



**SIMULASI MODEL PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA  
PADA PROSES PENGERINGAN BUTIRAN KEDELAI**

**SKRIPSI**

Oleh

**Indah Rohmawati**

**NIM 0818101019**

**JURUSAN MATEMATIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS JEMBER**

**2013**



**SIMULASI MODEL PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA  
PADA PROSES PENGERINGAN BUTIRAN KEDELAI**

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Matematika (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh

**Indah Rohmawati**  
**NIM 081810101019**

**JURUSAN MATEMATIKA**  
**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**  
**UNIVERSITAS JEMBER**

**2013**

## **PERSEMBAHAN**

Skripsi ini saya persembahkan untuk :

1. Ibunda Sri Rafiatun dan Ayahanda Sumarto tercinta, yang telah mendoakan dan memberi kasih sayang serta pengorbanan untuk putri tercintanya;
2. Adikku tersayang Muhammad Arifin, yang selalu memberi semangat dalam suka dan duka.
3. guru-guru sejak Taman Kanak-kanak sampai Perguruan Tinggi, yang telah memberikan ilmu dan membimbing dengan penuh kesabaran;
4. Almamater Jurusan Matematika FMIPA Universitas Jember.

## **MOTO**

Manusia tak selamanya benar dan tak selamanya salah, kecuali ia yang selalu mengoreksi diri dan membenarkan kebenaran orang lain atas kekeliruan diri sendiri.<sup>\*)</sup>

---

<sup>\*)</sup> <http://pristality.wordpress.com/2011/02/23/kumpulan-motto-kehidupan/>

## **PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

nama : Indah Rohmawati

NIM : 081810101019

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis ilmiah yang berjudul “Simulasi Model Perpindahan Panas dan Massa pada Proses Pengeringan Butiran Kedelai” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Februari 2013

Yang menyatakan,

Indah Rohmawati  
NIM 081810101019

**SKRIPSI**

**SIMULASI MODEL PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA  
PADA PROSES PENGERINGAN BUTIRAN KEDELAI**

Oleh

Indah Rohmawati  
NIM 081810101019

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Drs. Rusli Hidayat, M.Sc.

Dosen Pembimbing Anggota : Kosala Dwidja Purnomo, S.Si., M.Si.

## PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Simulasi Model Perpindahan Panas dan Massa pada Proses Pengeringan Butiran Kedelai” telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal :

tempat : Fakultas MIPA Universitas Jember

Tim Penguji :

Ketua,

Sekretaris,

Drs. Rusli Hidayat, M.Sc.  
NIP 19661012 199303 1 001

Kosala Dwidja Purnomo, S.Si., M.Si.  
NIP 19690828 199802 1 001

Penguji I,

Penguji II,

Kusbudiono, S.Si., M.Si.  
NIP 19770430 200501 1 001

Bagus Juliyanto, S.Si.  
NIP 19800702 200312 1 001

Mengesahkan

Dekan,

Prof. Drs. Kusno, DEA, Ph.D.  
NIP 196101081986021001

## RINGKASAN

**Simulasi Model Perpindahan Panas dan Massa pada Proses Pengeringan Butiran Kedelai;** Indah Rohmawati, 081810101019; 2013: 43 halaman; Jurusan Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Proses pengeringan kedelai dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu secara alami dan buatan. Proses pengeringan dengan cara alami, yaitu dengan melakukan penjemuran di bawah sinar matahari. Proses pengeringan kedelai dengan cara ini kurang efisien karena memerlukan waktu yang lama, memerlukan tempat penjemuran yang luas, hasil pengeringan yang bermutu relatif rendah dan tidak seragam. Sedangkan pengeringan dengan cara buatan, yaitu dengan menggunakan mesin pengering cara ini membutuhkan biaya lebih mahal dan memerlukan tenaga kerja dengan keahlian khusus tetapi cara ini beresiko tinggi jika temperatur dan kelembabannya tidak dikontrol secara ketat dan akurasi yang tinggi. Pada penelitian ini dikaji bagaimana simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai jika parameter yang mempengaruhi perpindahan panas divariasikan. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui profil perpindahan panas dan profil perpindahan massa pada proses pengeringan butiran kedelai.

Penelitian tentang perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai ini dibagi menjadi enam tahap yaitu kajian pustaka, diskritisasi, identifikasi parameter, pembuatan program, simulasi program, dan analisis hasil simulasi. Penentuan nilai parameter diambil dari data yang telah diperoleh dan sebagian diambil dari beberapa literatur yang berkaitan dengan proses pengeringan butiran kedelai. Setelah mendiskritisasi model perpindahan panas dan massa serta mengidentifikasi parameter, dilanjutkan dengan pembuatan program, dimana dalam langkah ini diberikan GUI dari simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai. Langkah selanjutnya yaitu melakukan simulasi dengan cara menginput nilai parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya,



dimana sebagian dari nilai parameter tersebut divariasikan. Kemudian tahap terakhir yaitu menganalisis *output* dari simulasi tersebut

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat dilihat jika jenis kedelai lokal memiliki nilai-nilai sifat fisik yang cukup mendukung untuk melakukan perpindahan panas yang lebih cepat dari pada jenis kedelai Edamame. Dilihat dari perpindahan massa kedelai jenis lokal mengalami proses perpindahan massa yang lebih cepat untuk kadar air akhir 11% maupun kadar air akhir sebesar 13 % selama 13 detik dan 9 detik. Proses pengeringan butiran kedelai dapat diketahui dengan menambahkan waktu pada proses perpindahan panas dan perpindahan massa yang terjadi pada butiran kedelai.

Secara umum jenis kedelai yang mempunyai karakteristik nilai konduktivitas thermal yang semakin tinggi, panas spesifik yang semakin rendah, dan kepadatan massa yang semakin tinggi memiliki kemampuan perpindahan panas yang cepat. Jari- jari kedelai dan kadar air awal menentukan waktu yang dibutuhkan untuk menyamakan kadar air pada setiap lapisan butiran kedelai. Semakin besar jari- jari dan kadar air awal kedelai maka perpindahan massa akan semakin lama.

## **PRAKATA**

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Simulasi Model Perpindahan Panas dan Massa pada Proses Pengeringan Butiran Kedelai”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Matematika Fakultas MIPA Universitas Jember.

Dalam penyelesaian karya tulis ilmiah ini, penulis telah banyak mendapat bantuan dan dorongan baik secara langsung maupun tak langsung dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Drs. Rusli Hidayat, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Kosala Dwidja Purnomo, S. Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing anggota, yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Kusbudiono, S.Si., M.Si., dan Bapak Bagus Juliyanto, S.Si., selaku Dosen Penguji yang telah memberi kritik dan saran dalam penyusunan skripsi ini;
3. Ibu Endhah Purwandari, S.Si., M.Si., selaku Ketua Laboratorium Fisika Dasar Fakultas MIPA Universitas Jember yang telah memberi saran dan membantu dalam mendapatkan data;
4. Bapak Budiyo, selaku teknisi Laboratorium Fisika Dasar Fakultas MIPA Universitas Jember yang telah membantu dalam mendapatkan data;
5. Retno Wulandari dan Serly Maharani yang telah membantu dalam mendapatkan data;
6. sahabat-sahabatku Linda Apriliyana, Prian Peisesa Putri, Yesiana Novikasari, Dayvis Suryadana, Bayu Kriswanto dan Abdul Muis Hadianto yang telah membantu dan memberi semangat dalam penyusunan skripsi ini;
7. teman-teman angkatan 2008 yang telah membantu dalam menyusun skripsi ini;

8. teman-teman kosan Villa Thi-Thut lily, Riris, Miftha, Diah, Galuh, Mbak Eva, Ani dan Hida yang selalu memberi semangat;
9. semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Jember, Februari 2013

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN MOTO .....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN.....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PEMBIMBINGAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>vii</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>viii</b>
<b>PRAKATA .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xv</b>
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Perumusan Masalah .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 Batasan Masalah .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4 Tujuan.....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 Manfaat.....</b>	<b>3</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Kedelai .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Perpindahan Panas .....</b>	<b>5</b>
2.2.1 Konduksi.....	5
2.2.2 Radiasi .....	6
2.2.3 Konveksi .....	6
<b>2.3 Hukum Fourier untuk Perpindahan Panas.....</b>	<b>7</b>
<b>2.4 Perpindahan Panas pada Bola.....</b>	<b>8</b>
<b>2.5 Perpindahan Massa .....</b>	<b>11</b>

2.5.1 Hukum Fick Tentang Difusi .....	11
2.5.2 Perpindahan Massa dengan Cara Difusi .....	12
<b>2.6 Syarat Awal dan Syarat Batas Pengeringan Butiran .....</b>	<b>12</b>
2.6.1 Syarat Awal.....	12
2.6.2 Syarat Batas .....	13
<b>2.7 Metode Numerik .....</b>	<b>14</b>
2.7.1 Skema Eksplisit.....	16
2.7.2 Skema Implisit .....	17
2.7.3 Skema Crank-Nicholson .....	18
2.7.4 Skema Metode- $\theta$ .....	19
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Data .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Langkah-langkah Penyelesaian .....</b>	<b>21</b>
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Diskritisasi .....</b>	<b>24</b>
4.1.1 Diskritisasi Persamaan Perpindahan Panas.....	24
4.1.2 Diskritisasi Persamaan Perpindahan Massa.....	26
<b>4.2 Identifikasi Parameter .....</b>	<b>28</b>
<b>4.3 Simulasi Program.....</b>	<b>29</b>
<b>4.4 Beberapa Hasil Simulasi.....</b>	<b>32</b>
<b>4.5 Analisis Hasil Simulasi .....</b>	<b>38</b>
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 Kesimpulan.....</b>	<b>40</b>
<b>5.2 Saran .....</b>	<b>41</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>42</b>
<b>LAMPIRAN</b>	
<b>A. Gambar .....</b>	<b>44</b>
<b>B. Script Program .....</b>	<b>49</b>

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Nilai-nilai fisik kedelai.....	28
Tabel 4.2 Ringkasan waktu untuk menyamakan temperatur beberapa jenis kedelai pada semua lapisan butiran kedelai dengan suhu pengeringan 50°C, 60°C dan 70°C.....	37
Tabel 4.3 Ringkasan waktu untuk menyamakan kadar air akhir beberapa jenis kedelai pada semua lapisan butiran kedelai dengan kadar air akhir 11% dan 13% .....	37
Tabel 4.4 Ringkasan waktu pengeringan beberapa jenis kedelai.....	37

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Biji Kedelai . . . . .	4
Gambar 2.2 Konduksi Panas Melewati Dinding dengan ketebalan $\Delta x$ dan Luas Daerah $A$ . . . . .	7
Gambar 2.3 Sketsa yang Melukiskan Perjanjian tentang Tanda untuk Aliran Panas Konduksi. . . . .	8
Gambar 2.4 Panas Merambat Secara Simetri Antara $r_1$ dan $r_2$ . . . . .	9
Gambar 2.5 Bagan Ketergantungan Difusi pada Profil Konsentrasi . . . . .	11
Gambar 2.6 Skema dari Syarat Batas di Pusat. . . . .	13
Gambar 2.7 Skema tentang Perpindahan Panas pada Permukaan Luar . . . . .	14
Gambar 2.8 Bidang Hitungan Penyelesaian Numerik . . . . .	15
Gambar 2.9 Skema Metode Eksplisit. . . . .	16
Gambar 2.10 Skema Metode Implisit . . . . .	18
Gambar 2.10 Skema Metode- $\theta$ . . . . .	20
Gambar 3.1 Skema Langkah Penelitian . . . . .	21
Gambar 4.1 Tampilan GUI program simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai. . . . .	31
Gambar 4.2 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan $50^{\circ}\text{C}$ . . . . .	32
Gambar 4.3 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan $60^{\circ}\text{C}$ . . . . .	33
Gambar 4.4 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan $70^{\circ}\text{C}$ . . . . .	34
Gambar 4.5 Profil perpindahan massa pada kedelai jenis import (Amerika) dengan kadar air akhir 13% . . . . .	35
Gambar 4.6 Profil perpindahan massa pada kedelai jenis import (Amerika) dengan kadar air akhir 11% . . . . .	36

## **BAB 1. PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Proses pengeringan memegang peranan penting dalam pengawetan bahan, baik di industri pertanian, obat-obatan, dan makanan. Kedelai yang merupakan salah satu hasil pertanian di Indonesia juga diperlukan proses pengeringan sebelum kedelai tersebut disimpan. Proses pengeringan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu secara alami dan buatan. Di Indonesia, proses pengeringan hasil pertanian rata-rata menggunakan cara alami, yaitu dengan melakukan penjemuran dibawah sinar matahari. Tetapi dengan cara ini proses pengeringan ini kurang efisien karena memerlukan waktu yang lama, memerlukan tempat penjemuran yang luas, hasil pengeringan yang bermutu relatif rendah dan tidak seragam (Wiraatmadja *et al.*, 1988).

Tujuan utama pengeringan butiran adalah untuk mengurangi kadar airnya sehingga kerusakan tidak terjadi sebelum digunakan. Jika butiran kedelai yang akan disimpan tidak dikeringkan, maka bahan akan berubah sifat atau rusak akibat terjadinya pembusukan atau aktivitas mikroorganisme. Pengeringan butiran berkadar air tinggi, dapat dilakukan baik dalam waktu lama pada suhu udara pengering yang rendah (memanfaatkan tenaga matahari) atau dalam waktu yang lebih pendek pada suhu yang lebih tinggi. Jika waktu yang dilakukan untuk pengeringan terlalu lama, dapat menyebabkan penjamuran dan pembusukan, apalagi jika dilakukan pada musim penghujan. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi bisa menyebabkan kerusakan baik secara fisik maupun kimia terhadap butiran tersebut, khususnya untuk bahan-bahan yang sangat sensitif terhadap temperatur (Istadi dan Sitompul, 2000).



Bila butiran basah dikeringkan dengan cara dipanaskan, maka akan terjadi dua proses yang utama terjadi, yaitu: perpindahan panas dari udara pengering ke butiran untuk menguapkan air di permukaan butiran, yang selanjutnya terjadi konduksi panas ke dalam butiran, dan perpindahan air dari dalam ke permukaan butiran (difusi) yang selanjutnya terjadi penguapan ke udara pengering. Pada perpindahan massa dari bahan ke udara dalam bentuk uap air terjadi pengeringan permukaan bahan. Setelah kenaikan suhu terjadi pada seluruh bagian bahan maka terjadi pergerakan air secara difusi sampai kadar air dalam bahan menurun sesuai yang diinginkan.

Bentuk biji kedelai umumnya bulat lonjong tetapi ada pula yang bundar atau bulat agak pipih. Dengan mengasumsikan bentuk kedelai sama yaitu memiliki bentuk bulat seperti bola, sehingga digunakan model perpindahan panas dan perpindahan massa pada benda yang berbentuk bola. Model tersebut digunakan untuk memperoleh profil perpindahan panas pada proses pengeringan butiran kedelai. Sehingga dengan adanya profil pengeringan butiran kedelai ini dapat bermanfaat bagi pembuatan mesin pengeringan.

Istadi dan Sitompul (2000) telah mengkaji model heterogen pada proses pengeringan, model ini diselesaikan dengan menggunakan skema implisit dan skema eksplisit. Hasil dari penelitian ini adalah mensimulasikan model heterogen pada pengeringan butiran jagung dalam unggun diam. Rafiee *et al.* (2008) hanya mensimulasikan perpindahan massa selama proses pengeringan pada kedelai varietas Villiamz.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, penulis tertarik untuk mensimulasikan model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai dengan menggunakan gabungan dari skema eksplisit dan implisit yaitu skema metode- $\theta$  .

## **1.2 Rumusan Masalah**

Masalah yang akan dibahas dalam skripsi ini dengan mengasumsikan bentuk butiran kedelai adalah bulat, yaitu:

- a. bagaimana profil model perpindahan panas pada proses pengeringan butiran kedelai,
- b. bagaimana profil perpindahan massa pada proses pengeringan butiran kedelai.

## **1.3 Batasan Masalah**

- a. Bentuk butiran kedelai diasumsikan sama yaitu berbentuk bulat seperti bola.
- b. Ukuran butiran kedelai diasumsikan memiliki jari-jari yang sama.
- c. Sifat fisik butiran kedelai dianggap homogen.

## **1.4 Tujuan**

Tujuan dalam skripsi ini, yaitu:

- a. untuk mengetahui profil perpindahan panas pada proses pengeringan butiran kedelai,
- b. untuk mengetahui profil perpindahan massa pada proses pengeringan butiran kedelai.

## **1.5 Manfaat**

Manfaat yang di ambil dari skripsi ini yaitu mendapatkan pengaruh nilai-nilai sifat fisik pada proses pengeringan yang bermanfaat dalam pembuatan mesin pengering.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Kedelai

Secara umum biji kedelai berkeping dua, terbungkus kulit biji dan tidak mengandung jaringan endosperma. Embrio terletak di antara keping biji. Pusat biji (hilum) adalah jaringan bekas biji melekat pada dinding buah. Bentuk biji kedelai umumnya bulat lonjong tetapi ada pula yang bundar atau bulat agak pipih. Sedangkan dalam skripsi ini bentuk biji kedelai diasumsikan sama, yaitu berbentuk bola.



