

BAB II

LANDASAN TEORI

1.6 Alat Penukar Kalor

Penukar kalor (*Heat exchanger*) adalah perangkat yang digunakan untuk mentransfer panas antara dua atau lebih fluida pada suhu yang berbeda tanpa mencampurkan fluida tersebut. Penukar kalor sangat penting dalam berbagai aplikasi industri, termasuk pembangkit listrik, pengolahan kimia, pemanas dan pendingin udara (HVAC), serta dalam industri makanan dan minuman. Berikut adalah beberapa jenis penukar kalor beserta prinsip kerjanya:

Penukar Kalor *Shell-and-Tube*:

Terdiri dari sejumlah tabung yang ditempatkan di dalam sebuah selubung (*shell*). Salah satu fluida mengalir di dalam tabung, sementara fluida lainnya mengalir di luar tabung tetapi di dalam selubung.

Aplikasi: Digunakan secara luas dalam industri pembangkit listrik dan pengolahan kimia.

Penukar Kalor Pelat (*Plate Heat Exchanger*):

Terdiri dari serangkaian pelat tipis yang dipasang secara paralel. Fluida mengalir melalui celah antara pelat-pelat ini.

Aplikasi: Sering digunakan dalam industri makanan dan minuman, serta dalam aplikasi HVAC.

Penukar Kalor Pipa Ganda (*Double Pipe Heat Exchanger*):

Terdiri dari dua pipa konsentris di mana satu fluida mengalir di dalam pipa dalam, sementara fluida lainnya mengalir di ruang antara pipa dalam dan pipa luar.

Aplikasi: Digunakan dalam aplikasi dengan aliran fluida yang lebih rendah dan dalam pengajaran laboratorium.

Penukar Kalor Regeneratif:

Deskripsi: Menggunakan medium penyimpan panas yang secara periodik dipanaskan dan didinginkan oleh fluida yang berbeda.

Aplikasi: Digunakan dalam aplikasi di mana suhu fluida sangat bervariasi, seperti dalam sistem turbin gas.

Penukar Kalor Mikrokanal (*Microchannel Heat Exchanger*):

Menggunakan saluran yang sangat kecil untuk meningkatkan area permukaan perpindahan panas dan efisiensi.

Aplikasi: Digunakan dalam aplikasi pendinginan elektronik dan kendaraan. (Zheng et al., 2020)

1.6.1 Definisi dan Klasifikasi

Definisi Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor (*Heat exchanger*) adalah perangkat yang digunakan untuk mentransfer panas antara dua atau lebih fluida pada suhu yang berbeda tanpa mencampurkan fluida tersebut. Alat ini memungkinkan perpindahan energi termal melalui dinding pemisah atau melalui kontak langsung antara fluida, tergantung pada desain dan aplikasi spesifiknya.

Klasifikasi Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria, seperti konstruksi,

metode perpindahan panas, arah aliran fluida, dan aplikasinya.

Berdasarkan Konstruksi:

Terdiri dari sejumlah tabung kecil yang ditempatkan di dalam sebuah selubung besar. Salah satu fluida mengalir di dalam tabung, sementara fluida lainnya mengalir di luar tabung dalam selubung.

Aplikasi: Digunakan secara luas dalam industri pembangkit listrik dan pengolahan kimia.

Penukar Kalor Pelat (*Plate Heat Exchanger*):

Terdiri dari serangkaian pelat tipis yang dipasang secara paralel. Fluida mengalir melalui celah antara pelat-pelat ini.

Aplikasi: Sering digunakan dalam industri makanan dan minuman, serta dalam aplikasi HVAC (***Heating, Ventilation, and Air Conditioning***).

Penukar Kalor Pipa Ganda (*Double Pipe Heat Exchanger*):

Terdiri dari dua pipa konsentris di mana satu fluida mengalir di dalam pipa dalam, sementara fluida lainnya mengalir di ruang antara pipa dalam dan pipa luar.

Aplikasi: Digunakan dalam aplikasi dengan aliran fluida yang lebih rendah dan dalam pengajaran laboratorium.

Penukar Kalor Mikrokanal (*Microchannel Heat Exchanger*):

Menggunakan saluran yang sangat kecil untuk meningkatkan area permukaan perpindahan panas dan efisiensi.

Aplikasi: Digunakan dalam aplikasi pendinginan elektronik dan kendaraan.

Berdasarkan Metode Perpindahan Panas:

Penukar Kalor Kontak Langsung (*Direct Contact Heat Exchanger*):

Fluida yang mentransfer panas bersentuhan langsung satu sama lain.

Aplikasi: Digunakan dalam menara pendingin dan alat penguap.

Penukar Kalor Kontak Tidak Langsung (*Indirect Contact Heat Exchanger*):

Fluida yang mentransfer panas dipisahkan oleh dinding padat, sehingga tidak bersentuhan langsung.

Aplikasi: Digunakan dalam penukar kalor tipe shell-and-tube dan pelat.

