

KAJIAN SISTEM PENDINGIN REAKTOR MSR UNTUK MENDUKUNG KETAHANAN ENERGI MASA DEPAN

STUDY OF MSR REACTOR COOLING SYSTEM TO SUPPORT FUTURE ENERGY RESILIENCE

Andhika Aji Sastra dan Eko Misriyanto
Puslitbang Iptekhan, Balitbang Kemhan
r.andhika@gmail.com
ekomisriyanto5@gmail.com

ABSTRAK

Perancangan prakonseptual sistem pendingin MSR (Molten Salt Reactor) ini bertujuan untuk mendesain komponen utama sistem pendingin, seperti pompa dan penukar panas, agar memenuhi spesifikasi desain. Dalam kegiatan ini, juga dilakukan perhitungan temperatur outlet (keluar) dan laju alir. Desain sistem pendingin berfungsi menjamin agar teras dapat didinginkan dengan aman selama berlangsung operasi normal, transien, dan kecelakaan. Perancangan dilakukan dengan perangkat lunak FLUENT dengan memodelkan teras dalam 1/8 geometri silinder. Temperatur inlet (masuk) 550°C dan tekanan 3 bar menjadi parameter yang ditetapkan dalam desain. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konfigurasi teras yang didesain memiliki kemampuan mengalirkan bahan bakar dengan baik, meskipun terdapat dead zone di beberapa lokasi di atas dan di bawah teras aktif. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa temperatur outlet maksimum sebesar 630°C. Desain penukar panas primer dan sekunder masing-masing berjumlah satu unit dengan kapasitas 20 MWt. Kemampuan penukar panas primer dapat menaikkan pendingin garam sebesar 92,4°C, sedangkan penukar panas sekunder sebesar 103,1°C. Hasil perancangan menunjukkan bahwa seluruh spesifikasi desain dapat dipenuhi dengan unjuk kerja yang maksimum dan selamat.

Kata kunci: reaktor garam cair, penukar panas, laju alir, temperatur, FLUENT

ABSTRACT

This pre-conceptual design for the MSR (Molten Salt Reactor) cooling system aims to design the main components of the cooling system, such as pumps and heat exchangers, to meet the design specifications. In this program, calculations of the outlet temperature and the flow rate were also carried out. The cooling system design functions to ensure that the core can be cooled safely during normal, transient, and accident operations. The design was carried out using FLUENT software by modeling the core in the 1/8-cylinder geometry. Inlet temperature of 550°C and the pressure of 3 bar were chosen as an input parameter. The calculation results showed that the proposed core configuration has a good fuel flow distribution, even though there are dead zones at several locations above and below the active core. The calculation result showed that the maximum outlet temperature is 630°C. The designs for primary and secondary heat exchanger are using 1 unit for each of them with the capacity of 20 MWt. The performance of the primary heat exchanger can increase the temperature of cooling salt by 92.4°C, while the secondary heat exchanger 103.1°C. The design results showed that all technical specifications can be met with maximum and safe performances.

Keywords: molten salt reactor, heat exchanger, coolant flow, temperature, FLUENT

PENDAHULUAN

Fokus desain pada sistem pendingin teras reaktor adalah mempersiapkan sistem pendingin agar seluruh panas yang dihasilkan dari teras reaktor dapat dipindahkan. Dengan demikian, teras reaktor tetap utuh selama beroperasi secara normal maupun dalam kondisi darurat. Sistem pendingin pada reaktor MSR (*Molten Salt Reactor*) memiliki perbedaan yang mendasar dibandingkan tipe reaktor lain, khususnya dalam hal sistem primer. Reaktor MSR menggunakan bahan bakar garam cair, yang selain berfungsi sebagai bahan bakar, juga berperan dalam sistem pendingin. Oleh karena itu, di sepanjang sistem primer, bahan bakar bergerak dari teras ke pompa, lalu ke penukar panas dan kembali lagi ke dalam reaktor.

Tujuan utama kegiatan ini adalah mendapatkan desain reaktor MSR yang akan dipakai sebagai laboratorium di darat yang merupakan pengembangan dari reaktor MSR pada platform kapal. Fungsi sistem pendingin reaktor pada kapal adalah menyediakan sistem perpindahan panas yang cukup untuk teras dan menyediakan daya untuk menggerakkan propulsi kapal. Penggerak propulsi dan sistem listrik kapal dapat dilakukan dengan memanfaatkan motor listrik. Akan tetapi pada laboratorium reaktor MSR di darat, aplikasinya agak berbeda, sebab reaktor menjadi fasilitas multi fungsi yang harus menghasilkan listrik sehingga diperlukan sistem pembangkit uap. Penyusunan desain sistem pendingin reaktor MSR akan terfokus kepada penentuan temperatur bahan bakar pada teras (masuk dan keluar), laju alir bahan bakar, kapasitas pompa primer dan sekunder, serta kapasitas penukar panas.

METODOLOGI PENULISAN

Metode yang digunakan dalam penulisan ini, yaitu metode deskriptif analitik. Data yang digunakan diperoleh dari beberapa hasil analisis dan kajian yang ada, disertai wawancara dan diskusi dengan pihak-pihak terkait. Dari data tersebut, kemudian dilakukan analisis berdasarkan sumber dan teori yang ada untuk menghasilkan rekomendasi sebagai dasar kebijakan ketahanan energi pertahanan ke depan.

LANDASAN TEORI

1. Sistem Primer

Seperti yang dinyatakan dalam Bab I, sistem pendingin primer reaktor MSR memiliki perbedaan dibandingkan reaktor jenis lain, karena penggunaan bahan bakar garam cair yang berfungsi ganda (sebagai pembangkit panas dan juga pendingin). Tekanan operasi reaktor MSR tergolong rendah (< 5 bar), sehingga tekanan di seluruh sistem primer juga menjadi rendah. Temperatur bahan bakar garam berkisar di titik $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ (titik didih bahan bakar garam adalah $\sim 1.400\text{ }^{\circ}\text{C}$) sehingga temperatur reaktor tergolong tinggi. Adapun komponen utama sistem primer MSR adalah, sebagai berikut:

a. Pompa

Fungsi utama pompa adalah mengalirkan bahan bakar dari teras menuju penukar panas untuk kemudian kembali lagi ke reaktor. Pompa yang dipakai pada reaktor MSRE (*Molten Salt Reactor Experiment*) adalah pompa sentrifugal *sump-type* dengan *shaft* vertikal.

b. Penukar panas

Fungsi utama penukar panas adalah memindahkan sebagian panas dari sistem primer ke sistem sekunder sehingga temperatur reaktor dapat konstan terjaga. Posisi penukar panas dapat diletakkan secara horizontal (MSRE) ataupun berdiri tegak (TMSR500), sedangkan untuk penggunaan di dalam kapal sebaiknya berdiri untuk menghemat ruang ke arah radial.

Dalam desain prakonseptual, reaktor MSR memakai material SS316 sebagai bahan utama pipa primernya mengingat usia operasi sistem primer sama dengan usia moderator grafit seperti yang dipakai pada reaktor TMSR500.

