

**Perancangan Sistem Pendingin Kapasitas 42,21 kg/jam Tipe *Water jacket*
Pada Reaktor Torefaksi Skala Pilot**

(Skripsi)

Oleh

**Ichsanul Abidin
NPM 2015021005**



**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**Perancangan Sistem Pendingin Kapasitas 42,21 kg/jam Tipe *Water jacket*
Pada Reaktor Torefaksi Skala Pilot**

Oleh

**Ichsanul Abidin
NPM 2015021005**

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

Perancangan Sistem Pendingin Kapasitas 42,21 kg/jam Tipe *Water jacket* Pada Reaktor Torefaksi Skala Pilot

Oleh

Ichsanul Abidin

Cooling char ini Bertujuan untuk menurunkan suhu dari *biochar* yang telah ditorefaksi dan menurunkan titik didihnya agar tidak langsung terbakar setelah ditorefaksi, menghitung spesifikasi dan parameter pada sistem pendinginan yang dibutuhkan, menganalisa *heat loss* dari reaktor torefaksi menuju *cooling char*, serta melakukan perancangan terhadap sistem pendingin dari reaktor torefaksi biomassa dengan sistem *cooling char* menggunakan *screw*.

Metode yang digunakan dalam merancang *cooling char* yaitu mencari referensi dari buku dan jurnal terkait dengan perhitungan dimensi, Analisa perpindahan panas dan *heat loss* dari dimensi yang telah dirancang berdasarkan hasil perhitungan mekanikal, menghitung kebutuhan energi, dan mencari ukuran dimensi silinder *cooling char* yang berada dipasar dan mendekati dengan hasil perhitungan, serta merancang hasil dari perhitungan kedalam bentuk model 3D.

Hasil dari penelitian ini yaitu parameter hasil perhitungan dimensi *cooling char* dengan Panjang 2,414 m, Diameter *cooling char* 508 mm, Diameter *screw* 482,82 mm, jarak *pitch* 241,4 mm, kapasitas *cooling char* 42,21 kg/jam, , $\dot{m}_{air} = 0,346$ kg/s dan $\dot{m}_{cond} = 0,038$ kg/s. Serta model 3D yang telah dirancang berdasarkan dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan.

Kesimpulan dengan adanya sistem pendinginan pada proses torefaksi dapat membuat produk tidak terbakar karena telah didinginkan dibawah titik nyala api, mengetahui nilai spesifikasi dan parameter berdasarkan hasil yang didapat, serta hasil analisa *heat loss* yaitu $Q_{loss} = 0,356$ KW, dan membuat perancangan model 3D dari hasil perhitungan *cooling char*.

Kata kunci: *Cooling char, Screw, Torefaksi, Heat Loss, Perancangan.*

ABSTRACT

Design of Cooling System with Capacity of 42.21 kg/hour Water jacket Type in Pilot Scale Torefaction Reactor

**By
Ichsanul Abidin**

This cooling char aims to reduce the temperature of the biochar, Calculate the specifications and parameters of the required cooling system, Analyse the heat loss, and design the cooling system. The method used in designing cooling char is to find references from books and journals, analyse heat transfer and heat loss from the dimensions, calculate energy requirements, and find the dimensions cooling char cylinder that are in the market and close to the calculation, and design the results into a 3D model.

The results of this study are the parameters with a length of 2.414 m, cooling char diameter of 508 mm, screw diameter of 482.82 mm, pitch distance of 241.4 mm, cooling char capacity of 42.21 kg / hour, $\dot{m}_{air} = 0.346$ kg/s and $\dot{m}_{cond} = 0.038$ kg/s. As well as 3D models that have been designed based on the results of mechanical calculations. As well 3D models that have been designed based on the results of calculations.

The conclusion with the cooling system in the torefaction process can make the product not burn because it has been cooled, knowing the value of specifications and parameters, as well as the results of heat loss analysis, $Q_{loss} = 0.356$ KW, and making a 3D model design from the calculation of cooling char.

Keywords: Cooling char, Screw, Torefaction, Heat Loss, Design.

Judul Skripsi : **PERANCANGAN SISTEM PENDINGIN
KAPASITAS 42,21 KG/JAM TIPE WATER
JACKET PADA REAKTOR TOREFAKSI
SKALA PILOT**

Mahasiswa : Ichsanul Abidin

Nomor Pokok Mahasiswa : Teknik Mesin

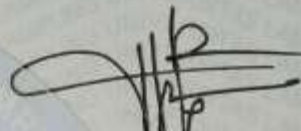
Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing



Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP. 19710331 199903 1 003

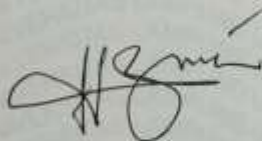


Hadi Pravitno, S.T., M.T.
NIP. 19880514 201903 1 012

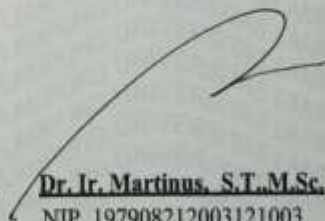
MENGETAHUI

Ketua Jurusan
Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin



Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197108171998021003



Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

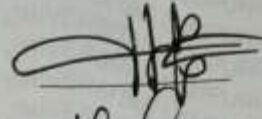
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

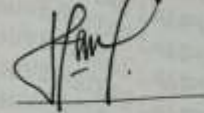
Ketua : Dr. Amrul, S.T.,M.T.



Anggota Penguji : Hadi Prayitno, S.T., M.T.



Penguji Utama : Dr. Harmen, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. ¶
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 8 Agustus 2024

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ichsanul Abidin
Nomor Pokok Mahasiswa : 2015021005
Program Studi : S1 Teknik Mesin
Jurusan : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Dengan ini penulis menyatakan bahwa dalam pembuatan skripsi ini tidak terdapat karya yang telah diajukan untuk memperoleh gelar sarjana di Perguruan Tinggi dan sepengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang tertulis didalam skripsi ini diacu dalam daftar pustaka sebagai acuan dalam membuat laporan skripsi.

Bandar Lampung, 29 Agustus 2024

Pembuat Pernyataan



109ALX 07 57 1980

Ichsanul Abidin
NPM 2015021005

MOTTO

"Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari sesuatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada Tuhanmulah engkau berharap." (QS. Al-Insyirah: 5-8)

"Menyesali nasib tidak akan mengubah keadaan. Terus berkarya dan bekerjalah yang membuat kita berharga." – Abduraahman Wahid

"Sukses berjalan dari satu kegagalan ke kegagalan yang lain, tanpa kita kehilangan semangat." – Abraham Lincoln

"Angin tidak berhembus untuk menggoyangkan pepohonan, melainkan menguji kekuatan akarnya." – Ali bin Abi Thalib

"Usaha dan doa tergantung pada cita-cita. Manusia tiada memperoleh selain apa yang telah diusahakannya." - Jalaluddin Rum

"Berusahalah sebisa kita, gagal coba lagi, selalu berbuat baik dengan orang lain, Sederhana, rendah hati dan humble dengan orang lain"

Ichsanul Abidin

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dengan Menyebut Nama Allah Yang Maha Pengasih Lagi Maha Penyayang

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah hirobbil alamin, dengan mengucap rasa syukur kepada Allah SWT atas segala limpahan rahmad, rezeki dan karunia yang Engkau berikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Teriring doa, rasa syukur dan segala kerendahan hati. Dengan segala cinta dan kasih sayang ku persembahkan karya ini untuk orang-orang yang sangat berharga dalam hidupku:

Bapak (Eko Priyono) Dan Ibu (Anggraiwati)

Kedua orangtuaku terima kasih atas segala ilmu yang telah kalian berikan dan atas segala dukungan untuk memberikan semangat yang senantiasa menyayangiku dengan penuh kasih sayang dengan penuh kesabaran dalam mendidik, merawatku sedari kecil, mendoakanku agar aku menjadi orang yang sukses, mengorbankan segalanya untuk kebahagiaanku dan cita-citaku, menasehatiku agar aku menjadi pribadi yang lebih baik lagi dan tidak pernah menyerah.

Kakak saya Frendy Ahmad Afandi Dan Ikhwan Ma'rifatullah

Yang selalu memberikan semangat, motivasi untuk selalu berusaha dalam menyelesaikan beberapa masalah.

Para pendidik yang telah memberikan ilmu, nasehat, bimbingan, kesabaran, waktu, dan arahan yang telah diberikan.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Warahmatullohi Wabarakatuh

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia yang telah memberikan nikmat hidup dan rezeki sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Shalawat serta salam dijunjungkan kepada Baginda Rasulullah SAW yang memberikan tuntunan dan syafaatnya kepada umatnya agar berada pada jalan yang lurus. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Dalam laporan tugas akhir ini penulis mengambil judul **“Perancangan Sistem Pendingin Kapasitas 42,21 kg/jam Tipe Water jacket Pada Reaktor Torefaksi Skala Pilot”**. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan lebih lanjut. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Bapak Eko Priyono dan Ibu Anggraiwati yang selalu mendampingi, mendidik, mendoakan, mendukung, dan memberikan restu penulis agar tetap semangat dalam menjalankan serta menyelesaikan studi Teknik Mesin.
2. Kedua kakak penulis, Frendy Ahmad Afandi dan Ikhwan Ma'rifatullah yang telah memberikan semangat dan dukungan kepada saya selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi.
3. Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
4. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.
5. Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung.
6. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T. selaku dekan 1 fakultas teknik Universitas Lampung.

7. Dr. Amrul, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing utama yang telah membimbing serta memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir di perkuliahan.
8. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.
9. Dr. Harmen, S.T, M.T. selaku Dosen Pembahas yang telah bersedia mengoreksi serta meluruskan dalam penyusunan skripsi ini.
10. Semua Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang, terima kasih atas ilmu yang telah kalian berikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
11. Keluarga besar grup TA (Torefaksi Design) yang terdiri dari Andri, Pico, David, dan Olsen, yang telah membantu, mendukung, penulis hingga dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kita dapat bertemu kembali dikemudian hari.
12. Teman-teman angkatan 2020 (SOLIDARITY M FOREVER) yang telah ada menemani, mendengarkan keluhan, memberikan motivasi, dan memberi dorongan semangat sejak 28 September 2020 menjalin kekeluargaan.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Dayamurni, Kec. Tumijajar, Kab. Tulang Bawang Barat, pada tanggal 10 oktober 2002 sebagai anak terakhir, dari pasangan Bapak Eko Priyono dan Ibu Anggariwati. Penulis menempuh Pendidikan dasar di MI NURUL IMAN Pulung Kencana, Tubaba hingga tahun 2014, lalu dilanjutkan di SMP NEGERI 4 Tulang Bawang Tengah, Tubaba yang diselesaikan pada tahun 2017 dan SMAN 1 TUMIJAJAR, Tulang Bawang Barat yang diselesaikan tahun 2020, hingga pada tahun 2020 penulis terdaftar

sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam dunia organisasi kemahasiswaan. Penulis pernah aktif sebagai anggota Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknik (BEM FT) Pada Tahun 2021. Selain itu, penulis juga pernah aktif dalam organisasi FOSSI FT UNILA dan menjabat sebagai kepala bidang Humas pada tahun 2022. Penulis pernah ikut dalam kepanitiaan Khusus Pemilihan Raya Fakultas Teknik tahun 2022 dan pernah menjadi kepala bidang kerohanian Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin HIMATEM Universitas Lampung pada tahun 2023. Penulis pernah melakukan Kerja Praktek (KP) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tahun 2023 dengan judul laporan **“ANALISIS HASIL UJI KINERJA MESIN PENCACAH BATANG SORGUM UNTUK BAHAN PAKAN TERNAK RUMINANSIA DI PUSAT RISET TEKNOLOGI TEPAT GUNA BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL”**.

Tahun 2024 penulis melakukan penelitian dengan judul **“Perancangan Sistem Pendingin Kapasitas 42,21 kg/jam Tipe Water jacket Pada Reaktor Torefaksi Skala Pilot”** dibawah bimbingan Dr. Amrul, S.T., M.T. dan Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Torefaksi.....	8
2.1.1 Sistem Torefaksi	9
2.1.2 Parameter Torefaksi	11
2.2 Sistem Pendinginan Produk Torefaksi	13
2.3 Proses Pendinginan (<i>Cooling System</i>).....	14
2.3.1 Proses Pendinginan <i>Water jacket</i>	15
2.4 Teknologi <i>Heat exchanger</i>	18
2.4.1 Konduksi.....	21
2.4.2 Konveksi	22
2.4.3 Radiasi	22
2.5 Pemilihan <i>Cooling char</i> yang akan digunakan dalam proses pendinginan <i>biochar</i>	22
2.6 <i>Screw conveyer</i>	24
2.7 Penelitian lain tentang <i>cooling</i> teknologi	25
2.8 Desain Rekayasa	25

2.9 <i>Heat loss</i>	28
2.10 Perancangan Desain <i>cooling char</i> dengan <i>screw</i>	30
2.10.1 Perancangan dimensi <i>cooling char</i> dengan <i>screw</i>	30
2.10.2 Analisis perhitungan <i>cooling char</i> dengan <i>screw</i>	31
2.11 Analisa proses perpindahan panas.....	33
2.12 Perhitungan <i>Water jacket</i> pada <i>cooling char</i>	34
III. METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1 Tahapan Penelitian	40
3.2 Alur Tahapan Pelaksanaan	42
3.3 Waktu dan Tempat Penelitian	43
3.3.1 Tempat Penelitian	44
3.3.2 Waktu Penelitian.....	44
3.4 Alat Penelitian	44
3.5 Parameter rancangan penelitian	44
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Perhitungan <i>Cooling char</i> System Pendingin <i>Water jacket</i> skala pilot...	47
4.2 Perhitungan Q_{loss} dan perpindahan panas	57
4.2.1 Analisis <i>Heat Loss</i>	59
4.2.2 Analisis Perpindahan Panas	62
4.3 Pemodelan 3D <i>Cooling char</i>	66
4.3.1 Desain <i>Cooling char water jacket</i>	66
4.3.2 Sistem penggerak dan pengaliran air ke <i>cooling char</i>	68
4.3.3 <i>Cooling char</i> sistem <i>water jacket</i> Skala Pilot model <i>screw</i>	70
V. PENUTUP	79
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Perbedaan biomassa mentah dengan produk torefaksi.....	8
Gambar 2.2. Mekanisme proses torefaksi.....	10
Gambar 2.3. sistem pendingin tertutup (<i>indirect cooling system</i>).....	14
Gambar 2.4. Penampang skema <i>water jacket</i>	15
Gambar 2.5 Pelilitan koil untuk sistem pendinginan.....	17
Gambar 2.6 <i>Helical coil heat exchanger</i> pada <i>cooling char</i>	18
Gambar 2.7 Sketsa <i>heat exchanger parallel flow</i>	20
Gambar 2.8 Aliran <i>counter-current flow</i>	21
Gambar 2.9 Konduksi Pada silinder	21
Gambar 2.10 <i>Cooling char tipe rotary drum</i>	23
Gambar 2.11 <i>Cooling char tipe screw</i>	23
Gambar 2.12 Skema desain rekayasa produk <i>cooling char</i>	28
Gambar 2.13 Skema lapisan dinding dan distribusi perpindahan panas.....	33
Gambar 3.1 Diagram alir perancangan <i>cooling char</i>	43
Gambar 3.2 Skema perancangan reaktor torefaksi dan <i>cooling char</i>	46
Gambar 4.1 Skema lapisan <i>cooling char water jacket</i>	58
Gambar 4.2 Skema <i>resistensi</i> pada <i>cooling char</i>	59
Gambar 4.3 Desain <i>cooling cooling char water jacket</i>	66
Gambar 4.4 Desain <i>cooling char water jacket</i> dengan <i>part</i>	67
Gambar 4.5 Desain <i>screw cooling char</i>	71
Gambar 4.6 Dimensi hasil perhitungan diameter silinder.....	72
Gambar 4.7 Neraca massa dan energi <i>cooling char</i> yang dirancang.....	77

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Kapasitas <i>pitch</i> untuk <i>screw conveyor</i>	31
Tabel 4.1 Parameter perhitungan <i>cooling char</i>	47
Tabel 4.2 Parameter hasil perhitungan dimensi <i>cooling char</i>	51
Tabel 4.3 Data perhitungan perpindahan panas <i>cooling char</i>	58
Tabel 4.4 Parameter Analisa Perpindahan panas	63
Tabel 4.5 Spesifikasi perhitungan volume <i>water jacket</i>	65
Tabel 4.6 Spesifikasi laju aliran air untuk debit 1249 liter/jam.....	65
Tabel 4.7 <i>Part cooling char water jacket</i>	67
Tabel 4.8 Perhitungan energi yang dibutuhkan.....	73
Tabel 4.9 Hasil analisis kebutuhan energi.....	74
Tabel 4.10 Parameter Awal kesetimbangan massa dan energi.....	75
Tabel 4.11 Hasil perhitungan kesetimbangan massa dan energi.....	76
Tabel 5.1 Hasil perhitungan mekanikal dimensi <i>cooling char</i>	79

DAFTAR SIMBOL

R = Nilai resistensi (C/W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².°C)

A = Luas permukaan (m²)

r = jari jari silinder (m)

k = konduktivitas termal bahan silinder (W/m.°C)

l = panjang silinder (m)

Q_{loss} = nilai heat loss (W)

ΔT = perbedaan temperatur (°C)

R_{total} = nilai resistensi total (C/W)

Q = Kapasitas screw conveyor (kg/jam)

n = Kecepatan putaran screw conveyor (rpm)

ρ = massa jenis material bahan baku (kg/m³)

ψ = *Loading Efficiency*

m = Massa benda yang menerima atau melepas kalor (Kg)

C_p = kapasitas panas pada tekanan tetap, (J/kg °C)

ΔT = Temperatur Suhu, (°C)

T_{h2} : suhu pada dinding *cooling char* (°C)

T_{h1} : suhu pada dinding luar (°C)

T_{c2} : suhu pada *water jacket* di bagian atas (°C)

T_{c1} : suhu pada *water jacket* di bagian bawah (° C)

W_t = Laju aliran massa biochar keluar dari cooling char (kg/s)

W_f = Laju aliran massa biochar masuk cooling char (kg/s)

My_{daf} = Mass yield biomassa dry ash free (%)

M = Kadar air biomassa masuk (%)

Q_{arang} = Laju perpindahan kalor arang (Kj/kg. °C)

Q_{serap} = Laju perpindahan kalor serap (air) (Kj/kg. °C)

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumber energi dan lingkungan memiliki permasalahan yang saling berkaitan antara satu dengan yang lain, karena dalam proses produksi, distribusi, hingga konsumsi energi berdampak signifikan terhadap lingkungan. Masalah lingkungan ini terkait dengan produksi dan konsumsi energi yang menyebabkan emisi polutan udara dari pembakaran bahan bakar fosil. Oleh karena itu, energi terbarukan menjadi alternatif untuk keluar dari masalah energi bahan bakar fosil. Literatur mengenai energi terbarukan meliputi penyediaan atau produksi dan pemanfaatan energi terbarukan. Saat ini, regulasi yang digunakan banyak berfokus pada sumber energi terbarukan sebagai sumber bahan bakar (Prastika, dkk. 2023).

Proses pengolahan sampah dan biomassa dengan sistem torefaksi menggunakan sampah biomassa sebagai bahan baku. Biomassa atau sampah diubah menjadi *biochar* melalui proses termal dengan sistem torefaksi. Torefaksi adalah metode perlakuan panas untuk meningkatkan nilai kalor dan karbon dari biomassa mentah menjadi bahan bakar padat. Torefaksi biasanya dilakukan pada suhu 200°C - 300°C dengan waktu tinggal selama 30 - 60 menit dalam lingkungan *inert* pada tekanan atmosfer tanpa oksigen. Sehingga, metode ini dapat digunakan sebagai salah satu alternatif dalam mengolah sampah atau biomassa menjadi bahan bakar padat untuk sumber energi terbarukan yang dapat menggantikan peran batu bara sebagai sumber energi yang tidak dapat diperbarui, untuk bahan bakar dari pembangkit listrik ataupun industri (Apriyanto, 2020).

Penelitian tentang torefaksi sampah sudah banyak dilakukan, salah satunya adalah torefaksi sampah daun di lingkungan kampus Universitas Lampung yang dilakukan oleh Yusuf (2023) dengan menggunakan reaktor torefaksi kontinu tipe tubular skala laboratorium kapasitas 5 kg/jam. Sampel biomassa yang diteliti adalah sampah daun di lingkungan Universitas Lampung. Nilai kalor (HHV) terbaik yang diperoleh dari penelitian ini adalah sekitar 6,121 kal/g pada suhu sekitar 300°C. Oleh karena itu, dibutuhkan reaktor torefaksi dengan kapasitas yang lebih besar untuk mengolah sampah di TPST Universitas Lampung.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mendapatkan reaktor torefaksi dengan kapasitas yang lebih besar adalah dengan melakukan perancangan skala pilot. Skala pilot merupakan kelanjutan setelah uji coba di laboratorium dan melibatkan penerapan konsep atau teknologi dalam skala yang lebih besar, tetapi belum sepenuhnya pada skala produksi penuh. Aspek perancangan *heat loss* dan mekanik perlu diperhatikan.

Pada reaktor torefaksi, ada beberapa bagian sistem pendukung (*support system*) yang digunakan sebelum biomassa ditorefaksi ke dalam reaktor, di antaranya sistem *dryer* (pengering biomassa), *burner* (sistem pembakaran), dan *cooler* (tempat pendinginan). Hal ini dilakukan agar energi yang digunakan tidak terlalu besar saat proses torefaksi. Oleh karena itu, diperlukan tahapan-tahapan dalam melakukan proses torefaksi. Salah satu bagian penting setelah biomassa ditorefaksi adalah sistem pendinginan. Hal ini penting dilakukan agar biomassa yang telah ditorefaksi tidak langsung terbakar jika keluar dari reaktor torefaksi. Setelah proses torefaksi, biomassa memiliki suhu sekitar 250°C - 300°C. Jika langsung keluar dari reaktor dan bertemu dengan oksigen, maka akan terjadi pembakaran langsung pada produk *biochar*. Sehingga, *biochar* yang telah ditorefaksi perlu didinginkan sampai titik didihnya di bawah titik nyala api jika bertemu dengan oksigen. Oleh karena itu, dibutuhkan *cooling char* skala pilot. Hal ini karena perancangan ukuran reaktor torefaksi dalam skala yang lebih besar, sehingga

dibutuhkan *cooling char* yang berukuran besar. Hal ini diperlukan agar *biochar* tidak menumpuk di bagian pengeluaran dari reaktor torefaksi.

