

**DESAIN DAN ANALISIS SISTEM PEMBUANGAN PANAS  
RESIDU PASIF PADA MOLTEN SALT REACTOR EXPERIMENT  
(MSRE) 10 MW**

**Siti Nurhasanah**

UIN Sunan Gunung Djati Bandung, Indonesia

Email: [sitinurhasanah@uinsgd.ac.id](mailto:sitinurhasanah@uinsgd.ac.id)

**ABSTRACT**

As one of the Generation IV reactors, the Molten Salt Reactor (MSR) has the advantage of meeting safety requirements. To enhance the inherent safety, it is necessary to develop a conceptual design of a passive residual heat removal system for the 10 MW Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) designed by Oak Ridge National Laboratory (ORNL). The principle, main components and design parameters of the system were discussed, and the thermohydraulic behaviours, such as natural circulation and heat removal capability, were numerically analysed in C++ code, especially for the bayonet cooling thimble. The results show that this system can effectively remove the decay heat in the molten salt in MSRE and has a heat removal rate close to the decay heat generation rate, thus causing the temperature of the molten salt to decrease stably. The width of the gas gap in the bayonet cooling thimble has little effect on the heat exchange or natural circulation inside the thimble, while the width of the vapour riser, although it has little effect on the heat transfer of the system, greatly affects the natural circulation. With the vapour riser width increasing from 3.6 to 5.1 mm, the mass flow rate increases from 1.9 kg/s to 4.79 kg/s. Finally, three operational schemes are proposed for the passive residual heat dissipation system, among which reducing the thimble cooling thimble to three quarters results in comprehensive performance.

Keywords: Residual heat, passive safety, molten salt reactor experiment, bayonet cooling thimble, C++

**ABSTRAK**

Sebagai salah satu reaktor Generasi IV, Molten Salt Reactor (MSR) memiliki keunggulan dalam memenuhi persyaratan keselamatan. Untuk meningkatkan keamanan yang melekat, diperlukan pengembangan desain konseptual dari sistem pembuangan panas residu pasif untuk Molten Salt Reactor Experiment (MSRE) 10 MW yang dirancang oleh Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Prinsip, komponen utama dan parameter desain sistem menjadi salah satu pembahasan, dan perilaku termalhidraulik, seperti sirkulasi alami dan kemampuan penghilangan panas, dianalisis secara numerik dalam kode C ++, terutama untuk bidal pendingin bayonet. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem ini dapat secara efektif menghilangkan panas peluruhan dalam garam cair dalam MSRE dan memiliki tingkat penghilangan panas yang mendekati laju pembangkitan panas peluruhan, sehingga menyebabkan suhu garam cair menurun secara stabil. Lebar celah gas di bidal pendingin bayonet tidak banyak berpengaruh pada pertukaran panas atau sirkulasi alami di dalam bidal, sementara lebar penambah uap, meskipun sedikit pengaruhnya pada perpindahan panas sistem, sangat mempengaruhi sirkulasi alami. Dengan lebar penambah uap meningkat dari 3,6 menjadi 5,1 mm, laju aliran massa meningkat dari 1,9 kg/dtk menjadi 4,79 kg/dtk. Akhirnya, tiga skema operasional diusulkan untuk sistem pembuangan panas residu pasif, di antaranya dengan mengurangi bidal pendinginan bidal menjadi tiga perempat menghasilkan kinerja yang komprehensif.

Kata Kunci: panas residu, keselamatan pasif, molten salt reactor experiment, bidal pendingin bayonet, C++

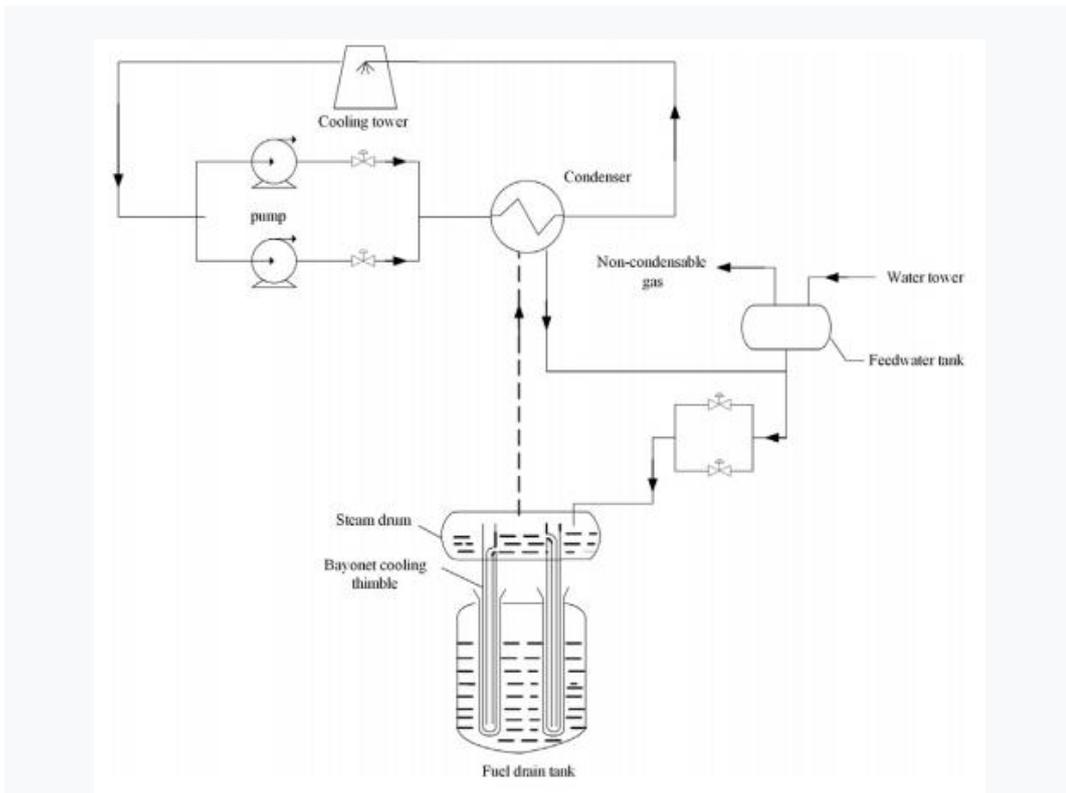
## PENDAHULUAN

Sebagai satu-satunya reaktor bahan bakar cair di antara enam kandidat dari Proyek reaktor nuklir canggih generasi IV, garam cair reaktor (MSR) pada awalnya diusulkan oleh Oak Ridge National Laboratory (ORNL) untuk percobaan reaktor pesawat terbang (ARE) dan percobaan reaktor garam cair (MSRE). Kedua proyek ini membentuk teknologi dasar untuk MSR dan menunjukkan keunggulan utama MSR, termasuk faktor produksi neutron yang baik, keamanan bawaan dan pengisian bahan bakar online, pemrosesan, dan pemindahan produk pemisah (Holcomb & Cetiner, 2010; LeBlanc, 2010; Robertson, 1965). Mengikuti proyek-proyek ini, banyak penelitian dilakukan oleh ORNL berdasarkan pengalaman positif MSRE, dan beberapa konsep untuk MSR diusulkan untuk produksi energi nuklir skala besar.