Berdasarkan Arah Aliran Fluida:

Penukar Kalor Aliran Paralel (*Parallel Flow Heat Exchanger*):

Kedua fluida bergerak dalam arah yang sama.

Keuntungan: Desain sederhana dan murah.

Kelemahan: Efisiensi transfer panas relatif rendah.

Penukar Kalor Aliran Berlawanan (*Counterflow Heat Exchanger*):

Fluida bergerak dalam arah yang berlawanan.

Keuntungan: Efisiensi transfer panas lebih tinggi.

Kelemahan: Desain lebih kompleks.

Penukar Kalor Aliran Silang (*Crossflow Heat Exchanger*):

Fluida mengalir secara tegak lurus satu sama lain.

Keuntungan: Desain yang memungkinkan kompaktilitas.

Kelemahan: Efisiensi transfer panas bervariasi.

Berdasarkan Aplikasi:

Penukar Kalor Regeneratif:

Menggunakan medium penyimpanan panas yang secara periodik dipanaskan dan didinginkan oleh fluida yang berbeda.

Aplikasi: Digunakan dalam sistem turbin gas dan pembangkit listrik.

Penukar Kalor Rekuperatif:

Fluida tidak bercampur dan perpindahan panas terjadi melalui permukaan pemisah.

Aplikasi: Umum dalam sistem pemanas dan pendingin. (Kamel et al., 2016)

1.7 Prinsip Kerja

Alat penukar kalor bekerja berdasarkan prinsip perpindahan panas dari fluida bersuhu tinggi ke fluida bersuhu rendah. Proses perpindahan panas ini dapat terjadi melalui tiga mekanisme dasar: konduksi, konveksi, dan radiasi, meskipun dalam banyak penukar kalor, konduksi dan konveksi adalah yang paling dominan. Berikut adalah prinsip kerja dari beberapa jenis alat penukar kalor beserta referensi jurnal terkait:

1.7.1 Prinsip Perpindahan Panas

1. Konduksi:

- Perpindahan panas melalui material padat (misalnya, dinding tabung atau pelat) dari fluida panas ke fluida dingin. Panas mengalir dari area dengan suhu tinggi ke area dengan suhu rendah melalui dinding pemisah.
- **Aplikasi:** Digunakan dalam semua jenis penukar kalor.

2. Konveksi:

- Perpindahan panas dari permukaan padat ke fluida atau dari fluida ke permukaan padat. Konveksi terjadi pada kedua sisi dinding pemisah antara dua fluida.
- **Aplikasi:** Digunakan dalam semua jenis penukar kalor.

3. Aliran Fluida

1. Aliran Paralel (*Parallel Flow*):

- Kedua fluida mengalir dalam arah yang sama melalui penukar kalor. Ini menghasilkan perpindahan panas yang lebih seragam, tetapi efisiensinya relatif lebih rendah dibandingkan dengan aliran berlawanan.
- **Keuntungan:** Desain yang sederhana.
- **Kelemahan:** Efisiensi perpindahan panas lebih rendah.

2. Aliran Berlawanan (*Counterflow*):

- Kedua fluida mengalir dalam arah yang berlawanan. Ini meningkatkan perbedaan suhu rata-rata antara fluida, meningkatkan efisiensi perpindahan panas.
- **Keuntungan:** Efisiensi perpindahan panas lebih tinggi.
- **Kelemahan:** Desain lebih kompleks.

3. Aliran Silang (*Crossflow*):

- Fluida mengalir tegak lurus satu sama lain. Digunakan dalam penukar kalor tipe pelat dan beberapa desain penukar kalor udara.

- **Keuntungan:** Kompakt dan fleksibel dalam desain.
- **Kelemahan:** Efisiensi perpindahan panas bervariasi.

1.8 Thermocouple



Gambar 2. 1 Thermocouple

Termocouple adalah sensor suhu yang digunakan secara luas untuk mengukur suhu pada berbagai aplikasi industri, termasuk pada sistem penukar panas (*Heat exchanger*). Pemantauan suhu yang akurat sangat penting dalam operasi heat exchanger untuk memastikan efisiensi transfer panas dan keselamatan operasional.

1. Prinsip Kerja *Termocouple*

Termocouple bekerja berdasarkan prinsip efek *Seebeck*, di mana tegangan listrik dihasilkan oleh perbedaan suhu antara dua titik sambungan dari dua jenis logam yang berbeda. Dalam heat exchanger, termokopel ditempatkan pada titik-titik kritis untuk mengukur suhu fluida yang masuk dan keluar, serta suhu permukaan penukar panas.

2. Penerapan *Termocouple* dalam *Heat Exchanger*

3. Pengukuran Suhu *Inlet* dan *Outlet*:

- *Termocouple* dipasang pada inlet dan outlet untuk memantau suhu fluida yang masuk dan keluar dari *Heat exchanger*.
- Data ini digunakan untuk menghitung efektivitas penukar panas dan kinerja keseluruhan sistem.

4. Pemantauan Suhu Permukaan:

- *Termocouple* juga bisa dipasang pada permukaan *Heat exchanger* untuk memantau suhu permukaan dan memastikan tidak ada hot spots atau cold spots yang dapat mengurangi efisiensi.