Reaktor dengan screw adalah reaktor yang berjalan secara kontinu, bebas dari kebocoran, memiliki permukaan perpindahan panas yang lebih besar, synthesis gas yang mudah bereformasi, serta biaya operasional dan konstruksi yang rendah. Ciri khas reaktor ini adalah screw conveyor reaktor dengan kecepatan screw bervariasi dari 0,5–25 rpm, dengan demikian residence time reaktor dapat diubah. Reaktor ini cocok untuk skala laboratorium dan juga skala pilot (Fariz, 2017). Berdasarkan ini, penulis tertarik untuk merancang *cooling char* sebagai *support system* dari reaktor torefaksi. Hal ini bertujuan untuk pengolahan biomassa secara massal pada TPST Universitas Lampung sehingga dapat menjadi energi alternatif guna mencegah krisis energi yang terjadi saat ini dan penumpukan sampah yang terjadi di TPST Universitas Lampung.

Pada penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Nurazizah (2022) secara eksperimental yaitu melakukan modifikasi sistem pendinginan skala laboratorium yang disebut dengan *cooling char*. Penelitian sebelumnya telah dilakukan modifikasi pada sistem pendinginnya yaitu pada bagian screw yang ada pada *cooling char* diubah menjadi sistem dorongan manual yang memiliki bentuk setengah lingkaran di dalam reaktornya, dan memiliki fungsi untuk mendorong sampel dan memaksimalkan penurunan temperatur hasil produk torefaksi. Dengan melakukan perancangan terhadap *cooling char*, maka dapat digunakan sebagai support system (sistem pendukung) terhadap sampel biomassa yang telah ditorefaksi dalam skala pilot untuk TPST (Tempat Pembuangan Sampah Terpadu) Universitas Lampung. Selain itu, juga dapat mengurangi konsumsi energi yang digunakan pada saat proses torefaksi karena penggunaan ukuran yang lebih besar dibandingkan sebelumnya, serta dapat mengontrol variabel proses yang dilakukan terhadap proses pendinginan yang telah dilakukan setelah proses torefaksi (Xiaodong, dkk. 2012).

Jenis atau tipe dari *cooling char heat exchanger* yang banyak digunakan dalam proses pendinginan adalah *plate heat exchanger*, *shell and tube heat exchanger*, *water jacket heat exchanger*, dan *helical coil heat exchanger*. Tipe-tipe *heat exchanger* ini sering digunakan pada proses pendinginan, khususnya pada *cooling char*. *Heat exchanger* pada *cooling char* berfungsi untuk menurunkan suhu dari *biochar* yang telah tertorefaksi, sehingga *biochar* yang telah keluar dari *cooling char* tidak terbakar, karena produk yang telah ditorefaksi keluar dari *cooling char* pada suhu di bawah titik didih nyala api.

Penulis tertarik untuk merancang sebuah *cooling char* dengan *screw* skala pilot yang mendukung proses torefaksi yang dilakukan di dalam reaktor. *Screw* digerakkan oleh motor listrik sebagai pendorong biomassa dengan sistem kontinu dan air disedot oleh pompa dari penampungan air ke aliran penampung air pada *cooling char*. Hal ini bertujuan untuk menurunkan suhu dari *biochar* yang telah ditorefaksi dan menurunkan titik didihnya agar tidak langsung terbakar setelah ditorefaksi. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini dilakukan dengan merancang suatu sistem pendingin dengan judul “**Perancangan Sistem Pendingin Kapasitas 42,21 kg/jam Tipe Water jacket pada Reaktor Torefaksi Skala Pilot**”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada perancangan *cooling char* sistem pendingin *water jacket* untuk reaktor torefaksi kontinu skala pilot ini adalah sebagai berikut :

1. Berapakah kapasitas dan dimensi yang dibutuhkan oleh *cooling char* ?
2. Berapa panjang *screw cooling char* ?
3. Berapakah daya pompa yang dibutuhkan untuk mengalirkan air ke dalam ke dinding *cooling char* ?
4. Berapakah Nilai LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*) *cooling char* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Melakukan perancangan terhadap sistem pendingin dari reaktor torefaksi biomassa dengan sistem *cooling char* menggunakan *screw*.
2. Menghitung spesifikasi dan parameter pada sistem pendinginan yang dibutuhkan .
3. Menganalisa *heat loss* dari reaktor torefaksi menuju *cooling char*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan dengan merancang *cooling char* menggunakan *screw* dalam skala pilot untuk reaktor torefaksi kontinu.
2. *Lay out* gambar teknik *cooling char* dengan *screw* skala pilot dengan bentuk 2D.
3. Hasil perhitungan yang telah dilakukan dan dibuat dalam bentuk rancangan sistem pendingin biomassa dengan asumsi air suhu ruangan memiliki suhu 27 °C .
4. Rancangan *cooling char* digambar dengan model 3D pada aplikasi *solidwork*.

1.5 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini menguraikan latar belakang masalah penggunaan energi dan manfaat dari penggunaan *cooling char* dengan *screw* terhadap biomassa yang telah ditorefaksi sebagai sistem pendukung dari reaktor torefaksi. Tujuan dari penelitian ini, batasan masalah yang ditetapkan untuk mengarahkan hasil penelitian, serta sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan laporan juga dijelaskan dalam bab ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini berisi tentang landasan teori yang menjadi acuan dan mendukung penelitian ini, serta teori dasar yang meliputi: penjelasan tentang torefaksi, jenis-jenis reaktor torefaksi, proses pendinginan, sistem pendinginan, teknologi *heat exchanger*, penelitian terkait teknologi sistem pendinginan lainnya. Selain itu, juga mencakup perancangan desain *cooling char* dengan *screw*, analisis perhitungan *cooling char* dengan *screw*, analisis perpindahan panas dari material yang telah ditorefaksi ke dalam dinding *cooling char* berdasarkan dimensi yang telah ditentukan, sistem pendinginan yang akan digunakan, analogi perpindahan panas dalam proses pendinginan dari *cooling char* yang akan dirancang, perhitungan luas permukaan silinder tabung pada *cooling char*, serta skema pemodelan 3D untuk *cooling char* dengan *screw* dalam skala pilot yang akan dirancang dalam penelitian ini.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang tahapan penelitian yang akan dilakukan, lokasi dan waktu pelaksanaan penelitian, jadwal penelitian, serta parameter desain sistem pendinginan *cooling char* sebagai sistem pendukung dari reaktor torefaksi skala pilot yang akan dirancang dalam penelitian ini.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan tentang hasil dari parameter perancangan *cooling char* dengan *screw* yang telah dirancang. Isinya mencakup parameter yang telah direncanakan dan spesifikasi yang telah ditetapkan berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh, seperti spesifikasi *cooling char* torefaksi yang sudah direncanakan, gambar teknik yang telah disusun, serta analisis dimensi perpindahan panas pada *cooling char* yang direncanakan menggunakan SolidWorks, dan parameter desain yang memengaruhi proses perpindahan panas dari reaktor ke dalam *cooling char*.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan simpulan yang diperoleh dari hasil penelitian dan saran yang diberikan oleh peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

LAMPIRAN

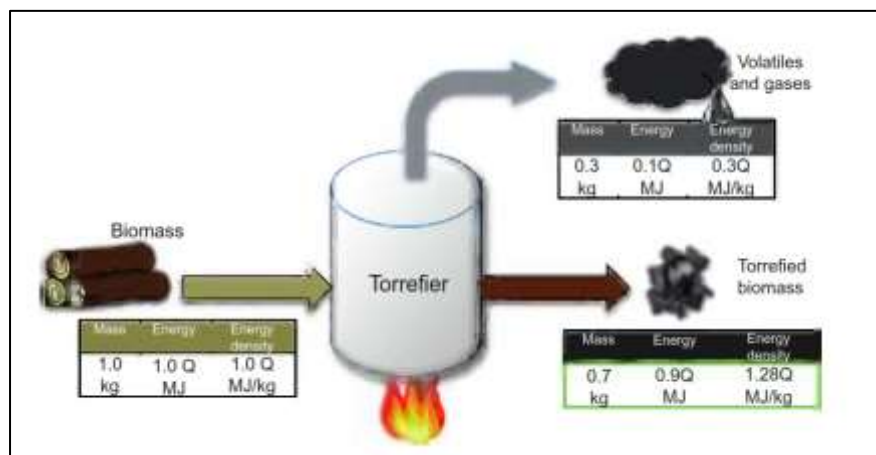
Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Torefaksi

Torefaksi adalah proses pengolahan termokimia pada bahan baku yang mengandung karbon, seperti biomassa. Proses ini memerlukan pemanasan biomassa pada suhu antara 200 - 300 °C selama lebih dari satu jam dalam kondisi tekanan atmosfer dan lingkungan tanpa oksigen. Transformasi sifat biomassa akibat torefaksi dapat ditampilkan secara grafis. Melalui torefaksi, kandungan hidrogen dan oksigen dalam biomassa berkurang, sementara kandungan karbon meningkat, yang mengakibatkan eliminasi sebagian bahan volatil dan peningkatan densitas energi. Selain itu, torefaksi mendegradasi sebagian besar hemiselulosa, menghasilkan berbagai gas permanen dan uap yang dapat terkondensasi, termasuk air. Proses ini juga dapat menghasilkan tar dan *biochar* (Sarker, dkk. 2021).

Berikut ini adalah perbedaan dari biomassa mentah dan produk dari hasil torefaksi yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1 yaitu sebagai berikut.



Gambar 2.1 Perbedaan biomassa mentah dengan produk hasil torefaksi
(Sumber: Basu, 2013)

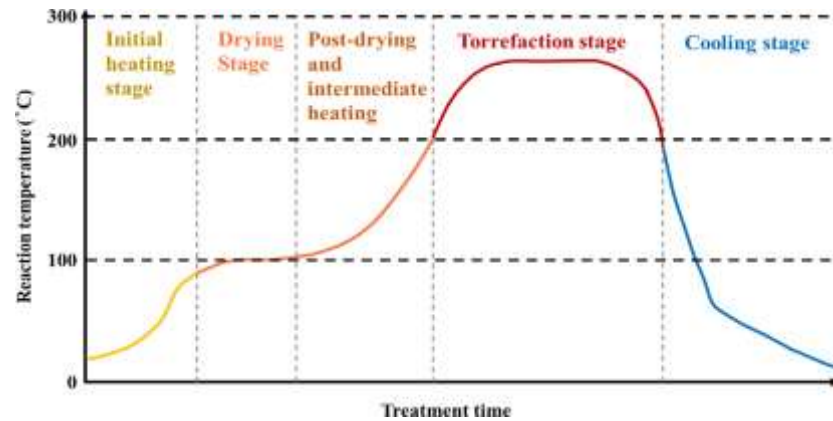
Pada Gambar 2.1 terdapat perbedaan dari biomassa mentah dan juga produk dari hasil torefaksi. Torefaksi merupakan proses termokimia yang mengubah komposisi biomassa dengan mengurangi kandungan hidrogen dan oksigen, sehingga meningkatkan proporsi karbon dan mengurangi bahan volatil, yang pada akhirnya meningkatkan densitas energi biomassa tersebut. Selain itu, torefaksi juga mengurai sebagian besar hemiselulosa yang terdapat dalam biomassa, menghasilkan berbagai gas permanen dan uap yang dapat terkondensasi, termasuk air. Proses ini tidak hanya mempengaruhi sifat mekanik dan struktural biomassa, tetapi juga mengubah komposisi selulosa dan lignin setelah melalui proses torefaksi (Sarker, dkk. 2021).

Penerapan torefaksi dilakukan untuk mengatasi beberapa masalah karakteristik biomassa yang akan digunakan sebagai bahan bakar. Contoh salah satu masalah pada biomassa kayu sebelum ditorefaksi antara lain adalah rendahnya nilai kalori, tingginya kandungan air, densitas energi yang rendah, ukuran yang relatif besar yang tidak ekonomis untuk transportasi, higroskopisitas, efisiensi pembakaran yang rendah, dan jumlah asap yang banyak selama pembakaran (Rizal, dkk. 2016).

2.1.1 Sistem Torefaksi

Sistem torefaksi merupakan proses pemanasan bahan organik berupa biomassa pada suhu 200-300 °C dalam reaktor tanpa oksigen. Produk akhir dari proses torefaksi ini berupa bahan bakar padat. Tujuan utama dari sistem ini adalah mengurangi kandungan air dalam biomassa dan meningkatkan nilai kalor setelah ditorefaksi.

Menurut Apriyanto, dkk. (2018), biomassa mengalami berbagai tahapan pemanasan yang dapat digambarkan seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Pada proses tersebut, pemanasan dalam torefaksi berpengaruh pada perubahan temperatur, massa, dan konsumsi energi dari biomassa selama proses torefaksi.



Gambar 2.2 Mekanisme proses torefaksi

(Sumber: Chen, dkk. 2021)

Terdapat beberapa tahapan proses dalam torefaksi biomassa di mana variasi sifat biomassa yang telah ditorefaksi dapat dibagi menjadi lima tahap, yaitu pemanasan awal, pengeringan, pemanasan pasca-pengeringan dan pemanasan menengah, torefaksi, serta proses pendinginan.

Menurut (Chen, dkk. 2021) Mekanisme proses torefaksi dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pada tahap pemanasan awal, biomassa dipanaskan hingga mencapai suhu yang diinginkan untuk memulai tahap pengeringan. Pada saat yang sama, kelembapan dalam biomassa secara perlahan menguap selama tahap ini.
2. Pada tahap pengeringan, suhu dipertahankan konstan hingga mencapai kadar air kritis dalam biomassa, sementara air bebas dalam biomassa menguap dengan laju yang konstan. Laju penguapan air mulai menurun ketika mencapai konsentrasi kelembapan kritis.
3. Pada tahap pasca-pengeringan dan pemanasan menengah, biomassa dipanaskan sampai suhu 200°C. Air yang terikat secara fisik dihilangkan sementara resistensi terhadap perpindahan massa dan panas ada dalam biomassa partikel. Biomassa hampir bebas dari kandungan air pada akhirnya dari

tahap ini. Beberapa kerugian massal dapat diperkirakan terjadi selama tahap ini, seperti akibat penguapan senyawa organik ringan.

4. Tahap torefaksi terdiri dari masa pemanasan dan pendinginan periode. Biomassa akan terbakar ketika suhu reaksi melebihi 200°C. Tahap ini dioperasikan pada suhu konstan disebut suhu torefaksi. Devolatilisasi dimulai selama periode pemanasan, berlanjut selama periode suhu konstan, dan berhenti selama atau setelah periode pendinginan.
5. Pada tahap pendinginan, suhu produk yang ditorefaksi didinginkan dari 300°C hingga suhu *biochar* yang telah ditorefaksi mencapai suhu di bawah titik nyala api. Pendinginan pada proses torefaksi penting dilakukan agar produk biomassa tidak langsung terbakar. Sehingga dibutuhkan sistem pendinginan setelah biomassa ditorefaksi. Tidak ada kerugian massal selama periode ini, meskipun ada beberapa penguapan produk reaksi yang teradsorpsi dapat terjadi (Chen, dkk. 2021).

Perubahan pada sifat biomassa selama proses torefaksi disebabkan oleh beberapa mekanisme reaksi yang terlibat dan saling berhubungan. Mekanisme ini meliputi dehidroksilasi hemiselulosa, destilasi dan dekarboksilasi polimer hemiselulosa yang mengandung xilan, depolimerisasi parsial dan demetoksilasi selulosa (pemendekan makrofibril selulosa) dan lignin, serta proses lainnya. Hilangnya massa biomassa akibat degradasi termal menghasilkan dekarbonisasi, dehidrogenasi, dan deoksigenasi dalam biomassa. Mekanisme-mekanisme yang relevan ini terjadi selama proses torefaksi biomassa dan menyebabkan perubahan sifat biomassa tersebut.

2.1.2 Parameter Torefaksi

Hasil produk torefaksi yaitu berupa bahan bakar padat sebagai produk utama dan menghasilkan volatil dan gas sebagai produk sampingan dari

proses pemanasan selama torefaksi dan perlakuan termokimia lainnya dari biomassa yang sebagian besar dipengaruhi oleh parameter proses seperti:

1. Temperatur, pengaruh temperatur torefaksi sangat penting dalam menentukan hasil dan sifat yang lebih baik dari produk torefaksi biomassa diikuti dengan waktu reaksi dan laju pemanasan. torefaksi umumnya dilakukan pada suhu rendah dengan waktu tinggal yang singkat menggunakan laju pemanasan rendah untuk hasil akhir padat yang lebih tinggi.
2. *Residence time* atau waktu tinggal torefaksi yang singkat yaitu sekitar (15-60 menit) cukup untuk proses torefaksi lengkap pada biomassa, dan memperpanjang waktu tinggal tidak menunjukkan efek yang signifikan pada transformasi biomassa.
3. Laju pemanasan yang lebih rendah dapat menguntungkan untuk hasil yang lebih tinggi dari suatu produk torefaksi biomassa padat.
4. Ukuran partikel biomassa memiliki pengaruh yang kurang signifikan terhadap proses torefaksi dibandingkan dengan suhu dan waktu tinggal. Namun, ukuran partikel harus diperhitungkan untuk memungkinkan pemanasan seragam biomassa dalam hal perpindahan massa selama proses torefaksi untuk hasil padat dan energi yang lebih baik.
5. Kadar air biomassa umumnya berdampak pada proses konversi energi selama torefaksi, dimana kadar air biomassa mentah harus dijaga minimal untuk proses torefaksi kering (Ong, dkk. 2021).

Torefaksi dapat mengubah suatu sifat biomassa seperti kelembaban, abu, karbon tetap, dan kandungan mudah menguap, hidrofobisitas, kemampuan penggilingan, dan kepadatan. Pada sub-bagian berikut, perubahan sifat-sifat ini akibat proses torefaksi dibahas, yaitu :

1. Hidrofobisitas Dalam biomassa lignoselulosa, air menempel pada permukaan pori-pori biomassa melalui ikatan hidrogen dengan gugus hidroksil di dinding sel. Hidrogen dalam molekul air

menempel pada oksigen dalam gugus hidroksil di dinding sel. Semakin tinggi kandungan oksigen pada dinding sel, semakin besar kemungkinan terbentuknya ikatan hidrogen. Karena torefaksi mengurangi gugus hidroksil di dinding sel, sehingga biomassa menjadi lebih hidrofobik.

2. *Ash Content* Komponen lain yang terkena dampak torefaksi adalah kadar abu. Peningkatan kadar abu merupakan perubahan relatif komposisi biomassa selama torefaksi. Meskipun bahan organik terdegradasi selama torefaksi, senyawa anorganik tidak terurai, sehingga menyebabkan konsentrasi abu.
3. Pengaruh massa dan kepadatan energi hasil massa padat menurun secara terus-menerus dengan meningkatnya suhu torefaksi. Sementara kepadatan energi merupakan parameter penting karena memberikan jumlah energi yang dilepaskan ketika satu satuan massa biomassa terbakar habis. Kepadatan energi setara dengan nilai kalor yang lebih tinggi (HHV). Selama torefaksi, HHV terus meningkat seiring dengan peningkatan suhu (Cahyanti, dkk. 2020).

2.2 Sistem Pendinginan Produk Torefaksi

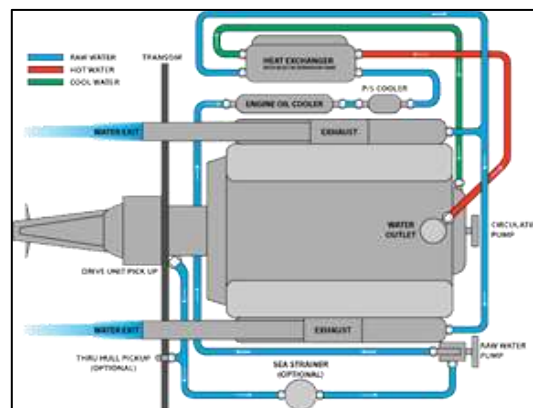
Adapun untuk sistem pendinginan pada *cooling char* bertujuan agar dapat menjaga temperatur *char* hasil produk torefaksi agar tidak terbakar setelah selesai proses torefaksi. Pada air pendingin dialirkan melalui dan menyelubungi dinding silinder, kepala silinder serta bagian-bagian lain yang perlu didinginkan. Air pendingin akan menyerap panas dari semua bagian pada silinder.

a. Sistem pendingin terbuka (*direct cooling system*)

Sistem pendingin terbuka (*direct cooling system*) adalah sistem pendingin dimana air dapat dipakai langsung untuk mendinginkan silinder pada *cooling char* dan komponen lainnya. Dimana pompa pendingin mengisap air dari tabung penampung air dan memompakan air tersebut kedalam silinder setelah mendinginkan *char* hasil produk torefaksi, cara ini disebut pendinginan dengan sistem terbuka.

b. Sistem pendingin tertutup (*indirect cooling system*)

Sistem pendingin tertutup (*indirect cooling system*) adalah sistem pendingin dimana silinder *cooling char* dan komponen lainnya didinginkan dengan air, dan kemudian air tersebut didinginkan oleh air es dan selanjutnya air tawar tersebut dipakai kembali untuk mendinginkan motor, jadi yang selalu bergantian adalah air es, sedangkan air tawar selalu beredar tetap, demikian daur ini berjalan terus. Pendingin air tawar (*fresh water cooler*) yaitu alat pemindah panas yang dipergunakan untuk mendinginkan air tawar sebagai pendingin *cooling char*. Adapun skema ada pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem pendingin tertutup (*indirect cooling system*)

(Sumber: Rohmah, 2022)

2.3 Proses Pendinginan (*Cooling System*)

Proses yang dapat mempengaruhi kenaikan temperatur air pendingin disebabkan karena permukaan silinder dan silinder yang menyerap sebagian air pendingin yang bersirkulasi melalui dinding silinder, ini dapat disebabkan oleh adanya pendingin air (*water jacket*). Kalor yang diserap pendingin kemudian menaikkan suhu air pendingin. Air pendingin pada *water jacket* cenderung mendidih dan menguap.