Keselamatan harus menjadi faktor pertama yang dipertimbangkan ketika merancang reaktor atau sistem. Di antara semua masalah yang terkait dengan keselamatan, kuncinya adalah untuk memastikan bahwa panas residu dihilangkan secara efisien (Iwamura, Murao, Araya, & Okumura, 1995). Sebagai salah satu reaktor Generasi IV, MSR seharusnya memiliki lebih banyak karakteristik pasif demi meningkatkan keamanan bawaannya, terutama untuk sistem pembuangan panas residualnya. Kecelakaan pembangkit listrik tenaga nuklir Fukushima Daiichi menunjukkan bahwa jika terjadi pemadaman stasiun (SBO) yang dikombinasikan dengan kegagalan generator diesel darurat, sisa panas dalam teras reaktor tidak dapat dihilangkan secara efektif, sehingga kemungkinan mengarah ke serangkaian masalah serius lainnya, seperti pencairan inti reaktor dan kebocoran gas radioaktif. Oleh karena itu, sistem pembuangan panas residu pasif harus dipertimbangkan dalam desain pembangkit listrik tenaga nuklir (Wang, Qiu, Tian, Su, & Zhang, 2013).

Gambar.1 menunjukkan skema dari sistem pembuangan panas residual untuk MSRE yang dikembangkan oleh ORNL (Beall, Haubenreich,

Lindauer, & Tallackson, 1965) di mana sistem pembuangan panas peluruhan digerakkan oleh pompa elektrik, teknik yang konsisten dengan pembangkit listrik tenaga nuklir Fukushima Daiichi. Menurut desain ini, terbukti bahwa sistem akan berhenti bekerja setelah pompa kehilangan daya.



Gambar 1. Diagram skema dari sistem pembuangan panas residu

Saat ini, konsep keselamatan pasif semakin banyak digunakan dalam desain pembangkit listrik reaktor untuk meningkatkan keselamatan dan penyederhanaan desain sistem. Konsep keamanan pasif diusulkan untuk meningkatkan keamanan dan keandalan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) pada tahun 1980-an. Prinsip kerja sistem keselamatan pasif adalah untuk menggabungkan dan menggunakan langkah-langkah keamanan pasif, seperti gravitasi atau sirkulasi alami yang disebabkan oleh perbedaan densitas berdasarkan teknologi PWR yang ada untuk memastikan integritas reaktor (Juhn, Kupitz, Cleveland, Cho, & Lyon, 2000; Schulz, 2006). Ini tidak hanya menyederhanakan peralatan keselamatan teknik tetapi juga mengurangi kemungkinan kerusakan bagian sistem, sehingga

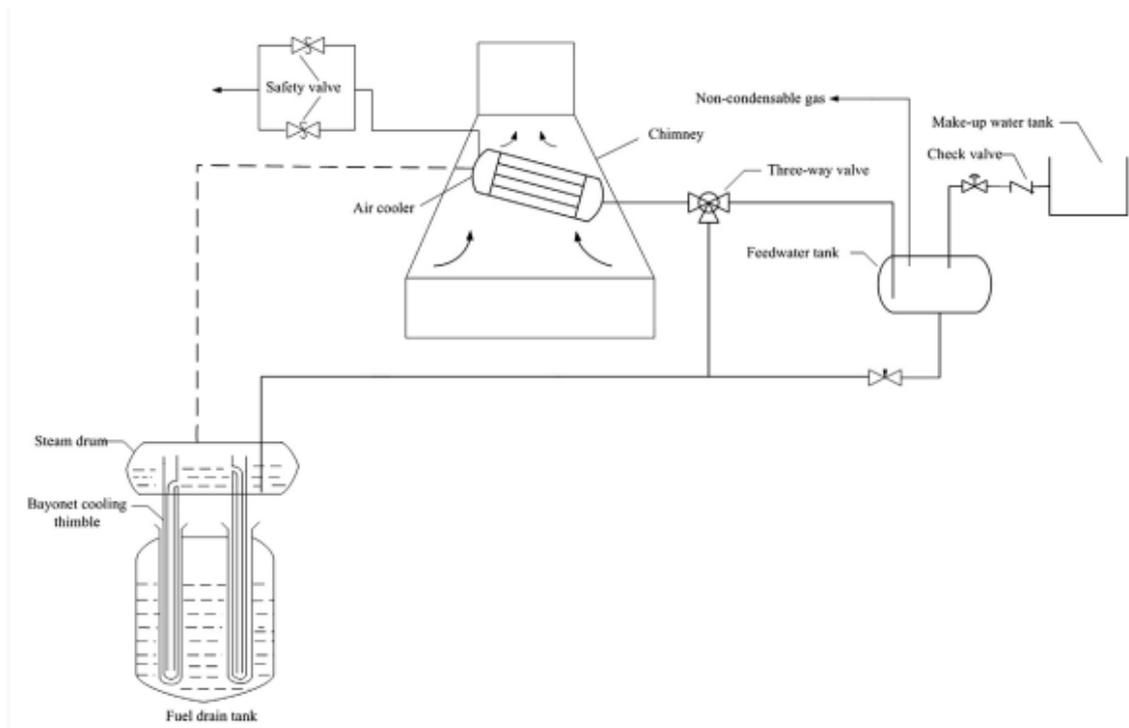
meningkatkan keselamatan yang melekat pada pembangkit listrik tenaga nuklir. Dengan demikian, sistem keselamatan pasif telah diadopsi secara luas oleh reaktor nuklir generasi ketiga, seperti AP1000 (Wang et al., 2012; Zhang, Qiu, Su, & Tian, 2011).

Sebuah reaktor garam cair berbasis thorium, *Thorium Molten Salt Reactor* (TMSR) merupakan salah satu perkembangan baru-baru ini dari Program Penelitian Prioritas Strategis dari Chinese Academy of Sciences (CAS). Dengan tujuan untuk meneliti dan mengembangkan energi fisi dari generasi keempat, tujuan proyek TMSR adalah membangun reaktor garam cair berbasis thorium dengan daya 2 MW dan meningkatkan kapasitas teknik yang mendukung evolusi sistem energi nuklir TMSR pada tahun 2020. Dalam penelitian ini mengambil keuntungan penuh dari konsep pasif dan merancang sistem pembuangan panas residual pasif untuk reaktor garam cair dengan daya penuh 10 MW. Model perpindahan panas yang melibatkan bidal pendingin bayonet, loop utama dan pendingin udara dikembangkan menggunakan program C++ untuk menyelidiki kemampuan penghilangan panas residu dan karakteristik transien dari sistem. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan dasar atau gambaran desain teknik dari sistem pembuangan panas residu pasif, terutama peningkatan keamanan yang melekat pada reaktor garam cair Cina 2 MW.

