

PEMINDAHAN HABA DALAM FILEM NIPIS

IZZAT ARIF BIN MUHAMAD

UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA

PEMINDAHAN HABA DALAM FILEM NIPIS

IZZAT ARIF BIN MUHAMAD

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK  
MEMENUHI SEBAHAGIAN DARIPADA SYARAT MEMPEROLEH  
IJAZAH SARJANA MUDA SAINS DENGAN KEPUJIAN (FIZIK)

FAKULTI SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA  
BANGI

2019

**PENGAKUAN**

Saya akui karya ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya.

13 Jun 2019

IZZAT ARIF BIN MUHAMAD  
A157935

## **PENGHARGAAN**

Pertama dan selamanya saya ingin mengucapkan setinggi-tinggi kesyukuran ke hadrat Allah S.W.T kerana memberikan saya kesihatan yang baik, kelapangan masa dan ketajaman minda untuk menyiapkan kajian ini.

Sehubungan dengan itu, saya ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan jutaan terima kasih kepada Prof. Madya Dr. Hasan Adli Alwi selaku penyelia projek akhir tahun saya. Beliau telah banyak memberi dorongan, nasihat, bimbingan, cadangan serta bantuan sepanjang saya menjalankan projek penyelidikan ini. Terima kasih sekali lagi diucapkan kepada beliau.

Seterusnya, penghargaan ini ditujukan kepada keluarga saya yang tercinta terutamanya kepada kedua ibu bapa saya kerana mereka banyak memberikan saya nasihat dan sokongan. Tidak dilupakan juga ucapan terima kasih kepada rakan-rakan sepengajian saya yang sanggup berkongsi ilmu dan maklumat kepada saya dalam menyiapkan projek ini.

Akhir sekali, saya juga ingin merakamkan penghargaan kepada semua pihak yang terlibat secara langsung atau tidak langsung dalam proses saya menyiapkan projek ini. Bantuan anda amat saya hargai.

## ABSTRAK

Kajian penyelidikan ini bertujuan untuk mengukur resapan terma bagi filem nipis  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO). Kaedah yang digunakan dalam penentuan nilai resapan terma ialah kaedah pantulan terma domain masa (TDTR) berdasarkan model Paddock dan Eesley (PE). Kaedah TDTR dilakukan dengan mengenakan tembakan laser berdenyut ultrapendek femtosaat pada permukaan filem nipis yang menyebabkan peningkatan suhu pada permukaan bahan tersebut. Penyusutan suhu di permukaan sampel dapat disimpulkan daripada perubahan pantulan laser penduga di permukaan sampel. Seterusnya, simulasi pengaliran haba dilakukan menggunakan persamaan pengaliran haba satu dimensi model PE. Dengan menyesuaikan lengkung data signal yang diukur oleh laser penduga dengan penyelesaian berangka, resapan terma dapat diperoleh. Penyesuaian lengkung paling tepat mendapatkan nilai resapan terma untuk YBCO adalah  $0.30 \pm 0.10 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ . Nilai yang diperoleh dibandingkan dengan kajian lepas yang diukur menggunakan kaedah berlainan. Keputusan menghampiri nilai yang dilaporkan sebelum ini, membuktikan kaedah TDTR berupaya mengukur resapan terma filem nipis. Pengukuran yang dilakukan juga bebas dari kesan lapisan penutup aluminium di permukaan sampel dan substrat.

## THERMAL TRANSPORT IN THIN FILM

### ABSTRACT

This research study aims to measure the thermal diffusivity of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) thin film. The method used in the determination of the thermal diffusivity value is time domain thermoreflectance method (TDTR) based on Paddock and Eesley model (PE). TDTR method is performed by shooting a femtosecond ultrashort laser pulse on a thin film surface, resulting an increase of temperature. The decay in temperature on the sample surface is deduced from the change of surface reflectivity measured by probing laser pulse. Next, the heat-flow simulation is performed using one-dimensional heat flow equation PE model. By curve-fitting the data signal measured with the numerical solution, the thermal diffusivity can be obtained. The best fit curve-fitting showed YBCO thermal diffusivity value of  $0.30 \pm 0.10 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ . The value obtained is compared with results from previous research measured using different methods. The result is close to the previously reported value, proving TDTR method is capable in measuring the thermal diffusivity of thin film material. The measurement in this method is free of the aluminium capping layer on the surface of material and substrate effect.

## KANDUNGAN

	<b>Halaman</b>
<b>PENGAKUAN</b>	<b>ii</b>
<b>PENGHARGAAN</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>v</b>
<b>KANDUNGAN</b>	<b>vi</b>
<b>SENARAI JADUAL</b>	<b>viii</b>
<b>SENARAI ILUSTRASI</b>	<b>ix</b>
<b>SENARAI SINGKATAN</b>	<b>x</b>
<b>SENARAI SIMBOL</b>	<b>xi</b>
<b>BAB I                      PENGENALAN</b>	
1.1                      Pendahuluan	1
1.2                      Permasalahan kajian	3
1.3                      Objektif kajian	3
1.4                      Skop kajian	3
<b>BAB II                      KAJIAN KEPUSTAKAAN</b>	
2.1                      Pengenalan	4
2.2                      Kaedah pantulan terma domain masa	4
2.3                      Model pengaliran haba satu lapisan	6
2.4                      Kaedah beza sehingga tersirat	8
<b>BAB III                      PERALATAN DAN KAEDAH KAJIAN</b>	
3.1                      Pengenalan	11
3.2                      Peralatan kajian	11
3.2.1      Perkakasan	11

	3.2.2	MatLab R2018a	11
3.3		Pengukuran kaedah TDTR	12
3.4		Simulasi pengaliran haba satu dimensi	12
<b>BAB IV</b>		<b>DAPATAN KAJIAN</b>	
4.1		Analisis kaedah pantulan terma pikosaat	14
	4.1.1	Analisis filem nipis aluminium	14
	4.1.2	Analisis filem nipis YBCO	16
<b>BAB V</b>		<b>KESIMPULAN</b>	
5.1		Kesimpulan	19
5.2		Cadangan	19
<b>RUJUKAN</b>			<b>20</b>
<b>LAMPIRAN</b>			
Lampiran A		Penerbitan persamaan beza terHINGGA tersirat	22
Lampiran B		Penerbitan sistem persamaan serentak	24
Lampiran C		Pengekodan MATLAB	26



**SENARAI JADUAL**

<b>No. Jadual</b>		<b>Halaman</b>
Jadual 3.1	Senarai parameter laser yang digunakan	12
Jadual 3.2	Sifat bahan digunakan dalam penyelesaian berangka	13
Jadual 4.1	Nilai resapan terma $\alpha_s$ sampel filem nipis YBCO pada suhu bilik.	18

## SENARAI ILUSTRASI

No. Rajah		Halaman
Rajah 2.1	Gambarajah susunan optikal TDTR.	5
Rajah 2.2	Keratan rentas sampel filem nipis berbilang lapisan.	5
Rajah 2.3	(a) Rajah skematik model satu lapisan (b) Rajah skematik filem nipis di atas substrat dengan lapisan penutup aluminium.	7
Rajah 2.4	Kawasan kepentingan model bersama syarat sempadan dan awal.	8
Rajah 2.5	Molekul pengiraan untuk kaedah tersirat.	9
Rajah 2.6	Kawasan kepentingan model ditindih grid beza terhingga.	9
Rajah 4.1	Penyesuaian lengkok penyelesaian suhu permukaan untuk filem nipis aluminium ketebalan 300 nm terhadap pengukuran pantulan terma ternormal melawan masa.	15
Rajah 4.2	Pengukuran pantulan terma ternormal untuk filem nipis aluminium ketebalan 300 nm dan filem nipis YBCO ketebalan 95 nm melawan masa	17
Rajah 4.3	Penyesuaian lengkok penyelesaian suhu permukaan untuk filem nipis YBCO ketebalan 95 nm dengan resapan yang berbeza terhadap pengukuran pantulan terma ternormal melawan masa.	18

**SENARAI SINGKATAN**

TDTR	Pantulan terma domain masa
PE	Paddock dan Eesley
FD	Beza terhingga
IFD	Beza terhingga tersirat
YBCO	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
STO	$\text{SrTiO}_3$
Si	Silikon
FWHM	Lebar penuh separuh maksimum

## SENARAI SIMBOL

$\alpha_s$	Resapan terma sampel
$k$	Kekonduksian terma sampel
$C$	Muatan haba spesifik sampel
$C_v$	Muatan haba per unit isipadu sampel
$T$	Suhu sampel
$T_{z=0}$	Suhu di permukaan sampel
$z$	Jarak normal dari permukaan sampel
$t$	Masa
$\rho$	Ketumpatan bahan
$I$	Keamatan laser pam
$R$	Pantulan laser pam oleh sampel
$\beta$	Penyerapan cahaya laser di dalam sampel per unit panjang
$\tau$	Lebar denyut laser pam
$\mu$	Panjang resapan terma di dalam sampel
$\Delta T$	Perubahan suhu ternormal
$T_m$	Suhu tertinggi di dalam sampel
$T_o$	Suhu awal sampel
$\lambda$	Panjang gelombang laser pam
$n$	Indeks biasan sampel
$\kappa$	Pekali kepupusan sampel

## **BAB I**

### **PENGENALAN**

#### **1.1 PENDAHULUAN**

Sejarah fabrikasi elektronik dan peranti seperti mikropemproses dan transistor sebahagian besarnya melibatkan pengecilan peranti tersebut. Ini berdasarkan kepada penggantian yang berterusan kepada peranti baharu, yang lebih kecil, lebih cepat dan lebih murah untuk dihasilkan daripada pendahulunya. Penyusutan saiz peranti kini sudah makin menghampiri peranti berskala nanometer.