Sistem pendingin merupakan sistem yang menggunakan prinsip yaitu perpindahan panas secara konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah ilmu yang menganalisis perpindahan energi dari perbedaan suhu antara benda atau material. Salah satu sistem pendinginan

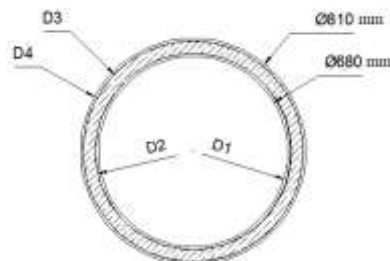
yaitu sistem yang memiliki manfaat dalam menstabilkan temperatur char tetap dalam keadaan dibawah titik didih nyala api, untuk menghindari *biochar* terbakar setelah proses torefaksi menurut (Febrianti, dkk. 2020).

2.3.1 Proses Pendinginan *Water jacket*

Pada *cooling char*, isolator bagian silinder ada yang terbuat dari bahan tahan api dan ada pula yang dilengkapi dengan *water jacket*. Pada penelitian ini, analisis perpindahan panas dilakukan pada *cooling char* yang menggunakan *water jacket* di bagian *cooling char*nya. Penambahan *water jacket* yang diharapkan dapat dijadikan isolator sekaligus untuk mendinginkan *char*.

Dalam hal ini minimal diharapkan, *char* yang sudah ditorefaksi yang dihasilkan dari reaktor torefaksi dapat menurun suhu dari produk hasil torefaksi dengan menggunakan selimut *water jacket*. Oleh karena itu, analisis perpindahan panas pada *water jacket* diperlukan untuk *heat loss* dan Analisa perpindahan panas yang terjadi pada bagian *cooling char* yang diselimuti oleh *water jacket*.

Selain itu juga pada *water jacket* ini digunakan untuk dapat menyerap panas pada material hasil produk torefaksi yang dialirkan menuju sistem pendingin, Adapun untuk penampang skema *water jacket* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Penampang skema *water jacket*

(Sumber: Nailul, dkk. 2020)

Cooling char telah banyak digunakan sebagai *support system* pada torefaksi. Untuk menghadapi persoalan tersebut salah satu penelitian yang telah dilakukan adalah teknik pendinginan *biochar* yang terkontrol dengan alat *cooling char* dengan tujuan menurunkan suhu produk torefaksi yang telah ditorefaksi dalam reaktor. *Cooling char* ini harus dilengkapi dengan sistem pendinginan dengan selimut air untuk memenuhi proses pendinginan *biochar* sehingga dipastikan produk *biochar* yang telah keluar dari *cooling char* tidak akan terbakar setelah ditorefaksi, jika bertemu dengan udara, menurut Nailul, dkk. (2020).

2.3.2 Proses pendinginan dengan menggunakan *coil system radiant*

Dari penelitian *radiant cooling system* diperoleh bahwa sistem pendinginan radiasi dapat menghemat energi pengguna sekitar 40% dibandingkan dengan sistem pendinginan konvensional. Salah satu cara untuk meningkatkan performa pendinginan dari *coil radiant cooling* adalah dengan menambahkan sirip pada pipa-pipa yang digunakan dalam sistem pendinginan *cooling char* tersebut. Untuk melakukan analisa pengaruh jumlah sirip pada *coil radiant cooling* terhadap performa pendinginan, dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran suhu udara di sekitar pipa dengan menggunakan atau tanpa menggunakan sirip.

Dalam penelitian menggunakan metode percobaan alat pendingin langsung dan penelitian kepustakaan ini untuk mengetahui pengaruh jumlah sirip pada *coil radiant cooling* terhadap performa pendinginan dan memberikan rekomendasi yang berguna untuk pengembangan *coil radiant cooling* yang lebih efektif dalam pendinginan. Hasil laju perpindahan panas ini didapatkan dari perhitungan data yang paling rendah pada sirip 10 dengan nilai 21.164 kJ/kg dan untuk paling tinggi pada sirip 4 dengan nilai 23.077 kJ/kg. Hasil nilai laju perpindahan panas ini menunjukkan pada sirip 4 paling tinggi dibandingkan variasi sirip 6, 8, dan 10 disebabkan oleh perbedaan suhu dinding evaporator

yang tinggi membuat proses pendinginan melalui media air menjadi lebih cepat. Untuk pelilitan koil untuk sistem pendinginan dapat dilihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut ini.



Gambar 2.5 Pelilitan koil untuk sistem pendinginan
(Sumber: Subarkah, dkk. 2020)

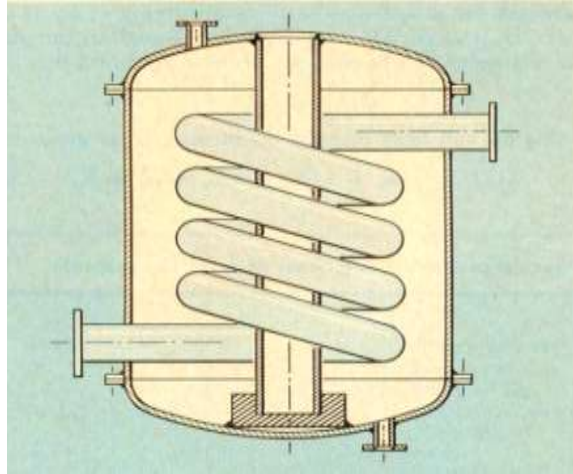
2.3.3 Proses pendinginan menggunakan *helical coil heat exchanger*

HCHE terdiri dari kumparan heliks yang dibuat dari pipa logam yang dipasang di bagian annular dari dua silinder konsentris, seperti ditunjukkan pada gambar 2.6 dimana Fluida mengalir di dalam kumparan dan annulus, dengan perpindahan panas terjadi melintasi dinding kumparan.

Dimensi kedua silinder ditentukan oleh kecepatan fluida dalam annulus yang diperlukan untuk memenuhi persyaratan perpindahan panas pada *cooling char* yang terjadi pada dinding silinder yang dililitkan oleh *helical coil* menurut Ramachandra, dkk. (1982).

Adapun gambar adalah tampilan skematik HCHE. Jarak bebas minimum antara dinding annulus dan kumparan serta antara dua lilitan kumparan yang berurutan harus sama. Dalam hal ini, kedua jarak bebas diambil sebagai $d/2$. Pitch, p , yang merupakan jarak antara putaran kumparan yang berurutan (diukur dari pusat ke pusat), adalah $1,5d$. Dengan asumsi bahwa kecepatan rata-rata fluida adalah seragam,

kecepatan massa fluida, dihitung berdasarkan jarak minimum antara heliks dan dinding silinder. Untuk *helical coil heat exchanger* terlihat pada Gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 *Helical coil heat exchanger* pada *cooling char*
(Sumber: Ramachandra, dkk. 1982)

Perpindahan panas adalah proses perpindahan energi yang terjadi karena terdapat perbedaan suhu diantara benda atau material. Panas akan berpindah dari temperatur tinggi ke temperatur yang rendah. Peristiwa perpindahan panas banyak dijumpai didalam dunia industri, misalnya pemanfaatan panas yang terbawa hasil akhir ataupun hasil antara untuk memanaskan umpan yang akan masuk ke reaktor dalam sebuah alat penukar panas (Intan, 2015).

2.4 *Teknologi Heat exchanger*

Secara harfiah *Heat exchanger* terdiri dari 2 kata yaitu *Heat* (panas) dan *Exchanger* (alat pertukaran/ perpindahan). Jadi arti dari *Heat exchanger* adalah alat yang digunakan untuk proses pertukaran/ perpindahan panas. Proses Perpindahan Panas (*Heat exchanger*) bisa berupa Proses pemanasan (*Heating*) dan proses pendinginan (*Cooling*). Yang perlu diperhatikan adalah proses perpindahan panas (*heat exchanger*) ini selalu melibatkan 2 media berupa *fluida* (cair maupun gas) yang mau ditukar panaskan. Sebagai contoh untuk pemanasan air melibatkan media pemanas misalkan uap (*steam*) dengan media yang mau didinginkan misalkan air.

Sebagai contoh untuk pendinginan misalkan pendinginan produk minuman dengan air dingin dimana produk minuman sebagai media yang mau didinginkan sedangkan air dingin sebagai media pendingin. Pada dunia industri lainnya fungsi penukar kalor untuk menukarkan energi dua fluida (baik fluida yang sama ataupun berbeda) yang berbeda temperatur.

Pertukaran energi dapat berlangsung melalui bidang atau permukaan perpindahan kalor yang memisahkan kedua fluida atau secara kontak langsung (fluida bercampur). Adanya pertukaran energi akan menyebabkan perubahan temperatur fluida atau dipergunakan untuk perubahan fasa. Walaupun fungsi penukar kalor adalah untuk menukarkan energi dua fluida atau dua zat, namun jenisnya cukup banyak. Hal ini terjadi karena umumnya desain penukar kalor harus dapat menunjang fungsi utama proses yang akan terjadi di dalamnya. Salah satu alat penukar kalor ialah *Heat exchanger*.

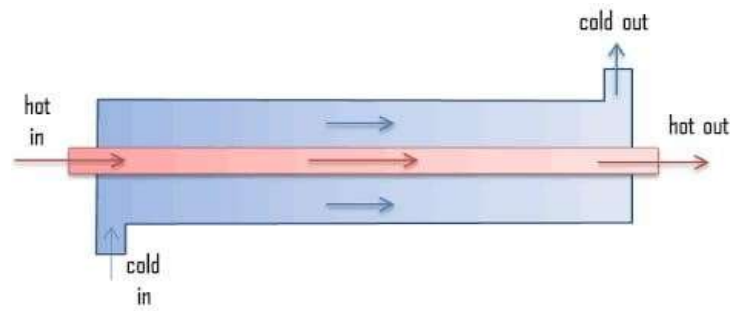
Heat exchanger merupakan alat penukar panas digunakan sebagai media perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur dari dua jenis fluida yang saling mengalir namun tidak tercampur. Prinsip kerja pada *Heat exchanger* yaitu panas adalah salah satu bentuk energi yang dapat dipindahkan dari suatu tempat ke tempat lain, tetapi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan sama sekali.

Dalam suatu proses, panas dapat mengakibatkan terjadinya kenaikan suhu suatu zat atau perubahan tekanan, reaksi kimia dan kelistrikan. Pada dasarnya prinsip kerja dari alat penukar kalor yaitu memindahkan panas dari dua fluida pada temperatur berbeda di mana transfer panas dapat dilakukan secara langsung ataupun tidak langsung. Proses terjadinya perpindahan panas dapat dilakukan secara langsung, yaitu fluida yang panas akan bercampur secara langsung. Adapun *Heat exchanger* Berdasarkan Arah Aliran Fluida antara lain:

1. *Heat exchanger* dengan aliran searah (*co-current/ parallel flow*).

Pada tipe ini temperatur fluida mengalir dengan arah yang sama, dan keluar pada sisi yang sama. Karakter *Heat exchanger* jenis ini, temperatur fluida dingin yang keluar dari *Heat exchanger* (T_{co}) tidak dapat melebihi temperatur fluida panas yang keluar (T_{ho}), sehingga diperlukan media pendingin atau media pemanas yang banyak. Jenis ini merupakan penukar kalor yang paling tidak efektif.

Heat exchanger jenis ini memiliki karakteristik kedua fluida (panas dan dingin) masuk ke *Heat exchanger* dengan arah sama, mengalir dengan arah berlawanan dan keluar *Heat exchanger* pada sisi yang sama. Sketsa *heat exchanger* paralel flow dapat dilihat pada Gambar 2.7.

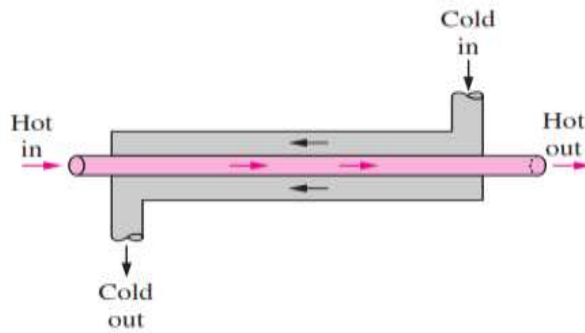


Gambar 2.7 Sketsa *heat exchanger* paralel flow

(Sumber: Rohmah, 2022)

2. *Heat exchanger* dengan aliran berlawanan arah (*counter current flow*)

Pada tipe ini didapat kemungkinan temperatur fluida yang menerima kalor saat keluar penukar kalor lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan kalor saat meninggalkan penukar kalor. Bahkan idealnya apabila luas permukaan perpindahan kalor tak berhingga dan tidak terjadi rugi-rugi kalor ke lingkungan, maka temperatur fluida yang menerima kalor. Aliran *counter-current Flow* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Aliran *counter-current Flow*

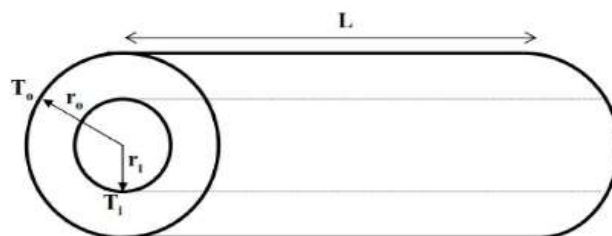
(Sumber: Rohmah, 2022)

Perpindahan panas terjadi melalui tiga cara yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

2.4.1 Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah proses perpindahan panas jika panas mengalir dari tempat yang bersuhu tinggi ke suhu yang lebih rendah, tetapi media untuk perpindahan panas tetap. Konduksi adalah proses perpindahan panas dari suatu bagian benda padat atau material ke bagian lainnya.

Kemudian perpindahan panas juga dapat terjadi pada pipa berbentuk silinder. tabung atau pipa adalah radial. Pada Gambar 2.9 ditunjukkan suatu pipa logam dengan jari-jari dalam (r_i), jari-jari luar (r_o), dan panjang (L), perbedaan suhu permukaan dalam dengan permukaan luar adalah $\Delta T = T_1 - T_2$. Perpindahan panas secara konduksi pada silinder dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Konduksi pada silinder

(Sumber: Intan, 2015)

2.4.2 Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas dimana cairan atau gas yang bertemperatur tinggi mengalir ke temperatur yang lebih rendah, memberikan panas kepermukaan yang suhunya lebih rendah. Perpindahan panas terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir di sekitarnya. Jadi media panas ini memerlukan media penghantar berupa fluida cairan atau gas.

2.4.3 Radiasi

Perpindahan secara radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran/radiasi gelombang elektromagnetik. Perpindahan panas radiasi berlangsung elektromagnetik dengan Panjang gelombang pada interval tertentu. Jadi perpindahan panas secara radiasi tidak memerlukan media, sehingga perpindahan panas dapat berlangsung pada ruangan hampa udara.

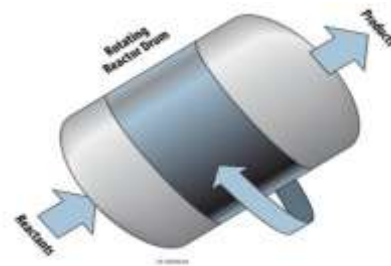
Berbeda dengan mekanisme konduksi dan konveksi, radiasi tidak membutuhkan medium perpindahan panas. Sampainya sinar matahari ke permukaan bumi adalah contoh yang paling jelas dari perpindahan panas radiasi (Intan, 2015).

2.5 Pemilihan *Cooling char* yang akan digunakan dalam proses pendinginan *biochar*

Pengembangan teknologi suatu proses torefaksi pada biomassa saat ini semakin berkembang sehingga dapat menyebabkan proses torefaksi dapat dilakukan melalui berbagai metode dan menggunakan berbagai solusi transfer panas serta teknologi konversi biomassa yang memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Menurut Tumuluru, dkk. (2021), berikut ini adalah beberapa jenis reaktor torefaksi yang digunakan untuk dapat memproses biomassa :

1. *Rotary drum*, adalah suatu *cooling char* yang menggunakan drum untuk mendinginkan hasil produk torefaksi setelah dari reaktor. Proses pendinginan dapat diberikan ke dalam *cooling char* dan biomassa yang telah tertorefaksi secara tidak langsung dengan melewati air melalui

cangkang reaktor. Kelemahan *cooling char* tipe ini adalah biaya yang relatif tinggi dan temperatur proses yang sulit dikendalikan. Selain itu sulit untuk mengatur skala ukuran yang dibutuhkan ketika ukuran *cooling char* menjadi terlalu besar karena perpindahan panas menuju biomassa menjadi terbatas. *Cooling char* tipe rotary drum ini dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Cooling char* tipe rotary drum

(Sumber : Tulumuru, dkk. 2021)

2. *Cooling char* tipe screw, *cooling char* jenis ini digunakan untuk mendinginkan produk torefaksi dibawah titik didih nyala api, karena ukuran *cooling char* menentukan beban panas yang dibutuhkan, dan untuk alasan desain, perpindahan panasnya terbatas. Dalam kasus suhu tinggi, kadar air yang rendah yaitu sekitar (5-7%) hal ini bersifat wajib dikarenakan *cooling char* tidak mampu mencapai suhu proses yang diperlukan (Piersa dkk., 2022). Untuk gambar *cooling char* dengan screw dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 *Cooling char* tipe screw

(Sumber: Nurazizah, 2022)

2.6 *Screw conveyor*

Screw conveyor adalah sebuah perangkat yang terdiri dari sebuah pipa dengan uliran yang dipasang pada pipa atau poros yang berputar di dalam tabung tetap. Tujuan dari perangkat ini adalah untuk memindahkan berbagai jenis material yang memiliki daya alir.

Setiap partikel material memiliki tingkat kebebasan yang memungkinkannya bergerak secara individual dan saling mendahului satu sama lain. Karakteristik ini memiliki peranan penting dalam operasi *screw conveyor*. Namun, perangkat ini kurang cocok untuk material yang lengket karena dapat menyebabkan aliran menjadi terhambat. Meskipun demikian, *screw conveyor* memiliki ketahanan yang baik terhadap suhu tinggi. (Arifin, 2022).

Adapun untuk kelebihan dan kekurangannya ini adalah sebagai berikut yaitu:

1. Dapat digunakan sebagai pencampur bahan di samping fungsi utamanya sebagai pemindah bahan.
2. Dapat mengeluarkan material pada beberapa titik yang dikehendaki. Hal ini penting untuk material yang berdebu (*dusty*) dan material panas, material yang berbau.

Sedangkan kekurangan *screw conveyor* adalah sebagai berikut:

1. Tidak dapat digunakan untuk pemindahan bahan bongkah besar (*largelumped*), Mudah hancur (*easily-crushed*), *abrasive*, dan material mudah menempel (*sticking materials*). Beban yang berlebihan akan mengakibatkan kemacetan, merusak poros, dan *screw* berhenti.
2. *Screw* pada *conveyor* ini mengakibatkan adanya gesekan material terhadap *screw* dan *through* yang berakibat pada konsumsi daya yang tinggi. Oleh karena itu *screw conveyor* digunakan untuk kapasitas rendah sampai sedang (sampai 100 m³/jam) dan panjang biasanya 30m sampai 40 m.

2.7 Penelitian lain tentang *cooling* teknologi

Cooling char, atau proses pendinginan pada suatu arang pada suatu proses pendinginan tambahan yang terjadi di antara kedua langkah tersebut. Namun, dalam sistem pembakaran batubara komersial, setelah devolatilisasi, arang yang dihasilkan bereaksi dengan oksigen secara langsung tanpa proses pendinginan apa pun. Sehingga perlu diperjelas pengaruh proses pendinginan terhadap laju pembakaran arang.

Pada penelitian tentang sistem pendingin torefaksi dengan cara memodifikasi sistem inlet dan pendinginan reaktor torefaksi biomassa kontinu tipe tubular yang dilakukan oleh (Nurazizah, 2022) dimana setelah dilakukannya modifikasi alat torefaksi mampu memproduksi dan mengelolah sampah dengan waktu yang lebih efisien dibandingkan sebelum adanya modifikasi dan reparasi yaitu berdampak dengan minimnya kerusakan yang akan sering terjadi seperti, mengalami pemuaiian atau sering terjadi selip pada v-belt, poros *rotary valve* bengkok akibat tidak mampu mendorong material masuk kedalam ruang reaktor dan lain sebagainya. Dalam skala laboratorium terhadap biomassa yang berjenis kayu *albazia*.

2.8 Desain Rekayasa

Desain rekayasa berbeda dengan ilmu pengetahuan, dapat dikatakan bahwa teori dan hipotesis tidak dapat diuji melalui eksperimen laboratorium. Desain rekayasa mencakup berbagai aspek yang lebih luas, termasuk pembahasan tentang manusia dan organisasi.

Oleh karena itu, desain rekayasa harusnya dianggap sebagai pengembangan teknologi. Namun, pendekatan ini masih bersifat parsial karena tidak ada jawaban tunggal yang pasti untuk setiap masalah yang melibatkan pembuatan keputusan dan kompromi, mengingat hampir semua parameter desain memiliki sifat kontradiktif.

Desain rekayasa mencakup semua aktivitas yang diperlukan untuk menciptakan dan mendefinisikan solusi bagi masalah yang belum terpecahkan, atau solusi baru untuk masalah yang telah dipecahkan dengan cara berbeda. Insinyur desain memanfaatkan kemampuan intelektual mereka untuk menerapkan pengetahuan ilmiah, memastikan produk memenuhi kebutuhan pasar dan spesifikasi desain yang telah ditetapkan, serta memungkinkan proses manufaktur yang optimal.

Prinsip-prinsip desain rekayasa mencakup iterasi, kompromi, kompleksitas, tanggung jawab, dan simplifikasi. Dalam iterasi, kemajuan menuju solusi harus melalui semua tahap yang diidentifikasi secara berurutan, namun banyak penelusuran balik sangat penting. Mengenai kompromi, solusi sempurna atau tunggal jarang ditemukan.

Solusi terbaik yang dapat dicapai adalah solusi optimum yang paling memuaskan pengguna. Kompleksitas menyiratkan bahwa rekayasa adalah teknologi, bukan sains, sehingga selain ilmu pengetahuan rekayasa yang diterapkan, aspek komunikasi, kerja tim, manajemen proyek, dan ergonomi juga penting.

Kegagalan dapat terjadi karena kelalaian atau perhatian yang berlebihan, dan tanggung jawab utama untuk memastikan produk yang aman dan sesuai berada di tangan insinyur profesional. Akhirnya, simplifikasi menekankan bahwa solusi terbaik biasanya adalah yang paling sederhana, dan setiap insinyur profesional berusaha menemukan solusi yang sederhana dan elegan. Di luar lingkungan perusahaan, khususnya dalam proyek mahasiswa, memperhatikan semua faktor ini tidaklah mudah.

