

Pengaruh Penggunaan Sirip Aksial pada Alat Penukar Kalor Pipa Ganda terhadap Proses Pelelehan dan Pembekuan Parafin sebagai Penyimpan Energi Thermal

Erik Tri Mahyudi^{1*}, Muhammad Irsyad², Harmen³

¹Politeknik Tunas Garuda

Kota Budaya Uluan Nughik, Panaragan Jaya, Tulang Bawang Barat

² Teknik Mesin Universitas Lampung

³ Teknik Mesin Universitas Lampung

*Corresponding author: eriktrimahyudi89@google.com

Abstract

This research aims to analyze the effect of fin geometry on the thermal performance of the latent heat energy storage and release system of axially finned horizontal tubes with variations in the number and height of fins. The research results show that increasing the number of axial fins by 4.6% and 13.7% of the total volume reduces melting time by 6.9% and 16.1% and 1.3% and 1.8% in the freezing process. Increasing the fin height by 11.1% and 24.3% of the total volume reduces the melting time by 2.7% and -2.7% and 0.9% and 3% in the freezing process. The benefits of increasing the number and height of fins are evaluated to optimal limits for the thermal energy storage and release system.

Keywords: Fins Geometry, Latent Heat, Paraffin, Solar Water Heater

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh geometri sirip terhadap kinerja thermal sistem penyimpanan dan pelepasan energi panas laten tabung horizontal bersirip aksial dengan variasi jumlah dan tinggi sirip. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan jumlah sirip aksial sebesar 4,6% dan 13,7% dari total volume mengurangi waktu leleh sebesar 6,9 % dan 16,1 % serta 1,3% dan 1,8% pada proses pembekuan. Penambahan tinggi sirip sebesar 11,1% dan 24,3% dari total volume mengurangi waktu leleh sebesar 2,7% dan -2,7% serta 0,9 % dan 3 % pada proses pembekuan. Manfaat penambahan jumlah dan tinggi sirip dievaluasi sampai batas optimal terhadap sistem penyimpanan dan pelepasan sistem energi termal.

Kata kunci: geometri sirip, panas laten, parafin, pemanas air tenaga surya

1. Pendahuluan

Masalah lingkungan hidup di seluruh dunia, mendorong pengurangan konsumsi energi fosil [1]. Energi surya adalah salah satu jenis energi bersih yang paling populer dan tersebar luas karena dianggap sebagai salah satu sumber paling aman. Bumi setiap tahun menerima energi matahari yang melebihi jumlah total energi yang dikonsumsi manusia setiap tahunnya. Pemanfaatan energi surya dalam jumlah besar ini akan membantu melindungi lingkungan dan memperkuat perekonomian global serta mengurangi emisi berbahaya. Untuk mendapatkan manfaat dari radiasi matahari yang masuk, energi tersebut diubah menjadi jenis energi lain untuk memfasilitasi penyimpanan, transportasi, dan penggunaan untuk berbagai kebutuhan [2]. Energi terbarukan, khususnya energi

surya, sangat penting dalam mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi tradisional [3]. Penyimpanan energi panas merupakan teknologi yang efektif untuk mengurangi ketidaksesuaian antara pasokan dan permintaan energi dalam berbagai aspek spasial dan temporal [4]. Selanjutnya ada tiga jenis sistem penyimpanan termal berdasarkan cara penyimpanan energi panas, yaitu laten, sensibel, dan termokimia. Penggunaan bahan perubahan fasa (PCM) dalam sistem penyimpanan energi panas laten (LHTES) menawarkan solusi praktis dan efisien karena kepadatan penyimpanan energinya yang tinggi selama perubahan fasa dalam kisaran suhu yang relatif sempit [5]. Perbandingan menunjukkan bahwa penyimpanan panas laten (LHS) 5 hingga 10 kali lebih efisien dibandingkan penyimpanan panas masuk

akal (SHS) dan hanya menempati setengah dari volume yang dibutuhkan [6]. PCM adalah material yang, bergantung pada suhunya, mengalami transisi fase yang dapat dibalik. Selama prosesnya, ia cenderung menyerap atau melepaskan panas [7]. Perubahan fasa dapat terjadi dalam berbagai bentuk antara lain transformasi padat-padat, padat-cair, padat-gas, dan cair-gas. Di antara bentuk perubahan fasa ini, padat-cair menunjukkan kapasitas penyimpanan panas laten yang lebih tinggi dengan perubahan volume dan suhu yang minimal selama transisi, dibandingkan dengan perubahan fasa padat-padat. Penyimpanan energi panas pada PCM yang bersumber dari radiasi matahari dapat dimanfaatkan untuk produksi air panas, proses pengeringan, dan aplikasi lainnya. Sistem pemanas air tenaga surya yang menggunakan kolektor pelat datar dapat menggabungkan penyimpanan panas tambahan menggunakan PCM di tangki penyimpanan selama beberapa jam, sehingga mengurangi ketergantungan pada pemanas gas alam atau listrik [8]. Dalam skenario saat ini, kebutuhan air panas meningkat baik di tingkat industri maupun domestik. Jadi saat ini, pemanas air tenaga surya digunakan untuk memanfaatkan sumber energi terbarukan. Pemanas air tenaga surya menggunakan energi panas dari radiasi matahari yang terjadi untuk memanaskan air. Ini adalah aliran alami (bekerja dengan efek termosifon) atau aliran paksa (menggunakan pompa) [9]. Sejumlah penelitian telah meneliti penggunaan PCM dalam penukar panas untuk proses peleburan dan pemadatan sebagai sistem penyimpanan energi panas. Temuan ini menunjukkan potensi untuk aplikasi teknik, yang berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi termal [10]. Vyshak dan Jilani melakukan analisis rinci menggunakan metode numerik untuk membandingkan total waktu leleh PCM, khususnya heksahidrat klorida, dalam penyimpanan panas laten dengan volume dan luas perpindahan panas yang sama dalam tiga geometri wadah yang berbeda, yaitu persegi panjang, silinder, dan cangkang-dan -

konfigurasi tabung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wadah shell-and-tube membutuhkan waktu paling singkat untuk meleleh sempurna. Signifikansi ini meningkat seiring bertambahnya massa PCM untuk kapasitas penyimpanan energi yang sama [11].

Kibria dkk. melakukan penelitian eksperimental dan numerik untuk menganalisis pengaruh aliran dan dimensi sistem pada sistem penyimpanan energi panas yang melibatkan susunan shell-and-tube. Air digunakan sebagai Heat Transfer Fluid (HTF), dan lilin parafin berfungsi sebagai PCM. Temuan menunjukkan bahwa suhu air masuk mempunyai pengaruh yang lebih besar dibandingkan laju aliran massa terhadap waktu penyimpanan energi panas dan suhu air keluar. Selain itu, radius tabung ternyata menjadi parameter yang lebih penting daripada ketebalan untuk mencapai perpindahan panas yang lebih baik antara PCM dan HTF [12].

Seddegh dkk. membandingkan penggunaan model perpindahan panas gabungan yang melibatkan konduksi dan konveksi dalam sistem penyimpanan panas shell-and-tube aksial dan horizontal menggunakan PCM. Hasilnya menunjukkan tipe horizontal menunjukkan kinerja termal yang unggul selama proses pengisian, dan peningkatan suhu masuk HTF mengurangi total waktu pengisian [13]. Demikian pula, Modi dkk. menganalisis pengaruh geometri sirip terhadap kinerja termal sistem LHTEs menggunakan tabung memanjang bersirip horizontal. Variasi yang diuji meliputi tinggi, ketebalan, dan jumlah sirip memanjang, dengan parafin dikemas dalam annulus. Hasil penelitian menunjukkan profil leleh di bagian depan, suhu rata-rata, dan profil kecepatan PCM diilustrasikan secara grafis. Penggunaan sejumlah kecil sirip memanjang (2,85% dari total volume) mengurangi total waktu leleh sebesar 34% dibandingkan dengan konfigurasi tabung kosong [14]. Penelitian ini menunjukkan bahwa tipe horizontal menunjukkan kinerja termal yang unggul selama pengisian dan meningkatkan suhu masuk fluida, serta

efektif dalam proses peleburan PCM. Namun, menurut Eslami et al., PCM konvensional memiliki kelemahan yaitu konduktivitas termal yang rendah, sehingga memerlukan teknik lain untuk meningkatkan perpindahan panas, seperti menambahkan sirip ke tabung. Temuan menunjukkan sirip memiliki pengaruh signifikan terhadap perpindahan panas konvektif PCM cair di ruang terbatas. Disimpulkan juga bahwa kinerja sistem lebih dipengaruhi oleh panjang dan jumlah sirip dibandingkan ketebalannya [15].

