



TUGAS AKHIR - TF 181801

**ANALISIS PENGARUH KADAR AIR BAHAN
BAKU, SUHU, DAN TEKANAN TERHADAP
KARAKTERISTIK *HYDROCHAR* PADA PROSES
*HYDROTHERMAL CARBONIZATION***

ZAKIYYATUL JIBILLAH
NRP 02311745000045

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T
Erna Septyaningrum, S.T, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019



FINAL PROJECT - TF 181801

***ANALYSIS OF FEEDSTOCK MOISTURE
CONTENT, TEMPERATURE, AND PRESSURE
TO HYDROCHAR CHARACTERISTIC OF
HYDROTHERMAL CARBONIZATION PROCESS***

ZAKIYYATUL JIBILLAH
NRP 02311745000045

Supervisor
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T
Erna Septyaningrum, S.T, M.T

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Zakiyyatul Jibillah
NRP : 02311745000045
Departemen : Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS PENGARUH KADAR AIR BAHAN BAKU, SUHU, DAN TEKANAN TERHADAP KARAKTERISTIK *HYDROCHAR* PADA PROSES *HYDROTHERMAL CARBONIZATION*”** adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 6 Mei 2019
Yang membuat pernyataan,

Zakiyyatul Jibillah
NRP. 02311745000045

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

ANALISIS PENGARUH KADAR AIR BAHAN BAKU,
SUHU, DAN TEKANAN TERHADAP KARAKTERISTIK
HYDROCHAR PADA PROSES *HYDROTHERMAL*
CARBONIZATION

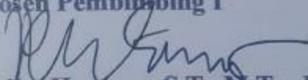
Oleh:

Zakiyyatul Jibillah

NRP. 02311745000045

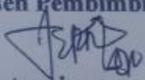
Surabaya,

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I


Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

NIP. 19761223 200501 1 001

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II


Erna Septyaningrum S.T., M.T.

NPP.1992201912073

Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS


Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.

NIP. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA PENGARUH KADAR AIR BAHAN BAKU,
SUHU, DAN TEKANAN TERHADAP KARAKTERISTIK
HYDROCHAR PADA PROSES HYDROTHERMAL
CARBONIZATION
TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ZAKIYYATUL JIBILLAH
NRP. 02311745000045

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. (Pembimbing I)
2. Erna Septyaningrum, S.T., M.T. (Pembimbing II)
3. Ir. Sarwono, M.M. (Ketua Penguji)
4. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. (Penguji I)
5. Prof. Dr.Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. (Penguji II)

SURABAYA

**ANALISIS PENGARUH KADAR AIR BAHAN BAKU,
SUHU, DAN TEKANAN TERHADAP KARAKTERISTIK
HYDROCHAR PADA PROSES HYDROTHERMAL
CARBONIZATION**

Nama : Zakiyatul Jibillah
NRP : 02311745000045
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Abstrak

HTC adalah proses konversi termal untuk mengubah biomassa ke bahan bakar padat yang disebut *hydrochar*. Proses HTC dapat menjadi metode alternatif dalam menyelesaikan masalah kebutuhan energi dan pengelolaan sampah di Indonesia. Beberapa variabel yaitu kadar air bahan baku, suhu, dan tekanan mempengaruhi proses konversi biomassa menjadi *hydrochar*. Tugas akhir ini dilakukan simulasi proses HTC pada sampah kota di Surabaya untuk mengetahui efek variasi kadar air bahan baku, suhu, dan tekanan proses terhadap karakteristik *hydrochar* yang dihasilkan. Berdasarkan hasil simulasi didapatkan hasil berupa penurunan *hydrochar yield* dari 70,2% menjadi 63,6% untuk kadar air 58,9% dengan peningkatan suhu dari 180-260°C, sementara kadar air 68,9% dan 78,9% dengan peningkatan suhu yang sama dihasilkan *yield* 70,47%-66,68% dan 71,14%-65,3%. HHV mengalami peningkatan dari 19,43MJ/Kg menjadi 22,35 MJ/Kg pada kadar air 58,9% dengan peningkatan suhu dan tekanan dari 180-260°C dan 10-47 bar. Efek yang sama juga ditunjukkan pada kadar air 68,9% dan 78,9% dimana HHV meningkat sebesar 2,41 M/Kg dan 2,33 MJ/Kg. Hal tersebut membuktikan jika kadar air, suhu, dan tekanan mempengaruhi jumlah dan kandungan energi *hydrochar*.

Kata Kunci : HHV, HTC, *hydrochar*, *hydrochar yield*

**ANALYSIS OF FEEDSTOCK MOISTURE CONTENT,
SUHU, AND PRESSURE TO HYDROCHAR
CHARACTERISTIC AT HYDROTHERMAL
CARBONIZATION PROCESS**

Name : Zakiyyatul Jibillah
NRP : 02311745000045
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisors : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

Abstract

HTC is thermal conversion process which to change biomass to solid fuel, the solid fuel is called hydrochar. HTC can be alternative solution for accomplish need of energy and garbage management. Variable like temperature, pressure, and moisture content interfere the hydrochar product. Based on simulation, hydrochar yield decrease to 63,6% from 70,2% this result is obtained at moisture content 58,9% with increasing suhu from 180°C to 260°C. At moisture content 68,9% and 78,9% with same suhu generated yield 70,47%-66,68% and 71,14%-63,3%. In the other hand HHV increased from 9,43 MJ/Kg to 22,35 MJ/Kg at moisture content 58,9% with increasing suhu and pressure from 180°C-260°C and 10-47 bar. Based on calculation of normalization energy yield is obtained optimum condition with suhu 240°C, pressure 33 bar, and moisture content 78,9%. It show that moisture content, suhu, and pressure interfere amount and energy content.

Keyword : HHV, HTC, hydrochar, hydrochar yield

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Agus M. Hatta, S.T., M.Si, Ph.D selaku ketua Departemen Teknik Fisika - ITS.
2. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T selaku dosen pembimbing I tugas akhir ini, yang selalu memberikan bimbingan dan semangat pada penulis.
3. Ibu Erna Septyaningrum, S.T, M.T selaku dosen pembimbing II tugas akhir ini, yang selalu memberikan bimbingan dan semangat pada penulis.
4. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
5. Orang tua penulis serta segenap keluarga besar penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan untuk penulis.
6. Teman-teman lintas jalur Teknik Fisika 2017 yang telah memberikan dukungan dan semangat,
7. Teman-teman Departemen Teknik Fisika – ITS yang senantiasa memberikan motivasi dan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 24 Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASME	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sampah Kota	5
2.1.1 Analisa Ultimat.....	7
2.1.2 Analisa Proksimat.....	8
2.1.3 Nilai Kalor	9
2.2 Hydrothermal Carbonization	12
2.3 Parameter Proses HTC	18
2.3.1 Suhu Proses	18
2.3.2 Waktu Reaksi	19
2.3.3 Bahan Baku	20
2.3.4 Kadar air	21
2.3.5 Tekanan	22

2.4	Produk HTC	23
2.4.1	<i>Hydrochar</i>	23
2.5	<i>Hydrochar Yield</i>	26
2.6	Normalisasi Energi <i>Yield</i>	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		27
3.1	Studi Literatur.....	28
3.2	Pengambilan Data Sebagai <i>Input</i> Simulasi.....	29
3.3	Simulasi Proses Hydrothermal Carbonization.....	30
3.3.1	<i>Input</i> komponen (conventional dan non-conventional).....	30
3.3.2	Membuat <i>Flowsheet</i> Proses HTC.....	31
3.3.3	<i>Input</i> Kondisi Stream dan <i>Block Unit</i>	34
3.4	Pengambilan Data Hasil Simulasi	34
3.5	Validasi Hasil Simulasi	34
3.6	Variasi Input dan Kondisi Operasi	35
3.7	Pengolahan Data.....	36
3.8	Analisa Data	37
3.9	Penarikan Kesimpulan.....	38
3.10	Penyusunan Laporan Akhir	38
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN		39
4.1	Validasi Hasil Simulasi	39
4.2	Analisa Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Produk	40
4.2.1	Analisa Pengaruh Suhu	42
4.2.2	Analisa Pengaruh Tekanan.....	47
4.2.3	Analisa Pengaruh Kadar Air.....	52

4.3 Diskusi.....	56
BAB V PENUTUP.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	62
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	67
BIODATA PENULIS.....	84

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sampah Organik (Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015).....	5
Gambar 2. 2 Sampah anorganik (Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015).....	6
Gambar 2. 3 Sampah Debu (Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015).....	6
Gambar 2. 4 Contoh Sampah Berbahaya (Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015).....	7
Gambar 2. 5 Diagram Van Kravelen (Berge, et al., 2014)	12
Gambar 2. 6 Skema Proses HTC (Hoekman S. , Broch, Robbins , Zielinska, & Felix, 2012)	13
Gambar 2. 7 Ringkasan Tahapan Reaksi pada proses hydrothermal (Biller & Ross).....	15
Gambar 2. 8 Skema pembentukan hydrochar selama proses HTC (Krailak, 2016)	16
Gambar 2. 9 Hidrolisis selulosa pada proses HTC (Krailak, 2016).....	16
Gambar 2. 10 Reaksi dehidrasi glukosa atau fruktosa pada proses HTC (Krailak, 2016)	17
Gambar 2. 11 Reaksi polimerisasi, aromatisasi, dan pertumbuhan partikel (Krailak, 2016)	18
Gambar 2. 12 Hasil hydrochar dari proses HTC serat kelapa dan daun eucalyptus pada suhu yang bermacam-macam (Krailak, 2016).....	19
Gambar 2. 13 Distribusi Produk HTC (Krailak, 2016).....	23
Gambar 2. 14 Kandungan energy dari bahan bakar padat, cair, dan hydrochar (PS240 : pine sawdust dan C240 : cellulose) (Krailak, 2016)	25
Gambar 3 1 Diagram alir penelitian	28

Gambar 3 2 Skema Simulasi HTC.....	32
Gambar 4. 1 Grafik <i>hydrochar yield</i> terhadap suhu	43
Gambar 4. 2 Grafik HHV terhadap suhu.....	44
Gambar 4. 3 Grafik persentase unsur terhadap suhu pada kadar air 58,9%	45
Gambar 4. 4 Grafik persentase unsur terhadap suhu pada kadar air 68,9%	46
Gambar 4. 5 Grafik persentase unsur terhadap suhu pada kadar air 78,9%	47
Gambar 4. 6 Grafik <i>hydrochar yield</i> terhadap tekanan	48
Gambar 4. 7 Grafik HHV terhadap tekanan.....	49
Gambar 4. 8 Grafik persentase unsur terhadap tekanan pada kadar air 58,9%	50
Gambar 4. 9 Grafik persentase unsur terhadap tekanan pada kadar air 68,9%	51
Gambar 4. 10 Grafik persentase unsur terhadap tekanan pada kadar air 78,9%	52
Gambar 4. 11 Grafik HHV dan Yield pada suhu 180 °C terhadap variasi kadar air	53
Gambar 4. 12 Grafik HHV dan Yield pada suhu 200 °C terhadap variasi kadar air	53
Gambar 4. 13 Grafik HHV dan Yield pada suhu 220 °C terhadap variasi kadar air	54
Gambar 4. 14 Grafik HHV dan Yield pada suhu 240 °C terhadap variasi kadar air	55
Gambar 4. 15 Grafik HHV dan Yield pada suhu 260 °C terhadap variasi kadar air	55
Gambar 4. 16 Grafik <i>normalized energy yield</i>	57

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Produksi hydrochar dari berbagai macam bahan baku dan kondisi proses HTC (Tititrici, Thomas, & Antonietti, 2008)	21
Tabel 2. 2 Komposisi unsur bahan baku sebelum dan setelah melalui proses HTC (Krailak, 2016)	25
Tabel 3. 1 Data Analisa Proksimat (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017)	29
Tabel 3. 2 Data Analisa Ultimat (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017)	29
Tabel 3. 3 Deskripsi Model Unit Blok Aspen Plus	33
Tabel 3. 4 Setting parameter awal pada <i>stream</i> dan <i>block unit</i>	34
Tabel 3. 5 Analisa Proksimat Sampah Kota di TPA Benowo (Nikmatun & Warmadewanthi, 2012)	35
Tabel 3. 6 Analisa Proksimat Sampah Kota di TPA Benowo (Nikmatun & Warmadewanthi, 2012)	35
Tabel 3. 7 Matriks variasi penelitian	36
Tabel 3. 8 Massa unsur dan persentase massa penyusun hydrochar	37
Tabel 4. 1 Nilai Selisih Eksperimen dan Simulasi	40
Tabel 4. 2 Persentase unsur penyusun setelah melalui proses HTC	41
Tabel 4. 3 Efek variasi terhadap hydrochar yield, HHV, dan carbon content	42

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Volume sampah di Indonesia sepanjang 2017 berdasarkan data yang dicatat oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan tahun 2017 tercatat 65,8 juta ton (Volume Sampah 2018 Diprediksi Mencapai 66,5 Juta Ton, 2018). Jumlah penduduk Indonesia sebanyak 258,7 juta jiwa, diperkirakan setiap rumah tangga/penduduk di Indonesia dapat menghasilkan sampah sebanyak 0,52 kg/jiwa /hari (Statistik Lingkungan Hidup Indonesia, 2017). Indonesia menjadi negara berkembang di Asia dengan peringkat pertama sebagai penghasil sampah kota terbanyak yaitu 53.000 ton per hari (World Bank Group Country, 2017). Banyaknya volume sampah belum diimbangi dengan pengelolaan sampah yang baik dan memadai. Hal ini ditunjukkan dari data pengelolaan sampah, sebesar 54,65% sampah dikelola dengan cara landfill (TPA) (Statistik Lingkungan Hidup Indonesia, 2017). Salah satu metode pengolahan sampah kota yang sedang dikembangkan adalah *Hydrothermal Carbonization* (HTC). Metode ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode lainnya seperti pirolisis kering, *landfilling*, *incernation* yaitu tidak memerlukan pengeringan dalam prosesnya, hasil utama berupa produk padatan (*hydrochar*), dan menghasilkan jumlah CO yang kecil

Hydrothermal carbonization adalah proses konversi termal untuk mengubah biomassa ke bahan bakar padat yang disebut *hydrochar* yang memiliki kandungan karbon dan nilai kalori yang tinggi (Berge, et al., 2014). Eksperimen dengan melibatkan proses HTC pertama kali digunakan pada tahun 1913 untuk memproduksi batubara dari selulosa (biomassa), namun sejak tahun 2011 bahan baku yang digunakan dalam proses ini mulai bermacam-macam salah satunya adalah sampah kota. Hal tersebut membuat HTC menjadi salah satu *treatment* dalam pengelolaan sampah. Proses *hydrothermal carbonization* dapat menjadi metode alternatif dalam menyelesaikan masalah

kebutuhan energi dan pengelolaan sampah di Indonesia. Parameter proses HTC berupa suhu, tekanan, jenis bahan baku, dan kadar air mempengaruhi proses konversi biomassa menjadi *hydrochar* (XiaoWei, 2014). Melalui penelitian yang dilakukan (Herlian, Kania, Darmawan, & Enri, 2016) didapatkan salah satu kesimpulan yaitu energi yang terkandung pada *hydrochar* dipengaruhi oleh suhu reaksi, tekanan dan jenis biomassa. Berdasarkan penelitian yang dilakukan (XiaoWei, 2014) yaitu variasi kadar air pada bahan baku, suhu, dan tekanan, kesimpulan dari penelitian tersebut adalah suhu, tekanan dan kadar air mempengaruhi produk yang terbentuk pada proses HTC. Semakin tinggi suhu proses yang digunakan menghasilkan jumlah massa padatan yang lebih sedikit dan memberikan nilai bahan bakat padat yang lebih tinggi. Begitu juga dengan tekanan, semakin tinggi tekanan yang digunakan maka akan menghasilkan massa produk padatan yang lebih rendah tetapi nilai energinya lebih tinggi. Eksperimen dengan memvariasikan kadar air bahan baku didapatkan kesimpulan dimana semakin tinggi kadar kadar air maka semakin cepat laju reaksi serta menghasilkan produk solid yang lebih sedikit dibandingkan dengan kadar kadar air yang lebih rendah. Penelitian-penelitian tersebut mendasari bahwa dalam proses HTC perlu diperhatikan kadar air bahan baku, suhu, dan tekanan yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang optimal.

Penelitian ini akan dilakukan simulasi proses HTC untuk mengetahui pengaruh variasi kadar air bahan baku, suhu, dan tekanan terhadap karakteristik dari *hydrochar*. Karakteristik *hydrochar* yang diamati berupa *hydrochar yield*, HHV, dan kandungan karbon.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang akan diangkat dalam tugas akhir ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh variasi kadar air bahan baku terhadap *yield*, HHV, dan kandungan karbon *hydrochar* pada proses *hydrothermal carbonization*?

2. Bagaimana pengaruh variasi suhu terhadap *yield*, HHV, dan kandungan karbon *hydrochar* pada proses *hydrothermal carbonization*?
3. Bagaimana pengaruh variasi tekanan terhadap *yield*, HHV, dan kandungan karbon *hydrochar* pada proses *hydrothermal carbonization*?
4. Berapakah kondisi operasi yang paling optimal dalam melakukan proses HTC?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan baku yang menjadi objek penelitian adalah sampah kota Surabaya yang diambil data ultimate dan proximate dari penelitian yang dilakukan oleh Lailatun, 2012 (Nikmatun & Warmadewanthi, 2012).
2. Ukuran partikel bahan baku dianggap *uniform*.
3. Distribusi panas pada reaktor dianggap *uniform*.
4. Proses dilakukan secara *batch*.
5. Proses diasumsikan dalam keadaan *steady*.
6. *Heat loss* dan *pressure drop* diabaikan

1.4 Tujuan

Adapun Tujuan yang akan dilakukan pada tugas akhir ini, yaitu:

1. Mengetahui pengaruh variasi kadar air pada bahan baku terhadap *yield*, HHV, dan kandungan karbon *hydrochar* pada proses *hydrothermal carbonization*.
2. Mengetahui pengaruh variasi suhu terhadap *yield*, HHV, dan kandungan karbon *hydrochar* pada proses *hydrothermal carbonization*.
3. Mengetahui pengaruh variasi tekanan terhadap *yield*, HHV, dan kandungan karbon *hydrochar* pada proses *hydrothermal carbonization*.

