

Simulasi Numerik Perpindahan Panas Absorber *Parabolic Trough Concentrator* (PTC) dengan Variasi *Liquid Media* untuk *Thermal Energy Storage*

WIDYA WIJAYANTI, FAHIM ABYAN MAKARIM, EKO SISWANTO, MUSYAROH

ABSTRACT

Renewable energy is gaining traction as a viable alternative to thermal energy. Thermal energy can be used as a source of combustion energy as well as a source of stored heat energy in this context. However, because it is still dependent on the environment, this thermal energy source, like other alternative energy sources, is less reliable. Heat energy sources are used as energy storage in this study via a Parabolic trough concentrator (PTC), which is a device used to focus solar thermal radiation to one point in order to increase the value of the radiation heat flux. PTC concentrates solar radiation using a parabolic-shaped collector, allowing heat transfer from concentrated thermal radiation to a tubular absorber, which in this study is made of stainless steel. PTC can be used as sensible thermal energy storage by utilizing various heat storage media materials. The analysis in this study was performed on molten salts as a heat storage medium, which is widely used in industry. The analysis was carried out using the COMSOL Multiphysics numerical simulation, which modeled the effect of the fluid's physical properties on the thermal energy storage medium's heat transfer performance. As heat storage media, three types of molten salts fluids were studied: $\text{LiNO}_3 - \text{KNO}_3$, $\text{NaNO}_2 - \text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$, dan $\text{KNO}_3 - \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. The numerical simulation results have also been subjected to heat transfer and friction factor analysis. It is predicted that $\text{NaNO}_2 - \text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$ has the highest Nusselt Number with 1033.360696, indicating that it will have more convective heat transfer than conductive heat transfer. After the flow has fully developed, the highest thermal efficiency result from $\text{KNO}_3 - \text{LiNO}_3$ is 0.53. And, according to friction factor analysis, $\text{KNO}_3 - \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - \text{LiNO}_3$ appears to have the highest friction factor with 0.02 at lengths of 1 to 2 meters from the inlet where it reaches the fully developed flow region.

Keywords: Perpindahan Panas, *Parabolic Trough Concentrator*. PTC, *Thermal Energy Storage*, COMSOL

PENDAHULUAN

Metode penyimpanan energi bisa dilakukan dalam beberapa cara, salah satunya penyimpanan energi termal (*Thermal Energy Storage*). Penyimpanan energi termal adalah bentuk penyimpanan energi listrik atau panas sisa sehingga nanti bisa digunakan kembali ketika dibutuhkan. Ada 3 jenis penyimpanan energi termal yaitu penyimpanan panas sensibel yang memanfaatkan perubahan temperatur akibat perubahan energi termal, penyimpanan panas laten yang memanfaatkan perubahan fase pada material akibat perubahan

energi termal, dan yang terakhir adalah penyimpanan energi termokimia yang memanfaatkan perubahan sifat kimia akibat perubahan energi termal (Aneke, et al, 2016).

Penyimpanan energi termal sensibel dapat dilakukan dengan beberapa jenis material media penyimpan panas seperti beton, keramik cor, dan garam leleh (*molten salts*). Banyak pembangkit energi panas yang telah menggunakan *molten salts* sebagai media penyimpan panas. Kekurangan dari media penyimpanan panas ini adalah titik bekunya yang tinggi sekitar 100°C sehingga bisa menyebabkan terbuangnya energi (Aneke, et al, 2016). *Molten salts* yang digunakan pada

keperluan industri energi umumnya terdiri dari senyawa ionik dengan kation logam alkali atau alkali tanah dengan anion dari jenis nitrat (NO_3^-) atau nitrit (NO_2^-). Penelitian menunjukkan bahwa *molten salts* dengan kation logam alkali seperti litium (Li), natrium (Na) dan kalium (K) memiliki nilai temperatur dekomposisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan jenis kation logam alkali tanah (Bauer et al, 2013).

Parabolic trough concentrator (PTC) adalah sebuah alat yang digunakan untuk memfokuskan radiasi termal matahari ke satu garis untuk meningkatkan nilai heat flux radiasi tersebut. Pada PTC radiasi matahari dikonsentrasikan menggunakan collector berbentuk parabola lalu selanjutnya terjadi perpindahan panas dari radiasi termal terkonsentrasi menuju absorber berbentuk tabung dengan bahan stainless steel (Maatallah et al, 2018).

Pembangkit energi yang menggunakan molten salts sebagai media penyimpan panasnya menggunakan absorber atau heat exchanger dengan bahan stainless steel sebagai media perpindahan panas mereka

dikarenakan titik rekristalisasi dan lelehnya yang tinggi yaitu sekitar 1050°C dan 1370°C (Sara et al, 2019).

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode penelitian eksperimental semu dengan cara simulasi numerik menggunakan piranti lunak komputasi COMSOL 5.3a. Tujuan dari penelitian ini adalah melihat ada atau tidaknya pengaruh sifat-sifat fisik fluida media penyimpanan energi termal terhadap performa perpindahan panas di *absorber* pada sistem *parabolic trough concentrator* (PTC).

