

PENENTUAN WAKTU TRANSPORT NITROGEN-16 (^{16}N) DI KOLAM REAKTOR SERBA GUNA "G. A. SIWABESSY"

oleh : Pudjijanto MS.

ABSTRAK

PENENTUAN WAKTU TRANSPORT NITROGEN-16 (^{16}N) DI KOLAM REAKTOR SERBA GUNA "G. A. SIWABESSY". Dalam penelitian ini diasumsikan reaktor mula-mula beroperasi normal pada tingkat daya nominal 30 MW_{th}, kemudian terjadi gangguan yang menyebabkan pompa primer RSG-GAS (JE01) mati, reaktor pancung dan sistem lapisan air hangat (KBE02) tidak berfungsi. Dengan debit air nominal sebesar $Q = 0,86$ Mgram/detik (SAR), beda suhu inlet dan outlet teras adalah $\Delta T = 8,33$ °C (SAR = 8,70 °C). Suhu inlet teras sama dengan suhu permukaan kolam reaktor. Dalam perhitungan konservatif diandaikan $T_{in} = 40,2$ °C (= SAR) dan $T_{out} = 48,53$ °C (SAR = 48,90 °C). Perbedaan suhu antara kedua tempat pengamatan yang terpisahkan sedalam $H = 1055$ cm ini (SAR = 1000 cm) menimbulkan perbedaan rapat massa air, yaitu $\rho_d = 0,9921$ g/cm³ (air permukaan, dingin) dan $\rho_p = 0,9887$ g/cm³ (air kedalaman, panas). Karena $\rho_d > \rho_p$, maka air kedalaman (lebih panas) akan mengapung naik ke permukaan. Atom-atom bebas ^{16}N dan molekul-molekul senyawa nitrogen lain yang mengandung ^{16}N yang terbentuk dari proses aktivasi ^{16}O menurut reaksi nuklir endoergik $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$ dan terlarut dalam air kedalaman yang panas dengan $\rho_p < \rho_d$, akan naik secara global ke permukaan karena adanya gaya apung F^{\uparrow} . Adanya kekentalan air, $\eta = 0,6506$ mPa-det (pada T_{in}), maka gerakan air panas ke atas akan mengalami gaya hambat F^{\downarrow} karena adanya gesekan dengan molekul-molekul air dingin di sekitarnya. Besarnya gaya gesek ini sebanding dengan kuadrat kecepatannya. Berdasarkan besaran-besaran fisis dan teknis yang diketahui, termasuk percepatan gravitasi bumi setempat, maka kecepatan terminal v_p dapat ditentukan sebesar 25,59 cm/detik dan waktu transport ^{16}N t_{tr} terhitung sebesar 46,42 detik. Pada saat itu, konsentrasi ^{16}N telah meluruh menjadi $\sim 1\%$ dibandingkan aktivitas semula di kedalaman teras. Dengan diperolehnya waktu transport radionuklida ini bisa ditentukan konsentrasi ^{16}N di permukaan kolam reaktor yang dapat digunakan sebagai bahan asupan guna mengevaluasi keselamatan radiasi serta unjuk kerja sistem lapisan air hangat.

ABSTRACT

DETERMINATION OF TRANSPORT TIME FOR NITROGEN-16 (^{16}N) IN REACTOR POOL OF MULTIPURPOSE REACTOR "G. A. SIWABESSY". The investigation reported in this paper was assumed that the reactor in early normal operation condition on 30 MW thermal power. Then happened a disturbance cause the primary cooling pumps system (JE01) was loss of electrical power and warm water layer system (KBE02) located under surface of pool water of MPR-GAS was no function. On this level of power, nominal debit of cooling water according to SAR was 0.86 Mgram/sec, then the different of the inlet and outlet temperatures was $\Delta T = 8.33$ °C (SAR = 8.70 °C). The core inlet temperature was the same with the temperature of the surface water. In this conservatively calculation was assumed $T_{in} = 40,2$ °C (= SAR) and $T_{ou} = 48,53$ °C (SAR = 48,90 °C). The different temperatur of the both different location points separated by $H = 1055$ cm deep of water (SAR = 1000 cm) caused the different in the water density. The density of surface water was 0,9921 g/cm³ and the deepth water density was 0,9887 g/cm³. Because ρ_d greather than ρ_p , the warmer deepth water will bouyance to surface of the pool. Free atoms and molecules of ^{16}N formed and soluted in the deep primary water will bouyance up to surface of pool water globally by bouyance force. Due to water viscosity, $\eta = 0,6506$ mPa-det (on T_{in}), during up ward movemet it would be hold by the drag force F^{\downarrow} , caused by friction with molecoles of cold water at the vicinity. The drag force was proportional directly to quadrat of it velocity. If the given debit of primary water, the transit time of water in the core, global volume of hot water, equivalence sphere radius and acceleration of gravitation were known, the terminal velocity and the transport time of ^{16}N can be determined together, there were $v_p = 25,59$ cm/sec and $t_{tr} = 46,42$ sec respectively. After the transport time of this radionuclide was determined, the radioactivity concentration of ^{16}N at the surface of water pool of MPR-GAS culd be use to evaluate radiation safety and performance of warm water layer system.

PENDAHULUAN

Diasumsikan terjadi kegagalan operasi sistem primer RSG-GAS (JE01) ketika reaktor beroperasi pada tingkat daya nominal 30 MW_{th} dan kebetulan pada saat yang sama sistem lapisan air hangat (KBE02) tidak berfungsi atau gagal. Pada makalah ini akan dihitung berapa lamanya waktu yang diperlukan bagi radionuklida nitrogen-16 (untuk selanjutnya, dinotasikan dengan ¹⁶N) hasil aktivasi air pendingin primer untuk transport dari teras ke permukaan kolam. Dengan diperolehnya waktu transport ¹⁶N dan dengan diketahuinya konsentrasi awal radionuklida ini ketika masih berada di teras reaktor, bisa ditentukan konsentrasinya di permukaan kolam reaktor yang dapat digunakan sebagai asupan guna mengevaluasi keselamatan radiasi serta unjuk kerja sistem lapisan air hangat. Oleh karenanya maka penelitian ini perlu dilakukan untuk menentukan waktu transport ¹⁶N di kolam reaktor RSG-GAS.

