

**PERMODELAN EFEK JENDELA PADA PENGUKURAN
ELLIPSOMETRI DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE
MATLAB**

TUGAS AKHIR

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Oleh :

MOHAMMAD ABDULLAH

0410930033-93



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2009

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**PERMODELAN EFEK JENDELA PADA PENGUKURAN
ELLIPSOMETRI DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE
MATLAB**

Oleh :

**MOHAMMAD ABDULLAH
0410930033-93**

**Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
Pada tanggal
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika**

Pembimbing I

Pembimbing II

**Ir. D.J. Djoko H.S., M.Phill, PhD
NIP. 131 879 050**

**Drs. Heru Budiono, M.Sc.
NIP. 131 653 822**

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya**

**Drs. Adi Susilo, M.Si, PhD.
NIP. 131 960 447**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mohammad Abdullah

NIM : 0410930033-93

Jurusan : Fisika

Penulis Tugas Akhir Berjudul :

**PERMODELAN EFEK JENDELA PADA PENGUKURAN
ELLIPSOMETRI DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE
MATLAB.**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Isi dari Tugas Akhir yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Tugas Akhir ini.
2. Apabila dikemudian hari ternyata Tugas Akhir yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 25 Januari 2009

Yang menyatakan,

(Mohammad Abdullah)

NIM. 0410930033-93

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



PERMODELAN EFEK JENDELA PADA PENGUKURAN ELLIPSOMETRI DENGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE MATLAB

ABSTRAK

Ellipsometri adalah suatu teknik pengukuran konstanta optik dengan menganalisa fenomena polarisasi cahaya terpantul dari sampel. Pada pengukuran secara *in-situ*, data hasil pengukuran ellipsometri membutuhkan koreksi dikarenakan *efek jendela*.

Koreksi dilakukan dengan menggunakan model matrik Jones dengan mencari besar intensitas cahaya pada sistem tanpa dan dengan jendela. Model matrik Jones jendela didapat dari reduksi matrik Mueller jendela untuk mengoreksi *efek jendela* agar intensitas antara sistem jendela dan tanpa jendela mirip. Penjelasan konstanta optik sampel dapat diketahui dengan parameter Cauchy.

Hasil model matrik Jones jendela mampu mengoreksi *efek jendela* pada sudut pengukuran 50° , 55° dan 60° pada range panjang gelombang 300 – 800 nm. Hasil model parameter Cauchy menunjukkan sampel bersifat transparan dan *non-dichroic* karena sampel mengabsorpsi gelombang elektromagnetik pada range ultra violet.



THE WINDOWS EFFECT MODELING ON ELLIPSOMETRY MEASUREMENT BY SOFTWARE MATLAB

ABSTRACT

Ellipsometry is a technical measurement of optical constant by analysis phenomenon of reflection polarization by a sample. For *in-situ* measurement, The ellipsometry data need correction because of *windows effect*.

The correction was done utilizing Jones matrices to calculate the intensity of light which was measured with and without window. Jones matrices for window was got by reduction of Mueller matrices for window to correct the *windows effect* in order the intensity of light between the system with and without window was similar. The Explanation of optical constant sample is known by Cauchy parameter.

The correction result by Jones matrices of window can correct *windows effect* at measurement angle 50° , 55° and 60° at range of wave length 300 -800 nm. The result of Cauchy parameter explain that the sample is transparent and *non-dichroic* because it absorbs electromagnetic wave at ultra violet range.

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT karena atas anugerah rahmat dan hidayahnya penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik.

Laporan Tugas Akhir ini disusun dan diajukan sebagai syarat untuk menyelesaikan program pendidikan Sarjana pada Jurusan Fisika Universitas Brawijaya.

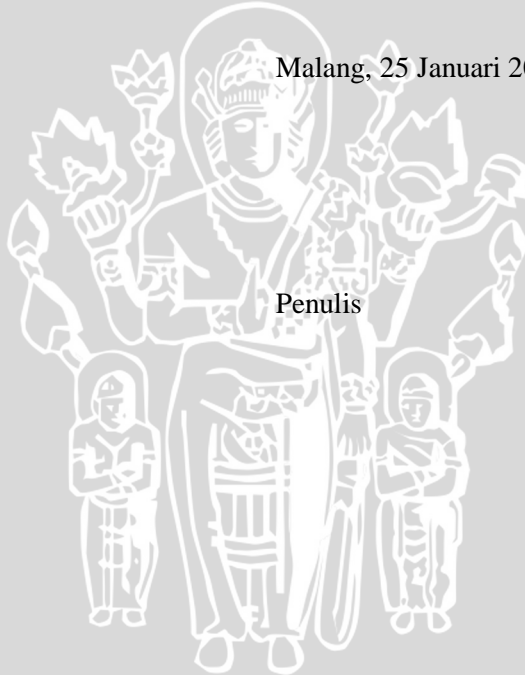
Pelaksanaan penelitian dan penulisan Laporan Tugas Akhir ini dapat berjalan baik dikarenakan dukungan dan kerjasama berbagai pihak yang terkait khususnya Jurusan Fisika Sehingga pada kesempatan ini penulis mengucapkan termia kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Drs. Adi Susilo, M.Si, PhD selaku ketua Jurusan Fisika Universitas Brawijaya, terima kasih atas bimbingan, saran dan masukannya.
2. Bapak Chomsin Widodo, S.Si., M.Si. selaku wakil Ketua Jurusan Fisika Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ir. D.J. Djoko HS., M.Phil., Ph.D. selaku pembimbing I yang selalu memberi motivasi dan pengarahan pada penyelesaian Tugas Akhir ini.
4. Almarhum Bapak Drs. Heru Budiono, M.Sc selaku pembimbing II yang masih menyempatkan waktunya untuk memberikan bimbimngan untuk penyelesaian penelitian ini.sampai diakhir hayat beliau. Semoga Allah menerima segala amal baik dan mengampuni segala kesalahan dan menempatkan beliau disisinya.
5. Ibunda (umi) Fadilah dan Ayahanda (abi) Mohammad Nur Hosen tercinta yang telah bersusah payah menjadikan penulis seperti sekarang ini dan tidak henti-hentinya mendoakan demi kebaiakan dan kemashlahatan hidup penulis.
6. Seluruh staf dan karyawan Tata Usaha Jurusan Fisika
7. Rekan-rekan jurusan fisika khususnya angkatan 2004 yang selalu memberikan motivasi dan inspirasi bagi penulis dan terima kasih atas kebersamaan dan kekompakannya selama ini semoga dapat terjalin selamanya.

8. Rekan-Rekan Fisika Material Mas Fani, Asmi, Selvi, Icuk, niken dan lain-lain terima kasih atas motivasinya untuk segera menyelesaikan penelitian ini.
9. Sahabat dan Teman-teman lama diluar jurusan fisika yang selalu memberikan motivasi dan doa kepada penulis.
10. Semua pihak yang telah membantu selama penelitian hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari akan keterbatasan penulis sebagai manusia yang tidak luput dari kesalahan baik disngaja maupun tidak disengaja. Penulis Memohon maaf sebesar-besarnya baik selama pelaksanaan penelitian maupun penulisan laporan ini. Kritik dan saran sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Malang, 25 Januari 2009



Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Polarisasi Cahaya	3
2.1.1 Polarisasi Linier.....	3
2.1.2 Polarisasi Lingkaran	4
2.1.3 Polarisasi Ellips.....	5
2.2 Interpretasi Polarisasi Cahaya dengan Vektor Jones.....	7
2.3 Ellipsometri	8
2.3.1 Prinsip Kerja Ellipsometer.....	8
2.3 Kelebihan Ellipsometri.....	13
2.4 Perhitungan Ellipsometri	13
2.5 Konstanta Optik.....	16
2.6 Ejek Jendela (Windows effect).....	18
2.6.1 Fused Silica (SiO ₂).....	18
2.6.2 Perhitungan Efek Jendela.....	19

BAB III METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian..... 23
3.2 Alat dan Bahan Penelitian 23
 3.2.1. Alat Penelitian 23
 3.2.2 Sumber Data 23
3.3 Alur Penyelesaian..... 23
 3.3.2 Perhitungan Konstanta Optik..... 24
 3.3.2 Perhitungan Koreksi Jendela 24

BAB IV PEMBAHASAN

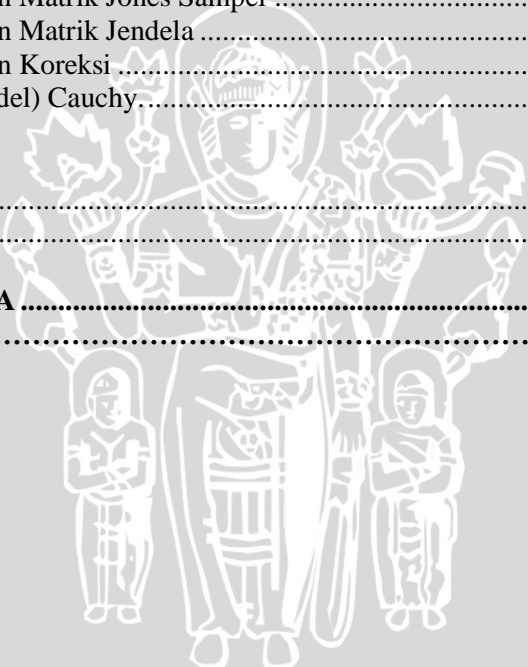
4.1 Perhitungan Konstanta Optik..... 29
4.2 Model Perhitungan Koreksi dengan Mencari Nilai Intensitas 34
 4.2.1 Penyusunan Matrik Jones Sampel 34
 4.2.2 Penyusunan Matrik Jendela 36
 4.2.3 Perhitungan Koreksi 40
4.3 Parameter (Model) Cauchy..... 45

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan..... 53
5.2 Saran..... 53

DAFTAR PUSTAKA 55

LAMPIRAN 57



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Polarisasi linier	3
Gambar 2.2 Proyeksi vektor medan listrik cahaya terpolarisasi linier.....	4
Gambar 2.3 Polarisasi lingkaran.....	4
Gambar 2.4 Proyeksi vektor medan listrik cahaya terpolarisasi lingkaran.	5
Gambar 2.5 Beda fase polarisasi lingkaran	
Gambar 2.6 Polarisasi ellip	6
Gambar 2.7 Proyeksi vektor medan listrik cahaya terpolarisasi ellips.	6
Gambar 2.8 Beda fase polarisasi ellips	6
Gambar 2.9 Skema perubahan polarisasi cahaya.....	9
oleh sampel lapisan tipis	9
Gambar 2.10 Peralatan ellipsometri pada sistem jendela.....	12
Gambar 2.11 Skema pengukuran sistem jendela	13
Gambar 2.12 Skema tiga medium lapisan tipis satu layer	15
Gambar 2.13 Grafik komponen real konstanta dielektrik	19
Gambar 3.1 Skema perhitungan konstanta optik bahan	24
Gambar 3.2 Skema penentuan konstanta optic sampel	24
Gambar 3.2 Skema transformasi balik Ψ dan Δ ke I.....	25
Gambar 3.3 Skema model matematis perhitungan efek jendela	25
Gambar 3.4 Diagram alir koreksi <i>efek jendela</i>	27
Gambar 4.1 Grafik Komponen imaginary konstanta dielektrik	29
Gambar 4.2 Fungsi dielektrik sistem tanpa jendela	30
Gambar 4.3 Grafik n dan k terhadap λ pada sudut 50°	31
Gambar 4.4 Grafik n dan k terhadap λ pada sudut 55°	31
Gambar 4.5 Grafik n dan k terhadap λ pada sudut 60°	32
Gambar 4.6 Grafik n dan k terhadap λ pada sistem tanpa jendela ...	32
Gambar 4.8 Alur skema penentuan koreksi efek jendela.....	41
Gambar 4.9 Intensitas pada sudut 50°	43
Gambar 4.10 Intensitas pada sudut 55°	43
Gambar 4.11 Intensitas pada sudut 60°	44
Gambar 4.12 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 50°	47
Gambar 4.13 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 55°	47

Gambar 4.14 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 60° 48

Gambar 4.15 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 50° 48

Gambar 4.16 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 55° 49

Gambar 4.17 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 60° 49

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Tabel nilai parameter Cauchy dan rmsnya 50

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Hasil Pengukuran Ellipsometri.....	57
Lampiran 2. Hasil Perhitungan Konstanta Dielektrik	59
Lampiran 3. Hasil Perhitungan Konstanta Optik	61
Lampiran 4. Data Hasil Permodelan Intensitas	63
Lampiran 5. Normalisasi Vektor Jones.....	65
Lampiran 6. Kronecker Product (Outer Product).....	66
Lampiran 7. Flowchat Program	68
Lampiran 8. Parameter Cauchy	77
Lampiran 9. Tabel Normalisasi Matrik Jones.....	78
Lampiran 10. Program Matlab.....	79



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengujian lapisan tipis (thin film) di dalam tabung vakum membutuhkan suatu koreksi dikarenakan pengaruh retardasi dinding tabung vakum yang dikenal dengan *efek jendela*. Koreksi ini dibutuhkan untuk meminimalkan *efek jendela* pada hasil pengukuran besaran lapisan tipis seperti sifat optiknya sehingga didapat hasil pengukuran yang akurat. Seluruh hasil interpretasi dari data ellipsometri untuk menentukan besaran lapisan tipis (contohnya ketebalan, konstanta optik dll.) yang digambarkan dalam suatu bentuk model matematis begitu pula jendelanya.

Penelitian sebelumnya menghasilkan model matematis jendela dengan menggunakan matrik Mueller yang mengoperasikan vektor Stokes untuk mengukur perubahan intensitas yang diakibatkan oleh jendela serta mengoreksinya. Koreksi yang dihasilkan oleh permodelan jendela tersebut hanya dapat digunakan pada rentang panjang gelombang 450-800 nm dengan sudut pengukuran 50° saja. Besaran yang telah dihitung berupa komponen real dari fungsi kompleks dielektrik sampel.

Penulis menindaklanjuti penelitian sebelumnya dengan menggunakan vektor dan matrik Jones sebagai model jendela dan sampel untuk mengoreksi *efek jendela*. Konstanta optik sampel dijabarkan dalam bentuk indek bias kompleks dengan melibatkan persamaan Cauchy untuk membatasi nilai indek refraksi (n) dan koefisien absorpsi (k) yang memiliki nilai pencilaan jauh.

1.2 Rumusan Masalah.

Rumusan masalah yang dapat ditemukan berdasarkan latar belakang di atas adalah

1. Bagaimana cara kerja dan analisis ellipsometri
2. Bagaimana menentukan model matematis yang tepat untuk mengoreksi data hasil eksperimen oleh pengaruh efek jendela.
3. Bagaimana model matematis efek jendela bekerja pada koreksi data hasil eksperimen pengukuran.

4. Bagaimana menentukan sifat optik lapisan tipis (thin film) dari data ellipsometri.

1.3 Tujuan

Tujuan pengerjaan skripsi ini antara lain :

1. Mempelajari pengaruh efek jendela terhadap data yang dihasilkan oleh pengukuran ellipsometri.
2. Menentukan model matematis untuk mengoreksi data ellipsometri dengan matrik Jones.
3. Menentukan konstanta optik suatu sampel isotropis (SiO_2).

1.4 Batasan Masalah

Ruang lingkup pembahasan pada skripsi ini terbatas pada masalah-masalah :

1. Jenis bahan jendela berupa Fused-silica (SiO_2)
2. Panjang gelombang cahaya yang digunakan berada range 250 – 800 nm
3. Bahan sample yang diujikan adalah lapisan tunggal SiO_2 yang bersifat isotropis.
4. Pengukuran dilakukan pada sudut (θ) 50° , 55° , 60° .
5. Pengukuran dilakukan tanpa mengikutsertakan efek depolarisasi dikarenakan mengoperasikan matrik Jones.

1.5 Manfaat

Permodelan efek jendela dengan matrik Jones dapat meminimalkan pengaruh jendela pada pengukuran ellipsometri dan mengidentifikasi sifat optik sampel. Model dan penyelesaian pada penelitian ini juga dapat digunakan sebagai bahan masukan pada pembuatan alat ellipsometer.

