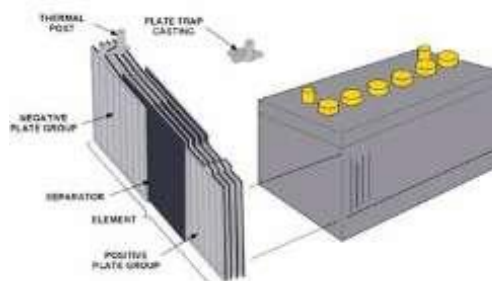


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baterai

Baterai merupakan suatu peralatan elektronik yang bisa mengkonversi energi. Baterai dibuat dari sejumlah elemen yang terpisah kemudian disatukan pada kotak karet keras atau plastik. Komponen dasar dari tiap sel membentuk pelat-pelat positif dan negatif, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.1 Pelat negatif dilapisi dengan timbal, berwarna kelabu. Sementara pelat positif dilapisi dengan timbal peroksida yang berwarna coklat. Beberapa pelat positif dan beberapa pelat negatif dihubungkan menjadi kelompok – kelompok pelat. Pada beberapa baterai, dalam kelompok pelat negatif selalu terdapat lebih banyak satu pelat daripada pelat positif dalam kelompok pelat positif (Nasution, 2021).



Gambar 2. 1 Pelat-pelat Positif dan Plat Negatif

(Sumber : Nasution, 2021)

2.2 Lithium – Ion Battery (Li-ion atau LIB)

Jenis baterai ini pertama kali pada tahun 1976 yang diperkenalkan oleh peneliti dari Exxon yang bernama M.S. Whittingham yang melakukan penelitian dengan judul “*Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry*”. Beliau ini menjelaskan mengenai proses interkalasi pada baterai lithium ion menggunakan titanium (II) sulfide sebagai katoda dan logam

titanium sebagai anoda. Proses interkalasi adalah proses perpindahan *ion lithium* dari anoda diganti dengan material lain yaitu grafit. Hal ini dilakukan oleh Rachid Yazami dan kawan kawan di *Grenoble Institute of Technology* (INPG) dan *French National Centre for Scientific Research* (CNSR) (Krysten Oates, 2010).

Menurut Fadli Rohman pada 2012 dijelaskan pada penelitiannya bahwa *Lithium-Ion Battery* atau baterai lithium ion merupakan salah satu jenis baterai sumber arus sekunder yang dapat diisi ulang. Pada saat ini, *Lithium-Ion Battery* menjadi baterai yang sangat dibutuhkan antara lain untuk kebutuhan energi listrik pada telepon seluler (ponsel), mp3 player dan lain-lain. Selain itu, saat ini *Lithium-Ion Battery* sangat dibutuhkan khususnya untuk kendaraan yang sumber energi listrik/*electric vehicle*. *Lithium-Ion Battery* ini memiliki daya yang tinggi serta bobot yang ringan dan dapat digunakan berkali – kali sehingga banyak digunakan oleh para produsen sebagai sumber tenaga alat elektroniknya.



Gambar 2. 2 Baterai Lithium Ion

2.2.1 Bagian Utama Lithium-Ion Battery

Lithium-Ion Battery pada umumnya memiliki empat komponen utama yaitu elektroda positif (anoda), elektroda negatif (katoda), elektrolit dan separator.

a. Elektroda Negatif (Anoda)

Anoda merupakan elektroda yang berfungsi sebagai pengumpul ion lithium serta merupakan material aktif. Parameter pengembangan dari material untuk digunakan sebagai anoda antara

lain kepadatan energi yang dihasilkan serta siklus pemakaian atau *cyclability*. Material yang biasa digunakan sebagai anoda antara lain *lithium titanium oxide* (LTO) dengan kepadatan energi yang dihasilkannya 175 A.h/kg. Material ini aman dipakai serta memiliki tingkat siklus pemakaian yang cukup lama. Pengembangan material pada anoda ini terus berlanjut seiring penelitian mengenai sifat-sifat suatu material. (Fadli Rohman, 2012).

b. Elektroda Positif (Katoda)

