



**ANALISIS KARAKTERISTIK TERMAL REAKTOR
GELOMBANG MIKRO UNTUK PIROLISIS
BERBAHAN BAKU LIMBAH SISA MAKANAN**

SKRIPSI

**Skripsi ini ditulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Program Studi Teknik Mesin**

oleh

Yanuar Adi Kurniawan

5212412065

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2016**

PENGESAHAN

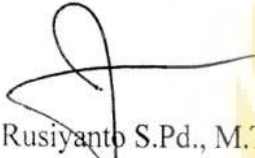
Skripsi dengan judul Analisis Karakteristik Termal Reaktor Gelombang Mikro untuk Pirolisis Berbahan Baku Limbah Sisa Makanan telah dipertahan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik Unnes pada tanggal.....*26 Oktober 2016*

Oleh

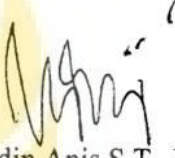
Nama : Yanuar Adi Kurniawan
NIM : 5212412065
Program Studi : Teknik Mesin S1

Panitia


Ketua Panitia


Rusiyanto S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Sekretaris


Samsudin Anis S.T., M.T., P.h.D.
NIP. 197601012003121002

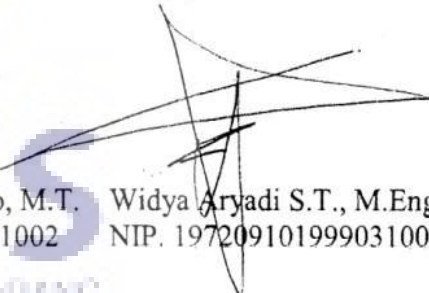
Pembimbing I


Samsudin Anis ST., M.T., P.h.D.
NIP. 197601012003121002

Pembimbing II

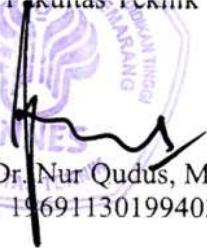

Dr. Wirawan Sumbodo, M.T.
NIP. 196601051990021002

Penguji


Widya Aryadi S.T., M.Eng
NIP. 197209101999031001

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik UNNES


Dr. Nur Qudus, M.T
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Yanuar Adi Kurniawan

NIM : 5212412065

Program Studi : Teknik Mesin S1

Fakultas : Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi dengan judul “**Analisis Karakteristik Termal Reaktor Gelombang Mikro untuk Pirolisis Berbahan Baku Limbah Sisa Makanan**” ini merupakan hasil karya saya sendiri dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi manapun, dan sepanjang pengetahuan saya dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Semarang, 20 September 2016
Yang membuat pernyataan

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Yanuar Adi Kurniawan
NIM 5212412065

ABSTRAK

Kurniawan, Yanuar. 2016. Analisis Karakteristik Termal Reaktor Gelombang Mikro untuk Pirolisis Limbah Sisa Makanan. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang. Samsudin Anis S.T, M.T, Ph.D dan Dr. Wirawan Sumbodo, M.T.

Kata kunci: Karakteristik termal, gelombang mikro, pirolisis, limbah sisa makanan, *moisture content*.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh waktu pemanasan dan daya terhadap karakteristik termal reaktor gelombang mikro. Kemudian juga untuk mengetahui pengaruh *moisture content* limbah sisa makanan terhadap karakteristik termal reaktor gelombang mikro.

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen. Limbah sisa makanan dipanaskan atau dipirolisis menggunakan *microwave* selama 1 jam dengan daya *microwave medium, medium high, dan high*. Data kenaikan temperatur reaktor dan besar daya *microwave* dicatat per menit sebagai data perhitungan karakteristik termal. Hasil perhitungan karakteristik termal ditabulasi dan dijelaskan dalam grafik. Terdapat dua variasi limbah sisa makanan yang menjadi pembanding analisa yakni limbah sisa makanan kering (11% *moisture*) dan limbah sisa makanan basah (24% *moisture*).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil yang optimal didapatkan pada daya 418 W dimana temperatur tertinggi, laju pemanasan dan efisiensi termal reaktor diperoleh masing-masing sebesar 757 °C, 12,1 °C/menit, dan 53% untuk kasus limbah sisa makanan kering, sedangkan untuk limbah sisa makanan basah, masing-masing sebesar 522 °C, 8,2 Dengan begitu, hasil tersebut menunjukkan bahwa pirolisis limbah sisa makanan dengan menggunakan radiasi gelombang mikro memiliki karakteristik termal reaktor yang efektif baik untuk limbah sisa makanan kering ataupun limbah sisa makanan basah.

PRAKATA

Alhamdulillah, puji syukur kehadiran Allah SWT berkat rahmat dan hidayah-Nya, sehingga dapat diselesaikannya skripsi dengan judul “Analisis Karakteristik Termal Reaktor Gelombang Mikro untuk Pirolisis Berbahan Baku Limbah Sisa Makanan” dalam rangka menyelesaikan studi Strata Satu untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Penulisan skripsi ini dapat terselesaikan berkat bimbingan, bantuan dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu dengan penuh kerendahan hati disampaikan ucapan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Nur Qudus, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
2. Rusiyanto, S.Pd., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Samsudin Anis S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin sekaligus pembimbing I.
4. Dr. Wirawan Sumbodo, M.T. selaku Wakil Dekan III sekaligus dosen pembimbing II.
5. Bapak Hermadi dan Ibu Sri Suwarni sebagai orang tua saya yang telah menjadi penyemangat dan motivasi dalam menyelesaikan kuliah dan penulisan skripsi.

6. Laily Syahadati, Moh. Arif Budianto, Defani Alrasyidi dan Arga Budiman sebagai rekan kerja dalam penyelesaian alat skripsi.
7. Reza Sutha Laksana yang selalu memberi *support* dan doa kepada sesama sahabatnya.
8. Teman-teman satu rumah kontrakan Restu, Rifki, Itaq, Benu, Dandi, Boy, Kadir, Arma, Bintang yang selalu menghibur, membantu dan memberi masukan dalam penyelesaian skripsi ini.
9. Kepada semua pihak yang mungkin secara tidak saya sadari telah membantu melancarkan penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari dalam skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dalam perbaikan skripsi ini. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca pada umumnya dan dunia pendidikan pada khususnya.

The logo of Universitas Negeri Semarang (UNNES) is centered on the page. It features a stylized yellow bird-like emblem with a red flame-like shape at the top. Below the emblem, the word "UNNES" is written in large, bold, blue capital letters. Underneath "UNNES", the full name "UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG" is written in smaller, blue capital letters.

UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

Semarang, 20 September 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
PRAKATA	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Masalah.....	1
B. Identifikasi Masalah.....	6
C. Pembatasan Masalah	7
D. Rumusan Masalah	7
E. Tujuan Penelitian	8
F. Manfaat Penelitian	8
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
A. Kajian Teori.....	10
1. Karakteristik Termal.....	10
2. Perpindahan Kalor.....	14
3. Gelombang Mikro.....	20
4. Pemanasan Dielektrik... ..	22
5. <i>Loss Tangent</i>	25
6. Pirolisis	27
7. Limbah Makanan	32
8. Kadar Air	34
B. Kajian Penelitian yang Relevan.....	36
C. Kerangka Berpikir.....	37

D. Hipotesis	38
BAB III METODE PENELITIAN	
A. Bahan Penelitian yang Digunakan	39
B. Skema Alat yang Digunakan	39
C. Prosedur Penelitian	43
1. Diagram Alir Penelitian	43
2. Proses Penelitian	44
3. Data Penelitian	46
4. Analisis Data	47
BAB IV HASIL PENELITIAN	
A. Hasil Penelitian	48
1. Evaluasi Daya <i>Microwave</i>	48
2. Temperatur	48
3. Laju Pemanasan Pirolisis	53
4. Efisiensi termal	55
B. Pembahasan	62
1. Perubahan Temperatur	62
2. Laju Pemanasan	66
3. Daya dan Efisiensi Termal	68
C. Keterbatasan Penelitian	73
BAB V PENUTUP	
A. Simpulan	75
B. Saran Pemanfaatan Hasil	76
DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN-LAMPIRAN	80

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Simbol	Arti
$\frac{dT}{dx}$	Gradien Suhu Penampang
$^{\circ}\text{C}$	Celcius
A	Luas Penampang
C	Carbon
C_p	Kapasitas Kalor Jenis pada Tekanan Konstan
D	Diameter Penampang
h_c	Koefisien Perpindahan Panas Konveksi
k	Konduktivitas Termal
Nu	Bilangan <i>Nusselts</i>
P	Daya
q	Nilai Laju Aliran Panas
T	Temperatur
t	Waktu
V	Volume
ΔT	Perbedaan Temperatur
ε	Emisivitas
η	Efisiensi
ρ	Massa Jenis
σ	Bilangan <i>Boltzman</i>

Singkatan	Arti
abs	Absorpsi
F	Fahrenheit
G	Giga
Hz	Hertz
in	Inlet (Masuk)
J	Joule
K	Kelvin
Kkal	Kilo kalori
m	Meter
M	Mega
min	Menit
s	Sekon
V	Volt
W	Watt