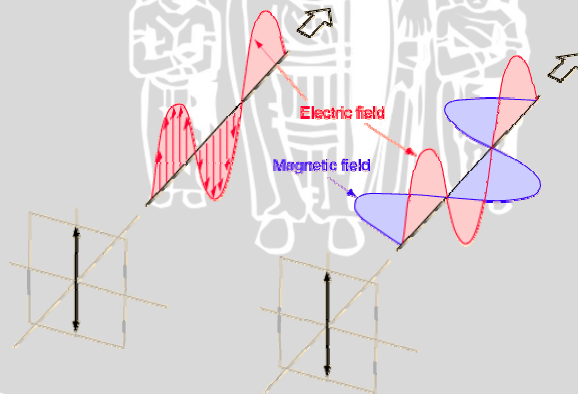
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polarisasi Cahaya

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetik yang terdiri dari medan magnet dan listrik yang saling tegak lurus satu sama lainnya dan keduanya juga saling tegak lurus arah rambatannya sehingga disebut juga gelombang transversal. Sifat cahaya dalam interaksinya dengan material diantaranya adalah polarisasi. Polarisasi adalah peristiwa pengkutuban arah komponen vektor medan listrik (E) cahaya dari arah vektor medan listrik semula. Jenis Polarisasi dibedakan dalam tiga jenis yaitu polarisasi linier, lingkaran dan polarisasi Ellips.

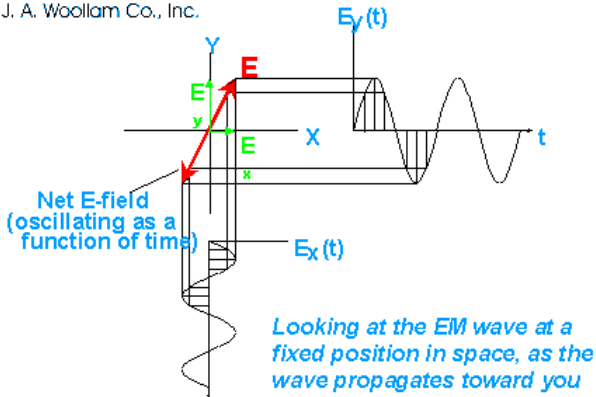
2.1.1 Polarisasi Linier

Polarisasi linier terjadi bila dalam polarisasinya memenuhi syarat, pertama besar kedua vektor medan listrik yang diproyeksikan pada sumbu- x (E_x) dan sumbu- y (E_y) sama dalam satu bidang yang tegak lurus dengan arah rambatannya. Kedua, tidak ada beda fase antara keduanya (E_x dan E_y) atau beda fasenya nol ($\Delta\phi = 0$). Hal tersebut menyebabkan getaran gelombang transversalnya parallel terhadap garis tertentu di udara (Tipler, 1996).



Gambar 2.1 Polarisasi linier
(www.Hperphysics-gsu.edu)

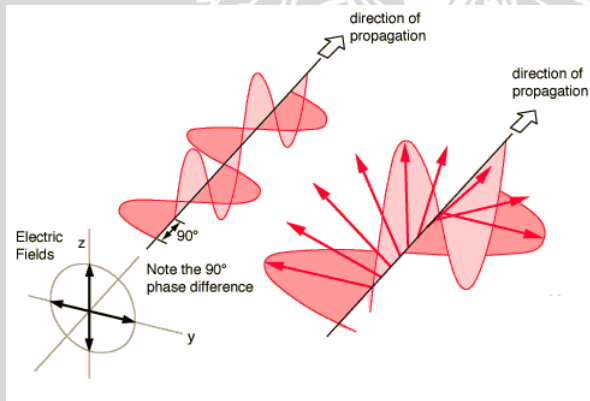
J. A. Woollam Co., Inc.



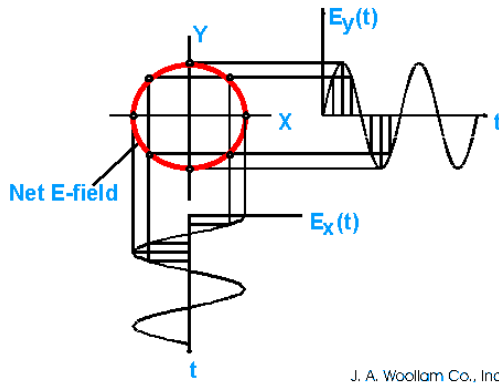
Gambar 2.2 Proyeksi vektor medan listrik cahaya terpolarisasi linier.

2.1.2 Polarisasi Lingkaran

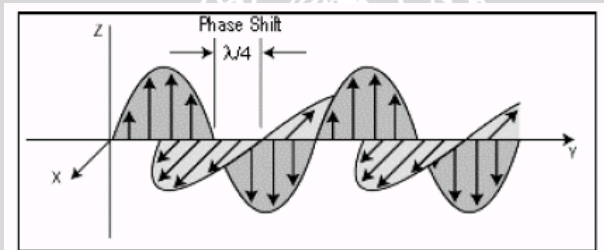
Polarisasi Lingkaran terjadi bila beda fase antara E_x dan E_y adalah 90° ($\Delta\phi = 90^\circ$) dengan besar E_x sama dengan E_y .



Gambar 2.3 Polarisasi lingkaran



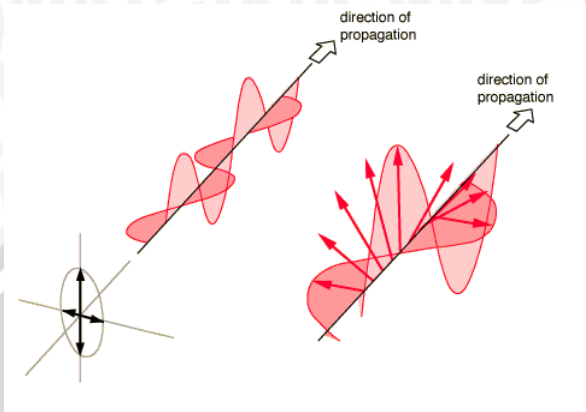
Gambar 2.4 Proyeksi vektor medan listrik cahaya terpolarisasi lingkaran.



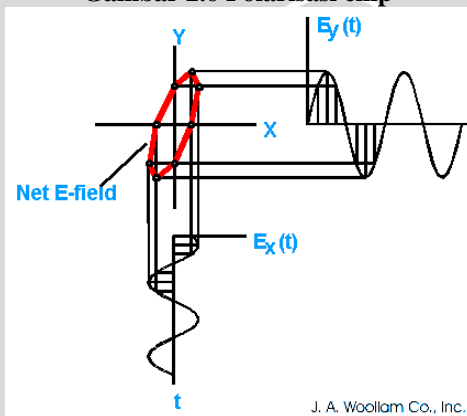
Gambar 2.5 Beda fase polarisasi lingkaran

2.1.3 Polarisasi Ellips.

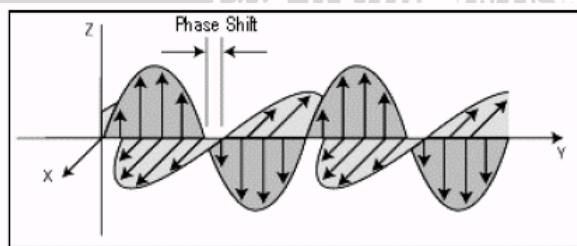
Polarisasi ellips terjadi bila besar E_x berbeda dengan E_y dengan beda fase tidak sama dengan nol dan 90° . Polarisasi linier ($E_x = E_y$) dan lingkaran (beda fase 90°) sebenarnya merupakan kasus khusus dari polarisasi ellips sehingga semua jenis polarisasi dapat digambarkan dalam bentuk polarisasi ellips.



Gambar 2.6 Polarisasi ellip



Gambar 2.7 Proyeksi vektor medan listrik cahaya terpolarisasi ellips.



Gambar 2.8 Beda fase polarisasi ellips

2.2 Interpretasi Polarisasi Cahaya dengan Vektor Jones

Jenis-jenis mode polarisasi di atas dapat di dideskripsikan dengan vektor Jones dalam bentuk matrik yang merupakan bentuk normalisasi vektor atau penyederhanaan dari persamaan teori elektromagnetik yaitu

$$\tilde{E} = \tilde{x}E_{0x}e^{i(kz-wt+\phi_x)} + \tilde{y}E_{0y}e^{i(kz-wt+\phi_y)} = (\tilde{x}E_{0x} + \tilde{y}E_{0y})e^{i(kz-wt+\phi)} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) dibentuk matrik (2x1), dikarenakan polarisasi hanya bergantung pada amplitude dan beda fase gelombang sehingga k dan ωt di abaikan sehingga didapat :

$$\tilde{E}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{E}_{0x} \\ \tilde{E}_{0y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}e^{i\phi_x} \\ E_{0y}e^{i\phi_y} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Jika dimisalkan $\phi_x = \phi_y = 0$ dan nilai amplitude $E_{0x} = E_{0y} = A$. Mode polarisasi linier dapat dideskripsikan sebagai berikut :

$$A \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad A \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad A \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix}$$

polarisasi horizontal *polarisasi vertical* *polarisasi dengan sudut α*

Polarisasi lingkaran dan ellips memiliki dua arah polarisasi yaitu searah jarum jam (*clockwise*) ditandai dengan bilangan kompleknya positif dan berlawanan arah jarum jam (*counterclockwise*) ditandai dengan bilangan kompleknya negative.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ \pm i \end{bmatrix} \quad \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \begin{bmatrix} A \\ B \pm iC \end{bmatrix}$$

Polarisasi lingkaran *Polarisasi ellips*

Pada polarisasi ellips

$$B + iC = be^{i\Delta} = b(\cos(\Delta) + i \sin(\Delta)) = b \cos(\Delta) + i.b \sin(\Delta) \quad (2.3)$$

Δ adalah beda fase (sumbu y dan x) dan B dan C adalah sumbu mayor dan minor vektor polarisasi ellips. faktor penyebut atau pembagi pada polarisasi merupakan konsekuensi dari syarat normalisasi yaitu :

$$|E_x|^2 + |E_y|^2 = 1 \quad (2.4)$$

(Pedrotti dan Leno, 1993)

2.3 Ellipsometri

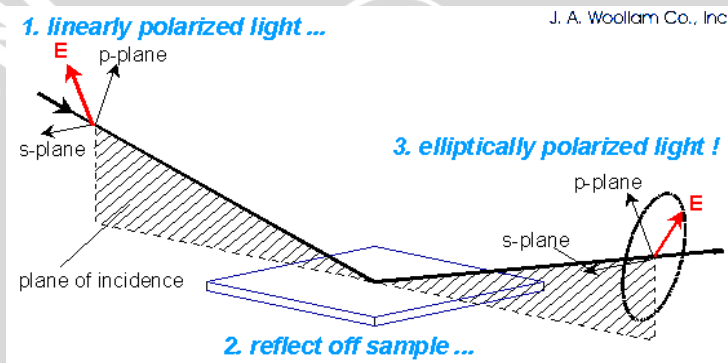
Ellipsometri adalah suatu teknik atau metode untuk mengukur sifat-sifat optik suatu material baik secara *in-situ* maupun *ex-situ* dengan menganalisis perubahan polarisasi sinar akibat respon material baik refleksi maupun transmisi. Intensitas sinar terpolarisasi tersebut dianalisa untuk mengetahui parameter optik bahan seperti indek bias, konstanta dielektrik, ketebalan dan lain-lainnya. Metode ini sangat sensitif sehingga banyak digunakan dalam berbagai bidang khususnya dalam teknologi lapisan tipis (*thin film*) seperti mengukur ketebalan dan konstanta optiknya sebagai bentuk kontrol dalam pembuatannya. Aplikasinya berkembang tidak hanya pada sifat optik material tetapi juga untuk mengetahui karakterisasi komposisi, kristalinitas, kekasaran suatu material dan sifat lainnya. Hal lain yang menjadi pemicu perkembangannya adalah semakin luasnya penerapan lapisan tipis (*thin film*) (ja.woolam, 2008).

2.3.1 Prinsip Kerja Ellipsometer.

Prinsip kerja ellipsometri adalah menganalisis perubahan polarisasi cahaya yang dipantulkan maupun ditransmisikan suatu material yang dianalisis namun pada umumnya yang diukur hanya polarisasi hasil pemantulannya saja. Peralatan yang dipergunakan disebut dengan *ellipsometer*.

Pada ellipsometri cahaya yang tak terpolarisasi dari sumber cahaya dipolarisasi linier oleh *polarizer*. Cahaya yang terpolarisasi linier tersebut memiliki dua komponen vektor medan listrik yaitu komponen yang tegak lurus bidang datang (*plane of incident*) disimbolkan *type-s* dan parallel *type-p*. Bidang datang (*plane of incident*) adalah bidang yang tegak lurus bidang batas dan melalui perambatan cahaya. Bidang ini menjadi acuan dalam penentuan semua sudut komponen ellipsometri. Cahaya dipolarisasi lingkaran setelah melewati kompensator dengan beda fase 90^0 . Alat ini bersifat optional jika tidak menggunakan kompensator cahaya polarisasi linier yang mengenai sampel akan terefleksi oleh sampel

menyebabkan perubahan fase dan amplitude komponen vektor medan listrik (type-p dan type-s) menjadi polarisasi elips (tanpa kompensator) dan polarisasi linier (kompensator). Perubahan tersebut merupakan respon material terhadap cahaya yang menunjukkan sifat-sifat optiknya. Perubahan tersebut juga berarti mengubah cahaya (datang) yang terpolarisasi lingkaran menjadi cahaya (pantul) yang terpolarisasi linier yang selanjutnya ditangkap *polarizer* kedua yang disebut dengan *analyzer* dan diteruskan ke detektor untuk menghitung perubahan fase (Δ) dan amplitudanya (Ψ). Kedua konstanta matematis tersebut (Δ dan Ψ) yang dianalisis untuk mengetahui berbagai parameter optik bahan uji seperti konstanta optik, ketebalan dan lain-lainya.



Gambar 2.9 Skema perubahan polarisasi cahaya oleh sampel lapisan tipis (JaWoolam.com)

Komponen-komponen utama Ellipsometer terdiri dari:

1. Sumber cahaya

Sumber cahaya yang digunakan dapat berupa laser He-Ne (632,8 nm), sinar infra merah maupun lampu halogen.

2. Polarizer

Polarizer berfungsi untuk mengkutubkan (mempolarisasi) cahaya datang (yang tidak tepolarisasi) dari sumber secara linier sehingga vektor Jones untuk keluarannya adalah sebagai berikut

$$E_{po} = A_c \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Inisial indeks dibawah menandakan input atau output suatu komponen, A_c adalah koefisien yang menyatakan intensitas.

3. Kompensator (Quarter Wave Plat)

Kompensator (quarter wave plat) berfungsi sebagai retarder untuk mempolarisasi cahaya dengan beda fase tertentu. Pada kompensator cahaya terpolarisasi linier dilambatkan fasenya sebesar 90° sehingga cahaya tersebut terpolarisasi lingkaran yang dinyatakan dengan matrik Jones :

$$M_c = K_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \rho_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

M_c adalah matrik kompensator, K_c adalah koefisien yang menyatakan besarnya atenuasi dan perubahan fase sepanjang sumbu perlambatan dan sumbu non perlambatannya (slow and fast axes), $\rho_c = T_c \cdot e^{-i\delta}$ dimana T_c adalah koefisien yang menyatakan besarnya atenuasi gelombang dan δ adalah besarnya perlambatan fase pada arah parallel terhadap sumbu perlambatannya (slow axes). Komponen ini bersifat optional dapat terpasang sebelum maupun sesudah sampel ataupun tidak terpasang sama sekali pada ellipsometer.

4. Sampel

Objek yang akan diukur sama dengan kompensator digambarkan dengan matrik Jones yang dijelaskan pada sub-bab selanjutnya

$$M_s = \begin{bmatrix} R_{pp} & R_{ps} \\ R_{ss} & R_{sp} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

5. Analyzer

Analizer merupakan polarizer kedua karena memiliki sifat yang sama dengan polarizer. Transformasi cahaya terpolarisasi linier dari sampel terhadap analizer sama dengan langkah sebelumnya dengan menggunakan matrik rotasi. Matrik analizer berupa :

$$M_a = K_a \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

K_a adalah koefisien yang menyatakan jumlah perubahan amplitude dan fase setelah melewati analyzer, angka satu menunjukkan sumbu transmisi analizer.

