



**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**

**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

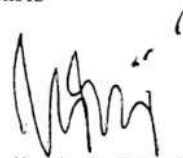
Nama : Yanuar Adi Kurniawan
NIM : 5212412065
Program Studi : Teknik Mesin S1

Panitia


Ketua Panitia


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


Sekretaris


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

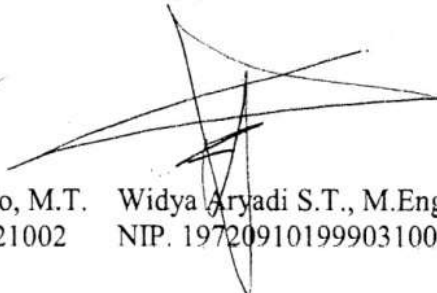
Pembimbing I


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

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik UNNES


Dr. Nur Qudus, M.T.
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama Mahasiswa : Yanuar Adi Kurniawan

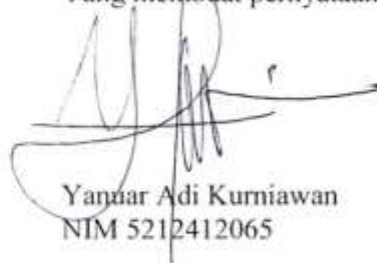
NIM : 5212412065

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



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.

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

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 pembauran (*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. $^{\circ}$ C)	Kkal/(s.m. $^{\circ}$ 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 perenkayasa 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.

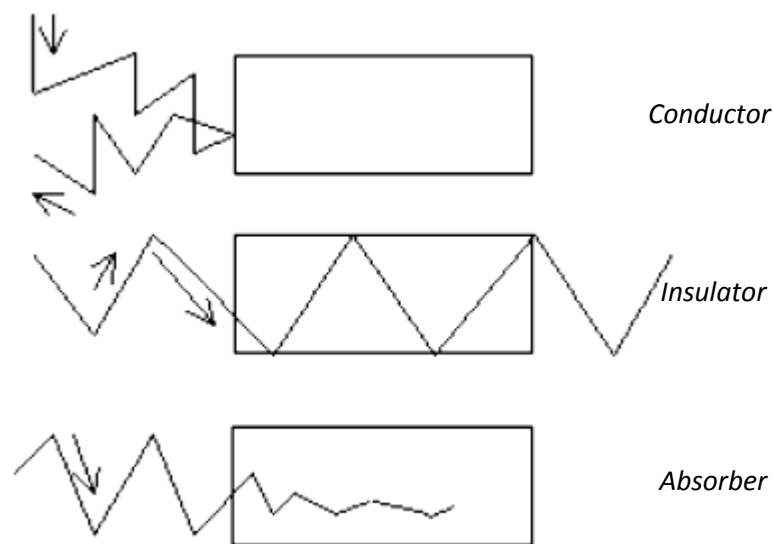
Dalam situs yohannessurya.com juga dipaparkan bahwa sebenarnya gelombang mikro merupakan gelombang radio, tetapi panjang gelombangnya lebih kecil dari gelombang radio biasa. Panjang gelombangnya termasuk *ultra short* sehingga disebut sebagai gelombang mikro (*microwave*). Gelombang ini tidak dapat dilihat 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)

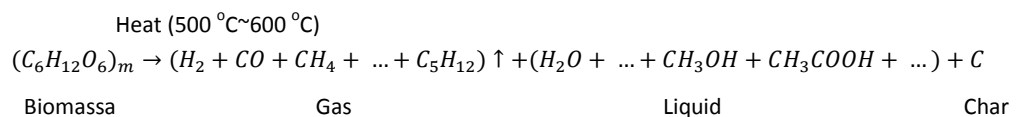
Material	$\tan \delta$	Material	$\tan \delta$
<i>Ethylene Glycol</i>	1.350	<i>Coconut activated carbon</i>	1.646
<i>Ethanol</i>	0.941	<i>Dried EFB (oil palm empty fruit bunch) char</i>	0.134
<i>2-propanol</i>	0.799	<i>EFB sampel with 18 wt% moisture</i>	0.297
<i>Formic acid</i>	0.722	<i>EFB sampel with 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 aditif 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

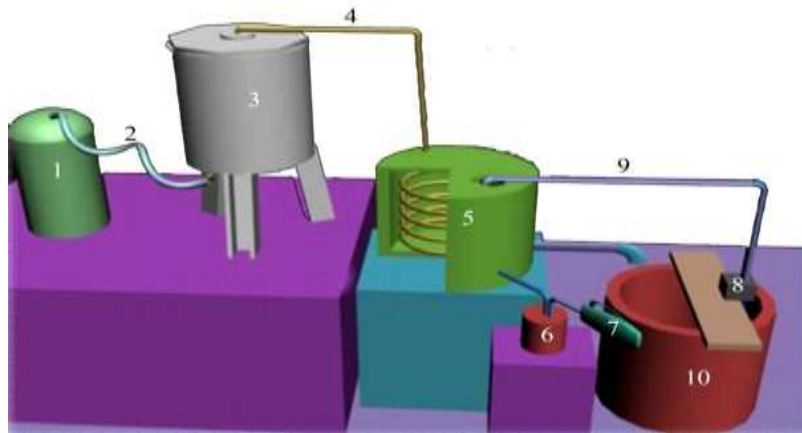
air yang dihasilkan (14-18%) (Yokayama, 2008). Kadar air yang tinggi menentukan viskositas dari produk hasil pirolisis. Semakin tinggi kadar air dalam cairan produk maka semakin kecil nilai viskositasnya, begitu sebaliknya. Untuk mendapatkan kadar air yang rendah diperlukan pemanasan lanjutan untuk menghilangkan kandungan air sehingga produk hasil menjadi lebih kental. Sedangkan produk gas memiliki kandungan CO₂, dan CO, H₂, C1-5 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 :

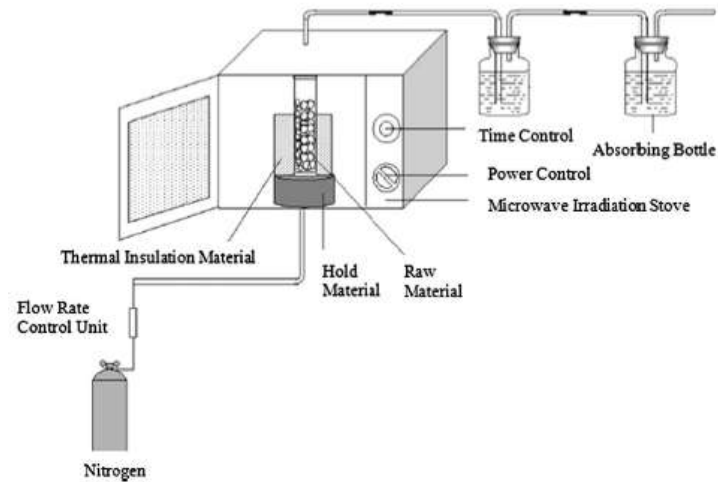
1. Tabung gas	2. Selang gas	3. Reaktor	4. Pipa	5. Pendingin
6. Bejana minyak	7. Kipas	8. Pompa air	9. Pipa air	10. Tandon air

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. Alhasil 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

membutuhkan 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 III

METODE PENELITIAN

A. Bahan Penelitian yang Digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Limbah Sisa Makanan Kering dan Basah

Limbah sisa makanan yang digunakan untuk penelitian ini adalah limbah makanan yang berasal dari sisa makanan sehari-hari seperti nasi, sayuran, dan sisa lauk-pauk. Limbah sisa makanan didapatkan dari tempat sampah restoran dan rumah makan terdekat. Adapun spesifikasi limbah sisa makanan kering memiliki kadar air 11% dan limbah sisa makanan basah 24%.

2. Air Es

Air es digunakan untuk cairan pendingin pada kondenser. Air es akan membantu proses pendinginan dari kondenser yang mendinginkan gas hasil pirolisis.

B. Skema Alat yang Digunakan

Dalam penelitian ini digunakan bantuan panas dari radiasi gelombang mikro. Skema alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Microwave Oven

Microwave oven digunakan sebagai alat yang menghasilkan panas dari gelombang mikro. Alat ini dapat diperoleh di supermarket sebagai alat rumah tangga yang membantu proses memasak.

Adapun spesifikasi dari *microwave oven* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Merk : Panasonic NN-SM322M

Sumber Daya : 220 V 50 Hz

Konsumsi Daya : 3.6 A 750 W

Kapasitas Volum : 25 Litre

Frekuensi : 2.450 MHz

2. Tabung kaca

Tabung kaca berguna sebagai tabung reaktor bahan uji.

3. Alumunium *foil*

Alumunium *foil* digunakan untuk menutupi tabung reaktor agar pemanasan dari gelombang mikro bisa menyebar ke semua permukaan gelas reaktor.

4. Bejana penampung minyak pirolisis

Kondenser digunakan untuk mendinginkan gas hasil pirolisis untuk selanjutnya gas tersebut berubah fase menjadi cair dan ditampung di bejana ini.

5. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk menghitung temperatur yang terjadi di dalam reaktor dan di dalam *microwave oven*. Dalam penelitian ini menggunakan dua buah *thermocouple* tipe K.

6. *Thermocouple reader*

Thermocouple reader adalah alat kalibrasi temperatur dari *thermocouple*. Pada penelitian ini menggunakan *Thermocouple reader Omron*.

7. Ampere Meter

Ampere meter digunakan untuk menghitung kuat arus pada *microwave oven*.

8. Pipa Saluran Gas

Selang saluran gas menyalurkan gas hasil pirolisis yang keluar dari gelas reaktor. Selang saluran gas mengantarkan gas hasil tersebut menuju ke kondenser untuk didinginkan. Pipa yang digunakan pada penelitian ini adalah pipa aluminium.

9. Selang Sisa Gas

Selang saluran minyak menyalurkan minyak hasil pirolisis dari kondenser. Minyak tersebut kemudian mengalir menuju penampung minyak. Bagian ini menggunakan selang bening.

10. Penampung Sisa Gas

Penampung minyak digunakan sebagai penampungan hasil akhir pirolisis yang berfase cair.

11. Bejana

Bejana digunakan untuk menampung air es dan kondenser.

12. Kipas Angin

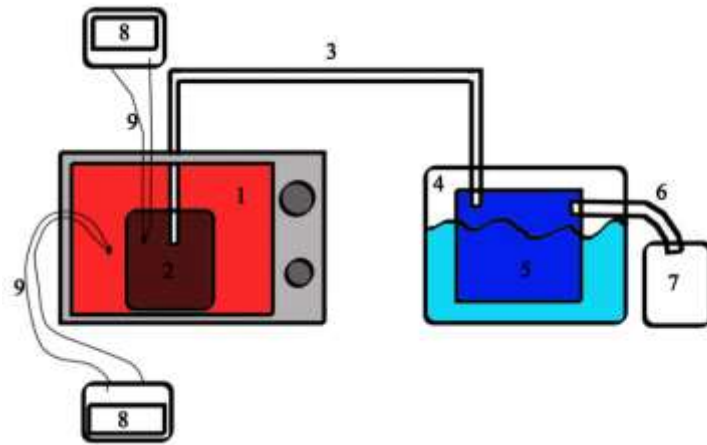
Kipas angin berguna untuk mendinginkan *microwave oven*.