Sains dan teknologi berskala nano, sering kali disebut sebagai nanosains ataupun nanoteknologi, secara ringkasnya adalah sains dan kejuruteraan yang dijalankan pada skala nanometer, iaitu  $10^{-9}$  meter. Dengan kemajuan teknologi terkini, ramai penyelidik telah mula membangunkan keupayaan untuk memanipulasi jirim pada tahap atom tunggal dan kumpulan kecil atom, serta mencirikan sifat-sifat bahan dan sistem pada skala nano.

Perkembangan yang pesat dalam pemprosesan dan sintesis bahan yang mempunyai struktur berskala nanometer ini memerlukan kita untuk mendapatkan pemahaman saintifik yang lebih tinggi mengenai pemindahan haba di dalam peranti berskala nano dan bahan berstruktur nano. Fokus utama di dalam kajian ini adalah pencirian sifat terma bahan berskala nanometer.

Bahan berstruktur nano ini boleh terdiri daripada bahan pukal atau filem nipis di mana ia mempunyai nanostruktur di dalamnya. Beberapa contoh bahan berstruktur nano adalah seperti bahan amorfus dan kaca, bahan yang mempunyai bijian berskala nano termasuk juga bahan yang porous mempunyai lohong bersaiz nanometer. Termasuk

juga di dalam kategori bahan berstruktur nano ialah filem nipis yang terdapat lapisan substrat dan lapisan penutup. Kajian ini akan memfokuskan untuk pencirian filem nipis berbilang lapisan ini.

Haba adalah kuantiti tenaga atau lebih tepat, pemindahan tenaga terma. Pemindahan tenaga terma ini berlaku disebabkan oleh perbezaan suhu di antara dua sistem, di mana haba dipindahkan dari sistem yang panas ke sistem yang lebih sejuk. Pemindahan haba berlaku dengan pelbagai cara, dengan cara mengkonduksi, sinaran, perolakan atau gabungannya. Kadar pemindahan haba juga bergantung kepada kekonduksian terma,  $k$  dan geometri bahan. Resapan terma,  $\alpha_s$  diperoleh menggunakan persamaan (1.1.1) dimana  $C$  ialah muatan haba spesifik.

$$\alpha_s = \frac{k}{C} \quad \dots(1.1.1)$$

Pelbagai kaedah telah dilaporkan untuk membuat pencirian sifat terma filem nipis dan khususnya di dalam kajian ini adalah pengukuran nilai resapan terma. Beberapa kaedah yang telah digunakan untuk mengukur resapan terma filem nipis adalah kaedah piezoelektrik dan piroelektrik terganding (Aravind & Fung 1999), kaedah fatamorgana (Wong et al. 1995), kaedah mikroskopi pantulan terma bermodulasi (Li et al. 1999), kaedah mikroskopi pengimbasan suhu rendah (Matsekh et al. 2009), kaedah parutan fana (Marshall et al. 1992, 1993) dan kaedah mikroskopi terma (Yagi, Taketoshi & Kato 2004).

Di dalam kajian ini, kaedah pantulan terma domain masa (TDTR) digunakan untuk menentukan resapan terma bahan filem nipis. Kaedah TDTR melibatkan penggunaan laser berdenyut ultrapendek femtosaat untuk menjana signal pantulan terma yang pendek (Cahill et al. 2012; Paddock & Eesley 1986). Kemudiannya, simulasi persamaan pengaliran haba satu dimensi untuk filem nipis satu lapisan dilakukan. Resapan terma bahan diperoleh dengan melakukan penyesuaian lengkung data signal yang diukur dengan penyelesaian berangka yang dilakukan. Kaedah ini digunakan untuk menentukan resapan terma filem nipis yang bebas dari kesan lapisan penutup dan substrat.

## **1.2 PERMASALAHAN KAJIAN**

Dengan kejayaan penyelidikan menghasilkan bahan berstruktur berskala nano, mereka menghadapi kesukaran dalam pencirian sifat terma bahan tersebut. Kesukaran yang dialami seperti pengendalian bahan berdimensi kecil dan kejituan pencirian bahan. Kebolehan untuk mengukur dan mencirikan sifat terma bahan semakin berkurang apabila mencapai skala nano ini. Kaedah konvensional yang digunakan sebelum ini sudah tidak sensitif atau tidak sesuai lagi untuk digunakan dalam pencirian terma bahan berskala nano. Hasilnya beberapa kaedah baru dibentuk untuk melakukan pencirian tersebut dan kajian ini bertujuan mengenalpasti keupayaan kaedah yang digunakan dalam pencirian sifat terma bahan berskala nano.

## **1.3 OBJEKTIF KAJIAN**

1. Mendapatkan resapan terma filem nipis  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) dengan melakukan simulasi persamaan pengaliran haba satu dimensi untuk filem nipis satu lapisan.
2. Membuktikan keupayaan kaedah TDTR untuk mengukur resapan terma filem nipis.

## **1.4 SKOP KAJIAN**

Kajian ini lebih tertumpu kepada simulasi persamaan pengaliran haba satu dimensi untuk filem nipis satu lapisan dan mendapatkan resapan terma filem nipis YBCO daripada pengukuran. Seterusnya membandingkan resapan terma bahan tersebut dengan kajian lepas untuk mengesahkan kaedah pantulan terma domain masa berupaya mengukur resapan terma bahan.

## **BAB II**

### **KAJIAN KEPUSTAKAAN**

#### **2.1 PENGENALAN**

Bab ini menerangkan tentang kaedah yang digunakan untuk mengira resapan terma filem nipis. Kaedah yang digunakan adalah pantulan terma domain masa (TDTR). Selain itu, diuraikan juga teori yang membolehkan penggunaan persamaan pengaliran haba satu dimensi. Beberapa kajian lepas seperti (Paddock & Eesley 1986) dan (Kim et al. 2010) menjadi rujukan utama dalam penghasilan kajian ini.

#### **2.2 KAEDAH PANTULAN TERMA DOMAIN MASA**

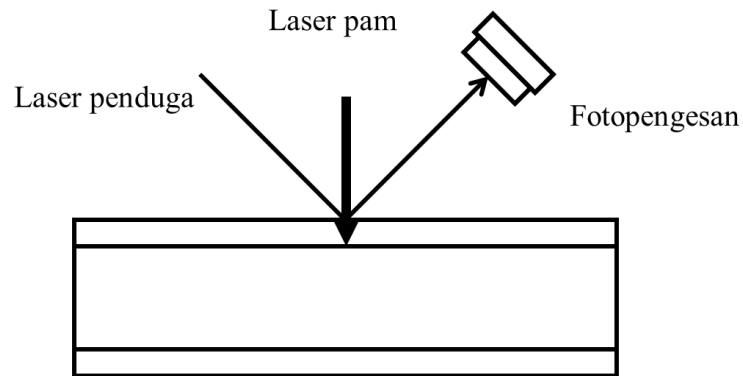
Dalam pengukuran pemindahan haba untuk filem nipis konvensional, penentuan sifat terma filem tersebut seringkali dirumitkan oleh kehadiran substrat. Kaedah TDTR diperkenalkan untuk menyelesaikan permasalahan ini. Kaedah ini berasal daripada eksperimen pantulan terma terdahulu, melibatkan pemanasan tidak seimbang elektron di dalam kuprum (Eesley 1986).

Kaedah pantulan terma ini menggunakan laser berdenyut ultrapendek untuk menjana signal pantulan terma pendek yang boleh digunakan untuk menentukan resapan terma,  $\alpha_s$  filem nipis. Resapan terma,  $\alpha_s$  yang diperoleh menggunakan kaedah ini juga bebas daripada kesan substrat (Paddock & Eesley 1986).

Berdasarkan Rajah 2.1, pengukuran kaedah TDTR melibatkan penggunaan dua laser berdenyut, ditembak pada permukaan sampel. Satu laser bertindak sebagai laser pam, menghasilkan peningkatan suhu untuk jangka masa yang singkat. Penyerapan haba ke dalam sampel menyebabkan penyusutan suhu. Suhu di permukaan sampel

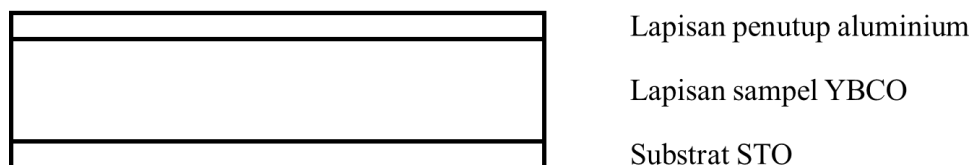


diukur menggunakan laser penduga. Penyerapan haba ke dalam sampel diukur menggunakan signal pantulan terma sebagai fungsi masa. Pengukuran ini dibuat dalam julat masa pikosaat.



