

**SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA  
PROSES PIROLISIS DENGAN PERUBAHAN PANAS REAKSI  
(ENTALPI)**

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**FARIS SAPUTRA**  
**NIM. 0910623043 – 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2014**

## LEMBAR PERSETUJUAN

### SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA PROSES PIROLISIS DENGAN PERUBAHAN PANAS REAKSI (ENTALPI)

#### SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:  
**FARIS SAPUTRA**  
NIM. 0910623043 – 62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dr. Eng. Widya Wijavanti, ST., MT.**  
NIP. 19750802 199903 2 002

**Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.**  
NIP. 19710321 199802 1 001

## LEMBAR PENGESAHAN

### SIMULASI NUMERIK PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI PADA PROSES PIROLISIS DENGAN PERUBAHAN PANAS REAKSI (ENTALPI)

#### SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**FARIS SAPUTRA**  
NIM. 0910623043 – 62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 28 Januari 2014

**MAJELIS PENGUJI**

**Skripsi I**

**Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng, Ph.D.**  
NIP. 19590703 198303 1 002

**Skripsi II**

**Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.**  
NIP. 19720817 200003 1 001

**Skripsi III**

**Khairul Anam, ST., M.Sc.**  
NIP. 861127 06 3 1 0032

Mengetahui,  
**Ketua Jurusan Teknik Mesin**

**Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., MT.**  
NIP. 19740121 199903 1 001

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, atas segala limpahan rahmat-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Simulasi Numerik Perpindahan Panas Konduksi Pada Proses Pirolisis Dengan Perubahan Panas Reaksi (Entalpi)**”. Dalam pembuatan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

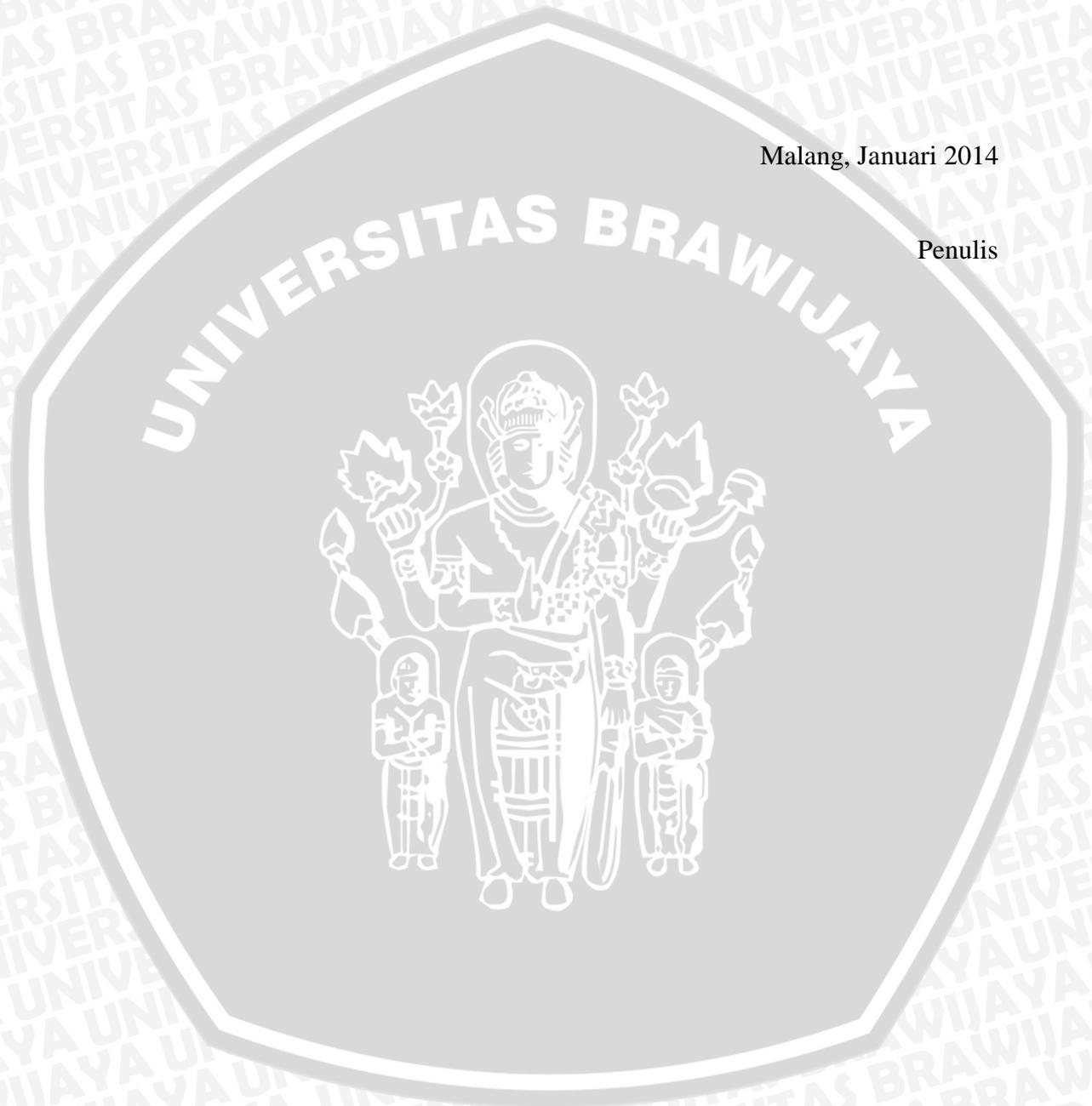
1. Bapak Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng., Dr.Eng., selaku Ketua Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Purnami, ST., MT., selaku Sekretaris Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
3. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan menyusun skripsi ini.
4. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan menyusun skripsi ini.
5. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi, Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya.
6. Bapak Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng., Dr.Eng., selaku Dosen Wali.
7. Seluruh Dosen Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi.
8. Seluruh Staf Pengajar yang saya hormati.
9. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
10. Kedua Orang Tua saya tercinta, Ayahanda Amiruddin dan Ibunda Yuniar Mulyani serta Adik saya tersayang Rahmatullah Bobby Saputra, kyai ucapkan terima kasih banyak atas doa dan bantuannya selama ini. Semoga Allah selalu melindungi kalian
11. Sahabat terbaik saya Bayu.S, Reza.A dan Jonas.S yang sangat membantu saya sehingga skripsi ini dapat selesai dan kekasih saya tersayang Aristya Widya Safitri, I Love You.
12. Seluruh sahabat KBMM Universitas Brawijaya khususnya Keluarga Besar BLACK MAMBA.
13. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

repository.ub.ac.id

Tiada gading yang tak retak, begitu juga halnya dengan skripsi ini yang masih banyak ditemukan kekurangan-kekurangan. Oleh sebab itu, penulis menerima masukan, saran, ataupun kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi masyarakat khususnya para akademisi.

Malang, Januari 2014

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	vii
<b>RINGKASAN</b> .....	viii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	5
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	5
2.2 Pirolisis .....	6
2.3 Pirolisis Biomassa.....	7
2.4 Proses Pirolisis pada Silinder.....	7
2.5 Perpindahan Panas .....	7
2.5.1 Pengertian Konduksi.....	8
2.5.2 Pengertian Konveksi .....	9
2.5.3 Pengertian Radiasi .....	10
2.6 Perpindahan Panas pada Koordinat Silinder.....	11
2.7 Perpindahan Panas Konduksi pada Keadaan <i>Transient</i> .....	12
2.8 <i>Boundary Conditions</i> (Kondisi Batas).....	13
2.9 <i>Finite Difference Method</i> .....	21
2.10 Hipotesa.....	23
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	24
3.1 Metode Penelitian .....	24
3.2 Tempat dan Waktu Simulasi.....	24
3.3 Langkah - langkah Simulasi .....	24

3.3.1	<i>Preprocessing</i> .....	24
3.3.1.1	Menentukan <i>domain</i> / geometri.....	24
3.3.1.2	<i>Mesh Generation</i> .....	26
3.3.1.3	Persamaan Atur .....	26
3.3.1.4	<i>Boundary Condition</i> .....	27
3.4	<i>Processing</i> .....	27
3.5	<i>Postprocessing</i> .....	27
3.6	Diagram Alir .....	30
 <b>BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN</b> .....		32
4.1	Asumsi dalam Bentuk 2D .....	32
4.2	<i>Preprocessing</i> .....	33
4.2.1	Menentukan <i>domain</i> / geometri .....	33
4.2.2	<i>Mesh Generation</i> .....	33
4.2.3	Persamaan Atur.....	34
4.2.4	<i>Boundary Conditions</i> .....	34
4.3	<i>Processing</i> .....	36
4.3.1	Diskritisasi Persamaan Atur.....	36
4.3.2	Penyelesaian Persamaan Terdiskritisasi .....	38
4.4	<i>Postprocessing</i> .....	40
4.4.1	Tampilan Hasil.....	40
 <b>BAB V PENUTUP</b> .....		45
5.1	Kesimpulan .....	45
5.2	Saran .....	45
 <b>DAFTAR PUSTAKA</b>		
<b>LAMPIRAN</b>		



## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1	Koordinat Silinder.....	12
Gambar 2.2	Perpindahan panas konduksi transien pada silinder berlubang.....	12
Gambar 2.3	Kondisi batas pada dinding pesawat .....	14
Gambar 2.4	Skema rumus <i>finite difference</i> pada noda batas kiri pada pesawat.....	15
Gambar 2.5	Skema rumus <i>finite difference</i> kombinasi konveksi radiasi.....	17
Gambar 2.6	Skema rumus <i>finite difference</i> kondisi batas antarmuka medium A dan B .....	18
Gambar 3.1	(a) Asumsi 2D; (b) Analisa kondisi .....	25
Gambar 3.2	Grafik temperatur rata - rata terhadap waktu .....	27
Gambar 3.3	(a) <i>Mesh grid</i> t = 0; (b) <i>Mesh grid</i> t = 30 m; (c) <i>Mesh grid</i> t = 1 jam; (d) <i>Mesh grid</i> t = 2 jam; (e) <i>Mesh grid</i> t = 2.5 jam; (f) <i>Mesh grid</i> t = 3 jam.....	29
Gambar 3.4	Diagram alir .....	30-31
Gambar 4.1	Asumsi 2D .....	32
Gambar 4.2	Model perpindahan panas .....	32
Gambar 4.3	Domain / geometri .....	33
Gambar 4.4	<i>Mesh generation</i> .....	34
Gambar 4.5	<i>Boundary conditions</i> .....	35
Gambar 4.6	Rumus tiap titik di <i>mesh</i> .....	38
Gambar 4.7	Grafik temperatur rata - rata terhadap waktu .....	40
Gambar 4.8	(a) <i>Mesh grid</i> t = 0; (b) <i>Mesh grid</i> t = 30 m; (c) <i>Mesh grid</i> t = 1 jam; (d) <i>Mesh grid</i> t = 2 jam; (e) <i>Mesh grid</i> t = 2.5 jam; (f) <i>Mesh grid</i> t = 3 jam (semua tanpa perubahan entalpi) .....	41-42
Gambar 4.9	Grafik temperatur rata - rata terhadap waktu (perubahan entalpi 100) .....	42
Gambar 4.10	(a) <i>Mesh grid</i> t = 0; (b) <i>Mesh grid</i> t = 30 m; (c) <i>Mesh grid</i> t = 1 jam; (d) <i>Mesh grid</i> t = 2 jam; (e) <i>Mesh grid</i> t = 2.5 jam; (f) <i>Mesh grid</i> t = 3 jam (dengan perubahan entalpi 100).....	43-44



## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 1.1	Porsi Konsumsi Minyak Solar Sektor Transportasi 1995 - 2010	1



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1.	Diskritisasi persamaan atur
Lampiran 2.	<i>Coding</i>
Lampiran 3.	Langkah-langkah simulasi



## RINGKASAN

Faris Saputra, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Januari 2014, Simulasi Numerik Perpindahan Panas Konduksi Pada Proses Pirolisis Dengan Perubahan Panas Reaksi (Entalpi) , Dosen Pembimbing: Widya Wijayanti dan Agung Widodo.

Dengan keterbatasan ketersediaan bahan bakar fosil dan keperluan akan bahan bakar *renewable* yang semakin meningkat, maka pengembangan energi alternatif dirasa sangat diperlukan. Oleh karena itu para peneliti membuat berbagai macam metode, salah satunya adalah proses pirolisis. Pirolisis adalah proses dekomposisi bahan organik melalui proses pemanasan tanpa melibatkan oksigen. Pada proses pirolisis terjadi perpindahan panas dan terjadi perubahan reaksi kimia. Untuk mengetahui distribusi temperatur pada proses pirolisis, dilakukan simulasi secara numerik dengan membandingkan proses pirolisis tanpa dan dengan adanya entalpi. Entalpi yang dibandingkan dalam simulasi ini adalah 0 dan 100.

Sedangkan parameter lainnya seperti massa jenis, kalor jenis, konduktivitas termal dan koefisien konveksi dianggap konstan. Metode penelitian yang digunakan pada simulasi ini menggunakan metode penelitian eksperimental semu. Langkah-langkah simulasi pada penelitian ini dibagi menjadi 3 tahap yaitu *preprocessing*, *processing*, *postprocessing*. Untuk proses *preprocessing* terdiri dari beberapa langkah diantaranya menentukan domain / geometri, *mesh generation*, persamaan atur rumus perpindahan panas konduksi pada silinder dalam keadaan transien yaitu  $\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$  dengan penambahan panas reaksi 0 dan 100 dan *boundary conditions* isolasi, konveksi, dan konduksi. Pada tahap *processing* terdiri dari diskritisasi persamaan atur dan penyelesaian persamaan terdiskritisasi. Pada tahap yang terakhir yaitu *postprocessing* merupakan tampilan hasil dari simulasi perpindahan panas pada proses pirolisis yang dilakukan.

Dari proses simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa perbandingan distribusi temperatur pada proses pirolisis tanpa dan dengan perubahan panas reaksi (entalpi) dengan nilai 100, mempunyai peningkatan temperatur rata-rata yang sangat signifikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa perubahan panas reaksi (entalpi) memiliki pengaruh terhadap distribusi temperatur pada proses pirolisis.

**Keywords** : Pirolisis, perpindahan panas, *finite difference*.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Banyak negara, terutama Indonesia mengalami masalah kekurangan bahan bakar minyak (dari bahan bakar fosil) untuk negaranya sendiri. Kebutuhan bahan bakar untuk mesin diesel di Indonesia tiap tahunnya semakin meningkat seiring dengan pertambahan jumlah mesin industri dan jumlah kendaraan bermesin diesel. Dengan semakin terbatasnya cadangan minyak bumi, maka perlu dicari alternatif sumber energi. Untuk konsumsi minyak solar di Indonesia dapat dilihat pada tabel 1.1.

**Tabel 1.1 Porsi Konsumsi Minyak Solar Sektor Transportasi 1995-2010**

Tahun		1995	2000	2005	2010
Transportasi	Milyar liter	6,91	9,69	13,12	18,14
Total	Milyar liter	15,84	21,39	27,05	34,71
Porsi	%	43,62	45,29	48,50	52,27

Jumlah minyak solar yang diimpor adalah :

- 1999 : 5 milyar liter atau 25% kebutuhan nasional
- 2001 : 8 milyar liter atau 34% kebutuhan nasional
- 2006 : 15 milyar liter atau 50% kebutuhan nasional asumsi tak ada pembangunan kilang baru ( Mescha.D.dkk, 2007)

Apalagi akhir - akhir ini dunia sangat prihatin terhadap pemanasan global maupun polusi udara, penggunaan energi berbasis bahan fosil (minyak tanah, batu bara) sangat merugikan kepada manusia, misalnya dapat memberikan emisi nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), belerang oksida (SO<sub>x</sub>), CO<sub>2</sub>, partikel - partikel halus maupun logam - logam berat (Gupta. R.B dan Dermibas. A, 2010), oleh karena itu sangat dibutuhkan energi alternatif seperti contoh, mengubah batubara ke bentuk bahan bakar yang lebih menyenangkan dengan mengubah menjadi bentuk gas (teknologi gasifikasi), cair (teknologi likuifaksi), bahan bakar padat tak berasap (teknologi *briquette*) .