Katoda merupakan elektroda yang fungsinya sama seperti anoda yaitu pengumpul ion serta material aktif. Namun perbedaannya adalah katoda merupakan elektroda positif. Beberapa karakteristik yang harus dipenuhi suatu material yang digunakan sebagai katoda antara lain material tersebut terdiri dari ion yang mudah melakukan reaksi reduksi dan oksidasi, memiliki konduktivitas yang tinggi seperti logam, memiliki kerapatan energi yang tinggi, memiliki kapasitas energi yang tinggi, memiliki kestabilan yang tinggi (tidak mudah berubah strukturnya atau terdegradasi baik saat pemakaian maupun pengisian ulang), harganya murah dan ramah lingkungan.

c. Elektrolit

Elektrolit adalah bagian yang berfungsi sebagai penghantar ion lithium dari anoda ke katoda atau sebaliknya. Karakteristik elektrolit yang penting untuk diperhatikan antara lain konduktivitas, aman (tidak beracun) serta harganya murah. Elektrolit ini terbagi dalam dua jenis yaitu elektrolit cair dan elektrolit padat. Kedua jenis ini memiliki kelebihan dan kekurangannya. Kelebihan dari elektrolit cair antara lain memiliki konduktivitas ion yang besar, harganya murah dan aman. Namun kekurangannya adalah memiliki performa siklus pemakaian yang rendah (tidak tahan lama) yaitu hanya berkisar 25 kali siklus dan dapat mengurangi kerapatan energi. Beberapa material yang dapat digunakan sebagai elektrolit cair antara lain LiNO_3 , LiClO_4 , Li_2SO_4 , garam LiNO_3 , garam Li_2SO_4 ,

LiPF₆. Elektrolit padat sendiri keuntungannya yaitu memiliki konduktivitas yang besar serta dapat tahan lama dibandingkan dengan elektrolit cair. Jenis elektrolit padat ini berupa keramik atau polimer organik. Contoh material yang dipakai untuk elektrolit pada tantara lain yaitu (La,Li)TiO₃ (Fadli Rohman, 2012).

d. Separator

Separator adalah suatu material berpori yang terletak diantara anoda dan katoda berfungsi untuk mencegah agar tidak terjadi hubungan singkat dan kontak antara katoda dan anoda. Selain itu separator harus dapat dilewati oleh ion lithium dengan baik. Tidak hanya sebagai pembatas antar elektroda, separator memiliki peranan penting dalam proses penghasilan listrik, pengisian ulang dan tentunya keamanan pada baterai lithium ion sendiri. Beberapa hal yang penting untuk memilih material agar dipilih sebagai separator antara lain material tersebut memiliki bersifat insulator, memiliki hambatan listrik yang kecil, kestabilan mekanik (tidak mudah rusak), memiliki sifat hambatan kimiawi untuk tidak mudah terdegradasi dengan elektrolit serta memiliki ketebalan lapisan yang seragam atau sama di seluruh permukaan. Beberapa material yang dapat digunakan sebagai separator antara lain *polyolefins* (PE dan PP), *Polyvinylidene fluodire* (PVdF), PTFE (Teflon), PVC dan *polyethylene oxide* (Fadli Rohman, 2012).

2.2.2 Prinsip Kerja Lithium-Ion Battery

Lithium-Ion Battery tersusun dari empat komponen penting yaitu anoda, katoda, elektrolit serta separator. Pada proses pemakaian listrik (*discharging*) elektron dari anoda mengalir ke katoda melalui kabel konektor sedangkan *lithium* yang berada pada sistem (di dalam baterai) lepas dari anoda karena kekurangan elektron untuk berpindah menuju katoda melalui elektrolit. Pada proses pengisian (*charging*), elektron dari katoda mengalir menuju anoda sedangkan *ion lithium*

dalam sistem berpindah dari katoda menuju anoda melalui elektrolit. (Fadli Rohman, 2012).

2.3 Karakteristik Termal *Lithium-Ion Battery*

Penggunaan *Lithium-Ion Battery* sebagai sumber energi tentunya tidak terlepas dari panas selama siklus pengisian dan pengosongan yang terus menerus. Oleh karena itu, salah satu perhatian utama dalam pengembangan pemakaian *baterai lithium-ion* adalah manajemen termal. Masalah termal pada baterai akan memberikan dampak negatif pada kinerja baterai, masa pakai dan keamanan baterai. Manajemen termal diperlukan untuk mengatasi masalah ini (Martellucci at al, 2021).