Spesifikasi dari sistem PTC ditunjukkan pada tabel 1 (Yanjuan, 2014). Dalam permodelan simulasi ini *glass envelope* tidak diikutsertakan dikarenakan pengaruh termalnya sudah dimasukkan kepada kondisi batas. Dalam penelitian ini menggunakan 3 jenis fluida molten salts sebagai media penyimpanan panas yaitu $\text{LiNO}_3 - \text{KNO}_3$ (41-59), $\text{NaNO}_2 - \text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$ (49-6-44) $\text{KNO}_3 - \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (64-27-9). Dari ketiga fluida penyimpanan panas ini

tidak ada yang memiliki sifat fisik yang sama sehingga pengaruh masing-masing sifat fisik dapat dilihat dari pengolahan data hasil simulasi numerik.

TABEL 1. Spesifikasi sistem PTC

Nama bagian	Dimensi
<i>Focal length</i>	1,71 m
<i>Aperture width</i>	5,77 m
<i>Concentration ratio</i>	26,251
<i>Rim angle</i>	180
<i>Receiver length</i>	2 m
<i>Material of the steel pipe</i>	Electric-welded AISI 316 L stainless steel
<i>Absorber inner radius</i>	3,2 cm
<i>Absorber outer radius</i>	3,5 cm
<i>Material of glass envelope</i>	Borosilicate glass
<i>Transmittance of the glass pipe</i>	>96%
<i>Cover inner radius</i>	5,95 cm
<i>Cover outer radius</i>	6,25 cm

Adapun sifat-sifat fisiknya dapat dilihat pada tabel 2 [6-7]. Setelah simulasi numerik selesai dijalankan, maka dilakukan pengolahan data dari solusi simulasi numerik. Pengolahan data tersebut terdiri dari 2 analisis performa perpindahan panas yaitu perhitungan Bilangan Nusselt (Nu) dan efisiensi PTC, dan 1 analisis aliran fluida yaitu analisis *friction factor* (f).

TABEL 2. Sifat-sifat fisik molten salts

Sifat fisika	Jenis Molten Salts		
	$\text{LiNO}_3 - \text{KNO}_3$ (41-59)	$\text{NaNO}_2 - \text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$ (49-6-44)	$\text{KNO}_3 - \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 - \text{LiNO}_3$ (64-27-9)
Viskositas dinamis (μ) (pa.s) @700 K	0.0018	0.00147	0.005
Massa Jenis (ρ)(g/cm ³)	1,7	1,8	1,6
Titik Lebur ($^\circ\text{C}$)	133	142	76
Kapasitas termal (C_p) (kJ/kg.K)	1,63	1,5	1,2
Konduktivitas Thermal (w/mK)	0,479	0,389	0,696

Persamaan perhitungan Bilangan Nusselt (Nu) dihitung dengan persamaan Dittus-Boelter sebagai berikut (Cengel, 2003):

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^n \quad (1)$$

Persamaan perhitungan efisiensi PTC dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Liu et al, 2010) :

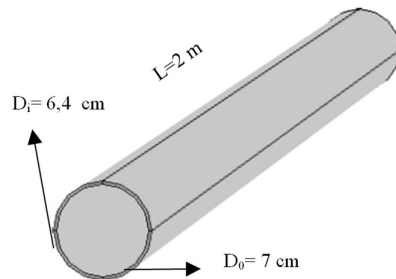
Persamaan perhitungan analisis *friction factor* (f) dengan persamaan (3) (Evangelos, 2017) :

$$\eta_{PTC} = \frac{Q_{effective}}{IA} = \frac{\rho v A C_p (T_o - T_{in})}{IA} \quad (2)$$

Persamaan perhitungan analisis *friction factor* (f) dengan persamaan sebagai berikut (Evangelos, 2017) :

$$f = \frac{\Delta P \cdot 1000}{0,5 \rho u^2} \left(\frac{D_i}{L} \right) \quad (3)$$

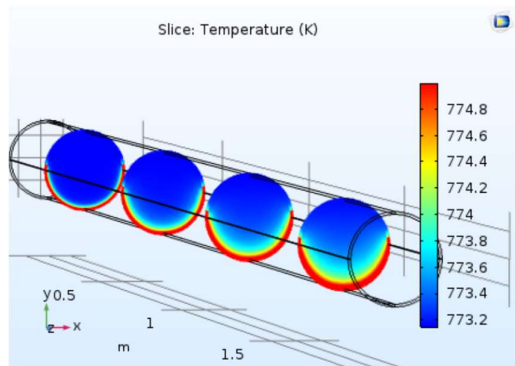
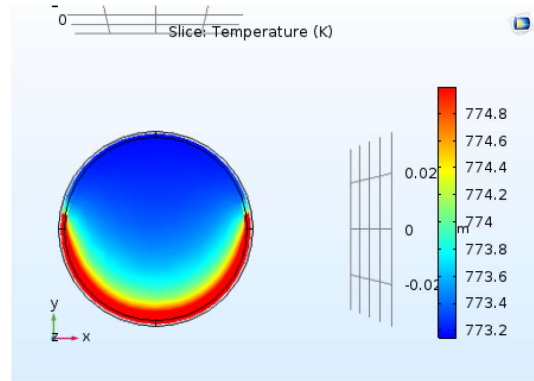
Model geometri dari domain-domain yang disimulasi pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