Gambar 2.1 Biji Kedelai

(sumber gambar: <http://www.ekon.go.id/news/2012/07/25/pemerintah-akan-bebaskan-bea-masuk-kedelai>)

Menurut Sitompul *et al.*(2003) pengeringan adalah proses untuk mengeluarkan atau menghilangkan sebagian air dari suatu bahan, dengan cara menguapkan sebagian besar air yang dikandungnya dengan menggunakan energi panas. Hellevang (1994), butiran kedelai dengan kandungan air maksimal 13 % dapat disimpan paling lama 6 bulan, sedangkan butiran kedelai dengan kandungan air bahan maksimal 11 % dapat disimpan lebih dari 6 bulan.

Pada proses pengeringan umumnya dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan cara tradisional dan cara teknologi (buatan).

#### a. Cara Tradisional

Pengeringan dengan cara tradisional yaitu dengan memanfaatkan sinar matahari. Teknik pengeringan dilakukan secara langsung maupun tidak langsung (dikeringanginkan), dengan rak-rak maupun lantai semen atau tanah serta penampung bahan lainnya. Proses pengeringan secara alami memang lebih praktis, murah dan sederhana. Kelemahan cara ini adalah memerlukan hamparan yang luas, hasil pengeringan yang bermutu relatif rendah dan tidak seragam, kebersihan sukar untuk diawasi, tergantung dari cuaca jumlah panas matahari tidak tetap, kenaikan suhu tidak dapat diatur, sehingga waktu penjemuran tidak dapat ditentukan dengan tepat.

#### b. Cara Teknologi

Pengeringan dengan pemanas buatan mempunyai beberapa keistimewaan yaitu suhu dan aliran udara dapat diatur, tidak memerlukan hamparan yang luas, waktu pengeringan dapat ditentukan dengan tepat dan kebersihan dapat diawasi. Tetapi, dengan cara ini memerlukan panas selain sinar matahari berupa bahan bakar, sehingga biaya pengeringan menjadi mahal, memerlukan peralatan yang relatif mahal harganya, serta memerlukan tenaga kerja dengan keahlian tertentu (Effendi, 2009).

## 2.2 Perpindahan Panas

Menurut Kreith (1997), perpindahan panas adalah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Panas akan mengalir dari tempat yang bersuhu tinggi ke tempat yang bersuhu rendah. Perpindahan panas terjadi menurut tiga mekanisme, yaitu:

- a. konduksi,
- b. radiasi, dan
- c. konveksi.

### 2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas jika panas mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya lebih rendah, dengan media penghantar

panas tetap. Laju perpindahan panas dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.1)$$

dengan  $\frac{\partial T}{\partial x}$  ialah *gradient* suhu (*temperature gradient*) dalam arah normal (tegak lurus) terhadap luas daerah  $A$ . Konduktivitas termal (*thermal conductivity*)  $k$  ialah suatu nilai yang ditentukan dari eksperimen dengan medium yang dapat bergantung dari berbagai sifat lain seperti suhu dan tekanan.

### 2.2.2 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran atau radiasi gelombang elektro-magnetik, tanpa memerlukan media perantara. *Hukum Stefan-Bolzmant* yang fundamental menyatakan

$$q = \sigma AT^4, \quad (2.3)$$

dengan  $T$  adalah suhu. Nilai  $\sigma$  tidak bergantung pada permukaan, medium atau suhu.

### 2.2.3 Konveksi

Konveksi adalah proses transport energi dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas.

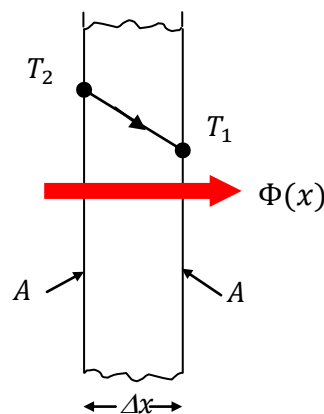
Jika suhu dibagian hulu adalah  $T_s$  dan suhu permukaan benda  $T_\infty$ , maka perpindahan panas per satuan waktu adalah

$$q = hA(T_s - T_\infty). \quad (2.4)$$

Hubungan ini dinamakan dengan *hukum Newton*. Persamaan ini mendefinisikan koefisien perpindahan kalor konveksi (*convective heat-transfer coefficient*)  $h$  yang merupakan konstanta proporsionalitas (tetapan kesebandingan) yang menghubungkan perpindahan panas per satuan waktu dan satuan luar dengan beda suhu menyeluruh (Pitts dan Sissom,1987).

### 2.3 Hukum Fourier untuk Perpindahan Panas

Misal perpindahan panas dengan cara konduksi, dalam keadaan *steady*, melewati dinding dengan ketebalan  $\Delta x = L$  dan luas permukaan  $A$ , seperti terlihat pada Gambar 2.2. Perubahan temperatur yang melewati dinding adalah  $\Delta T = T_2 - T_1$  (Çengel, 1998). Pengertian *steady* adalah bila laju aliran panas dalam suatu sistem tidak berubah dengan waktu, yaitu laju tersebut konstan, maka suhu di titik manapun tidak berubah (Kreith, 1997).



Gambar 2.2 Konduksi Panas Melewati Dinding dengan ketebalan  $\Delta x$  dan Luas Daerah  $A$

Laju konduksi panas yang melewati permukaan bidang berbanding lurus dengan perubahan temperatur yang melewati lapisan dan daerah perpindahan panas, tetapi berbanding terbalik dengan ketebalan dinding.

$$\text{Laju Konduksi Panas} \approx \frac{(\text{Luas Daerah}) (\text{Perubahan Temperatur})}{\text{Ketebalan Dinding}},$$

atau

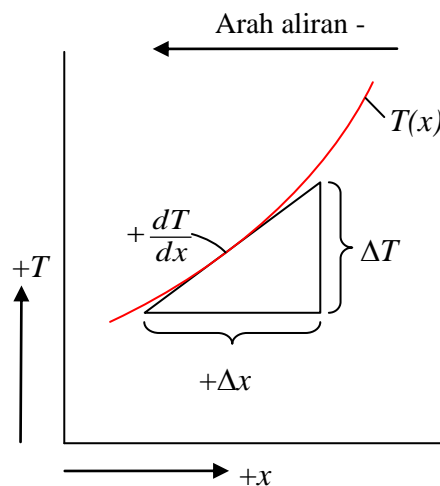
$$\Phi(x) = k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

dengan  $k$  adalah konduktivitas thermal, yang diukur dari kemampuan material untuk menghantarkan panas. Dengan pendekatan  $\Delta x \rightarrow 0$ , persamaan di atas berubah menjadi:

$$\Phi(x) = -k A \frac{dT}{dx} . \quad (2.5)$$

Tanda negatif pada persamaan (2.5) diatas menunjukkan bahwa aliran konduksi panas dari daerah dengan temperatur tinggi ke temperatur rendah berlawanan arah gradient temperatur seperti pada Gambar 2.3 (Çengel, 1998). Jika  $A$  merupakan luas permukaan yang bernilai satu satuan ukuran luas. Sehingga persamaan (2.5) dapat ditulis menjadi:

$$\Phi(x) = -k \frac{dT}{dx} . \quad (2.6)$$



Gambar 2.3 Sketsa yang Melukiskan Perjanjian tentang Tanda untuk Aliran Panas Konduksi

#### 2.4 Perpindahan Panas pada Bola

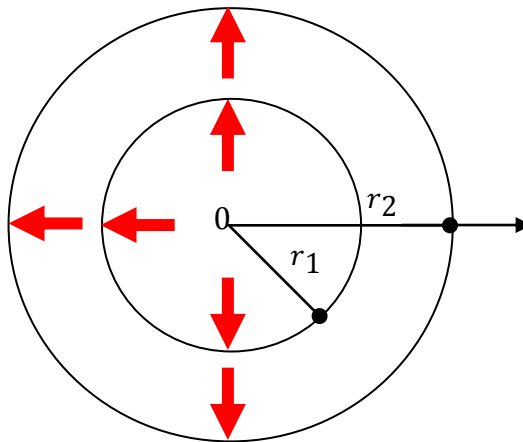
Pada suatu benda, panas akan merambat dari tempat yang bersuhu tinggi ke tempat yang bersuhu rendah. Pada benda yang berbentuk *spherik* (bola), panas akan mengalir dari yang bersuhu tinggi ke yang bersuhu rendah secara simetri, yaitu lurus mengarah ke titik tengah bola.

Misal temperatur  $T(r, \theta, \phi, t)$  adalah temperatur dalam benda *spherik* yang dinyatakan dalam tiga dimensi  $r$ ,  $\theta$ , dan  $\phi$  yang berubah terhadap waktu  $t$ . Temperatur

$T$  merambat secara simetri, sehingga  $T$  tidak bergantung pada sudut  $\theta$  dan  $\phi$ , tetapi hanya bergantung pada posisi radius  $r$ . Sehingga  $T = T(r,t)$  menyatakan temperatur dan  $\Phi = \Phi(r)$  menyatakan fluks panas (*heat flux*), yaitu panas yang melalui suatu permukaan per satuan luas ( $m^2$ ) per satuan waktu (*detik*).

Misalkan potongan dari suatu bola antara posisi  $r_1$  dan  $r_2$  seperti diperlihatkan pada gambar 2.4, panas yang masuk melalui bola bagian dalam dengan radius  $r_1$  dan luas daerah  $4\pi r_1^2$  adalah  $4\pi r_1^2 \Phi(r_1)$  dan panas yang keluar melalui radius  $r_2$  dengan luas daerah  $4\pi r_2^2$  adalah  $4\pi r_2^2 \Phi(r_2)$ . Sehingga panas yang masuk ke lapisan antara  $r_1$  dan  $r_2$  adalah panas yang masuk dikurangi dengan panas yang keluar, atau secara aljabar dapat ditulis sebagai berikut :

$$4\pi r_1^2 \Phi(r_1) - 4\pi r_2^2 \Phi(r_2).$$



Gambar 2.4 Panas Merambat Secara Simetri Antara  $r_1$  dan  $r_2$

Dengan menaikkan  $T$  dengan cara menaikkan  $\Delta T$  dalam lapisan, maka  $\Delta H = C\rho V\Delta T$ , dengan  $C$  adalah panas spesifik,  $\rho$  adalah kepadatan massa,  $V$  adalah volume ( $\frac{4}{3}\pi r_2^3 - \frac{4}{3}\pi r_1^3$ ),  $\Delta H$  adalah perubahan panas dalam lapisan dan  $\Delta T$  adalah perubahan temperatur. Hubungan antara perubahan panas per unit waktu terhadap perubahan temperatur per unit waktu adalah :



$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = C\rho \left( \frac{4}{3} \pi r_2^3 - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \right) \frac{\Delta T}{\Delta t}.$$

Dengan mengambil nilai limit  $\Delta t \rightarrow 0$ , panas yang dikandung dalam lapisan per detik, diperoleh :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = C\rho \left( \frac{4}{3} \pi r_2^3 - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \right) \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.7)$$

Keseimbangan panas dalam sistem dapat dinyatakan sebagai :

$$4\pi r_1^2 \Phi(r_1) - 4\pi r_2^2 \Phi(r_2) = C\rho \left( \frac{4}{3} \pi r_2^3 - \frac{4}{3} \pi r_1^3 \right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

atau

$$-\frac{[4\pi r^2 \Phi(r)]_{r=r_2} - [4\pi r^2 \Phi(r)]_{r=r_1}}{r_2 - r_1} = \frac{C\rho \frac{4}{3} \pi (r_2^3 - r_1^3)}{r_2 - r_1} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.9)$$

Selanjutnya dengan mengambil nilai  $r_2 - r_1 = \Delta r \rightarrow 0$ , diperoleh  $r_2 = r_1 = r$  dan  $(r_2^2 + r_1 \cdot r_2 + r_1^2) = 3r^2$ . Dengan menggunakan hukum Fourier tentang perpindahan panas, fluks panas  $\Phi(r)$  atau panas yang merambat per unit area dan per unit waktu pada suatu titik dalam sebuah medium adalah berbanding lurus dengan gradien temperatur di titik tersebut, yaitu :

$$\Phi(r) = -kA \frac{dT}{dr}.$$

Substitusikan nilai-nilai di atas ke persamaan (2.9), kita peroleh persamaan differensial parsial dari persamaan dalam sistem *spherik* sebagai berikut :

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (2.10)$$

(Hidayat, 2006).

## 2.5 Perpindahan Massa

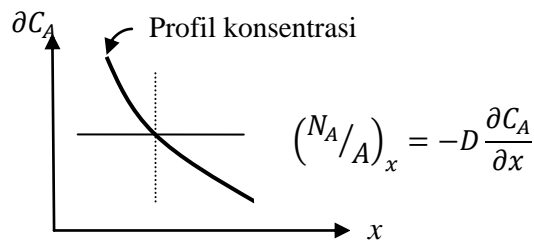
Perpindahan massa (*mass transfer*) adalah perpindahan salah satu unsur dari daerah yang konsentrasinya lebih tinggi ke daerah yang konsentrasinya lebih rendah. Prinsip perpindahan massa analog dengan perpindahan panas. Perpindahan panas terjadi dalam arah yang mengurangi gradient suhu yang ada sedangkan perpindahan massa terjadi dalam arah yang mengurangi gradien konsentrasi yang ada. Mekanisme perpindahan massa sebagian besar bergantung pada dinamika fasa-fasa fluidanya (Kreith,1997).

### 2.5.1 Hukum Fick Tentang Difusi

Menurut Holman (1993), laju difusi diberikan oleh hukum Fick tentang difusi, yang menyatakan bahwa fluks massa dari suatu konstituen per satuan luas berbanding lurus dengan gradien suhu. Jadi,

$$\frac{N_A}{A} = -D \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (2.11)$$

dengan  $D$  adalah kostanta proporsionalitas (tetapan kesebandingan) atau koefisien difusi (*diffusion coefficient*),  $N_A$  adalah fluks massa persatuan waktu dan  $C_A$  adalah konsentrasi massa komponen  $A$  per satuan volume. Dari gambar 2.5 Dapat dilihat bahwa perpindahan massa dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah.



Gambar 2.5 Bagan Ketergantungan Difusi pada Profil Konsentrasi

### 2.5.2 Perpindahan Massa dengan Cara Difusi

Perpindahan massa dengan cara difusi (*diffusion*) secara langsung analog dengan perpindahan panas konduksi atau dengan perpindahan momentum dalam aliran laminar. Persamaan perpindahan massa satu dimensi transien dapat ditulis dalam bentuk yang identik dengan persamaan panas Fourier.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2}, \quad (2.12)$$

dengan  $C_A$  adalah konsentrasi komponen  $A$ ,  $t$  adalah waktu,  $D$  adalah difusivitas massa (*mass diffusivity*) dan  $x$  adalah jarak dalam arah difusi. Dalam keadaan stedi konsentrasi di setiap titik tidak berubah dengan waktu, dan

$$\frac{N_A}{A} = -D \frac{dC_A}{dx}, \quad (2.13)$$

dengan  $N_A/A$  adalah fluks massa. Tanda negatif muncul karena gradien konsentrasi negatif dalam arah perpindahan massa. (Kreith,1997).

Menurut Abdullah *et al.*(1992) model perpindahan massa dalam satu butir biji-bijian yang berbentuk bola dengan jari-jari ( $r$ ) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial sebagai berikut:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right), \quad (2.14)$$

dengan  $M$  merupakan kadar air yang terkandung dalam butir biji-bijian.