## **TINJAUAN PUSTAKA**

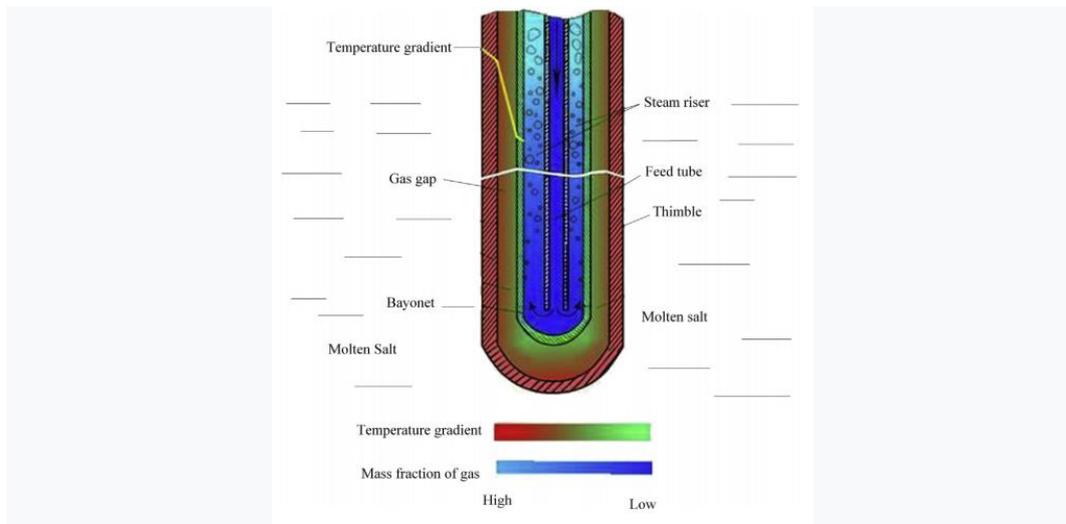
### **1. Deskripsi Sistem**

Alih-alih menggunakan sirkulasi paksa air untuk mendinginkan kondensor, pendingin udara alami diadopsi untuk meningkatkan keselamatan dan keandalan yang melekat dari MSRE. Gambar 2 menunjukkan diagram skematik dari sistem pembuangan panas residu pasif yang dirancang untuk reaktor garam cair 10 MW, yang terutama terdiri dari tangki pembuangan bahan bakar, drum uap, pendingin udara, cerobong asap, tangki air umpan, katup dan pipa yang sesuai.



Gambar 2. Diagram skema sistem pembuangan panas residu pasif

Panas peluruhan yang dihasilkan dalam garam cair dalam tangki pembuangan dihilangkan oleh aliran air mendidih dalam tabung bayonet dimasukkan ke dalam bidal, yang direndam dalam garam cair. Gambar. 3 menunjukkan diagram skematik bidal pendingin bayonet, yang terutama terdiri dari dua tabung konsentris. Dan bagian dalam berfungsi sebagai downcomer untuk air umpan, dan uap dihasilkan dalam annulus sekitarnya, yaitu, penambah uap.



Gambar 3. Diagram skema bidal pendingin bayonet

Setelah sistem digerakkan, air dalam riser uap dipanaskan hingga mendidih, yang mengarah pada penumpukan sirkulasi alami di bidal pendingin bayonet karena perbedaan kepadatan antara tabung umpan dan penambah uap. Air dalam drum uap masuk ke tabung umpan dari lubang masuk terbuka di dalamnya dan mengalir ke bawah bagian bawah bayonet, di mana nantinya akan berbalik dan masuk ke penambah uap. Saat air mengalir ke atas dalam penambah uap, ia menyerap sisa panas dari garam yang meleleh dan menguap. Selanjutnya, campuran mengalir ke drum uap, di mana air diresirkulasi sementara uap mengalir ke pendingin udara yang ditempatkan di cerobong asap. Karena sirkulasi udara yang alami, uap terkondensasi dalam pendingin udara dan mengalir kembali ke drum uap dengan gravitasi. Jadi, itu sisa panas dikeluarkan dari garam dan akhirnya dilepaskan ke atmosfer. Tangki air umpan dan tangki pemutus aliran air berfungsi sebagai fasilitas pasokan air untuk drum uap. Gas yang tidak terkondensasi dalam tangki air umpan dihilangkan dan dilepaskan ke atmosfer setelah disaring.

Untuk membuat sistem pasif, perangkat proteksi tekanan berlebih diperlukan di loop utama untuk mencegah kecelakaan serius akibat tekanan berlebih. Katup pengaman, dipasang pada pendingin udara, akan secara otomatis terbuka ketika tekanan dalam loop melebihi nilai yang ditetapkan karena kondisi kecelakaan, seperti kegagalan kondensor, dll., dengan

demikian melepaskan uap ke sistem kondensat uap. Sistem pembuangan panas pasif terdiri dari tiga loop sirkulasi alami. Ini termasuk (1) sirkulasi alami dua fase dalam bidal pendingin bayonet, yang mentransfer panas peluruhan ke loop kedua; (2) sirkulasi alami dua fase antara pendingin udara dan drum uap; (3) loop terbuka di mana uap masuk pendingin udara terkondensasi oleh sirkulasi udara di cerobong asap.

## 2. Model Matematika

Seperti terlihat pada Gambar. 3, ada dua penghalang independen, dinding bidal dan dinding tabung bayonet, untuk memisahkan garam bahan bakar dari air jika tabung thimble terganggu atau rusak. Panas dipindahkan dari bidal ke bayonet. tabung oleh radiasi dan konduksi termal, yang dapat dihitung dengan persamaan berikut (Ramesh & Dusan, 2002):

$$\Phi_r = \frac{\sigma(T_T^4 - T_B^4)}{\frac{1-\varepsilon_T}{\varepsilon_T} A_T + \frac{1}{A_T X_{T,B}} + \frac{1-\varepsilon_B}{\varepsilon_B} A_B}$$

(1)

$$\Phi_c = \frac{2\pi L(T_T - T_B)}{\ln(D_T/D_B)}$$

(2)

Di bawah kondisi shutdown yang panas, tangki drainase dipanaskan oleh tungku silindris yang mengelilingi dinding tangki untuk mencegah pemadatan garam cair. Bagian atas, bawah, dan panas tangki ditutup dan diisolasi. Namun, penelitian ORNL menunjukkan bahwa kehilangan panas dari tangki pembuangan akan mencapai sekitar 20 kW pada suhu garam bahan bakar 922 K, yang harus dipertimbangkan dalam analisis sistem sehubungan dengan transfer panas.

Sedangkan kehilangan panas dari tangki pembuangan bahan bakar ke keadaan ini terutama hasil radiasi dan konveksi bebas, yang terakhir dikorelasikan dengan angka tak berdimensi yang dinamakan bilangan Grashof (Gr) dan bilangan Prandtl (Pr) serta bilangan Nusselt (Nu) (Yang & Tao, 2006).

$$Nu = C(GrPr)^n$$

(3)

Tabel 1 Parameter utama tangki pembuangan bahan bakar dan drum uap.

<b>Parameter</b>	<b>Nilai</b>
Desain tekanan (kPa)	448.2
Desain temperatur (K)	977
Jumlah bidal pendingin bayonet	32
Diameter tabung bidal (mm)	38
Diameter tabung bayonet (mm)	25.4
Diameter <i>feed tube</i> (mm)	12.7
Diameter <i>steam drum</i> (mm)	1220
Tinggi <i>steam drum</i> (mm)	458
Diameter <i>steam exit</i> (mm)	76
Diameter <i>condensate inlet</i> (mm)	12.7
Daya (kW)	100

untuk bilangan Grashof didefinisikan:

$$Gr = \frac{g\alpha_v\Delta t^3}{\nu^2} \quad (4)$$

di mana C dan n ditentukan pada tabel 2.