UNNES
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Konduktivitas Termal.....	16
2.2 Emisivitas Beberapa Benda Umum	20
2.3 Nilai <i>Loss Tangent</i> Beberapa Larutan dan Material	26
2.4 Perbandingan Pirolisis Gelombang Mikro dan Konvensional	31
4.1 Besar Daya pada <i>Microwave</i>	48
4.2 Perubahan Temperatur Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering	49
4.3 Perubahan Temperatur Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah	51
4.4 Laju Pemanasan Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering	54
4.5 Laju Pemanasan Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah	54
4.6 Daya Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering	58
4.7 Efisiensi Termal Reaktor Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering	59
4.8 Daya Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah	60
4.9 Efisiensi Termal Reaktor Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah.....	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Karakteristik material gelombang mikro.	22
2.2 Proses kimia pirolisis	27
2.3 Skema alat pirolisis konvensional.....	30
2.4 Skema alat pirolisis gelombang mikro	31
3.1 Skema alat penelitian pirolisis	42
3.2 Diagram alir penelitian.....	43
4.1 Grafik perubahan temperatur terhadap waktu pirolisis limbah sisa makanan kering.....	63
4.2 Grafik perubahan temperatur terhadap waktu pirolisis limbah sisa makanan basah.....	65
4.3 Grafik laju pemanasan pirolisis limbah sisa makanan kering.....	67
4.4 Grafik laju pemanasan pirolisis limbah sisa makanan basah	68
4.5 Grafik perbandingan daya pirolisis limbah sisa makanan kering	69
4.6 Grafik efisiensi termal limbah sisa makanan kering	70
4.7 Grafik laju pemanasan pirolisis limbah sisa makanan basah	71
4.8 Grafik efisiensi termal limbah sisa makanan basah	73

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Pada era industrialisasi yang semakin maju dan berkembang membuat sumber energi minyak bumi menjadi sesuatu yang sangat dibutuhkan. Namun, ketersediaan minyak bumi di dunia semakin menipis bahkan telah diambang krisis. Hal tersebut dikarenakan minyak bumi merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbarui (*not renewable*). Apabila penggunaan minyak bumi semakin bertambah tentunya akan berdampak pada krisis energi, terutama bagi negara yang tidak kaya akan sumber energi fosil (*fossil fuel*). Menurut jurnal Lembaga Pertahanan Nasional (2014), Indonesia termasuk kategori negara tersebut dimana cadangan per kapita sumber energi di Indonesia berada di bawah garis rata-rata cadangan per kapita sumber energi dunia. Dengan adanya permasalahan tersebut, sumber energi minyak bumi harus digunakan seefisien mungkin.

Sumber energi minyak bumi telah bertahun-tahun dikenal dan dimanfaatkan oleh manusia sebagai bahan bakar. Seperti yang dipaparkan Jurnal Lembaga Pertahanan Nasional (2014) menyatakan bahwa hampir 95% segala sesuatunya bergantung pada sumber energi berbasis minyak bumi. Disisi lain, penggunaan sumber energi tersebut menimbulkan dampak pemanasan global dan efek rumah kaca serta polusi gas buang yang berbahaya bagi kehidupan di bumi.

Keterbatasan sumber energi serta dampak yang ditimbulkan atas penggunaan sumber energi tersebut mendorong beberapa pengembangan lanjut untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan energi dengan persediaan yang ada, serta menciptakan sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Solusi tersebut dilakukan dengan menciptakan sumber energi alternatif yang dapat diperbarui serta ramah lingkungan. Sumber energi alternatif yang sering disebut juga sebagai sumber energi terbarukan merupakan sumber energi yang memanfaatkan kekayaan alam untuk dikonversikan menjadi energi dan ketersediaannya dapat diperbarui serta tidak menimbulkan dampak polusi.

Salah satu dari sumber energi alternatif adalah sumber energi biomassa. Sumber energi biomassa merupakan sumber energi alternatif yang telah berkembang dan merupakan sumber energi tertua (Kadir, 1982). Menurut Kadir (1982) jumlah biomassa yang dihasilkan dalam setahun oleh seluruh dunia mencapai 75 milyar tonne atau suatu ekuivalensi dari 1500 juta barrel minyak per hari. Jumlah tersebut dapat membantu dalam menyeimbangkan dan mampu menggeser eksistensi minyak bumi yang digunakan manusia. Biomassa merupakan hasil produksi dari makhluk hidup. Biomassa dari kayu bakar merupakan biomassa tertua yang digunakan. Namun, saat ini biomassa lebih mengutamakan pemanfaatan limbah-limbah hasil produksi makhluk hidup atau limbah sisa industri yang sudah tidak layak digunakan (Kadir, 1982). Adanya pemanfaatan limbah untuk dikelola menjadi bentuk lain yang lebih bermanfaat merupakan salah satu tindakan untuk mengurangi limbah yang semakin tidak terkontrol.

Seiring bertambahnya jumlah penduduk menyebabkan meningkatnya limbah sisa makanan yang terbuang. Limbah sisa makanan merupakan salah satu produk limbah rumah tangga. Pada saat ini penumpukan sampah rumah tangga merupakan salah satu masalah yang sulit di tangani (Fadlilah dan Yudihanto, 2013). Beberapa usaha yang telah berlangsung di tempat pembuangan akhir (TPA) untuk mengurangi volume sampah seperti pengambilan oleh pemulung pada sampah yang dapat didaur ulang. Penanganan sampah yang mudah busuk telah dilakukan pengolahan dengan komposting. Namun usaha tersebut masih menyisahkan sampah yang harus dikelola dan memerlukan biaya yang tinggi dan lahan luas. Pembusukan sampah tersebut juga menimbulkan bau menyengat yang sangat mengganggu penciuman sehingga perlu diolah untuk meminimalisasi pencemaran dan menambah nilai ekonomisnya (Amrullah, 2015).

Dalam perencanaan sumber energi biomassa perlu dilakukan proses konversi yang memiliki tujuan untuk mengubah fase biomassa limbah sisa makanan menjadi fase yang lebih sempurna saat terbakar. Menurut Kadir (1982), suatu langkah yang lebih maju adalah dengan menjadikan biomassa dalam bentuk yang lebih mudah pemanfaatan dan transportasinya, yaitu dengan mengubahnya menjadi arang. Selain mengubah biomassa menjadi arang, terdapat cara yang lebih modern untuk mengkonversi biomassa yaitu dengan pirolisis. Pirolisis merupakan suatu proses memanaskan bahan baku atau biomassa secara bebas atau sedikit oksigen, sehingga tidak terjadi oksidasi (Wan, et al., 2008). Pemanasan dilakukan untuk menguraikan molekul-molekul besar pembentuk biomassa. Hasil dari proses pirolisis biomassa tersebut meliputi fase padat dan fase gas. Fase padat

dari proses pembakaran menghasilkan menghasilkan biomassa dalam bentuk arang. Sedangkan, fase gas dari proses pembakaran ini menghasilkan biomassa dalam bentuk gas. Pemanasan pirolisis dilakukan dalam temperatur berkisar 350 °C-500 °C. Selama proses pemanasan pirolisis, molekul-molekul besar biomassa terurai pada temperatur tinggi dan menghasilkan produk yang umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H_2 , CO , CO_2 , H_2O dan CH_4), tar, dan char (Yin, 2012). Semua produk yang dihasilkan oleh proses pirolisis dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan bahan bakar yang ramah lingkungan.

Keuntungan yang diperoleh dari penggunaan metode pirolisis yaitu dapat memanfaatkan bahan yang berasal dari sampah maupun limbah yang ada di lingkungan sekitar. Adapun jenis limbah yang dapat digunakan yaitu yang berasal dari limbah organik maupun dari limbah anorganik atau limbah cair maupun limbah padat. Limbah yang selama ini dianggap sebagai penyebab pencemaran lingkungan dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pirolisis untuk diuraikan molekul-molekulnya. Oleh karena itu, pencemaran lingkungan dapat ditekan dengan cara pemanfaatan limbah-limbah tersebut menjadi sesuatu yang lebih berguna dengan metode pirolisis.

Berdasarkan cara memperoleh panasnya, metode pirolisis dibagi dua macam, yaitu metode pirolisis konvensional dan metode pirolisis gelombang mikro. Metode pirolisis konvensional menggunakan teknik pemanasan yang diperoleh dari panas tungku api. Sedangkan, metode pirolisis gelombang mikro mendapat bantuan panas dari perangkat *microwave*. Bantuan panas gelombang mikro dari *microwave* berpotensi untuk memecahkan molekul biomassa karena

kecepatan dan efisiensi panas dari efek panas dielektrik gelombang mikro (Yin, 2012). *Microwave* mampu memanaskan sampai 750 °C. Suhu yang dihasilkan oleh *microwave* tentunya dapat membantu metode pirolisis karena suhu yang digunakan dalam metode pirolisis hanya berkisar 400 °C-500 °C.

Meskipun dengan menggunakan pemanasan gelombang mikro dapat memberikan keuntungan dibanding pemanasan konvensional, mekanisme baru juga dibutuhkan untuk kelangsungan proses pirolisis (Thostenson dan Chou, 1999). Karena energi panas gelombang mikro disalurkan oleh medan elektromagnetik dari perangkat *microwave*, ketidakseragaman dalam penyaluran medan elektromagnetik akan menghasilkan panas yang tidak seragam pula. Sebagaimana material yang dipanaskan, perubahan struktur dan sifat fisis material juga mempengaruhi sifat dielektrik. Struktur material reaktor dan material biomassa menentukan kecepatan laju pemanasan gelombang mikro. Oleh karena itu, struktur material berperan penting dalam proses pirolisis yang menggunakan bantuan gelombang mikro.

Selain struktur material, kondisi termal dalam reaktor perlu diperhatikan agar diketahui karakteristik termal yang tepat dalam proses pirolisis menggunakan gelombang mikro. Karakteristik termal reaktor tersebut meliputi laju pemanasan, besar daya yang diperlukan, efisiensi termal, dan temperatur yang terjadi selama proses berlangsung. Selama bahan baku limbah sisa makanan berada di dalam reaktor dan memanaskan karena bantuan gelombang mikro, terjadi perubahan temperatur dalam reaktor secara berangsur-angsur. Perubahan temperatur tersebut menyebabkan terjadinya penguapan kandungan air dan pemecahan molekul dari

bahan baku. Pada kondisi temperatur tertentu terjadi produksi gas hasil pemanasan bahan baku tersebut.