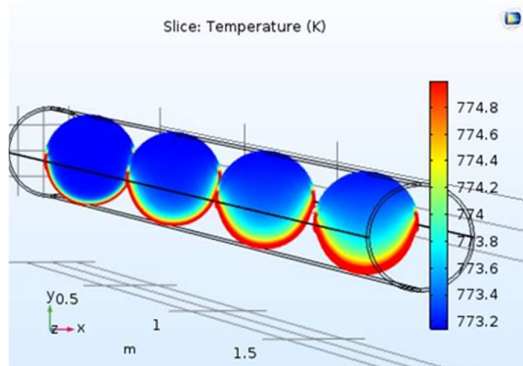
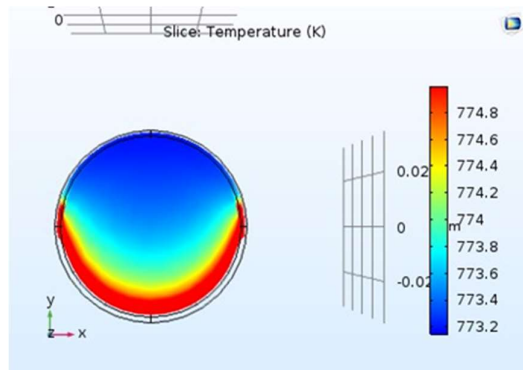
GAMBAR 1. Permodelan domain fluida dan solid pada absorber PTC

HASIL DAN PEMBAHASAN

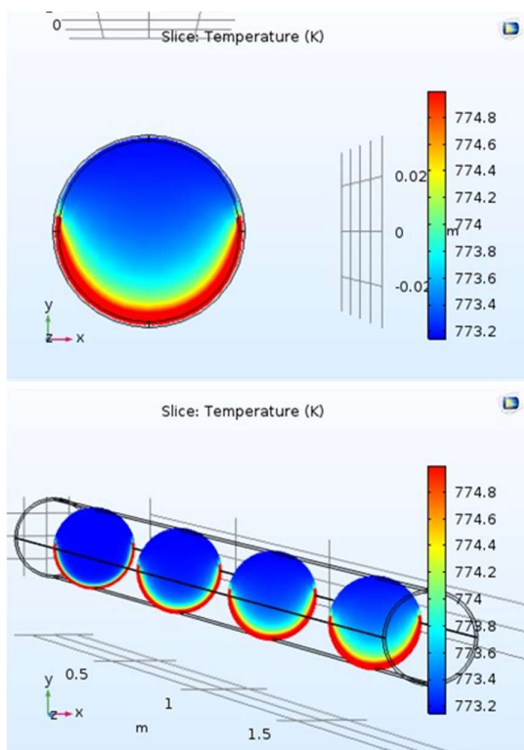
1. *Perpendicular Slice Plot Distribusi Temperatur Terhadap Solusi Persamaan Perpindahan Panas Pada Domain Fluida*



GAMBAR 2. Hasil simulasi persamaan perpindahan panas plot temperatur pada KNO₃-LiNO₃



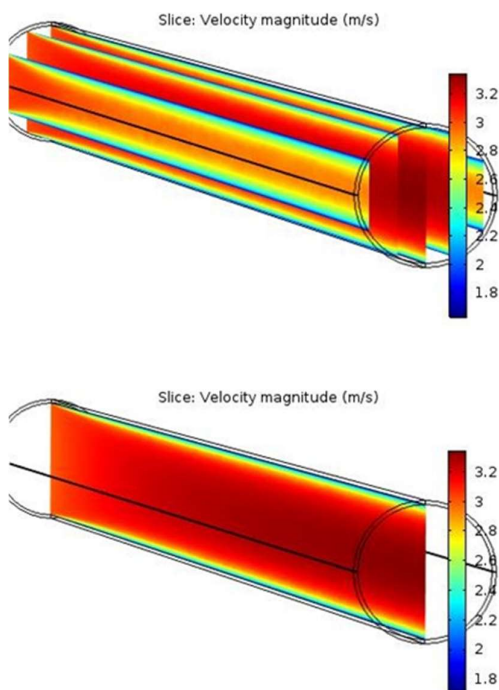
GAMBAR 3. Hasil simulasi persamaan perpindahan panas plot temperatur pada KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃



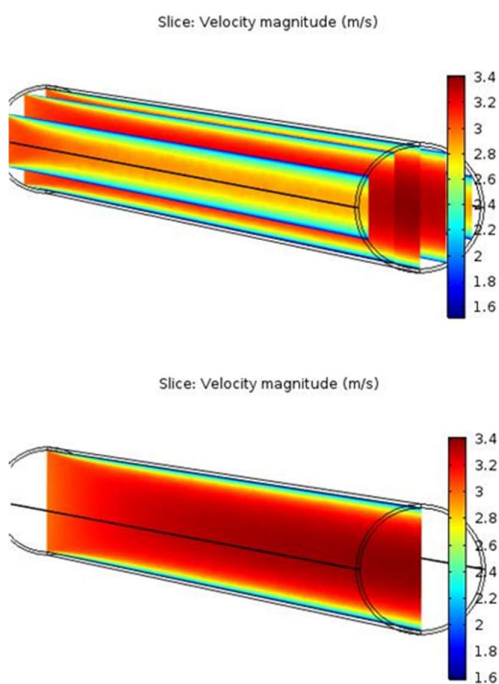
GAMBAR 4. Hasil simulasi persamaan perpindahan panas plot temperatur pada NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3