Tabel 2 Nilai Konstanta pada persamaan-persamaan yang digunakan

<b>Jenis aliran</b>	<b>C</b>	<b>n</b>	<b>Gr</b>
Aliran laminar	0.59	1/4	$1.43 \times 10^4 - 3 \times 10^9$
Aliran transisi	0.0292	0.39	$3 \times 10^9 - 2 \times 10^{10}$
Aliran turbulen	0.11	1/3	$> 2 \times 10^{10}$

Lazarek dan Black (1982) mengusulkan korelasi sederhana berdasarkan 738 data percobaan yang telah dilakukan terkait pendidihan aliran jenuh R113 dalam sebuah *inner diameter* tabung sebesar 3,15 mm dan mencatat bahwa perpindahan panas yang efisien menunjukkan ketergantungan yang kuat pada fluks panas dengan diabaikannya pengaruh kualitas uap, menunjukkan bahwa mekanisme pendidihan nukleat mengontrol proses perpindahan panas dinding. Pada proses pendidihan terjadi pada *steam riser* bayonet, di mana koefisien perpindahan panas  $h_{tp}$  dihitung dengan metode Lazarek-Black (Sun & Mishima, 2009) (Tabel 1 dan 2).

$$h_{tp} = 30 Re^{0.857} Bo^{0.714} \frac{\lambda_l}{D} \quad (5)$$

$$Re = \frac{GD}{\mu_l} Bo = \frac{q}{G\gamma}$$

(6)

Untuk kasus ini, di mana fluida diuapkan dari cairan pada suhu saturasi ke campuran uap air- cairan dengan perubahan linear dari kualitas massa  $x$  dan panjang  $L$ , rugi tekanan dua fasa dapat dievaluasi dengan:

$$\Delta P = \frac{2f_{tp}G^2Lv_l}{D} \left[ 1 + \frac{x}{2} \frac{v_g - v_l}{v_l} \right] + G^2v_l \frac{v_g - v_l}{v_l} x + \frac{g \sin \theta L}{(v_g - v_l)x} \ln \left[ 1 + x \frac{v_g - v_l}{v_l} \right]$$

(7)

Tabel 3 Parameter utama dari pendingin udara

Parameter	Nilai
Jumlah baris <i>tube</i>	4
Ukuran <i>inner tube</i> (mm)	16
Ukuran <i>outer size</i> (mm)	20
Tinggi <i>fin</i> (mm)	9
Lebar <i>pitch fin</i> (mm)	2.5
Rasio <i>fin</i>	13.9
Jumlah <i>tube</i>	114
Luasan transfer panas (m <sup>2</sup> )	14.4
Tinggi cerobong asap	9.3
Panjang bagian bawah cerobong asap	2.7
Lebar bagian bawah cerobong asap	2.3
Diameter atas cerobong asap	1.35

Faktor friksi dapat dihitung dari bilangan Reynolds dengan menggunakan persamaan Blasius.

$$f_{tp} = 0.079 \left( \frac{GD}{\mu} \right)^{-0.25}$$

(8)

Pendingin udara menggunakan tabung sirip tinggi berbentuk-L sebagai bagian transfer panasnya. Uap mengembun di dalam tabung pendingin udara, dan aliran konveksi mendominasi perpindahan panas di luar tabung. Akers dan Rosson (1960) mengusulkan korelasi sederhana untuk memprediksi koefisien perpindahan panas  $h_i$  dari kondensasi dalam pipa horizontal:

$$for Re = \frac{GeD_i}{\mu_l} < 5 \times 10^4, h_i = 5.03 \frac{\lambda_l}{D_i} Re_l^{\frac{1}{3}} Pr_l^{\frac{1}{3}}$$

(9)

$$\text{for } Re = \frac{G_e D_i}{\mu_l} > 5 \times 10^4, h_i = 0.0265 \frac{\lambda_l}{D_i} Re_l^{0.8} Pr_l^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Dalam kondisi eksperimental, Briggs dan Rose (1999) mengusulkan korelasi modifikasi dari koefisien perpindahan panas untuk tabung sirip tinggi sebagai berikut:

$$h_o = 453.6 V_{wind}^{0.718} \quad (11)$$

Ketinggian cerobong asap bisa diungkapkan dengan mengikuti persamaan (Nuntaphan, Kiatsiriroat, & Wang, 2005)

$$H = \frac{\xi_{\Sigma}}{2g(\rho_o - \rho_m)\rho_{ref}} \left( \frac{V_{wind}}{A_{ref}} \right)^2 \quad (12)$$

$$\xi_{\Sigma} = f_t + f_s \quad (13)$$

di mana  $\xi_{\Sigma}$  adalah total koefisien hambatan dalam cerobong asap,  $A_{ref}$  adalah area permukaan referensi,  $\rho_o$  adalah kerapatan outlet udara,  $\rho_m$  adalah densitas rata-rata,  $f_t$  adalah koefisien hambatan dari cerobong asap, dan  $f_s$  adalah koefisien hambatan dari bundel pipa.

$$f_t = 952.343 Re_{ref}^{-0.5227} \quad (14)$$

$$f_s = \frac{1.536}{\left( \frac{D_t}{D_b} \right)^4} \quad (15)$$

di mana  $D_t$  dan  $D_b$  adalah diameter bagian atas dan sama dengan diameter bagian bawah cerobong asap, masing-masing.

Penurunan tekanan udara melalui tabung bersirip tergantung pada kecepatan angin dan jumlah baris tabung  $N_r$  (Rabas, Eckels, & Sabatino, 1981)

$$\Delta P_s = 2.292 N_r V_{wind}^{1.434} \quad (16)$$

Resistensi gesekan  $h_f$  dan resistansi local  $h_j$  dalam pipa dalam sistem dapat dievaluasi oleh Persamaan (17) dan (18).

$$h_f = \lambda \frac{L V^2}{d 2g}$$

(17)

$$h_j = \lambda \frac{L V^2}{d 2g}$$

(18)

Sistem pembuangan panas residual pasif terdiri dari tiga pasangan sirkulasi alami, dan sirkulasi alami dibangun oleh menyeimbangkan kepala penggerak  $P_d$  dan hambatan aliran total  $\Sigma \Delta P$  sepanjang loop.

$$\frac{|P_d - \Sigma \Delta P|}{P_d} \leq 1\%$$

(19)

Karena sirkulasi air dan uap ditutup dalam sistem, maka laju aliran massa total uap dan air adalah konstan.

$$M_g + M_l = M_{gl} + M_{l1}$$

(20)

Kesetimbangan termal antara garam cair dan sistem pembuangan panas pasif dapat diekspresikan oleh

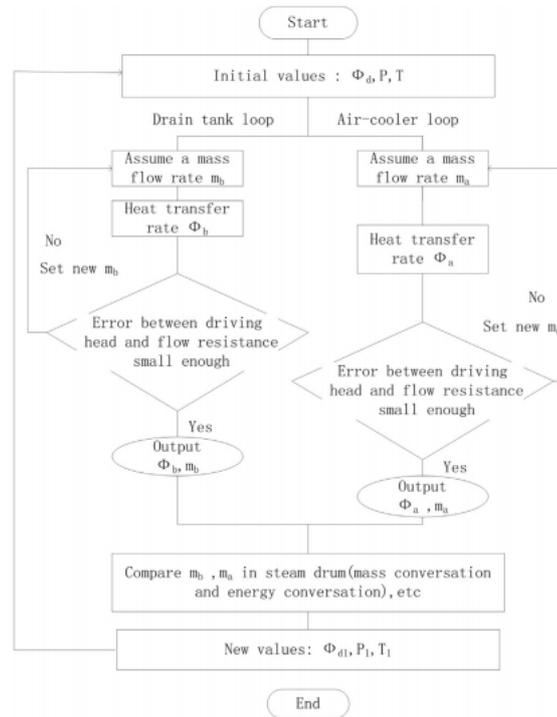
$$MC_p \Delta T = (\phi_b + \phi_T - \phi_d) \Delta t$$

(21)

di mana  $\phi_b$  adalah kekuatan bidal pendingin bayonet,  $\phi_T$  adalah daya disipasi panas dari tangki pembuangan bahan bakar, dan  $\phi_d$  adalah daya peluruhan dari garam cair.