B. Identifikasi Masalah

Adapun identifikasi masalah berdasarkan latar belakang masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Sumber energi berbahan baku fosil termasuk sumber energi tidak terbarukan dan tidak dapat diperbarui.
2. Sumber energi berbahan baku fosil menimbulkan masalah pencemaran udara karena gas buang yang dihasilkan mengandung zat yang merugikan.
3. Penciptaan sumber energi terbarukan dapat memberikan solusi permasalahan di bidang energi.
4. Sumber energi terbarukan dapat diperbarui dan memiliki karakteristik ramah lingkungan.
5. Sumber energi terbarukan dapat diciptakan dengan memanfaatkan limbah biomassa yang dikonversi menjadi sumber energi melalui metode pirolisis.
6. Metode pirolisis dengan bantuan gelombang mikro digunakan untuk mengkonversi limbah biomassa menjadi sumber energi bahan bakar.
7. Struktur material memiliki peran penting dalam peningkatan laju pemanasan proses pirolisis dengan bantuan gelombang mikro.
8. Karakteristik termal reaktor yang tepat untuk proses pirolisis meliputi laju pemanasan, daya yang dibutuhkan, efisiensi termal, dan perubahan temperatur selama proses berlangsung.

C. Pembatasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perubahan temperatur yang terjadi selama proses pirolisis berlangsung.
2. Laju pemanasan yang terjadi pada reaktor pirolisis limbah sisa makanan dengan bantuan gelombang mikro.
3. Besar daya yang dibutuhkan untuk memanaskan limbah sisa makanan dengan bantuan gelombang mikro.
4. Efisiensi termal proses pirolisis limbah sisa makanan dengan bantuan gelombang mikro.
5. Pengaruh limbah sisa makanan kering dan limbah sisa makanan basah terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis.

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan masalah yang sudah dibahas, maka rumusan masalah yang dirancang penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh waktu pemanasan terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro?
2. Bagaimana pengaruh daya terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro?
3. Bagaimana pengaruh kandungan *moisture* limbah sisa makanan terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro?

E. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh waktu pemanasan terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro.
2. Mengetahui pengaruh daya terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro.
3. Mengetahui pengaruh kandungan *moisture* limbah sisa makanan terhadap karakteristik termal reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro.

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi Mahasiswa
 - a. Sebagai suatu penerapan ilmu teori dan kerja praktek selama masa perkuliahan yang telah dilalui.
 - b. Meningkatkan minat penelitian untuk menciptakan pengetahuan baru yang bermanfaat terhadap perkembangan teknologi masa kini.
 - c. Menambah pengetahuan melalui penelitian yang bisa memicu terciptanya penelitian selanjutnya yang dapat memberikan solusi bagi masalah ketersediaan sumber energi.
 - d. Menyelesaikan syarat akhir guna menunjang keberhasilan studi untuk memperoleh gelar Sarjana.

2. Bagi Universitas

- a. Sebagai bentuk pengabdian terhadap masyarakat sesuai dengan Tri Dharma Perguruan Tinggi, sehingga perguruan tinggi bisa memberikan kontribusi yang berguna bagi masyarakat dan bisa digunakan sebagai pertimbangan solusi dalam memecahkan masalah yang ada.
- b. Menambah referensi peralatan untuk perkuliahan maupun untuk penelitian selanjutnya.

3. Bagi Pemerintah

- a. Sebagai pertimbangan solusi dalam memecahkan masalah khususnya pada bidang energi.
- b. Sebagai batu loncatan penelitian lanjutan atau penciptaan sumber energi terbarukan yang bisa membantu memenuhi kebutuhan energi di negara ini.
- c. Membantu pemerintah dalam program Daur Ulang Sampah yang diubah menjadi bahan bakar yang bermanfaat.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Kajian Teori

1. Karakteristik Termal

Karakteristik suatu sistem secara kuantitatif dapat dinyatakan dengan nilai sifat atau besaran yang dapat diukur. Definisi kondisi sistem dengan nilai tertentu dari sifat-sifat tersebut dinamakan pula sebagai keadaan (state). Keadaan sistem dapat dibedakan antara keadaan internal dan eksternal. Keadaan internal bersifat inheren sedangkan sifat eksternal merupakan sifat dengan nilai relatif terhadap referensi lingkungan misalnya level dan kecepatan (Sihana, 2010). Jika salah satu atau beberapa nilai sifat dari sistem mengalami perubahan maka dinamakan sistem mengalami proses. Sedangkan jika beberapa rangkaian proses yang memiliki kondisi akhir proses kembali ke kondisi semula dinamakan siklus.

Karakteristik termal reaktor berperan penting dalam proses pemanasan suatu bahan yang ada di dalamnya. Dalam hal ini karakteristik termal dari reaktor yang mempengaruhi keefektifan proses pirolisis biomassa yaitu, profil temperatur, laju pemanasan (*heating rate*), efisiensi termal, dan perpindahan kalor yang terjadi (Sihana, 2010).

a. Temperatur (*Temperature*)

Temperatur adalah penunjukkan nilai panas atau nilai dingin yang dapat diperoleh/diketahui melalui suatu alat pengukuran temperatur yang disebut termometer. Adanya perubahan temperatur disebabkan terjadinya pertukaran

kalor antara dua jenis fluida/zat atau lebih. Adapun cara pengukuran temperatur yakni sebagai berikut:

1) Metode Pemuaian

Metode pemuaian yaitu panas yang diukur menghasilkan pemuaian, pemuaian tersebut diubah kedalam bentuk gerak-gerak mekanik kemudian dikalibrasi dengan skala angka-angka yang menunjukkan nilai panas yang diukur. Metode pemuaian ini diterapkan pada termometer dengan memanfaatkan air raksa sebagai fluida yang memuai akibat perubahan temperatur.

2) Metode Elektris

Metode elektris yaitu pengukuran dengan memanfaatkan panas yang diukur untuk menghasilkan gaya gerak listrik. Gaya gerak listrik tersebut kemudian dikalibrasi kedalam skala angka-angka yang menunjukkan nilai panas yang diukur. Alat yang menggunakan metode elektris yaitu termokopel dan *resistance thermometer*.

Penggunaan alat ukur metode elektris lebih menguntungkan karena tidak menggunakan fluida lain untuk dikalibrasi ke dalam angka ukur. Salah satu alat ukur temperatur dengan metode elektris yang sering digunakan adalah termokopel. Cara kerja termokopel yaitu menggunakan beda potensial antara ujung-ujung kedua sambungan yang menghasilkan gaya gerak listrik untuk digunakan sebagai tolak ukur temperatur.

b. Laju Pemanasan (*Heating Rate*)

Laju pemanasan suatu proses pembakaran dapat diketahui melalui persamaan berikut (Cherbanski dan Molga, 2009) :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t} \text{ (}^\circ\text{C/s)} \dots\dots\dots 2.1$$

dimana :

T_1 = Temperatur awal material ($^\circ\text{C}$)

T_2 = Temperatur akhir material ($^\circ\text{C}$)

t = Waktu yang dibutuhkan proses (s)

Dari persamaan di atas menunjukkan bahwa laju pemanasan merupakan perubahan temperatur yang dipengaruhi oleh panas selama waktu berlangsungnya proses. Reaktor pirolisis yang mendapatkan panas dari gelombang mikro digunakan untuk memanaskan bahan baku hingga menghasilkan gas dari pemecahan molekul bahan tersebut .

c. Daya dan Efisiensi Termal

Daya adalah energi yang dikeluarkan untuk melakukan usaha. Dalam energi termal, daya termal adalah jumlah energi kalor yang dibutuhkan untuk suatu proses pemanasan. Untuk menentukan total daya termal yang diterima suatu material diperlukan metode perpindahan termal yang terjadi. Sehingga jumlah laju perpindahan termal yang terjadi akan didapatkan besar daya termal yang digunakan dalam proses sistem.

Efisiensi termal adalah konsep dasar dari efisiensi siklus ideal yang didefinisikan perbandingan antara energi yang berguna dengan energi yang masuk (Winarno, et al., 2008). Energi di sini dikonversikan menjadi daya suatu reaktor

pirolisis. Sehingga didapatkan persamaan untuk menghitung besar daya yang berguna sebagai berikut (Cherbanski dan Molga, 2009):

$$P_{abs} = \rho \cdot C_p \frac{(T - T_{inlet})}{t} V + h_c \cdot A(T - T_{inlet}) + \sigma \varepsilon A T_{rerata}^4 \dots\dots\dots 2.2$$

Dimana

ρ = Massa jenis bahan (kg/m³)

C_p = Kapasitas kalor jenis pada tekanan konstan (J/kg K)

T = Temperatur akhir (°C)

T_{inlet} = Temperatur awal (°C)

t = Waktu (s)

V = Volume (m³)

h_c = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m K)

A = Luas penampang yang dilalui panas (m²)

σ = Konstanta boltzman (5,669.10⁻⁸ W/m².K⁴)

ε = Nilai emisivitas benda

Kemudian persamaan efisiensi termal sebagai berikut (Winarno, et al., 2008) :

$$\eta_p = \frac{P_{abs}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots 2.3$$

Dimana

η_p = Efisiensi termal (%)

P_{abs} = Daya yang digunakan (W)

P_{in} = Daya yang masuk ke sistem (W)

2. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor adalah energi yang melintas menuju ke sebuah perbedaan temperatur (Incropera dan De Witt, 1981). Ketika disuatu keadaan terdapat perbedaan temperatur dalam satu media atau di antara media maka perpindahan kalor pasti terjadi. Perpindahan kalor tersebut bertujuan untuk menyeimbangkan perbedaan temperatur tersebut. Oleh karena itu, proses perpindahan kalor akan berhenti secara ideal apabila kondisi perbedaan temperatur itu telah setimbang.