6. Detektor

Detektor berfungsi untuk mengonversi energi photon menjadi signal elektronik sehingga dapat diketahui polarisasi yang terefleksi oleh sampel dan kemudian dibandingkan dengan polarisasi input untuk mengetahui perubahan polarisasinya, yaitu rasio perubahan amplitude (Ψ) dan fasenya (Δ) (ja.woolam, 2008).

Penyusunan matrik Jones pada ellipsometri sederhana yang terdiri dari Polarizer, Sampel (isotropis), Analizer terdiri dari dua point :

1. Susunan matrik diurut dari matrik alat yang pertama kali menangkap cahaya diletakkan pada sisi paling kanan, begitu seterusnya alat yang ke dua menangkap cahaya berada pada sisi ke dari kanan dan seterusnya.
2. Pada setiap peralihan alat sebelum ditangkap alat selanjutnya atau ke dua cahaya diproyeksikan pada pada sumbu alat yang ke dua terlebih dahulu pada sumbu transmisi, perlambatannya maupun bidang datang. misalnya output polarizer merupakan input sampel harus diproyeksikan dengan sumbu sampel. Hal tersebut berlaku pada setiap (input-output) komponen ellipsometri. Langkah proyeksi dilakukan dengan mengalikan ouput polarizer (sebagai input sampel) dengan matrik rotasi begitu selanjutnya pada setiap komponen hingga analizer. Matrik rotasinya berupa :

$$M_r = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

α adalah sudut proyeksinya sehingga matrik Jones untuk susunan ellipsometri sederhana yang disebut sebelumnya di atas adalah

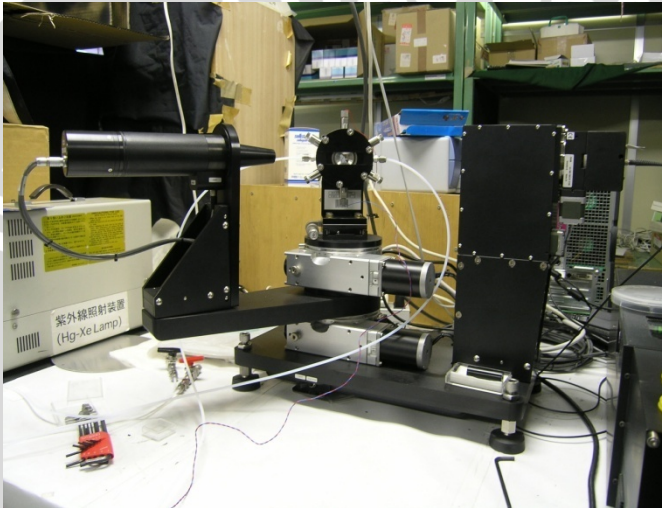
$$E_{out} = M_a \cdot M_{r(a)} \cdot M_s \cdot M_{r(s)} \cdot M_p \cdot E_{in} \quad (2.10)$$

Indek dibawah menyatakan alat dan r menyatakan matrik rotasi pada alat yang disebutkan dalam tanda kurung (Shurcliff, 1962)

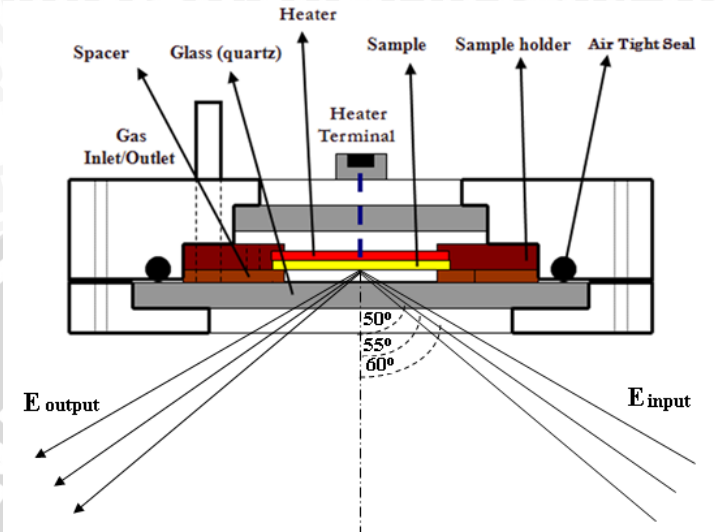
Susunan matrik diatas berubah sesuai dengan konfigurasi peralatan ellipsometri dengan menggeser matrik alat tersebut atau jika tidak ada cukup dihilangkan matriknya. Signal dari detektor

diolah oleh komputer dengan suatu teknik komputasi sehingga perhitungan dan interpretasi data dapat dilakukan lebih cepat.

Pada pengukuran secara *in-situ* (pengukuran pada saat proses pembuatan material) yang dilakukan pada ruang hampa melibatkan dinding tabung hampa pada pengukurannya yang dijelaskan pada sub-bab 2.6. Peralatan Ellipsometri pada sistem jendela ditunjukkan pada gambar 2.10. Skema sistem jendela secara detail ditunjukkan pada gambar 2.11 dengan sudut pengukuran 50° , 55° dan 60° .



**Gambar 2.10 Peralatan ellipsometri pada sistem jendela
(Djoko, 2003)**



Gambar 2.11 Skema pengukuran sistem jendela (Djoko, 2003)

2.3 Kelebihan Ellipsometri

Metode Ellipsometri memiliki beberapa keunggulan sebagai suatu teknik pengujian yaitu Non-destruktif tidak mengganggu sifat - sifat fisis permukaan sampel, Prosesnya cepat, Tidak sensitif terhadap fluktuasi intensitas cahaya, Memiliki banyak konfigurasi sistem, pengukurannya sangat akurat, dapat dioperasikan pada udara bebas (tidak harus pada kondisi khusus seperti ruang hampa) sehingga dari kelebihan tersebut dapat melakukan pengukuran secara langsung (*in situ*) pada saat pembuatan suatu material (thin film) maupun secara *ex-situ*.

2.4 Perhitungan Ellipsometri

Ellipsometri tidak dapat mengukur kuantitas yang diukur dari sampel (contohnya lapisan tipis) secara langsung karena pengukurannya hanya menghasilkan informasi perubahan polarisasi cahaya dalam bentuk beda fase (Δ) dan rasio amplitudanya (Ψ). Hal ini membutuhkan suatu perhitungan matematis untuk menentukan sifat optik sampel yang umumnya menggunakan persamaan Fresnel dalam bentuk :

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi \cdot \exp(i\Delta) \quad (2.11)$$

r_p dan r_s adalah koefisien pantul Fresnel yang arahnya parallel dan tegak lurus bidang datang.

Pengukuran dilakukan dengan rentang panjang gelombang (λ) dan sudut datang tertentu (Φ). Detektor dapat mengukur secara langsung konstanta matematis (Ψ dan Δ) ataupun mengukur r_p dan r_s berdasarkan besar perbandingan intensitas sinar datang dengan intensitas sinar pantul pada masing-masing koordinat (parallel dan tegak lurus bidang datang) yaitu

$$r_p = \left(\frac{I_r}{I_i} \right)_p \quad \text{dan} \quad r_s = \left(\frac{I_r}{I_i} \right)_s \quad (2.12)$$

I_r dan I_i adalah intensitas sinar yang terefleksi oleh sampel dan sinar datang. Indek p dan s adalah arah pengkutubannya.

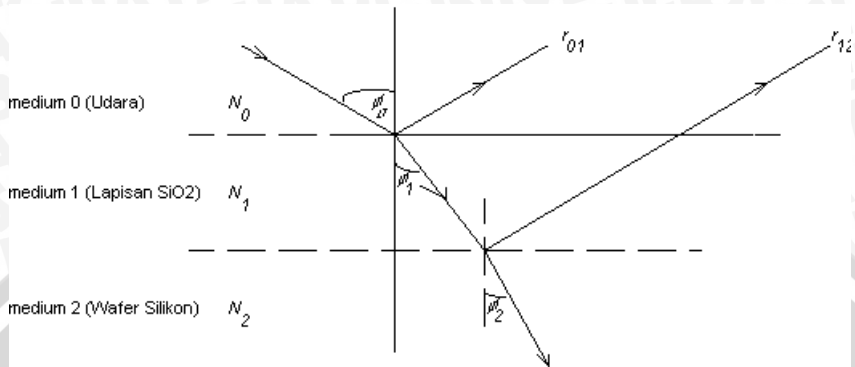
Pengukuran pada lapisan tipis (thin film) tunggal pada substrat memerlukan tiga koefisien pantul Fresnel yang mewakili medium udara, lapisan tipis dan substratnya seperti ditunjukkan gambar 2.12. Persamaan Fresnel untuk mendapatkan koefisien pantul total oleh ketiga komponen tersebut diberikan pada persamaan (2.13) dengan memasukkan nilai r_p dan r_s dari hasil pengukuran di atas.

$$R_{(p,s)} = \frac{r_{01(p,s)} + r_{12(p,s)} e^{-j2\beta_1}}{1 + r_{01(p,s)} \cdot r_{12(p,s)} e^{-j2\beta_1}} \quad (2.13)$$

Dimana j adalah bilangan imajiner ($j = \sqrt{-1}$), r_{01p} , r_{12p} , r_{01s} , dan r_{12s} masing-masing adalah koefisien pantul Fresnel dengan indek 0-1 untuk medium udara-film dan 1-2 film dan substrat dengan p dan s jenis pengkutubannya. β_1 adalah beda fase dikarenakan refleksi antara muka (interface) 0-1 dan 1-2 yang besarnya.

$$\beta_1 = 2\pi \left(\frac{d_1}{\lambda} \right) N_1 \cos \phi_1 \quad (2.14)$$

Dimana d_1 dan N_1 adalah ketebalan dan indek bias film.



Gambar 2.12 Skema tiga medium lapisan tipis satu layer

Dari persamaan (2.13) dapat dituliskan persamaan Fresnel setiap medium dan jenis pengkutubannya yaitu :

$$r_{01,p} = \frac{N_1 \cos \phi_0 - N_0 \cos \phi_1}{N_1 \cos \phi_0 + N_0 \cos \phi_1} \quad (2.15)$$

$$r_{12,p} = \frac{N_2 \cos \phi_1 - N_1 \cos \phi_2}{N_2 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_2} \quad (2.16)$$

$$r_{01,s} = \frac{N_0 \cos \phi_0 - N_1 \cos \phi_1}{N_0 \cos \phi_0 + N_1 \cos \phi_1} \quad (2.17)$$

$$r_{12,s} = \frac{N_1 \cos \phi_1 - N_2 \cos \phi_2}{N_1 \cos \phi_1 + N_2 \cos \phi_2} \quad (2.18)$$

(Hariyadi, 2008).

Persamaan (2.15)-(2.18) disesuaikan dengan struktur media yang diukur sehingga pada struktur dua atau lebih lapisan persamaan koefisien frenel mengalami penambahan. Keempat persamaan koefisien Fresnel tersebut dapat dirangkum dalam dua persamaan koefisien Fresnel total berdasarkan arahnya terhadap bidang datang menggunakan persamaan (2.13) menghasilkan :

$$r_p = \frac{r_{01p} + r_{12p} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{01p} \cdot r_{12p} \exp(-2i\beta)} ; r_s = \frac{r_{01s} + r_{12s} \exp(-2i\beta)}{1 + r_{01s} \cdot r_{12s} \exp(-2i\beta)} \quad (2.19)$$

Dengan $\beta = 2\pi n_1 \frac{d_1}{\lambda} \cos \phi_1$ dimana d_1 dan n_1 ketebalan dan indek bias film (medium ke 2). Penentuan sudut $\cos \phi_1$ dan $\cos \phi_2$ dilakukan menggunakan hukum snellius didapat :

$$\cos \phi_1 = \left[1 - \left(\frac{n_0 \sin \phi_0}{n_1} \right)^2 \right]^{0,5}; \cos \phi_2 = \left[1 - \left(\frac{n_0 \sin \phi_0}{n_2} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (2.20)$$

$$\tan \Psi = \frac{E_r^p}{E_r^s} = \frac{n_1 \cos \phi_0 - n_0 \cos \phi_1}{n_1 \cos \phi_0 + n_0 \cos \phi_1} = \frac{r_{0,1,p}}{r_{0,1,s}} \quad (2.21)$$

Maka didapat persamaan (2.11) :

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan \Psi \exp(i\Delta) \Rightarrow \tan \Psi = \frac{E_r^p}{E_r^s} \text{ dengan } \Delta = \phi_{y,p} - \phi_{x,s}$$

2.5 Konstanta Optik.

Konstanta optik suatu material memberikan gambaran interaksi cahaya terhadap material tersebut yang dirumuskan dengan persamaan :

$$\tilde{n} = n + ik \quad (2.22)$$

Dengan \tilde{n} adalah indek refraksi kompleks yang terdiri dari komponen real yaitu indek refraksi n dan komponen imajiner adalah koefisien absorpsi k . Indek bias adalah perbandingan kecepatan cahaya pada ruang vakum dan material yang menunjukkan perubahan kecepatan pada material yang berbeda dan dirumuskan.

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.23)$$

Dengan c dan v merupakan kecepatan cahaya pada ruang vakum dan di dalam material.

Koefisien absorpsi merupakan koefisien yang menyatakan penyerapan energi cahaya oleh suatu material sehingga amplitudanya semakin menurun dengan kedalaman yang dilalui cahaya yang dikenal dengan atenuasi atau pelemahan.

Komponen konstanta optik di atas dapat di ukur oleh ellipsometri dengan mengonversi parameter ellipsometri yaitu Ψ , Δ dan sudut datang ϕ . Penurunan dari berbagai persamaan Fresnel di atas menghasilkan konstanta dielektrik dan hubungannya dengan konstanta optik :

$$\langle \tilde{\varepsilon} \rangle = \sin^2(\phi) \left[1 + \tan^2(\phi) \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right) \right] \quad (2.24)$$

(Ja.Woolam, 2004)

Dengan $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, $\varepsilon_1 = n^2 - k^2$, $\varepsilon_2 = 2nk$

dan $\rho = \tan \Psi \exp(i\Delta)$ maka :

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 = n_0^2 \sin^2 \phi \left[1 + \frac{\tan^2 \phi (\cos^2 2\Psi - \sin^2 \Psi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \right] \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk = \frac{n_0^2 \sin^2 \phi \tan^2 \phi \sin 4\Psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \quad (2.26)$$

Dengan $n_0 = 1$ (udara) dan $\phi =$ sudut datang (Kaufmann, 2003)

Dengan memanipulasi persamaan (2.25) dan (2.26) didapat nilai n dan k yaitu

$$n = \sqrt{\frac{1}{2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)} + \varepsilon_1 \quad (2.27)$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{2}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2)} - \varepsilon_1 \quad (2.28)$$

(Bryansk, 2004).

Setiap material memiliki respon berbeda terhadap terhadap panjang gelombang yang berbeda sehingga konstanta optiknya berbeda pada setiap panjang gelombang. Perbedaan ini dikenal dengan peristiwa dispersi cahaya. Peristiwa dispersi menggambarkan pemecahan cahaya polikromatik menjadi monokromatik pada prisma akibat perbedaan indek refraksi setiap cahaya monokromatik pada material yang sama. Peristiwa dispersi bermanfaat untuk memberikan batasan terhadap nilai n dan k yang memiliki nilai pencilan yang jauh pada setiap panjang gelombang. Pengaruh

dispersi ini dinyatakan dalam bentuk parameter (dispersi) Cauchy yang menyatakan indek refraksi maupun absorpsi suatu material sebagai fungsi panjang gelombang yang dirumuskan :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.29)$$

$$k(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.30)$$

Dimana n , k dan λ adalah indek bias material, koefisien absorpsi dan panjang gelombang sedangkan parameter (Cauchy) A , B dan C merupakan konstanta.

2.6 Ejek Jendela (Windows effect).

Jendela (window) merupakan kebutuhan mutlak pada proses sintesis dan pengukuran lapisan tipis (thin film) secara *in-situ* karena membutuhkan ruang vakum. Pada ruang vakum proses deposisi lapisan tipis dapat berlangsung tanpa pengaruh unsur-unsur lain yang tidak dibutuhkan sehingga lebih mudah mengontrol dan menjamin kualitas hasilnya.