## 2.6 Syarat Awal dan Syarat Batas Pengeringan Butiran

### 2.6.1 Syarat Awal

Syarat awal atau kondisi awal didefinisikan dengan menuliskan distribusi temperatur yang diketahui melewati bola pada waktu nol. Dan dituliskan sebagai fungsi dari  $r$ :

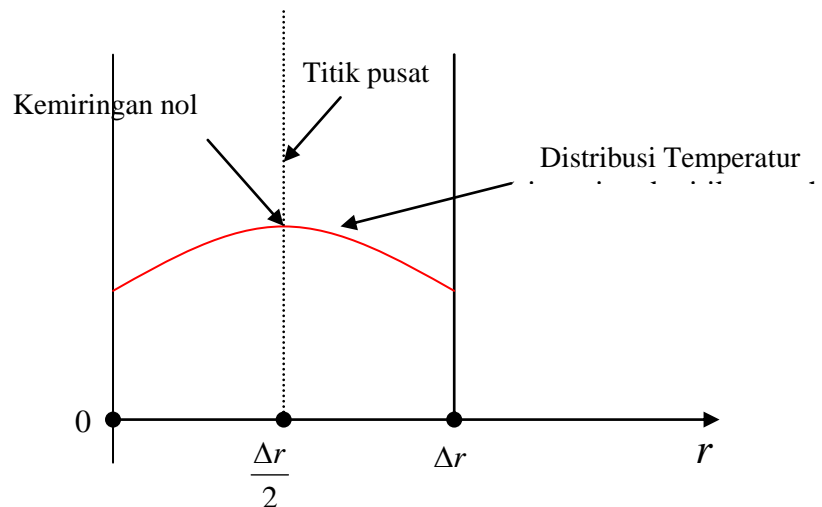
$$T(r, t = 0)$$

## 2.6.2 Syarat Batas

### a. Syarat Batas Pusat (*Center Boundary Condition*)

Substraksi atau pengurangan antara fluks masuk dan fluks keluar di pusat bola adalah nol, karena tidak ada fluks masuk maupun fluks keluar pada  $r = 0$  (lihat Gambar 2.6), sehingga gradien temperaturnya juga nol.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 \quad (2.15)$$



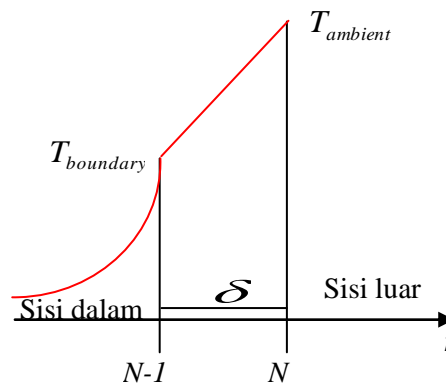
Gambar 2.6 Skema dari Syarat Batas di Pusat

### b. Syarat Batas Luar (*Outer Boundary Condition*)

Dalam proses perpindahan panas, bagian yang paling disebut sebagai batas luar dan panas dari luar disebut temperatur lingkungan ( $T_{ambient}$ ). Misalkan pada permukaan benda yang berbentuk bola terdapat suatu lapisan yang tipis (*film*) dengan ketebalan  $\delta$ . Jika indeks  $i$  menyatakan bagian dalam dan indeks  $o$  bagian luar, maka dengan menggunakan prinsip keseimbangan panas dimana fluks masuk sama dengan fluks keluar, dimana fluks masuk adalah hasil kali antara konduktivitas panas dari luar dengan selisih temperatur lingkungan ( $T_{ambient}$ ) dan temperatur pada syarat batas permukaan (lihat Gambar 2.7). Secara matematik dirumuskan dalam persamaan (2.16) berikut ini:

$$k_i \left\{ \frac{\partial T}{\partial r} \right\}_{boundary} = \frac{k_o}{\delta} \{ T_{ambient} - T_{boundary} \} \quad (2.16)$$

(Hidayat, 2006).



Gambar 2.7 Skema tentang Perpindahan Panas pada Permukaan Luar

## 2.7 Metode Numerik

Akhir-akhir ini banyak penyelesaian analitis dari masalah perpindahan kalor konduksi. Namun dalam banyak situasi praktis, kita dihadapkan pada kondisi batas yang sedemikian rupa sehingga penyelesaian analitis tidak bisa dilakukan ataupun biasa tetapi sangat kompleks, sehingga evaluasi dengan angka-angka sangat sulit. Untuk situasi yang demikian, pendekatan yang paling baik adalah didasarkan atas teknik-teknik beda hingga (*finite-difference technique*).

Misal diberikan persamaan:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; 0 < x < L; 0 < t \quad (2.17)$$

dimana  $T$  adalah temperatur,  $K$  adalah konduktivitas, sedang  $t$  dan  $x$  adalah waktu dan jarak. Untuk mengaproksimasi persamaan (2.17) dengan beda hingga, dibuat garis paralel pada sumbu  $x$  dan  $t$  yang membentuk *grid* (seperti pada Gambar 2.8). Kita akan menulis  $\Delta x$  dan  $\Delta t$  untuk jarak garis.

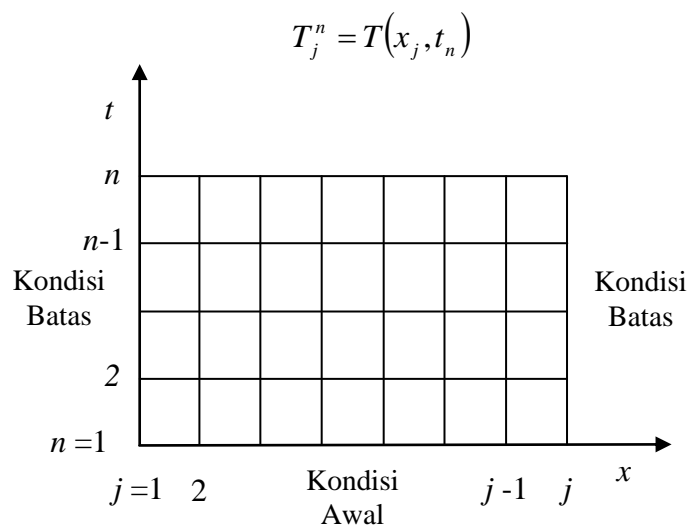
$$(x_j = j\Delta x, t_n = n\Delta t); j = 1, 2, \dots, J; n = 1, 2, \dots$$

dengan  $\Delta x = \frac{L}{j}$ , yang disebut titik jaringan (*grid point*). Bentuk turunan pertama dan kedua terhadap waktu dan ruang adalah:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta x^2} \quad (2.19)$$

Dalam bentuk beda hingga di atas, superskrip  $n$  dan  $n+1$  menunjukkan nilai  $T$  pada waktu  $n$  dan  $n+1$ . Penulisan  $n$  sebagai superskrip, menunjukkan waktu, untuk membedakan dengan subskrip untuk  $j$  yang menunjukkan notasi ruang (Triatmodjo, 1992). Kita akan mengaproksimasi solusi pada titik jaringan dengan menunjukkan bahwa nilai aproksimasi adalah:



Gambar 2.8 Bidang Hitungan Penyelesaian Numerik

Ada empat tipe metode (skema) dasar untuk menyelesaikan persamaan (2.17), yaitu:

- a. skema Eksplisit,
- b. skema Implisit,
- c. skema Crank-Nicholson, dan
- d. skema Metode- $\theta$ .

### 2.7.1 Skema Eksplisit

Pada skema eksplisit, variabel waktu  $n+1$  dihitung berdasarkan variabel pada waktu  $n$  yang sudah diketahui (Gambar 2.9). Dengan menggunakan skema seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10, fungsi  $T(x,t)$  dan turunannya dalam ruang dan waktu didekati oleh bentuk berikut:

$$T(x,t) = T_j^n$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \approx \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \approx \frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta x^2}$$

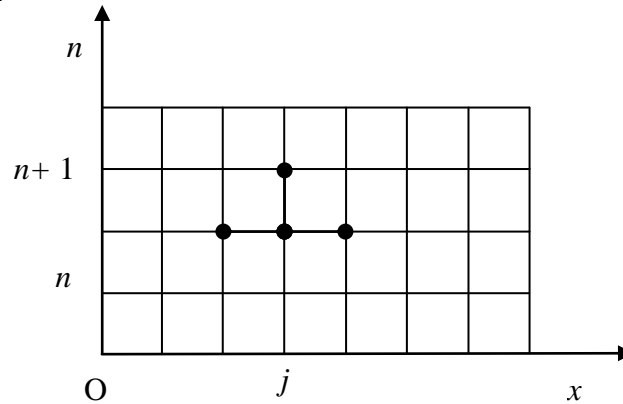
sehingga persamaan (2.17) dapat ditulis :

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = K_j \frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta x^2}$$

atau

$$T_j^{n+1} = T_j^n + K_j \nu (T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n) \quad (2.20)$$

dimana  $\nu = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$



Gambar 2.9 Skema Metode Eksplisit

Persamaan (2.17) dengan kondisi batas yang diketahui memungkinkan untuk menghitung  $T_j^{n+1}$ , dari nilai awal dan nilai batas :

$$T_j^0 = T^0(x_j); j = 1, 2, \dots, J-1$$

$$T_0^n = T_j^n = 0; n = 0,1,2,\dots$$

Kondisi perhitungan pada metode eksplisit akan stabil jika  $0 < \nu < \frac{1}{2}$ . Skema eksplisit memberikan hasil yang baik apabila langkah waktu  $\Delta t$  yang cukup kecil. Apabila  $\Delta t$  besar, penyelesaian dari persamaan (2.20) menjadi tidak stabil. Keterbatasan ini menyebabkan metode eksplisit kurang disukai, karena diperlukan waktu hitungan yang lebih lama.

### 2.7.2 Skema Implisit

Dalam skema implisit, ruas kanan persamaan (2.17) tersebut ditulis pada waktu  $n+1$ , dimana nilainya belum diketahui. Gambar 2.10 menunjukkan jaringan titik simpul dari skema implisit. Dengan menggunakan skema tersebut, fungsi  $T(x,t)$  dan turunannya dalam ruang dan waktu didekati oleh bentuk berikut ini :

$$T(x,t) = T_j^n \text{ atau } T(x,t) = T_j^{n+1}$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} \approx \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \approx \frac{T_{j+1}^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{2\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \approx \frac{T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}}{\Delta x^2}$$

Dengan menggunakan skema di atas, persamaan (2.17) dapat ditulis dalam bentuk beda hingga :

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = K_j \frac{T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{\Delta t} T_j^{n+1} - \frac{K_j}{\Delta x^2} T_{j-1}^{n+1} + \frac{2K_j}{\Delta x^2} T_j^{n+1} - \frac{K_j}{\Delta x^2} T_{j+1}^{n+1} = \frac{T_j^n}{\Delta t}$$

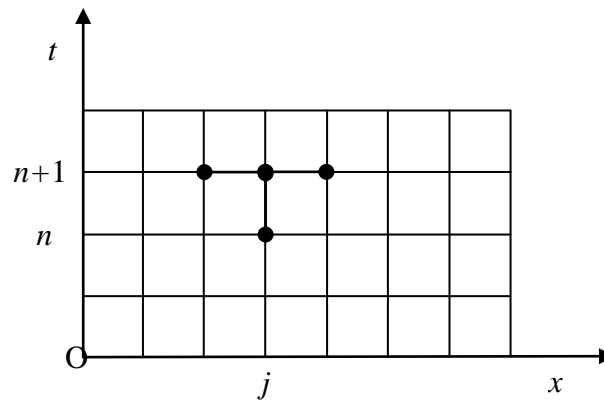
$$-\frac{K_j}{\Delta x^2} T_{j-1}^{n+1} + \left( \frac{1}{\Delta t} + \frac{2K_j}{\Delta x^2} \right) T_j^{n+1} - \frac{K_j}{\Delta x^2} T_{j+1}^{n+1} = \frac{T_j^n}{\Delta t}$$



$$-vK_j T_{j-i}^{n+1} + (1 + 2vK_j) T_j^{n+1} - vK_j T_{j+i}^{n+1} = T_j^n \quad (2.22)$$

dengan  $v = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$

Dengan memberikan nilai  $j = 1, 2, \dots, (j-1)$ , kita peroleh persamaan linier  $j-1$  yang dapat diselesaikan dengan metode matrik.



Gambar 2.10 Skema Metode Implisit

Penyelesaian dengan menggunakan skema implisit lebih sulit dibandingkan dengan skema eksplisit. Kelebihan dari skema implisit adalah stabil tanpa syarat, langkah waktu  $\Delta t$  dapat diambil sembarang (besar) tanpa menimbulkan ketidakstabilan. Pembatasan  $\Delta t$  hanya untuk menjaga kesalahan pemotongan (*truncation error*) dalam batas-batas yang dapat diterima.

### 2.7.3 Skema Crank-Nicholson

Dalam skema eksplisit, ruas kanan dari persamaan (2.17) ditulis pada waktu  $n$ . Dalam skema implisit, ruas kanan dari persamaan tersebut ditulis untuk waktu  $n+1$ . Skema Crank-Nicholson menulis ruas kanan dari persamaan (2.17) pada waktu  $\frac{n+1}{2}$  yang merupakan nilai rerata dari skema eksplisit dan implisit. Turunan kedua fungsi terhadap  $x$  adalah :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{1}{2} \left( \frac{T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta x^2} \right)$$

Dengan menggunakan skema di atas persamaan (2.17) dapat ditulis :

$$\frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = K_j \left( \frac{1}{2} \frac{T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2} \frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta x^2} \right) \quad (2.23)$$

Suku kedua ruas kanan dari persamaan di atas telah diketahui. Terlihat bahwa persamaan di atas adalah persamaan implisit.

#### 2.7.4 Skema Metode- $\theta$

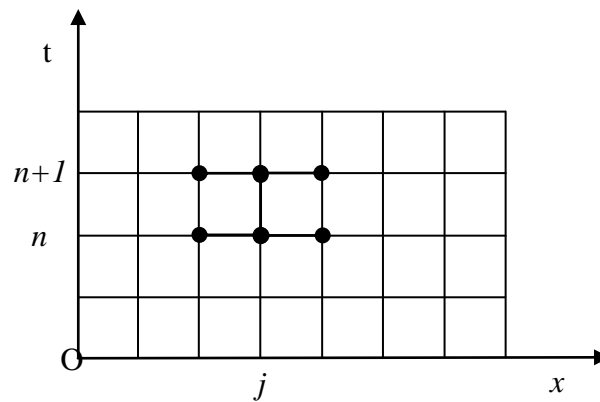
Dalam skema Crank-Nicholson, kita artikan aproksimasi beda hingga pada derivatif waktu sebagai beda pusat pada titik tengah interval waktu. Dalam Metode- $\theta$ , kita membuat pernyataan lebih umum dengan mengartikan aproksimasi ini untuk penerapan pada beberapa titik yang lain dalam interval waktu.

Sekarang kita anggap dua metode beda hingga, yang mana berbeda hanya dalam satu aproksimasi kedua jarak derivatif dengan tiga titik pada level waktu yang lama, yaitu  $t_n$ , dan yang lainnya menggunakan tiga titik pada level waktu yang baru,  $t_{n+1}$ . Secara umum aproksimasi dengan metode- $\theta$  menggunakan keenam titik ini. Ini dapat dianggap bahwa kita mengambil rata-rata terbobot (*weighted*) pada dua formula. Bila waktu beda (*difference*) pada sisi kiri sama, kita dapatkan skema enam titik (Gambar 2.11).

Skema metode- $\theta$  dapat dituliskan sebagai berikut;

$$\begin{aligned} \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} &= \theta \left( \frac{T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}}{\Delta x^2} \right) + (1 - \theta) \left( \frac{T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n}{\Delta x^2} \right), \\ T_j^{n+1} - T_j^n &= \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \left[ \theta (T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}) + (1 - \theta) (T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n) \right], \\ T_j^{n+1} &= T_j^n + v \left[ \theta (T_{j-1}^{n+1} - 2T_j^{n+1} + T_{j+1}^{n+1}) + (1 - \theta) (T_{j-1}^n - 2T_j^n + T_{j+1}^n) \right] \end{aligned} \quad (2.24)$$

dengan  $\nu = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$ .



Gambar 2.11 Skema Metode- $\theta$

Kestabilan metode- $\theta$  dapat dinyatakan sebagai berikut:

- (a)  $0 \leq \theta \leq \frac{1}{2}$ , stabil jika dan hanya jika  $\nu \leq \frac{1}{2}(1 - 2\theta)^{-1}$
- (b)  $\frac{1}{2} < \theta \leq 1$ , stabil untuk semua nilai  $\nu$

Kelebihan dari skema ini adalah untuk nilai  $\Delta x$  tertentu kesalahan pemotongan pada suku dalam  $\Delta t$  adalah lebih kecil daripada dalam skema eksplisit dan implisit (Hidayat, 2009). Metode- $\theta$  inilah yang akan digunakan untuk mendiskritisasi model dalam skripsi ini.

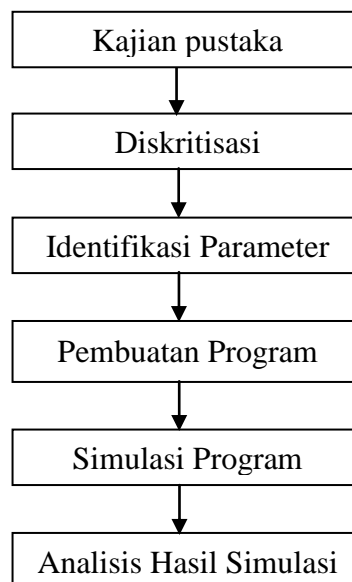
## BAB 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Data

Data yang digunakan dalam skripsi ini adalah data primer hasil pengukuran di Laboratorium Fisika Dasar Fakultas MIPA Universitas Jember. Data yang dihasilkan dari hasil pengukuran antara lain konduktivitas termal ( $k$ ), panas spesifik ( $C$ ), kepadatan massa ( $\rho$ ), jari-jari ( $r$ ) dan kadar air awal ( $M_0$ ) dari kedelai jenis Lokal, Import (Amerika) dan Edamame. Sedangkan untuk difusivitas massa ( $D$ ) dan Suhu pengeringan ( $T_{ambient}$ ) diambil dari literatur yang berhubungan dengan pengeringan butiran kedelai.