Demikian pula, El dkk. menyelidiki karakteristik termo-fluida penukar panas pipa ganda (DPHE) dengan sirip belah memanjang (SLF). Hal ini dilakukan dengan menggunakan bilangan Prandtl yang tinggi dengan sifat termofisika yang bervariasi. Simulasi dinamika fluida komputasi (CFD) tiga dimensi dilakukan dalam kondisi aliran laminar untuk konfigurasi dengan interval jarak sirip berkisar antara 0,333 hingga 0,166 m. Hasil penelitian menunjukkan laju perpindahan panas pada annulus yang dilengkapi SLF lebih tinggi dibandingkan tabung halus konvensional sebesar 31% hingga 48% untuk daya pemompaan dan berat satuan yang sama [16].

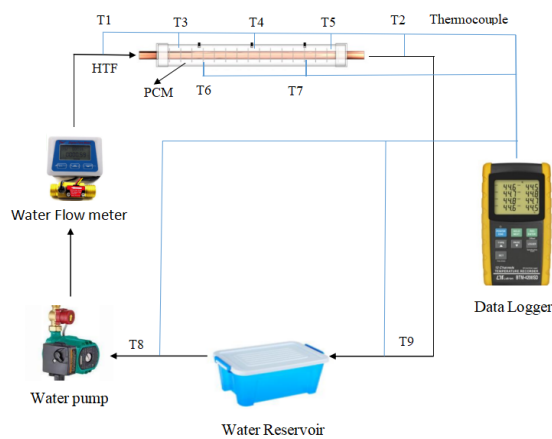
Mishra dkk. membandingkan perpindahan panas konvektif pada permukaan sirip padat dan berlubang dan menyelidiki pengaruh jumlah dan ukuran perforasi terhadap karakteristik konveksi alami. Selanjutnya, percobaan dilakukan pada sirip padat dan sirip yang memiliki jumlah perforasi permukaan berbeda. Jarak pada permukaan dianggap sebagai parameter yang mempengaruhi kontrol perpindahan panas alami, dengan jarak masing-masing 6mm, 8mm, 10mm, dan 12mm. Setelah analisis mendetail, disimpulkan bahwa sirip berlubang memberikan laju perpindahan panas yang lebih tinggi dan menurunkan suhu permukaan sirip dibandingkan sirip padat. Hasil analisa menunjukkan pola zig-zag dengan perforasi sebanyak 5 baris, diameter perforasi 10 mm, dan jarak sirip 10 mm memberikan hasil yang optimal [17].

Rostami dkk. mengevaluasi secara numerik pengaruh susunan sirip pada penukar panas pipa ganda bersirip aksial dalam penyimpanan panas laten, dengan mempertimbangkan lokasi sirip, ketebalan, dan diameter selama proses peleburan dan pemadatan. PCM ditempatkan di tabung luar sementara air dialirkan melalui bagian dalam, dan sirip ditempatkan melingkari pipa dalam di zona PCM. Hasil penelitian menunjukkan penambahan sirip secara signifikan mengurangi waktu leleh dan mempercepat proses pemadatan. Bahan perubahan fasa (PCM) mampu menyimpan energi sebagai energi laten dengan mengubah fasa dan menyediakan energi yang tersimpan ketika dikembalikan ke fasa awal pada waktu yang diinginkan. Karena suhu leleh yang bervariasi dari bahan-bahan ini, penerapannya pada kondisi udara bangunan, serta penyediaan air panas yang higienis telah mendapat banyak perhatian, akhir-akhir ini [18]. Lilin parafin sebagian besar ditemukan dalam bentuk padatan lilin berwarna putih, tidak berbau, tidak berasa, dengan titik leleh khas antara sekitar 47 °C dan 64 °C (116,6 °F hingga 147,2 °F), dan memiliki kepadatan sekitar 0,9 g/cm³ [19]. Lilin parafin aman, karena tidak menimbulkan korosi, maka cocok dengan wadah logam. Namun, mereka berinteraksi dengan beberapa wadah plastik yang memiliki kemiripan kimia dengan parafin [20]. Berdasarkan temuan tersebut, perlu dilakukan investigasi eksperimental penggunaan sirip memanjang pada alat penukar panas pipa ganda yang berisi lilin parafin pada annulus untuk penyimpanan energi panas pada aplikasi pemanas air tenaga surya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencapai perpindahan panas yang optimal pada alat penukar panas sehingga efektif untuk penyimpanan energi panas.

2. Metode Penelitian

Penelitian yang dilakukan berupa eksperimental dengan menggunakan alat penukar panas berupa pipa ganda dengan menggunakan lilin parafin sebagai PCM

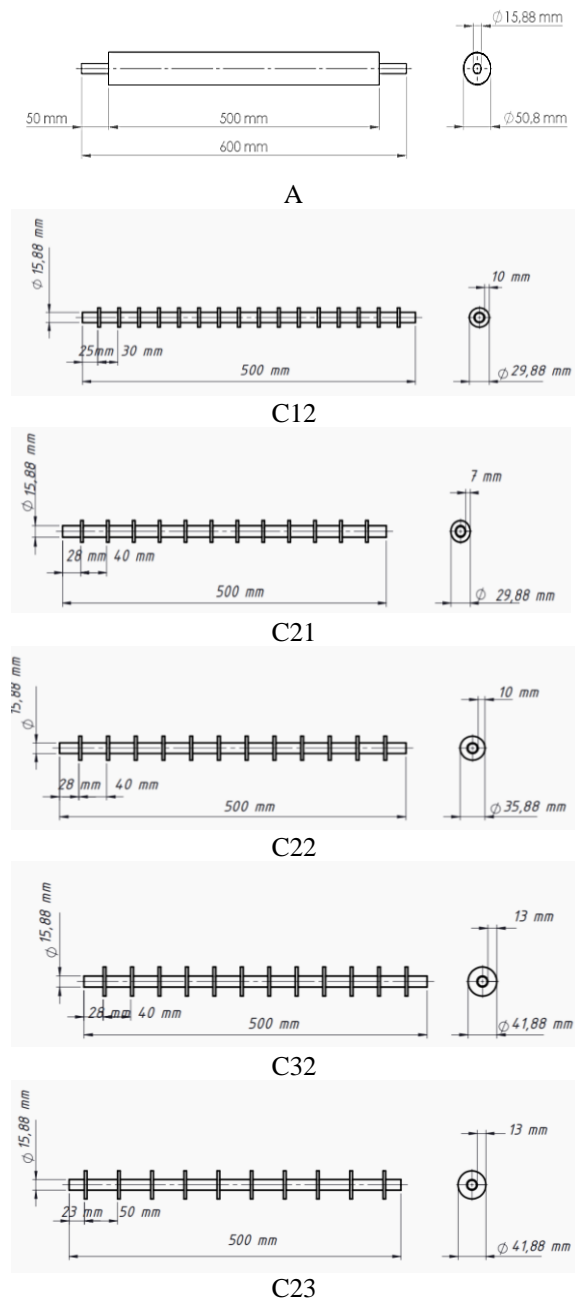
yang dipasang pada anulus bagian luar. Pipa bagian dalam berfungsi sebagai permukaan perpindahan panas antara air yang mengalir di dalam pipa dan PCM di bagian luar. Dimensi pipa ganda antara lain, pipa bagian dalam berbahan tembaga dengan diameter 5/8 inci, pipa bagian luar berbahan akrilik dengan diameter luar 50 mm dan diameter dalam 46 mm, serta panjang pipa ganda. pipa ganda berukuran 500 mm, seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. skema diagram pengujian sistem LHTES