Jenis bahan jendela sangat berpengaruh terhadap data hasil pengukuran secara *in-situ* karena melibatkan besaran jendela terhadap nilai parameter ellipsometri sampel sehingga membutuhkan suatu koreksi terhadap hasil pengukuran ellipsometri. Bahan yang biasa digunakan sebagai jendela atau dinding ruang vakum adalah fused silica (SiO_2)

2.6.1 Fused Silica (SiO_2).

Fused silica adalah silikon dioksida (SiO_2) yang berbentuk nonkristaline atau glass karena range keteraturan strukturnya yang kecil. Walaupun berupa material glass ini memiliki ikatan struktur tiga dimensi (crosslink) antar atomnya yang membuatnya memiliki koefisien ekspansi thermal yang rendah sehingga cocok digunakan pada temperatur tinggi contohnya penumbuhan lapisan tipis dengan metode evaporasi.

Sifat – sifat fisis fused silika pada umumnya adalah

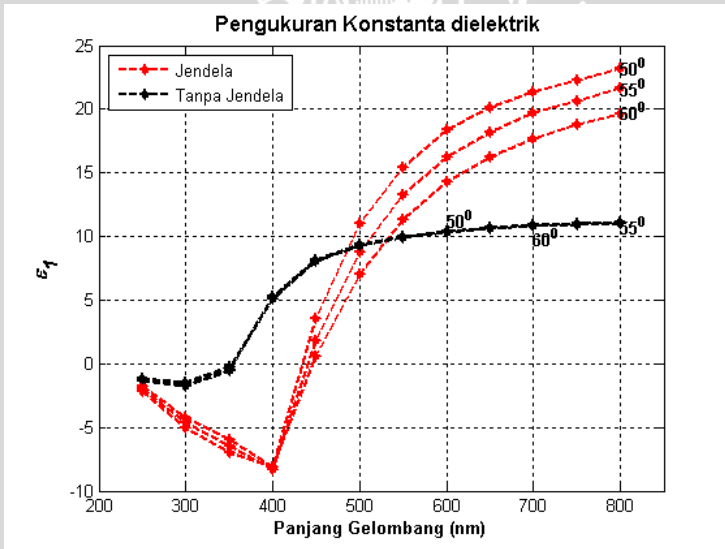
- 1) Koefisien thermal ekspansinya mendekati nol.
- 2) Inert terhadap bahan kimia.

- 3) Konstanta dielektrik yang rendah.
- 4) Transparansi UV dan IR yang baik.

Sifat-sifat tersebut membuatnya sangat cocok untuk digunakan sebagai bahan tabung vakum pada proses penumbuhan lapisan tipis baik dengan metode CVD maupun PVD, selain itu banyak juga digunakan pada selubung lampu bertemperatur tinggi, jendela radar aeronautik dan lain-lain (<http://accuratus.com/fused.html>, 2008).

2.6.2 Perhitungan Efek Jendela.

Pengaruh efek jendela pada pengukuran parameter ellipsometri pada sampel isotropik membutuhkan suatu koreksi dikarenakan adanya retardasi oleh jendela. Pengaruh retardasi jendela (*efek jendela*) pada pengukuran konstanta dielektrik sampel SiO_2 isotropis yang ditunjukkan ditunjukkan pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Grafik komponen real konstanta dielektrik (Dharmawan Wahyudi, 2006)

Pada gambar 2.13 grafik ketiga sudut pengukuran sistem tanpa jendela (garis hitam) berhimpit menunjukkan sampel bersifat isotropis. Pada sistem jendela grafiknya berubah terhadap sudut pengukuran menunjukkan adanya *efek jendela* yang sangat

berpengaruh pada sistem jendela. Suatu koreksi sangat dibutuhkan untuk meminimalkan *efek jendela* ini untuk mendapatkan nilai konstanta dielektrik yang sama dengan sistem tanpa jendela.

Koreksi dilakukan tidak pada nilai konstanta optik yang dihasilkan tetapi pada intensitas yang ditangkap detector untuk selanjutnya dikonversi dalam bentuk rasio amplitude (Ψ) dan beda fase (Δ). Keduanya kemudian diturunkan kembali untuk mendapatkan nilai konstanta optik yang sudah terkoreksi.

Interpretasi hasil pengukuran ellipsometri dilakukan dengan menghitung koefisien refleksi kompleks permukaan sampel. Koefisien kompleks refleksi Fresnel tersebut bila digambarkan dalam matrik Mueller-Jones yaitu

$$M_j = A.(J \otimes J^*).A^{-1} \quad (2.31)$$

M_j adalah matrik Mueller (berukuran 4 x 4), J dan J^* adalah matrik Jones dan konjugatnya (berukuran 2x2), persamaan (2.31) di atas menggambarkan hubungan matrik Mueller dan Jones yang digunakan untuk menghitung efek jendela dengan A merupakan matrik 4x4 yang diberikan :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Sedangkan A^{-1} adalah invers A . A merupakan matrik Mueller (berukuran 4 x 4), \otimes adalah operator kronecker (outer) product yang beroperasi pada matrik Jones terhadap konjugatnya.

Apabila sampel yang diuji diasumsikan bersifat isotropis maka matrik Mueller sampel adalah

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -N & 0 & 0 \\ -N & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & -S & C \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Pada sampel isotropis block off diagonal dari matrik sampel (m_{31} , m_{32} , m_{41} , m_{42} , m_{13} , m_{14} , m_{23}) kiri atas ke kanan bawah bernilai nol.

Dimana C, S dan N diberikan :

$$N = \cos(2\psi) \quad (2.34)$$

$$S = \sin(2\psi) \sin \Delta \quad (2.35)$$

$$C = \sin(2\psi) \cos \Delta \quad (2.36)$$

Perumusan pada sampel isotropis dengan matrik Jones seperti yang dinyatakan sebelumnya dirumuskan :

$$J = \begin{bmatrix} r_{pp} & r_{ps} \\ r_{sp} & r_{ss} \end{bmatrix} = r_{ss} \begin{bmatrix} \rho_{pp} & \rho_{ps} \\ \rho_{sp} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

r_{pp} dan r_{ss} merupakan koefisien refleksi kompleks untuk polarisasi yang sejajar dan tegak lurus bidang datang, sedangkan r_{ps} dan r_{sp} adalah koefisien kompleks refleksi untuk cross polarisasi. Besar masing-masing koefisien pada matrik Jones sampel memiliki hubungan dengan koefisien pada matrik Mueller yaitu

$$\rho_{pp} = \frac{r_{pp}}{r_{ss}} = \tan(\psi) \exp(i\Delta) = \frac{C + iS}{1 + N} \quad (2.38)$$

Hal yang sama seperti pada perumusan matrik Mueller untuk sampel isotropis pada matrik Jones sampel isotropik nilai koefisien refleksi Fresnel pada diagonal off yaitu r_{ps} dan r_{sp} adalah nol ($\rho_{ps} = \rho_{sp} = 0$).

Jendela (dinding tabung vakum) pada pengukuran ellipsometri diasumsikan sebagai sepasang plat yang tidak sempurna (*imperfection plate*) yang diselipkan pada kedua sisi sampel (sisi cahaya datang dan pantul) sehingga memberikan gangguan pada cahaya yang berinteraksi dengan sampel yang diukur. Keberadaan plat yang tidak sempurna (*imperfection plate*) ini digambarkan dengan matrik Mueller yaitu

$$\begin{bmatrix} 1 & -N & 0 & S_0 N \\ -N & 1 & S_1 S & -S_0 - S_1 C \\ 0 & S_0 S & C - WS & S + WC \\ -S_1 N & S_0 + S_0 C & -(S + WC) & C - WS \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Dimana $S_{0,1} = \sin(2\theta_{0,1})$ dan $W = \delta_0 \cos(2\theta_0) + \delta_1 \cos(2\theta_1)$ dan δ adalah faktor retardasi jendela dan θ adalah sudut pengukuran. Persamaan matrik (2.39) di atas adalah matrik gabungan sampel isotropis dengan jendela sehingga jika persamaan matrik (2.39) dikurangi matrik (2.33) didapat matrik jendela (*imperfection plat*) :

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & S_0 N \\ 0 & 0 & S_1 S & -S_0 - S_1 C \\ 0 & S_0 S & -WS & WC \\ -S_1 N & S_1 + S_0 N & -WC & -WS \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Sehingga pada permodelan jendela dari hasil pengukuran pada sistem jendela matrik sampel ditambahkan dengan matrik jendela (Gerald E, 1999).



BAB III METODOLOGI

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli sampai November 2008 yang bertempat di laboratorium Fisika Permodelan dan Simulasi Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya Malang.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1. Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan spesifikasi sebagai berikut :

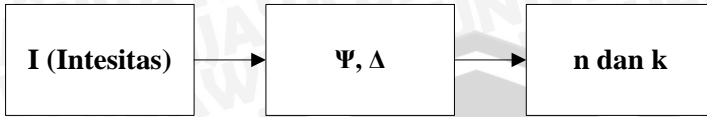
- a. Processor : AMD Athlon 64 3000+ 1,8 GHz
- b. Memory : 512 Mb PC 533 Maestro
- c. Hard Disk : 80 GB Maxtor
- d. Sistem Operasi : Windows XP SP 3
- e. Bahasa Pemrograman : MATLAB 7.1 SP 3

3.2.2 Sumber Data

Data yang digunakan pada permodelan ini menggunakan data hasil pengukuran lapisan tipis SiO_2 isotropis sebagai acuan dengan material jendela berupa fused-silica (SiO_2 , glass) hasil eksperimen Bapak Ir. D. J. Djoko H. S., M.Phil., Ph.D di Tokyo University. Hasil pengukuran tanpa jendela menghasilkan konstanta matematis (Ψ dan Δ) dan pengukuran dengan jendela menghasilkan (Ψ' dan Δ').

3.3 Alur Penyelesaian.

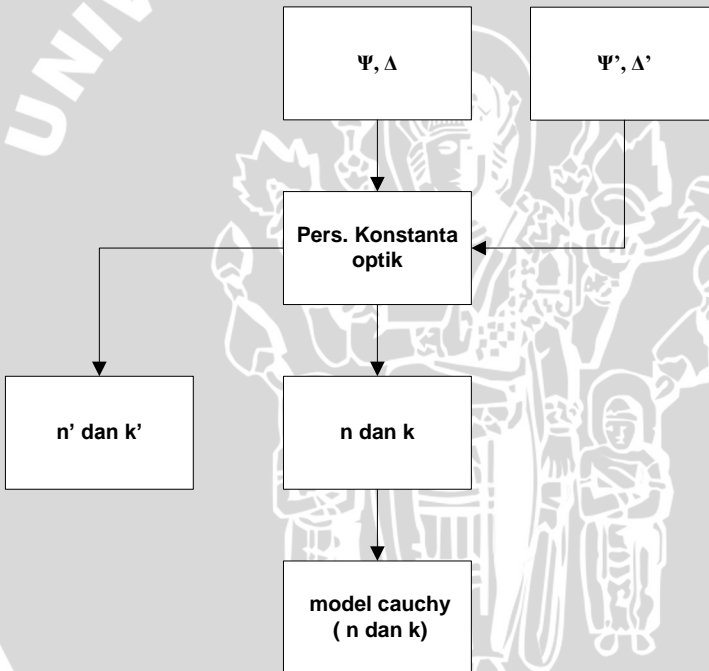
Pada pengukuran ellipsometry data yang diperoleh hanya berupa konstanta matematis (Ψ dan Δ) sehingga dibutuhkan suatu perhitungan matematis persamaan (2.24) - (2.27) untuk mendapat nilai konstanta optik (n dan k). Alur untuk memperoleh informasi tersebut digambarkan dalam skema di bawah ini :



Gambar 3.1 Skema perhitungan konstanta optik bahan

3.3.2 Perhitungan Konstanta Optik

Perhitungan konstanta optik (n dan k) dilakukan dengan memberikan nilai Ψ dan Δ sebagai input pada persamaan (2.24) - (2.27). seperti pada skema pada gambar di bawah ini yang selanjutnya dicari model parameter Cauchynya.

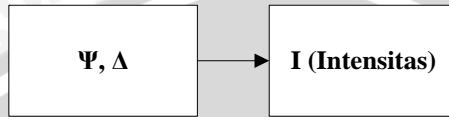


Gambar 3.2 Skema penentuan konstanta optic sampel

3.3.2 Perhitungan Koreksi Jendela

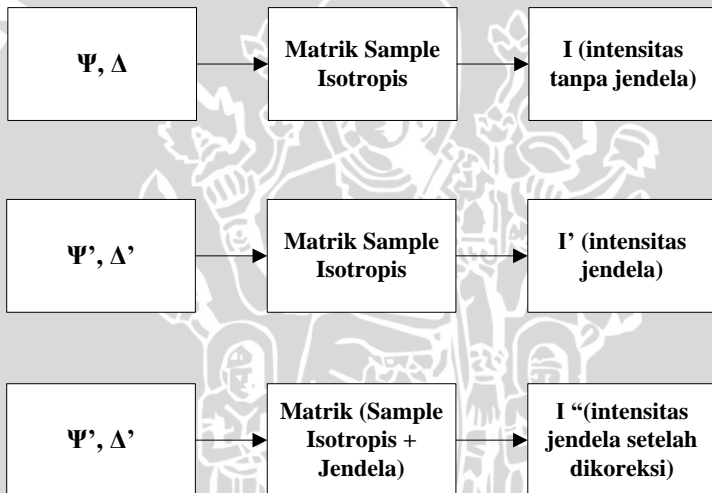
Pada pengukuran dengan sistem jendela dibutuhkan koreksi terhadap Ψ^e dan Δ^e (hasil pengukuran pada sistem jendela) dengan mengacu pada sistem tanpa jendela dengan mengkoreksi nilai

intensitasnya atau mentransformasi balik Ψ dan Δ ke I sebagai berikut :



Gambar 3.2 Skema transformasi balik Ψ dan Δ ke I

Langkah selanjutnya dengan menerapkan skema dari gambar 3.2 pada setiap data ellipsometry (Ψ dan Δ) baik jendela dan tanpa jendela dengan matrik sampel isotropis serta gabungan matrik sampel dan jendela untuk mengkoreksinya.