## **METODOLOGI PENELITIAN**

Kemampuan penghilangan panas dari sistem pembuangan panas pasif dievaluasi dengan menyeimbangkan kepala penggerak dari sirkulasi alami dan hambatan aliran sepanjang loop dengan asumsi aliran satu dimensi dalam kondisi tunak. Model numerik dibangun dalam kode C++, dimana perilaku termalhidrolik sistem diperoleh sesuai dengan prosedur yang ditunjukkan pada Gambar. 4.



Gambar 4. Diagram alir metode numerik untuk analisis termalhidrolik

Adapun langkah-langkah yang bisa dilakukan adalah sebagai berikut:

Pertama, nilai awal, seperti daya peluruhan  $\phi_d$ , tekanan dalam drum uap  $P$  dan suhu garam cair  $T$  diberikan, dan laju aliran massa dari sirkulasi alami di tabung bayonet  $m_b$  dan daya bidal pendingin bayonet  $\phi_b$ , dan lain-lain dapat diperoleh dengan menghitung sirkulasi alami dalam bidal pendingin bayonet

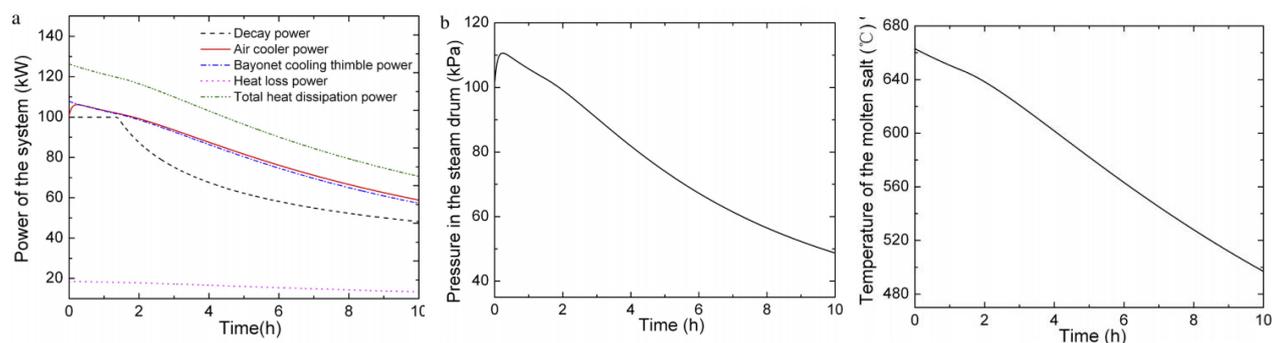
Kedua, parameter, seperti laju aliran massa dari kondensasi  $m_a$  dan daya pendingin udara  $\phi_a$ , bisa diperoleh dengan menyeimbangkan kepala penggerak dari sirkulasi alami dan hambatan aliran sepanjang loop antara pendingin udara dan drum uap

Ketiga, persamaan konservasi massa dan persamaan konservasi energi diselesaikan untuk mendapatkan perubahan tekanan dalam drum uap serta perubahan suhu garam cair. Hasilnya akan digunakan sebagai nilai awal waktu berikutnya.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Analisis sistem numerik

Gambar. 5 menunjukkan perbandingan laju penghilangan panas dari bidal pendingin bayonet dan pendingin udara dengan laju peluruhan panas. Garam cair dialirkan ke tangki pembuangan bahan bakar setelah reactor dalam keadaan mati, dan daya peluruhan sebesar 100 kW dalam 1,5 jam pertama. Tingkat pembuangan panas bidal pendingin bayonet mencapai nilai maksimum 107,8 kW di awal dan menurun terus menerus sesudahnya. Kehilangan panas dari tangki pembuangan sekitar 18,6 kW, menghasilkan daya disipasi panas total awal dari tangki pembuangan bahan bakar 126,4 kW. Kekuatan pendingin udara meningkat menjadi 106,2 kW setelah sistem digerakkan dan berkurang secara bertahap sesudahnya.



Gambar 5. Parameter transien sistem a) variasi daya berbanding waktu, b) variasi tekanan dalam drum uap terhadap waktu. c) variasi dari suhu garam cair terhadap waktu

Dalam percobaan MSRE, penelitian ORNL menunjukkan bahwa kehilangan panas dari tangki pembuangan sekitar 20 kW, dan kekuatan dari sistem pembuangan panas residual adalah sekitar 100 kW (Beall et al., 1965), keduanya mendekati hasil diperoleh dalam penelitian ini.

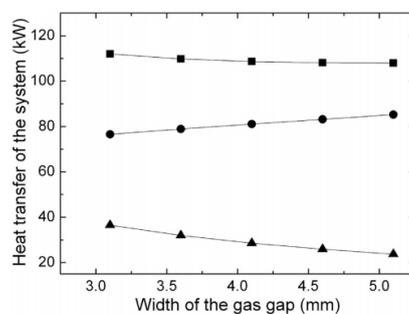
Dengan adanya penurunan daya peluruhan, tekanan dalam drum uap pada awalnya naik dan kemudian turun perlahan. Nilai awal dari tekanan sekitar 101 kPa, mencapai nilai maksimumnya sebesar 111 kPa pada 880 s, hal ini dikarenakan pendinginan dari pendingin udara yang tidak memadai pada kondisi awal. Karena total daya pembuangan panas lebih

besar dari daya peluruhan, suhu garam cair dengan nilai awal dari 663°C, akan turun menjadi 50°C dalam 10 jam. Untuk memastikan keamanan absolut dari sistem dalam desain reaktor garam cair Cina 2 MW. Percobaan, suhu garam cair diharapkan lebih rendah dari nilai awal dan lebih tinggi dari 500 C.