13. Timbangan

Digunakan untuk menimbang berat bahan uji.

14. *Stopwatch*

Menghitung waktu pemanasan.



Gambar 3.1. Skema alat penelitian pirolisis bantuan panas gelombang mikro

Keterangan gambar :

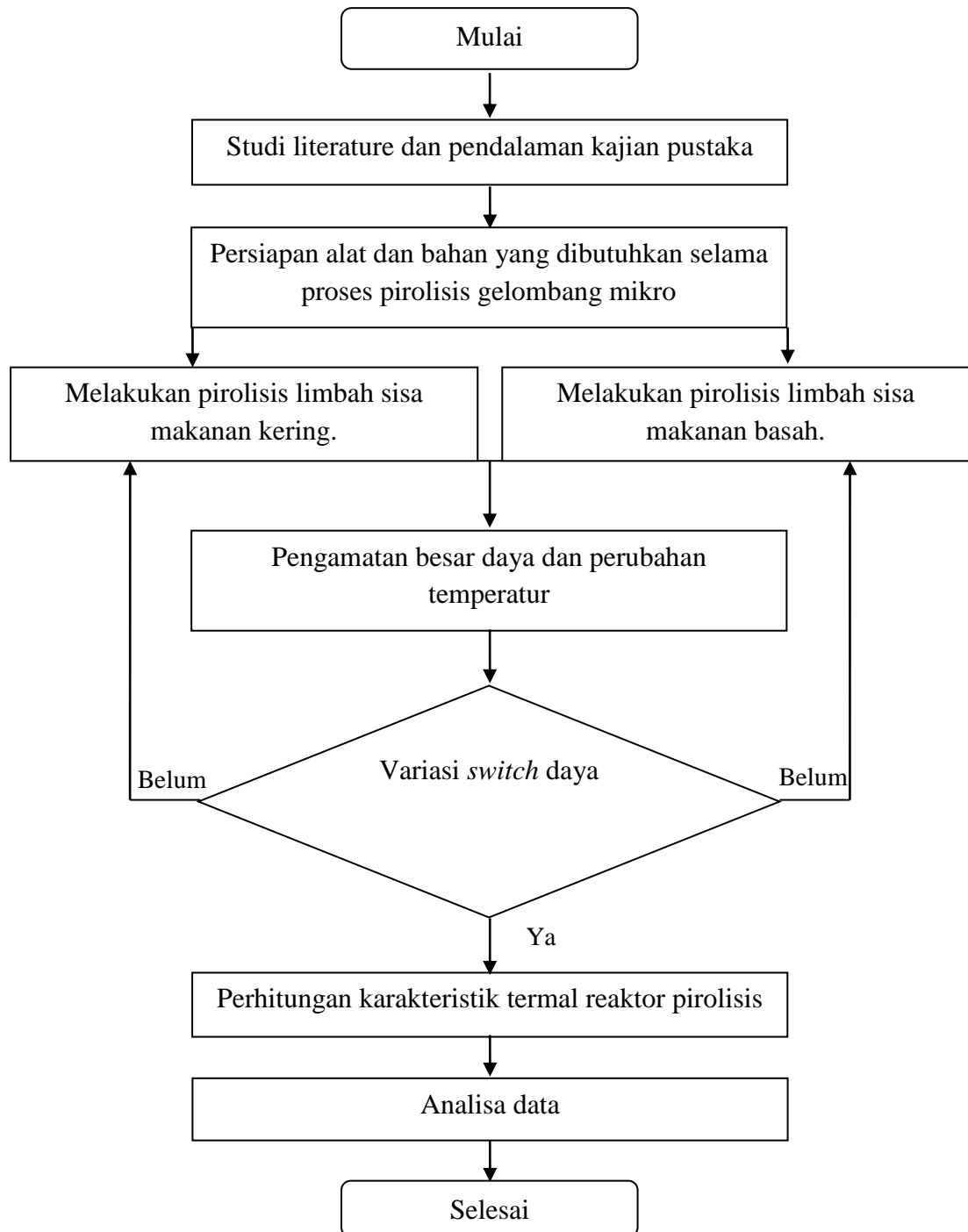
1. *Microwave Oven*
2. Tabung kaca sebagai reaktor yang diselimuti alumunium foil
3. Pipa saluran gas
4. Bejana berisi air es
5. Bejana penampung minyak pirolisis
6. Selang gas sisa
7. Penampung gas sisa
8. *Thermocouple Reader*
9. *Thermocouple*

Peralatan penunjang penelitian

1. Kipas Angin
2. *Ampere Meter*
3. *Stopwatch*

C. Prosedur Penelitian

1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian Pirolisis

2. Proses Penelitian

Pengujian karakteristik termal reaktor pirolisis ini menggunakan limbah sisa makanan kering dan basah masing-masing sebesar 300 gram dengan bantuan panas gelombang mikro yang dilakukan selama 60 menit atau 3600 detik. Proses pirolisis menggunakan variasi daya pada *microwave oven* yaitu *medium*, *medium high* dan *high*. Dari variasi daya tersebut akan diukur daya sebenarnya menggunakan alat Ampere meter. Selain daya, akan diukur juga pencapaian temperatur yang terjadi selama proses pirolisis gelombang mikro dengan termokopel.

Untuk mengetahui kadar air di dalam masing-masing limbah sisa makanan dilakukan proses percobaan sebagai berikut :

1. Limbah sisa makanan untuk tekstur kering dilakukan penjemuran terlebih dahulu selama satu hari di bawah sinar matahari. Sedangkan untuk limbah basah tidak perlu dilakukan penjemuran
2. Limbah yang telah dijemur digolongkan menjadi limbah sisa makanan kering. Sedangkan limbah yang tidak dijemur atau di *pre-treatment* digolongkan limbah sisa makanan basah di.
3. Setelah dijemur, limbah sisa makanan kering diambil seberat 300 gram untuk penelitian. Limbah sisa makanan basah juga diambil 300 gram.
4. Kedua limbah tersebut diperlakukan sama untuk mengetahui besar kadar air di dalamnya.
5. Perlakuan yang sama dilakukan yaitu memanaskan kedua limbah tersebut di dalam *microwave* selama ± 30 menit pada temperatur atur 100 °C.

6. Kedua limbah dinaikkan temperaturnya di dalam *microwave* hingga 100 °C kemudian ditahan hingga 30 menit.
7. Setelah kedua limbah selesai dipanaskan, lalu keduanya ditimbang untuk mengetahui berat akhir.
8. Untuk menghitung kadar air kedua jenis limbah, maka berat akhir dibagi berat awal dalam satuan persen.

Adapun proses penelitian pirolisisnya adalah sebagai berikut :

1. Melakukan *pre-treatment* pada bahan baku limbah sisa makanan kering agar kandungan uap air didalamnya berkurang. *Pre-treatment* tersebut dapat dengan cara dijemur di bawah panas matahari. Lama penjemuran tersebut adalah satu hari.
2. Mempersiapkan alat-alat dan bahan.
3. Setelah itu bahan baku yang sudah di *pre-treatment* dimasukkan ke dalam gelas reaktor sebanyak 300 gram.
4. Kemudian gelas reaktor tersebut dimasukkan ke dalam *microwave oven* ditutup rapat-rapat.
5. Sebelum mulai dipanaskan, dua buah termokopel yang telah disediakan di masukkan ke dalam gelas reaktor dan satunya di lingkungan *microwave*.
6. Sambungkan pipa saluran gas dengan tutup gelas reaktor dan terhubung keluar *microwave* menuju ke kondensor.
7. Setelah semua persiapan selesai, langkah selanjutnya mengatur *switch* daya *microwave* di posisi *medium*.
8. Pemanasan bahan baku dilakukan selama 1 jam.

9. Pengamatan daya dan temperatur dilakukan setiap kelipatan waktu 60 detik selama satu jam.
10. Selama satu jam atau 3600 detik besar daya dan perubahan temperatur dicatat dalam tabel analisa.
11. Setelah pemanasan selama 3600 detik selesai, dilakukan pergantian bahan baku baru untuk dipanaskan pada daya selanjutnya.
12. Melakukan langkah 8-12 dengan daya *medium high*.
13. Melakukan langkah 8-12 dengan daya *high*.
14. Setelah semua pengujian variasi daya selesai, dilakukan pergantian bahan baku baru limbah sisa makanan basah.
15. Melakukan langkah 8-14 dengan bahan baku tersebut.
16. Menghitung karakteristik termal reaktor pirolisis dari data yang telah diperoleh.

3. Data Penelitian

Adapun data yang diperoleh dari penelitian berdasarkan langkah di atas adalah sebagai berikut:

1. Besar daya *microwave* yang digunakan untuk mempirolisis limbah sisa makanan.
2. Perubahan temperatur reaktor pirolisis limbah sisa makanan kering dan basah selama 1 jam penelitian.

Data di atas digunakan untuk menghitung karakteristik termal reaktor selama proses pirolisis limbah sisa makanan menggunakan bantuan panas gelombang mikro. Karakteristik termal reaktor tersebut berupa besar laju

pemanasan yang terjadi per satuan waktu, besar daya yang digunakan untuk memanaskan bahan pirolisis yang kemudian diketahui besar efisiensi termal dari reaktor tersebut.

4. Analisis Data

Karakteristik termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan dengan bantuan panas gelombang mikro dianalisa melalui perubahan temperatur yang terjadi dalam reaktor, besar laju pemanasan, besar daya yang berguna untuk memanaskan bahan dan efisiensi termal reaktor. Analisa tersebut berguna untuk mengetahui karakteristik termal reaktor yang tepat dan cocok untuk mendapatkan hasil yang efektif dari proses pirolisis limbah sisa makanan dengan bantuan panas gelombang mikro.

BAB IV

HASIL PENELITIAN

A. Hasil Penelitian

1. Evaluasi Daya Microwave

Pada pirolisis 300 gram limbah sisa makanan yang dipanaskan dengan bantuan *microwave* pada *switch* daya *medium*, *medium-high*, dan *high* selama masing-masing 1 jam diperoleh besar daya yang masuk untuk mempirolisis limbah sisa makanan tersebut. Besar daya pada masing-masing *switch* yang ada di *microwave* diperoleh dari pengamatan dengan menggunakan alat *clampmeter* yang dipasang di aliran listrik *microwave*. Di bawah ini adalah tabel besar daya yang ada pada masing-masing *switch microwave*.

Tabel 4.1
Besar Daya Pada Microwave

<i>Switch</i> Daya	Besar Daya (W)
Medium	257
Medium High	362
High	418

Berdasarkan tabel di atas, daya paling besar ada pada *switch* daya maksimum yaitu *high* sebesar 418 W.

