



## SIMULATOR PEMBUANG PANAS RSG-GAS

Utaja<sup>1</sup>, Demon Handoyo<sup>2</sup>, Khairul Handono<sup>3</sup>, Agus Cahyono<sup>4</sup>, Sapto Teguh P<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup> Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Gedung 71, Tangerang Selatan, 15310

### ABSTRAK

*SIMULATOR PEMBUANG PANAS RSG\_GAS. Salah satu aspek penting pengoperasian reaktor nuklir adalah keselamatan. Faktor yang sangat berpengaruh pada keselamatan pengoperasian reaktor nuklir adalah temperatur bahan bakar. Agar temperatur maksimum bahan bakar tidak melampaui nilai tertentu (200 °C), maka sistem pembuang panas harus mempunyai kemampuan cukup untuk mempertahankan temperatur bahan bakar di bawah nilai tersebut. Untuk itu dikembangkan sebuah perangkat lunak yang dapat mensimulasikan beberapa kemungkinan kejadian, yang tidak boleh terjadi pada reaktor sesungguhnya. Perangkat lunak yang dikembangkan ini didasarkan pada teori perpindahan panas pada penukar panas (heat exchanger), pada cooling tower (menara pendingin), dan konduksi panas pada benda padat. Dengan perangkat lunak yang selanjutnya dinamakan simulator ini, beberapa perubahan parameter yang mungkin terjadi pada sistem pembuang panas pada RSG\_GAS dapat dipelajari tanpa resiko kecelakaan.*

*Kata kunci : simulator, pemindahan panas, keselamatan, temperatur*

### ABSTRACT

*A SIMULATOR FOR RSG\_GAS HEAT REJECTION. One of the importance aspects on the nuclear reactor operation is safety. The very importance factor on the safety of the nuclear reactor operation is the fuel temperature. In order to the maximum fuel temperature not exceed to certain value (200 °C), so the heat rejection system should have enough capability so that the fuel temperature less than that value. For this reason the software for some events simulation will be developed, where these events cannot be uccured on the real reactor. This software is based on the heat transfer theory of the heat exchanger, the cooling tower, and on the solid state heat diffusion. With this software which on the next discussion will be introduced as a simulator, some expect changing value on the heat rejection system of RSG\_GAS can be learned without accident risk.*

*Keywords: simulators, heat exchange, safety, temperature filmless*

### 1. PENDAHULUAN

Keselamatan merupakan aspek penting dalam pengoperasian suatu reaktor nuklir. Salah satu parameter yang berpengaruh pada keselamatan adalah temperatur bahan bakar reaktor. Temperatur bahan bakar harus dibawah temperatur yang diijinkan. Agar temperatur bahan bakar dibawah nilai yang diijinkan, sistem pembuangan panas pada reaktor harus mampu membuang panas yang dibangkitkan bahan bakar ke lingkungan

Sistem pembuang panas pada RSG\_GAS terdiri dari penukar panas dan menara pendingin. Sedangkan pemindahan panas berlangsung secara berturut-turut lewat konduksi bahan bakar, konveksi antara pendingin primer dengan bahan bakar, pemindahan panas pada penukar panas, dan pembuang panas pada menara pendingin. Penurunan kemampuan pemindahan panas salah satu atau beberapa urutan tersebut akan mempengaruhi temperatur bahan bakar. Studi kejadian penurunan kemampuan pemindahan panas sulit dilakukan atau bahkan tidak dapat dilakukan pada reaktor sesungguhnya.



Untuk itu dikembangkan sebuah perangkat lunak atau simulator yang dapat mensimulasikan kejadian dan akibatnya. Dasar yang dipakai adalah teori perpindahan panas konduksi pada benda padat, perpindahan panas pada konveksi antara bahan bakar dengan pendingin primer, perpindahan panas pada penukar panas, dan perpindahan panas pada menara pendingin. Masalah yang mungkin terjadi dapat disimulasikan dan akibatnya dapat diamati. Misal kejadian padamnya salah satu pompa primer yang mengakibatkan naiknya temperatur air pendingin. Kejadian ini tidak mungkin dilakukan pada reaktor sesungguhnya.

Dengan simulator ini diharapkan studi tentang pembuangan panas RSG\_GAS dapat dilakukan dengan lebih rinci tanpa risiko keselamatan.