Penelitian ini dilakukan dengan menentukan konsentrasi radioaktivitas ¹⁶N di dalam teras dan menentukan waktu transport dengan berdasarkan teori transport dan prinsip gaya apung (Gaya Archimides) dan gaya hambat (gaya Stokes). Radioaktivitas dalam zalir (cairan ≡ air sebagai zat alir) pendingin primer reaktor merupakan sumber radiasi eksternal yang cukup potensiil pada sebuah reaktor nuklir. Radioaktivitas ini berasal dari berbagai macam sumber, yaitu : (1) aktivasi neutron terhadap zalir pendingin primer itu sendiri, (2) aktivasi atom-atom pengotor yang terkandung dalam zalir pendingin primer, dan (3) pengikisan atom-atom radioaktif yang melekat pada dinding-dinding permukaan saluran pendingin dan kelongsong luar bahan bakar dalam teras reaktor oleh zalir pendingin primer. Serapan neutron oleh ketiga isotop oksigen alam (¹⁶O, ¹⁷O dan ¹⁸O) yang terikat dalam molekul air

(H₂O) yang berfungsi sebagai moderator, perisai radiasi dan pendingin primer cenderung memancarkan sinar gamma hasil aktivasi dalam air pendingin primer. Sinar atau foton gamma ini disebut foton gamma sekunder, untuk membedakannya dengan foton gamma primer yang berasal dari proses pembelahan baik seketika maupun kasip dari inti-inti berat yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir sebagai akibat terinduksi oleh neutron (termal : ²³⁵U fisil / cepat : ²³⁵U fertil) di dalam teras reaktor. Sebagai contoh di sini, reaksi ¹⁶O(n,p)¹⁶N yang dihasilkan oleh iradiasi neutron cepat dari air adalah yang paling penting. Reaksi ini disebut *endoergik* karena bersifat endotermis dengan tenaga ambang 10,2 MeV, yang cenderung memancarkan sinar gamma bertenaga tinggi dalam peluruhan radioaktif berantai dari ¹⁶N. Proses ini dapat menyebabkan bangkitnya sinar gamma hasil aktivasi dalam jumlah yang cukup berarti untuk terlepas dalam air pendingin primer. Ditinjau dari segi radiologis, dampak dari hasil reaksi ¹⁷O(n,p)¹⁷N dan ¹⁸O(n,p)¹⁸N tidak begitu berarti dibandingkan dengan ¹⁶N. Molekul ¹⁶N yang terbentuk dari aktivasi dalam teras, karena pemanasan maka rapat massanya akan menurun dan akan naik ke permukaan dengan adanya gaya apung dan mengalami hambatan karena gesekan dengan molekul-molekul air (gaya Stokes).

Teori yang mendasari perhitungan waktu transport ¹⁶N diberikan pada bab II. Dalam bab itu akan dijelaskan antara lain mengenai : Model transport ¹⁶N termal, Gaya gesek dari air primer yang lebih dingin terhadap global air panas yang berasal dari teras (gaya Stokes) dan gaya apung global air panas terhadap air dingin di sekitarnya (gaya Archimides), kecepatan terminal, posisi dan kecepatan sesaat serta waktu transport dari global air panas yang mengandung ¹⁶N terlarut dalam gerakannya mengapung ke atas.

Posisi dan kecepatan sesaat secara berturut-turut berkorelasi dalam bentuk persamaan diferensial derajat dua dan satu terhadap waktu. Karena kedua persamaan dimaksud begitu kompleks sehingga sulit diselesaikan secara analitis, maka ditempuh cara penyelesaian secara numerik, yaitu secara integral simultan dengan menggunakan metode Runge-Kutta orde-4. Variabel percepatan didekati dengan suatu fungsi yang hampir sebanding dengan kuadrat kecepatan, dengan parameter kesebandingan yang bergayut pada koefisien gesekan. Sementara koefisien gesekan adalah fungsi dari bilangan Reynold yang juga merupakan fungsi dari kecepatan itu sendiri. Kesulitan dalam merumuskan koefisien gesekan secara matematis yang berlaku umum untuk sepanjang rentang bilangan Reynold dari daerah Stokian ($R_e <<$) hingga daerah Newtonian ($R_e >>$) diatasi dengan merumuskannya secara rejim demi rejim. Dalam hal ini disajikan 5 (lima) rejim aliran, yaitu : ① daerah Hukum Stoke, ② aliran laminar, ③ aliran transisi laminar-turbulen, ④ aliran turbulen dan ⑤ aliran transisi turbulen-Newtonian. Mengingat rumus-rumus pendekatan dimaksud hanya berlaku khusus untuk rejim yang bersangkutan saja, maka di daerah perbatasan antara dua rejim perlu diperlakukan khusus pula, yaitu diambil nilai rerata dua rejim di titik batas itu.

Dengan terjawabnya posisi dan kecepatan sebagai fungsi dari waktu tempuh, maka pada posisi yang diberikan (permukaan air kolam) dapat dapat ditentukan waktu tempuh yang ditanyakan (waktu transport).

DASAR TEORI DAN METODE

A. Model Transport ^{16}N Termal ^{11/}

Untuk 40 perangkat elemen bakar termasuk 8 perangkat elemen kendali yang dimuat di dalam teras RSG-GAS

dimungkinkan dapat terjadi kecelakaan kriticalitas apabila terjadi penyisipan reaktivitas positif tertentu. Andaikan bahwa koefisien perpindahan bahang besar (laju perpindahan bahangnya besar karena bahan bakar oksida mempunyai difusivitas termal yang relatif besar) dan bahwa perpindahan panasnya terus-menerus sampai suhu kesetimbangannya tercapai (suhu bahan bakar = suhu air), maka suhu akhir dari air di sekeliling bahan bakar dalam teras akan naik menjadi $\approx 100^\circ C$. Oleh karenanya, di situ cenderung akan terjadi perpindahan massa air ($T_{jenuh} \approx 120^\circ C$ pada tekanan $p = 2$ bar pada lokasi 10 m di bawah permukaan air). Akan tetapi, sebagaimana campuran antara air (cairan) dan uap air (gas) mulai meningkat melalui air dingin, perpindahan bahang dua fase (dari uap air ke cairan air dingin) akan menghasilkan dalam bentuk pengembunan fase uap lagi, meningkatkan suhu sekeliling air. Oleh karenanya, perandaian (model konservatif) dibuat agar bahang akan berpindah dari bahan bakar yang terpanasi ke air sampai suhu bahan bakar mencapai suhu pendidihan air ($T_{jenuh} = 120^\circ C, p = 2$ bar, $H = 10$ m di bawah permukaan air).