2. Temperatur

a. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Pada pirolisis 300 gram limbah sisa makanan yang dipanaskan dengan bantuan *microwave* pada daya 257 W, 362 W dan 418 W selama masing-masing 1 jam diperoleh data perubahan temperatur sebagaimana ditunjukkan

pada Tabel 4.2. Temperatur yang diukur meliputi temperatur bagian luar reaktor (*cavity*) dan temperatur bagian reaktor.

Tabel 4.2
Perubahan Temperatur Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
0	34	30	34	30	33	30
60	48	58	69	138	92	171
120	57	69	74	156	92	194
180	69	74	85	189	94	208
240	75	88	90	206	94	224
300	77	98	91	210	95	230
360	77	110	94	217	96	241
420	77	118	95	216	99	247
480	83	118	97	215	99	253
540	82	119	97	214	99	262
600	83	126	97	219	102	278
660	82	135	98	218	102	285
720	81	147	99	219	101	298
780	81	158	99	220	102	307
840	83	166	99	218	109	315
900	85	171	98	231	109	325
960	85	180	98	238	109	332
1020	87	188	99	245	111	340
1080	87	193	99	251	115	349
1140	85	188	102	258	114	356
1200	86	195	102	264	115	362
1260	86	202	103	272	115	374
1320	87	199	102	280	124	382
1380	88	198	103	286	122	388
1440	86	198	103	293	122	396
1500	89	200	105	304	122	406
1560	89	201	105	313	129	417
1620	89	202	107	325	129	424
1680	91	217	111	337	129	439
1740	90	235	112	342	136	447
1800	92	240	112	355	137	453
1860	92	249	113	363	137	471
1920	98	255	113	376	138	487
1980	92	260	114	382	145	502
2040	92	268	115	389	152	515
2100	92	276	115	402	150	521

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
2160	91	280	115	407	152	536
2220	93	286	119	412	157	541
2280	93	292	120	419	162	558
2340	93	297	120	426	163	563
2400	92	303	120	434	165	574
2460	94	311	122	446	170	581
2520	93	321	122	454	171	595
2580	94	330	124	461	171	602
2640	94	337	126	474	168	610
2700	95	345	131	481	176	616
2760	94	341	132	489	177	629
2820	93	349	132	493	186	638
2880	93	351	136	500	186	645
2940	94	356	136	517	191	656
3000	95	363	138	527	191	663
3060	95	368	139	536	193	672
3120	95	373	139	544	194	688
3180	94	381	141	558	194	697
3240	94	386	143	565	194	708
3300	96	392	144	574	192	716
3360	95	401	147	585	193	722
3420	96	408	152	596	199	730
3480	98	417	153	610	199	745
3540	99	423	155	627	204	753
3600	102	427	155	630	204	757

Temperatur yang diperlukan untuk proses pirolisis limbah sisa makanan atau biomassa yaitu berkisar antara 350 °C sampai 500 °C (Yokayama, 2008). Pada daya 257 W, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur pirolisis yaitu 48 menit sebesar 351 °C. Pada daya 362 W, didapatkan pada menit ke-36 sampai 59 untuk mencapai temperatur 348 °C- 503 °C. Sedangkan pada daya 418 W, diperoleh pada menit ke-18 sampai 39 yaitu sebesar 348 °C sampai 507 °C.

Selama pirolisis, kelembaban bahan menguap pertama kali pada suhu 100 °C, setelah kadar air menguap lalu bahan akan terdekomposisi (Yokayama, 2008). Setelah melewati 500 °C, bahan uji yang dipirolisis akan berubah coklat kehitaman yaitu terjadi proses pembentukan *char* atau arang sisa pirolisis.

b. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Pada pirolisis 300 gram limbah sisa makanan basah yang dipanaskan dengan bantuan *microwave* pada daya 257 W, 362 W dan 418 W selama masing-masing 1 jam diperoleh data tabel di bawah ini :

Tabel 4.3
Perubahan Temperatur Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
0	34	30	34	30	34	30
60	49	46	75	71	89	85
120	50	52	81	72	94	91
180	56	56	84	74	98	98
240	63	59	90	77	108	106
300	63	65	94	77	110	109
360	67	71	94	83	114	113
420	70	72	95	88	115	117
480	71	72	95	91	115	120
540	79	77	95	96	122	124
600	81	86	97	102	123	129
660	81	91	97	107	128	132
720	84	97	97	110	128	137
780	84	106	97	114	132	139
840	84	107	97	118	133	144
900	84	107	100	118	133	147
960	86	108	100	123	137	153
1020	88	106	102	126	137	158
1080	87	107	101	127	138	159
1140	87	109	101	129	143	165
1200	88	109	102	131	143	171
1260	88	110	102	132	144	174
1320	88	111	104	136	143	179

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
1380	89	113	106	138	144	184
1440	89	116	110	143	147	188
1500	89	117	110	146	147	189
1560	91	120	110	151	151	197
1620	90	123	115	154	151	199
1680	90	125	116	159	155	204
1740	90	128	119	164	155	214
1800	91	128	119	167	156	221
1860	91	131	122	173	155	233
1920	92	136	123	186	156	247
1980	92	137	123	199	156	252
2040	94	142	126	216	160	268
2100	94	147	126	221	160	275
2160	94	149	126	237	160	288
2220	94	153	128	244	162	296
2280	94	157	128	253	162	304
2340	95	159	132	265	166	314
2400	95	164	132	272	167	328
2460	95	167	132	279	167	331
2520	95	172	136	288	170	347
2580	95	176	136	296	170	353
2640	96	184	140	303	170	365
2700	97	189	141	314	173	376
2760	96	192	141	327	174	383
2820	96	195	144	336	178	391
2880	95	200	144	344	178	415
2940	96	204	149	350	178	427
3000	97	211	152	358	181	432
3060	97	215	159	365	181	446
3120	97	221	158	376	183	451
3180	98	226	160	382	186	463
3240	98	231	162	389	186	473
3300	99	235	162	397	186	480
3360	99	240	163	405	191	488
3420	99	247	163	417	192	495
3480	100	252	165	421	192	507
3540	100	258	165	435	197	513
3600	101	265	165	442	197	522

Pada data tabel di atas menunjukkan kronologi perubahan temperatur reaktor pirolisis limbah sisa makanan basah. Daya 257 W selama 1 jam temperatur reaktor mencapai hingga 265 °C. Sedangkan untuk daya 362 W dan 418 W mencapai temperatur 442 °C dan 522 °C.

3. Laju Pemanasan Pirolisis

Laju pemanasan adalah selisih antara temperatur akhir dengan temperatur awal yang dibagi waktu selama penelitian. Hal tersebut menunjukkan kemampuan reaktor gelombang mikro untuk memanaskan bahan uji. Laju pemanasan dihitung berdasarkan persamaan 2.1 berikut :

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

Temperatur awal digunakan temperatur pada menit ke-1 karena pada menit awal tersebut bahan uji sudah terkena radiasi gelombang mikro. Sementara itu untuk data waktu digunakan waktu selama proses yaitu 60 menit atau 3600 detik. Satuan laju pemanasan ini adalah °C/menit.

a. Laju Pemanasan Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Berdasarkan persamaan laju pemanasan di atas, diambil sampel perhitungan untuk menghitung laju pemanasan proses pirolisis limbah sisa makanan kering pada temperatur *cavity* dan daya 257 W. Nilai T_{akhir} dari *cavity* yaitu 102 °C dan T_{awal} yaitu 34 °C. Adapun contoh perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{102 - 34}{60} = 1.13^{\circ}\text{C/menit}$$

Hasil perhitungan laju pemanasan untuk daya lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4
Laju Pemanasan Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

257 W		362 W		418 W	
<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
1,1°C/min	6,6°C/min	2,1°C/min	10°C/min	2,8°C/min	12,1°C/min

Tabel tersebut menunjukkan bahwa laju pemanasan paling besar selama proses yaitu pada daya 418 W yang mana pada temperatur *cavity* memiliki laju 2,8°C/menit dan 12,1°C/menit pada temperatur reaktornya.

b. Laju Pemanasan Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Berdasarkan persamaan laju pemanasan di atas diambil sampel perhitungan untuk menghitung laju pemanasan proses pirolisis limbah sisa makanan basah pada temperatur *cavity* dan daya 257 W. Nilai T_{akhir} dari *cavity* yaitu 101 °C dan T_{awal} yaitu 34 °C. Adapun contoh perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{101 - 34}{60} = 1,1^\circ \text{ C/menit}$$

Hasil perhitungan laju pemanasan untuk daya lainnya ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5
Laju Pemanasan Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

257 W		362 W		418 W	
<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
1,1°C/min	3,9°C/min	2,1°C/min	6,8°C/min	2,8°C/min	8,2°C/min

Tabel di atas menunjukkan bahwa laju pemanasan pada temperatur *cavity* tetap seperti pirolisis limbah sisa makanan kering. Sedangkan untuk temperatur reaktor pada pirolisis limbah sisa makanan basah menurun dibanding dengan percobaan limbah sisa makanan kering.

4. Efisiensi Termal

Selama proses pirolisis limbah sisa makanan dengan menggunakan bantuan gelombang mikro selama 1 jam diperoleh perhitungan besar daya *microwave* yang diserap oleh reaktor selama pirolisis. Daya yang digunakan bersumber dari daya *microwave* yang digunakan untuk memicu pemanasan bahan uji. Besar daya yang diserap dapat dihitung dengan persamaan 2.2 berikut:

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

Dimana massa jenis (ρ) dari limbah sisa makanan kering dan limbah sisa makanan basah yang diuji pada penelitian ini adalah masing-masing 333,3 kg/m³ dan 545,5 kg/m³. Sementara itu untuk harga Cp limbah kering dan limbah basah adalah 1695 J/kg °C dan 2130 J/kg K. Untuk mengetahui konduktivitas termal gas (udara) berdasarkan keadaan temperatur rerata dapat dilihat pada tabel *Air Properties* (Lampiran 2).

Di bawah ini merupakan harga lainnya untuk persamaan 2.2 :

$$V = 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$A = 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\sigma = \text{Konstanta Boltzman } (5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)$$

$$D = 9 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\varepsilon = 0,92$$

Untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi menggunakan persamaan 2.6 yang telah dibahas di kajian pustaka dapat dituliskan sebagai berikut:

$$4,36 = \frac{hD}{k_{udara}}$$

Konduktivitas termal udara diketahui melalui tabel *Air Properties* (Lampiran 2). Setelah diketahui harga k pada temperatur tertentu, langkah selanjutnya mensubstitusikan harga tersebut ke dalam persamaan. Sebagai contoh perhitungan untuk temperatur rerata 518 K memiliki nilai k 0,042 W/mK. Dari data tersebut, koefisien perpindahan panas konveksi (h) dapat dihitung sebagai berikut:

$$4,36 = \frac{h \cdot 9 \times 10^{-2} m}{0,042 W/mK}$$

$$h = \frac{4,36 \times 0,042}{9 \times 10^{-2}}$$

$$h = 2,03 W/m^2K$$

Setelah mengetahui nilai koefisien perpindahan panas konveksi dan semua properti persamaan daya yang digunakan, selanjutnya mensubstitusikan harga-harga yang telah diketahui ke dalam persamaan 2.2. Perhitungan daya absorpsi difokuskan pada temperatur dalam reaktor yang berhubungan dengan perubahan temperatur bahan uji selama 1 jam percobaan. Oleh karena itu, temperatur yang digunakan berdasarkan pada tabel perubahan temperatur pirolisis.