## 2. TEORI

Seperti telah dijelaskan di bagian depan, urutan pembuangan panas terdiri dari konduksi, konveksi, transfer panas pada penukar panas, dan transfer panas pada menara pendingin. Masing-masing kejadian pembuangan panas dijelaskan pada teori berikut:

### 2.1 Konduksi panas pada bahan bakar

Konduksi panas pada bahan bakar mengikuti teori difusi panas pada benda padat yang disertai dengan sumber panas. Persamaan difusi panas dinyatakan dengan persamaan berikut:[1]

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Untuk pemindahan panas dengan sumber panas dalam benda padat dan bentuk plat, persamaan tersebut dapat digantikan dengan<sup>[1]</sup>

$$T = T_0 - \left( \frac{q'' t^2}{k} \right) \quad (2)$$

Dengan:

$q''$  = fluks panas (kkal/m<sup>2</sup>.jam).

$q'''$  = panas persatuan volume (kkal/m<sup>3</sup>.jam)

$k$  = konduktivitas bahan bakar (kkal/(jam.m.°C))

$T$  = temperatur luar bahan bakar (°C)

$T_0$  = temperatur pusat bahan bakar (°C)

$t$  = setengah tebal bahan bakar (m)

### 2.2 Pemindahan panas konveksi dari bahan bakar ke pendingin primer

Pemindahan panas berlangsung secara konveksi paksa, dengan mengikuti persamaan<sup>[1]</sup>

$$h = \left( \frac{Nu \times \lambda}{d_{eq}} \right) \quad (3)$$
$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.23}$$
$$Re = v \times d_{eq} / \nu$$

Dengan:

$h$  = koefisien konveksi paksa (kkal/m<sup>2</sup>.jam.°C)

$Nu$  = bilangan Nusselt (tanpa satuan)

$Re$  = bilangan Reynold (tanpa satuan)

$\nu$  = kekentalan kinematis (m<sup>2</sup>/detik), diambil dari data air

$r$  = bilangan Prndtl (tanpa satuan), diambil dari data air.

$v$  = kecepatan aliran (m/detik) ;  $\lambda$  = konduktivitas air (kkal/m.jam.°C)

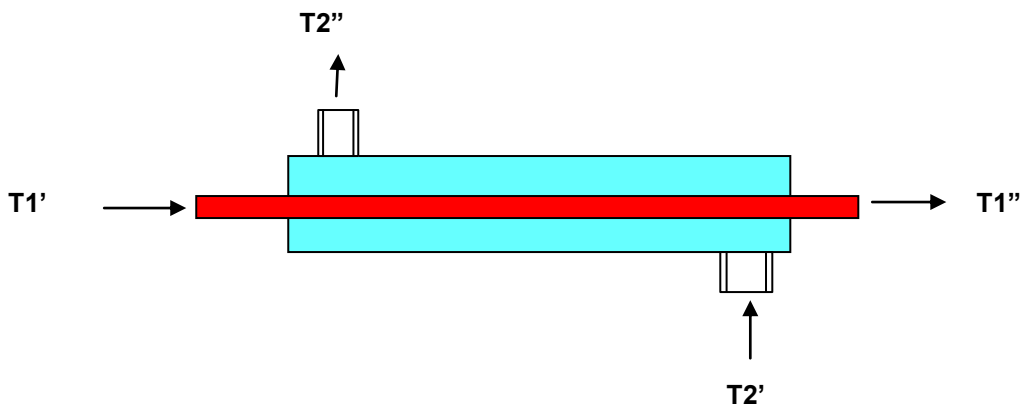
$d_{eq}$  = diameter ekwivalent (m)



### 2.3 Pemindahan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder

Pemindahan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder berlangsung pada alat penukar panas (*heat exchanger*). Mekanisme pemindahan panas cukup kompleks. Untuk itu pemindahan panas disederhanakan dengan mengambil persamaan:<sup>[1]</sup>

$$Z = \frac{\ln \left( \frac{T_1' - T_1''}{T_1' - T_2''} \right)}{\ln \left( \frac{T_1' - T_2''}{T_1' - T_2'} \right)} \quad (4)$$