Seperti yang telah jelaskan bahwa kenaikan temperatur yang digambarkan dengan *Perpendicular Slice Plot* tersebut tidak terlalu besar dikarenakan oleh temperatur awal yang sudah tinggi dan luas area kontak yang tidak cukup luas. Jika dibandingkan dengan hasil simulasi untuk validasi maka hasil dari ketiga variabel bebas yang diuji menampakkan kecenderungan yang sama yaitumeningkatnya temperatur seiringpergerakan titik-titik fluida dari sisi *inlet* menuju *outlet*.

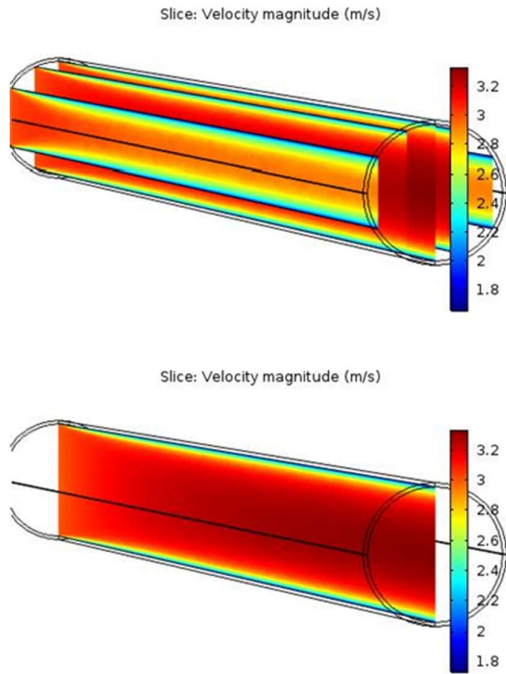
2. *Parallel Slice Plot Distribusi Vektor Kecepatan Terhadap Solusi Persamaan Flow Equation Pada Domain Fluida*



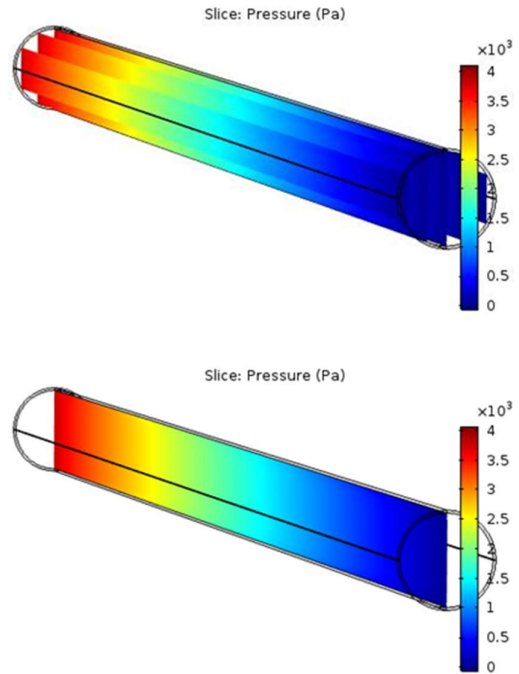
GAMBAR 5. Hasil simulasi persamaan flow equation plot kecepatan pada KNO_3 - LiNO_3



GAMBAR 6. Hasil simulasi persamaan flow equation plot kecepatan pada KNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - LiNO_3



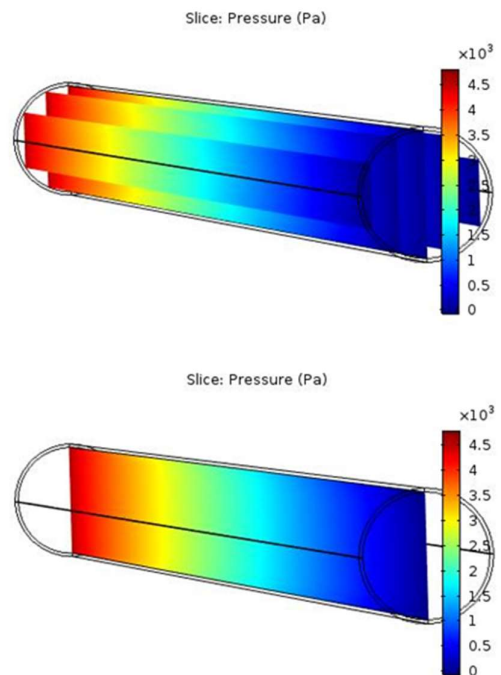
GAMBAR 7. Hasil simulasi persamaan flow equation plot kecepatan pada NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3