Berdasarkan pengukuran satu abad yang lampau suhu udara global telah naik 0,56°C. Kenaikan ini disebut dengan perubahan iklim global ataupun pemanasan global. Gas CO<sub>2</sub> yang terdapat diudara memberikan pemantulan pemanasan ke bumi sehingga suhu bumi akan naik dan diprediksi suhu akan naik 1,5°C - 5,8°C. Pengaruh pemanasan global ini berdampak pada perpindahan daerah pertanian, pergeseran daerah penyakit tropis, pencairan es di kutub maupun

naiknya permukaan air laut 9 cm - 88 cm pada tahun 2040 karena itu perlu penggunaan bahan bakar yang bersifat *renewable*. Karena itu disebut bahan yang tak terbarukan (*unrenewable*). Sumber energi seperti minyak atau lemak, dapat dipakai untuk bahan bakar yang lebih mudah berubah menjadi lemak atau minyak kembali. CO<sub>2</sub> yang dihasilkan lebih mudah berubah menjadi lemak atau minyak kembali, melalui fotosintesis. Karena itu kedua bahan itu digolongkan dalam energi *renewable* (Gupta. R.B dan Dermibas. A, 2010).

Dengan keterbatasan ketersediaan bahan bakar fosil dan keperluan akan bahan bakar *renewable* yang semakin meningkat, maka pengembangan energi alternatif dirasa sangat diperlukan. Oleh karena itu para peneliti membuat berbagai macam metode pembuatan bahan bakar alternatif, salah satunya adalah proses pirolisis. Pirolisis adalah proses dekomposisi bahan organik melalui proses pemanasan tanpa melibatkan oksigen. Bahan yang biasa digunakan untuk proses pirolisis adalah batu bara, limbah manusia dan hewan, sisa makanan, kertas, plastik, dan biomassa. Komposisi kimia bahan tersebut berubah ketika dilakukan pemanasan dalam keadaan tanpa adanya oksigen. Produk yang dihasilkan dari proses pirolisis berupa arang (karbon padat), *tar* (minyak), dan gas permanen yang meliputi metana, hidrogen, karbon monoksida dan karbon dioksida.

Bahan yang biasa digunakan untuk proses pirolisis adalah batu bara, limbah manusia dan hewan, sisa makanan, kertas, plastik, dan biomassa. Biomassa, dalam industri produksi energi, merujuk pada bahan biologis yang hidup atau baru mati yang dapat digunakan sebagai sumber bahan bakar atau untuk produksi industrial. Umumnya biomassa merujuk pada materi tumbuhan yang dipelihara untuk digunakan sebagai *biofuel*. Biomassa dapat pula meliputi limbah terbiodegradasi yang dapat dibakar sebagai bahan bakar.

Pada proses pirolisis terjadi perpindahan panas dan terjadi perubahan panas reaksi. Sumber bahan bakar dari pirolisis ini berasal dari sumber daya yang terbarukan seperti *biomass* / tumbuhan. Di samping sumber daya yang terbarukan, hasil dari pirolisis ini menghasilkan zat yang ramah lingkungan namun memiliki manfaat yang banyak. Proses pirolisis ini menghasilkan produk berupa asap cair, *tar*, arang dan minyak atsiri (IPB. 2006).

Perpindahan panas yang terjadi di dalam proses pirolisis bisa berupa perpindahan konduksi, konveksi, dan radiasi, namun mayoritas perpindahan panas yang terjadi adalah secara konduksi. Sebagai contoh, proses pirolisis yang menggunakan serbuk kayu, serbuk kayu digunakan sebagai bahan yang akan diubah menjadi *char*, *tar*, *gas*. Serbuk kayu tersebut akan

mengalami perpindahan panas konduksi dari *heater* ke serbuk kayu. Proses perpindahan panas konveksi terjadi pada batas sistem dari senyawa  $N_2$  yang dialirkan menuju *furnace* sehingga mencegah serbuk kayu untuk tidak terbakar. Untuk perpindahan panas radiasi itu sendiri terjadi pada tabung yang mendapatkan panas dari *heater* yang tidak menyentuh tabung secara langsung. Oleh karena itu, perlu dianalisa secara numerik untuk mengetahui distribusi temperatur pada prosesnya. Karena adanya proses pirolisis yang menimbulkan perubahan  $\Delta H$  akibat perubahan panas reaksi serbuk kayu, untuk itu perlu dilakukan pengukuran  $\Delta H$  pada proses pirolisis. Namun  $\Delta H$  pada simulasi ini menggunakan nilai  $\Delta H$  dari beberapa peneliti (Koufopanou, 1991; Tanoue, 2010; Widya, 2011), sehingga belum bisa dilakukan validasi hasil simulasi.

Dengan perkembangan teknologi saat ini, simulasi numerik dapat dilakukan untuk memprediksi pengaruh  $\Delta H$  pada distribusi temperatur yang terjadi pada proses pirolisis, untuk memprediksi adanya perubahan panas reaksi ( $\Delta H$ ) atau tanpa  $\Delta H$  pada proses pirolisis itu sendiri.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat diambil rumusan masalah sebagai berikut:

Bagaimana distribusi temperatur pada perpindahan panas konduksi yang terjadi pada proses pirolisis tanpa dan dengan perubahan panas reaksi (entalpi pirolisis) secara transien.

## 1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Ditinjau secara dua dimensi.
2. Menggunakan pemodelan pada piroliser.
3. Dilakukan secara simulasi.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan skripsi ini adalah untuk mengetahui proses perpindahan panas yang terjadi pada proses pirolisis, apakah proses pirolisis tersebut sangat dipengaruhi oleh panas reaksi (entalpi).

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat antara lain :

1. Mampu menerapkan teori – teori yang didapat selama perkuliahan terutama mengenai konduksi panas transien dua dimensi.
2. Memberikan wawasan tentang perpindahan panas konduksi melalui simulasi numerik, agar dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.
3. Mengetahui perubahan reaksi kimia yang terjadi pada proses pirolisis.
4. Menambah wawasan tentang cara mengetahui titik pada permukaan silinder dengan menggunakan simulasi numerik.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Novan, 2008 meneliti tentang konduksi panas pada lempeng baja silindris yang berinteraksi dengan laser dengan metode studi model numerik. Penelitian dilakukan dengan membentuk suatu model numerik untuk mensimulasikan distribusi temperatur dalam bahan, memprediksi bagian bahan yang dipengaruhi panas, sehingga dapat memprediksi kedalaman lapisan yang mengeras dalam proses LTH. Profil temperatur yang dihasilkan dari model numerik ini dapat menggambarkan bagaimana proses transfer panas yang terjadi dalam bahan. Model ini dibuat berdasarkan metode *finite difference* yang dikodekan dalam program FORTRAN dan akan dibandingkan dengan solusi analitis dari literatur yang didapat dengan menggunakan MAPLE. Hasil penelitiannya secara numerik hampir sesuai dengan analitis dalam hal temperatur maksimum yang dicapai yaitu  $645^{\circ}\text{C}$  -  $660^{\circ}\text{C}$ . Akan tetapi pada daerah pendinginan ada ketidaksesuaian antara hasil numerik dengan analitis sekitar  $50\text{-}60^{\circ}\text{C}$  kearah 1 detik. Beberapa langkah diambil untuk memeriksa masalah ini, yaitu dengan menyesuaikan besarnya penambahan waktu (*time step*) dan ukuran jala (*mesh size*). Pada awalnya ukuran jala (*mesh size*) yang digunakan yaitu  $61 \times 61$  titik (atau  $60 \times 60$  jarak antar titik). Kemudian dengan meningkatkan resolusi data, digunakan ukuran jala sebesar  $121 \times 121$  atau dua kali semula dan tetap tidak menghasilkan perubahan.

Wijayanti, dkk (2010) melakukan percobaan tentang simulasi numerik pada proses pirolisis biomassa dengan penambahan *trial and error* nilai *enthalpy* yang merupakan nilai kalor yang dihasilkan dengan adanya perubahan panas pada reaksi kimianya. Terutama kepadatan pada  $T > 623 \text{ K}$  akan menjadi sekitar 60% dari suhu kamar. Selanjutnya, tentu saja waktu rata-rata suhu di lapisan biomassa dapat direproduksi oleh simulasi numerik dari konduksi panas melalui pirolisis. Yang termasuk dalam perubahan kepadatan dan perubahan permukaan biomassa oleh reduksi volume.

## 2.2 Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa melibatkan oksigen. Bahan yang biasa digunakan untuk proses pirolisis adalah batu bara, limbah manusia dan hewan, sisa makanan, kertas, plastik, dan biomassa. Jumlah energi yang dilepaskan pada proses pembakaran dinyatakan sebagai entalpi pembakaran yang merupakan beda entalpi antara produk dan reaktan dari proses pembakaran sempurna. Entalpi pembakaran ini dapat dinyatakan sebagai *Higher Heating Value* (HHV) atau *Lower Heating Value* (LHV). HHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam wujud cair sedangkan LHV diperoleh ketika seluruh air hasil pembakaran dalam bentuk uap. Pada umumnya pembakaran tidak menggunakan oksigen murni melainkan memanfaatkan oksigen yang ada di udara. Jumlah udara minimum yang diperlukan untuk menghasilkan pembakaran lengkap disebut sebagai jumlah udara teoritis (atau stoikiometrik). Akan tetapi pada kenyataannya untuk pembakaran lengkap udara yang dibutuhkan melebihi jumlah udara teoritis. Kelebihan udara dari jumlah udara teoritis disebut sebagai *excess air* yang umumnya dinyatakan dalam persen. Parameter yang sering digunakan untuk mengkuantifikasi jumlah udara dan bahan bakar pada proses pembakaran tertentu adalah rasio udara-bahan bakar. Apabila pembakaran lengkap terjadi ketika jumlah udara sama dengan jumlah udara teoritis maka pembakaran disebut sebagai pembakaran sempurna.

Dalam penelitian ini ingin mengetahui proses perpindahan panas yang terjadi pada proses pirolisis, apakah proses pirolisis tersebut sangat dipengaruhi oleh reaksi kimianya. Karena proses perpindahan panas, secara teoritis perhitungan perpindahan panas tidak melibatkan pengaruh entalpi. Pada kenyataannya, perubahan entalpi itu selalu terjadi, sehingga mempengaruhi distribusi panas itu sendiri.  $\Delta H$  pada proses pirolisis itu sendiri harus dilakukan dengan pengukuran. Simulasi ini untuk memprediksi distribusi temperatur pada proses pirolisis dengan adanya perubahan panas reaksi dengan  $\Delta H$  dan tanpa  $\Delta H$ .

- *Slow Pyrolysis*

*Slow pyrolysis* dicirikan dengan laju pemanasan lambat, temperatur kecil, dan waktu pemanasan yang lama. Laju pemanasan yang digunakan adalah kurang dari  $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ . Produk utama dari *slow pyrolysis* adalah *char*.

Produk-produk *Non-combustible*, seperti  $\text{CO}_2$ , senyawa organik, dan uap air, dihilangkan pada temperatur antara  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $200^{\circ}\text{C}$ . Di atas temperatur  $200^{\circ}\text{C}$ , terjadi pemecahan struktur

komponen bahan organik menjadi gas dengan massa molekul yang rendah (*volatile*) dan char karbon. Pada temperature 500 °C semua *volatile* hilang, yang tersisa adalah *char* (Beall & Eickner, 1970).

### 2.3 Pirolisis Biomassa

Selulosa, hemiselulosa, dan lignin merupakan komponen utama dari biomassa, yang memiliki properties yang berbeda. Hemiselulosa adalah konstituen yang paling reaktif dan lignin sebaliknya (Probstein dan Hicks, 1982). Pirolisis biomassa keseluruhan dapat digambarkan dalam hal perilaku komponen-komponen ini. Laju reaksi, produk, dan perilaku termal lainnya dari pirolisis biomassa dianggap sebagai kombinasi dari perilaku komponen utamanya.

### 2.4 Proses Pirolisis pada Silinder

Proses pirolisis pada silinder adalah proses pirolisis yang menggunakan media tabung sebagai tempat untuk melakukan proses pirolisis. Untuk material yang dipakai sebagai proses pirolisis di sini adalah serbuk kayu. Serbuk kayu yang ada di dalam *furnace* dimasukkan ke dalam piroliser sebagai alat pemanas. Di situ serbuk kayu akan dibuat berubah bentuk menjadi *char*, *tar*, dan gas tergantung kebutuhan penelitian. Pada silinder akan diberi perlakuan panas konduksi, konveksi, radiasi. Untuk perpindahan panas konduksi terjadi pada serbuk kayu yang ada pada silinder yang mengalirkan panas menuju silinder. Perpindahan panas konveksi didapat melalui zat  $N_2$  yang dialirkan di dalam piroliser. Proses perpindahan panas radiasi adalah panas dari *heater* yang menuju silinder secara tidak langsung. Itulah yang disebut proses pirolisis yang terjadi pada silinder.

### 2.5 Perpindahan Panas

Perpindahan panas (*heat transfer*) adalah ilmu yang meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur di antara benda atau material. Dari hukum termodinamika yang telah diketahui bahwa energi yang dipindahkan itu dinamakan energi panas. Ilmu perpindahan panas tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi panas berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga untuk meramalkan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi – kondisi tertentu. Istilah – istilah yang digunakan untuk menyatakan tiga modulus perpindahan panas antara lain, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Solusi dari masalah yang

melibatkan konduksi panas dalam padatan dapat disederhanakan dengan solusi dari persamaan diferensial tunggal, persamaan konduksi panas. Persamaan dapat diturunkan dengan membuat keseimbangan energi panas pada elemen volume diferensial dalam padatan. Konduksi akan terjadi jika terdapat gradien suhu dalam media padat (atau stasioner cairan). Energi ditransfer dari energi berlebih menuju molekul berenergi kurang ketika molekul di dekatnya bercampur. Aliran panas konduktif terjadi pada arah suhu yang menurun karena suhu yang lebih tinggi berhubungan dengan energi molekul yang lebih tinggi.

### 2.5.1 Pengertian Konduksi

Konduksi adalah transfer energi dari partikel-partikel yang lebih energik dari zat untuk mendekati partikel yang kurang energi hasil dari interaksi antara partikel. Konduksi dapat berlangsung di padatan, cairan atau gas. Dalam gas dan cairan, konduksi adalah karena tabrakan dan difusi molekul selama gerakan acak mereka. Dalam padatan, itu adalah karena kombinasi dari getaran molekul-molekul dalam kisi-kisi dan transportasi energi oleh elektron bebas. Kaleng minuman dingin di ruangan yang hangat, misalnya, akhirnya menghangat sampai suhu kamar karena transfer panas dari ruang minum melalui aluminium dapat konduksi.

Tingkat konduksi panas melalui media tergantung pada geometri media, ketebalannya dan material medium, serta perbedaan suhu di media. Kita tahu bahwa pembungkus tangki air panas dengan wol kaca (bahan isolasi) mengurangi tingkat kehilangan panas dari tangki. Yang tebal isolasi, semakin kecil kehilangan panas. Kita juga tahu bahwa tangki air panas akan kehilangan panas yang lebih tinggi ketika suhu kamar perumahan tangki diturunkan. Lebih lanjut, semakin besar tangki, semakin besar wilayah permukaan dan dengan demikian tingkat panas kerugian. Untuk rumus konduksi dapat ditunjukkan dengan rumus :

$$\text{Rata - rata konduksi panas} \propto \frac{(\text{Area})(\text{Perbedaan Temperatur})}{\text{Ketebalan}} \quad (\text{Cengel,2002 ; 18}) \quad (2-1)$$

atau,

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W}) \quad (\text{Cengel,2002 ; 18}) \quad (2-2)$$

dimana konstan proporsionalitas  $k$  adalah konduktivitas termal bahan, yang merupakan ukuran kemampuan bahan untuk melakukan panas. Dalam kasus membatasi  $\Delta x \Rightarrow 0$ , persamaan di atas disederhanakan ke bentuk diferensial.