4

4. Mengetahui kondisi operasi yang paling optimal dalam proses HTC.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sampah Kota

Sampah merupakan segala bentuk buangan padat yang sebagian berasal dari aktivitas manusia (domestik). Dalam UU No. 18 tahun 2008 tentang pengelolaan sampah dinyatakan bahwa sampah sebagai sisa kegiatan sehari-hari manusia dan atau dari proses alam yang berbentuk padat. Berdasarkan data yang dicatat oleh Kementerian Hidup dan Kehutanan tahun 2017, volume sampah di Indonesia sepanjang 2017 tercatat 65,8 juta ton (Volume Sampah 2018 Diprediksi Mencapai 66,5 Juta Ton, 2018). Komposisi utamanya adalah sampah organik sebanyak 70 – 80% dari seluruh jumlah sampah yang dihasilkan (Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015)

Sampah kota dapat dibedakan atas dasar sifat-sifat biologis dan kimia sehingga mempermudah pengelolaannya, yaitu sebagai berikut:

1. Sampah yang dapat membusuk (organik), seperti sisa makanan, daun, sampah kebun, pertanian dan lainnya. Gambar 2.1 memperlihatkan bahwa salah satu jenis sampah organik adalah daun.



Gambar 2. 1 Sampah Organik (*Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015*)

6

2. Sampah yang tidak membusuk (anorganik), seperti kertas, plastik, karet, gelas, logam dan lainnya. Gambar 2.2 menunjukkan bahwa botol plastik merupakan salah satu jenis sampah anorganik.



Gambar 2. 2 Sampah anorganik (*Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015*)

3. Sampah yang berupa debu atau abu dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Sampah Debu (*Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015*)

4. Sampah yang berbahaya terhadap kesehatan, baik secara fisik maupun kimia seperti sampah-sampah industri. Salah satu contoh sampah industri adalah lampu yang dapat dilihat pada Gambar 2.4



Gambar 2. 4 Contoh Sampah Berbahaya (*Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015*)

Sampah kategori nomor satu disebut *garbage*, yaitu sampah yang mudah membusuk karena aktivitas mikroorganisme. Dengan demikian pengelolannya menghendaki kecepatan baik dalam pengumpulan maupun dalam pembuangannya. Sampah jenis kategori kedua disebut refuse, biasanya terdiri dari kertas-kertas, plastik, logam, gelas, karet dan lainnya yang tidak dapat membusuk.

Proses pengolahan dan peningkatan energi terhadap limbah padatan kota diperlukan suatu metode khusus untuk mendapatkan hasil maksimal, untuk dapat mendukung metode ataupun teknologi yang akan digunakan, diperlukan sifat-sifat dari limbah padatan kota yaitu melalui analisa *proximate* dan analisa *ultimate* dari limbah padatan kota (*Jenis-jenis Sampah Perkotaan, 2015*).

2.1.1 Analisa Ultimat

Analisis ultimat adalah komposisi hidrokarbon bahan bakar yang dinyatakan dalam unsur elemen dasar yaitu C, H, O, dan S sedangkan kadar air, kandungan anorganik dan abu (*ash*) tidak terkait dalam *ultimate analysis* (Valkenburg, et al.).

$$C + H + O + N + S + ASH + M = 100\% \quad (2.1)$$

Kandungan C, H, O, N dan S adalah presentase massa karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen dan belerang, masing-masing dalam bahan bakar.

2.1.2 Analisa Proksimat

Analisis proksimat adalah analisis yang memberikan komposisi biomassa dalam hal komponen kadar air (M), zat terbang (*Volatile Meter*), abu (*ASH*) dan karbon tetap (*Fixed carbon*) [10]. Berikut ini merupakan keterangan lebih lanjut mengenai komponen proksimat :

a. Zat Terbang (*Volatile Meter*)

Volatile matter atau zat terbang merupakan komponen dalam bahan bakar padat yang dapat terkondensasi dan tidak terkondensasi yang dilepaskan pada saat dilakukan pemanasan. Jumlah zat terbang tergantung pada suhu pemanasan dan tingkat pemanasan yang digunakan. *Volatile matter* terdiri dari sebagian besar gas yang mudah terbakar seperti hidrogen, karbon monoksida, dan metana serta terdapat sebagian kecil uap yang dapat terkondensasi seperti tar. Nilai kalor yang dihasilkan oleh *volatile matter* dalam proses pembakaran tidak sebesar karbon tetap. Selain itu, komposisi karbon tetap dan *volatile matter* pada bahan bakar disebut batubara murni (*pure coal*).

b. Abu (*ash*)

Ash atau abu adalah residu padat anorganik yang tersisa setelah bahan bakar benar-benar terbakar. Bahan utama dari abu adalah silika, aluminium, besi, dan kalsium, adapun sejumlah kecil lainnya yaitu magnesium, titanium, natrium dan kalium. Bahan bakar abu tidak mewakili bahan mineral anorganik asli karena beberapa unsur abu dapat mengalami oksidasi selama pembakaran. Selain itu, kandungan abu biomassa pada umumnya sangat kecil akan tetapi sangat penting dalam pemanfaatan biomassa terutama jika mengandung logam alkali seperti kalium dan halida seperti klorin. Komponen tersebut dapat menyebabkan tumpukan, kotoran dan korosi pada boiler.

c. Kadar air

Kadar air yang tinggi merupakan karakteristik utama dari biomassa. Kandungan kadar air pada suatu biomassa dapat setinggi 90 % (db). Terdapat dua macam kadar air, yaitu *free moisture* dan *inherent moisture*. *Free moisture* adalah kandungan kadar air pada biomassa (kayu) yang terletak diluar dinding sel biomassa, sedangkan untuk *inherent moisture* adalah kandungan kadar air yang melekat pada dinding-dinding sel biomassa. Proses pemanasan *free moisture* lebih mudah dihilangkan dibandingkan dengan *inherent moisture*.

d. Karbon Tetap (*fixed carbon*)

Fixed carbon atau karbon tetap adalah karbon padat dalam biomassa yang tetap di *char* di dalam proses pirolisis setelah devolatilisasi. Komponen *fixed carbon* dalam suatu bahan bakar padat memberikan nilai kalor yang besar. *Fixed carbon* berbeda dengan kandungan unsur karbon, karena beberapa unsur karbon akan hilang dalam bentuk ikatan hidrokarbon bersama zat terbang ketika menguap. Karbon tetap pada batubara termasuk unsur karbon dalam bahan bakar asli ditambah residu karbon yang terbentuk saat terjadi proses pemanasan. Karbon tetap pada bahan bakar ditentukan dari persamaan berikut :

$$FC = 1 - M - VM - ASH \quad (2.2)$$

Contoh pada batu bara, *fixed carbon* termasuk unsur karbon dalam bahan bakar asli ditambah residu karbon yang terbentuk saat pemanasan.

2.1.3 Nilai Kalor

Nilai kalor dari suatu zat adalah jumlah panas yang dilepaskan selama pembakaran dari jumlah yang ditentukan. Nilai kalor merupakan karakteristik dari setiap subtansi. Hal ini diukur dalam satuan energy per unit dari subtansi. Nilai kalor biasanya

ditentukan dengan menggunakan bom kalorimeter. Semakin tinggi nilai kalor, biaya investasi suatu proses pengolahan menjadi semakin tinggi pula, begitupun sebaliknya (World Bank Group Country, 2017). Nilai kalor yang terukur pada percobaan bom kalorimeter dikenal dengan *High Heating Value* (HHV), dimana keberadaan air dan hidrogen setelah pembakaran terjadi adalah pada keadaan terkondensasi pada produk. Nilai kalor didapatkan selain dengan menggunakan bom *calorimeter* juga menggunakan perhitungan persamaan analisa ultimat.

- ***Higher heating value (HHV)***

Higher heating value dapat didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan oleh unit massa atau volume bahan bakar setelah dibakar. Produk pembakaran pada HHV kondisi air berada pada fasa cair sehingga terdapat kalor laten penguapan yang terlepas mengakibatkan nilai HHV yang semakin besar. Untuk mendapatkan nilai HHV dapat menggunakan Bom kalorimeter yang dilakukan di laboratorium pada suhu ruangan. Pengujian nilai kalor HHV menggunakan standar ASTM D-388.

Pada umumnya, untuk mengetahui nilai kalor dari suatu bahan bakar dilakukan pengujian laboratorium menggunakan bom kalorimeter. Jika tidak memungkinkan melakukan pengujian laboratorium, nilai kalor suatu bahan bakar dapat diketahui dari perhitungan menggunakan persamaan empiris Dulong-Berhelot dan persamaan Channiwala. Pada awalnya persamaan Dulong dikembangkan untuk mengetahui nilai kalor dari batubara dengan koefisien yang sudah dimodifikasi untuk biomassa. Untuk menghitung jumlah nilai kalor dapat digunakan persamaan Dulong sebagai berikut :

$$\text{HHV} = 0.314 C + 1.4445 H - (N + O - 1)/8 + 0.0093 S \quad (2.3)$$

Dimana :

C : Persentase unsur Carbon

H : Persentase unsur Hidrogen

O : Persentase unsur Oksigen

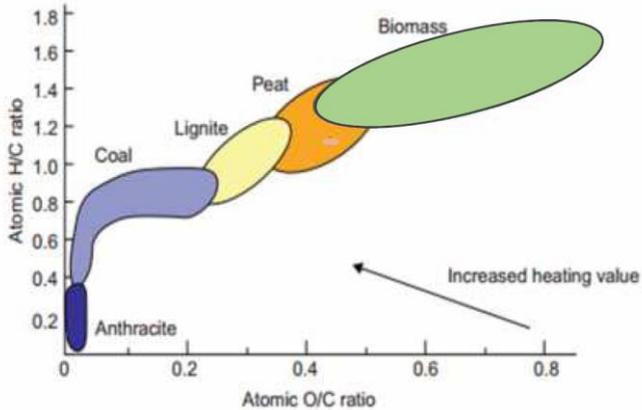
N : Persentase unsur Nitrogen

S : Persentase unsur Sulfur

Persamaan Dulong menggunakan persentase C,H,O, dan S dan valid jika kandungan oksigen dibawah 10%. Sehingga apabila kandungan oksigen < 10% maka dapat menggunakan persamaan Boie, dimana menggunakan persentase C,H,O,N dan S. Berikut ini adalah persamaan Boie untuk menghitung HHV pada *hydrochar* :

$$HHV = 35160.C + 116225.H - 11090.O + 6280.N + 10465.S \text{ (Kj/Kg)} \quad (2.4)$$

Klasifikasi rasio atom dapat digunakan untuk memahami peningkatan nilai kalor bahan bakar padat akibat perubahan komposisi. Rasio atom diperoleh dari kandungan oksigen, hidrogen dan karbon dari bahan bakar padat. Perubahan komposisi yang terjadi pada bahan bakar padat dapat diilustrasikan menggunakan diagram yang dikembangkan oleh Van Krevelen seperti pada Gambar 2.5. Diagram Van Krevelen memplot rasio H/C terhadap O/C untuk semua bahan bakar padat, dari antrasit yang kaya akan karbon hingga biomassa yang memiliki kandungan karbon rendah serta menunjukkan bahwa biomassa memiliki rasio O/C dan H/C yang lebih tinggi dari bahan bakar fosil. Biomassa memiliki nilai kalor yang rendah karena memiliki rasio H/C dan O/C yang tinggi.



Gambar 2. 5 Diagram Van Kravelen (Berge, et al., 2014)

2.2 Hydrothermal Carbonization

Hydrothermal carbonization (HTC) adalah proses koalisi induksi yang mengubah biomassa menjadi produk seperti batu bara, yang disebut hidrokar, yang memiliki ciri-ciri yaitu kandungan karbon dan nilai kalori yang tinggi. Jenis konversi termo-kimia ini disebut sebagai pirolisis basah. HTC dapat diterapkan untuk berbagai macam jenis limbah, seperti *municipal solid waste* (sampah kota), residu pertanian, alga, residu akuakultur (Funke & Ziegler). Tidak seperti pirolisis kering, proses HTC memungkinkan perlakuan substrat dengan kadar air yang tinggi yaitu 75%-90%, tanpa memerlukan proses *pre-drying* (Funke & Ziegler). Proses HTC dilakukan di bejana bertekanan tinggi dengan suhu yang relatif rendah (umumnya dalam kisaran 180-250°C) dan tekanan (sekitar 10-50 bar) pada biomassa dalam air selama waktu tertentu tanpa adanya udara.

Selama HTC, biomassa mengalami reaksi dehidrasi, dekarboksilasi dan dekarbonisasi. Produk utama dari HTC mengandung 3 komponen yaitu solid, aqueous solution (campuran bio oil dan air), dan sedikit gas (utamanya CO₂) (Libra J. , et al.,

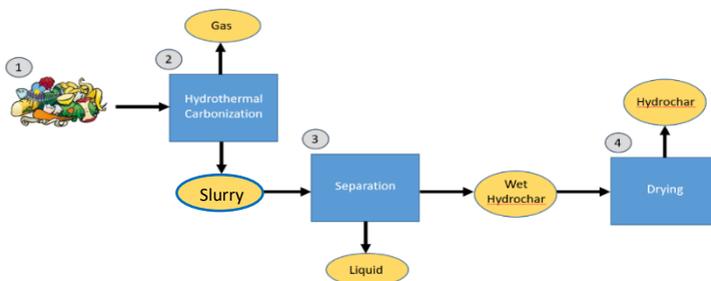
2011). Distribusi dan properti dari 3 produk dipengaruhi oleh bahan baku dan kondisi proses. Residu padat adalah produk utama dari HTC, yang mana dengan mudah dipisahkan dari suspensi memiliki hidrofobik yang tinggi dan properti yang homogen (Hoekman S. , Broch, Robbins , Zielinska, & Felix, 2012) (Cao, et al., 2013).

Biomassa diubah menjadi produk yang dipadatkan bernama hidrokar, yang dapat digunakan untuk berbagai macam aplikasi salah satunya adalah sebagai bahan bakar (Hoekman S. , Broch, Robbins , Zielinska, & Felix, 2012). Hidrokar menunjukkan performa yang lebih unggul terhadap biomassa mentah, yaitu massa yang lebih besar dan densitas energy, juga meningkatkan kinerja pembakaran sebagai bahan bakar padat (Hoekman S. , Broch, Robbins , Zielinska, & Felix, 2012). *Hydrochar* telah dibuktikan sebagai bahan kaya karbon setelah menjalani hidrotermal treatment untuk mengurangi kandungan hidrogen dan oksigennya.

Parameter *hydrothermal* dapat menghasilkan keragaman yang besar di dalam properti fisiokimia dari hidrokar. Untuk mengeksplor penuh properti yang luar biasa dan aplikasi potensial dari hidrokar dibutuhkan pemahaman tentang parameter proses kritis yang mengatur HTC dan mekanisme proses pembentukan hidrokar.

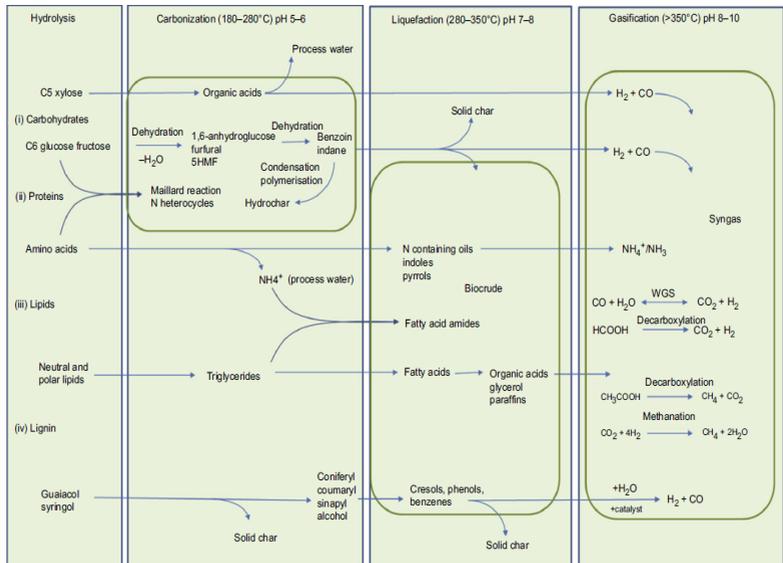
a. Tahapan Proses *Hydrothermal Carbonization*

Tahapan proses HTC ditunjukkan secara diagram pada Gambar 2.6 di bawah ini :



Gambar 2. 6 Skema Proses HTC (Hoekman S. , Broch,

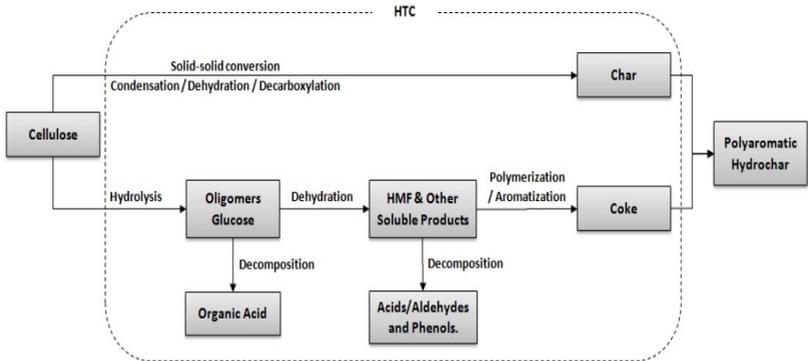
- i. MSW atau *municipal solid waste* sebagai bahan baku proses dimasukkan ke dalam reaktor HTC. MSW atau lebih dikenal sebagai sampah kota didefinisikan sebagai limbah rumah tangga, limbah komersil, dan limbah padat industri. MSW sendiri dikategorikan menjadi beberapa jenis yaitu sisa makanan, limbah taman (tumbuhan), kertas, plastic, dan kayu.
- ii. Proses HTC terjadi pada di dalam reaktor dengan suhu 180-250° C dan tekanan autogenous. Tekanan autogenous adalah tekanan yang dihasilkan dari proses pemanasan pada wadah atau tempat tertutup. HTC berada di suhu 180-280°C karena proses karbonisasi terjadi pada range suhu tersebut, seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 Melalui proses pemisahan didapatkan hasil berupa gas dan solid + liquid.
- iii. Proses pemisahan ditujukan untuk memisahkan produk solid+liquid yang dihasilkan selama proses HTC dalam reaktor. Pemisahan antara solid dan liquid menggunakan separation filter. Dari proses pemisahan didapatkan liquid yang dikenal dengan sebutan *process water* yang dianggap sebagai limbah proses dan produk solid yang disebut *wet hydrochar*.
- iv. Proses *drying* atau pengeringan bertujuan untuk menghilangkan kadar air yang masih terkandung pada *hydrochar*, dari proses ini didapatkan *hydrochar* kering yang selanjutnya siap digunakan.