5. Kontrol Proses:

- Data suhu yang dikumpulkan oleh termokopel dapat digunakan oleh sistem

kontrol otomatis untuk menyesuaikan aliran fluida, tekanan, atau parameter lain untuk mengoptimalkan kinerja heat exchanger.

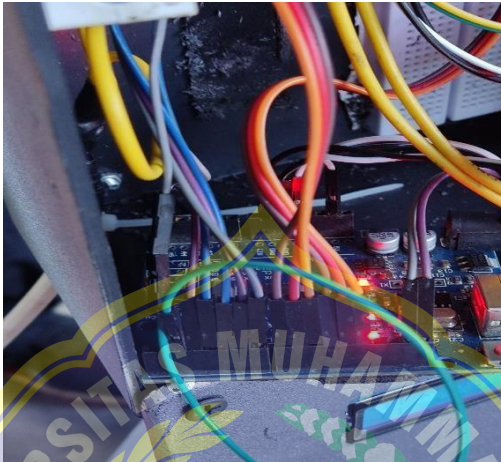
6. Keuntungan Penggunaan *Termocouple*

- **Rentang Suhu Luas:** *Termocouple* dapat mengukur suhu dari yang sangat rendah hingga sangat tinggi.
- **Respons Cepat:** Termokopel memiliki waktu respons yang cepat terhadap perubahan suhu.
- **Konstruksi Sederhana:** Termokopel relatif sederhana dan mudah dipasang.

7. Tantangan Penggunaan *Termocouple*

- **Akurasi:** Akurasi *termocouple* bisa dipengaruhi oleh gangguan listrik dan kalibrasi yang tidak tepat.
- **Degradasi:** *Termocouple* dapat mengalami degradasi di lingkungan yang keras, seperti korosi atau oksidasi pada suhu tinggi. (Pearce et al., 2010)

1.9 Arduino



Gambar 2. 2 Arduino

Arduino adalah platform perangkat keras terbuka yang dirancang untuk memudahkan pembuatan proyek elektronik. Arduino terdiri dari papan mikrokontroler dan perangkat lunak pengembangan (IDE) yang memudahkan pengguna dalam menulis, mengunggah, dan menjalankan kode pada papan mikrokontroler. Berikut adalah prinsip dasar kerja Arduino:

1. Mikrokontroler:

- Di jantung papan Arduino terdapat mikrokontroler, seperti ATmega328 pada Arduino Uno. Mikrokontroler adalah chip yang menjalankan program yang ditulis oleh pengguna dan mengontrol perangkat keras yang terhubung ke papan.

- **Penjelasan:** Mikrokontroler ini menjalankan siklus instruksi yang membaca input, memproses data, dan mengeluarkan output sesuai dengan kode yang diunggah.

2. Program (*Sketch*):

- Program yang ditulis untuk Arduino disebut *sketch*. *Sketch* ditulis dalam bahasa pemrograman C/C++ dan diunggah ke mikrokontroler melalui IDE Arduino.
- **Penjelasan:** *Sketch* terdiri dari dua bagian utama: *setup()* yang dijalankan satu kali saat perangkat dinyalakan, dan *loop()* yang dijalankan secara berulang. Program ini menginstruksikan mikrokontroler bagaimana berinteraksi dengan *input* dan *output*.

3. *Input dan Output*:

- Arduino dapat membaca input dari berbagai sensor (misalnya sensor suhu, sensor cahaya) dan mengendalikan output ke perangkat seperti *LED*, motor, dan layar *LCD*.
- **Penjelasan:** *Input* dibaca melalui pin analog atau digital, sedangkan *output* dikendalikan melalui pin digital (untuk sinyal ON/OFF) atau pin *PWM* (untuk sinyal analog).

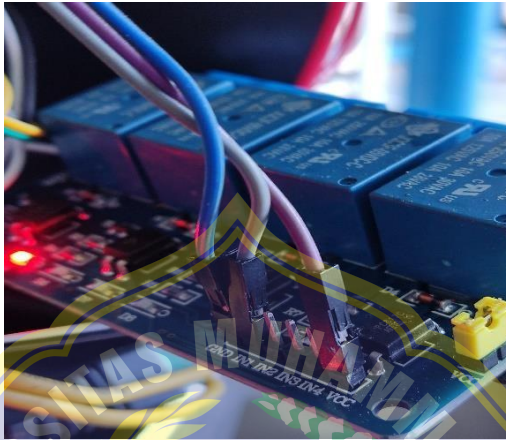
4. Komunikasi:

- Arduino dapat berkomunikasi dengan perangkat lain melalui berbagai protokol komunikasi seperti serial (*UART*), *I2C*, dan *SPI*.
- **Penjelasan:** Komunikasi serial memungkinkan Arduino untuk berkomunikasi dengan komputer atau perangkat lain melalui port *USB* atau pin serial. Protokol *I2C* dan *SPI* memungkinkan komunikasi dengan berbagai sensor dan perangkat tambahan.