Kinerja sel baterai dapat berubah secara dramatis dengan suhu. Pada suhu rendah, baterai lithium terkena pelapisan lithium pada anoda yang menyebabkan penurunan permanen dalam kapasitas. Pada suhu yang tinggi, bahan kimia aktif dapat rusak yang juga berarti merusak baterai. Diantara dua Batasan suhu ini, kinerja sel umumnya meningkat dengan suhu. Baterai lithium ion rusak ketika suhu operasi turun. Jadi, untuk keduanya suhu rendah dan suhu tinggi, semakin jauh suhu operasi dari suhu ruang semakin besar terjadinya penurunan siklus baterai.

Menurut Guanchen Liu dan Lijun Zhang pada jurnal *Research on the Thermal Characteristics of an 18650 Lithium-Ion Battery Based on an Electrochemical-Thermal Flow Coupling Model* bahwa laju kenaikan suhu tertinggi dalam baterai adalah saat siklus pengisian dan pengosongan pertama. Pada akhir siklus pengisian dan pengosongan baterai, suhu mencapai maksimum. Pada awal siklus pengosongan berikutnya, panas internal yang dihasilkan baterai lebih kecil dibandingkan pembuangan panas eksternal, sehingga suhu rata-rata baterai menurun sebentar. Kemudian, laju pemanasan baterai meningkat dan suhu terus meningkat. Setelah sekitar tiga siklus pengisian dan pengosongan, kenaikan suhu baterai tidak terlihat jelas. Hal ini karena pertukaran panas antara baterai dan bagian luar pada dasarnya stabil, laju pemanasan sama dengan laju pembuangan panas, dan kenaikan suhu baterai sangat kecil.

Perubahan laju pengisian dan pengosongan memiliki efek non-linear pada suhu baterai, dan laju pengisian dan pengosongan yang tinggi memiliki pengaruh yang lebih besar pada suhu baterai. Dalam kondisi siklus pengisian dan pengosongan kontinu dalam waktu singkat, laju kenaikan suhu paling tinggi pada proses pengisian dan pengosongan pertama. Setelah beberapa siklus, suhu baterai stabil. Selain siklus pengisian dan pengosongan, ketebalan elektroda pada baterai juga mempengaruhi karakteristik termal pada *Lithium-Ion Battery*. Ketebalan elektroda baterai berbanding lurus dengan kapasitas baterai dan kenaikan suhu. (Liu & Zhang, 2021).

2.4 Konsep Dasar Perpindahan Kalor

Perpindahan panas adalah ilmu untuk mengetahui perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi akibat adanya perbedaan suhu di antara suatu material. Kalor dikenal sebagai benda yang bisa berpindah dari suhu yang lebih tinggi ke suhu yang lebih rendah. Di dalam proses perpindahan energi tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Oleh karena itu ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk mengetahui laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan kalor dapat diartikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperature pada daerah tersebut.

Kalor adalah bentuk energi yang dirasakan oleh manusia. Energi mewujudkan keadaan di mana jumlah energi yang dipindahkan antara manusia dan persekitarannya mencapai keseimbangan secara termal. Terdapat tiga mekanisme perpindahan kalor, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan kalor merupakan sifat dasar alam persekitaran, yaitu Hukum Termodinamika. Hukum ini menyatakan bahwa apabila terdapat suatu Kawasan dengan kandungan kalor yang tinggi, seperti suhu yang tinggi dan kandungan suhu yang rendah akan terdapat kecenderungan kalor yang akan berpindah dari suhu yang tinggi ke suhu yang rendah.

2.4.1 Hukum Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu yang berkaitan dengan aliran kalor yang berhubungan dengan kerja mekanik.

1. Hukum Pertama Termodinamika

Adalah merupakan prinsip kekekalan energi. Energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya.

2. Hukum Kedua Termodinamika

Perpindahan kalor atau energi dapat terjadi secara spontan hanya dalam satu arah, dari benda yang lebih panas ke benda yang lebih dingin.

Dari suhu yang lebih tinggi kalor dapat mengalir menuju zona yang bersuhu lebih rendah dengan tiga cara ; konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan ini dapat diukur dengan 2 cara yaitu dengan

- a. Sebagai aliran total dalam satuan waktu (kadar aliran kalor) melalui suatu luasan tertentu sebuah benda atau ruang.
- b. Sebagai berat jenis dari aliran ini, yaitu kadar aliran per-satuan luas (berat jenis fluks).