Gambar 2. 7 Ringkasan Tahapan Reaksi pada proses hydrothermal (*Biller & Ross*)

b. Reaksi Pada Proses HTC

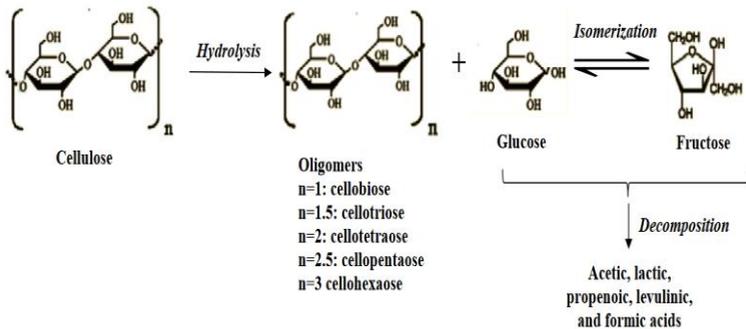
Pada proses HTC terjadi 3 proses reaksi kimia utama yang menyebabkan bahan baku dapat berubah menjadi *hydrochar*. Berikut ini adalah reaksi kimia yang terjadi selama proses HTC berlangsung:



Gambar 2. 8 Skema pembentukan hydrochar selama proses HTC (Krailak, 2016)

• Reaksi Hidrolisis

Reaksi hidrolisis merupakan reaksi kimia yang menggunakan air sebagai pemisah ikatan dari suatu substansi. Pada proses HTC reaksi hidrolisis bertujuan untuk memecah rantai polimer pada selulosa menjadi monomer gula (misalnya glukosa), reaksi ini terjadi pada suhu 100-175°C.



Gambar 2. 9 Hidrolisis selulosa pada proses HTC (Krailak, 2016)

Reaksi kimia yang terjadi pada proses hidrolisis selulosa dapat dituliskan sebagai berikut :

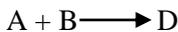


Jika A adalah H_2O B adalah polimer, dan D adalah gula, reaksi dapat dituliskan sebagai berikut:



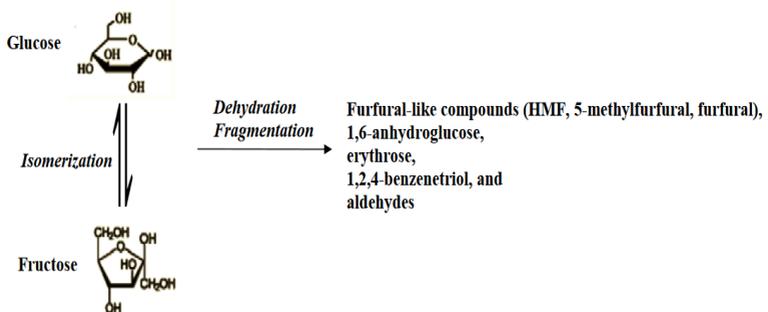
Dimana v adalah koefisien stoikiometri.

Jika jumlah polimer (selulosa) diukur sebagai ekivalen gula, reaksi dapat disederhanakan sebagai berikut:



• Reaksi Dehidrasi

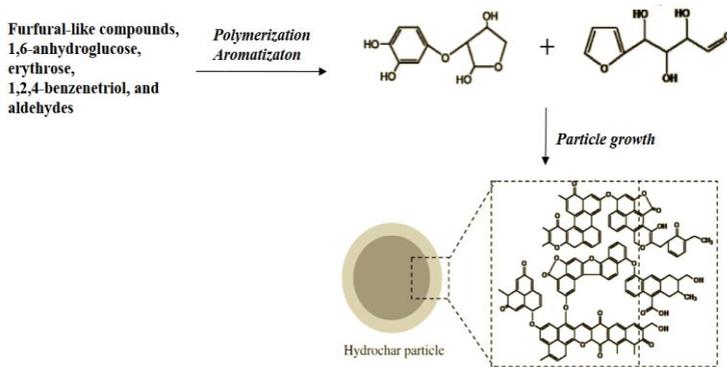
Reaksi dehidrasi adalah reaksi kimia antara dua senyawa yang melibatkan pelepasan air dari molekul yang bereaksi atau sering disebut sebagai reaksi kimia yang menghilangkan gugus hidroksil. Pada proses HTC reaksi dehidrasi terjadi pada glukosa menghasilkan berbagai produk larut seperti HMF, 5-methylfurfural, furfural. Reaksi ini terjadi diatas suhu 160°C .



Gambar 2. 10 Reaksi dehidrasi glukosa atau fruktosa pada proses HTC (Krailak, 2016)

• Reaksi Polimerisasi dan Aromatisasi

Reaksi polimerisasi terjadi pada produk larut, reaksi ini di induksi oleh dehidrasi molekuler atau kondensasi aldol. Reaksi dehidrasi molekuler sendiri adalah konversi yang melibatkan hilangnya air dari molekul atau ion yang bereaksi, sedangkan kondensasi aldol adalah reaksi pemutusan ikatan rangkap (pengubahan ikatan rangkap menjadi ikatan kovalen tunggal) dari ion enolat terhadap gugus karbonil. Reaksi polimerisasi terjadi bersamaan dengan aromatisasi. Berikut ini adalah gambar skema terjadinya reaksi polimerisasi dan aromatisasi pada proses HTC.



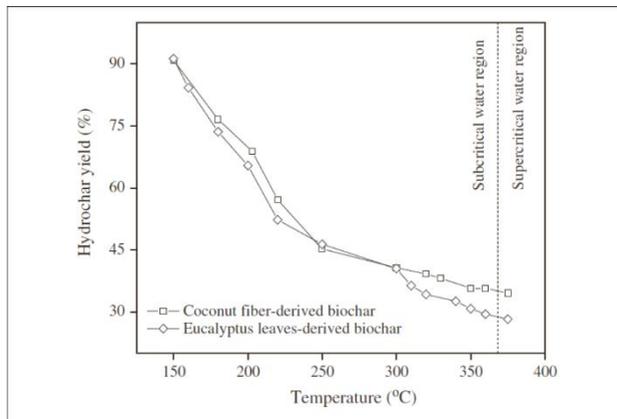
Gambar 2. 11 Reaksi polimerisasi, aromatisasi, dan pertumbuhan partikel (*Krailak, 2016*)

2.3 Parameter Proses HTC

2.3.1 Suhu Proses

Suhu memiliki efek yang menentukan terhadap hidrolisis biomassa, contohnya adalah hemiselulosa hampir mencapai hidrolisis sempurna pada suhu 180-200°C (Funke & Ziegler). Hidrolisis dapat terjadi pada *range* suhu 100-175°C, sedangkan dehidrasi dan karbonisasi membutuhkan suhu lebih dari 160°C. Suhu juga secara tidak langsung memberi pengaruh pada proses HTC dengan mengubah properti air, perubahan properti air mengakibatkan meningkatnya dekomposisi biomassa [12].

Efek dari suhu terhadap kandungan energi, hasil hydrochar, dan distribusi karbon telah dilaporkan oleh beberapa penelitian sebelumnya. Menurut Xiaowei Liu (Xiaowei, 2014), peningkatan suhu menghasilkan peningkatan kandungan energi dari produksi *hydrochar* dan berkorelasi dengan baik dengan kandungan karbon dalam produksi *hydrochar*. Fraksi dari carbon yang ditransfer pada *hydrochar* dan produk cair menurun dengan adanya peningkatan suhu, dengan demikian produksi *hydrochar* yang lebih tinggi menghasilkan suhu operasi yang lebih rendah. Efek dari suhu terhadap produksi hydrochar terlihat pada Gambar 2.12. Hasil hydrochar menurun secara cepat (90 hingga 45%) dengan meningkatnya suhu (150 hingga 300°C).



Gambar 2. 12 Hasil hydrochar dari proses HTC serat kelapa dan daun eucalyptus pada suhu yang bermacam-macam (Krailak, 2016)

2.3.2 Waktu Reaksi

Waktu reaksi adalah waktu yang dibutuhkan oleh proses HTC untuk mengkonversi biomassa menjadi solid produk (*hydrochar*). Waktu reaksi pada proses HTC berkisar dari beberapa menit hingga beberapa jam. Efek dari waktu reaksi pada distribusi karbon, kandungan energi, pembentukan *hydrochar*, dan struktur kimia dari *hydrochar* sebelumnya telah dilaporkan dalam beberapa

penelitian terdahulu. Waktu reaksi yang lama akan menghasilkan massa produk padat yang lebih rendah, akan tetapi memiliki kandungan energi yang lebih tinggi, sebaliknya waktu reaksi yang lebih singkat akan meningkatkan massa produk solid namun mengurangi kandungan energi pada produk.

Pada penelitian yang dilakukan Liu (Xiaowei, 2014) meningkatkan waktu reaksi dari 30 menit menjadi 24 jam dengan suhu 240°C menghasilkan perbedaan karakteristik permukaan pada *hydrochar*. Hasilnya memperlihatkan bahwa yang singkat pada HTC akan menghasilkan retakan pada permukaan hidrokar tanpa mikrosfer. Waktu tinggal yang melebihi 24 jam menghasilkan agregasi dari mikrosfer di permukaan karbon (Xiaowei, 2014). Waktu reaksi mengontrol tingkat dekomposisi bahan baku pada suhu tertentu dengan menentukan hidrolisis dan polimerisasi dari monomer, yang menghasilkan tekstur hidrokar berbeda setelah pembentukan mikrosfer.

2.3.3 Bahan Baku

Secara terori, segala jenis bahan organik dan biomassa dapat dikarbonisasi dalam kondisi hidrotermal. Bahan baku seperti selulosa, kayu, mikroalga, sisa makanan, limbah, dan residu pertanian telah berhasil diolah dengan proses HTC (Zhao, Shen, Ge, Chen, & Yoshikawa, 2014). Produksi *hydrochar* dari berbagai macam bahan baku biomassa dan berbagai macam kondisi proses HTC dapat dilihat pada tabel. Karakteristik bahan baku biomassa seperti komposisi kimia, *moisture content*, *volatile matter* (VM), *fixed carbon* (FC), abu, dan kandungan energi secara signifikan mempengaruhi distribusi produk (fase *hydrochar*, cair, dan gas), karakteristik produk, efisiensi konversi, dan proses energetic.

Titirici dalam penelitiannya (Titirici, Thomas, & Antonietti, 2008) membandingkan karakteristik *hydrochar* yang diproduksi dari proses HTC biomassa yang beragam (xylose, glukosa, sukrosa, maltose). Hasil yang didapat dari penelitian tersebut memperlihatkan jika perbedaan struktur tidak terlalu memberikan efek pada mekanisme karbonisasi. Tabel 2.1

menunjukkan karakteristik hydrochar dengan berbagai macam jenis bahan baku dan kondisi proses.

Tabel 2. 1 Produksi hydrochar dari berbagai macam bahan baku dan kondisi proses HTC (*Tittrici, Thomas, & Antonietti, 2008*)

Feedstock information							HTC Process Condition			Hydrochar		
Type	Ultimate Analysis %			Proximate Analysis %			Energy Content (Mj/Kg)	MC (%)	Subu (°C)	Reaction Time (hr)	Yield (%)	Energy Content (MJ/Kg)
	C	H	O	VM	FC	ASH						
Forest Wood	46,2	0,6	37,6	90,1	-	-	18,4	85	220	4	61	21,5
Landscape Wood	49,6	5,8	39,4	95,2	-	-	19,4	85	220	4	46	24,3
Paper	36	5	48,1	79,6	9,6	10,9	14	80	250	20	29	23,9
Food	42,5	5,8	40,8	77,6	14,8	7,5	18,1	80	250	20	44	29,1
Mixed MSW	28,5	3,8	38,7	62	9,6	28,4	16,5	80	250	20	63	20
AD Waste	32,6	4,8	20,3	55,9	8,2	35,9	15,5	80	250	20	47	13,7
Corn Stalk	46,8	6,3	40,7	-	-	-	17,5	90	250	4	35	29,2
Forest Waste	48	6,6	43,4	-	-	-	17,9	90	250	4	38	28,4
Coconut Fiber	47,8	5,6	45,5	80,9	11	8,1	18,4	90	220-375	0,5	56-77	24,7-30,6
Eucalyptus Leaves	47	5,2	44,8	79,2	10,3	10,5	18,9	90	220-375	0,5	43-87	25-29
Walnut Shell	-	-	-	71,8	15,9	1,3	19,6	95	230	20	36	27,1
Sunflower Stem	-	-	-	82,3	3,6	1,3	16,4	95	230	20	29	28,5

2.3.4 Kadar air

Kadar air merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi proses HTC. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Funke dkk diambil kesimpulan jika air mempercepat proses HTC (Funke & Ziegler). Keberadaan air yang cukup merupakan bagian penting terkait dengan proses HTC (Krailak, 2016). Pengaruh air di dalam proses HTC adalah sebagai berikut:

- a. Air menjadi media transfer dan penyimpanan panas yang baik sehingga suhu puncak selama proses HTC yang

mungkin timbul dari reaksi eksotermal dapat dihindari (Siskin & Katrizky, 2001).

- b. Distribusi zat dan transportasi fragmen dari bahan baku dipengaruhi oleh jumlah air (sebagai pelarut), yang dapat menjadi penentu laju reaksi (Behar, Lewan, Lorant, & van den Broucke, 2003)
- c. Pada suhu tinggi, sifat pelarut air meningkat secara signifikan. Kelarutan komponen organik dan non organik meningkat
- d. Air yang dipanaskan telah terbukti memiliki efek katalitik pada karbonisasi, reaksi hidrolisis, kondensasi ionic, dan penguraian ikatan.

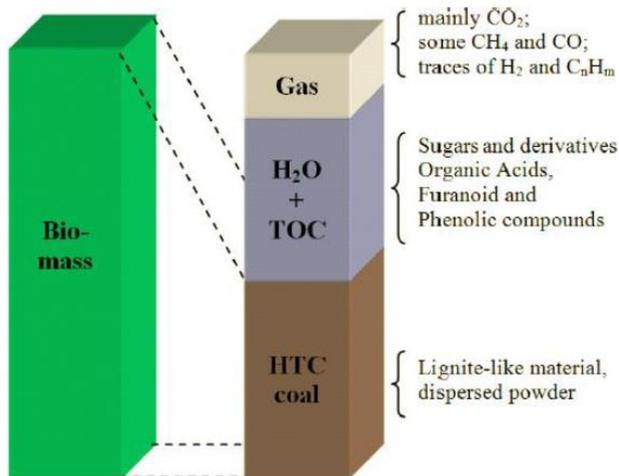
2.3.5 Tekanan

Tekanan adalah salah satu factor yang secara signifikan mempengaruhi degradasi biomassa dalam proses hidrolisis. Dekomposisi biomassa dan laju hidrolisis dapat dikendalikan dengan menjaga tekanan diatas tekanan kritis. Tekanan memiliki efek positif pada densitas pelarut yaitu meningkatkan densitas pelarut. Pelarut dengan densitas tinggi semakin tinggi pula tingkat ekstraksi dan disintegrasi biomassa yang dicapai.

Tekanan di dalam reaktor dapat ditingkatkan baik dengan meningkatkan suhu secara langsung atau dengan menambahkan fluida. Berdasarkan prinsip Le Chatelier reaksi di dalam reaktor dipengaruhi oleh tekanan. Contohnya reaksi dekarboksilasi dan dehidrasi terjadi pada tekanan yang cukup tinggi. Efek dari tekanan pada HTC sangat mempengaruhi pembentukan *hydrochar*. Tekanan yang tinggi menyebabkan naiknya suhu, sehingga dekomposisi biomassa terjadi secara cepat dan dapat menghasilkan produk akhir *hydrochar* yang memiliki kulaitas baik. Oleh karena itu, tekanan memili peran dalam pembentukan *hydrochar* dalam proses HTC.

2.4 Produk HTC

Ada bermacam jenis produk yang dihasilkan di dalam reaksi HTC. Distribusi produk diilustrasikan seperti pada Gambar 2.13, sebagian besar tergantung terhadap kondisi proses dan jenis bahan baku. Pada proses HTC, biomasa dapat diubah menjadi tiga fasa produk termasuk padat, cair, dan gas (Krailak, 2016)



Gambar 2. 13 Distribusi Produk HTC (Krailak, 2016)

2.4.1 Hydrochar

Hydrochar merupakan produk padatan yang dihasilkan pada proses *hydrothermal carbonization* (Krailak, 2016). *Hydrochar* memiliki struktur kimia yang paling mendekati dengan batubara alami dibandingkan dengan produk padatan dari proses konversi termal yang lain (Funke & Ziegler), hal tersebut penting untuk menentukan aplikasi *hydrochar* di masa yang akan datang. Hal tersebut mendorong penyelidikan menggunakan *hydrochar* sebagai pengganti bahan bakar fosil dalam proses pembakaran konvensional (Krailak, 2016).

Karakteristik *Hydrochar*

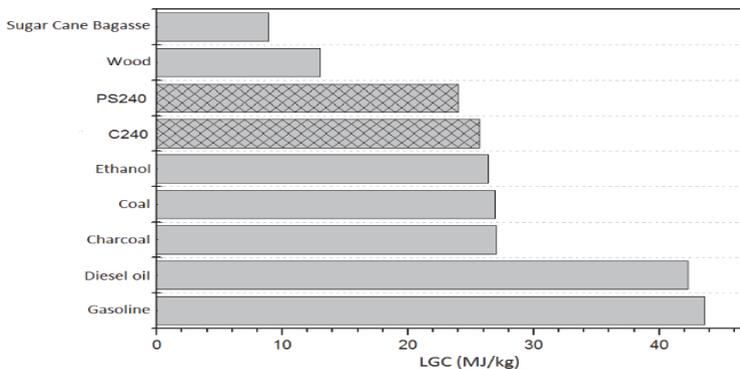
Kandungan energi, komposisi dasar, dan morfologi permukaan dari *hydrochar* telah dikarakterisasi secara intensif melalui berbagai macam cara seperti *X-ray photoelectron microscopy* (XPS), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Fourier transform infrared spectroscopy* (FTIR), *elemental analyzer*, calorimeter, dan penggunaan model teoritis.

a) Kandungan Energi

Kandungan energi merupakan salah satu karakteristik yang perlu dianalisa. Gambar 2.14 menampilkan *Gross Calorific Value* (GCV) atau kandungan energi dari *hydrochar* dan beberapa bahan bakar alami. Terlihat bahwa kandungan energi yang dihasilkan *hydrochar* berkisar antara 20-30 MJ/kg.

b) Komposisi Unsur

Salah satu factor yang mempengaruhi produksi *hydrochar* selain suhu operasi, waktu reaksi adalah komposisi unsur. Tabel 2.2 memperlihatkan tentang perbandingan komposisi unsur dari berbagai kondisi proses dan komposisi unsur biomassa. Penelitian yang dilakukan oleh Sevilla (Sevilla & Fuertes, 2009) memperlihatkan bahwa kandungan karbon pada selulosa meningkat dari 44,44% menjadi 71,66% setelah dilakukan proses HTC. Hasil yang sama juga diperoleh dari bahan baku yang lainnya.