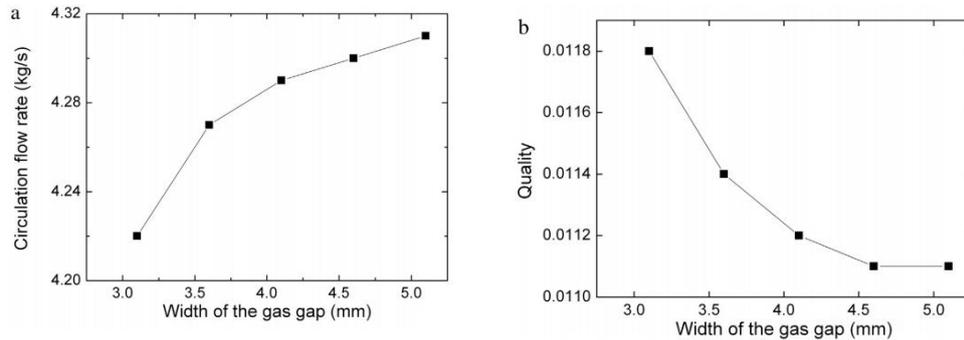
## 2. Pengaruh lebar celah gas pada sistem

Berdasarkan struktur dari bidal pendingin bayonet dalam reaktor garam cair 10 MW, lebar celah gas dan penambah uap mungkin memiliki pengaruh besar pada kinerja bidal pendingin bayonet. Untuk mengevaluasi pengaruhnya, pertimbangkan jika bayonet dan bidal dipasang di diameter luar, kemudian divariasikan tebal dinding mereka untuk mendapatkan lebar yang berbeda untuk celah gas yang mencakup kisaran 3.1-5.1 mm dan lebar berbeda untuk riser uap mulai dari 3,6 hingga 5,1 mm.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 6 dan 7, karena radiasi terutama kontribusinya pada perpindahan panas antara bidal dan tabung bayonet, efek lebar celah gas kecil. Daya dalam transfer panas yang timbul dari radiasi termal meningkat dari 76,58 kW menjadi 85,25 kW ketika lebar celah gas meningkat dari 3,1 mm menjadi 5,1 mm, dan daya dari konduksi termal berkurang dari 36,49 kW menjadi 23,75 kW, sehingga menghasilkan penurunan daya total dari 112 kW hingga 108 kW. Berkaitan dengan aliran bidal pendingin bayonet, laju aliran massa sirkulasi alami naik dari 4,22 kg/s hingga 4,31 kg/s dengan kualitas yang sesuai sedikit menurun dari 0,012 hingga 0,011.



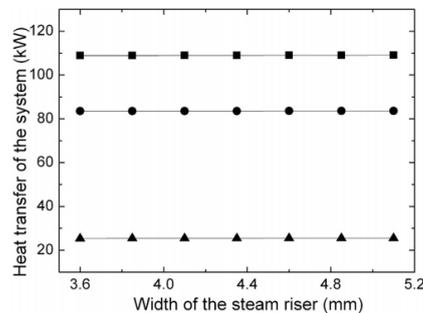
Gambar 6. Pengaruh lebar celah gas pada perpindahan panas. ■ Total daya, ● Perpindahan panas radiasi, ▲ Perpindahan panas konduksi.



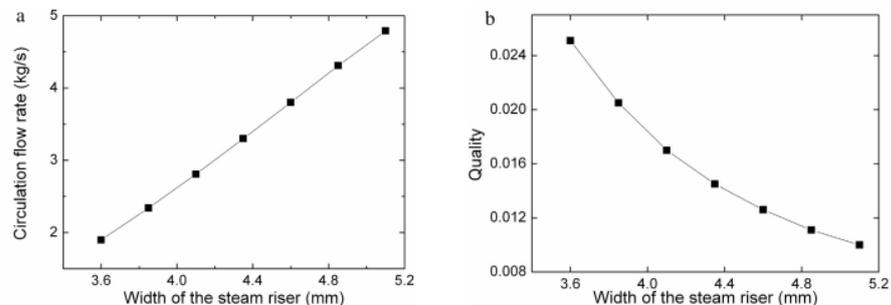
Gambar 7. Pengaruh lebar celah gas pada sirkulasi alami. (a) Pengaruh lebar celah gas pada laju aliran sirkulasi. (b) Pengaruh lebar celah gas pada kualitas.

### 3. Pengaruh lebar riser uap pada sistem

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 8 dan 9, saat lebar penambah uap (*steam riser*) diubah-ubah dari 3,6 mm menjadi 5,1 mm, total daya transfer panas tetap hampir tidak berubah, sementara laju aliran sirkulasi alami pada bidal pendingin bayonet meningkat dari 1,9 kg/s, menjadi 4,79 kg/s dan kualitasnya menurun dari 0,025 menjadi 0,01.



Gambar 8. Pengaruh lebar penambah uap pada pertukaran panas. ■ Total daya, ● Perpindahan panas radiasi, ▲ Perpindahan panas konduksi.



Gambar 9. Pengaruh lebar penambah uap pada sirkulasi alami. (a) Pengaruh lebar penambah uap terhadap laju aliran sirkulasi. (B) Pengaruh lebar penambah uap pada kualitas.

Secara keseluruhan, ketika lebar celah gas meningkat dari 3,1 mm menjadi 5,1 mm, menghasilkan perubahan daya dan sirkulasi alamilaju aliran keduanya kurang dari 5%. Saat lebar uap naik berubah dari 3,6 mm menjadi 5,1 mm, laju aliran massa alami sirkulasi meningkat dari 1,9 kg/dtk menjadi 4,79 kg/dtk; Namun, ada sedikit efek pada efisiensi perpindahan panas sistem. Hasil dari, lebar penambah uap lebih penting untuk optimalisasi sistem.

#### **4. Skema operasional sistematis**

Mempertimbangkan keselamatan reaktor, semua bagian dari sistem yang mengandung garam dipanaskan menggunakan listrik untuk mempertahankan garam di keadaan cair. Di awal operasi, daya peluruhan berkurang dengan cepat, sementara tingkat pembuangan panas masih tinggi. Akibatnya, suhu garam menurun dengan cepat. Ketika laju peluruhan panas rendah, beberapa langkah harus diambil untuk mengendalikan laju pembuangan panas dan dengan demikian mencegah suhu garam cair menurun terlalu cepat. Seperti ditunjukkan pada Gambar. 5, suhu lelehan Garam turun menjadi 500°C dalam 10 jam ketika semua bidal pendingin bayonet sedang bekerja, pada titik mana sistem pemanas tangki pembuangan harus diaktifkan untuk memastikan keamanan mutlak sistem.

Untuk sistem pembuangan panas residu pasif, dibuat tiga skema operasional, termasuk mengubah jumlah bidal pendingin bayonet dan menyesuaikan aliran udara di cerobong asap, untuk menunda proses start-up pemanas tangki pembuangan bahan bakar

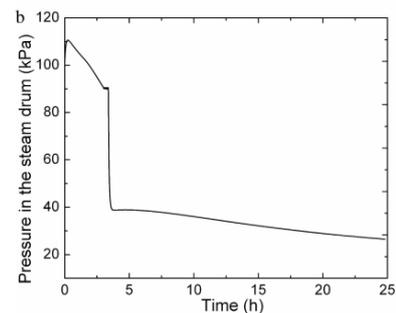
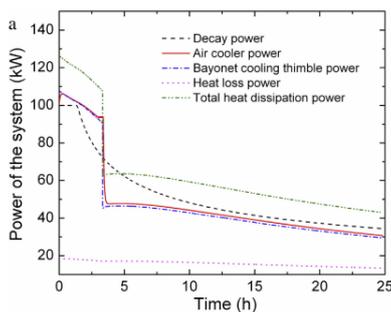
#### **5. Skema mengurangi bidal pendingin bayonet hingga setengahnya**

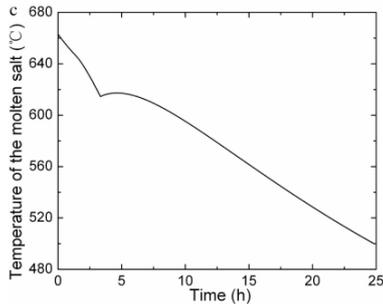
Dalam desain MSRE, bukaan pintu masuk bidal memiliki dua jenis ketinggian yang bergantian dengan bidal yang berdekatan. Dengan demikian, jumlah bidal pendingin bayonet dapat dikurangi setengahnya menyesuaikan level air dalam drum uap.