Dan mempunyai dua kuantitas yaitu :

- a. Kadar aliran yang melalui sebuah bidang yaitu jumlah energi yang melaluinya dalam satuan waktu (J/s – Joule/second -W(Watt)).
- b. Berat jenis fluks adalah jumlah energi yang melalui sebuah unit luasan dari sebuah benda atau ruang dalam satuan waktu diukur dalam $Watt/m^2$.

2.4.2 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan kalor dari suatu bagian benda atau material ke bagian lainnya. Pada perpindahan kalor secara konduksi tidak ada bahan dari logam yang berpindah. Menurut Joseph Fourier (1822) yang telah mempelajari proses perpindahan panas secara konduksi telah merumuskan hukumnya yang berkaitan dengan

konduksi. Banyak faktor yang mempengaruhi peristiwa konduksi. Diantaranya pengaruh luas penampang berbeda, pengaruh geometri, pengaruh permukaan kontak, pengaruh adanya insulasi dan lain-lainnya. Konduksi panas terjadi melalui transfer energi dan getaran antar molekul atau pergerakan elektron bebas. Konduksi sangat penting dalam logam dan terjadi tanpa pergerakan materi yang dapat diamati (Doran M. Pauline,2013).

Dalam proses perpindahan kalor secara konduksi terdapat laju hantaran kalor. Laju hantaran kalor menyatakan seberapa cepat kalor dihantarkan melalui medium itu. Terdapat besaran – besaran yang mempengaruhi dalam laju hantaran kalor yaitu luas permukaan benda, panjang atau tebal benda, perbedaan suhu antar ujung benda dan juga dipengaruhi oleh konduktivitas termal (Holman, 1995).

2.4.3 Konveksi

Konveksi dapat dimaksudkan sebagai perpindahan kalor melalui fluida cair dan gas. Konveksi merupakan suatu mekanisme di mana energi kalor dipindahkan oleh gabungan benda mengalir yaitu gas atau fluida cair. Oleh karena itu, konveksi melibatkan gerakan atau aliran bahan. Konveksi oleh udara tidak boleh berlaku tanpa adanya pergerakan udara tetapi pergerakan udara dapat berlaku tanpa perpindahan kalor.

Perpindahan kalor secara konveksi berlaku pada permukaan dinding, lantai dan atap atau pipa ataupun benda alir mengalir di luar batas bahan pejal pada suhu yang berbeda. Konveksi memerlukan pergerakan dalam skala makroskopis, oleh karena terbatas pada gas dan cairan. Konveksi alami terjadi ketika gradien suhu dalam sistem menghasilkan perbedaan kepadatan yang menghasilkan aliran. Dalam konveksi paksa, arus aliran digerakkan oleh zat eksternal seperti pengaduk atau pompa yang tidak bergantung pada gradien densitas. Tingkat perpindahan panas yang lebih tinggi dimungkinkan dengan konveksi paksa dibandingkan dengan konveksi alami (Doran M. Pauline,2013).

2.4.4 Radiasi

Radiasi adalah proses di mana panas mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan jika terdapat ruang hampa di antara benda – benda tersebut. Radiasi terpancar dalam bentuk gelombang dari semua material. Ketika radiasi diserap oleh material, maka material akan tampak panas (Doran M. Pauline,2013). Energi radiasi dikeluarkan oleh benda karena temperature yang dipindahkan melalui ruang antara dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila energi radiasi menimpah suatu bahan, maka sebagian radiasi dipantulkan, sebagian diserap dan sebagian diteruskan.

2.5 *Heat Exchanger*

Heat Exchanger adalah alat penukar kalor yang berfungsi untuk mengubah temperatur dan fasa suatu jenis fluida. Proses tersebut terjadi dengan memanfaatkan proses perpindahan kalor dari fluida bersuhu tinggi menuju fluida bersuhu rendah. *Heat exchanger* adalah suatu peralatan yang digunakan untuk mentransfer kalor dari *heat exchanger* secara konveksi. Dalam praktek fungsi penukar kalor yang dipergunakan di industri lebih diutamakan untuk menukarkan energi dua fluida (boleh sama zatnya) yang berbeda temperaturnya. Pertukaran energi dapat berlangsung melalui bidang atau permukaan perpindahan kalor yang memisahkan kedua fluida atau secara kontak langsung (fluida bercampur). Beberapa hal yang harus ditinjau dalam penggunaan alat penukar panas yaitu proses perpindahan panas dari kedua fluida tersebut, jumlah fluida yang digunakan, arah fluida yang mengalir, serta bentuk bidang kontak yang digunakan untuk memindahkan panas dari satu fluida ke fluida yang lainnya (Septian et al, 2021)