### 3.2. Langkah-langkah Penyelesaian

Secara umum langkah-langkah yang akan dilakukan untuk menyelesaikan permasalahan pada subbab 1.2 terdiri dari beberapa langkah. Secara skematik dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Skema Langkah Penelitian

Dari skema pada Gambar 3.1, langkah-langkah penelitian dapat dijelaskan sebagai berikut:

a. Kajian Pustaka

Kajian pustaka dengan cara memahami secara teoritis mengenai model perpindahan dan massa pada butiran dalam proses pengeringan.

b. Diskritisasi

Diskritisasi model ini bertujuan untuk merubah model yang kontinu menjadi bentuk model diskrit. Diskritisasi model perpindahan panas pada persamaan (2.10) dan perpindahan massa pada persamaan (2.14) dengan menggunakan metode- $\theta$ .

c. Identifikasi Parameter

Langkah selanjutnya dalam simulasi model perpindahan panas dan perubahan massa pada proses pengeringan butiran kedelai adalah menentukan parameter yang akan digunakan dalam simulasi. Penentuan parameter ini diambil dari data primer yang telah didapat, misalnya konduktivitas termal ( $k$ ), panas spesifik ( $C$ ), kepadatan massa ( $\rho$ ), kadar air awal ( $M_o$ ) dan jari-jari ( $r$ ) nilainya diambil rata-rata butir kedelai besar. Sedangkan nilai difusivitas massa ( $D$ ) dan suhu pengeringan ( $T_{ambient}$ ) diambil dari literatur.

d. Pembuatan Program

*Software* yang akan digunakan dalam membuat program adalah *software* Matlab 7.8. Prosedur untuk membuat program simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai sebagai berikut:

- 1) Input nilai-nilai parameter seperti yang ada pada langkah c.
- 2) Proses
  - a) Membuat subprogram untuk perpindahan panas yang terjadi pada butiran.
  - b) Membuat subprogram untuk perpindahan massa yang terjadi pada butiran.
- 3) Output program berupa waktu serta grafik perpindahan panas dan massa.

#### e. Simulasi

Setelah pembuatan program selesai, langkah selanjutnya yaitu mensimulasi beberapa parameter yaitu suhu dan kadar air. Simulasi ini dilakukan dengan mengubah-ubah beberapa nilai parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Suhu yang akan digunakan dalam pengeringan butiran kedelai antara 50°C-70°C (Rafiee *et al.*, 2008). Kadar air butiran kedelai yang akan dicapai dalam proses pengeringan antara 11% - 13% (Hellevang, 1994).

#### f. Analisis Hasil

Output dari program yang dibuat berupa waktu yang diperlukan untuk panas merambat sampai pusat butiran dan waktu yang di butuhkan untuk menyamakan kadar air butiran kedelai sampai 11% atau 13%. Hasil yang diperoleh dari simulasi selanjutnya dianalisis untuk mengetahui pengaruh dari nilai-nilai sifat fisik kedelai sehingga didapat profil pengeringan butiran kedelai.

## BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Diskritisasi

Penyelesaian persamaan perpindahan panas dan massa dengan menggunakan metode beda hingga. Proses diskritisasi yang digunakan pada skripsi ini menggunakan gabungan dari skema implisit dan skema eksplisit, yaitu dengan skema metode- $\theta$ .

#### 4.1.1 Diskritisasi Persamaan Perpindahan Panas

##### a. Diskritisasi Syarat Batas pada $r = 0$

Syarat batas pada pusat bola adalah:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=0} = 0 \quad (4.1)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan bola dengan batas  $\left[0, \frac{1}{2}\Delta r\right]$  sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\frac{1}{2}\Delta r} (C\rho r^2 T) dr &= \left[ kr^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right]_0^{\frac{1}{2}\Delta r} \\ \frac{\partial T_0}{\partial t} \left[ \frac{1}{3} C\rho r^3 \right]_0^{\frac{1}{2}\Delta r} &= k \left( \frac{1}{2}\Delta r \right)^2 \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{\frac{1}{2}\Delta r} \\ \frac{\partial T_0}{\partial t} \frac{1}{3} C\rho \left( \frac{1}{2}\Delta r \right)^3 &= k \left( \frac{1}{2}\Delta r \right)^2 \frac{T_1 - T_0}{\Delta r} \\ \frac{\partial T_0}{\partial t} \frac{1}{24} C\rho \Delta r^3 &= k \frac{1}{4} \Delta r^2 \frac{T_1 - T_0}{\Delta r} \\ \frac{\partial T_0}{\partial t} &= 6 \frac{k}{C\rho} \frac{T_1 - T_0}{\Delta r^2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Persamaan (4.2) didiskritisasi dengan menggunakan skema implisit dan skema eksplisit sehingga diperoleh persamaan (4.2a) dan (4.2b).

$$\frac{T_0^{n+1} - T_0^n}{\Delta t} = 6 \frac{k}{C\rho} \frac{T_1^{n+1} - T_0^n}{\Delta r^2} \quad (4.2a)$$

$$\frac{T_0^{n+1}-T_0^n}{\Delta t} = 6 \frac{k}{c\rho} \frac{T_1^n - T_0^n}{\Delta r^2} \quad (4.2b)$$

Dengan menggunakan aproksimasi metode- $\theta$ , diskritisasi syarat batas pada  $x = 0$  diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{T_0^{n+1}-T_0^n}{\Delta t} &= 6 \frac{k}{c\rho} \left[ \theta \frac{T_1^{n+1}-T_0^{n+1}}{\Delta r^2} - (1-\theta) \frac{T_1^n - T_0^n}{\Delta r^2} \right] \\ T_0^{n+1} &= T_0^n + 6 \frac{k}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \theta (T_1^{n+1} - T_0^{n+1}) + 6 \frac{k}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} (1-\theta) (T_1^n - T_0^n) \\ \left( 1 + 6 \frac{k}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \theta \right) T_0^{n+1} - 6 \frac{k}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \theta T_1^{n+1} &= \left( 1 - 6 \frac{k}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} (1-\theta) \right) T_0^n + \\ & 6 \frac{k}{c\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} (1-\theta) T_1^n \end{aligned}$$

dengan  $v = \frac{\Delta t}{\Delta r^2}$ , maka diperoleh:

$$\begin{aligned} \left( 1 + 6 \frac{k}{c\rho} v\theta \right) T_0^{n+1} - 6 \frac{k}{c\rho} v\theta T_1^{n+1} &= \left( 1 - 6 \frac{k}{c\rho} v(1-\theta) \right) T_0^n + \\ & 6 \frac{k}{c\rho} v(1-\theta) T_1^n \end{aligned} \quad (4.3)$$

#### b. Diskritisasi *Interior Grid-Point*

Diskritisasi persamaan *Interior Grid-Point*  $1 \leq j \leq J$  adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} -\frac{kv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j-1}^{n+1} + \left[ 1 + \frac{kv\theta}{c\rho} \left( \frac{(j-\frac{1}{2})^2 + (j+\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} \right) \right] T_j^{n+1} - \frac{kv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j+1}^{n+1} = \\ \frac{kv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j-1}^n + \left[ 1 - \frac{kv(1-\theta)}{c\rho} \left( \frac{(j-\frac{1}{2})^2 + (j+\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} \right) \right] T_j^n + \frac{kv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j+1}^n \end{aligned}$$

atau

$$\begin{aligned} -\frac{kv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j-1}^{n+1} + \left[ 1 + 2 \frac{kv\theta}{c\rho} \frac{(j^2+\frac{1}{4})}{(j^2+\frac{1}{12})} \right] T_j^{n+1} - \frac{kv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j+1}^{n+1} = \frac{kv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j-1}^n + \\ \left[ 1 - 2 \frac{kv(1-\theta)}{c\rho} \frac{(j^2+\frac{1}{4})}{(j^2+\frac{1}{12})} \right] T_j^n + \frac{kv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})} T_{j+1}^n \end{aligned} \quad (4.4)$$



### c. Diskritisasi Syarat Batas Luar

Dari syarat batas Diriclet didapatkan diskritisasi syarat batas luar dalam bentuk:

$$T_j^{n+1} = T_{ambient}$$

Sedangkan diskritisasi syarat batas Robin untuk kasus ini diperoleh:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{boundary} + T_{boundary} = T_{ambient}$$

$$\theta \left( \frac{T_j^{n+1} - T_{j-1}^{n+1}}{\Delta r} \right) + (1 - \theta) \left( \frac{T_j^n - T_{j-1}^n}{\Delta r} \right) + \alpha (\theta T_j^{n+1} + (1 - \theta) T_j^n) = \alpha T_{ambient}$$

atau

$$\left( \alpha + \frac{1}{\Delta r} \right) \theta T_j^{n+1} - \frac{\theta}{\Delta r} T_{j-1}^{n+1} = \alpha T_{ambient} + \frac{(1 - \theta)}{\Delta r} T_{j-1}^n - \left( \alpha + \frac{1}{\Delta r} \right) (1 - \theta) T_j^n$$

dengan  $\alpha = \frac{\mu}{\lambda \delta}$ .

### 4.1.2 Diskritisasi Persamaan Perpindahan Massa

#### a. Diskritisasi Syarat Batas pada $r = 0$

Syarat batas pada pusat bola adalah:

$$\left( \frac{\partial M}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (4.5)$$

Dengan mengintegalkan persamaan bola dengan batas  $\left[ 0, \frac{1}{2} \Delta r \right]$  sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{\frac{1}{2} \Delta r} \left( \frac{r^2}{D} M \right) dr = \left[ r^2 \frac{\partial M}{\partial r} \right]_0^{\frac{1}{2} \Delta r}$$

$$\frac{\partial M_0}{\partial t} \left[ \frac{1}{3} \frac{r^3}{D} \right]_0^{\frac{1}{2} \Delta r} = \left( \frac{1}{2} \Delta r \right)^2 \left( \frac{\partial M}{\partial r} \right)_{\frac{1}{2} \Delta r}$$

$$\frac{\partial M_0}{\partial t} \frac{1}{3D} \left( \frac{1}{2} \Delta r \right)^3 = \left( \frac{1}{2} \Delta r \right)^2 \frac{M_1 - M_0}{\Delta r}$$

$$\frac{\partial M_0}{\partial t} \frac{1}{24D} \Delta r^3 = \frac{1}{4} \Delta r^2 \frac{M_1 - M_0}{\Delta r}$$

$$\frac{\partial M_0}{\partial t} = 6D \frac{M_1 - M_0}{\Delta r^2} \quad (4.6)$$

Persamaan (4.6) didiskritisasi dengan menggunakan skema implisit dan skema eksplisit sehingga diperoleh persamaan (4.6a) dan (4.6b).

$$\frac{M_0^{n+1} - M_0^n}{\Delta t} = 6D \frac{M_1^{n+1} - M_0^n}{\Delta r^2} \quad (4.6a)$$

$$\frac{M_0^{n+1} - M_0^n}{\Delta t} = 6D \frac{M_1^n - M_0^n}{\Delta r^2} \quad (4.6b)$$

Dengan menggunakan aproksimasi metode- $\theta$ , diskritisasi syarat batas pada  $r = 0$  diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{M_0^{n+1} - M_0^n}{\Delta t} &= 6D \left[ \theta \frac{M_1^{n+1} - M_0^{n+1}}{\Delta r^2} - (1 - \theta) \frac{M_1^n - M_0^n}{\Delta r^2} \right] \\ M_0^{n+1} &= M_0^n + 6D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \theta (M_1^{n+1} - M_0^{n+1}) + 6D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} (1 - \theta) (M_1^n - M_0^n) \\ \left( 1 + 6D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \theta \right) M_0^{n+1} - 6D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \theta T_1^{n+1} &= \left( 1 - 6D \frac{\Delta t}{\Delta r^2} (1 - \theta) \right) M_0^n + \\ &\quad 6M \frac{\Delta t}{\Delta r^2} (1 - \theta) M_1^n \end{aligned}$$

dengan  $v = \frac{\Delta t}{\Delta r^2}$ , maka diperoleh:

$$\begin{aligned} (1 + 6Dv\theta)M_0^{n+1} - 6Dv\theta M_1^{n+1} &= (1 - 6Dv(1 - \theta))M_0^n + \\ &\quad 6Dv(1 - \theta)M_1^n \end{aligned} \quad (4.2b)$$

#### b. Diskritisasi *Interior Grid-Point*

Diskritisasi persamaan *Interior Grid-Point*  $1 \leq j \leq J$  adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} -\frac{Dv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j-1}^{n+1} + \left[ 1 + Dv\theta \left( \frac{(j-\frac{1}{2})^2 + (j+\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} \right) \right] M_j^{n+1} - \frac{Dv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j+1}^{n+1} &= \\ \frac{Dv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j-1}^n + \left[ 1 - Dv(1-\theta) \left( \frac{(j-\frac{1}{2})^2 + (j+\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} \right) \right] M_j^n + \frac{Dv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j+1}^n & \\ \text{atau} & \\ -\frac{Dv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j-1}^{n+1} + \left[ 1 + 2Dv\theta \frac{(j^2+\frac{1}{4})}{(j^2+\frac{1}{12})} \right] M_j^{n+1} - \frac{Dv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j+1}^{n+1} &= \\ \frac{Dv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j-1}^n + \left[ 1 - 2Dv(1-\theta) \frac{(j^2+\frac{1}{4})}{(j^2+\frac{1}{12})} \right] M_j^n + \frac{Dv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{(j^2+\frac{1}{12})} M_{j+1}^n & \end{aligned} \quad (4.8)$$

c. Diskritisasi Syarat Batas Luar

$$M_j^{n+1} = M_{ambient}$$

$$\left(\alpha + \frac{1}{\Delta r}\right) \theta M_j^{n+1} - \frac{\theta}{\Delta r} M_{j-1}^{n+1} = \alpha M_{ambient} + \frac{(1-\theta)}{\Delta r} M_{j-1}^n - \left(\alpha + \frac{1}{\Delta r}\right) (1 - \theta) M_j^n$$

dengan  $\alpha = \frac{\mu}{D\delta}$ .

#### 4.2 Identifikasi Parameter

Dalam simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai terdapat parameter-parameter yang harus ditentukan terlebih dahulu, dimana besar parameter-parameter ini akan mempengaruhi profil perpindahan panas pada pengeringan butiran kedelai. Parameter yang dimaksud antara lain konduktivitas termal ( $k$ ), panas spesifik ( $C$ ), kepadatan massa ( $\rho$ ), suhu pengeringan ( $T_{ambient}$ ), jumlah grid point ( $N$ ), kadar air awal ( $M_o$ ) dan jari-jari ( $r$ ). Dalam skripsi ini akan digunakan jumlah grid point dalam lapisan sebesar 30, suhu pengeringan ( $T_{ambient}$ ) sebesar 50°C, 60°C, dan 70°C (Rafiee *et al*, 2008) dan nilai difusivitas massa ( $D$ ) menurut Doulia *et al*. (2000) adalah  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Sedangkan untuk jari-jari dan kadar air menggunakan data primer. Jari-jari untuk kedelai Lokal, import (Amerika) dan Edamame yaitu 0,331cm; 0,3575cm dan 0,9065cm. Sedangkan kadar air awal ( $M_o$ ) pada kedelai Lokal, import (Amerika) dan Edamame antara lain yaitu 15,02%; 15,53% dan 19,16%. Sedangkan untuk parameter-parameter lain yang menggunakan data primer disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Nilai-nilai fisik kedelai

No	Jenis Kedelai	$k$ (W/cm <sup>2</sup> °C)	$C$ (J/Kg°C)	$\rho$ (kg/cm <sup>3</sup> )
1.	Lokal	0,156638	3035,04	836,5
2.	Import (Amerika)	0,125075	2613,484	841,5
3.	Edamame	0,08141	3198,648	708,4483

### 4.3 Simulasi Program

Dari bentuk diskritisasi, kita dapat menuliskan persamaan aljabar secara lengkap dari persamaan panas dalam bentuk sistem linier yang ditunjukkan dalam bentuk matriks seperti di bawah ini:

Bentuk matriks pada *grid point*:  $0 \leq j \leq J$ , untuk pengeringan butiran kedelai dengan jari-jari  $r$  yaitu:

#### a. Persamaan Matriks Perpindahan Panas

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \gamma_1 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^{n+1} \\ T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ T_{j-1}^{n+1} \\ T_j^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \gamma_3 & \gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_0^n \\ T_1^n \\ T_2^n \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ T_{j-1}^n \\ T_j^n \end{bmatrix}$$

nilai komponen matriks pada persamaan di atas adalah:

$$A_1 = 1 + 6 \frac{k}{c\rho} v\theta, A_2 = -6 \frac{k}{c\rho} v\theta$$

$$B_1 = 1 - 6 \frac{k}{c\rho} v(1-\theta), B_2 = 6 \frac{k}{c\rho} v(1-\theta)$$

$$\alpha_1 = -\frac{kv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})}, \alpha_2 = 1 + 2 \frac{kv\theta}{c\rho} \frac{(j^2+\frac{1}{4})}{(j^2+\frac{1}{12})}, \alpha_3 = -\frac{kv\theta(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})}$$

$$\beta_1 = \frac{kv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})}, \beta_2 = 1 - 2 \frac{kv(1-\theta)}{c\rho} \frac{(j^2+\frac{1}{4})}{(j^2+\frac{1}{12})}, \beta_3 = \frac{kv(1-\theta)(j-\frac{1}{2})^2}{c\rho(j^2+\frac{1}{12})}$$

$$\gamma_1 = -\frac{\theta}{\Delta r}, \gamma_2 = \left(\alpha + \frac{1}{\Delta r}\right)\theta, \gamma_3 = \frac{(1-\theta)}{\Delta r}, \gamma_4 = \left(\alpha + \frac{1}{\Delta r}\right)(1-\theta)$$

b. Persamaan Matriks Perpindahan Massa

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \gamma_1 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0^{n+1} \\ M_1^{n+1} \\ M_2^{n+1} \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ M_{j-1}^{n+1} \\ M_j^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & B_2 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & \gamma_3 & \gamma_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0^n \\ M_1^n \\ M_2^n \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ M_{j-1}^n \\ M_j^n \end{bmatrix}$$

nilai komponen matriks pada persamaan di atas adalah:

$$A_1 = 1 + 6Dv\theta, A_2 = -6Dv\theta$$

$$B_1 = 1 - 6Dv(1 - \theta), B_2 = 6Dv(1 - \theta)$$

$$\alpha_1 = -\frac{Dv\theta\left(j-\frac{1}{2}\right)^2}{\left(j^2+\frac{1}{12}\right)}, \alpha_2 = 1 + 2Dv\theta \frac{\left(j^2+\frac{1}{4}\right)}{\left(j^2+\frac{1}{12}\right)}, \alpha_3 = -\frac{Dv\theta\left(j-\frac{1}{2}\right)^2}{\left(j^2+\frac{1}{12}\right)}$$

$$\beta_1 = \frac{Dv(1-\theta)\left(j-\frac{1}{2}\right)^2}{\left(j^2+\frac{1}{12}\right)}, \beta_2 = 1 - 2Dv(1 - \theta) \frac{\left(j^2+\frac{1}{4}\right)}{\left(j^2+\frac{1}{12}\right)}, \beta_3 = \frac{Dv(1-\theta)\left(j-\frac{1}{2}\right)^2}{\left(j^2+\frac{1}{12}\right)}$$

$$\gamma_1 = -\frac{\theta}{\Delta r}, \gamma_2 = \left(\alpha + \frac{1}{\Delta r}\right)\theta, \gamma_3 = \frac{(1-\theta)}{\Delta r}, \gamma_4 = \left(\alpha + \frac{1}{\Delta r}\right)(1 - \theta)$$

Setelah diperoleh persamaan matriks dari diskritisasi model dengan menggunakan skema metode- $\theta$  langkah selanjutnya adalah pembuatan program simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai dengan menggunakan *software* MATLAB. Berikut ini adalah tampilan GUI program simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai.



Gambar 4.1 Tampilan GUI program simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai.

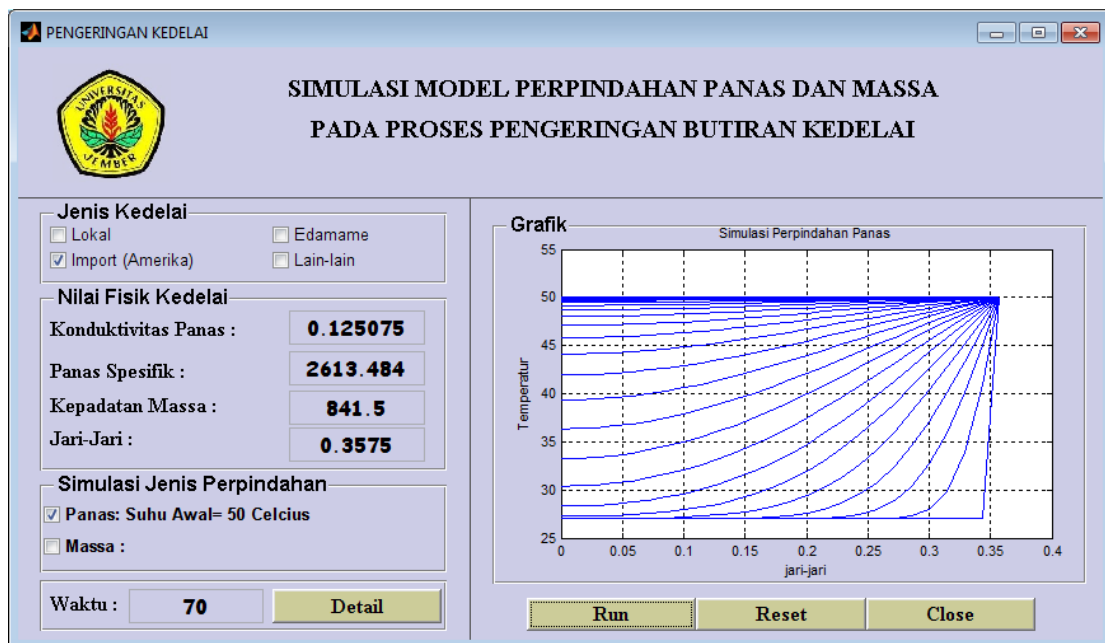
*Input* dari program diatas antara lain nilai konduktivitas thermal, panas spesifik, kepadatan massa, jari-jari, suhu pengeringan dan kadar air awal, selanjutnya *input* lainnya yaitu memilih kadar air akhir dan memilih simulasi yang akan ditampilkan. Sedangkan *output*nya yaitu waktu perpindahan panas yang merupakan waktu yang dibutuhkan sampai temperatur kedelai sama di seluruh lapisan kedelai dan *output* waktu perpindahan massa yang merupakan waktu yang dibutuhkan sampai kadar air kedelai sama di seluruh lapisan kedelai. Keterangan lain dari program diatas antara lain:

- Jenis kedelai, merupakan pilihan untuk menentukan jenis kedelai yang akan disimulasi,
- Simulasi jenis perpindahan, merupakan pilihan simulasi yang ingin ditampilkan,
- Run, merupakan tombol yang digunakan untuk menjalankan program,
- Reset, merupakan tombol untuk menghapus nilai-nilai yang sudah diinput,
- Close, merupakan tombol yang digunakan untuk menutup program.

#### 4.4 Beberapa Hasil Simulasi

Pada simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai parameter yang akan divariasikan pada perpindahan panas adalah suhu. Sedangkan pada model perpindahan massa adalah kadar air kedelai. Variasi suhu pengeringan yang diberikan yaitu 50°C, 60°C dan 70°C. Sedangkan variasi kadar air untuk pengeringan yaitu 11% dan 13%.

Dalam bagian ini akan diberikan hasil simulasi serta visualisasi perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan diberikan konduktivitas thermal sebesar 0,125075 W/cm<sup>2</sup>°C, panas spesifik sebesar 2613,484 J/Kg°C, kepadatan massa sebesar 841,5 Kg/cm<sup>3</sup>, jari-jari 0,3575 cm, serta suhu pengeringan sebesar 50°C. Hasil simulasi serta visualisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.2.

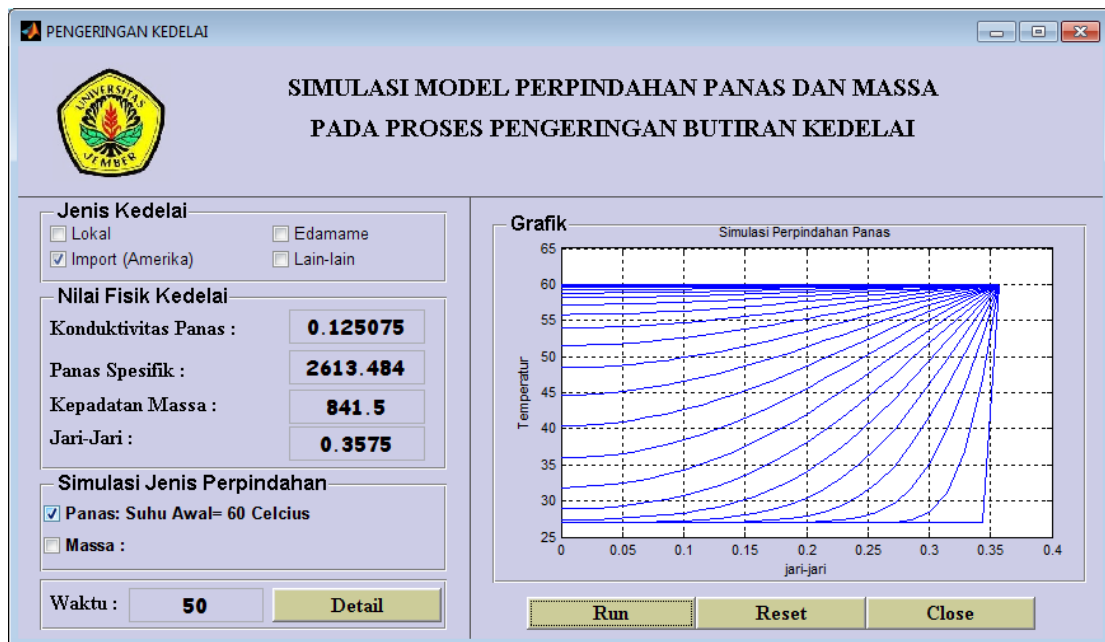


Gambar 4.2 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan 50°C

Pada Gambar 4.2, sumbu horizontal merupakan jari-jari dan sumbu vertikal merupakan temperatur. Setiap kurva mewakili perambatan panas setiap 1 detik, hal ini memudahkan untuk mengamati perilaku perambatan panas pada waktu 1 detik

pertama, 1 detik kedua, dan seterusnya. Jumlah kurva yang tergambar menunjukkan waktu perpindahan panas yang terjadi pada butiran kedelai. Waktu yang diperlukan untuk menyamakan temperatur di seluruh lapisan butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan sebesar  $50^{\circ}\text{C}$  yaitu 70 detik.

Selanjutnya akan diberikan hasil simulasi serta visualisasi perpindahan panas pada butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan sebesar  $60^{\circ}\text{C}$ . Hasil simulasi serta visualisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3.

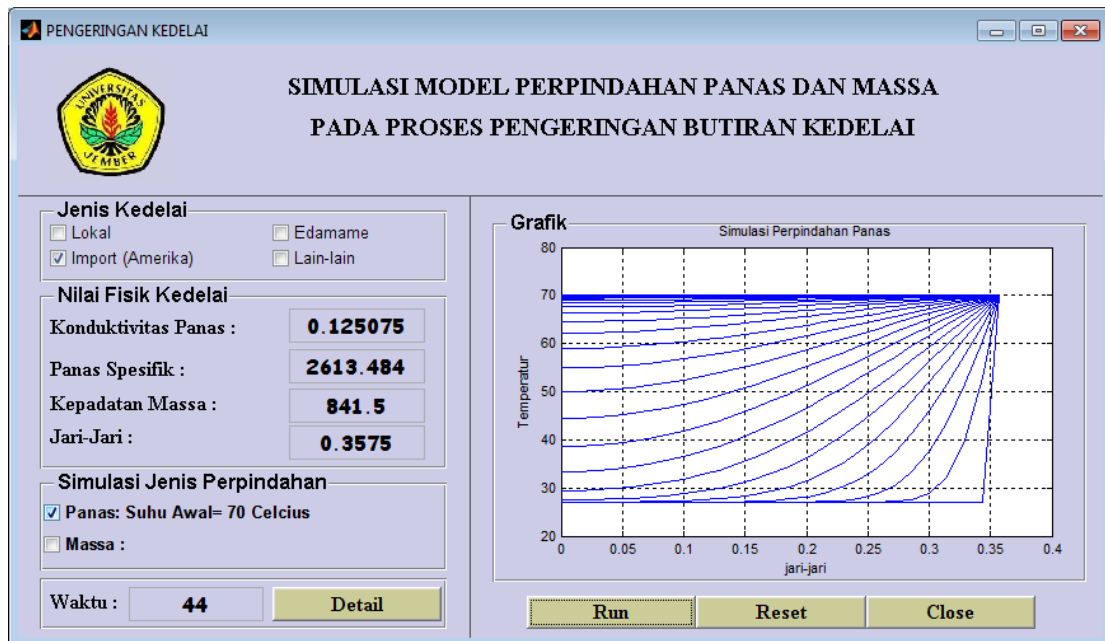


Gambar 4.3 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu Pengeringan  $60^{\circ}\text{C}$

Pada Gambar 4.3, setelah memasukkan nilai-nilai sifat fisik kedelai jenis import (Amerika) dapat diamati bahwa setiap kurva yang tergambar mewakili perambatan panas setiap 1 detik. Waktu yang diperlukan untuk menyamakan temperatur di seluruh lapisan butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan sebesar  $60^{\circ}\text{C}$  yaitu 50 detik.



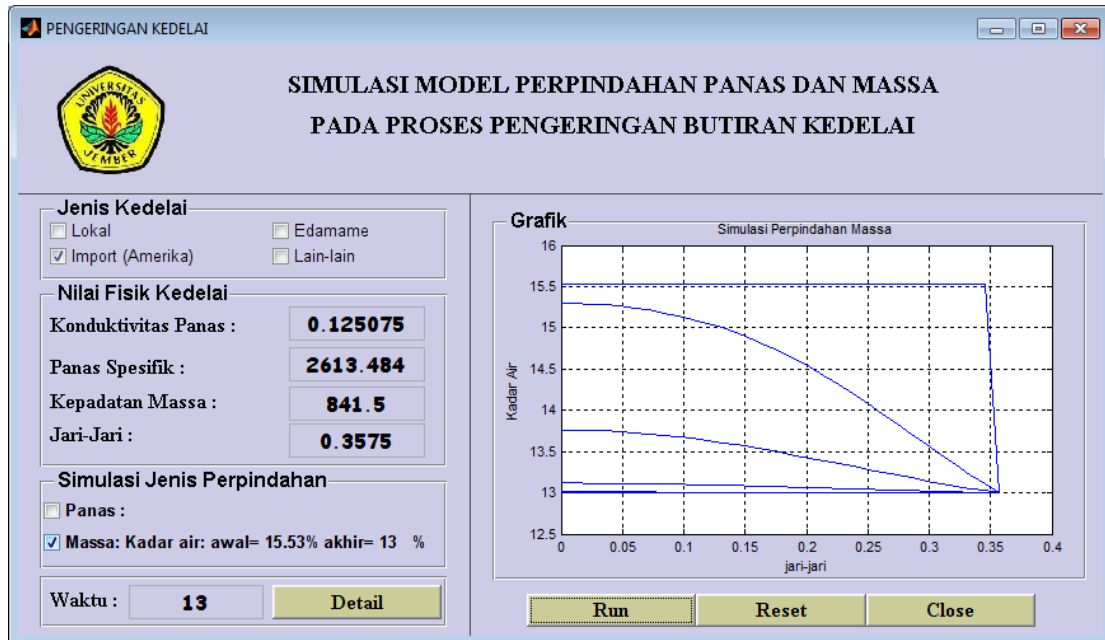
Selanjutnya akan diberikan hasil simulasi serta visualisasi perpindahan panas pada butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan sebesar  $70^{\circ}\text{C}$ . Hasil simulasi serta visualisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu Pengeringan  $70^{\circ}\text{C}$

Pada Gambar 4.4, setelah memasukkan nilai-nilai sifat fisik kedelai jenis import (Amerika) dapat diamati bahwa setiap kurva yang tergambar mewakili perambatan panas setiap 1 detik. Waktu yang diperlukan untuk menyamakan temperatur di seluruh lapisan butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu pengeringan sebesar  $70^{\circ}\text{C}$  yaitu 44 detik.