Setelah mendapatkan besar daya *microwave* dan daya yang diserap untuk proses pirolisis limbah sisa makanan menggunakan bantuan gelombang mikro,

maka dapat dihitung besar efisiensi termal dari reaktor dengan masing-masing variasi limbah basah dan kering. Efisiensi dihitung untuk mengetahui seberapa besar daya yang berguna dibanding dengan daya yang masuk. Untuk menghitung efisiensi termal digunakan persamaan 2.3.

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

P_{abs} merupakan harga untuk daya yang diserap (absorpsi) reaktor dalam proses pirolisis, sedangkan harga P_{in} adalah besar daya *microwave* atau daya yang masuk. Perbandingan keduanya menghasilkan efisiensi termal dalam satuan presentase efisiensi.

a. Efisiensi Termal untuk Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Perhitungan daya yang diserap untuk proses memanaskan reaktor limbah sisa makanan kering menggunakan persamaan 2.2. Diketahui mula-mula properti perhitungan pada daya *microwave* 257 W untuk memanaskan reaktor adalah sebagai berikut :

$$\rho = 333,3 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1695 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T = 427 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{inlet} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$k = 0,042 \text{ W/m K}$$

$$hc = 2,03 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$A = 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$\varepsilon = 0,92$$

$$T_{\text{rerata}} = 518 \text{ K}$$

Dengan mensubstitusikan nilai properti di atas ke dalam persamaan 2.2, maka diperoleh sampel perhitungan seperti di bawah ini:

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

$$P_{\text{abs}} = (333,3 \text{ kg/m}^3 \times 1695 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \frac{(427-30)^\circ\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (2,03 \text{ W/m}^2\text{K} \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (427 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (518 \text{ K})^4)$$

$$P_{\text{abs}} = 45,3 \text{ W} + 6,5 \text{ W} + 30,4 \text{ W}$$

$$P_{\text{abs}} = 82,2 \text{ W}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka diperoleh harga daya yang diserap reaktor untuk mempirolisis limbah sisa makanan kering pada daya 257 W yaitu sebesar 82,2 W. Sementara itu dengan persamaan yang sama, diperoleh besar daya yang digunakan pada daya 362 W dan 418 W berturut-turut adalah 146,2 W dan 223,1 W.

Tabel 4.6
Daya Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Daya <i>Microwave</i> (W)	Daya yang Digunakan (W)
257	82,2
362	146,2
418	223,1

Besar daya yang diserap reaktor dan daya *microwave* pada proses pirolisis limbah sisa makanan kering telah diketahui berdasarkan perhitungan sebelumnya maka dapat dihitung harga efisiensi termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan kering tersebut. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.3.

Berikut adalah perhitungan efisiensi termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan kering pada daya 257 W:

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

$$\eta_p = \frac{82,2}{257} \times 100\%$$

$$\eta_p = 31 \%$$

Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh harga efisiensi termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan kering pada daya masuk 257 W yaitu sebesar 31%. Harga tersebut berarti daya yang diserap reaktor untuk mempirolisis bahan adalah 31% dari besar daya *microwave*.

Tabel 4.7
Efisiensi Termal Reaktor Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Daya <i>Microwave</i> (W)	Efisiensi Termal
257 W	31 %
362 W	40 %
418 W	53 %

Selain itu harga efisiensi termal untuk penggunaan daya *microwave* 362 W dan 418 W secara berturut-turut sebesar 40% dan 53%.

b. Efisiensi Termal untuk Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Perhitungan daya yang diserap untuk proses memanaskan reaktor limbah sisa makanan basah menggunakan persamaan 2.2. Diketahui mula-mula properti perhitungan pada daya *microwave* 257 W untuk memanaskan reaktor adalah sebagai berikut :

$$\rho = 545,5 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T = 265 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}
 T_{\text{inlet}} &= 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
 V &= 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \\
 k &= 0,034 \text{ W/m K} \\
 h_c &= 1,64 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\
 A &= 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\
 \sigma &= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \\
 \varepsilon &= 0,92 \\
 T_{\text{rerata}} &= 415 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan nilai properti di atas ke dalam persamaan 2.2, maka diperoleh sampel perhitungan seperti di bawah ini:

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

$$\begin{aligned}
 P_{\text{abs}} &= (545,5 \text{ kg/m}^3 \times 2130 \text{ J/kg } ^{\circ}\text{C} \frac{(265-30) ^{\circ}\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (1,64 \text{ W/m}^2 \text{ K} \times 8,1 \times \\
 &10^{-3} \text{ m}^2 (265 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (415)^4)
 \end{aligned}$$

$$P_{\text{abs}} = 55,3 \text{ W} + 3,1 \text{ W} + 12,5 \text{ W}$$

$$P_{\text{abs}} = 70,9 \text{ W}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, maka diperoleh harga daya yang diserap reaktor untuk mempirolisis limbah sisa makanan kering pada daya 257 W yaitu sebesar 70,9 W. Sementara itu dengan persamaan yang sama, diperoleh besar daya yang digunakan pada daya 362 W dan 418 W berturut-turut adalah 126,6 W dan 158,3 W.

Tabel 4.8
Daya yang Digunakan Untuk Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Daya Microwave (W)	Daya yang Digunakan (W)
257	70,9
362	126,6
418	158,3

Besar daya yang diserap dan daya *microwave* pada proses pirolisis limbah sisa makanan basah telah diketahui berdasarkan perhitungan sebelumnya maka dapat dihitung harga efisiensi termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan basah tersebut. Persamaan yang digunakan adalah persamaan 2.3. Berikut adalah perhitungan efisiensi termal limbah sisa makanan basah pada daya 257 W:

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

$$\eta_p = \frac{70,9}{257} \times 100\%$$

$$\eta_p = 27 \%$$

Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh harga efisiensi termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan basah pada daya masuk 257 W yaitu sebesar 27%. Harga tersebut berarti daya yang diserap reaktor untuk mempirolisis bahan sebesar 27% dari besar daya masuk.

Tabel 4.9
Efisiensi Termal Reaktor Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Daya <i>Microwave</i> (W)	Efisiensi Termal
257 W	27 %
362 W	34 %
418 W	37 %

Selain itu harga efisiensi termal untuk penggunaan daya *microwave* 362 W dan 418 W secara berturut-turut sebesar 34% dan 37%

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan karakteristik termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan dengan bantuan gelombang mikro, maka diperoleh analisa sebagai berikut :

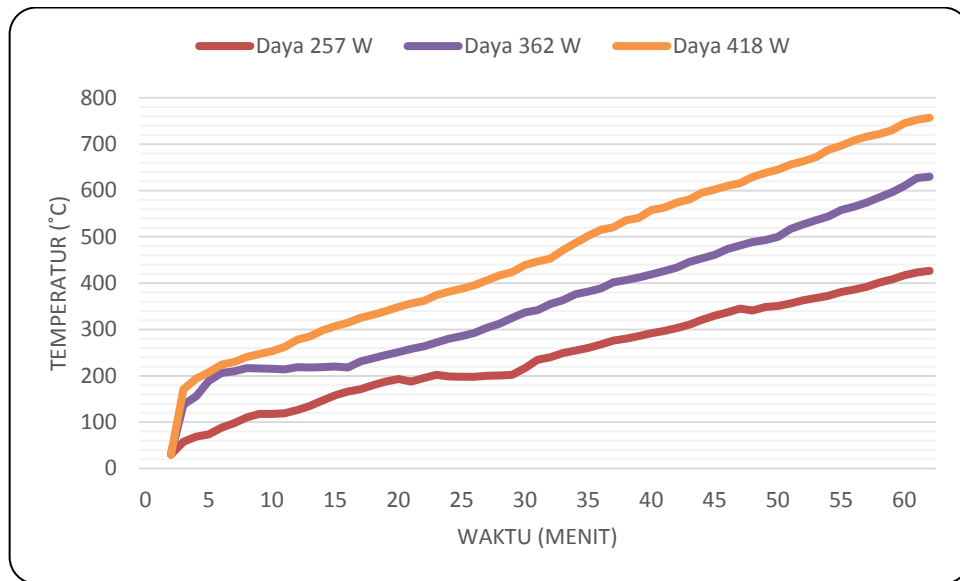
1. Perubahan Temperatur

Secara ilmiah, pirolisis adalah proses dekomposisi termal bahan organik pada temperatur sekitar 350 °C-550 °C, tanpa oksigen. Selama pirolisis berlangsung, kelembaban bahan menguap pertama kali pada suhu 100° C. Setelah melampaui suhu 500 °C, pirolisis suatu biomassa sudah mencapai pengarangan (Yokayama, 2008).

Berdasarkan percobaan pirolisis limbah sisa makanan kering dan limbah sisa makanan basah, maka diperoleh analisa pembahasan pengaruh waktu terhadap perubahan temperatur sebagai berikut:

a. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Di bawah ini adalah Gambar 4.1 yang menunjukkan grafik hubungan perubahan temperatur di dalam reaktor terhadap waktu selama 1 jam. Peningkatan temperatur pada daya *microwave* 418 W lebih cepat dibandingkan dengan peningkatan temperatur dari daya 257 W atau 362 W. Daya 418 W selama satu jam percobaan, temperaturnya mencapai hampir 800 °C pada temperatur dalam reaktor. Hal tersebut sebanding dengan besar daya yang diserap ke sistem. Untuk daya *microwave* yang lainnya yaitu 257 W dan 362 W, selama satu jam percobaan masing-masing temperaturnya hanya mencapai 427 °C dan 630 °C.



Gambar 4.1. Grafik perubahan temperatur terhadap waktu pirolisis limbah sisa makanan kering.

