



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KANDUNGAN TAR UPDRAFT GASIFIER DENGAN
PENGELUARAN SYNGAS PADA ZONA REDUKSI**

SKRIPSI

**IRVAN NURTANIO
0806454821**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**STUDI KANDUNGAN TAR UPDRAFT GASIFIER DENGAN
PENGELUARAN SYNGAS PADA ZONA REDUKSI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**IRVAN NURTANIO
0806454821**

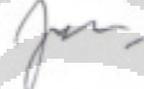
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Irvan Nurtanio

NPM : 0806454821

Tanda Tangan Penulis : 

Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Irvan Nurtanio
NPM : 0806454821
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Studi Kandungan Tar Updraft Gasifier dengan
Pengeluaran Syngas pada Zona Reduksi

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

Penguji : Prof. Dr. Ir. I Made Kartika D., Dipl.Ing.

Penguji : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng

Penguji : Prof. Ir. Yulianto S. Nugroho, M.Sc., Ph.D

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kepada Allah SWT. karena karunia rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi mengenai gasifikasi, dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak saat masa perkuliahan hingga pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta bantuan lain baik dorongan moril maupun materil dan memberi kepercayaan untuk membantu RSN UI beliau.
2. Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng. selaku dosen pembimbing akademis, yang selalu memberi masukan positif.
3. Seluruh dosen dan staff pengajar Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang memberikan masukan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis selama masa perkuliahan.
4. Fajri Vidian, ST., M.T., yang memberi kesempatan dan kepercayaan untuk membantu bagian dari disertasi S3 beliau dan Skripsi ini merupakan bagian dari disertasi beliau.
5. S. Sutarmo (Bapak), Harsih (Ibu), A. Zaenuri dan Tri Yumawan, S.T. (Kakak), dan seluruh keluarga penulis lainnya yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan baik moril maupun materil selama penulis menjalani masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
6. Ardyan Humala G, Guswendar Rinovianto, Priza Karunia, Arya Yuwana, Eggi Ikhsan, dan Wiweko sebagai rekan satu bimbingan dan rekan diskusi yang baik selama proses penyusunan skripsi ini.
7. Mas Suryadi, Mas Syarief, dan karyawan DTM lainnya yang telah banyak membantu persiapan hingga jalannya pengujian di Laboratorium Termodinamika Proyek Gasifikasi.

8. Flora Resha Ferliana yang telah banyak memberikan doa, motivasi serta masukan demi kelancaran penyusunan skripsi ini.
9. Rekan-rekan Termonator yang telah banyak membantu penulis selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini baik dalam hal akademis maupun non-akademis.
10. Rekan-rekan Jurusan Teknik Mesin dan Teknik Perkapalan angkatan 2008 yang telah membantu selama 4 tahun masa perkuliahan baik hal akademis maupun non-akademis.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT. berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 4 Juli 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Irvan Nurtanio
NPM : 0806454821
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**STUDI KANDUNGAN TAR UPDRAFT GASIFIER DENGAN
PENGELUARAN SYNGAS PADA ZONA REDUKSI**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 4 Juli 2012

Yang menyatakan,



(Irvan Nurtanio)

ABSTRAK

Nama : Irvan Nurtanio
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Studi Kandungan Tar *Updraft Gasifier* dengan Pengeluaran *Syngas* pada Zona Reduksi

Gasifikasi adalah suatu proses termokimia yang mengubah bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar yang dikenal dengan istilah teknik "*Producer Gas* atau *Syntetic Gas (Syngas)*" dengan proses pembakaran menggunakan oksigen terbatas. *Updraft Gasifier* merupakan jenis *gasifier* yang dapat menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan *downdraft gasifier* tetapi menghasilkan tar yang lebih banyak. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kandungan tar pada *updraft gasifier* dengan pengeluaran gas produk melalui daerah reduksi. Dengan penggunaan metode seperti ini diharapkan kandungan tar dapat berkurang dikarenakan gas produk bergerak kembali ke daerah temperatur tinggi dan tar yang terkandung di dalamnya mengalami *cracking* baik karena termal atau bereaksi dengan uap, H₂O atau CO₂ yang terkandung dalam gas produk sebelum meninggalkan *gasifier*. Pengujian dilakukan menggunakan bahan bakar kayu karet dengan *primary air blower* sebesar 108 lpm dan penarikan tar sebesar 2 lpm.

Kata Kunci: gasifikasi, *updraft gasifier*, tar, zona reduksi

ABSTRACT

Name : Irvan Nurtanio
Major : Mechanical Engineering
Title : Study of Tar Content in *Updraft Gasifier* with *Syngas* Outlet at Reduction Zone

Gasification is a thermochemical process that converts solid fuel into a combustible gas known as "Producer Gas or Synthetic Gas (Syngas)" using a limited supply of air for combustion. *Updraft gasifier* is a type of *gasifier* that can generate more power than the *downdraft gasifier* but produces more tar. The purpose of this study was to determine the tar content in the *updraft gasifier* with *syngas* outlet through the reduction zone. With the use of such methods is expected to decrease due to the tar content of product gas to move back into areas of high temperature and tar contained in it have either *cracking* due to thermal or react with steam, H₂O or CO₂ contained in the product gas before leaving the *gasifier*. Tests carried out using rubber wood fuel with the *primary air blower* at 108 lpm and tar extracted at 2 lpm.

Key words : gasification, *updraft gasifier*, tar, reduction zone

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERSETUJUAN	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	2
1.3. Batasan Permasalahan	3
1.4. Tujuan	3
1.5. Metode Penulisan	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II DASAR TEORI	6
2.1. Gasifikasi	6
2.2. Jenis Gasifier	8
2.2.1. <i>Updraft Gasifier</i>	9
2.2.2. <i>Downdraft Gasifier</i>	10
2.3. Biomassa	11
2.3.1. Kayu Karet	12
2.4. Tar	14
2.4.1. Proses Pembentukan Tar	16
2.4.2. <i>Tar Cracking</i>	18
2.5. Pengukuran Tar	23
2.5.1. Isokinetik Sampling	24
2.5.2. Modul Penangkap Tar	26
2.5.3. Waktu Pengambilan Gas Sampling	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1. Garis Besar Penelitian	29
3.2. Garis Besar Pengujian	29
3.2.1. Parameter-Parameter yang Ditentukan	30
3.3. Komponen-Komponen Alat Pengujian	31
3.3.1. <i>Sampling Tar Pipe</i>	32
3.3.2. <i>Valve</i>	32
3.3.3. Selang Silikon	33
3.3.4. Tabung Impinger	34
3.3.5. <i>Solvent</i>	34
3.3.6. Kotak Kondensasi	35
3.3.7. Pompa Vakum	35
3.3.8. <i>Heater</i>	36

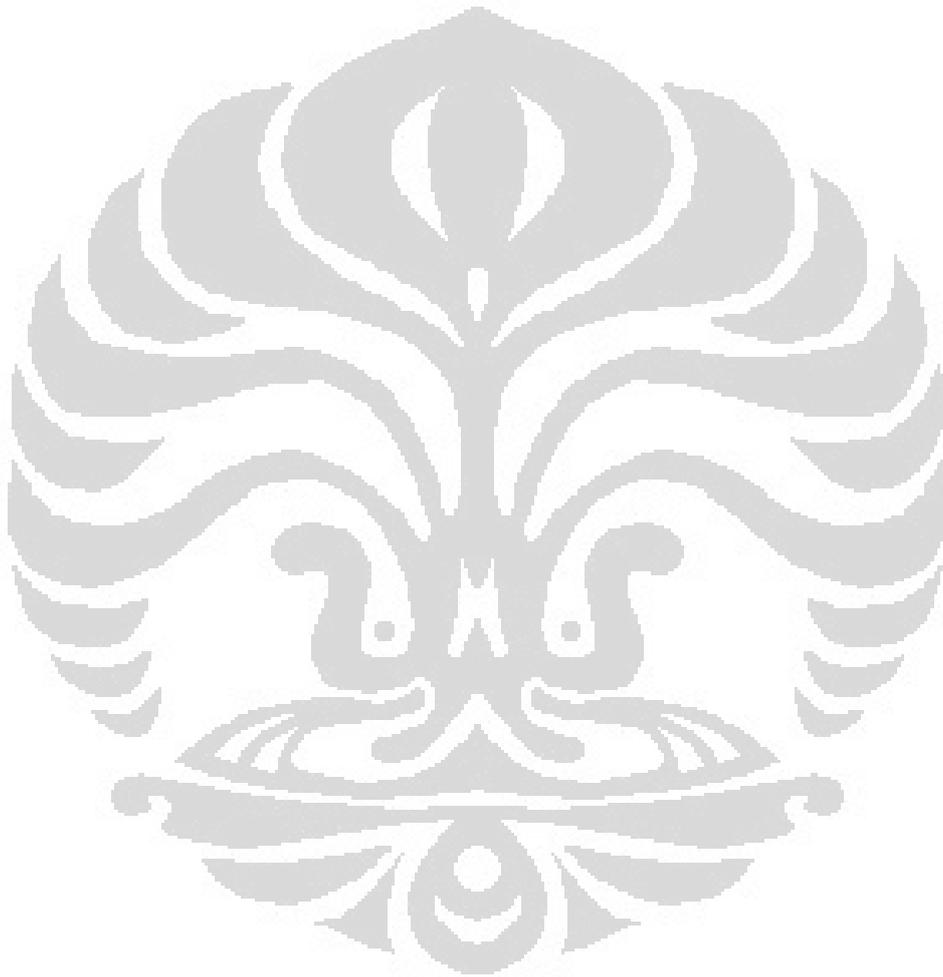
3.3.9. Gelas Ukur	36
3.3.10. Rotameter	37
3.3.11. Termometer Digital	37
3.3.12. Timbangan Digital	37
3.3.13. Oven	38
3.4. Tahap Pengujian.....	38
3.4.1. Tahap Persiapan	39
3.4.2. Tahap Pengambilan Tar	39
3.4.3. Tahap Penimbangan Tar dan Pembersihan Alat-Alat	40
3.5. Pengolahan Data Hasil Pengujian	41
3.5.1. Pengolahan Data Tar	42
BAB IV HASIL DAN ANALISA	43
4.1. Analisa Modifikasi Pengujian.....	43
4.2. Perbandingan Tar Primer <i>Outlet</i> Zona Reduksi dengan Konvensional.....	44
4.3. Perbandingan Komposisi <i>Syngas Outlet</i> Reduksi dengan Konvensional.....	47
4.4. Hasil Pengujian Tar Primer <i>Outlet</i> Reduksi 2 <i>Batch</i>	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	50
5.1. Kesimpulan.....	50
5.2. Saran.....	50
DAFTAR REFERENSI	52
LAMPIRAN	xii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Proses-proses dalam gasifikasi	6
Gambar 2.2.	Rentang penerapan untuk jenis gasifier biomass.....	8
Gambar 2.3.	Skema dan tahapan pada <i>updraft gasifier</i>	9
Gambar 2.4.	Skema dan tahapan operasi pada <i>downdraft gasifier</i>	10
Gambar 2.5.	Grafik variasi tar primer, sekunder, dan produk tersier	16
Gambar 2.6.	Zona temperatur terbentuknya tar	17
Gambar 2.7.	Grafik jumlah tar terhadap kenaikan temperatur	17
Gambar 2.8.	Proses pengambilan tar melalui nozel dan tabung impinger	23
Gambar 2.9.	Ilustrasi perbandingan antara isokinetik sampling dan non-isokinetik.....	24
Gambar 2.10.	Posisi nozel terhadap pipa utama.....	24
Gambar 2.11.	Skema nozel pada pipa utama.....	25
Gambar 2.12.	Ilustrasi kotak kondensasi.....	26
Gambar 3.1.	Diagram alur penelitian.....	29
Gambar 3.2.	Diagram alur proses pengujian.....	30
Gambar 3.3.	Skematik pengujian.....	31
Gambar 3.4.	<i>Sampling tar pipe set</i>	32
Gambar 3.5.	<i>Ball valve</i>	33
Gambar 3.6.	<i>Gate Valve</i>	33
Gambar 3.7.	Selang silikon.....	33
Gambar 3.8.	Tabung impinger.....	34
Gambar 3.9.	<i>Solvent</i>	34
Gambar 3.10.	a. Kotak kondensasi 1 ; b. kotak kondensasi 2.....	35
Gambar 3.11.	Pompa Vakum.....	35
Gambar 3.12.	<i>Heater</i>	36
Gambar 3.13.	Gelas ukur.....	36
Gambar 3.14.	Rotameter.....	37
Gambar 3.15.	Termometer digital.....	37
Gambar 3.16.	Timbangan digital.....	38
Gambar 3.17.	Oven.....	38
Gambar 4.1.	Skema modifikasi pengujian.....	43
Gambar 4.2.	Distribusi temperatur pada <i>gasifier</i>	44
Gambar 4.3.	Temperatur zona pirolisis pengujian zona outlet reduksi.....	45
Gambar 4.4.	Grafik perbandingan laju tar primer <i>outlet</i> reduksi dengan konvensional.....	46
Gambar 4.5.	Grafik temperatur <i>syngas</i> pengujian outlet konvensional.....	47
Gambar 4.6.	Grafik temperatur <i>syngas</i> pengujian outlet zona reduksi.....	47
Gambar 4.7.	(a) Tar <i>outlet</i> reduksi ; (b) Tar <i>outlet</i> konvensional.....	47
Gambar 4.8.	Komposisi gas hasil gasifikasi.....	48
Gambar 4.9.	Grafik laju alir tar primer <i>outlet</i> zona reduksi 2 <i>batch</i>	49

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Temperatur proses <i>updraft gasifier</i>	10
Tabel 2.2.	Data pengujian spesimen kayu karet berdasarkan analisis <i>proximate dan ultimate</i>	13
Tabel 2.3.	Komposisi tar.....	15
Tabel 2.4.	Perbandingan produksi tar dalam tiga media gasifikasi.....	21
Tabel 2.5.	Jenis-jenis <i>cooling bath</i> yang biasa digunakan.....	26
Tabel 2.6.	Komparasi <i>solvent</i> berdasarkan titik didih.....	27



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Gasifikasi adalah suatu proses termokimia yang mengubah bahan bakar padat dengan proses pembakaran menggunakan oksigen terbatas menjadi gas mampu bakar yang dikenal dengan istilah teknik “*Producer Gas* atau *Syntetic Gas* (*Syngas*)” yang lebih aman dan nyaman digunakan sebagai energi panas (*heating energy*) maupun untuk *power* (diesel, turbin, dll). *Updraft Gasifier* merupakan salah satu jenis *gasifier* dan memiliki keuntungan bisa menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan *downdraft gasifier* tetapi memiliki kerugian karena menghasilkan tar yang lebih banyak. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah metode untuk mengurangi kandungan tar yang dihasilkan agar kandungan tar bisa memenuhi standar untuk bisa digunakan dalam mesin.

Gas mampu bakar yang dihasilkan dari proses gasifikasi tidak hanya mengandung zat yang mampu bakar (H_2 , CO , CH_4 , dll), tetapi juga mengandung suatu senyawa pencemar organik yang disebut dengan tar. Tar merupakan suatu hasil sampingan dari gasifikasi yang tidak dapat dihindarkan dan merupakan gangguan utama dari gas hasil gasifikasi. Tar merupakan cairan yang memiliki tingkat viskositas tinggi yang terkondensasi di zona suhu rendah dari *gasifier*, berwarna hitam dan pekat, serta dapat menyumbat daerah keluaran gas hasil gasifikasi dan menyebabkan gangguan pada sistem. Tar adalah campuran kompleks dari hidrokarbon yang terkondensasi, termasuk antara lain yang mengandung oksigen, 1- sampai 5- cincin aromatik dan poliaromatik hidrokarbon kompleks (Devi dkk, 2003.). Neeft dkk.(1999) mendefinisikan tar sebagai DGXVII "semua kontaminan organik dengan berat molekul lebih besar dari 78, yang merupakan berat molekul benzena". *International Energy Agency* (IEA) *Bioenergy Agreement*, *U.S. Department of Energy* (DOE), dan *DGXVII of the European Commission* setuju untuk mengidentifikasi semua komponen gas produk yang memiliki berat molekul lebih tinggi dari benzena sebagai tar (Knoef, 2005, hal. 278).