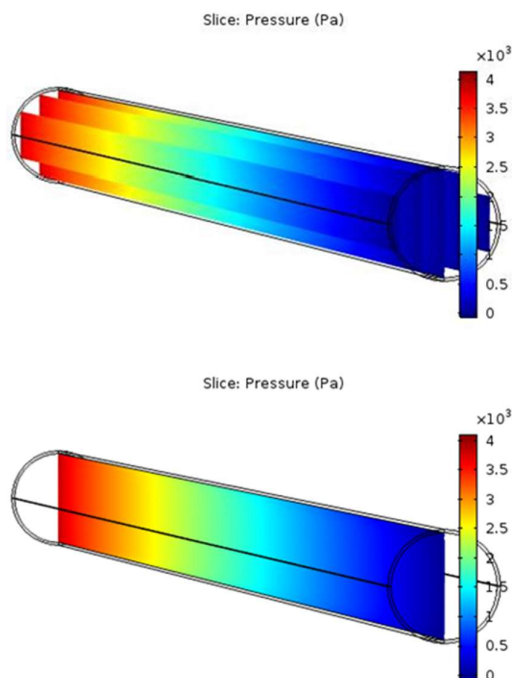
GAMBAR 8. Hasil simulasi persamaan flow equation pada KNO_3 - LiNO_3

Dari penyajian hasil *parallel slice plot* tersebut dapat diamati solusi vektor kecepatan pada bagian tengah dan pinggir dari ketiga fluida yang diuji. Bentuk solusi vektor aliran yang timbul pada bagian tengah dan pinggir dari domain fluida sesuai dengan dasar teori yaitu menggambarkan perkembangan aliran atau *flow development*, yaitu menebalnya *boundary layer* pada fluida hingga kondisi aliran telah sepenuhnya berkembang atau *fully developed flow*.

3. Parallel Slice Plot Distribusi Vektor Tekanan Terhadap Solusi Persamaan Flow Equation Pada Domain Fluida



GAMBAR 9. Hasil simulasi persamaan flow equation pada KNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - LiNO_3

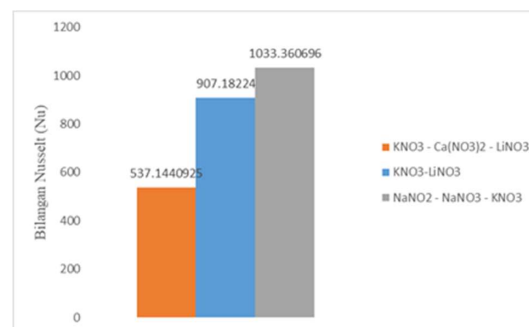


GAMBAR 10. Hasil simulasi persamaan flow equation pada NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3

Pada *parallel slice plot* tersebut terlihat kecenderungan yang sama yaitu tekanan menurun seiring Bergeraknya titik dari sisi *inlet* menuju *outlet*. Dalam aliran fluida setidaknya ada 3 jenis tekanan yaitu tekanan statis (P_s), tekanan dinamis (P_d), dan tekanan total (P_t). Telah diketahui bahwa fluida mengalir dari titik dengan tekanan tinggi ke tekanan rendah, Tekananyang dimaksud adalah antara tekanan statis(P_s) atau tekanan dinamis (P_d) tergantung dari kondisi alirannya. Pada *nozzle* aliran datang dari sisi dengan area lebih luas sehingga menurut hukum kontinuitaskecepatannya lebih rendah, hal ini berarti fluida mengalir dari titik dengan tekanan statis besar menuju titik dengan tekananstatis rendah.

Dalam penelitian ini tidak ada perubahan area penampang pada *absorber*, sehingga satu-satunya penyebab perbedaan tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet* adalah perubahan tekanan total fluida (P_t). Perubahan tekanan total fluida diakibatkan oleh fenomena *pressure drop* yang diakibatkan oleh *losses* energi dalam bentuk panas akibat gesekan dengan dinding pipa dan gesekan antar molekul pada fluida akibat viskositas fluida.

4. Perhitungan Bilangan Nusselt



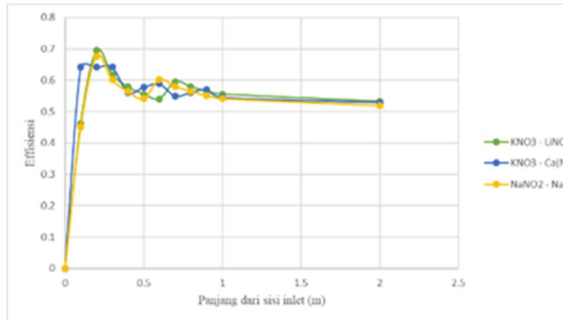
GAMBAR 11. Nilai Bilangan Nusselt (Nu) pada masing-masing fluida

Gambar 11 menunjukkan grafik Bilangan Nusselt pada ketiga fluida yang diuji. Bilangan Nusselt (Nu) adalah rasio dari perpindahan panas konveksi terhadap perpindahan panas konduksi. Nilai dari rasio perpindahan panas konveksi terhadap konduksi akan menunjukkan perpindahan panas mana yang lebih dominan dalam suatu system perpindahan panas, Cengel (2003) menyatakan dalam bukunya bahwa Bilangan Nusselt bernilai 1 berarti perpindahan panas pada system tersebut adalah sepenuhnya dari konduksi. Pada grafik balok tersebut dibandingkan nilai Bilangan Nusselt dari ketiga fluida yang diuji. Balok berwarna oranye menunjukkan nilai bilangan Nusselt dari fluida KNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - LiNO_3 , balok berwarna biru menunjukkan Nilai bilangan Nusselt pada fluida KNO_3 - LiNO_3 , dan balok berwarna abu-abu menunjukkan nilai Bilangan Nusselt dari fluida NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3 .