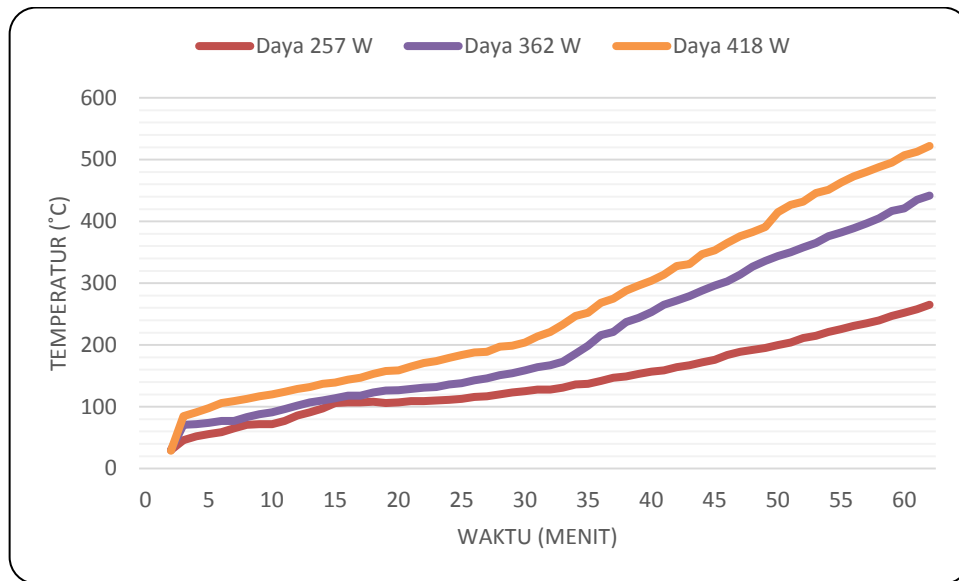
Berdasarkan Gambar 4.1 di atas, pada menit-menit awal antara 1-4 menit terjadi kenaikan temperatur yang sangat drastis terutama pada daya *microwave* 362 W dan 418 W. Mula-mula dari temperatur reaktor 30 °C meningkat hingga 100 °C dalam beberapa menit. Hal tersebut bisa saja terjadi ketika suatu bahan memiliki sedikit kandungan air dan terkena radiasi gelombang mikro. Pada menit-menit awal tersebut terjadi reaksi pemanasan molekul air akibat radiasi gelombang mikro yang cepat dan bertahan hingga temperatur uap jenuhnya lalu kemudian menguap menjadi uap panas dengan temperatur lebih dari 100 °C.

Setelah penguapan kandungan air selesai atau habis, temperatur bahan berangsur-angsur naik dengan normal hingga mencapai temperatur akhir pirolisis yaitu kurang lebih 500 °C yang mana bahan telah berubah bentuk menjadi arang.

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa pada daya 257 W dibutuhkan waktu selama hampir 1 jam untuk mendapatkan temperatur minimal dalam mempirolisis suatu biomassa. Pada menit ke-45 proses pirolisis baru akan dimulai yakni pada temperatur 350°C. Sedangkan pada daya 362 W, temperatur pirolisis dimulai kurang lebih pada menit ke-30 dan pada daya 418 W temperatur pirolisis sudah dimulai pada menit ke-18. Hal tersebut terjadi karena pengaruh besar daya *microwave* selama pirolisis. Semakin tinggi daya *microwave*, maka semakin cepat dan tinggi pula temperatur yang dicapai.

b. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Di bawah ini adalah Gambar 4.2 yang menunjukkan grafik hubungan perubahan temperatur terhadap waktu. Selama 1 jam semua varian daya *microwave* mengalami kenaikan temperatur. Kenaikan temperatur tercepat terjadi pada daya maksimum yaitu daya 418 W selama 1 jam mencapai temperatur lebih dari 500 °C. Sedangkan pada kedua varian daya yang lainnya kenaikannya hanya mencapai 265 °C dan 396 °C selama 1 jam proses pirolisis.



Gambar 4.2. Grafik perubahan temperatur terhadap waktu pirolisis limbah sisa makanan basah

Berdasarkan pada Gambar 4.2 yang menunjukkan grafik perubahan temperatur reaktor limbah sisa makanan basah, terlihat bahwa perubahan temperatur limbah sisa makanan basah lebih lambat dibandingkan dengan percobaan limbah sisa makanan kering sebelumnya. Dalam kasus ini, kandungan air yang ada pada limbah sisa makanan basah lebih banyak dibanding dengan kandungan air pada limbah sisa makanan kering. Hal yang mempengaruhi kelambatan naiknya temperatur adalah akibat dari sifat air itu sendiri. Dalam kondisi kadar air yang tinggi, pemanasan bahan cenderung dikonstankan pada temperatur 100 °C. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.2 bahwa kenaikan temperatur pada reaktor tertahan di kisaran temperatur 100 °C sampai kandungan air benar-benar telah menguap sepenuhnya dan keluar meninggalkan sistem kemudian temperatur reaktor kembali naik secara normal.

Pemanasan fluida air memiliki beberapa tahapan dalam prosesnya. Pada fase cair, fluida air yang dipanaskan dari temperatur normal awal akan meningkat

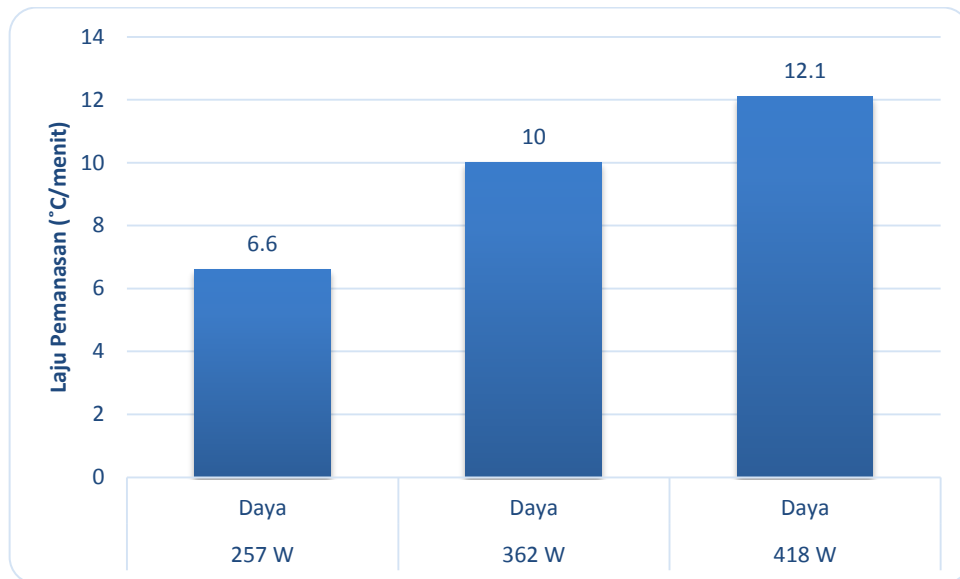
sampai temperatur jenuhnya yaitu 100 °C. Pada temperatur 100 °C, fluida air menjadi jenuh dan berubah menjadi fase campuran yaitu fase cair jenuh dan uap jenuh. Pada fase campuran ini, fluida air akan mendidih dan cenderung menahan kenaikan temperatur hingga molekulnya telah benar-benar berubah fase menjadi fase uap jenuh semuanya. Setelah fase uap jenuh ini temperaturnya akan naik kembali menjadi uap panas. Oleh karena itu, perubahan temperatur tidak berlangsung cepat dan terlihat perbedaan yang signifikan dengan pirolisis limbah sisa makanan kering. Selain itu, kandungan air juga menyebabkan perbedaan massa jenis antara kedua varian limbah tersebut.

Seperti terlihat pada Gambar 4.2 di atas, kenaikan temperatur pada daya 257 W tertahan pada kisaran temperatur 100 °C selama 15 menit hingga akhirnya naik kembali. Sedangkan pada daya 362 W dan 418 W temperatur tertahan pada 100 °C tidak terlalu lama seperti pada daya 257 W.

2. Laju Pemanasan

a. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Berdasarkan Gambar 4.3 di bawah ini diperoleh analisa bahwa daya 257 W memiliki laju pemanasan yang paling lambat dibandingkan dengan laju pemanasan pada daya lainnya yaitu sebesar 6,6° C/menit. Laju pemanasan paling cepat terjadi pada daya tertinggi yaitu 418 W sebesar 12,1° C/menit. Jika dilihat dari perbedaan laju pemanasan seperti terlihat pada Gambar 4.3 dapat ditarik analisa bahwa semakin besar daya yang diserap, maka akan semakin besar pula laju pemanasannya.

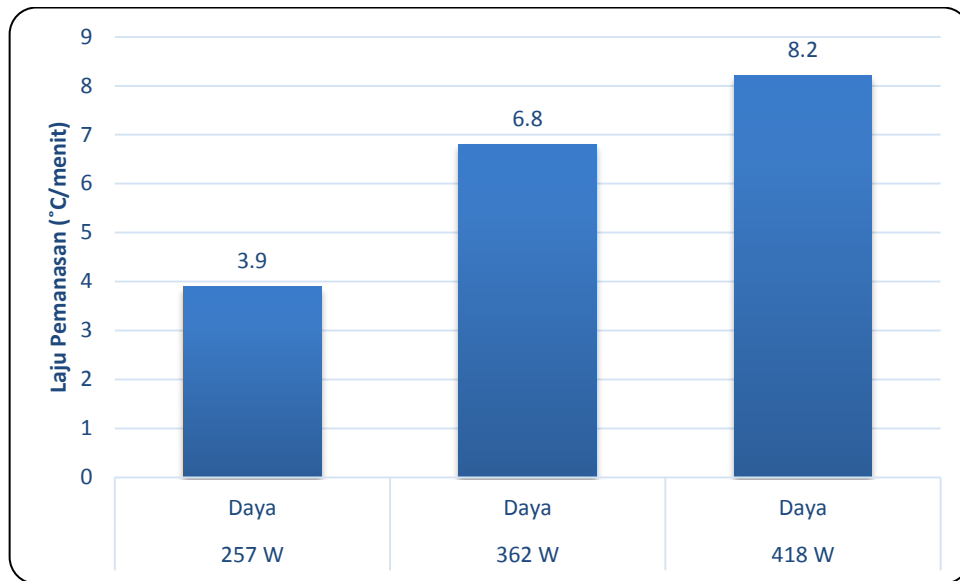


Gambar 4.3. Grafik laju pemanasan pirolisis limbah sisa makanan kering.

Gambar 4.3 di atas menunjukkan laju pemanasan dari temperatur awal mula sampai temperatur akhir percobaan. Dapat diartikan bahwa laju pemanasan di atas merupakan nilai rata-rata setiap menitnya. Suatu bahan yang memiliki nilai *loss tangent* dalam kategori tinggi maka akan lebih besar nilai laju pemanasannya dibandingkan dengan bahan yang nilai *loss tangent*nya lebih rendah.

b. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Pada Gambar 4.4 di bawah ini diperoleh bahwa laju pemanasan limbah sisa makanan basah semakin meningkat sebanding dengan bertambahnya besar daya *microwave*. Pada percobaan ini laju pemanasan dengan daya 257 W mencapai 3,9°C/menit yang mana nilai tersebut merupakan yang terendah dibanding dengan kedua daya lainnya.



Gambar 4.4. Laju pemanasan pirolisis limbah sisa makanan basah.