Variasi pengujian meliputi laju aliran massa air dan penggunaan sirip. Laju aliran massa yang digunakan adalah 0,065 kg/s, 0,126 kg/s, dan 0,194 kg/s. Selanjutnya variasi sirip meliputi jumlah dan tinggi. Jumlah sirip yang digunakan adalah 10, 12, dan 16 dengan tinggi 10 mm. Variasi tinggi 7 mm, 10 mm, dan 13 mm dengan jumlah sirip sebanyak 12 buah. Pengujian dibagi menjadi dua bagian yaitu proses peleburan dan pematatan. Pada proses peleburan, suhu awal parafin adalah 31°C dalam kondisi padat, kemudian dialirkan air panas bersuhu 80°C untuk setiap variasi pengujian. Pengujian berakhir ketika suhu parafin mencapai 63°C. Pada proses pematatan, parafin cair yang bersuhu 63°C dialirkan dengan air dingin bersuhu 29°C hingga parafin mencapai suhu 31°C. Data yang dikumpulkan untuk setiap variasi pengujian meliputi suhu masuk dan keluar air, suhu parafin, suhu sirip, dan waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu parafin yang diinginkan. Variasi pipa yang

digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Variasi pipa tembaga bersirip aksial

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini pengumpulan data dilakukan secara bertahap. Tahap pertama adalah proses peleburan, pada proses ini parafin yang berada pada tabung akrilik berbentuk padat dengan suhu 31°C yang kemudian dicairkan menggunakan air panas yang akan dialirkan ke pipa bagian

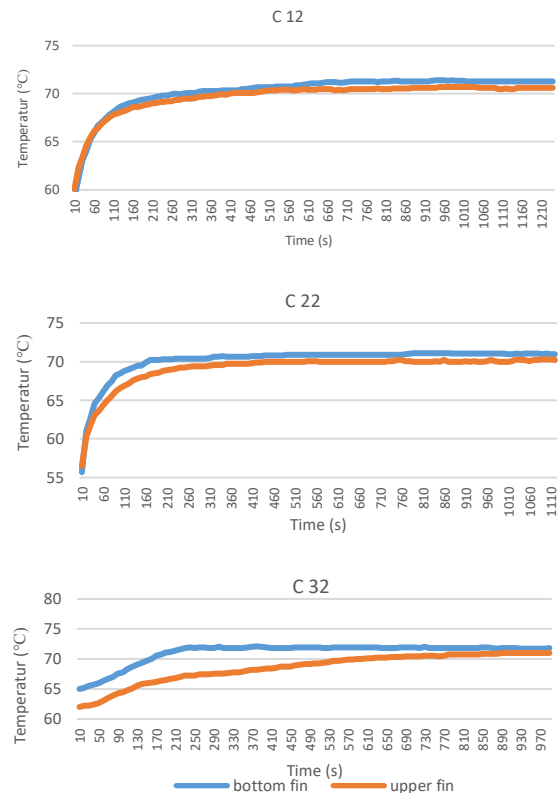
dalam. Air panas akan bersirkulasi dengan tiga variasi laju aliran massa yaitu 0,065 kg/s, 0,126 kg/s dan 0,194 kg/s hingga suhu parafin mencapai 63 °C. Air pada tandon tersebut akan dipanaskan oleh elemen pemanas air berkekuatan 650 Watt berbentuk huruf “U” yang terbuat dari bahan stainless steel. Elemen pemanas air ini dihubungkan dengan pengatur suhu. Pengatur suhu ini berfungsi untuk menjaga suhu air yang telah ditentukan yaitu 80°C.

Tahap kedua adalah proses pembekuan, pada proses ini paraffin dengan suhu 63°C akan dimasukkan ke dalam tabung akrilik yang kemudian akan didinginkan dengan air yang dialirkan melalui pipa bagian dalam. Air bersirkulasi dengan tiga variasi laju aliran massa yaitu 0,065 kg/s, 0,126 kg/s dan 0,194 kg/s hingga suhu parafin mencapai 31°C.

Variasi pertama yang dibandingkan adalah geometri dan jumlah sirip. Sirip aksial dengan tinggi sirip 10 mm akan divariasikan jumlah sirip 10, 12, 16 sirip yang dipasang pada pipa bagian dalam penukar panas. Kemudian variasi kedua adalah membandingkan tinggi sirip pada masing-masing geometri. Sirip aksial yang berjumlah 12 sirip akan divariasikan tinggi siripnya yaitu 7 mm, 10 mm dan 13 mm.

3.1 Pengaruh Penggunaan Sirip Aksial Terhadap Proses Pelelehan Parafin.

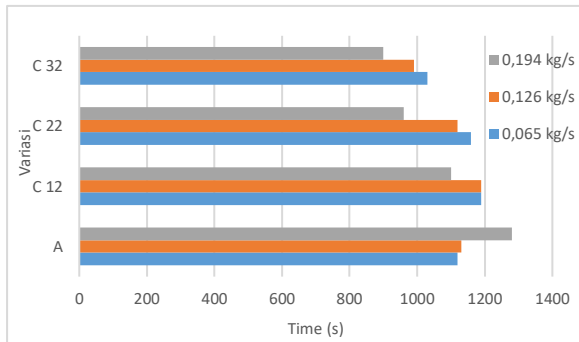
Pada proses pelelehan paraffin, termokopel yang dipasang pada bagian atas dan bawah sirip menunjukkan adanya perbedaan perbandingan temperatur pada masing-masing variasi. Gambar 3 di bawah ini menunjukkan proses perpindahan panas yang terjadi di sirip variasi C12, C22 dan C32 dengan laju aliran massa 0,126 kg/s. Temperatur sirip bagian bawah lebih tinggi dibandingkan temperatur sirip bagian atas, ketiga variasi menunjukkan fenomena yang sama pada proses perpindahan panas pada sirip. Selisih temperatur rata-rata sirip bagian bawah dan atas pada variasi C12, C22, C32 sebesar 0,6°C, 1,1°C, 2,5 °C



Gambar 3. Distribusi suhu sirip aksial dalam proses pelelehan parafin

Dari gambar 3 dapat dilihat ada perbedaan fenomena distribusi perpindahan panas di sirip pada variasi jumlah sirip aksial. Variasi C12 dengan jumlah sirip paling sedikit memiliki selisih temperatur di dasar dengan bagian atas sirip sangat kecil sejak awal proses pelelehan. Konduktivitas thermal yang rendah dari paraffin menghambat perpindahan panas dari sirip menuju parafin, sehingga perpindahan panas terjadi secara lambat. Dengan penambahan jumlah sirip maka luas area perpindahan panas juga akan bertambah sehingga laju perpindahan panas akan lebih besar pada variasi C22 dan C32. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2, selisih suhu dasar dan ujung sirip pada variasi C22 dan C32 lebih tinggi dibanding variasi C12 sehingga waktu pelelehan parafin pun semakin cepat.

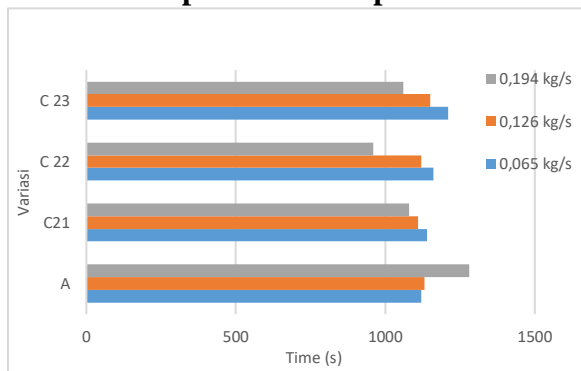
3.2 Perbandingan jumlah sirip aksial terhadap waktu leleh paraffin



Gambar 4. Grafik perbandingan jumlah sirip aksial terhadap waktu pada proses peleburan paraffin

Dari grafik yang ditunjukkan gambar 4 dapat dilihat bahwa penambahan jumlah sirip dan laju aliran massa akan memperpendek waktu pelelehan paraffin. Dengan menambah jumlah sirip maka luas area konduksi juga akan bertambah, akibatnya resistensi termal dari paraffin dapat diperkecil sehingga waktu pelelehan paraffin dapat diperpendek. Gambar 4 menunjukkan data bahwa variasi A memiliki waktu pelelehan rata-rata di semua variasi laju aliran massa sebesar 1176 detik, C12 sebesar 1160 detik, C22 sebesar 1080 detik dan C32 sebesar 973 detik. Artinya dengan penambahan 12 dan 16 sirip aksial akan mengurangi waktu leleh sebesar 6,8 % dan 16,1 % dibandingkan variasi 10 sirip aksial pada rata-rata semua variasi laju aliran massa.