Gambar 1. Temperatur pada penukar panas

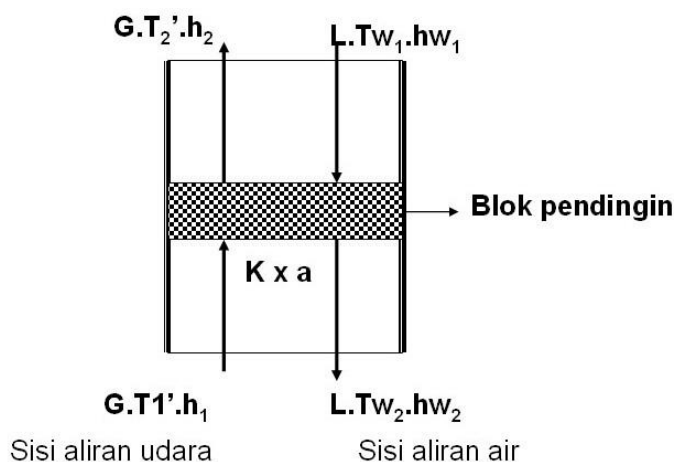
Dengan:

- $T_1'$  = temperatur masuk primer ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_1''$  = temperatur keluar primer ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_2'$  = temperatur masuk sekunder ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_2''$  = temperatur keluar sekunder ( $^{\circ}\text{C}$ )

Nilai Z merupakan indikator kemampuan pemindahan panas penukar kalor, yang tidak berubah (dianggap tidak berubah) walaupun nilai lain berubah. Nilai Z diperhitungkan pada data awal reaktor:

### 2.4 Pemindahan panas pada *cooling tower*.

Pemindahan panas pada sisi sekunder dilakukan dengan *cooling tower*. Pada *cooling tower* terjadi proses penguapan sebagian air sekunder. Konsep dasar pemindahan panas adalah adanya perbedaan entalpi antara air sisi sekunder dengan udara luar yang terjadi sepanjang fin pendingin. Hal ini didasarkan pada gambar berikut:



Gambar 2. Pemindahan panas pada fin dingin

Kemampuan pemindahan panas fin pendingin pada *cooling tower* berdasarkan data udara dinyatakan dengan <sup>[2]</sup>

$$Ka/V = \int_{T_2}^{T_1} \frac{dT}{(Tw - ha)} \quad (5)$$

Dengan:

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| G = laju aliran udara (kg/detik)   | h1 = entalpi awal udara (kkal/kg)        |
| L = laju aliran air (kg/detik)     | h2 = entalpi akhir udara (kkal/kg)       |
| T1' = temperatur awal udara (oC)   | hw1 = entalpi air awal (kkal/kg)         |
| T2'' = temperatur udara akhir (oC) | hw2 = entalpi air akhir (kkal/kg)        |
| Tw1 = temperatur awal air (oC)     | Ka = koefisien <i>transfer</i> panas fin |
| Tw2 = temperatur akhir air         | V = volume <i>fin</i> pendingin          |
| hw = entalpi air sepanjang fin     | ha = entalpi udara sepanjang fin         |
| G = laju aliran udara (kg/detik)   |  |

Nilai Ka/V atau kemampuan transfer panas dari air ke udara pada fin *cooling tower* ditentukan dari data unjuk kerja suatu *cooling tower*. Integral pada persamaan 5) diselesaikan dengan pendekatan berikut <sup>[2]</sup>:

Integral ini diselesaikan dengan pendekatan:

$$Ka/V = 0.25 (T_1 - T_2) \left\{ \left( \frac{1}{\Delta h_1} \right) + \left( \frac{1}{\Delta h_2} \right) + \left( \frac{1}{\Delta h_3} \right) + \left( \frac{1}{\Delta h_4} \right) \right\} \quad (6)$$

Dengan:

- $\Delta h_1$  dihitung pada suhu  $T_1 + 0.1(L/G)(T_2 - T_1)$
- $\Delta h_2$  dihitung pada suhu  $T_1 + 0.4(L/G)(T_2 - T_1)$
- $\Delta h_3$  dihitung pada suhu  $T_2 - 0.4(L/G)(T_2 - T_1)$
- $\Delta h_4$  dihitung pada suhu  $T_2 - 0.1(L/G)(T_2 - T_1)$