Tar inilah yang menyebabkan gas hasil gasifikasi tidak cocok jika digunakan pada suatu *engines* yang memiliki tingkat toleransi yang rendah terhadap tar. Mesin pembakaran internal, seperti Diesel atau mesin Otto, adalah aplikasi favorit dari gasifikasi biomassa, terutama dalam bentuk pendistribusian daya (*power*). Hal tersebut dikarenakan sistem piston-silinder mesin pembakaran internal tidak dirancang untuk menangani padatan, yang memberikan batasan yang lebih ketat pada tar serta pada tingkat partikel dalam gas. Konsentrasi dari partikulat dan tar dalam gas produk harus di bawah batas toleransi, yaitu $30\text{mg}/\text{Nm}^3$ untuk partikulat dan $100\text{ mg}/\text{Nm}^3$ untuk tar (Milne dkk., 1998). Contoh aplikasi lainnya dari pemanfaatan gas biomassa adalah turbin gas, dimana menerapkan pembatasan lebih ketat pada kebersihan gas karena mata pisanya lebih sensitif terhadap kandungan yang terdapat di dalam gas panas yang melewatinya setelah pembakaran. Di sini, konsentrasi partikulat harus antara 0,1 dan $120\text{ mg}/\text{Nm}^3$ (Milne dkk., 1998). Batas partikulat dan tar dalam aplikasi *syngas* bahkan lebih ketat, sebagai racun tar katalis. Untuk aplikasi ini, Graham dan Bain (1993) menunjukkan batas atas serendah $0,02\text{ mg}/\text{Nm}^3$ untuk partikulat dan $0,1\text{ mg}/\text{Nm}^3$ untuk tar.

Jumlah tar yang terkandung dalam gas produk tergantung pada temperatur gasifikasi serta pada desain *gasifier*. Tingkat tar khas dalam gas dari *downdraft* dan *updraft gasifiers* biomassa adalah $1\text{ g}/\text{Nm}^3$ dan $50\text{ g}/\text{Nm}^3$. Tingkat tar dalam gas produk dari *bubbling* dan *circulating fluidized-bed gasifiers* sekitar $10\text{ g}/\text{Nm}^3$. Oleh karena itu, hingga saat ini masih dilakukan penelitian untuk mengurangi kandungan tar yang terdapat dalam gas hasil gasifikasi.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang ada selama ini adalah terlalu besarnya jumlah kandungan tar yang terdapat pada gas hasil gasifikasi di *updraft gasifier* sehingga masih sulit digunakan untuk mesin pembakaran dalam. Oleh karena itu, maka pada penelitian ini dilakukan pengujian dengan pengeluaran gas produk melalui bagian bawah *gasifier* (zona reduksi) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap jumlah kandungan tar yang dihasilkan.

1.3. Batasan Permasalahan

Batasan masalah yang diangkat dalam penelitian kali ini mencakup beberapa hal. Hal ini bertujuan agar penelitian dapat terencana dan terarah dengan baik. Adapun batasan permasalahan yang ditetapkan adalah sebagai berikut:

1. *Flow rate* pada *primary air blower* sebesar 108 lpm.
2. Pengukuran hanya dilakukan untuk mengetahui jumlah tar primer.
3. Jumlah tar primer yang terkandung dalam *syngas updraft gasifier* yang keluar melalui bagian bawah (zona reduksi) *gasifier*.
4. Penarikan tar primer oleh pompa vakum konstan pada 2 lpm.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian yang dilakukan penulis adalah sebagai berikut:

1. Mengukur dan menganalisa jumlah kandungan tar primer yang dihasilkan oleh *updraft gasifier* dengan pengeluaran gas produk dari bagian bawah *gasifier* (zona reduksi).
2. Mengetahui perbandingan jumlah kandungan tar primer yang dihasilkan ketika gas produk keluar melalui zona reduksi *gasifier* dengan gas produk yang keluar secara konvensional (melalui bagian atas *gasifier*).

1.5. Metode Penulisan

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis menggunakan beberapa metode antara lain:

1. Persiapan eksperimental
 - Identifikasi masalah yang akan dibahas
 - Studi literatur
2. Pengujian dan pengambilan data
 - Pengukuran *flowrate* pompa vakum dengan menggunakan *rotameter*.
 - Penguapan pelarut (*solvent*) hasil *sampling* dengan menggunakan oven dengan temperatur tertentu.

- Pengukuran massa tar primer dengan menggunakan timbangan digital dengan tingkat ketelitian tertentu.

3. Hasil dan Analisa

- Grafik perbandingan laju alir tar primer untuk pengeluaran gas produk yang melalui bagian bawah *gasifier* (zona reduksi) dengan gas produk yang keluar melalui bagian atas *gasifier* (konvensional).
- Grafik perbandingan temperatur *syngas* keluaran zona reduksi dengan keluaran konvensional.
- Grafik perbandingan komposisi *syngas*
- Grafik laju alir tar primer untuk 2 *batch* pengujian.
- Analisa grafik perbandingan laju alir tar primer untuk pengeluaran gas produk yang melalui bagian bawah *gasifier* (zona reduksi) dengan gas produk yang keluar melalui bagian atas *gasifier* (konvensional).
- Analisa grafik perbandingan laju alir tar primer untuk 2 *batch* pengujian.

4. Kesimpulan

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan tugas akhir ini, penulis membagi penulisan dalam lima bab. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan dan mengarahkan pembahasan agar diperoleh informasi secara menyeluruh. Kerangka penulisan tersebut diuraikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan mengenai latar belakang, pokok permasalahan, pembatasan masalah, tujuan, metode penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II DASAR TEORI

Menjelaskan secara umum tentang gasifikasi, tar, dan cara pengukuran tar menurut standar tertentu.

BAB III METODE PENELITIAN

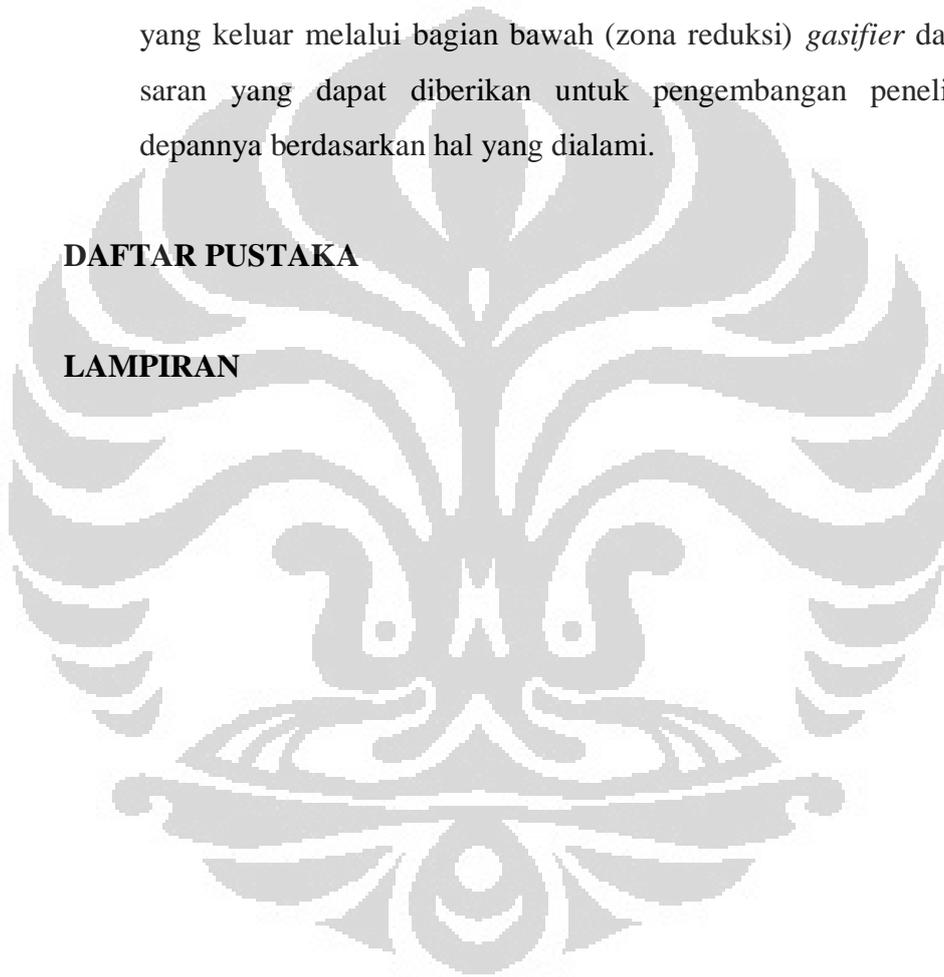
Menjelaskan mengenai rangkaian alat, skema alat, prosedur pengujian, dan bagan alur pengujian.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

Mengolah dan menganalisa data yang telah diperoleh dari pengujian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Membuat kesimpulan dari hasil analisa jumlah laju alir tar primer yang keluar melalui bagian bawah (zona reduksi) *gasifier* dan saran-saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian ke depannya berdasarkan hal yang dialami.

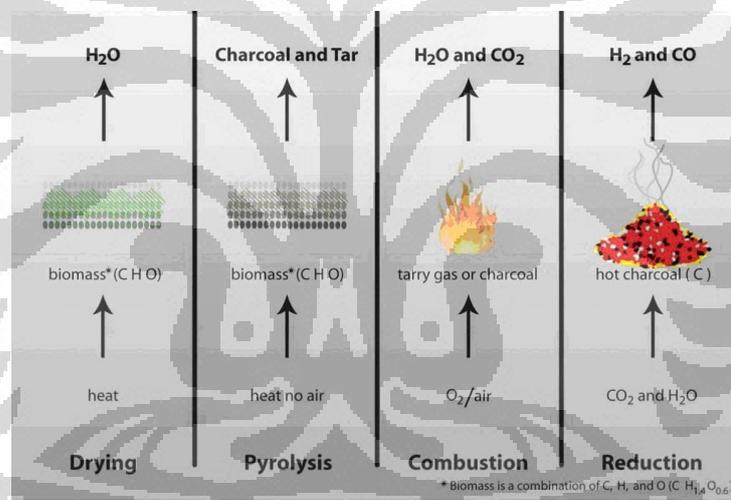
DAFTAR PUSTAKA**LAMPIRAN**

BAB II DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan tentang teori dari pembahasan yang diangkat penulis. Beberapa dasar teori digunakan sebagai dasar pengujian dan analisa, sedangkan beberapa dasar teori yang lain hanya dijelaskan, karena bahasan tersebut termasuk dari hal-hal yang terjadi pada pengujian yang dilakukan penulis.

2.1. Gasifikasi

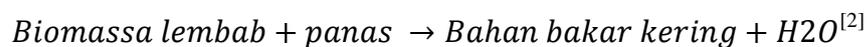
Gasifikasi adalah suatu proses kimia yang mengubah bahan karbon seperti biomassa menjadi gas mampu bakar (CO , H_2 , CH_4 , dll) dengan menggunakan sedikit udara sehingga tidak terjadi pembakaran sempurna^[1]. Sebuah proses gasifikasi biomassa memiliki tahapan-tahapan seperti berikut:



Gambar 2.1. Proses-proses dalam gasifikasi

- **Pengeringan (*Drying*)**

Selama fase ini berlangsung, temperatur dari bahan bakar (kayu) meningkat dan kandungan air yang terdapat di dalamnya menguap karena terjadi pertukaran panas antara kayu dengan aliran gas panas dari zona pembakaran

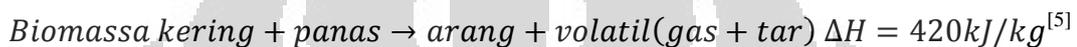


- **Dekomposisi termal atau pirolisis**

Temperatur bahan bakar kering semakin meningkat dan Ketika temperatur bahan bakar kering meningkat, proses pirolisis terjadi dan bahan bakar tersebut dikonversi menjadi arang dan produk volatil terlepas seiring dengan kenaikan temperatur. Hasil dari proses pirolisis, yaitu:

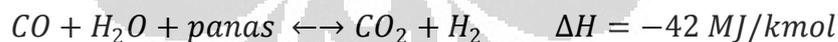
- Gas ringan, diantaranya $H_2, CO, CO_2, H_2O, CH_4$
- Tar, terdiri atas molekul organik dan anorganik yang lepas dari ikatan solid seperti gas dan cairan dalam bentuk uap.
- Arang, sisa hasil pembakaran

Proses tersebut ditunjukkan pada persamaan di bawah ini:



- **Gasifikasi (Reduksi)**

Setelah proses pengeringan dan pirolisis, arang memasuki zona gasifikasi dimana karbon bereaksi dengan uap panas, karbon dioksida, dan hidrogen. Reaksi endotermik ini menghasilkan karbon monoksida dan hidrogen. Sedikit reaksi eksotermik dari hidrogen dengan karbon menghasilkan metana. Karbon monoksida yang dihasilkan juga bereaksi dengan air untuk menghasilkan hidrogen dan karbon dioksida. Perbedaan antara zona gasifikasi dan zona pembakaran adalah ada atau tidaknya oksigen. Reaksi-reaksi yang terjadi pada zona ini di gasifier adalah sebagai berikut:



- **Pembakaran**

Sisa arang lalu terbakar dengan memanfaatkan oksigen dari udara pada jalur umpan gas dan meninggalkan sisa abu sesuai dengan reaksi berikut ini:

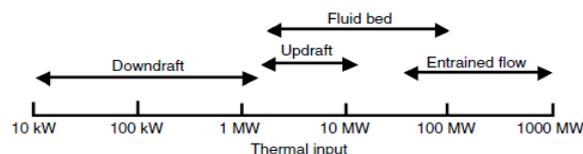


Gasifikasi dengan pembakaran merupakan dua proses termokimia yang terkait erat, tetapi memiliki perbedaan yang penting. Gasifikasi menyatukan energi menjadi satu ikatan kimia dalam gas yang dihasilkan, sedangkan pembakaran hanya memecahkan ikatan kimia tersebut untuk melepaskan energi yang terdapat pada bahan bakar^[1]. Selain itu, gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan gas yang dihasilkan dari suatu pembakaran pada umumnya^[1]. Hal ini yang membuat gas hasil proses gasifikasi dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar gas. Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi tersebut memiliki nama penyebutan yang beranekaragam, antara lain: *wood gas*, *syngas*, *gas producer*, *town gas*, *generator gas*, dll. Adapun hasil sampingan berupa tar dan abu hasil pembakaran.

2.2. Jenis Gasifier

Gasifier atau reaktor gasifikasi adalah alat dimana proses gasifikasi berlangsung. Hasil yang keluar dari *gasifier* dalam bentuk gas sehingga dapat disebut gas produser. Dalam proses gasifikasi, bentuk dan model *gasifier* sangat penting karena menentukan seberapa besar jumlah *syngas* dan tar yang dihasilkan, serta jenis tar yang terbentuk. *Gasifier* secara luas dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu *fixed* atau *moving bed*, *fluidized bed*, dan *entrained flow*.

Masing-masing *gasifier* memiliki jenis pengaplikasiannya sendiri yang sesuai dengan kapasitas yang dihasilkan. Misalnya, jenis *moving-bed* (*updraft*, *downdraft*, dan *crossdraft*) digunakan untuk unit yang lebih kecil (10 kWth – 10 MWth), jenis *fluidized-bed* lebih sesuai digunakan untuk unit menengah (5 MWth – 100 MWth), sedangkan reaktor *entrained-flow* digunakan untuk unit dengan kapasitas yang besar (>50 MWth). Gambar 2.2. menunjukkan kapasitas aplikasi untuk berbagai jenis *gasifier* yang dikembangkan berdasarkan data dari Maniatis (2001) dan Knoef (2005).



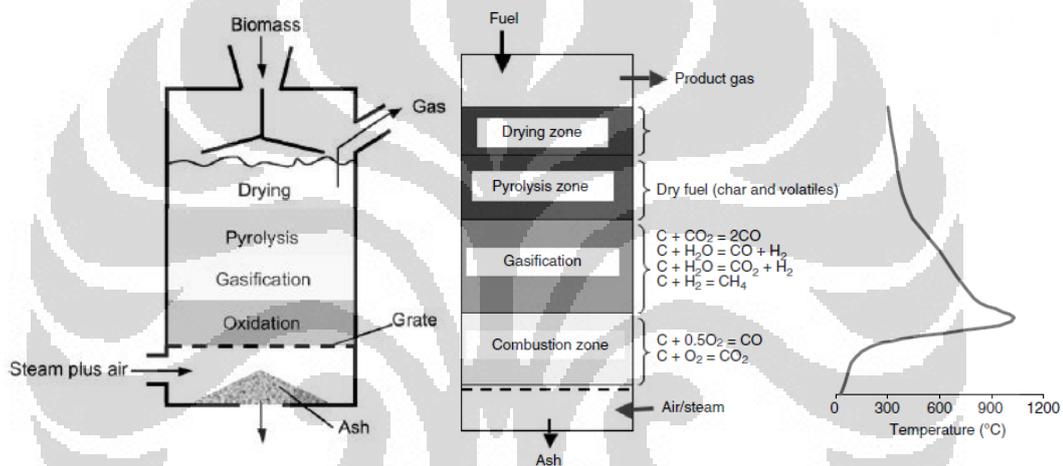
Gambar 2.2. Rentang penerapan untuk jenis gasifier biomassa

(Sumber: Prabir Basu. “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*”)

Universitas Indonesia

2.2.1. Updraft Gasifier

Jenis *updraft gasifier* adalah salah satu yang tertua dan paling sederhana dari semua desain. Di sini, media gasifikasi (udara, oksigen, atau uap) bergerak ke atas sementara bahan bakar diumpankan dari atas dan bergerak ke bawah, dengan demikian gas dan padatan bergerak dalam arah yang berlawanan. Gas produk keluar dari bagian atas reaktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Media gasifikasi memasuki reaktor melalui *grate* atau distributor, dimana media tersebut bertemu dengan tempat abu panas. Abu turun melalui *grate*, yang sering dibuat bergerak (berputar atau *reciprocating*), terutama pada unit besar untuk memfasilitasi pembuangan abu.