Namun, tetap penting untuk menerapkan beberapa bentuk pengendalian dalam proses desain. Desain adalah aktivitas awal dari rangkaian proses dalam pembuatan produk. Pada tahap desain ini, diambil beberapa keputusan

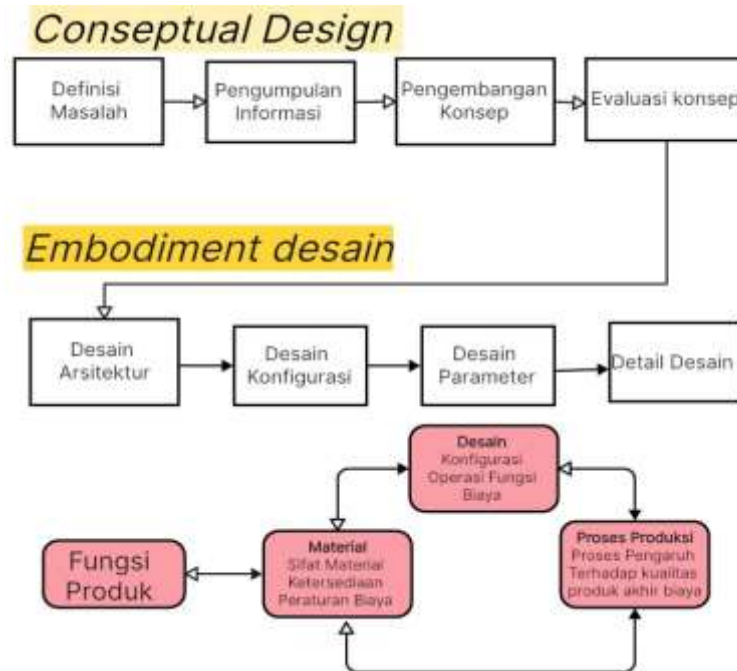
penting (Firmansyah dan Prahasto, 2015). Dalam desain, dilakukan proses yang terencana dan kreatif untuk mengubah ide-ide menjadi solusi teknis yang nyata. Pada tahap ini, desainer harus memahami persyaratan dan spesifikasi produk atau sistem yang akan dirancang dengan baik.

Hasil dari suatu perancangan ini adalah suatu rencana rinci yang mendokumentasikan solusi desain, spesifikasi, dan pertimbangan penting lainnya. Proses perancangan melibatkan berbagai aspek seperti aspek fungsional, estetika, keamanan, keandalan, dan biaya. Salah satu cara perancangan yang sering digunakan pada bidang keteknikan adalah menggunakan metode DFMA (*design for manufacture and assembly*).

Konsep dasar DFMA adalah memecahkan masalah manufaktur dan perakitan komponen pada fase awal perancangan, sehingga beberapa aspek yang berdampak pada hasil akhir keluaran produk dapat diantisipasi secepat mungkin.

Dengan begitu waktu dapat dihemat dan biaya produksi dapat ditekan. DFMA adalah metode yang menekankan pada perkembangan desain ke arah bentuk yang paling sederhana tanpa meninggalkan keinginan pasar. Bentuk desain yang paling sederhana berarti waktu pengerjaan yang paling singkat sehingga biaya bisa minimum (Fathoni dan Anwar, 2020).

Adapun skema yang digunakan dalam desain rekayasa perancangan ini bertujuan untuk memahami konsep desain yang akan dibuat, mulai dari pendefinisian masalah, pengumpulan informasi, pengembangan konsep, evaluasi konsep, serta fungsi dari produk yang akan dirancang nantinya. Skema desain tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.12 di bawah ini :



Gambar 2.12 Skema desain rekayasa produk *cooling char*
(Sumber: Taufiq, 2015)

2.9 Heat loss

Adapun analisis dari *heat loss* yang digunakan dalam perancangan *cooling char* ini adalah sebagai berikut menurut (cengel, 2006) :

$$R = \frac{1}{h \cdot A} \text{ (Konveksi)} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

R = Nilai resistensi (C/W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².°C)

A = Luas permukaan (m²)

Kemudian untuk mencari resistensi dari konduksi pada silinder *cooling char* maka dapat menggunakan suatu persamaan :

$$R = \frac{\ln \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dimana :

R = nilai resistensi (C/W)

r = jari jari silinder (m)

k = konduktivitas termal bahan silinder (W/m.°C)

l = panjang silinder (m)

kemudian untuk nilai dari *heat loss* dapat menggunakan persamaan yang ada di bawah ini :

$$Q_{\text{loss}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{total}}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

Q_{loss} = nilai heat loss (W)

ΔT = perbedaan temperatur ($^{\circ}\text{C}$)

R_{total} = nilai resistensi total (C/W)

Setelah memperoleh beberapa tinjauan pustaka dan studi literatur mengenai sistem pendinginan, proses pendinginan, teknologi *heat exchanger*, Penelitian tentang penggunaan sistem *cooling* teknologi, serta kelebihan maupun kekurangan dari *cooling* yang akan digunakan. Maka penulis memilih pendingin *cooling char* dengan *screw* menggunakan sistem pendingin *water jacket* yang akan dirancang dalam skala pilot sebagai salah satu sistem pendukung yang sangat penting dalam proses torefaksi biomassa.

Produk biomassa yang telah ditorefaksi tidak langsung terbakar, dan dapat dijadikan sebagai bahan bakar padat. Adapun perancangan pada *Cooling char* ini digunakan untuk reaktor torefaksi kontinu dengan skala pilot. Hasil dari rancangan ini digunakan untuk TPST Universitas Lampung. Setelah mencari landasan teori mengenai proses pendinginan, teknologi tentang *heat exchanger*, penelitian yang lainnya tentang teknologi pendinginan. Maka perlu dilakukan perancangan pada reaktor *cooling char* dengan *screw* skala pilot yang digunakan sebagai *support system* atau sistem pendukung yang akan digunakan pada reaktor torefaksi dalam skala pilot, maka dari itu hal penting yang harus dilakukan yaitu dengan merancang sistem pendukung dari reaktor torefaksi ini berupa sistem pendingin *biochar* yang telah ditorefaksi. Agar tidak langsung terbakar jika *biochar* keluar dari reaktor torefaksi karena titik didih yang tinggi. Adapun dari beberapa teori yang telah didapatkan mengenai jenis reaktor *cooling char* yang akan digunakan sebagai media pendingin. Salah satu yang cocok untuk mendinginkan *biochar* dalam skala besar adalah *cooling char* dengan *screw* dengan sistem pendinginan *water jacket*.

Pemilihan jenis ini dikarenakan dapat berjalan secara *continue* atau berkelanjutan dalam proses pendinginannya. Ciri khas dari reaktor tubular adalah screw conveyor reaktor dengan operasional dan biaya konstruksi yang rendah (Zainuri, 2009). Sehingga cocok untuk perancangan sistem pendinginan dari torefaksi biomassa dalam skala pilot. Adapun untuk proses perancangan reaktor *cooling char* dengan screw yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

2.10 Perancangan Desain *cooling char* dengan screw

Pada proses penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan, yaitu dimulai dengan prosedur perancangan desain *cooling char* menggunakan perangkat lunak menggambar. Perancangan ini dilakukan untuk mengetahui waktu tinggal yang dibutuhkan oleh *biochar* selama proses pendinginan dari suhu 300 °C hingga mencapai suhu kamar. *Cooling char* merupakan suatu media akhir sebelum sampel dikeluarkan, Adapun untuk *cooling char* sendiri memiliki fungsi untuk tempat pendinginan atau penurunan suhu terhadap sampel dan digunakan untuk mendorong material panas dari hasil proses torefaksi yang keluar melalui lubang pengeluaran. Adapun untuk *cooling char* yang akan dirancang ini memiliki beberapa komponen seperti tabung pendingin, silinder *cooling char*, *screw conveyor* yang terdiri dari poros yang terpasang pada *screw*.

2.10.1 Perancangan dimensi *cooling char* dengan screw

Cooling char dengan *screw* dirancang untuk mendinginkan suhu terhadap produk *biochar* yang telah ditorefaksi. Adapun untuk dimensi dari *cooling char* dengan *screw* ini dapat dilakukan dengan menentukan dimensinya terlebih dahulu.

Asumsi dimensi dari *cooling char* dengan menggunakan *screw* yang akan dirancang digunakan sebagai acuan dari perhitungan dimensi yang akan digunakan dalam perancangan ini. Untuk kapasitas dari *cooling char* sebagai sistem pendukung ini yang dirancang berkisar 42,21 kg/jam.

2.10.2 Analisis perhitungan *cooling char* dengan *screw*

Setelah merancang dimensi *cooling char* yang telah diasumsikan, langkah berikutnya yaitu melakukan analisis terhadap perhitungan yang akan dilakukan pada *cooling char tipe screw*. Adapun untuk perhitungannya ini adalah sebagai berikut ini yaitu :

- **Diameter Screw**

$$D_{screw} = \sqrt[3]{\frac{4 Q}{60 \pi 0.5 n \psi \rho c}} \text{ (kW)} \dots\dots\dots(2.4).$$

Dimana :

Q = Kapasitas screw conveyor (kg/jam)

n = Kecepatan putaran screw conveyor (rpm)

ρ = massa jenis material bahan baku (kg/m³)

ψ = *Loading Efficiency*

0.12 sampai 0.15 untuk material abrasif

0.25 sampai 0.3 untuk material sedikit abrasif

0.4 sampai 0.45 untuk material tidak abrasif dengan aliran bebas

c = Faktor koreksi

sudut screw horizontal 0°, 5°, 10°, 15°, 20°

nilai faktor C 1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.65

- **Pitch**

Pitch adalah jarak antar ulir pada screw. Untuk menentukan pitch pada screw dapat dilihat pada Tabel 3.1

Tabel 2.1 Kapasitas *pitch* untuk *screw conveyor*

<i>Pitch</i>	Keterangan
<i>Standart</i>	<i>Pitch = diameter screw</i>
<i>Short</i>	<i>Pitch = 2/3 diameter screw</i>
<i>Half</i>	<i>Pitch = 1/2 diameter screw</i>
Long	<i>Pitch = 1 1/2 diameter screw</i>

Sumber : CEMA (*Conveyor Equipment Manufacture Association*) *Approach*

Jumlah pitch dapat ditentukan dengan parameter waktu tinggal (residence time, Rt) dan kecepatan putaran (n). Adapun untuk rumus yang digunakan untuk mencari *jarak pitch* adalah

$$S = D_s \cdot 0,5 \dots\dots\dots(2.5)$$

- **Diameter luar**

Diameter luar adalah diameter tabung luar. Untuk menentukan diameter luar dihitung dengan persamaan .

$$D_{\text{tabung}} = D_{\text{screw}} + 0.6 \approx 0.10 \dots\dots\dots(2.6)$$

- **Laju sembur**

Laju sembur adalah kecepatan aliran material dalam screw conveyor. Untuk menghitung laju sembur menggunakan persamaan.

$$V = \frac{S \times n}{60} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

- v : Laju sembur material (m/s)
- S : Jarak pitch (m)
- n : Kecepatan putaran (rpm)

- **Panjang *Cooling char***

Panjang reaktor dipengaruhi oleh jarak pitch dan jumlah pitch, sesuai dengan persamaan

$$L = v \cdot t \dots\dots\dots(2.8)$$

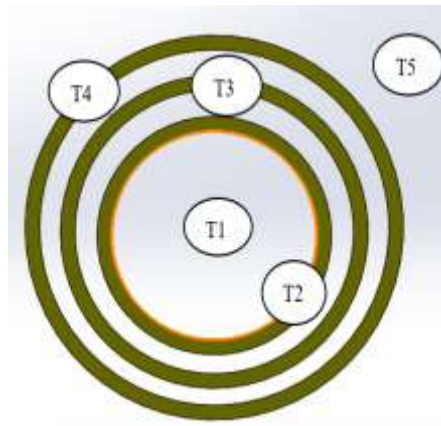
- memverifikasi perhitungan dimensi *cooling char* dengan menghitung volume silinder *cooling char* untuk biochar, sehingga persamaan volume tabung

$$V_t = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L \dots\dots\dots(2.9)$$

(Apriyanto, 2018)

2.11 Analisa proses perpindahan panas

Adapun Analisa Perpindahan panas yang harus dilakukan untuk mengetahui hasil pendekatan yang dilakukan pada desain yang dibuat dengan model 3D. Tahapan yang berikutnya yaitu menganalisis perpindahan panas produk yang telah ditorefaksi sekitar 275°C , dengan menentukan terlebih dahulu rumus yang akan digunakan seperti laju aliran massa, laju aliran panas, debit air, massa jenis air yang digunakan sebagai pendekatan perhitungan pada model 3D yang akan dibuat. Adapun untuk Analogi listrik pada perpindahan panas pada proses perancangan *cooling char water jacket* ini terdapat pada Gambar 2.13 sebagai berikut :



Gambar 2.13 Skema lapisan dinding dan distribusi perpindahan panas

(Sumber : Zulkri, 2022)

Berikut ini adalah nomenklatur yang terdapat pada Gambar 2.13

T_1 = Temperatur dalam *cooling char*

T_2 = Temperatur dinding dalam *cooling char*

T_3 = Temperatur dinding *water jacket*

T_4 = Temperatur luar *water jacket*

T_5 = Temperatur Lingkungan

Setelah menentukan jaring-jaring analogi listrik perpindahan panas pada proses perancangan *cooling char* dengan *screw*. Selanjutnya yaitu mencari rumus yang digunakan berdasarkan analogi listrik perpindahan panas. Adapun pada *cooling char* dengan *screw* yang

menggunakan rumus perpindahan panas adalah sebagai berikut ini yaitu :

- Konduksi

$$Q_{cylinder\ in} = 2 \pi k L \frac{\Delta T}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana :

Q = laju perpindahan panas, watt

ΔT = Suhu, °C

r = jari –jari lingkaran,

m = Konduktivitas Thermal, W/m K

- Konveksi

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana :

\dot{Q}_{conv} = perpindahan panas konveksi (W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².°C)

A_s = luas penampang (m²)

T_s = temperatur permukaan (°C)

T_∞ = temperatur fluida (°C)

- Menghitung Panas yang diserap (Q_s) maupun panas yang dilepas dapat dihitung menggunakan rumus

$$Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

Q = laju perpindahan panas, (watt)

m = Massa benda yang menerima atau melepas kalor (Kg)

Cp = kapasitas panas pada tekanan tetap, (J/kg °C)

ΔT = Temperatur Suhu, (°C)

2.12 Perhitungan *Water jacket* pada *cooling char*

Dalam proses pendinginan dibutuhkan adanya *water jacket*. Analisis perpindahan panas pada *water jacket* melibatkan prinsip konduksi pada

dinding silinder (*Cooling char*) dan konveksi pada aliran airnya. Adapun untuk rumusnya yang digunakan adalah :

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_h} \dots \dots \dots (2.13)$$

Dimana :

h : koefisien perpindahan panas konveksi (Watt/m °C)

Nu : bilangan Nusselt

k : konduktivitas air (Watt/m. °C)

D_h : Diameter *cooling char* (m)

Bilangan Nusselt merupakan bilangan yang tergantung pada bilangan Reynolds dan Prandtl :

$$Nu = 0.322 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{(1/3)} \dots \dots \dots (2.14)$$

Dimana :

Pr : Bilangan Prandtl

Re : Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds dapat dihitung dengan persamaan :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana :

ρ : massa jenis air (kg/m³)

v : kecepatan linier *water jacket* (m/s)

D_h : diameter silinder (m)

μ : viskositas air (kg/m.s)

Diameter silinder dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$D_h = \frac{4 A_h}{P_h} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana :

A_h : Luas penampang hidraulik (m²)

P_h : Perimeter hidraulik (m)

Log Mean Temperature Difference (LMTD) pada perpindahan panas yang terjadi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$LMTD = \frac{(T_{h2} - T_{c2}) - (T_{h1} - T_{c1})}{\ln\left(\frac{T_{h2} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c1}}\right)} \dots \dots \dots (2.17)$$

Dimana :

T_{h2} : suhu pada dinding *cooling char* ($^{\circ}\text{C}$)

T_{h1} : suhu pada dinding luar ($^{\circ}\text{C}$)

T_{c2} : suhu pada *water jacket* di bagian atas ($^{\circ}\text{C}$)

T_{c1} : suhu pada *water jacket* di bagian bawah ($^{\circ}\text{C}$)

Keliling Dalam

$$K_{in} = \pi \cdot D_{in} \dots \dots \dots (2.18)$$

Keliling Luar

$$K_{out} = \pi \cdot D_{out} \dots \dots \dots (2.19)$$

Luas Penampang dalam

$$A_{in} = \frac{3.14 D_{in}^2}{4} \dots \dots \dots (2.20)$$

Luas penampang luar

$$A_{out} = \frac{3.14 D_{out}^2}{4} \dots \dots \dots (2.21)$$

Perimeter silinder

$$P_h = K_{out} + K_{in} \dots \dots \dots (2.22)$$

Luas penampang silinder

$$A = \frac{\pi (D_2^2 - D_1^2)}{4} \dots \dots \dots (2.23)$$

Kecepatan debit aliran air pendingin

$$v = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (2.24)$$

(Nailul, dkk 2020).

Mencari volume screw cooling char menurut (Nursyahbani, dkk. 2021)

$$V_{poros} = \pi \cdot r^2 \cdot L \dots \dots \dots (2.25)$$

Dimana :

r = jari- jari poros (m)

L = Panjang poros (m)

$$V = (\pi \cdot r_{luar}^2 - \pi \cdot r_{dalam}^2) \cdot L \dots \dots \dots (2.26)$$

$$V_{total\ screw} = V_{poros} + V_{ring\ plat} \dots \dots \dots (2.27)$$

Dimana :

r_{luar} = jari- jari luar ring (m)

r_{dalam} = jari- jari dalam ring (m)

L = Panjang ring screw (m)

Kemudian untuk mencari laju aliran massa kondensasi dapat menggunakan persamaan menurut (Yunus, 2019) adalah sebagai berikut :

Untuk mencari laju aliran massa air menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m}_{air} = Q \rho \dots\dots\dots(2.28)$$

Dimana :

\dot{m}_{air} = laju aliran massa air masuk (kg/s)

Q = Debit air (Liter/jam)

ρ = massa jenis air (Kg/m³)

Untuk mencari laju aliran massa kondensasi menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{m}_{cond} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dimana :

\dot{m}_{cond} = laju aliran massa kondensasi (kg/s)

\dot{Q} = Laju perpindahan Panas air (Kw)

h_{fg} = Entalpi penguapan air (Kj/Kg)

Untuk mencari Volume air yang digunakan untuk mendinginkan char adalah sebagai berikut :

$$V = \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana :

V = Volume air (m³)

m = Laju aliran massa (kg)

ρ = massa jenis air (kg/m³)

Kemudian menurut (Basu, 2013) untuk mencari Laju aliran massa yang keluar dari *cooling char* dapat digunakan persamaan sebagai berikut :

$$W_t = W_f MY_{daf}(1-M) \dots\dots\dots(2.31)$$

Dimana :

W_t = Laju aliran massa biochar keluar dari cooling char (kg/s)

W_f = Laju aliran massa biochar masuk cooling char (kg/s)

My_{daf} = Mass yield biomassa dry ash free (%)

M = Kadar air biomassa masuk (%)

Kemudian untuk mencari nilai dari torsi dan momen torsi yang digunakan pada *cooling char* ini dapat menggunakan persamaan menurut (Reski, dkk. 2023) adalah sebagai berikut :

Mencari torsi

$$T = \frac{N \cdot 6000}{2 \cdot \pi \cdot rpm} \dots\dots\dots(2.32)$$

Dimana :

T = Torsi (Nm)

N = daya motor (kW)

π = Konstanta phi

RPM = *rotation per minute*

Mencari momen torsi

$$T = \frac{60 \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot n} \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana :

T = Momen Torsi (Nm)

N = daya motor (kW)

π = Konstanta phi

n = putaran screw (rpm)

Untuk menentukan nilai efektivitas dari penukar kalor panas pada *cooling char* dapat menggunakan persamaan menurut (Markus, dkk. 2019). Untuk persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{(Q_{arang})}{(Q_{serap})} \dots\dots\dots(2.34)$$

Dimana :

ε = Efektivitas

Q_{arang} = Laju perpindahan kalor arang (Kj/kg. °C)

Q_{serap} = Laju perpindahan kalor serap (air) (Kj/kg. °C)

Untuk mencari nilai total energi yang dibutuhkan dalam sistem pendinginan cooling char ini adalah sebagai berikut :

$$Q_{arang} = Q_{serap} \dots\dots\dots(2.35)$$

Untuk mencari aliran debit air yang dibutuhkan dalam sistem pendinginan cooling char ini adalah sebagai berikut :

$$Q = \frac{V}{t} \dots\dots\dots(2.36)$$

Dimana :

Q = aliran debit air (m^3 / jam)

V = Volume air (m^3)

t = waktu (jam)

Untuk dapat menghitung laju aliran massa air keluar *cooling char* digunakan persamaan (2.37) berikut:

$$\dot{m}_{air\ keluar} = \dot{m}_{air} - \dot{m}_{cond} \dots\dots\dots(2.37)$$

Di mana:

$\dot{m}_{air\ keluar}$ = laju aliran massa air keluar (kg/s)

\dot{m}_{air} = laju aliran massa air masuk (kg/s)

\dot{m}_{cond} = laju aliran massa kondensasi (kg/s)

Untuk dapat menghitung kesetimbangan energi yang terjadi pada suatu sistem *cooling char* digunakan persamaan (2.38) berikut:

$$Q_{sistem} = Q_{masuk} - Q_{keluar} \dots\dots\dots (2.38)$$

Di mana:

Q_{sistem} = perubahan total energi sistem (kW)

Q_{masuk} = total energi masuk ke sistem (kW)

Q_{keluar} = total energi keluar sistem (kW)

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Adapun untuk tahapan-tahapan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