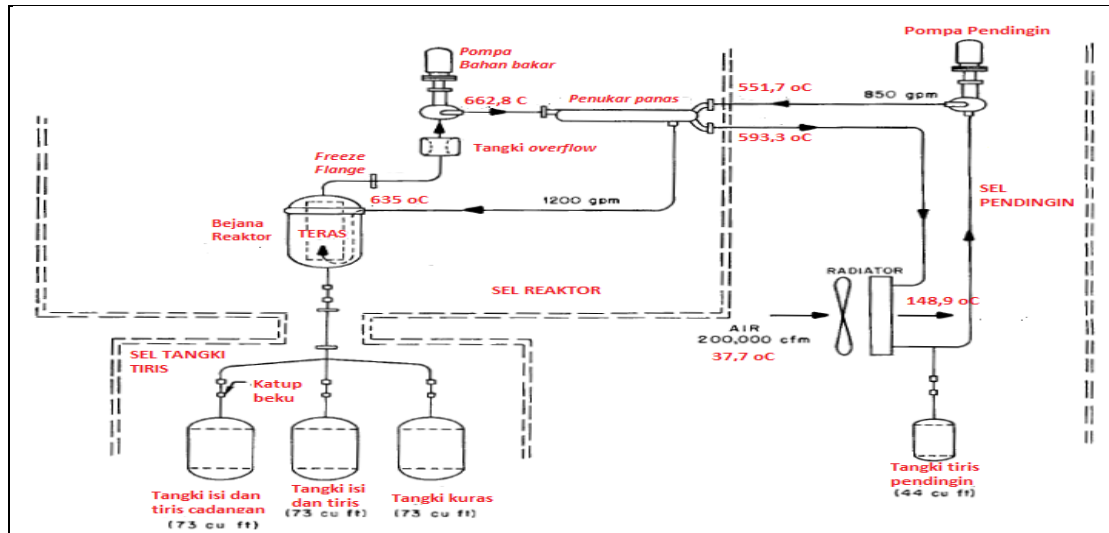
2. Sistem Sekunder

Komponen utama pada sistem sekunder adalah pompa dan penukar panas, yang berfungsi untuk memindah-

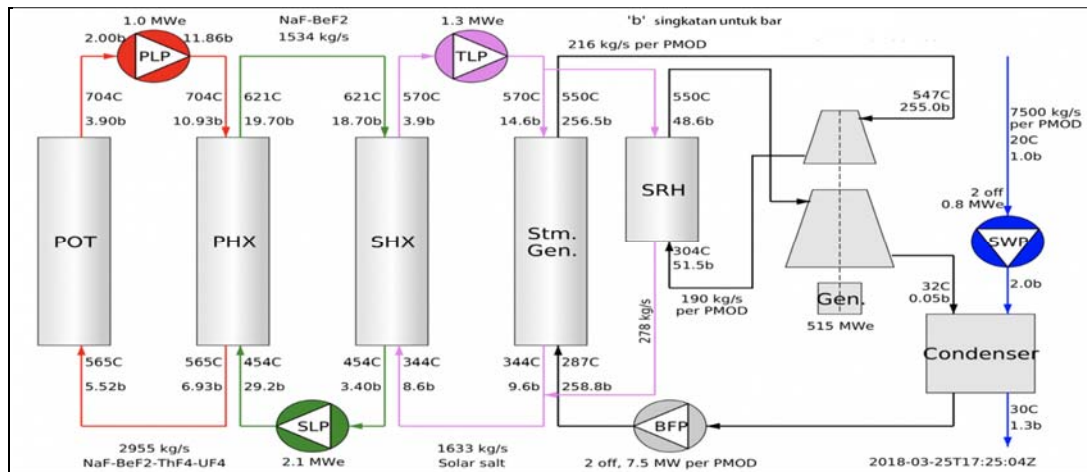
kan panas dari sistem primer. Fluida pendingin yang dipakai pada sistem sekunder adalah garam cair, seperti NaF-BeF₂. Laju alir fluida pada sistem sekunder lebih rendah dibandingkan sistem primer tetapi tekanan pada sistem sekunder lebih tinggi dibandingkan pada sistem primer. Adapun pompa yang digunakan sama dengan yang terdapat pada sistem primer.

3. Sistem Pendingin Lainnya

Penambahan sistem lain, di luar sistem primer dan sekunder, akan disesuaikan dengan fungsi reaktor MSR. Pada reaktor MSRE, proses pendinginan sistem sekunder dilakukan oleh radiator yang bekerja seperti menara pendingin (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram mekanisme sistem pendingin reaktor MSRE Reaktor TMSR500 (ThorCon) menggunakan sistem tersier sebelum ke sistem pembangkit uap (Gambar 2).



Gambar 2. Sistem pendingin dan konversi energi reaktor TMSR500

Keterangan :

POT = tempat reaktor; PHX = penukar panas primer; SHX = penukar panas sekunder; Stm Gen. = pembangkit uap; SRH= steam reheater; PLP = pompa primer; SLP= pompa sekunder; TLP = pompa tersier; Gen. = Generator; BFP = boiler feed pump; PMOD = power modul.

4. Spesifikasi Teknis

Desain prakonseptual sistem pendingin MSR mengacu pada spesifikasi teknis (berdasarkan kontrak), sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi teknis sistem pendingin

No.	URAIAN	NILAI
1.	TERAS REAKTOR	
a.	Temperatur masuk (<i>inlet</i>)	$\pm 635\text{ }^{\circ}\text{C}$
b.	Temperatur keluar (<i>outlet</i>)	$\pm 663\text{ }^{\circ}\text{C}$
c.	Rapat daya rerata / maksimum	$\leq 14\text{ MW/m}^3 / \leq 31\text{ MW/m}^3$
d.	Tekanan	$\pm 3\text{ bar}$
2.	SISTEM PRIMER	
a.	Laju alir	$\geq 4,54\text{ m}^3/\text{menit}$
b.	Jenis pompa	Sentrifugal <i>sump-type</i> dengan <i>saft</i> vertikal
3.	PENUKAR PANAS PRIMER	
a.	Jumlah	Maksimal 2
b.	Posisi	Berdiri (vertikal)
c.	Kapasitas per unit	8-10 MW (minimal)
d.	Tinggi	$\pm 2,5\text{ m}$
e.	Diameter,	$\pm 0,5\text{ m}$
f.	Tipe	Shell dan U-tube
g.	Bagian <i>shell</i>	Bahan bakar garam
h.	Bagian <i>U-tube</i>	Pendingin garam
4.	PIPA PRIMER	
a.	Material	SS316
b.	Diameter dalam	13 cm – 20 cm
c.	Tebal	0,7 cm - 0,8 cm
5.	SISTEM SEKUNDER	
a.	Temperatur masuk (<i>inlet</i>)	$\leq 580\text{ }^{\circ}\text{C}$
b.	Temperatur keluar (<i>outlet</i>)	$\leq 610\text{ }^{\circ}\text{C}$
c.	Jenis pompa	Sentrifugal <i>sump-type</i> dengan <i>saft</i> vertikal
6.	PENUKAR PANAS SEKUNDER	
a.	Jumlah	Maksimal 2
b.	Posisi	Berdiri (vertikal)
c.	Kapasitas per unit	8-10 MW (minimal)
d.	Tinggi	$\pm 2,5\text{ m}$
e.	Diameter	$\pm 0,5\text{ m}$
f.	Tipe	Shell dan U-tube
g.	Bagian <i>shell</i>	Bahan bakar garam
h.	Bagian <i>U-tube</i>	Pendingin garam
7.	PIPA SEKUNDER	
a.	Material	SS316
b.	Diameter dalam	13 cm – 15 cm
c.	Tebal	0,7 cm
8.	SISTEM PEMBANGKIT UAP	
a.	Temperatur masuk (<i>inlet</i>)	$\leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$
b.	Temperatur keluar (<i>outlet</i>)	$\leq 550\text{ }^{\circ}\text{C}$
c.	Laju uap	Tergantung kecepatan sistem propulsi
d.	Jalur 1	Sistem propulsi
e.	Jalur 2	Generator keperluan kapal

5. Kegiatan Desain

Kegiatan desain prakonseptual sistem pendingin dapat dijabarkan, sebagai berikut:

- Desk assesment*. Kegiatan ini bertujuan untuk mengumpulkan seluruh model perhitungan termasuk persamaan-persamaan empiris dan teoritis berkaitan dengan fluida garam cair dan fluida garam.
- Perhitungan temperatur pada teras (masuk dan keluar)
- Perhitungan laju alir pada teras
- Perhitungan kapasitas pompa (primer dan sekunder)
- Perhitungan kapasitas penukar panas (primer dan sekunder)

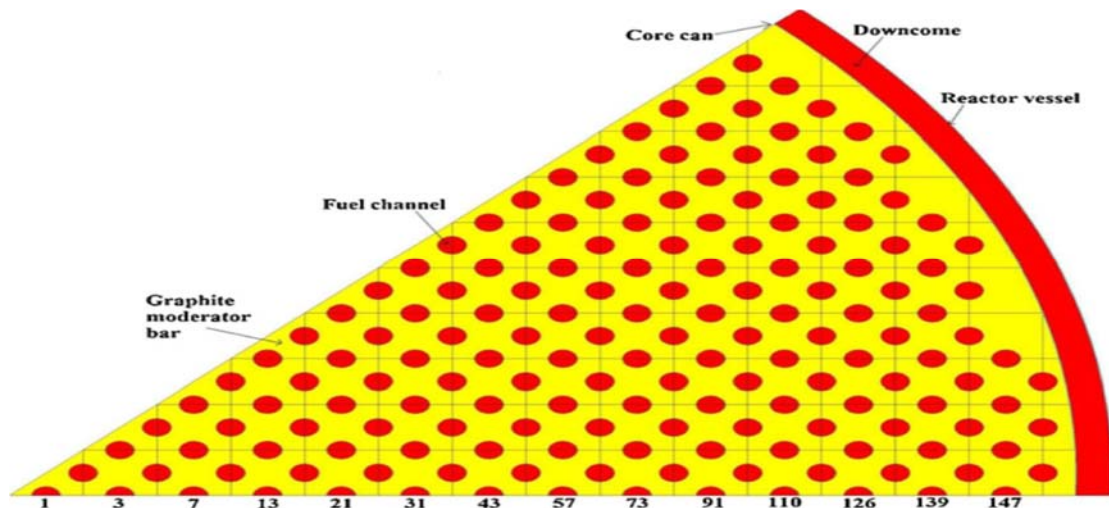
6. Desk Assesment

Desk assesment untuk desain sistem pendingin, khususnya perhitungan laju alir pada teras, dilakukan melalui studi

pustaka. Studi pustaka yang dipilih adalah dokumen yang berkaitan dengan perhitungan termal-hidraulika teras, misalnya kajian Guo, A. dkk [3] yang telah melakukan perhitungan termal-hidraulika untuk reaktor MSRE. Adapun dari hasil kajian pustaka, dapat disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

- Teras harus dimodelkan secara radial (1/8 teras)

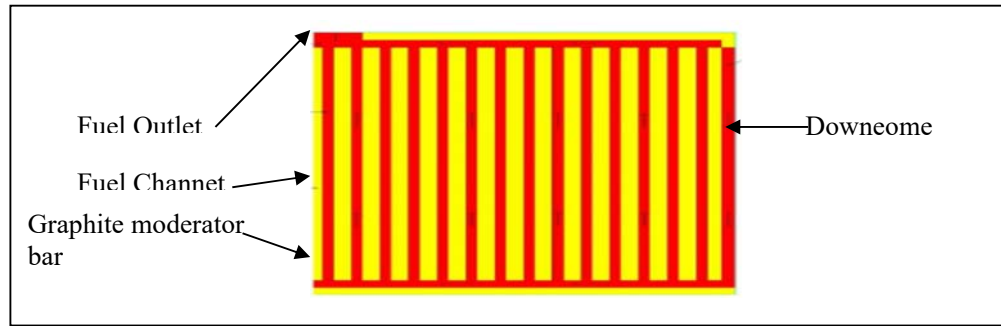
Gambar 3 menunjukkan susunan bahan bakar dengan celah berbentuk kapsul yang disusun menjadi silinder di empat sisi reflektor grafit. Untuk teras MSR, susunan akan berubah karena celah bahan bakar yang berbentuk lingkaran berada di tengah moderator grafit.



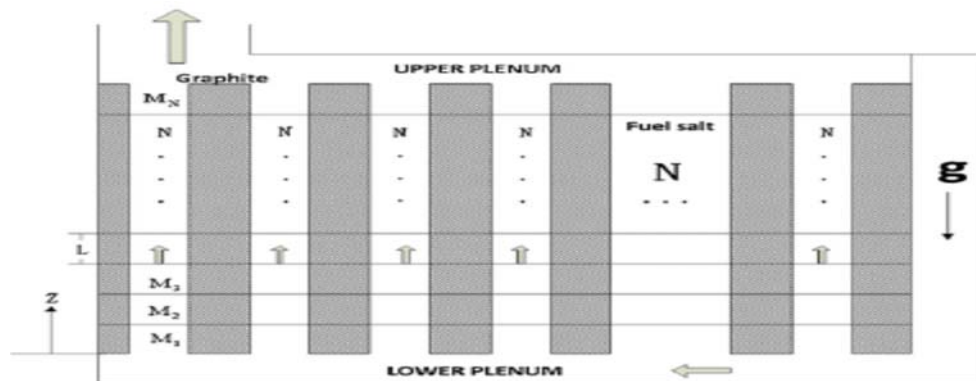
Gambar 3. Model 1/8 geometri silinder teras MSRE

Model teras yang ke arah radial juga harus memperhitungkan lebar celah *downcomer* antara sisi grafit dan sisi tabung tekan. Dilihat dari aspek ini, teras reaktor MSR tidak didesain menggunakan *downcomer* dari sisi bagian *inlet* teras. Aliran bahan bakar akan langsung masuk ke bagian bawah teras menuju bagian plenum bawah.

- Teras harus dimodelkan secara aksial, termasuk arah aliran. Masing-masing gambar di bawah ini menunjukkan model aksial teras dan penetapan arah aliran pada teras.



Gambar 4 Penampang aksial teras



Gambar 5. Model aliran pada teras

Dilihat dari gambar, tampak jelas seluruh bagian aksial telah dimodelkan dengan detail, termasuk bagian *upper* dan *lower* plenum. Bagian ini juga telah dimodelkan dalam desain teras. Demikian pula untuk bagian aksial aliran *outlet* yang keluar dari teras.

- c. Penetapan sifat fisika bahan bakar garam dan grafit.
Dalam menghitung perpindahan panas diperlukan korelasi antara sifat fisika bahan bakar garam dan grafit sebagai fungsi temperatur (T). Keterangan berikut ini merupakan persamaan sifat fisika kedua komponen tersebut.