Perpindahan panas dapat didefinisikan sebagai berpindahnya energi dari satu daerah ke daerah lainnya sebagai akibat dari beda suhu antara daerah – daerah tersebut (Kreith, 1986). Karena perbedaan suhu terdapat di seluruh alam semesta, maka hal yang mengenai aliran panas bersifat sama universalnya dengan perihai yang berkaitan tarikan gravitasi. Akan tetapi aliran panas tidak dikendalikan oleh sebuah hubungan yang unik namun oleh kombinasi dari berbagai hukum fisika yang tidak saling bergantung.

Perpindahan kalor dibedakan menjadi 3 macam berdasarkan cara perambatannya, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi (Incropera dan De Witt, 1981).

a. Konduksi

Konduksi adalah proses dimana panas mengalir dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung (Kreith, 1986). Dalam aliran panas konduksi, perpindahan

energi terjadi karena adanya hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Suhu elemen suatu zat sebanding dengan energi kinetik rata-rata molekul-molekul yang membentuk elemen tersebut. Jadi, semakin cepat molekul-molekul tersebut bergerak, semakin tinggi suhu yang berpindah dalam elemen itu. Apabila molekul di suatu sisi memiliki atau diberikan energi kinetik rata-rata yang lebih besar dari yang dimiliki oleh molekul di sekitarnya yang berdekatan, maka molekul yang memiliki energi yang lebih besar itu akan memindahkan sebagian energinya kepada molekul-molekul di daerah yang bersuhu lebih rendah. Dalam fase cair perpindahan energi tersebut dapat berlangsung dengan tumbukan elastis atau *elastic impact* dan dalam fase padat dapat berlangsung dengan pembaruan (*diffusion*) elektron-elektron yang bergerak dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu rendah.

Adapun persamaan proses perpindahan panas secara konduksi adalah :

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots 2.4$$

dimana :

q_k = Nilai laju aliran panas konduksi (W)

k = Konduktivitas termal (W/m.K)

A = Luas penampang yang dilalui panas (m²)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradien suhu penampang (K/m)

dT/dx adalah gradient temperatur kearah perpindahan kalor. Konstanta positif "k" disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan

tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ketempat yang lebih rendah dalam skala temperatur.

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan di atas merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu.

Berikut adalah tabel konduktivitas termal beberapa material disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Konduktivitas Termal (engineeringtoolbox.com)

Bahan	J/(s.m.°C)	Kkal/(s.m.°C)
Perak	10×10^{-2}	420
Tembaga	$9,2 \times 10^{-2}$	380
Alumunium	$5,0 \times 10^{-2}$	200
Baja	$1,1 \times 10^{-2}$	40
Es	5×10^{-4}	2
Gelas	2×10^{-4}	0,84
Batu bata	2×10^{-4}	0,84
Air	$1,4 \times 10^{-4}$	0,56
Jaringan tubuh manusia	$0,5 \times 10^{-4}$	0,2
Kayu	0,2 dan $0,4 \times 10^{-4}$	0,08-0,16
Isolator fiberglass	$0,12 \times 10^{-4}$	0,048
Gabus dan serat kaca	$0,1 \times 10^{-4}$	0,042
Bulu Angsa	$0,06 \times 10^{-4}$	0,025
Busa Polyurethane	$0,06 \times 10^{-4}$	0,024
Udara	$0,055 \times 10^{-4}$	0,023

Pada umumnya konduktivitas termal berubah dengan suhu, tetapi dalam banyak kasus perengkayaan perubahannya cukup kecil untuk diabaikan.

b. Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan panas dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur (Kreith, 1986). Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas. Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Awalnya panas akan merambat ke fluida yang saling bersinggungan dengan permukaan kemudian memicu molekul-molekul fluida untuk memindahkan energi panas tersebut. Molekul-molekul tersebut bergerak dan bercampur dengan molekul lain yang memiliki suhu lebih rendah. Molekul yang bergerak tersebut menyimpan energi panas yang diterimanya kemudian menyalurkannya kepada molekul lain yang memiliki perbedaan suhu.

Perpindahan panas konveksi dapat diklasifikasikan dalam konveksi alamiah dan konveksi paksa menurut cara menggerakkan alirannya (Kreith, 1986). Dalam hal ini, perpindahan panas konveksi yang berlangsung secara alami adalah disebabkan oleh pergerakan molekul-molekulnya sendiri tanpa bantuan faktor lain. Sedangkan ketika perpindahan panasnya dibantu oleh suatu alat untuk mempercepat perambatannya maka disebut konveksi paksa.

Laju perpindahan panas konveksi antara suatu permukaan dan suatu fluida dapat dihitung dengan persamaan :

$$q_c = h_c A \Delta T \dots\dots\dots 2.5$$

Dimana :

q_c = Nilai perpindahan panas konveksi (W)

h_c = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m² K)

A = Luas penampang (m²)

ΔT = Perbedaan temperatur (K)

Sedangkan untuk menentukan nilai koefisien perpindahan panas konveksi dapat digunakan persamaan berikut (Incropera dan De Witt, 1981):

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 4.36 \dots \dots \dots 2.6$$

Dimana:

Nu_D = Bilangan Nusselt (constant)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m² K)

D = Diameter reaktor (m)

k = Konduktivitas termal udara (W/m K)

Harga bilangan Nusselt pada kasus ini tetap karena reaktor tabung bersifat memiliki *uniform surface heat flux* (perubahan panas permukaan yang seragam) dan laminar (Incropera dan De Witt, 1981).

Perpindahan panas konveksi didukung oleh dua cara yaitu oleh gerakan acak molekul-molekul dan gerakan fluida itu sendiri dalam lapis batas (Incropera dan De Witt, 1981). Perkumpulan gerakan acak molekul-molekul (difusi) fluida umumnya banyak terjadi di dekat permukaan zat padat.

c. Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan panas yang mengalir dari benda yang memiliki suhu tinggi ke benda yang bersuhu lebih rendah yang terpisah di dalam ruang (Kreith, 1986). Radiasi identik dengan suatu benda yang memancar atau perpindahan panasnya tanpa adanya persinggungan. Umumnya radiasi dipergunakan untuk segala hal yang berkenaan dengan gelombang elektromagnetik, tetapi di dalam ilmu perpindahan panas yang diperhatikan adalah yang diakibatkan oleh suhu dan yang dapat mengangkut energi melalui medium yang tembus cahaya atau melalui ruang.

Radiasi panas adalah pancaran energi oleh suatu zat yang mana zat tersebut berada pada temperatur tertentu (Incropera dan De Witt, 1981). Pada umumnya zat yang memancarkan radiasi adalah zat padat, pemancarannya bisa juga terjadi dari zat cair dan gas. Apapun bentuk zatnya, pemancaran bisa bersifat untuk mengubah konfigurasi elektron dari atom atau molekul. Medan radiasi dapat dihantarkan oleh gelombang elektromagnetik.

$$Q_{radiasi} = \sigma \varepsilon A T_{rerata}^4 \dots\dots\dots 2.6$$

Dimana :

$Q_{radiasi}$ = Laju perpindahan panas radiasi (W)

σ = Konstanta boltzman ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

ε = Tetapan/nilai koefisien emisivitas benda

T_{rerata} = Temperatur rata-rata (K)

A = Luas penampang (m^2)

Temperatur pada persamaan di atas adalah rata-rata temperatur dari proses pirolisis. Sedangkan untuk emisivitas beberapa benda umum berdasarkan Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2
Emisivitas Beberapa Benda Umum (engineeringtoolbox.com)

Jenis Benda	Emisivitas (ϵ)
Kaca Halus	0,92
Ubin Beton	0,63
Besi Dipoles	0,14
Cat Jelaga	0,96
Magnesium Oksida	0,25
Marmer Putih	0,95
Merkuri Cair	0,10
Nikel	0,04
Kertas	0,93
Plastik	0,91
Stainless Steel	0,85
Baja Galvanis	0,88
Besi Tempa	0,94
Pasir	0,76
Kaca Kuarsa	0,93
Es Halus	0,96

3. Gelombang Mikro

Gelombang mikro adalah sebuah bentuk energi elektromagnetik yang mana energi tersebut diubah menjadi panas oleh interaksi antar media (komponen penghasil gelombang elektrik dengan partikel bermuatan dari material yang digunakan) (Yuen dan Hameed, 2009). Pada umumnya, radiasi gelombang mikro berhubungan dengan beberapa radiasi elektromagnetik yang mana frekuensi gelombang mikro tersebut antara 300 MHz sampai 300 GHz. Kebutuhan domestik dan industri menggunakan *microwave* umumnya beroperasi pada frekuensi 2,45 GHz yang memiliki panjang gelombang 12,2 cm dan energinya $1,02 \cdot 10^{-5}$ eV.

Dalam sejarahnya, gelombang elektromagnetik dikembangkan oleh persamaan Maxwell pada tahun 1864 yang kemudian keberadaannya diperkenalkan oleh Heinrich Hertz pada tahun 1888 (Yuen dan Hameed, 2009). Selama perang dunia kedua, teknologi gelombang mikro dimanfaatkan untuk kebutuhan telekomunikasi dan radar. Seiring berjalannya waktu teknologi tersebut memiliki potensi sebagai alat pemanas yang efisien dan oleh orang Jepang dikembangkan untuk alat pemanas makanan dengan perangkat yang lebih fleksibel. Hingga akhirnya kecepatan pemanasan gelombang mikro digunakan pada penelitian, industri, memproses makanan, telekomunikasi, teknologi informasi, peralatan medis, sintesis organik, sintesis polimer dan lain-lain.