Rajah 2.1 Gambarajah susunan optikal TDTR.

Menurut Kim et al. 2010, pengukuran yang dilakukan menggunakan kaedah TDTR tidak terjejas oleh lapisan penutup sampel dan substrat. Kajian yang dilakukan adalah terhadap sampel filem nipis berbilang lapisan yang terdiri daripada tiga lapisan, lapisan penutup aluminium, lapisan YBCO dan substrat  $SrTiO_3$  (STO) (Rajah 2.2). Kebanyakan kaedah lain seperti kaedah fatamorgana atau mikroskop terma biasanya menunjukkan sifat filem nipis yang bergantung kepada substrat.



Rajah 2.2 Keratan rentas sampel filem nipis berbilang lapisan.

### 2.3 MODEL PENGALIRAN HABAS SATU LAPISAN

Persamaan pengaliran habas satu dimensi di dalam filem nipis satu lapisan dimodelkan menurut (Paddock & Eesley 1986) dan (Rosencwaig & Gersho 1976) untuk mendapatkan resapan terma  $\alpha_s$  bahan daripada pengukuran.

$$C \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + I(1 - R)\beta e^{-\beta z} e^{-(t/\tau)^2} \quad \dots(2.3.1a)$$

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + \frac{I(1-R)\beta e^{-\beta z} e^{-(t/\tau)^2}}{C} \quad \dots(2.3.1b)$$

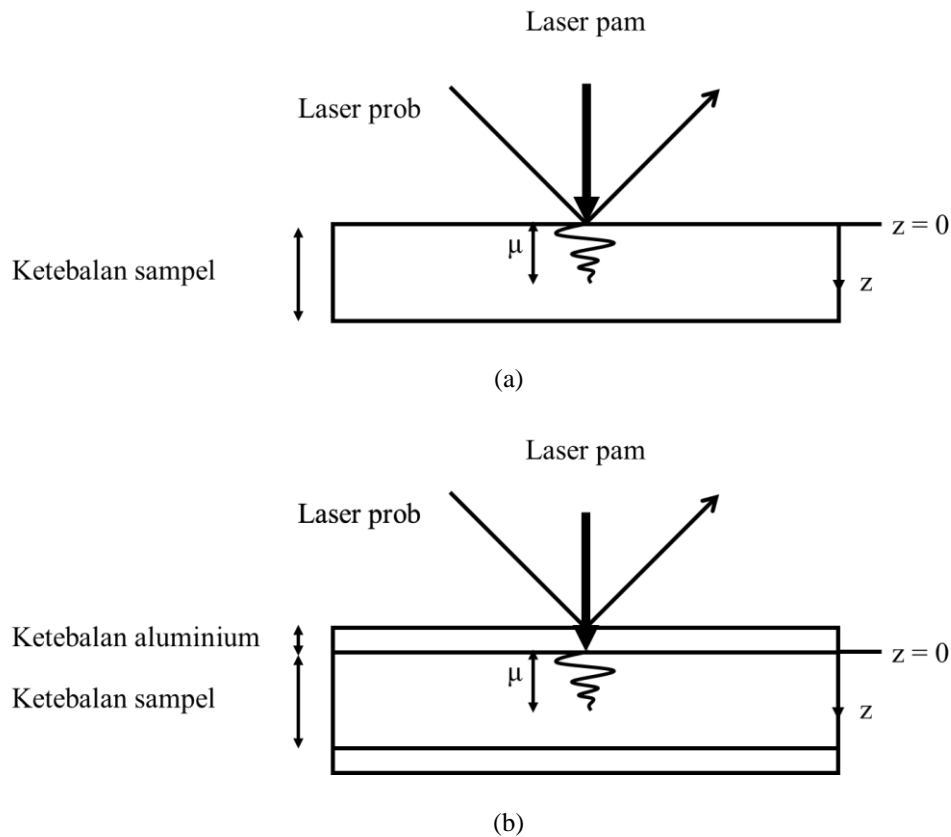
di mana :

- $T$  ialah suhu sampel
- $z$  ialah jarak normal dari permukaan sampel
- $t$  ialah masa
- $C$  ialah muatan habas spesifik sampel
- $\alpha_s$  ialah resapan terma sampel
- $k$  ialah kekonduksian terma sampel
- $I$  ialah keamatan laser pam
- $R$  ialah pantulan laser pam oleh sampel
- $\beta$  ialah penyerapan laser di dalam sampel per unit panjang
- $\tau$  ialah lebar denyut laser pam

Persamaan yang sama juga digunakan di dalam kajian (Kim et al. 2010). Kajian dikembangkan untuk menggunakan kaedah TDTR terhadap filem nipis dua lapisan (Alwi et al. 2013; Alwi & Abd-Shukor 2011). Kajian (Kim 2017) menggunakan model satu lapisan, untuk membuat pencirian terma bahan magnet.

Resapan yang berlaku digambarkan menurut teori kesan resapan terma (Rosencwaig & Gersho 1976), di mana laser pam dipancarkan pada bahan yang legap iaitu lapisan sampel yang hendak dikaji. Cahaya laser pam diserap di permukaan sampel oleh lapisan penutup aluminium, permukaan sampel bertindak sebagai sumber habas

satah. Resapan satu dimensi berlaku. Haba yang dihasilkan pada permukaan ini meresap secara melintang ke dalam sampel sejauh panjang resapan terma,  $\mu$ . Pengaliran haba satu dimensi ini boleh digambarkan seperti Rajah 2.3(a) dan Rajah 2.3(b).



Rajah 2.3 (a) Rajah skematik model satu lapisan (b) Rajah skematik filem nipis di atas substrat dengan lapisan penutup aluminium.

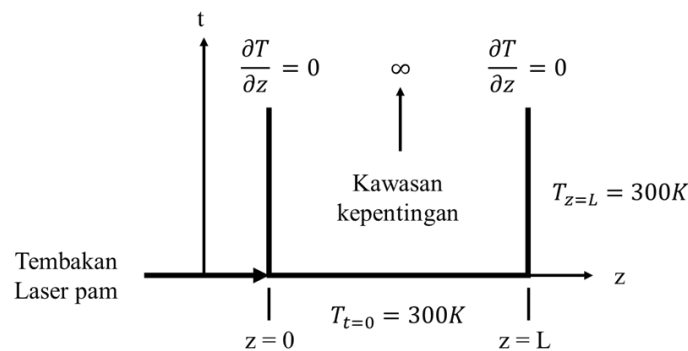
Model memerlukan pengaliran haba hanya berlaku dalam satu lapisan sahaja. Dengan mempertimbangkan lapisan aluminium mencapai kondisi kenipisan terma dan lapisan sampel pula mencapai kondisi ketebalan terma, model ini hanya akan menganalisis pengaliran haba pada lapisan sampel sahaja. Jadi, pengukuran yang dibuat tidak boleh terlalu lama sehingga menyebabkan resapan mencapai substrat. Julat masa pengukuran 700 pikosaat mencapai kondisi ini (Kim et al. 2010).

Kondisi kenipisan terma hanya tercapai apabila  $\mu$  lebih besar dari ketebalan sampel. Kondisi ketebalan terma pula tercapai apabila ketebalan sampel lebih besar dari  $\mu$ . Haba meresap sepanjang ketebalan sampel dan tidak sampai kepada substrat, mengesahkan model pengaliran haba satu lapisan ini (Alwi et al. 2013).

## 2.4 KAEDAH BEZA TERHINGGA TERSIRAT

Persamaan pengaliran haba satu dimensi untuk filem nipis satu lapisan diselesaikan menggunakan kaedah beza terhingga (FD). Kaedah FD digunakan untuk mendapatkan penyelesaian persamaan parabolik seperti persamaan (2.3.1b). Ia terbahagi kepada tiga iaitu kaedah jelas, tersirat dan *Crank-nicolson*. Kaedah yang akan digunakan di dalam kajian ini adalah kaedah beza terhingga tersirat (IFD). Buku (Chapra & Canale 1988; Hornbeck 1975) menjadi rujukan utama untuk kaedah yang digunakan.

Tiga kaedah yang disebutkan mempunyai kestabilan dan kejituan penyelesaian yang berbeza, di mana kaedah jelas hanya menggunakan pengiraan yang mudah untuk mendapatkan penyelesaian, tetapi ia tidak stabil jika dibandingkan dengan dua kaedah lain dan penyelesaian yang diperoleh akan mempunyai ralat yang besar. Kaedah *Crank-nicolson* pula menggunakan pengiraan yang lebih kompleks dari dua kaedah sebelumnya untuk mendapatkan penyelesaian yang lebih jitu. Kaedah IFD dipilih untuk kajian ini kerana pengiraannya tidak terlalu kompleks dan stabil di antara tiga kaedah.