Gambar 2. 14 Kandungan energy dari bahan bakar padat, cair, dan *hydrochar* (PS240 : *pine sawdust* dan C240 : *cellulose*) (Krailak, 2016)

Tabel 2. 2 Komposisi unsur bahan baku sebelum dan setelah melalui proses HTC (Krailak, 2016)

Feedstock	Process Condition		Elemental Composition (%)				O/C	H/C
	Suhu (°C)	Time (hr)	C	H	O	N		
Cellulose	-	-	44,44	6,17	49,38	-	0,833	1,666
Cellulose	250	4	71,66	4,55	23,79	-	0,249	0,762
Corn Stalk	250	4	71,36	5,6	16,27	2	0,171	0,935
Sewage Sludge	200	4	46,17	5,81	49,39	1,88	0,8	1,51
MSW	250	20	33,5	2,7	14,2	0,63	0,32	0,97
Coconut Fiber	220	0,5	62,47	5,28	31,09	0,9	0,37	1,01
Micro Algae	203	2	72,7	9,7	-	7,3	-	1,6

Selama proses HTC, reaksi dehidrasi dan dekarboksilasi menyebabkan penurunan pada perbandingan atom H/C dan O/C (Funke & Ziegler). Perbandingan atom H/C dan O/C dari produksi *hydrochar* mendekati area lignit dimana nilainya adalah 0,8-1,3 dan 0,2-0,38 (Park & Jang, 2011), sehingga *hydrochar* dapat digunakan sebagai bahan bakar padat dalam proses pembakaran.

2.5 *Hydrochar Yield*

Hydrochar yield merupakan persentase dari massa *hydrochar* dibanding dengan massa bahan baku. *Hydrochar yield* digunakan untuk mengetahui berapa banyak produk solid (*hydrochar*) yang terbentuk dalam proses HTC. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk mengetahui banyaknya *hydrochar* yang terbentuk :

$$\text{Hydrochar yield} = \frac{\text{massa hydrochar}}{\text{massa bahan baku}} \times 100\% \quad (2.5)$$

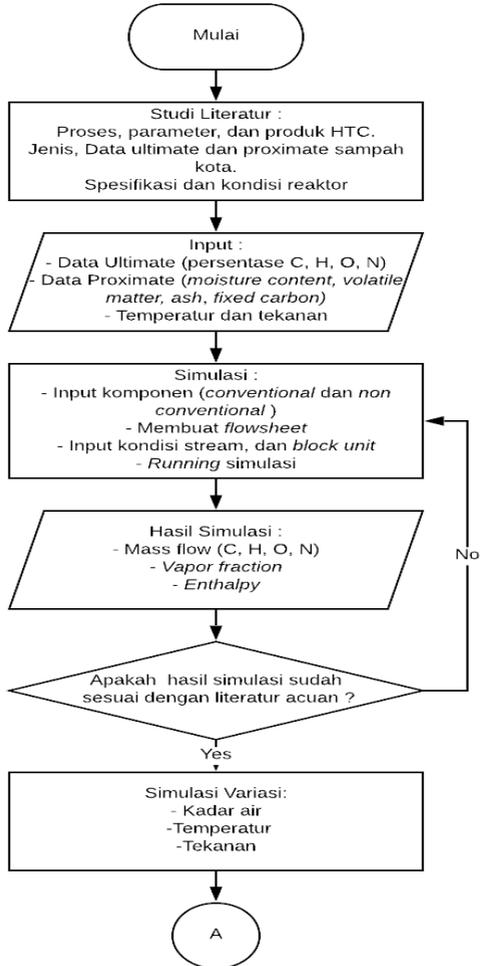
2.6 *Normalisasi Energi Yield*

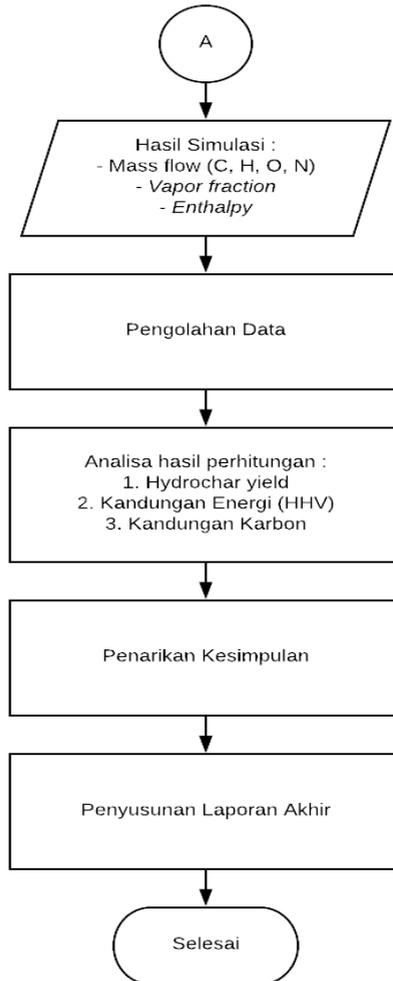
Menentukan kondisi optimum, dapat menggunakan perbandingan antara kandungan energy (HHV) yang dihasilkan oleh *hydrochar* dan *hydrochar yield* sebagai normalisasi energi yield. Normalisasi energi yield (MJ/Kg) didefinisikan sebagai energi yang dihasilkan *hydrochar* per massa bahan baku awal. Berikut ini adalah persamaan untuk mendapatkan nilai normalisasi energi yield.

$$\text{Normalisasi Energi Yield} = \frac{\text{HHV hydrochar} \times \text{massa hydrochar}}{\text{massa bahan baku}} \quad (2.6)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian tugas akhir ini dirancang dengan beberapa tahapan yang digambarkan pada diagram alir di bawah ini. Tahapan-tahapan tersebut meliputi beberapa hal, antara lain:





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur fokus pada bagaimana proses HTC terjadi, reaksi-reaksi yang terjadi pada proses HTC, dan parameter-parameter proses yang mempengaruhi produk yang dihasilkan pada proses HTC, serta data ultimate dan proximate sampah yang

dibutuhkan sebagai input dalam proses simulasi. Studi literatur diperoleh dari *e-book*, jurnal, dan penelitian yang berkaitan dengan topik permasalahan yang akan diteliti.

3.2 Pengambilan Data Sebagai *Input* Simulasi

Langkah pertama dan yang paling sering dilakukan dalam suatu penelitian adalah pengumpulan data. Pada tugas akhir ini, data-data yang diperlukan adalah data ultimate dan proksimate sampah kota, kondisi reaktor, serta parameter proses. Berikut adalah data-data yang dibutuhkan dalam proses penelitian:

a. Data ultimate dan proksimate

Data ultimate dan proksimate awal yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data analisa proksimat dan ultimat penelitian yang dilakukan oleh (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017) dapat dilihat pada tabel 3.1 dan 3.2

Tabel 3. 1 Data Analisa Proksimat (*Kim, Park, & Yoshikawa, 2017*)

Analisis	Parameter	Satuan	Nilai
Proximate Analysis	Kadar Air	%	47,4
	Volatile Matter	%	87,1
	Ash	%	6,9
	Fixed Carbon	%	6
	Nilai Kalor	MJ/kg	15,1

Tabel 3. 2 Data Analisa Ultimat (*Kim, Park, & Yoshikawa, 2017*)

Analisis	Parameter	Satuan	Nilai
Ultimate Analysis	C	%	37
	H	%	5,4
	N	%	1,9
	O	%	48,8

b. Kondisi Operasi

Kondisi operasi yang digunakan berdasarkan penelitian terdahulu (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017). Jenis reaktor yang digunakan adalah reaktor tubular dengan jumlah bahan baku sebanyak 20kg, dan proses reaksi dilakukan secara *batch* dengan sumber kalor berupa *saturated steam* yang berasal dari boiler dengan asumsi lama waktu proses adalah 1 jam.

Kondisi proses yang digunakan sebagai berikut :

- Suhu Reaktor : 200°C
- Tekanan Reaktor : 16 Bar
- Bahan Baku : Sampah Kota

3.3 Simulasi Proses Hydrothermal Carbonization

Simulasi proses HTC terdiri dari 4 tahap utama yaitu *input component*, *create flowsheet diagram*, *stream and block specification*, dan *running process*. Reaktor HTC pada simulasi ini terdiri dari 3 buah reaktor, yang diperlukan untuk memodelkan proses HTC sampah kota. Skema model proses HTC dapat dilihat pada Gambar 3.2

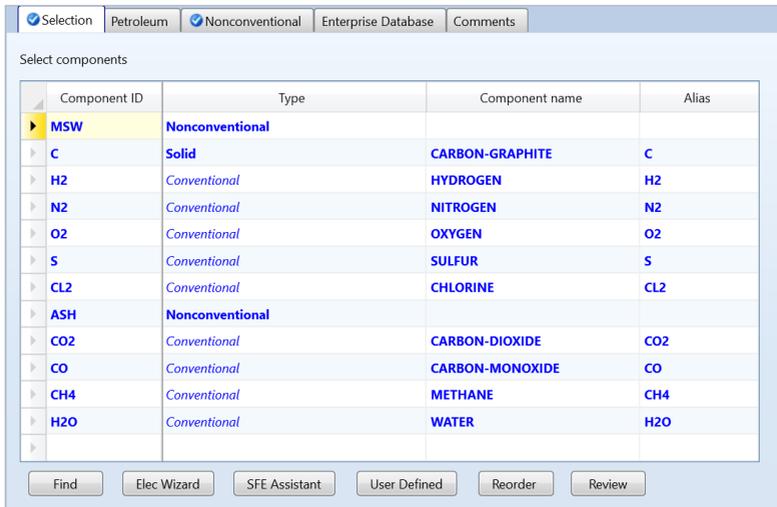
Asumsi dasar yang digunakan pada simulasi ini adalah

- a. Proses simulasi yang terjadi adalah *steady state*
- b. Tidak ada *pressure drop*
- c. *Heat loss* diabaikan
- d. Distribusi panas pada reaktor dianggap *uniform*
- e. Ukuran partikel bahan baku dianggap *uniform*.

3.3.1 Input komponen (conventional dan non-conventional)

Proses pertama dalam melakukan simulasi adalah dengan memasukkan komponen yang akan digunakan selama proses HTC berlangsung. Komponen yang digunakan dalam proses terdiri dari 2 jenis yaitu komponen *conventional* dan *non-conventional*. Komponen *conventional* adalah komponen yang data dan spesifikasinya sudah ada di dalam *software*. Komponen *non-conventional* adalah komponen yang tidak tersedia data dan spesifikasi dalam *software* sehingga data dan spesifikasi perlu

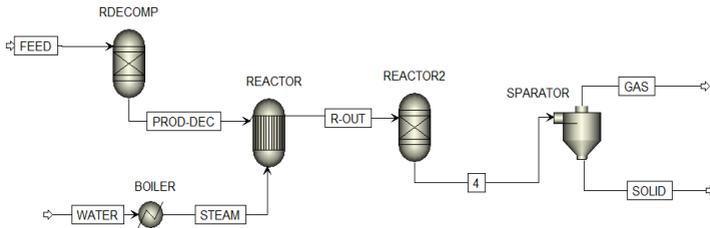
didefinisikan terlebih dahulu. Komponen yang termasuk *non-conventional* pada proses HTC adalah MSW yang merupakan bahan baku dan *ash*. *Input* komponen *conventional* dan *non-conventional* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 *Input* komponen *conventional* dan *non-conventional*

3.3.2 Membuat *Flowsheet* Proses HTC

Tahap kedua dalam simulasi adalah pembuatan *flowsheet*. *Flowsheet* merupakan skema dari suatu proses yang akan disimulasikan. Gambar 3.2 merupakan *flowsheet* atau skema simulasi proses HTC. Skema proses HTC pada simulasi dimodelkan dengan 3 jenis reaktor, hal tersebut dikarenakan diperlukan beberapa tahapan dalam proses HTC yaitu dekomposisi, dan pemanasan biomasa dengan *steam* yang dalam kondisi nyata dapat dilakukan dengan satu reaktor namun dalam proses simulasi perlu adanya 2 reaktor tambahan untuk mengakomodasi kebutuhan tersebut.



Gambar 3.2 Skema simulasi HTC

Proses pertama dalam simulasi ini adalah dekomposisi yang terjadi pada reaktor dekomposisi (RDECOMP) yang berfungsi untuk mendekomposisi sampah kota menjadi komponen fraksionalnya C, H, O, N. Reaktor dekomposisi disimulasikan menggunakan reaktor RYield. Proses dekomposisi terjadi dengan memberikan informasi analisa proksimat dan ultimat yang terkandung pada sampah. *Output* dari proses dekomposisi adalah massa dari produk *conventional* dan *non-conventional*. RYield merupakan reaktor yang prinsip kerjanya berdasarkan perhitungan distribusi *yield*. Distribusi *yield* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan 3.1.

$$M_{unsur} = (1 - X_{moisture}) \cdot \left(\frac{X_{unsur}}{M_{feed}} \right) \cdot M_{feed} \quad (3.1)$$

Dimana :

M_{unsur} : Massa yield dari unsur

$X_{moisture}$: Kadar air bahan baku

X_{unsur} : Kandungan unsur

M_{feed} : Massa bahan baku

Proses selanjutnya *output* dari RDECOMP diteruskan menuju REACTOR (RGibbs) yang fungsinya menghitung produk HTC yang terbentuk berdasarkan kesetimbangan massa seperti

pada persamaan 3.2 dengan memberikan *input* berupa tekanan dan suhu dalam simulasi.

$$\begin{aligned} \Sigma Massa_{in} &= \Sigma Massa_{out} & (3.2) \\ m_{biomassa} + m_{steam} &= m_{hydrochar} + m_{liquid} + m_{gas} \end{aligned}$$

Hasil dari REACTOR (RGibbs) digunakan sebagai masukan pada REACTOR2 (RYield). REACTOR2 berfungsi untuk mengeluarkan nilai atau hasil dari produk (*hydrochar*) dalam bentuk unsur pembentuknya. Reaktor ini bekerja setelah memberi masukan berupa suhu dan tekanan serta hasil pembakaran yang sebelumnya dilakukan pada REACTOR.

Heater pada simulasi ini digunakan sebagai BOILER dengan memberi masukan berupa air dan men-*setting* suhu, tekanan, dan nilai *vapor* 1 agar steam yang dihasilkan berada pada kondisi saturasi. Selanjutnya, SEPARATOR berfungsi untuk memisahkan produk gas dan padatan yang dihasilkan oleh REACTOR2 tanpa mengubah komposisi.

Tabel 3. 3 Deskripsi Model Unit Blok Aspen Plus

Aspen Plus ID	Blok ID	Deskripsi
RYield	RDECOMP	Mendekomposisi bahan baku
RGibbs	REACTOR	Reaktor tempat proses HTC terjadi
Heater	BOILER	Sebagai boiler untuk menghasilkan steam
Ryield	REACTOR2	Menghasilkan produk berdasarkan perhitungan yield
SSPLIT	SEPARATOR	Pemisah yang digunakan untuk melakukan pemisahan padatan dari gas atau cairan.

3.3.3 *Input Kondisi Stream dan Block Unit*

Tahap ketiga dalam simulasi adalah memberi masukan pada stream dan block unit. Tabel 3.4 merupakan *setting* masukan pada *stream* dan *block unit*. Fungsi dari *input* kondisi *stream* dan *block unit* adalah untuk menyesuaikan kondisi proses dengan yang kita inginkan.

Tabel 3. 4 Setting parameter awal pada *stream* dan *block unit*

Apparatus	Suhu (C)	Tekanan (bar)
RDECOMP	25	1
REACTOR	200	10
BOILER	200	10
REACTOR1	200	10
SEPARATOR	80	8

3.4 Pengambilan Data Hasil Simulasi

Data yang digunakan dari hasil simulasi HTC berupa *mass flow rate* tiap komponen, dan enthalpy. Data simulasi tersebut selanjutnya akan digunakan untuk proses validasi terhadap literature acuan.

3.5 Validasi Hasil Simulasi

Validasi adalah proses penentuan bahwa hasil simulasi telah merepresentasikan suatu model secara akurat sesuai dengan teori yang telah ada. Tujuan dari tahap verifikasi adalah memastikan bahwa hasil simulasi pada penelitian ini memiliki selisih maksimal 10% dengan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya. Apabila data tidak sesuai dengan teori atau penelitian sebelumnya, maka akan dilakukan proses simulasi ulang. Data yang telah diperoleh dan lolos tahap verifikasi kemudian diolah dan dianalisis pada tahap selanjutnya. Untuk menghitung selisih hasil simulasi dapat dilakukan menggunakan persamaan (3.2).

$$\text{selisih (\%)} = \frac{|\text{hasil simulasi} - \text{hasil penelitian}|}{\text{hasil penelitian}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

3.6 Variasi Input dan Kondisi Operasi

Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap kadar air bahan baku, tekanan, dan suhu operasi. Data bahan baku yang digunakan adalah data analisa ultimate dan proksimate sampah kota di TPA Benowo Surabaya, data menggunakan penelitian komposisi sampah di TPA Benowo (Nikmatun & Warmadewanthi, 2012)

Tabel 3. 5 Analisa Proksimat Sampah Kota di TPA Benowo (Nikmatun & Warmadewanthi, 2012)

Analisis	Parameter	Satuan	Nilai
Proximate Analysis	Kadar Air	%	58,90
	Volatile Matter	%	82,91
	Fixed Carbon	%	7,78
	Ash	%	9,31
	Nilai Kalor	Kkal/kg	2741,25

Tabel 3. 6 Analisa Proksimat Sampah Kota di TPA Benowo (Nikmatun & Warmadewanthi, 2012)

Analisis	Parameter	Satuan	Nilai
Ultimate Analysis	C	%	34,78
	H	%	10
	N	%	1,41
	O	%	44,5

Bahan baku tersebut akan divariasikan kadar airnya yaitu 58,9%, 68,9%, dan 78,9%, serta suhu dan tekanan operasi. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari ketiga variasi tersebut (kadar air, suhu, dan tekanan) terhadap *hydrochar* yang diproduksi pada proses HTC. Hasil dari proses simulasi HTC adalah berupa berat unsur penyusun *hydrochar*, selanjutnya dilakukan pengolahan data untuk mengubah kebentuk persentase berat terhadap hasil simulasi. Tabel 3.7 adalah matriks variasi yang digunakan pada penelitian ini. Matriks variasi digunakan untuk

memudahkan dalam pengambilan data pada penelitian yang dilakukan.