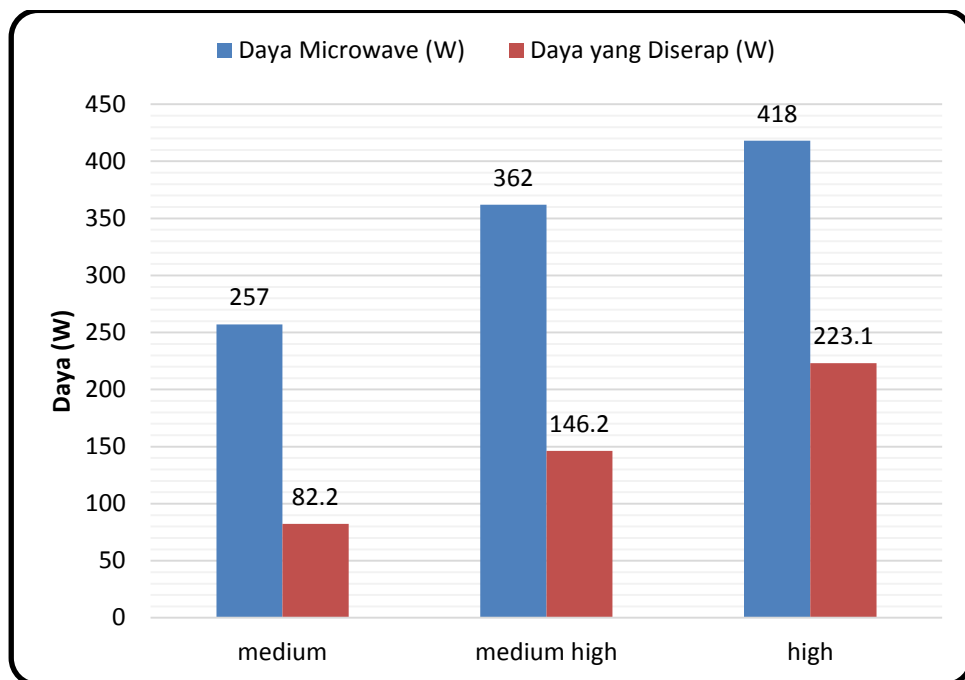
Namun jika dibandingkan dengan percobaan limbah sisa makanan kering, percobaan limbah sisa makanan basah lebih lambat laju pemanasannya. Hal tersebut terjadi karena penguapan kadar air di dalam bahan uji basah memakan waktu lebih lama sehingga kenaikan temperatur terhambat. Air yang terkandung di dalam suatu bahan cenderung menahan temperatur bahan tersebut sampai akhirnya air benar-benar menguap menjadi uap air.

3. Daya dan Efisiensi Termal

Untuk menentukan total daya absorpsi atau yang diserap suatu material diperlukan evaluasi perhitungan perpindahan panas yang terjadi. Sehingga berdasarkan evaluasi perpindahan panas yang terjadi akan didapatkan besar daya absorpsi yang digunakan selama proses.

a. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Di bawah ini adalah Gambar 4.5 yang menggambarkan grafik perbandingan daya *microwave* dan daya yang diserap oleh reaktor.

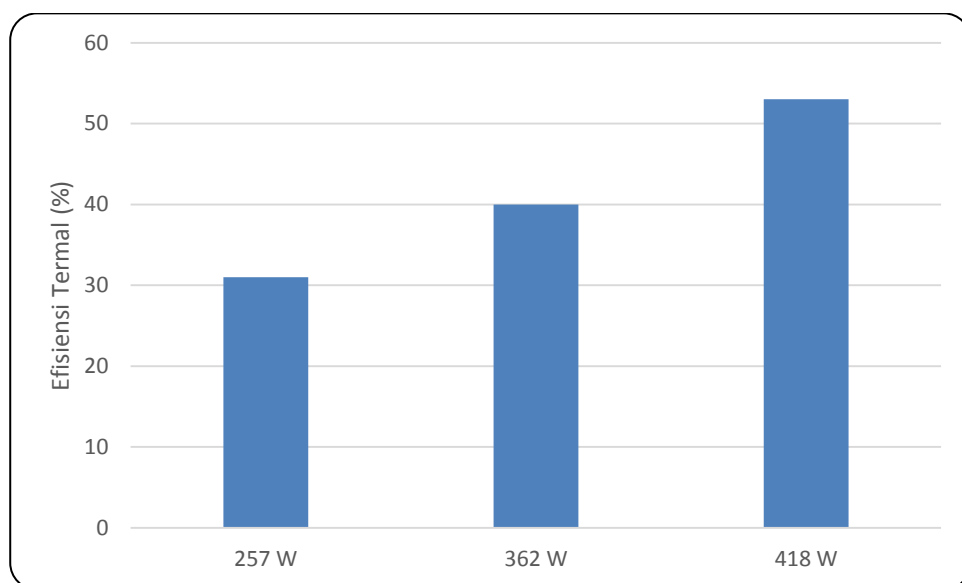


Gambar 4.5. Grafik perbandingan daya pirolisis limbah sisa makanan kering.

Berdasarkan Gambar 4.5 di atas diperoleh analisa bahwa daya yang diserap paling banyak adalah pada saat percobaan pirolisis limbah sisa makanan kering dengan daya 418 W yaitu sebesar 223,1 W. Proses pirolisis dengan memanfaatkan gelombang mikro sebagai pemanasnya memerlukan daya *microwave* berkisar 600 W sampai 900 W (Fachrizal, et al., 2012). Walaupun tidak jarang beberapa penelitian menggunakan *power microwave* lebih dari 900 W untuk kepentingan pirolisis bahan yang lebih besar jumlahnya agar memakan waktu yang singkat. Daya yang dihasilkan *microwave* berupa konversi radiasi atau pancaran gelombang mikro dari magnetron yang diserap oleh bahan dielektrik sehingga memicu pemanasan dari molekul-molekul bahan itu sendiri.

Percobaan limbah sisa makanan yang sebelumnya dilakukan *pre-treatment* sehingga diperoleh bahan dengan kadar air rendah akan lebih efektif dalam prosesnya. Selain itu, limbah sisa makanan yang terdiri dari bermacam-macam jenis makanan yang molekul-molekul dielektrik lebih cepat terpapar panasnya dan lebih mudah menyerap radiasi gelombang mikro dari *microwave* (Cherbanski dan Molga, 2009). Pada varian daya 362 W, limbah sisa makanan kering menyerap daya pirolisis sebesar 146,2 W. Sedangkan pada daya 257 W bahan uji menyerap daya pirolisis sebesar 82,2 W saja.

Setelah diketahui besar daya *microwave* dan besar daya yang diserap reaktor pirolisis limbah sisa makanan kering, maka dapat diketahui efisiensi termal reaktor seperti yang digambarkan pada Gambar 4.6 di bawah ini.



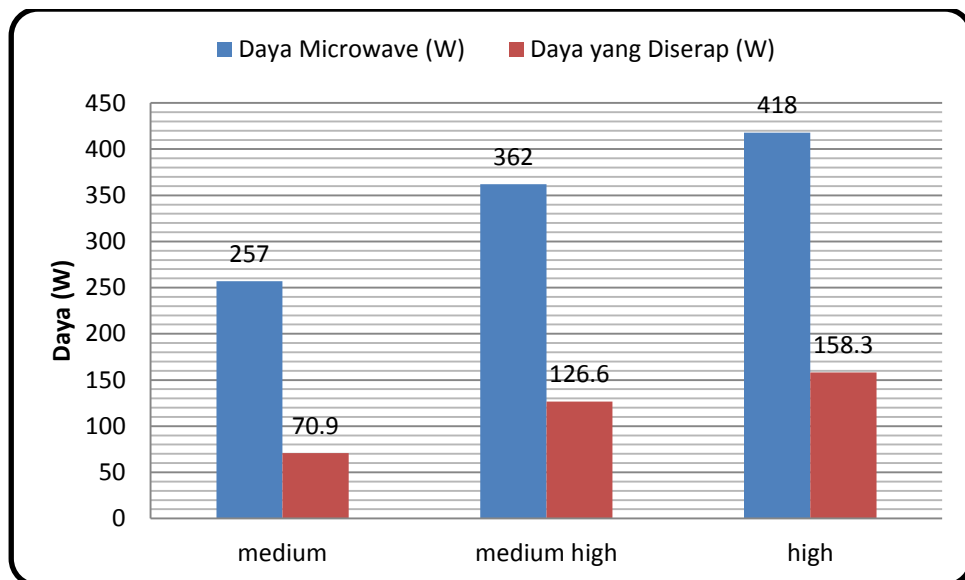
Gambar 4.6. Grafik efisiensi termal limbah sisa makanan kering

Gambar 4.6 menggambarkan efisiensi termal antara ketiga varian daya yaitu 257 W, 362 W dan 418 W. Pada daya 418 W memiliki efisiensi termal yang

tertinggi yang mencapai 53%. Hal tersebut sebanding dengan besar daya yang digunakan untuk proses pirolisis dan mempengaruhi laju pemanasan pirolisis.

b. Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Di bawah ini adalah gambar 4.7 yang menunjukkan perbandingan daya *microwave* dengan daya yang diserap oleh reaktor pirolisis limbah sisa makanan basah.



Gambar 4.7. Grafik perbandingan daya pirolisis limbah sisa makanan basah

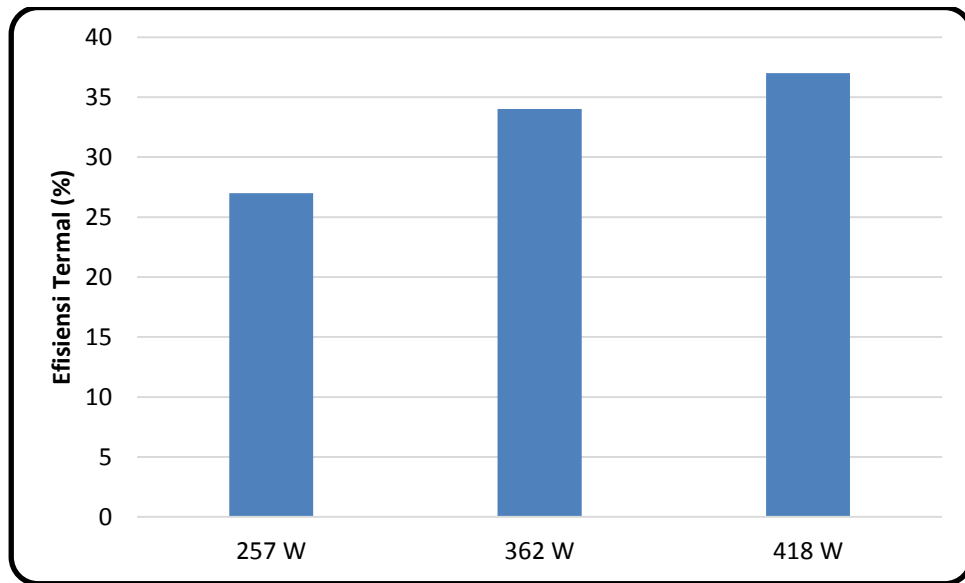
Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan daya masuk dengan daya yang digunakan oleh proses pirolisis limbah sisa makanan basah. Penyerapan daya tertinggi ketika percobaan pirolisis dengan menggunakan daya masuk 418 W yaitu sebesar 158,3 W. Diikuti dengan daya 362 W dan 257 W yang diserap sebesar 126,6 W dan 70,9 W.