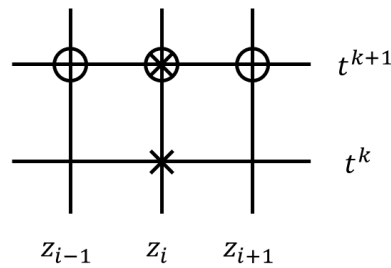


Rajah 2.4 Kawasan kepentingan model bersama syarat sempadan dan awal.

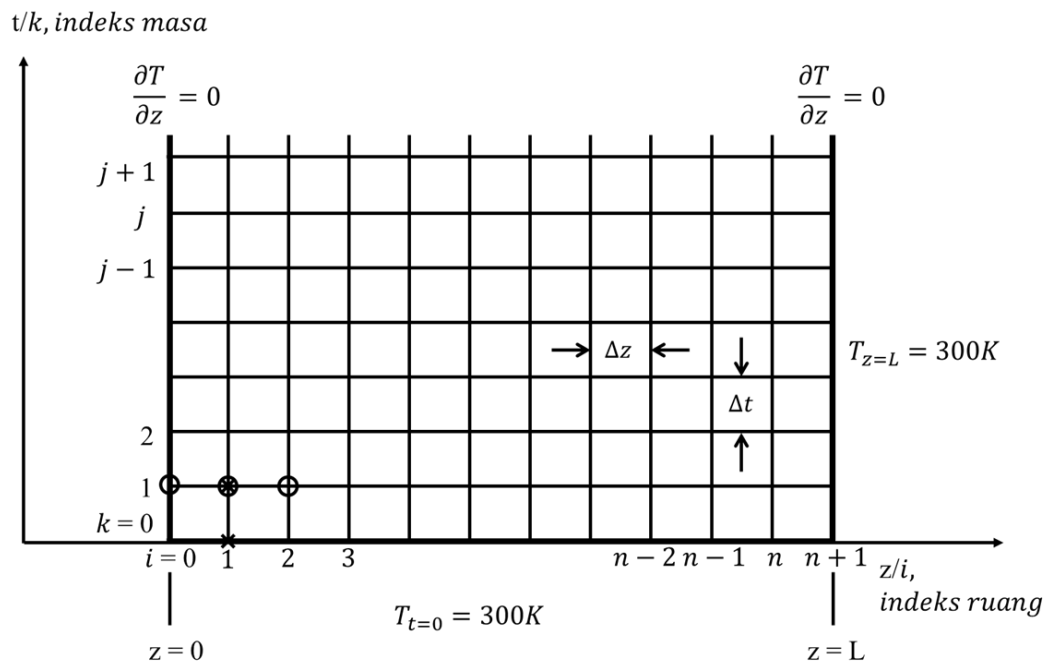
Model yang dibentuk boleh digambarkan seperti Rajah 2.4 untuk menunjukkan kawasan kepentingan di filem nipis. Syarat sempadan permukaan bebas dikenakan pada permukaan atas dan bawah sampel. Ini bermaksud tiada perubahan suhu pada permukaan tersebut. Suhu permukaan atas sampel adalah nilai yang kita hendak perolehi dan suhu bawah sampel adalah tetap pada suhu bilik,  $T_0 = 300K$ . Seterusnya, adalah syarat awal sepanjang ketebalan sampel. Sampel mempunyai suhu bilik sepanjang ketebalan sampel pada permulaan pengiraan.

Daripada persamaan (2.3.1b), penghampiran dilakukan untuk terbitan kedua dalam ruang dan terbitan pertama dalam masa. Terbitan ruang dihampirkan menggunakan ungkapan perbezaan terhingga berpusat pada tahap masa lanjutan  $k + 1$ . Terbitan masa pula dihampirkan menggunakan ungkapan perbezaan terhingga ke hadapan. Simbol  $i$  melambangkan indeks kedalaman dan simbol  $k$  pula melambangkan indeks masa. Rajah 2.5 menunjukkan molekul pengiraan untuk kaedah tersirat hasil daripada penghampiran yang dilakukan. Penindihan grid beza terhingga ini di atas kawasan kepentingan menghasilkan Rajah 2.6. Rajah ini boleh menerangkan nilai suhu sampel pada indeks kedalaman dan masa yang tertentu.

- ✕ Titik grid melibatkan perbezaan masa
- Titik grid melibatkan perbezaan ruang



Rajah 2.5 Molekul pengiraan untuk kaedah tersirat.



Rajah 2.6 Kawasan kepentingan model ditindih grid beza terhingga.

Persamaan yang dihampirkan disusun semula untuk menerbitkan persamaan (2.4.1), dilampiran di lampiran A. Persamaan ini mempunyai beberapa nilai yang tak diketahui. Kaedah tersirat memerlukan pembentukan satu sistem persamaan dan ia akan diselesaikan secara serentak. Daripada persamaan (2.4.1), kita bentukkan satu sistem persamaan diungkapkan dalam bentuk matriks. Persamaan (2.4.1) ditulis untuk sepanjang indeks kedalaman,  $i = 1, 2, \dots, n-1$  dan indek masa,  $k$  yang dipilih.

$$T_i^k + \lambda_2 e^{-\beta z(i)} e^{-(t(k)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_{i+1}^{k+1} + (1 + 2\lambda_1) T_i^{k+1} - \lambda_1 T_{i-1}^{k+1} \quad \dots(2.4.1)$$

Sistem persamaan serentak dibentuk dan ditulis dalam bentuk matriks, persamaan (2.4.2). Penerbitan sistem persamaan serentak ditunjukkan di lampiran B. Akhirnya, daripada sistem persamaan serentak ini, penyelesaian untuk persamaan (2.3.1a) dapat diperoleh untuk  $k$  yang dipilih. Langkah yang sama diulang untuk nilai  $k$  yang seterusnya sehingga habis julat masa. Penyelesaian diperoleh dari kaedah ini ialah suhu sampel sebagai fungsi masa dan kedalaman sampel.

$$\begin{bmatrix} (1 + \lambda_1) & -\lambda_1 & & & \\ -\lambda_1 & (1 + 2\lambda_1) & -\lambda_1 & & \\ & -\lambda_1 & (1 + 2\lambda_1) & -\lambda_1 & \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & & \dots & -\lambda_1(1 + 2\lambda_1) & -\lambda_1 \\ & & & & -\lambda_1 & (1 + 2\lambda_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^1 \\ T_2^1 \\ T_3^1 \\ \dots \\ T_{n-1}^1 \\ T_{n-2}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ T_2^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(2)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ T_3^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(3)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ \dots \\ T_{n-2}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-2)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ T_{n-1}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} + \lambda_1(300) \end{bmatrix} \quad \dots(2.4.2)$$

## **BAB III**

### **PERALATAN DAN KAEDAH KAJIAN**

#### **3.1 PENGENALAN**

Peralatan yang digunakan dalam kajian ini ialah komputer riba yang dipasang perisian MatLab R2018a. Perisian ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan (2.3.1b). Seterusnya, penyesuaian lengkok data signal yang diukur dengan penyelesaian berangka dilakukan untuk mendapatkan resapan terma filem nipis.

#### **3.2 PERALATAN KAJIAN**

##### **3.2.1 Perkakasan**

Model komputer riba peribadi yang digunakan adalah *Acer Aspire E5-476G*. Komputer riba ini dilengkapi dengan pemproses *Intel® Core™ i7-8550U* CPU yang berkelajuan 1.8GHz, ingatan capaian rawak (RAM) sebanyak 4GB dan sistem pengoperasian 64-bit Windows edisi 10.

##### **3.2.2 MatLab R2018a**

MatLab (Matrix Laboratory) versi R2018a 64-bit adalah perisian utama yang digunakan untuk membuat penyelesaian berangka persamaan pengaliran haba satu dimensi untuk filem nipis satu lapisan. Perisian ini berkebolehan untuk membuat pengiraan matematik dan komputasi, memanipulasi matriks, pemodelan, simulasi, analisis data dan pemvisualan data.

### 3.3 PENGUKURAN KAEDAH TDTR

Data signal untuk pengukuran TDTR diperoleh dari kajian lepas (Kim et al. 2010). Pengukuran yang dilakukan adalah terhadap sampel filem nipis aluminium setebal 300 nm dan filem nipis  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) setebal 95 nm.

Pengukuran yang dilakukan menggunakan sebuah sistem laser femtosaat (Millenia Pro dan Tsunami oleh Spectra-Physics) yang memancarkan laser berdenyut ultra pendek. Jadual 3.1 menunjukkan parameter laser yang digunakan. Pancaran laser dipisahkan menjadi laser pam dan laser penduga dengan nisbah keamatannya adalah 10:1. Susunan pancaran laser adalah seperti Rajah 2.1, di mana laser pam ditembak terus kepada sampel, menghasilkan peningkatan suhu. Laser penduga pula bertindak mengukur penyusutan suhu di permukaan sampel sambil haba meresap ke dalam sampel. Laser penduga yang terpantul dikesan oleh fotopengesan seperti Rajah 2.1. Data signal dari fotopengesan dibandingkan dengan penyelesaian persamaan (2.3.1b) yang dikira oleh komputer.