3.3 Perbandingan tinggi sirip aksial terhadap waktu leleh paraffin



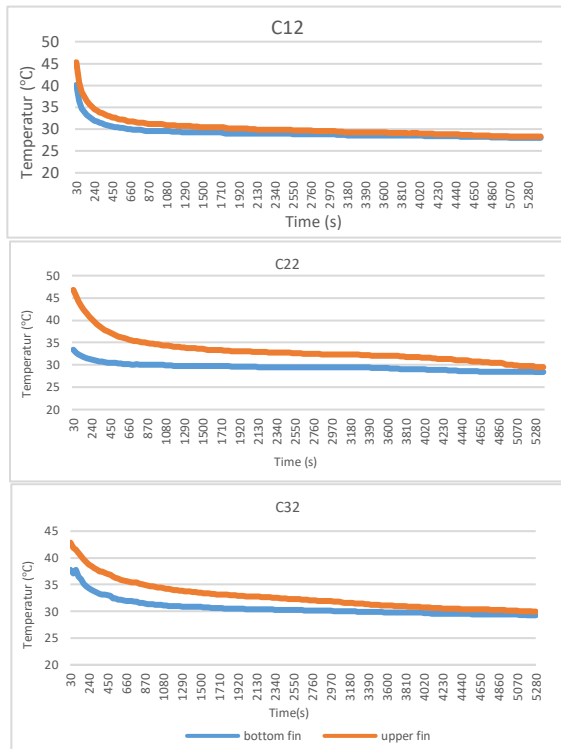
Gambar 5. Grafik perbandingan tinggi sirip aksial terhadap waktu pada proses peleburan paraffin

Dari gambar 5 dapat dilihat bahwa penambahan ketinggian sirip akan mempengaruhi waktu pelelehan paraffin di semua variasi laju aliran massa. Diamati bahwa waktu leleh rata-rata semua variasi laju aliran massa pada variasi C21 sebesar 1110 detik, C22 sebesar 1080 detik dan C23 sebesar 1140 detik. Artinya ada penurunan waktu leleh sebesar 2,7% dari variasi C21 ke C22. Namun dari variasi C21 ke C23 ada penambahan waktu sebesar 2,7 %. Dengan meningkatkan diameter sirip akan memberikan penetrasi ke arah paraffin padat sehingga mempercepat perpindahan panas dari air menuju paraffin. Namun peningkatan diameter sirip melebihi nilai tertentu akan menekan efek konveksi alami yang disebabkan jarak antara sirip dan dinding tabung luar terlalu kecil sehingga gerakan aliran paraffin cair akan terhambat [21]

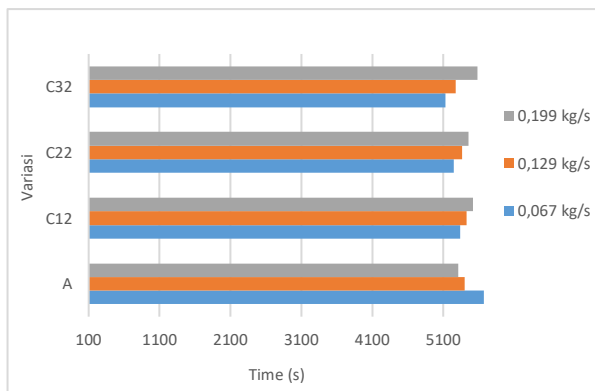
3.4 Pengaruh penggunaan sirip aksial terhadap proses pembekuan paraffin

Pada proses pembekuan paraffin, termokopel yang dipasang pada bagian atas dan bawah sirip menunjukkan adanya perbedaan perbandingan temperatur pada masing-masing variasi. Gambar 6 di bawah ini menunjukkan proses perpindahan panas yang terjadi di sirip variasi C12, C22 dan C32 dengan laju aliran massa 0,129 kg/s. Temperatur sirip bagian atas lebih tinggi dibandingkan temperatur sirip bagian bawah, ketiga variasi menunjukkan fenomena yang sama pada proses perpindahan panas pada sirip. Selisih temperatur rata-rata sirip bagian atas dan bawah pada variasi C12, C22, C32 sebesar 1°C, 3,4°C, 2,07°C. Dari gambar 46 dapat dilihat bahwa pada variasi C12 penurunan temperatur terjadi secara cepat dari awal proses sehingga selisih temperatur sirip bagian atas dan bawah cenderung kecil hingga akhir proses pembekuan. Sedangkan pada variasi C22 dan C32 menunjukkan fenomena perpindahan panas yang hampir sama yaitu diawali dengan selisih temperatur besar di awal proses dan secara berangsur selisih temperatur atas dan bagian

bawah sirip semakin mengecil secara konstan hingga akhir proses pembekuan. Ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas pada sirip sangat dipengaruhi oleh daerah perpindahan panas [22].



Gambar 6. Distribusi suhu sirip aksial dalam proses pembekuan parafin

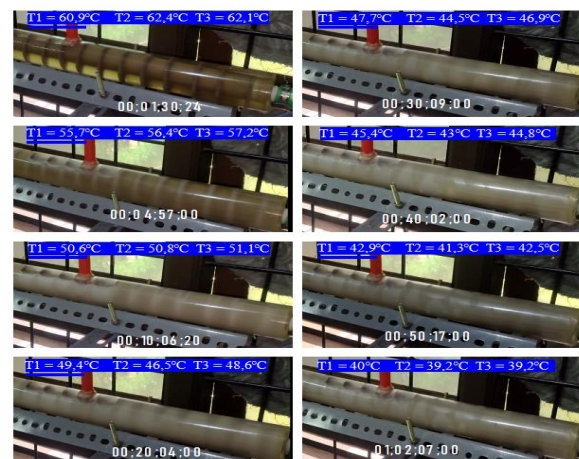


Gambar 7. Proses pembekuan parafin pada sistem LHTES sirip aksial

Dari gambar 7 dapat dilihat proses pembekuan paraffin. Mula-mula proses perpindahan panas didominasi oleh konveksi alami parafin cair pada sistem penyimpanan, yang dengan cepat menghilangkan panas sensibel parafin kemudian menurunkan suhu ke titik beku

parafin dalam waktu singkat. Pada gambar menunjukkan bahwa parafin di sekitar pipa dan sirip akan membeku lebih dulu karena perpindahan panas konduksi yang lebih tinggi di area ini. Parafin padat akan berperilaku sebagai bahan insulasi karena konduktivitas termalnya yang rendah. Sehingga laju perpindahan panas dari parafin ke air akan menjadi lambat. Laju ini menurun saat bagian depan solidifikasi bergerak ke luar dan ketebalan parafin padat meningkat sepanjang arah radial. Gambar 7 juga menunjukkan bahwa parafin cair bergerak ke atas dan proses pemadatan lebih cepat di bagian bawah sistem penyimpanan. Gerakan ini juga disebabkan oleh gaya apung dan perpindahan panas konveksi antara fase padat dan cair. Akibat konduktivitas termal parafin sangat rendah sehingga perpindahan panas keseluruhan didominasi oleh konduksi termal dalam fase padat antara pipa tembaga dengan parafin [13].

3.5 Perbandingan jumlah sirip aksial terhadap waktu pembekuan paraffin

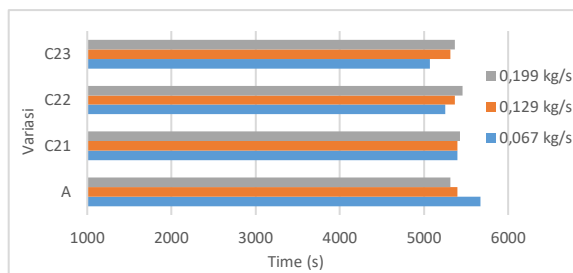


Gambar 8. Grafik perbandingan jumlah sirip aksial terhadap waktu pembekuan paraffin

Gambar 8 menunjukkan secara berturut-turut variasi A, C12, C22 dan C32 memiliki waktu pembekuan rata-rata semua variasi kecepatan aliran sebesar 5460 detik, 5430 detik, 5360 detik dan 5330 detik. Artinya penambahan jumlah sirip aksial sebesar 7,9% dan 23,6% dari total luas pipa

tembaga 10 sirip aksial (variasi C12) dapat mengurangi waktu pembekuan rata-rata di semua variasi laju aliran massa sebesar 1,3 % dan 1,8 %. Ini menunjukkan bahwa penambahan luas area hanya memberikan pengaruh yang kecil terhadap waktu pembekuan parafin. Karena ketika proses perpindahan panas terjadi, parafin di area dekat sirip akan membeku sehingga konveksi alami tidak bisa membantu secara nyata untuk meningkatkan proses pemadatan berbeda dengan proses pelelehan. Dari gambar 8 juga menunjukkan bahwa menaikkan laju aliran tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap waktu pembekuan parafin.