Gambar 2.3. Skema dan tahapan pada *updraft gasifier*

(Sumber: Prabir Basu. “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*”)

Reaksi pembakaran pada *gasifier* ini terjadi di dekat *grate* kemudian diikuti reaksi reduksi (proses gasifikasi). Reaksi reduksi tersebut akan menghasilkan gas bertemperatur tinggi. Gas hasil reaksi (gas produser) bergerak ke bagian atas *gasifier* menembus unggun bahan bakar menuju daerah yang bertemperatur lebih rendah. Pada saat menembus unggun bahan bakar, gas produserakan kontak dengan bahan bakar yang turun sehingga terjadi proses pirolisis dan pertukaran panas antara gas dan bahan bakar. Panas *sensible* yang diberikan gas digunakan bahan bakar untuk pemanasan awal dan pengeringan bahan bakar. Proses pirolisis dan pengeringan tersebut terjadi pada bagian teratas *gasifier*. *Updraft gasifier* mencapai efisiensi tertinggi ketika gas panas yang

dihasilkan meninggalkan *gasifier* pada temperatur rendah. Proses-proses pada *updraft gasifier* terjadi pada temperatur yang tertera pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1. Temperatur proses updraft gasifier

1.	Pengeringan	>423 K
2.	Pirolisis	423 – 973 K
3.	Gasifikasi (reduksi)	1073 – 1373 K
4.	Pembakaran	973 – 1773 K

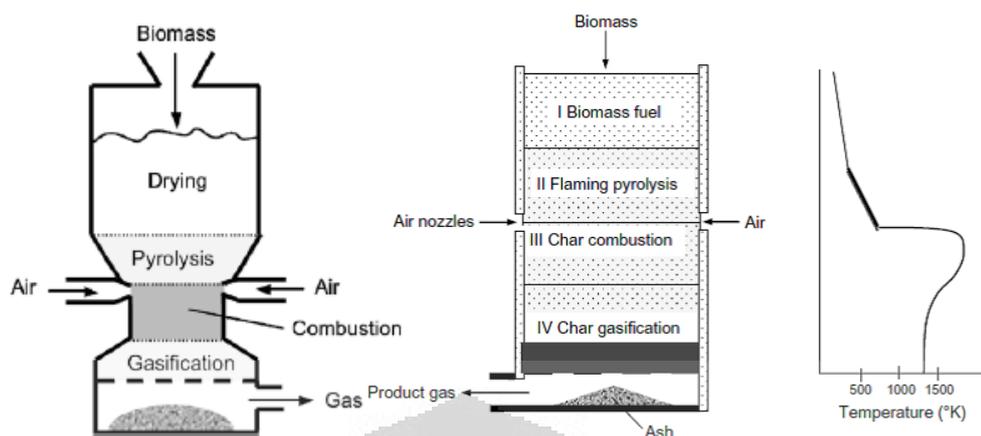
(Sumber: Arthur Okuga, “Analysis and Operability Optimization Of An Updraft Gasifier Unit”)

Updraft gasifier cocok untuk jumlah abu yang tinggi (hingga 25%), biomassa berkelembaban yang tinggi (hingga 60%), dan cocok juga untuk bahan bakar yang memiliki volatilitas rendah seperti arang. Produksi tar dalam *updraft gasifier* sangat tinggi (30-150 g/Nm³) yang membuat *gasifier* jenis ini cocok untuk bahan bakar yang memiliki tingkat volatilitas tinggi^[1].

2.2.2. *Downdraft Gasifier*

Sebuah *downdraft gasifier* adalah reaktor *co-current* dimana udara masuk ke *gasifier* pada ketinggian tertentu di bawah puncak. Gas produk mengalir ke bawah dan keluar reaktor melalui hamparan abu panas (Gambar 2.4). Sejak melewati zona suhu tinggi dari abu panas, tar di gas produk menemukan kondisi yang menguntungkan untuk dapat pecah. Untuk alasan tersebut, *downdraft gasifier* memiliki tingkat produksi tar terendah dibandingkan jenis *gasifier* lainnya.

Udara dari satu set nozel yang dipasang sekitar pinggiran *gasifier* mengalir ke bawah dan bertemu dengan partikel arang, meningkatkan zona pembakaran dari sekitar 1200⁰C sampai 1400⁰C (zona III pada Gambar 2.4). Kemudian gas turun melalui tempat dari partikel arang panas (zona VI). Abu yang dihasilkan bergerak bersama dengan gas, jatuh ke bagian bawah reaktor.



Gambar 2.4. Skema dan tahapan operasi pada *downdraft gasifier*

(Sumber: Prabir Basu. “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*”)

Downdraft gasifier memiliki kandungan tar yang rendah ($0,015-3 \text{ g/Nm}^3$) dalam gas produk sehingga memungkinkan untuk dapat digunakan pada mesin pembakaran dalam. Selain itu, sebuah *downdraft gasifier* membutuhkan waktu yang lebih cepat untuk penyalaan (20-30 menit) dan mencapai suhu kerjanya dibandingkan waktu yang diperlukan oleh *updraft gasifier*^[1].

2.3. Biomassa

Biomassa adalah bahan bakar yang dapat diperbaharui dan secara umum berasal dari makhluk hidup (non-fosil) yang didalamnya tersimpan energi atau dalam definisi lain, biomassa merupakan keseluruhan materi yang berasal dari makhluk hidup, termasuk bahan organik yang hidup maupun yang mati, baik di atas permukaan tanah maupun yang ada di bawah permukaan tanah. Biomassa merupakan produk fotosintesa dimana energi yang diserap digunakan untuk mengkonversi karbon dioksida dengan air menjadi senyawa karbon, hidrogen, dan oksigen.

Teknologi biomassa telah diterapkan sejak zaman dahulu dan telah mengalami banyak perkembangan. Biomassa memegang peran penting dalam menyelamatkan kelangsungan energi di bumi ditinjau dari pengaruhnya terhadap kelestarian lingkungan. Sifat biomassa yang merupakan energi dengan kategori sumber energi terbarukan mendorong penggunaannya menuju ke skala yang lebih besar lagi sehingga manusia tidak hanya tergantung dengan energi fosil. Biomassa

Universitas Indonesia

memiliki kelebihan yang memberi pandangan positif terhadap keberadaan energi ini sebagai alternatif energi pengganti energi fosil. Beberapa kelebihan itu antara lain, biomassa dapat mengurangi efek rumah kaca, mengurangi limbah organik, melindungi kebersihan air dan tanah, mengurangi polusi udara, dan mengurangi adanya hujan asam dan kabut asam.

Biomassa tidak selalu berupa padatan tetapi termasuk di dalamnya gas dan cairan yang berasal dari reaksi dekomposisi alam. Beberapa sumber biomassa adalah :

- Agrikultural : ampas padi, batang jagung, kulit kacang, dan gandum kering
- Hutan : ranting pohon, kulit kayu, ampas gergaji, dan daun kering
- *Municipal* : sampah organik dan kotoran manusia
- Energi : kelapa sawit, kacang kedelai, dan alga
- Biologikal : kotoran hewan dan hasil pembusukan makhluk hidup

2.3.1 Kayu Karet

Biomassa sebagai salah satu opsi dalam mengatasi krisis energi yang terus meningkat dari tahun ke tahun memiliki banyak pilihan dalam mengembangkan sumber daya yang efektif untuk suatu negara, disesuaikan dengan potensi yang dimiliki negara tersebut untuk memenuhi kebutuhan energinya sendiri hingga terwujud kemandirian energi yang hakiki. Hal ini yang menjadi nilai tambah karena setiap negara memiliki potensi masing-masing sehingga dalam pengembangan energi terbarukan, tidak harus tergantung dari pengaruh negara lain dalam penanganan masalah energinya tetapi dapat melihat ke masing-masing daerah untuk mengetahui sumber daya yang mungkin untuk dikembangkan untuk negara tersebut.

Kayu karet yang dalam dunia internasional disebut dengan sebutan *rubber wood*, merupakan tanaman asli dari daerah Amazon, Brasil yang pada awalnya dikembangkan di India pada akhir abad ke-18 namun tidak berhasil dan setelah itu dibawa hingga ke Asia Tenggara dan masuk ke Indonesia. Kayu karet dibudidayakan dengan tujuan utama untuk mendapatkan getah karet sebagai bahan utama karet hingga kini. Pohon karet dapat tumbuh hingga ketinggian 30

Universitas Indonesia

meter dan akan memproduksi getah karet setelah 5-6 tahun. Setelah 25 tahun, pohon karet akan ditebang dan digantikan pohon yang baru karena sudah tidak lagi menghasilkan *lateks* (getah karet). Hal inilah yang menjadikan pemanfaatan pohon karet berpotensi untuk dikembangkan sebagai produk biomassa karena selama ini pemanfaatannya terbatas hanya pada industri kerajinan dan furnitur. Secara teknis kayu karet tergolong kayu yang lunak-keras dan lumayan berat dengan densitas antara 435-625 kg/m³ pada level 12 % *moisture content* pada kayu. Setelah melalui proses pengeringan, penyusutan kayu sangat kecil dengan angka rata-rata di bawah 2% pada arah radialnya. Kayu karet berwarna putih kekuningan dan akan berubah sedikit kecoklatan apabila telah mulai mengering. Pada pengujian yang dilakukan oleh BPPT menggunakan analisis *proximate* dan *ultimate* didapat data sebagai berikut:

Tabel 2.2. Data pengujian spesimen kayu karet berdasarkan analisis *proximate* dan *ultimate* oleh BPPT, Tangerang

Moisture	10,24	ASTM D-3173
Ash	2,71	ASTM D-3174
Volatile matter	71,81	ASTM D-3175
Fixed carbon	15,25	By difference
Calorific value	Result	Standard method
Cal/gram	4069	ASTM D 5865
Density	Result	Standard method
Gram/cm ³	0.64	ASTM D 167
Ultimate analysis	Result (%)	Standard method
Moisture	10,24	ASTM D-3173
Ash	2,71	ASTM D-3174
Carbon	43,33	ASTM D-5373
Hydrogen	5.11	ASTM D-5373
Nitrogen	0,0	ASTM D-5373
Oxygen	38,61	By difference

Dimana analisis *proximate* merupakan sebuah metode pengujian bahan untuk melakukan analisis terhadap kandungan *fixed carbon*, bahan bakar yang menguap, kadar air, dan persen abu yang berguna untuk perancangan *grate* tungku, volume pembakaran, peralatan kendali polusi, dan sistem *handling* abu pada tungku berdasarkan dari hasil uji dan analisis kadar abu. Sementara *fixed carbon* adalah bahan bakar padat yang tertinggal dalam pembakaran setelah bahan yang mudah menguap didistilasi yang penting untuk memperhitungkan perkiraan nilai kasar dari nilai panas bahan bakar. Analisis yang kedua adalah analisis *ultimate* yang merupakan metode analisa bahan dimana seluruh komponen bahan baik padatan maupun gas diperhitungkan dan analisisnya berguna untuk mendapatkan kandungan kimia pada bahan uji. Analisa tersebut berguna untuk menentukan jumlah udara yang dibutuhkan saat pembakaran, serta volume dan komposisi gas bakar. Untuk melakukan kedua analisis tersebut diperlukan kelengkapan alat laboratorium pengujian dan juga tenaga ahli yang terampil.

Kayu yang memiliki densitas yang tinggi akan memiliki rendemen yang tinggi pada arangnya, serta kadar karbon terikat yang banyak, dan tingkat kekerasan kayu berbanding terbalik dengan kadar airnya (Syachri dan Hartoyo, 1976). Berdasarkan data tersebut, kayu karet memiliki densitas $0,64 \text{ g/cm}^3$ yang artinya kayu karet termasuk dalam kelas III (0,6-0,75) dan artinya baik dalam pemanfaatan energi biomassa (Oey Djoen Seng, 1951).

2.4. Tar

Tar adalah kontaminan organik yang terbentuk selama proses gasifikasi berlangsung. Tar merupakan suatu campuran yang kompleks dari hidrokarbon yang dapat terkondensasi dengan benzena merupakan komponen terbesar dari tar^[1], seperti yang tertera pada Tabel 2.3. Jumlah dan komposisi dari tar yang dihasilkan sangat tergantung pada jenis *gasifier*, temperatur reaksi, dan bahan bakar^[1]. Secara visual tar memiliki ciri-ciri berwarna hitam pekat dan kental.

Tabel 2.3. Komposisi Tar

Component	Weight (%)
Benzene	37.9
Toluene	14.3
Other 1-ring aromatic hydrocarbons	13.9
Naphthalene	9.6
Other 2-ring aromatic hydrocarbons	7.8
3-ring aromatic hydrocarbons	3.6
4-ring aromatic hydrocarbons	0.8
Phenolic compounds	4.6
Heterocyclic compounds	6.5
Others	1.0

(Sumber: Prabir Basu. “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*”)

Tar dapat diklasifikasikan menjadi empat kelompok produk utama, yaitu *primary*, *secondary*, *alkyl tertiary*, and *condensed tertiary* (Evans dan Milne, 1997).

Tar Primer (200⁰C-500⁰C)

Tar primer diproduksi selama proses pirolisis primer. Tar ini terdiri dari *oxygenated*, organik primer, dan molekul terkondensasi. Produk utama berasal dari terurainya komponen-komponen selulosa, hemiselulosa, dan lignin dari biomassa. Milne dkk. (1998) mendaftarkan sejumlah besar senyawa asam, gula, alkohol, keton, aldehyd, fenol, *guaiacols*, *syringols*, furan, dan campuran *oxygenates* dalam tar ini. Jenis tar inilah yang terbentuk pada *updraft gasifier* yang terbentuk dalam rentang temperatur 200⁰C-500⁰C.

Tar Sekunder (500-800⁰C)

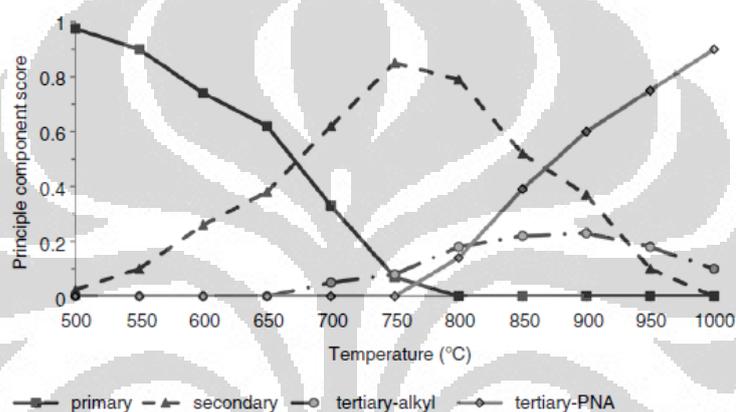
Saat temperatur *gasifier* meningkat hingga di atas 500⁰C, primer tar mulai membentuk gas yang lebih tidak terkondensasi dan molekul yang lebih berat yang disebut tar sekunder, dimana fenol dan olefin adalah konstituen penting.

Produk Tar Tersier (>750⁰C)

Produk tersier alkil termasuk turunan metal organik, seperti *methyl acenaphthylene*, *methyl naphthalene*, toluene, dan indena (Evans dan Milne, 1997). Terkondensasinya organik tersier membentuk seri *Polynuclear Aromatic Hydrocarbon* (PAH) tanpa substituen (atom atau sekelompok atom diganti untuk organik dalam rantai induk hidrokarbon). Seri ini mengandung benzena, naftalena,

acenaphthylene, antrasena/fenantrena, dan *pyrene*. Produk tar sekunder dan tersier berasal dari tar primer. Tar primer hancur sebelum produk tersier muncul (Milne dkk., 1998).

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa seiring meningkatnya temperatur maka produk tar primer menurun tetapi produk tersier meningkat. Ketika temperatur di atas 500°C, tar sekunder meningkat dan menggantikan tar primer. Setelah tar primer organik hancur, tar tersier mulai terbentuk seiring meningkatnya temperatur. Pada tahap ini tar sekunder mulai menurun. Dengan demikian, temperatur tinggi menghancurkan tar primer tetapi bukan produk tar tersier^[1].