Dari data unjuk kerja *cooling tower* didapat beberapa data hubungan harga Ka/V dengan harga L/G. Selanjutnya persamaan yang menyatakan kemampuan pemindahan panas pada fin suatu *cooling tower* dinyatakan dengan <sup>[2]</sup>:

$$Ka/V = C (L/G)^{-n} \quad (7)$$



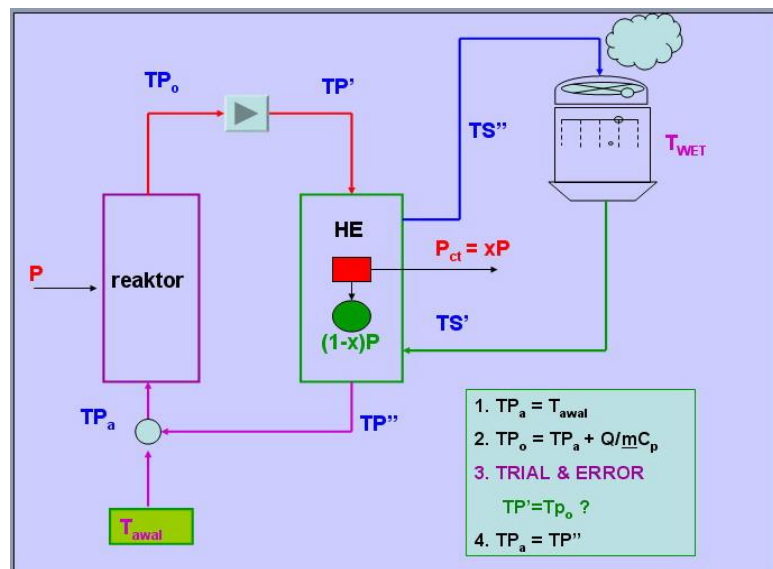
Untuk memperoleh harga C dan n dilakukan dengan mengambil harga logaritma persamaan 7) sebagai berikut:

$$\log \left( \frac{Ka}{V} \right) = -(n) \log \left( \frac{L}{G} \right) + \log C \quad (8)$$

Dengan metoda kurva fitting, didapat nilai C dan n rerata. Dari persamaan 6) dan 7) kemampuan pemindahan panas *cooling tower* bila terjadi perubahan harga L/G dapat ditentukan. Semua proses perhitungan persamaan 1) sampai dengan persamaan 8) dilakukan di dalam simulator yang di buat dengan program LabVIEW.

### 3. MODEL PEMINDAHAN PANAS PADA PROGRAM

Program komputer di dalam perangkat lunak didasarkan pada model pemindahan panas di RSG-GAS seperti pada Gambar 3 berikut:



Gambar 3. Model Pemindahan Gas

$TP_a$ = temperatur awal primer	$TP''$ = temperatur air masuk teras
$TP_o$ = temperatur keluar teras	$TP'$ = temperatur primer masuk HE
$TS'$ = temperatur keluar CT	$TS''$ = temperatur masuk CT
CT = <i>cooling tower</i> ;	HE = penukar kalor
Tawal = temperatur air kolam awal	P = daya reaktor.

Pada kondisi tunak (*steady state*), dipenuhi syarat:  $T_{awal} = TP_a = TP''$  ;  $TP_o = TP'$

Sedangkan pada kondisi transien, kondisi tersebut tidak berlaku, karena selain Tawal, temperatur akan berubah terhadap waktu. Proses transien dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada awal mula temperatur air kolam adalah Tawal. Temperatur yang masuk ke teras adalah  $TP_a$  yang sama dengan Tawal
2. Teras membangkitkan panas P yang akan memanaskan air primer dari  $TP_a$  ke  $TP_o$
3. Selama melewati penukar panas HE, sebagian panas dilepaskan ke sekunder. Pada kondisi transien, sebagian panas ditransfer ke sekunder sisanya dipakai untuk memanaskan air primer sendiri. Oleh karena itu temperatur air primer keluar dari HE akan naik menjadi  $TP''$  ( $TP'' > TP_a$ ). Bagian panas yang ditransfer ke sisi sekunder sebesar x bagian; harga x ini dicari dengan metoda tebakan