Jadual 3.1 Senarai parameter laser yang digunakan.

Parameter	Nilai
Frekuensi, $f$ (MHz)	80
Keamatan laser, $I$ , ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	12
Panjang gelombang, $\lambda$ (nm)	780
Lebar penuh separuh maksimum, FWHM (fs)	120
Lebar laser berdenyut, $\tau$ (fs)	60

### 3.4 SIMULASI PENGALIRAN HABA SATU DIMENSI

Terdapat dua nilai yang tidak diketahui dalam persamaan (2.3.1b) iaitu nilai resapan terma,  $\alpha_s$ , dan penyerapan per unit panjang,  $\beta$ . Sampel aluminium digunakan untuk mendapatkan nilai  $\beta$  aluminium dengan melakukan simulasi pengaliran haba. Kemudian, dengan nilai  $\beta$  yang diperoleh,  $\alpha_s$  YBCO diperoleh menggunakan kaedah yang sama. Penyelesaian suhu untuk pantulan terma filem nipis aluminium diperoleh dahulu. Nilai  $\beta$  yang tepat adalah penting untuk mendapatkan nilai resapan terma sampel. Simulasi pengaliran haba satu dimensi dilakukan untuk sampel filem nipis



aluminium setebal 300 nm di atas substrat silikon menggunakan kaedah IFD. Sifat terma pukal aluminium yang digunakan untuk simulasi pengaliran haba disenaraikan dalam Jadual 3.2. Seterusnya, penyelesaian suhu di permukaan sampel disuai lengkuk dengan data signal kajian lepas oleh Kim et al. 2010. Nilai  $\beta$  diperoleh daripada penyesuaian lengkuk yang paling tepat.

Menggunakan nilai  $\beta$  lapisan aluminium, resapan terma sampel ditentukan menggunakan kaedah yang sama. Sampel yang dikaji adalah filem nipis  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) setebal 95 nm dengan lapisan penutup aluminium setebal 90 nm di atas substrat  $\text{SrTiO}_3$  (STO). Nilai yang digantikan di dalam persamaan (2.4.1) disenaraikan dalam Jadual 3.2. Seterusnya, penyelesaian suhu di permukaan sampel disuai lengkuk dengan data signal kajian lepas oleh Kim et al. 2010. Nilai  $\alpha_s$  diperoleh daripada penyesuaian lengkuk yang paling tepat.

Jadual 3.2 Sifat bahan digunakan dalam penyelesaian berangka.

Bahan	Aluminium	YBCO
Ketumpatan bahan, $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	2700	3000
Muatan haba per unit isipadu, $C_v$ ( $/\text{kg}\cdot\text{K}$ )	900	5
Resapan terma, $\alpha_s$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$9.75 \times 10^{-5}$	-

## **BAB IV**

### **DAPATAN KAJIAN**

#### **4.1 ANALISIS KAEDAH PANTULAN TERMA PIKOSAAT**

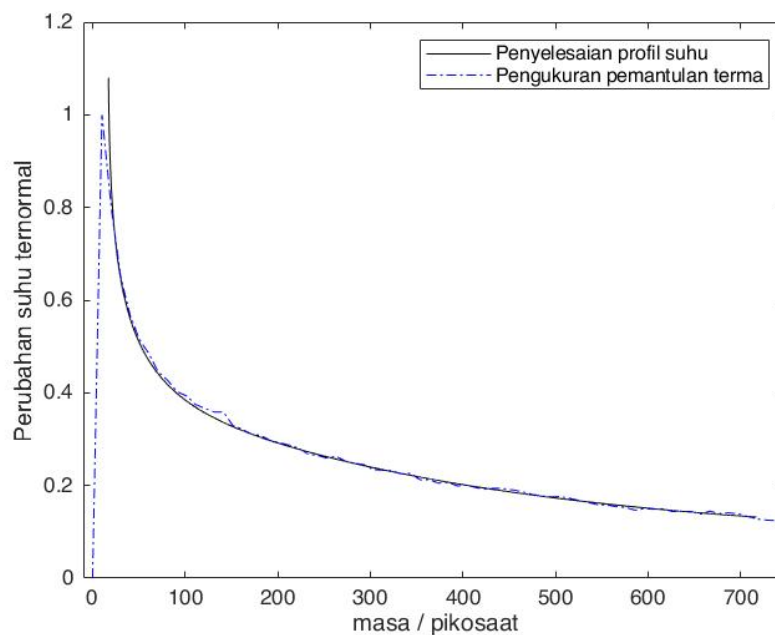
##### **4.1.1 Analisis filem nipis aluminium**

Penyelesaian berangka untuk persamaan (2.3.1b) diperoleh menggunakan kaedah beza terhingga tersirat (IFD) dan syarat sempadan permukaan bebas untuk permukaan atas dan bawah sampel. Penyelesaian suhu telah diperoleh untuk filem nipis aluminium berketebalan 300 nm di atas substrat silikon sebagai fungsi masa dan kedalaman sampel. Pengiraan yang dibuat selaras dengan pengukuran pantulan terma iaitu selama 700 pikosaat pada permukaan sampel.

Daripada pengukuran, perubahan pantulan adalah berkadar dengan peningkatan suhu sampel, pengukuran yang diambil dinormalkan sebelum proses penyesuaian lengkuk dilakukan untuk mengira perubahan suhu sampel. Penyelesaian persamaan pengaliran haba juga dinormalkan untuk menyelaraskan kedua nilai ini menggunakan persamaan (4.1.1). Di mana  $\Delta T$  ialah perubahan suhu ternormal,  $T$  ialah suhu sampel,  $T_m$  ialah suhu sampel tertinggi dan  $T_o$  ialah suhu sampel awal.

$$\Delta T = \frac{T + T_o}{T_m + T_o} \quad \dots(4.1.1)$$

Penyelesaian persamaan pengaliran haba ternormal disuai lengkuk terhadap pengukuran pantulan terma yang telah dinormalkan untuk memperoleh nilai penyerapan per unit panjang,  $\beta$  filem nipis aluminium (Rajah 4.1). Nilai  $\beta$  untuk filem nipis aluminium diperoleh menggunakan sifat terma pukal aluminium.



Rajah 4.1 Penyesuaian lengkok penyelesaian suhu permukaan untuk filem nipis aluminium ketebalan 300 nm terhadap pengukuran pantulan terma ternormal melawan masa.

Suaian lengkok yang paling tepat memberikan nilai  $\beta$  ialah  $20 \mu\text{m}^{-1}$ . Nilai teori untuk  $\beta$  diperoleh menggunakan persamaan (4.1.2). Pengiraan dilakukan menggunakan nilai kepustakaan indeks biasan kompleks ( $n + i\kappa$ ) aluminium tulen dari (Lide et al. 2005). Di mana  $n$  ialah indeks biasan sampel dan  $\kappa$  ialah pekali kepupusan sampel. Nilai teori  $\beta$  aluminium ialah sekitar  $140 \mu\text{m}^{-1}$  berdasarkan nilai kepustakaan yang dirujuk. Penyimpangan nilai yang diukur daripada nilai teori  $\beta$  berkemungkinan oleh dua faktor. Pertamanya, disebabkan oleh perbezaan sifat di antara filem nipis YBCO dengan bahan pukal. Kedua, pengoksidaan separa lapisan filem nipis aluminium.

$$\beta = 4\pi\kappa/\lambda \quad \dots(4.1.2)$$

Aluminium adalah satu bahan yang agak reaktif. Pendedahan lapisan filem nipis aluminium terhadap udara mengoksidadkannya, menghasilkan aluminium oksida. Nilai  $\beta$  untuk aluminium oksida pula adalah sangat rendah menurut (French, Mu & Jones 1998) dan ia menghampiri nilai kosong untuk panjang gelombang 780 nm yang digunakan di dalam kajian ini. Nilai  $\beta$  aluminium oksida yang rendah ini merendahkan nilai  $\beta$  efektif untuk lapisan filem nipis aluminium. Oleh sebab itu,  $\beta$  yang dicadangkan oleh penyelesaian pengaliran haba ini adalah satu nilai yang munasabah.

Dapat dikira juga panjang resapan terma,  $\mu$  untuk lapisan aluminium menggunakan persamaan (4.1.3). Panjang resapan terma selama 700 ps mengikut julat masa pengiraan model dilakukan ialah 261 nm. Panjang resapan terma tidak melebihi ketebalan 300 nm lapisan aluminium, membuktikan model satu lapisan ini sesuai.

$$\mu = \sqrt{\alpha t} \quad \dots(4.1.3)$$

Juga dapat diperhatikan penyelesaian berangka daripada persamaan (2.3.1b) hanya bergantung kepada nilai resapan terma  $\alpha_s$  dan nilai penyerapan  $\beta$  dan tidak berubah dengan sebarang parameter lain di dalam persamaan tersebut, seperti nilai keamatan laser  $I$  atau pantulan  $R$ .