3.6 Perbandingan tinggi sirip aksial terhadap waktu pembekuan parafin.



Gambar 9. Grafik perbandingan tinggi sirip aksial terhadap waktu pembekuan parafin

Dari gambar 9 dapat dilihat bahwa penambahan ketinggian sirip hanya memberikan sedikit pengaruh terhadap waktu pembekuan parafin. Diamati bahwa waktu pembekuan parafin sedikit berkurang dengan meningkatnya tinggi sirip dari variasi C21 ke C23. Grafik menunjukkan bahwa waktu pembekuan rata-rata semua variasi kecepatan aliran untuk konfigurasi C21 adalah 5410 detik, berkurang menjadi 5360 detik untuk variasi C22 atau turun 0,9 %. Selanjutnya, berkurang menjadi 5250 detik untuk variasi C23 atau turun sebesar 3%. Ini menunjukkan bahwa penambahan tinggi sirip hanya sedikit berpengaruh terhadap waktu proses pembekuan parafin [23].

3.7 Laju Perpindahan Panas Proses Pelelehan

Laju perpindahan panas air ini menunjukkan perpindahan panas yang terjadi dalam alat penukar kalor, dimana energi panas berpindah dari air panas yang berada pada inner pipe ke parafin yang berada di outer pipe dan dalam proses perpindahan energi tersebut ada laju perpindahan panas yang terjadi. Berikut ini adalah tabel laju perpindahan panas dari data hasil pengujian yang telah dilakukan. Didapatkan nilai $\bar{x} \Delta T$ dari rata-rata perubahan temperatur masuk dan keluar air dari double pipe yang diperoleh dari hasil pengujian. Nilai \dot{m} adalah laju aliran masa dari satuan yang dibaca oleh water flow meter, yaitu liter per menit yang kemudian dikonversikan menjadi satuan kilogram per sekon. Sedangkan nilai c_p air ini adalah nilai kapasitas panas spesifik air pada temperatur 80°C . Berikut ini adalah persamaan dari laju perpindahan panas [24]:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Dimana \dot{m} adalah laju aliran massa (kg/s), c_p adalah kapasitas panas spesifik (J/kg.K) dan ΔT adalah selisih temperatur (K).

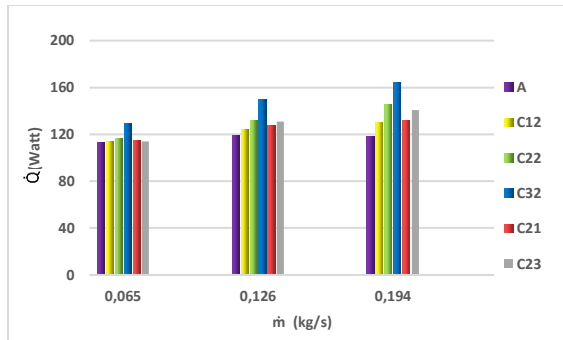
Berdasarkan persamaan diatas, dapat diketahui nilai laju perpindahan panas air pada setiap variasi sirip aksial yang diuji. Nilai hasil perhitungan laju perpindahan panas air ini dapat dilihat seperti pada tabel 1 dan gambar 10 berupa grafik berikut ini.

Tabel 1. Data laju perpindahan panas sirip aksial pada proses peleburan

\dot{m} (kg/s)	$C_{p\text{water}}$ @80°C (J/kg°C)	\dot{Q} (Watt)					
		A	C12	C22	C32	C21	C23
0,065	4197	113,21	114,03	116,76	127,67	111,03	114,03
0,126		118,98	124,27	131,68	148,60	124,8	131,15
0,194		118,06	130,27	144,12	157,96	127,83	144,93
Rata-rata		116,75	122,77	131,39	147,72	124,82	128,68

Dari grafik Gambar 10. menunjukkan bahwa penambahan jumlah dan tinggi sirip akan meningkatkan laju perpindahan panas pada setiap variasi laju aliran massa HTF. Pada laju aliran massa

0,065 kg/s, variasi A, C12, C22 dan C32 memiliki laju perpindahan panas sebesar 113,21 Watt, 114,03 Watt, 116,76 Watt, 127,67 Watt.



Gambar 10. Grafik perbandingan laju perpindahan panas air ke parafin pada proses peleburan

Pada laju aliran massa HTF 0,126 kg/s dan 194 kg/s menunjukkan fenomena yang sama yaitu laju perpindahan panas akan meningkat seiring bertambahnya jumlah sirip. Dari hasil rata-rata semua variasi laju aliran massa, variasi A, C12, C22 dan C32 memiliki laju perpindahan panas sebesar 116,75 Watt, 122,86 Watt, 130,85 Watt, 144,74 Watt. Ini menunjukkan bahwa dengan penambahan jumlah sirip pada variasi C22 dan C32 akan menambah laju perpindahan panas sebesar 6,5 % dan 17,8 % jika dibandingkan dengan variasi C12.

Dari gambar 9 juga dapat dilihat bahwa penambahan tinggi sirip akan mempengaruhi nilai laju perpindahan panas. Dari hasil rata-rata semua variasi laju aliran massa, variasi C21, C22 dan C23 memiliki laju perpindahan panas sebesar 121,22 Watt, 130,85 Watt dan 130,03 Watt. Data ini menunjukkan bahwa ada kenaikan nilai laju perpindahan panas pada variasi C22 dan C23 sebesar 7,94 % dan 7,27 % jika dibandingkan dengan variasi C21.

3.8 Laju Perpindahan Panas Proses Pembekuan

Laju perpindahan panas parafin ini menunjukkan perpindahan panas yang terjadi dalam alat penukar kalor, dimana energi panas berpindah dari parafin cair

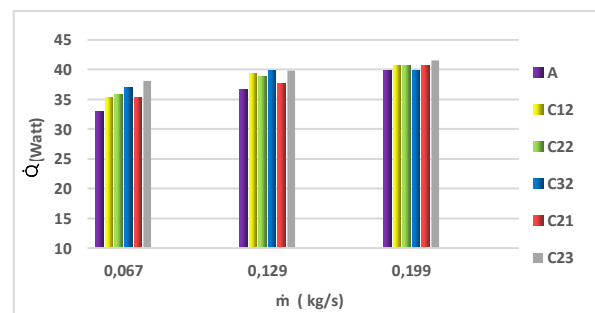
yang berada pada outer pipe menuju air yang berada di inner pipe dan dalam proses perpindahan energi tersebut ada laju perpindahan panas yang terjadi. Berikut ini adalah persamaan dari laju perpindahan panas pada proses pembekuan parafin:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \text{ parafin} \cdot \Delta T \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan diatas, dapat diketahui nilai laju perpindahan panas parafin pada setiap variasi sirip aksial yang diuji. Hasil perhitungan laju perpindahan panas parafin ini dapat dilihat seperti pada tabel 2 dan gambar 11 berupa grafik berikut ini.