Kerapatan bahan bakar garam :

$$\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] = 2,599 - 4,819 \times 10^{-3} \times T_f [^{\circ}C]$$

Viskositas bahan bakar garam :

$$\mu [Pas] = 0,1542 \times e^{\left(\frac{3624}{T_f} \right)} [^{\circ}C]$$

Kapasitas panas bahan bakar garam : 1976 [J/kg °C]

Konduktivitas termal bahan bakar garam : 1,44 [W/mK]

Kerapatan grafit :

$$\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right] = 1,89 - 1,0 \times 10^{-5} \times T_M [^{\circ}C]$$

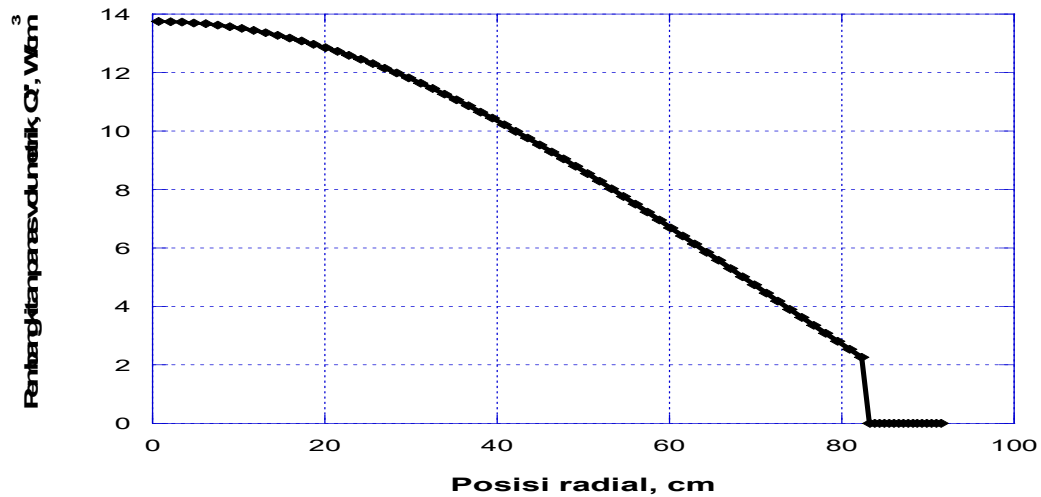
Kapasitas panas grafit : 1758 [J/kg °C]

Konduktivitas termal grafit :

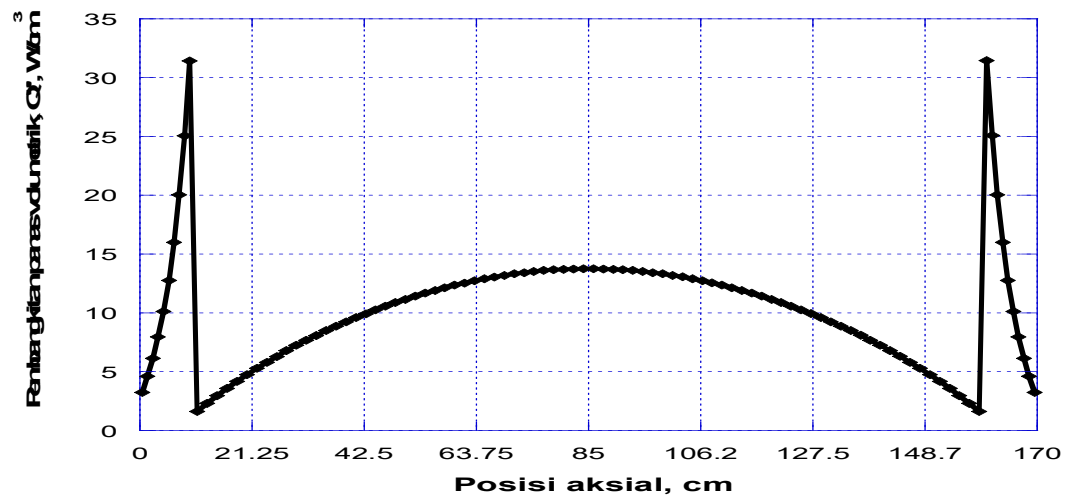
$$\lambda [W/(m^{\circ}C)] = 3763 \times (T_G [^{\circ}C])^{-0,7}$$

7. Data Input Desain

Sebelum melakukan perhitungan teras, diperlukan *input* distribusi panas ke arah radial dan aksial. Distribusi panas ini diambil dari teras terpilih, yaitu teras dengan daya 20 MW dengan tinggi dan jari-jari teras aktif masing-masing 150 cm dan 80 cm.



Gambar 6. Distribusi pembangkitan panas ke arah radial



Gambar 7. Distribusi pembangkitan panas ke arah aksial

Berdasarkan gambar di atas, panas maksimum ke arah radial dan aksial masing-masing sebesar $13,75 \text{ W/cm}^3$ dan $31,43 \text{ W/cm}^3$. Nilai ini akan dipakai dalam perhitungan termal-hidraulika teras reaktor. Adapun penentuan syarat batas pada bagian inlet reaktor adalah, sebagai berikut:

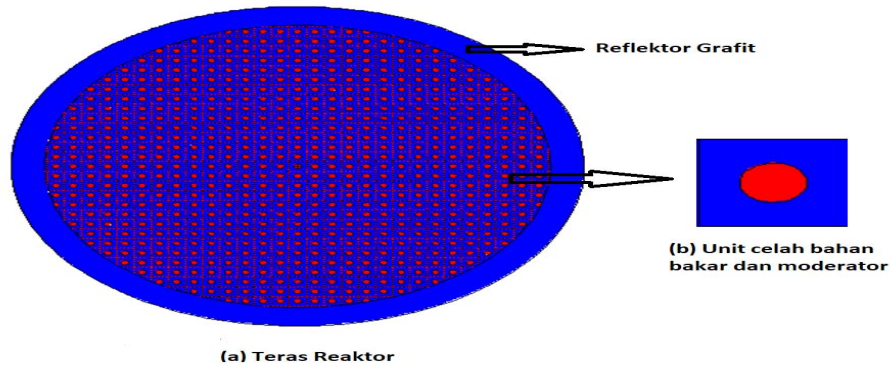
Temperatur inlet = $550 \text{ }^\circ\text{C}$. Penetapan temperatur $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (lebih rendah $100 \text{ }^\circ\text{C}$ dari penetapan awal) dilakukan untuk mengantisipasi terjadinya temperatur lokal maksimum yang dapat mengganggu keutuhan bejana reaktor yang terbuat dari SS316.

Tekanan inlet = 3 bar

Kecepatan aliran bahan bakar garam = $4,5425 \text{ m}^3/\text{menit}$

Gerakan fluida bahan bakar dari bawah (sisi masuk) ke atas teras (sisi keluar)

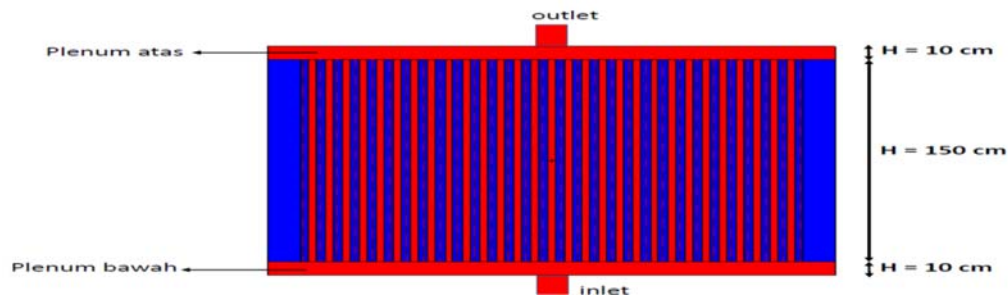
Gambar 8 dan 9 masing-masing menunjukkan model ke arah radial dan aksial teras MSR, di mana satu unit bahan bakar terdiri dari celah tempat bahan bakar bergerak dan moderator grafit di bagian luarnya. Tabel 2 menyajikan data input teras MSR untuk desain pendingin yang berkaitan dengan teras dan unit bahan bakar.