Tabel 3. 7 Matriks variasi penelitian

Percobaan	Kadar air	Suhu (°C)	Tekanan (Bar)
1	58,9%	180	10
		200	16
		220	23
		240	33
		260	47
2	68,9%	180	10
		200	16
		220	23
		240	33
		260	47
3	78,9%	180	10
		200	16
		220	23
		240	33
		260	47

3.7 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan setelah mendapatkan hasil berupa berat unsur pembentuk *hydrochar*, seperti yang terlihat pada Tabel 3.8. Data tersebut dilakukan perhitungan untuk menentukan persentase unsur C, H, O, N dan ash. Perhitungan merupakan perbandingan massa unsur dengan massa *hydrochar*, dimana massa *hydrochar* didapatkan sebesar 15,94 Kg. Berat unsur C,H,O,N dan ash kemudian diubah menjadi persentase berat unsur dengan menggunakan persamaan 3.2.

Tabel 3. 8 Massa unsur dan persentase massa penyusun *hydrochar*

Parameter	C	H	O	N	ASH
Massa Unsur (Kg)	7,10	0,84	6,27	0,19	1,55
Persentase Massa (%)	44,56	5,24	39,31	1,19	9,70

$$\text{Persentase Unsur (\%)} = \frac{\text{Berat Unsur (Kg)}}{\text{Berat hydrochar (Kg)}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Data persentase unsur digunakan untuk menghitung *hydrochar yield*, kandungan karbon, dan HHV. *Hydrochar yield* didapatkan dengan membagi massa *hydrochar* dengan massa bahan baku seperti pada persamaan 3.3.

$$\text{Hydrochar yield (\%)} = \frac{\text{massa hydrochar}}{\text{massa bahan baku}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Berdasarkan massa carbon yang terkandung pada *hydrochar* dapat dicari nilai *Carbon content* dengan menggunakan persamaan 3.4

$$\text{Carbon content (\%)} = \frac{\text{massa carbon di hydrocar}}{\text{massa carbon di bahan baku}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Sedangkan untuk mengetahui HHV dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan Boie, persamaan ini digunakan karena memenuhi nilai oksigen yang terkandung pada di atas 10%.

$$\text{HHV} = 35160 \times C + 116225 \times H - 11090 \times O + 6280 \times N + 10465 \times S \quad (3.5)$$

3.8 Analisa Data

Analisis data dilakukan setelah semua data hasil simulasi yang telah diperoleh. Bagian ini akan dianalisis mengenai HHV, *hydrochar yield*, dan kandungan karbon yang dihasilkan dari

proses pengolahan data dengan mengacu pada teori maupun beberapa referensi dari jurnal penelitian sebelumnya.

3.9 Penarikan Kesimpulan

Penarikan kesimpulan dilakukan ketika seluruh analisis data dari setiap variasi telah dilakukan. Kesimpulan akan menjawab rumusan masalah dari penelitian dalam tugas akhir ini.

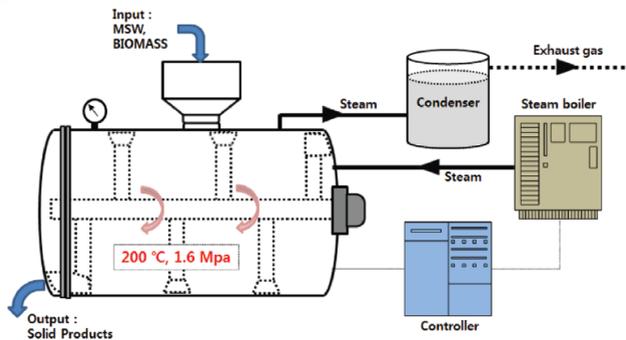
3.10 Penyusunan Laporan Akhir

Penyusunan laporan merupakan tahap terakhir dari pelaksanaan tugas akhir ini. Laporan memuat hasil penelitian yang telah dilaksanakan selama tugas akhir.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Pada penelitian ini, hasil simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen sebelumnya (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017). Oleh karena itu, pengaturan dalam simulasi ini dapat diterapkan pada setiap variasi berikutnya yang hasilnya dapat dipertanggung jawabkan.



Gambar 4.1 Skema Proses Eksperimen Hydrothermal Carbonization penelitian sebelumnya (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017)

Sistem HTC pada Gambar 4.1 disimulasikan dengan melakukan beberapa penyederhanaan seperti yang terlihat pada skema Gambar 3.2. Tahap validasi membandingkan nilai beberapa variabel hasil simulasi. Data yang didapatkan dari simulasi berupa massa dari unsur penyusun *hydrochar* seperti yang terlihat pada Tabel 3.8.

Tabel 4.3 memperlihatkan data hasil simulasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan Kim dkk (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017). Hasil yang digunakan sebagai parameter meliputi persentase unsur (C, H, O, N, dan *ash*) dan HHV. Data hasil simulasi dan eksperimen dibandingkan untuk mendapatkan selisih. Selisih dari setiap parameter yang dibandingkan selanjutnya di

rata-rata, didapatkan rata-rata selisih sebesar 5,06% yang artinya tingkat keakuratan dari simulasi sebesar 94,94%. Berdasarkan rata-rata selisih yang kurang dari 10%, maka dapat dikatakan jika simulasi yang dilakukan valid.

Tabel 4. 1 Nilai Selisih Eksperimen dan Simulasi

Variabel	Hasil		
	Simulasi	Penelitian Sebelumnya (Kim, Park, & Yoshikawa, 2017)	Selisih (%)
C (%)	44,56	43,5	2,42
H (%)	5,24	5,7	8
N (%)	1,19	1,1	8,36
O (%)	39,31	40	1,71
Ash (%)	9,7	6,9	8,36
HHV (MJ/kg)	17,47	17,2	1,56
Hydrochar Yield (%)	79	-	
Selisih rata-rata			5,06

4.2 Analisa Pengaruh Kondisi Operasi Terhadap Produk

Analisis pada penelitian ini adalah analisis terhadap persentase kandungan unsur pada setiap variasi kondisi operasi yang diberikan. Data persentase unsur yang dihasilkan dari simulasi digunakan untuk menghitung nilai *hydrochar yield*, HHV, dan kandungan karbon dari *hydrochar*.

Tabel 4.3 menunjukkan persentase berat unsur penyusun *hydrochar* setelah diberikan variasi pada kadar air, suhu dan tekanan. Berdasarkan data yang ditampilkan Tabel 4.3 terlihat jika persentase karbon mula-mula pada bahan baku meningkat setelah dilakukan proses HTC dengan memvariasikan kadar air, suhu, dan tekanan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa proses HTC mampu

meningkatkan persentase karbon pada bahan baku (sampah kota). Meningkatnya karbon akan berpengaruh terhadap nilai kalor yang dimiliki oleh *hydrochar*, hal tersebut akan dibahas pada subbab berikutnya.

Tabel 4. 2 Persentase unsur penyusun setelah melalui proses HTC

Kadar air	Suhu dan Tekanan					
	Ash(%)	C(%)	H(%)	O(%)	N(%)	
58,9 % *	-	9,31	34,78	10	44,5	1,41
58,9 %	180C, 10 bar	10,5	35,62	9,93	42,57	1,38
	200C, 16 Bar	9,71	39,48	9,28	40,13	1,39
	220C, 23 Bar	10,01	41,04	8,7	38,9	1,36
	240C, 33 Bar	10,52	42,63	8,65	36,83	1,36
	260C, 47 Bar	11,12	46,6	8,19	32,77	1,32
68,9 %	180C, 10 bar	10,41	37,18	9,54	42,86	1,31
	200C, 16 Bar	10,54	39,85	8,86	40,75	1,28
	220C, 23 Bar	11,04	42,10	9,12	38,12	1,23
	240C, 33 Bar	12,27	44,16	8,7	35,69	0,9
	260C, 47 Bar	12,34	47,03	8,32	33,29	0,63
78,9 %	180C, 10 bar	10,47	39,89	9,14	39,09	1,41
	200C, 16 Bar	10,64	41,97	8,9	37,13	1,36
	220C, 23 Bar	11,1	44,1	8,58	34,87	1,35
	240C, 33 Bar	11,78	48,77	7,55	30,58	1,33
	260C, 47 Bar	12,25	53,95	5,75	26,95	1,1

**raw material*

Sementara Tabel 4.4 memperlihatkan efek dari perbedaan 5 kondisi suhu, tekanan, dan kadar air terhadap nilai *hydrochar* yield, HHV, dan kandungan karbon. Hasil yang terlihat pada tabel menunjukkan jika semua properti dari bahan baku mengalami perubahan nilai dengan meningkatnya kadar air, suhu, dan tekanan.

Hydrochar yield mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kadar air, suhu, dan tekanan. Sedangkan HHV justru mengalami peningkatan saat kadar air, suhu, dan tekanan ditingkatkan. Perilaku yang sama juga terlihat pada kandungan karbon dimana nilainya meningkat seiring dengan naiknya kadar air, suhu, dan tekanan. Alasan terjadinya perubahan pada nilai

hydrochar yield, HHV, dan kandungan karbon akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

Tabel 4. 3 Efek variasi terhadap *hydrochar yield*, HHV, dan *carbon content*

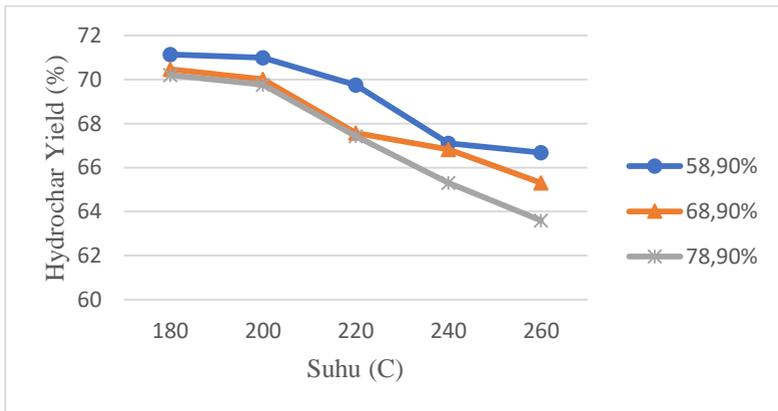
Parameter yang Dianalisa	Kadar air (%)	Kondisi Operasi (Suhu dan Tekanan)				
		180 C, 10 bar	200C, 16 Bar	220C, 23 Bar	240C, 33 Bar	260C, 47 Bar
Hydrochar Yield (%)	58,9	71,14	71	69,75	67,1	66,68
	68,9	70,47	70,02	67,57	66,82	65,3
	78,9	70,02	69,76	67,42	65,3	63,6
HHV (MJ/Kg)	58,9	19,43	19,87	20,31	21,04	22,35
	68,9	19,49	20,31	21,09	21,34	21,9
	78,9	20,4	21,07	21,7	22,51	22,73
Kandungan Karbon (%)	58,9	55,46	61,09	63,42	64,46	68,5
	68,9	57,67	61,43	62,79	65,56	66,65
	78,9	62,71	64,97	65,85	71,37	77,85

4.2.1 Analisa Pengaruh Suhu

Pengaruh suhu pada *hydrochar yield* dengan variasi kadar air terlihat pada Gambar 4.1. Terlihat pada Gambar 4.1 jika grafik memiliki *trendline* menurun dengan bertambahnya suhu, hal tersebut terjadi pada semua variasi kadar air. Nilai *hydrochar yield* terendah pada kadar air 58,9% terletak pada suhu 260°C dengan nilai 66,68%. Hal yang sama juga terjadi pada kadar air 68,9% dan 78,9% dimana yield terendah juga berada pada suhu 260°C dengan nilai sebesar 65,3% dan 63,6%

Sehingga dapat dikatakan jika peningkatan suhu menyebabkan nilai *hydrochar yield* berkurang. Efek tersebut dikarenakan suhu operasi pada HTC adalah antara 180 hingga 250°C (Funke & Ziegler). Meningkatnya suhu membuat produk solid yang terbentuk terkonversi menjadi bentuk produk yang lain yaitu *liquid* dan gas, sehingga *hydrochar* yang merupakan produk *solid* yang terbentuk dalam proses HTC akan berkurang

jumlahnya. Suhu di atas dari 260°C hingga 360°C akan terjadi proses hydrothermal liquefaction, dimana produk yang dihasilkan sebagian besar berupa liquid. Menurut pendapat Krailak pada penelitiannya (Krailak, 2016) tentang proses HTC sebaiknya tidak dilakukan lebih dari suhu 260°C karena akan menghasilkan *hydrochar yield* lebih sedikit dan biaya operasional yang lebih mahal.

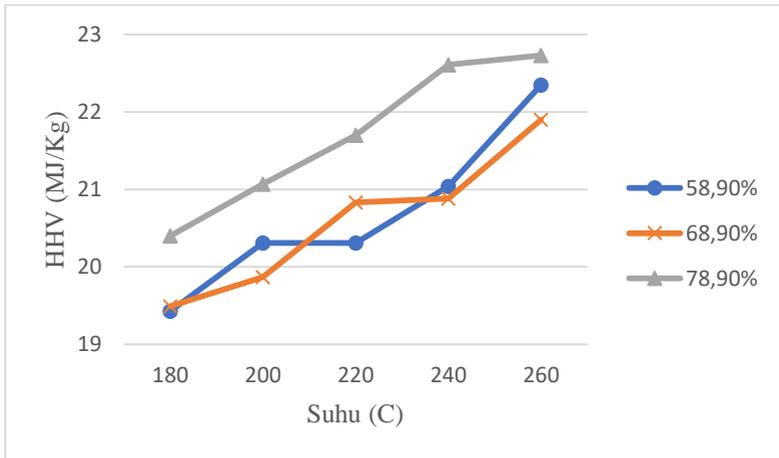


Gambar 4. 1 Grafik *hydrochar yield* terhadap suhu

Pengaruh suhu terhadap HHV dapat dilihat pada Gambar 4.2. Terlihat pada Gambar 4.2 jika HHV mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya suhu, perilaku tersebut terjadi pada semua variasi kadar air. HHV tertinggi pada kadar air 58,9% adalah 22,35 MJ/kg terletak pada suhu 260°C. Kadar air 68,9% dan 78,9% juga mendapatkan HHV tertinggi yaitu 21,9 MJ/Kg dan 22,73 MJ/Kg pada suhu yang sama yaitu 260°C.

Perilaku tersebut dikarenakan dengan suhu akan meningkatkan proses dehidrasi. Proses dehidrasi adalah proses eliminasi gugus hidroksil, proses ini menyebabkan nilai perbandingan atom H/C dan O/C berkurang. Berkurangnya rasio atom H/C dan O/C ini akan menyebabkan peningkatan pada kandungan energi atau HHV dari *hydrochar*, hal tersebut dikarenakan kandungan hidrogen dan oksigen pada bahan baku

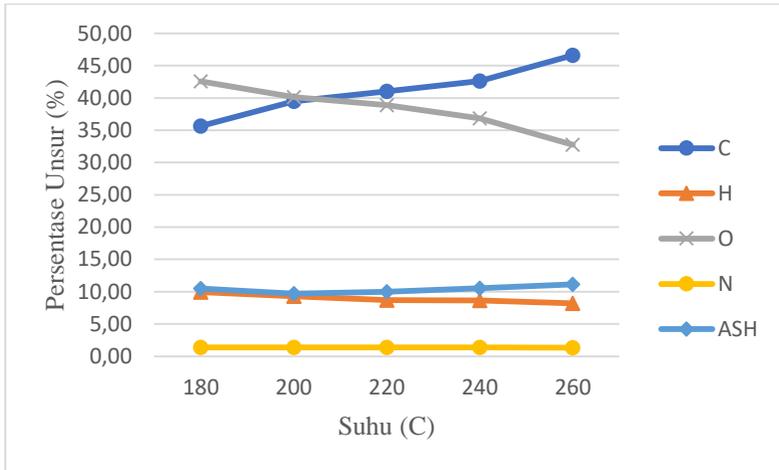
akan berkurang sementara kandungan karbon meningkat. Unsur C,H,O merupakan unsur penyusun dari biomassa, dimana secara teoritis berdasarkan persamaan Boie nilai unsur H dan O merupakan pengurang dari nilai karbon yang menjadi komponen penentu nilai HHV. Sehingga jika nilai kandungan hidrogen dan oksigen semakin rendah maka HHV yang dihasilkan akan semakin tinggi, begitu pula sebaliknya.