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (Cengel, 2002 ; 18) \quad (2-3)$$

Dimana :

$Q$  = Laju perpindahan panas konduksi (Watt)

$k$  = Konduktivitas termal bahan (Watt/m  $^{\circ}C$ )

$A$  = Luas penampang pada posisi normal arah perpindahan panas ( $m^2$ )

$\Delta T$  = Beda temperatur pada penampang ( $^{\circ}C$ )

$\Delta X$  = Tebal material (m)

## 2.5.2 Pengertian Konveksi

Konveksi adalah modus transfer energi antara permukaan padat dan berdekatan cairan atau gas yang bergerak, dan melibatkan gabungan efek dari gerakan konduksi dan cairan. Semakin cepat gerakan fluida, semakin besar perpindahan panas konveksi. Dalam ketiadaan massal setiap pergerakan fluida, perpindahan panas antara permukaan padat dan cairan berdekatan adalah murni konduksi. Kehadiran massal gerakan cairan meningkatkan perpindahan panas antara permukaan padat dan cairan, tetapi juga menyulitkan penentuan kecepatan perpindahan panas.

Proses perpindahan panas yang melibatkan perubahan fase cairan juga dianggap menjadi konveksi karena pergerakan fluida yang disebabkan selama proses, seperti munculnya gelembung uap selama perebusan atau kejatuhan cair tetesan selama kondensasi. Meskipun kompleksitas konveksi, laju perpindahan panas konveksi diamati untuk menjadi pembanding perbedaan suhu, dan dinyatakan oleh **hukum pendinginan Newton** sebagai

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (W) \quad (Cengel, 2002 ; 26) \quad (2-4)$$

Dimana :

$Q$  = kalor yang dipindahkan (joule)

$h$  = koefisien konveksi ( $W/m^2K$ )

$A$  = luas penampang melintang ( $m^2$ )

$T_s$  = Suhu sekitar ( $^{\circ}C$ )

$T_{\infty}$  = Suhu Ambient ( $^{\circ}C$ )

dimana koefisien  $h$  perpindahan panas konveksi  $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$  atau  $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^{\circ}F$  seperti luas permukaan melalui perpindahan panas konveksi yang berlangsung,  $T_s$  adalah suhu permukaan, dan  $T_{\infty}$  adalah temperatur cairan yang cukup jauh dari permukaan. Perhatikan bahwa pada permukaan, suhu fluida sama dengan suhu permukaan padat.

### 2.5.3 Pengertian Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh materi dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau foton) sebagai hasil dari perubahan dalam konfigurasi elektronik Atom atau molekul. Tidak seperti konduksi dan konveksi, perpindahan energi oleh radiasi tidak memerlukan kehadiran media intervensi. Pada kenyataannya, transfer energi oleh radiasi tercepat (pada kecepatan cahaya) dan itu tidak terpengaruh dalam ruang hampa. Ini adalah bagaimana energi matahari mencapai bumi.

Tingkat maksimum radiasi yang dapat dipancarkan dari permukaan pada suhu absolut  $T_s$  (dalam K atau R) diberikan oleh hukum **Stefan-Boltzmann** sebagai

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \quad (Cengel,2002 ; 28) \quad (2-5)$$

dimana  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$  atau  $0.1714 \times 10^{-8} Btu/h \cdot ft^2 \cdot R^4$  adalah Stefan Boltzmann konstan. Permukaan ideal yang memancarkan radiasi pada tingkat maksimum ini disebut *blackbody*, dan radiasi yang dipancarkan oleh *blackbody* disebut *blackbody* radiasi. Radiasi yang dipancarkan oleh semua permukaan yang nyata adalah kurang dari radiasi yang dipancarkan oleh *blackbody* pada suhu yang sama, dan dinyatakan sebagai

$$\dot{Q}_{emit} = \sigma \epsilon A_s T_s^4 \quad (W) \quad (Cengel,2002 ; 28) \quad (2-6)$$

Dimana :

$Q$  = kalor yang dialirkan (J)

$A$  = luas ( $m^2$ ), luas permukaan lingkaran =  $4 \cdot \pi \cdot r^2$

$T$  = suhu (K)

$\varepsilon$  = emisivitas benda (tanpa satuan)

$\sigma$  = *Stefan – Boltzmann* ( $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ )

dimana  $\varepsilon$  adalah emisivitas dari permukaan. Sifat emisivitas, bernilai sekitar  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , adalah ukuran permukaan yang sangat mendekati *blackbody* dengan  $\varepsilon = 1$ .

## 2.6 Perpindahan Panas pada Koordinat Silinder

Persamaan umum konduksi panas dalam koordinat silinder dapat diperoleh dari keseimbangan energi pada elemen volume dalam koordinat silinder,

ditunjukkan pada gambar dibawah, dengan mengikuti langkah-langkah saja dijelaskan bahwa:

$$x = r \cos \phi, y = r \sin \phi, \text{ dan } z = z$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{e}_{gen} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

(Cengel, 2002 ; 76)

(2-7)

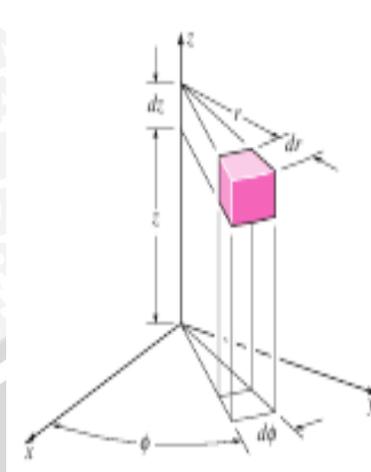
$\rho$  = massa jenis ( $kg/m^3$ )

$C_p$  = kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan ( $J/Kg \cdot ^\circ C$ )

$k$  = konduktivitas termal ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

$T$  = temperatur ( $^\circ C$ )

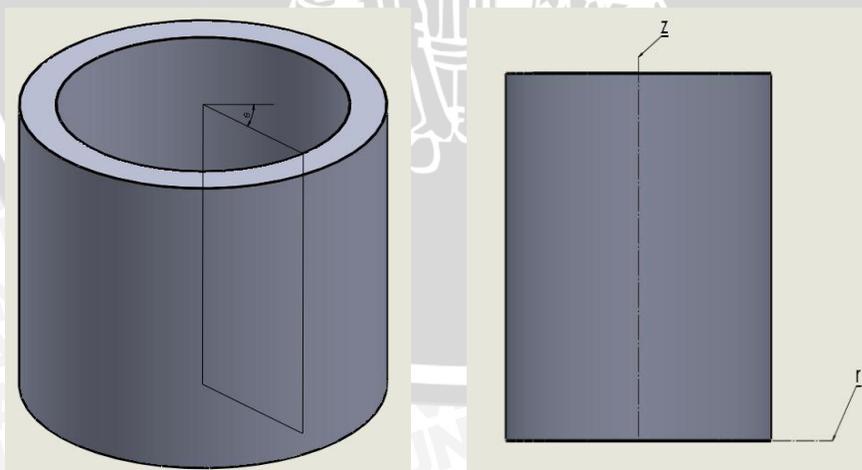
$t$  = waktu (s)



Gambar 2.1 Koordinat Silinder  
Sumber : Cengel, 2002 ; 76

## 2.7 Perpindahan Panas Konduksi pada Keadaan *Transient*

Perpindahan panas konduksi pada keadaan transien terjadi ketika suhu dalam suatu objek berubah sebagai fungsi waktu. Pada piroliser yang digunakan untuk proses pirolisis serbuk kayu pada penelitian terdapat wadah berbentuk silinder dan terjadi perpindahan konduksi secara transien, karena itulah dalam proses pemecahan masalahnya menggunakan teori yang berkaitan dengan perpindahan panas konduksi transien pada silinder yang berlubang seperti yang terlihat pada Gambar 2.2 berikut ini:



Gambar 2.2 Perpindahan Panas konduksi transien pada silinder berlubang  
Sumber : Arsip Pribadi

Dari gambar 2.2 diatas dapat dilihat bahwasanya perpindahan panas terjadi pada silinder berlubang 3 dimensi. Pada gambar terlihat bahwa selain sumbu z dan r, pada silinder berlubang tersebut terdapat sudut  $\theta$ . Namun untuk mempermudah proses perhitungannya dan pemecahannya, sudut  $\theta$  diabaikan dan bernilai nol sehingga nantinya dalam pemecahannya, perpindahan panas konduksi transien pada silinder berlubang dapat dicari dengan rumus :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( kr \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( kr \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g \quad (2-8)$$

(Cengel,2002 ; 76)

Dimana :

$\rho$  = massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_p$  = kapasitas panas spesifik pada tekanan konstan ( $\text{J/Kg}^\circ\text{C}$ )

$k$  = konduktivitas termal ( $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )

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

$t$  = waktu (s)

## 2.8 *Boundary Conditions (Kondisi Batas)*

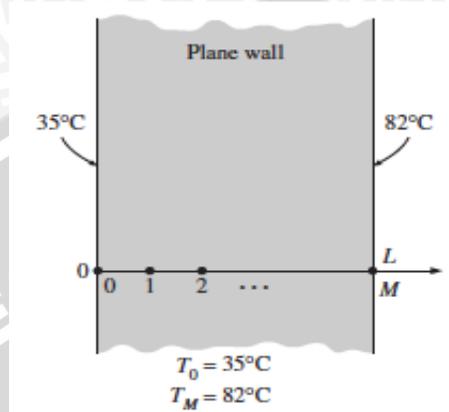
Kondisi batas adalah suatu kondisi yang diperlukan untuk menyelesaikan semua atau bagian dari batas wilayah pada satu set persamaan diferensial yang harus diselesaikan. Kondisi batas yang paling sering ditemui dalam praktek yang ditentukan suhu, ditentukan fluks panas, konveksi, dan kondisi batas radiasi, dan di sini kita mengembangkan formulasi beda hingga bagi mereka untuk kasus steady satu dimensi konduksi panas di dinding pesawat ketebalan  $L$  sebagai contoh. Jumlah simpul di permukaan kiri di  $x = 0$  adalah 0, dan tepat pada permukaan kanan pada  $x = L$  itu adalah  $M$ . Perhatikan bahwa lebar dari elemen volume untuk kedua simpul batas adalah  $\Delta x/2$ .

$$T(0) = T_0 = \text{Nilai spesifik}$$

$$T(L) = T_M = \text{Nilai spesifik} \quad (2-9)$$

(Cengel,2002 ; 274)

Kondisi batas yang ditentukan adalah kondisi batas sederhana untuk diselesaikan. Untuk perpindahan panas satu dimensi melalui dinding pesawat ketebalan  $L$ , kondisi batas yang ditentukan suhu pada kedua sisi kiri dan kanan permukaan dapat dinyatakan sebagai gambar di bawah ini



Gambar 2.3 Kondisi batas pada dinding pesawat  
Sumber : Cengel, 2002 ; 275

Di mana  $T_0$  dan  $T_m$  adalah suhu tertentu pada permukaan pada  $x = 0$  dan  $x = L$ , masing-masing. Oleh karena itu, kondisi batas suhu yang ditentukan digabungkan dengan hanya menetapkan suhu permukaan diberikan kepada node batas. Kita tidak perlu menulis sebuah keseimbangan energi dalam hal ini kecuali kita memutuskan untuk menentukan laju perpindahan panas ke dalam atau keluar dari medium setelah suhu di node interior ditentukan. Ketika kondisi batas lain seperti fluks panas tertentu, kondisi konveksi, radiasi, atau kombinasi konveksi dan radiasi ditetapkan pada batas, persamaan beda hingga untuk node pada batas yang diperoleh dengan menulis keseimbangan energi pada elemen volume pada saat itu batas. Keseimbangan energi lagi dinyatakan sebagai :

$$\sum_{\text{semua sist}} \dot{Q} + \dot{G}_{\text{element}} = 0$$

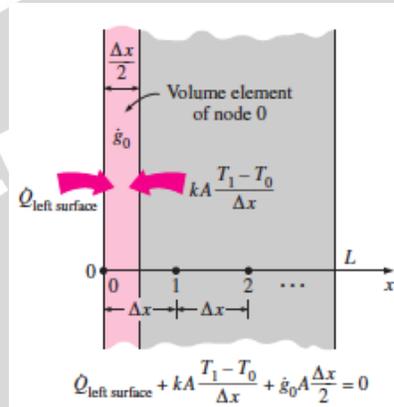
(Cengel, 2002 ; 275) (2-10)

Untuk transfer panas dalam kondisi stabil. Sekali lagi kita menganggap semua perpindahan panas menjadi ke dalam elemen volume dari semua permukaan untuk kenyamanan dalam perumusan, kecuali untuk fluks panas tertentu karena arahnya sudah ditentukan. Ditentukan fluks panas diambil untuk menjadi kuantitas positif jika ke dalam medium dan kuantitas negatif jika

keluar dari medium. Kemudian formulasi beda hingga pada node  $m = 0$  (pada batas kiri di mana  $x = 0$ ) dari dinding pesawat ketebalan  $L$  selama tetap satu dimensi konduksi panas dapat dinyatakan sebagai :

$$\dot{Q}_{\text{permukaan kiri}} + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{g}_0 \left( \frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel,2002 ; 275) (2-11)



Gambar 2.4 Skema rumus *finite difference* pada noda batas kiri pada pesawat  
 Sumber : Cengel, 2002 ; 275

di mana  $A\Delta x/2$  adalah volume elemen volume (perhatikan bahwa elemen batas memiliki setengah ketebalan),  $\dot{g}_0$  adalah tingkat generasi panas per satuan volume (dalam w/m<sup>3</sup>) pada  $x = 0$ , dan  $A$  adalah luas perpindahan panas, yang konstan untuk dinding pesawat. Perhatikan bahwa kita punya  $\Delta x$  dalam penyebut dari kedua istilah bukan  $\Delta x/2$ . Hal ini karena rasio dalam jangka waktu yang melibatkan perbedaan suhu antara node 0 dan 1, dan dengan demikian kita harus menggunakan jarak antara dua node, yang  $\Delta x/2$ .

Bentuk beda hingga berbagai kondisi batas dapat diperoleh dari persamaan di atas dengan mengganti  $\dot{Q}_{\text{permukaan kiri}}$  meninggalkan permukaan dengan ekspresi yang sesuai. Selanjutnya hal ini dilakukan untuk berbagai kondisi batas pada batas kiri.