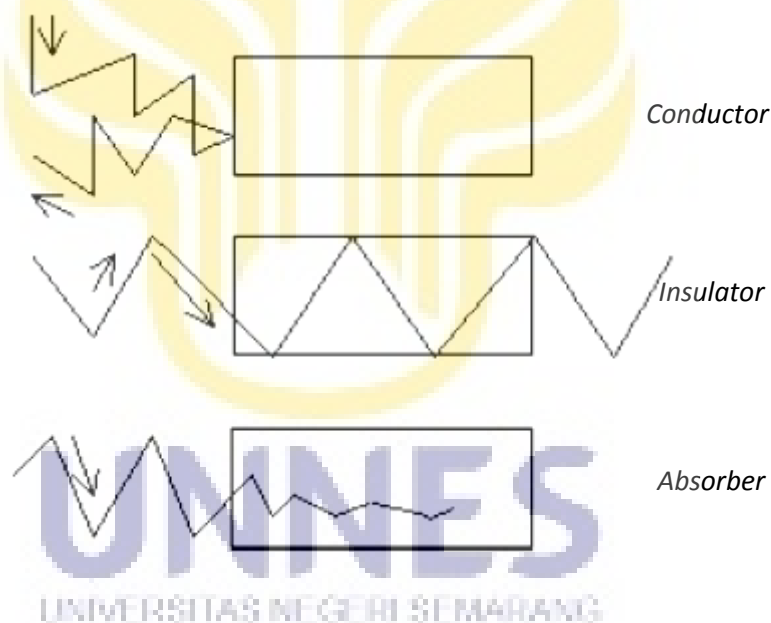
Dalam situs yohannessurya.com juga dipaparkan bahwa sebenarnya gelombang mikro merupakan gelombang radio, tetapi panjang gelombangnya lebih kecil dari gelombang radio biasa. Panjang gelombangnya termasuk *ultra short* sehingga disebut sebagai gelombang mikro (*microwave*). Gelombang ini tidak dapat dilihat mata kita karena panjang gelombangnya jauh lebih besar (walaupun sangat kecil dibanding gelombang radio) dari panjang gelombang sinar tampak (cahaya). Kedua gelombang tersebut sama-sama termasuk spektrum gelombang elektromagnetik. Panjang gelombang cahaya berkisar antara 400-700 nm, sedangkan gelombang mikro berkisar antara 1-30 cm.

Seperti yang dipaparkan dalam situs yohannessurya.com, *microwave oven* yang biasa digunakan dalam peralatan rumah tangga untuk memanaskan masakan atau makanan bisa bekerja begitu cepat dan efisien karena gelombang elektromagnetiknya dapat menembus makanan dan mengeksitasi molekul-

molekul air dan lemak secara merata. Gelombang pada frekuensi 2,5 GHz ini diserap oleh air, lemak dan gula. Saat diserap, atom tereksitasi dan menghasilkan panas. Pemanasan ini berlangsung cepat dan merata sehingga sangat efektif dibanding oven dengan konduksi panas.

4. Pemanasan Dielektrik

Dalam pemanfaatan gelombang mikro, sifat material yang digunakan dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam, yaitu *konduktor* (pemantul), *insulator* (penerus) dan *absorber* (penyerap) (Jones, 2002).



Gambar 2.1. Karakteristik material gelombang mikro (Jones, 2002)

a. Konduktor/Pemantul (*Conductor*)

Secara umum semua jenis logam merupakan konduktor. Dalam proses pemanasan gelombang mikro, zat konduktif hanya akan memantulkan gelombang tersebut ke segala arah. Penggunaan konduktor ini dimanfaatkan

sebagai material dinding perangkat *microwave* sehingga gelombang yang masuk akan terperangkap di antara dinding-dinding *microwave*. Contoh dari konduktor antara lain, besi, aluminium, emas, tembaga dan lain-lain.

b. Penerus (*Insulator*)

Insulator adalah material yang tidak dapat menyerap dan hanya dilalui oleh radiasi gelombang mikro. Gelombang mikro tidak akan berdampak apa-apa terhadap suatu zat yang memiliki karakteristik bening dan tembus pandang. Kaca dan gelas adalah termasuk insulator.

c. Penyerap (*Absorber*)

Untuk material yang bersifat absorber adalah material yang menyerap radiasi gelombang mikro. Proses penyerapan energi gelombang mikro tersebut oleh beberapa material disebut fenomena pemanasan material dielektrik (Cherbański, 2009).

Sifat dielektrik merupakan sifat yang menggambarkan tingkat kemampuan suatu bahan untuk menyimpan muatan listrik pada beda potensial yang tinggi. Secara praktis, sifat dielektrik sering dikaitkan dengan kelistrikan bahan isolator yang ditempatkan di antara dua keping kapasitor. Apabila bahan isolator itu dikenai medan listrik yang dipasang di antara kedua keping kapasitor, maka di dalam bahan tersebut dapat terbentuk dwikutub (*dipole*) listrik. Sehingga pada permukaan bahan dapat terjadi muatan listrik induksi. Bahan dengan sifat seperti ini disebut sebagai bahan dielektrik.

Bahan dielektrik adalah bahan yang tidak memiliki muatan bebas yang berpengaruh penting terhadap sifat kelistrikan bahan tersebut. Bahan dielektrik sangat penting dalam kelistrikan karena beberapa sifatnya dapat menyimpan muatan listrik, melewatkan arus bolak-balik (AC) dan menahan arus searah (DC). Bahan dielektrik juga dapat diartikan suatu bahan yang memiliki daya hantar arus yang sangat kecil atau bahkan hampir tidak ada. Bahan dielektrik ini dapat berwujud padat, cair dan gas. Ketika bahan ini berada dalam medan listrik, muatan listrik yang terkandung didalamnya tidak mengalami pergerakan sehingga tidak akan timbul arus seperti bahan konduktor ataupun semi konduktor, tetapi hanya sedikit bergeser dari posisi setimbangnya yang mengakibatkan terciptanya pengutuban dielektrik (Thostenson dan Chou, 1999). Pengutuban tersebut menyebabkan muatan positif bergerak menuju kutub negatif medan listrik, sedangkan muatan negatif bergerak pada arah berlawanan (yaitu menuju kutub positif medan listrik). Hal ini menimbulkan medan listrik internal (di dalam bahan dielektrik) yang menyebabkan jumlah keseluruhan medan listrik yang melingkupi bahan dielektrik menurun.

Pada prinsip pemanasan dielektrik dengan gelombang mikro, pantulan radiasi gelombang mikro diantara dinding-dinding *microwave* secara kontinyu akan menimbulkan medan listrik di tempat tersebut. Ketika material dielektrik diletakkan pada kondisi tersebut, ion positif dan ion negatifnya akan bergerak ke arah perubahan medan listrik tersebut (Yuen dan Hameed, 2009). Perubahan medan listrik yang ditimbulkan dari pantulan radiasi gelombang mikro terjadi sekitar 2 milyar kali setiap detiknya. Perubahan yang sangat cepat tersebut diikuti

dengan pergerakan ion-ion material dielektrik. Akibatnya terjadi gesekan antar muatan berlawanan dan perbedaan energi kinetik yang berubah menjadi energi termal dan kenaikan temperatur. Terdapat dua mekanisme yang berperan dalam perubahan panas, yaitu *dipolar polarization* (polarisasi dipolar) dan *conduction losses* (rugi hantaran) (Yin, 2012). Mekanisme polarisasi dipolar hanya mengenai senyawa polar, antara lain air, ethanol, methanol yang mana mempengaruhi momen dipole tetap. *Conduction Loss* atau Kerugian Hantar merupakan kehilangan energi panas yang disebabkan oleh dimensi dari suatu material yang dipanaskan.

5. *Loss Tangent*

Pengukuran *loss tangent* pada suatu bahan dielektrik dimaksudkan untuk mengetahui sifat listrik dari bahan yang diukur tersebut (Ferawati dan Toifur, 2014). Setiap dielektrik memiliki tingkat kerapatan fluks elektrostatik dalam suatu bahan bila diberi potensial listrik. Tetapan dielektrik merupakan perbandingan energi listrik yang tersimpan pada bahan tersebut jika diberi sebuah potensial, relatif terhadap ruang hampa. Tetapan dielektrik ini berhubungan dengan kemampuan suatu bahan untuk menyimpan energi dan sifat optik suatu bahan dan juga dapat menentukan jumlah energi yang hilang atau dissipasi energi yang berhubungan langsung dengan *loss tangent*.

Kemampuan suatu material untuk menyerap gelombang mikro dan mengubahnya menjadi panas merupakan syarat penting dari metode pemanasan gelombang mikro. Hal tersebut bergantung pada sifat dielektrik material yang

meliputi konstanta dielektrik (ϵ') dan kerugian dielektrik (ϵ''). Perbandingan dari kerugian dielektrik dan konstanta dielektrik menghasilkan nilai *loss tangent*.

Tabel 2.3
Nilai *Loss Tangent* Beberapa Larutan dan Material (Yin, 2012)

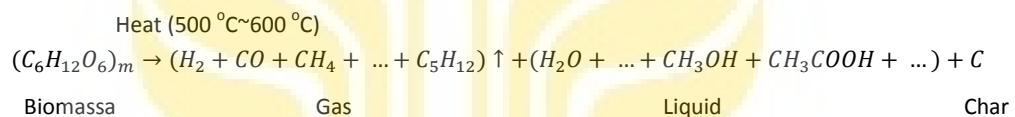
Material	$\tan \delta$	Material	$\tan \delta$
<i>Ethylene Glycol</i>	1.350	<i>Coconut activated carbon</i>	1.646
<i>Ethanol</i>	0.941	<i>Dried EFB (oil palm empty fruit bunch) char</i>	0.134
<i>2-propanol</i>	0.799	<i>EFB sampel with 18 wt% moisture</i>	0.297
<i>Formic acid</i>	0.722	<i>EFB sampel with 45 wt% moisture</i>	0.535
<i>Methanol</i>	0.659	<i>EFB sampel with 64 wt% moisture</i>	0.324
<i>1-butanol</i>	0.571	<i>Plexiglass</i>	5.7×10^{-3}
<i>2-butanol</i>	0.447	<i>Porcelaine No 4462</i>	1.1×10^{-3}
<i>Acetic acid</i>	0.174	<i>Borosilicate glass</i>	1.06×10^{-3}
<i>Water</i>	0.123	<i>Ceramic F-66</i>	5.5×10^{-4}
<i>Acetone</i>	0.054	<i>Polyethylene</i>	3.1×10^{-4}
<i>Dichloromethane</i>	0.042	<i>Teflon PFA</i>	1.5×10^{-4}
<i>Toluene</i>	0.040	<i>Fused quartz</i>	6×10^{-5}

Berdasarkan tabel di atas, materialnya dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu nilai *loss* tinggi ($\tan \delta > 0.5$), nilai *loss* sedang ($0.1 - 0.5$), nilai *loss* rendah ($\tan \delta < 0.1$) (Yin, 2012). Semakin tinggi nilai *loss tangent* material maka semakin mudah menyerap radiasi gelombang mikro dan mengkonversinya menjadi panas. Untuk material rendah dapat digunakan penambahan reaktan agar proses penyerapannya menjadi lebih cepat.