Jika diandaikan bahwa seluruh bahang yang dilepaskan oleh bahan bakar ini digunakan sepenuhnya untuk memanasi air sampai mencapai suhu $120^\circ C$, maka nilai yang terhitung dari kesetimbangan bahang adalah :

$$m_f \int_{T_{jenuh}}^{T_{awal} + T_{fisi}} C_{p,f}(T) dT = C_{p,w} m_p (T_{jenuh} - T_{awal}) \quad (1)$$

di mana :

$C_{p,f}$ \equiv panas jenis dari bahan bakar U_3O_8 -Al sebagai fungsi suhu T , secara empiris dirumuskan sebagai

$$C_{p,U_3O_8-Al} = \{0,892 + 0,00046.T - W_u(0,734 + 0,00019.T)\} \text{joule/gr.}^\circ C \quad (2)$$

Untuk RSG-GAS, dengan $W_u =$ fraksi berat uranium dalam daging bahan

bakar diketahui, panas jenis dari bahan bakar U_3O_8 -Al dapat dirumuskan sebagai :

$$C_{p,f} = C_{p,U_3O_8-Al}(T) \cong (0,12134 + 0,0000863 \cdot T) \frac{\text{kcalori}}{\text{gram} \cdot ^\circ\text{C}} \quad (3)$$

$C_{p,w}$ = panas jenis dari air kolam

Diandaikan konstan =

1,0 kalori/(gram \cdot $^\circ$ C);

m_f = massa bahan bakar U_3O_8 -Al =

110,580 kg, setara dengan

11,428 kg U-235

m_p = massa dari air yang terpanasi =

189,2 kg

Begitu perpindahan bahang dimulai, air yang berkurang rapat massanya akan memulai bergerak naik pada saat itu juga, membangkitkan arus konveksi alam.

Hasilnya akan ada sejumlah massa air (pada suhu yang lebih rendah) bergerak naik ke atas dengan kecepatan yang lebih rendah (hal ini disebabkan oleh karena gaya apung yang lebih kecil, karena rapat massanya berbeda dari air di sekelilingnya akan kecil).

Hasil perhitungan dosis maksimum dari waktu ke waktu minimum. Ringkasnya, waktu penaikan terminisasi tercapai dengan mengandaikan skenario kejadian dari gaya apung maksimum, yang menghasilkan dari sejumlah minimum air yang terpanasi (memberikan sejumlah tenaga termal yang dapat digunakan dari kekritisasi).

Perpindahan massa air panas ini dimodelkan dengan sebuah persamaan diferensial derajat dua tunggal dari z terhadap t atau persamaan diferensial derajat satu tunggal dari v terhadap t , untuk percepatan a dalam arah aksial sebagai berikut.

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{dv_p}{dt} = a_p = \frac{1}{m_p} \cdot (F_\uparrow - F_\downarrow) \quad (4)$$

di mana :

z = posisi massa global air yang terpanasi terhadap permukaan teras, |cm|;

v_p = kecepatan massa global air yang terpanasi pada posisi z pada saat t , |cm/detik|;

a_p = percepatan massa global air yang terpanasi pada posisi z dan kecepatan v pada saat t , |cm/detik 2 |;

t = waktu berlalu yang dihitung sejak saat awal air panas meninggalkan teras, |detik|;

m_p = massa dari air yang terpanasi, |gram|;

F_\uparrow = gaya apung, |dyne|;

F_\downarrow = gaya hambat atau gaya gesek, |dyne|;

B. Gaya Gesek

Gaya gesek F_\downarrow dihitung sbb :

$$F_\downarrow = \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot \zeta_{gs} \cdot V_p^2 \cdot A_p \quad (5)$$

di mana :

A_p = luas tampang irisan dari massa air yang tepanasi, |cm 2 |, dirumuskan sebagai :

$$A_p = \pi \cdot r_p^2 \quad (6)$$

r_p = jejari massa air yang terpanasi, |cm|;

ζ_{gs} = koefisien gesekan (tanpa dimensi), sebagai fungsi dari bilangan Reynold;

v_p = kecepatan perpindahan massa air yang terpanasi, |cm|;

ρ_d = rapat massa air yang lebih dingin = 0,9922 gram/cm 3 (pada suhu 40 $^\circ$ C).

Koefisien gesekan ζ_{gs} seperti yang dilukiskan pada Gambar 1^{4, 5'}, dapat dinyatakan secara emperik sebagai fungsi dari bilangan Reynold, R_e , untuk subyek dengan geometri mirip atau setara bola^{6'}, yaitu persamaan (7), lihat Lampiran 2.

Bilangan Reynold (tanpa dimensi) dirumuskan sebagai :

$$R_e = \frac{\rho_{\text{air}} \cdot v \cdot \phi}{\eta} = \rho_{\text{air}} \cdot v \cdot \left(\frac{2 r_p}{\eta} \right) \quad (8)$$

di mana :

- ϕ \equiv diameter subyek mirip bola (dhi. global air yang terpanasi) = $2r_p$, |cm|.
- ρ_{air} \equiv rapat massa fluida (dhi. air) pada suhu yang ditinjau, |gram/cm³|.
- η_{air} \equiv viskositas fluida (dhi. air) pada suhu yang ditinjau, |gram/ (cm·detik)|.

Dalam program komputer yang dirancang untuk mengintegalkan persamaan gaya aksial ini, koefisien gesekan g_s sebagai fungsi bilangan Reynold R_e ditulis seperti yang dirumuskan pada persamaan (7) dan (8) untuk digunakan di setiap tahap waktu integrasi guna mendapatkan nilai sesaat bagi kedua besaran ini.

C. Gaya Apung ^{1, 2, 3, 4, 5/}

Gaya apung F_{\uparrow} diindikasikan oleh perbedaan antara rapat massa air yang terpanasi ρ_p dan rapat massa air di sekitarnya yang lebih dingin ρ_d , yaitu :

$$F_{\uparrow} = (\rho_d - \rho_p) \cdot g \cdot V_p = \rho_d \cdot \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_d} \right) \cdot g \cdot V_p \quad (9)$$

di mana :

- g \equiv percepatan gravitasi bumi (bergantung garis lintang geografis, ketinggian dari permukaan laut dan kandungan material di dalam bumi setempat); untuk daerah Serpong dan sekitarnya, $g = 980,665 \text{ cm/det}^2$;

V_p \equiv volume air yang terpanasi, |cm³|, dirumuskan sebagai :

$$V_h = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_h^3 \quad (10)$$

ρ_p \equiv rapat massa air yang terpanasi = 0,9887 gram/cm³ (pada suhu ~50 °C).