1. Kondisi Batas yang Ditentukan Fluks Panas

$$\dot{q}_0 A + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{g}_0 \left( \frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel,2002 ; 275) (2-12)

Kasus special: Kondisi Isolasi ( $\dot{q}_0 = 0$ )

$$kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{q}_0 \left( \frac{A \Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 275) (2-13)

2. Kondisi Batas Konveksi

$$hA(T_\infty - T_0) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{q}_0 \left( \frac{A \Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 275) (2-14)

3. Kondisi Batas Radiasi

$$\varepsilon \sigma A (T_{surr}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{q}_0 \left( \frac{A \Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 276) (2-15)

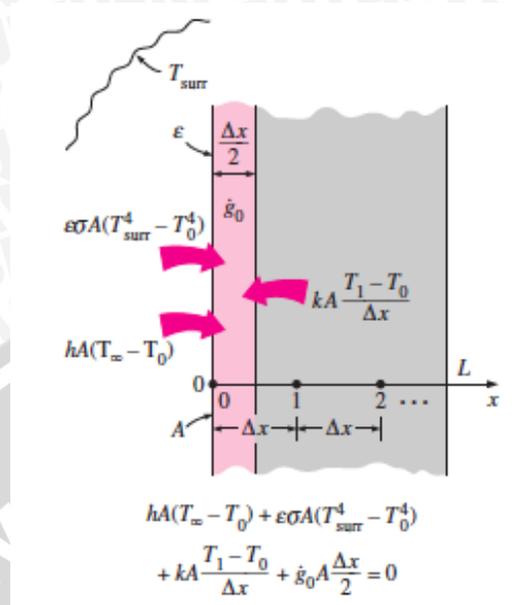
4. Kondisi Batas Kombinasi Konveksi dan Radiasi

$$hA(T_\infty - T_0) + \varepsilon \sigma A (T_{surr}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{q}_0 \left( \frac{A \Delta x}{2} \right) = 0$$

(2-16a)

$$h_{combined} A (T_\infty - T_0) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{q}_0 \left( \frac{A \Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 276) (2-16b)



Gambar 2.5 Skema rumus *finite difference* kombinasi konveksi radiasi  
 Sumber : Cengel, 2002 ; 276

5. Kondisi Batas Kombinasi Konveksi, Radiasi, dan Fluks Panas

$$\dot{q}_0 A + hA(T_\infty - T_0) + \varepsilon\sigma A(T_{surr}^4 - T_0^4) + kA \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + \dot{g}_0 \left( \frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

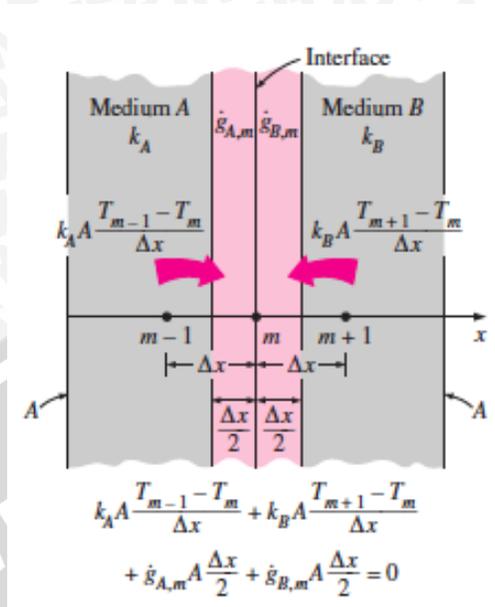
(Cengel, 2002 ; 276) (2-17)

6. Kondisi Batas Antarmuka

Dua media yang berbeda A dan B yang solid diasumsikan dalam kontak sempurna, dan dengan demikian pada suhu yang sama pada antarmuka pada node m (gambar di bawah). Subskrip A dan B menunjukkan sifat media A dan B, masing-masing.

$$k_A A \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_B A \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} + \dot{g}_{A,m} \left( \frac{A\Delta x}{2} \right) + \dot{g}_{B,m} \left( \frac{A\Delta x}{2} \right) = 0$$

(Cengel, 2002 ; 276) (2-18)



Gambar 2.6 Skema rumus *finite difference* kondisi batas antarmuka medium A dan B  
 Sumber : Cengel, 2002 ; 276

Dalam hubungan ini,  $\dot{q}_0$  adalah fluks panas ditentukan dalam  $W/m^2$ ,  $h$  adalah koefisien konveksi,  $h_{combined}$  adalah konveksi gabungan dan koefisien radiasi,  $T_\infty$  adalah suhu medium sekitarnya,  $T_{surr}$  adalah suhu permukaan sekitarnya,  $\varepsilon$  adalah emisivitas permukaan, dan adalah konstanta Stefan-Boltzman. Hubungan di atas juga dapat digunakan untuk simpul M pada batas kanan dengan mengganti subscript "0" dengan "M" dan subscript "1" oleh " $M - 1$ ".

Perhatikan bahwa suhu mutlak harus digunakan dalam perhitungan perpindahan panas radiasi, dan semua suhu harus dinyatakan dalam K atau R ketika kondisi batas melibatkan radiasi untuk menghindari kesalahan. Kami biasanya mencoba untuk menghindari kondisi batas radiasi bahkan dalam solusi numerik karena menyebabkan persamaan beda hingga menjadi nonlinier, yang lebih sulit untuk dipecahkan.

### 1. Penentuan Temperatur Kondisi Batas

Suhu permukaan terkena biasanya dapat diukur secara langsung dan mudah. Oleh karena itu, salah satu cara termudah untuk menentukan kondisi termal pada permukaan adalah untuk menentukan suhu.

$$T_{(0,t)} = T1$$

$$T_{(L,t)} = T2 \quad (2-19)$$

(Cengel,2002 ; 78)

di mana T1 dan T2 adalah suhu tertentu pada permukaan pada  $x = 0$  dan  $x = L$ , masing-masing. Suhu yang ditentukan dapat konstan, yang merupakan kasus untuk konduksi panas stabil, atau mungkin berbeda dengan waktu.

## 2. Isolasi

Beberapa permukaan umumnya terisolasi dalam praktek untuk meminimalkan kerugian panas (atau keuntungan panas) melalui bahan. Isolasi mengurangi perpindahan panas tetapi tidak benar-benar menghilangkannya kecuali ketebalannya tak terhingga.

$$k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad \text{atau} \quad \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (2-20)$$

(Cengel,2002 ; 79)

## 3. Kondisi Batas Konveksi

Konveksi mungkin adalah kondisi batas yang paling umum ditemui dalam praktek karena sebagian besar permukaan perpindahan panas terkena lingkungan pada suhu tertentu.

$$(\text{Panas konduksi pada permukaan arah tertentu}) = (\text{Panas konveksi pada permukaan arah tertentu}) \quad (2-21)$$

(Cengel,2002 ; 81)

Untuk perpindahan panas satu dimensi dalam arah  $x$  dalam piring ketebalan  $L$ , kondisi batas konveksi pada kedua permukaan dapat dinyatakan sebagai:

$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = h_1 [T_{\infty 1} - T(0,t)] \quad (2-22a)$$

(Cengel,2002 ; 81)

dan

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = h_2 [T(L,t) - T_{\infty 2}] \quad (2-22b)$$

(Cengel,2002 ; 81)

di mana  $h_1$  dan  $h_2$  adalah perpindahan panas koefisien konveksi dan  $T_1$  dan  $T_2$  adalah suhu medium sekitarnya pada dua sisi plat.

#### 4. Kondisi Batas Radiasi

Dalam beberapa kasus, seperti yang ditemui dalam aplikasi ruang dan kriogenik, permukaan perpindahan panas dikelilingi oleh ruang dievakuasi dan dengan demikian tidak ada perpindahan panas konveksi antara permukaan dan medium sekitarnya. Dalam kasus tersebut, radiasi menjadi satu-satunya mekanisme perpindahan panas antara permukaan bawah pertimbangan dan sekitarnya.

$$(\text{Panas konduksi pada permukaan arah tertentu}) = (\text{Panas radiasi pada permukaan arah tertentu}) \quad (2-23)$$

(Cengel,2002 ; 82)

Untuk perpindahan panas satu dimensi dalam arah  $x$  dalam piring ketebalan  $L$ , kondisi batas radiasi pada kedua permukaan dapat dinyatakan sebagai:

$$-k \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \varepsilon_1 \sigma [T_{surr,1}^4 - T(0,t)^4] \quad (2-24a)$$

(Cengel,2002 ; 83)

dan

$$-k \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = \varepsilon_2 \sigma [T(L,t)^4 - T_{surr,2}^4] \quad (2-24b)$$

(Cengel,2002 ; 83)

#### 5. Kondisi Batas Antar Permukaan

Beberapa badan yang terdiri dari lapisan bahan yang berbeda, dan solusi dari masalah perpindahan panas dalam medium tersebut membutuhkan solusi dari panas mentransfer masalah dalam setiap lapisan. Hal ini, pada gilirannya, memerlukan spesifikasi dari kondisi batas pada setiap antarmuka.

$$T_A(x_0, t) = T_B(x_0, t)$$

$$(Cengel, 2002 ; 83) \quad (2-25a)$$

dan

$$-k_A \frac{\partial T_A(x_0, t)}{\partial x} = -k_B \frac{\partial T_B(x_0, t)}{\partial x}$$

$$(Cengel, 2002 ; 83) \quad (2-25b)$$

## 6. Kondisi Batas Umum

Sejauh ini kita telah mempertimbangkan permukaan mengalami perpindahan tunggal modus panas, seperti penentuan fluks panas, konveksi, atau radiasi untuk penyederhanaan. Secara umum, bagaimanapun, permukaan mungkin melibatkan konveksi, radiasi, dan fluks panas tertentu secara bersamaan.

$$\begin{aligned} &(\text{Perpindahan panas ke permukaan dalam semua mode}) = \\ &(\text{Perpindahan panas dari permukaan dalam semua mode}) \end{aligned}$$

$$(Cengel, 2002 ; 84) \quad (2-26)$$

## 2.9 Finite Difference Method

Ide dasar di balik metode beda hingga adalah untuk menggantikan berbagai turunan yang muncul dalam masalah perumusan matematika dengan perkiraan yang sesuai pada perbedaan jalaterbatas.

Derivasi sederhana formula beda hingga yang menggunakan deret Taylor. Ekspansi deret Taylor dari fungsi  $f(x)$  sekitar titik  $x$  adalah:

$$f(x + \delta x) = f(x) + \delta x f'(x) + \frac{\delta x^2}{2!} f''(x) + \frac{\delta x^3}{3!} f'''(x) + \dots$$

$$(2-27a)$$

dan

$$f(x - \delta x) = f(x) - \delta x f'(x) + \frac{\delta x^2}{2!} f''(x) - \frac{\delta x^3}{3!} f'''(x) + \dots \quad (2-27b)$$

Di mana  $\delta x$  adalah jarak *mesh*.

Penyelesaian persamaan pertama  $f'(x)$  di atas

$$f'(x) = \frac{f(x+\delta x) - f(x)}{\delta x} - \frac{\delta x}{2} f''(x) - \frac{\delta x^2}{6} f'''(x) + \dots \quad (2-28a)$$

Dan penyelesaian kedua adalah

$$f'(x) = \frac{f(x) - f(x - \delta x)}{\delta x} + \frac{\delta x}{2} f''(x) - \frac{\delta x^2}{6} f'''(x) + \dots \quad (2-28b)$$

Akhirnya, dari dua persamaan di atas

$$f'(x) = \frac{f(x + \delta x) - f(x - \delta x)}{2\delta x} - \frac{\delta x^2}{6} f'''(x) + \dots \quad (2-29)$$

Ini disebut masing-masing perkiraan *forward*, *backward* dan turunan *central* dari  $f(x)$ .

Perhatikan bahwa istilah kedua di sisi kanan dalam dua persamaan di atas sebanding dengan  $\delta x$  sedangkan istilah kedua yang sama dalam persamaan ketiga adalah sebanding dengan  $\delta x^2$ . Oleh karena itu, pertama dua persamaan dianggap mengarah ke perkiraan akurat pertama untuk derivatif sedangkan rumus terakhir mengarah ke pendekatan orde kedua akurat. Perhatikan bahwa mengabaikan istilah orde yang lebih tinggi dalam rumus di atas untuk  $f'(x)$  menghasilkan berbagai skema pendekatan untuk turunan. Perkiraan derivatif orde kedua dapat diperoleh sama. Misalnya, memperluas  $f(x \pm \delta x)$  tentang  $x$ .

$$f(x + 2\delta x) = f(x) + 2\delta x f'(x) + 2\delta x^2 f''(x) + \frac{4}{3} \delta x^3 f'''(x) + \dots \quad (2-30a)$$

dan

$$f(x - 2\delta x) = f(x) - 2\delta x f'(x) + 2\delta x^2 f''(x) - \frac{4}{3} \delta x^3 f'''(x) + \dots \quad (2-30b)$$

Mengeleminasi  $f'(x)$  akan menghasilkan

$$f''(x) = \frac{f(x + \delta x) - 2f(x) + f(x - \delta x)}{\delta x^2} - \frac{1}{12} \delta x^2 f''''(x) + \dots \quad (2-31)$$

Mengabaikan hal yang lebih tinggi agar menghasilkan perbedaan pendekatan pusat  $f''(x)$ . Catatan bahwa ini mengarah pada pendekatan akurat urutan kedua dari turunan kedua.

Kesalahan selalu terlibat dalam melakukan setiap perhitungan numerik. *Round-off error* muncul setiap kali komputasi berlangsung menggunakan jumlah digit terbatas. Hal ini terjadi ketika menggunakan mesin komputasi modern. Kesalahan pemotongan adalah kesalahan yang bahkan ada dalam ketiadaan *round-off error* dan merupakan hasil mengabaikan istilah orde tinggi dalam perkiraan beda hingga diperoleh dari deret Taylor ekspansi. Pekerjaan numerik sukses dalam transfer konduksi panas memerlukan perhatian terhadap isu-isu akurasi dan kontrol kesalahan.

## 2.10 Hipotesa

Dengan melakukan simulasi numerik berupa penentuan model pirolisis, beserta kondisi - kondisi batasnya, maka distribusi temperatur pada proses pirolisis dapat diketahui dan sangat dipengaruhi oleh panas reaksi (entalpi) yang dihasilkan.

## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental semu, yaitu melakukan studi literatur untuk mencari hubungan sebab akibat dalam suatu proses melalui pengumpulan data dari berbagai sumber, kemudian data tersebut diolah dalam simulasi yang menggunakan software MATLAB.

### 3.2. Tempat dan Waktu Simulasi

Simulasi ini dilakukan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan September 2013.

### 3.3. Langkah - langkah Simulasi

Proses simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* MATLAB. Langkah-langkah proses simulasi dibagi menjadi 3 tahap, yaitu :

1. *Preprocessing*
2. *Processing*
3. *Postprocessing*

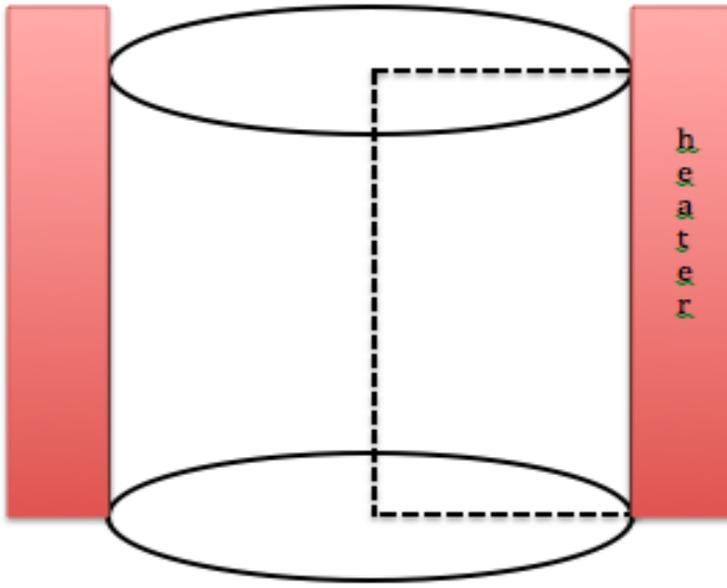
#### 3.3.1. *Preprocessing*

Pada tahap ini dilakukan pemodelan distribusi temperatur pada silinder.