Gambar 4. 2 Grafik HHV terhadap suhu

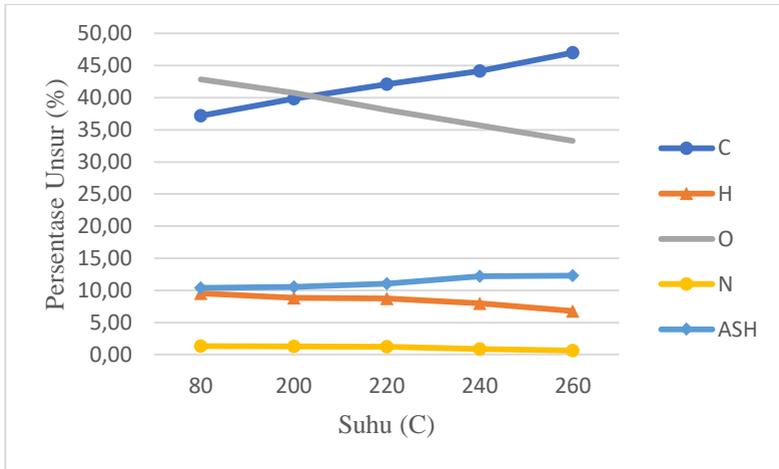
Korelasi antara kenaikan carbon dan penurunan oksigen dan hydrogen seiring dengan meningkatnya suhu pada proses HTC dapat dilihat pada Gambar 4.3, 4.4, dan 4.5. Gambar 4.3 adalah hasil persentase unsur *hydrochar* yang terbentuk pada kadar air 58,9% dengan suhu 180 °C hingga 260 °C. Terlihat pada grafik jika unsur C pada suhu 180 °C yang semula adalah 35,62% menjadi 46,6% saat berada di suhu 260 °C, kandungan karbon meningkat sebesar 10,98%. Berbanding terbalik dengan karbon, persentase oksigen semakin turun seiring dengan bertambahnya suhu, penurunan persentase oksigen sebesar 9,8%. Penurunan tidak terjadi pada oksigen saja namun bisa dilihat juga terjadi penurunan

kandungan unsur hidrogen meskipun tidak signifikan seperti pada oksigen.



Gambar 4. 3 Grafik persentase unsur terhadap suhu pada kadar air 58,9%

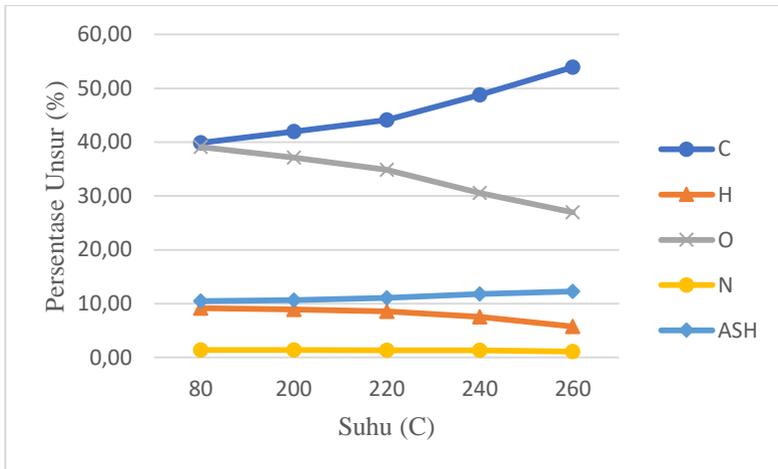
Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh persentase unsur terhadap suhu pada kandungan 68,9%. Terjadi kenaikan karbon sebesar 9,85% pada dari suhu 180°C hingga 260°C. Sama seperti pada kadar air 58,9% di kadar air 68,9% kandungan oksigen juga mengalami penurunan sebesar 9,57%. Sedangkan untuk hidrogen mengalami penurunan sebesar 1,22% saat suhu ditingkatkan dari 180°C hingga 260°C. Sementara untuk nitrogen dan *ash* mengalami perubahan yang tidak terlalu signifikan saat temperatur ditingkatkan.



Gambar 4. 4 Grafik persentase unsur terhadap suhu pada kadar air 68,9%

Gambar 4.5 menunjukkan pengaruh persentase unsur terhadap suhu pada kadar air 78,9%. Sama seperti yang terjadi pada kadar air 58,9% dan 68,9%, pada kadar air 78,9% juga terjadi kenaikan karbon saat suhu dinaikkan. Karbon meningkat sebesar 14,06% saat suhu ditingkatkan. Kenaikan persentase karbon juga diiringi dengan penurunan oksigen, persentase oksigen turun sebesar 12,14% seiring dengan meningkatnya suhu. Perilaku tersebut terjadi pada semua variasi kadar air saat suhu ditingkatkan.

Penurunan kandungan H dan O pada suhu yang lebih tinggi kemungkinan dikarenakan terjadi penguraian ikatan oksigen dan hidrogen saat terjadi reaksi dehidrasi (Waled, Harsh, & Manuel, 2016). Sementara itu kandungan nitrogen cenderung tidak mengalami perubahan atau perubahan yang terjadi sangat kecil. Hal tersebut dikarenakan nitrogen cenderung bergabung dengan struktur kompleks yang tahan dengan suhu yang lebih tinggi dan tidak mudah menguap (Adel, Adel, & Meththika, 2015).

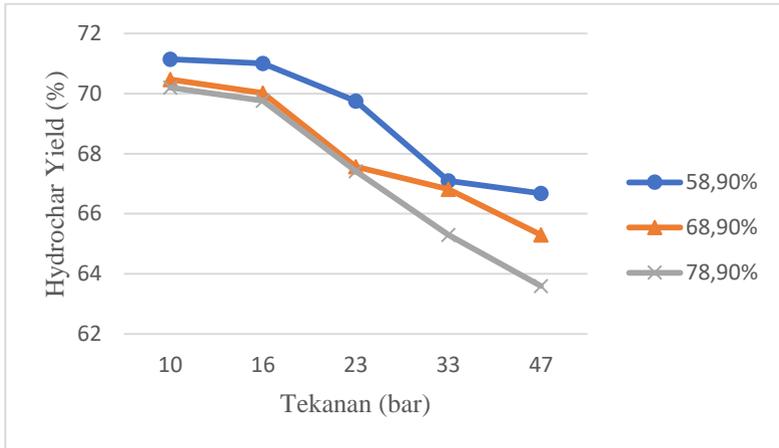


Gambar 4. 5 Grafik persentase unsur terhadap suhu pada Kadar air 78,9%

4.2.2 Analisa Pengaruh Tekanan

Pengaruh tekanan pada proses HTC memiliki efek yang sama seperti pengaruh suhu. Hal tersebut dikarenakan suhu dan tekanan memiliki hubungan yang linear, tekanan yang tinggi akan menghasilkan suhu yang tinggi. Gambar 4.6 merupakan grafik *Hydrochar yield* terhadap tekanan. Terlihat pada Gambar 4.6 bahwa *hydrochar yield* pada semua variasi kadar air menurun seiring dengan meningkatnya tekanan. Nilai *hydrochar yield* terendah pada kadar air 58,9% terletak pada tekanan 47 bar dengan nilai *yield* 66,68%. Nilai *yield* terendah pada kadar air 68,9% dan 78,9% juga berada pada tekanan 47 bar.

Penurunan nilai *hydrochar yield* saat tekanan semakin tinggi karena tekanan dipengaruhi oleh reaksi dekarboksilasi. Reaksi dekarboksilasi adalah reaksi untuk menghilangkan oksigen dari bahan baku selama proses HTC berlangsung, dari proses tersebut akan dihasilkan gas CO_2 dan *liquid*. Peningkatan tekanan membuat reaksi dekarboksilasi menghasilkan gas dan *liquid* semakin banyak.



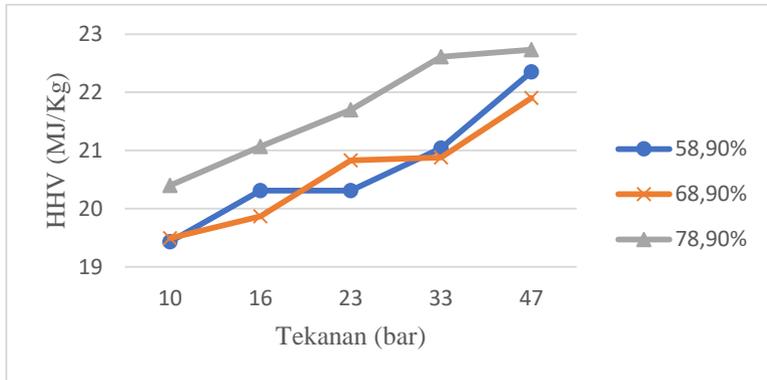
Gambar 4. 6 Grafik *hydrochar yield* terhadap tekanan

Gambar 4.7 yang merupakan grafik HHV terhadap tekanan. HHV meningkat seiring dengan peningkatan tekanan. HHV tertinggi pada kadar air 58,9% adalah 22, 35 MJ/Kg terletak pada tekanan 47 bar. Sementara pada kadar air 68,9% HHV tertinggi juga berada pada tekanan 47 bar dengan nilai 21,9 MJ/Kg. Kadar air 78,9% juga memiliki HHV tertinggi pada tekanan 47 bar dan HHV terendah pada tekanan 10 bar.

Berdasarkan pendapat Nizamuddin dkk dalam penelitiannya (Sabzoi, Humair, & Griffin, 2015) dikatakan bahwa tekanan merupakan faktor lain yang secara signifikan mempengaruhi degradasi dari biomassa dalam proses hidrolisis. Proses dekomposisi biomassa dan hydrolysis akan terjadi secara optimal dengan menjaga proses pada tekanan tinggi. Selain itu diperlukan tekanan yang cukup tinggi agar terjadi reaksi dekarboksilasi dan dehidrasi.

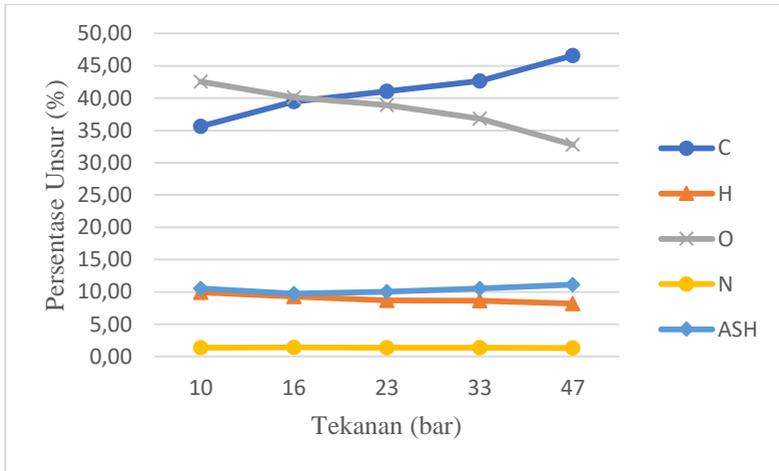
Reaksi dehidrasi sendiri seperti yang sudah dijelaskan pada subbab 4.2.1 merupakan reaksi yang mempengaruhi terbentuknya karbon. Pada reaksi tersebut kandungan karbon akan meningkat sementara oksigen dan hidrogen akan turun, peningkatan karbon dan penurunan oksigen-hidrogen akan berpengaruh pada

kandungan energi yang dimiliki oleh produk. Sehingga dapat dikatakan jika semakin tinggi tekanan yang digunakan dalam proses HTC maka kandungan energi yang dihasilkan juga akan semakin tinggi.



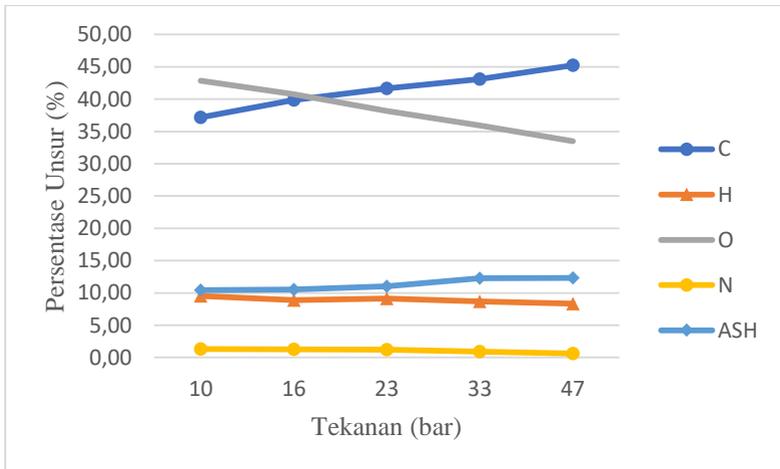
Gambar 4. 7 Grafik HHV terhadap tekanan

Pengaruh tekanan terhadap persentase unsur, dapat dilihat secara keseluruhan pada Gambar 4.8, 4.9 dan 4.10. Gambar 4.8 menunjukkan pengaruh tekanan terhadap unsur pembentuk *hydrochar* pada kadar air 58,9%. Terjadi kenaikan karbon dari 35,62% menjadi 46,6% pada dari tekanan mula-mula 10 bar menjadi 47 bar. Sementara itu kandungan oksigen justru mengalami penurunan dari persentase awal 42,57% menjadi 32,77%. Persentase hidrogen juga mengalami penurunan walaupun tidak sebesar penurunan pada oksigen, hidrogen mengalami penurunan sebesar 1,22% saat tekanan dinaikkan dari 10 bar menjadi 47 bar. Sementara untuk nitrogen dan *ash* mengalami perubahan yang tidak terlalu signifikan saat tekanan ditingkatkan.



Gambar 4. 8 Grafik persentase unsur terhadap tekanan pada kadar air 58,9%

Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh persentase unsur terhadap tekanan pada kandungan 68,9%. Terjadi kenaikan karbon sebesar 9,85% dari tekanan 10 bar menjadi 47 bar. Sama seperti pada kadar air 58,9% di kadar air 68,9% kandungan oksigen juga mengalami penurunan yaitu sebesar 9,57%. Sedangkan untuk hidrogen mengalami penurunan dari persentase awal 9,54% menjadi 8,32%, terjadi penurunan sebesar 1,22% pada hidrogen saat tekanan ditingkatkan dari 10 bar menjadi 47 bar. Sementara untuk nitrogen dan *ash* hanya mengalami sedikit sekali perubahan, atau dapat dikatan nitrogen dan *ash* hampir tidak terjadi perubahan jumlah persentase saat tekanan ditingkatkan dari 10 bar menjadi 47 bar.

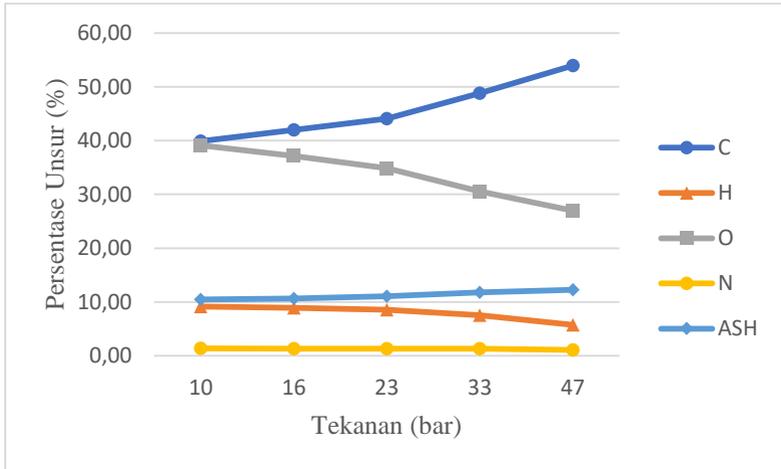


Gambar 4. 9 Grafik persentase unsur terhadap tekanan pada kadar air 68,9%

Gambar 4.10 menunjukkan pengaruh persentase unsur terhadap tekanan pada kandungan 78,9%. Sama seperti yang terjadi pada variasi kadar air 58,9% dan 68,9%, pada kadar air 78,9% juga terjadi kenaikan karbon saat suhu dinaikkan. Karbon meningkat sebesar 14,06% saat suhu ditingkatkan. Kenaikan persentase karbon juga diiringi dengan penurunan oksigen, persentase oksigen turun sebesar 12,14% seiring dengan meningkatnya suhu. Persentase hidrogen terlihat mengalami penurunan yang cukup banyak yaitu hampir 2% pada tekanan 23 bar hingga 47 bar. Persentase kandungan *ash* dan nitrogen cenderung tidak mengalami perubahan yang signifikan, hal tersebut terlihat pada grafik dimana untuk garis kuning dan biru muda tidak mengalami penurunan ataupun peningkatan.

Tekanan memiliki pengaruh pada reaksi dehidrasi, dimana pada reaksi dehidrasi terjadi penurunan kandungan H dan O saat terjadi peningkatan tekanan, hal tersebut kemungkinan dikarenakan terjadi penguraian ikatan oksigen dan hidrogen saat berlangsungnya reaksi dehidrasi. Sementara itu kandungan

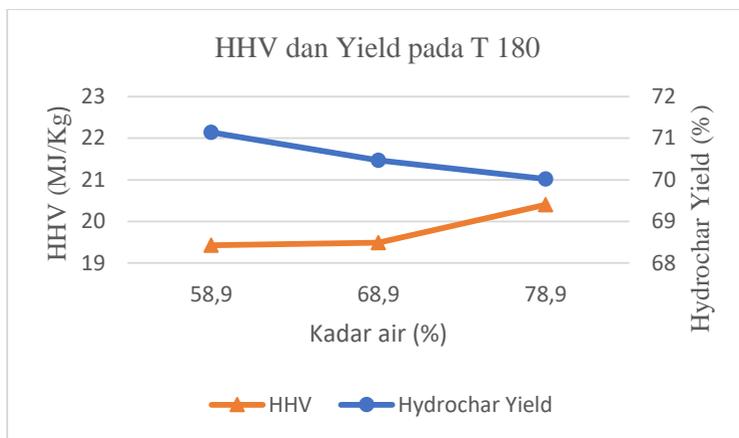
nitrogen cenderung tidak mengalami perubahan atau perubahan yang terjadi sangat kecil. Hal tersebut dikarenakan nitrogen cenderung bergabung dengan struktur kompleks.



Gambar 4. 10 Grafik persentase unsur terhadap tekanan pada kadar air 78,9%

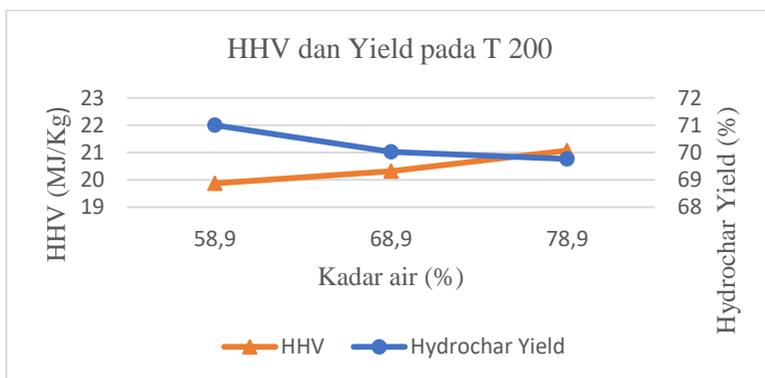
4.2.3 Analisa Pengaruh Kadar Air

Pengaruh dari kadar air pada *hydrochar yield* dan HHV dapat dilihat pada Gambar 4.11 hingga 4.15. Pada gambar 4.11 yang merupakan grafik HHV dan *hydrochar yield* pada suhu 180°C dengan variasi kadar air 58,9%, 68,9%, dan 78,9% terlihat bahwa HHV sebesar 19,43 MJ/Kg meningkat menjadi 20,4% atau terjadi peningkatan sebesar 0,97% seiring dengan peningkatan kadar air. Sedangkan pada *hydrochar yield* tidak terlalu mengalami perubahan nilai yang signifikan, *yield* terbentuk sebanyak 70,2%, 70,47%, dan 71,14% pada kadar air 58,9%, 68,9%, dan 78,9%.