Apabila diamati dari kronologi perubahan temperatur bahan, pada daya pemasukkan 418 W temperatur maksimal selama 1 jam mencapai 522° C.

Berbeda dengan percobaan limbah sisa makanan kering yang bisa mencapai 757°C . Perbedaan yang signifikan tersebut disebabkan oleh perbedaan kadar air dari kedua jenis bahan uji. Bahan yang memiliki lebih banyak kandungan air di dalamnya cenderung akan dihambat proses kenaikan panasnya oleh air tersebut sampai akhirnya kadar air menguap dan menghilang.

Selain itu, fluida air memiliki nilai *loss tangent* yang termasuk tinggi dibandingkan limbah sisa makanan. Nilai *loss tangent* air sebesar 0,123 yang mana semakin besar nilai *loss tangent* suatu zat maka semakin mudah untuk proses absorpsi radiasi gelombang mikro (Yin, 2012). Oleh karena itu, dalam kasus ini yang lebih dahulu menyerap radiasi *microwave* adalah kandungan air dari limbah sisa makanan. Ketika kadar air di dalamnya telah habis, radiasi dari gelombang mikro akan diserap dengan mudah oleh limbah sisa makanan sehingga temperatur limbah sisa makanan akan naik dan temperatur reaktor juga ikut naik.

Berdasarkan besar daya *microwave* dan daya yang diserap proses pirolisis limbah sisa makanan basah yang telah diketahui, maka dapat diketahui efisiensi termal reaktor pirolisis limbah sisa makanan basah.



Gambar 4.8. Grafik efisiensi termal limbah sisa makanan basah

Gambar 4.8 di atas menunjukkan grafik perbandingan efisiensi termal proses pirolisis limbah sisa makanan basah. Efisiensi tertinggi adalah pada percobaan daya 418 W sebesar 37 %. Jika dibandingkan dengan efisiensi termal limbah sisa makanan kering, selisih dari masing-masing daya terpaut jauh. Hal tersebut disebabkan daya yang diserap terlalu banyak untuk menguapkan uap air sampai kadari air benar-benar hilang.

C. Keterbatasan Penelitian

Penelitian analisa karakteristik termal reaktor gelombang mikro untuk pirolisis bahan baku limbah sisa makanan memiliki keterbatasan sebagai berikut:

1. Daya maksimum yang dapat dicapai *microwave* mencapai 418 W.
2. Limbah makanan yang digunakan pada penelitian ini mengabaikan sifat-sifat dari beberapa macam makanan yang dianggap minoritas atau dalam jumlah sedikit.

3. Penelitian ini tidak menganalisa tentang hasil pirolisis dan uji performa hasil minyak uap pirolisis pada mesin.

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 sumbernya](https://www.academia.edu/9646910/Air_dan_karakteristik_berdasarkan_sumbernya) [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 under 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.

LAMPIRAN

1. Foto Dokumentasi



2. Tabel Air Properties (www.engineeringtoolbox.com)

<u>Temperature</u> - t - (°C)	<u>Density</u> - ρ - (kg/m ³)	<u>Specific Heat</u> - c _p - (kJ/(kg K))	<u>Thermal Conductivity</u> - k - (W/(m K))	<u>Kinematic Viscosity</u> - ν - x 10 ⁻⁶ (m ² /s)	<u>Expansion Coefficient</u> - β - x 10 ⁻³ (1/K)	<u>Prandtl's Number</u> - Pr -
-150	2.793	1.026	0.0116	3.08	8.21	0.76
-100	1.980	1.009	0.0160	5.95	5.82	0.74
-50	1.534	1.005	0.0204	9.55	4.51	0.725
0	1.293	1.005	0.0243	13.30	3.67	0.715
20	1.205	1.005	0.0257	15.11	3.43	0.713
40	1.127	1.005	0.0271	16.97	3.20	0.711
60	1.067	1.009	0.0285	18.90	3.00	0.709
80	1.000	1.009	0.0299	20.94	2.83	0.708
100	0.946	1.009	0.0314	23.06	2.68	0.703
120	0.898	1.013	0.0328	25.23	2.55	0.70
140	0.854	1.013	0.0343	27.55	2.43	0.695
160	0.815	1.017	0.0358	29.85	2.32	0.69
180	0.779	1.022	0.0372	32.29	2.21	0.69
200	0.746	1.026	0.0386	34.63	2.11	0.685
250	0.675	1.034	0.0421	41.17	1.91	0.68
300	0.616	1.047	0.0454	47.85	1.75	0.68
350	0.566	1.055	0.0485	55.05	1.61	0.68
400	0.524	1.068	0.0515	62.53	1.49	0.68

3. Tabel Perubahan Temperatur Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
0	34	30	34	30	33	30
60	48	58	69	138	92	171
120	57	69	74	156	92	194
180	69	74	85	189	94	208
240	75	88	90	206	94	224
300	77	98	91	210	95	230
360	77	110	94	217	96	241
420	77	118	95	216	99	247
480	83	118	97	215	99	253
540	82	119	97	214	99	262
600	83	126	97	219	102	278
660	82	135	98	218	102	285
720	81	147	99	219	101	298
780	81	158	99	220	102	307
840	83	166	99	218	109	315
900	85	171	98	231	109	325
960	85	180	98	238	109	332
1020	87	188	99	245	111	340
1080	87	193	99	251	115	349
1140	85	188	102	258	114	356
1200	86	195	102	264	115	362
1260	86	202	103	272	115	374
1320	87	199	102	280	124	382
1380	88	198	103	286	122	388
1440	86	198	103	293	122	396
1500	89	200	105	304	122	406
1560	89	201	105	313	129	417
1620	89	202	107	325	129	424
1680	91	217	111	337	129	439
1740	90	235	112	342	136	447
1800	92	240	112	355	137	453
1860	92	249	113	363	137	471
1920	98	255	113	376	138	487
1980	92	260	114	382	145	502
2040	92	268	115	389	152	515
2100	92	276	115	402	150	521
2160	91	280	115	407	152	536
2220	93	286	119	412	157	541
Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor

	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
2280	93	292	120	419	162	558
2340	93	297	120	426	163	563
2400	92	303	120	434	165	574
2460	94	311	122	446	170	581
2520	93	321	122	454	171	595
2580	94	330	124	461	171	602
2640	94	337	126	474	168	610
2700	95	345	131	481	176	616
2760	94	341	132	489	177	629
2820	93	349	132	493	186	638
2880	93	351	136	500	186	645
2940	94	356	136	517	191	656
3000	95	363	138	527	191	663
3060	95	368	139	536	193	672
3120	95	373	139	544	194	688
3180	94	381	141	558	194	697
3240	94	386	143	565	194	708
3300	96	392	144	574	192	716
3360	95	401	147	585	193	722
3420	96	408	152	596	199	730
3480	98	417	153	610	199	745
3540	99	423	155	627	204	753
3600	102	427	155	630	204	757

4. Tabel Perubahan Temperatur Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
0	34	30	34	30	34	30
60	49	46	75	71	89	85
120	50	52	81	72	94	91
180	56	56	84	74	98	98
240	63	59	90	77	108	106
300	63	65	94	77	110	109
360	67	71	94	83	114	113
420	70	72	95	88	115	117
480	71	72	95	91	115	120
540	79	77	95	96	122	124
600	81	86	97	102	123	129
660	81	91	97	107	128	132
720	84	97	97	110	128	137
780	84	106	97	114	132	139
840	84	107	97	118	133	144
900	84	107	100	118	133	147
960	86	108	100	123	137	153
1020	88	106	102	126	137	158
1080	87	107	101	127	138	159
1140	87	109	101	129	143	165
1200	88	109	102	131	143	171
1260	88	110	102	132	144	174
1320	88	111	104	136	143	179
1380	89	113	106	138	144	184
1440	89	116	110	143	147	188
1500	89	117	110	146	147	189
1560	91	120	110	151	151	197
1620	90	123	115	154	151	199
1680	90	125	116	159	155	204
1740	90	128	119	164	155	214
1800	91	128	119	167	156	221
1860	91	131	122	173	155	233
1920	92	136	123	186	156	247
1980	92	137	123	199	156	252
2040	94	142	126	216	160	268
2100	94	147	126	221	160	275
2160	94	149	126	237	160	288
2220	94	153	128	244	162	296
2280	94	157	128	253	162	304
2340	95	159	132	265	166	314

Waktu (s)	Temperatur (°C)					
	257 W		362 W		418 W	
	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor	<i>Cavity</i>	Reaktor
2400	95	164	132	272	167	328
2460	95	167	132	279	167	331
2520	95	172	136	288	170	347
2580	95	176	136	296	170	353
2640	96	184	140	303	170	365
2700	97	189	141	314	173	376
2760	96	192	141	327	174	383
2820	96	195	144	336	178	391
2880	95	200	144	344	178	415
2940	96	204	149	350	178	427
3000	97	211	152	358	181	432
3060	97	215	159	365	181	446
3120	97	221	158	376	183	451
3180	98	226	160	382	186	463
3240	98	231	162	389	186	473
3300	99	235	162	397	186	480
3360	99	240	163	405	191	488
3420	99	247	163	417	192	495
3480	100	252	165	421	192	507
3540	100	258	165	435	197	513
3600	101	265	165	442	197	522

5. Analisa dan Perhitungan

Pada penelitian ini memuat beberapa perhitungan untuk memperoleh hasil analisa karakteristik termal reaktor pirolisis. Perhitungan tersebut adalah sebagai berikut :

a. Laju Pemanasan Reaktor Pirolisis Limbah Sisa Makanan Kering

1) Daya *microwave* 257 W

Diketahui :

$$T_{awal} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$T_{akhir} = 427^{\circ}\text{C}$$

$$t = 60 \text{ menit}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{427^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{60 \text{ menit}}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = 6,61^{\circ}\text{C}/\text{menit}$$

2) Daya *microwave* 362 W

Diketahui :

$$T_{awal} = 31^{\circ}\text{C}$$

$$T_{akhir} = 630^{\circ}\text{C}$$

$$t = 60 \text{ menit}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{630^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{60 \text{ menit}}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = 10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$$

3) Daya *microwave* 418 W

Diketahui :

$$T_{\text{awal}} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{akhir}} = 757^{\circ}\text{C}$$

$$t = 60 \text{ menit}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{\text{akhir}} - T_{\text{awal}}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{757^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{60 \text{ menit}}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = 12,11^{\circ}\text{C}/\text{menit}$$

b. Laju Pemanasan Reaktor Pirolisis Limbah Sisa Makanan Basah

1) Daya *microwave* 257 W

Diketahui :

$$T_{\text{awal}} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{akhir}} = 265^{\circ}\text{C}$$

$$t = 60 \text{ menit}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{\text{akhir}} - T_{\text{awal}}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{265^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}}{60 \text{ menit}}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = 3,91^{\circ}\text{C}/\text{menit}$$

2) Daya *microwave* 362 W

Diketahui :

$$T_{\text{awal}} = 30^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{akhir}} = 442^{\circ}\text{C}$$

$$t = 60 \text{ menit}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{442^{\circ}C - 30^{\circ}C}{60 \text{ menit}}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = 6,82 \text{ }^{\circ}C/\text{menit}$$