##### 3.3.1.1. Menentukan *domain* / geometri

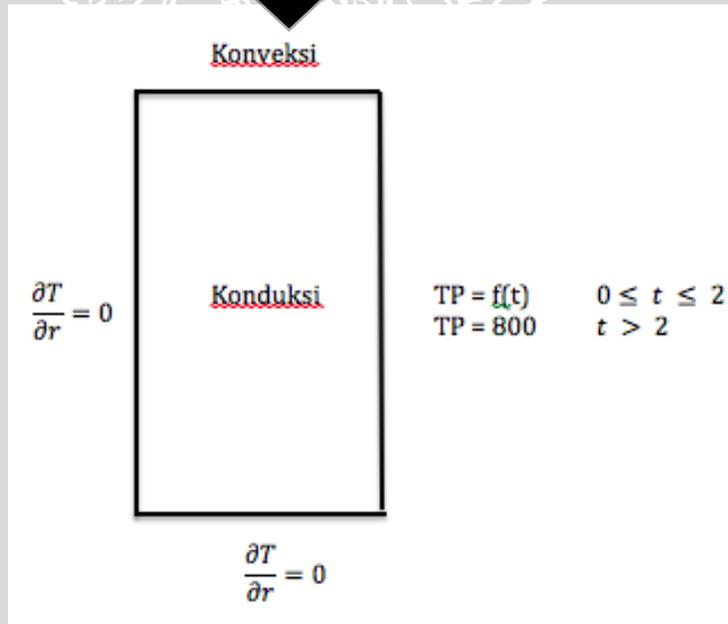
- **Asumsi 2D**

Permasalahan yang akan dikaji dalam pembahasan ini adalah mengambil setengah dari proses perpindahan panas pada silinder yang digambarkan pada gambar 3.1 di bawah ini.



(a)

○ Analisa Kondisi



(b)

Gambar 3.1 (a) Asumsi 2D; (b) Analisa kondisi

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa benda mendapat perpindahan panas secara konduksi, dan diberi isolator. Karena koordinat silinder dan perpindahan panasnya transien (berdasarkan fungsi waktu).

Pada gambar di atas  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  dan  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$  merupakan representasi dari keadaan tabung yang diberi isolator. Untuk  $TP = f(t)$   $0 \leq t \leq 2$  dan  $TP = 800$   $t > 2$ , merupakan representasi dari panas yang datang dari heater. Untuk keadaan konduksi adalah representasi dari panas serbuk kayu yang menuju tabung. Kondisi batas bagian atas menggunakan kondisi batas konveksi.

### 3.3.1.2. Mesh Generation

#### ○ Meshing

*Meshing* adalah proses membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil dimana nantinya dihasilkan node-node yang dapat digunakan dalam perhitungan komputasi secara elemen hingga. Semakin kecil elemen yang dibentuk semakin besar pula persamaan yang harus diselesaikan oleh *software* sehingga beban komputer akan semakin besar tetapi hasil yang akan diperoleh juga semakin akurat yang diakibatkan karena node yang dihasilkan sangat banyak.

### 3.3.1.3. Persamaan Atur

Persamaan atur yang digunakan dalam simulasi ini adalah:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-1)$$

#### ○ Physical Properties

Dari rumus di atas didapat tiga physical properties yaitu  $\rho$ ,  $C$ ,  $k$ . Dengan nilainya masing-masing:

- $\rho$  atau massa jenis untuk mahoni afrika adalah  $0,64 \text{ gr cm}^{-3}$
- $C$  atau kalor jenis kayu adalah  $1,7 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
- $k$  atau konduktivitas termal kayu yang dipakai adalah  $0,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

### 3.3.1.4. *Boundary Conditions (Kondisi Batas)*

- Kondisi batas isolasi
- Konduksi batas *heater*
- Kondisi batas konduksi
- Kondisi batas konveksi

### 3.4. *Processing*

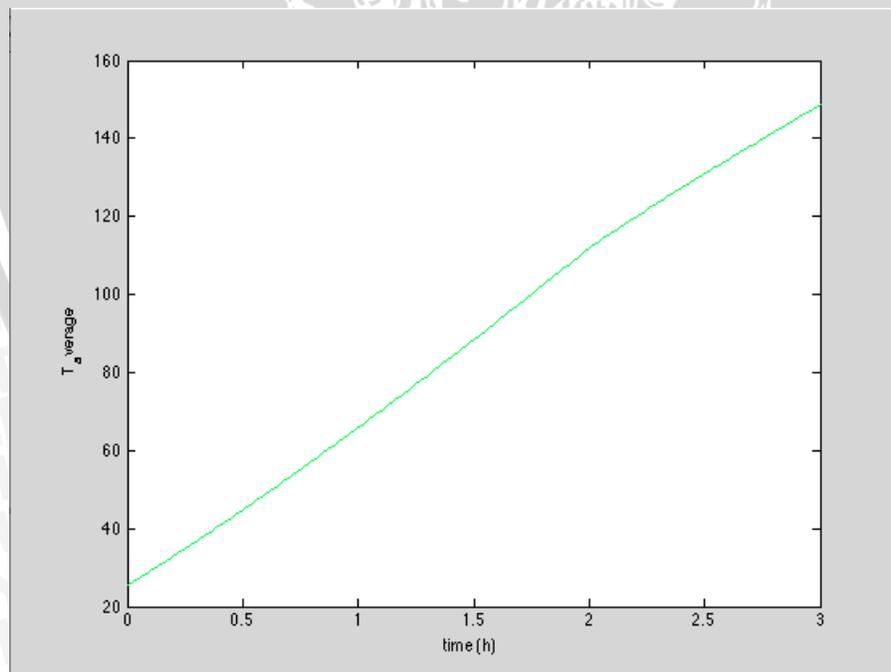
Pada tahap ini kita akan melakukan:

1. Diskritisasi persamaan atur: Penurunan rumus *governing equation* dengan menggunakan metode *finite difference*.
2. Penyelesaian persamaan terdiskritisasi: Memasukkan hasil dari diskritisasi persamaan atur yang sudah didapat dengan menggunakan *software* MATLAB.

### 3.5. *Postprocessing*

- Tampilan hasil

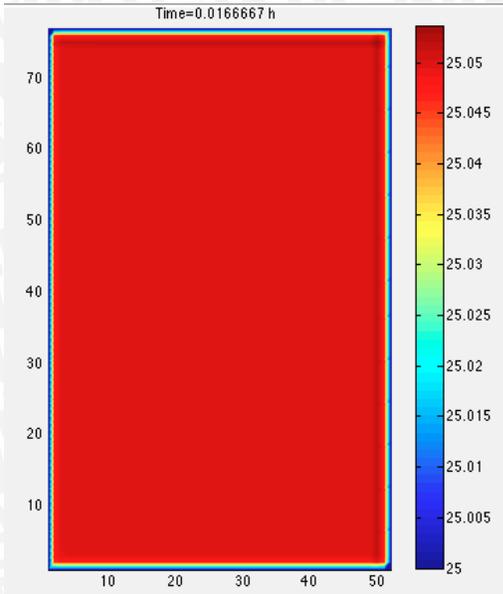
Berikut ini merupakan contoh tampilan hasil yang didapat setelah menjalankan program.



Gambar 3.2 Grafik Temperatur rata - rata terhadap waktu

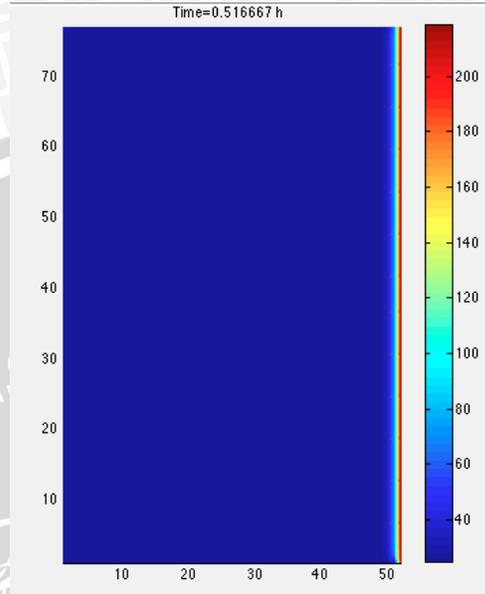
Sumber: *Software* MATLAB

t = 0



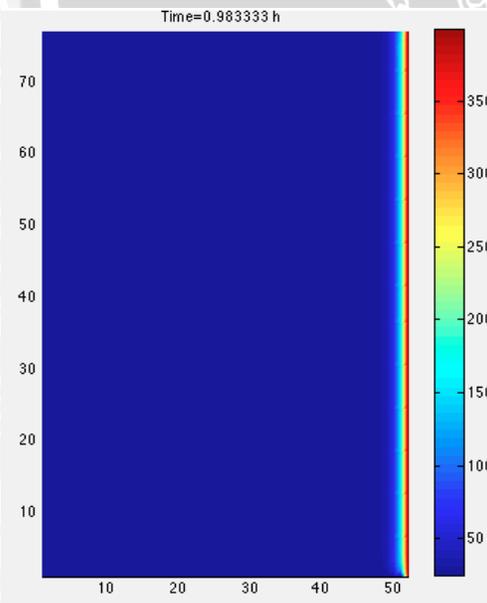
(a)

t = 30 m



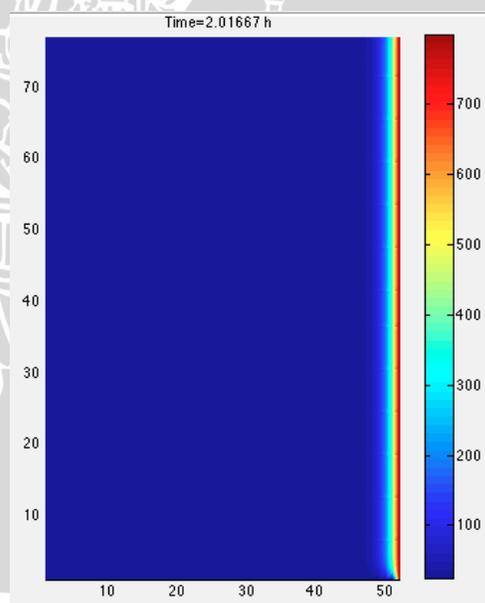
(b)

t = 1 jam



(c)

t = 2 jam

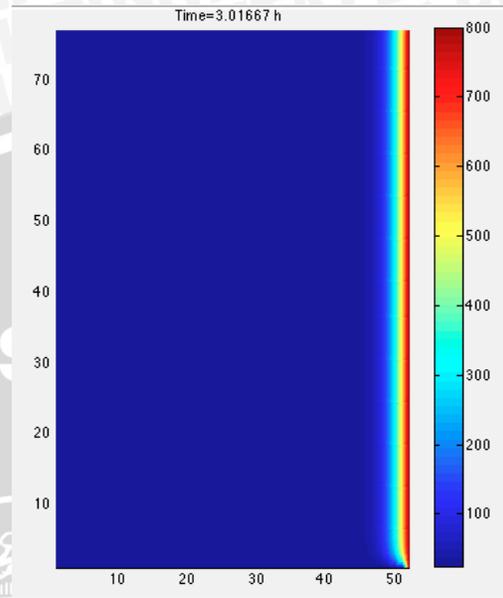
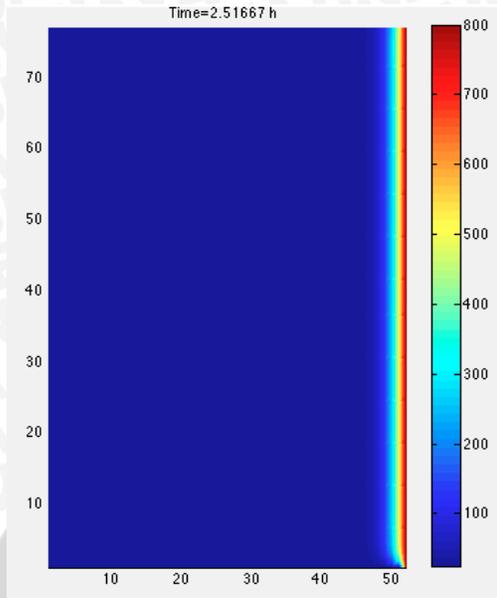


(d)



t = 2.5 jam

t = 3 jam



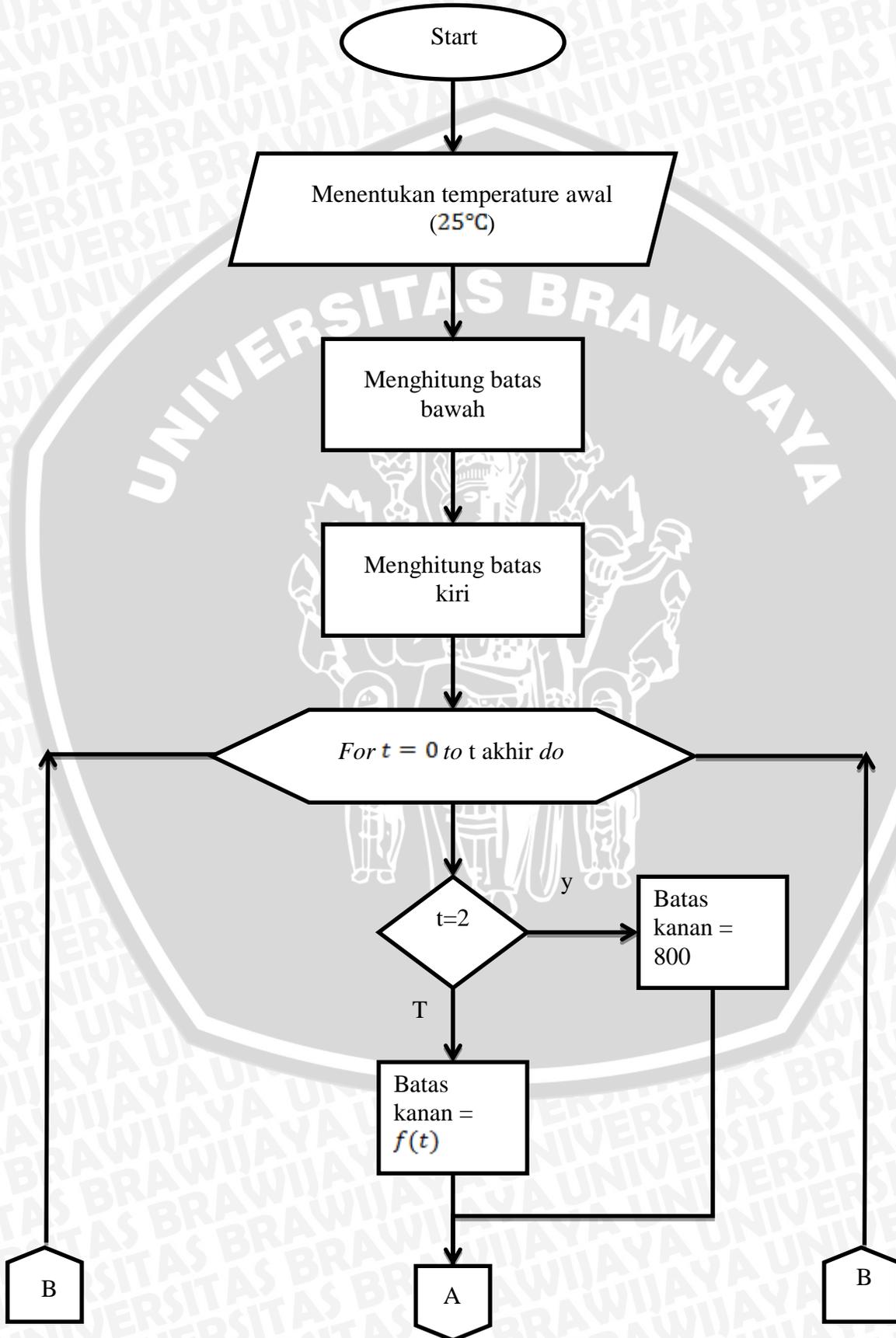
(e)