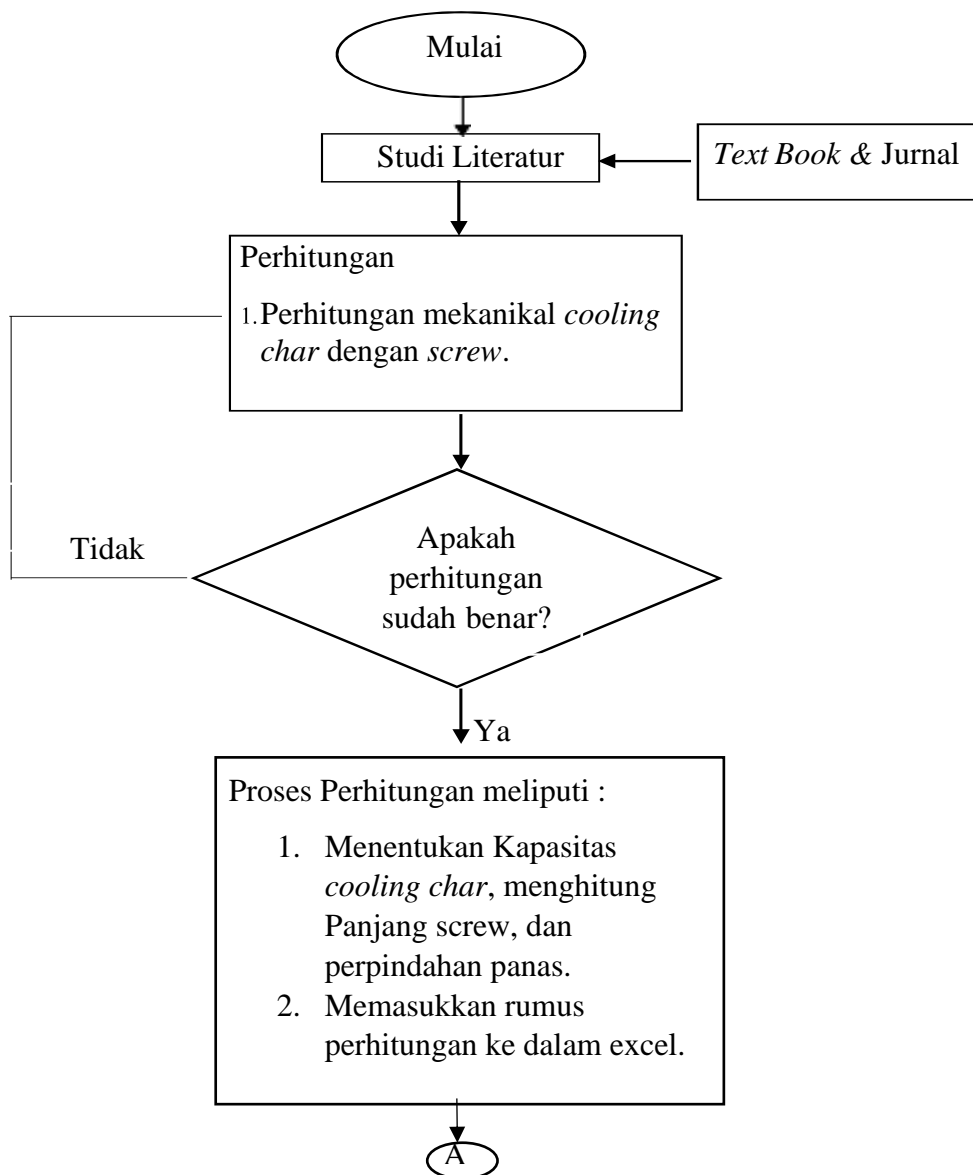
- Studi literatur : Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah studi literatur. yang dimulai dengan mempelajari perancangan *cooling char*, mempelajari cara menganalisis kebutuhan energi yang terdapat pada biomassa, laju aliran panas, laju aliran massa, mencari rumus debit air, mencari rumus massa jenis air, mempelajari panas yang diserap oleh air untuk mendinginkan sampel biomassa dan sistem pendinginan yang digunakan pada *cooling char*.
- Pemilihan jenis *cooling char*: Setelah menemukan studi literatur tentang perancangan dari proses torefaksi, jenis-jenis *cooling char*, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan jenis *cooling char* untuk proses pendinginan dari produk torefaksi itu sendiri, salah satu jenis *cooling char* yang akan digunakan pada perancangan desain model 3D ini yaitu dengan menggunakan jenis *cooling char* dengan pendorong char yang telah didinginkan menggunakan *screw*. Sehingga diberi nama proses perancangan *cooling char* dengan *screw*. Jenis pendingin ini dipilih karena memiliki beberapa keunggulan dari studi literatur yang telah dipelajari. Adapun keunggulannya yaitu pendistribusian suhu yang lebih merata, kapasitas yang lebih besar, sehingga proses penyerapan panas pada *biochar* yang didinginkan dapat berjalan dengan lebih efisien dan efektif. Selain itu juga *screw* ini dipilih karena berfungsi untuk mendorong *biochar* keluar dari *cooling char* yang telah didinginkan dalam tabung *cooling char* ini.

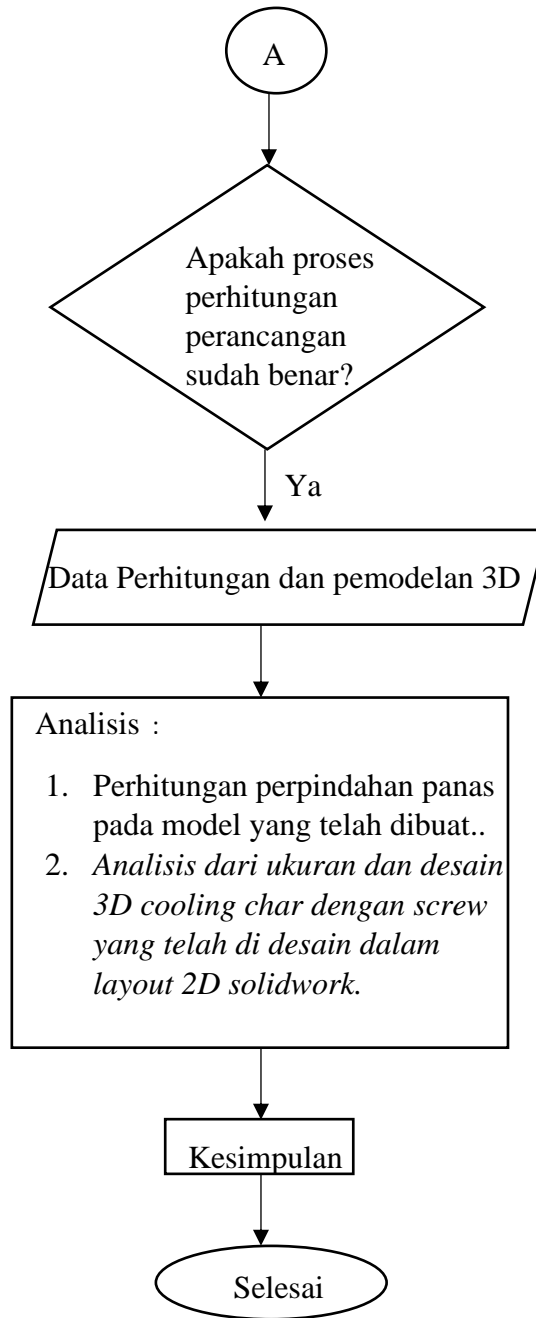
- Kemudian melakukan perhitungan : Untuk perhitungan dilakukan dengan menggunakan Microsoft excel, Dengan menggunakan rumus yang sesuai dengan buku perancangan dan referensi jurnal *cooling char*. Dan dengan menggunakan hasil dari perancangan gambar yang telah dibuat. Analisis termal digunakan untuk hasil perhitungan dari pemodelan 3D *cooling char* dengan *screw*.
- Analisa kebutuhan energi *cooling char* : Setelah mendapatkan dimensi reaktor pendingin *biochar* yang telah dirancang, langkah selanjutnya yaitu menghitung analisa kebutuhan *water jacket* dari proses pemanasan hingga pendinginan dengan waktu tinggal yang dibutuhkan dalam melakukan perpindahan panas dari reaktor torefaksi menuju *cooling char* Adapun untuk Analisa perhitungan perpindahan ini yang paling utama yaitu menentukan terlebih dahulu rumus laju perpindahan panas, laju aliran massa, debit air, massa jenis air, dan suhu air yang akan digunakan dalam proses pendinginan *biochar*. Hal ini dilakukan sebagai acuan dalam melakukan perhitungan dari proses perpindahan panas dari sampel yang di serap panasnya dengan air dingin untuk menurunkan suhu biomassa yang telah ditorefaksi. Serta sebagai pendekatan hasil perhitungan dengan model 3D *cooling char* dengan *screw* yang telah dirancang menggunakan *solidwork*.
- Analisa hasil perhitungan: setelah mendapatkan hasil perhitungan model 3D dari perhitungan excel, Membuat model 3D dengan *solidwork*, waktu tinggal pendinginan, Panas yang diserap dan jumlah sampel yang diasumsikan untuk perancangan *cooling char* dengan *screw*.
- Perancangan *cooling char* dengan *screw*: selanjutnya merancang dimensi *cooling char* yang telah dihitung menggunakan excel untuk diameter *screw* yang akan digunakan, kemudian merancang dimensi untuk tabung *cooling char* yang akan dipakai dalam desain, diameter tabung pendingin, dan ruang penampung sistem pendingin yang digunakan pada *cooling char*.

- Kesimpulan : Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan dituangkan dalam bentuk laporan.

3.2 Alur Tahapan Pelaksanaan

Setelah menentukan tahapan penelitian dari perancangan *cooling char* dengan menggunakan *screw* ini. Langkah berikutnya yaitu menentukan alur dari tahapan pelaksanaan yang akan dilakukan pada proses penelitian yang akan dilakukan. Adapun untuk alur tahapan pelaksanaan dari penelitian tentang proses pendinginan pada *biochar* dengan menggunakan *screw* ini adalah sebagai berikut ini yaitu :





Gambar 3.1 Diagram alir proses penelitian perancangan *cooling char*

3.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Adapun untuk waktu dan tempat yang akan dilakukan pada saat proses penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.3.1 Tempat Penelitian

Proses perancangan dengan menggunakan aplikasi solidworks dan analisis perhitungan dilakukan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan Tempat Pembuangan Sampah Terpadu (TPST) Universitas Lampung .

3.3.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan pada bulan Januari 2024 hingga bulan Agustus 2024.

3.4 Alat Penelitian

Adapun untuk alat yang digunakan sebagai pendukung Penelitian ini adalah Program solidworks yang digunakan untuk media perancangan *cooling char*, dan data pada biomassa yang akan dihitung analisis perpindahan panasnya dari reaktor menuju *cooling char* dengan data berdasarkan dimensi *cooling char* dan dianalisis dengan rumus perpindahan panas menggunakan Microsoft excel.

3.5 Parameter rancangan penelitian

Adapun parameter yang akan dilakukan dari perancangan *cooling char* dengan *screw* skala pilot dengan sistem pendinginan *water jacket* ini adalah sebagai berikut ini yaitu :

1. Menentukan spesifikasi *cooling char* yang akan dirancang

Setelah mencari rumus dari studi literatur mengenai perhitungan mekanikal *cooling char* dengan *screw* maka langkah berikutnya yaitu menghitung luas permukaan *water jacket* dan parameter *water jacket* yang akan digunakan dalam menentukan data dari spesifikasi dari *cooling char* dengan *screw* yang akan dirancang. Maka langkah selanjutnya yaitu menganalisa perhitungan *heat loss* dan perpindahan panasnya.

2. Analisa *heat loss* pada *cooling char water water jacket*

Setelah menghitung spesifikasi *cooling char* secara mekanikal, maka langkah selanjutnya adalah Analisa *heat loss* berdasarkan dimensi yang telah dihitung dengan rumus yang telah ditetapkan dan spesifikasi desain yang telah didapatkan kedalam tabel Analisa *heat loss* dari spesifikasi perhitungan yang telah diperoleh.

3. Analisa perpindahan panas

Setelah menghitung *heat loss cooling char water water jacket* berdasarkan resistensi termal, maka langkah berikutnya yaitu menganalisa perpindahan panas dengan rumus yang telah ditetapkan dan spesifikasi desain yang telah didapatkan kedalam tabel analisa perpindahan panas berdasarkan dari spesifikasi dimensi yang telah dihitung.

4. Membuat gambar desain dengan model 3D

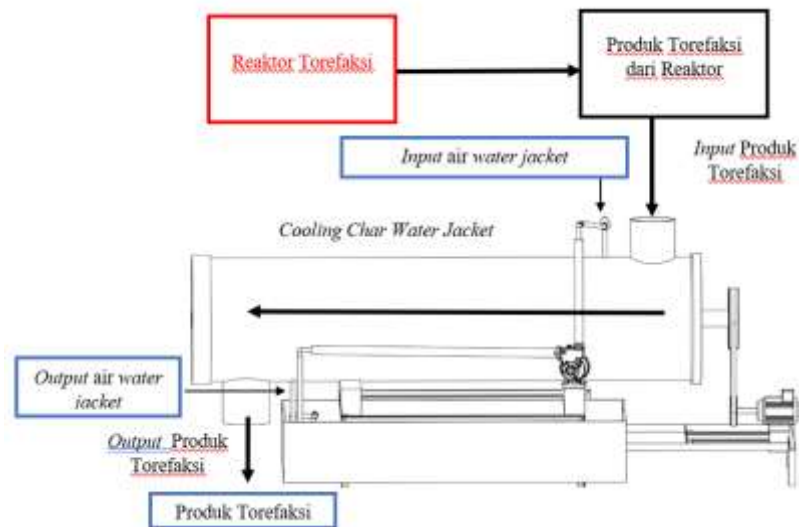
Setelah menghitung keseluruhan, maka langkah selanjutnya adalah membuat model 3D dengan *solidwork* serta mengisi tabel nama part dari *cooling char* dengan *screw* dengan 13 nama *part* dan juga jumlah part yang digunakan dalam komponen *lay out cooling char* yang dirancang menggunakan *solidwork*.

Setelah menentukan data yang digunakan dalam proses perhitungan perpindahan panas dengan *cooling char* yang telah dirancang dalam model 3D. maka langkah selanjutnya adalah melakukan pengolahan data dengan Analisa pendekatan proses perpindahan panas pada model perancangan pendinginan *biochar* yang telah dibuat dengan skala pilot.

Pemodelan 3D untuk *cooling char* dengan *screw*

Pada Tahapan ini yaitu membuat rancangan yang telah dibuat kedalam model 3D dengan menggunakan aplikasi *solidwork* Pemodelan dilakukan dengan menggunakan hasil dari analisis dan perhitungan yang telah dilakukan, berdasarkan dengan kebutuhan *cooling char* dengan *screw* yang akan

dirancang. Sesuai dengan dimensi yang telah diasumsikan atau pada parameter awal perancangan. Adapun skema yang akan digunakan dalam proses perancangan ini terdapat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 skema perancangan reaktor torefaksi dan *cooling char*

Dari Gambar 3.2 dapat disimpulkan bahwa skema proses perancangan *cooling char* menggunakan *screw* untuk mendinginkan sampel biomassa yang telah ditorefaksi. Pada skema tersebut dijelaskan bahwa biomassa yang sudah ditorefaksi akan masuk ke dalam cooler dengan aliran air sebagai media pendingin. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan nilai pada proses torefaksi biomassa yang akan dilakukan. Dengan merancang *cooling char* dalam skala pilot sebagai sistem pendukung dari reaktor torefaksi, langkah selanjutnya adalah melakukan perancangan pada *cooling char*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan *Cooling char* System Pendingin *Water jacket* skala pilot

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan dalam menentukan spesifikasi dari *cooling char*, perpindahan panas, dan debit yang dibutuhkan untuk melakukan proses pendinginan tersebut, maka didapatkan data dan hasil sebagai berikut :

Pada proses perancangan terdapat tiga pekerjaan utama yang dilakukan yakni menghitung dimensi *cooling char*, membuat desain dari *cooling char* dan melakukan perhitungan perpindahan panas terhadap *cooling char*, serta *lay out* gambar 2 dimensi yang telah dibuat menggunakan solidwork. Perhitungan dimensi *cooling char* terdapat lima tahapan yang harus dikerjakan antara lain: menghitung diameter screw, menghitung jarak pitch, menghitung diameter tabung, menghitung laju sembur, dan menghitung panjang tabung *cooling char* Parameter awal dalam merancang dimensi reaktor dapat dilihat pada Tabel 4.1. Asumsi ini ditujukan agar menjadi acuan pada perancangan dimensi *cooling char*.

Tabel 4.1 Parameter perhitungan dimensi *cooling char*

No	Simbol	Parameter	Nilai	Satuan
1	(Q)	Kapasitas <i>Cooling char</i>	42,21	kg/Jam
2	(n)	Kecepatan putaran Screw	0,5	rpm
3	(ϕ)	Loading Efficiency	0,25	
4	(c)	Faktor Koreksi	1	
5	(Rt)	Waktu tinggal	20	menit
6		Jarak antara tabung & screw	10	mm
7	(ρ)	Massa Jenis sampah kering tertorefaksi	127,4	kg/m ³

Parameter perhitungan mengenai dimensi *cooling char* yang digunakan terutama pada kecepatan putaran *screw*, kecepatan putaran aliran *screw* yang digunakan adalah 0,5 rpm. Kecepatan putaran *screw* ini digunakan untuk memindahkan material *biochar* yang telah ditorefaksi didalam silinder *cooling char* supaya dapat mempertahankan waktu tinggal selama proses pendinginan.

Perhitungan perancangan *cooling char* sebagai berikut :

1. Menghitung diameter *screw*

Langkah awal dari merancang *cooling char water jacket* ini adalah dengan menghitung diameter *screw*, sesuai dengan Persamaan (2.4). Dan beberapa nilai diambil dari parameter yang sudah diasumsikan.

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{4 Q}{60 \pi 0.5 n \phi \rho c}}$$

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 42,21}{60 \cdot \pi \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 0,25 \cdot 127,4 \cdot 1}}$$

$$D_s = \sqrt[3]{0,112549871}$$

$$D_s = 0,482816 \text{ m} = 482,82 \text{ mm}$$

2. Menghitung jarak *pitch*

Untuk menghitung jarak *pitch*, digunakan tipe *pitch half pitch* yaitu jarak *pitch* 0,5 diameter *screw*. Sesuai dengan Persamaan (2.5). Asumsi ini diambil untuk mendapatkan jarak *pitch* yang paling besar.

$$S = D_s \cdot 0,5$$

$$S = 0,48282 \cdot 0,5$$

$$S = 0,2414 \text{ m} = 241,4 \text{ mm}$$

3. Menghitung diameter tabung *screw*

Setelah mendapatkan dimensi *screw*, langkah selanjutnya yaitu menghitung diameter tabung *cooling char*. Sesuai dengan Persamaan (2.6). Untuk diameter digunakan toleransi 10 mm.

$$D_{\text{tabung}} = D_{\text{screw}} + 10 \text{ mm}$$

$$D \text{ tabung} = 482,82 \text{ mm} + 10 \text{ mm}$$

$$D \text{ tabung} = 492,82 \text{ mm}$$

Toleransi yang digunakan dalam menentukan diameter tabung *cooling char* ini berdasarkan Persamaan (2.6) dimana toleransi yang dapat digunakan untuk nilai minimumnya 6 mm, sementara untuk nilai maksimumnya adalah 10 mm. Agar *screw* dan silinder tabung tidak saling bergesekan, karena jarak yang toleransi yang terlalu kecil. Maka dipilihlah nilai toleransi sebesar 10 mm. Kemudian setelah mencari dipasaran ukuran dari diameter tabung *screw* ini dengan menggunakan baja seamless adalah 20 inch. Maka diameter yang digunakan adalah ukuran 508 mm dengan ukuran 20 inch.

4. Menghitung laju sembur

Langkah selanjutnya yaitu menghitung laju sembur atau kecepatan aliran material dalam *cooling char*. Adapun rumus yang digunakan adalah Persamaan (2.7). Adapun untuk perhitungan laju sembur adalah sebagai berikut:

$$v = \frac{S \cdot n}{60}$$

$$v = \frac{241,40 \cdot 0,5}{60}$$

$$v = 2,0117 \text{ mm/s}$$

5. Menghitung panjang *cooling char*

Selanjutnya untuk mendapatkan laju sembur, dapat menghitung panjang tabung *cooling char* dengan menggunakan parameter *residence time cooling char*. Adapun untuk rumus yang digunakan adalah Persamaan (2.8) dengan perhitungan sebagai berikut :

$$L = v \cdot t$$

$$L = 2,0117 \cdot 1200$$

$$L = 2414,080 \text{ mm}$$

$$L = 2.414 \text{ m}$$

Kemudian langkah berikutnya yaitu menghitung waktu tinggal dengan persamaan (2.8), dari persamaan tersebut yang dicari adalah t. Adapun persamaannya adalah sebagai berikut :

$$t = \frac{L}{v}$$
$$t = \frac{2414}{2,0117}$$
$$t = 1200 \text{ s}$$
$$t = 20 \text{ menit}$$

Terakhir memverifikasi perhitungan dimensi *cooling char* dengan mencari volume produk tertorefaksi dalam *cooling char* menurut Apriyanto (2018) sehingga Persamaan (2.9) yang digunakan untuk mencari volume tabung.

$$V_t = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L$$
$$V_t = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,508^2 \cdot 2,414$$
$$V_t = 0,489 \text{ m}^3$$

Kemudian, setelah mencari volume tabung langkah berikutnya yaitu mencari volume *biochar*, Adapun persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Laju aliran massa produk tertorefaksi yang masuk kedalam *cooling char* adalah 42,21 kg/jam. Jika waktu tinggal yang digunakan adalah 20 menit, maka laju aliran massa *biochar* yang masuk kedalam *cooling char* per 20 menit adalah 14,07 kg. Oleh karena itu langkah berikutnya yaitu mencari volume *biochar* produk tertorefaksi dengan menggunakan persamaan (2.30) adalah sebagai berikut:

$$V = \frac{m}{\rho}$$
$$V = \frac{14,07 \text{ kg}}{127,4 \text{ kg/m}^3}$$
$$V = 0,11044 \text{ m}^3$$

Setelah menemukan volume *biochar*, langkah berikutnya yaitu mencari volume screw dengan persamaan (2.25):

$$V_{\text{poros}} = \pi \cdot r^2 \cdot L$$

$$V_{\text{poros}} = 3,14 \cdot 0,0762^2 \cdot 2,414$$

$$V_{\text{poros}} = 0,04401 \text{ m}^3$$

Mencari volume ring plat pada screw dengan menggunakan persamaan (2.26) sebagai berikut :

$$V_{\text{ring plat}} = (\pi \cdot r_{\text{luar}}^2 - \pi \cdot r_{\text{dalam}}^2) \cdot L$$

$$V_{\text{ring plat}} = (3,14 \cdot 0,24141^2 - 3,14 \cdot 0,16521^2) \cdot 0,2414$$

$$V_{\text{ring plat}} = 0,02349 \text{ m}^3$$

Jumlah ring yang digunakan pada *screw* sebanyak 10 buah, maka volumenya adalah 0.2349m^3 . Setelah menjumlahkan volume poros dan volume ring plat untuk mengetahui volume dari *screw cooling char* digunakan persamaan (2.27).

$$V_{\text{total screw}} = V_{\text{poros}} + V_{\text{ring plat}}$$

$$V_{\text{total screw}} = 0,04401 \text{ m}^3 + 0.2349 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{total screw}} = 0.2788 \text{ m}^3.$$

Jadi untuk volume *screw cooling char* ini adalah 0.2788 m^3 .