Keterangan :

- $\Psi \Delta$ = hasil pengukuran ellipsometry tanpa jendela
- $\Psi' \Delta'$ = hasil pengukuran ellipsometry dengan jendela
- Matrik sampel dan jendela dijabarkan dengan matrik Jones

Gambar 3.3 Skema model matematis perhitungan efek jendela

Pada skema di atas (gambar 3.3) I' dibandingkan dengan I sebagai pusat acuan untuk mencari koreksi yang diakibatkan oleh jendela dengan menyusun matrik jendela dengan matrik Jones. Perhitungan intensitas terkoreksi I'' pada matrik gabungan jendela

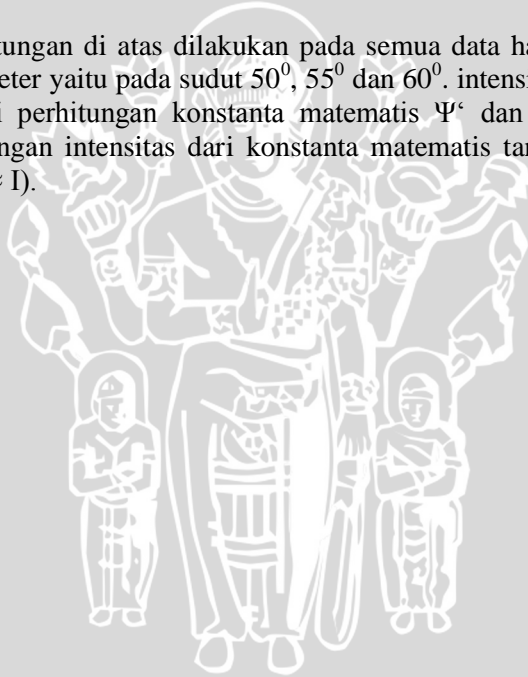
dan sampel dilakukan dengan mencari faktor retardasi untuk memperoleh nilai akar kuadrat kesalahan terkecil (root mean square error) yang dirumuskan dalam persamaan di bawah ini:

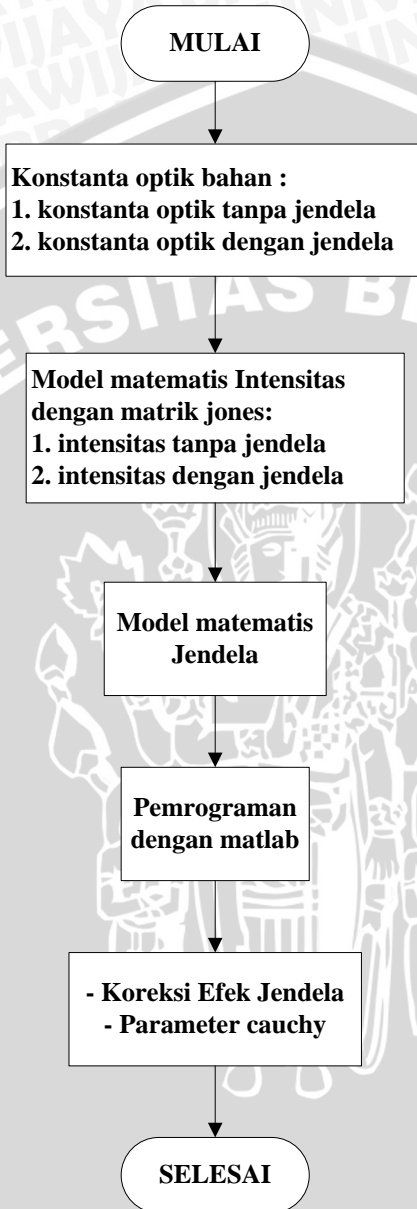
$$rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_{i,1} - x_{i,2}|^2}{n}}$$

(2.41)

Dimana : $x_{i,1}$ = nilai data ke-i pada data 1
 $x_{i,2}$ = nilai data ke-i pada data 2
 n = banyak data

Proses perhitungan di atas dilakukan pada semua data hasil pengukuran ellipsometer yaitu pada sudut 50^0 , 55^0 dan 60^0 . intensitas yang dihasilkan dari perhitungan konstanta matematis Ψ' dan Δ' diharapkan mirip dengan intensitas dari konstanta matematis tanpa jendela Ψ dan Δ ($I' \approx I$).





Gambar 3.4 Diagram alir koreksi efek jendela

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



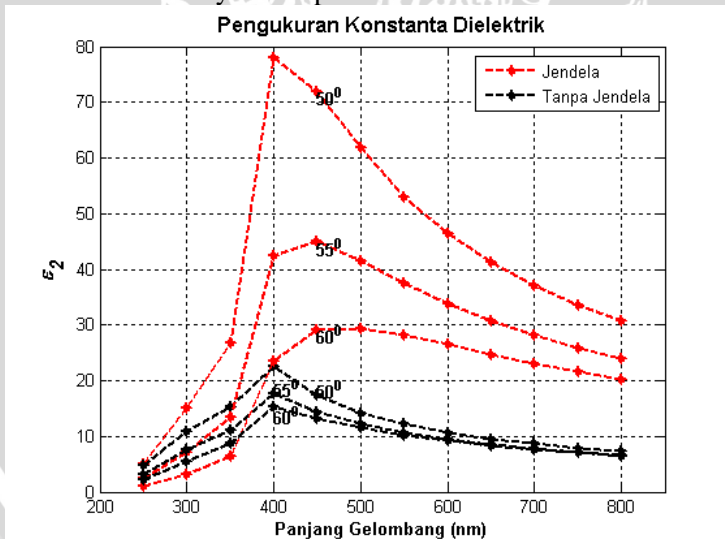
BAB IV PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Konstanta Optik

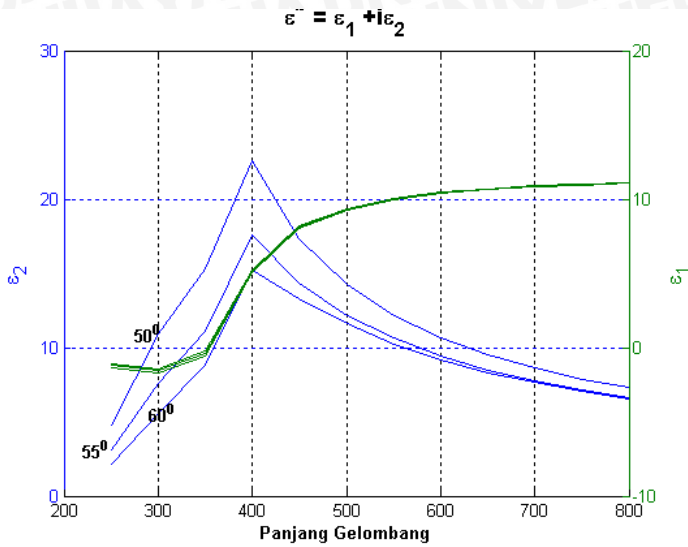
Konstanta optik material dapat diinterpretasikan dalam dua bentuk yaitu fungsi kompleks dielektrik dan indeks refraksi kompleks. Hubungan fungsi dielektrik dan indeks refraksi kompleks adalah fungsi dielektrik merupakan kuadrat dari indeks refraksi kompleks ($\tilde{\epsilon} = \tilde{n}^2$) Peneliti sebelumnya (Dharmawan Wahyudi) menggunakan fungsi kompleks dielektrik pada komponen realnya untuk mengidentifikasi konstanta optik sampel pada sistem jendela dan tanpa jendela yang hasilnya ditunjukkan pada gambar 2.12. Grafik hasil perhitungan komponen imaginary fungsi dielektrik ditunjukkan pada gambar 4.1. Persamaan fungsi dielektrik kompleks yaitu

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (4.1)$$

ϵ_1 menunjukkan hubungan antara D (*displacement*) dan Medan listrik external dan ϵ_2 menunjukkan beda fase antara D dan E yang diakibatkan oleh adanya absorpsi.



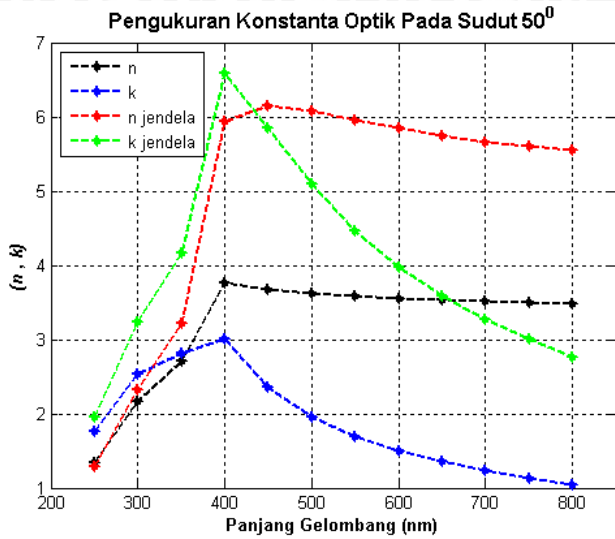
Gambar 4.1 Grafik Komponen imaginary konstanta dielektrik



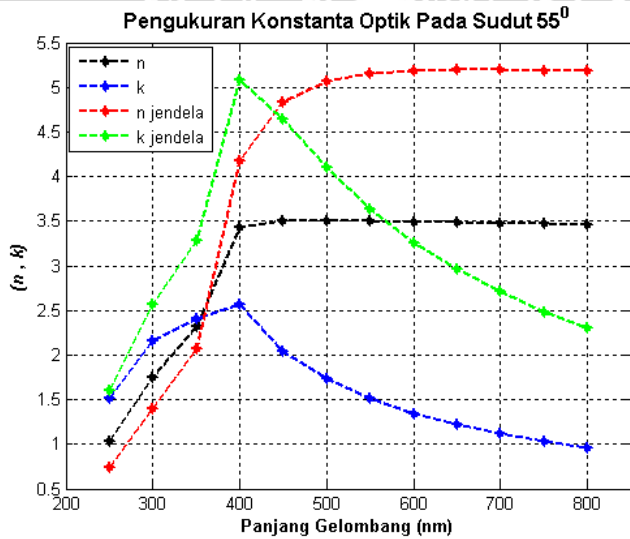
Gambar 4.2 fungsi dielektrik sistem tanpa jendela

Grafik hasil perhitungan konstanta dielektrik baik komponen real dan imaginary sampel menunjukkan hasil yang berbeda walaupun sudut pengukuran dan panjang gelombang yang sama. Hal ini diakibatkan gangguan (perturbation) atau berinteraksi dengan jendela sehingga hasilnya merupakan penjumlahan besaran (Ψ , Δ) sampel dan jendela. Suatu model koreksi dibutuhkan untuk menghilangkan efek jendela.

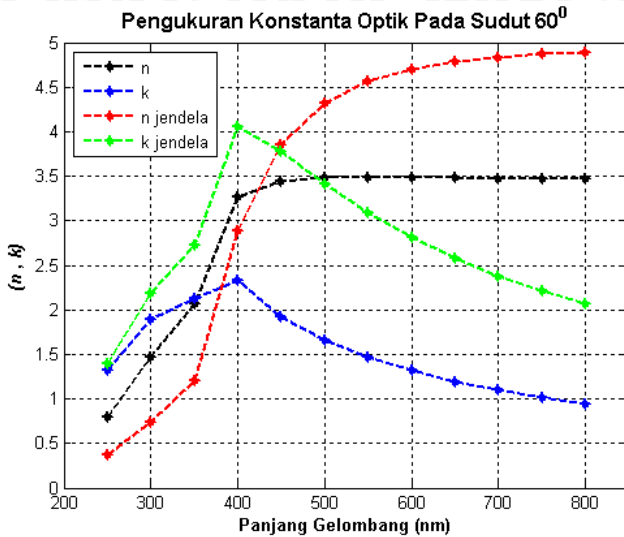
Komponen real (ϵ_1) konstanta dielektrik pada semua sudut pengukuran (gambar 4.2) menghasilkan nilai yang mirip dibuktikan dengan grafik yang saling berhimpit. Nilai ϵ_2 yang berbeda tidak memberikan pengaruh besar pada perbedaan nilai ϵ_1 . Hasil ini membuktikan bahwa sampel SiO_2 yang digunakan bersifat isotropis. Hasil perhitungan fungsi dielektrik di atas digunakan untuk menghitung indeks refraksi kompleks yang terdiri dari indeks bias (n) dan koefisien absorpsi (k) dengan menggunakan persamaan (2.26) dan (2.27). Hasilnya ditunjukkan grafik di bawah ini.



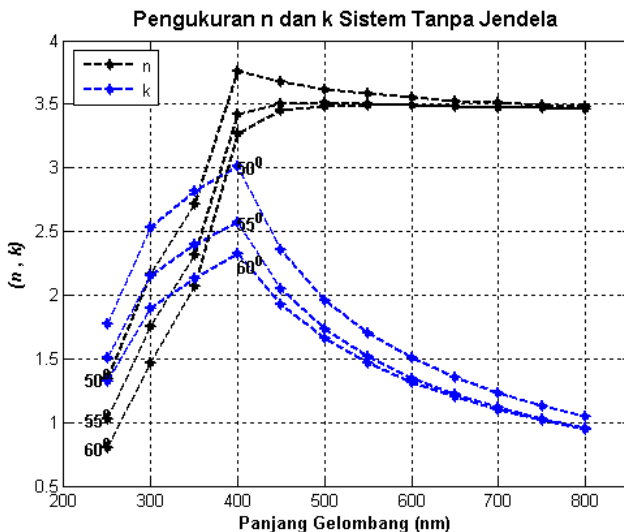
Gambar 4.3 Grafik n dan k terhadap λ pada sudut 50°



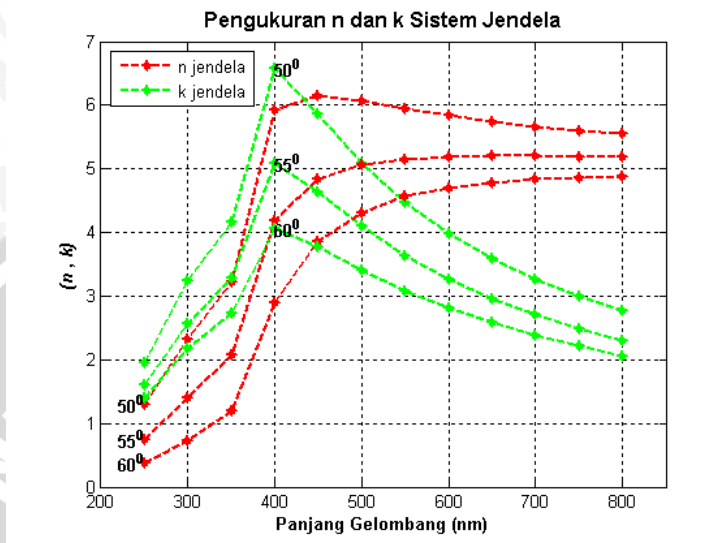
Gambar 4.4 Grafik n dan k terhadap λ pada sudut 55°



Gambar 4.5 Grafik n dan k terhadap λ pada sudut 60°



Gambar 4.6 Grafik n dan k terhadap λ pada sistem tanpa jendela



Gambar 4.7 Grafik n dan k terhadap λ pada sistem jendela

Seluruh grafik konstanta dielektrik maupun optik memiliki grafik dengan pola yang mirip. Pada perhitungan tanpa jendela gambar 4.6 dan 4.1 grafik k dan ϵ_2 (koefisien absorpsi) dari ketiga sudut pengukuran menurun secara eksponensial pada range panjang gelombang 400 – 800 nm begitu pula pada nilai k dan ϵ_2 pada sistem jendela. Nilai n (indek bias) dari ketiga sudut pengukuran menuju nilai 3,5 juga pada range 400 – 800 nm namun tidak demikian pada sistem jendela yang memberikan hasil berbeda. Hasil perhitungan n dan k pada sistem (ellipsometri) tanpa jendela dan dengan jendela sama dengan konstanta dielektrik yaitu memberikan hasil yang berbeda dikarenakan pengaruh jendela namun polanya hampir sama (gambar 4.6 dan 4.7).

Perhitungan pada sistem jendela menunjukkan perubahan nilai koefisien absorpsi (k) lebih besar dari pada indek bias menandakan pengaruh peristiwa yang absorpsi yang terjadi lebih besar dari pada perlambatan intensitas yang ditangkap detektor. Suatu model koreksi sangat dibutuhkan untuk meminimalkan pengaruh jendela ini agar pengukuran secara *in-situ* dapat dilakukan.

4.2 Model Perhitungan Koreksi dengan Mencari Nilai Intensitas

Koreksi pada efek jendela dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung intensitas tanpa dan dengan jendela pada sistem ellipsometri yang ditangkap detektor untuk mengukur parameter ellipsometri (Ψ dan Δ).