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai Bilangan Nusselt dari yang terkecil ke terbesar adalah fluida KNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - LiNO_3 , KNO_3 - LiNO_3 , lalu NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3 . Bilangan Nusselt ini sepenuhnya bisa dihitung dari sifat-sifat material dari fluida yang diuji. Sehingga Hasil dari simulasi tidak dapat menunjukkan adanya pengaruh terhadap Bilangan Nusselt, sehingga Bilangan ini bagus digunakan sebagai prediksi mengenai keadaan system perpindahanpanas yang sedang diuji.

Maka dari itu dapat disimpulkan bahwa prediksi keadaan system perpindahan panas pada absorber adalah akan semakin didominasi oleh konveksi pada fluida dengan urutan dari kecil ke terbesar KNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - LiNO_3 , KNO_3 - LiNO_3 , lalu NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3 .

5. Perhitungan Effisiensi PTC



GAMBAR 12. Nilai Effisiensi pada masing- masing fluida

Gambar 12 menunjukkan grafik efisiensi terhadap jarak dari titik *inlet* ke titik yang diuji. Effisiensi dari PTC adalah sebuah perhitungan mengenai jumlah energi yang berhasil ditransfer kedalam sistem dari jumlah total energi yang ditransferkan. Dalam penelitian ini *heat loss* dalam bentuk konveksi udara luar tidak diperhitungkan dikarenakan selubung luar *absorber* telah di selubungi oleh pipa kaca transparan untuk menghilangkan jenis *heat loss* tersebut. Pada grafik tersebut dipaparkan nilai efisiensi dari masing- masing fluida dari 11 titik di sepanjang *absorber*.

Pada grafik tersebut ketiga fluida menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu kenaikan drastis nilai efisiensi dari panjang 0 m hingga 0,2 m. seiring bertambahnya panjang *absorber* efisiensi fluida menurun hingga panjang 1 m dan terjaga konstan hingga panjang 2 m. Fluida KNO₃-LiNO₃ memiliki nilai efisiensi tertinggi secara keseluruhan dari kedua fluida yang lain, sedangkan fluida KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃ mulai memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi dari fluida NaNO₂ - NaNO₃ - KNO₃ pada titik 0,9 m. Kenaikan efisiensi ini berbanding lurus dengan kenaikan nilai ΔT (delta T) pada *absorber*. Data temperatur yang digunakan pada perhitungan ini berdasarkan rata-rata temperatur *inlet* dan *outlet* pada setiap panjang yang dievaluasi dari solusi simulasi numerik.

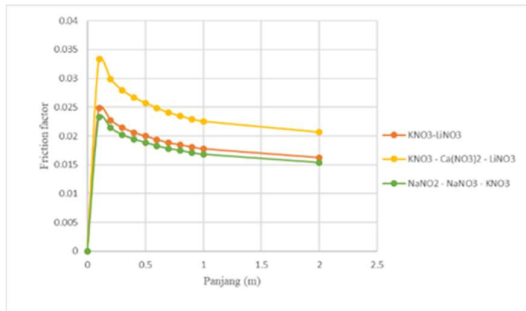
Dari persamaan (3) dapat dilihat bahwa sifat material secara langsung mempengaruhi efisiensi dari PTC, dalam hal ini adalah densitas (ρ) dan kapasitas termal isobarik (C_p).