Laju perpindahan energi dalam penukar kalor dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kecepatan aliran fluida, sifat-sifat fisik (viskositas, konduktivitas termal, kapasitas kalor spesifik, dan lain – lain), beda temperature antara kedua fluida, dan sifat permukaan bidang perpindahan kalor yang memisahkan kedua fluida. Walaupun fungsi penukar kalor adalah

untuk menukarkan energi dua fluida atau dua zat, namun jenisnya banyak sekali. Hal ini terjadi karena biasanya desain penukar kalor harus menunjang fungsi utama proses yang akan terjadi di dalamnya.

Berdasarkan proses perpindahan kalor yang terjadi, penukar kalor dapat dibedakan menjadi dua golongan yaitu tipe kontak langsung dan tipe tidak kontak langsung. Maksudnya adalah :

- a. Pada alat penukar kalor yang langsung, fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau ruangan tertentu. Contohnya adalah clinker cooler dimana antara clinker yang panas dengan udara pendingin berkontak langsung. Contoh yang lain adalah cooling tower untuk mendinginkan air pendingin kondenser pada instalasi mesin pendingin sentral atau PLTU, dimana antara air hangat yang didinginkan oleh udara sekitar saling berkontak seperti layaknya air mancur.
- b. Pada alat penukar kalor yang tidak langsung, fluida panas tidak berhubungan langsung dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panas itu mempunyai media perantara seperti pipa, pelat atau peralatan jenis lainnya. Untuk meningkatkan efektivitas pertukaran energi, biasanya bahan permukaan pemisah dipilih dari bahan-bahan yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi seperti tembaga dan aluminium. Contoh dari penukar kalor seperti ini sering dijumpai antar lain radiator mobil, evaporator AC.

2.6 Jenis – jenis *Heat Exchanger*

Standar yang banyak dipergunakan dalam perancangan penukar kalor ini yaitu TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturer Association*) yaitu suatu asosiasi para pembuat penukar kalor di Amerika dan ASME (*American Society of Mechanical Engineers*). TEMA lebih banyak membahas mengenai jenis penukar kalor, metode perhitungan kinerja dan kekuatannya (proses perancangan), istilah bagian-bagian dari penukar kalor dan dasar pemilihan

dalam aplikasi penukar kalor untuk kebutuhan sehari-hari khususnya di industri. Sedangkan ASME lebih memuat masalah prosedur dasar bagaimana membuat penukar kalor serta standart bahan yang akan atau biasa dipergunakan. Kedua aturan atau prosedur tersebut tidak lain bertujuan untuk melindungi pengguna dari bahaya kerusakan dan kegagalan operasi. (Septian et al, 2021).

Berdasarkan TEMA secara garis besar jenis penukar kalor dibagi menjadi dua kelompok besar berdasarkan pemakaiannya di industri yaitu :

- a. Kelas R : untuk pemakaian dengan kondisi kerja yang berat, misalnya untuk industri minyak dan kimia berat.
- b. Kelas C : yaitu yang dibuat untuk pemakaian umum (*general purpose*) yang dasar produksinya lebih memperhatikan aspek ekonomi dengan ukuran dan kapasitas pemindahan panas yang kecil.

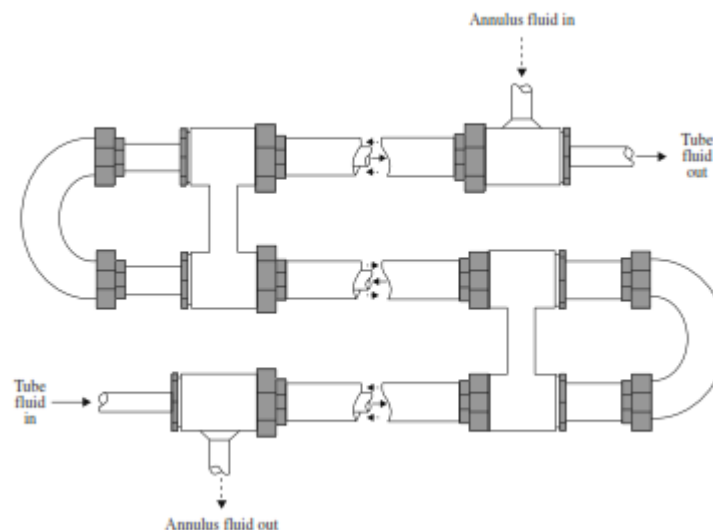
Di dalam perancangan *heat exchanger* yang telah dilakukan oleh para akademisi, klasifikasi penukar kalor ini menjadi lebih luas karena dapat digolong-golongkan berdasarkan berbagai aspek yaitu antara lain ; Proses perpindahan kalor yang terjadi, tingkat kekompakan permukaan pemindah kalor, profil konstruksi permukaan, susunan aliran fluida, jumlah atau banyaknya fluida yang energinya ditukar, mekanisme perpindahan kalor yang dominan. Berdasarkan profil konstruksi permukaan, *heat exchanger* banyak dipergunakan antara lain dengan konstruksi tabung dan pipa (*shell and tube*), pipa bersirip (*tube with extendsurfaces/fins and tube*), *double pipe heat exchanger* dan penukar kalor pelat (*plate heat exchanger*).