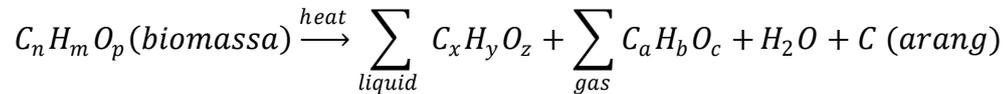


Gambar 2.5. Grafik variasi tar primer, sekunder, dan produk tersier terhadap temperatur dengan *residence time* 0,3 detik. (Sumber: Diadaptasi dari Evans dan Milne, 1997, hal. 804)

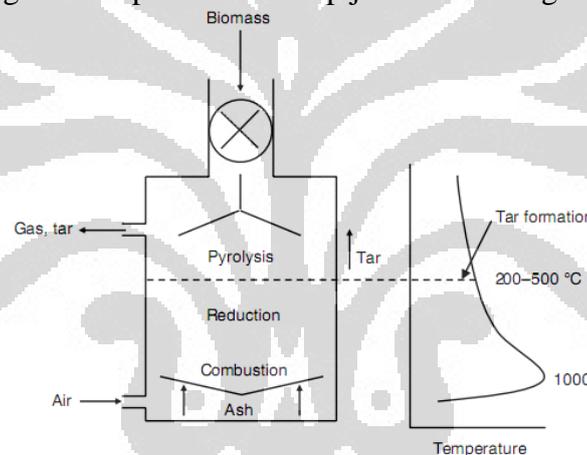
2.4.1. Proses Pembentukan Tar

Tar diproduksi terutama melalui dipolerimerisasi selama tahap pirolisis pada proses gasifikasi. Biomassa (atau bahan bakar lain) ketika dimasukkan ke *gasifier* akan mengalami proses pirolisis yang dapat dimulai pada temperatur yang relatif rendah, yaitu dari 200°C dan selesai pada 500°C^[1]. Dalam rentang temperatur tersebut, selulosa, hemiselulosa, lignin, dan komponen biomassa terurai menjadi tar primer, yang dikenal juga sebagai minyak kayu atau sirup kayu yang berisi *oxygenates* dan molekul organik primer yang terkondensasi (Milne dkk, 1998). Arang juga diproduksi pada tahap ini. Ketika suhu telah di atas 500°C, komponen tar primer memulai reformasi menjadi lebih kecil, gas yang lebih ringan dan tidak terkondensasi, serta serangkaian molekul yang lebih berat yang disebut tar sekunder. Gas-gas yang tidak terkondensasi tersebut meliputi CO₂, CO,

dan H₂O. Pada suhu yang lebih tinggi, produk tar primer hancur dan produk tersier dihasilkan. Dalam proses pembentukan tar, terjadi reaksi heterogen. Reaksi heterogen adalah reaksi yang melibatkan dua fase yang berbeda, dalam hal ini fase gas dan fase padat. Reaksi kimia pada proses pirolisis pada umumnya adalah sebagai berikut:

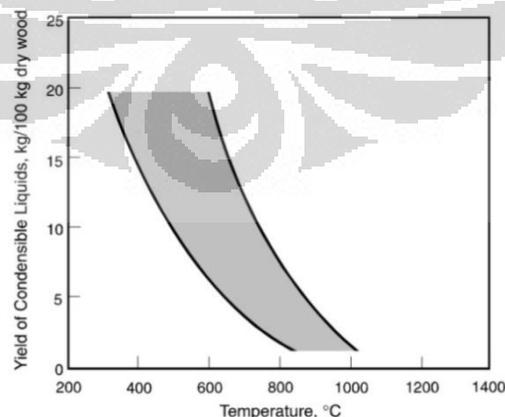


Tar pada *updraft gasifier* tidak mengalami proses pemecahan kembali karena langsung ikut terbawa keluar bersama gas melalui bagian atas *gasifier*. Tar tersebut akan masuk ke area dingin sehingga terkondensasi dan terbentuklah tar cair. Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 menunjukkan skema terbentuknya tar dalam *gasifier* dan pengaruh temperatur terhadap jumlah kandungan tar.



Gambar 2.6. Zona temperatur terbentuknya tar

(Sumber: Prabir Basu, “*Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*”)



Gambar 2.7. Grafik jumlah tar terhadap kenaikan temperatur

(Sumber: T.A. Milne and R.J Evans *Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation and Conversion*. National Renewable Energy Laboratory 1998)

Universitas Indonesia

2.4.2. Tar Cracking

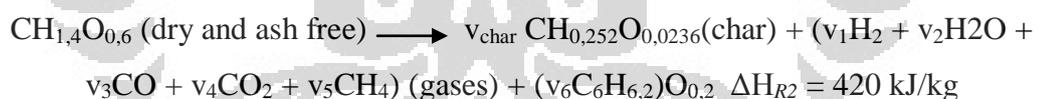
Jenis dari biomassa sangat mempengaruhi tar yang terbentuk. Laju reaksi yang terjadi di dalam *gasifier* dalam reaksi gasifikasi didasarkan pada reaksi:

$$r = \frac{\delta C_{tar \text{ compound}}}{\delta t} = k(T) \cdot (C_{tar \text{ compound}})^m \cdot (C_{CO_2})^n \cdot (C_{H_2O})^o \cdot (C_{H_2})^p \quad [3] \quad (2.1)$$

Dimana r adalah laju reaksi, C adalah konsentrasi, t adalah waktu, k(T) adalah konstanta laju reaksi dan m, n, o, dan p adalah orde laju reaksi untuk konsentrasi tar, CO₂, H₂O and H₂. Konstanta laju reaksi mengacu pada persamaan Arrhenius. Persamaan tersebut adalah:

$$k(T) = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad [3] \quad (2.2)$$

Dimana K₀ adalah faktor pre-eksponensial, E_a adalah energi aktivasi, R adalah konstanta gas, dan T adalah temperatur. Berdasarkan persamaan-persamaan tersebut hubungan antara kandungan tar yang dihasilkan dengan laju reaksi pengujian. Dalam proses pembentukan tar, terjadi reaksi heterogen. Reaksi heterogen adalah reaksi yang melibatkan dua fase yang berbeda, dalam hal ini fase gas dan fase padat. Proses pembentukan tar terjadi pada reaksi pirolisis. Reaksi tersebut adalah :



Laju dari reaksi pyrolysis diatas adalah :

$$r_2 = \left((1,516 \times 10^7 \exp\left(-\frac{75549}{T}\right)) \right) \rho_{wood} \text{ kg/m}^3\text{s} \quad (2.3)$$

Dalam proses dekomposisi tar (*tar cracking*), terjadi proses *homogeny*. Proses *homogeny* adalah proses yang melibatkan satu fase saja, dalam hal ini hanya fase gas. Proses dekomposisi tar (*tar cracking*) mengacu pada reaksi :



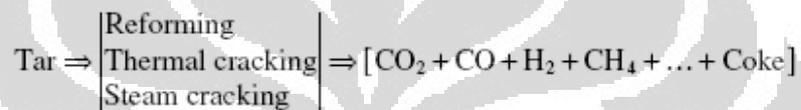
Laju dari reaksi proses dekomposisi tar adalah :

$$R_{10} = (4,28 \times 10^6 [s^{-1}] \exp\left(-\frac{12919}{T}\right)) \rho_{tar} \text{ kg/m}^3\text{s} \quad (2.4)$$

Tar yang dihasilkan dapat dikonversi menjadi produk lain sebelum meninggalkan *gasifier*. Hal tersebut dapat dicapai dengan langkah berikut:

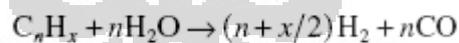
- Modifikasi kondisi operasi dari *gasifier*
- Penambahan katalis
- Modifikasi desain *gasifier*

Pemilihan salah satu atau kombinasi yang tepat dari faktor tersebut dapat sangat mengurangi jumlah tar dalam gas produk yang meninggalkan *gasifier*. *Reforming*, *thermal cracking*, and *steam cracking* merupakan tiga reaksi utama yang dapat mengurangi jumlah tar (Delgado dkk.,1996). Hal ini mengubah tar menjadi susunan hidrokarbon yang lebih kecil dan ringan seperti ditunjukkan persamaan di bawah ini:



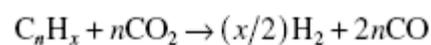
- *Tar reforming*

Reaksi *tar reforming* dapat ditulis seperti persamaan di bawah ini, dimana tar dimisalkan dengan C_nH_x . Reaksi pemecahan dapat terjadi pada gasifikasi uap, dimana uap hasil gasifikasi memecahkan tar, menghasilkan molekul yang lebih kecil dan ringan seperti H_2 dan CO ^[1].



- *Dry tar reforming*

Proses ini dapat terjadi ketika CO_2 menjadi medium gasifikasi. Hal ini dapat memecah tar menjadi H_2 dan CO , seperti persamaan di bawah ini^[1]. Proses *dry tar reforming* lebih efektif dibandingkan dengan *steam reforming* ketika dolomite digunakan sebagai katalis (Sutton dkk.,2001).



- *Thermal cracking*

Thermal cracking dapat mengurangi tar, tetapi membutuhkan temperatur tinggi ($>1100^\circ\text{C}$) dan menghasilkan jelaga (Dayton 2002). Dikarenakan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan temperatur gas keluaran hasil gasifikasi biomassa pada umumnya, pemanasan eksternal atau internal

dibutuhkan dengan penambahan oksigen. Hal ini memiliki dua konsekuensi ketika dilakukan pada pembangkit gasifikasi biomassa. Pertama, jika bahan bakar gas digunakan pada *engine* atau turbin gas atau proses sintesis, karbon perlu dihilangkan terlebih dahulu dengan menggunakan filter. Kedua, hasil *thermal cracking* hanya membuat bagian kandungan energi dari tar yang tersedia menjadi bahan bakar dengan nilai kalor yang rendah^[3].

- *Steam cracking*

Pada *steam cracking*, tar dikurangi dengan uap dan dipanaskan secara singkat dalam tungku perapian karena tidak adanya oksigen^[1]. Hidrokarbon jenuh mengalami pemecahan menjadi hidrokarbon yang lebih kecil.

Parameter-parameter pengoperasian seperti temperatur, tekanan reaktor, medium gasifikasi, ekuivalen rasio, dan *residence time* juga mempengaruhi pembentukan dan konversi tar.

Temperatur

Temperatur pengoperasian reaktor mempengaruhi kuantitas dan komposisi tar. Kuantitas biasanya berkurang seiring dengan kenaikan temperatur reaksi. Produksi dari oksigen, berisi senyawa seperti phenol, kresol, dan benzofuran dikurangi dengan temperatur, terutama di bawah 800⁰C. Seiring dengan kenaikan temperatur maka jumlah dari senyawa 1- dan 2- cincin aromatik bersama *substituents* akan berkurang, tetapi senyawa 3- dan 4- cincin aromatik meningkat. Senyawa aromatik tanpa *substituents* (naftalena, benzena, dll.) yang disukai pada temperatur tinggi. Kandungan naftalena dan benzena dalam gas meningkat bersama temperatur (Devi dkk.,2003). Temperatur tinggi juga mengurangi kandungan ammonia dalam gas dan meningkatkan perubahan arang, tetapi memiliki efek negatif yaitu mengurangi nilai panas yang berguna dari gas produk.

Peningkatan temperatur *freeboard* pada *fluidized-bed gasifier* juga dapat mengurangi tar dalam gas produk^[1]. Penurunan tar diperoleh dengan menginjeksikan udara sekunder ke *freeboard* tersebut (Narvaez dkk.,1996). Hal ini mungkin disebabkan karena meningkatnya pembakaran pada *freeboard* tersebut. Meningkatkan temperatur melalui injeksi udara sekunder di *freeboard* mungkin memiliki dampak negatif pada nilai kalor.

Universitas Indonesia

Tekanan Reaktor

Bersama dengan meningkatnya tekanan maka jumlah tar semakin berkurang, tetapi fraksi PAH meningkat (Knight, 2000).

Media Gasifikasi

Empat media dapat digunakan untuk gasifikasi, yaitu udara, uap, karbon dioksida, dan campuran uap-oksigen. Rasio bahan bakar dengan media merupakan parameter penting yang mempengaruhi produk dari gasifikasi, termasuk tar. Parameter ini berbeda untuk masing-masing media. Sebagai contoh, untuk gasifikasi udara parameter yang dibutuhkan adalah ekuivalensi rasio (ER), untuk gasifikasi uap parameternya adalah rasio biomassa (S/B), dan untuk gasifikasi uap-oksigen parameternya adalah rasio gasifikasi (GR). Tabel 2.4 menunjukkan kisaran dari produksi tar pada tiga media gasifikasi untuk nilai-nilai khas dari karakteristik parameternya masing-masing.

Secara umum, hasil tar dalam gasifikasi uap lebih besar dari gasifikasi uap-oksigen. Dari jumlah tersebut, gasifikasi udara merupakan produsen tar terendah (Gil dkk., 1999). Hasil tar dalam suatu sistem tergantung pada jumlah media gasifikasi per-unit gasifikasi biomassa.

Tabel 2.4. Perbandingan produksi tar dalam tiga media gasifikasi

Medium	Operating Condition	Tar Yield (g/Nm ³)	LHV (MJ/Nm ³ dry)	Tar Yield (g/kg BM _{dat})
Steam	S/B = 0.9	30–80	12.7–13.3	70
Steam and oxygen	GR = 0.9, H ₂ O/O ₂ = 3	4–30	12.5–13.0	8–40
Air	ER = 0.3; H/C = 2.2	2–20	4.5–6.5	6–30

Sumber: Data yang dikumpulkan dari Gil dkk., 1999

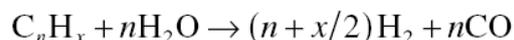
- Gasifikasi udara

Hasil dan konsentrasi tar dalam gas produk berkurang bersama dengan peningkatan ER. Semakin tinggi ER memungkinkan jumlah oksigen yang lebih besar untuk bereaksi dengan volatil di zona *flaming pyrolysis*^[1]. Ketika ekuivalen rasio di atas 0,27 fenol hampir semuanya dikonversi dan sedikit tar terbentuk (Kinoshita dkk., 1994). Penurunan ini lebih besar pada temperatur yang lebih tinggi. Pada ER yang lebih tinggi, fraksi PAH,

benzene, naftalena, 3- dan 4- cincin aromatik lainnya meningkat. Selain mengurangi tar, ER yang lebih tinggi juga mengurangi kualitas dari gas. Nilai kalor gas berkurang karena cairan nitrogen dari udara^[1].

- **Gasifikasi uap**

Ketika uap bereaksi dengan biomassa untuk memproduksi H₂, seperti persamaan di bawah ini, reaksi *tar-reforming* mengurangi tar.



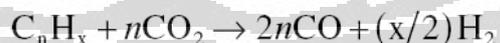
Penurunan hasil tar yang besar terlihat ketika rasio S/B berkisar antara 0,5 sampai 2,5 (Herguido dkk., 1992). Pengurangan lebih lanjut dimungkinkan dengan adanya katalis yang mendorong reaksi *tar-reforming*. Tiga jenis utama katalis adalah dolomite, logam alkali, dan nikel.

- **Gasifikasi campuran uap-oksigen**

Penambahan oksigen dengan uap lebih meningkatkan pengurangan tar. Selain itu, hal ini juga menyediakan panas yang dibutuhkan untuk membuat reaksi gasifikasi autotermal. Hasil tar berkurang bersama dengan peningkatan rasio gasifikasi (GR). Sebagai contoh, 85% pengurangan tar terjadi ketika GR meningkat dari 0.7 ke 1.2 (Aznar dkk., 1997). Tar ringan terbentuk pada GR rendah.

- **Gasifikasi karbon dioksida**

Tar mungkin direformasi pada permukaan katalis dalam media karbon dioksida. Reaksi seperti ini disebut *dry reforming* (Sutton dkk., 2001).

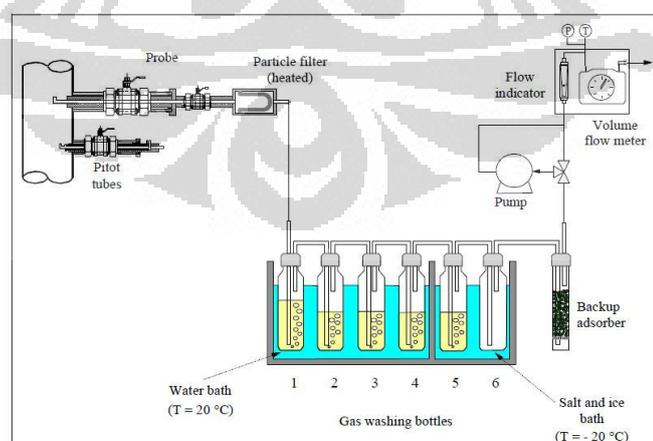


Residence Time

Residence time memiliki efek nominal pada hasil tar dalam *fluidized-bed gasifier*. Bersama dengan peningkatan residence time, hasil dari senyawa oxygenated, senyawa 1- dan 2- cincin (benzena dan naftalena terkecuali) berkurang, tetapi hasil dari senyawa 3- dan 4- cincin meningkat.