Kondisi geometri dan kondisi batas dari sistem dibuat sama, sehingga pengaruh sifat material pada efisiensi PTC bisa diamati. Dari persamaan (3) efisiensi berbanding lurus dengan hasil perkalian densitas (ρ) dan kapasitas termal isobarik (C_p). Jika diurutkan, nilai hasil kali densitas (ρ) dengan kapasitas termal isobarik (C_p) dari yang terkecil ke terbesar adalah KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃, NaNO₂ - NaNO₃ - KNO₃, lalu KNO₃-LiNO₃. Kecenderungan pada grafik menunjukkan ketidaksesuaian pola kecenderungan pada grafik KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃, mulai panjang 1 m hingga 2 m, fluida ini memiliki nilai efisiensi lebih tinggi dari fluida NaNO₂ - NaNO₃ - KNO₃. Jika melihat dari hasil perkalian (ρ) dan (C_p)-nya seharusnya fluida NaNO₂ - NaNO₃ - KNO₃ memiliki efisiensi lebih besar dari fluida KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃ penjelasan mengenai penyimpangan ini ada pada Gambar 11 yaitu nilai Bilangan Nusselt (Nu) pada masing-masing fluida. Dari gambar 11 dapat dilihat bahwa nilai Bilangan Nusselt (Nu) dari fluida KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃ adalah paling kecil, sehingga perpindahan panas konduksi pada sistem dengan fluida tersebut lebih dominan. Hubungan nilai Bilangan Nusselt fluida KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃ dengan penyimpangan pada panjang 1 m hingga 2 m adalah bahwa nilai konduktivitas termal tertinggi dimiliki oleh fluida tersebut. Dibandingkan dengan 2 fluida lainnya, fluida tersebut memiliki nilai konduktivitas termal tertinggi yaitu sebesar 0,696 W/mK. Selain itu viskositas dinamis (μ) fluida KNO₃ - Ca(NO₃)₂ - LiNO₃ juga yang terbesar dibanding 2 fluida lainnya yaitu sebesar 0,005 Pa sehingga pada jarak 1 m dari *inlet* perpindahan panas konduksi dari *absorber* ke *boundary layer* fluida ini akan lebih besar dari 2 fluida yang lainnya.

Panas spesifik pada tekanan konstan (C_p) pada suatu senyawa sangat dipengaruhi oleh struktur molekul senyawa tersebut. Cooper (2013) menjelaskan bahwa jika hanya melihat dari informasi panas spesifiknya, suatu senyawa bisa terlihat aneh, sebagai contoh air dengan struktur molekul H₂O memiliki (C_p) 4,18 J/g.^oC, hampir 4 kali lebih besar dari senyawa yang mengandung gugus hidroksida (OH-) lainnya seperti *methanol* (CH₃OH) yaitu 2,53 J/g.^oC, padahal ukuran molekul air jauh lebih kecil dibandingkan dengan *methanol*. Jawaban dari pertanyaan ini adalah melihat kepada besar mol senyawa-senyawa tersebut. 1 mol air memiliki

massa yang sama dengan 0,5625 *methanol*, sehingga dengan jumlah massa yang sama, ketika energi termal diberikan ke dua senyawa dengan jumlah yang sama pula, air akan menggunakan energi tersebut untuk mengatasi gaya tarik dari ikatan hidrogen pada antar molekulnya lebih banyak dari *methanol* karena *methanol* memiliki jumlah moleku yang lebih sedikit, sehingga nilai panas spesifik pada tekanan konstan (C_p) menjadi lebih besar. Begitu juga dengan *molten salts*. Semakin besar massa molar senyawa *molten salts*, maka semakin sedikit jumlah molekul yang harus mengatasi gaya tarik antar molekul dalam senyawa tersebut yang menyebabkan (C_p)-nya menjadi lebih kecil. Dapat disimpulkan bahwa kapasitas termal isobarik (C_p)-yang besar dari suatu material fluida tidak menjamin perpindahan panas ke dalam fluida tersebut akan lebih tinggi, karena pada sistem perpindahan panas dengan nilai Bilangan Nusselt (Nu) yang rendah, konduksi akan lebih mendominasi. Viskositas dinamis (μ) juga akan menguntungkan sistem dengan nilai Bilangan Nusselt rendah ini karena secara langsung akan menyebabkan ketebalan *boundary layer* pada fluida meningkat.

6. Perhitungan Pressure Drop



GAMBAR 13. Friction factor pada masing-masing fluida

Gambar 11 adalah grafik hubungan *friction factor* ketiga fluida yang diuji dengan jarak dari titik *inlet* ke titik yang diuji. Sumbu x pada grafik menunjukkan jarak dari titik *inlet* ke titik yang diuji dalam satuan meter dan sumbu y menunjukkan nilai *friction factor* di interval jarak tersebut. Warna kuning pada grafik menunjukkan data dari fluida $KNO_3 - Ca(NO_3)_2 - LiNO_3$, warna oranye menunjukkan data dari fluida $KNO_3 - LiNO_3$, dan warna hijau menunjukkan data dari fluida $NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3$.

Pada grafik tersebut terlihat

kecenderungan ketiga fluida sama, yaitu nilai *friction factor* ketiganya turun tajam dari 0 menuju titik terendah pada interval jarak 1 m, lalu berangsur angsur menurun dengan *slope* sangat kecil. Dapat dilihat bahwa fluida $KNO_3 - Ca(NO_3)_2 - LiNO_3$ memiliki nilai *friction factor* yang paling tinggi dibandingkan 2 fluida lainnya.