2.7 Double Pipe Heat Exchanger

Menurut Anggoro & Arsana pada 2022, *double pipe heat exchanger* merupakan salah satu jenis alat penukar kalor yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Dipilihnya jenis ini karena konstruksi yang dimiliki oleh *double pipe heat exchanger* ini cukup sederhana, biaya pembuatan yang relatif rendah dibandingkan dengan tipe *heat exchanger* yang lain, dan tidak memakan banyak tempat.

Double pipe heat exchanger atau alat penukar kalor jenis pipa ganda adalah salah satu alat penukar kalor yang proses perpindahannya terjadi secara tidak langsung (*indirect contact*) karena terdapat dinding pembatas antara fluida panas dengan fluida dingin yang mengalir. Tujuan dibatasinya kedua fluida oleh dinding adalah agar kedua jenis fluida tidak tercampur, sehingga yang terjadi di dalam sistem tersebut hanya transfer kalor saja (Anggoro & Arsana, 2022)

Penukar panas pipa ganda terdiri dari dua pipa logam, satu di dalam dan satu di luar seperti pada gambar 2.3 dibawah. Fluida yang satu mengalir melalui pipa bagian dalam sedangkan fluida yang lain mengalir di pipa yang lebih besar. Jika salah satu fluida lebih panas dari fluida yang lain, terjadilah perpindahan panas fluida panas menjadi dingin dan fluida dingin menjadi panas. (Doran M. Pauline, 2013).

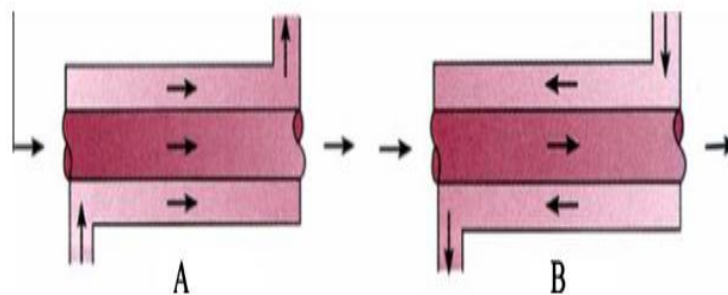


Gambar 2. 3 Double Pipe Heat Exchanger

(Sumber : Doran M.Pauline, 2013)

Menurut Sampson pada tahun 2017, *double pipe heat exchanger* terdiri dari dua pipa konsentris, dimana terdapat dua jenis arah aliran fluida yaitu aliran searah dan aliran berlawanan arah. Kedua jenis aliran tersebut dapat mentransfer kalor dari fluida yang lebih panas ke fluida yang lebih dingin. Arah aliran fluida yang paling baik dalam menghasilkan efisiensi perpindahan panas yang paling besar adalah aliran yang berlawanan arah

(*counterflow*), dikarenakan pada desain aliran tersebut, Ketika fluida yang lebih dingin menuju bagian pipa keluaran (*outlet*) maka fluida dingin tersebut akan langsung mengalami pemanasan oleh fluida yang lebih panas dan belum mengalami penurunan suhu (Omidi et al, 2017). Lain hal dengan tipe aliran paralel, di mana fluida akan dipanaskan ketika baru memakai *heat exchanger*, yang menyebabkan fluida panas akan mengalami pengurangan suhu pada saat fluida dingin melalui bagian pipa keluaran pada *heat exchanger*. Hal tersebut menyebabkan berkurangnya efisiensi perpindahan panas dari fluida yang lebih panas ke fluida yang lebih dingin.