5. Power Supply:

- **Deskripsi:** Arduino bisa dioperasikan menggunakan catu daya eksternal seperti adaptor AC-DC atau baterai, atau melalui port *USB* dari komputer.
- **Penjelasan:** Catu daya eksternal memberikan arus listrik yang diperlukan untuk menjalankan papan Arduino dan perangkat yang terhubung. (Oyekola et al., 2019)

1.10 Relay



Gambar 2. 3 Relay

Relay adalah komponen elektromagnetik yang berfungsi sebagai saklar otomatis untuk mengendalikan sirkuit listrik. Relay memungkinkan kontrol sirkuit listrik berdaya tinggi dengan menggunakan sinyal kontrol berdaya rendah. Berikut adalah prinsip dasar kerja relay:

1. Struktur **Relay**:

- **Kumparan (Coil):** Kumparan atau solenoid adalah bagian dari relay yang menghasilkan medan magnet saat dialiri arus listrik.
- **Kontak (Contacts):** Relay memiliki satu atau lebih set kontak yang dapat terbuka

atau menutup untuk mengendalikan sirkuit listrik lainnya.

- **Armature:** Komponen logam yang digerakkan oleh medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan. Armature menghubungkan atau memutuskan kontak relay.

2. Prinsip Kerja:

- **Medan Magnet:** Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan, medan magnet terbentuk. Medan magnet ini menarik armature yang biasanya terhubung ke kontak.
- **Perubahan Posisi Kontak:** Ketika armature ditarik oleh medan magnet, kontak relay akan berpindah dari posisi normalnya (NO—*Normally Open*) ke posisi yang tertutup (NC—*Normally Closed*), atau sebaliknya, tergantung pada jenis relay.
- **Kontrol Sirkuit:** Perubahan posisi kontak ini mengalihkan atau mengendalikan aliran arus dalam sirkuit berdaya tinggi, memungkinkan kontrol dari jarak jauh atau otomatisasi sistem.

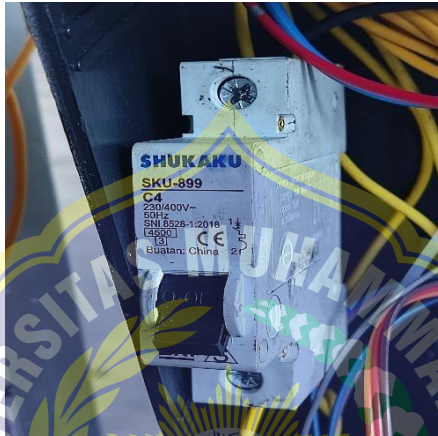
3. Jenis *Relay*:

- ***Relay Elektromagnetik***: *Relay* ini menggunakan elektromagnet untuk mengendalikan kontak.
- ***Relay Solid-State***: Menggunakan komponen elektronik untuk menggantikan mekanisme elektromagnetik, tanpa bagian bergerak.
- ***Relay Termal***: Menggunakan prinsip pemuai termal untuk mengendalikan kontak.
- ***Relay Fotografis***: Menggunakan cahaya untuk mengendalikan kontak.

4. Aplikasi:

- **Pengendalian Peralatan**: *Relay* digunakan untuk mengendalikan perangkat berdaya tinggi seperti motor, lampu, dan pemanas dengan sinyal kontrol berdaya rendah.
- **Proteksi Sirkuit**: Digunakan dalam sistem perlindungan untuk memutuskan aliran arus dalam kondisi arus berlebih atau hubung singkat.
- **Automatisasi**: *Relay* digunakan dalam sistem otomatisasi industri dan rumah untuk mengendalikan berbagai fungsi berdasarkan kondisi *input*. (Agwa & El-Fergany, 2023)

1.11 MCB (Miniature Circuit Breaker)



Gambar 2. 4 MCB

Miniature Circuit Breaker (MCB) adalah perangkat pelindung yang digunakan dalam sistem listrik untuk melindungi sirkuit dari arus lebih dan hubung singkat. MCB bekerja secara otomatis untuk memutuskan aliran arus listrik jika arus melebihi batas yang telah ditentukan. Berikut adalah prinsip dasar kerja MCB:

1. Struktur dan Komponen MCB:

- **Kumparan Elektromagnetik:** Komponen ini merespons arus lebih. Ketika arus melewati kumparan, ia menghasilkan medan magnet yang bertindak pada mekanisme pemutus.

- **Mekanisme Termal:** Menggunakan elemen bimetalik yang memuai ketika suhu meningkat akibat arus lebih. Pemuaian ini memengaruhi mekanisme pemutus.
- **Kontak:** Bagian yang menghubungkan dan memutuskan aliran arus listrik. Biasanya terdiri dari dua atau lebih kontak yang dikendalikan oleh mekanisme elektromagnetik atau termal.
- **Papan Sirkuit:** Papan tempat kumparan, mekanisme, dan kontak terpasang. Biasanya dilindungi oleh casing plastik.