6. Pirolisis

a) Pengertian Pirolisis

Pada akhir tahun 1990-an, masalah terkait dengan dioksin telah mendorong pengusaha insenator untuk memajukan sistem pirolisis (atau gasifikasi) di samping sistem pelelehan (Yokoyama, 2008). Yokoyama (2008) memaparkan bahwa dalam mengatasi masalah limbah perkotaan diperlukan pengolahan pirolisis untuk mengkonversinya menjadi bahan bakar yaitu dengan cara limbah dipanaskan pada suhu 500 °C pada tekanan atmosfer dengan kadar oksigen rendah. Di bawah ini gambar proses kimia dari pirolisis:



Gambar 2.2. Proses kimia pirolisis (Yokoyama, 2008)

Selama pirolisis, kelembaban bahan menguap pertama kali pada suhu 100° C, kemudian hemiselulosa terdekomposisi pada suhu 200 °C-260 °C, diikuti selulosa pada suhu 240 °C-340 °C dan lignin pada suhu 280 °C-500 °C (Yokoyama, 2008). Ketika suhu pemanasan telah mencapai 500 °C, pirolisis telah selesai. Laju pemanasan dalam reaktor juga mempengaruhi pembentukan zat-zat hasil. Semakin tinggi laju pemanasan maka hal tersebut mempercepat pembentukan produk fluida mudah menguap, meningkatkan tekanan, waktu tinggal yang lebih pendek dari produk yang mudah menguap di dalam reaktor dan hasil produk cair lebih tinggi.

Pada dasarnya, pirolisis merupakan proses dekomposisi kimia suatu bahan dengan pemanasan dengan kondisi kadar oksigen yang rendah. Proses pirolisis ini juga bisa disebut proses *devotilisasi* (Santoso, 2010). Produk utama dari proses pirolisis yang dihasilkan adalah *char* (arang), gas, dan minyak. *Char* didapatkan dari sisa padat hasil pemanasan yang tertinggal di dalam reaktor dan dapat digunakan sebagai karbon aktif. Untuk produk yang berfase minyak dapat digunakan sebagai zat additif atau sebagai campuran minyak bahan bakar. Sedangkan produk gas dapat digunakan dengan cara dibakar langsung (A.S Chaurasia, B.V Babu dalam Santoso, 2005).

Dalam eksperimen Amrullah (2015) metode pirolisis digunakan untuk mengkonversi limbah makanan dari kantin Fakultas Teknik dan PAU UGM menjadi sumber energi serta membandingkan pengaruh suhu terhadap komposisi produk hasil pirolisis. Selain itu juga untuk mengetahui pengaruh jenis perekat kanji dan campuran perekat kanji dengan residu plastik hasil pirolisis terhadap karakteristik briket biomassa seperti nilai kalor, kadar air, kadar abu, kadar volatil dan *fixed carbon* (Amrullah, et al., 2015). Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pirolisis akan semakin meningkatkan nilai produksi bio-oil dan diikuti dengan peningkatan nilai kalor serta kandungan karbon suatu briket.

b) Produk Pirolisis

Produk pirolisis yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi ada tiga fase, yaitu cair (minyak), gas dan padat (*char*). Produk hasil pirolisis yang berfase cair memiliki kelembaban tinggi yang berasal dari kelembaban asli dan

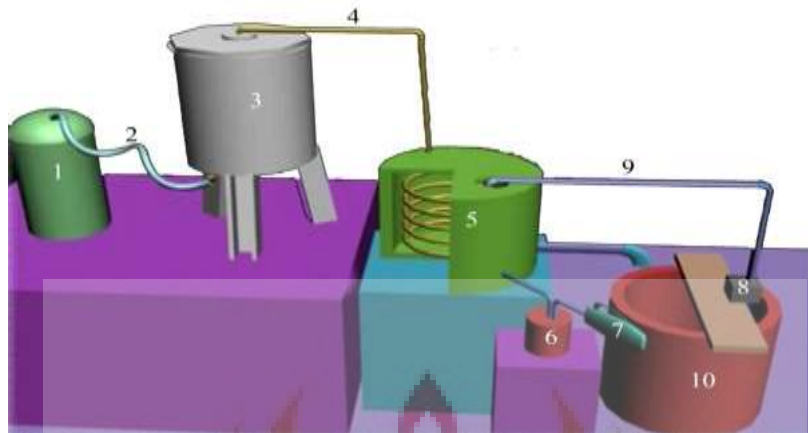
air yang dihasilkan (14-18%) (Yokayama, 2008). Kadar air yang tinggi menentukan viskositas dari produk hasil pirolisis. Semakin tinggi kadar air dalam cairan produk maka semakin kecil nilai viskositasnya, begitu sebaliknya. Untuk mendapatkan kadar air yang rendah diperlukan pemanasan lanjutan untuk menghilangkan kandungan air sehingga produk hasil menjadi lebih kental. Sedangkan produk gas memiliki kandungan CO_2 , dan CO , H_2 , C_1 -5 hidrokarbon sebagai gas yang mudah terbakar. Produk pirolisis yang lain adalah *char* atau arang.

c) Reaktor Pirolisis

Reaktor metode pirolisis terbagi menjadi dua, yaitu reaktor pirolisis konvensional dan reaktor pirolisis gelombang mikro. Klasifikasi tersebut berdasarkan cara perolehan panasnya.

1) Reaktor Pirolisis Konvensional

Reaktor pirolisis konvensional adalah reaktor pirolisis yang memanfaatkan perambatan panas dari tungku api atau dapat digunakan oven listrik. Perambatan panas tersebut dihasilkan dari proses konduksi melalui material berpenampang yang dikenai sumber panas. Adapun skema alat pirolisisnya adalah sebagai berikut :



Keterangan gambar :

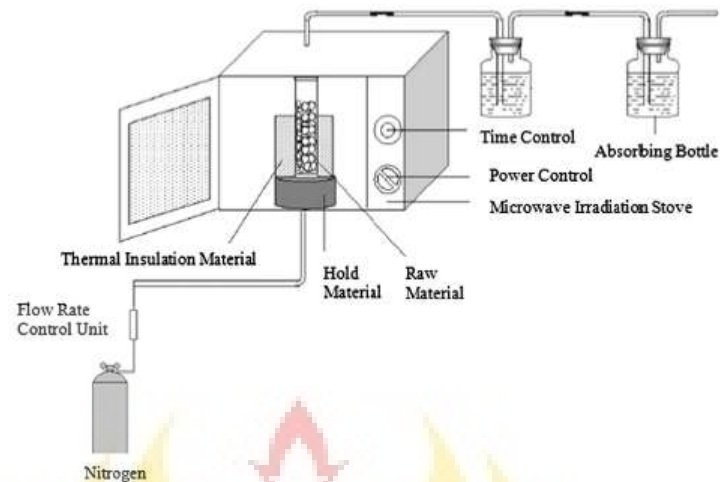
1. Tabung gas	2. Selang gas	3. Reaktor	4. Pipa	5. Pendingin
6. Bejana minyak	7. Kipas	8. Pompa air	9. Pipa air	10. Tandon air

Gambar 2.3. Skema Alat Pirolisis Konvensional (Santoso, 2010)

Berdasarkan gambar di atas, tabung gas menyalurkan gas untuk pembakaran melalui selang gas sehingga terjadi pembakaran untuk memanaskan tabung reaktor pirolisis. Tabung reaktor yang berisi bahan baku pirolisis akan memanaskan dan menghasilkan produk pirolisis yang keluar melalui pipa gas menuju ke pendingin. Di dalam pendingin, gas tersebut didinginkan sehingga berubah fase menjadi cair yaitu bio-oil.

2) Reaktor Pirolisis Gelombang Mikro

Pirolisis gelombang mikro memanfaatkan bantuan radiasi gelombang mikro untuk memanaskan bahan baku pirolisis. Radiasi gelombang mikro akan memicu kenaikan temperatur pada material dielektrik sehingga terjadi proses pirolisis di dalam tabung reaktor. Adapun skema alat sebagai berikut:



Gambar 2.4. Skema Alat Pirolisis Gelombang Mikro (Yuen dan Hameed, 2009).