Ketika bidal pendingin bayonet berkurang, hasil perhitungan menunjukkan bahwa suhu garam cair akan naik dengan cukup drastis bahkan bisa melebihi kapasitas dari tangki pembuangan bahan bakar. Untuk memenuhi persyaratan agar tetap bisa beroperasi, bidal pendingin

dikurangi setengahnya setelah sistem bekerja selama 3 jam. Skema ini diimplementasikan dengan mengatur tiga arah katup yang dipasang pada pipa loop tengah dan menggunakan air yang terkondensasi ke dalam tangki air umpan sampai tingkat air dalam drum uap menurun ke nilai tertentu, dengan demikian menyebabkan bukaan dengan ketinggian lebih tinggi terpapar dari air. Setelah itu, hanya setengah dari bidal pendingin bayonet yang tersisa bekerja dan kapasitas pendinginan turun menjadi sekitar setengah. Katup tiga arah kemudian disesuaikan kembali ke posisi semula untuk mengarahkan kondensat kembali ke drum uap seperti sebelum penyesuaian.

Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 10, setelah setengah pendinginan bidal bayonet tidak berfungsi, kapasitas pembuangan panas menurun tajam dan total daya pembuangan panas mencapai tingkat yang sama kurang dari daya peluruhan, menyebabkan suhu garam cair meningkat dari  $615^{\circ}\text{C}$  menjadi  $617^{\circ}\text{C}$  untuk waktu yang singkat. Oleh karena itu, daya bidal pendingin bayonet dan daya disipasi panas total juga akan sedikit meningkat karena kenaikan suhu garam cair, tetapi menurun lagi setelah system telah berjalan selama 4,6 jam. Suhunya menurun secara monoton karena daya pembuangan panas total melebihi panas peluruhan dan diperlukan 25 jam sebelum suhu menurun menjadi  $500^{\circ}\text{C}$ .



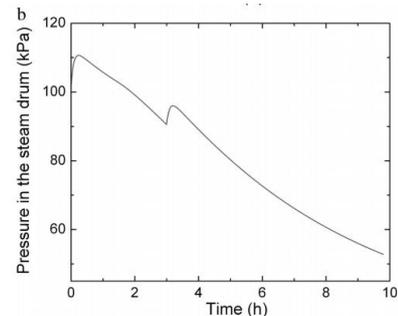
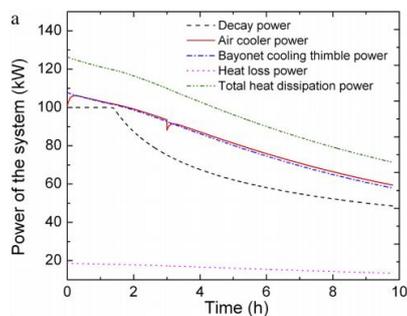


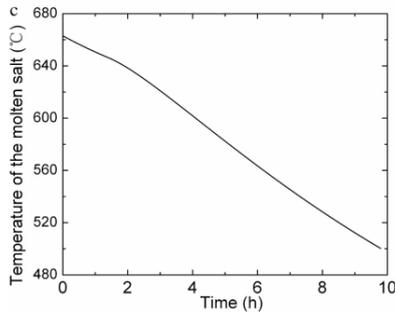
Gambar 10. Variasi parameter sistem transien setelah mengurangi bidal pendingin bayonet bidal menjadi setengahnya. (a) Variasi daya sistem berbanding waktu. (B) Variasi tekanan dalam drum uap berbanding waktu. (c) Variasi suhu garam cair berbanding waktu.

## 6. Skema menyesuaikan aliran udara di cerobong asap

Dengan mengurangi pembukaan cerobong asap dapat menghasilkan penurunan intensitas perpindahan panas dari sistem yang muncul dari reduksi arus masuknya udara, sehingga mencapai tujuan untuk menurunkan kekuatan pendingin udara.

Gambar. 11 menunjukkan hasil numerik dari perubahan dalam daya sistem suhu garam cair dan lain-lain. Daya dari pendingin udara menurun dengan cepat setelah mengurangi separuh laju aliran udara di cerobong asap dengan mengatur regulator peredam yang dipasang di bagian bawah cerobong asap. Sementara itu, tekanan dalam drum uap naik dari 90 kPa hingga 96 kPa karena laju pembangkitan uapnya melebihi tingkat kondensasi. Secara bersamaan, perpindahan panas di pendingin udara secara bertahap ditingkatkan karena peningkatan tekanan, dengan demikian menghasilkan kondensasi lebih banyak uap. Setelah itu tekanan sistem menurun lagi dan mencapai sekitar 52 kPa dalam 10 jam kemudian.





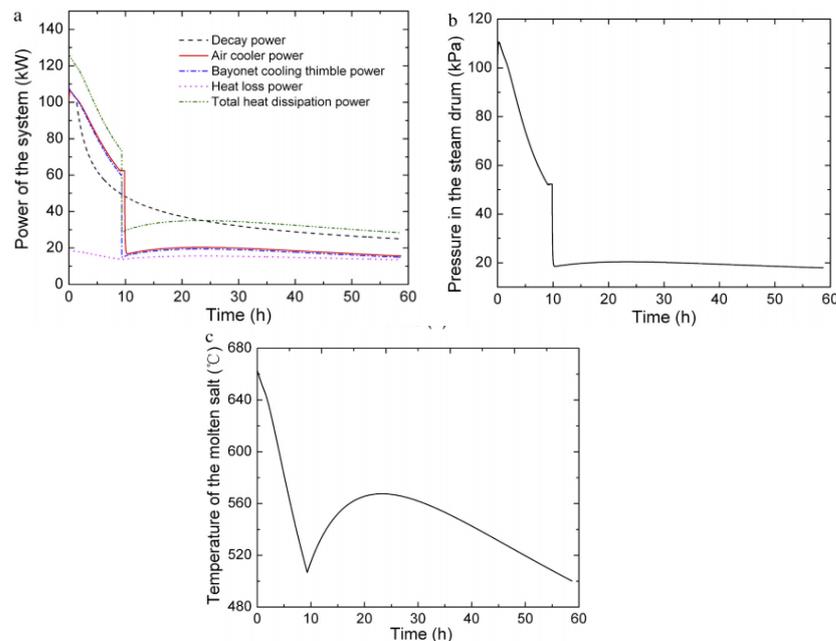
Gambar 11. Variasi parameter sistem transien setelah menyesuaikan aliran udara di cerobong asap. (a) Variasi daya sistem berbanding waktu. (B) Variasi tekanan dalam drum uap berbanding waktu. (c) Variasi suhu garam cair berbanding waktu.

Meskipun tekanan dalam drum uap akan meningkat selama periode tertentu setelah mengurangi aliran udara di cerobong asap, ia hanya memiliki sedikit pengaruh pada proses perpindahan panas mendidih dalam bidal pendingin bayonet. Dengan demikian, suhu garam cair akan terus menurun hingga  $500^{\circ}\text{C}$  dalam 10 jam. Alhasil, skema menyesuaikan aliran udara di cerobong asap hampir tidak dapat berdampak pada daya sistem.