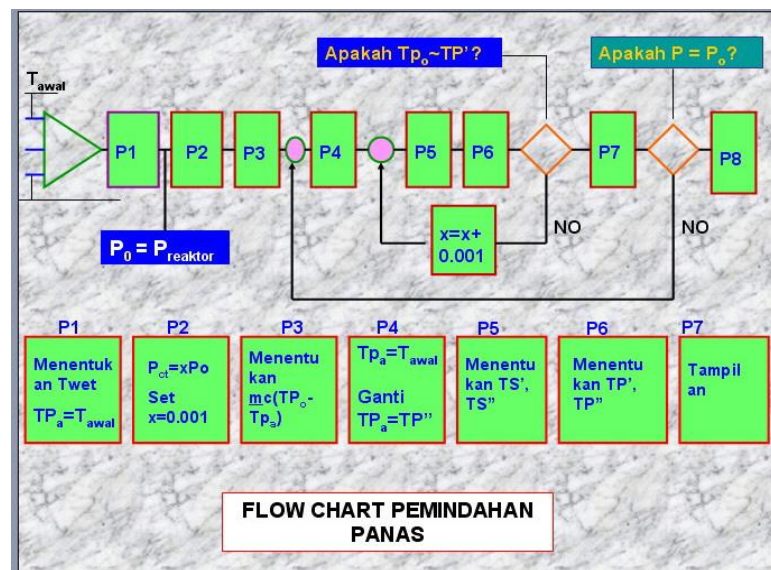
4. Panas yang dilepaskan ke sekunder akan memanaskan air sisi sekunder dari TS' ke TS". Air sekunder akan didinginkan oleh *cooling tower*.

Untuk melaksanakan komputasi pada model pemindahan panas seperti pada Gambar 3, dilakukan tahapan pemrograman atau flow chart yang dapat dilihat pada Gambar 4.

#### 4. ALUR PEMOGRAMAN ( FLOW CHART)

Alur pemrograman kondisi transien dapat dilihat pada Gambar 4 berikut. Proses transien seperti disebut pada bab 3 langkah 1 sampai dengan langkah 4 dilaksanakan pada blok P5 dan P6 Gambar 4 yang merupakan loop pertama. Nilai atau harga X ditentukan secara coba-coba sampai didapat temperatur TP' sama dengan temperatur Tpo seperti pada Gambar 3.

Setelah dicapai harga TP' sama atau mendekati sama (selisih kurang dari 1 o), dilanjutkan dengan menaikkan harga Tpa pada Gambar 3 ke TP". Ini adalah proses loop ke dua.. Proses pada loop ke dua ini dilaksanakan pada blok P4 sampai dengan blok P7, sehingga loop pertama akan diulang lagi. Blok P1,P2 , dan P3 adalah setting awal sebagai masukan.



Gambar 4. Alur Pemograman.

Di bagian atas adalah blok fungsi sedangkan di bagian bawah adalah keterangan fungsi masing-masing blok. Pada deretan atas tampak dua buah loop, yaitu loop untuk menentukan fraksi daya yang dipindahkan, sedangkan loop yang lebih besar untuk memproses seluruh perubahan daya. Untuk kondisi tunak (*steady state*), kedua loop tidak diperlukan, karena perhitungan didasarkan pada daya total.

Dari kegiatan perengkayasa perangkat penangkap citra sinar-x berbasis layar pendar ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

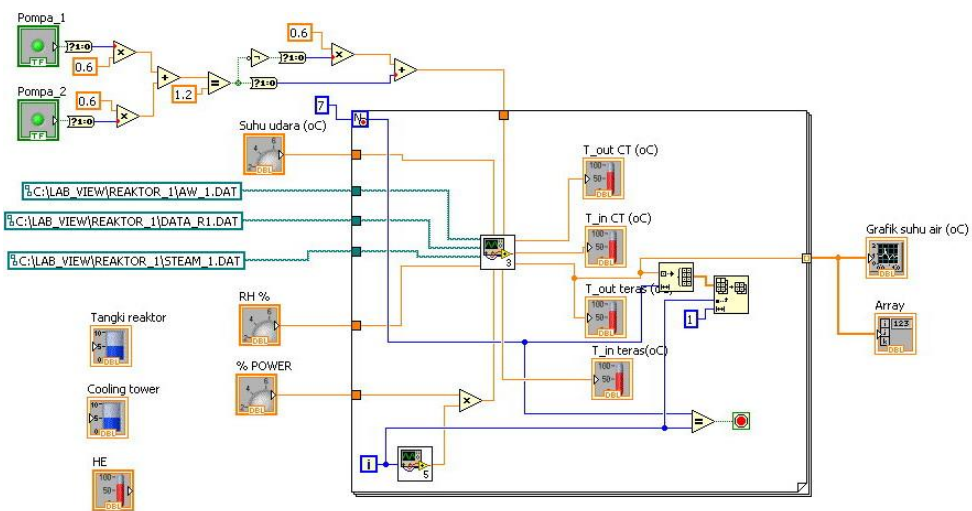
- Layar pendar dapat menghasilkan citra dari objek yang diberi paparan sinar-x. Citra ini ditangkap oleh kamera IP dan kemudian diubah menjadi data digital. Data digital ini ditransmisikan ke pengolah data. Proses penangkapan citra ini diakhiri dengan menampilkan citra pada layar monitor. Dengan menggunakan prinsip proses penangkapan citra ini telah dibuat perangkat penangkap citra berbasis layar pendar.
- Dari hasil pengujian yang dengan parameter 55, 60, 70 kV dan dengan objek berbahan metal serta plastik terlihat bahwa citra pada tegangan 70 kV menghasilkan citra objek yang baik. Sedangkan pada tegangan 55 dan 60 kV, citra yang dihasilkan tidak terlalu baik.