Langkah pertama menyusun matrik matrik Jones peralatan ellipsometri. Semua peralatan ellipsometri dirumuskan dengan matrik Jones berupa :

$$E_{out} = M \cdot E_{in} \quad (4.2)$$

Dimana E_{out} adalah matrik cahaya yang diterima detektor, M adalah matrik Jones ellipsometer (persamaan (2.10)) dan E_{in} adalah matrik cahaya input. Sehingga jika dikembangkan menjadi.

$$E_{out} = K_a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A \\ \sin A & \cos A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_{pp} & \rho_{ps} \\ \rho_{sp} & \rho_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot A_c \quad (4.3)$$

Dimana :

- A_c = koefisien yang berhubungan dengan intensitas
- K_a = koefisien analyzer
- A = sudut sumbu transmisi analyzer

Setelah dilakukan perhitungan didapat matrik Jones vektor (2x1) :

$$E_{out} = K_a \cdot A_c \begin{bmatrix} E_t \\ E_e \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Nilai intensitas pada matrik Jones didapat dengan mengalikan matriknya dengan konjugatonya sehingga nilai intensitas yang ditangkap detektor adalah

$$I = |K_a|^2 \cdot |A_c|^2 \cdot E_e \cdot E_e^* + E_t \cdot E_t^* \quad (4.5)$$

4.2.1 Penyusunan Matrik Jones Sampel

Sampel isotropis sebagai sumber acuan yang akan diukur pada penelitian dinyatakan dengan matrik Jones dan matrik Mueller-

Jones untuk dicari hubungannya. Matrik Jones sampel isotropis adalah

$$M_s = \begin{bmatrix} \rho_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \rho_{pp} = \frac{C+iS}{1+N} \quad (4.6)$$

Dimana sampel isotropis selalu ditandai dengan block off diagonalnya ($m_{12} = m_{21}$) adalah nol begitu pula pada matrik Mueller-Jones seperti pada persamaan (2.32) :

$$M_{mueller} = \begin{bmatrix} 1 & -N & 0 & 0 \\ -N & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & S \\ 0 & 0 & -S & C \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Dengan mentranformasikan matrik Jones ke matrik Mueller dengan persamaan hubungan matrik Mueller-Jones (persamaan 2.31) akan didapat matrik Mueller untuk sampel isotropis :

$$M_m = A J \otimes J^* \cdot A^{-1} \quad (2.31)$$

Didapat :

$$M_{jm} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+N} & \frac{-N}{1+N^2} & 0 & 0 \\ \frac{-N}{1+N^2} & \frac{1}{1+N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{C}{1+N} & \frac{S}{1+N} \\ 0 & 0 & \frac{-S}{1+N} & \frac{C}{1+N} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Dengan menyamakan dengan persamaan (2.32) didapat bahwa penyebut ($1+N$) diabaikan karena nilai N sangat kecil sehingga dianggap satu.

$$1+N \cong 1; \frac{1}{1+N} \cong 1 \quad ; N \cong 0 \quad (4.8)$$

Sehingga persamaan (4.7) sama dengan persamaan (2.32).

Langkah sebaliknya yaitu menurunkan matrik Jones sampel isotropis dari matrik Mueller dengan hubungan Matrik Mueller-Jones.

$$M = A \cdot J \otimes J^* \cdot A^{-1} \Rightarrow A^{-1} \cdot M \cdot A = A^{-1} \cdot A \cdot J \otimes J^* \cdot A^{-1} \cdot A$$

$$\Leftrightarrow J \otimes J^* = A^{-1} \cdot M \cdot A \quad (4.9)$$

$$= \begin{bmatrix} 1-N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C-iS & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C+iS & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+N \end{bmatrix}$$

Pada matrik Jones dilakukan hal yang sama mencari nilai $J \otimes J^*$

Dengan nilai matrik pada persamaan (4.7) didapat :

$$J \otimes J^* = \begin{bmatrix} \rho_{pp} \cdot \rho'_{pp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{pp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Samakan persamaan (4.9) dan (4.10) maka didapat :

$$\rho_{pp} \cdot \rho'_{pp} = \frac{C^2 + S^2}{1+N} \approx C^2 + S^2 = \sin^2 2\psi = 1 - \cos^2 2\psi$$

$$\Leftrightarrow 1 - N^2 = 1 - N \cdot 1 + N \quad (4.11)$$

$$\rho_{pp} = \frac{C + iS}{1+N} \approx C + iS$$

4.2.2 Penyusunan Matrik Jendela

Langkah selanjutnya adalah merumuskan matrik jendela dan sampel dalam matrik Jones dengan menggunakan hubungan matrik Mueller-Jones. Jika pada langkah di atas matrik Jones di turunkan menjadi matrik Mueller pada perumusan jendela ini sebaliknya yaitu merumuskan matrik Jones jendela dan sampel dengan diturunkan dari matrik Mueller yang digunakan pada penelitian sebelumnya.

Matrik Mueller gabungan sampel dan jendela seperti yang digunakan pada penelitian sebelumnya dinyatakan dalam persamaan (2.38)

$$M = \begin{bmatrix} 1 & N & 0 & S_0 N \\ -N & 1 & S_1 S & -S_0 - S_1 C \\ 0 & S_0 S & C - WS & S + WC \\ -S_1 N & S_1 + S_0 C & -S + WC & C - WS \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Pada persamaan (2.31) eliminasi matrik A dan invers (A) sehingga didapat $J \otimes J^*$



$$M_j = A J \otimes J^* \cdot A^{-1}$$

$$\Leftrightarrow A^{-1} M \cdot A = A^{-1} [A J \otimes J^* \cdot A^{-1}] A = J \otimes J^* =$$

$$\begin{bmatrix} 1-N & \frac{S_1 S - i S_0 N - S_0 - S_1 C}{2} & \frac{S_1 S + i S_0 N - S_0 - S_1 C}{2} & 0 \\ \frac{-i S_1 N + S_0 S - i S_1 + S_0 C}{2} & \frac{C - WS - i S + WC}{2} & \frac{-i S + WC + i C - WS}{2} & \frac{C - WS - i S + WC + i S + WC + i C - WS}{2} & \frac{-i S_1 N - S_0 S + i S_1 + S_0 C}{2} \\ \frac{i S_1 N + S_0 S - i S_1 + S_0 C}{2} & \frac{C - WS + i S + WC}{2} & \frac{-i (S + WC - i C - WS)}{2} & \frac{C - WS + i (S + WC) + i (S + WC - i C - WS)}{2} & \frac{i S_1 N - (S_0 S - i S_1 + S_0 C)}{2} \\ 0 & \frac{-S_1 S - i (S_0 N + S_0 + S_1 C)}{2} & \frac{-S_1 S + i (S_0 N + S_0 + S_1 C)}{2} & 1+N \end{bmatrix}$$

(4.12)

Pada penyelesaian matrik sampel isotropis tanpa jendela sebelumnya yaitu persamaan (4.8) - (4.10) karena nilai m_{11} dan m_{44} pada sampel isotropis dan gabungan jendela sampel sama sehingga nilai $m_{44} = 1$ sedangkan $m_{11} = 1 - N$. Hal ini berarti komponen diagonal block on / kiri atas ke kanan bawah ρ_{pp} dan ρ_{ss} pada matrik gabungan jendela sampel adalah matrik sampel sendiri sehingga dapat disimpulkan matrik jendela sebagai plat tidak sempurna (imperfection plat) adalah diagonal block off-nya ρ_{ps} dan ρ_{sp} .

Dengan melakukan hal yang sama mencari $J \otimes J^*$ pada matrik Jones

$$J \otimes J^* = \begin{bmatrix} \rho_{pp} & \rho_{ps} \\ \rho_{sp} & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \rho'_{pp} & \rho'_{ps} \\ \rho'_{sp} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{pp} \cdot \rho'_{pp} & \rho_{pp} \cdot \rho'_{ps} & \rho_{ps} \cdot \rho'_{pp} & \rho_{ps} \cdot \rho'_{ps} \\ \rho_{pp} \cdot \rho'_{sp} & \rho_{pp} \cdot \rho'_{ps} & \rho_{ps} \cdot \rho'_{sp} & \rho_{ps} \cdot \rho'_{ps} \\ \rho_{sp} \cdot \rho'_{pp} & \rho_{sp} \cdot \rho'_{ps} & \rho'_{pp} & \rho'_{ps} \\ \rho_{sp} \cdot \rho'_{sp} & \rho_{sp} \cdot \rho'_{ps} & \rho'_{sp} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Persamaan (4.13) disamakan dengan persamaan (4.12) dengan membandingkan pula persamaan (4.9) dan (4.10) maka akan di dapat komponen matrik Jones untuk jendela dan sampel yang akan mengoreksi efek jendela:

$$\begin{aligned} \rho_{pp} &= \frac{C + iS}{1 + N} \\ \rho_{ss} &= 1 \\ \rho_{ps} &= \frac{-i \cdot S_1 N - S_0 S + i S_1 + S_0 C}{2} \\ \rho_{sp} &= \frac{-S_1 S - i S_0 N + S_0 + S_1 C}{2} \end{aligned} \quad (4.14)$$

Sehingga matrik sampel pada sistem jendela adalah jumlah matrik sampel dan jendela sebagai plat tidak sempurna (imperfection plate) untuk mengoreksi efek jendela.

$$\begin{aligned} \text{Matrik jendela+sampel} &= \text{Matrik sample} + \text{Matrik Jendela} \\ \begin{bmatrix} \rho_{pp} & \rho_{ps} \\ \rho_{sp} & 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \rho_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \rho_{ps} \\ \rho_{sp} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Pada sistem jendela matrik sampel isotropis berbentuk seperti matrik anisotropis dimana block-off diagonalnya tidak lagi nol sehingga

dapat diperkirakan besarnya (faktor retardasi, konstanta optik dan lain-lain.) akan berubah terhadap perubahan arah.

4.2.3 Perhitungan Koreksi

Matrik jendela yang telah dirumuskan persamaan (4.15) digunakan untuk mengoreksi efek jendela dengan skema model seperti gambar 3.3 (Metodologi) dengan faktor retardasinya di abaikan terlebih dahulu. Semua peralatan ellispometri diasumsikan bekerja ideal (sempurna) tidak terdapat atenuasi amplitude gelombang dan beda fase pada polarizer dan analyzer.

Konstanta Matematis Ψ , Δ dan Ψ' , Δ' sebagai input matrik ellipsometri dengan sampel isotropis persamaan (4.4) menjadi

$$E_{out} = K_a \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A \\ \sin A & \cos A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \rho_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos P & \sin P \\ -\sin P & \cos P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot A_c \quad (4.16)$$

Pada sistem jendela matrik sampel pada persamaan (4.16) diganti dengan matrik jendela dan sampel yaitu matrik pada persamaan (4.15)

Matrik $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ adalah output polarizer dengan mengasumsikan sumbu transmisinya vertical (bersudut 0° dari bidang datang) sedangkan A_c adalah koefisien intensitas yang dirumuskan :

$$A_c = E_x \left(1 + \frac{E_x^* \cdot E_x}{E_y^* \cdot E_y} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.17)$$

(Azzam dan Bashara, 1977)

Dimana E_x, E_y adalah komponen matrik Jones dari hasil normalisasi matrik Jones. E_x^*, E_y^* adalah konjugate E_x, E_y Sehingga dihasilkan :

$$E_x = \cos \psi \cdot \exp^{-i\Delta/2} \quad (4.18)$$

$$E_y = \sin \psi \cdot \exp i\Delta/2$$

Persamaan (4.18) disubstitusikan pada persamaan (4.17) dan selanjutnya didapat hasil perkalian matrik pada sistem tanpa jendela yaitu :

$$E_t = \cos A \cdot \rho \cdot \cos P + \sin A \cdot \sin P \quad (4.19)$$

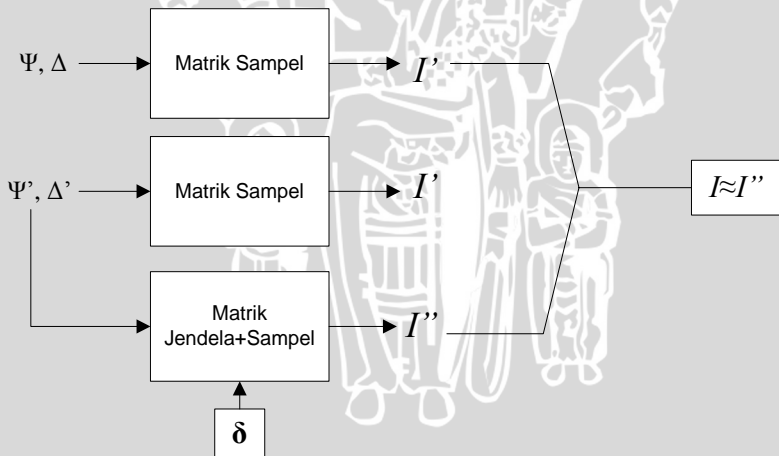
Sedangkan pada sistem jendela

$$E_{t-j} = \cos A \cdot \rho_{pp} \cdot \cos P - \rho_{ps} \cdot \sin P - \sin A \cdot \rho_{sp} \cdot \cos P - \sin P \quad (4.20)$$

pada persamaan (4.16) ataupun (4.3) didapat intensitas pada sistem tanpa jendela dan jendela adalah

$$I = |A_c|^2 \cdot |K_a|^2 E_t \cdot E_t^* \quad (4.21)$$

pada sistem jendela E_t diganti $E_{t,j}$. Alur penentuan koreksi efek jendela digambarkan skema di bawah ini.



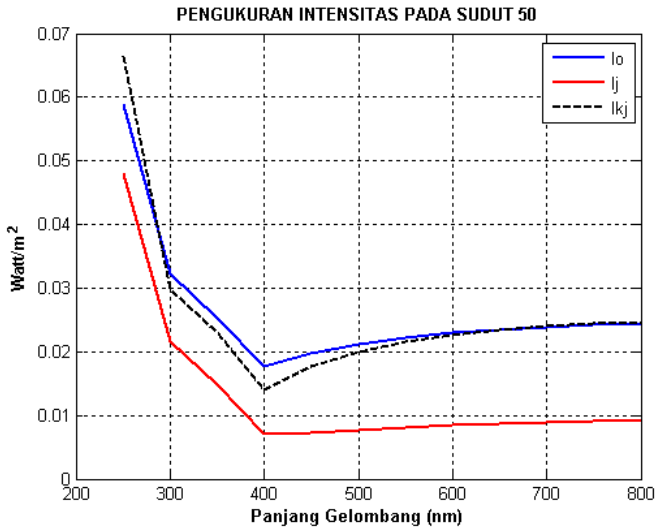
Gambar 4.8 Alur skema penentuan koreksi efek jendela

Faktor retardasi dan matrik jendela diharapkan menghasilkan $I'' \approx I$.

Pada penelitian sebelumnya (Dharmawan Wahyudi) menggunakan matrik Mueller dan vektor Stokes untuk memodelkan jendela. Faktor retardasi jendela diabaikan dalam perhitungan koreksi efek jendela sehingga matrik jendela tidak berfungsi untuk mengoreksi efek jendela melainkan sebagai range yang membatasi semua grafik intensitas baik tanpa jendela, jendela dan koreksinya. Koreksi yang dihasilkan peneliti sebelumnya hanya dapat mengoreksi pada sudut pengukuran 50^0 saja dengan range panjang gelombang 400-800 nm. Penulis berusaha melanjutkan penelitian sebelumnya dengan memperhitungkan faktor retardasi jendela (δ) dengan menggunakan matrik Jones yang diharapkan menghasilkan hasil yang lebih baik lagi.

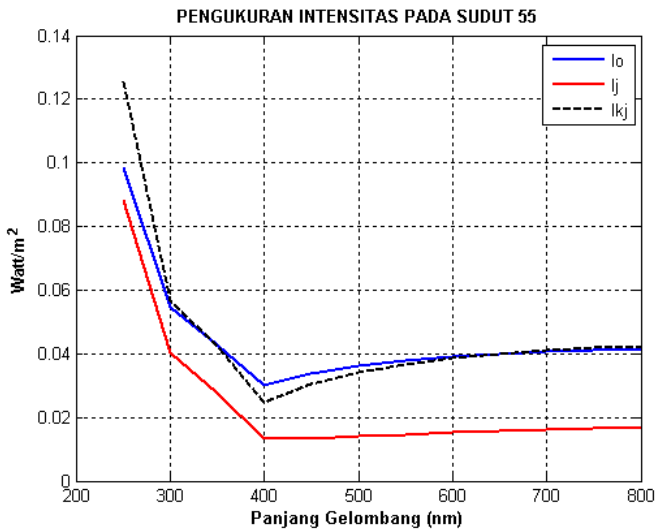
Langkah koreksi dilakukan dengan sudut yang digunakan terbatas $P = 45^0$, $A = 45^0$ sudut ini dipilih dikarenakan pada sudut ini trend ketiga grafik mirip sehingga dapat dikoreksi untuk mendapatkan nilai rmse (root mean square error) terkecil antara data pengukuran tanpa jendela dengan data hasil koreksi efek jendela.

Langkah selanjutnya dengan mengiterasikan nilai dari 0 sampai 1 (dengan spasi 4 digit dari dibelakang koma) sebagai nilai δ untuk mendapatkan akar kuadrat kesalahan terkecil (root mean square) antara I_0 dan I_{kj} sehingga didapat grafik I_{kj} yang mendekati grafik I_0 .