2. Prinsip Kerja MCB:

- **Arus Lebih (*Overcurrent Protection*):**
 - Ketika arus listrik melebihi nilai yang ditentukan oleh rating *MCB*, kumparan elektromagnetik menghasilkan medan magnet yang cukup kuat untuk menarik lengan pemutus dan memutuskan kontak.
 - **Proses:** Medan magnet ini memindahkan kontak pemutus dari posisi "terhubung" ke posisi "terputus," menghentikan aliran arus untuk mencegah kerusakan pada kabel dan perangkat.

- **Arus Hubung Singkat (*Short-Circuit Protection*):**
 - Jika terjadi hubung singkat, arus yang sangat tinggi mengalir melalui *MCB* dalam waktu yang sangat singkat. Kumparan elektromagnetik segera memutuskan aliran arus karena medan magnet yang dihasilkan cukup kuat.
 - **Proses:** Ketika arus hubung singkat terdeteksi, mekanisme elektromagnetik mengaktifkan pemutus dengan sangat cepat, memutuskan aliran arus untuk melindungi sistem dari kerusakan serius.
- **Pengembalian Manual (*Manual Reset*):**
 - **Deskripsi:** Setelah *MCB* trip (memutuskan), *MCB* biasanya harus direset secara manual oleh pengguna. Ini memastikan bahwa *MCB* tidak secara otomatis kembali aktif sebelum masalah diperbaiki.
 - **Proses:** Pengguna harus memindahkan tuas *MCB* ke posisi "ON" setelah masalah diselesaikan dan *MCB* dapat kembali berfungsi.

3. Karakteristik *MCB*:

- **Rating Arus (*Current Rating*):** Menentukan arus maksimum yang dapat ditangani *MCB* tanpa trip.
- **Kurva Trip:** Menunjukkan bagaimana *MCB* merespons arus lebih berdasarkan waktu. Kurva trip bisa berbeda (B, C, D) tergantung pada aplikasi dan kebutuhan proteksi. (Kommey et al., 2021)

1.12 Heater atau Alat pemanas



Gambar 2. 5 Heater atau Alat pemanas

Heater adalah perangkat yang dirancang untuk menghasilkan panas atau menaikkan suhu suatu ruang atau material. Heater bekerja

dengan cara mengubah energi listrik menjadi energi panas. Berikut adalah prinsip dasar kerja heater:

1. Komponen Utama *Heater*:

1. Elemen Pemanas (*Heating Element*):

- **Deskripsi:** Elemen pemanas adalah komponen utama yang mengubah energi listrik menjadi panas. Biasanya terbuat dari bahan dengan resistansi tinggi seperti nikel-kromium (*nichrome*) atau kawat logam lain.
- **Prinsip Kerja:** Ketika arus listrik mengalir melalui elemen pemanas, resistansi elemen menghambat aliran arus, menyebabkan energi listrik berubah menjadi panas. Panas ini kemudian dipancarkan ke lingkungan sekitar.

2. Pengatur Suhu (*Thermostat*):

- **Deskripsi:** Alat yang mengontrol suhu heater dengan mematikan atau menyalakan elemen pemanas berdasarkan suhu yang diinginkan.
- **Prinsip Kerja:** *Thermostat* mengukur suhu dan mengaktifkan atau menonaktifkan heater untuk mempertahankan suhu pada tingkat yang diatur.

3. **Casing** atau **Rumah Heater**:

- Struktur yang menampung elemen pemanas dan melindungi pengguna dari kontak langsung dengan elemen panas.
- **Prinsip Kerja:** Casing ini juga membantu dalam distribusi panas dengan mengarahkan aliran udara panas ke area yang diinginkan.

2. **Prinsip Kerja Heater:**

1. **Konversi Energi Listrik Menjadi Energi Panas:**

- Saat listrik mengalir melalui elemen pemanas, resistansi elemen menyebabkan energi listrik berubah menjadi energi panas. Ini dikenal sebagai efek *Joule*.
- **Penjelasan:** Efek *Joule* adalah fenomena di mana energi listrik yang melewati konduktor dengan resistansi berubah menjadi panas. Panas ini dihasilkan oleh gesekan di dalam elemen pemanas.

2. **Distribusi Panas:**

- Panas yang dihasilkan oleh elemen pemanas didistribusikan ke lingkungan sekitar. Ini dapat dilakukan melalui konveksi, radiasi, atau konduksi tergantung pada desain heater.

- **Penjelasan:**

- **Konveksi:** Udara di sekitar elemen pemanas dipanaskan dan menjadi lebih ringan, lalu naik, menggantikan udara dingin yang turun, menciptakan aliran udara panas.
- **Radiasi:** Panas disebarluaskan dalam bentuk radiasi inframerah, yang langsung memanaskan objek di sekelilingnya tanpa menghangatkan udara di sekitarnya.
- **Konduksi:** Panas dikirimkan melalui kontak langsung dengan permukaan atau bahan yang dipanaskan.

3. Kontrol Suhu:

- *Thermostat* atau kontrol suhu mengatur operasi heater dengan memonitor suhu dan menyesuaikan aliran listrik ke elemen pemanas.