- c. Pada aplikasi medis untuk pemeriksaan toraks, tegangan yang umumnya digunakan adalah tegangan 55 dan 60 kV. Dengan demikian perangkat ini perlu disempurnakan agar dapat menghasilkan citra yang baik pada tegangan 55 dan 60 kV.
- d. Dengan kondisi yang sekarang, perangkat ini belum dapat digunakan untuk aplikasi medis. Masih diperlukan peningkatan ketajaman citra yang dihasilkan dengan penggunaan layar pendar yang sesuai.
- e. Namun demikian, perangkat ini dapat digunakan untuk keperluan pengambilan citra dari objek yang terbuat dari bahan metal dan plastik seperti pada uji tak rusak pada industri.

## 5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Program untuk menentukan temperatur pendingin pada kondisi tunak, yang ditulis dengan LabVIEW dapat dilihat pada Gambar 5 berikut:

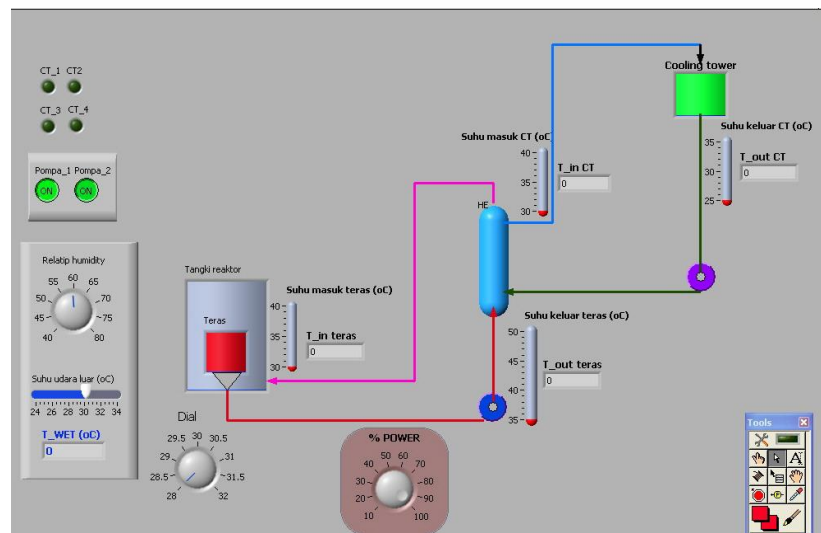


Gambar 5. Program untuk menentukan temperatur pendingin

Pada Gambar 5, tiga kotak panjang di luar kotak besar adalah data yang diperlukan meliputi data udara, data uap, dan data reaktor. Di luar kotak besar terdapat data yang dimasukkan meliputi temperatur udara, kelembaban, dan prosentase daya yang dibangkitkan. Di bagian dalam kotak besar terdapat dua buah sub program dan empat buah penampil temperature.

Hasil perhitungan ditayangkan pada panel hasil seperti pada Gambar 6. Pada gambar ini ditayangkan diagram aliran pendingin primer dan sekunder, reaktor dengan terasnya, penukar panas, dan menara pendingin. Di sisi kiri terdapat data masukan temperatur udara luar, dan kelembaban relatif. Di sisi bawah terdapat masukan prosen daya reaktor. Tayangan temperatur air pendingin diletakkan di dekat masing-masing aliran.

Daya reaktor yang dibangkitkan dapat diatur dengan memutar tombol di sisi bawah, dari 10% daya sampai dengan 100% daya. Pada saat tombol daya diputar dapat dilihat perubahan temperatur pendingin baik di sisi primer maupun sekunder.