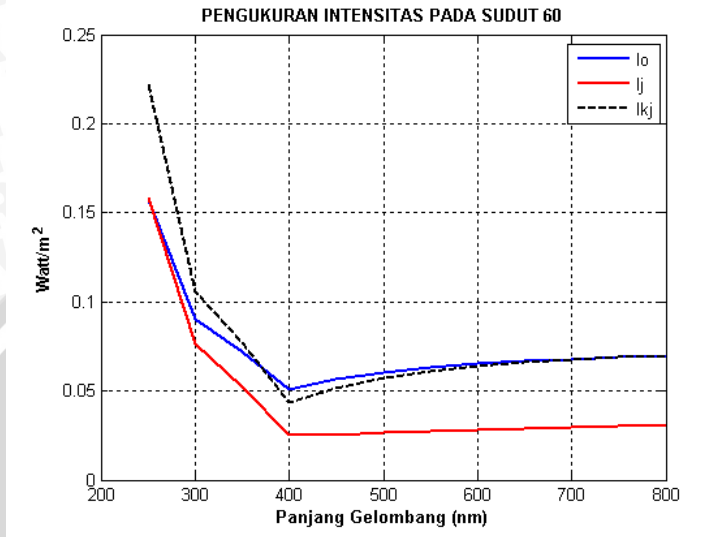
$\delta = 0.824$; $rmse = 0.0059838$

Gambar 4.9 Intensitas pada sudut 50°



$\delta = 0.77$; $rmse = 0.012491$

Gambar 4.10 Intensitas pada sudut 55°



$$\delta = 0.687 ; \text{rmse} = 0.030239$$

Gambar 4.11 Intensitas pada sudut 60°

Pada gambar 4.9 – 4.11 ketiga grafik intensitas memiliki trend menurun dengan naiknya panjang gelombang karena dengan semakin besarnya panjang gelombang energinya semakin kecil sehingga semakin kecil pula besar intensitasnya. Pada ketiga grafik di atas grafik I_j pada sistem jendela berada di bawah grafik I_0 tanpa jendela dikarenakan adanya pengaruh retardasi jendela baik diserap maupun dipantulkan sehingga intensitas yang ditangkap detektor lebih kecil. Selisih antara grafik I_0 dan I_j pada panjang gelombang 250 – 400 nm semakin besar dan sedikit naik pada λ 400-800 nm. Hal ini diakibatkan semakin kecil panjang gelombang energinya semakin besar sehingga dapat melewati jendela dengan pengaruh retardasi jendela yang minimum bahkan pada sudut 60° pada panjang gelombang 250 nm adanya jendela tidak berpengaruh pada intensitas yang ditangkap detektor. Pada λ 400-800 nm grafik intensitas sedikit naik dikarenakan menurunnya absorpsi seperti yang ditunjukkan pada grafik hasil perhitungan indek refraksi kompleks (gambar 4.6-4.7).

Hasil permodelan dari ketiga sudut di atas menunjukkan bahwa koreksi efek jendela dengan matrik Jones dapat digunakan

pada range 300-800 nm dengan faktor retardasi dan akar kuadrat kesalahan terkecil (rmse) berbeda-beda. Hal ini dapat dikarenakan pada model matrik jendela dan sampel menunjukkan sampel dimodelkan bersifat anisotropis (block off diagonalnya tidak nol) sehingga berkelakuan seperti bahan anisotropis. Kesalahan (simpangan) terbesar pada sudut pengukuran 50^0 dan 55^0 dengan panjang gelombang 400 nm yang dikarenakan besarnya absorpsi mencapai puncak (grafik) yang tinggi namun tidak demikian pada sudut 60^0 karena nilai puncak k tidak sebesar kedua sudut sebelumnya. Nilai optimum diberikan pada rentang panjang gelombang 600 – 800 nm pada ketiga sudut pengukuran dengan simpangan antara grafik koreksi (I_{kj}) dengan I_0 minimum dan bahkan hampir berhimpit.

4.3 Parameter (Model) Cauchy.

Model Cauchy berfungsi untuk memberikan batasan pada pencilan nilai konstanta optik yang jauh pada rentang panjang gelombang tertentu karena mempengaruhi nilai konstanta optik terhadap panjang gelombangnya. Pada model ini dicari nilai parameter A, B, C sedemikian sehingga konstanta optik (n dan k) merupakan fungsi panjang gelombang pada suatu rentang tertentu yang dirumuskan pada persamaan (2.29) dan (2.30)

$$n \lambda = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.29)$$

$$k \lambda = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.30)$$

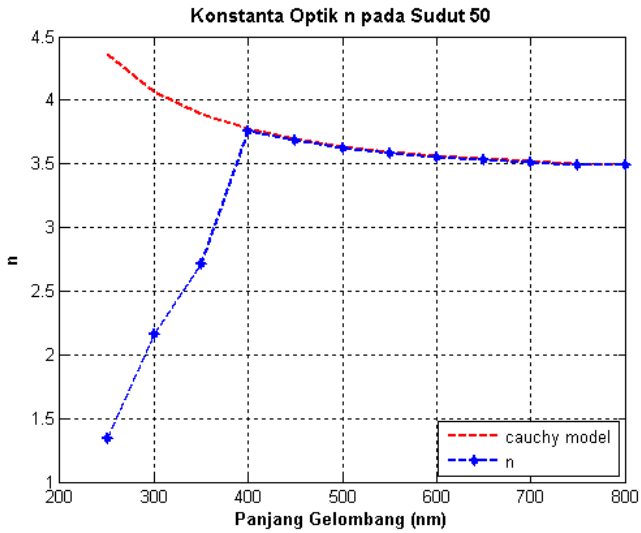
Model dibuat dengan mengacu data hasil perhitungan konstanta optik (n dan k) dengan persamaan (2.25) - (2.28) yang ditunjukkan grafik pada gambar 4.3 - 4.5.

Pada grafik tersebut terlihat bahwa model parameter Cauchy (persamaan mengikuti trend pada range panjang gelombang 400 – 800 nm hal dapat dimengerti dikarenakan pada persamaan (2.29) dan (2.30) n dan k berbanding terbalik dengan λ sehingga seiring naiknya λ nilai n dan k dapat diprediksikan menurun atau konstan. Pada semua data yang ditampilkan grafik yang memenuhi hal tersebut berada pada range 400 – 800nm sehingga penentuan nilai parameter Cauchy dipotong dengan mengacu pada λ antara 400 – 800 nm untuk

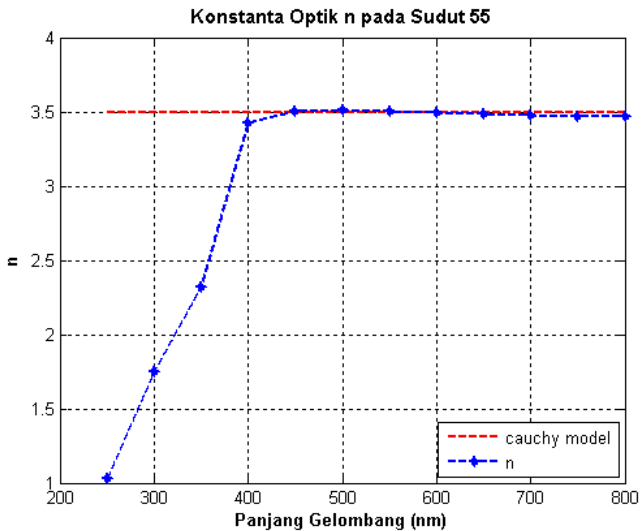
mendapatkan r-mse minimum. Nilai n dan k dipotong pada range 400-800 nm dengan mengabaikan nilai indek refraksi n dan koefisien absorpsi k dibawah 400 nm.

Hasil parameter model Cauchy didapat dengan mencari nilai konstanta A , B dan C sehingga didapat nilai akar kuadrat kesalahan terkecil (root mean square) minimum dengan nilai indek refraksi n dan koefisine absorpsi k hasil perhitungan. Panjang gelombang yang berada pada orde nanometer (10^{-9} m) sebagai penyebutnya menyebabkan nilai n dan k sangat besar jika konstanta B dan C bernilai 1 atau lebih sehingga dapat dipastikan nilai keduanya di bawah 1. Tahap pertama dengan mengiterasikan pangkat -1 sampai 10 untuk A dan -1 sampai -30 pada B dan C sampai -37 dikarenakan pangkat penyebut B dan C mencapai -18 dan -36 sehingga didapat kombinasi pangkat minus A , B dan C dengan rmse terkecil. Setelah didapat nilai pangkat minus untuk A , B dan C (dengan nilai A , B dan C sementara 1). Penentuan nilai B dan C dilakukan dengan mengiterasikan nilai 0 sampai 10 dengan selisih 0,01 sehingga terdapat 10^j kombinasi A , B dan C dan dicari kombinasi dengan rmse yang terkecil. J adalah jumlah digit A , B dan C . Khusus A batas iterasinya adalah sampi pada nilai indek refraksi n dan koefisien absorpsi k terbesarnya. A berpengaruh pada tinggi rendahnya grafik sedangkan B dan C berpengaruh besar pada trend grafik sehingga diusahakan plot grafik model Cauchy (A , B dan C) berhimpit dengan nilai n dan k pada range 400 – 800nm.

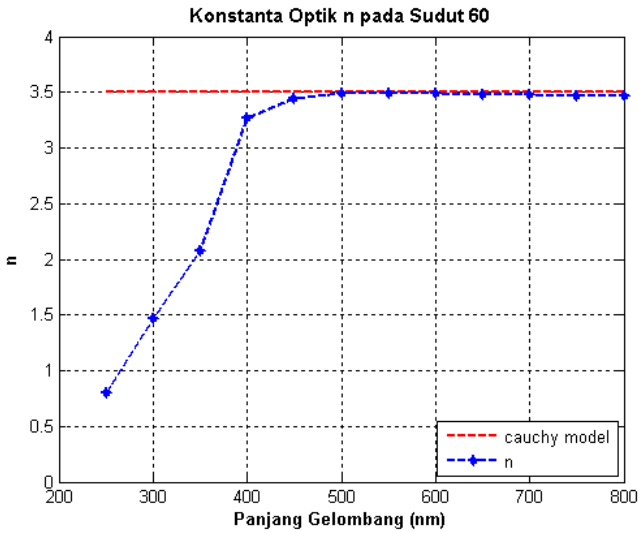
Metode ini memiliki kelemahan yaitu eksekusi program yang sangat lama bahkan terkadang computer hang atau error. Sehingga selisihnya diperkecil hanya 0,1 pada A , B dan C . Selisih 0,1 ini menghasilkan nilai yang baik pada koefisien absorpsi k seperti ditunjukkan pada gambar 4.14-4.17. Pengecualian pada model Cauchy indek refraksi n untuk selisih 0,1 grafiknya kurang berhimpit (*match*) sehingga selisihnya diperkecil 0,01 namun dengan batas range terlebih dahulu hanya pada 1 untuk menghindari waktu eksekusi dan computer hang. Pada range ini didapat grafik yang baik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12-4.14



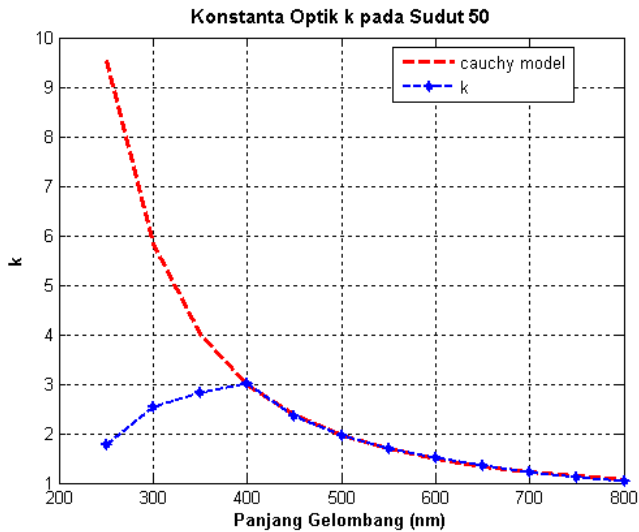
Gambar 4.12 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 50°
 $A = 3,4$; $B = 6 \times 10^{-14}$; $C = 0$; $r\ mse = 0.014568$



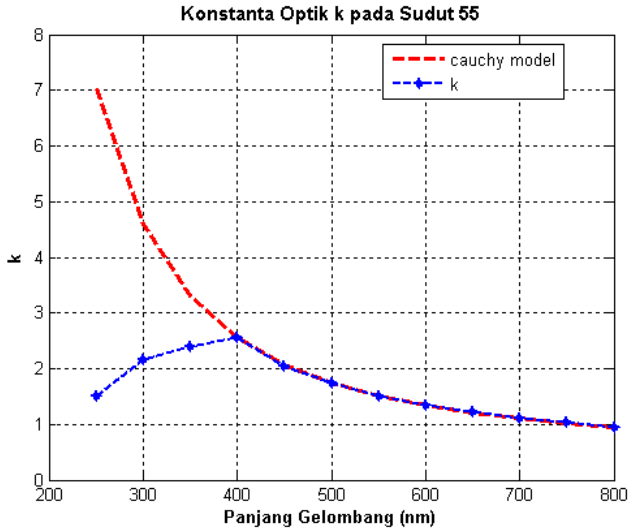
Gambar 4.13 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 55°
 $A = 3.5$; $B = 0$; $C = 0$; $r\ mse = 0.030192$



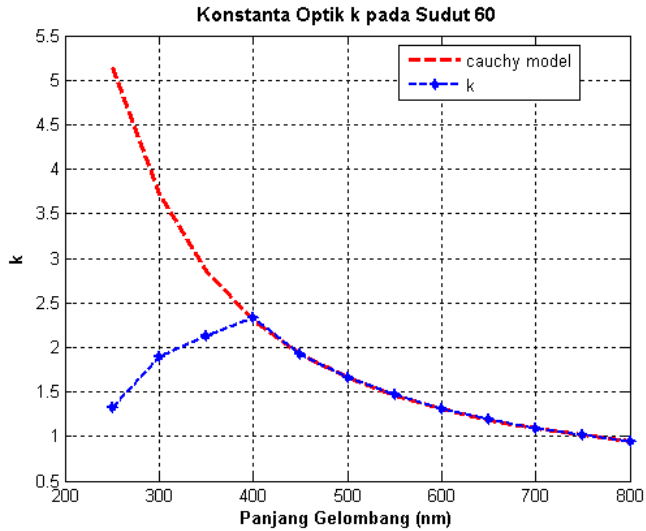
Gambar 4.14 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 60°
 $A = 3.5$; $B = 0$; $C = 0$; $r\ mse = 0.08111$



Gambar 4.15 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 50°
 $A = 0.6$; $B = 2.7 \times 10^{-13}$; $C = 1.8 \times 10^{-26}$; $r\ mse = 0.014084$



Gambar 4.16 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 55°
 $A = 0.5$; $B = 2.8 \times 10^{-13}$; $C = 0.8 \times 10^{-26}$; $r \text{ mse} = 0.013353$



Gambar 4.17 Grafik model parameter Cauchy n pada sudut 60°
 $A = 0.5$; $B = 2.9 \times 10^{-26}$; $C = 0$; $r \text{ mse} = 0.0096783$

Parameter Cauchy secara matematis memodelkan n dan k sebagai fungsi λ sehingga n dan k dapat ditentukan pada λ tertentu hanya dengan memasukkan nilai λ -nya saja namun yang terpenting adalah membatasi nilai indek refraksi n dan koefisien absorpsi k yang memiliki pencilan jauh karena mempengaruhi grafik indek refraksi n dan koefisien absorpsi k . Sehingga penentuan nilai indek absorpsi n dan koefisien absorpsi k dapat dilakukan dengan rentang panjang gelombang 400 – 800 nm baik perhitungan maupun model parameter Cauchy pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Tabel nilai parameter Cauchy dan rmsnya

Parameter		A	B	C	rmse
Sudut 50 ⁰	n	3.4	6×10^{-14}	0	0.014568
	k	0.5	3.3×10^{-13}	1×10^{-26}	0.023269
Sudut 55 ⁰	n	3.5	0	0	0.030192
	k	0.5	2.8×10^{-13}	8×10^{-27}	0.013353
Sudut 60 ⁰	n	3.5	0	0	0.08111
	k	0.5	2.9×10^{-26}	0	0.0096783