D. Kecepatan Terminal ^{1/1/}

Pada keadaan kesetimbangan di antara kedua gaya yang bekerja dengan arah yang saling berlawanan arah, yaitu dengan menyamakan antara gaya gesek F_{\downarrow} dan gaya apung F_{\uparrow} , dihasilkan suatu pernyataan untuk kecepatan terminal dari massa air yang terpanasi, v_{∞} sehingga memenuhi persamaan sbb. :

$$F_{\downarrow} = F_{\uparrow} \Rightarrow \frac{1}{2} \cdot \rho_d \cdot c_{gs} \cdot v_p^2 \cdot A_p = \rho_d \cdot \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_d} \right) \cdot V_p \quad (11)$$

Dengan memasukkan persamaan (6) dan (10) ke dalam persamaan (11), maka diperoleh pernyataan untuk $v_p = v_{\infty}$ sebagai :

$$v_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} v_p = \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{g \cdot r_p}{c_{gs}} \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_d} \right)} \quad (12)$$

Ini adalah kecepatan terminal bagi global air yang terpanasi. Akan tetapi, dari hasil analisis menunjukkan bahwa massa air yang muncul tidak mempunyai cukup waktu untuk mencapai kecepatan terminal yang dimaksud. Oleh karenanya, posisi dan kecepatan dari massa air yang terpanasi sebagai fungsi dari waktu harus dihitung dengan menggunakan integral numerik. Untuk itu maka persamaan diferensial derajat dua tunggal sebagaimana dinyatakan pada persamaan (4) di atas perlu diterapkan sebagai persamaan derajat satu sebagai berikut:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{dz}{dt} = \frac{dv}{dt} = \ddot{z} = \frac{\rho_d}{m_p} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_d} \right) \cdot g \cdot V_p - \frac{1}{2} \cdot c_{gs} \cdot v_p^2 \cdot A_p \right\} = a(v_p) \quad (13)$$

di mana :

$a = a_p = a(v_p)$ \equiv percepatan gaya gerak sebagai fungsi dari kecepatan v , |cm/det²|;

dan

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z} = v \quad (14)$$

Dengan memasukkan persamaan (6) dan (7) untuk aliran laminar, maka persamaan (13) dapat dimanipulasi untuk disajikan secara eksak sebagai persamaan (15), lihat Lampiran 2.

E. Posisi dan Kecepatan untuk Aliran Laminar

Persamaan (15) ternyata dapat dengan mudah untuk diselesaikan secara analitik dengan membawanya ke dalam bentuk persm. dif. derajat-1 sederhana seperti berikut :

$$\frac{dv_p}{v_p - \frac{P}{Q}} = -Q \cdot dt \quad (16)$$

yang memberikan penyelesaian untuk v_p sebagai :

$$v_p = \frac{P}{Q} + R \cdot \exp(-Q \cdot t) = v_\infty \cdot (1 - e^{-Q \cdot t}) \quad (17)$$

di mana :

$P \equiv$ percepatan ke atas sebagai akibat bekerjanya gaya apung Archimides (tanpa gesekan), $|\text{cm/det}^2|$, yang dirumuskan sebagai :

$$P = \left(\frac{\rho_d}{\rho_p} - 1 \right) \cdot g \quad (18)$$

$Q \equiv$ faktor pengereman ke arah bawah macam pertama, sebagai akibat bekerjanya gaya hambat Stokes untuk aliran laminar, $|\text{det}^{-1}|$, yang dirumuskan sebagai :

$$Q = \frac{6 \pi \cdot \eta \cdot r_p}{m_p} = \frac{6 \pi \cdot \eta \cdot r_p}{\frac{4}{3} \pi \cdot r_p^3 \cdot \rho_p} = \frac{9 \eta}{2 r_p^2 \cdot \rho_p} \quad (19)$$

$R \equiv$ tetapan integrasi yang mempunyai dimensi kecepatan, $|\text{cm/det}|$, yang harganya ditentukan dengan syarat awal yang memenuhi sebagai :

$$R = -\frac{P}{Q} \quad (20)$$

$v_\infty \equiv$ kecepatan terminal seperti persamaan (12) tetapi dalam bentuk khusus untuk aliran laminar, $|\text{cm/det}|$, yang

dirumuskan sebagai :

$$v_\infty = \frac{\frac{4}{3} \pi \cdot r_p^3 \cdot (\rho_d - \rho_p) \cdot g}{6 \pi \cdot \eta \cdot r_p} = \frac{2 r_p^2 \cdot (\rho_d - \rho_p) \cdot g}{9 \eta} \quad (21)$$

Jika $p = v_p/v_\infty$ adalah nilai banding antara kecepatan massa air panas pada saat tertentu terhadap kecepatan terminalnya, maka dari persamaan (17) dapat ditentukan waktu yang diperlukan untuk transport tersebut, yaitu :

$$t_{tr} = -\frac{\ln(1-p)}{Q}; 0,0 \leq p \leq 1,0 \quad (22)$$

Posisi massa air yang terpanasi pada saat t diselesaikan dengan mengintegalkan persamaan (17) terhadap waktu, yaitu :

$$\begin{aligned} z(t) &= v_\infty \cdot \int_0^t (1 - e^{-Q \cdot \tau}) \cdot d\tau \\ &= v_\infty \cdot \left(t - \frac{1 - e^{-Q \cdot t}}{Q} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

F. Waktu Transport ke Permukaan untuk Aliran Laminar

Untuk $z = H$ (tertentu), maka waktu yang diperlukan untuk transport bagi air yang terpanasi dari teras ke permukaan kolam reaktor dapat diselesaikan dari persamaan (23) secara iterasi numerik dengan menarik akar positif dari suatu fungsi $f(\xi)$ berikut.

$$f(\xi) = \xi + e^{-\xi} + b \quad (24)$$

di mana :

$b \equiv$ parameter tanpa dimensi yang besarnya dirumuskan sebagai :

$$b = -\left(1 + \frac{H \cdot Q}{v_\infty} \right) = -\left(1 + \frac{H \cdot Q^2}{P} \right) \quad (25)$$

$\xi \equiv$ peubah bebas tanpa dimensi yang pada harga ξ_0 tertentu memberikan harga fungsi $f(\xi_0) = 0$ berkorelasi dengan waktu transport yang diminta sebagai :

$$t_{tr} = \frac{\xi_0}{Q} \quad (26)$$

Dengan menggunakan metode iterasi numerik Newton-Raphson, akar ξ_0

terbaik bisa diperoleh dari perhitungan berulang berikut :

$$\begin{aligned} \xi_{i+1} &= \xi_i - \frac{f(\xi_i)}{f'(\xi_i)} = \xi_i - \frac{\xi_i + e^{-\xi_i} + b}{1 - e^{-\xi_i}} \\ &= \frac{(\xi_i + 1) \cdot e^{-\xi_i} + b}{e^{-\xi_i} - 1} \end{aligned} \quad (27)$$

G. Posisi dan Kecepatan untuk Aliran Tak Laminer ^{11, 6/}

Jika alirannya memberikan bilangan Reynold yang cukup besar ($R_e > 1,0$), maka penyelesaiannya harus dilakukan secara numerik dengan tahapan sebagai berikut :