2.5. Pengukuran Tar

Pengukuran tar dimaksudkan untuk mengetahui massa tar per satuan volume gas dan jenis tar yang dihasilkan oleh suatu *gasifier*. Banyak metode untuk mengetahui kadar atau konsentrasi tar pada gas produk, seperti contohnya melakukan *sampling* terhadap gas dengan menggunakan tabung-tabung impinger, analisa spektrografi dengan menggunakan *photo-ionization detector*, ataupun dengan metode-metode lainnya. Namun demikian, penulis memutuskan untuk menggunakan metode *gas sampling* yang telah terstandarisasi yaitu berpegang pada *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases* yang telah mendapat standar CEN (*Comité Européen de Normalisation*) dan mempunyai range ukur yang besar yaitu 1 mg/m^3 - 300 g/m^3 satuan volume gas produser. Hal ini dikarenakan tar yang akan diukur adalah jenis tar primer yang terkandung dalam gas dengan konsentrasi yang tinggi. Dengan begitu metode spektrometri massa tidak dapat dilakukan karena partikel tar primer sangat besar sehingga tidak dapat terdeteksi alat spektrometri massa. Selain itu, alat-alat yang digunakan oleh metode ini cukup mudah didapat. Pada metode ini ada beberapa hal penting dalam proses pengukuran tar, yaitu isokinetik *sampling*, *tar collector module*, *volume sampling module*. Berdasarkan jurnal dari *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases*, proses pengambilan tar dilakukan seperti Gambar 2.8.



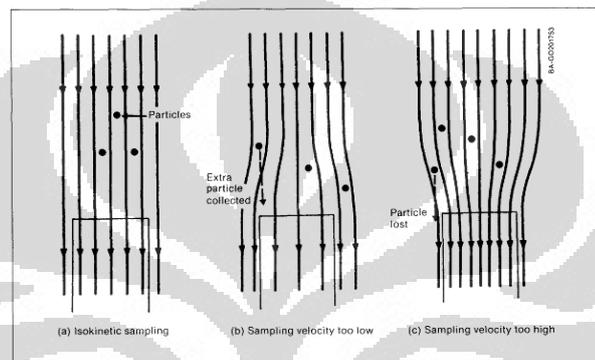
Gambar 2.8. Proses pengambilan tar melalui nozel dan tabung impinger

(Sumber: J.P.A. Neeft, H.A.M. Knoef, U. etc *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases* Version 3.3)

Universitas Indonesia

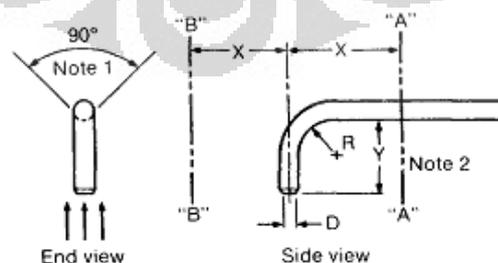
2.5.1. Isokinetik Sampling

Isokinetik sampling adalah pengambilan contoh gas dimana kecepatan gas saat diluar nozel sama dengan kecepatan saat masuk kedalam nozel. Isokinetik sampling digunakan apabila polutan yang ada dalam gas tidak tercampur secara homogen dalam gas. Non-isokinetik sampling dapat digunakan pada temperatur *gas producer* diatas 350°C dimana tar secara keseluruhan masih dalam bentuk gas.



Gambar 2.9. Ilustrasi Perbandingan antara Isokinetic Sampling dan Non-isokinetik
(Sumber: *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. US Department of Energy. 1988)

Agar diperoleh isokinetik sampling yang ideal, posisi pemasangan nozel tidak boleh dekat dengan tekukan atau dekat dengan katup-katup, pemasangan nozel harus ditengah pipa utama, seperti pada Gambar 2.10. Diameter minimal pipa utama adalah $2X$ dimana X adalah 4 kali diameter nozel sedangkan jarak bibir nozel terhadap bibir pipa utama adalah adalah 5 kali diameter dalam pipa utama tersebut.



Gambar 2.10. Posisi nozel terhadap pipa utama

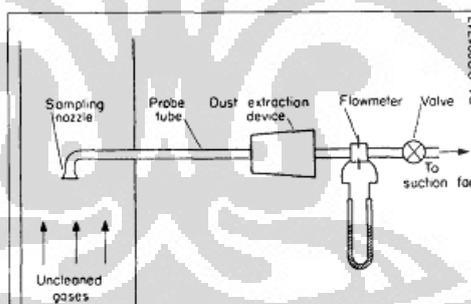
(Sumber: *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. US Department of Energy. 1988)

Untuk mendapatkan diameter nozel yang sesuai dengan isokinetik sampling, digunakan rumus berikut:

$$Dn^2 = \frac{V \sqrt{\frac{Ms(T + 273)}{Ps}}}{(5.9195 \times 10^{-4}) \times Cp \times \Phi (1 - Bwo) \times \sqrt{\Delta P}} \quad (2.5)$$

Dimana:

- Dn = Diameter dalam nozzle (mm)
 V = Volume gas yang diinginkan (m³)
 Ms = Mol berat gas producer (g/gmol)
 T = Temperatur pada pipa utama (°C)
 Ps = Tekanan pada pipa utama (mmHg)
 Cp = Konstanta pitot tipe S (0.84)
 Φ = Waktu pengambilan sample (s)
 Bwo = perbandingan uap air dalam volume gas
 √ΔP = akar pangkat dari tekanan dinamik



Gambar 2.11. Skema nozel pada pipa utama

(Sumber: *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. US Department of Energy. 1988)

Untuk mendapatkan diameter nozel yang isokinetik, diperlukan serangkaian percobaan-percobaan berupa *trial and error*. Namun menurut *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases* dengan diameter 5 mm dan maksimal *flowrate sampling* gas hingga 10 lpm maka dapat diperoleh isokinetik *sampling* dengan kecepatan gas maksimal hingga 8.5 m/s.

2.5.2. Modul Penangkap Tar

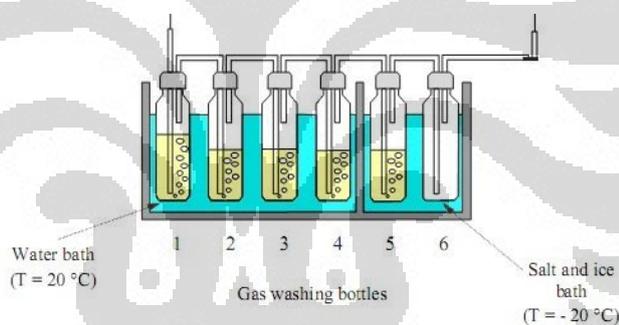
Modul penangkap tar atau *module tar collector* terdiri atas beberapa tabung impinger, kotak kondensasi dan *solvent*.

1. Tabung impinger

Tabung-tabung impinger yang digunakan adalah 6 buah tabung impinger standar dengan kapasitas 100 ml atau 250 ml dan mampu mengalirkan gas antara 0.1-0.6 m³/h.

2. Kotak kondensasi

Kotak kondensasi digunakan untuk mengkondensasikan gas sampling di dalam tabung-tabung impinger. Pada kotak pertama diisi dengan air dan dijaga temperaturnya pada 20°C, Gambar 2.12. Pada kotak kedua diisi dengan material yang mampu membuat temperatur hingga -20°C, untuk hal ini ada beberapa pilihan seperti yang tertera pada Tabel 2.5.



Gambar 2.12. Ilustrasi kotak kondensasi

(Sumber: http://chemwiki.ucdavis.edu/VV_Lab_Techniques/Cooling_baths)

Tabel 2.5. Jenis-jenis cooling bath yang biasa digunakan

Mixture	T (°C)
CaCl ₂ .6 H ₂ O/ice 1:2.5	-10
NaCl/ice 1:3	-20
carbon tetrachloride/CO ₂	-23
acetonitrile/CO ₂	-42
CaCl ₂ .6 H ₂ O/ice 1:0.8	-40
Acetone/CO ₂	-78
Methanol/N ₂	-98
Liquid N ₂	-196

(Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Cooling_bath)

Berdasarkan nilai ekonomi dan kemudahan untuk memperoleh material sebagai *cooling bath*, maka dipilih campuran es dengan garam untuk mengisi kotak kondensasi kedua pada pengujian yang dilakukan oleh penulis.

3. Solvent

Solvent atau pelarut digunakan untuk mengendapkan (menangkap) tar yang ada didalam *gas producer*. Dalam *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases* direkomendasikan beberapa jenis *solvent*, seperti isopropanol, aseton, iso-oktan dan dichlorometan. Tabel 2.6 menunjukkan titik didih dari beberapa *solvent* yang dapat digunakan dalam pengujian.

Tabel 2.6. Komparasi solvent berdasarkan titik uap

Component A	Component B	Boiling Point A	Boiling Point B	Azeotrope Boiling Point	Azeotrope Wt % A
Water	Methanol	100 °C	64.5 °C	Non-Azeotrope	
Water	Ethanol	100 °C	78.3 °C	78.2 °C	4 %
Water	Isopropanol	100 °C	82.3 °C	80.3 °C	12.6 %
Water	Acetone	100 °C	56.2 °C	Non-Azeotrope	
Water	Acetonitrile	100 °C	81.6 °C	76.1 °C	16%
Water	Ethyl Acetate	100 °C	77.2 °C	70.3 °C	8.5 %
Water	Acetic Acid	100 °C	118 °C	Non-Azeotrope	
Water	THF (tetrahydrofuran)	100 °C	66 °C	65 °C	5%
Water	Dichloromethane	100 °C	40 °C	38.1 °C	1.5%

Component A	Component B	Boiling Point A	Boiling Point B	Azeotrope Boiling Point	Azeotrope Wt % A
Dichloromethane	Methanol	40 °C	64.5 °C	37.8 °C	92.7 %
Dichloromethane	Hexane	40 °C	68.8 °C	Non-Azeotrope	
Dichloromethane	Ethyl Ether	40 °C	34.6 °C	40.8 °C	70 %
Dichloromethane	Acetone	40 °C	56.2 °C	Non-Azeotrope	
Acetone	Hexane	56.2 °C	68.8 °C	49.8 °C	59 %

(Sumber: http://www.solvent--recycling.com/azeotrope_1.html)

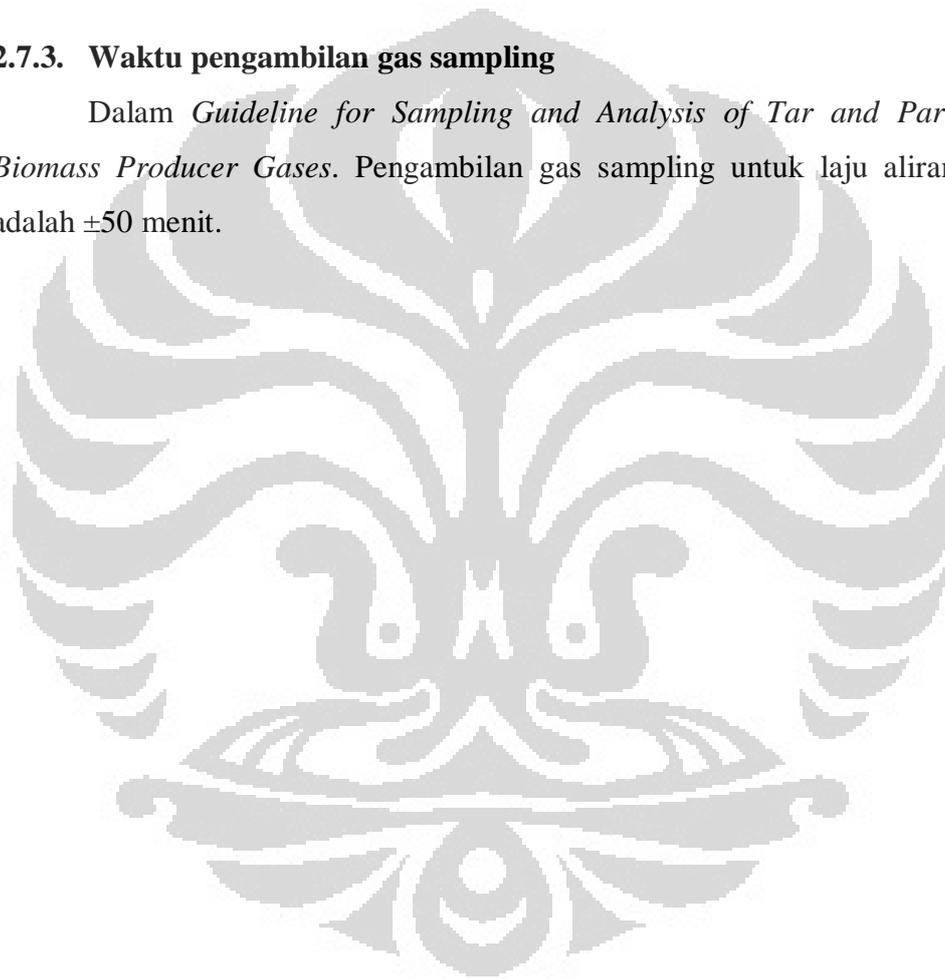
Isopropanol merupakan *solvent* dengan titik uap medium sehingga dapat melakukan proses *liquid quench* pada gas yang dihasilkan *gasifier*, sedangkan aseton merupakan *solvent* dengan titik uap rendah sehingga dapat menyebabkan

Universitas Indonesia

solvent pada tabung pertama akan menguap saat mengenai gas hasil gasifikasi, akibatnya gas harus dilewatkan melalui kondenser terlebih dahulu sebelum diabsorpsi *solvent*, dan *non-polar solvent* seperti iso-oktan akan menyebabkan terdapatnya es yang terbentuk pada ujung dari impinger, atau akan terbentuk emulsi dari campuran gas dengan *solvent* tersebut. Oleh karena itu, dalam pengujian kali ini penulis memilih menggunakan *solvent* isopropanol agar jumlah tar yang diperoleh lebih maksimal.

2.7.3. Waktu pengambilan gas sampling

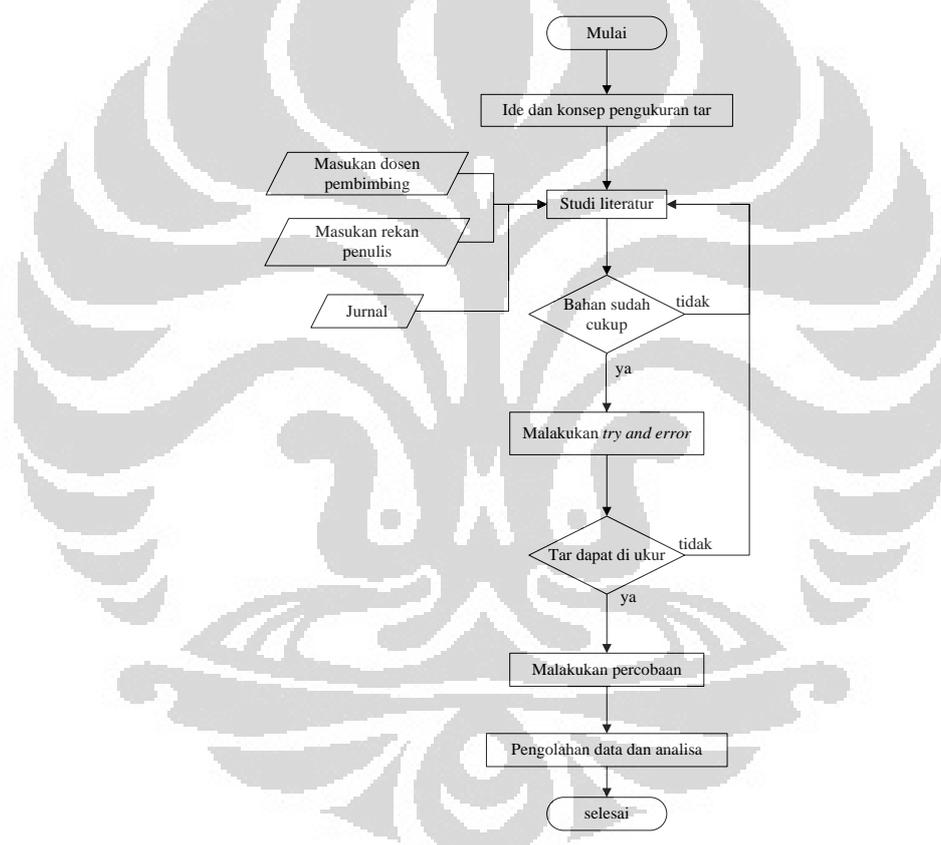
Dalam *Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases*. Pengambilan gas sampling untuk laju aliran 2 lpm adalah ± 50 menit.



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Garis Besar Penelitian

Sebelum dan selama pengujian serta penelitian dilakukan, penulis mendapatkan bimbingan terlebih dahulu dari dosen pembimbing, melakukan tukar pikiran dengan rekan serta studi literatur agar diperoleh data pengujian yang baik. Secara garis besar proses penelitian yang dilakukan penulis seperti diagram alur di bawah ini.