Hasil dari perhitungan *cooling char* pada reaktor torefaksi sebagai sistem pendukung dari proses torefaksi ini terdapat pada Tabel 4.2 berikut ini yaitu :

Tabel 4.2 Parameter hasil perhitungan dimensi *cooling char*

No	Data Yang dihitung	Hasil perhitungan	Satuan
1	Panjang <i>Cooling char</i>	2,414	m
2	Diameter <i>Cooling char</i>	0,508	m
3	Diameter <i>Screw</i>	0,48282	m
4	Jarak <i>Pitch</i>	0,2414	m
5	Diameter <i>inlet & outlet cooling char</i>	0,200	m
6	Diameter <i>inlet & outlet water jacket</i>	0,020	m

Setelah menentukan kapasitas dimensi *cooling char*, yang telah dihitung dengan menggunakan persamaan yang ada dan diameter baja seamless yang ada dipasaran maka langkah berikutnya adalah melakukan perhitungan *water jacket* :

6. Menghitung keliling *water jacket*

Keliling Dalam

Langkah awal dalam menentukan keliling dalam pada permukaan silinder *water jacket* pada *cooling char* dapat menggunakan Persamaan (2.18) adalah sebagai berikut :

$$K_{in} = \pi \cdot D_{in}$$

$$K_{in} = 3,14 \cdot 0,508$$

$$K_{in} = 1,59512 \text{ m}$$

Keliling Luar

Setelah menentukan keliling dalam pada *water jacket*, maka langkah berikutnya yaitu menentukan keliling luar dari lapisan permukaan luar silinder *water jacket* pada *cooling char*. Adapun untuk menghitung keliling luar dapat menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.19) sebagai berikut :

$$K_{out} = \pi \cdot D_{out}$$

$$K_{out} = 3,14 \cdot 0,9652$$

$$K_{out} = 3,030728 \text{ m}$$

7. Menghitung luas *water jacket* yang dibasahi

Luas Penampang dalam

Langkah awal setelah menghitung keliling luar dan dalam pada silinder *cooling char*, maka langkah berikutnya yaitu menghitung luas permukaan dalam yang dibasahi oleh *water jacket*, hal ini diperlukan agar dapat mengetahui luas penampang dalam *water jacket* yang dibasahi dalam proses desain *cooling char*. Untuk luas permukaan dalam pada sistem

pendingin torefaksi dapat menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.20) adalah sebagai berikut

$$A_{in} = \frac{3,14 \cdot D_{in}^2}{4}$$

$$A_{in} = \frac{3,14 \cdot 0,508^2}{4}$$

$$A_{in} = 0,20 \text{ m}^2$$

Luas penampang luar

Sementara itu untuk melakukan perhitungan pada luas penampang dalam pada *cooling char* maka langkah berikutnya sebelum melakukan pemodelan 3d adalah menghitung luas penampang luar pada *water jacket* yang dibasahi. Oleh karena itu dapat menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.21) sebagai berikut :

$$A_{out} = \frac{3,14 D_{out}^2}{4}$$

$$A_{out} = \frac{3,14 \cdot 0,9652^2}{4}$$

$$A_{out} = 0,73 \text{ m}^2$$

8. Menghitung perimeter silinder

Kemudian setelah menghitung luas penampang luar dari silinder *water jacket* yang dibasahi, maka langkah berikutnya yaitu menghitung perimeter silinder pada sebuah *cooling char* tipe *water jacket* ini dengan menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.22) adalah sebagai berikut :

$$Ph = K_{out} + K_{in}$$

$$Ph = 3,30728 \text{ m} + 1,59512 \text{ m}$$

$$Ph = 4,625848 \text{ m}$$

9. Menghitung luas penampang silinder

Luas penampang silinder pada *water jacket* dapat dihitung setelah mencari perimeter pada silinder *water jacket*, maka langkah berikutnya yang dapat dilakukan adalah menghitung luas penampang silinder pendingin produk torefaksi. Pada penampang silinder ini dibutuhkan perhitungan luas

permukaan pada penampang silinder dengan menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.23) adalah sebagai berikut.

$$A = \frac{\pi (D_2^2 - D_1^2)}{4}$$

$$A = \frac{3,14 (0,9652^2 - 0,508^2)}{4}$$

$$A = 0,53 \text{ m}^2$$

10. Menghitung debit air untuk *cooling char*

Setelah menemukan hasil perhitungan dari luas penampang silinder pada *cooling char*. Maka langkah berikutnya yaitu mencari nilai dari debit air untuk *cooling char*. Untuk laju aliran massa air yang ada pada water jacket adalah 1245,25 kg. Oleh karena itu, digunakan persamaan (2.30) sebagai berikut:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{1245,25 \text{ kg}}{997 \text{ kg/m}^3}$$

$$V = 1,249 \text{ m}^3$$

Dalam satuan liter

$$V = 1249 \text{ liter}$$

Maka langkah selanjutnya yaitu mencari nilai laju aliran debit air yang digunakan, dalam waktu 1 jam, maka rumus yang digunakan adalah persamaan (2.36) sebagai berikut:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{1249 \text{ liter}}{1 \text{ jam}}$$

$$Q = 1249 \text{ liter/jam.}$$

Untuk menghitung aliran debit air dalam m^3/s dapat menggunakan rumus sesuai dengan persamaan sebagai berikut

$$Q = \frac{1249}{3600000} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 0.000346851 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 3,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

11. Menghitung kecepatan debit aliran air pendingin

Kemudian setelah mengetahui kapasitas debit air yang dibutuhkan oleh *cooling char*, maka langkah berikutnya yaitu menghitung kecepatan debit aliran air pendingin pada *water jacket* dengan menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.24) sebagai berikut :

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{3,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}}{0,53}$$

$$v = 6,56 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

12. Menghitung diameter rata-rata silinder

Pada *cooling char* ini dibutuhkan proses untuk menghitung diameter rata-rata silinder pada sistem pendingin produk torefaksi, maka pada diameter silinder ini dapat dihitung dengan menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.16) sebagai berikut :

$$D = \frac{4.A}{Ph}$$

$$D = \frac{4.(0.53)}{4,26548}$$

$$D = 0,46 \text{ m}$$

13. Menghitung bilangan reynolds

Bilangan reynolds dapat dicari setelah menemukan hasil dari perhitungan diameter silinder pada *cooling char*, maka proses perhitungan berikutnya yaitu mencari bilangan reynolds pada perancangan sistem pendingin. Oleh karena itu, untuk menghitung bilangan reynolds dapat menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.15) sebagai berikut :

$$Re = \frac{\rho.V.D}{\mu}$$

$$Re = \frac{(995,23).(6,56 \cdot 10^{-3}).(0,46)}{0,00068}$$

$$Re = 438,96$$

14. Menghitung bilangan nusselt

Sedangkan untuk mencari bilangan nusselt, dibutuhkan bilangan reynolds terlebih dahulu untuk menghitung bilangan Nusselt, kemudian setelah mendapatkan nilai dari bilangan reynolds, maka proses perhitungan pada bilangan nusselt dapat menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.14) sebagai berikut :

$$Nu = 0,332. Re^{0.5} . Pr^{(1/3)}$$

$$Nu = 0,332. (438,96)^{0.5} . (5,39)^{(1/3)}$$

$$Nu = 12,20$$

15. Menghitung koefisien perpindahan panas *water jacket*

Perhitungan pada koefisien perpindahan panas *water jacket* diperlukan agar mengetahui nilai koefisien sebelum dilakukan proses perancangan sistem pendingin produk torefaksi, sehingga dapat dihitung dengan menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.13) sebagai berikut :

$$h = \frac{Nu.k}{D}$$

$$h = \frac{(12,20).(0,62)}{0,46}$$

$$h = 16,54 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

16. Menghitung *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*

Suhu pada perancangan *cooling char* dapat diasumsikan menggunakan air untuk mendinginkan produk torefaksi dan material hasil dari reaktor. Oleh karena itu, sebelum menentukan *Log Mean Temperature Difference (LMTD)*, maka langkah awal yang perlu dipersiapkan adalah menghitung $T_{c \text{ out}}$ air dari *cooling char* yang telah ditorefaksi, Adapun untuk perhitungannya adalah sebagai berikut.

$$T_{car \text{ in}} = 275 \text{ } ^\circ\text{C} \quad h_1 = 15 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{car \text{ out}} = 95 \text{ } ^\circ\text{C} \quad D_i = 0.528 \text{ m}$$

$$T_{air, \text{ In}} = 27 \text{ } ^\circ\text{C} \quad D_o = 0.9652 \text{ m}$$

$$T_{air, \text{ Out}} = ? \quad h_2 = 0.61012 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Kemudian setelah itu menghitung $T_{air\ out}$ dengan menggunakan persamaan menurut Muhammad, 2020. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$Q_{konveksi} = Q_{konduksi}$$

$$h_1 \cdot \Delta T_{air} = k \cdot A \cdot \Delta T_{biochar}$$

$$h_1 \cdot \Delta T_{air} = \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{D_i}{k} + \frac{1}{h_1}} \cdot \pi \cdot D_o \cdot (T_1\ biochar - T_2\ biochar)$$

$$h_1 \cdot (T_1\ air - X) = \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{D_i}{k} + \frac{1}{h_1}} \cdot \pi \cdot D_o \cdot (T_1\ biochar - T_2\ biochar)$$

$$15 \times (27 - X) = \frac{1}{\frac{1}{0,6102} + \frac{0,528}{10} + \frac{1}{15}} \times 3,14 \times 0,9652 \times (275 - 95)$$

$$X = 69\ ^\circ\text{C}$$

$$\text{Jadi } T_{air\ out} = 69\ ^\circ\text{C}$$

Setelah diperoleh nilai $T_{air\ out} = 69\ ^\circ\text{C}$, maka dapat dihitung dengan menggunakan rumus sesuai dengan Persamaan (2.17) sebagai berikut :

$$LMTD = \frac{(Th_2 - Tc_2) - (Th_1 - Tc_1)}{\ln\left(\frac{Th_2 - Tc_2}{Th_1 - Tc_1}\right)}$$

$$LMTD = \frac{(275 - 27) - (95 - 69)}{\ln\left(\frac{275 - 27}{95 - 69}\right)}$$

$$LMTD = 98,433\ ^\circ\text{C}.$$

Jadi untuk nilai LMTD nya adalah 98,433 $^\circ\text{C}$.

4.2 Perhitungan Q_{loss} dan perpindahan panas

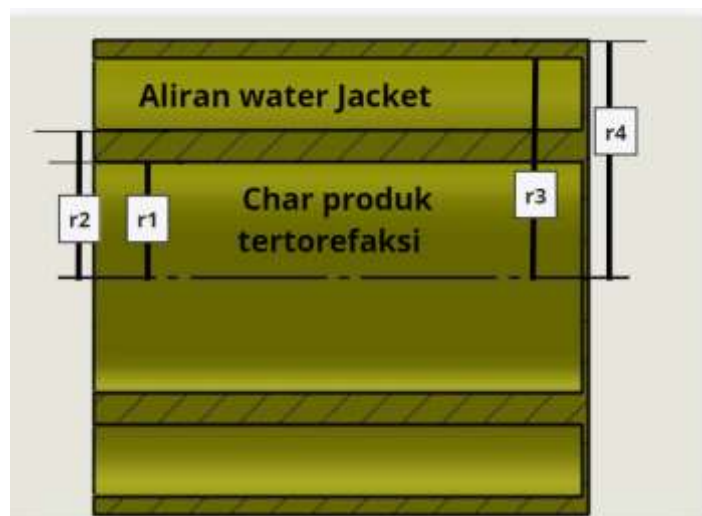
Parameter perpindahan panas dan nilai dari Q_{loss} pada sebuah perancangan *cooling char* dengan *screw* diperlukan agar dapat mengetahui nilai dari *heat loss* dan perpindahan panas yang dialami oleh *cooling char* yang dirancang. Oleh karena itu diperlukan perhitungan sebagai data awal yang diperlukan dalam menganalisis *cooling char*.

Pada Tabel 4.3 dapat dilihat bahwa nilai koefisien konveksi dalam, jari-jari pada *cooling char*, Panjang silinder, konduktivitas termal pada *cooling char*, kemudian konduktivitas termal pada *water jacket* dan parameter yang lainnya adalah sebagai berikut :

Tabel 4.3 Data Perhitungan Perpindahan Panas *cooling char*

No	Simbol	Parameter	Nilai	Satuan
1	h_i	Koefisien konveksi dalam	10	(W/m ² .C)
2	r_1	Jari jari dalam <i>cooling char</i>	0.254	(m)
3	r_2	Jari jari luar <i>cooling char</i>	0.264	(m)
4	L	Panjang silinder	2.414	(m)
5	r_3	Jari jari dalam dinding <i>water jacket</i>	0.483	(m)
6	r_4	Jari jari luar dinding <i>water jacket</i>	0.4876	(m)
7	K_1	Konduktivitas termal baja seamless <i>cooling char</i>	15	(W/m. ⁰ C)
8	K_2	Konduktivitas termal <i>water jacket</i>	0.61	(W/m. ⁰ C)
9	K_3	Konduktivitas termal dinding <i>water jacket</i>	0.9	(W/m. ⁰ C)
10	h_o	Koefisien konveksi luar	10	(W/m ² . ⁰ C)
9	T_1	Temperatur dalam <i>cooling char</i>	275	(⁰ C)
10	T_5	Temperatur lingkungan luar	27	(⁰ C)
11		Ketebalan Dinding Dalam	0.01	(m)
12		Ketebalan <i>water jacket</i>	0.04	(m)

Variasi dari nilai Q_{loss} dan perpindahan panas yang telah ditentukan pada sebuah tabel 4.3, maka langkah berikutnya yaitu membuat skema pada lapisan *cooling char water jacket* yang akan dirancang dalam bentuk 3 dimensi dengan menggunakan aplikasi *solidwork*. Oleh karena itu untuk gambar dari skema lapisan sistem pendingin dari produk torefaksi ini dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Skema Lapisan *Cooling char water jacket*

4.2.1 Analisis *Heat Loss*

Analisis *heat loss* pada perancangan sistem pendingin produk torefaksi perlu dilakukan, agar dapat mengetahui nilai dari hasil perhitungan. Langkah awal yang dilakukan adalah mencari luas permukaan silinder terdalam dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.20) sebagai berikut :

$$A_{in} = \frac{3,14 D_{in}^2}{4}$$

$$A_{in} = \frac{3,14 \cdot 0,508^2}{4}$$

$$A_{in} = 0,20 \text{ m}^2$$

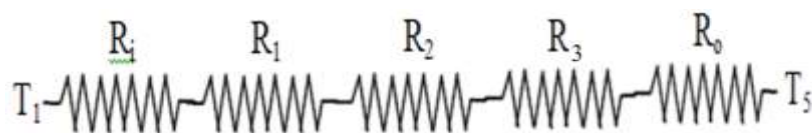
Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai dari luas permukaan silinder bagian dalam sebesar $A_{in} = 0,20 \text{ m}^2$. Kemudian untuk mendapatkan luas permukaan silinder terluar dapat menggunakan persamaan (2.21) sebagai berikut :

$$A_{out} = \frac{3,14 D_{out}^2}{4}$$

$$A_{out} = \frac{3,14 \cdot 0,9652^2}{4}$$

$$A_{out} = 0,73 \text{ m}^2$$

Hasil perhitungan luas permukaan silinder bagian luar sebesar $A_{out} = 0,73 \text{ m}^2$.



Gambar 4.2 Skema Resistensi Pada *Cooling char*

Resistensi setiap lapisan dapat dilihat pada gambar 4.2 tersebut. Dimana resistensi tersebut terdiri dari perpindahan panas konduksi dan konveksi. Untuk mencari nilai resistensi tersebut dapat digunakan dengan persamaan (2.1) dibawah ini :

$$R = \frac{1}{h \cdot A} \text{ (Konveksi)}$$

Sehingga pada resistensi yang terjadi didalam *cooling char*, yaitu

panas dari dalam *cooling char* menuju dinding dalam screw dapat dihitung menggunakan persamaan perpindahan panas konveksi seperti yang ada dibawah ini :

$$R_i = \frac{1}{h_i \cdot A_i}$$

$$R_i = \frac{1}{10 \frac{W}{m^2 \cdot C} \times 0,20 m^2}$$

$$R_i = 0,493631561 \frac{C}{W}$$

Resistensi yang terjadi diluar *screw cooling char*, yaitu panas dari dinding terluar *cooling char* menuju ke lingkungan dapat dihitung menggunakan dengan persamaan perpindahan panas konveksi seperti yang ada dibawah ini :

$$R_o = \frac{1}{h_o \cdot A_o}$$

$$R_o = \frac{1}{10 \frac{W}{m^2 \cdot C} \times 0,73 m^2}$$

$$R_o = 0,13674 \frac{C}{W}$$

Mencari nilai resistensi R_1 dan R_2 , yaitu perpindahan panas dari dinding dalam ke dinding luar yang terjadi secara konduksi. Adapun nilai resistensi tersebut dapat dicari dengan menggunakan persamaan konduksi yang terjadi pada silinder *cooling char* dengan persamaan (2.2), seperti yang ada dibawah ini:

$$R = \frac{\ln \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L} \text{ (Konduksi Pada Silinder)}$$

Sehingga nilai R_1 , dapat dihitung seperti yang ada dibawah ini :

$$R_1 = \frac{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L}$$

$$R_1 = \frac{\ln \left(\frac{0,264 \text{ m}}{0,254 \text{ m}} \right)}{2 \times 3,14 \times 15 \frac{W}{m \cdot C} \times 2,414 \text{ m}}$$

$$R_1 = 0,000169805 \frac{C}{W}$$

Sedangkan untuk nilai dari R_2 , dapat dihitung dengan rumus seperti yang ada dibawah ini :

$$R_2 = \frac{\ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right)}{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot L}$$

$$R_2 = \frac{\ln \left(\frac{0,483 \text{ m}}{0,264 \text{ m}} \right)}{2 \times 3,14 \times 0,61012 \frac{W}{m \cdot C} \times 2,414 \text{ m}}$$

$$R_2 = 0,06522 \frac{C}{W}$$

Sedangkan untuk mencari nilai dari R_3 , dapat dihitung dengan rumus seperti yang ada dibawah ini :

$$R_3 = \frac{\ln \left(\frac{r_4}{r_3} \right)}{2 \cdot \pi \cdot k_3 \cdot L}$$

$$R_3 = \frac{\ln \left(\frac{0,4876 \text{ m}}{0,483 \text{ m}} \right)}{2 \times 3,14 \times 0,9 \frac{W}{m \cdot C} \times 2,414 \text{ m}}$$

$$R_3 = 0,000755 \frac{C}{W}$$

Sehingga diperoleh nilai dari resistensi total yaitu :

$$R_{total} = R_i + R_o + R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{total} = (0,493631561 + 0,136740044 + 0,000169805 + 0,06522 + 0,000755) \frac{C}{W}$$

$$R_{total} = 0,696514 \frac{C}{W}$$

Setelah diperoleh nilai resistensi total maka Q_{loss} dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.3) sebagai berikut :

$$Q_{loss} = \frac{T_1 - T_5}{R_{total}}$$

$$Q_{loss} = \frac{275 \text{ }^{\circ}\text{C} - 27 \text{ }^{\circ}\text{C}}{0,696514 \frac{\text{ }^{\circ}\text{C}}{\text{W}}}$$

$$Q_{loss} = 356,059 \text{ W atau } 356,059 \text{ J/S}$$

$$Q_{loss} = 0,356 \text{ KW}$$

Jadi untuk nilai dari Q_{loss} yang diperoleh dari *cooling char water jacket* ini adalah $Q_{loss} = 0,356 \text{ KW}$ atau $356,059 \text{ J/S}$.

4.2.2 Analisis Perpindahan Panas

Setelah mendapatkan nilai laju perpindahan panas pada *cooling char*, maka temperatur di setiap lapisan dapat dihitung melalui (jaring jaring termal) dengan menggunakan persamaan yang telah ditentukan dibawah ini :

- **Menghitung T_2 (Temperatur silinder)**

Untuk menghitung T_2 menggunakan persamaan (2.11) konveksi seperti yang ada dibawah berikut :

$$T_2 = T_1 - \frac{Q}{h_i \cdot A_i}$$

$$T_2 = 275 \text{ }^{\circ}\text{C} - \frac{356.059 \text{ W}}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \times 0,20 \text{ m}^2}$$

$$T_2 = 99,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Diperoleh nilai suhu pada dinding dalam *cooling char* sebesar $T_2 = 99,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

- **Menghitung T_3 (Temperatur *water jacket*)**

Perhitungan T_3 menggunakan persamaan (2.10) konduksi seperti yang ada dibawah ini :

$$T_3 = T_2 - \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \times 3,14 \times k_1 \times L}$$

$$T_3 = 99,24 \text{ }^{\circ}\text{C} - \frac{356.059 \text{ W} \times \ln\left(\frac{0,264 \text{ m}}{0,254 \text{ m}}\right)}{2 \times 3.14 \times 15 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}} \times 2,414 \text{ m}}$$

$$T_3 = 99,17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Diperoleh nilai temperatur dinding *water jacket* sebesar $T_3 = 99,17 \text{ } ^\circ\text{C}$.