Kecepatan $\dot{z}(t)$ dan posisi $z(t)$ massa air yang terpanasi secara diskrit tertahapi terhadap waktu t sebagai :

$$\dot{z}_{i+1} = \dot{z}_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} a(v, t) \cdot dt \quad (28)$$

$$z_{i+1} = z_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} v(t) \cdot dt \quad (29)$$

di mana waktu bertambah secara diskrit sebagai :

$$t_{i+1} = t_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} dt = t_i + \Delta t \quad (30)$$

Integral dari t_i ke t_{i+1} dilaksanakan dengan menggunakan teknik integrasi numerik kuadratur berdasarkan metode Runge-Kutta orde-4 ^{16, 7, 8, 9/} sebagai berikut :

Dari persamaan (13) dan dibandingkan dengan persamaan (15), percepatan a sebagai fungsi waktu t dapat disajikan lagi sebagai fungsi v dan t sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{dv_p}{dt} = \dot{v}_p = a(v_p, t) \\ &= a\{v_p(t)\} = P - S(v_p) \cdot v_p^2 \end{aligned} \quad (31)$$

di mana :

$S \equiv$ faktor pengereman ke arah bawah macam kedua yang masih merupakan fungsi dari kecepatan v , sebagai akibat bekerjanya gaya hambat umum untuk segala jenis aliran, $[\text{cm}^{-1}]$, yang dirumuskan

sebagai :

$$\begin{aligned} S &= S(v_p) = \frac{\frac{1}{2} \zeta_{gs} \cdot \rho_d \cdot v_p^2 \cdot A_p}{m_p} \\ &= \frac{\frac{1}{2} \zeta_{gs} \cdot \rho_d \cdot v_p^2 \cdot \pi \cdot r_p^2}{\frac{4}{3} \pi \cdot r_p^3 \cdot \rho_p} \\ &= \frac{3 \zeta_{gs} \cdot \rho_d}{8 r_p \cdot \rho_p} \approx 0,375 \frac{\zeta_{gs}}{r_p} \end{aligned} \quad (32)$$

dan integralnya untuk memperoleh kecepatan :

$$\frac{dz}{dt} = \dot{z} = v(t) \quad (33)$$

dengan syarat awal :

$$\dot{z}(0) = v(0) = v_o = 0 \quad (34)$$

$$z(0) = z_o = 0 \quad (35)$$

Kemudian diselesaikan secara tahap demi tahap waktu :

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \frac{1}{6} \cdot (F_{v1} + 2 F_{v2} + 2 F_{v3} + F_{v4}) \quad (36)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \frac{1}{6} \cdot (F_{z1} + 2 F_{z2} + 2 F_{z3} + F_{z4}) \quad (37)$$

di mana :

$$F_{z1} = \Delta t \cdot v_p; v_p = v_p(t) \quad (38)$$

$$F_{v1} = \Delta t \cdot a(v_p) \quad (39)$$

$$F_{z2} = \Delta t \cdot v_1; v_1 = v_p + \frac{1}{2} F_{v1} \quad (40)$$

$$F_{v2} = \Delta t \cdot a(v_1) \quad (41)$$

$$F_{z3} = \Delta t \cdot v_2; v_2 = v_p + \frac{1}{2} F_{v2} \quad (42)$$

$$F_{v3} = \Delta t \cdot a(v_2) \quad (43)$$

$$F_{z4} = \Delta t \cdot v_3; v_3 = v_p + F_{v3} \quad (44)$$

$$F_{v4} = \Delta t \cdot a(v_3) \quad (45)$$

H. Waktu Transport ke Permukaan untuk Aliran Tak Laminer

Pentahapan terhadap waktu perhitungan kecepatan v dan posisi z dihentikan pada saat t_i jika dipenuhi syarat batas :

$$z(t_i) \leq H \leq z(t_i + \Delta t) \quad (46)$$

dan waktu transport secara sederhana dihitung dengan interpolasi linier sebagai :

$$t_{tr} = t_i + \frac{H - z(t_i)}{z(t_i + \Delta t) - z(t_i)} \cdot \Delta t \quad (47)$$

HASIL PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Perhitungan

Berdasarkan atas rumusan yang telah disajikan di Bab-II, telah dibuat

paket program PC sederhana dalam bahasa FORTRAN-77 bernama N16VZT.FOR untuk menghitung kecepatan, posisi dan waktu transport ¹⁶N yang terkandung dalam air pendingin primer di kolam reaktor. Les dek sumber program ini disajikan terpisah dari bab ini dan dapat dilihat di lembar lampiran. Data masukan yang diperlukan di sini adalah : Tingkat daya operasi, P_{th} (MW), suhu inlet teras, T_{in} (°C), debit total pompa air pendingin primer, Q (kg/detik), waktu transit air di dalam teras, t_{core} (detik), dan kedalaman bidang inlet teras di bawah permukaan air kolam, H (meter). Luaran program yang terdiri dari data masukan (ricek) dan hasil perhitungan awal, transisi dan akhir disajikan sebagai berikut.

HASIL PERHITUNGAN PENENTUAN KECEPATAN DAN POSISI RARADIONUKLIDA YANG TERLARUT DALAM AIR PENDINGIN PRIMER REAKTOR TIPE KOLAM TERBUKA SEBAGAI FUNGSI WAKTU SEJAK DARI TITIK GERAKAN AWAL DI PERMUKAAN TERAS SAMPAI KE TITIK AKHIR DI PERMUKAAN AIR KOLAM

PROGRAMER: PUDJIANTO MS./NIP: 330001365, SBPDK,BKK, PRSG
PENGGUNA : YUS RUSDIAN ACHM /NIP: 330002378, SBPDK, BKK, PRSG

Data masukan dan perhitungan awal	
Daya operasi nominal,	PMW = 30.00 MW (termal).
Faktor konversi daya,	F_cal = .238846 J/kal.
Daya terkonversi,	P_con = 7165377. kal/det.
Debit air primer,	Q_prm = 860000. gram/det.
Panas jenis air,	Cp_a = 1.00 kal/(g.oC).
Beda suhu inlet/outlet,	DT_a = 8.33 oC.
Suhu inlet teras,	T_in = 40.20 oC.
Rapat massa air dingin,	Rho_d = .9921 g/cm3.
Viskositas air dingin,	Eta_d = .006506 g/(cm.det).
Suhu outlet teras,	T_ou = 48.53 oC.
Rapat massa air panas,	Rho_p = .9887 g/cm3.
Viskositas air panas,	Eta_p = .005611 g/(cm.det).
Waktu transit teras,	t_cor = .22 detik.
Massa air terpanasi,	M_p = 189200.0 gram.
Volume air terpanasi,	V_p = 191370.1 cm3.
Jejari air panas eqv.,	R_p = 35.74883 cm.
Beda rapat massa,	DRho = .003462 gram/cm3.
Percepatan gravitasi,	Grav = 980.6650 cm/det2.
DRho*Grav,	Drhog = 3.395546 g/cm2/det2
Gaya apung ke atas,	F_up = 649805.9 dyne.
Percepatan gaya apung,	P = 3.434492 cm/det2
Faktor pengereman,	Q = 2.317165E-05 1/det.
Kecepatan terminal,	Vterm = 148219.6 cm/det.
Nama radionuklida acuan,	RadNuc= Nitrogen-16
Umur paroh radionuklida,	T_1/2 = 7.130000 detik.
Kedalaman permukaan teras,	H = 1055.00 cm.