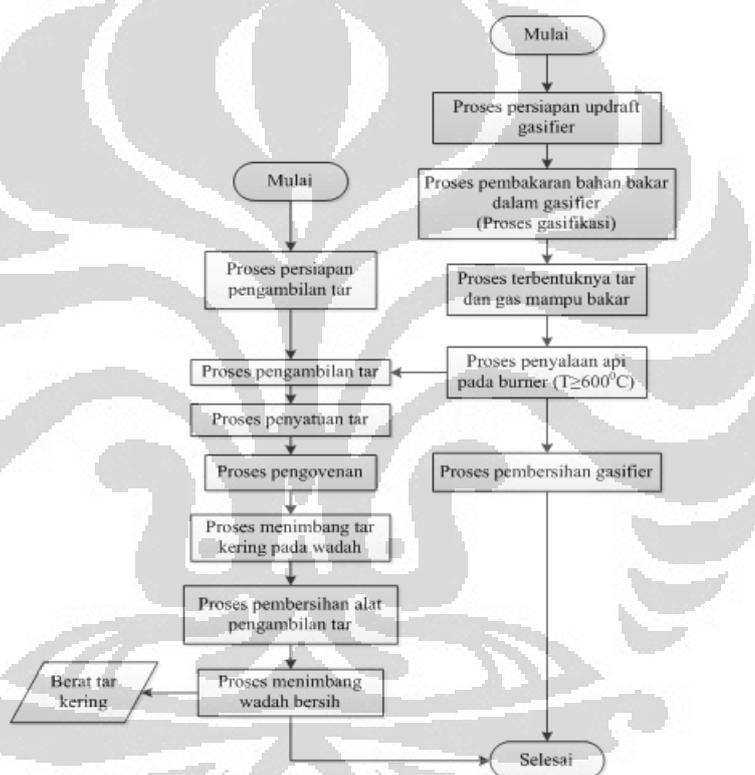


Gambar 3.1. Diagram alur penelitian

3.2. Garis Besar Pengujian

Proses pengujian untuk mengetahui karakteristik dimulai dengan menjemur bahan bakar, lalu 0.5 kg bahan bakar dimasukkan ke dalam *gasifier* dan dibakar selama 10 menit atau sampai bahan bakar menjadi arang dilanjutkan dengan pengaturan laju alir udara. Setelah itu *gasifier* diisi dengan 6 kg bahan bakar dan

temperatur mulai direkam. Langkah selanjutnya adalah menyulut *syngas* sampai diperoleh *flame* yang stabil. Proses pengujian pengambilan tar primer pada *updraft gasification* dilakukan ketika *gasifier* telah menghasilkan gas mampu bakar secara konstan dan kontinyu, dimana gas tersebut dapat menghasilkan *flame* yang stabil ($T_1 \geq 600^{\circ}\text{C}$). Proses pengambilan tar dilakukan selama *flame* yang dihasilkan oleh *syngas* dari *gasifier* masih menyala dengan stabil. Ketika *flame* padam, maka pengambilan tar dihentikan. Adapun proses pengujian yang dilakukan penulis secara garis besar ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram alur proses pengujian

3.2.1. Parameter-Parameter yang Ditentukan

Dalam proses pengambilan tar pada *gasifier* tipe *updraft* yang dilakukan, terdapat beberapa parameter yang ditentukan agar proses pengujian yang dilakukan dapat berjalan dengan baik. Parameter-parameter tersebut, antara lain:

1. Bahan bakar

Bahan bakar yang digunakan adalah kayu karet. Sebelum eksperimen, pengeringan kayu karet dilakukan dengan metode *dewatering* di dalam

ruangan laboratorium satu hari sebelum eksperimen dan dilanjutkan dengan pengeringan dibawah sinar matahari langsung selama 2 jam sebelum eksperimen (10.00 sampai 12.00 WIB) dengan maksud agar tekanan parsial kayu karet sama dengan tekanan lingkungan serta juga untuk mengurangi kadar air (*moisture content*) yang terkandung dalam kayu karet.

2. Debit (*flowrate*)

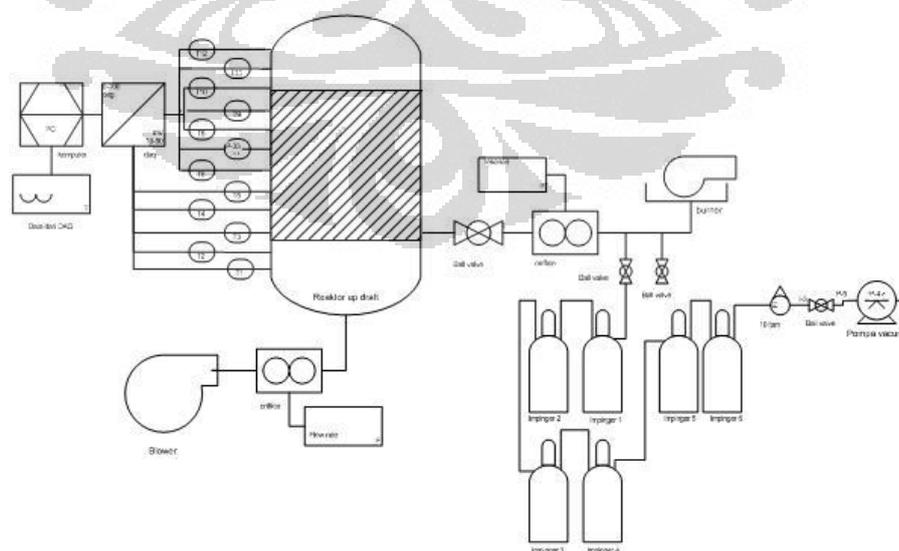
- Debit pada pompa vakum dijaga 2 lpm.
- Debit pada *primary air blower* diatur pada 108 lpm

3. Temperatur

Selama proses pengambilan tar dilakukan, temperatur pada kotak kondensasi pertama sekitar 20°C dan temperatur pada kotak kondensasi kedua sekitar -15°C s/d 20°C.

3.3. Komponen-Komponen Alat Pengujian

Proses pengujian dilakukan dengan metode yang sesederhana mungkin dan menggunakan komponen-komponen yang mudah didapat di pasaran. Hal ini dimaksudkan untuk mempermudah jalannya pengujian, menghemat biaya yang dibutuhkan, dan mempercepat proses pengadaan komponen-komponen tersebut di dalam laboratorium. Skematik alat pengujian adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3. Skematik pengujian

Komponen-komponen yang digunakan selama proses pengujian, antara lain:

1. *Sampling tar pipe*
2. *Valve*
3. Selang silikon
4. Tabung impinger
5. *Solvent*
6. Kotak kondensasi
7. Pompa vakum
8. *Heater*
9. Gelas ukur
10. Rotameter
11. Termometer digital
12. Timbangan digital
13. Oven

3.3.1. *Sampling Tar Pipe set*

Alat ini digunakan sebagai jalur keluaran gas dari dalam reaktor menuju ke burner dan untuk menarik gas sampel hasil proses gasifikasi yang akan diukur jumlah kandungan tar didalamnya. Alat *sampling tar pipe set* ini terdiri atas dua bagian utama, yaitu:

- Pipa utama : diameter dalam 64 mm
panjang pipa 500 mm
- Nozel : diameter dalam 5 mm



Pipa utama

Nozzle

Gambar 3.4. *Sampling tar pipe set*

3.3.2. *Valve*

Dalam eksperimen ini, digunakan 2 tipe katup, yaitu:

- o *Ball valve* yang digunakan dalam pengujian berukuran 1 ½ inch dan ¼ inch dimana katup berukuran 1 ½ inch digunakan sebagai pengatur besar-kecilnya aliran udara yang masuk ke dalam reaktor, sedangkan *ball valve* ukuran ¼ inch digunakan sebagai pintu keluarnya gas

sampel dari pipa utama yang masuk ke dalam tabung impinger melalui selang silikon.



Gambar 3.5. Ball valve

- *Gate valve*, ukuran katup yang digunakan adalah $\frac{1}{2}$ inch dan berfungsi sebagai pembuka/penutup saluran keluar *syngas*.



Gambar 3.6. Gate valve

3.3.3. Selang Silikon

Selang silikon ini berfungsi untuk mengalirkan gas sampel yang keluar dari pipa utama ke dalam tabung impinger pertama, antar tabung impinger hingga ke pompa vakum. Selang silikon yang digunakan selama pengujian merupakan selang silikon yang mampu tahan terhadap temperatur tinggi, memiliki diameter dalam 6 mm dan 8 mm yang panjangnya disesuaikan dengan jarak antara pipa utama ke tabung impinger pertama, jarak antar tabung impinger, dan jarak tabung impinger ke pompa vakum.



Gambar 3.7. Selang silikon

3.3.4. Tabung Impinger

Tabung impinger digunakan sebagai wadah untuk menangkap tar yang terdapat dalam gas sampel. Tabung ini terbuat dari bahan yang tahan terhadap temperatur tinggi, dimana terdapat dua buah selang kaca pada bagian tutupnya, yaitu selang kaca panjang sebagai jalur masuknya gas sampel ke dalam tabung dan selang kaca pendek sebagai jalur keluarnya gas sampel dari tabung impinger tersebut. Dalam tiap *batch* pengambilan tar digunakan tujuh tabung impinger (5 tabung diisi dengan *solvent* (isopropanol), 1 tabung dibiarkan kosong, dan 1 tabung diisi dengan kapas).



Gambar 3.8. Tabung impinger

3.3.5. Solvent

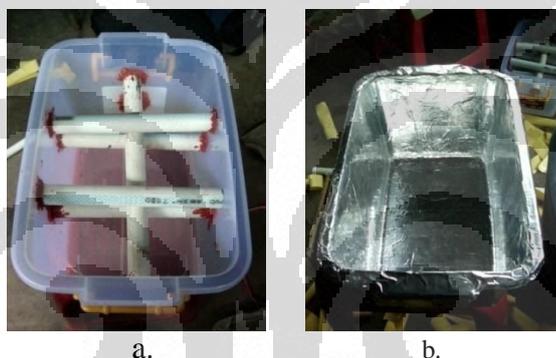
Solvent yang digunakan dalam pengujian adalah cairan isopropanol. *Solvent* atau yang disebut dengan pelarut berfungsi sebagai penangkap tar yang terdapat dalam gas sampel.



Gambar 3.9. Solvent

3.3.6. Kotak Kondensasi

Setiap *batch* pengujian digunakan dua buah kotak kondensasi yang berdimensi sama (panjang 400 mm, lebar 225 mm dan tinggi 250 mm) dan telah dimodifikasi. Kotak kondensasi pertama diberikan pembatas untuk tabung impinger dengan menggunakan pipa paralon $\frac{1}{4}$ inch hingga membentuk 6 sekat yang bertujuan agar tabung impinger dalam kotak tersebut tetap berada pada posisinya selama pengujian dilakukan, dimana dalam kotak ini dimasukkan empat buah tabung impinger, kemudian diisi dengan air dan dibuat temperatur di dalamnya $\pm 20^{\circ}\text{C}$. Kotak kondensasi kedua dilapisi dengan selotip aluminium untuk menjaga temperatur dalam kotak tersebut. Di dalam kotak ini akan diletakkan dua buah tabung impinger yang kemudian diisi campuran es batu dan garam hingga temperatur dalam kotak mencapai -20°C .



Gambar 3.10. a. Kotak kondensasi 1 ; b. kotak kondensasi 2

3.3.7. Pompa Vakum

Pompa vakum yang digunakan untuk pengujian adalah model VE 115N dengan kapasitas power $\frac{1}{4}$ HP. Pompa ini digunakan untuk menghisap gas sampel dari dalam *sampling tar pipem* melalui nozel yang dihubungkan dengan selang ke tabung impinger.



Type	: 1 stage vacuum pump
Merk & Model	: Value VE115N
Air Displacement	: 2 CFM
Ultimate Vacuum	: 150 micron
Voltage	: 230 V/50-60Hz
Power	: $\frac{1}{4}$ HP
Oil Capacity	: 250 ml

Gambar 3.11. Pompa vakum

3.3.8. Heater

Heater dipasang tepat pada nozel yang terdapat di *sampling tar pipedan* berfungsi untuk memanaskan gas sampel yang diambil agar tar yang terkandung dalam gas tersebut tidak terkondensasi dan menempel pada dinding-dinding nozel dan *ball valve* karena memasuki temperatur yang lebih rendah.



Gambar 3.12. Heater

3.3.9. Gelas Ukur

Gelas ukur digunakan untuk mengukur jumlah volume *solvent* yang akan dimasukkan ke dalam tabung impinger. Gelas ukur yang digunakan memiliki *range* 0 ml hingga 250 ml.



Gambar 3.13. Gelas ukur

3.3.10. Rotameter

Rotameter atau yang disebut juga flowmeter digunakan untuk menjaga aliran gas sampel yang dihisap dari *sampling tar pipe* sebesar 2 lpm.



Nama	: Rotameter
Merk	: Mueller
Ketelitian	: 1 lpm gas
Kapasitas	: 0.3 - 3 lpm gas 5-25 lpm gas

Gambar 3.14. Rotameter

3.3.11. Termometer Digital

Termometer digital digunakan untuk mengukur temperatur pada kotak kondensasi pertama dan kedua. Pada termometer ini terdapat tiga *display*, yaitu untuk mengukur temperatur dalam (di sekeliling termometer), mengukur temperatur luar (temperatur ruangan), dan mengukur kelembaban di dalam ruang pengujian.



Merk	: KI&BNT
Type	: DT-3
Range Temperatur Luar	: -30°C s/d 70°C
Range Temperatur Dalam	: -10°C s/d 60°C
Range Kelembaban	: 0% s/d 100%

Gambar 3.15. Termometer digital

3.3.12. Timbangan Digital

Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa tar yang diperoleh dari pengujian yang dilakukan. Timbangan ini memiliki tingkat ketelitian hingga 0.01 gram dan kemampuan baca maksimal hingga 600 gram.



Merk & Type : Sigma DJ620C
 Ketelitian : 0.01g
 Kapasitas : 600g
 Power : AC 220 (dengan adaptor DC 9V)
 atau 6 baterai AA 1.5V

Gambar 3.16. Timbangan digital

3.3.13. Oven

Oven digunakan untuk menguapkan *solvent* yang digunakan sebagai penangkap tar dari gas sampel yang diambil hingga hanya tersisa tar di dalam tabung impinger.



Gambar 3.17. Oven

3.4. Tahap Pengujian

Eksperimen yang dilakukan penulis melalui beberapa tahap, yaitu persiapan, pengujian/pengambilan tar, penimbangan tar serta pembersihan alat-alat pengujian. Seluruh tahapan tersebut harus dilakukan dengan baik agar proses pengujian dapat berjalan dengan lancar dan data yang diperoleh memiliki tingkat kesalahan yang rendah serta menjamin keselamatan selama proses pengujian berlangsung.

3.4.1. Tahap Persiapan

Sebelum proses pengambilan tar pada *updraft gasifier* dilakukan, diperlukan proses persiapan alat-alat yang mendukung berlangsungnya proses pengujian. Adapun persiapan yang diperlukan adalah sebagai berikut:

1. Memastikan kebersihan dari tabung-tabung impinger dan selang-selang silikon yang akan digunakan.
2. Memasukkan 50 ml *solvent* (isopropanol) ke dalam lima tabung impinger untuk setiap *batch* pengujian.
3. Memasukkan kapas ke dalam satu tabung impinger untuk setiap *batch* pengujian.
4. Memasukkan tabung impinger ke dalam kotak kondensasi, yaitu 4 buah tabung berisi *solvent* pada kotak kondensasi pertama, satu buah tabung berisi *solvent* dan satu buah tabung kosong pada kotak kondensasi kedua, serta satu buah tabung berisi kapas diletakkan di luar kotak kondensasi kedua yang bertujuan agar tidak ada tar yang terhisap masuk ke dalam pompa vakum.
5. Menghubungkan tabung impinger satu dan lainnya dengan menggunakan selang silikon dan memastikan tutup tabung berada pada posisi yang benar, yaitu selang kaca panjang pada posisi jalur masukkan gas sampel ke dalam tabung dan selang kaca pendek pada posisi jalur keluaran gas sampel dari tabung.
6. Memasukkan air pada kotak kondensasi pertamadan es batu pada kotak kondensasi kedua.
7. Memastikan minyak pompa vakum masih dalam keadaan yang cukup dan pompa vakum dapat berfungsi dengan baik.
8. Memasang pipa *heater* pada nozel keluaran gas sampel dan memastikan *heater* dapat berfungsi dengan baik.
9. Memasang *ball valve* pada ujung pipa *heater*, lalu memastikannya tidak tersumbat dan berada pada posisi tertutup.