- **Penjelasan:** Ketika suhu mencapai tingkat yang diatur, thermostat memutuskan aliran listrik ke elemen pemanas untuk mencegah *overheating*. Setelah suhu turun, thermostat menghidupkan kembali heater untuk mencapai suhu yang diinginkan.

4. **Keamanan dan Efisiensi:**

- *Heater* dilengkapi dengan fitur keamanan seperti pemutus suhu (*overheat protection*) dan penutup untuk mencegah kecelakaan.
- **Penjelasan:** Pemutus suhu akan mematikan *heater* jika suhu melampaui batas aman, sedangkan penutup melindungi pengguna dari kontak langsung dengan elemen panas dan mengurangi risiko kebakaran. (Anam et al., 2018)

1.13 Power Supply



Gambar 2. 6 Power Supply

Prinsip kerja *power supply* pada heat exchanger adalah sebagai berikut:

1. **Pompa Air DC dan Power Supply DC:** Pompa air DC digunakan untuk mengalirkan fluida panas dan dingin melalui heat exchanger. *Power supply DC* menyediakan daya listrik untuk mengoperasikan pompa.
2. **Dimmer:** *Dimmer* digunakan sebagai pengontrol kecepatan motor pompa. Ini memungkinkan pengaturan laju aliran fluida yang mengalir melalui *heat exchanger*, yang penting untuk mengoptimalkan pertukaran panas.
3. **Keran/Valve:** Keran atau valve digunakan untuk mengubah arah aliran fluida pada heat

exchanger. Ini memungkinkan penggunaan *heat exchanger* dalam berbagai konfigurasi aliran, seperti aliran berlawanan atau aliran yang sama.

4. **Water Heater:** Water heater digunakan untuk memanaskan fluida yang akan digunakan sebagai fluida panas.
5. **Alat Ukur Suhu (*Termocouple*) dan Alat Ukur Kecepatan Fluida (*Flow Meter*):** Alat-alat ini digunakan untuk mengukur suhu dan kecepatan aliran fluida, yang penting untuk mengontrol dan menyesuaikan proses pertukaran panas. (Ghani & Taufiqurrahman, 2021a)

1.14 Koefisien Panas Universal (U)

Koefisien panas universal (U) adalah besaran yang mengukur laju perpindahan panas melalui suatu material per satuan luas per satuan perbedaan temperatur. Satuan SI untuk U adalah **Watt per meter persegi per Kelvin W/m^2k**

Semakin tinggi nilai U , semakin mudah panas berpindah melalui material tersebut.

- **Faktor yang Mempengaruhi Nilai U**
Nilai U dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya:
- **Jenis material:** Material yang berbeda memiliki nilai U yang berbeda. Contohnya, kayu memiliki nilai U yang lebih rendah

daripada baja, sehingga kayu lebih baik dalam menahan panas.

- **Ketebalan material:** Semakin tebal material, semakin kecil nilai U -nya. Hal ini karena panas harus melewati jarak yang lebih jauh untuk berpindah melalui material yang lebih tebal.
- **Konduktivitas termal material:** Konduktivitas termal adalah kemampuan material untuk menghantarkan panas. Material dengan konduktivitas termal tinggi memiliki nilai U yang tinggi.
- **Keberadaan rongga udara:** Rongga udara dapat meningkatkan nilai U material secara signifikan. Hal ini karena udara adalah konduktor panas yang buruk.
- **Jenis permukaan material:** Permukaan material yang kasar atau bertekstur memiliki nilai U yang lebih tinggi daripada permukaan yang halus.
- **Rumus Koefisien Panas Universal**
Nilai U dapat dihitung dengan rumus berikut:
$$U = Q / (A * \Delta T)$$

di mana:
 - U adalah koefisien panas universal (W/m^2K)
 - Q adalah laju perpindahan panas (W)
 - A adalah luas permukaan material (m^2)
 - ΔT adalah perbedaan temperatur antara kedua sisi material (K) (Ghani & Taufiqurrahman, 2021b)

1.15 $\Delta LMTD$ (Log Mean Temperature Difference)

- Pengertian $\Delta LMTD$

$\Delta LMTD$ (*Log Mean Temperature Difference*) adalah perbedaan temperatur rata-rata logaritmik antara dua fluida dalam sebuah penukar panas. Parameter ini digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas dalam penukar panas.

Rumus $\Delta LMTD$

Rumus untuk menghitung $\Delta LMTD$ adalah:

$$\Delta LMTD = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

di mana:

$\Delta LMTD$: *Log Mean Temperature Difference* (K)

ΔT_1 : Perbedaan temperatur antara fluida panas dan dingin pada inlet (K)

ΔT_2 : Perbedaan temperatur antara fluida panas dan dingin pada outlet (K)

Pentingnya $\Delta LMTD$

$\Delta LMTD$ merupakan parameter penting dalam perhitungan kinerja penukar panas. Nilai $\Delta LMTD$ digunakan dalam persamaan perpindahan panas untuk menentukan laju perpindahan panas antara dua fluida.

