$ ) untuk model pelat tunggal ditaksir seperti:

$$\omega_{mn}^f = \frac{\omega_{mn}}{\sqrt{1 + \frac{2\rho H_{mn}\chi_{mn}}{k_{mn}M_p}}} \quad (5)$$

Dimana  $\rho$  adalah kepadatan fluida. Pada persamaan (5), kalau ketinggian alur naik tanpa batas, parameter ketinggian alur menjadi kesatuan dan demikian nilai dari frekuensi adalah sama halnya itu dari satu pelat pada sarana fluida tanpa batas. Dengan cara serupa, model frekuensi alami didalam fluida untuk dua pelat dapat diekspresikan dengan bentuk seperti:

$$\begin{bmatrix} \omega^2 \left(1 + \frac{2\rho H_{mn}\chi_{mn}}{k_{mn}M_p}\right) - \omega_{mn}^2 & -\frac{\rho\chi_{mn}\omega^2}{k_{mn}M_p H_2} \\ -\frac{\rho\chi_{mn}\omega^2}{k_{mn}M_p H_2} & \omega^2 \left(1 + \frac{2\rho H_{mn}\chi_{mn}}{k_{mn}M_p}\right) - \omega_{mn}^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (6)$$

dimana  $H_2 = -2 \sinh(k_{mn}h)$ . Persamaan (6) melibatkan akibat dari gerak pelat berdekatan. Demikian juga, model pelat banyak, frekuensi alami di dalam fluida dapat ditaksir dengan menambahkan efek dari pelat pada model.

#### Alternatif

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

$$D\nabla^4 w + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -P \quad (7)$$

D adalah kekakuan flexural / 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 daya gerak air pendingin mengalir di sekitar pelat-pelat dapat digambarkan melalui persamaan,

$$P = M_c \left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 w \quad (8)$$

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:

$$D\nabla^4 w + (M+M_c) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + 2M_c u \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + M_c u^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (9)$$

#### A. SOLUSI UNTUK FREKUENSI ALAMI

Dengan mempergunakan transformasi Fourier untuk Persamaan (9) pada x, w, t, persamaan eigen diperoleh seperti berikut

$$D(k_m^2 + k_n^2)^2 - (M+M_c)\omega_{mn}^2 - 2M_c u k_m \omega_{mn} - M_c k_m^2 u^2 = 0 \quad (10)$$

dimana  $k_m$  adalah bilangan moda gelombang arah bujur,  $k_n$  adalah bilangan moda gelombang arah

samping,  $\omega_{mn}$  adalah frekuensi alami. Untuk nilai  $k_m \geq 0$ ,  $k_n \geq 0$ ,  $\omega_{mn} \geq 0$  dan  $u \geq 0$ , Persamaan (10) dapat ditulis ulang seperti x

$$\omega_{mn}^2 \pm \frac{2M_c}{M+M_c} k_m u \omega_{mn} + \frac{M_c}{M+M_c} k_m^2 u^2 - \frac{M}{M+M_c} \omega_{mn}^2 = 0 \quad (11)$$

dimana

$$\omega_{mn}^* = \sqrt{\frac{D}{M}} (k_m^2 + k_n^2) \quad (12)$$

$\omega_{mn}$  adalah frekuensi alami dari pelat di ruang hampa.

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

#### B. KECEPATAN KRITIS UNTUK KETIDAK-STABILAN STATIS

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

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{M}{M_c}} \frac{\omega_{mn}^*}{k_m} \quad (13)$$

Substitusi dengan persamaan-(11) dapat mengubahnya menjadi:

$$u_{cr} = \sqrt{\frac{D}{M_c}} \left( k_m + \frac{k_n^2}{k_m} \right) \quad (14)$$

$u_{cr}$  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*).

$$u_{cr} \approx 2 \sqrt{\frac{D}{M_c}} k_n \quad (15)$$

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

#### C. KECEPATAN UNTUK RESONANSI

Pada peristiwa getaran tergugah pual (vortex), hubungan di antara frekuensi pual pergantian-penanggalan (*shedding vortex*)  $\omega_s$  dan kecepatan aliran u dinyatakan dengan persamaan (10)

$$\omega_s = 2\pi S/h \quad (16)$$

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

$$u_{vr} = \left( \frac{M}{4\pi^2 S^2 (M+M_c) \pm 4\pi S M_c k_m h + M_c k_m^2 h^2} \right)^{1/2} \omega_{mn}^* h$$

atau

$$u_{vr} = \left( \frac{D}{4\pi^2 S^2 (M+M_c) \pm 4\pi S M_c k_m h + M_c k_m^2 h^2} \right)^{1/2} (k_m^2 + k_n^2) h \quad (17)$$

Untuk rasio massa lebih besar  $(M-M_c)/M_c \gg 1$  dan moda lebih rendah  $k_m h \ll 1$ , 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, kemudian minimum dekat dari kecepatan pual pergantian-penanggalan, *shedding vortex*, adalah :

$$u_{vr} \approx \sqrt{\frac{D}{H+M_c}} \frac{k_n^2 h}{2\pi S} \quad (18)$$

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aplikasi model ini menggunakan data geometri berkas elemen bakar uji (EBU) RSG seperti pada Gambar 1 dan 2, sebagai berikut: lebar pelat  $a = 7.07$  cm, panjang pelat  $b = 76.2$  cm, ketebalan pelat  $h = 0.138$  cm, ketebalan celah/saluran  $h_c = 0.254$  cm, serta data sifat-sifat kepadatan/densitas pelat  $P = 6.5 \times 10^{-3}$  kg/cm<sup>3</sup>, kepadatan pendingin  $P_c = 1.0 \times 10^{-3}$  kg/cm<sup>3</sup> modulus lenteng pelat  $E = 68.95$  GPa, Rasio Poison,  $\nu = 0.3$ , dan data desain kecepatan aliran pendingin  $u = 8$  m/s, bilangan dihitung menghasilkan 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 dengan mengelam sempurna ke dinding rakitan.