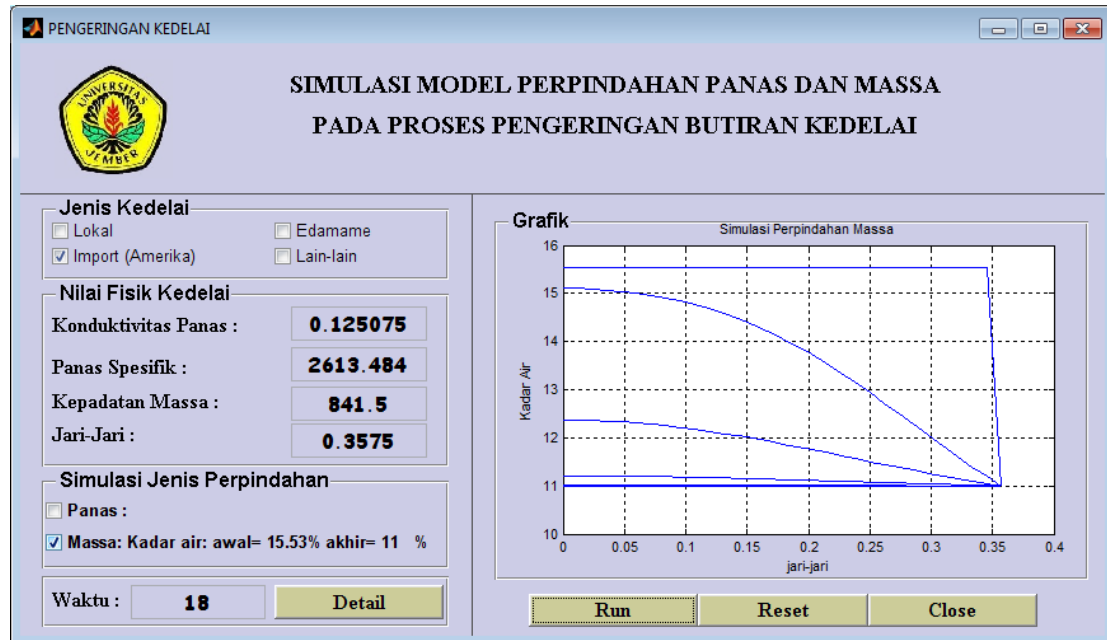
Perpindahan massa dalam proses pengeringan butiran kedelai merupakan proses perpindahan air dari dalam ke luar kedelai sehingga menyebabkan kadar air kedelai berkurang. Hasil simulasi serta visualisasi perpindahan massa pada kedelai jenis import (Amerika) dengan jari-jari 0,3575 cm dan kadar air awal sebesar 15,53% dan kadar air akhir 13%. Hasil simulasi serta visualisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Profil perpindahan massa pada kedelai jenis import (Amerika) dengan kadar air akhir 13%

Pada Gambar 4.5 sumbu horizontal merupakan jari-jari dan sumbu vertikal merupakan kadar air. Setiap kurva mewakili perubahan kadar air setiap 1 detik, hal ini memudahkan untuk mengamati perilaku perubahan kadar air pada waktu 1 detik pertama, 1 detik kedua, dan seterusnya. Jumlah kurva yang tergambar menunjukkan waktu perubahan kadar air yang terjadi pada butiran kedelai. Waktu yang diperlukan untuk menyamakan kadar air di seluruh lapisan butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan dengan kadar air akhir sebesar 13% yaitu 13 detik.

Selanjutnya akan diberikan hasil simulasi serta visualisasi perpindahan panas pada butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan kadar air akhir sebesar 11%. Hasil simulasi serta visualisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Profil perpindahan panas pada kedelai jenis import (Amerika) dengan kadar air akhir 11%

Pada Gambar 4.6 setelah memasukkan nilai-nilai sifat fisik kedelai jenis import (Amerika) dapat diamati bahwa setiap kurva yang tergambar mewakili perubahan kadar air setiap 1 detik. Waktu yang diperlukan untuk menyamakan kadar air di seluruh lapisan butiran kedelai jenis import (Amerika) dengan suhu kadar air akhir sebesar 11% yaitu 18 detik.

Dengan memasukkan nilai-nilai parameter untuk masing-masing jenis kedelai, maka akan diperoleh waktu untuk menyamakan temperatur dan kadar air di seluruh lapisan butiran kedelai. Berikut ini hasil simulasi dari beberapa jenis butiran kedelai dengan suhu pengeringan akhir sebesar  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  dan  $70^{\circ}\text{C}$  dan kadar air akhir sebesar 11% dan 13% yang secara ringkas disajikan dalam Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

Tabel 4.2 Ringkasan waktu untuk menyamakan temperatur beberapa jenis kedelai pada semua lapisan butiran kedelai dengan suhu pengeringan 50°C, 60°C dan 70°C

No	Jenis Kedelai	Suhu		
		50 °C	60 °C	70 °C
1.	Lokal	39 detik	34 detik	30 detik
2.	Import (Amerika)	70 detik	50 detik	44 detik
3.	Edamame	96 detik	93 detik	91 detik

Tabel 4.3 Ringkasan waktu untuk menyamakan kadar air akhir beberapa jenis kedelai pada semua lapisan butiran kedelai dengan kadar air akhir 11% dan 13%

No	Jenis Kedelai	Kadar Air Akhir	
		11%	13%
1.	Lokal	13 detik	9 detik
2.	Import (Amerika)	18 detik	13 detik
3.	Edamame	46 detik	26 detik

Pada proses perpindahan massa terjadi setelah suhu pada butiran kedelai menjadi sama disetiap lapisan butiran. Untuk mengetahui proses pengeringan butiran kedelai terjadi dengan menambahkan waktu pada proses perpindahan panas pada Tabel 4.2 dan perpindahan massa yang terjadi pada butiran kedelai pada Tabel 4.3. Dengan demikian proses pengeringan butiran kedelai pada suhu sebesar 50°C, 60°C dan 70°C dan kadar air akhir sebesar 11% dan 13% disajikan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Ringkasan waktu pengeringan beberapa jenis kedelai.

No	Jenis Kedelai	50°C		60°C		70°C	
		11%	13%	11%	13%	11%	13%
1.	Lokal	52	48	47	43	43	39
2.	Import	88	83	68	63	62	57
3.	Edamame	142	122	139	119	137	117

#### 4.5 Analisis Hasil Simulasi

Pada subbab ini dibahas mengenai hasil simulasi yang telah dilakukan pada subbab 4.4. Pada Tabel 4.2 untuk kedelai jenis lokal waktu tercepat untuk menyamakan temperatur yaitu 30 detik pada suhu pengeringan  $70^{\circ}\text{C}$ . Pada kedelai jenis import (Amerika) waktu tercepat untuk menyamakan temperatur yaitu 44 detik pada suhu pengeringan  $70^{\circ}\text{C}$ . Sedangkan untuk kedelai jenis Edamame waktu tercepat untuk menyamakan temperatur yaitu 91 detik pada suhu pengeringan  $70^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $50^{\circ}\text{C}$  untuk kedelai jenis lokal, kedelai jenis import dan kedelai jenis Edamame waktu untuk menyamakan temperatur secara berurutan yaitu 39 detik, 70 detik dan 96 detik. Sedangkan pada suhu  $60^{\circ}\text{C}$  untuk kedelai jenis lokal, kedelai jenis import dan kedelai jenis Edamame waktu untuk menyamakan temperatur secara berurutan yaitu 34 detik, 50 detik dan 93 detik. Sehingga dapat diketahui bahwa dari ketiga jenis kedelai yang diamati pada suhu  $70^{\circ}\text{C}$  terjadi perpindahan panas yang lebih cepat dibandingkan dengan suhu  $50^{\circ}\text{C}$  dan  $60^{\circ}\text{C}$ .

Bila diamati, nilai-nilai fisik jenis butiran kedelai pada Tabel 4.1 memiliki karakteristik sebagai berikut:

1. Kedelai jenis Edamame memiliki nilai konduktivitas thermal yang rendah.
2. Kedelai jenis import (Amerika) memiliki nilai panas spesifik rendah.
3. Kedelai jenis lokal memiliki nilai massa jenis yang rendah.

Bila dilihat dari konsep fisika, jenis kedelai yang mempunyai karakteristik nilai konduktivitas thermal yang semakin tinggi, panas spesifik yang semakin rendah, dan kepadatan massa yang semakin tinggi memiliki kemampuan perpindahan panas yang cepat. Pada Tabel 4.2 hasil simulasi sudah sesuai dengan konsep fisika. Jenis kedelai lokal memiliki nilai-nilai sifat fisik yang cukup mendukung untuk melakukan perpindahan panas yang lebih cepat dari pada jenis kedelai Import (Amerika) dan Edamame.

Jika diamati pada Tabel 4.3 waktu tercepat untuk menyamakan kadar air akhir sebesar 11 % maupun kadar air akhir sebesar 13 % terjadi pada kedelai jenis lokal yaitu 13 detik dan 9 detik. Jari- jari kedelai dan kadar air awal menentukan waktu yang dibutuhkan untuk menyamakan kadar air pada setiap lapisan butiran kedelai. Semakin besar jari- jari dan kadar air awal kedelai maka perpindahan massa akan semakin lama.

## **BAB 5. PENUTUP**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan pembahasan pada bab sebelumnya dapat disimpulkan simulasi model perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai adalah sebagai berikut.

1. Kedelai jenis Lokal, kedelai jenis import (Amerika) dan kedelai Edamame memiliki perpindahan panas yang cepat jika dipanaskan pada suhu 70 °C yaitu 30 detik, 44 detik dan 91 detik.
2. Kedelai jenis lokal mengalami proses perpindahan massa yang lebih cepat untuk kadar air akhir 11% maupun kadar air akhir sebesar 13 % yaitu 13 detik dan 9 detik.
3. Kedelai jenis Lokal mempunyai karakteristik nilai konduktivitas thermal yang tinggi, panas spesifik yang rendah, dan kepadatan massa yang tinggi sehingga memiliki kemampuan perpindahan panas yang cepat, sedangkan pada kedelai jenis Edamame mempunyai nilai konduktivitas thermal yang rendah, panas spesifik yang tinggi, dan kepadatan massa yang rendah memiliki perpindahan panas yang lebih lambat.
4. Jari-jari dan kadar air berpengaruh pada proses perpindahan massa. Artinya semakin besar jari-jari dan kadar air kedelai yang dikeringkan maka perpindahan massa akan lebih lambat.

## **5.2 Saran**

Pada penelitian ini masih terdapat kekurangan yaitu saat memperoleh data primer dari hasil pengukuran di Laboratorium tingkat ketelitiannya masih terbatas dan adanya pengaruh dari lingkungan luar selama proses pengukuran. Untuk penelitian selanjutnya diharapkan memperoleh data yang lebih baik dengan harapan mendapatkan hasil yang lebih baik. Selain itu untuk mengetahui perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan butiran kedelai penulis menyarankan untuk penelitian berikutnya agar meneliti perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan jika terjadi tumpang tindih butiran yang mengakibatkan suhu pengeringan menjadi berbeda pada jenis kedelai atau jenis biji-bijian yang lainnya.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, K, Wirakartakusumah, M.A, & Syarif, A.M. 1992. *Sifat Fisik Pangan*. Bogor: Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Direktorat Jendral Pendidikan Pusat antar Universitas Pangan dan Gizi Institut Pertanian Bogor.
- Çengel, Y. A. 1998. *Heat Transfer: A Practical Approach*. Nevada: McGraw-Hill Inc.
- Doulia,D. Tzia, K. & Gekas, V. 2000. A Knowledge Base For The Apparent Mass Diffusion Coefficient (Deff) Of Foods. *International Journal of Food Properties*. **3** (1): 1–14.
- Effendi, S. 2009. *Teknologi Pengolahan dan Pengawetan Pangan*. Bandung: Alfabeta.
- Hellevang, K. J. 1994. *Grain Drying*. Fargo: NDSU Extention Service.
- Hidayat, R. 2006. *Persamaan Diferensial Parsial*. Jember: Jember University Press.
- Hidayat, R. 2009. “Model Perpindahan Panas Proses Penetasan Telur Menggunakan Syarat Batas *Interface*”. Tidak dipublikasikan. Laporan Penelitian. Jember : Jurusan Matematika Fakultas MIPA Universitas Jember.
- Holman, J. P. 1993. *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.
- Istadi & Sitompul, J. P. 2000. Model Heterogen Pengeringan Butiran Jagung dalam Unggun Diam. *Mesin*. **15** (3): 63-68.
- Kreith, F. 1997. *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*. Jakarta: Erlangga.
- Rafiee, S., Keyhani, A. & Mohammadi, A. 2008. Soybean Seeds Mass Transfer Simulation during Drying Using Finite Element Method. *World Applied Sciences Journal*. **4** (2): 284-288.

Pitts, D. R. & Sissom, L. E. 1987. *Seri Buku Schaum: Teori dan Soal-Soal Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.

Sitompul, J. P, Istadi, & Sumardiono, S. 2003. Modelling and Simulation of Momentum, Heat, and Mass Transfer in a Deep-Bed Grain Dryer. *Drying Technology*. **21** (2): 217–229.

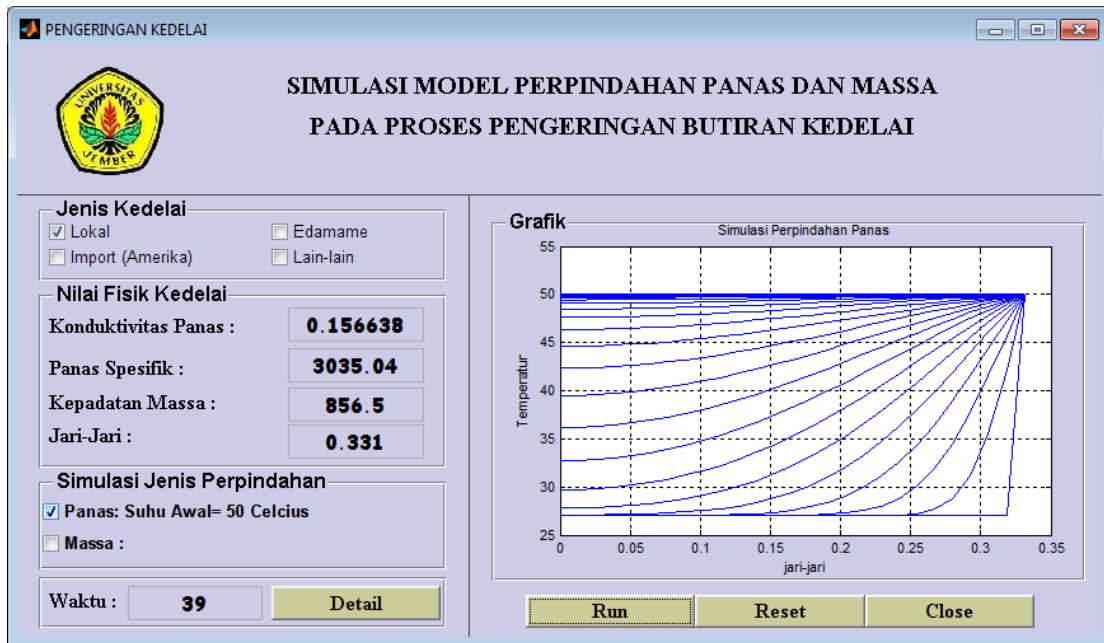
Triatmodjo, B. 1992. *Metode Numerik*. Yogyakarta : Beta Offset.

Wiraatmadja, S., Taib, G. & Said, G. 1988. *Operasi Pengeringan pada Pengolahan Hasil Pertanian*. Jakarta: Mediyatama Sarana Perkasa.

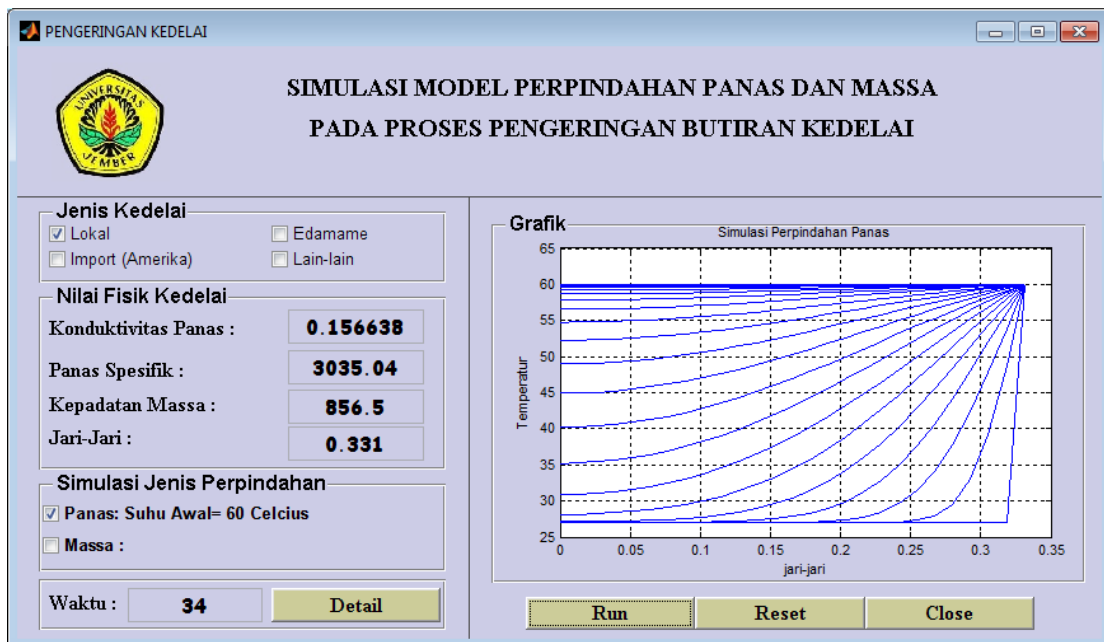
## LAMPIRAN

### A. Gambar

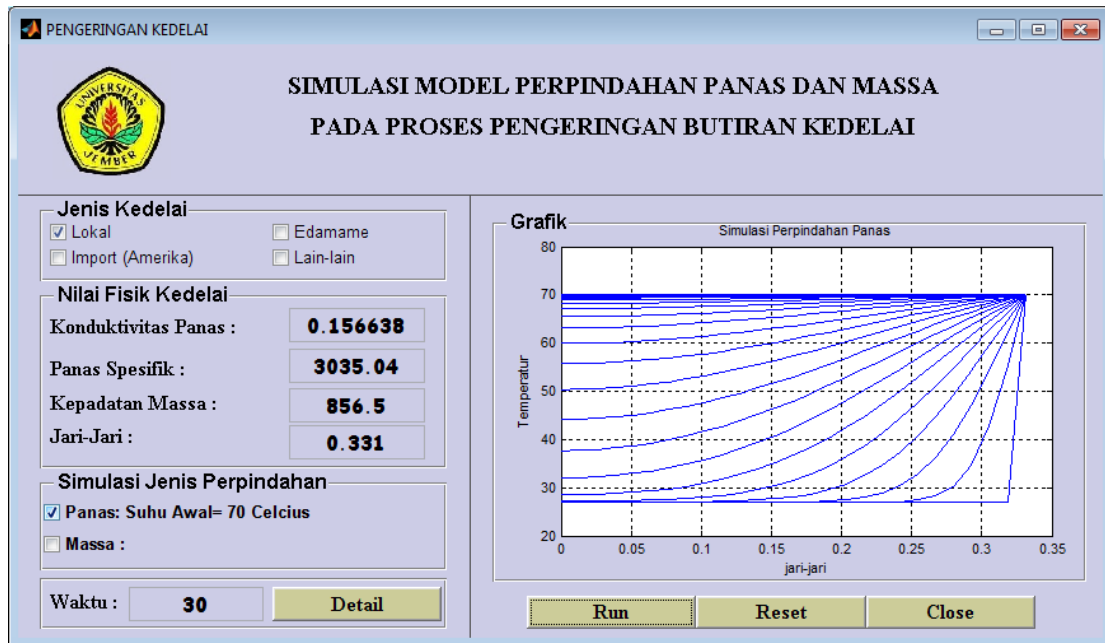
1. Profil perpindahan panas pada kedelai jenis Lokal dengan suhu pengeringan 50°C