Gambar 8. Model radial teras MSR

Tabel 2. Data input teras MSR untuk desain pendingin

Parameter	Nilai
Daya reaktor	20 MWt
Jari-jari teras aktif	83 cm
Laju alir	4,5425 m ³ /menit
Temperatur masuk	550 °C
Tekanan	3 bar
Tinggi teras aktif	150 cm
Tinggi total teras (dengan asumsi tinggi plenum 10 cm)	170 cm
Jari-jari celah bahan bakar (1 unit)	1,2786 cm
Panjang sisi moderator garfit (1 unit)	5,6655 cm
Jumlah unit bahan bakar pada teras	674
Jari-jari dalam pipa inlet/outlet teras	10,15 cm
Panas yang dibangkitkan dari teras	16,6 MW (83%)
Panas yang dibangkitkan dari plenum	3,4 MW (17%)

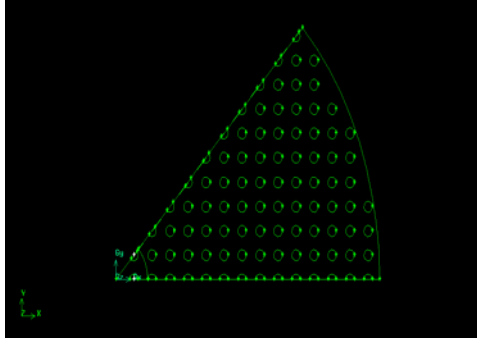


Gambar 9. Model aksial teras MSR

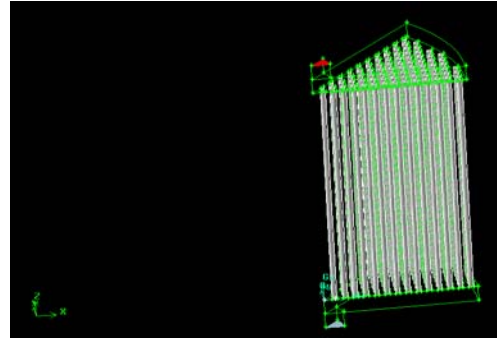
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Perhitungan laju alir Kecepatan Kecepatan aliran bahan bakar saat masuk ke dalam reaktor adalah 4,54 m³/menit (4,5425 m³/menit), dengan tekanan dan temperatur masuk masing-masing 3 bar dan 550 °C.

Perhitungan dilakukan menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.3. berdasarkan data pada Tabel 2 serta model Gambar 8 dan 9. Gambar 10 dan 11 masing-masing menunjukkan model 1/8 teras reaktor MSR ke arah radial dan model 3D teras reaktor.



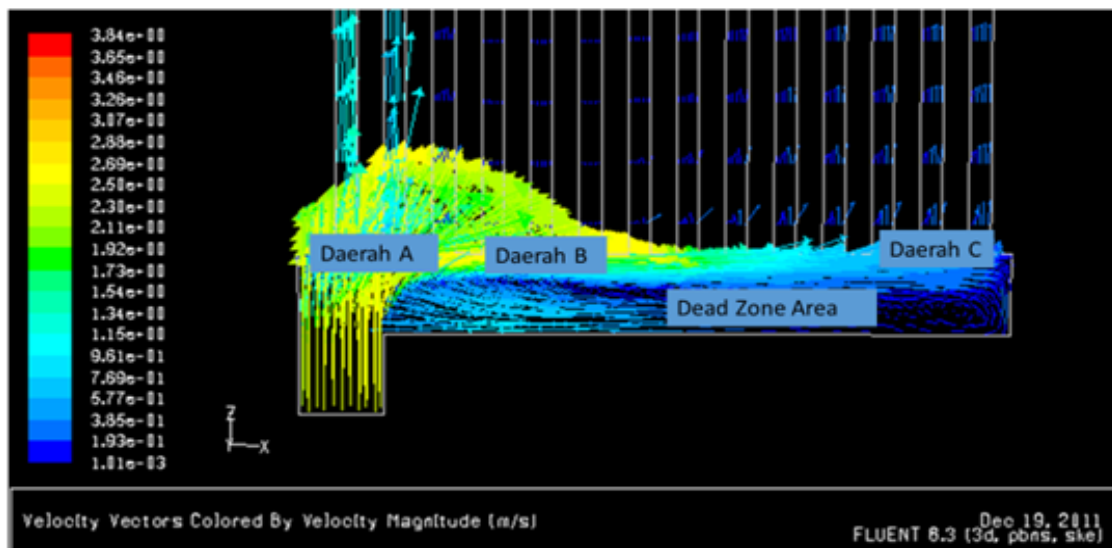
Gambar 10. Penampang X-Y teras reaktor

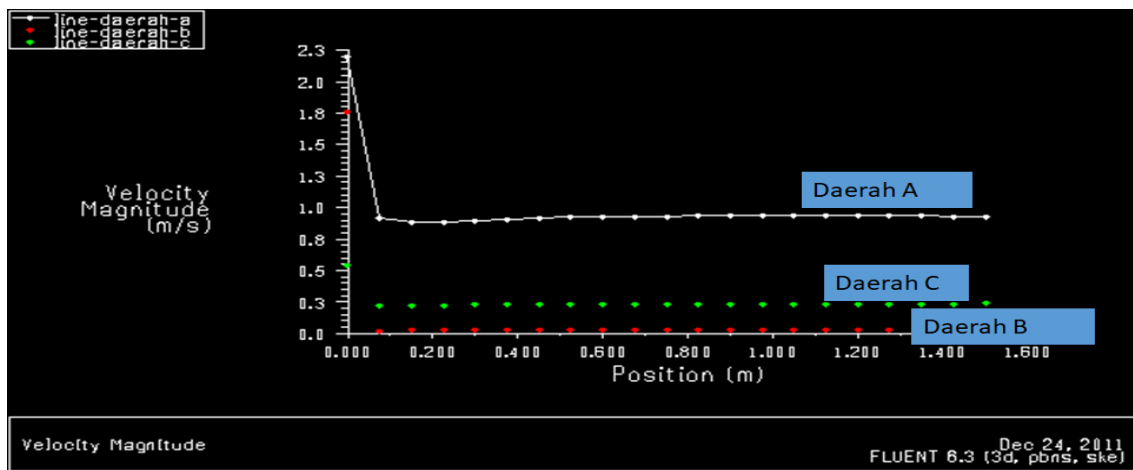


Gambar 11. Model 3-dimensi teras (X-Y-Z)

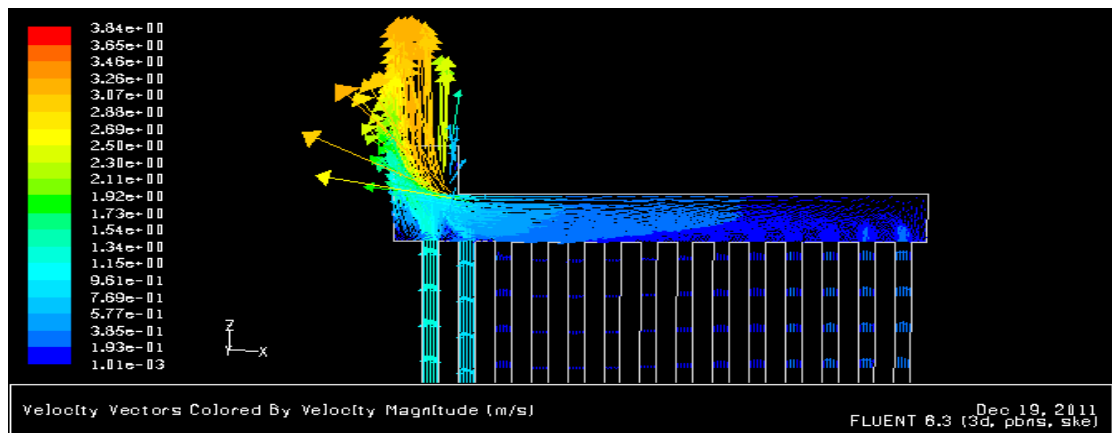
Gambar 12 dan 13 masing-masing menunjukkan vektor aliran pada bagian *inlet* dan *outlet* reaktor. Aliran terjadi karena fluida bahan bakar mendapat tekanan dari pompa. Pada daerah A, karena hambatan yang kecil, fluida akan cenderung mengalir melalui kelongsong ke arah atas. Sebagian fluida yang lain, dengan energi yang masih cukup, akan berbelok dan cenderung mengalir ke daerah C. Dengan aliran fluida yang cenderung mengarah dari daerah A ke daerah C, hanya sebagian kecil fluida di daerah B yang masih mampu berbelok ke atas, sehingga nilai kecepatan fluida dalam kelongsong di daerah B relatif kecil. Di daerah C, sebagian fluida yang masih memiliki energi akan mengalir ke atas