Gambar 6. Panel untuk menayangkan hasil

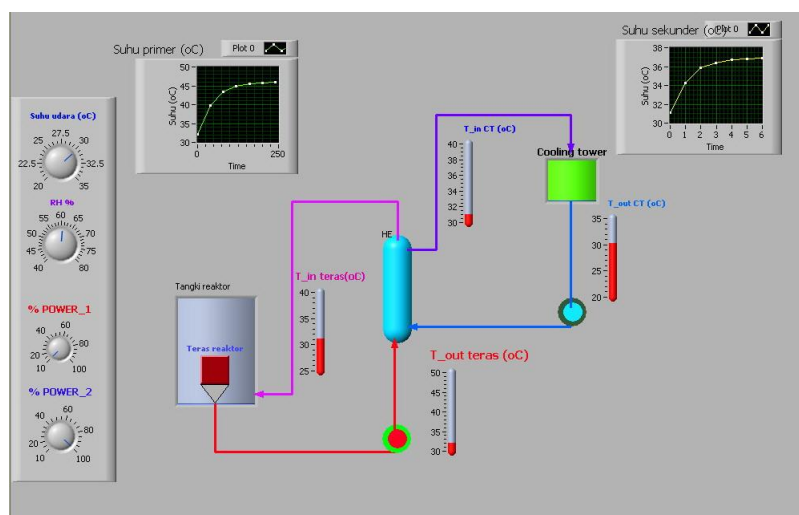
Temperatur air primer sebagai fungsi prosentase daya ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Temperatur air primer sebagai fungsi daya, pada temperatur udara 30 °C dan kelembaban relatip 60%

Prosen daya (%)	Temperatur primer keluar teras (°C)	Temperatur primer masuk teras (°C)
100	45,7	36,7
90	44,2	36,0
80	42,7	35,4
70	41,0	34,7
60	39,5	34,0
50	37,9	33,4

Untuk panel tayangan temperatur transien dapat dilihat pada Gambar 7.





Gambar 7. Panel untuk penayangan hasil transient

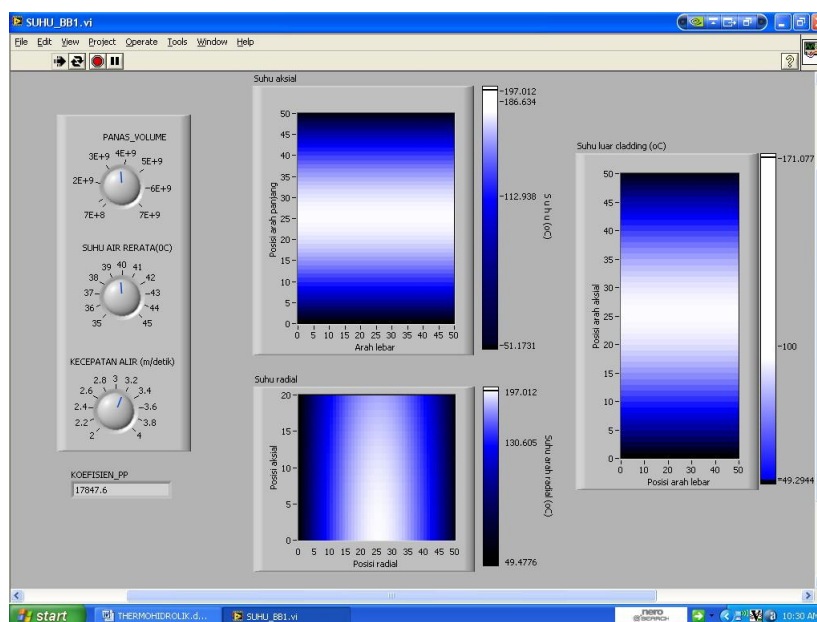
Pada sisi atas Gambar 7 tampak tayangan grafik perubahan temperatur pendingin di sisi primer (grafik kiri) dan grafik temperatur di sisi sekunder (grafik kanan). Terlihat kenaikan temperatur berlangsung secara eksponensial

Temperatur air primer masuk maupun keluar keluar teras sebagai fungsi waktu ditayangkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Temperatur primer masuk teras dan temperatur sekunder keluar , pada temperatur udara 30 oC dan kelembapan relatif 60 %