1.16 Material Alat Penukar Kalor

Bahan yang digunakan dalam pembuatan alat penukar panas (*heat exchanger*) harus memiliki sifat-sifat tertentu agar dapat berfungsi dengan baik dan efisien. Berikut adalah beberapa faktor yang

perlu dipertimbangkan dalam pemilihan material alat penukar panas:

- **Ketahanan terhadap korosi:** Material harus tahan terhadap korosi yang disebabkan oleh fluida yang mengalir dalam alat penukar panas.
- **Konduktivitas termal:** Material harus memiliki konduktivitas termal yang tinggi untuk memfasilitasi perpindahan panas yang optimal.
- **Kekuatan mekanik:** Material harus memiliki kekuatan mekanik yang cukup untuk menahan tekanan dan beban operasi.
- **Kemampuan manufaktur:** Material harus mudah dibentuk dan fabrikasi menjadi komponen alat penukar panas.
- **Biaya:** Biaya material harus dipertimbangkan dalam pemilihan material. Beberapa material yang umum digunakan dalam pembuatan alat penukar panas adalah:
 - **Baja:** Baja adalah material yang kuat dan murah, dan tahan terhadap korosi dalam beberapa aplikasi.
 - **Tembaga:** Tembaga memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan mudah dibentuk, menjadikannya pilihan yang baik untuk beberapa aplikasi.
 - **Stainless steel:** Stainless steel tahan terhadap korosi dan memiliki kekuatan

mekanik yang tinggi, menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi yang demanding.

- **Titanium:** Titanium memiliki konduktivitas termal yang tinggi, tahan terhadap korosi, dan memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, tetapi juga mahal.
- **Alunium:** Aluminium memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan ringan, menjadikannya pilihan yang baik untuk beberapa aplikasi.
- **Plastik:** Plastik digunakan dalam beberapa aplikasi alat penukar panas berbiaya rendah, tetapi memiliki konduktivitas termal yang rendah dan tidak tahan terhadap temperatur tinggi. Pemilihan material yang tepat untuk alat penukar panas tergantung pada beberapa faktor, seperti jenis fluida yang digunakan, kondisi operasi, dan persyaratan kinerja. (Kolmetz, 2019)

1.17 Metode Penelitian Terdahulu

Metode Penelitian Terdahulu dalam Rancang Bangun Alat Penukar Kalor

Berikut beberapa metode penelitian terdahulu yang umum digunakan dalam rancang bangun alat penukar panas (*heat exchanger*) untuk menghitung koefisien panas universal (U) dan $\Delta LMTD$ (*Log Mean Temperature Difference*):

Metode Eksperimental:

- **Pengukuran langsung U dan $\Delta LMTD$:**

- Metode ini melibatkan pengukuran temperatur fluida inlet dan outlet, laju aliran, dan luas permukaan penukar panas.
- Data yang diperoleh digunakan untuk menghitung U dan $\Delta LMTD$ secara langsung menggunakan persamaan fundamental perpindahan panas.
- **Teknik visualisasi aliran:**
 - Teknik ini menggunakan metode visual seperti pewarna atau partikel kecil untuk mengamati pola aliran fluida dalam penukar panas.
 - Informasi ini dapat digunakan untuk memahami distribusi temperatur dan meningkatkan performa penukar panas.
- **Pengukuran tekanan:**
 - Penurunan tekanan di sisi fluida dapat diukur untuk memperkirakan resistensi aliran dan membantu dalam perhitungan U .

Metode Simulasi Numerik:

- **Metode Dinamika Fluida Komputasi (CFD):**
 - *CFD* digunakan untuk memodelkan aliran fluida dan perpindahan panas dalam penukar panas secara detail.

- Metode ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam tentang distribusi temperatur dan performa penukar panas dibandingkan dengan metode eksperimental.

- **Metode Analisis Elemen Hingga (FEA):**

- *FEA* digunakan untuk menganalisis tegangan dan deformasi pada struktur penukar panas.
- Informasi ini penting untuk memastikan keandalan dan keamanan penukar panas.

- **Metode Analisis Teori:**

- **Metode Persamaan Dasar Perpindahan Panas:**

- Metode ini menggunakan persamaan dasar perpindahan panas seperti persamaan Dittus-Boelter untuk konveksi paksa dan persamaan Nusselt untuk konveksi alami untuk menghitung koefisien perpindahan panas.
- Koefisien perpindahan panas ini kemudian digunakan untuk menghitung U dan $\Delta LMTD$.

- **Metode Analisis Dimensi:**

- Metode ini menggunakan analisis dimensi untuk mendapatkan hubungan antara variabel-variabel yang terlibat dalam perpindahan panas dalam penukar panas.

- Hubungan ini dapat digunakan untuk memprediksi kinerja penukar panas.