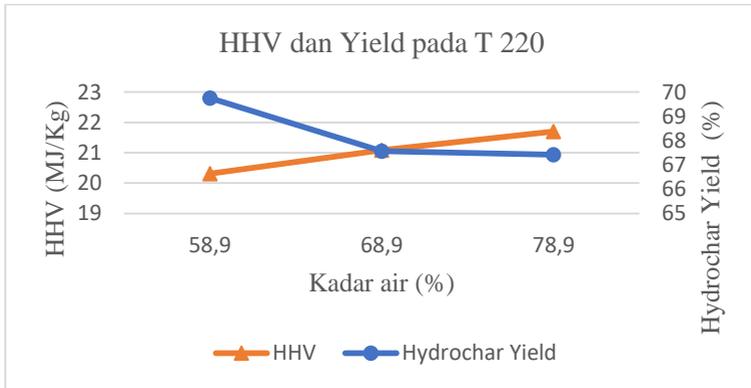
Gambar 4. 11 Grafik HHV dan Yield pada suhu 180 °C terhadap variasi kadar air

Selanjutnya pada Gambar 4.12 yaitu HHV dan hydrochar yield pada suhu 200°C terlihat jika HHV meningkat sebanyak 1,83% dari kadar air 58,9% hingga 78,9%. Grafik tersebut memperlihatkan bahwa nilai *hydrochar yield* cenderung tidak mengalami perubahan yang besar, hanya terjadi penurunan sebesar 0,2% dari nilai *yield* awal.



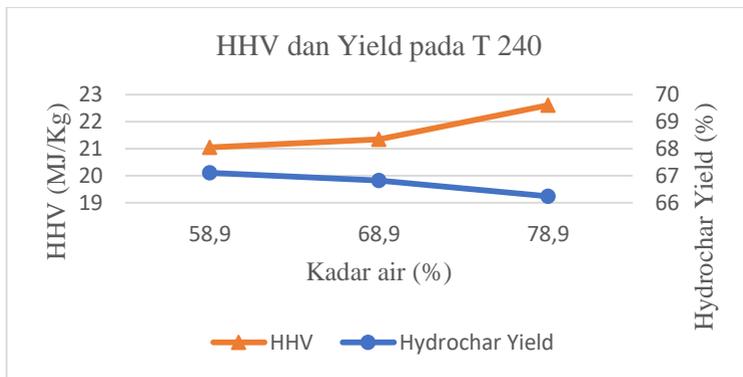
Gambar 4. 12 Grafik HHV dan Yield pada suhu 200 °C terhadap variasi kadar air

Sementara pada Gambar 4.13 yang menunjukkan grafik HHV dan hydrochar yield pada suhu 220°C HHV mengalami kenaikan sebanyak 1,39%. Sementara *hydrochar yield* mengalami penurunan dari 69,75% menjadi 67,57% atau terjadi penurunan sebanyak 2,18%.

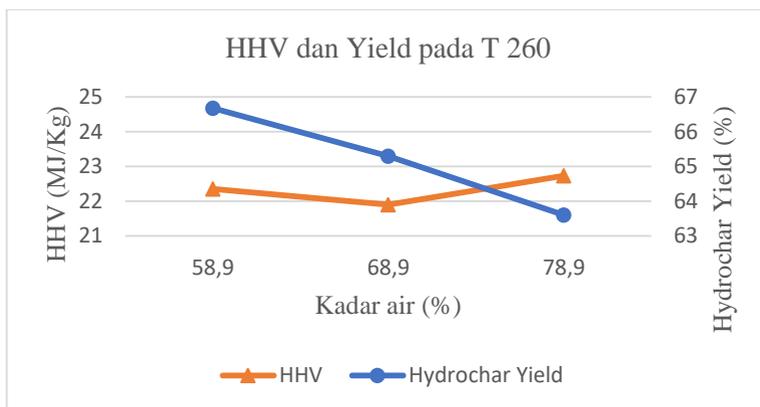


Gambar 4. 13 Grafik HHV dan Yield pada suhu 220 °C terhadap variasi kadar air

Gambar 4.14 dan 4.15 merupakan grafik HHV dan *hydrochar yield* pada suhu 240°C dan 260°C. Kedua grafik tersebut memperlihatkan bahwa HHV pada suhu 240°C dan 260°C dimana terjadi peningkatan sebanyak 1,47% dan 0,38%. Sebaliknya untuk *hydrochar yield* pada kedua suhu tersebut mengalami penurunan sebesar 0,87% dan 1,38%.



Gambar 4. 14 Grafik HHV dan Yield pada suhu 240 °C terhadap variasi kadar air



Gambar 4. 15 Grafik HHV dan Yield pada suhu 260 °C terhadap variasi kadar air

Funke dan Ziegler dalam penelitiannya (Funke & Ziegler) menyatakan bahwa kadar air tidak hanya bekerja sebagai pelarut dalam proses HTC, tapi juga bekerja sebagai katalis pada proses karbonisasi, memfasilitasi reaksi hidrolisis, dan sebagai pengurai ikatan pada suhu tinggi.

Kadar air 58,9% menghasilkan HHV yang rendah jika dibandingkan dengan variasi kadar air yang lain yaitu sekitar 19,43 MJ/Kg hingga 22,35 MJ/Kg, hal tersebut kemungkinan

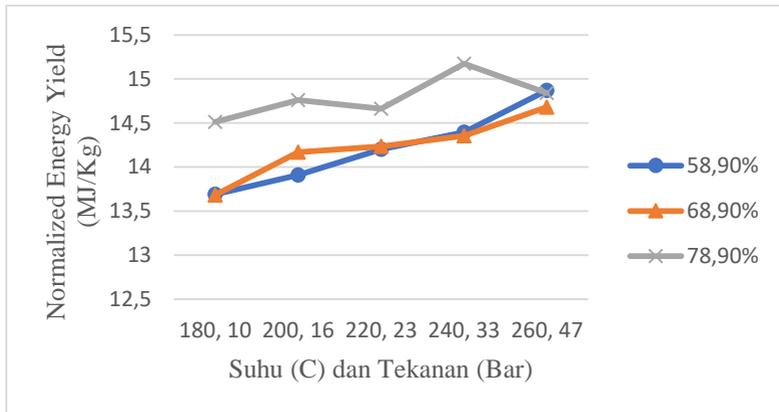
dikarenakan kekurangan air sebagai katalis yang digunakan dalam berbagai reaksi yang terjadi dalam proses HTC. Sebaliknya pada kadar air 78,9% menghasilkan HHV sebesar 20,4 MJ/Kg hingga 22,73MJ/Kg. Kadar air yang lebih banyak membuat reaksi hidrolisis yang terjadi lebih cepat sehingga proses dekomposisi bahan baku juga terjadi lebih cepat, sehingga reaksi berikutnya yaitu reaksi dehidrasi dapat berlangsung lebih lama dan menyebabkan berkurangnya kandungan hidrogen dan oksigen. Kandungan hidrogen dan oksigen ini mempengaruhi kandungan energi atau HHV *hydrochar*. Semakin besar kandungan H dan O maka akan semakin kecil HHV yang dihasilkan oleh *hydrochar*, begitupun sebaliknya.

Bahan baku dengan kadar air yang lebih tinggi menghasilkan *hydrochar yield* yang lebih sedikit, hal tersebut karena jumlah air (bekerja sebagai pelarut) meningkatkan kelarutan dari bahan baku, produk terhidrolisis (contohnya glukosa), dan produk intermediate (contohnya HMF) sehingga menghasilkan *hydrochar* yang lebih sedikit, karena sebagian air membentuk produk *liquid* dan sisanya berupa gas.

4.3 Diskusi

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan dengan melakukan variasi pada kadar air bahan baku, suhu, dan tekanan kondisi optimum dapat dicari untuk setiap variasi kadar air bahan baku. Kondisi optimum didapatkan melalui perhitungan normalisasi *energy yield*. Perhitungan normalisasi energi *yield* adalah perbandingan antara kandungan energi (HHV) yang dihasilkan oleh *hydrochar* dan *hydrochar yield*. Normalisasi energi *yield* ini perlu dicari karena pada proses HTC jumlah *yield* dan HHV yang dihasilkan memiliki pola berlawanan saat diberi suhu, tekanan, dan kadar air ditingkatkan. Gambar 4.16 menunjukkan normalisasi energi *yield* dengan variasi kadar air dan suhu. Variasi kadar air 78,9% mendapatkan kondisi optimumnya di suhu 240°C dan tekanan 33 bar dengan nilai normalisasi energi *yield*nya sebesar 15,17 MJ/Kg. Sedangkan untuk kadar air 68,9% dan 58,9%

belum didapatkan kondisi optimum, hal tersebut dikarenakan grafik yang terbentuk pada dua variasi kadar air tersebut terus naik seiring dengan meningkatnya suhu dan tekanan.



mGambar 4. 16 Grafik normalized energy yield

Letak kondisi optimum dengan variasi kadar air 78,9% pada suhu 240°C dan tekanan 33 bar berkaitan dengan hasil dari penelitian-penelitian sebelumnya dimana dikatakan kondisi operasi HTC berada pada suhu 180-250°C. Sehingga suhu di atas 250°C akan menghasilkan *hydrocar yield* lebih sedikit dan kandungan energi (HHV) yang lebih tinggi. Sehingga suhu 240°C yang masih berada di daerah kondisi operasi HTC dapat diasumsikan sebagai kondisi optimum yang menghasilkan normalisasi energi yield tertinggi. Suhu mempengaruhi proses dehidrasi yang terjadi selama HTC berlangsung. Proses dehidrasi ini menyebabkan berkurangnya rasio atom H/C dan O/C, hal tersebut akan berdampak pada peningkatan pada kandungan energy atau HHV dari *hydrochar*. Unsur C,H,O merupakan unsur penyusun dari biomassa, dimana C,H,O ini berdasarkan persamaan Boie merupakan penentu nilai kalor (HHV). Meningkatnya suhu membuat produk solid yang terbentuk terkonversi menjadi bentuk produk yang lain yaitu liquid dan gas, sehingga *hydrochar* yang

merupakan produk solid yang terbentuk dalam proses HTC akan berkurang massanya.

Kondisi optimum yang didapatkan berada pada tekanan 47 bar yang merupakan tekanan tertinggi pada penelitian ini. Hal tersebut dikarenakan Pengaruh tekanan pada proses HTC memiliki efek yang sama seperti pengaruh suhu pada proses HTC. Hal tersebut dikarenakan suhu dan tekanan memiliki hubungan yang linear, tekanan yang tinggi akan menghasilkan suhu yang tinggi. Pengaruh tekanan memiliki perilaku yang sama dimana semakin tingginya tekanan maka karbon yang dihasilkan juga semakin tinggi sedangkan kandungan oksigen cenderung semakin turun. Hal ini dikarenakan tekanan merupakan faktor lain yang secara signifikan mempengaruhi degradasi dari biomassa dalam proses hidrolisis. Proses dekomposisi biomassa dan hydrolysis akan terjadi secara optimal dengan menjaga proses pada tekanan tinggi. Selain itu diperlukan tekanan yang cukup tinggi minimal pada tekanan saturasi agar terjadi reaksi dekarboksilasi dan dehidrasi..

Selain itu kadar air 78,9% juga mempengaruhi banyak *hydrochar yield* dan HHV, karena semakin tinggi kadar air menyebabkan semakin kecil jumlah *hydrochar yield*. Kadar air yang lebih banyak akan menyebabkan reaksi hidrolisis yang terjadi lebih cepat sehingga proses dekomposisi bahan baku juga terjadi lebih cepat, hal tersebut berpengaruh pada reaksi berikutnya yaitu reaksi dehidrasi dapat berlangsung lebih lama dan menyebabkan berkurangnya kandungan hidrogen dan oksigen. Kandungan hidrogen dan oksigen ini mempengaruhi kandungan energi atau HHV *hydrochar*. Semakin besar kandungan H dan O maka akan semakin kecil HHV yang dihasilkan oleh *hydrochar*, begitupun sebaliknya.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan nilai *hydrochar yield* tertinggi adalah 71,4% yang berada pada suhu 180°C, tekanan 10 bar, dan pada kadar air 58,9%. Sedangkan untuk HHV tertinggi adalah 22,73 MJ/Kg berada pada suhu 260°C, tekanan 47 bar dengan kadar air 78,9%. Hasil untuk carbon content tertinggi adalah 77,85% berada pada kondisi operasi suhu 260°C, tekanan 47 bar dengan kadar air 78,9%. Sebaliknya untuk nilai

carbon content terendah yaitu 55.46% berada pada kondisi operasi paling rendah yaitu suhu 180°C, tekanan 10 bar, dan kadar air 58,9%.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari tugas akhir yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan diantaranya sebagai berikut:

- a. Peningkatan kadar air pada bahan baku menyebabkan peningkatan kandungan energi atau HHV yang dimiliki *hydrochar*. HHV meningkat sebesar 0,39%, 0,97%, 1,39%, 1,43%, dan 1,45% dari kadar air mula-mula 58,9% menjadi 78,9% pada tiap suhu operasi. HHV tertinggi adalah 22,73 MJ/kg berada pada kadar air 78,9% dan suhu 260°C, sedangkan HHV terendah adalah 19,43 MJ/Kg pada kadar air 58,9%.
- b. Semakin tinggi suhu operasi yang digunakan menyebabkan semakin besar kandungan karbon pada *hydrochar*. Kandungan karbon meningkat sebanyak 8,98%, 9,6% 15,14% dari suhu 180°C menuju 260°C pada setiap variasi kadar air. Kandungan karbon terbesar adalah 53,95% pada suhu 260°C dengan kadar air 78,9%, sedangkan kandungan karbon terendah adalah 35,62% pada suhu 180°C dengan kadar air 58,9%. Peningkatan kandungan karbon dapat meningkatkan kandungan energi yang dihasilkan *hydrochar*. Namun memiliki efek menurunkan jumlah *hydrochar yield* yang dapat dihasilkan. Jumlah *hydrochar yield* terendah adalah 63,6% pada suhu 260 °C
- c. Peningkatan tekanan operasi memiliki efek yang tidak berbeda jauh dari suhu karena suhu dan tekanan memiliki hubungan yang linear. Tekanan tertinggi yaitu 47 bar menghasilkan persentase berat karbon sebesar 45,24%, 46,6%, 53,95% pada setiap variasi kadar air. Sedangkan tekanan terendah 10 bar hanya menghasilkan persentase berat karbon sebesar 10,5%, 10,41%, dan 10,47%.
- d. Kondisi optimum dengan kadar air 78,9% berada pada suhu 240°C, tekanan 33 bar dengan nilai normalisasi energi yield sebesar 15,17 MJ/Kg. Kadar air 68,9% dan 58,9% belum

ditemukan kondisi optimum, hal tersebut dikarenakan nilai normalisasi energi yield terus meningkat saat suhu dan tekanan ditingkatkan.

5.2 Saran

Pada tugas akhir ini dapat di berikan saran untuk pengembangan pada tugas akhir selanjutnya yaitu:

- a. Menambahkan lebih banyak variasi suhu dan tekanan untuk menemukan kondisi optimum pada proses HTC.
- b. Melakukan analisa laju reaksi terhadap efek variasi kadar air sebagai katalis.

DAFTAR PUSTAKA

- Adel, U., Adel, A., & Meththika, V. (2015). Biochar Production from date palm waste : Charring suhu induced changes in composition and surface chemistry.
- Behar, F., Lewan, M. D., Lorant, F., & van den Broucke, M. (2003). Comparison of artificial maturation of lignite in hydrous and nonhydrous conditions. *34(Organic Geochemistry)*, 575-600.
- Berge, N. D., Rienhart, K. R., Mao, J., Flora, J. R., Chappell, M., & Bae, S. (2014). Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. *Environmental Science and Technology*, *45*, 5696-5703.
- Biller, P., & Ross, A. B. production of Biofuels Via Hydrothermal Conversion.
- Cao, X., Ro, K., Libra, J., Kamman, C., Lima, I., & Berge, N. (2013). Effects of biomass types and carbonization conditions on the chemical characteristics of hydrochar. *Agric Fppd Chem*, *61*.
- Funke, A., & Ziegler, F. (2010.). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproduct, and Biorefining*, *4*, 160-177.
- Herlian, E., Kania, D., Darmawan, P. A., & Enri, D. (2016). Hydrothermal Carbonization of Biomass Waste by Using a Stirred Reactor : An Initial Experiment Result. *Reaktor*.
- Hoekman, S., Broch, A., Robbins, C., Zielinska, B., & Felix, I. (2012). Hydrothermal carbonization (HTC) of selected woody and herbaceous biomass feedstocks. *Biomass-Converts Biorefinery*.

- Hoekman, S., Broch, A., Robbins, C., Zielinska, B., & Felix, I. (2012). Hydrothermal carbonization (HTC) of selected woody and herbaceous biomass feedstocks. (Biomass Convers Biorefinery).
- (2015). *Jenis-jenis Sampah Perkotaan*. Jakarta: www.masterpedidikan.com.
- Kim, D., Park, K. Y., & Yoshikawa, K. (2017). Conversion of Municipal Solid Waste into Biochar Through Hydrothermal Carbonization.
- Krailak, F. (2016). *Evaluation of Hydrothermal Carbonization Reactions for Faecal Sludge Treatment and Hydrochar Production*. Bangkok: Asian Institute of Technology School of Environment.
- Libra, J., Ro, K., Kamman, C., Funke, A., Berge, N., Neubauer, Y., . . . Fuhner, M. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *2(Biofuels)*, 71-106.
- Libra, J., Ro, K., Kamman, C., Funke, A., Berge, N., Neubauer, Y., . . . Fuhner, M. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2, 71-106.
- Nikmatun, L., & Warmadewanthi, I. (2012). *Prediksi Potensi Pencemaran Pengolahan Sampah*. Surabaya.
- Park, S. W., & Jang, C. H. (2011). Characteristics of carbonized sludge for co-combustion in pulverized coal power plants. *31(Waste Management)*, 523-529.