melalui kelongsong, sementara sebagian fluida yang lain akan berbalik ke daerah A. Hal tersebut akan menimbulkan *dead zone area* yang dapat mengurangi efektivitas aliran fluida. Untuk memperbaiki kualitas aliran fluida dan mendapatkan kondisi aliran fluida yang seragam, *dead zone area* perlu diminimalkan dengan cara mengurangi belokan aliran yang tajam atau dengan menambahkan bentuk *fillet* pada bagian belokan tersebut yang disesuaikan dengan bentuk kontur aliran fluida. Adapun pada sisi *outlet*, juga terdapat aliran balik fluida yang menimbulkan *dead zone area*, namun tidak sebesar pada daerah *inlet*.

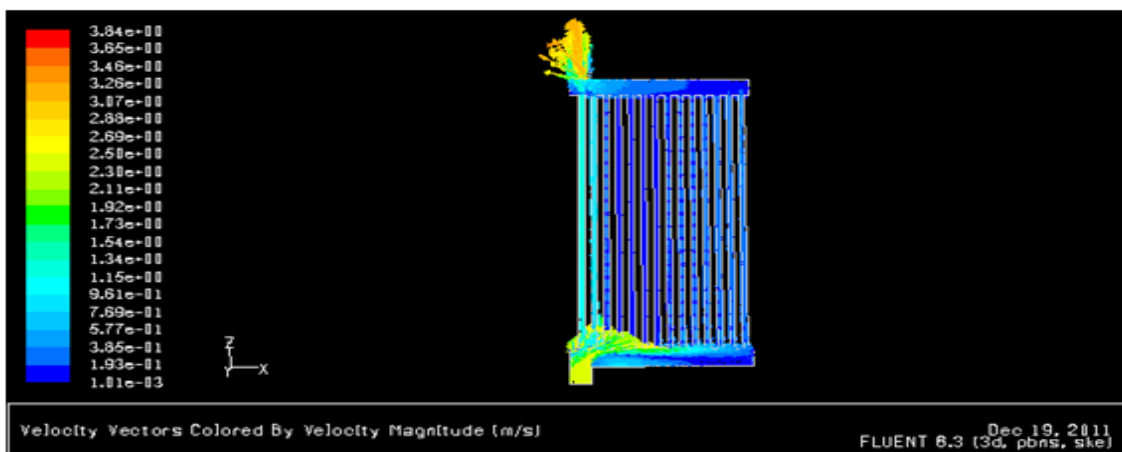
Gambar 12. Pemetaan vektor kecepatan pada penampang $y=0$ cm pada sisi *inlet*



Gambar 13. Kurva kecepatan pada daerah A, B, dan C



Gambar 14. Pemetaan vektor kecepatan pada penampang $y=0$ cm pada sisi *outlet*, distribusi kecepatan pada posisi $y=56,66$ cm yang menunjukkan bahwa distribusi merata di setiap posisi- y .

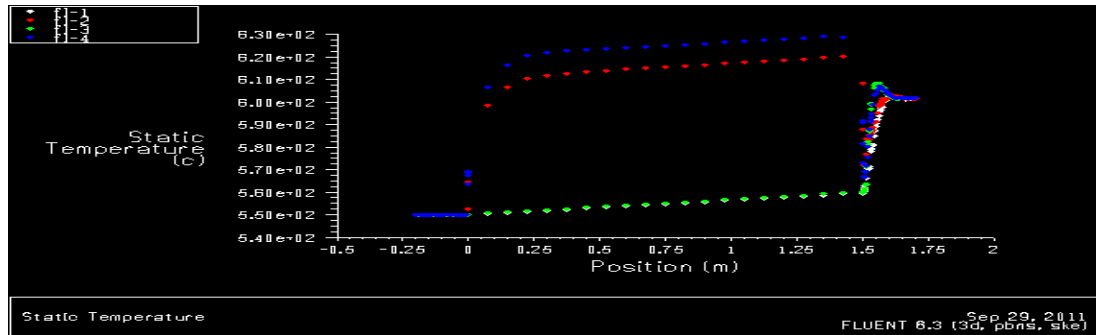


Gambar 15. Pemetaan vektor kecepatan pada penampang $y=56,66$ cm

2. Perhitungan Temperatur Teras

Gambar 16 menunjukkan temperatur teras rerata di sepanjang tinggi aksial teras. Dilihat dari gambar, temperatur *outlet* teras sebesar 630 °C

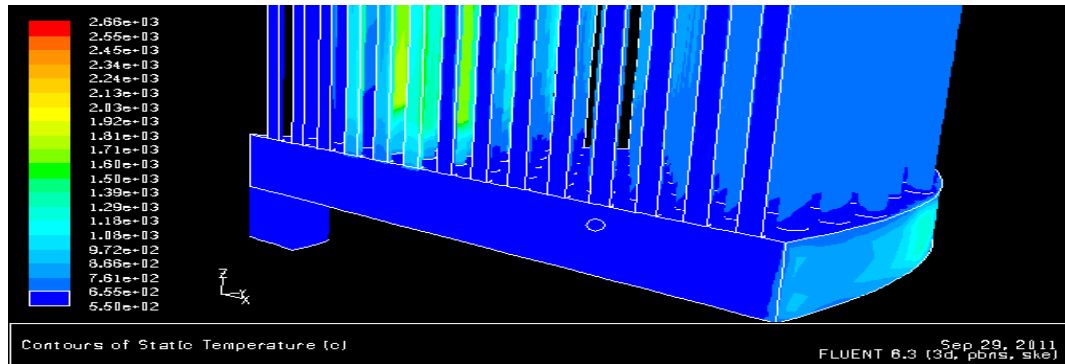
atau lebih rendah 33 °C dari spesifikasi desain. Jika dibandingkan dengan temperatur *inlet*, maka ada kenaikan temperatur sebesar 80 °C.



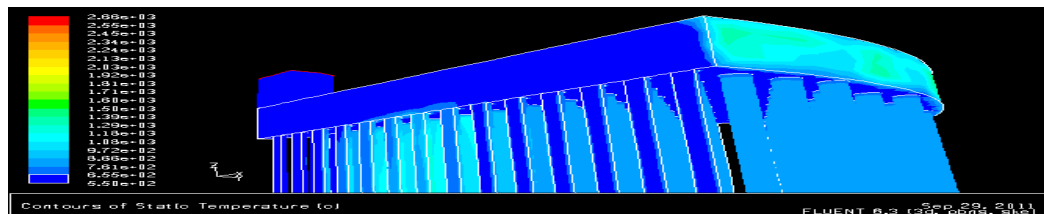
Gambar 16. Distribusi temperatur rerata bahan bakar sepanjang tinggi teras

Gambar 17 dan 18 masing-masing menunjukkan distribusi temperatur di bagian bawah dan atas teras. Dilihat dari gambar, tampak temperatur maksimum yang terjadi pada bejana bagian bawah dan atas masing-masing sebesar 900 °C dan 1180 °C, di mana batas temperatur untuk kondisi operasi berkelanjutan pada baja SS316 adalah 920 °C. Sebagai

catatan, temperatur leleh baja SS316 adalah minimum 1390 °C. Tingginya temperatur ini karena adanya *dead zone area* pada bagian bawah dan atas teras. Oleh karena itu, perbaikan aliran harus dilakukan agar aliran menjadi seragam, sehingga temperatur pada bejana teras dapat dikurangi.