Pirolisis dengan bantuan gelombang mikro memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan cara konvensional. Hal tersebut disebabkan karena metode gelombang mikro berupa radiasi yang menyebar ke seluruh ruang. Selain itu perbedaan lainnya ditunjukkan oleh tabel berikut :

Tabel 2.4
Perbandingan Pirolisis Gelombang Mikro dan Konvensional (Yin, 2012)

Gelombang Mikro	Konvensional
Perubahan energi	Pemindahan energy
Pemanasan yang seragam dan <i>volumetric</i> : memicu pemanasan molekul dari bahan	Perpindahan panas secara konveksi dan konduksi
Cepat dan efisien	Lambat dan terbatas pada konduktifitas termal dari material
Bersifat memilih : pemanasan material dielektrik.	Menyeluruh
Bergantung pada sifat material	Sifat material kurang berpengaruh
Pemanasan yang tepat dan terkendali : Pemasukkan energi dimulai dan dihentikan bersamaan dengan <i>power</i> hidup dan mati	<i>Power</i> hidup atau mati tidak berpengaruh selama ada sisa panas yang merambat.

7. Limbah Makan

Dalam situs hijauku.com (2013) dipaparkan bahwa limbah makanan yang bertambah banyak memicu perubahan iklim dan menghasilkan emisi gas rumah kaca dalam setiap proses produksi, transportasi dan konsumsinya. Penelitian terbaru dari *Nature Resources Defense Council (NRDC)* dan *Food Law and Policy Clinic* dari *Harvard Law School*, mengungkapkan bahwa sistem pelabelan makanan yang salah kian memperburuk kondisi bertambahnya limbah makanan. Sistem pelabelan yang salah pada makanan membuat masyarakat bingung dan lebih cepat membuang makanan mereka. Akibat makanan-makanan yang dibuang menumpuk dan mengakibatkan kerugian setiap tahunnya.

Menurut laporan yang disusun bersama oleh *World Resource Institute (WRI)*, Program Lingkungan PBB (UNEP) dan Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (FAO) (2013) dalam situs hijauku.com mengungkapkan bahwa satu dari empat kalori yang dihasilkan oleh industri pertanian dunia hilang atau terbuang. Lebih dari separuh makanan yang hilang atau terbuang di Eropa, Kanada, Amerika Serikat dan Australia terjadi pada level konsumsi. Sementara di negara berkembang, dua per tiga makanan terbuang saat pemanenan dan penyimpanan hasil pertanian.

Keberadaan limbah makanan semakin meningkat dan terus meningkat. Menurut situs CNN Indonesia (2015), apabila limbah makanan diibaratkan sebagai sebuah negara, kemungkinan luasannya bisa dibandingkan dengan Tiongkok atau Kanada. Selain besar secara luasan, negara limbah juga bisa menjadi negara penyumbang karbon terbesar di dunia. Hal tersebut terjadi

mengingat banyaknya energi yang dibutuhkan guna menumbuhkan tumbuhan, beternak hewan, juga karbon yang terbang akibat penyimpanan dan transportasi makanan. Sayangnya, semua energi tersebut terbang percuma karena tidak termakan dan berakhir di tempat sampah.

Menurut BPS yang dilansir situs hariantangerang.com (2015), diperkirakan pada tahun 2020 sampah atau limbah rumah tangga dari 384 kota di Indonesia mencapai sekitar 80.235 ton/harinya dimana sekitar 70% hingga 80% berasal dari sampah organik dari kegiatan dapur masyarakat. Apabila setiap rumah tangga menyisakan 1 gram beras yang tidak termakan setiap harinya atau setara dengan 50 butir beras, maka 10 juta rumah tangga telah menghasilkan beras tidak termakan sebanyak 10.000 kg beras per hari atau sekitar 500 juta butir beras. Dalam setahun, beras yang terbang mencapai 3.650.000 kg atau 3.650 ton per tahun.

Di negara maju lainnya, persoalan limbah makanan juga menjadi masalah yang tidak bisa dikesampingkan. Di negara Inggris dan Belanda, menurut data *Zero Waste Europe* yang dilansir situs hariantangerang.com (2015), terdapat sisa makanan senilai 500 euro yang terbang oleh rumah tangga setiap tahunnya. Di lain pihak, terdapat sekitar 805 juta orang (1 banding 9 orang) di dunia tidak mendapatkan makanan yang cukup sebagai syarat bagi kehidupan aktif yang sehat.

Limbah makanan merupakan sisa makanan yang tidak dimakan atau sudah tidak layak dimakan hingga akhirnya dibuang dan terkumpul di tempat penampungan. Pada saat ini keberadaan tumpukan limbah makanan merupakan

masalah yang sulit ditangani. Berbagai usaha dilakukan untuk mengurangi penumpukan limbah makanan seperti digunakan untuk bahan baku pengolahan *composting* (Fadlilah dan Yudihanto, 2013). Namun, usaha tersebut masih menyisakan permasalahan yang memerlukan biaya tinggi dan lahan yang luas untuk mengefisiensikan pengolahannya.

8. Kadar Air

Air yang terkandung di dalam suatu bahan yang menyebabkan suatu bahan menjadi basah disebut kadar air. Kadar air diperoleh dengan mengetahui presentase kandungan air suatu bahan yang dapat dinyatakan berdasarkan berat basah (*wet basis*) atau berat kering (*dry basis*). Kadar air merupakan faktor utama yang perlu dipertimbangkan ketika menggunakan biomassa sebagai sumber energi (Yokoyama, 2008).

Biomassa terdiri atas makromolekul alami seperti selulosa, lignin dan protein. Ada beberapa biomassa yang memiliki kadar air tinggi yang disebabkan biomassa tersebut berasal dari organisme hidup. Biomassa sendiri memiliki rentang kandungan kadar air yang luas mulai dari kadar air rendah seperti kayu kering, sisa kertas dan jerami kering. Untuk biomassa dengan kadar air tinggi kebanyakan merupakan organisme air seperti mikroalga, sisa fermentasi dan endapan (Yokoyama, 2009). Untuk mengetahui berat air yang terkandung di dalam suatu bahan biasanya dapat dihitung berat total bahan tersebut sehingga diperoleh berat basah yang dikurangi dengan berat kering bahan tersebut. Sedangkan untuk mengetahui berat kering dari suatu bahan yang mulanya basah

dapat dilakukan dengan proses pengeringan bahan, meskipun dalam pengeringan tidak dapat menguapkan seluruh kadar air yang terkandung.

Sedangkan air memiliki beberapa karakteristik yang berhubungan dengan perubahan temperatur, yakni :

- a. Pada kisaran suhu yang sesuai bagi kehidupan, yakni 0°C (32°F) – 100°C , air berwujud cair. Suhu 0°C merupakan titik beku (*freezing point*) dan suhu 100°C merupakan titik didih (*boiling point*) air.
- b. Perubahan suhu air berlangsung lambat sehingga air memiliki sifat sebagai penyimpanan panas yang sangat baik. Perubahan suhu air yang lambat mencegah terjadinya stres pada makhluk hidup karena adanya perubahan suhu yang mendadak dan memelihara suhu bumi agar sesuai bagi makhluk hidup. Sifat ini juga menyebabkan air sangat baik digunakan sebagai pendingin mesin.
- c. Air memerlukan panas yang tinggi dalam proses penguapan. Penguapan (evaporasi) adalah proses perubahan air menjadi uap air. Proses ini memerlukan energi panas dalam jumlah besar. Sebaliknya, proses perubahan uap air menjadi cairan (kondensasi) melepaskan energi panas yang besar. Pelepasan energi ini merupakan salah satu penyebab mengapa kita merasa sejuk pada saat berkeringat. Sifat ini juga merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan terjadinya penyebaran panas secara baik di bumi.

- d. Air merupakan satu-satunya senyawa yang merenggang ketika membeku. Pada saat membeku, air merenggang sehingga es memiliki densitas (massa/volume) yang lebih rendah daripada air.

B. Kajian Penelitian yang Relevan

Dalam eksperimen Amrullah, et al (2015) digunakan bahan baku limbah makanan untuk dikonversi menjadi sumber energi dengan cara termokimia pirolisis konvensional. Pengujian yang dilakukan adalah memberikan variasi suhu pirolisis dan jenis briket yang digunakan untuk mengetahui pengaruh terhadap karakteristik bio-oil dan briket sisa pembakaran. Variasi suhu yang digunakan berawal dari 300 °C-600 °C dengan interval 100 °C. Penelitian ini juga memaparkan kandungan kadar air dalam bahan uji mempengaruhi waktu pemanasan dalam proses pirolisis.

Pirolisis jerami gandum dengan bantuan gelombang mikro telah diteliti oleh Xiqiang Zhao, et al (2012). Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui peran kenaikan temperatur terhadap pirolisis dengan menggunakan gelombang mikro. Dalam pembahasannya di paparkan bahwa katalis SiC (Silikon Karbida) berguna sebagai absorber radiasi gelombang mikro. Kenaikan profil temperatur berhenti di atas suhu 200 °C dan laju pemanasan menurun sampai kesetimbangan panas tercapai. Waktu untuk mencapai kesetimbangan panas disingkat dengan kenaikan power pada *microwave*.

Penelitian lain dari K. El Harfi, et al (2000) tentang pirolisis serpihan yang mengandung minyak Moroccan dengan radiasi gelombang mikro berpendapat bahwa kenaikan temperatur material uji seiring dengan kenaikan daya dari

gelombang mikro. Hal tersebut disebabkan bahwa faktanya ketika daya gelombang mikro meningkat maka laju pemanasan meningkat pula.

C. Kerangka Berpikir

Gelombang mikro merupakan salah satu gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang 1-30 cm dan memiliki frekuensi 300 MHz – 300 GHz. Gelombang tersebut diaplikasikan pada *microwave oven* yang beredar di pasaran dengan frekuensi 2,45 GHz yang digunakan untuk keperluan memasak dan kebutuhan rumah tangga lainnya. Cara kerja *microwave* tersebut adalah dengan cara pemanasan dielektrik dimana material yang efektif untuk pemanasan berbasis gelombang mikro ini adalah material yang bersifat dielektrik. Material dielektrik memiliki dipole yang seimbang dan bersifat tidak menghantarkan listrik. Contoh dari material dielektrik tersebut adalah lemak dan air.