3.4.2. Tahap Pengambilan Tar

Proses pengambilan tar dilakukan ketika gas mampu bakar yang keluar dari dalam reaktor sudah stabil, dimana gas tersebut sudah dapat terbakar saat

disulut dengan api dan nyala api telah stabil hingga tidak ada lagi gas mampu bakar yang keluar dari dalam reaktor. Adapun proses pengujian (pengambilan tar) dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menghubungkan tabung impinger yang berisi kapas ke rotameter, lalu rotameter tersebut dihubungkan ke pompa vakum dengan menggunakan selang silikon. Kemudian peralatan yang telah disiapkan disusun hingga menjadi suatu sistem yang dapat digunakan untuk pengambilan tar.
2. Memastikan laju aliran yang terhisap oleh pompa vakum adalah 2 lpm yang terbaca pada rotameter berskala 0.3 lpm – 3.0 lpm.
3. Membuat temperatur pada kotak kondensasi pertama menjadi $\pm 20^{\circ}\text{C}$ dengan menambahkan es batu ke dalamnya dan temperatur pada kotak kondensasi kedua menjadi $\pm -20^{\circ}\text{C}$ dengan menambahkan garam ke dalam kotak tersebut.
4. Menunggu hingga gas mampu bakar yang dikeluarkan dari dalam reaktor (*gasifier*) menghasilkan *flame* yang stabil (dimana temperatur yang terbaca pada termokopel 1 yang terpasang di *gasifier* mencapai $\geq 600^{\circ}\text{C}$).
5. Ketika gas tersebut telah stabil, pengambilan tar untuk *batch* 1 dilakukan dengan menyalakan pompa vakum bersamaan dengan dibukanya *ball valve* pada pipa set sehingga gas sampel terhisap ke dalam sistem.
6. Proses pengambilan tar dilakukan selama ± 50 menit atau hingga api yang dihasilkan oleh gas produk telah padam.
7. Setelah 50 menit, pompa vakum dimatikan bersamaan dengan ditutupnya *ball valve* pada pipa set sehingga tidak ada lagi gas yang terhisap ke dalam sistem.
8. Melepas selang silikon yang digunakan pada sistem.
9. Menyusun kembali sistem yang telah disiapkan untuk pengambilan tar *batch* 2 dan proses pengambilan tar yang dilakukan sama seperti proses yang dilakukan pada batch 1, yaitu dilakukan selama 50 menit dan pada temperatur $\geq 600^{\circ}\text{C}$ pada termokopel 1 yang terpasang di *gasifier*.

3.4.3. Tahap Penimbangan Tar dan Pembersihan Alat-Alat

Setelah proses pengambilan tar selesai dilakukan, maka dilakukan proses penimbangan untuk mengetahui berapa banyak kandungan tar yang terdapat dalam gas sampel. Akan tetapi, sebelum proses penimbangan dilakukan, terlebih

dahulu dilakukan proses-proses di bawah ini agar diperoleh hasil penimbangan yang lebih akurat dan mempermudah penulis untuk memperoleh hasil akhir, yaitu:

1. Menyatukan tar yang tercampur bersama *solvent* dalam tabung impinger sehingga hanya menjadi dua buah tabung/wadah untuk setiap *batch*.
2. Membersihkan tar yang menempel pada selang silikon dan dinding-dinding tabung maupun selang kaca yang terdapat pada tabung impinger dengan menggunakan aseton, lalu menyatukan hasil pembersihan tersebut ke dalam satu buah tabung/wadah kosong. Proses ini dilakukan pada setiap *batch* pengujian sehingga pada akhirnya didapatkan dua buah tabung/wadah yang berisi campuran tar dengan *solvent* dan satu buah tabung/wadah yang berisi campuran tar dengan aseton.
3. Tabung/wadah yang telah berisi campuran tar dengan *solvent* maupun aseton dimasukkan ke dalam oven. Hal ini bertujuan untuk menguapkan *solvent* dan aseton agar hanya tersisa tar di dalam tabung-tabung tersebut.
4. Mengatur temperatur oven hingga 105°C dan proses penguapan dilakukan selama ± 10 jam.
5. Setelah proses penguapan selesai dan hanya tersisa tar di dalam tabung/wadah, lalu dilakukan proses penimbangan tabung tersebut menggunakan timbangan digital.
6. Membersihkan tabung/wadah berisi tar dengan aseton, kemudian dijemur dan dilakukan penimbangan kembali untuk tabung tersebut hingga mendapatkan perbandingan massa antara tabung berisi tar dan tabung kosong (yang telah dibersihkan).
7. Melakukan pengurangan massa hasil penimbangan tabung berisi tar dengan tabung yang telah dibersihkan sehingga diperoleh jumlah massa tar yang tertangkap saat pengujian, baik *batch* 1 maupun *batch* 2.

3.5. Pengolahan Data Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan dengan secara berulang-ulang. Walaupun seluruh parameter, sistem dan pengaturan pengujian menggunakan kondisi yang sama, tetapi data penelitian yang diperoleh berbeda-beda. Hal ini berhubungan erat dengan berbagai faktor seperti kadar *moisture* bahan bakar, kondisi lingkungan

saat eksperimen, kondisi komponen alat gasifikasi, serta pembacaan alat ukur yang dibutuhkan ketelitian tinggi. Untuk itu, tingkat keakuratan data dapat tergantung dari banyak faktor. Menjadi penting untuk menjaga kondisi dari setiap komponen pengujian agar data yang didapat memiliki tingkat keakuratan yang baik.

3.5.1. Pengolahan Data Tar

Proses penimbangan tabung yang berisi tar (sebelum dibersihkan) dan tabung kosong (setelah dibersihkan) dilakukan untuk mengetahui jumlah massa tar yang diperoleh dari pengujian. Massa tar dapat diketahui dengan pengurangan massa pada kedua penimbangan tersebut. Setelah diperoleh jumlah massa tar dari pengujian, dilakukan pengolahan data terhadap massa tar tersebut sehingga dapat diketahui jumlah tar yang terkandung dalam setiap volume gas hasil gasifikasi. Di bawah ini merupakan langkah-langkah pengolahan data tar yang dilakukan, yaitu:

1. Melakukan pengurangan hasil penimbangan terhadap tabung berisi tar dengan tabung setelah dibersihkan hingga didapatkan jumlah massa total tar dari pengujian yang dilakukan untuk setiap *batch*.
2. Menghitung banyaknya sampel gas (dalam satuan liter) yang ditarik selama pengujian dilakukan.

$$V_{gas} = flowrate \left(\frac{\text{liter}}{\text{menit}} \right) \times \text{lama waktu pengujian (menit)} = \text{liter} \quad (3.1)$$

3. Menghitung banyaknya massa tar yang dihasilkan untuk setiap liter gas sampel (gram per liter).

$$M_{tar} = \frac{M_{total} \text{ (gram)}}{D \text{ (lpm)} \times t \text{ (menit)}} = \text{gram/liter} \quad (3.2)$$

Keterangan:

M_{tar} = Massa tar dalam satu liter gas sampel (gram/liter)

M_{total} = Massa total tar untuk setiap *batch* pengujian (gram)

D = Nilai *flowrate* penarikan gas sampel (liter per menit, lpm)

t = Lama waktu pengujian (menit)

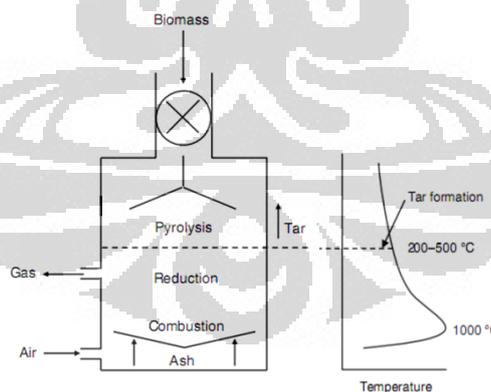
BAB IV

HASIL DAN ANALISA

Setiap pengujian yang dilakukan diusahakan selalu dengan metode, sistem, dan kondisi yang sama antara pengujian satu dengan lainnya. Hal ini dimaksudkan agar diperoleh data yang lebih akurat dari pengujian. Akan tetapi, untuk menjaga data yang dihasilkan konstan sangatlah sulit sehingga masih terdapat perbedaan data pada setiap pengujian yang dilakukan. Pembahasan dalam bab ini berkisar pada penyajian hasil pengujian yang telah dilakukan, pengolahan data, dan analisa terhadap hasil pengujian tersebut.

4.1. Analisa Modifikasi Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mengeluarkan gas hasil gasifikasi melalui zona reduksi (bagian bawah *gasifier*). Dengan modifikasi pengujian ini, maka diharapkan jumlah tar yang dihasilkan menjadi lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah tar pada pengujian *updraft gasifier* konvensional (gas produk keluar dari bagian atas *gasifier*). Gambar 4.1 merupakan skema modifikasi pengujian yang dilakukan oleh penulis.



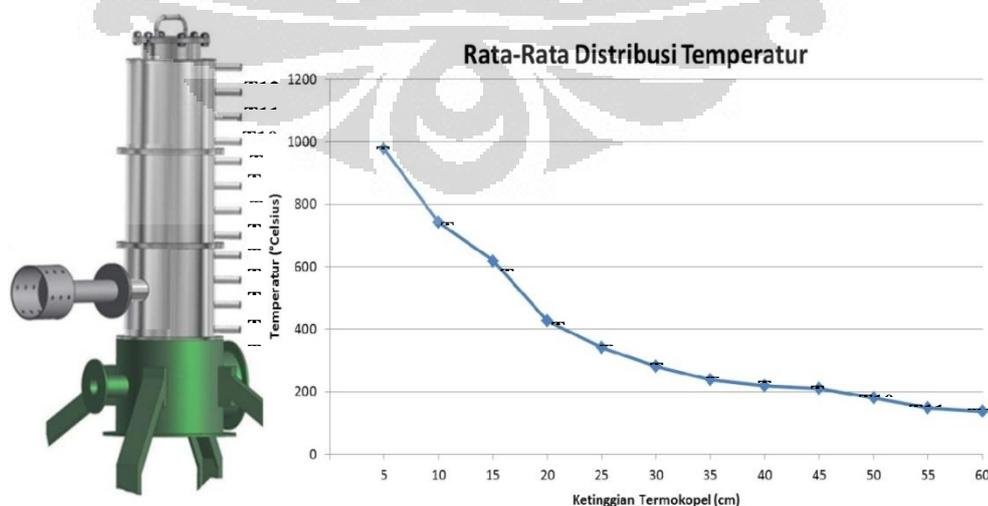
Gambar 4.1. Skema modifikasi pengujian

Berdasarkan Gambar 4.1 maka diasumsikan bahwa pengurangan tar dapat terjadi dikarenakan tar yang telah terbentuk karena gas produk melewati zona pirolisis dan bergerak ke arah atas *gasifier* dapat mengalami *cracking* karena

bergerak kembali ke bawah dan melewati zona temperatur yang cukup tinggi sebelum meninggalkan *gasifier* serta memiliki *residence time* yang lebih lama sehingga dapat bereaksi dengan H_2O , CO_2 atau uap yang dapat membuat tar tersebut berkurang jumlahnya karena terurai menjadi H_2 atau CO . Berdasarkan hasil yang diperoleh dari modifikasi pengujian ini, laju alir tar primer yang dihasilkan ternyata lebih sedikit dibandingkan dengan pengujian *updraft gasifier* konvensional yang disebabkan perubahan tar primer menjadi tar sekunder bukan akibat tar mengalami *thermal cracking* karena temperatur keluaran *syngas* hanya mencapai $\pm 700^{\circ}C$, sehingga belum dapat membuat tar yang dihasilkan mengalami *thermal cracking* dan terurai menjadi CO atau H_2 .

4.2. Perbandingan Tar Primer Outlet Zona Reduksi dengan Konvensional

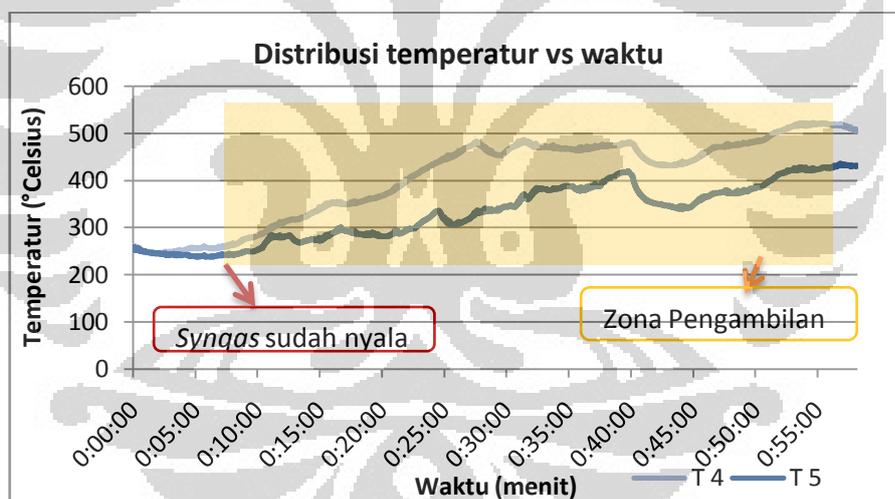
Pengujian atau pengambilan tar selalu diupayakan menggunakan metode dan sistem yang sama agar diperoleh data yang lebih akurat. Pengambilan tar dilakukan ketika *gasifier* telah menghasilkan gas produk yang stabil dimana gas tersebut telah dapat menghasilkan *flame* yang stabil pula ketika disulut dengan api atau ketika temperatur telah mencapai $\pm 600^{\circ}C$ pada termokopel 1 (T1). Setelah dilakukan beberapa kali pengujian, maka diperoleh rata-rata temperatur dari 12 termokopel yang terpasang pada *gasifier* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 sehingga dapat diketahui zona-zona proses gasifikasi yang terjadi.



Gambar 4.2. Distribusi temperatur pada *gasifier*

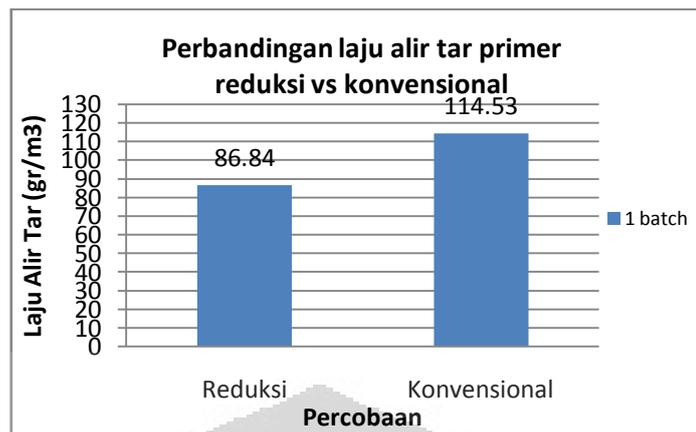
Gambar 4.2 menyatakan bahwa semakin tinggi posisi termokopel dari daerah pembakaran sebagai titik acuan penentuan titik 0 centimeter, maka semakin rendah temperatur yang terdapat di dalam *gasifier* tersebut. Diketahui juga bahwa pada termokopel 5 hingga 12 (posisi 25 cm hingga 60 cm) merupakan daerah pengeringan sehingga untuk menentukan daerah gasifikasi lainnya digunakan posisi termokopel 1 hingga 4 (posisi 5 cm sampai 20 cm) dimana sebaran temperatur di daerah tersebut mengindikasikan.

Berdasarkan grafik rata-rata distribusi temperatur yang diperoleh dari hasil pengujian, dapat terlihat bahwa pada sekitar posisi termokopel 3 (T3) yang terpasang pada *gasifier* dan merupakan daerah outlet dari *syngas* pada pengujian ini merupakan daerah reduksi dalam *gasifier*, sedangkan pirolisis (pembentukan tar) terjadi pada posisi termokopel 4 (T4) dimana temperatur yang terbaca selama pengujian berkisar antara 200-500⁰C, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3.



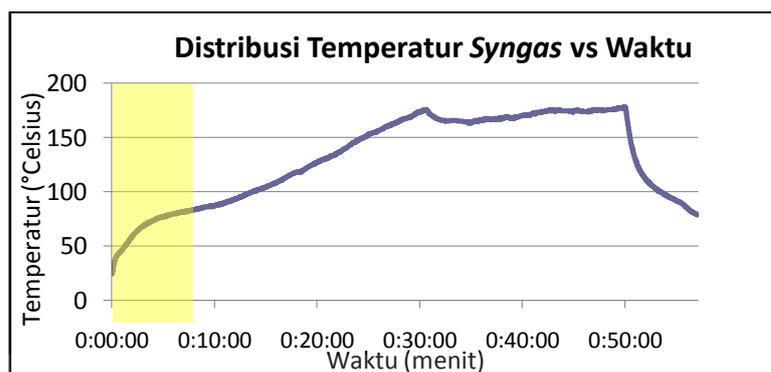
Gambar 4.3. Temperatur zona pirolisis pengujian outlet reduksi

Dari pengujian yang telah dilakukan didapatkan pula perbandingan laju alir tar primer dari gas produk yang keluar melalui bagian bawah *gasifier* (zona reduksi) dengan gas produk yang keluar melalui bagian atas *gasifier* (konvensional) seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 di bawah ini.