Gambar 17. Distribusi temperatur di bagian bawah teras



Gambar 18. Distribusi temperatur di bagian atas teras

3. Kapasitas Pompa dan Pembangkit Uap

Tabel 3 menyajikan karakteristik pompa primer dan sekunder yang digunakan dalam sistem primer dan sekunder teras MSR. Seluruh data diperoleh dari hasil perhitungan menggunakan perangkat lunak ChemCad

6.1.4 dengan menghitung *balance of plant* sistem konversi energi reaktor MSR. Secara lengkap, data hasil *balance of plant* dapat dilihat di dalam dokumen desain prakonseptual instrumentasi dan kendali serta catu daya.

Tabel 3. Kapasitas pompa primer dan sekunder

Pompa	Nilai
Pompa Primer:	
Fluida	Bahan bakar cair
Tekanan <i>inlet</i>	4 bar
Tekanan <i>outlet</i>	3 bar
Temperatur <i>inlet</i> pompa	630 °C
Temperatur <i>outlet</i> pompa	550 °C
Pompa Sekunder:	
Fluida	Garam cair
Tekanan <i>inlet</i>	18 bar
Tekanan <i>outlet</i>	20 bar
Temperatur <i>inlet</i> pompa,	505 °C
Temperatur <i>outlet</i> pompa,	505 °C

Tabel 4 menyajikan data pembangkit uap yang terkoneksi ke turbin. Pembangkit uap ini juga berperan dalam sistem propulsi kapal.

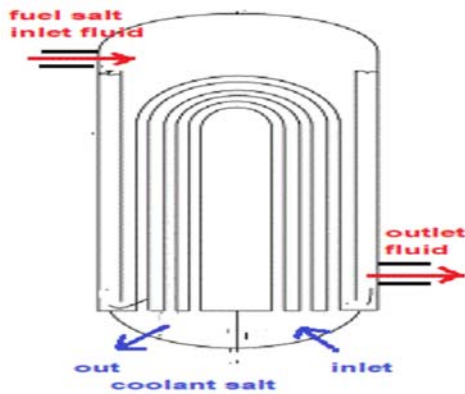
Tabel 4. Data sistem pembangkit uap

	Nilai
Pembangkit uap ke high pressure turbine:	
Fluida <i>inlet</i>	Air
Tekanan <i>inlet</i>	24 bar
Temperatur <i>inlet</i>	350 °C
Fluida <i>outlet</i>	Uap
Tekanan <i>outlet</i>	4,2 bar
Temperatur <i>outlet</i>	145,4 °C
Reheater ke low pressure turbine:	
Fluida <i>inlet</i>	Uap
Tekanan <i>inlet</i>	11 bar
Temperatur <i>inlet</i>	190 °C
Fluida <i>outlet</i>	uap
Tekanan <i>outlet</i>	10 bar
Temperatur <i>outlet</i>	185 °C

4. Penukar Panas Primer

Gambar 19 menunjukkan sketsa penukar panas primer. Dilihat dari gambar, tampak jelas bagian panas adalah fluida bahan bakar garam cair sedangkan pada bagian dingin adalah fluida garam sebagai pendingin. Kondisi bahan bakar cair pada saat masuk ke dalam penukar panas

adalah T_{inlet} dengan suhu 630 °C dan laju alir 4,5425 m³/menit. Adapun pada saat keluar, T_{outlet} bernilai 550 °C. Pada bagian dingin, yaitu aliran pendingin garam, bagian *inlet* memiliki temperatur sebesar 593,3 °C dengan laju alir fluida 5,3629 m³/menit, sedangkan temperatur pada bagian *outlet* akan ditentukan kemudian.



Gambar 19. Sketsa penukar panas primer

Tabel 5. Nilai parameter penukar panas primer

Parameter	Nilai
Beban panas	20 J/s
Fluida pada sisi panas	
- Inlet	610 °C
- Outlet	550 °C
- Laju aliran	0,0757 m ³ /s
- kerapatan	1342146 kg/m ³
- kapasitas panas	0,471968 J/kgK
Fluida pada sisi dingin	
- Inlet	505 °C
- Outlet	597,4 °C
- Laju aliran	0,0894 m ³ /s
- kerapatan	1201922 kg/m ³
- kapasitas panas	0,532217 J/kgK

Persamaan (1) dan (2) akan digunakan dalam menentukan ukuran pemindah panas primer, di mana masing-masing persamaan digunakan untuk menentukan *LMTD* (log mean temperature difference) (°C) dan *A* (luas perpindahan panas) (m²).

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln[(T_1 - t_2)/(T_2 - t_1)]} \quad (1)$$

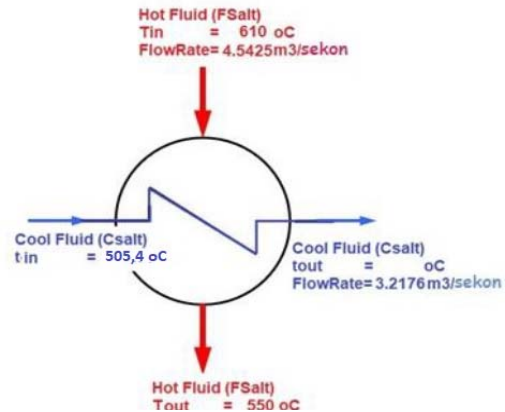
$$A = \frac{Q}{U_o \Delta LMTD} \quad (2)$$

Dari persamaan (1) dan (2) diperoleh hasil, sebagai berikut:

$$LMTD = 65,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_o = 1817 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$$

h (koefisien perpindahan panas bagian sisi *tube* dan *shell*) = 2520 W/(m².K)



Gambar 20. Bagan model penukar panas primer

Luas perpindahan panas yang dibutuhkan = 167,13 m².

Dengan demikian, prediksi awal untuk ukuran penukar panas adalah :

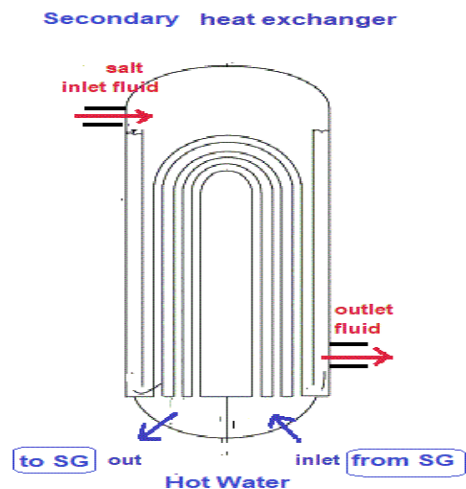
- diameter = 0,54 m

- tinggi = 4,6 m

Dengan catatan, nilai di atas akan terkoreksi lagi jika dilakukan perhitungan *balance of plant*.