#### **7. Skema mengurangi bidal pendingin bayonet oleh tiga-tempat tinggal**

Untuk lebih memudahkan laju penurunan suhu garam cair dan penundaan start-up dari pemanas tangki bahan bakar, jumlah inlet bidal pendingin bayonet rendah berkurang dari 16 menjadi 8, tanpa mengubah jumlah total. Jadi, setelah menyesuaikan sistem, tiga perempat bagian bidal pendingin akan berhenti bekerja. Selanjutnya, untuk menjaga keseimbangan antara daya peluruhan dan kapasitas pembuangan panas, waktu dari akan mulai operasi hingga penyesuaian tidak kurang dari 3 jam. Jika kurang dari 3 jam, suhu garam cair akan naik dengan cukup drastis karena penurunan kapasitas pendingin yang dihasilkan dari tiga perempat dari bidal pendingin bayonet dalam keadaan tidak bekerja. Selain itu, seperti yang dijelaskan di sini, sistem harus disesuaikan 10 jam setelah digerakkan. Karena itu diperlukan sekitar 50 menit untuk mengurangi jumlah bidal pendingin bayonet yang beroperasi, jam ke 9 setelah dimulainya operasi adalah waktu yang tepat untuk menyesuaikan sistem.

Seperti yang dapat diamati dari Gambar 12, tekanan dalam drum uap berkurang hingga 52 kPa setelah sistem berjalan selama 9 jam, dan setelah itu, turun menjadi sekitar 19 kPa dalam 50 menit setelah sirkulasi alami dibangun kembali dalam sistem.



Gambar 12. Variasi parameter sistem transien setelah mengurangi bidal pendinginan bayonet menjadi tiga perempat. (a) Variasi daya sistem berbanding waktu. (B) Variasi tekanan dalam drum uap berbanding waktu. (c) Variasi suhu garam cair berbanding waktu.

Suhu garam cair naik dari  $506,8^{\circ}\text{C}$  menjadi  $567^{\circ}\text{C}$  setelah pembentukan kembali sirkulasi alami, dan sebagai hasilnya, kekuatan bidal pendingin bayonet dan panas disipasi naik pada saat bersamaan. Setelah berjalan selama 23 jam, suhu garam cair menurun lagi dan mencapai  $500^{\circ}\text{C}$  pada jam ke-59, yang masih dalam kriteria aman.

Di antara tiga skema ini, jelas bahwa yang terakhir bias lebih lanjut menunda waktu penyesuaian serta memulai pemanas tangki drain bahan bakar, sehingga menunjukkan kinerja lebih baik. Selain itu, penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa suhu garam akan melebihi nilai awalnya jika jumlah inlet bidal pendingin bayonet inlet rendah dikurangi menjadi 6 atau kurang.

## SIMPULAN

Dalam penelitian ini, sistem pembuangan panas residu pasif untuk *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) dirancang dan diverifikasi secara numerik. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa apabila dibandingkan dengan sistem pendingin yang asli, sistem baru memiliki tingkat *inherent safety* (keamanan yang melekat) lebih baik. Sistem tersebut memenuhi fungsinya dengan tiga cara sirkulasi alami dan bisa secara efektif memenuhi persyaratan keamanan tersebut. Lebar penambah uap memiliki efek yang jelas pada sirkulasi alami di bidal pendingin bayonet dibandingkan dengan penambahan celah gas. Namun secara keseluruhan tidak juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kinerja perpindahan panas yang terjadi. Skema operasional dengan mengurangi bidal pendingin bayonet menjadi tiga perempat bagian menghasilkan kinerja yang paling baik di antara ketiga skema yang dilakukan. Skema tersebut dapat menunda waktu penyesuaian menjadi satu persembilan jam dan menunda start-up pemanas tangki pembuangan bahan bakar menjadi jam ke-59.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akers, W. W., & Rosson, H. F. (1960). Condensation inside a horizontal tube. *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 56(30), 145–150.
- Beall, S. E., Haubenreich, P. N., Lindauer, R. B., & Tallackson, J. R. (1965). *MSRE Design and Operation Report V*. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/4034157>
- Briggs, A., & Rose, J. W. (1999). An Evaluation of Models for Condensation Heat Transfer on Low-finned Tubes. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 6(1), 51–60. <https://doi.org/10.1615/jenhheattransf.v6.i1.50>
- Holcomb, D. E., & Cetiner, S. M. (2010). *An Overview of Liquid Fluoride Salt Heat Transport Systems*. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/990239>

- Iwamura, T., Murao, Y., Araya, F., & Okumura, K. (1995). A concept and safety characteristics of JAERI passive safety reactor (JPSR). *Progress in Nuclear Energy*, 29, 397–404. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00068-u](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00068-u)
- Juhn, P. E., Kupitz, J., Cleveland, J., Cho, B., & Lyon, R. B. (2000). IAEA activities on passive safety systems and overview of international development. *Nuclear Engineering and Design*, 201(1), 41–59. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00260-0](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00260-0)
- LeBlanc, D. (2010). Molten salt reactors: A new beginning for an old idea. *Nuclear Engineering and Design*, 240(6), 1644–1656. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.12.033>
- Nuntaphan, A., Kiatsiriroat, T., & Wang, C. C. (2005). Air side performance at low Reynolds number of cross-flow heat exchanger using crimped spiral fins. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(1–2), 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.03.022>
- Rabas, T. J., Eckels, P. W., & Sabatino, R. . . (1981). The effect of fin density on the heat transfer and pressure drop performance of low-finned tube banks. *Chemical Engineering Communications*, 10(1–3), 127–147. <https://doi.org/10.1080/00986448108910930>
- Ramesh, K. S., & Dusan, P. S. (2002). *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Robertson, R. C. (1965). *MSRE Design and Operation Report I*. Office of Scientific and Technical Information ({OSTI}). <https://doi.org/10.2172/4654707>
- Schulz, T. L. (2006). Westinghouse AP1000 advanced passive plant. *Nuclear Engineering and Design*, 236(14–16), 1547–1557. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.03.049>
- Sun, L., & Mishima, K. (2009). An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels. *International*

*Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(23–24), 5323–5329.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.041>

Wang, M., Qiu, S., Tian, W., Su, G., & Zhang, Y. (2013). The comparison of designed water-cooled and air-cooled passive residual heat removal system for 300MW nuclear power plant during the feed-water line break scenario. *Annals of Nuclear Energy*, 57, 164–172.  
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.01.027>

Wang, M., Zhao, H., Zhang, Y., Su, G., Tian, W., & Qiu, S. (2012). Research on the designed emergency passive residual heat removal system during the station blackout scenario for CPR1000. *Annals of Nuclear Energy*, 45, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2012.03.004>

Yang, S. M., & Tao, W. Q. (2006). *Heat Transfer*. Beijing: Higher Education Press.

Zhang, Y., Qiu, S., Su, G., & Tian, W. (2011). Design and transient analyses of emergency passive residual heat removal system of CPR 1000. Part I: Air cooling condition. *Progress in Nuclear Energy*, 53(5), 471–479.  
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.03.001>