Gambar 2. 4 Tipe-Tipe Aliran Fluida pada *Double Pipe Heat Exchanger*

(A) Aliran searah (*Parallel Flow*), (B) Aliran berlawanan arah (*Counter Flow*)

(Sumber : Omidi et al, 2017)

Selain memiliki dua arah fluida, *double pipe heat exchanger* juga memiliki dua tipe konstruksi utama dalam menaikkan efisiensi perpindahan panas dari salah satu fluida ke fluida lainnya. Kedua jenis konstruksi tersebut adalah *multi-pass* dan *single-pass* seperti pada gambar berikut. Konstruksi yang paling sering digunakan di industri adalah jenis *multi-pass* karena efisiensi perpindahan panasnya lebih besar dan lebih baik dibandingkan dengan konstruksi *single-pass*.

2.8 Persamaan Dasar Heat Exchanger

2.8.1 Panas yang Diserap

Pada penelitian ini yang menjadi sasaran analisis adalah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika. Pada penukar panas, transfer panas atau mengalir dari fluida panas ke fluida dingin. Tingkat perpindahan panas adalah fungsi dari tingkat cairan massa aliran, perubahan suhu dan kapasitas panas spesifik dari cairan (pada suhu rata-rata) (Kern,1982).

$$Q_h = m_h \cdot C_p \cdot \Delta T_h \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

Q_h = Kalor yang dilepas fluida panas (Watt)

m_h = Laju massa fluida panas (Kg/m)

C_p = *Specific Heat Fluid* fluida panas (J/Kg.K)

ΔT_h = Selisih suhu masuk dan suhu keluar fluida panas (K)

$$Q_c = m_c \cdot C_p \cdot \Delta T_c \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

Q_c = Kalor yang diterima fluida dingin (Watt)

m_c = Laju massa fluida dingin (Kg/m)

C_p = *Specific Heat Fluid* fluida dingin (J/Kg.K)

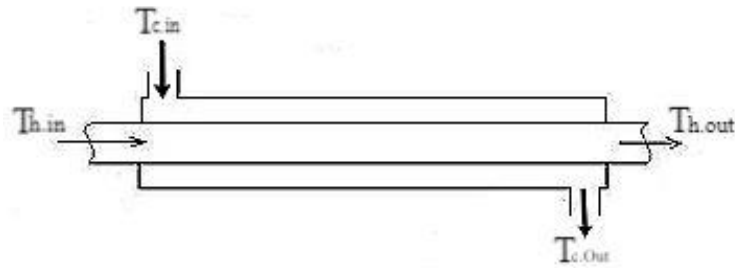
ΔT_c = Selisih suhu masuk dan suhu keluar fluida dingin (K)

Setelah mendapatkan Q yang dilepas/diterima akan $Q_{average}$ dengan merata-rata Q_h dan Q_c (Hardjono, 2023).

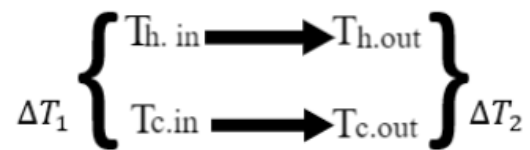
2.8.2 Log Mean Temperature Difference (LMTD)

Log Mean Temperature Difference (LTMD) atau perbedaan temperature rata-rata didefinisikan sebagai menghitung perbedaan temperature yang terjadi dalam alat penukar kalor. Untuk menentukan LMTD tergantung jenis aliran yang diaplikasikan pada *double pipe*

heat exchanger. Berikut adalah perhitungan LMTD untuk aliran searah (*parallel flow*).



Gambar 2. 5 *Paralel Flow*



Gambar 2. 6 Analogi Temperatur *Paralel Flow*

Maka Persamaannya adalah :

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$= \frac{(T_{h.in} - T_{c.in}) - (T_{h.out} - T_{c.out})}{\ln\left[\frac{(T_{h.in} - T_{c.in})}{(T_{h.out} - T_{c.out})}\right]}$$

Keterangan :

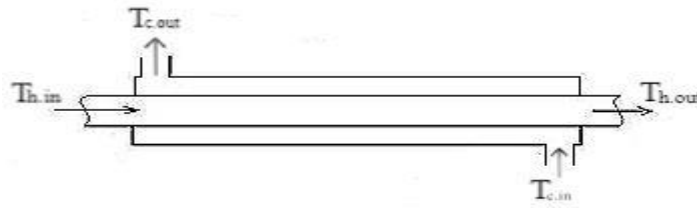
$T_{h.in}$ = Suhu fluida panas masuk (K)