KECEPATAN V DAN POSISI Z SEBAGAI FUNGSI WAKTU T

Waktu	v(t)	x(t)	v(t)	x(t)	v(t)	x(t)	Reynold Nr	Rezim	F_luruh
(det)	Tanpa gesekan		Anggap laminar		Dengan gesekan			Aliran	N-16
.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	mandeg	1.00000
1.00	3.43	1.72	3.43	1.72	3.42	1.43	37306.16	turbu.	.90736
2.00	6.87	6.87	6.87	6.86	6.73	6.24	73407.99	turbu.	.82330
3.00	10.30	15.46	10.30	15.45	9.83	14.27	107144.20	turbu.	.74703
4.00	13.74	27.48	13.74	27.46	12.62	25.28	137646.50	turbu.	.67783
5.00	17.17	42.93	17.17	42.91	15.08	38.94	164406.00	turbu.	.61503
6.00	20.61	61.82	20.61	61.81	17.18	54.90	187263.30	turbu.	.55806
7.00	24.04	84.15	24.04	84.05	18.93	72.82	206342.90	turbu.	.50636
8.00	27.48	109.90	27.47	109.93	20.36	92.36	221963.20	turbu.	.45945
9.00	30.91	139.10	30.91	139.16	21.51	113.21	234548.40	turbu.	.41689
10.00	34.34	171.72	34.34	171.74	22.43	135.11	244557.60	turbu.	.37827
11.00	37.78	207.79	37.77	207.76	23.15	157.85	252435.80	turbu.	.34322
12.00	41.21	247.28	41.21	247.23	23.72	181.24	258586.00	turbu.	.31143
13.00	44.65	290.21	44.64	290.23	24.15	205.15	263356.60	turbu.	.28258
14.00	48.08	336.58	48.08	336.40	24.49	229.44	267038.50	turbu.	.25640
15.00	51.52	386.38	51.51	386.29	24.75	254.05	269869.20	turbu.	.23265
16.00	54.95	439.61	54.94	439.54	24.95	278.88	272039.00	turbu.	.21109
17.00	58.39	496.28	58.37	496.32	25.10	303.90	273698.50	turbu.	.19154
18.00	61.82	556.39	61.81	556.45	25.22	329.05	274965.30	turbu.	.17379
19.00	65.26	619.93	65.24	619.74	25.31	354.31	275931.30	turbu.	.15769
20.00	68.69	686.90	68.67	686.76	25.38	379.65	276666.90	turbu.	.14309
21.00	72.12	757.31	72.11	757.32	25.43	405.05	277226.80	turbu.	.12983
22.00	75.56	831.15	75.54	831.04	25.47	430.49	277652.70	turbu.	.11780
23.00	78.99	908.42	78.97	908.11	25.50	455.97	277976.40	turbu.	.10689
24.00	82.43	989.13	82.40	988.91	25.52	481.47	278222.40	turbu.	.09699
25.00	85.86	1073.28	85.84	1073.06	25.54	507.00	278409.40	turbu.	.08800
26.00	89.30	1160.86	89.27	1160.55	25.55	532.54	278551.40	turbu.	.07985
27.00	92.73	1251.87	92.70	1251.78	25.56	558.09	278659.30	turbu.	.07245
28.00	96.17	1346.32	96.13	1345.98	25.57	583.65	278741.20	turbu.	.06574
29.00	99.60	1444.20	99.57	1443.90	25.57	609.22	278803.40	turbu.	.05965
30.00	103.03	1545.52	103.00	1545.17	25.58	634.79	278850.60	turbu.	.05412
31.00	106.47	1650.27	106.43	1649.80	25.58	660.37	278886.50	turbu.	.04911
32.00	109.90	1758.46	109.86	1758.15	25.58	685.95	278913.80	turbu.	.04456
33.00	113.34	1870.08	113.29	1869.47	25.58	711.53	278934.40	turbu.	.04043
34.00	116.77	1985.14	116.73	1984.52	25.58	737.12	278950.10	turbu.	.03669
35.00	120.21	2103.63	120.16	2103.30	25.59	762.70	278962.00	turbu.	.03329
36.00	123.64	2225.55	123.59	2225.05	25.59	788.29	278971.10	turbu.	.03020
37.00	127.08	2350.91	127.02	2350.15	25.59	813.88	278977.90	turbu.	.02741
38.00	130.51	2479.70	130.45	2478.98	25.59	839.47	278983.20	turbu.	.02487
39.00	133.95	2611.93	133.88	2611.15	25.59	865.05	278987.10	turbu.	.02256
40.00	137.38	2747.59	137.32	2746.68	25.59	890.64	278990.10	turbu.	.02047
41.00	140.81	2886.69	140.75	2885.93	25.59	916.23	278992.40	turbu.	.01858
42.00	144.25	3029.22	144.18	3028.17	25.59	941.82	278994.20	turbu.	.01686
43.00	147.68	3175.19	147.61	3173.75	25.59	967.41	278995.50	turbu.	.01529
44.00	151.12	3324.59	151.04	3323.42	25.59	993.00	278996.50	turbu.	.01388
45.00	154.55	3477.42	154.47	3476.08	25.59	1018.59	278997.20	turbu.	.01259
46.00	157.99	3633.69	157.90	3632.46	25.59	1044.18	278997.80	turbu.	.01143
46.42					25.59	1055.00	278998.00	turbu.	.01097

Laporan selesai.