Tabel 2. Data laju perpindahan panas pada proses pembekuan parafin

\dot{m} (kg/s)	$C_{p\text{water}}$ @30C (J/kg°C)	\dot{Q} (Watt)					
		A	C1	C22	C32	C21	C23
0,067	4178	33,03	35,27	35,83	36,95	35,27	38,07
0,129		36,65	39,34	38,81	39,88	37,73	39,88
0,199		39,91	40,74	40,74	39,91	40,74	41,57
Rata-rata		36,53	38,45	38,46	38,91	37,91	39,84



Gambar 11. Grafik perbandingan laju perpindahan panas parafin ke air pada proses pembekuan parafin

Dari grafik Gambar 11. menunjukkan bahwa penambahan jumlah dan tinggi sirip akan meningkatkan laju perpindahan panas pada setiap variasi laju aliran massa HTF. Pada laju aliran massa 0,067 kg/s, variasi A, C12, C22 dan C32 memiliki laju perpindahan panas sebesar 33,03 Watt, 35,27 Watt, 35,83 Watt, 36,95 Watt. Pada laju aliran massa HTF 0,129 kg/s dan 199 kg/s menunjukkan fenomena yang sama yaitu laju perpindahan panas akan

meningkat seiring bertambahnya jumlah sirip. Dari hasil rata-rata semua variasi laju aliran massa, variasi A, C12, C22 dan C32 memiliki laju perpindahan panas sebesar 36,83 Watt, 38,45 Watt, 38,46 Watt, 38,91 Watt. Ini menunjukkan bahwa dengan penambahan jumlah sirip pada variasi C22 dan C32 akan menambah laju perpindahan panas sebesar 0,03 % dan 1,19 % jika dibandingkan dengan variasi C12.

Dari gambar 11 juga dapat dilihat bahwa penambahan tinggi sirip akan mempengaruhi nilai laju perpindahan panas. Dari hasil rata-rata semua variasi laju aliran massa, variasi C21, C22 dan C23 memiliki laju perpindahan panas sebesar 37,91 Watt, 38,46 Watt dan 39,84 Watt. Data ini menunjukkan bahwa ada kenaikan nilai laju perpindahan panas pada variasi C22 dan C23 sebesar 1,45 % dan 5,09 % jika dibandingkan dengan variasi C21.

3.9 Kinerja Pada Proses Pelelehan

Kinerja perpindahan panas pada proses pelelehan dihitung melalui panas masuk dan kapasitas penyimpanan panas dari parafin. Panas yang masuk ke parafin merupakan jumlah energi yang dilepaskan oleh air yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [25]:

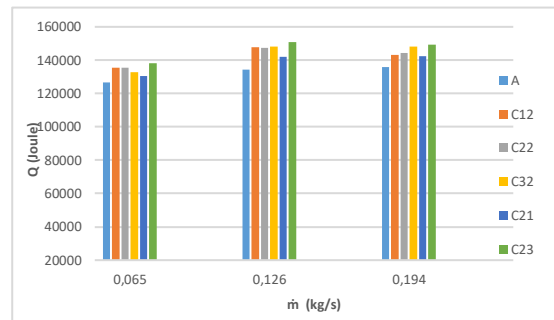
$$\dot{Q}_{\text{air}} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot t \quad (3)$$

Dimana \dot{m} adalah laju aliran massa (kg/s), c_p adalah kapasitas panas spesifik (J/kg.K), ΔT adalah selisih temperatur (K) dan t adalah waktu leleh parafin (s).

Dari persamaan 3 kita dapat mengetahui energi yang dilepaskan oleh air selama proses pelelehan parafin, berikut ini adalah tabel dan grafik yang menunjukkan hasil perhitungan energi yang dilepaskan oleh air ke parafin.

Tabel 3. Energi yang dilepaskan oleh HTF selama proses pelelehan

Variasi (kg/s)	Q (Joule)					
	A	C12	C22	C32	C21	C23
0,065	126800	135374	135442	132908	130619	137979
0,126	134453	147885	147478	148160	142052	150820
0,194	135771	143302	144288	148025	142456	149311
Rata-rata	132341	142187	142403	143031	138376	146037



Gambar 12. Grafik perbandingan energi yang dikeluarkan air panas terhadap parafin pada proses pelelehan

Dari tabel 3 dan gambar 12 menunjukkan bahwa dari hasil rata-rata semua variasi laju aliran massa, nilai energi terkecil yang dilepaskan oleh air untuk memanaskan parafin hingga temperatur 63 °C dimiliki oleh variasi A sebesar 132.341 Joule dan berturut turut C21, C12, C22, C32 dan C23 dengan nilai 138.376 Joule, 142.187 Joule, 142.403 Joule, 143.031 Joule, 146.037 Joule. Artinya semakin luas area perpindahan panas maka energi yang dilepaskan oleh air selama proses pelelehan juga akan semakin besar.

Kemudian untuk menghitung kesetimbangan energi pada sistem LHTES kita perlu menghitung besarnya energi yang diterima oleh parafin. Panas yang diterima oleh parafin dihitung dari panas yang disimpan oleh panas sensibel dan panas laten menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{\text{par}} = m_{\text{par.tot}} \cdot C_{p(\text{solid})} \cdot (T_m - T_i) + m_{\text{par.liq}} \cdot L \quad (4)$$

dimana T_m merupakan suhu rata-rata maksimum paraffin meleleh, T_i adalah suhu awal parafin terukur yaitu 31 °C. Sedangkan m , C_p dan L masing-masing mewakili massa, panas spesifik dan panas laten pelelehan parafin. Untuk dapat menghitung persamaan diatas, diperlukan sifat-sifat yang terdapat pada parafin yang digunakan. Berikut adalah tabel sifat-sifat parafin yang digunakan dalam penelitian ini [26]:

Tabel 4. Sifat lilin parafin

Property	Value
Liquid Temperature	51-57, main peak: 55 (°C)
Melting Heat (Combination of latent and sensible heat in a temperature range of 48°C to 63 °C)	170 (kJ/kg)
Specific Heat	2 (kJ/kg.K)
Density (Solid)	876.623 (kg/m ³)
Density (Liquid)	760 (kg/m ³)
The Total Mass of the Paraffin	0,981 (kg)
Initial Test Temperature	31 (°C)
Final Test Temperature	63 (°C)

Dalam proses penyimpanan energi thermal, pipa tembaga berperan sebagai media perpindahan panas antara air menuju parafin, sehingga pipa tembaga menyimpan sebagian energi panas yang akan mempengaruhi di dalam perhitungan kesetimbangan energi. Energi yang tersimpan di dalam pipa tembaga dapat dihitung dengan persamaan 5 berikut ini

$$Q_{\text{pipa}} = m \cdot C_{p\text{cooper}} \cdot \Delta T \quad (5)$$

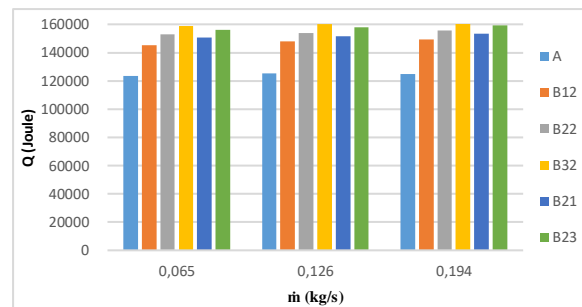
Tabel 5. Energi yang tersimpan didalam pipa tembaga

Variasi	massa (kg)	Cp cooper (J/kg°C)	ΔT (°C)	Q (Joule)
A	0,243	385	32	2992,94
C12	0,315		32	3881,22
C22	0,329		32	4058,87
C32	0,358		32	4414,19
C21	0,296		32	3652,33
C23	0,368		32	4539,78

Sehingga hasil perhitungan energi total yang diterima oleh parafin merupakan jumlah dari energi yang diterima parafin hingga temperatur 63 °C dan energi yang tersimpan dalam pipa tembaga. Hasil perhitungan energi total yang diterima parafin ditunjukkan dalam tabel 6 berikut ini

Tabel 6. Total energi yang diterima parafin selama proses peleburan

Variasi (kg/s)	Q (Joule)					
	A	C12	C22	C32	C21	C23
0,065	123585	133288	134987	136747	131350	140636
0,126	125523	134580	135891	138685	131996	141282
0,194	124877	135872	136925	139331	133288	142574
Rata-rata	124661	134580	135934	138254	132211	141497



Gambar 13. Grafik perbandingan energi total yang diterima parafin selama proses peleburan

Tabel 6 dan gambar 13 menunjukkan nilai energi yang diterima parafin pada semua variasi sirip aksial. Pada variasi A menunjukkan nilai sebesar 124.661 Joule dan berturut turut C21, C12, C22, C32 dan C23 dengan nilai 132.211 Joule, 134.580 Joule, 135.934 Joule, 138.254 Joule dan 141.497 Joule. Ini menunjukkan bahwa semakin luas area perpindahan panas maka energi yang diterima oleh parafin juga akan semakin besar. Nilai terbesar ditunjukkan oleh variasi C23 pada laju aliran 0,194 kg/s dengan nilai 142.574 Joule sedangkan nilai terendah ditunjukkan pada variasi A pada laju aliran 0,065 kg/s dengan nilai 123.585 Joule. Laju aliran massa fluida tidak begitu berpengaruh terhadap jumlah energi yang diterima oleh parafin. Dari tabel 4.11 dapat dilihat bahwa menaikkan laju aliran dari 0,065 kg/s menjadi 0,126 kg/s akan menaikkan jumlah energi rata-rata semua variasi yang diterima oleh parafin sebesar 0,92 %. Namun dengan memperbesar laju aliran massa dari 0,126 kg/s menjadi laju aliran 0,194 kg/s hanya akan meningkatkan jumlah energi rata-rata yang diterima parafin sebesar 0,61 %.