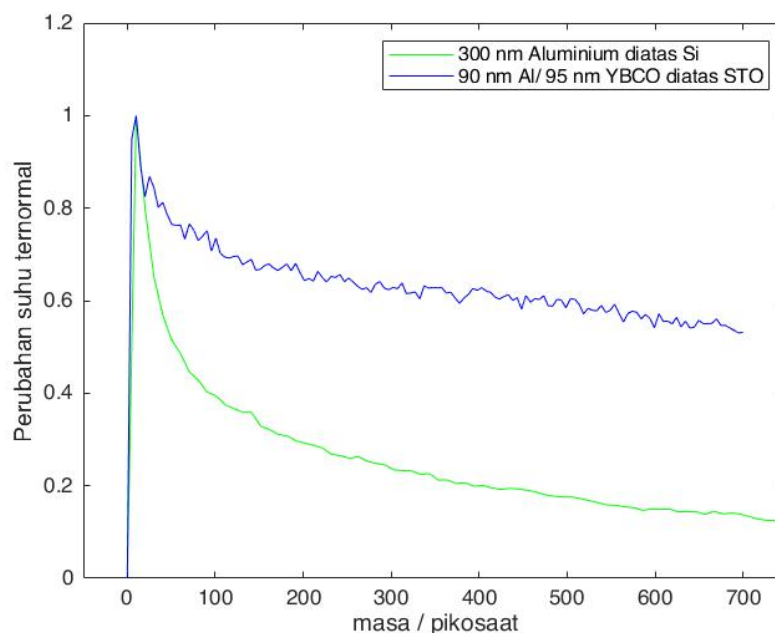
Peningkatan nilai  $\alpha_s$  menjadikan penyelesaian perubahan suhu ternormal lebih cerun. Nilai  $\alpha_s$  yang lebih tinggi bermaksud haba meresap dengan kadar yang lebih cepat di dalam bahan sampel, setanding dengan penyelesaian berangka model yang dibuat, haba berkurang dengan lebih cepat terhadap masa, mempunyai kecerunan yang tinggi.

Peningkatan nilai  $\beta$  pula menjadikan nilai minimum penyelesaian perubahan suhu ternormal lebih rendah. Nilai  $\beta$  yang lebih tinggi membuatkan bahan sampel menyerap haba dengan kadar yang lebih tinggi. Peningkatan nilai  $\beta$  meningkatkan suhu sampel tertinggi  $T_m$ , setanding dengan penyelesaian model berangka yang dibuat, iaitu perubahan haba suhu ternormal berkurang dengan peningkatan nilai  $\beta$  dan  $T_m$ . Hubungkait ini boleh juga diperhatikan melalui persamaan (4.1.1).  $\Delta T$  berkadar songsang dengan  $T_m$ .

#### 4.1.2 Analisis filem nipis YBCO

Menggunakan nilai penyerapan per unit panjang,  $\beta$  lapisan aluminium dari bahagian sebelum ini, resapan terma,  $\alpha_s$  untuk YBCO diperolehi dengan melakukan penyesuaian lengkung penyelesaian berangka persamaan (2.3.1b) terhadap pengukuran pantulan terma untuk sampel filem nipis YBCO setebal 95 nm dengan lapisan penutup aluminium setebal 90 nm di atas substrat STO.

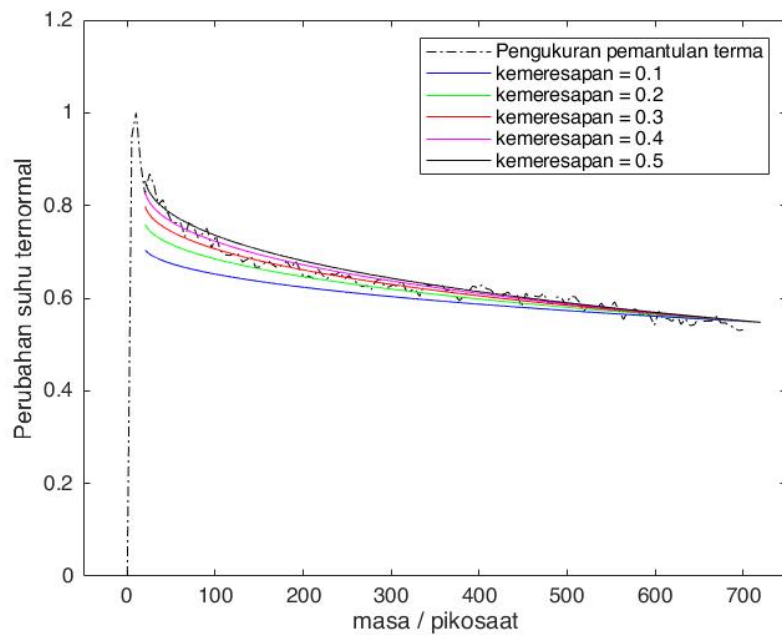
Rajah 4.2 menunjukkan pengukuran pantulan terma untuk sampel filem nipis tiga lapisan, 90 nm aluminium/ 95 nm YBCO di atas substrat STO dan sampel filem nipis 300 nm aluminium di atas substrat silikon. Dapat diperhatikan untuk pengukuran yang dilakukan terhadap filem nipis YBCO, bentuk graf menyimpang pada 20 pikosaat. Kesan daripada lapisan YBCO menjadi dominan selepas waktu ini, iaitu sejeurus sahaja haba meresap melepasi lapisan aluminium dan sampai kepada lapisan YBCO.



Rajah 4.2 Pengukuran pantulan terma ternormal untuk filem nipis aluminium ketebalan 300 nm dan filem nipis YBCO ketebalan 95 nm melawan masa

Penyelesaian berangka yang diperoleh disuai lengkok terhadap pengukuran pantulan terma dengan anjakan ke kanan sebanyak 20 pikosaat kerana pengiraan model yang dilakukan hanyalah untuk resapan haba di dalam sampel YBCO. Penyesuaian lengkok yang dilakukan ditunjukkan di Rajah 4.3.

Penyesuaian lengkok untuk filem nipis YBCO yang paling tepat memberikan nilai resapan terma,  $\alpha_s$  di antara 0.2 hingga 0.4  $\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ . Nilai resapan terma purata adalah  $0.30 \pm 0.10 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ . Nilai ini dibandingkan dengan nilai resapan terma yang dilaporkan menggunakan kaedah berbeza di jadual 4.1.



Rajah 4.3 Penyesuaian lengkung penyelesaian suhu permukaan untuk filem nipis YBCO ketebalan 95 nm dengan resapan yang berbeza terhadap pengukuran pantulan terma ternormal melawan masa.

Keputusan yang diperoleh adalah hampir dengan nilai-nilai yang dilaporkan untuk filem nipis YBCO. Menggunakan persamaan (4.1.3) kita dapat mengira nilai panjang resapan terma untuk 700 ps iaitu 14.5 nm. Nilai ini lebih rendah dari ketebalan sampel YBCO, 95 nm. Membuktikan andaian yang dibuat bahawa lapisan sampel YBCO mencapai kondisi ketebalan terma. Mengesahkan lagi ketepatan penggunaan model satu lapisan di dalam kajian ini. Kesan substrat boleh diabaikan untuk model pengaliran haba satu lapisan ini.

Jadual 4.1 Nilai resapan terma  $\alpha_s$  sampel filem nipis YBCO pada suhu bilik.

Ketebalan sampel	Kaedah	Resapan terma $\alpha_s$ ( $\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ )
95 nm	kaedah TDTR	$0.30 \pm 0.10$
95 nm	kaedah TDTR (Kim et al. 2010)	$0.25 \pm 0.05$
Sampel pukal	kaedah piezoelektrik dan piroelektrik terganding (Aravind & Fung 1999)	2.20
60 nm	kaedah fatamorgana (Wong et al. 1995)	0.12
220 nm	kaedah parutan fana (Marshall et al. 1992)	0.28
190 nm	kaedah parutan fana (Marshall et al. 1993)	0.26
800 nm	kaedah mikroskopi terma (Yagi, Taketoshi & Kato 2004)	0.30

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 KESIMPULAN**

Hasil daripada kajian ini mendapati nilai resapan terma,  $\alpha_s$  bagi filem nipis YBCO adalah  $0.3 \pm 0.1 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$ . Nilai  $\alpha_s$  diperoleh dengan melakukan simulasi persamaan pengaliran haba satu dimensi untuk filem nipis satu lapisan. Perbandingan telah dilakukan terhadap nilai  $\alpha_s$  yang dilaporkan menggunakan kaedah berbeza dari kajian lepas. Terbukti analisis yang dilakukan adalah betul kerana nilai diperoleh melalui kajian ini mendapat perbandingan yang baik dengan nilai yang dirujuk.

Ini membuktikan kaedah pantulan terma pikosaat berupaya untuk mengukur resapan terma untuk filem nipis YBCO. Kaedah ini membolehkan pengukuran resapan terma filem nipis YBCO yang bebas daripada kesan lapisan penutup dan substrat.