4) Daya *microwave* 418 W

Diketahui :

$$T_{awal} = 30 \text{ }^{\circ}C$$

$$T_{akhir} = 522 \text{ }^{\circ}C$$

$$t = 60 \text{ menit}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{T_{akhir} - T_{awal}}{t}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = \frac{522^{\circ}C - 30^{\circ}C}{60 \text{ menit}}$$

$$\frac{\Delta T}{t} = 8,2 \text{ }^{\circ}C/\text{menit}$$

c. Daya Absorpsi dan Efisiensi Termal Limbah Sisa Makanan Kering

1) Daya *microwave* 257 W

Diketahui :

$$\rho = 333,3 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 1695 \text{ J/kg }^{\circ}C$$

$$T = 427 \text{ }^{\circ}C$$

$$T_{inlet} = 30 \text{ }^{\circ}C$$

$$V = 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$k = 0,042 \text{ W/m K}$$

$$\begin{aligned}
 hc &= 2,03 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\
 A &= 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\
 \sigma &= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \\
 \varepsilon &= 0,92 \\
 T_{\text{rerata}} &= 518 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan properti di atas, maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{abs}} &= \rho \cdot Cp \frac{(T - T_{\text{inlet}})}{t} V + h_c \cdot A(T - T_{\text{inlet}}) + \sigma \varepsilon A T^4 \\
 P_{\text{abs}} &= (333,3 \text{ kg/m}^3 \times 1695 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \frac{(427-30) ^\circ\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (2,03 \text{ W/m}^2 \text{ K} \times 8,1 \times \\
 &10^{-3} \text{ m}^2 (427 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (518 \text{ K})^4) \\
 P_{\text{abs}} &= 82,2 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Daya yang diserap oleh reaktor pada daya *microwave* 257 W sebesar 82,2 W.

Perolehan daya tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi termal reaktor.

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

Dimana P_{in} merupakan besar daya *microwave*.

$$\eta_p = \frac{82,2 \text{ W}}{257 \text{ W}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 31 \%$$

2) Daya *microwave* 362 W

Diketahui :

$$\begin{aligned}
 \rho &= 333,3 \text{ kg/m}^3 \\
 Cp &= 1695 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \\
 T &= 630 ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{\text{inlet}} &= 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \\
V &= 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \\
k &= 0,048 \text{ W/m K} \\
hc &= 2,31 \text{ W/m}^2 \text{ K} \\
A &= 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \\
\sigma &= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \\
\varepsilon &= 0,92 \\
T_{\text{rerata}} &= 636 \text{ K}
\end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan properti di atas, maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
P_{\text{abs}} &= \rho \cdot Cp \frac{(T - T_{\text{inlet}})}{t} V + h_c \cdot A(T - T_{\text{inlet}}) + \sigma \varepsilon A T^4 \\
P_{\text{abs}} &= (333,3 \text{ kg/m}^3 \times 1695 \text{ J/kg }^{\circ}\text{C} \frac{(630-30)^{\circ}\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (2,31 \text{ W/m}^2 \text{ K} \times 8,1 \times \\
&10^{-3} \text{ m}^2 (630 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (636 \text{ K})^4) \\
P_{\text{abs}} &= 146,2 \text{ W}
\end{aligned}$$

Daya yang diserap oleh reaktor pada daya *microwave* 362 W sebesar 146,2 W.

Perolehan daya tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi termal reaktor.

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

Dimana P_{in} merupakan besar daya *microwave*.

$$\eta_p = \frac{146,2 \text{ W}}{362 \text{ W}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 40 \%$$

3) Daya *microwave* 418 W

Diketahui :

ρ	= 333,3 kg/m ³
C_p	= 1695 J/kg °C
T	= 757 °C
T_{inlet}	= 30 °C
V	= 7,29 x 10 ⁻⁴ m ³
k	= 0,055 W/m K
h_c	= 2,66 W/m ² K
A	= 8,1 x 10 ⁻³ m ²
σ	= 5,669 x 10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
ε	= 0,92
T_{rerata}	= 738 K

Dengan mensubstitusikan properti di atas, maka diperoleh :

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

$$P_{abs} = (333,3 \text{ kg/m}^3 \times 1695 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \frac{(757-30) ^\circ\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (2,66 \text{ W/m}^2\text{K} \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (757 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (738 \text{ K})^4)$$

$$P_{abs} = 223,1 \text{ W}$$

Daya yang diserap oleh reaktor pada daya *microwave* 418 W sebesar 223,1 W.

Perolehan daya tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi termal reaktor.

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

Dimana P_{in} merupakan besar daya *microwave*.

$$\eta_p = \frac{223,1 \text{ W}}{418 \text{ W}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 53 \%$$

d. Daya Absorpsi dan Efisiensi Termal Limbah Sisa Makanan Basah

1) Daya *microwave* 257 W

Diketahui :

$$\rho = 545,5 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T = 265 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{inlet} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$k = 0,034 \text{ W/m K}$$

$$h_c = 1,64 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$A = 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$\varepsilon = 0,92$$

$$T_{rerata} = 415 \text{ K}$$

Dengan mensubstitusikan properti di atas, maka diperoleh :

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

$$P_{abs} = (545,5 \text{ kg/m}^3 \times 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \frac{(265-30)^\circ\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (1,64 \text{ W/m}^2 \text{ K} \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (265 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (415 \text{ K})^4)$$

$$P_{abs} = 70,9 \text{ W}$$

Daya yang diserap oleh reaktor pada daya *microwave* 257 W sebesar 70,9 W.

Perolehan daya tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi termal reaktor.

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

Dimana P_{in} merupakan besar daya *microwave*.

$$\eta_p = \frac{70,9 W}{257 W} \times 100\%$$

$$\eta_p = 27 \%$$

2) Daya *microwave* 362 W

Diketahui :

$$\rho = 545,5 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T = 442 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{inlet} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$k = 0,039 \text{ W/m K}$$

$$h_c = 1,88 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$A = 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$\varepsilon = 0,92$$

$$T_{rerata} = 486 \text{ K}$$

Dengan mensubstitusikan properti di atas, maka diperoleh :

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

$$P_{abs} = (545,5 \text{ kg/m}^3 \times 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \frac{(442-30) ^\circ\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (1,88 \text{ W/m}^2 \text{ K} \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (442 - 30) \text{ K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (486 \text{ K})^4)$$

$$P_{abs} = 126,6 \text{ W}$$

Daya yang diserap oleh reaktor pada daya *microwave* 362 W sebesar 126,6 W.

Perolehan daya tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi termal reaktor.

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

Dimana P_{in} merupakan besar daya *microwave*.

$$\eta_p = \frac{126,6 \text{ W}}{362 \text{ W}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 34 \%$$

3) Daya *microwave* 418 W

Diketahui :

$$\rho = 545,5 \text{ kg/m}^3$$

$$C_p = 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$$

$$T = 522 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{inlet} = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$V = 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$k = 0,043 \text{ W/m K}$$

$$h_c = 2,08 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$A = 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\sigma = 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$$

$$\varepsilon = 0,92$$

$$T_{rerata} = 535 \text{ K}$$

Dengan mensubstitusikan properti di atas, maka diperoleh :

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

$$P_{abs} = (545,5 \text{ kg/m}^3 \times 2130 \text{ J/kg } ^\circ\text{C} \frac{(522-30)^\circ\text{C}}{3600} 7,29 \times 10^{-4} \text{ m}^3) + (2,08 \text{ W/m}^2\text{K} \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 (522 - 30)\text{K}) + ((5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4) 0,92 \times 8,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \times (535 \text{ K})^4)$$

$$P_{abs} = 158,3 \text{ W}$$

Daya yang diserap oleh reaktor pada daya *microwave* 418 W sebesar 158,3 W.

Perolehan daya tersebut digunakan untuk menghitung efisiensi termal reaktor.

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

Dimana P_{in} merupakan besar daya *microwave*.

$$\eta_p = \frac{158,3 \text{ W}}{418 \text{ W}} \times 100\%$$

$$\eta_p = 37 \%$$

6. Surat Penetapan Dosen Pembimbing Skripsi


UNNES
KEPUTUSAN
DEKAN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
 Nomor: 872/ FT-UNNES /2016
 Tentang
PENETAPAN DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI/TUGAS AKHIR SEMESTER
GASAL/GENAP
TAHUN AKADEMIK 2015/2016

Menimbang : Bshwa untuk memperlancar mahasiswa Jurusan/Prodi Teknik Mesin/Teknik Mesin Fakultas Teknik membuat Skripsi/Tugas Akhir, maka perlu menetapkan Dosen-dosen Jurusan/Prodi Teknik Mesin/Teknik Mesin Fakultas Teknik UNNES untuk menjadi pembimbing.

Mengingat : 1. Undang-undang No.20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional (Tambahan Lembaran Negara RI No.4301, penjelasan atas Lembaran Negara RI Tahun 2003, Nomor 78)
 2. Peraturan Rektor No. 21 Tahun 2011 tentang Sistem Informasi Skripsi UNNES
 3. SK. Rektor UNNES No. 164/O/2004 tentang Pedoman penyusunan Skripsi/Tugas Akhir Mahasiswa Strata Satu (S1) UNNES.
 4. SK Rektor UNNES No. 162/O/2004 tentang penyelenggaraan Pendidikan UNNES;

Menimbang : Usulan Ketua Jurusan/Prodi Teknik Mesin/Teknik Mesin Tanggal 1 April 2016

MEMUTUSKAN

Menetapkan :
PERTAMA : Menunjuk dan menugaskan kepada:

1. Nama : Samsudin Anis, S.T., M.T.Ph.D.
 NIP : 197601012003121002
 Pangkat/Golongan : III/d
 Jabatan Akademik : Lektor
 Sebagai Pembimbing I

2. Nama : Drs. Wirawan Sumbodo, M.T.
 NIP : 196601051990021002
 Pangkat/Golongan : IV/b
 Jabatan Akademik : Lektor Kepala
 Sebagai Pembimbing II

Untuk membimbing mahasiswa penyusun skripsi/Tugas Akhir :
 Nama : YANUAR ADI KURNIAWAN
 NIM : 5212412065
 Jurusan/Prodi : Teknik Mesin/Teknik Mesin
 Topik : ANALISIS KARAKTERISTIK TERMAL REAKTOR GELOMBANG MIKRO UNTUK PYROLISIS BERBAHAN BAKU LIMBAH SISA MAKANAN

KEDUA : Keputusan ini mulai berlaku sejak tanggal ditetapkan.

Tembusan
 1. Pembantu Dekan Bidang Akademik
 2. Ketua Jurusan
 3. Petinggal

DITETAPKAN DI : SEMARANG
 PADA TANGGAL : 26 April 2016
 DEKAN

 Dr. Nur Ghidien, M.T.
 NIP. 196911301994031001


 5212412065
 FM-03-AKD-24/Rev. 02