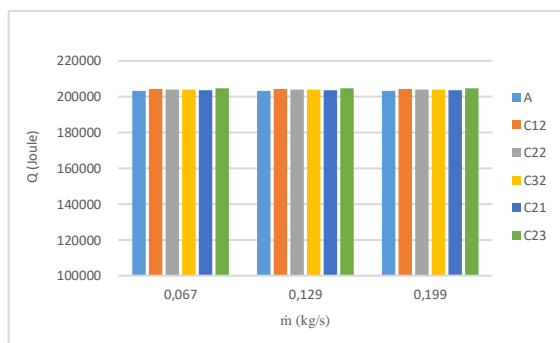
3.10 Kinerja Pada Proses Pembekuan

Kinerja perpindahan panas yang terjadi pada proses pembekuan ini dihitung melalui panas yang masuk ke HTF dari kapasitas penyimpanan panas pada parafin. Panas yang masuk ke air merupakan jumlah energi yang dilepaskan oleh parafin yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{\text{par}} = m_{\text{par.liq}} \cdot L + m_{\text{par.tot}} \cdot C_p(\text{solid}) \cdot (T_m - T_i) \quad (6)$$

Tabel 7. Total energi yang dilepaskan parafin selama proses pembekuan variasi sirip aksial

Variasi (kg/s)	Q (Joule)					
	A	C12	C22	C32	C21	C23
0,067	203043	204464	204109	203931	203702	204590
0,129	203043	204464	204109	203931	203702	204590
0,199	203043	204464	204109	203931	203702	204590



Gambar 14. Grafik perbandingan energi total yang diterima parafin selama proses peleburan

Tabel 7 dan gambar 14 menunjukkan nilai energi yang dilepaskan parafin pada semua variasi. Pada variasi A menunjukkan nilai sebesar 203.043 Joule dan berturut turut C21, C12, C22, C32 dan C23 dengan nilai 203.702 Joule, 203.931 Joule, 204.109 Joule, 204.464 Joule dan 204.590 Joule. Data ini menunjukkan adanya sedikit kenaikan jumlah energi yang dilepaskan oleh parafin. Jika dibandingkan dengan variasi A, kenaikan jumlah energi yang dilepaskan oleh parafin adalah sebesar 0,3%, 0,4 %, 0,5 %, 0,7 % dan 0,8 %. Artinya penambahan luas area hanya memberikan sedikit pengaruh terhadap peningkatan energi yang dilepaskan oleh parafin pada proses pembekuan. Kemudian untuk menghitung kesetimbangan energi

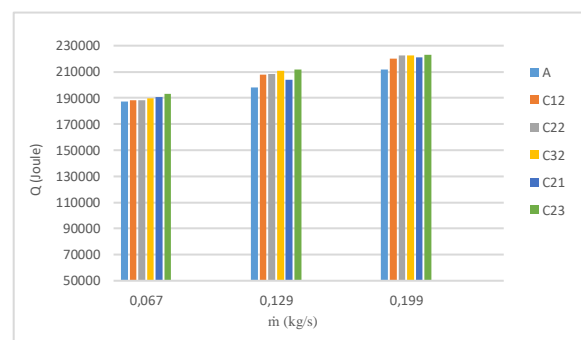
pada sistem LHTES kita perlu menghitung besarnya energi yang diterima oleh air. Panas yang diterima oleh air dihitung dengan persamaan 7 berikut ini

$$Q_{\text{air}} = \dot{m} \cdot c_{p\text{air}@30^\circ\text{C}} \cdot \Delta T \cdot t \quad (7)$$

Dengan persamaan ini kita dapat mengetahui energi yang diterima oleh air selama proses pembekuan parafin, berikut ini adalah tabel dan grafik yang menunjukkan hasil perhitungan energi yang diterima oleh air dari parafin.

Tabel 8. Energi yang diterima air selama proses pembekuan

Variasi (kg/s)	Q (Joule)					
	A	C12	C22	C32	C21	C23
0,067	187287	188345	188110	189555	190462	193015
0,129	197907	207786	208384	210583	203728	211780
0,199	211913	220294	222439	222688	221216	223237
Rata-rata	199036	205475	206311	207609	205135	209344



Gambar 15. Grafik perbandingan energi yang diterima HTF selama proses pembekuan

Tabel 8 dan gambar 15 menunjukkan nilai energi yang diterima oleh air pada semua variasi. Nilai rata-rata pada variasi A menunjukkan nilai sebesar 199.036 Joule dan berturut turut C21, C12, C22, C32 dan C23 dengan nilai 205.135 Joule, 205.475 Joule, 206.311 Joule, 207.609 Joule dan 209.344 Joule. Artinya penambahan luas area memberikan dampak positif terhadap peningkatan energi yang diterima oleh air meskipun tidak signifikan. Dari data diatas ditunjukkan bahwa peningkatan jumlah energi yang diterima oleh air jika dibandingkan variasi A, berturut-turut mulai

dari variasi C21, C12, C22, C32 dan C23 adalah sebesar 3 %, 3,2 %, 3,65 %, 4,3 %, 5,17 %. Energi terbesar yang diterima oleh air didapatkan pada variasi C32 pada laju aliran massa 0,199 kg/s sedangkan energi terendah terdapat pada variasi A pada laju aliran massa 0,067 kg/s.

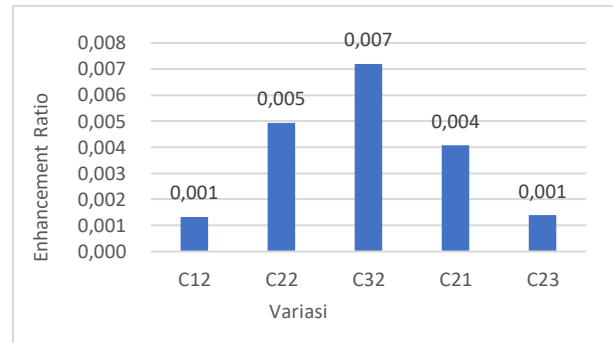
3.11 Luas Sirip Optimal

Seperti yang telah dibahas, waktu leleh parafin berkurang dengan penambahan jumlah dan tinggi sirip. Namun, penerapan penambahan jumlah dan tinggi sirip juga akan meningkatkan volume bahan sirip dan memengaruhi biaya awal sistem LHTES [27]. Oleh karena itu, optimalisasi volume sirip diperlukan. Oleh karena itu, rasio peningkatan (ER) diperkenalkan dan dibandingkan untuk berbagai konfigurasi tabung bersirip. Ini didefinisikan sebagai rasio penghematan waktu leleh terhadap luas sirip dari masing-masing konfigurasi tabung bersirip. Rasio ini menunjukkan trade-off antara penghematan waktu pencairan dan ekonomi sistem LHTES. Seperti yang telah dibahas di bagian sebelumnya, dengan meningkatnya

tinggi dan jumlah sirip, biaya sistem LHTES meningkat dan tingkat penghematan waktu pelelehan berkurang. Peningkatan jumlah dan tinggi sirip ke nilai tertentu, peningkatan lebih lanjut dalam bahan fin tidak akan mengurangi waktu leleh secara substansial.

$$ER = \frac{\text{melting time savings}}{\text{total fin area}} \quad (8)$$

di mana penghematan waktu leleh adalah perbedaan antara waktu leleh dari masing-masing konfigurasi tabung bersirip dan kasus referensi. Karena konfigurasi pipa tanpa sirip dianggap sebagai kasus referensi untuk menghitung penghematan waktu leleh, maka nol untuk variasi A seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Grafik perbandingan peningkatan rasio semua variasi sirip

Dari gambar 16 diatas menunjukkan bahwa peningkatan rasio (ER) variasi C32 yang memiliki luas total sirip 28.214 mm² dapat dianggap sebagai luas sirip optimal.