Input panjang $L(m)$ dan kuadrat kecepatan aliran (u^2) dari ketiga fluida ditetapkan sama, sehingga *input* densitas (ρ) adalah pembagi yang nilainya akan bervariasi pada masing-masing fluida yang diuji. Nilai densitas (ρ) dari fluida $KNO_3 - Ca(NO_3)_2 - LiNO_3$ ternyata adalah yang terkecil dibandingkan dengan kedua fluida yang lainnya yaitu sebesar 1600 kg/m^3 , dibandingkan $KNO_3 - LiNO_3$ sebesar 1700 kg/m^3 dan $NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3$ sebesar 1800 kg/m^3 . Sehingga nilai *friction factor* ketiga fluida sudah sesuai dengan dasar teori. Penyebab nilai *friction factor* dari ketiga fluida cenderung landai setelah interval 0,5 meter adalah nilai *pressure drop* (ΔP) dibagi dengan total nilai pembagi pada persamaan (3) dari ketiga fluida mulai konstan. Nilai (ΔP) sendiri diambil dari hasil simulasi numerik sehingga nilainya akan sangat dipengaruhi oleh kondisi batas, kondisi awal, serta sifat material domain.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai *friction factor* terhadap jarak interval dari *inlet* dari ketiga fluida tidak menunjukkan penyimpangan dengan nilai terbesar diraih oleh fluida $KNO_3 - Ca(NO_3)_2 - LiNO_3$ dengan nilai *friction factor* sebesar 0,19.

KESIMPULAN

Dari pemaparan dan pembahasan hasil simulasi numerik proses perpindahan panas pada *absorber* PTC dengan variasi fluida ini, dapat disimpulkan :

1. Prediksi keadaan sistem perpindahan panas pada absorber adalah akan semakin didominasi oleh konveksi pada fluida dengan urutan dari kecil ke terbesar $KNO_3 - Ca(NO_3)_2 - LiNO_3$, $KNO_3 - LiNO_3$, diikuti oleh $NaNO_2 - NaNO_3 - KNO_3$.
2. Kapasitas termal isobarik (C_p)-yang besar dari suatu material fluida tidak menjamin

- effisiensi perpindahan panas ke dalam fluida tersebut akan lebih tinggi, karena pada sistem perpindahan panas dengan nilai Bilangan Nusselt (Nu) yang rendah, konduksi akan lebih mendominasi. Viskositas dinamis (μ) juga akan menguntungkan sistem dengan nilai Bilangan Nusselt rendah ini karena secara langsung akan menyebabkan ketebalan *boundary layer* pada fluida meningkat. Walaupun nilai terbesar dari hasil pengolahan data adalah fluida dengan (C_p) terbesar yaitu fluida $\text{KNO}_3\text{-LiNO}_3$. Panas spesifik pada tekanan konstan sangat dipengaruhi oleh struktur molekul senyawa tersebut. Semakin besar massa molar senyawa *molten salts*, maka semakin sedikit jumlah molekul yang harus mengatasi gaya tarik antar molekul dalam senyawa tersebut yang menyebabkan (C_p)-nya menjadi lebih kecil.
3. Nilai *friction factor* terhadap jarak interval dari *inlet* dari ketiga fluida tidak menunjukkan penyimpangan dengan nilai terbesar diraih oleh fluida KNO_3 - $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - LiNO_3 dengan nilai *friction factor* sebesar 0,02.
- DAFTAR PUSTAKA
- Aneke, Mathew., & Wang, Meihong. (2016). Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. Science Direct, 179, 350-377.
- Bauer, Thomas. Pflieger, Nicole. Laing, Doerte. Steinmann, Wolf-Dieter. Eck, Markus. Kaesche, Stefanie. (2013). High-Temperature Molten Salts for Solar Power Application. Science Direct. 20, 415-438.
- Maatallah, Taher. Houcine, Ahlem. El-Alimi, Souheil. Ben Nasrallah, Sassi. (2018). A novel solar concentrating system based on a fixed cylindrical reflector and tracking receiver. Science Direct, 117, 85-107.
- Sara, Kheiri., Hamed, Mirzadeh., Meysam, Naghizadeh. (2019). Tailoring the microstructure and mechanical properties of AISI 316L. Science Direct, 759, 90-96.
- Yanjuan, Wang., Qibin, Liu a., Jing, Lei., Hongguang, Jin. (2014). A three-dimensional simulation of a parabolic trough solar collector system using molten salt as heat transfer fluid. Science Direct, 70, 462-476.
- G, J, Janz., R, P, T, Tomkins. (1981). Physical Properties Data Compilations Relevant to Energy Storage : IV. Molten Salts: Data on Additional Single and Multi-Component Salt System. Rensselaer Polytechnic Institute: New York.
- Mohapatra, Satish., Oztekin, Alparslan., Neti, Sudhakar. Thermophysical Properties of $\text{LiNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-KNO}_3$ Mixtures for Use in Concentrated Solar Power. Research Gate. 135, 034506-1
- Cengel, A., Yunus. (2003). Heat transfer a practical approach second edition. The United States of America: McGraw-Hill.
- Liu, Qibin., Wang, Ya Long., Gao, Zhi Chao., Sui, Jun., Jin, Hong Guang., Li, He Ping. (2010). Experimental investigation on a parabolic trough solar collector for thermal power generation. Science China. 53, 52-56.
- Evangelos, Bellos., Christos, Tzivanidis., Dimitrios, Tsimpoukis. (2017). Thermal enhancement of parabolic trough collector with internally finned absorbers. Science Direct, 157, 514-531.

PENULIS:

Widya Wijayanti, Fahim Aryan Makarim, Eko Siswanto, Musyaroh

Mechanical Engineering Departement,
Brawijaya university