Hasil ini sesuai dengan penemuan Guo dan Paidoussis yaitu frekuensi dan percepatan kritis ditemukan menyusut bila panjang pelat bertambah dan juga apabila celah aliran menyempit [8].

Frekuensi alami dari satu sistem pelat segi-empat didalam fluida ditemukan sebagai suatu fungsi aspek rasio pelat, syarat batas bingkai, kedalaman fluida, dan jumlah pelat pada sistem. Frekuensi alami didalam fluida menyusut sesuai penyusutan kedalaman fluida. Juga menyusut bila jumlah pelat tersusun paralel bertambah sehubungan dengan interaksi antar plat [11].

### IV. KESIMPULAN

1. Kecepatan minimum batas statis adalah jauh lebih tinggi dibandingkan kecepatan desain. Apabila kecepatan minimum dicapai akan terjadi defleksi maksimum, oleh karena itu desain dan pengoperasian kecepatan alir perlu cukup jauh dari batas minimum ini.
2. Kecepatan minimum untuk resonansi pual (vortex) menumpahkan adalah kurang dari kecepatan desain, jadi kecepatan berdasar desain berada di dalam jangkauan dari kecepatan minimum untuk resonansi Pual menumpahkan. Oleh sebab itu, fenomenum ini harus dipertimbangkan pada desain dalam hal gagl kelelahan. Dari sisi transfer panas resonansi pual menguntungkan.
3. Kecepatan minimum batas statis dan kecepatan minimum untuk resonansi pual menumpahkan bagi pelat terkait sempurna pada dinding rakitan adalah lebih tinggi dibandingkan bagi pelat tertumpu sederhana pada dinding rakitan.

### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kolega Ir. Sukarman Amindjopyo, SU, APU dan Ir. Sukarsono, SU, APU yang telah membantu memeriksa naskah ini dan saran perbaikan.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] [http://www.engineersedge.com/Plate\\_Specifications-Engineers\\_Edge.htm](http://www.engineersedge.com/Plate_Specifications-Engineers_Edge.htm), 2008.
- [2] BRIYATMOKO, B., dkk, Laporan Analisis Keselamatan Inseri Elemen Bakar Uji U3Si2/Al Densitas 4.8 dan 5.2 gU/ml, PTBN-BATAN, Jakarta, 2008.
- [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. vol. 16: pp. 102-105, 1958.
- [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) Elsevier Science Publishers B.V. 1 J01/11, 1993.
- [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.
- [8] C.Q. GUO AND M.P. PAIDOUSSIS, "Analysis of Hydroelastic Instabilities of Rectangular Parallel-Plate Assemblies", J. Pressure Vessel Technol, Volume 122, Issue 4, 502 (7 pages), November 2000
- [9] Encarta Encyclopedia 2009
- [10] DHARMARAJU4 , K. K. MEHER4 AND A. RAMA RAO4, Vibration Laboratory Section, Reactor Engineering Division, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, 400085, India
- [11] KIM, Y.H. et al. Fretting wear of fuel rods due to FIV, Trans. 14th SMiRT et al., Trans of the 14th Int. Conf. Structural Mechanics in reactor technology (Lyon, Frence, Agustus 1997.

LAMPIRAN

TABEL 1.  
DATA UJI DIMENSI EBU [2]

Dimensi	Nominal, mm	Aktual, mm
a	144.70 -	145.10
b	40.10 - 40.40	40.28
c	37.80 - 38.05	37.86
d	868.0 - 869.0	868.50
e	0.975 - 1.225	1.07
f	0.975 - 1.225	0.99
g	80.40 - 80.60	80.54
h	75.80 - 76.10	75.97
l	$A/B < 0.3$	0.05
	$A < 0.3$	0.08
//	$C/A < 0.3$	0.15
//	$D/B < 0.3$	0.10
Test sumbat dengan alat <b>PLUG GAGE</b>		memenuhi syarat

TABEL 2.  
DATA TERUKUR DIMENSI LUAR PEB [2]

No	No.PEB,	Panjang, mm	Lebar,mm	Tebal,mm	Letak No PEB pd Pelat Sisi
1	CBBJ 249	629,00	70,70	1,40	Alur 3
2	CBBJ 250	629,00	70,71	1,39	Alur 7
3	CBBJ 251	629,00	70,70	1,39	Alur 19
4	CBBJ 252	629,00	70,71	1,38	Alur 3
5	CBBJ 253	629,00	70,70	1,39	Alur 7
6	CBBJ 254	629,00	70,70	1,39	Alur 19

TABEL 3.  
DATA TEBAL TERUKUR PEB U3Si2-AL [2]

Uraian	Nilai
Tebal PEB	1,30 + 0,10/- 0,07 mm
Tebal kelongsong minimal	0,25mm
Kuat ikat spesimen	27 - 135 N / mm
Tebal Celah	2,30 - 2,80 mm