- **Menghitung T_4 (Temperatur Dinding dalam *Water jacket*)**

Untuk menghitung T_4 menggunakan persamaan (2.10) konduksi seperti yang ada dibawah berikut :

$$T_4 = T_3 - \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \times 3,14 \times k_2 \times L}$$

$$T_4 = 99,17 \text{ } ^\circ\text{C} - \frac{356.059 \text{ W} \times \ln\left(\frac{0,4826 \text{ m}}{0,264 \text{ m}}\right)}{2 \times 3,14 \times 0,6102 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{C}} \times 2,414 \text{ m}}$$

$$T_4 = 75,95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Didapat nilai temperatur dinding luar *water jacket* sebesar $T_4 = 75,95 \text{ } ^\circ\text{C}$

- **Menghitung T_5 (Temperatur dinding luar *water jacket*)**

Perhitungan T_5 dapat menggunakan persamaan (2.11) secara konveksi seperti yang ada dibawah berikut :

$$T_5 = T_4 - \frac{Q}{h_i \cdot A_o}$$

$$T_5 = 75,95 \text{ } ^\circ\text{C} - \frac{356.059 \text{ W}}{10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{C}} \times 0,73 \text{ m}^2}$$

$$T_5 = 27,27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Jadi nilai temperatur lingkungan sebesar $T_5 = 27,27 \text{ } ^\circ\text{C}$

Setelah dihitung perpindahan panas tersebut diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Tabel 4.4 dibawah berikut :

Tabel 4.4 Parameter Analisa Perpindahan Panas

No	simbol	Nilai	Satuan
1	Q_{loss}	356,059	(W)
2	T_2	99,24	($^\circ\text{C}$)
3	T_3	99,17	($^\circ\text{C}$)
4	T_4	75,95	($^\circ\text{C}$)
5	T_5	27,27	($^\circ\text{C}$)

Kemudian setelah membuat tabel analisa perpindahan panas, maka langkah selanjutnya adalah menentukan spesifikasi pompa yang digunakan untuk aliran debit sebanyak 1249 liter /jam, Adapun untuk laju aliran massa air yang digunakan dapat menggunakan persamaan (2.28) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\dot{m}_{air} &= Q \rho \\ &= 1249 \text{ liter/jam} \times 997 \text{ kg/m}^3 \\ &= 1,249 \frac{\text{m}^3}{\text{jam}} \times 997 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

$$\dot{m}_{air} = 1245,25 \text{ kg/jam}$$

$$\dot{m}_{air} = 0,346 \text{ kg/s}$$

Dari hasil perhitungan diatas dapat diperoleh laju aliran massa air yaitu = 0,346 kg/s.

Jadi untuk nilai volume yang diperoleh adalah $V = 1,249 \text{ m}^3$ dan laju aliran volume air $\dot{v}_{air} = 0.000346944 \text{ m}^3/\text{s}$ atau $3,46 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, kemudian setelah diperoleh nilai tersebut langkah selanjutnya adalah mencari dimensi dari hasil tersebut menggunakan persamaan (2.26) yang digunakan dalam mencari volume tabung :

$$\begin{aligned}V &= 3,14 \cdot (r_2^2 - r_1^2) \cdot L \\ 1,249 \text{ m}^3 &= 3,14 \cdot (r_2^2 - 264^2) \cdot 2,414 \text{ m} \\ \frac{1,249 \text{ m}^3}{3,14 \cdot 2,414 \text{ m}} &= (r_2^2 - 264^2) \\ r_2 &= 0,4842 \text{ m}\end{aligned}$$

Jadi untuk nilai dari jari-jari silinder water jacket adalah $r_2 = 0,4842 \text{ m}$, kemudian diubah ke dalam diameter maka diperoleh hasil $D = 0.9684 \text{ m}$. karena dimensi silinder water jacket ditemukan maka langkah selanjutnya mencari ukuran dipasaran. Dari diameter yang diperoleh ukuran yang mendekati adalah 0.9652 m , oleh karena itu diameter yang sesuai dengan ukuran pasaran ini yang digunakan. Untuk bahannya terbuat dari pipa *schedule stainless steel*. Adapun untuk hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Spesifikasi perhitungan volume *water jacket*

PERHITUNGAN VOLUME WATER JACKET				
No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Diameter silinder char	D1	528	mm
2	Diameter silinder water jacket	D2	968.4	mm
3	Panjang silinder	L	2414.080071	mm
4	Jari-jari silinder char	r1	264	mm
5	Jari-jari silinder Water Jacket	r2	484.2	mm
6	Luas lingkaran	L	517381.1646	mm ²
7	Volume tabung	V	1248999558.536	mm ³
8	Volume tabung	V	1.2490	m ³
9	Laju aliran massa air	\dot{m}_{air}	1245.25256	kg
10	Laju aliran massa air	\dot{m}_{air}	0.346	kg/s
11	Laju aliran volume	\dot{v}_{air}	0.000346944	m ³ /s
12	Laju aliran volume	\dot{v}_{air}	3.469443218	notasi ilmiah
13	Diameter silinder water jacket ukuran pasar	D2	965.2	mm

Berdasarkan hasil perhitungan volume yang digunakan pada *cooling char*, beserta dengan laju aliran volume atau debit, maka kapasitas pompa yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut ;

$$V = Q \times \frac{1}{60}$$

$$V = 1249 \text{ liter/jam} \times \frac{1 \text{ jam}}{60 \text{ menit}}$$

$$V = 20,81 \text{ liter/menit}$$

Langkah berikutnya mencari spesifikasi pompa yang dapat mengalirkan air sebesar 20,81 liter/menit. Berdasarkan ukuran tersebut kapasitas pompa yang ada dipasar memiliki kapasitas sebesar 21 liter/menit. Panjang *cooling char* yaitu 2,414 m, hasil perhitungan dimensi yang telah dibuat. Oleh karena itu, spesifikasi pompa yang dapat digunakan terdapat pada Tabel 4.6 sebagai berikut.

Tabel 4.6 Spesifikasi laju aliran air untuk debit air 1249 liter/jam

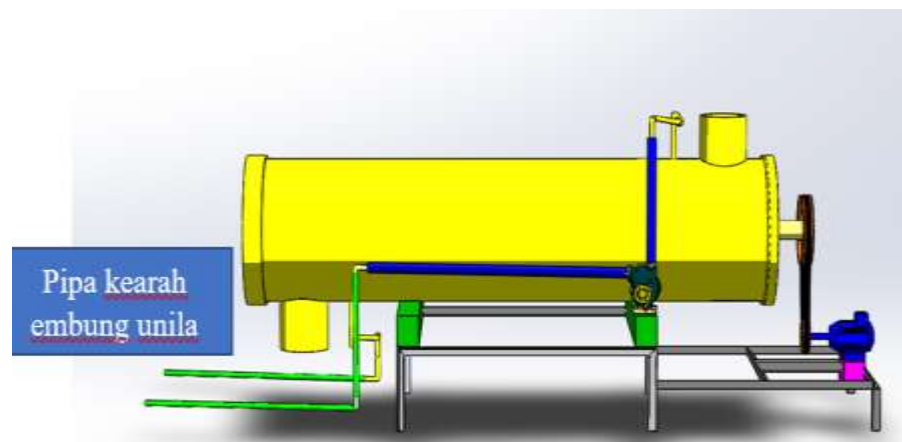
No	Parameter	Nilai
1	Kapasitas (L/Menit)	21
2	n (rpm)	1200
3	Head (m)	18
4	Power (Kw)	0.2

4.3 Pemodelan 3D *Cooling char*

Berdasarkan spesifikasi *cooling char* yang telah dihitung meliputi perhitungan mekanikal *cooling char*, dimensi *cooling char*, perhitungan *water jacket*, spesifikasi pompa untuk laju aliran air pada *water jacket* dan analisis *heat loss* serta perpindahan panas yang terjadi pada *cooling char*. Tahap selanjutnya adalah menggambar rancangan dari perhitungan ke dalam model 3D. Aplikasi yang digunakan dalam menggambar *cooling char* adalah *Software* berupa program *Solidwork*. Hasil *modelling cooling char* adalah sebagai berikut:

4.3.1 Desain *Cooling char water jacket*

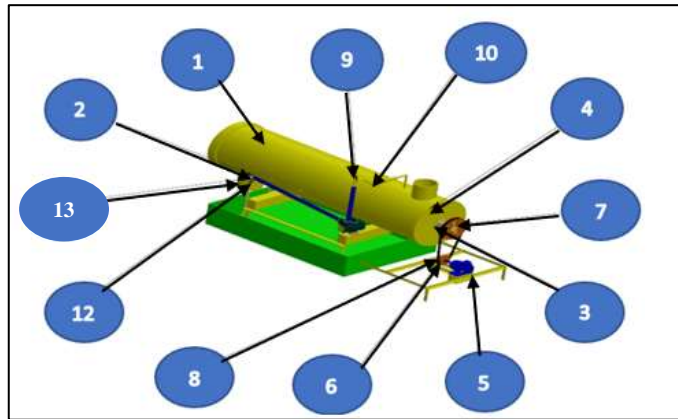
Spesifikasi *cooling char* dapat dilihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2 untuk diameter silinder screw, serta pada tabel 4.5 untuk perhitungan dimensi silinder *water jacket*. Desain ini dibuat berdasarkan spesifikasi tersebut yang telah dihitung dan digambar dalam bentuk 3D dan 2D. Desain *cooling char* tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3 sebagai berikut.



Gambar 4.3 Desain *cooling char water jacket*

Dari gambar *modeling desain cooling char water jacket* dapat dilihat bahwa nama *part* yang digunakan berupa pompa air dengan daya 200 watt untuk mengalirkan air ke dalam selimut *water jacket* pada *cooling char* dengan menggunakan pipa yang mengangkut air dari embung Unila menuju ke dalam selubung silinder.

Motor listrik digunakan sebagai penggerak utama dari *screw*, daya yang digunakan pada motor listrik sebesar 0,5 hp, sebagai pendorong material yang telah ditorefaksi dalam silinder *cooling char* seperti pada gambar 4.3. Tenaga motor listrik disalurkan dengan menggunakan pulley dan vanbelt. Nama-nama part *cooling char* yang telah di desain dengan *solidwork* terletak pada Gambar 4.4 sebagai berikut :



Gambar 4.4 Desain *Cooling char Water jacket* dengan part

Pada gambar desain *cooling char water jacket* merupakan gambar dari bagian sistem *cooling char* yang dibuat dengan menggunakan *solidwork*, untuk oemodelan 3 dimensinya. Keterangan nomor Gambar 4.4 pada desain *cooling char water jacket*, dari bagian *part modelling 3D cooling char* bagian desain ini terdapat pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Part *cooling chart water jacket*

No	Nama Part	Jumlah part
1	Tabung <i>Screw Cooling char</i> & rangka	1
2	Pompa air	1
3	<i>Screw cooling char</i>	1
4	Tutup <i>cooling char</i>	1
5	Motor listrik	1
6	Pulley motor listrik	1
7.	Pulley screw	1
8.	Vanbelt pulley	1
9.	Pipa Letter L <i>cooling char</i>	2
10.	Pipa	1
11.	Pipa letter L saluran air	1
12.	Pipa L saluran pengangkat air	1
13.	Pipa pengangkat air	1

4.3.2 Sistem penggerak dan pengaliran air ke *cooling char*

Cooling char ini menggunakan 1 unit *motor listrik* dengan daya 0.5 HP, Adapun motor listrik yang digunakan untuk menggerakkan *screw* ini memiliki daya 0,5 hp dikarenakan butuh daya yang kecil untuk menggerakkan *screw* karena rpm yang digunakan pada putaran *screw* cukup pelan yaitu 0.5 rpm. Berdasarkan hasil perhitungan torsi dan daya pada *screw*, maka motor listrik dapat digunakan untuk menggerakkan *screw* dengan kapasitas *cooling char* sebesar 42,21 kg/jam. sebagai sistem penggerak. *Cooling char* ini juga direncanakan dilengkapi dengan pompa dengan power 0.2 kw. Adapun untuk penggunaan power pompa sebesar 200 watt dikarenakan aliran debit air yang digunakan adalah 21 liter per menit.

Alasan digunakannya motor listrik dengan daya 0,5 Hp ini adalah karena dapat memutar *screw* dengan kecepatan yang relatif pelan. Adapun untuk perhitungan torsinya adalah sebagai berikut:

$$N = 0.5 \text{ hp} \cdot 0.7457 \text{ kw}$$

$$N = 0.373 \text{ kW}$$

berikutnya yaitu menghitung torsi dari *screw* dengan menggunakan persamaan (2.32) , maka :

$$T = \frac{N \cdot 6000}{2 \cdot \pi \cdot rpm}$$

$$T = \frac{0.373 \cdot 6000}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.5}$$

$$T = 712.45 \text{ Nm}$$

Jadi nilai torsinya adalah $T = 712.45 \text{ Nm}$

Setelah mencari nilai torsinya, maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai momen torsi yang digunakan, Adapun untuk persamaannya (2.33) adalah sebagai berikut :

$$T = \frac{60 \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$T = \frac{60 \cdot 0.373}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.5}$$

$$T = 0.0712 \text{ Nm}$$

Jadi nilai momen torsi yang memutar poros sebesar $T = 0.0712 \text{ Nm}$.

Untuk mengkonversi daya motor dari Hp ke kW. Untuk 1 Hp nilai nya adalah 0,746 Kw. Adapun untuk menghitung daya dari motor listrik yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$0,5 \text{ Hp} = 0,5 \times 0,746 \text{ kW}$$

$$= 0,373 \text{ kW}$$

$$N = 0,5 \times 0,746 \text{ kW}$$

Kemudian untuk mencari daya total yang dibutuhkan oleh *cooling char* dari motor dan pompa :

$$P_{\text{total}} = N + P_{\text{pompa}}$$

$$P_{\text{total}} = 0,373 + 0,2$$

$$P_{\text{total}} = 0,573 \text{ kW}$$

Jadi daya total yang dibutuhkan oleh *cooling char* adalah 0,573 kW.

Menghitung kalor perpindahan panas pada water jacket, Hubungan pada kalor sensibel saat melakukan proses pemodelan 3D berlaku untuk menghitung nilai kalor pada *cooling char*, sehingga dapat dihitung dengan menggunakan rumus menurut (Nailul dkk., 2020) sesuai dengan Persamaan (2.12) sebagai berikut :

$$Q_{\text{arang}} = Q_{\text{serap}}$$

$$m \cdot cp \cdot (T_{h2} - T_{h1}) = m \cdot cp \cdot (T_{c2} - T_{c1})$$

$$0,011725 \text{ kg/s} \cdot cp \cdot (275-95)^{\circ}\text{C} = 0,346 \text{ kg/s} \cdot 4.184 \cdot (69-27)^{\circ}\text{C}$$

$$2,1105 \text{ cp} = 60.77 \text{ kJ/s}$$

$$Cp = 28.79345 \text{ Kj/kg. }^{\circ}\text{C}$$

Maka, nilai dari Q_{arang} :

$$Q_{\text{arang}} = m \cdot cp \cdot (T_{h2} - T_{h1})$$

$$Q_{\text{arang}} = 0,011725 \text{ kg/s} \cdot 28.79345 \text{ Kj/kg. }^{\circ}\text{C} \cdot (275-95)^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{arang}} = 60.77 \text{ kJ/s}$$

Jadi untuk nilai $Q_{\text{arang}} = 60.77 \text{ kJ/s}$

Setelah mencari nilai Q_{arang} , maka langkah selanjutnya adalah mencari nilai dari Q_{serap} , Adapun untuk perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$Q_{\text{serap}} = m \cdot cp \cdot (T_{c2} - T_{c1})$$

$$Q_{\text{serap}} = 0,346 \text{ kg/s} \cdot 4.184 \text{ Kj/kg} \cdot ^\circ\text{C} \cdot (69-27)^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{serap}} = 60.77 \text{ kj/s}$$

Jadi untuk nilai $Q_{\text{serap}} = 60.77 \text{ kj/s}$

Menghitung emisivitas penukar kalor, Adapun rumus yang digunakan untuk menghitung emisivitas penukar kalor pada *cooling char* ini dengan menggunakan persamaan (2.34) sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{\text{Laju perpindahan kalor arang}}{\text{Laju perpindahan kalor serap (air)}}$$

$$\varepsilon = \frac{60.77 \text{ kj/s}}{60.77 \text{ kj/s}}$$

$$\varepsilon = 1$$

Jadi, nilai emisivitasnya $\varepsilon = 1$, maka aliran debit air 1249 liter/jam dapat menyerap panas dari produk yang tertorefaksi. Sehingga arang yang telah tertorefaksi dapat didinginkan dengan laju aliran debit air tersebut. Perhitungan perpindahan kalor ini penting dilakukan agar dapat mengetahui nilai dari emisivitasnya yang terjadi didalam *cooling char* yang telah didesain.

4.3.3 Cooling char sistem water jacket Skala Pilot model screw

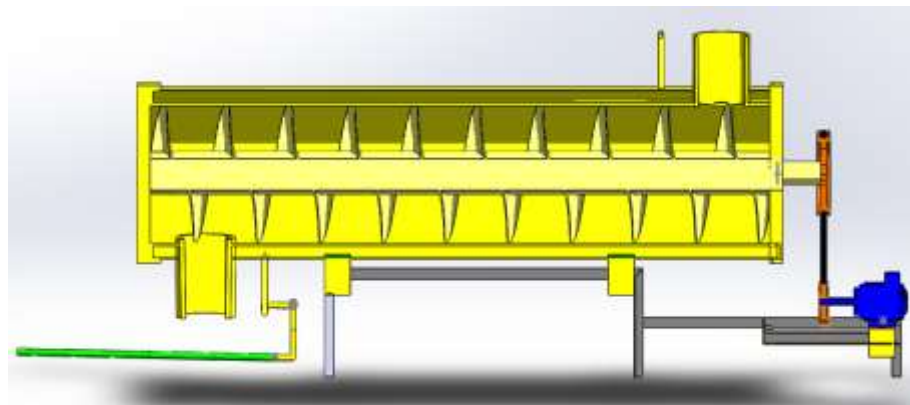
Cooling char kontinu skala pilot model screw dengan tipe *water jacket* dirancang secara kontinu dengan skala pilot, artinya *cooling char* ini berfungsi untuk tahap uji coba sebelum masuk ke tahap produksi yang dijalankan secara kontinu dengan menggunakan tipe pendingin selimut air (*water jacket*).

Alasan dipilihnya *cooling char* dengan menggunakan *screw* yaitu dikarenakan salah satu fungsinya yang dapat berjalan secara kontinu serta mengatur waktu tahan yang lebih sederhana dimana *screw* dapat mendorong *biochar* yang ingin didinginkan dari reaktor torefaksi. Kemudian dapat dihitung secara teoritis untuk dimensinya.

Dipilihnya tipe pendingin *water jacket* merupakan salah satu alasan dipilihnya *cooling char* bermodel *screw* karena lebih sederhana, hal

tersebut dikarenakan model screw cocok dengan tipe pendingin *water jacket* dimana *biochar* langsung dimasukkan ke dalam *cooling char* dan berkontak langsung dengan biomassa, dengan adanya *screw* di dalam *cooling char*, nantinya akan mendorong *biochar* yang masuk ke dalam silinder, selama proses pendinginan. *Cooling char* diharapkan dapat mendinginkan produk torefaksi berbagai macam biomassa, tidak hanya biomassa yang hanya ada pada TPST (Sampah Daun) tapi juga berbagai macam biomassa lainnya seperti serbuk gergaji, tandan kosong kelapa sawit, bonggol jagung, dan biomassa lainnya yang berpotensi untuk menghasilkan energi dan nilai jual yang tinggi.

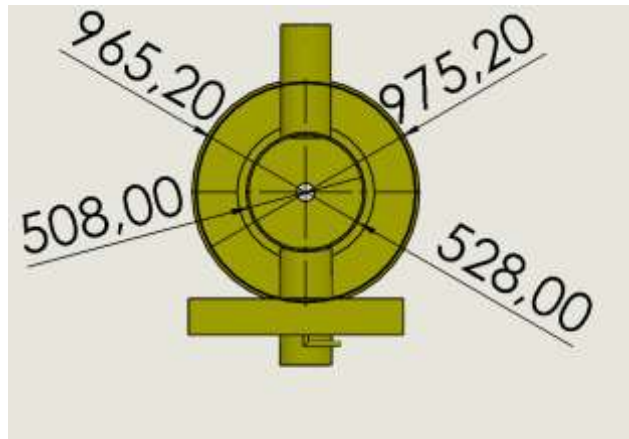
Cooling char dengan skala pilot ini merupakan tahap persiapan sebelum masuk ke skala produksi. Adapun Gambar 4.5 dari *screw* yang di desain dengan menggunakan solidwork adalah sebagai berikut:



Gambar 4.5 Desain *screw cooling char*

Cooling char dirancang dengan kapasitas awal sebesar 42.21 kg/jam. Dimana nilai tersebut diasumsikan dimana timbulan sampah unila tiap harinya yang mencapai ± 769 kg/jam. Timbulan sampah tersebut 40% nya terdiri dari sampah jalanan yang didominasi oleh sampah daun yang telah berguguran di area kampus.

Adapun untuk dimensi gambar dari *cooling char* yang telah dihitung dimensi silinder water jacket berdasarkan laju aliran massa dapat dilihat pada gambar 4.6 sebagai berikut :



Gambar 4.6 Desain hasil perhitungan diameter silinder

Kemudian dilanjutkan dengan asumsi dimana jam kerja minimal adalah 4 jam maka didapatkan nilai kapasitas sebesar 80 kg/jam tersebut. Dimana kapasitas tersebut diasumsikan nilai dari produk torefaksi sekitar 70% dari 67 kg/jam kapasitas reaktor torefaksi. Kapasitas ini dibuat dengan kapasitas semaksimal mungkin guna mengantisipasi bila terjadi timbulan *biochar* yang menumpuk. *Cooling char* ini diharapkan kedepannya dapat tidak hanya mengolah *biochar* hasil produk torefaksi di Universitas Lampung, namun juga mendinginkan *biochar* dari sampah kota. Hal ini merupakan bentuk dukungan Universitas Lampung dalam membantu memajukan kota Bandar Lampung. Dalam perhitungan mekanikal, hal-hal yang mempengaruhi perancangan nilai kapasitas dari *cooling char* antara lain berbanding lurus dengan nilai diameter *screw*, panjang *cooling char*, dan verifikasi perhitungan dimensi *cooling char*.

Semakin besar kapasitas *cooling char*, semakin besar dimensi yang diperoleh untuk perhitungan *cooling char*. Selain itu, dilakukan perhitungan *water jacket*, spesifikasi pompa, perhitungan *heat loss*, dan juga analisis perpindahan panas. Kemudian untuk *outlet* dari *cooling char* ini dibuat dengan sistem terbuka. Hal ini dilakukan agar material tidak menumpuk dibagian *outlet cooling char* saat *biochar* yang telah didinginkan keluar.