$T_{h.out}$ = Suhu fluida panas keluar (K)

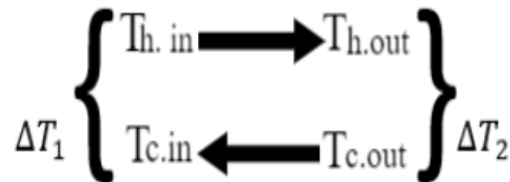
$T_{c.in}$ = Suhu fluida dingin masuk (K)

$T_{c.out}$ = Suhu fluida dingin keluar (K)

Berikut adalah perhitungan untuk LMTD untuk aliran berlawanan arah (*counter flow*).



Gambar 2. 7 Counter Flow



Gambar 2. 8 Analogi Temperatur Counter Flow

Maka persamaannya adalah :

$$\begin{aligned}
 LTMD &= \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left[\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right]} \dots\dots\dots(2.4) \\
 &= \frac{(T_{h.in} - T_{c.out}) - (T_{h.out} - T_{c.in})}{\ln \left[\frac{(T_{h.in} - T_{c.out})}{(T_{h.out} - T_{c.in})} \right]}
 \end{aligned}$$

Keterangan :

$T_{h.in}$ = Suhu fluida panas masuk (K)

$T_{h.out}$ = Suhu fluida panas keluar (K)

$T_{c.in}$ = Suhu fluida dingin masuk (K)

$T_{c.out}$ = Suhu fluida dingin keluar (K)

2.8.3 Koefisien Perpindahan Panas Overall rata-rata (U)

Kemudian dari nilai LTMD digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan panas overall (U) dengan persamaan :

$$U_{av} = \frac{Q_{av}}{A \times LTMD} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

U_{av} = Koefisien perpindahan panas overall rata-rata (W/m^2K)

Q_{av} = Kalor yang dilepas/diterima rata-rata (Watt)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)

$LTMD$ = Selisih suhu rata-rata logaritmik (K)

2.8.4 Panas Aktual dan Perpindahan Panas Maksimal

Langkah selanjutnya setelah nilai LMTD didapatkan, maka nilai LMTD digunakan untuk mencari Panas aktual ;

$$q = U \cdot A \cdot \Delta_{LMTD} \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan :

q = Panas Aktual (W)

U = Koefisien Perpindahan Panas rata-rata (W/m² K)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m²)

$LMTD$ = Selisih suhu rata-rata logaritmik (K)

Langkah selanjutnya adalah menghitung panas maksimal :

$$q_{max} = C_{min}(Th_{inlet} - Tc_{inlet}) \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

q_{max} = Perpindahan panas maksimal (W)

C_{min} = Kalor minimum (W/K)

Th_{inlet} = Temperatur masukan nanofluid (K)

Tc_{inlet} = Temperatur masukan coolant (K)

2.8.5 Nilai efektivitas

Berikut adalah rumus untuk mencari nilai efektivitas untuk keda variasi arah aliran :

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.8)$$

Keterangan :

ε =Efektivitas (%)

q = Panas aktual (W)

q_{max} = Perpindahan panas maksimal (W)

2.9 Cellulose Nanocrystal – Ethylene Glycol Nanofluid Coolant

Cellulose Nanocrystal (CNC) merupakan material nano yang berasal dari serat selulosa alami yang memiliki jumlah kristal yang tinggi. Serat selulosa dapat diperoleh dari tumbuhan, hewan dan bakteri. CNC memiliki sifat yang ramah lingkungan, dimensi nano dan sifat mekanik yang baik.

Menurut Laela & Hairunnisa pada tahun 2021, *Ethylene glycol* adalah senyawa organik yang tidak berwarna, tidak berbau serta berwujud cairan. Pada umumnya etilen glikol digunakan untuk tambahan serat pada polyester, wadah yang menggunakan PET, *antifreeze* dan pendingin pada mesin.

Cellulose Nanocrystal-Ethylene Glycol Nanofluid Coolant adalah larutan fluida yang akan digunakan untuk mendinginkan baterai. Larutan ini adalah campuran dari 40% etilen glikol, 60% air dan *Cellulose Nanocrystal* (CNC).