Waktu (detik)	Temperatur primer keluar teras (oC)	Temperatur primer masuk teras (oC)
<b>0</b>	<b>32</b>	<b>32</b>
<b>25</b>	<b>37</b>	<b>33,3</b>
<b>50</b>	<b>40,5</b>	<b>34,5</b>
<b>75</b>	<b>43</b>	<b>35,5</b>
<b>100</b>	<b>44</b>	<b>36,0</b>
<b>125</b>	<b>45</b>	<b>36,4</b>
<b>150</b>	<b>45,4</b>	<b>36,5</b>
<b>175</b>	<b>45,5</b>	<b>36,7</b>
<b>200</b>	<b>45,8</b>	<b>36,8</b>

Pada Gambar 8 tampak tayangan distribusi temperatur bahan bakar dari berbagai arah. Warna hitam menunjukkan temperatur terendah, sedangkan warna putih menunjukkan temperatur tertinggi.



Gambar 8. Distribusi Temperatur bahan baker pada beberapa arah

Pada panel depan program penampil temperatur bahan baker (Gambar 8) ditampilkan temperatur bahan baker dalam tiga (3) posisi. Pada gambar kiri atas ditampilkan temperatur di bagian luar cladding, di bagian kiri bawah ditampilkan temperatur bagian dalam bahan baker dari tengah arah tebal plat. Sedangkan di bagian kanan ditampilkan temperatur bahan baker di bagian tengah arah memanjang.

Temperatur sebagai fungsi posisi ditampilkan pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 3. Temperatur pusat bahan baker dari tengah ke tepi (oC) (arah melebar)

Posisi	Temperatur (°C)
1	93,7
2	93,6
3	93,3
4	92,9
5	92,2
6	91,4
7	90,4
8	89,2
9	87,8
10	86,3

Tabel 4. Temperatur cladding dari tepi ke tengah (oC) (arah memanjang)

Posisi	Temperatur (°C)
1	42,4
2	47,8
3	53,0
4	58,1
5	62,9
6	67,4
7	71,4
8	75,0
9	78,1
10	80,6

Tabel 5. Temperatur pusat bahan baker dari ujung ke ujung (arah memanjang)

Posisi	Temperatur (°C)	Posisi	Temperatur (°C)
1	46,3	6	91,3
2	58,9	7	84,2
3	73,0	8	73,0
4	84,2	9	58,9
5	91,3	10	46,3
6	93,7		



Program yang telah selesai di bagian termohidrolik ini harus digabung dengan program induk simulator reaktor RSG. Pada tingkat penggabungan ini baru tampak perubahan temperatur akibat perubahan batang kendali.

Perubahan batang kendali akan mengubah populasi neutron yang selanjutnya mengubah panas yang dibangkitkan teras. Perubahan panas yang dibangkitkan teras akan mengubah temperatur pendingin baik primer maupun sekunder. Perubahan temperatur air di bagian teras selanjutnya akan mengubah temperatur bahan bakar.

Pada panel depan program *steady state*, terdapat informasi (sebagai data masukan) temperatur udara, kelembaban, prosen daya teras, pompa primer dan diagram alir pendingin

Pada panel depan program *transient* ditambahkan penampil hasil dalam bentuk grafik. Kenaikan atau penurunan temperatur akibat perubahan daya teras seperti yang ditampilkan pada Gambar 7 mendekati eksponensial

## 6. KESIMPULAN

Simulator pembuang panas RSG\_GAS yang telah dikembangkan ini dapat dipakai untuk studi kemampuan pembuangan panas dengan mensimulasikan beberapa kejadian pada sistem pembuang panas RSG\_GAS. Selain itu simulator ini juga dapat dipakai untuk *predictive maintenance* pada sistem pembuang panas dengan cara membandingkan data operasi dengan data yang ada di simulator. Ini akan membantu operator reaktor melacak gangguan yang terjadi pada sistem pemindah panas, sehingga perbaikan akan lebih cepat dilakukan.

## 7. UCAPAN TERIMA KASIH

Saya sampaikan terima kasih kepada KPTF PRPN yang sudah membantu penyempurnaan makalah saya sehingga makalah saya menjadi lebih komunikatif.

## 8. DAFTAR PUSTAKA

1. M.MIKHEYEV, "Fundamental of Heat Transfer", Peace Publisher, Moscow
2. ANONIM, CTI Code Tower, Standard Specification, CTI USA, 1967