Adapun untuk material yang digunakan pada *screw* ini adalah baja pejal untuk poros dan pelat baja untuk ulir *screw*nya. Kemudian untuk bagian tabung cooling char dibuat dengan material berbahan baja *seamless*. Selain itu juga untuk material yang digunakan oleh pipa berupa pipa pvc yang digunakan untuk mengalirkan air kedalam sistem *water jacket*.

Setelah itu menghitung energi yang dibutuhkan oleh *cooling char*, dimana energi ini digunakan untuk mengetahui energi pada *cooling char* yang digunakan berdasarkan dimensi yang telah dirancang dan analisis perhitungan yang telah diperoleh. Untuk mengetahui perhitungan energi yang dibutuhkan ini dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Perhitungan energi yang dibutuhkan

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	laju produksi biochar yang didinginkan	m_{arang}	0,01175	kg/s
2	Panas spesifik arang	$C_{p\ arang}$	28.79345	kJ/kg.C
3	Temperatur produk torefaksi	T_t	275	°C
4	Temperatur produk setelah didinginkan	T_c	95	°C
5	Laju aliran massa air	\dot{m}_{air}	0.348	Kg/s
6	Temperatur air masuk	$T_{w\ in}$	27	°C
7	Temperatur air keluar	$T_{w\ out}$	69	°C
8	Panas spesifik air	$C_{p\ air}$	4,184	Kj/kg.c

1. Produk torefaksi arang (Q_{arang})

Q_{arang} dibutuhkan dalam proses pendinginan dari temperatur awal produk torefaksi masuk menuju ke temperatur pendinginan yaitu 95°C. Untuk menghitung Q_{arang} yang digunakan persamaan (2.12) sebagai berikut:

$$Q_{arang} = m_{arang} \cdot c_p \cdot (T_{h2} - T_{h1})$$

$$Q_{arang} = 0,011725 \text{ kg/s} \cdot 28.79345 \text{ Kj/kg. } ^\circ\text{C} \cdot (275-95)^\circ\text{C}$$

$$Q_{arang} = 60,77 \text{ kj/s}$$

Maka, energi yang dibutuhkan dalam proses pendinginan produk torefaksi berupa arang sebesar 60,77 kW. Setelah menemukan energi yang dibutuhkan arang, maka selanjutnya mencari Q_{serap} .

2. Air yang menyerap panas dari produk torefaksi (Q_{serap})

Q_{serap} merupakan energi yang dibutuhkan untuk menyerap panas dari produk torefaksi. Adapun untuk menghitung Q_{serap} digunakan persamaan (2.12) berikut:

$$Q_{\text{serap}} = \dot{m}_{\text{air}} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{\text{serap}} = 0,346 \cdot 4,184 \cdot (69-27)$$

$$Q_{\text{serap}} = 60,77 \text{ kJ/s}$$

Maka, energi yang dibutuhkan dalam proses menyerap panas dari produk torefaksi adalah sebesar 60,77 kW.

3. Total Energy

Total energi merupakan total energi yang dibutuhkan selama proses pendinginan berlangsung dari awal hingga akhir. Adapun untuk total energi yang diperoleh dapat menggunakan persamaan (2.35) yaitu sebagai berikut :

$$Q_{\text{arang}} = Q_{\text{serap}}$$

$$60,77 \text{ kW} = 60,77 \text{ kW}.$$

Sehingga setelah semua kebutuhan daya selama proses pendinginan biochar didapatkan, nilai nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil analisis kebutuhan energi

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Daya Produk torefaksi yang didinginkan	Q_{arang}	60,77	kW
2	Daya air yang digunakan dalam menyerap panas dari produk torefaksi	Q_{serap}	60,77	kW
3	Total energi	Q_{total}	60,77	kW

Setelah melakukan perhitungan terhadap analisis kebutuhan daya nya, maka langkah berikutnya adalah membuat neraca masa *cooling char* yang dirancang. Karena kadar air biomassa yang masuk kedalam reaktor adalah 10% dan M_{daf} atau massa keluar dari reaktor torefaksi berkisar 70%.

Dimana massa tersebut masuk ke dalam *cooling char*, maka massa yang masuk dan keluar dari *cooling char* akan bernilai sama. Sehingga nilai dari MY_{daf} *cooling char* bernilai 1% dan *moisture*nya tidak dihitung lagi di *cooling char*, karena bernilai sama dengan *moisture* pada reaktor torefaksi. Neraca massa merupakan skema dari kesetimbangan massa yang ada pada suatu sistem. Sistem yang digunakan pada neraca massa dan energi ini digunakan sebagai salah satu Parameter awal perhitungan kesetimbangan massa dan energi dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Parameter Awal kesetimbangan massa dan energi.

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	laju aliran <i>biochar</i> masuk	W_f	0,011725	kg/s
2	Temperatur <i>biochar</i> masuk	$T_{c\ in}$	275	°C
3	Temperatur <i>biochar</i> keluar	$T_{c\ out}$	95	°C
4	Temperatur air masuk	$T_{w\ in}$	27	°C
5	Temperatur air keluar	$T_{w\ out}$	69	°C
6	Panas Spesifik arang	$C_{p\ arang}$	28,79345	$\frac{kJ}{kg\ ^\circ C}$
7	Panas spesifik air	$C_{p\ water}$	4,184	$\frac{kJ}{kg\ ^\circ C}$
8	Kadar air biomassa masuk reaktor	M	10	%
9	<i>Mass yield</i> biomassa dry ash free	MY_{daf}	70	%

Pendinginan bertujuan untuk menstabilkan suhu tanpa mengubah struktur atau massa *biochar* secara signifikan. Menurut (Basu, 2013) menghitung laju aliran massa yang keluar dari *cooling char* dapat digunakan persamaan (2.31) sebagai berikut:

$$W_t = W_f MY_{daf}(1-M)$$

$$W_t = 0,011725 \frac{kg}{s} \times 1 \times (1 - 0)$$

$$W_t = 0,011725 \text{ kg/s}$$

Diperoleh nilai laju aliran massa keluar dari *cooling char* sebesar 0,011725 kg/s.

Perhitungan laju aliran massa kondensasi dari panas yang diserap oleh air maka digunakan persamaan (2.29) sebagai berikut ini :

$$\dot{m}_{cond} = \frac{\dot{Q}}{h_{fg}}$$

Berdasarkan hasil perhitungan untuk laju perpindahan panas yang menyerap air $\dot{Q} = 60,77$ kJ/s, dan entalpi penguapan air pada suhu 275 °C $h_{fg} = 1574,5$ kJ/kg (Tabel A-4). Maka untuk laju aliran massa terkondensasi adalah

$$\dot{m}_{cond} = \frac{60,77 \text{ kJ/s}}{1574,5 \text{ kJ/kg}} \text{ s}$$

$$\dot{m}_{cond} = 0,038 \text{ kg/s.}$$

Jadi untuk laju aliran massa yang terkondenasi adalah $\dot{m}_{cond} = 0,038$ kg/s. Kemudian untuk nilai $\dot{m}_{air \text{ keluar}}$ adalah sebagai berikut dengan menggunakan persamaan (2.37) seperti dibawah ini:

$$\dot{m}_{air \text{ keluar}} = \dot{m}_{air} - \dot{m}_{cond}$$

$$\dot{m}_{air \text{ keluar}} = 0,346 \text{ kg/s} - 0,038 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{air \text{ keluar}} = 0,307 \text{ kg/s.}$$

Jadi laju aliran massa air yang keluar dari *cooling char* setelah proses kondensasi penyerapan air terhadap char yang didinginkan $\dot{m}_{air \text{ keluar}}$ adalah 0,307 kg/s.

Sehingga setelah semua nilai kesetimbangan massa dan energi didapatkan, nilai nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil perhitungan kesetimbangan massa *cooling char*.

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Laju aliran massa biochar keluar <i>cooling char</i>	W_t	0,011725	kg/s
2	Laju aliran massa air masuk	\dot{m}_{air}	0,346	kg/s
3	Laju aliran massa terkondensasi uap air	\dot{m}_{cond}	0,038	kg/s

Setelah ditemukan hasil kesetimbangan massa dan energi, maka langkah selanjutnya yaitu menghitung Q_{sistem} dari *cooling char* yang telah dirancang dengan menggunakan persamaan (2.38) sebagai berikut:

$$Q_{\text{sistem}} = Q_{\text{masuk}} - Q_{\text{keluar}}$$

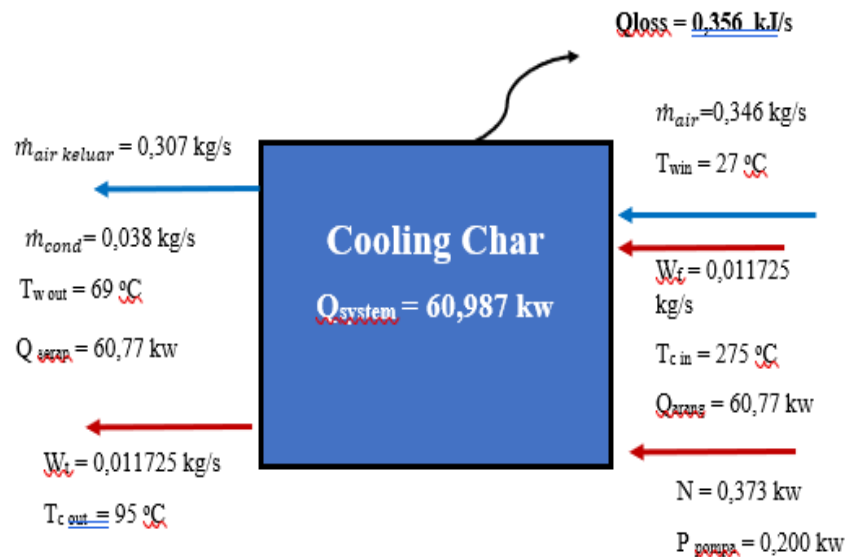
$$Q_{\text{sistem}} = (Q_{\text{total}} + N + P_{\text{pompa}}) - (Q_{\text{loss}})$$

$$Q_{\text{sistem}} = (60,77 \text{ kw} + 0,373 \text{ kw} + 0,200 \text{ kw}) - (0,356 \text{ Kw})$$

$$Q_{\text{sistem}} = 60,987 \text{ Kw atau } 61 \text{ Kw}$$

Jadi untuk nilai dari $Q_{\text{sistem}} = 60,987 \text{ Kw atau } 61 \text{ Kw}$.

Kemudian setelah menghitung nilai dari Q_{sistem} dari cooling char yang telah dirancang, maka langkah selanjutnya adalah membuat neraca massa dan energi dari perhitungan yang telah ditemukan. Oleh karena itu Parameter awal dan hasil dari perhitungan kesetimbangan massa dan energi pada rancangan *cooling char*, serta neraca massa yang diperoleh yaitu untuk laju aliran massa air yang telah diperoleh dan laju aliran massa yang terkondensasi dimana laju aliran massa terkondensasi merupakan laju aliran massa air yang hilang akibat penyerapan panas pada char yang telah ditorefaksi. maka dapat digambarkan neraca massa dan energi. Ilustrasi dari neraca massa dan energi ini dapat dilihat pada Gambar 4.7. dibawah ini.



Gambar 4.7 Neraca massa dan energi *cooling char* yang dirancang.

Dari neraca massa *cooling char* diatas, dapat diperoleh bahwa laju aliran massa air yang masuk kedalam *cooling char* adalah 0,346 kg/s

dengan debit aliran air 1249 liter/jam. Kemudian laju aliran massa dari produk tertorefaksi adalah 0,011725 kg/s. karena pada *cooling char* ini berfungsi untuk menurunkan suhu dari produk tertorefaksi, sehingga massa yang keluar akan bernilai tetap.

Sementara laju aliran massa yang terkondensasi diperoleh dari laju perpindahan panas yang menyerap air sebesar 60,77 kJ/s dibagi dengan entalpi penguapan air pada suhu 275 °C yang terjadi pada *biochar* $h_{fg} = 1574,5$ kJ/kg. sehingga diperoleh hasil laju aliran massa kondensasi uap sebesar $\dot{m}_{cond} = 0,038$ kg/s.

Setelah menemukan neraca massa pada *cooling char*, maka langkah berikutnya yaitu membuat neraca energi pada sistem pendinginan. Pada neraca energi ini terdapat resistensi termal yang diukur dari jari-jari diameter silindernya. Hal ini dilakukan agar dapat mengetahui nilai Q_{loss} total yang berasal perubahan suhu dibagi dengan penjumlahan resistensi termal pada *cooling char*.

Pada gambar 4.7 dijelaskan seberapa banyak energi yang dibutuhkan oleh *cooling char*. Pada awalnya energi yang dibutuhkan untuk mendinginkan produk tertorefaksi (Q_{arang}) adalah 60,77 kW. Kemudian energi yang dibutuhkan air untuk menyerap panas dari produk tertorefaksi adalah 60,77 kW. Total energi yang dibutuhkan sebesar 60,77 kW. Setelah menemukan kebutuhan total energi yang dibutuhkan oleh *cooling char*, maka langkah berikutnya yaitu mencari nilai Q_{system} pada *cooling char* yang dirancang. Nilai Q_{system} sebesar 60,987 kw, sedangkan nilai Q_{loss} sebesar 0,356 kW.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan maka dapat disimpulkan bahwa :

1. Model yang dipilih untuk *cooling char* yang dirancang dan dibuat model 3D adalah *cooling char* sistem pendingin *water jacket* dengan kapasitas 42.21 kg/jam dan waktu tahan (*residence time*) selama 20 menit. Rancangan tersebut dibuat dengan asumsi bahwa *biochar* yang digunakan adalah produk yang telah tertorefaksi.
2. Hasil dari perhitungan spesifikasi teknis *cooling char* menunjukkan bahwa kecepatan putar screw sebesar 0,5 rpm. Adapun hasil dari perhitungan spesifikasi *cooling char* dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5.1 Hasil perhitungan mekanikal dimensi *cooling char*

No	Data Yang dihitung	Hasil perhitungan	Satuan
1	Panjang <i>Cooling char</i>	2,414	m
2	Diameter <i>Cooling char</i>	0,508	m
3	Diameter <i>Screw</i>	0,48282	m
4	Jarak <i>Pitch</i>	0,241	m
5	Diameter <i>inlet & outlet cooling char</i>	0,200	m
6	Diameter <i>inlet & outlet water jacket</i>	0,020	m

3. Hasil perhitungan *heat loss* yang telah diperoleh yaitu Q_{loss} 0,356 KW. Dan memiliki resistensi termal sebanyak 5 dimana nilai dari R_i 0,49363 °C/W, R_1 0,000169 °C/W, R_2 0,0652 °C/W, R_3 0,000755 °C/W dan R_o 0,136 °C/W. Perhitungan ini dilakukan dengan asumsi bahwa temperatur material di *cooling char* sebesar 275 °C yang telah keluar dari reaktor torefaksi, , $T_{\text{car out}} = 95$ °C, $T_{\text{air, In}} = 27$ °C , $T_{\text{air, Out}} = 69$ °C, $\dot{m}_{\text{air}} = 0,346$ kg/s dan daya pompa 200 watt, dimana air yang keluar ini diperoleh dari perhitungan yang telah dilakukan pada desain *cooling char*.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dari hasil rancangan *cooling char* diatas, maka ada beberapa saran sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat dilanjutkan dan dikembangkan sebagai *cooling char* pada sistem torefaksi skala pilot, agar hasil dari perhitungan dan perancangan *cooling char* ini dapat digunakan untuk mendinginkan produk *biochar* dari hasil torefaksi, serta dapat difabrikasi untuk kebutuhan TPST Universitas Lampung.
2. Setelah dilakukan perhitungan terkait dengan dimensi dan perancangan dengan *cooling char* dengan solidwork, diharapkan ke depannya, setelah desain dipabrikasi, dapat dicatat hasil pengujian secara eksperimental sehingga hasil pendinginan dapat dibandingkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifin, Muhammad. (2022). Desain Screw Conveyor Pada Mesin Ekstruder Pelet Apung Dengan Kapasitas 100 kg/jam. Skripsi. Universitas Medan Area. Medan.
- Apriyanto, A., (2020). Torefaksi Kontinu *Municipal Solid Waste* (MSW) pada screw conveyor reaktor dengan sistem pemanas heat transfer oil. *Jurnal Teknik Sains*, 5 (1), 35-43.
- Apriyanto, A., No, J. I. B., & No, J. S. B. (2018). Rancang Bangun Dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Jurnal Tesis Program Pasca Sarjana Teknik Mesin Universitas Negeri Lampung*. Hal, 22-23.
- Cahyanti, N. M., dkk. (2020) *Biomass Torrefaction: An overview on process parameters, economic and enviromental aspects and recents advancements*. *Journal Bioresource Technology*, 122737.
- Chen, H. W., dkk. (2021). Progress in biomass torrefaction: Principles, Applications and challenges. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/peccs, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2-32.
- Faris Muhammad (2017). Perancangan dan Simulasi Termal Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Untuk Produksi Bahan Bakar Padat Dari Sampah Kota. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Fathoni, A., Anwar, A. 2020. Perancangan Mini Forklip Manual Dengan Metode DFMA (Design For Manufacture And Assembly). *Jurnal APTEK* 12(2): 114-120
- Febrianti, F., dkk. (2020). Sistem Pakar Untuk Mengidentifikasi Kerusakan Pada Sistem Pendinginan Air (*Water Cooling System*) Mesin Mobil Dengan Metode *Dempster Shafer*. *Jurnal CyberTech*. 10 (10), 1-12.
- Firmansyah, T.I., Prahasto, T. (2015). Perancangan Mekanisme Rolling Mesin Untuk Adonan Pizza. *Jurnal Teknik Mesin S-1*, Vol. 3, No. 3.
- Intan, N. (2015). Alat Peraga Laju Hantaran Kalor Konduksi, Prosiding Seminar Nasional Fisika dan Pendidikan Fisika (SNFPF) Ke-6 2015 269 Volume 6 Nomor 1 2015 ISSN : 2302-7827. Program Studi Pendidikan Fisika PMIPAFKIP UNS Surakarta, Indonesia.

- Markus, Faldian. (2019). *Analysis Of Double Pipe Heat Exchanger Performance By Utilizing The Heat Of Discharge Compressor Pipe*. Seminar Nasional Edusainstek. FMIPA UNIMUS. Politeknik Negeri Bandung. Bandung.
- Muhammad Rahim (2020). Perencanaan Penukar Kalor Pada Sistem Ventilasi Pada Ruang Workshop Pada Kapal MT Kasim. Skripsi. Jurusan Teknik Sistem Perkapalan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Nailul Atifah, Bambang Herlambang, Edi Tri Astuti, Yayan Mulyana, Perdamean Sebayang. (2020). Analisis Perpindahan Panas Pada *Water jacket* Di Ruang Bakar Primer Incinerator Sampah Kota. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 3, No 2. Hal 63-75.
- Nurazizah Patmawati (2022). Modifikasi Sistem Inlet dan Pendingin Reaktor Torefaksi Biomassa Kontinu Tipe Tubular. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Nursyahbani Putri Parahdiba, dkk. (2021). Rancang Bangun Mesin Ektrusi Pembuat Filamen Dengan Sistem Screw Conveyor. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin. Politeknik Nesgeri Ujung Pandang. Makassar.
- Ong, H. C., Yu, K. L., Chen, W. H., Pillejera, M. K., Bi, X., Tran, K. Q., ... & Pétrissans, M. (2021). Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152, 111698.
- Piersa, P., Unyay, H., Szufa, S., Lewandowska, W., Modrzewski, R., Ślęzak, R., & Ledakowicz, S. (2022). An Extensive Review And Comparison Of Modern Biomass Torefaksi Reactors Vs. Biomass Pyrolysis — Part 1. *Energies*, 15(6), 2227.
- Prastika, A., & Muzakhar, A. S. S., (2023). Analisis Pemanfaatan Limbah Biomassa sebagai Basis Pengembangan Energi Terbarukan di Kabupaten Jember. *Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, 8(1), 19-29.
- Prabir Basu. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction practical design and theory*. Elsevier Inc.
- Rizal, A., dkk. (2016). Peningkatan Nilai Kalor Pellet Biomassa Cocopeat sebagai Bahan Bakar Terbarukan dengan Aplikasi Torefaksi. *Journal of Agro-based Industry*. 33 (1), 17-23.
- Ramachandra K. Patil, B. W. Shende, Prasanta K. Ghosh (1982). *Designing a Helical Coil Heat exchanger*. *Chemical Engineering*.

- Reski, H. P., Norman, I., Sulardjaka. (2023). Analisis Performansi Screw Mesin Pelet Apung Wira Karya Fabrikasi. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 11, No. 4. Hal, 255-264.
- Rohmah Lailiyatur (2022). Pentingnya Perawatan *Heat exchanger* Dalam Menunjang Daya Tahan Msin Induk Di Kapal KM Tosana Line XXV. Jurusan Pelayaran . Makassar.
- Sarker, T. R., Nanda, S., Dalai, A. K., & Meda, V. (2021). A Review Of Torrefaction Technology For Upgrading Lignocellulosic Biomass To Solid Biofuels. *BioEnergy Research*, 14, 645-669.
- Subarkah, R., dkk. (2020). Rancang Bangun Sistem Pendingin Motor Listrik Menggunakan *Water jacket* lilitan pipa pipih. *ational Conference of Industry, Engineering and Technology*. Vol. 1.
- Taufiqur Rokhman, (2015). Perancangan Alat Uji Kemampukerasan Jominy Test Untuk Laboratorium Teknik Mesin Universitas Islam “45” Bekasi. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*. Vol. 3, No. 1, Hal 68 – 80.
- Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, And Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9, 728140.
- Xiodong, si, Yang , H., dkk. (2012). Heat transfer in the rotary ash cooler with residual char combustion considered. *Fuel Processing Technology*, 61–66. doi:10.1016/j.fuproc.2011.10.022.
- Yusuf Ardy Muhammad (2023). Karakteristik *Biochar* Dari Sampah Daun Di Lingkungan Universitas Lampung Melalui Proses Torefaksi. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Yunus A. Cengel. (2006). *Heat and Mass Transfer: A Practical Aproach*. Blacklick Publishers.
- Yunus A. Cengel. (2019), dkk. *Thermodynamics : Ninth Edition, An Engineering Aproach*.
- Zainuri, Ach Muhib. 2009. *Mesin Pemindah bahan*. Penerbit Andi : Yogyakarta.
- Zulkri Kurniawansyah (2022). Analisis *Heat Balance* Pada Reaktor Torefaksi Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket*. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Bandar Lampung.