4. Kesimpulan

Dalam penelitian ini, efek geometri sirip pada karakteristik sistem pelelehan dan pembekuan LHTES shell-and-tube sirip aksial telah diperiksa dan dibandingkan dalam hal waktu pelelehan, waktu pembekuan dan penyimpanan energi PCM. Manfaat penambahan jumlah sirip sampai batas optimal lebih memberikan dampak positif dibandingkan dengan penambahan tinggi sirip.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan jumlah sirip aksial sebesar 4,6% dan 13,7% dari total volume pipa tembaga 10 sirip (variasi C12) dapat mengurangi waktu leleh rata-rata di semua variasi laju aliran massa sebesar 6,9 % dan 16,1 %, sedangkan dalam proses pembekuan dapat mengurangi waktu pembekuan sebesar 1,3 % dan 1,8 %. Penambahan tinggi sirip sebesar 11,13% dan 24,29% dari total volume pipa tembaga 12 sirip aksial dengan tinggi sirip 7 mm (variasi C21) dapat mempengaruhi waktu leleh rata-rata di semua laju aliran massa sebesar 2,7 % dan -2,7 % sedangkan dalam proses pembekuan dapat mengurangi waktu pembekuan sebesar 0,9 % dan 3 %. Dari data hasil perhitungan dan data hasil perbandingan didapatkan hasil Peningkatan Rasio (ER) variasi C32 yang memiliki volume sirip 12.961 mm³ dapat dianggap sebagai luas

area sirip optimal. Variasi C32 memiliki 16 sirip aksial dengan tinggi sirip 10 mm. Studi ini menunjukkan bahwa kombinasi antara tinggi dan jumlah sirip yang tepat akan meningkatkan kinerja termal sistem LHTES secara substansial.

Pada proses pelelehan, peningkatan nilai laju perpindahan panas pada variasi jumlah sirip C22 dan C32 akan meningkat sebesar 6,5 % dan 17,8 % jika dibandingkan dengan variasi C12. Sedangkan pada variasi tinggi sirip menunjukkan peningkatan nilai laju perpindahan panas variasi C22 dan C23 sebesar 7,94 % dan 7,27 % jika dibandingkan variasi C21. Sedangkan pada proses pembekuan menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sirip C22 dan C32 akan meningkatkan laju perpindahan panas sebesar 0,03 % dan 1,19 % jika dibandingkan dengan variasi C12. Sedangkan penambahan tinggi sirip akan meningkatkan nilai laju perpindahan panas variasi C22 dan C23 sebesar 1,45 % dan 5,09 % jika dibandingkan dengan variasi C21.

Referensi

- [1] Susanto H, Irawan D., 2017. Pengaruh Jarak Antar Pipa Pada Kolektor Terhadap Panas Yang Dihasilkan Solar Water Heater (Swh). *Turbo Jurnal Program Studi Teknik Mesin*; 6(1):84-91. doi:10.24127/trb.v6i1.470
- [2] Rahmalina D, et al., 2023. Peningkatan Performa Termal Phase Change Material dengan Komposit Berbasis Parafin/High-Density Polyethylene Melalui Penambahan Carbon Nanotube. *TURBO* Vol. 12 No. 02
- [3] S. Zaphar, et al., 2023. Thermal Analysis of an Evacuated Tube Solar Collector using a One-end Stainless Steel Manifold for Air Heating Applications under Diverse Operational Conditions. *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 10 (02) 897-911.
- [4] R. Koželj, et al., 2021. An experimental and numerical analysis of an improved thermal storage tank with encapsulated PCM for use in retrofitted buildings for heating. *Energy Build*, 248. doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111196
- [5] A. Gil, et al., 2010. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1- Concepts, materials and modellization. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 14 (1) 31–55. doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.035
- [6] S. Seddegh, et al., 2015. Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 49 517–533. doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.147
- [7] K. Verma, et al., 2023. Photovoltaic Panel Integration Using Phase Change Material (PCM): Review, *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 10 (01) 444-453. https://doi.org/10.5109/6782147
- [8] A. S. Fleischer., 2015. Thermal energy storage using phase change materials: Fundamentals and applications, In *Springer Briefs. Applied Sciences and Technology* no. 9783319209210. doi.org/10.1007/978-3-319-20922-7
- [9] K. Tewari, and R. Dev., 2018. Analysis of modified solar water heating system made of transparent tubes & insulated metal absorber. *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 5 (1) 62–72. doi:10.5109/1929731
- [10] A. Sharma, et al., 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 13 (2) 318–345. doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005

- [11] N. R. Vyshak and G. Jilani, 2007. Numerical analysis of latent heat thermal energy storage system. *Energy Convers. Manag.*, 48 (7) 2161–2168. doi.org/10.1016/j.enconman.2006.12.013
- [12] M. A. Kibria, et al., 2014. Numerical and experimental investigation of heat transfer in a shell and tube thermal energy storage system. *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 53 71-78. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.02.023
- [13] S. Seddegh, et al, 2016. A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and axial shell-and-tube energy storage using phase change materials. *Appl. Therm. Eng.*, 93, 348–358. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.02.023
- [14] N. Modi, et al., 2021. Melting characteristics of a longitudinally finned-tube horizontal latent heat thermal energy storage system. *Sol. Energy*, 230 333–344. doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.043
- [15] M. Eslami, et al., 2021. Effects of fin parameters on performance of latent heat thermal energy storage systems. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 47 101-449. doi.org/10.1016/j.seta.2021.101449
- [16] A. El, et al., 2020. Performance enhancement of finned annulus using surface interruptions in double-pipe heat exchangers. *Energy Convers. Manag.* doi.org/10.1016/j.enconman.2020.11.2710
- [17] S. Mishra, et al., 2023. An Experimental Analysis of Natural Heat Transfer between Rectangular Solid and Perforated Fins Having Different Perforation Characteristics. *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 10 (01) 366-371. https://doi.org/10.5109/6781094
- [18] S. Rostami, et al., 2020. A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage. *Energy*. doi.org/10.1016/j.energy.2020.11868
- [19] C. Ijogbemeye Oseghale and E. J. Akpabio., 2012. Managing paraffin wax deposition in oil wells - Related problems in Nigerian oil fields. *Soc. Pet. Eng. - 36th Niger. Annu. Int. Conf. Exhib. Oil Gas Right Balanc. Sustain.* 2 551–560. doi: 10.2118/163037-ms.
- [20] G. Alva, et al., 2017. Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 68 693–706 doi: 10.1016/j.rser.2016.10.021.
- [21] A. Shahsavari, et al., 2020. Thermal performance evaluation of non-uniform fin array in a finned double-pipe latent heat storage system. *Energy*, 116800. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116800
- [22] K. G. Harding, 2012. *Heat Transfer Introduction*. Res. Gate, pp. 2–6 .https://www.researchgate.net/publication/323144799
- [23] A. Fallahi, et al., 2017. Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *Appl. Therm. Eng.*, 127, 1427–1441. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.161
- [24] A. J. Cengel, Y. A., & Ghajar., 2014. *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications 5th Ed.*, McGraw-Hill. New York.
- [25] J. P. Holman., 2010. *Heat Transfer: Tenth Edition*”. McGraw-Hill Education, New York.
- [26] H. Jouhara, et al., 2020. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review, *Int. J. Thermofluids*, 5–6, p. 100039. doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100039

- [27] H. Li, et al., 2021. Influence of fin parameters on the melting behavior in a horizontal shell-and-tube latent heat storage unit with longitudinal fins. *J. Energy Storage*, 34 102230 <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102230>