#### **5.2 CADANGAN**

Kaedah pantulan terma pikosaat terbukti berupaya mengukur nilai resapan terma untuk filem nipis YBCO. Kajian ini boleh diteruskan untuk mengukur nilai resapan terma filem nipis lain yang sudah diketahui, untuk menentusahkan lagi kebolehan kaedah ini. Juga boleh dibuat pengukuran keatas sampel yang berbeza ketebalan. Ini untuk melihat kebergantungan nilai yang diukur dan kebolehan kaedah yang digunakan terhadap ketebalan sampel. Kaedah ini boleh juga digunakan untuk menentukan resapan terma bahan yang tidak diketahui untuk kajian akan datang.

Cadangan lain adalah penggunaan kaedah Crank-Nicolson di dalam model yang dibentuk untuk menambah kejituan model. Penambahbaikan model juga boleh dilakukan untuk mengambil kira kesan antara muka lapisan filem nipis.

## RUJUKAN

- Alwi, H.A. & Abd-Shukor, R. 2011. Measurement of thermophysical properties of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> thin film using picosecond thermoreflectance technique. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 471(1–2): 26–28.
- Alwi, H.A., Kim, Y.Y., Awang, R., Rahman, S.A. & Krishnaswamy, S. 2013. Measurement of thermophysical properties of hydrogenated amorphous carbon thin films using picosecond thermoreflectance technique. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 63: 199–203.
- Aravind, M. & Fung, P.C.. 1999. Thermal parameter measurements of bulk YBCO superconductor using PVDF transducer. *Meas. Sci. Technol.* 10 979.
- Cahill, D.G., Ford, W.K., Goodson, K.E., Mahan, G.D., Majumdar, A., Ford, W.K. & Maris, H.J. 2012. Nanoscale thermal transport Nanoscale thermal transport 793(May).
- Chapra, S.C. & Canale, R.P. 1988. *Numerical Methods for Engineers*. Second edi.
- Eesley, G.L. 1986. Generation of nonequilibrium electron and lattice temperatures in copper by picosecond laser pulses. *Physical Review B* 33(4): 2144–2151.
- French, R.H., Mu, H. & Jones, D.. 1998. Optical Properties of Aluminum Oxide : Determined from Vacuum Ultraviolet and Electron Energy-Loss Spectroscopies 81: 2549–2557.
- Hornbeck, R.W. 1975. *Numerical Methods*. Quantum publisher.
- Kim, Y.Y. 2017. Thermal Conductivity of a Nanoscale Yttrium Iron Garnet Thin-Film Prepared by the Sol-Gel Process.
- Kim, Y.Y., Alwi, H.A., Huang, Q., Abd-Shukor, R., Tsai, C.F., Wang, H., Kim, K.W., Naugle, D.G. & Krishnaswamy, S. 2010. Thermal diffusivity measurement of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> thin film with a picosecond thermoreflectance technique. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 470(7–8): 365–368.
- Li, B., Pottier, L., Roger, J.P. & Fournier, D. 1999. Thermal characterization of thin superconducting films by modulated thermoreflectance microscopy 352: 91–96.
- Lide, D.R., Data, S.R., Board, E.A., Baysinger, G., Chemistry, S., Library, C.E., Berger, L.I., Goldberg, R.N., Division, B., Kehiaian, H. V, Kuchitsu, K., Rosenblatt, G., Roth, D.L. & Zwillinger, D. 2005. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*.
- Marshall, C.D., Fishman, I.M., Dorfman, R., Eom, C.B. & Fayer, M.D. 1992. Thermal diffusion, interfacial thermal barrier, and ultrasonic propagation in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin films: Surface-selective transient-grating experiments. *Physical Review B* 45(17): 9–21.



- Marshall, C.D., Tokmakoff, A., Fishman, I.M., Eom, C.B., Phillips, J.M., Fayer, M.D., Marshall, C.D. & Tokmakoff, A. 1993. Thermal boundary resistance and diffusivity measurements on thin  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  films with MgO and  $\text{SrTiO}_3$  substrates using the transient grating method Thermal boundary resistance and diffusivity measurements on thin  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  films with MgO and  $\text{SrTiO}_3$  73: 850.
- Matsekh, A., Kiss, T., Inoue, M., Yoshizumi, M., Sutoh, Y., Izumi, T., Shiohara, Y. & Samples, A. 2009. The Use of Low Temperature Scanning Microscope for Estimating In-Plane Thermal Diffusivity in YBCO Thin Film 19(3): 2867–2871.
- Paddock, C.A. & Eesley, G.L. 1986. Transient thermoreflectance from thin metal films. Journal of Applied Physics 60(1): 285–290.
- Rosencwaig, A. & Gersho, A. 1976. Theory of the photoacoustic effect with solids Theory of the photoacoustic effect with solids. Journal of Applied Physics(47): 64–69.
- Wong, P.K., Fung, P.C., Tam, H. & Gao, J. 1995. Thermal-diffusivity measurements of an oriented superconducting-film —substrate composite using the mirage technique. PHYSICAL REVIEW B 51(1).
- Yagi, T., Taketoshi, N. & Kato, H. 2004. Distribution analysis of thermal effusivity for sub-micrometer YBCO thin films using thermal microscope 414: 1337–1342.

## LAMPIRAN A

### PENERBITAN PERSAMAAN BEZA TERHINGGA TERSIRAT

Merujuk kepada 'Transient thermoreflectance from thin metal films' oleh Paddock dan Eesley (PE) pada tahun 1986, persamaan yang digunakan ialah

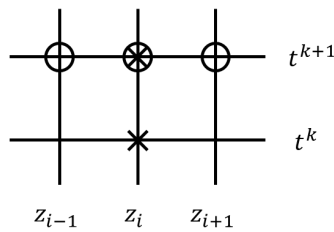
$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} + \frac{I(1-R)\beta e^{-\beta z} e^{-(t/\tau)^2}}{c} \quad (1)$$

Menggunakan kaedah beza terHINGGA tersirat (IFD) persamaan (1) dilakukan penghampiran untuk terbitan kedua dalam ruang dan terbitan pertama dalam masa. Terbitan ruang dihampirkan menggunakan perbezaan dibahagi terHINGGA berpusat pada tahap masa lanjutan  $k + 1$ . Perbezaan dibahagi terHINGGA ke hadapan digunakan untuk membuat penghampiran untuk terbitan masa.

$$\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} = \frac{T_{i+1}^{k+1} - T_i^{k+1} - T_{i-1}^{k+1}}{(\Delta z)^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} \quad (3)$$

- ✕ Titik grid melibatkan perbezaan masa  
 ○ Titik grid melibatkan perbezaan ruang



Rajah 5.1 Molekul pengiraan untuk kaedah tersirat.

Daripada persamaan di atas, persamaan (1) diterbitkan sebagai

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta t} = \alpha_s \frac{T_{i+1}^{k+1} - T_i^{k+1} - T_{i-1}^{k+1}}{(\Delta z)^2} + \frac{I(1-R)\beta e^{-\beta z} e^{-(t/\tau)^2}}{c} \quad (4)$$

Mendarabkan persamaan (4) dengan  $(\Delta t)$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = \frac{\Delta t \alpha_s}{(\Delta z)^2} [T_{i+1}^{k+1} - T_i^{k+1} - T_{i-1}^{k+1}] + \frac{\Delta t I(1-R)\beta e^{-\beta z} e^{-(t/\tau)^2}}{c} \quad (5)$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = \lambda_1 [T_{i+1}^{k+1} - T_i^{k+1} - T_{i-1}^{k+1}] + \frac{\Delta t I(1-R)\beta e^{-\beta z} e^{-(t/\tau)^2}}{c} \quad (6)$$

$$\text{di mana } \lambda_1 = \frac{\Delta t \alpha_s}{(\Delta z)^2} \quad Q = I(1-R)\beta \quad \lambda_2 = \frac{\Delta t Q}{c}$$

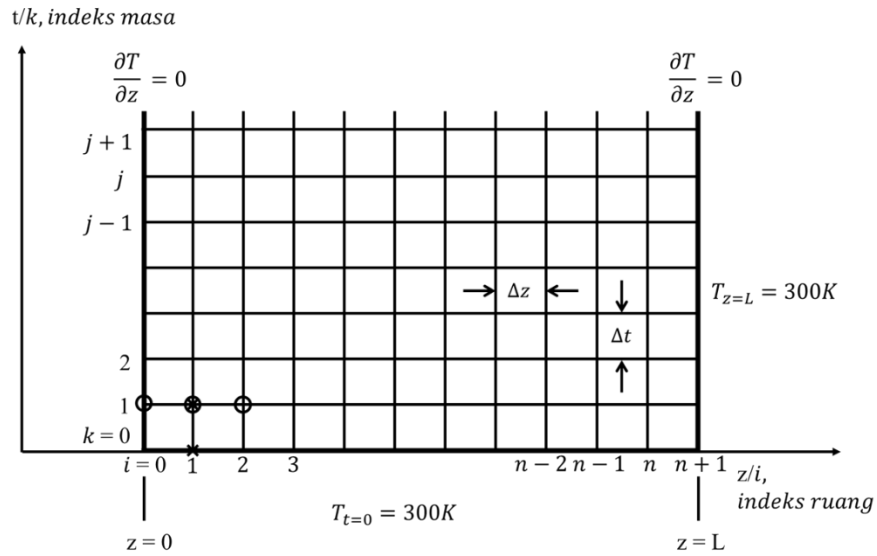
Seterusnya memindahkan  $T^{k+1}$  kepada satu bahagian, persamaan beza terhingga diberikan sebagai

$$T_i^k + \frac{\Delta t I(1-R)\beta e^{-\beta z(i)} e^{-(t(k)/\tau)^2}}{c} = -\lambda_1 T_{i+1}^{k+1} + (1 + 2\lambda_1) T_i^{k+1} - \lambda_1 T_{i-1}^{k+1} \quad (7)$$

$$T_i^k + \frac{\Delta t Q e^{-\beta z(i)} e^{-(t(k)/\tau)^2}}{c} = -\lambda_1 T_{i+1}^{k+1} + (1 + 2\lambda_1) T_i^{k+1} - \lambda_1 T_{i-1}^{k+1} \quad (8)$$

$$T_i^k + \lambda_2 e^{-\beta z(i)} e^{-(t(k)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_{i+1}^{k+1} + (1 + 2\lambda_1) T_i^{k+1} - \lambda_1 T_{i-1}^{k+1} \quad (9)$$

Persamaan (9) akan ditulis untuk sepanjang indeks  $i$  dan indeks  $k$  yang dipilih untuk membentuk sistem persamaan serentak.