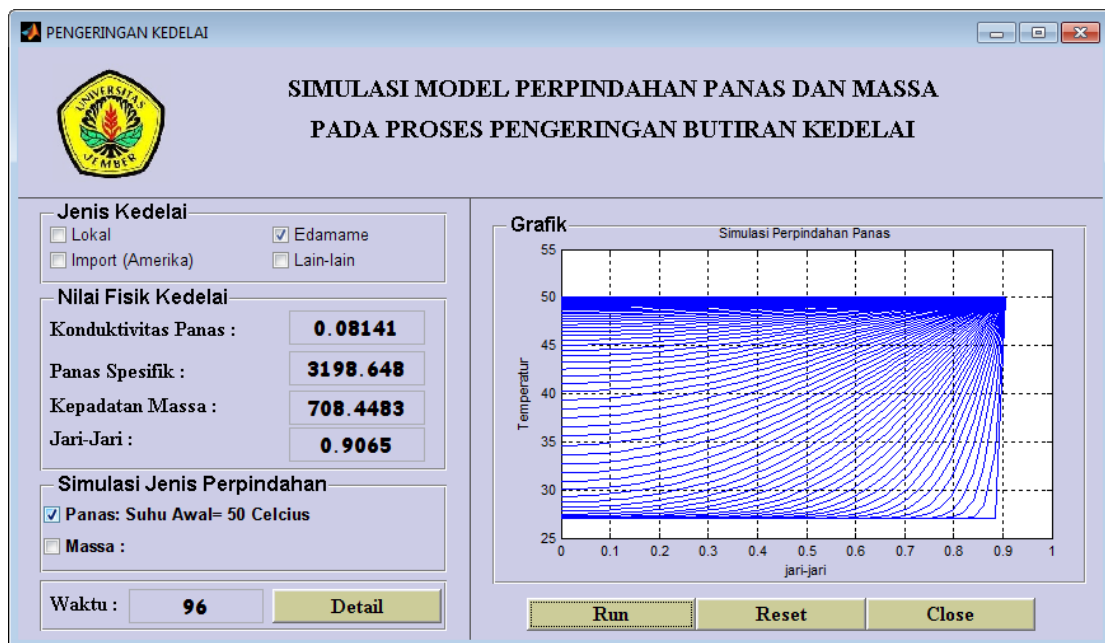
2. Profil perpindahan panas pada kedelai jenis Lokal dengan suhu pengeringan 60°C



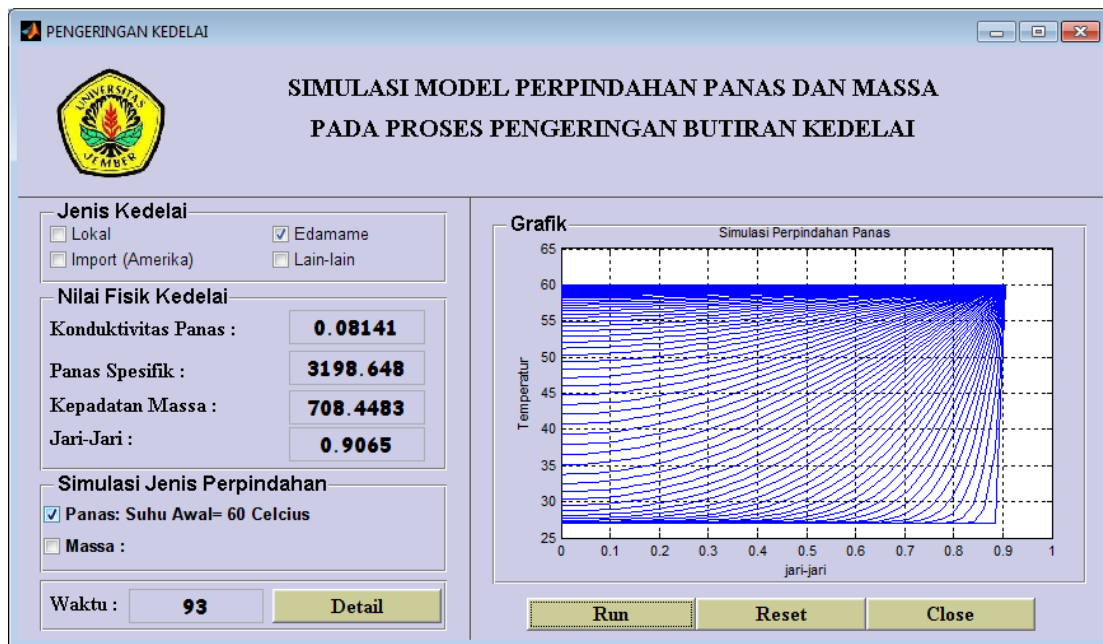
3. Profil perpindahan panas pada kedelai jenis Lokal dengan suhu pengeringan 70°C



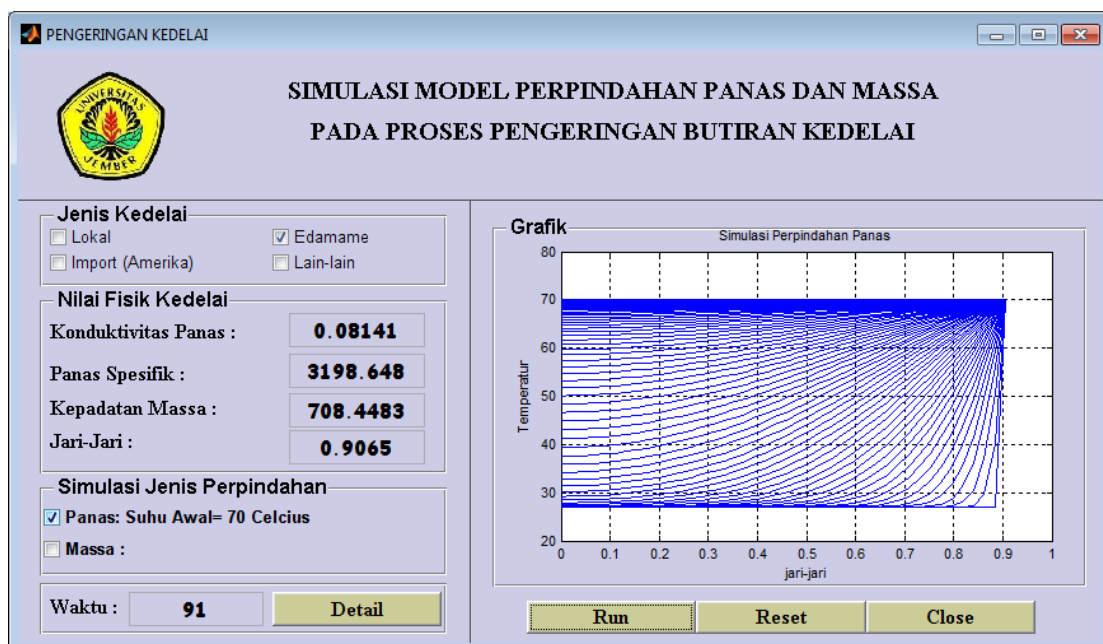
4. Profil perpindahan panas pada kedelai jenis Edamame dengan suhu pengeringan 50°C



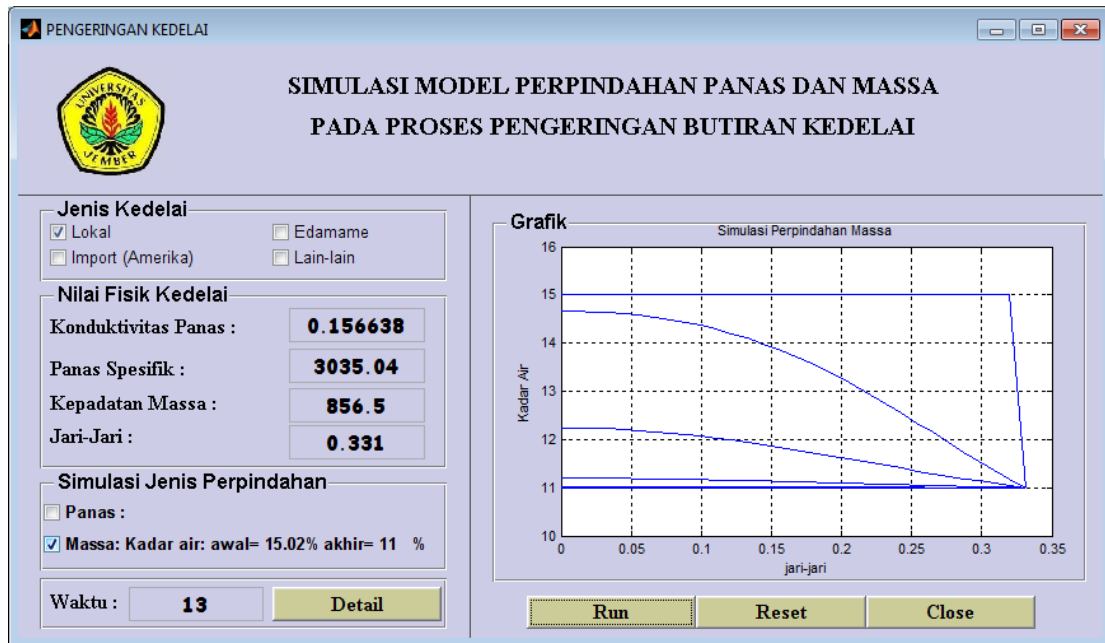
5. Profil perpindahan panas pada kedelai jenis Edamame dengan suhu pengeringan  $60^{\circ}\text{C}$



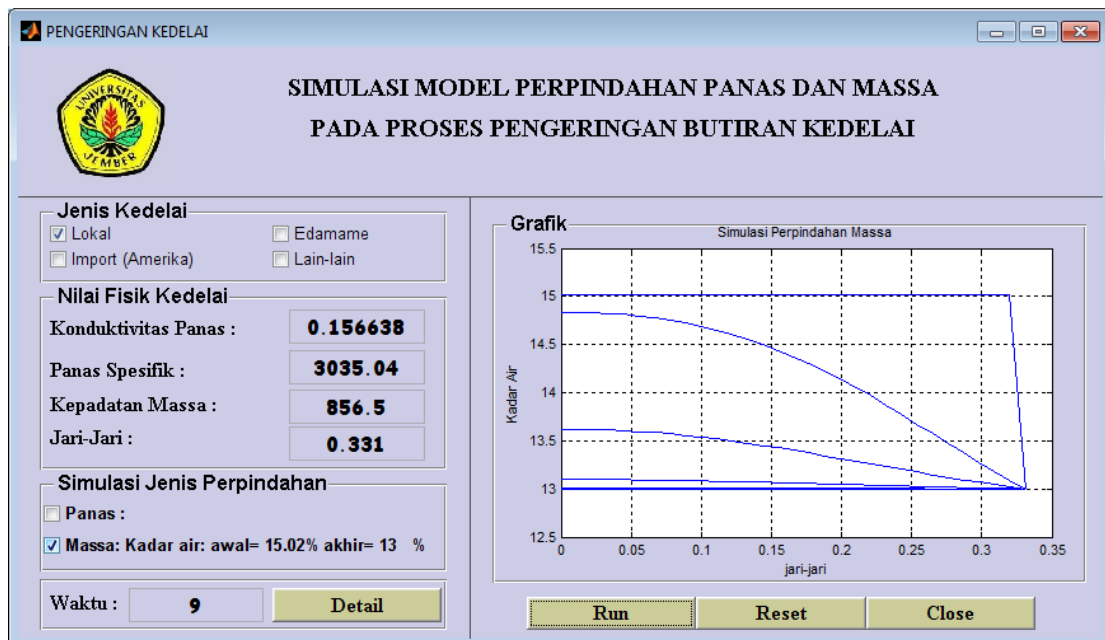
6. Profil perpindahan panas pada kedelai jenis Edamame dengan suhu pengeringan  $70^{\circ}\text{C}$



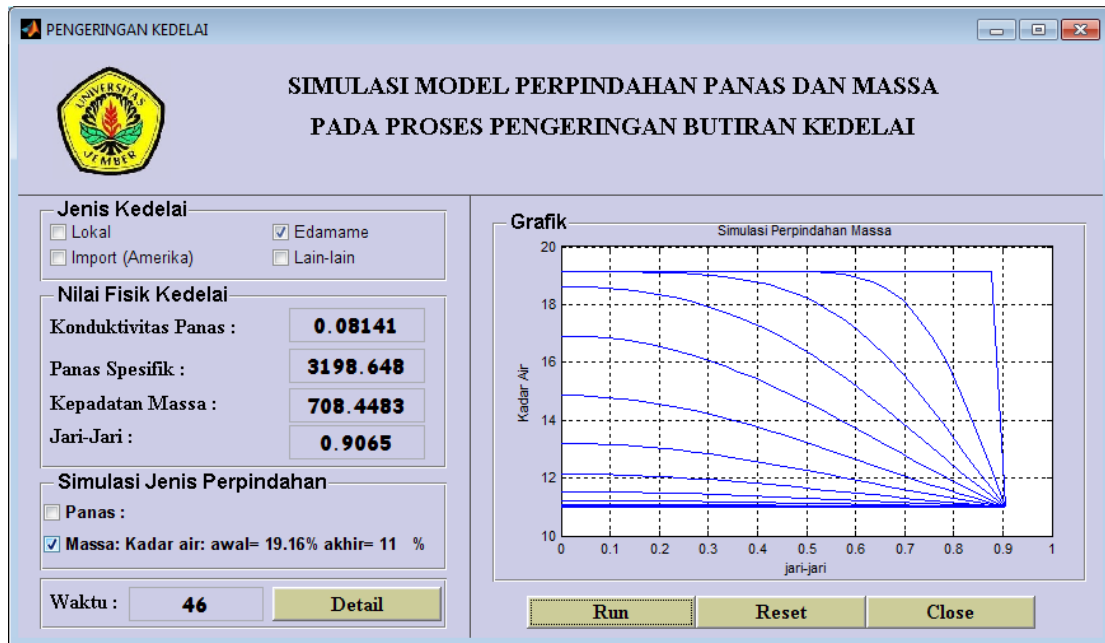
## 7. Profil perpindahan massa pada kedelai jenis Lokal dengan kadar air akhir 11%



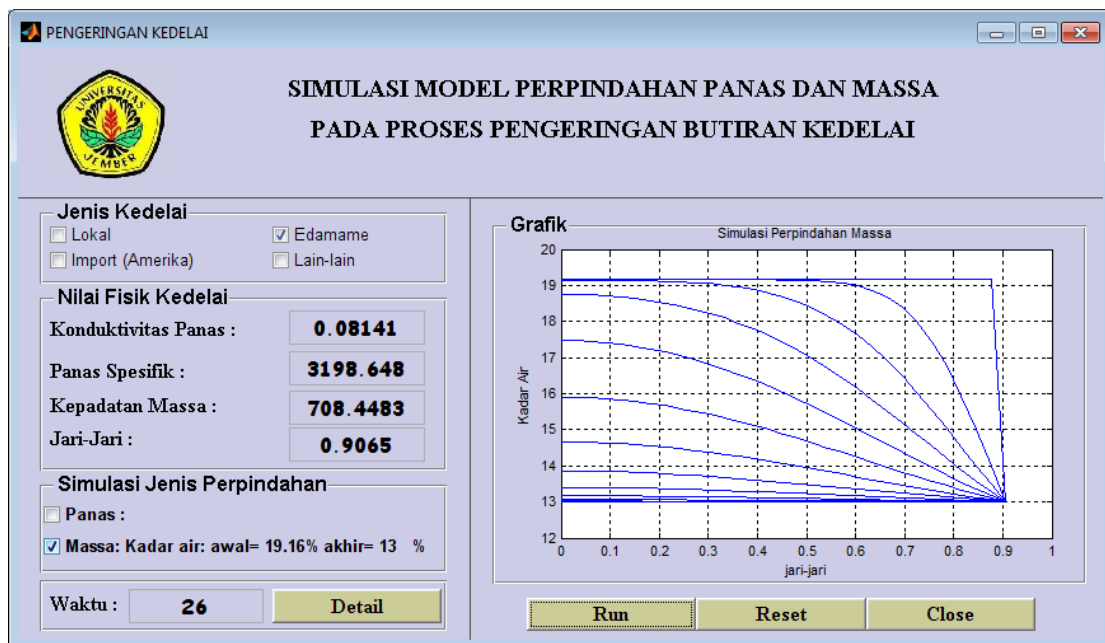
## 8. Profil perpindahan massa pada kedelai jenis Lokal dengan kadar air akhir 13%