5. Desain Penukar Panas Sekunder

Gambar 21 menunjukkan konseptual penukar panas sekunder. Dilihat dari gambar, tampak jelas bagian panas adalah fluida NaF-BeF₂ sedangkan pada bagian dingin adalah garam cair. Kondisi fluida NaF-BeF₂ pada saat masuk ke dalam penukar panas adalah *T inlet* dengan suhu 593 °C dan laju alir 3,2176 m³/menit.



Gambar 21. Sketsa penukar panas sekunder

Tabel 6. Nilai parameter penukar panas

Parameter	Nilai
Beban panas	20 J/s
Fluida pada sisi panas	
- Inlet	593 °C (dihitung)
- Outlet	550 °C (dihitung)
- Laju aliran	0,0536 m ³ /s
- kerapatan	1201922 kg/m ³
- kapasitas panas	0,532217 J/kgK
Fluida pada sisi dingin	
- Inlet	444 °C (dihitung)
- Outlet	452,2 °C (dihitung)
- Laju aliran,	0,0380 m ³ /s
- kerapatan	1168627 kg/m ³
- kapasitas panas	1,996 J/kgK

6. Perbandingan Hasil Desain Dengan Spesifikasi Teknis

Tabel 7 menyajikan perbandingan nilai parameter sistem pendingin reaktor MSR antara nilai spesifikasi teknis dalam kontrak dengan hasil desain prakonseptual. Perhitungan parameter sistem pendingin menggunakan input dari hasil desain teras reaktor. Dalam mengerjakan desain, terdapat beberapa

acuan yang dipakai, yakni sebagai berikut:

Temperatur inlet (butir 1.a) sebesar 550°C. Pemilihan nilai yang lebih rendah dari spesifikasi desain dilakukan dengan tujuan agar temperatur pada bejana reaktor juga rendah sehingga keutuhan (integritas) reaktor terjaga.

Tekanan (butir 1.d) sebesar 3 bar.

Laju alir (butir 2.a) minimal sebesar 4,54 m³/menit.

Ada beberapa parameter sistem pendingin (hasil desain) yang sangat berbeda dengan spesifikasi teknis, yaitu sebagai berikut:

Butir 3.c dan 3.d, kapasitas per unit dan tinggi penukar panas primer. Hal ini terjadi karena jumlah unit penukar panas sebanyak 1 unit, padahal nilai pada spesifikasi teknis ditetapkan berbasis 2 unit. Dengan demikian parameter 3.c dan 3.d dapat menjadi 2 kali lipat. Di sisi lain, pemilihan jumlah 1 unit dilakukan agar sistem reaktor lebih efisien dari aspek tata letak.

Butir 6.c dan 6.d, kapasitas per unit dan tinggi penukar panas sekunder. Sama halnya dengan penukar panas primer, perbedaan 2 kali lipat dibandingkan nilai spesifikasi teknis terjadi karena penggunaan 1 unit penukar panas.

Tabel 7. Perbandingan nilai spesifikasi teknis dan desain prakonseptual

No.	URAIAN		NILAI	
			Spesifikasi teknis (Kontrak)	Desain Pra Konseptual
1.	TERAS REAKTOR			
	a.	Temperatur masuk (<i>inlet</i>)	± 635 °C	550 °C
	b.	Temperatur keluar (<i>outlet</i>)	± 663 °C	630 °C
	c.	Rapat daya rerata / maksimum	≤ 14 MW/m ³ / ≤ 31 MW/m ³	13,75 MW/m ³ / 31,43 MW/m ³
	d.	Tekanan	± 3 bar	3 bar
2.	SISTEM PRIMER			
	a.	Laju alir	≥ 4,54 m ³ /menit	4,54 m ³ /menit
	b.	Jenis pompa	Sentrifugal <i>sump-type</i> dengan <i>saft</i> vertikal	Sentrifugal <i>sump-type</i> dengan <i>saft</i> vertikal
3.	PENUKAR PANAS PRIMER			
	a.	Jumlah	Maksimal 2	1
	b.	Posisi	Berdiri (vertikal)	Berdiri
	c.	Kapasitas per unit	8 MW -10 MW (minimal)	20 MW
	d.	Tinggi	± 2,5 m	4,6 m
	e.	Diameter	± 0,5 m	0,54 m
	f.	Tipe	Shell dan U-tube	Shell dan U-tube
	g.	Bagian <i>shell</i>	Bahan bakar garam	NaF-BeF ₂ -UF ₄ / NaF-BeF ₂ -

				ThF ₄ -UF ₄
	h.	Bagian <i>U-tube</i>	Pendingin garam	NaF-BeF ₂
4.	PIPA PRIMER			
	a.	Material	SS316	SS316
	b.	Diameter dalam	13 cm – 20 cm	20,3 cm
	c.	Tebal	0,7 cm - 0,8 cm	0,7 cm
5.	SISTEM SEKUNDER			
	a.	Temperatur masuk (<i>inlet</i>)	≤ 580 °C	593 °C
	b.	Temperatur keluar (<i>outlet</i>)	≤ 610 °C	550 °C
	c.	Jenis pompa	Sentrifugal <i>sump-type</i> dengan <i>saft</i> vertikal	Sentrifugal <i>sump-type</i> dengan <i>saft</i> vertikal
6	PENUKAR PANAS SEKUNDER			
	a.	Jumlah	Maksimal 2	1
	b.	Posisi	Berdiri (vertikal)	Berdiri
	c.	Kapasitas per unit	8 MW -10 MW (minimal)	20 MW
	d.	Tinggi	± 2,5 m	4,6 m
	e.	Diameter	± 0,5 m	0,54 m
	f.	Tipe	Shell dan U-tube	Shell dan U-tube
	g.	Bagian <i>shell</i>	Bahan bakar garam	NaF-BeF ₂
	h.	Bagian <i>U-tube</i>	Pendingin garam	Garam cair
7	PIPA SEKUNDER			
	a.	Material	SS316	SS316
	b.	Diameter dalam	13 cm – 15 cm	20,3 cm
	c.	Tebal	0,7 cm	0,7 cm
8	SISTEM PEMBANGKIT UAP			
	a.	Temperatur masuk (<i>inlet</i>)	≤ 350 °C	350 °C
	b.	Temperatur keluar (<i>outlet</i>)	≤ 550 °C	150 °C
	c.	Laju uap	Tergantung kecepatan sistem propulsi	Propulsi untuk kecepatan kapal LPD sebesar 14 knot.
	d.	Jalur 1	Sistem propulsi	(P: 122 m; L: 22 m; H: 11 m; <i>displacement</i> : 7300 ton)
	e.	Jalur 2	Generator keperluan kapal	Sistem propulsi : 2 × 2,2 MW = 4,4 MWe

KESIMPULAN

Kegiatan desain prakonseptual sistem pendingin reaktor MSR yang akan dipakai untuk laboratorium reaktor MSR di darat telah selesai dilakukan. Hasil utama dari desain menunjukkan bahwa seluruh nilai parameter dalam spesifikasi teknis dapat dipenuhi. Dengan demikian desain reaktor yang diusulkan telah memenuhi unjuk kerja yang baik dari aspek sistem pendingin.

DAFTAR PUSTAKA

1. Tagor Sembiring, Mekanisme sistem pendingin reaktor MSRE Reaktor TMSR500 (ThorCon) menggunakan sistem tersier sebelum ke sistem pembangkit uap, Batan, 2017.
2. Tagor Sembiring, Pemodelan penukar panas dalam reaktor MSR untuk kapasitas 20 MWt, Batan, 2018.
3. -----, Perhitungan menghitung *balance of plant* sistem konversi energi reaktor MSR pada simulasi ChemCad 6.1.4, 2019.
4. -----, Perhitungan laju kecepatan bahan bakar dengan menggunakan Fluent 6.3, 2020.