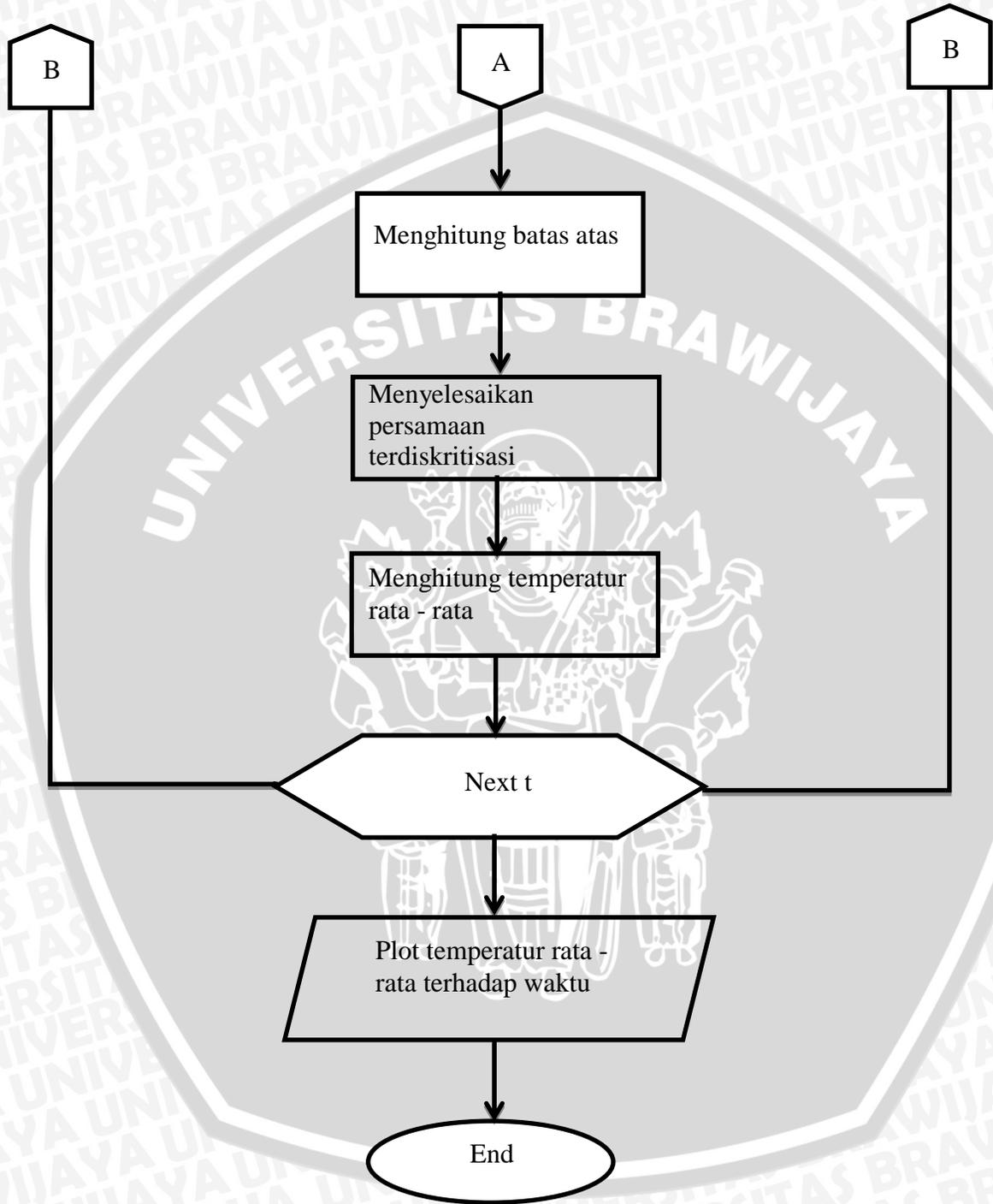
(f)

Gambar 3.3 (a) Mesh grid t = 0; (b) Mesh grid t = 30 m; (c) Mesh grid t = 1 jam; (d) Mesh grid t = 2 jam; (e) Mesh grid t = 2.5 jam; (f) Mesh grid t = 3 jam

Sumber: Software MATLAB

### 3.6 Diagram Alir



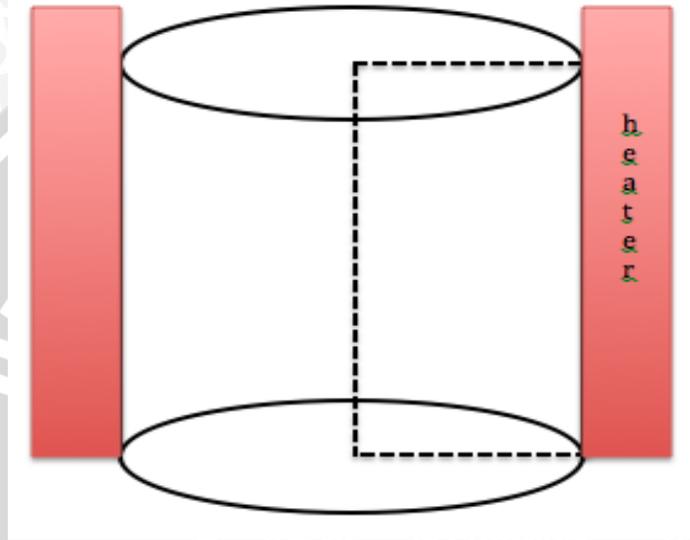


Gambar 3.4 Diagram alir

**BAB IV**  
**DATA DAN PEMBAHASAN**

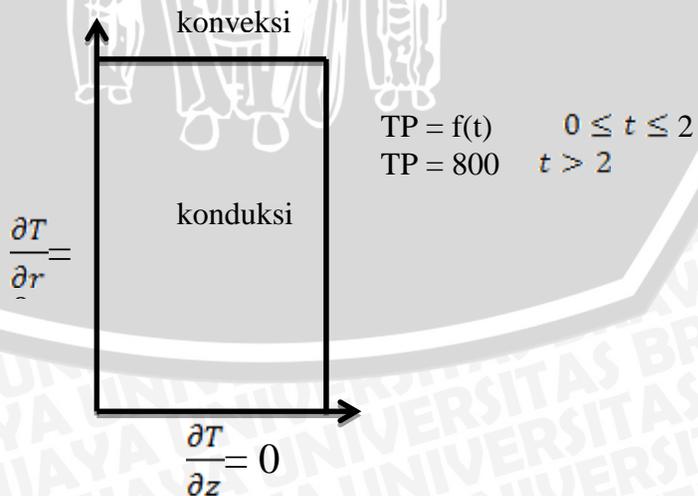
**4.1 Asumsi dalam Bentuk 2D**

Permasalahan yang akan dikaji dalam pembahasan ini adalah mengambil setengah dari proses perpindahan panas pada silinder yang digambarkan pada gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4.1 Asumsi 2D

Tabung ini akan diberi keadaan isolasi dari glass wool, konduksi dari serbuk kayu yang ada di dalam furnace. Seperti yang akan ditunjukkan oleh gambar di bawah ini.



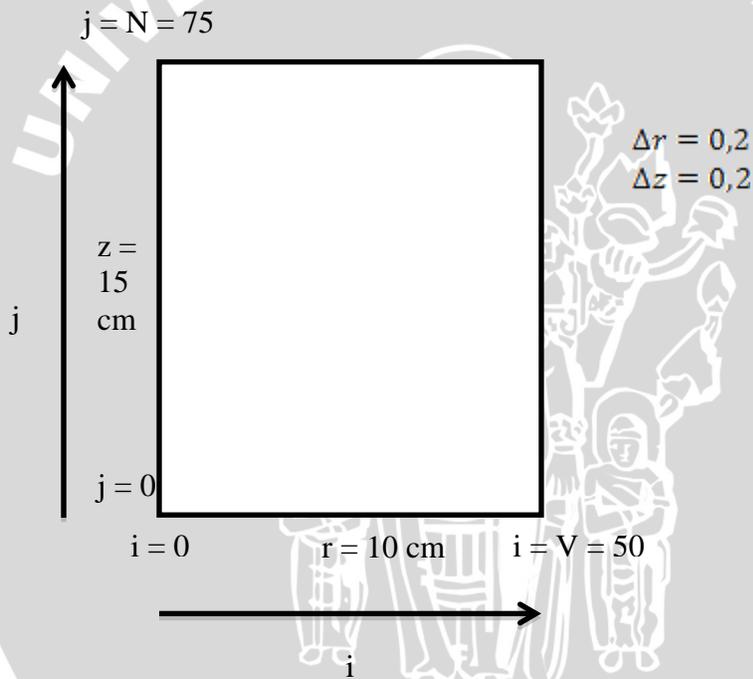
Gambar 4.2 Model perpindahan panas

Pada gambar di atas  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  dan  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$  merupakan representasi dari keadaan tabung yang diberi isolator. Untuk  $TP = f(t)$   $0 \leq t \leq 2$  dan  $TP = 800$   $t > 2$ , merupakan representasi dari panas yang datang dari heater. Untuk keadaan konduksi adalah representasi dari panas serbuk kayu yang menuju tabung. Sementara itu untuk konveksi merupakan representasi dari senyawa N2 yang ada di sekitar tabung dalam piroliser.

**4.2 Preprocessing**

**4.2.1 Menentukan domain / geometri**

Domain yang digunakan dalam simulasi distribusi temperatur pada silinder ini, dijelaskan pada gambar 4.3 di bawah ini:



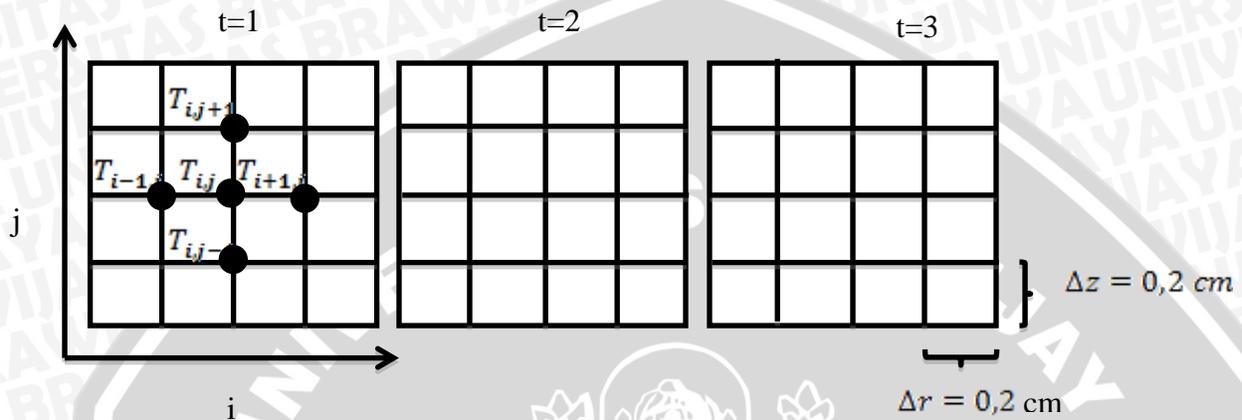
Gambar 4.3 Domain / geometri

**4.2.2 Mesh Generation**

Dari domain pada subbab 4.2.1 akan dipartisi menjadi elemen-elemen kecil dimana nantinya dihasilkan node-node yang dapat digunakan dalam perhitungan komputasi secara elemen hingga. Semakin kecil elemen yang dibentuk semakin besar pula persamaan yang harus diselesaikan oleh *software* sehingga beban komputer akan semakin besar tetapi hasil yang akan diperoleh juga semakin akurat yang diakibatkan karena node yang dihasilkan sangat banyak.

Jarak *mesh* untuk arah r sepanjang 10 cm adalah  $\Delta r = 0,2$  dengan jumlah titik dari  $i = 0$  sampai titik  $i = 50$ .

Jarak *mesh* untuk arah z sepanjang 15 cm adalah  $\Delta z = 0,2$  dengan jumlah titik dari  $j = 0$  sampai titik  $j = 75$



Untuk  $\Delta z = L/N$  dengan L merupakan panjang z dan N merupakan banyak partisi, sedangkan untuk  $\Delta r$  diasumsikan sama dengan  $\Delta z$ .

Gambar 4.4 Mesh generation

### 4.2.3 Persamaan atur

Persamaan atur untuk perpindahan panas konduksi pada keadaan transien pada silinder.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \tag{4-1}$$

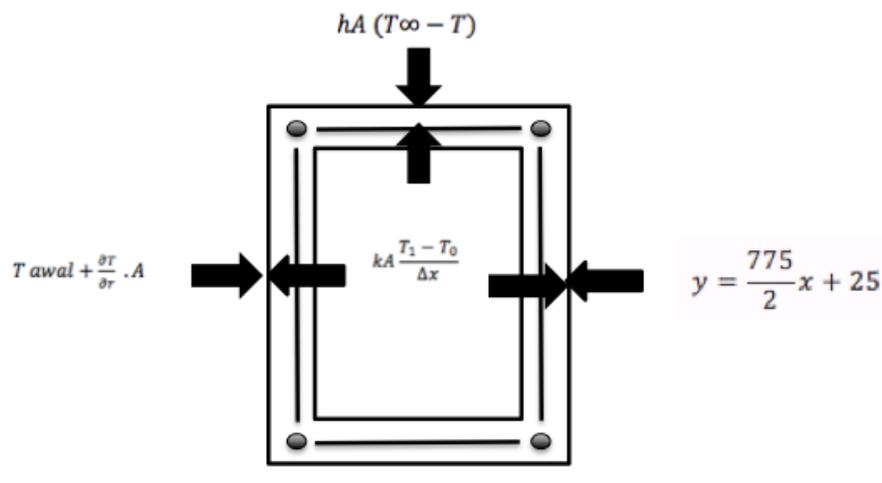
dengan  $\rho$  = massa jenis,

C = kalor jenis,

k = konduktivitas termal,

### 4.2.4 Boundary Conditions

Penentuan syarat batas yang tepat menjadi sangat penting dalam menurunkan solusi numerik. Syarat batas yang tidak tepat akan menghasilkan profil temperatur yang tidak sesuai atau tidak mengikuti hukum fisika dengan baik. Berikut adalah syarat batas yang ditetapkan pada permukaan kiri, bawah, kanan, atas bagian tabung:



Gambar 4.5 Boundary conditions

Permukaan kiri ( $i = 0$ ):

Dengan panjang 15 cm dan dengan banyak titik sebanyak 75 titik yang diberikan keadaan isolasi  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ . Ditunjukkan dengan rumus  $T_{awal} + \frac{\partial T}{\partial r} \cdot A$ , karena  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$  maka suhu kiri =  $T_{awal}$

Permukaan bawah ( $j = 0$ ):

Dengan panjang 10 cm dan dengan banyak titik sebanyak 50 titik yang diberikan keadaan isolasi  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ . Ditunjukkan dengan rumus  $T_{awal} + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot A$ , karena  $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$  maka suhu bawah =  $T_{awal}$

Permukaan kanan ( $i = V + 1$ ):

Pada kasus ini adalah kasus dimana  $i = V + 1$  sehingga temperatur pada keadaan ini adalah  $f(t)$  untuk  $t < 2$  dan 800 untuk  $t > 2$ . Untuk itu ditentukan terlebih dahulu  $f(t)$  dengan menggunakan persamaan garis dari  $(x_1, y_1) = (0, 25)$  dan  $(x_2, y_2) = (2, 800)$  di mana  $x_1$  dan  $x_2$  melambangkan waktu minimal dan maksimal sedangkan  $y_1$  dan  $y_2$  melambangkan suhu minimal dan maksimal. Oleh karena itu diperoleh

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$\frac{y - 25}{800 - 25} = \frac{x - 0}{2 - 0}$$

$$\frac{y - 25}{775} = \frac{x}{2}$$

$$2y - 50 = 775x$$

$$2y = 775x + 50$$

$$y = \frac{775}{2}x + 25 \tag{4-2}$$

persamaan (4-2) ini merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan kondisi batas pada sisi kanan tiap satuan waktu apabila  $t < 2$ .