Rajah 5.2 Kawasan kepentingan model ditindih grid beza terhingga.

**LAMPIRAN B**  
**PENERBITAN SISTEM PERSAMAAN SERENTAK**

Daripada persamaan dibawah, menggunakan syarat sempadan permukaan bebas untuk permukaan atas dan bawah sampel, sistem persamaan serentak diterbitkan untuk  $i = 1, 2, \dots, n, n-1$  dan  $k = 0$ . Simbol  $i$  melambangkan indeks kedalaman dan simbol  $k$  pula melambangkan indeks masa.

$$T_i^k + \lambda_2 e^{-\beta z(i)} e^{-(t(k)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_{i+1}^{k+1} + (1 + 2\lambda_1) T_i^{k+1} - \lambda_1 T_{i-1}^{k+1} \quad (1)$$

Syarat sempadan permukaan bebas yang digunakan bermaksud tiada perubahan suhu untuk pada permukaan atas dan bawah sampel sepanjang masa. Untuk permukaan atas sampel, suhunya adalah sama dengan nilai suhu bawah satu indeks darinya. Untuk permukaan bawah sampel, suhunya adalah sama dengan nilai suhu atas satu indeks darinya. Persamaan  $i = 0, n$  dan  $n+1$  boleh diabaikan.

$$T_0^{k+1} = T_1^{k+1} \quad (2)$$

$$T_n^{k+1} = T_{n+1}^{k+1} \quad (3)$$

Untuk  $k = 0$ ;  
 $i = 1$ ,

$$T_1^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_2^1 + (1 + 2\lambda_1) T_1^1 - \lambda_1 T_0^1 \quad (4)$$

$$T_1^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_2^1 + (1 + \lambda_1) T_1^1 \quad (5)$$

$i = 2$ ,

$$T_2^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(2)} e^{-(t(0)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_3^1 + (1 + 2\lambda_1) T_2^1 - \lambda_1 T_1^1 \quad (6)$$

$i = 3$ ,

$$T_3^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(3)} e^{-(t(0)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_4^1 + (1 + 2\lambda_1) T_3^1 - \lambda_1 T_2^1 \quad (7)$$

$i = n - 2$ ,

$$T_{n-2}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-2)} e^{-(t(0)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_{n-1}^1 + (1 + 2\lambda_1) T_{n-2}^1 - \lambda_1 T_{n-3}^1 \quad (8)$$

$$i = n - 1,$$

$$T_{n-1}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} = -\lambda_1 T_n^1 + (1 + 2\lambda_1) T_{n-1}^1 - \lambda_1 T_{n-2}^1 \quad (9)$$

$$T_{n-1}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} + \lambda_1(300) = (1 + 2\lambda_1) T_{n-1}^1 - \lambda_1 T_{n-2}^1 \quad (10)$$

Terbentuk sebuah sistem persamaan serentak untuk sepanjang titik indeks  $i$  dan  $k = 0$ . Seterusnya sistem persamaan serentak ini ditulis dalam bentuk matriks seperti dibawah untuk mendapatkan penyelesaian suhu sepanjang kedalaman sampel pada indeks masa  $k = 1$ .

$$\begin{bmatrix} (1 + \lambda_1) & -\lambda_1 & & & & \\ -\lambda_1 & (1 + 2\lambda_1) & -\lambda_1 & & & \\ & -\lambda_1 & (1 + 2\lambda_1) & -\lambda_1 & & \\ & & \dots & \dots & \dots & \\ & & & \dots & \dots & \dots \\ & & & & -\lambda_1(1 + 2\lambda_1) & -\lambda_1 \\ & & & & -\lambda_1 & (1 + 2\lambda_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^1 \\ T_2^1 \\ T_3^1 \\ \dots \\ \dots \\ T_{n-1}^1 \\ T_{n-2}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ T_2^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(2)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ T_3^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(3)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ \dots \\ \dots \\ T_{n-2}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-2)} e^{-(t(0)/\tau)^2} \\ T_{n-1}^0 + \lambda_2 e^{-\beta z(n-1)} e^{-(t(0)/\tau)^2} + \lambda_1(300) \end{bmatrix} \quad (11)$$

## LAMPIRAN C

### PENGEKODAN MATLAB

```

% implicit method. Heat diffusion of thin film sample aluminum
clear;
clc;
format long

% constant. laser properties
I = 12; %pump laser intensity.
TAU = 60e-9; %half pump laser pulse width. mewsec
lambda = 780e-3; %wavelength of pump laser. mewmeter

% constant. aluminium properties
B = 20.; %absorption per unit length.
permewmeter
thermdiff = 97.53; %thermal diffusivity. mewmeter square
per mewsec
rho = 2.7e-9; %density. miligram per mewmeter cube
Cv = 900; %specific heat.
C = rho*Cv; %heat capacity per unit volume.
R = 0.632; %reflectivity.

% parameter of sample. within the space z and time t
L = 300e-3; % length of wire. 300e-3 mewmeter. 300
nm
t = 700.0e-6; % final time. 700.0e-6 mewsec. 700 ps

% solving the equation of implicit method
j = 7000; % number of time steps
dt = t/j; % time step
n = 300; % number of space steps
dx = L/n; % space steps

lambda1 = thermdiff*dt/(dx*dx); % constant in implicit
equation
Q = I*(1-R)*B;
lambda2 = dt*(Q/C); % second constant

%matrix creation. to improve speed
grid = zeros(n+1,j+1); % matrix of temperature
at thick-time
x = zeros(1,n+1); % matrix of thickness of
sample
time = zeros(1,j+1); % matrix of time
rhs = zeros(n-2,j+1); % matrix of rhs-time

% initial temperature of wire. at time = 1 and any x
for i = 1: n+1
    grid(i,1) = 300.;
    x(i) = (i-1)*dx;
end

```

```

% temperature at boundary not given. only gradient = 0 at x = 0
and L
for k = 1: j+1
    time(k) = (k-1)*dt;
    grid(n+1,k) = 300.;           %temperature at substrate
contacts
    grid(n,k) = grid(n+1,k);     %temperature above it by 1
index
end

% forming the matrix
diagonal(1:n-2) = 1+2*lambda1;   % diagonal component
diagonal(1) = 1+lambda1;
superdiag(1:n-3) = -lambda1;     % superdiagonal component
subdiag(1:n-3) = -lambda1;       % subdiagonal component
matrix = diag(diagonal,0) + diag(superdiag,1) + diag(subdiag,-1);

% forming rhs and implementing implicit method
for k = 2: j+1                   % time loop
    for i = 2 : n-2
        % took the value within the boundary of the previous
        level
        rhs(i-1,k-1) = grid(i,k-1) + lambda2*exp(-B*x(i))*exp(-(time(k-1)/TAU)^2);
        % took the value within the
        boundary of the previous level
    end
    i = n-1;
    rhs(i-1,k-1) = grid(i,k-1) + lambda1*grid(i+1,k) +
    lambda2*exp(-B*x(i))*exp(-(time(k-1)/TAU)^2);
    grid(2:n-1,k) = matrix\rhs(:,k-1); % input a new value
    into the current level
end

modelmeas(:,1) = time'*1e6;       %model measurements
maxgrid = max(grid(2,:));
normtemp = (grid(2,:)-300.)/(maxgrid-300.);
modelmeas(:,2) = normtemp';

%importing experimental data from excel file
filename = 'Aldata300nm.xlsx';
timeexp = xlsread(filename,2,'A1:A90');
normtempexp = xlsread(filename,2,'B1:B90');

%graphical representation
figure(1)
plot(modelmeas(3:end,1)+17,modelmeas(3:end,2)+0.08,'-k')
hold on
plot(timeexp,normtempexp,'-.b')
xlabel('masa / pikosaat')
ylabel('Perubahan suhu ternormal')
legend('Penyelesaian profil suhu','Pengukuran pemantulan
terma')
axis([-50 750 0 1.2])

```