2. Pembahasan

Dari hasil perhitungan seperti tertera pada cuplikan luaran komputer tersebut di atas, tampak bahwa perandaian model aliran laminer tidak sesuai untuk diterapkan pada kasus ini. Model ini memberikan hasil luaran untuk kecepatan dan posisi sesaat yang tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan kedua besaran tersebut seandainya menggunakan model bebas hambatan sempurna (fluida tanpa kekentalan atau viskositas nol). Keadaan ini dapat divisualisasi dengan liku (kurva) sebelah kiri yang terlukis pada Gambar 2 dan 3. Tampak pada Gambar 2 bahwa liku kecepatan v hampir sebanding linier terhadap seluruh rentang waktu dan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa liku posisi z mengikuti pola parabola. Dengan model ini, gumpalan setara bola air panas dengan diameter $\pm 71,5$ cm yang mengandung radionuklida ^{16}N dari teras sedalam 10,55 m akan segera mencapai permukaan air kolam dalam tempo ± 25 detik. Pada saat itu, kecepatannya mencapai ± 84 cm/detik. Sesuai dengan persamaan (7) dan (8) untuk koefisien gesekan g_s dan bilangan Reynold R_e , model aliran laminer untuk bola air hanya berlaku jika hasil kali antara kecepatan v dan diameternya \emptyset tidak lebih besar daripada viskositasnya.

Dari hasil perhitungan secara numerik dengan metode Runge-Kutta orde-4, ternyata gerakan vertikal ke atas dari gumpalan air panas yang ditinjau mengikuti model aliran turbulen. Dengan model ini, gumpalan setara bola air panas yang ditinjau akan mencapai permukaan air kolam dalam tempo 46,42 detik, atau ± 22 detik lebih lambat daripada waktu transport yang dihitung berdasarkan dua model sebelumnya. Kecepatan di titik terminal ini adalah 25,60 cm/detik, yang tidak banyak berubah dan hampir konstan sejak dari kedalaman $\pm 7,50$ m di

bawah permukaan air, atau $\pm 3,0$ m di atas teras. Pada saat itu pula, konsentrasi radioaktivitas ^{16}N telah banyak meluruh hingga mencapai $\pm 1,0$ % dibandingkan dengan konsentrasi di air kedalaman. Visualisasi keadaan ini ditunjukkan oleh liku sebelah kanan pada Gambar 2 dan 3 (Lampiran 1).

Pada Gambar 2 tampak bahwa liku kecepatan v untuk aliran turbulen hampir sebanding terhadap waktu pada detik-detik pertama, tetapi kemudian akan segera mencapai suatu kecepatan terminal yang konstan pada detik ke 17 ($v = 25$ cm/det dan $z = 300$ cm). Gambar 3 untuk aliran turbulen (sebelah kanan dari liku aliran laminer) menunjukkan bahwa liku posisi z ini pada detik-detik awal mengikuti pola parabola, tetapi 17 detik kemudian mulai tampak bahwa ia akan sebanding lurus dengan waktu. Sampai di posisi akhir, $z = H = 10,55$ m, yang tercapai pada detik ke 46~47, kecepatannya hanya bertambah sedikit yaitu $v \approx 25,6$ cm/detik.

KESIMPULAN

Kegagalan operasi sistem pendingin primer RSG-GAS (JE01) dan tidak berfungsinya sistem lapisan air hangat di permukaan kolam (KBE02) ketika reaktor beroperasi pada daya nominal 30 MW_{th} tidak banyak memberikan sumbangan langsung yang cukup bermakna ke dosis air permukaan yang diterima oleh seseorang yang berdiri di tepi atau atas kolam reaktor. Akan tetapi, efek samping dari aktivasi ^{16}N dapat menyebabkan dosis tambahan bagi pekerja yang berdiri di atas jembatan kolam reaktor jika ia tinggal di sana sampai ^{16}N yang terlarut dalam air pendingin primer mencapai permukaan kolam. Model kenaikan air yang digunakan dalam analisis ini adalah sangat konservatif. Akan tetapi, di

bawah beberapa batasan perandaian, pekerja radiasi masih bisa berada di sana beberapa saat jika kecelakaan disain ini benar-benar terjadi, paling tidak mempunyai kesempatan yang cukup untuk meninggalkan Balai Operasi Reaktor sebelum mereka mendapatkan dosis gamma yang cukup bermakna dari kemunculan ^{16}N . Setelah beberapa menit, ^{16}N yang muncul ini akan meluruh sehingga keadaan dapat dinyatakan aman dan terkendali sehingga

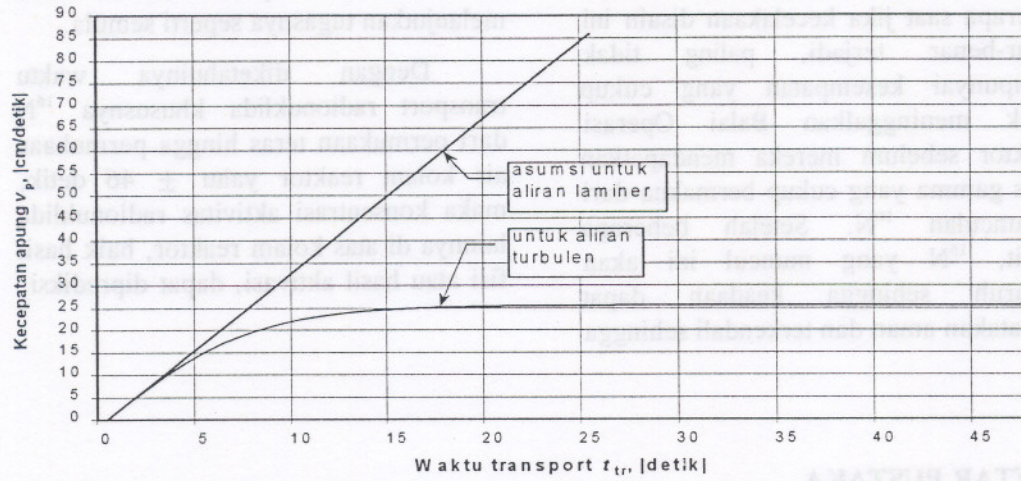
personil pekerja radiasi boleh masuk kembali ke Balai Operasi Reaktor untuk melanjutkan tugasnya seperti semula.

Dengan diketahuinya waktu transport radionuklida khususnya ^{16}N dari permukaan teras hingga permukaan air kolam reaktor yaitu ± 46 detik, maka konsentrasi aktivitas radionuklida lainnya di atas kolam reaktor, baik hasil fisi atau hasil aktivasi, dapat diprediksi.