Permukaan atas ( $j=N+1$ )

Pada kondisi batas atas menggunakan kondisi batas konveksi. Di mana ditunjukkan dengan rumus:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial z} = hA (T_\infty - T)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{h}{k} (T_\infty - T)$$

$$\text{Atas} = T - \frac{\partial T}{\partial z} \cdot A \text{ (konveksi)} \tag{4-3}$$

dimana  $h = 0.0003$

$A = 0.15$

### 4.3 Processing

#### 4.3.1 Diskritisasi Persamaan Atur

Persamaan perpindahan panas konduksi pada silinder dengan pengaruh entalpi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{Term 1}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right)}_{\text{Term 2}} + \underbrace{\Delta H}_{\text{Term 3}} \tag{4-4}$$

*Term 1*

*Term 2*

*Term 3*

dengan  $\rho$  = massa jenis (g/cc) = 0.64,

C = kalor jenis = 1.7,

k = konduktivitas termal = 0.1

Untuk mendapatkan skema numerik, persamaan (4-4) diselesaikan dengan menggunakan metode beda hingga. Dalam kasus ini digunakan metode Crank - Nicolson, yaitu metode di mana diterapkan beda maju pada turunan pertama terhadap waktu dan beda pusat pada turunan kedua terhadap spasial bangun ruang

**Term 1**

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \rho C \left( \frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \right) \tag{4-5}$$

**Term 2**

Menurut (Ernesto, 2009) penurunan skema dari **Term 2** adalah sebagai berikut

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{k}{r_i \Delta r^2} (r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t) \tag{4-6}$$

**Term 3**

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= k \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{T_{i,j+\frac{1}{2}}^t - T_{i,j-\frac{1}{2}}^t}{\Delta z} \right) \\ &= \frac{k}{\Delta z} \left( \frac{T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t}{\Delta z} \right) - \left( \frac{T_{i,j}^t - T_{i,j-1}^t}{\Delta z} \right) \\ &= \frac{k}{\Delta z^2} (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t) \end{aligned} \tag{4-7}$$

Oleh karena itu persamaan (4-3) dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\mathbf{Term 1} = \mathbf{Term 2} + \mathbf{Term 3} + \Delta H \tag{4-8}$$

Dengan menurunkan persamaan (4-8) seperti pada Lampiran 1 diperoleh skema di bawah ini

$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{T_{i,j}^t (M-4) + P \Delta H + \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t)}{M} \tag{4-9}$$

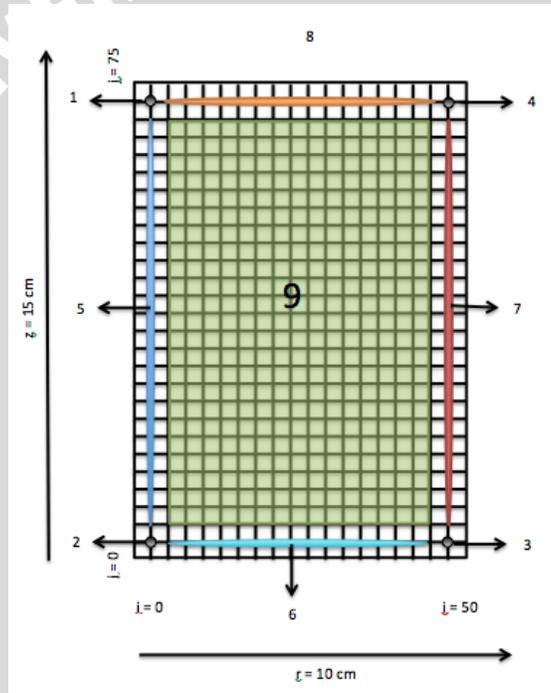
dengan

$$M = \frac{\Delta r^2 \rho C}{\Delta t k} = \frac{0.04 \times 0.64 \times 1.7}{1/60 \times 0.1} = \frac{0.04352}{0.00167} = 26.06$$

$$P = \frac{\Delta r^2}{k} = \frac{0.04}{0.1} = 0.4$$

### 4.3.2 Penyelesaian Persamaan Terdiskritisasi

Di bawah ini merupakan contoh pembagian *mesh* dan noda pada tiap titik. Setiap titik mempunyai penyelesaian persamaan yang berbeda pada setiap bagian.



Gambar 4.6 Rumus tiap titik di *mesh*

- **Titik yang diberi nomor 1**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (1, 75) digunakan rumus:

$$T_{1,75}^{t+1} = \frac{T_{1,75}^t (26.06 - 4) + P \Delta H + \frac{1}{r_1} \left( r_{1-\frac{1}{2}} T_{0,75}^t + r_{1+\frac{1}{2}} T_{2,75}^t \right) + (T_{1,76}^t + T_{1,74}^t)}{26.06}$$

- **Titik yang diberi nomor 2**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (1, 1) digunakan rumus:

$$T_{1,1}^{t+1} = \frac{T_{1,1}^t(26.06 - 4) + P\Delta H + \frac{1}{r_1} \left( r_{1-\frac{1}{2}} T_{0,j}^t + r_{1+\frac{1}{2}} T_{2,1}^t \right) + (T_{1,2}^t + T_{1,0}^t)}{26.06}$$

- **Titik yang diberi nomor 3**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (50, 1) digunakan rumus:

$$T_{50,1}^{t+1} = \frac{T_{50,1}^t(26.06 - 4) + P\Delta H + \frac{1}{r_{50}} \left( r_{50-\frac{1}{2}} T_{50-1,1}^t + r_{50+\frac{1}{2}} T_{50+1,1}^t \right) + (T_{50,1+1}^t + T_{50,1-1}^t)}{26.06}$$

- **Titik yang diberi nomor 4**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (50, 75) digunakan rumus:

$$T_{50,75}^{t+1} = \frac{T_{50,75}^t(26.06 - 4) + P\Delta H + \frac{1}{r_{50}} \left( r_{50-\frac{1}{2}} T_{50-1,75}^t + r_{50+\frac{1}{2}} T_{50+1,75}^t \right) + (T_{50,75+1}^t + T_{50,75-1}^t)}{26.06}$$

- **Titik - titik yang diberi nomor 5**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (1, 2...74) digunakan rumus:

$$T_{1,j}^{t+1} = \frac{T_{1,j}^t(26.06 - 4) + P\Delta H + \frac{1}{r_1} \left( r_{1-\frac{1}{2}} T_{1-1,j}^t + r_{1+\frac{1}{2}} T_{1+1,j}^t \right) + (T_{1,j+1}^t + T_{1,j-1}^t)}{26.06}$$

dengan j = 2...74

- **Titik - titik yang diberi nomor 6**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (2...49, 1) digunakan rumus:

$$T_{i,1}^{t+1} = \frac{T_{i,1}^t(26.06 - 4) + P\Delta H + \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,1}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,1}^t \right) + (T_{i,1+1}^t + T_{i,1-1}^t)}{26.06}$$

dengan i = 2...49

- **Titik - titik yang diberi nomor 7**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (50, 2...74) digunakan rumus:

$$T_{50,j}^{t+1} = \frac{T_{50,j}^t(26.06 - 4) + P\Delta H + \frac{1}{r_{50}} \left( r_{50-\frac{1}{2}} T_{50-1,j}^t + r_{50+\frac{1}{2}} T_{50+1,j}^t \right) + (T_{50,j+1}^t + T_{50,j-1}^t)}{26.06}$$

dengan j = 2...74

- **Titik - titik yang diberi nomor 8**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (2...49, 75) digunakan rumus:

$$T_{i,75}^{t+1} = \frac{T_{i,75}^t(26.06-4)+P\Delta H+\frac{\dot{m}}{r_i}\left(r_{i-\frac{1}{2}}T_{i-1,75}^t+r_{i+\frac{1}{2}}T_{i+1,75}^t\right)+(T_{i,75}^t+T_{i,75}^t-1)}{26.06}$$

dengan  $i = 2...49$

- **Titik - titik yang diberi nomor 9**  
Untuk menghitung nilai pada titik ini (2...49, 2...74) digunakan rumus:

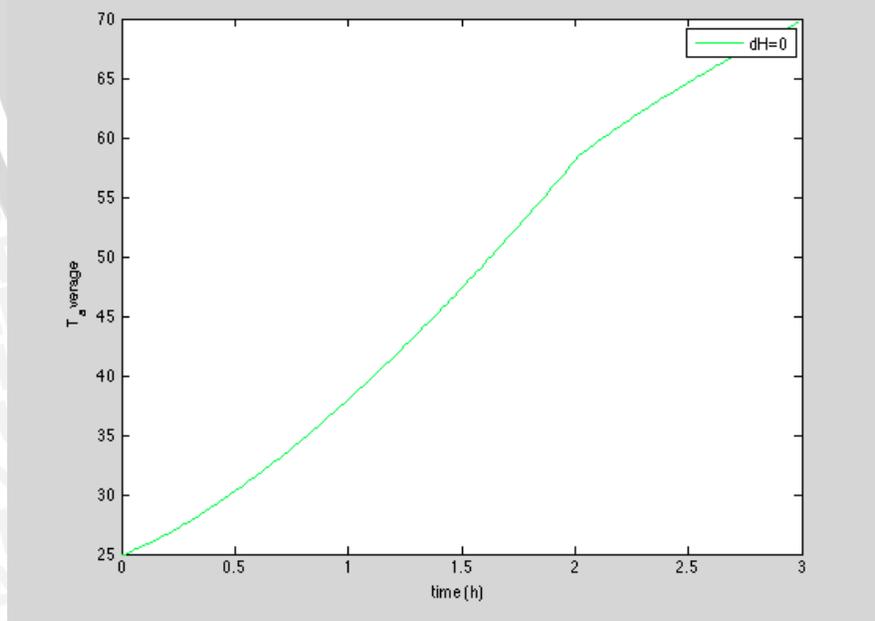
$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{T_{i,j}^t(26.6-4)+P\Delta H+\frac{\dot{m}}{r_i}\left(r_{i-\frac{1}{2}}T_{i-1,j}^t+r_{i+\frac{1}{2}}T_{i+1,j}^t\right)+(T_{i,j+1}^t+T_{i,j-1}^t)}{26.06}$$

dengan  $i = 2...49$  dan  $j = 2...74$

#### 4.4 Postprocessing

##### 4.4.1 Tampilan Hasil

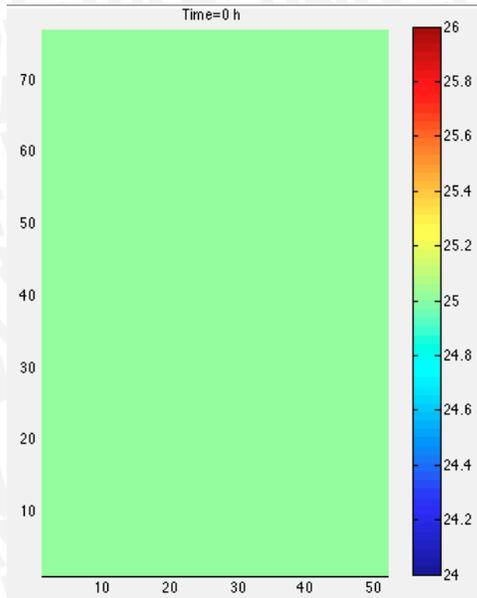
*Output* yang diperoleh dari hasil simulasi distribusi temperatur perpindahan panas konduksi pada proses pirolisis divisualisasikan menggunakan *command plot pcolor* pada matlab. Untuk mengetahui perubahan temperatur tanpa dan dengan adanya perubahan entalpi 100 ditunjukkan pada gambar di bawah ini:



Gambar 4.7 Grafik Temperatur rata - rata terhadap waktu

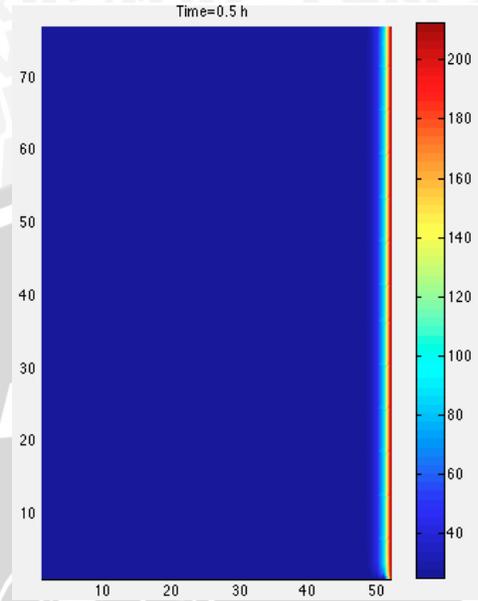
Sumber: *Software* MATLAB

t = 0



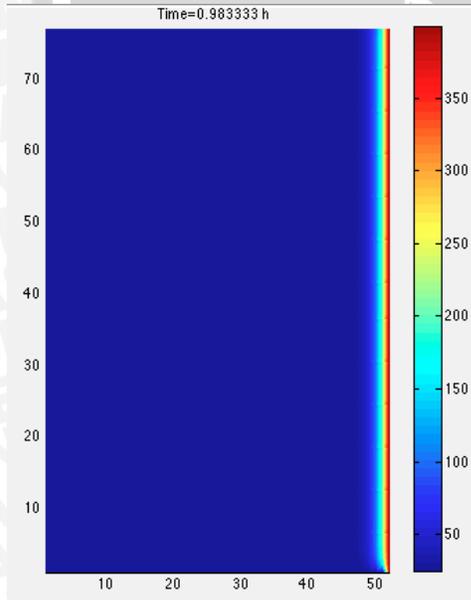
(a)

t = 30 m



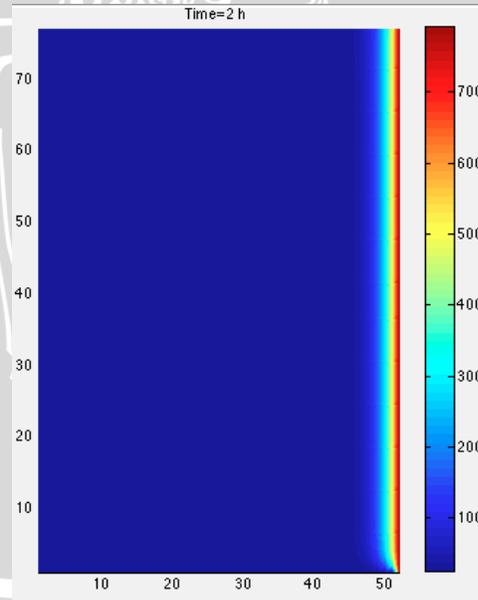
(b)