Limbah sisa makanan mengandung beberapa zat yang terkumpul dari berbagai macam makanan. Pada dasarnya *microwave* digunakan untuk mengolah dan memasak makanan. Dalam penelitian ini limbah sisa makanan memiliki komposisi yang sama dengan makanan yang biasa dimasak dengan *microwave*. Oleh karena itu digunakan limbah sisa makanan untuk dipirolisis menjadi bahan bakar agar meningkatkan nilai manfaatnya.

Selama proses pirolisis, terjadi perubahan temperatur dalam reaktor. Reaktor tersebut dapat diamati karakteristik termalnya agar diketahui proses kenaikan temperatur dan kebutuhan daya selama proses pirolisis dengan menggunakan gelombang mikro. Proses pirolisis cepat sendiri pada umumnya

mebutuhkan suhu di atas 350 °C untuk dapat menguraikan molekul-molekul bahan yang dipanaskan. Oleh karena itu reaktor pirolisis dengan bantuan gelombang mikro diamati untuk mengetahui karakteristik termalnya.

Faktor yang mempengaruhi keefektifan pirolisis adalah proses kenaikan temperatur pada reaktor. Dalam penelitian yang relevan, temperatur memegang peran penting terhadap keefektifan proses pirolisis.

D. Hipotesis

Berdasarkan kajian pustaka yang telah dipaparkan, diperoleh hipotesis sebagai berikut :

1. Waktu radiasi/pemanasan berpengaruh terhadap perubahan temperatur dalam reaktor pirolisis.
2. Daya yang diberikan selama pirolisis berpengaruh terhadap laju pemanasan di dalam reaktor.
3. Limbah sisa makanan dalam keadaan basah akan mempengaruhi karakteristik termal reaktor proses pirolisis dan memiliki perbedaan yang signifikan dibanding limbah dalam keadaan kering.

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan hasil dan analisa yang telah dipaparkan pada bab-bab sebelumnya, maka diperoleh kesimpulan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Waktu pemanasan atau radiasi berpengaruh terhadap kenaikan temperatur. Semakin lama waktu pemanasan maka akan semakin tinggi temperatur yang dicapai. Namun, lamanya waktu radiasi tidak berpengaruh terhadap laju pemanasan. Pada percobaan ini laju pemanasan semakin mengecil seiring dengan lamanya waktu radiasi gelombang mikro. Sedangkan efisiensi termal dipengaruhi oleh laju pemanasan reaktor. Semakin besar laju pemanasannya, maka semakin tinggi pula efisiensi termalnya.
2. Semakin besar daya *microwave* juga akan berdampak semakin besarnya daya yang diserap reaktor dalam mempirolisis limbah sisa makanan sehingga efisiensi termal juga akan semakin tinggi. Selain itu, daya *microwave* juga berpengaruh terhadap kenaikan temperatur dan laju pemanasan. Semakin tinggi daya *microwave* maka akan semakin tinggi pula laju pemanasan dan capaian temperaturnya. Pada limbah sisa makanan kering yang dipanaskan dengan daya tertinggi 418 W memiliki capaian temperatur maksimum 757 °C dengan laju pemanasan 12,1 °C/menit, daya yang diserap sebesar 223,1 W dan efisiensi termal reaktor adalah 53%. Sedangkan pada pirolisis limbah sisa makanan basah yang dipanaskan dengan daya 418 W diperoleh hasil

temperatur maksimum 522 °C dengan laju pemanasan 8,2 °C/menit, daya yang diserap 158,3 W dan efisiensi termal 37%. Oleh karena itu, reaktor pirolisis gelombang mikro yang paling efektif pada penelitian ini ada pada daya *microwave* maksimum yaitu 418 W.

3. Dari data yang diperoleh setelah penelitian pirolisis limbah sisa makanan kering 11% dan basah 24%, didapatkan bahwa terjadi perbedaan karakteristik termal reaktor gelombang mikro yang signifikan. Pada daya maksimum *microwave*, limbah sisa makanan kering yang dipirolisis memiliki karakteristik termal reaktor yang lebih besar dibandingkan limbah sisa makanan basah. Semakin sedikit kandungan air di dalam limbah sisa makanan maka akan semakin besar nilai karakteristik termalnya. Oleh karena itu, dalam mempirolisis limbah sisa makanan disarankan untuk mengurangi kandungan *moisture* seminimal mungkin.

B. Saran Pemanfaatan Hasil

Adapun saran yang diberikan terhadap hasil penelitian yang telah dilakukan tentang analisa karakteristik termal reaktor gelombang mikro untuk pirolisis berbahan baku limbah sisa makanan untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan *microwave* yang memiliki daya yang lebih besar dari penelitian ini perlu diterapkan untuk proses pirolisis yang lebih singkat.
2. Perhitungan sifat-sifat bahan limbah bisa lebih didetilkan apabila keberadaannya memungkinkan untuk dihitung.

3. Pengambilan sampel hasil pirolisis bisa diujikan terhadap mesin bakar apabila jumlahnya memungkinkan untuk digunakan dalam uji performa mesin.



DAFTAR PUSTAKA

- Amrullah, A. et al. 2015. Studi Eksperimental Bio Oil Berbahan Baku Limbah Sisa Makanan Dengan Variasi Temperatur Pirolisis. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIV*. Banjarmasin : Universitas Lampung Mangkurat.
- Anonim. 2010. Kadar Air Basis Basah Dan Kadar Air Basis Kering. Online. <https://laskarteknik.com/2010/08/04/kadar-air-basis-basah-dan-kadar-air-basis-kering/> [accessed 12/3/2016]
- Anonim. (n.d). Online [https://www.academia.edu/9646910/Air dan karakteristik berdasarkan sum bernya](https://www.academia.edu/9646910/Air_dan_karakteristik_berdasarkan_sum_bernya) [accessed 12/3/2016]
- Cherbanski, R. dan Molga, E. 2009. Intensification of desorption processes by use of microwaves—An overview of possible applications and industrial perspectives. *Chemical Engineering and Processing*. 48:48-58.
- CNN Indonesia. 2015. Online. <http://www.cnnindonesia.com/gaya-hidup/20151117170003-262-92260/enam-cara-sederhana-kurangi-limbah-makanan/> [accessed 22/2/2016]
- El harfi, K. et al. 2000. Pyrolysis of the Moroccan (Tarfaya) oil shales undern microwave irradiation. *Fuel*. 79: 733-742.
- Fachrizal, N, et al. 2012. Rancang Bangun Perangkat Eksperimentasi Proses Pirolisis Biomasa Gelombang Mikro. *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*. 14/2: 153-160
- Ferawati, R dan Toifur, M. 2014. Penentuan Nilai Rugi Tangen (*Loss Tangent*) Kaldu Daging Sapi Berbantuan Software Logger Pro. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVIII HFI Jateng & DIY*. Yogyakarta: Universitas Ahmad Dahlan.
- Fadlilah, N. dan Yudihanto, G. 2013. Pemanfaatan Sampah Makanan Menjadi Bahan Bakar Alternatif dengan Metode Biodrying. *Jurnal Teknik Pomits*. 2/2:1-5.
- Harian Tangerang. 2015. Online. www.hariantangerang.com/news/2015/2020-sampah-rumah-tangga-indonesia-80235-ton-per-hari.htm [accessed 12/3/2016]

- Hijauku. 2013. Bijak Mengolah Pangan untuk Selamatkan Lingkungan. Online. <http://www.hijauku.com/2013/06/07/bijak-mengolah-pangan-selamatkan-lingkungan/> [accessed 26/3/2016]
- Incropera, F. P. dan De Witt, D. P. 1981. *Second Edition : Fundamental of Heat and Mass Tranfer*. Singapore : Purdue University.
- Jones, D.A, et al. 2002. Microwave Heating Applications in Environmental Engineering-a review. *Resources, Conservation, and Recycling*. 34:75-90.
- Kadir, A. 1982. *Energi*. Jakarta : UI-Press.
- Kertopati, L. 2015. Enam Cara Sederhana Kurangi Limbah Makanan. Online. www.cnnindonesia.com/gaya-hidup/20151117170003-292-92-260/enam-cara-sederhana-kurangi-limbah-makanan.htm [accessed 12/3/2016]
- Kreith, F. 1973. *Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas*. Translated by Arko Prijono. 1986. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- LEMHANNAS. 2012. Pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) Guna Penghematan Bahan Baku Fosil dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional. *Jurnal Kajian LEMHANNAS*. 14:12-19.
- Sihana. 2010. Analysis of Thermal System. Online. www.sihana.staff.ugm.ac.id/s1/than/than-ch01.htm [accessed 12/3/2016].
- Surya, Y. (n.d). Microwave dan Keistimewaannya. Online. www.yohanessurya.com/microwave-keistimewaannya.htm [accessed 12/3/2016]
- The Engineering Toolbox. (n.d). *Air Properties*. Online. http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html [accessed 1/9/2016]
- Thostenson, E.T. dan Chou, T.W. 1999. Microwave processing: fundamentals and applications. *Composites*. 30:1055-1071.
- Wan, Y. et al. 2009. Microwave-Assisted Pyrolysis Of Biomass: Catalysts To Improve Product Selectivity. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 86:161-167.
- Winarno, D.R. et al. 2008. *Buku Ajar Mesin Konversi Energi*. Semarang : Universitas Negeri Semarang.
- Yin, C. 2012. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource Technology*. 120:273-284.

- Yokoyama, S. 2008. *Buku Panduan Biomassa: Panduan Untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa*. Translated by Kementerian Indonesia. Japan: The Japan Institute of Energy.
- Yuen, F. dan Hameed, B.H. 2009. Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Advances in Colloid and Interface Science*. 149:19-27.
- Zhao, X, et al. 2010. Microwave pyrolysis of corn stalk bale: A promising method for direct utilization of large-sized biomass and syngas production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 89:87-94.