9. Profil perpindahan massa pada kedelai jenis Edamame dengan kadar air akhir 11%



10. Profil perpindahan massa pada kedelai jenis Edamame dengan kadar air akhir 13%



## B. Script Program

### 1. Script tampilan GUI

```

clc; clear all; close all;
ulang=0; k=0; hasil=0;
win1=figure(...
    'units', 'points', ...
    'position', [50 100 640 350], ...
    'color', [.8 .8 .9], ...
    'menubar', 'none', ...
    'resize', 'on', ...
    'numbertitle', 'off', ...
    'name', 'PENGERINGAN KEDELAI');
=====
grafik1=axes('parent', win1, ...
    'units', 'points', ...
    'position', [10 270 90 70], ...
    'fontsize', 8, ...
    'color', [1 1 1]);
olmat=imread('unej.jpg');
    imshow(olmat);
        set(win1, 'CurrentAxes', grafik1);
=====
labell=icontrol('parent', win1, ...
    'units', 'points', ...
    'position', [125 310 450 24], ...
    'style', 'Text', ...
    'string', ' SIMULASI MODEL PERPINDAHAN PANAS DAN MASSA ', ...
    'backgroundcolor', [.8 .8 .9], ...
    'fontname', 'Times New Roman', ...
    'fontsize', 15, ...
    'fontweight', 'bold', ...
    'foregroundcolor', [.0 .0 .0]);
labell=icontrol('parent', win1, ...
    'units', 'points', ...
    'position', [125 286 450 24], ...
    'style', 'Text', ...
    'string', ' PADA PROSES PENGERINGAN BUTIRAN KEDELAI ', ...
    'backgroundcolor', [.8 .8 .9], ...
    'fontname', 'Times New Roman', ...
    'fontsize', 15, ...
    'fontweight', 'bold', ...
    'foregroundcolor', [.0 .0 .0]);
labell=icontrol('parent', win1, ...
    'units', 'points', ...
    'position', [266 0 1 260], ...
    'style', 'Text', ...
    'backgroundcolor', [.3 .3 .3], ...
    'foregroundcolor', [1 1 1]);
labell=icontrol('parent', win1, ...
    'units', 'points', ...

```



```

'position',[0 260 700 1],...
'style','Text',...
'backgroundcolor',[.3 .3 .3],...
'foregroundcolor',[1 1 1]);
%=====
hp = uipanel('parent',win1,...
            'Title','Jenis Kedelai','FontSize',12,...
            'units','points',...
            'fontweight','bold',...
            'BackgroundColor',[.8 .8 .9],...
            'Position',[13 210 240 50]);

u1 =
uicontrol('Style','checkbox','String','Lokal','fontsize',10,...
          'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
          'pos',[25 310 100 20],'parent',win1,'callback','ked_lokal');
u2 = uicontrol('Style','checkbox','String','Import
(Amerika)','fontsize',10,...
          'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
          'pos',[25 290 140
20],'parent',win1,'callback','ked_amerika');
u3 =
uicontrol('Style','checkbox','String','Edamame','fontsize',10,...
          'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
          'pos',[200 310 100 20],'parent',win1,'callback','ked_edama');
u1 = uicontrol('Style','checkbox','String','Lain-
lain','fontsize',10,...
          'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
          'pos',[200 290 100
20],'parent',win1,'callback','ked_lain','Value',1);
%=====
hp = uipanel('parent',win1,...
            'Title','Nilai Fisik Kedelai','FontSize',12,...
            'units','points',...
            'fontweight','bold',...
            'BackgroundColor',[.8 .8 .9],...
            'Position',[13 100 240 110]);

labell1=uicontrol('parent',win1,...
                 'units','points',...
                 'position',[18 165 150 25],...
                 'style','Text',...
                 'HorizontalAlignment','left',...
                 'string','Konduktivitas Panas :',...
                 'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
                 'fontname','Times New Roman',...
                 'fontsize',12,...
                 'fontweight','bold');
edit1=uicontrol('parent',win1,...
               'units','points',...
               'position',[160 174 80 20],...
               'style','edit',...
               'string','0',...
               'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...

```

```

'fontname','comic',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
labell=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[18 145 150 20],...
'style','Text',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Panas Spesifik :',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
edit2=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[160 150 80 20],...
'style','edit',...
'string','0',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','comic',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
labell=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[18 125 150 20],...
'style','Text',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Kepadatan Massa :',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
edit3=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[160 127 80 20],...
'style','edit',...
'string','0',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','comic',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
labell=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[18 105 150 20],...
'style','Text',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Jari-Jari :',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');

```

```

edit4=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[160 105 80 20],...
'style','edit',...
'string','0',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','comic',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
=====
hp = uipanel('parent',win1,...
            'Title','Simulasi Jenis
Perpindahan','FontSize',12,...
            'units','points',...
            'fontweight','bold',...
            'BackgroundColor',[.8 .8 .9],...
            'Position',[13 40 240 60]);
u5 = uicontrol('Style','checkbox','String','Panas :
','fontweight','bold','fontsize',10,...
            'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
            'pos',[20 90 315 20],'parent',win1,'callback','chek_panas');
u6 = uicontrol('Style','checkbox','String','Massa :
','fontweight','bold','fontsize',10,...
            'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
            'pos',[20 65 315 20],'parent',win1,'callback','chek_massa');
=====
%OUTPUT
hp = uipanel('parent',win1,...
            'Title','Grafik','FontSize',12,...
            'units','points',...
            'fontweight','bold',...
            'BackgroundColor',[.8 .8 .9],...
            'Position',[280 33 350 220]);
grafik3=axes('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[320 60 290 170],...
'fontsize',8,...
'color',[1 1 1]);
olmat=imread('kedelai.jpg');
    imshow(olmat);
        set(win1,'CurrentAxes',grafik1);
=====
%TOMBOL
hp = uipanel('parent',win1,...
            'Title','', 'FontSize',12,...
            'units','points',...
            'fontweight','bold',...
            'BackgroundColor',[.8 .8 .9],...
            'Position',[13 5 240 30]);
labell1=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[18 8 50 20],...

```

```

'style','Text',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Waktu :',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
edit5=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[65 10 80 20],...
'style','edit',...
'string','- ',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .9],...
'fontname','comic',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold');
%=====
Proses1=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[300 5 100 20],...
'style','PushButton',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Run',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .6],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold','callback','PROSES');
Proses1=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[400 5 100 20],...
'style','PushButton',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Reset',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .6],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold','callback','Pengerangan_Kedelai');
Proses1=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...
'position',[500 5 100 20],...
'style','PushButton',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Close',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .6],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold','callback','close');

```

## 2. Script untuk menjalankan simulasi

```

clc;
set(win1, 'CurrentAxes', grafik3);
hold off; ulang=0;
grid on; format long;
K = str2num(get(edit1, 'string'));
C = str2num(get(edit2, 'string'));
rho = str2num(get(edit3, 'string'));
r = str2num(get(edit4, 'string'));
U=[];U1=[];
v11=get(u5, 'value');v12=get(u6, 'value');
if v11==1
    Pilih=2;
end
if v12==1
    Pilih=3;
end
if v11==v12 && v11==0
    warndlg('Silahkan Pilih Jenis Simulasi
!!!', 'Peringatan');
    break
end
switch Pilih
case 2
    theta = 0.75;
    mu=0.167;
    delta =1E-12;
    deltax = (r*0.1)/Nx;
    alpa = mu/(K*delta);
    deltat=0;
    %Inisialisasi Matriks
    %-----
    A = zeros (Nx+1, Nx+1);
    B = zeros (Nx+1, Nx+1);
    Tlama = zeros (Nx+1, 1);
    Tbaru = zeros (Nx+1, 1);
    rhs = zeros (Nx+1, 1);
    %Syarat awal
    %-----
    for I = 1:Nx+1
        Tlama(I) = 27;
    end
    while Tlama(I) <= Tambient
        deltat = deltat+1;
        v = deltat/(deltax^2);

    %Syarat Batas pada x = 0
    %-----
        A1 = 1 + 6*K*v*theta/(C*rho);
        A2 = -6*K*v*theta/(C*rho);
        B1 = 1-6*K*v*(1 - theta)/(C*rho);

```

```

    B2 = 6*K*v*(1 - theta)/(C*rho);
%Syarat Batas pada Batas Luar
%-----
Gamma1 = -theta/deltax;
Gamma2 = (alpha+1/deltax)*theta;
Gamma3 = (1-theta)/deltax;
Gamma4 = -(alpha+1/deltax)*(1-theta);
A(1,1) = A1;
A(1,2) = A2;
B(1,1) = B1;
B(1,2) = B2;
A(Nx+1,Nx) = Gamma1;
A(Nx+1,Nx+1) = Gamma2;
B(Nx+1,Nx) = Gamma3;
B(Nx+1,Nx+1) = Gamma4;
%Interior Grid Point
%=====
for J = 2:Nx
    x=(J-1)*deltax;
    delay1 = C*rho*(x^2+deltax^2/12);
    alfa1(J) = -v*K*theta*(x-deltax/2)^2/delay1;
    alfa2(J) =
        1+v*K*theta*2*(x^2+(deltax)^2/4)/delay1;
    alfa3(J) = -v*K*theta*(x+deltax/2)^2/delay1;
    beta1(J) = v*K*(1-theta)*(x-deltax/2)^2/delay1;
    beta2(J) = 1-v*K*(1-
        theta)*2*(x^2+(deltax)^2/4)/delay1;
    beta3(J) = v*K*(1-theta)*(x+deltax/2)^2/delay1;
    A(J,J-1) = alfa1(J);
    A(J,J) = alfa2(J);
    A(J,J+1) = alfa3(J);
    B(J,J-1) = beta1(J);
    B(J,J) = beta2(J);
    B(J,J+1) =beta3(J);
end
f=size(A);
for it=1:f(1)
    rhs = B*Tlama;
    rhs (Nx+1) = rhs (Nx+1)+alpha*Tambient;
    Tbaru = A\rhs;
    Tlama = Tbaru;
end
%Mencetak Nilai T pada saat delta t :
%=====
size_Tlama = size(Tlama,1);
for i=1:size_Tlama
    x_array(i)=(i-1)/(size_Tlama-1);
end
x_array=x_array.*r;
if deltat==1
    Tlama1=27.*ones(1,size_Tlama);
    Tlama1(size_Tlama)=Tambient;

```

```

        plot(x_array(1:size_Tlama),Tlama1);hold on;
    end
    plot(x_array(1:size_Tlama),Tlama);
    U(:,deltat)=Tlama;
    set(win1,'CurrentAxes',grafik3);
    set(edit5,'string',deltat);
    hold on;
    grid on;
end
title('Simulasi Perpindahan Panas');
xlabel('jari-jari');
ylabel('Temperatur');

case 3
M=3;
theta = 0.75;
N =30;
mum=0.0167;
delta =1E-12;
deltam = (r*0.1)/N;
alpha = mum/(M*delta);
deltad=0;
%Inisialisasi Matriks
%-----
AA = zeros(N+1,N+1);
BB = zeros(N+1,N+1);
mlama = zeros(N+1,1);
mbaru = zeros(N+1,1);
rhsa = zeros(N+1,1);
%Syarat awal
%-----
for I = 1:N+1
    mlama(I) = minpt;
end
while mlama(I)>= mambient
    deltad = deltad+1;
    v = deltad/(deltam^2);
%Syarat Batas pada x = 0
%-----
    AA1 = 1 + 6 *M*v*theta;
    AA2 = -6*M*v*theta;
    BB1 = 1-6*M*v*(1 - theta);
    BB2 = 6*M*v*(1 - theta);
%Syarat Batas pada Batas Luar
%-----
    Gammaa = -theta/deltam;
    Gammab = (alpha+1/deltam)*theta;
    Gammac = (1-theta)/deltam;
    Gammad = -(alpha+1/deltam)*(1-theta);
    AA(1,1) = AA1;
    AA(1,2) = AA2;
    BB(1,1) = BB1;

```

```

BB(1,2) = BB2;
AA(N+1,N) = Gammaa;
AA(N+1,N+1) = Gammab;
BB(N+1,N) = Gammac;
BB(N+1,N+1) = Gammad;
%Interior Grid Point
%=====
for J = 2:N
    x=(J-1)*deltam;
    delay2 = (C*rho)*(x^2+deltam^2/12);
    alphaa1(J) = -v*M*theta*(x-deltam/2)^2/delay2;
    alphaa2(J) = 1+v*M*theta^2*(x^2+(deltam)^2/4)/delay2;
    alphaa3(J) = -v*M*theta*(x+deltam/2)^2/delay2;
    beta1(J) = v*M*(1-theta)*(x-deltam/2)^2/delay2;
    beta2(J) = 1-v*M*(1-
                theta)*2*(x^2+(deltam)^2/4)/delay2;
    beta3(J) = v*M*(1-theta)*(x+deltam/2)^2/delay2;
    AA(J,J-1) = alphaa1(J);
    AA(J,J) = alphaa2(J);
    AA(J,J+1) = alphaa3(J);
    BB(J,J-1) = beta1(J);
    BB(J,J) = beta2(J);
    BB(J,J+1) =beta3(J);
end
for im=1:60
    rhss = BB*mlama;
    rhss (N+1) = rhss (N+1)+alpha*mambient;
    mbaru = AA\rhss;
    mlama = mbaru;
end
size_mlama = size(mlama,1);
for i=1:size_mlama
    x_array(i)=(i-1)/(size_mlama-1);
end
x_array=x_array*r;
if deltad==1
    mlamal=minpt.*ones(1,size_mlama);
    mlamal(size_mlama)=mambient;
    plot(x_array(1:size_mlama),mlamal);hold on;
end
    U(:,deltad)=mlama;
plot(x_array(1:size_mlama),mlama);
set(win1,'CurrentAxes',grafik3);
set(edit5,'string',deltad);
hold on;grid on;
end
title('Simulasi Perpindahan Massa');
xlabel('jari-jari');
ylabel('Kadar Air');
end
Proses11=uicontrol('parent',win1,...
'units','points',...

```



```

'position',[150 10 100 20],...
'style','PushButton',...
'HorizontalAlignment','left',...
'string','Detail',...
'backgroundcolor',[.8 .8 .6],...
'fontname','Times New Roman',...
'fontsize',12,...
'fontweight','bold','callback','detail');

```

### 3. Script untuk menginput suhu pengeringan

```

prompt={'Suhu Kedelai :'};
name='Input Suhu Kedelai';
numlines=1;
defaultanswer={'50'}; options.Interpreter='tex';
answer=inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer,options);
numell=numel(answer);
if numell~=0
answer1=char(answer);
Tambient=str2num(answer1);
t=num2str(Tambient);
kata=joinseq('Panas: Suhu Pengeringan= ',t);
kata=joinseq(kata,' Celcius');
set(u5,'string',kata); set(u5,'value',1);
set(u6,'string','Massa :');set(u6,'value',0);
end

```

### 4. Script untuk menginput kadar air awal dan kadar air akhir

```

prompt={'Kadar Air Awal (%):','Kadar Air Akhir (%):'};
name='Input Kadar Air';
numlines=1;
pilh1=get(u1,'value');
pilh2=get(u2,'value');
pilh3=get(u3,'value');
tot=pilh1+pilh2+pilh3;
if pilh1==1 || tot==0
defaultanswer={'15.02','11'}; options.Interpreter='tex';
end
if pilh2==1
defaultanswer={'15.53','11'}; options.Interpreter='tex';
end
if pilh3==1
defaultanswer={'19.16','11'}; options.Interpreter='tex';
end
answer=inputdlg(prompt,name,numlines,defaultanswer,options);
numell=numel(answer);
if numell~=0
answer1=char(answer);
mambient=str2num(answer1(2,:));
minpt=str2num(answer1(1,:));

```

```
kata=joinseq('Massa: Kadar air: awal= ',answer1(1,:));
kata=joinseq(kata,'% akhir= ');
kata=joinseq(kata,answer1(2,:));
kata=joinseq(kata,' %');
set(u6,'string',kata); set(u6,'value',1);
set(u5,'string','Panas :');set(u5,'value',0);
end
```