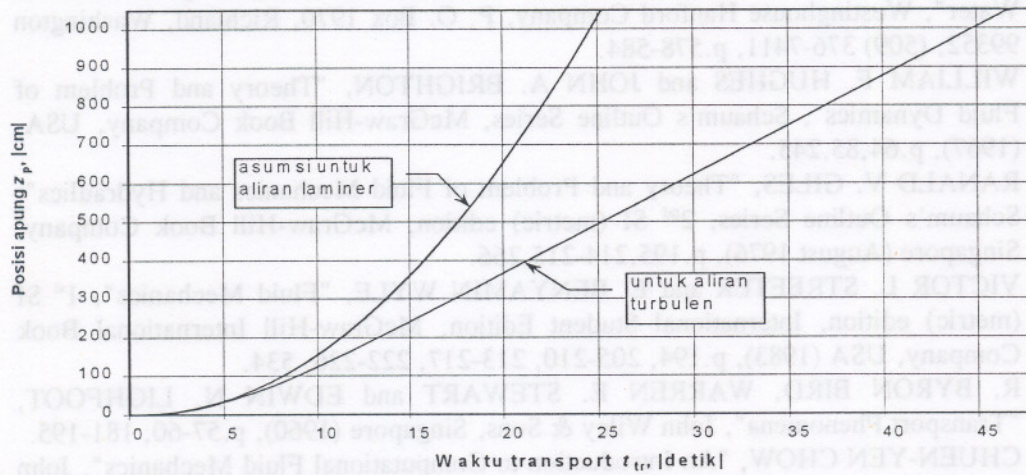
DAFTAR PUSTAKA

1. K. N. SCHINKENDORF, A. D. WILCOX, S. P. ROBLER and H. TOFFER, "Dose Calculation for Nuclear Criticality Accidents Shielded by Large Amounts of Water", Westinghouse Hanford Company, P. O. Box 1970, Richland, Washington 99352, (509) 376-7411, p.578-584.
2. WILLIAM F. HUGHES and JOHN A. BRIGHTON, "Theory and Problem of Fluid Dynamics", Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company, USA, (1967), p.64,85,245.
3. RANALD V. GILES, "Theory and Problem of Fluid Mechanics and Hydraulics", Schaum's Outline Series, 2nd SI (metric) edition, McGraw-Hill Book Company, Singapore (August 1976), p.195,214-215,266.
4. VICTOR L. STREETER and E. BENYAMIN WYLE, "Fluid Mechanics", 1st SI (metric) edition, International Student Edition, McGraw-Hill International Book Company, USA (1983), p.194, 205-210, 213-217, 222-226, 534.
5. R. BYRON BIRD, WARREN E. STEWART and EDWIN N. LIGHFOOT, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Singapore (1960), p.57-60, 181-195.
6. CHUEN-YEN CHOW, "An Introduction to Computational Fluid Mechanics", John Wiley & Sons, New York, USA (1963), p.53, 93-95, 105-108,121.
7. ELLIOT WARD CHENEY and DAVID RONALD KINCAID, "Numerical Mathematics and Computing", 2nd edition, Brooks / Cole Publishing Company, Monterey, California, USA, (1985), p.311-332 (Runge-Kutta Method).
8. S. D. CONTE and CARL de BOOR, "Elementary Numerical Analysis : An Algorithmic Aproach", 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, (1972), p.337-339 (Runge-Kutta Method).
9. RALPH H. PENINGTON, "Introductory Computer Methods and Numerical Analysis", The Macmillan Company, New York, USA, (1967), p.432-436 (Runge-Kutta Method).

LAMPIRAN 1.



Gambar 2. Kecepatan apung bola air panas v_p sebagai fungsi dari waktu transport t_{tr} .



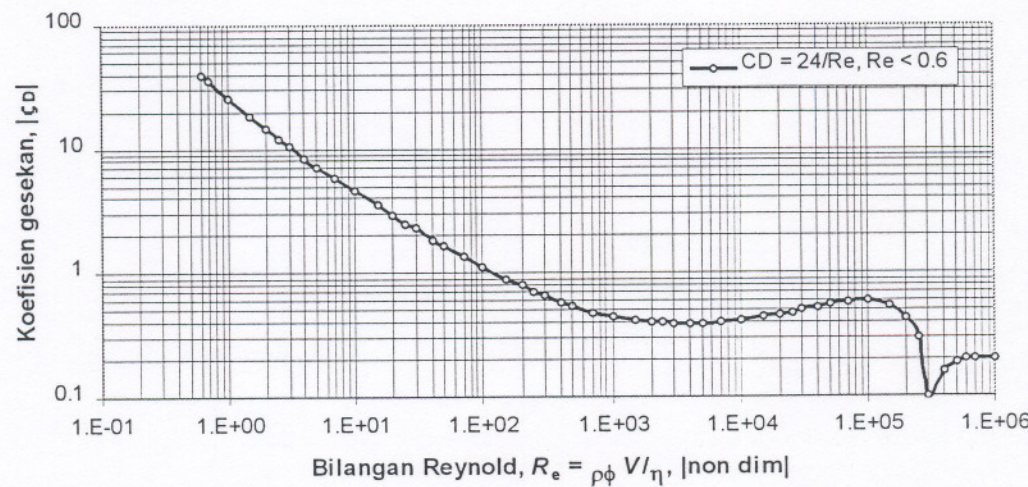
Gambar 3. Posisi apung bola air panas z_p sebagai fungsi dari waktu transport t_{tr} .

LAMPIRAN 2.

$$\zeta_{gs} = \begin{cases} \frac{24}{R_e} & ; 0 \leq R_e \leq 1,0 \mapsto \text{daerah hukum Stoke} \\ \frac{24}{R_e^{0,646}} & ; 1,0 \leq R_e \leq 400,0 \mapsto \text{aliran laminar} \\ 0,5 & ; 400,0 \leq R_e \leq 3,0 \times 10^5 \mapsto \text{aliran transisi lam} \leftrightarrow \text{turb} \\ \frac{3,66 \times 10^{-4}}{R_e^{-0,4275}} & ; 3,0 \times 10^5 \leq R_e \leq 2,0 \times 10^6 \mapsto \text{aliran tubulen} \\ 0,18 & ; R_e > 2,0 \times 10^6 \mapsto \text{aliran transisi turbulen} \leftrightarrow \text{Newtonian} \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \dot{v}_p = \frac{\rho_d}{m_p} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_d} \right) \cdot g \cdot \frac{4\pi \cdot r_p^3}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{24\eta}{\rho_d \cdot v_p \cdot 2r_p} \cdot v_p^2 \cdot \pi \cdot r_p^2 \right\} \Rightarrow$$

$$\frac{dv_p}{dt} = \dot{v}_p = \frac{1}{m_p} \cdot \left\{ \underbrace{\left(\frac{4\pi \cdot r_p^3}{3} \right) \cdot (\rho_d - \rho_p) \cdot g}_{\text{gayapung Archimidez}} - \underbrace{6\pi \cdot \eta \cdot r_p \cdot v_p}_{\text{gayagesek Stokes}} \right\} = P - Q \cdot v_p \dots\dots\dots (15)$$



Gambar 1. Diagram koefisien gesekan untuk bola (ζ_D) versus bilangan Reynold (R_e).