- Sabzoi, N., Humair, B., & Griffin, G. J. (2015). An Overview of effect of process parameters on hydrothermal carbonization of biomass.
- Sevilla, M., & Fuertes, A. B. (2009). The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. *47(Carbon)*, 2281-2289.
- Siskin, M., & Katrizky, A. R. (2001). Reactivity of organic compounds in superheated water: General background. *101(Cheical Reviews)*, 825-835.
- (2017). *Statistik Lingkungan Hidup Indonesia*. Jakarta: BPS Indonesia.
- Tititrici, M. M., Thomas, A., & Antonietti, M. (2008). Hydrothermal carbon from biomass: a comparison of the local structure from poly to monosaccharides and pentoses/ hexoses. *10(Green Chemistry)*, 1204-1212.
- Valkenburg, C., Walton, C. W., Thompson, B. L., Gerber, M. A., Jones, S. B., & Stevens, D. J. (t.thn.). Municipal Solid Waste (MSW) to Liquid Fuels Synthesis. *Avaiability of Feedstock and Technoogy, 1*.
- (2018). *Volume Sampah 2018 Diprediksi Mencapai 66,5 Juta Ton*. www.idntimes.com.
- Waled, S., Harsh, J. B., & Manuel, G. P. (2016). Influence of feedstock source and pyrolysis suhu on biochar bulk and surface properties.
- (2017). *World Bank Group Country*. World Bank Data.
- Xiaowei, L. (2014). *Understanding Hydrothermal Carbonization Of Mixed Feedstock For Waste Conversion*. California.

Zhao, P., Shen, Y., Ge, S., Chen, Z., & Yoshikawa, K. (2014). Clean solid biofuel production from high moisture content waste biomass employing hydrothermal treatment. (*Appl Energy*), 67-345.

LAMPIRAN

1. Hasil simulasi (MC= 58,9% ; T=180°C, P=10 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	180	180	80	80	180
Pressure	bar	1	1	1	10	10	1	1	10
Vapor Fraction		0	0,366312	0	1	0,896695	1	0	0,675
Mass Flow	kg/hr	20	20	2	2	22	4,378	17,622	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	12,0054	0	5,522	5,5220
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00153171	0	1,54	1,5400
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,2134	0,2134
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	6,6	6,6000
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,628	1,6280
CO2	kg/hr	0	0	0	0	6,52713	1,408	0	1,4080
CO	kg/hr	0	0	0	0	1,46	2,068	0	2,0680
CH4	kg/hr	0	0	0	0	1,99668	0,902	0	0,9020
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,09618	0	2,1186	2,1186

2. Hasil simulasi (MC= 58,9% ; T=200°C, P=16 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	200	200	80	80	200
Pressure	bar	1	1	1	16	16	1	1	16
Vapor Fraction		0	0,35121	0	1	0,802484	1	0	0,658
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,5584	17,4416	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	12,7318	0	6,028	6,028
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00190262	0	1,43	1,430
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,2134	0,213
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	6,182	6,182
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,496	1,496
CO2	kg/hr	0	0	0	0	6,76247	1,474	0	1,474
CO	kg/hr	0	0	0	0	3,08	2,112	0	2,112
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,081	0,9724	0	0,972
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,07691	0	2,0922	2,092

3. Hasil simulasi (MC= 58,9% ; T=220°C, P=23 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD- DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	220	220	80	80	220
Pressure	bar	1	1	1	23	23	1	1	23
Vapor Fraction		0	0,3418	0	1	0,807662	1	0	0,643
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,675	17,325	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	11,5927	0	6,314	6
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00240683	0	1,298	1
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,209	0,209
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	5,984	6
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,54	1,54
CO2	kg/hr	0	0	0	0	6,97388	1,518	0	2
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,631	2,178	0	2
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,15606	0,979	0	0,979
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,0596	0	1,98	1,98

4. Hasil simulasi (MC= 58,9% ; T=240°C, P=33 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	240	240	80	80	240
Pressure	bar	1	1	1	33	33	1	1	33
Vapor Fraction		0	0,3578	0	1	0,811464	1	0	0,6363
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,818	17,182	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,7564	0	6,4174	6,4174
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00293128	0	1,012	1,012
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,2046	0,2046
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	5,544	5,544
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,584	1,584
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,1299	1,628	0	1,628
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,000119464	2,2	0	2,2
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,21086	0,99	0	0,99
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,04682	0	2,42	2,42

5. Hasil simulasi (MC= 58,9% ; T=260°C, P=47 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	260	260	80	80	260
Pressure	bar	1	1	1	47	47	1	1	47
Vapor Fraction		0	0,36651	0	1	0,813729	1	0	0,616
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	5,346	16,654	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,258	0	6,82	6,820
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00345395	0	0,5544	0,554
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,1936	0,194
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	4,796	4,796
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,628	1,628
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,22395	1,65	0	1,650
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,000211388	2,662	0	2,662
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,24309	1,034	0	1,034
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,03912	0	2,662	2,662

6. Hasil simulasi (MC= 68,9% ; T=180°C, P=10 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	180	180	80	80	180
Pressure	bar	1	1	1	10	10	1	1	10
Vapor Fraction		0	0,366312	0	1	0,796695	1	0	0,6659
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,2196	17,775	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	12,0054	0	5,742	5,742
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00153171	0	1,474	1,474
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,2024	0,202
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	6,6198	6,620
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,6082	1,608
CO2	kg/hr	0	0	0	0	4,52713	1,3772	0	1,377
CO	kg/hr	0	0	0	0	1,46	1,98	0	1,980
CH4	kg/hr	0	0	0	0	1,99668	0,8624	0	0,862
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,09618	0	2,134	2,134

7. Hasil simulasi (MC= 68,9% ; T=200°C, P=16 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD- DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	200	200	80	80	200
Pressure	bar	1	1	1	16	16	1	1	16
Vapor Fraction		0	0,366312	0	1	0,802484	1	0	0,6485
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,2746	17,7254	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	12,7318	0	6,116	6,116
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00190262	0	1,364	1,364
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,1958	0,196
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	6,2546	6,255
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,617	1,617
CO2	kg/hr	0	0	0	0	6,76247	1,3794	0	1,379
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,201	2,024	0	2,024
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,081	0,8712	0	0,871
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,07691	0	2,178	2,178

8. Hasil simulasi (MC= 68,9% ; T=220°C, P=23 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	220	220	80	80	220
Pressure	bar	1	1	1	23	23	1	1	23
Vapor Fraction		0	0,366132	0	1	0,807662	1	0	0,6446
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,4	17,6	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	11,5927	0	6,182	6,182
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00240683	0	1,276	1,276
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,1826	0,183
O2	kg/hr	0	616.832	0	0	0	0	5,6606	5,661
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,6368	1,637
CO2	kg/hr	0	0	0	0	6,97388	1,4102	0	1,410
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,631	2,112	0	2,112
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,15606	0,8778	0	0,878
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,0596	0	2,662	2,662

9. Hasil simulasi (MC= 68,9% ; T=240°C, P=33 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	240	240	80	80	240
Pressure	bar	1	1	1	33	33	1	1	33
Vapor Fraction		0	0,36612	0	1	0,811464	1	0	0,63
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,5298	17,4762	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,7564	0	6,336	6,336
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00293128	0	0,99	0,990
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,132	0,132
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	5,2822	5,282
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,804	1,804
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,1299	1,342	0	1,342
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,000119464	2,3738	0	2,374
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,21086	0,814	0	0,814
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,04682	0	2,926	2,926

10. Hasil simulasi (MC= 68,9% ; T=260°C, P=47 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	260	260	80	80	260
Pressure	bar	1	1	1	47	47	1	1	47
Vapor Fraction		0	0,37123	0	1	0,813721	1	0	0,618421
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,742918	17,29395	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,258	0	6,63563	6,636
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00345395	0	0,779352	0,779352
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,0846154	0,0846154
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	5,14818	5,148
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,75911	1,759
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,22395	1,44737	0	1,447
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,000211388	2,40486	0	2,405
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,24309	0,890688	0	0,890688
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,03912	0	2,8502	2,850

11. Hasil simulasi (MC= 78,9% ; T=180°C, P=10 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	180	180	80	80	180
Pressure	bar	1	1	1	10	10	1	1	10
Vapor Fraction		0	0,37114	0	1	0,896655	1	0	0,6417
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,2152	17,7848	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	14,0054	0	6,2436	6,244
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00153171	0	1,43	1,430
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,22	0,220
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	6,1182	6,118
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,639	1,639
CO2	kg/hr	0	0	0	0	6,52713	1,4058	0	1,406
CO	kg/hr	0	0	0	0	1,46	1,8194	0	1,819
CH4	kg/hr	0	0	0	0	1,99668	0,99	0	0,990
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,09618	0	2,134	2,134

12. Hasil simulasi (MC= 78,9% ; T=220°C, P=16 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	220	220	80	80	220
Pressure	bar	1	1	1	16	16	1	1	16
Vapor Fraction		0	0,36414	0	1	0,810814	1	0	0,627
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,4176	17,5824	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,8993	0	6,468	6
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00297501	0	1,342	1
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,2134	0,2134
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	5,7222	6
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,639	2
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,104	1,43	0	1,43
CO	kg/hr	0	0	0	0	7,76	1,892	0	2
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,20124	1,0956	0	1
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,04895	0	2,1978	2

13. Hasil simulasi (MC= 78,9% ; T=220°C, P=23 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	220	220	80	80	220
Pressure	bar	1	1	1	16	16	1	1	16
Vapor Fraction		0	0,351114	0	1	0,811464	1	0	0,599
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,5166	17,4834	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,8993	0	6,556	6,556
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00297501	0	1,276	1,276
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,2002	0,200
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	5,1832	5,183
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0,000
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,65	1,650
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,104	1,4553	0	1,455
CO	kg/hr	0	0	0	0	7,76	1,9173	0	1,917
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,20124	1,144	0	1,144
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,04895	0	2,618	2,618

14. Hasil simulasi (MC= 78,9% ; T=240°C, P=33 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	240	240	80	80	240
Pressure	bar	1	1	1	33	33	1	1	33
Vapor Fraction		0	0,35624	0	1	0,86271	1	0	0,5677
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,6794	17,3206	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	107564	0	7,106	7
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00293128	0	1,1	1,1
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,1936	0,1936
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	4,455	4
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,716	1,716
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,1299	1,518	0	1,518
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,000119464	1,9514	0	1,9514
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,21086	1,21	0	1,21
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,04682	0	2,75	2,75

15. Hasil simulasi (MC= 78,9% ; T=260°C, P=47 bar)

Stream Name	Units	FEED	PROD-DEC	WATER	STEAM	R-OUT	GAS	SOLID	PRODUCT
Suhu	C	25	25	25	260	260	80	80	260
Pressure	bar	1	1	1	47	47	1	1	47
Vapor Fraction		0	0,342114	0	1	0,800121	1	0	0,551
Mass Flows	kg/hr	20	20	2	2	22	4,818	17,182	22
MSW	kg/hr	20	0	0	0	0	0	0	0
C	kg/hr	0	4,6768	0	0	10,258	0	7,7506	7,7506
H2	kg/hr	0	0,68256	0	0	0,00345395	0	0,726	0,726
N2	kg/hr	0	0,24016	0	0	0,24016	0	0,1584	0,1584
O2	kg/hr	0	6,16832	0	0	0	0	3,971	3,971
S	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
CL2	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0
ASH	kg/hr	0	0,87216	0	0	0,87216	0	1,76	1,76
CO2	kg/hr	0	0	0	0	7,22395	1,562	0	1,562
CO	kg/hr	0	0	0	0	0,00021138	1,958	0	1,958
CH4	kg/hr	0	0	0	0	2,24309	1,298	0	1,298
H2O	kg/hr	0	7,36	2	2	1,03912	0	2,816	2,816

16. Langkah-langkah Simulasi :

a. Input komponen

Selection Petroleum Nonconventional Enterprise Database Comments

Select components

Component ID	Type	Component name	Alias
MSW	Nonconventional		
C	Solid	CARBON-GRAPHITE	C
H2	Conventional	HYDROGEN	H2
N2	Conventional	NITROGEN	N2
O2	Conventional	OXYGEN	O2
S	Conventional	SULFUR	S
CL2	Conventional	CHLORINE	CL2
ASH	Nonconventional		
CO2	Conventional	CARBON-DIOXIDE	CO2
CO	Conventional	CARBON-MONOXIDE	CO
CH4	Conventional	METHANE	CH4
H2O	Conventional	WATER	H2O

Find Elec Wizard SFE Assistant User Defined Reorder Review

b. Menentukan base method (base method yang digunakan adalah SRK)

Global Flowsheet Sections Referenced Comments

Property methods & options

Method filter: COMMON

Base method: SRK

Henry components

Petroleum calculation options

Free-water method: STEAM-TA

Water solubility: 3

Electrolyte calculation options

Chemistry ID

Use true components

Method name: SRK

Methods Assistant...

Modify

EOS: ESSRK

Data set: 1

Liquid gamma

Data set

Liquid molar enthalpy: HLMXR03

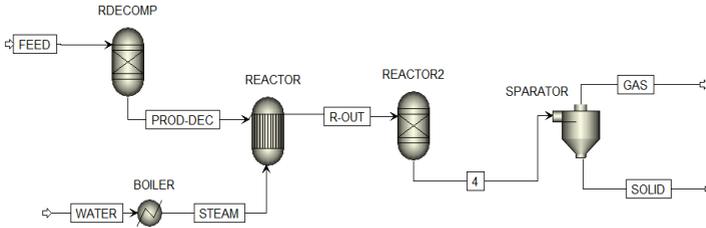
Liquid molar volume: VLMXR03

Heat of mixing

Poynting correction

Use liquid reference state enthalpy

c. Membuat flowsheet proses HTC



d. Menentukan kondisi stream bahan baku

Mixed
 Cl Solid
 NC Solid
 Flash Options
 EO Options
 Costing
 Comments

Specifications

State variables

Substream name:

Temperature: C

Pressure: bar

Total flow basis:

Total flow rate:

Composition

Mass-Flow

Component	Value
MSW	20
ASH	
Total	20

e. Input data proksimate

Component Attribute

Component ID:

Attribute ID:

Element	Value
MOISTURE	58,9
FC	6
VM	82,91
ASH	11,09

f. Input data ultimate

Component Attribute

Component ID MSW

Attribute ID ULTANAL

	Element	Value
▶	ASH	6
▶	CARBON	49,78
▶	HYDROGEN	5,53
▶	NITROGEN	2,82
▶	CHLORINE	0
▶	SULFUR	0
▶	OXYGEN	45,59

g. Memasukkan kondisi operasi pada RDECOMP

Specifications Yield Flash Options PSD Comp. Attr. Comp. Mapping Utility Comments

Operating conditions

Flash Type Temperature Pressure

Temperature C

Temperature change C

Pressure bar

Duty cal/sec

Vapor fraction

h. Memasukkan nilai element ash

Specifications Yield Flash Options PSD Comp. Attr. Comp. Mapping Utility Comments

Substream ID **NCPSD**

Component attributes

Component ID **ASH**

Attribute ID **PROXANAL**

Element	Value
MOISTURE	
FC	
VM	
ASH	100

i. Memasukkan kondisi operasi pada REACTOR

Specifications Products Assign Streams Inerts Restricted Equilibrium PSD Utility Comments

Calculation option

Calculate phase equilibrium and chemical equilibrium

Operating conditions

Pressure **10 bar**

Temperature **180 C**

Heat Duty cal/sec

Phases

Maximum number of fluid phases

Maximum number of solid solution phases

Include vapor phase

Merge all CISOLID species into the first CISOLID substream

j. Memasukkan kondisi operasi pada REACTOR2

Flash specifications

Flash Type: Temperature

Vapor fraction: Vapor fraction

Temperature: 180 C

Temperature change: C

Degrees of superheating: C

Degrees of subcooling: C

Pressure: bar

Duty: cal/sec

Vapor fraction: 1

Pressure drop correlation parameter:

k. Menentukan kondisi stream water sebelum masuk BOILER

Specifications

Flash Type: Temperature Pressure

State variables

Temperature: 25 C

Pressure: 1 bar

Vapor fraction:

Total flow basis: Mass

Total flow rate: kg/hr

Solvent:

Reference Temperature

Volume flow reference temperature: C

Composition

Mass-Flow: kg/hr

Component	Value
N2	
O2	
S	
CL2	
CO2	
CO	
CH4	
H2O	2

1. Menentukan kondisi operasi boiler

Specifications Yield Flash Options PSD Comp. Attr. Comp. Mapping Utility Comments

Operating conditions

Flash Type: Temperature Vapor Fraction

Temperature: 180 C

Temperature change: C

Pressure: bar

Duty: cal/sec

Vapor fraction: 1

Valid phases: Vapor-Liquid

m. Menentukan produk yang akan dipisah pada SEPARATOR

Specifications Flash Options Key Components Comments

Specification for each substream

Stream names: GAS

	Substream Name	Specification	Basis	Value	Units	Key Comp No
▶	MIXED	Split fraction		1		
▶	CIPSD	Split fraction				
▶	NCPSD	Split fraction				

Specification for each substream

Stream names **SOLID**

	Substream Name	Specification	Basis	Value	Units	Key Comp No
▶	MIXED	<i>Split fraction</i>				
▶	CIPSD	Split fraction		1		
▶	NCPSD	Split fraction		1		

BIODATA PENULIS



Penulis lahir pada tanggal 28 November 1995 di Rembang, Jawa Tengah. Penulis menempuh pendidikan di SDN Sekardangan (2001-2007), SMPN 1 Candi (2007-2010), SMA Muhammadiyah 2 Sidoarjo (2010-2013), dan D3 Teknik Mesin-ITS (2013-2016). Penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis adalah rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan. Penulis pernah melakukan *internship* di PT. Dirgantara Indonesia pada Departemen *Aircraft Service*, penulis ditempatkan di divisi *Non-Destructive Test*. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail zakiyya.jibillah@gmail.com.