t = 60 m



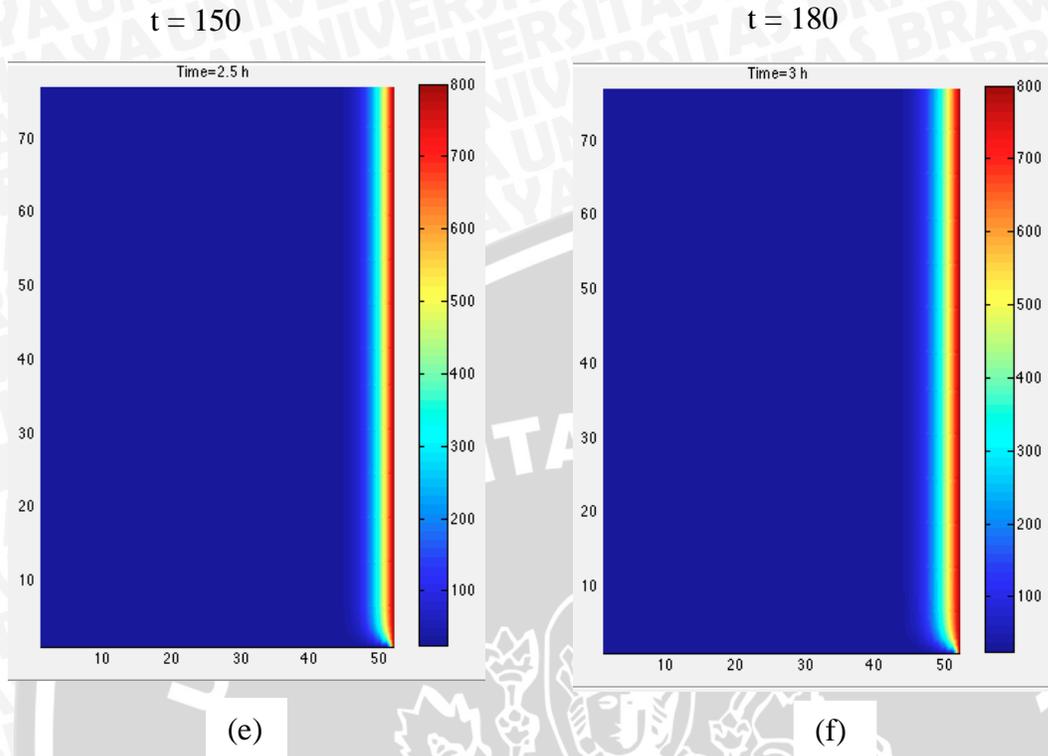
(c)

t = 120

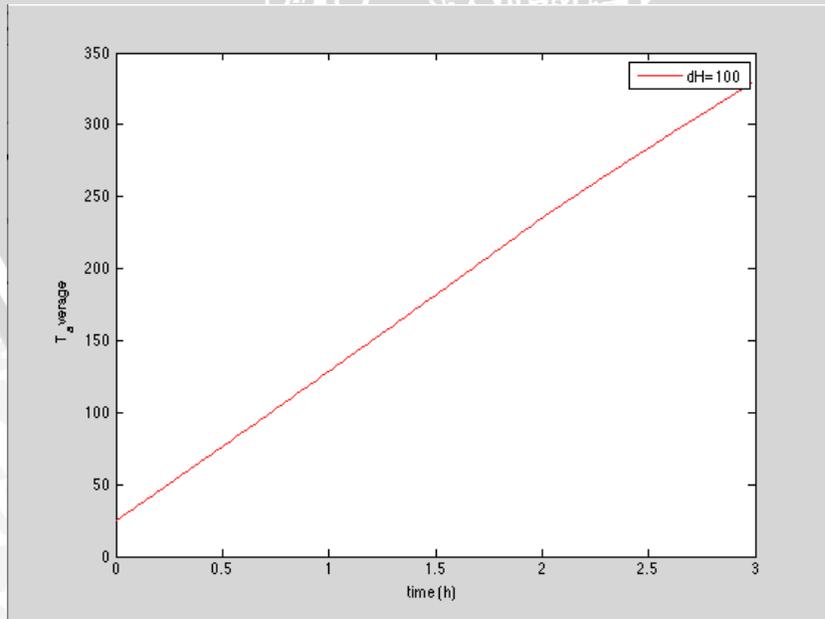


(d)



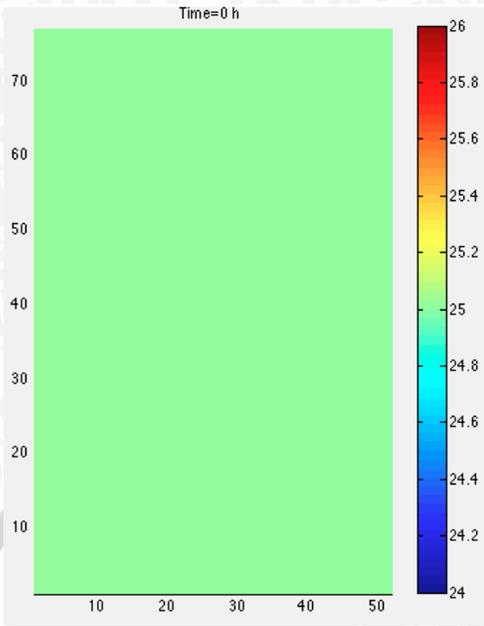


Gambar 4.8 (a) Mesh grid  $t = 0$ ; (b) Mesh grid  $t = 30$  m; (c) Mesh grid  $t = 1$  jam; (d) Mesh grid  $t = 2$  jam; (e) Mesh grid  $t = 2.5$  jam; (f) Mesh grid  $t = 3$  jam (semua tanpa perubahan entalpi)  
 Sumber: Software MATLAB



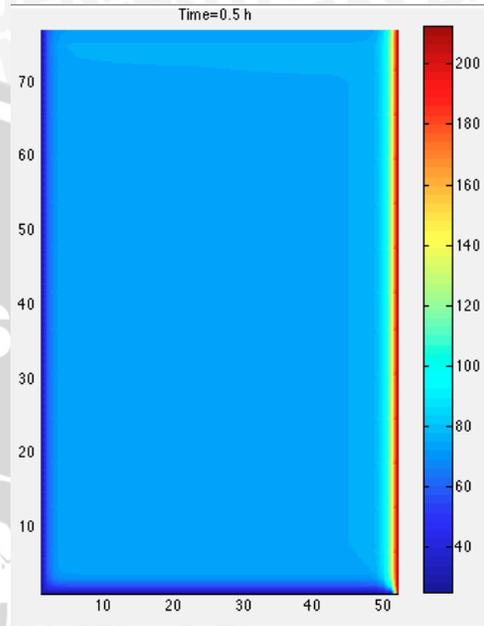
Gambar 4.9 Grafik Temperatur rata - rata terhadap waktu (perubahan entalpi 100)  
 Sumber: Software MATLAB

$t = 0$



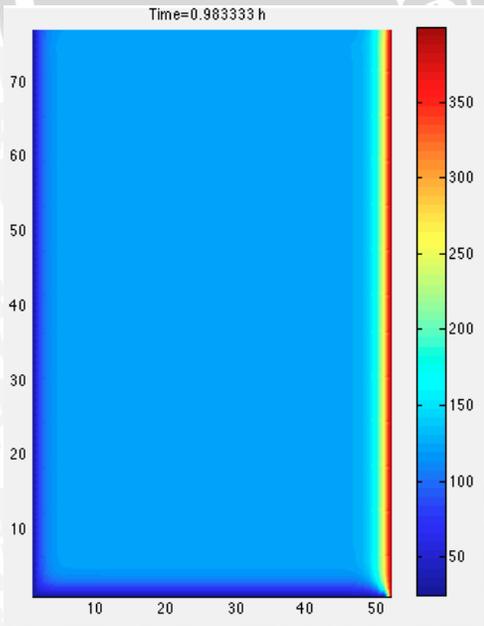
(a)

$t = 30$  m



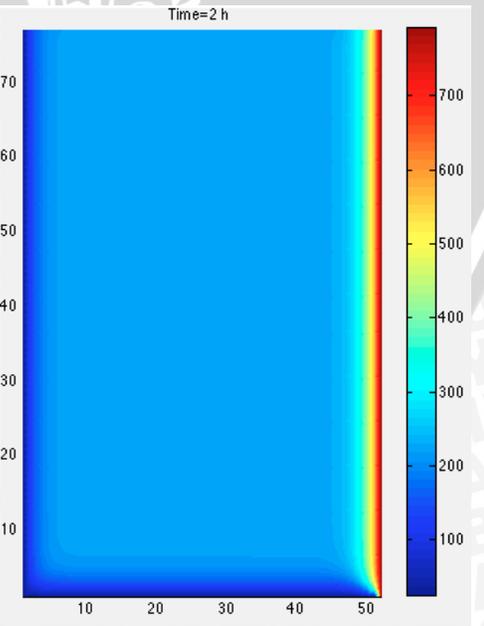
(b)

$t = 60$  m



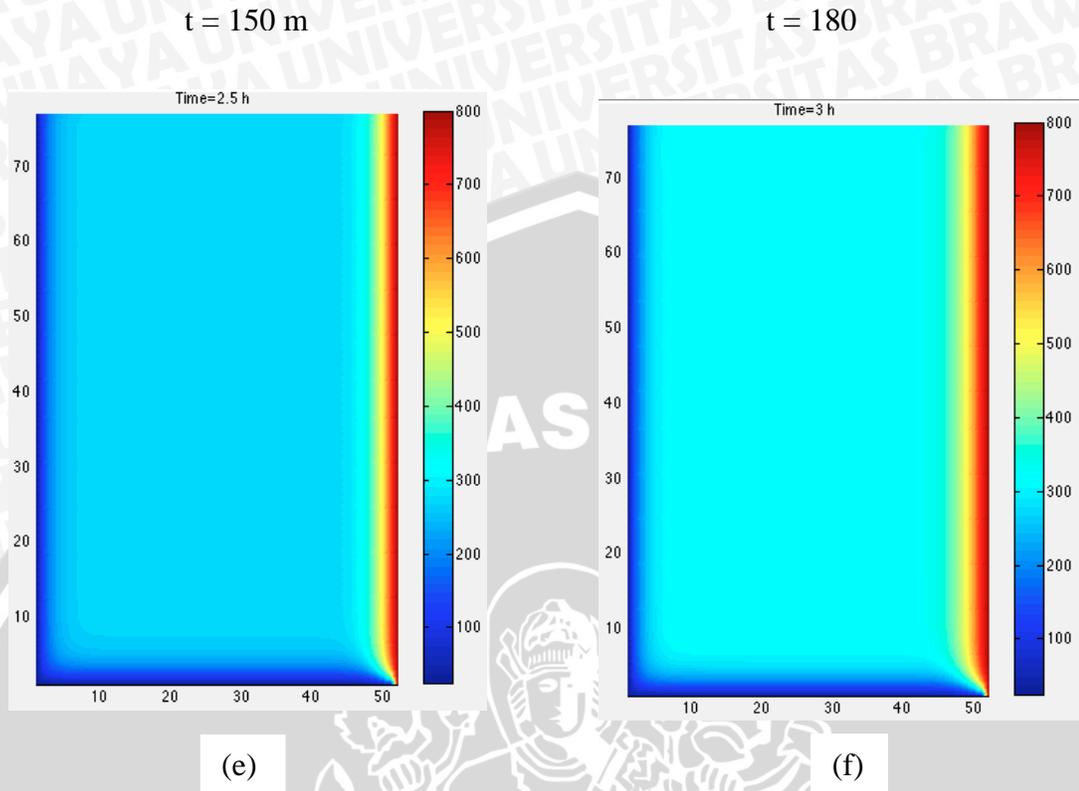
(c)

$t = 120$



(d)





Gambar 4.10 (a) Mesh grid  $t = 0$ ; (b) Mesh grid  $t = 30$  m; (c) Mesh grid  $t = 1$  jam; (d) Mesh grid  $t = 2$  jam; (e) Mesh grid  $t = 2.5$  jam; (f) Mesh grid  $t = 3$  jam (dengan perubahan entalpi 100)

Sumber: Software MATLAB

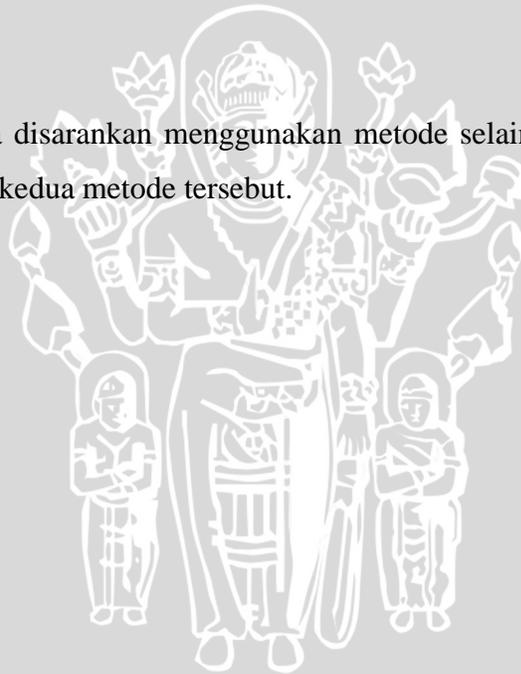
## BAB V PENUTUP

### 5.1 KESIMPULAN

Mengacu pada hasil simulasi perpindahan panas konduksi pada proses pirolisis dengan entalpi 0 didapat kurva T rata - rata yang terus meningkat dengan interval suhu yang berkisar antara 25°C - 70°C. Pada proses dengan entalpi 100 terjadi peningkatan kurva T rata - rata yang terjadi lebih signifikan dengan interval suhu berkisar antara 25°C - 350°C. Sehingga dapat disimpulkan bahwa perubahan entalpi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi temperatur pada proses pirolisis.

### 5.2 SARAN

Untuk skripsi selanjutnya disarankan menggunakan metode selain *finite difference* agar dapat membandingkan hasil dari kedua metode tersebut.



**DAFTAR PUSTAKA**

Cengel, Yunus A. ; 1998 : *Heat transfer : A Practical Approach*; University of Nevada. Reno.

Neta, B. : 2003 : *Numerical Solution of Partial Differential Equations* : Department of Mathematics Naval Postgraduate School, California.

Tovani, Novan. : 2008 : *Studi Model Numerik Konduksi Panas Lempeng Baja Silindris Yang Berinteraksi Dengan Laser* : Fakultas Matematika Institut Pertanian Bogor.

Wijayanti, Widya et al. : 2010 : *Numerical Simulation of the thermal conduction of packed bed of woody biomass particles accompanying volume reduction induced by pyrolysis* : Yamaguchi University, 2-16-1, Ube-shi, Yamaguchi 755-8611, Japan.

William, Simpson et al. : 1999 : *Physical Properties and Moisture Relations of Wood* : Department of Agriculture, U.S.



### Lampiran 1 : Diskritisasi Persamaan Atur

$$\text{Term 1} = \text{Term 2} + \text{Term 3} + \Delta H$$

$$\rho C \left( \frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \right) = \frac{k}{r_i \Delta r^2} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + \frac{k}{\Delta z^2} \left( \frac{T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t}{T_{i,j-1}^t} \right) + \Delta H$$

karena  $dr = dz$  maka didapatkan

$$\rho C \left( \frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta t} \right) = k \left( \frac{1}{r_i \Delta r^2} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + \frac{1}{\Delta r^2} (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t) \right) + \Delta H$$

$$\frac{\rho C}{\Delta t} (T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t) - \Delta H = \frac{k}{\Delta r^2} \left( \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t) \right)$$

$$\frac{\Delta r^2 \rho C}{\Delta t k} (T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t) - \frac{\Delta r^2 \Delta H}{k} = \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t)$$

Dengan memisalkan  $\frac{\Delta r^2 \rho C}{\Delta t k} = M$  dan  $\frac{\Delta r^2}{k} = P$

$$MT_{i,j}^{t+1} - MT_{i,j}^t - P\Delta H = \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t)$$

$$MT_{i,j}^{t+1} = MT_{i,j}^t + P\Delta H + \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t - 2r_i T_{i,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t - 2T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t)$$

$$MT_{i,j}^{t+1} = T_{i,j}^t (M - 2 - 2) + P\Delta H + \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t)$$

$$T_{i,j}^{t+1} = \frac{T_{i,j}^t (M-4) + P\Delta H + \frac{1}{r_i} \left( r_{i-\frac{1}{2}} T_{i-1,j}^t + r_{i+\frac{1}{2}} T_{i+1,j}^t \right) + (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t)}{M}$$