Pemilihan metode penelitian tergantung pada beberapa faktor, seperti:

- **Kompleksitas geometri penukar panas:**
 - Metode simulasi numerik mungkin lebih cocok untuk penukar panas dengan geometri yang kompleks.
- **Ketersediaan data eksperimental:**
 - Jika data eksperimental tersedia, metode eksperimental dapat digunakan untuk memverifikasi hasil simulasi numerik atau untuk mendapatkan informasi yang tidak dapat diperoleh dari simulasi.
- **Tujuan penelitian:**
 - Jika tujuan penelitian adalah untuk memahami secara mendalam distribusi temperatur dan performa penukar panas, metode simulasi numerik mungkin lebih cocok.
 - Jika tujuan penelitian adalah untuk menghitung U dan $\Delta LMTD$ dengan cepat dan mudah, metode analisis teori mungkin lebih cocok. (Chien et al., 2019)

1.18 Shell

Shell pada heat exchanger tipe shell and tube adalah komponen utama yang berfungsi sebagai wadah bagi fluida yang mengalir di luar tube. Shell menyediakan ruang bagi fluida untuk berinteraksi dengan tube, memungkinkan perpindahan panas yang efisien antara fluida di dalam tube dan fluida di dalam shell.

2. Jenis-Jenis Shell

1.Fixed Tube Sheet Shell

- Deskripsi: Memiliki tube sheet yang terikat secara permanen pada shell.
- Keuntungan: Struktur sederhana dan biaya pembuatan lebih rendah.
- Kekurangan: Sulit untuk membersihkan bagian dalam tube bundle.

2.U-tube Shell

- Deskripsi: Menggunakan tube berbentuk U, memungkinkan ekspansi termal bebas.
- Keuntungan: Memudahkan perawatan dan pembersihan.
- Kekurangan: Distribusi aliran tidak sebaik tipe lainnya.

3. Floating Head Shell

- Deskripsi: Salah satu ujung tube bundle bisa bergerak bebas, memungkinkan ekspansi termal.
- Keuntungan: Memudahkan pembersihan dan perawatan.
- Kekurangan: Lebih kompleks dan mahal dibandingkan fixed tube sheet.

4. Bahan Material Shell

- Carbon Steel: Digunakan untuk aplikasi dengan tekanan dan suhu sedang. Ekonomis dan cukup tahan korosi.
- Stainless Steel: Digunakan untuk aplikasi dengan suhu tinggi atau lingkungan yang korosif. Lebih mahal, tetapi menawarkan ketahanan korosi yang lebih baik.
- Alloy Steel: Untuk aplikasi khusus dengan suhu sangat tinggi atau lingkungan yang sangat korosif.

1.19 Tube

Tube dalam heat exchanger biasanya terdiri dari serangkaian tabung yang disusun secara paralel atau dalam susunan tertentu. Fluida yang membutuhkan pemanasan atau pendinginan mengalir melalui tabung ini, sementara fluida pemanas atau pendingin mengalir di sekitar tabung untuk mentransfer panas ke atau dari fluida yang mengalir di dalam tabung.

Karakteristik tube dalam heat exchanger:

- **Material:** Tabung heat exchanger terbuat dari berbagai bahan, seperti tembaga, baja, stainless steel, dan titanium. Pemilihan material tergantung pada fluida yang digunakan, temperatur operasi, dan sifat korosi.
- **Diameter:** Diameter tabung menentukan luas permukaan pertukaran panas. Diameter yang lebih besar memungkinkan perpindahan panas yang lebih banyak, namun juga meningkatkan resistensi aliran fluida.
- **Panjang:** Panjang tabung juga mempengaruhi perpindahan panas. Tabung yang lebih panjang memungkinkan perpindahan panas yang lebih banyak, namun juga meningkatkan biaya manufaktur.
- **Susunan:** Tabung dapat disusun dalam berbagai pola, seperti segitiga sama sisi, segitiga sama kaki, dan persegi. Susunan

tabung mempengaruhi distribusi aliran fluida dan efisiensi perpindahan panas.

Fungsi tube dalam heat exchanger:

- Menyediakan media mengalirnya fluida: Tabung menyediakan jalur bagi fluida untuk mengalir di dalam heat exchanger.
- Meningkatkan luas permukaan pertukaran panas: Dinding tabung bertindak sebagai permukaan pertukaran panas di mana perpindahan panas antara kedua fluida terjadi.
- Mendukung struktur heat exchanger: Tabung bersama dengan baffle plates membantu menopang struktur heat exchanger.

Performa tube dalam heat exchanger:

Performa tube dalam heat exchanger dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti:

- Material: Konduktivitas termal material tabung mempengaruhi kemampuannya untuk mentransfer panas.
- Diameter: Diameter tabung menentukan luas permukaan pertukaran panas.
- Panjang: Panjang tabung menentukan waktu kontak antara fluida dan dinding tabung.
- Ketebalan dinding: Ketebalan dinding tabung mempengaruhi resistensi perpindahan panas.

- Kecepatan aliran: Kecepatan aliran fluida di dalam tabung mempengaruhi koefisien perpindahan panas konveksi.
- Sifat fluida: Viskositas, konduktivitas termal, dan densitas fluida mempengaruhi perpindahan panas