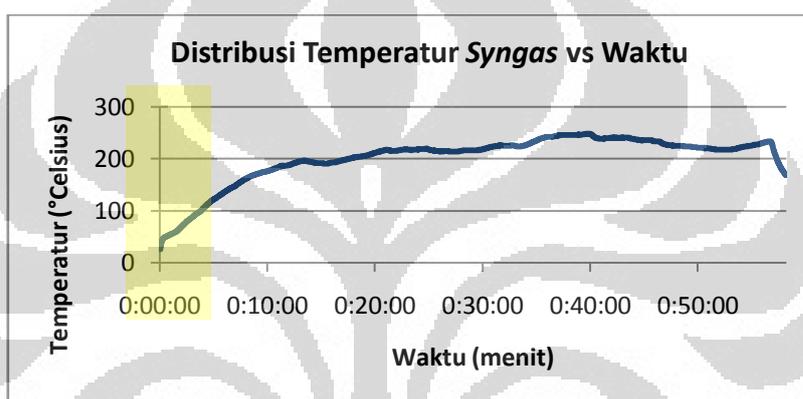


Gambar 4.4. Grafik perbandingan laju alir tar primer outlet reduksi dengan konvensional

Ketika gas produk keluar melalui zona reduksi (bagian bawah *gasifier*) diperoleh rata-rata laju alir tar primer $\pm 85 \text{ gr/m}^3$, sedangkan ketika gas produk keluar pada bagian atas *gasifier* (konvensional) $\pm 100 \text{ gr/m}^3$. Penurunan laju alir tar primer yang terjadi disebabkan perubahan jenis tar primer menjadi tar sekunder, dimana tar sekunder tidak dapat terdeteksi dengan metode pengujian yang dilakukan oleh penulis. Tar sekunder dapat terdeteksi atau dapat diukur dengan menggunakan *gas chromatograph*. Perubahan jenis tar yang terjadi dikarenakan temperatur *gasifier* pada daerah reduksi (T3) yang merupakan daerah keluaran *syngas* mencapai $\pm 700^\circ\text{C}$. Oleh karena itu, tar tidak mengalami proses *thermal cracking* yang membutuhkan temperatur $> 1100^\circ\text{C}$, dimana tar dapat terurai menjadi H_2 atau CO . Selain itu, tidak terjadinya proses *tar cracking* juga dikarenakan *residence time* gas produk di dalam *gasifier* yang begitu singkat. Kurangnya *residence time* tersebut disebabkan karena dimensi *gasifier* yang tidak terlalu tinggi sehingga jarak antara zona proses gasifikasi yang terjadi terlalu dekat dan waktu gas produk sebelum meninggalkan *gasifier* menjadi terlalu singkat. Hasil laju alir tar primer di atas didukung pula oleh grafik temperatur gas dari masing-masing pengujian, dimana pada pengujian gas yang keluar melalui zona reduksi memiliki temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian gas yang keluar melalui bagian atas *gasifier*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.5 dan Gambar 4.6. Berdasarkan hasil tersebut diketahui bahwa temperatur dalam *gasifier* mempengaruhi besarnya jumlah dan jenis tar yang dihasilkan, semakin tinggi temperatur maka jumlah tar primer akan berkurang.



Gambar 4.5. Grafik temperatur syngas pengujian outlet konvensional



Gambar 4.6. Grafik temperatur syngas pengujian outlet zona reduksi

Secara kasat mata ciri-ciri tar primer yang diperoleh dari pengujian baik yang keluar dari bagian atas ataupun bagian bawah (zona reduksi) *gasifier* tidak memiliki perbedaan yang begitu signifikan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7. Keduanya tampak terlihat sama, yaitu berwarna hitam pekat. Perbedaan terlihat ketika *solvent* dari masing-masing pengujian telah menguap dan dilakukan penimbangan. Dari proses penimbangan tersebutlah diketahui perbedaan berat tar primer dari masing-masing pengujian.



(a)

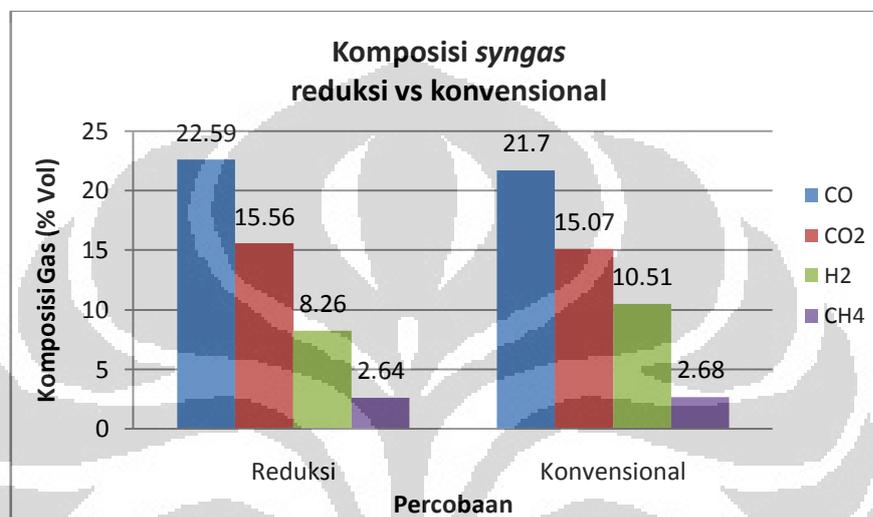


(b)

Gambar 4.7. (a) Tar primer *outlet* reduksi ; (b) Tar primer *outlet* konvensional

4.3. Perbandingan Komposisi Syngas Outlet Reduksi dengan Konvensional

Selain melakukan pengujian terhadap kandungan tar primer, dilakukan pula pengujian terhadap komposisi gas produk yang dihasilkan, baik pengeluaran melalui zona reduksi maupun pengeluaran secara konvensional. Adapun hasil dari pengujian komposisi gas seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.

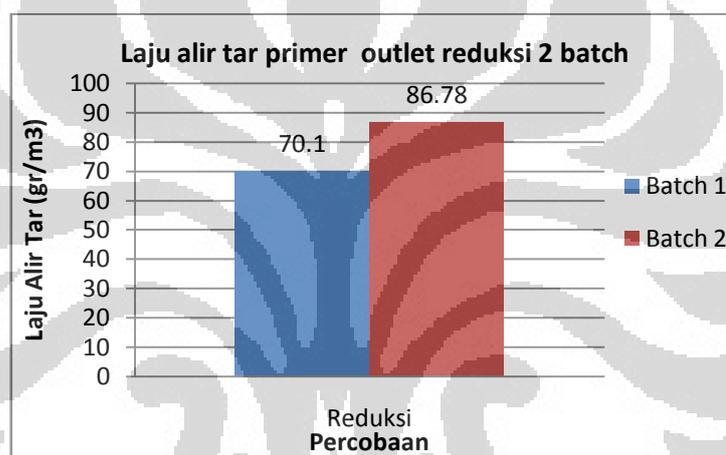


Gambar 4.8. Komposisi gas hasil gasifikasi

Pengujian komposisi gas dilakukan guna mendukung hasil pengujian terhadap laju alir tar primer yang diperoleh. Dari Gambar 4.8 terlihat bahwa nilai kandungan CO pada gas produk keluaran zona reduksi mencapai 22,59% sedangkan pada gas produk keluaran secara konvensional hanya 21,7%. Hasil persentase komposisi gas yang diperoleh antara gas produk keluaran zona reduksi dengan gas produk keluaran secara konvensional tidak mengalami perbedaan yang begitu jauh dan signifikan sehingga komposisi gas tersebut dianggap tidak mengalami perubahan. Persentase komposisi gas membuktikan bahwa proses *thermal cracking* belum terjadi dan pengurangan laju alir tar primer yang terjadi disebabkan perubahan jenis tar primer menjadi tar sekunder.

4.4. Hasil Pengujian Tar Primer Outlet Reduksi 2 Batch

Proses pengambilan tar juga dilakukan dalam 2 *batch* pengujian, dimana *batch* kedua dilakukan setelah pengujian *batch* pertama selesai dan temperatur pada T1 *gasifier* telah turun hingga di bawah 600⁰C. Hal ini dilakukan agar temperatur pengambilan tar antara *batch* pertama dengan *batch* kedua tidak berbeda jauh, yaitu $\pm 600^{\circ}\text{C}$ pada T1. Metode pengujian 2 *batch* ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui repetibilitas dari karakteristik operasi *gasifier* dan jumlah tar primer yang dihasilkan. Dari pengujian 2 *batch* didapatkan laju alir tar primer seperti ditunjukkan Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Grafik laju alir tar primer outlet zona reduksi 2 batch

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan Gambar 4.9 terlihat bahwa terjadi repetibilitas dari laju alir tar primer yang dihasilkan dari pengujian *batch* pertama dan *batch* kedua, dimana laju alir tar primer yang dihasilkan dari kedua *batch* pengujian relatif sama. Akan tetapi, terjadi sedikit peningkatan dari laju alir tar primer pada *batch* kedua yang kemungkinan dikarenakan masih adanya tar primer yang tersisa dari pengujian *batch* pertama pada *sampling tar pipe* sehingga ketika pengujian *batch* kedua dilakukan, tar primer tersebut terakumulasi dengan tar primer yang dihasilkan dari *batch* kedua dan mengakibatkan jumlah tar primer yang diperoleh sedikit lebih banyak dari *batch* pertama.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisa pengujian yang telah dilakukan, maka diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Sistem pengambilan tar primer yang digunakan dalam pengujian ini dapat berfungsi dengan baik.
2. Modifikasi pengujian pada *updraft gasifier* dengan pengeluaran gas produk melalui bagian bawah (zona reduksi) *gasifier* dapat mengurangi jumlah kandungan tar primer yang dihasilkan dibandingkan dengan pengujian *updraft gasifier* konvensional.
3. Laju aliran tar primer rata-rata dari pengujian dengan pengeluaran gas produk melalui bagian bawah *gasifier* sebesar $\pm 85 \text{ gr/m}^3$, sedangkan pada pengujian pengeluaran gas produk melalui bagian atas *gasifier* (konvensional) sebesar $\pm 100 \text{ gr/m}^3$.
4. Semakin tinggi temperatur pada daerah yang dilalui gas produk sebelum meninggalkan *gasifier*, maka semakin tinggi jumlah tar primer yang berubah menjadi tar sekunder dan tar tersier.
5. Tar yang dihasilkan *updraft gasifier* sangat banyak dan cenderung menghasilkan tar cair dan pekat.
6. Tar yang terbentuk pada *updraft gasifier* adalah jenis tar primer.

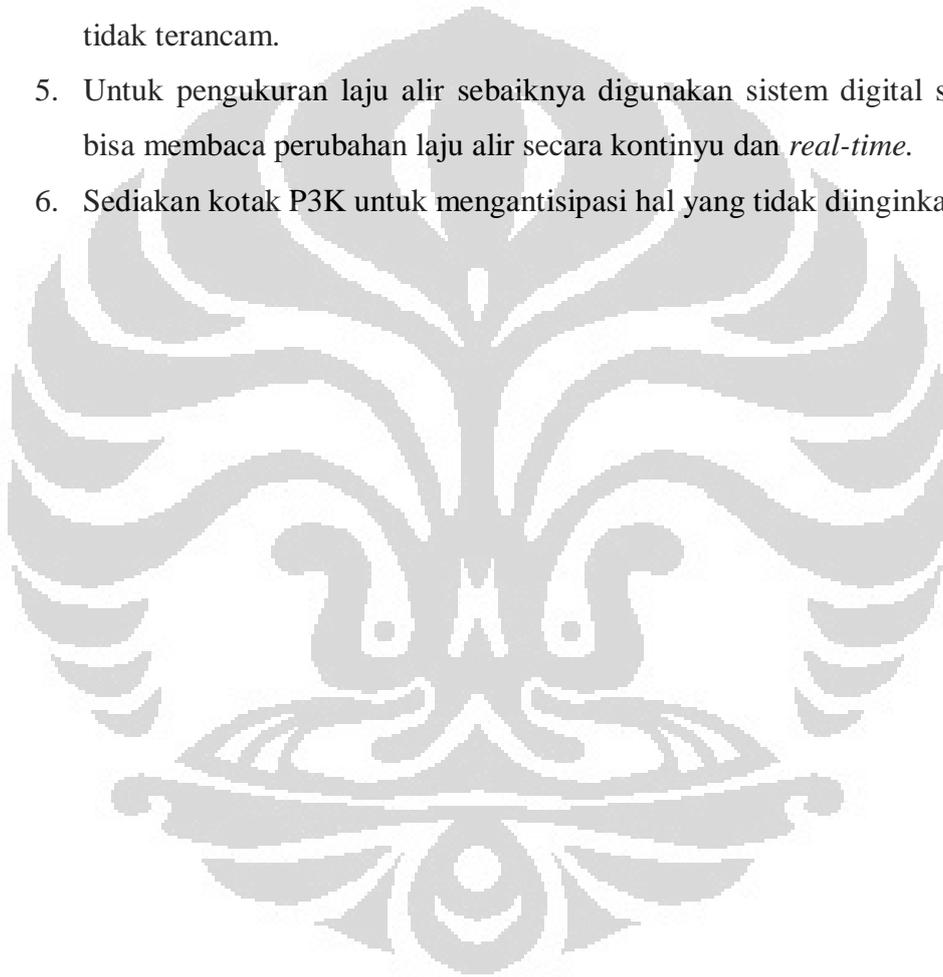
5.2. Saran

Agar kedepannya hasil pengujian tentang tar pada *updraft gasifier* ini mendapatkan hasil yang lebih baik dan jumlah kandungan tar dapat lebih berkurang dari saat ini, maka penulis menyarankan beberapa hal, antara lain:

1. Dimensi dari *gasifier* diperbesar sehingga *residence time* gas produk menjadi lebih lama di dalam *gasifier* dan dapat diperoleh pengurangan tar yang lebih banyak jika pengujian dengan pengeluaran gas melalui zona

reduksi kembali dilakukan, selain itu, pembesaran dimensi akan mempermudah pembagian zona gasifikasi

2. Disediakan APAR pada laboratorium untuk mengantisipasi hal yang tidak diinginkan.
3. Diadakan SOP (standard operating procedure) agar eksperimen bisa berjalan secara teratur.
4. Sediakan sistem ventilasi udara yang memadai agar kesehatan penguji tidak terancam.
5. Untuk pengukuran laju alir sebaiknya digunakan sistem digital sehingga bisa membaca perubahan laju alir secara kontinyu dan *real-time*.
6. Sediakan kotak P3K untuk mengantisipasi hal yang tidak diinginkan.



DAFTAR REFERENSI

1. Basu, Prabir. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design*. UK: Elsevier
2. *Handbook of Gasification Technologies A Primer for Engineers and Scientists Chemical Industries*. 2005. Taylor & Francis Group, LLC.
3. Okuga, Arthur. *Analysis and Operability Optimization of an Updraft Gasifier Unit*. Eindhoven University of Technology.
4. Colomba Di Blasi. *Modeling Wood Gasification in a Countercurrent Fixed-Bed Reactor*. Wiley InterScience.
5. Goorts, M.P. 2008. *Applying gas chromatography to analyze the composition and tar content of the product gas of a biomass gasifier. Tar formation*
6. Surjosatyo, Adi, & Vidian, Fajri. 2005. *Studi Eksperimental Cogasifikasi Tandan Kosong dan Tempurung Kelapa Sawit Menggunakan Downdraft Gasifier*. Jurnal Teknologi, No. 4 tahun XXIX
7. Vidian, Fajri. 2008. *Gasifikasi Tempurung Kelapa Menggunakan Updraft Gasifier pada Beberapa Variasi Laju Alir Udara Pembakaran*. Jurnal Teknik Mesin, vol. 10 No. 2
8. Higman, Cristopher, & van der Burgt, Marteen. 2008. *Gasification: Second Edition*. UK: Elsevier
9. Zainal. ZA, Ali. R, Quadir. G, Seetharanu.K.N, 2002. *Experimental Investigation of a Downdraft Biomass Gasifier*.
10. Seggiani M, Vittolo S, Puccini M, Belliani. *Cogasification of Sewage Sludge in an Updraft gasifier*. Fuel 2011
11. Bilad, M.Roil. *Teknologi Gasifikasi Biomassa Alternatif Solusi Bahan Bakar Oven Tembakau (Bagian I konsep dasar)*^{5th}. Komunitas Sasak
12. *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. US Department of Energy. 1988
13. Milne, T.A. and Evans, R.J. *Biomass gasifier 'tars': their nature, formation and conversion*, National Renewable Energy Laboratory, DE-AC36-83CH10093, November 1998.



LAMPIRAN