Hasil model Cauchy dari perhitungan konstanta optik sampel SiO₂ secara fisis memberikan gambaran terjadinya dispersi pada sampel. Pada range 400 – 800 nm grafik n menurun dengan naiknya panjang gelombang, hal ini merupakan peristiwa dispersi normal seperti yang dirumuskan pada persamaan parameter Cauchy semakin besar λ semakin kecil nilai indek refraksi n . Hal sebaliknya terjadi pada range 250 – 400 nm dimana grafik indek refraksi n justru naik hal ini merupakan suatu anomali dalam peristiwa dispersi yang dikenal dengan *anomali dispersi*. Anomali ini disebabkan oleh faktor koefisien absorpsi k yang pada grafik naik sehingga mempengaruhi (menaikkan) nilai indek refraksi n yang normalnya menurun. Nilai koefisien absorpsi yang semakin besar menyebabkan absorpsi energi atau intensitas semakin besar sehingga kecepatan cahaya pada bahan semakin kecil. Range terjadinya *anomali dispersi* ini disebut dengan *absorption band*. Anomali yang disebabkan oleh faktor k berpengaruh besar pada range yang lebih kecil (250 – 400 nm) yang grafiknya naik dari pada dispersi normal (400 – 800 nm). Nilai k tidak berpengaruh besar pada range 400 – 800 nm walaupun memiliki nilai yang sama seperti pada range *absorption band*

(gambar 4.6) sehingga disebut suatu anomali pula (Pedrotti S. J dan S, 1993)

Penjelasan di atas memberikan dari hasil model Cauchy dan perhitungan pada range 250 – 400 nm terjadi anomali yang perlu dihindari pada penentuan konstanta optik sampel namun informasi ini dibutuhkan pada penentuan sifat optik material. Grafik *absorption band* yang berada pada range λ ultraviolet menunjukkan bahwa sifat sampel transparan terhadap cahaya tampak dan tidak terjadi absorpsi selektif (*non-dichroic*) dikarenakan sampel bersifat isotropis (Pedrotti S. J dan S, 1993). Material *dichroic* adalah material dengan besar absorpsi yang besar sumbu tertentu atau absorpsi hanya terjadi pada sumbu tertentu sehingga memiliki dua nilai k yaitu k_o pada sumbu absorpsi maksimum (*ordinary extinction coefficients*) dan k_e sumbu tegak lurus dari k_o (*extraordinary extinction coefficients*). Material sampel hanya mengabsorpsi pada range ultraviolet saja dikarenakan pita energy atom pada sampel yang terkuantisasi sama dengan energi gelombang ultraviolet menyebabkan atom sampel mengabsorbirnya dan tereksitasi. Pada cahaya tampak energinya tidak beresuaian dengan kuantisasi energi atom sampel sehingga gelombang cahaya hanya dilewatkan saja sehingga sampel terlihat transparan.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.

Setelah dilakukan penelitian terhadap data hasil pengukuran ellipsometri dapat ditarik kesimpulan :

1. Adanya jendela pada sistem ellipsometri menyebabkan hasil perhitungan konstanta optik sampel naik dibandingkan tanpa jendela dikarenakan adanya parameter tambahan dari jendela. Parameter optik tambahan yang paling dominan adalah koefisien absorpsi (k) dari pada indek refraksi (perlambatan) jendela.
2. Intensitas yang mengenai detektor berkurang dikarenakan retardasi jendela dimana pada energi tinggi (250 – 400 nm) pengaruhnya semakin kecil dan pada intensitas rendah (400 – 800 nm) sedikit naik karena turunnya nilai koefisien absorpsi.
3. Model matrik jones pada sampel dan jendela yang dihasilkan mampu mengoreksi intensitas data ellipsometri pada system jendela (Ψ' , Δ') pada rentang panjang gelombang 300 – 800 nm dengan faktor retardasi jendela 0.824, 0.77 dan 0.687 pada masing-masing sudut pengukuran 50° , 55° dan 60° .
4. Data hasil perhitungan konstanta optik n dan k yang dapat digunakan adalah yang sesuai dengan model parameter Cauchy yaitu pada rentang panjang gelombang 400 – 800 nm.
5. Sampel bersifat transparan terhadap cahaya tampak dan non-dichroic tidak memiliki perbedaan koefisien absorpsi yang besar terhadap arah.

5.2 Saran.

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk :

1. Dapat menentukan nilai Ψ Δ model yang diturunkan dari nilai intensitas yang telah dikoreksi untuk selanjutnya dibandingkan dengan nilai Ψ dan Δ dari hasil pengukuran.
2. Mengikutsertakan efek depolarisasi pada permodelan.

3. Dapat menentukan tebal lapisan tipis sampel SiO_2 isotropis.
4. Dapat mengoreksi nilai indeks bias jendela + sampel pada sudut 55° dan 60° pada rentang λ 250-400 nm yang nilai indeks biasnya lebih rendah dari pada tanpa jendela.
5. Algoritma program yang lebih efektif sehingga eksekusi program lebih singkat contohnya dengan metode swarm.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR PUSTAKA

- . Polarization Ligth. Akses tanggal 12 Agustus, 2008, dari www.Hperphysics-gsu.edu.
- Anonymous. (2003). Fused Silica, SiO₂. Akses tanggal 27 mei, 2008, dari <http://accuratus.com/fused.html>.
- Anonymous. (2007, 30 mei 2008). Ellipsometry. Akses tanggal 12 april, 2008, dari <http://www.jawoollam.com>.
- Anonymous. (2008). Basics of Ellipsometry. Akses tanggal 11 November, 2008, dari http://www.fis.unipr.it/~gigi/elli/principi_ellissometria.html.
- Anonymous. (2008). Ellipsometry. Akses tanggal 13 mei, 2008, dari <http://en.wikipedia.org/wiki/Ellipsometry>.
- Azzam, R. M. A. dan N. M. Bashara. 1977. Ellipsometry and Polarized Light. NORTH-HOLLAND PUBLISHING COMPANY. Amsterdam.
- Bryansk, S. D. a. (2004). Spectroscopic Ellipsometry of Interfacial Phase Transitions in Fluid Metallic Systems: K_xKCl_{1-x} and Ga_{1-x}Bix Akses tanggal 10 Desember, 2008, dari <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/812004>.
- Djoko, D. J. 2003. *Hydrogenation and dehydrogenation of Yttrium Hydride Switchable Mirror*.
- Hariyadi. (1998). Ellipsometer Sederhana. 14. Akses tanggal 27 mei, 2008, dari <http://www.elektroindonesia.com/elektro/inst14.html>.
- Jellison, G. E. 1999. Windows in Ellipsometry Measurements. *Applied Optics*. 38(22): 4784-4789.
- Kaufmann, E. N. 2003. CHARACTERIZATION of MATERIAL. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- Pedrotti S. J, F. dan L. S. 1993. INTRODUCTION to OPTIC. Prentice Hall, Inc. New Jersey.
- Shurcliff, W. A. 1962. Polarized Light Production and Use. Harvard University Press. Massachusetts.
- Tipler, P. A. 2004. Fisika untuk Sains dan Teknik. 2, Erlangga. Jakarta.
- Wahyudi, D. 2006. Permodelan Efek Jendela dalam Analisis Data Ellipsometry. *Physics*. Malang, Brawijaya.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 1. Hasil Pengukuran Ellipsometri

Tabel 1 Hasil Pengukuran Ellipsometri Pada Sudut 50°

λ nm	Ψ	Ψ'	Δ	Δ'
250	42,00419	47,77336	133,961	137,0457
300	39,75284	45,62331	146,0736	149,3616
350	38,09012	43,90763	151,4933	154,432
400	36,01919	41,79231	160,5524	163,2626
450	34,07089	39,72044	163,0809	165,5467
500	32,98858	38,55748	164,8703	167,1737
550	32,29654	37,78564	166,2969	168,4127
600	31,80673	37,24841	167,4925	169,4546
650	31,44666	36,8662	168,4597	170,2515
700	31,17329	36,55436	169,289	170,9591
750	30,94558	36,31538	170,0311	171,5655
800	30,78914	36,12981	170,6817	172,1587

Tabel 2 Hasil Pengukuran Ellipsometri Pada Sudut 55°

λ nm	Ψ	Ψ'	Δ	Δ'
250	41,59464	49,30069	122,6739	125,1196
300	38,70878	46,45471	136,9936	139,9225
350	36,57727	44,2063	143,4944	146,2134
400	33,82884	41,26945	154,655	157,241
450	31,32604	38,51137	157,7135	160,2066
500	29,94739	36,96767	159,9181	162,2356
550	29,05932	35,94182	161,716	163,8522
600	28,40442	35,20046	163,2461	165,1892
650	27,93865	34,68013	164,4793	166,2785
700	27,58281	34,25692	165,5637	167,25
750	27,31394	33,90297	166,5212	168,0828
800	27,08774	33,65996	167,3672	168,8722

Tabel 3 Hasil Pengukuran Ellipsometri Pada Sudut 60°

λ nm	Ψ	Ψ'	Δ	Δ'
250	41,27076	51,26742	109,6886	110,7854
300	37,6523	47,73179	125,9592	128,0824
350	34,96736	44,82571	133,4384	135,6395
400	31,25864	40,71482	146,8511	149,2284
450	28,11308	37,06122	150,3253	152,7179
500	26,37914	34,94754	152,9226	155,2327
550	25,20628	33,54686	155,1072	157,2951
600	24,37846	32,52019	157,0195	159,0562
650	23,76025	31,78986	158,5729	160,5099
700	23,30188	31,16129	159,9738	161,812
750	22,91943	30,72052	161,2275	162,9577
800	22,62751	30,34023	162,3485	163,9892

Keterangan : **Ψ** : rasio amplitude pada sistem tanpa jendela **Ψ'** : rasio amplitude sistem jendela **Δ** : Beda fase pada sistem tanpa jendela **Δ'** : Beda fase pada sistem jendela

Lampiran 2. Hasil Perhitungan Konstanta Dielektrik

Tabel Hasil Perhitungan Konstant dielektrik real (ϵ_1)

λ (nm)	Sudut 50		Sudut 55		Sudut 60	
	ϵ_1	ϵ'_1	ϵ_1	ϵ'_1	ϵ_1	ϵ'_1
250	-1.335622	-2.185699	-1.22498	-1.995114	-1.121412	-1.803398
300	-1.729278	-5.0509	-1.574707	-4.625383	-1.421774	-4.236343
350	-0.560902	-6.971029	-0.401235	-6.478997	-0.244933	-5.975643
400	8.022263	3.525996	5.128946	-8.326967	5.253999	-8.121345
450	8.022263	3.525996	8.097858	1.853743	8.174687	0.593603
500	9.25743	10.986865	9.322371	8.824571	9.384364	7.029791
550	9.931944	15.465465	9.996797	13.315013	10.04046	11.315859
600	10.357912	18.371863	10.410058	16.277088	10.457857	14.264073
650	10.61981	20.139501	10.663883	18.236515	10.697643	16.24558
700	10.806811	21.411316	10.851745	19.686929	10.887854	17.700818
750	10.941165	22.327149	11.003973	20.697525	11.019528	18.811844
800	11.072437	23.170947	11.11239	21.624954	11.131315	19.662455

Keterangan :

ϵ_1 = konstanta dielektrik sistem tanpa jendela

ϵ'_1 = konstanta dielektrik sistem jendela

Tabel Hasil Perhitungan Konstant dielektrik imaginary (ϵ_2)

λ nm	Sudut 50		Sudut 55		Sudut 60	
	ϵ_2	ϵ_2'	ϵ_2	ϵ_2'	ϵ_2	ϵ_2'
250	4.739084	5.069534	3.10362	2.391004	2.112732	1.030524
300	10.95463	15.06929	7.561229	7.227366	5.577394	3.217119
350	15.3189	26.76603	11.13827	13.5582	8.814273	6.540043
400	22.62152	78.10985	17.60787	42.4972	15.23787	23.45523
450	17.3303	71.9975	14.34969	44.93677	13.28279	29.09158
500	14.21256	61.91637	12.16652	41.5248	11.60652	29.42694
550	12.17315	53.09613	10.63053	37.51303	10.25475	28.19557
600	10.679	46.40123	9.415682	33.79736	9.187686	26.4423
650	9.549126	41.30826	8.501347	30.83249	8.330174	24.75532
700	8.656535	37.01042	7.757909	28.17254	7.639269	22.9585
750	7.892217	33.61533	7.150289	25.79253	7.033445	21.53616
800	7.299919	30.78911	6.620071	23.992	6.531424	20.1607

Keterangan :

ϵ_2 = konstanta dielektrik sistem tanpa jendela

ϵ_2' = konstanta dielektrik sistem jendela

Lampiran 3. Hasil Perhitungan Konstanta Optik

Tabel Hasil Perhitungan Konstanta Optik (n dan k)

1. Sudut 50°

λ (nm)	n	k	n'	k'
250	1.339417	1.769085	1.291306	1.962949
300	2.163446	2.531754	2.328341	3.236058
350	2.717376	2.818694	3.2162	4.161126
400	3.756517	3.01097	5.934544	6.580947
450	3.682342	2.353163	6.148568	5.854818
500	3.620709	1.962677	6.077436	5.093954
550	3.580694	1.69983	5.948449	4.463023
600	3.552111	1.50319	5.842849	3.970771
650	3.528561	1.353119	5.748726	3.592818
700	3.510926	1.232799	5.664316	3.26698
750	3.495122	1.129033	5.598291	3.002285
800	3.488173	1.046381	5.554496	2.771548

2. Sudut 55°

λ (nm)	n	k	n'	k'
250	1.027531	1.510232	0.74798	1.598308
300	1.75339	2.156174	1.406298	2.569642
350	2.317785	2.402782	2.067332	3.279155
400	3.425537	2.570089	4.182006	5.080959
450	3.505337	2.046834	4.83884	4.643342
500	3.510685	1.732784	5.063432	4.10046
550	3.50638	1.515884	5.153688	3.639435
600	3.496183	1.346566	5.18603	3.2585
650	3.48581	1.219422	5.198965	2.965253
700	3.477885	1.11532	5.19887	2.709487

750	3.473256	1.029335	5.184968	2.487241
800	3.46751	0.954586	5.192514	2.310249

3. Sudut 60°

λ (nm)	n	k	n'	k'
250	0.797023	1.32539	0.369914	1.392923
300	1.472071	1.894404	0.7359	2.185839
350	2.070355	2.128686	1.200683	2.723469
400	3.268962	2.330689	2.889645	4.058496
450	3.447566	1.926401	3.853001	3.775184
500	3.48641	1.664538	4.317682	3.407725
550	3.492287	1.468199	4.566038	3.087531
600	3.4913	1.315797	4.706823	2.808933
650	3.482534	1.195993	4.788291	2.584985
700	3.47767	1.098332	4.831701	2.37582
750	3.470762	1.013242	4.868632	2.211726
800	3.466796	0.941997	4.889984	2.061428

Keterangan :

n : indeks bias (refraksi) pada sistem tanpa jendela.

n' : indeks bias (refraksi) pada sistem jendela.

k : koefisien serap (absorpsi) pada sistem tanpa jendela

k' : koefisien serap (absorpsi) pada sistem jendela

Lampiran 4. Data Hasil Permodelan Intensitas

1. Data Hasil Permodelan Intensitas pada sudut 50°

λ nm	I	I _j	I _{kj}	% error
250	0.058891	0.047905	0.06649	12.9032375
300	0.032176	0.021598	0.029832	7.2848963
350	0.025298	0.014861	0.023037	8.9408142
400	0.017606	0.007118	0.013972	20.645612
450	0.01977	0.007364	0.017617	10.8905236
500	0.021231	0.007762	0.019953	6.0205745
550	0.022215	0.008163	0.021622	2.6662173
600	0.022934	0.008469	0.022704	1.003016
650	0.023501	0.008733	0.023492	0.0393441
700	0.023936	0.008971	0.024118	0.7590606
750	0.024316	0.009158	0.024549	0.960282
800	0.024533	0.009278	0.024744	0.8598253

2. Data Hasil Permodelan Intensitas pada sudut 55°

λ nm	I	I _j	I _{kj}	% error
250	0.098309	0.088172	0.125483	27.6419211
300	0.054553	0.040503	0.056752	4.0312045
350	0.042974	0.027682	0.042346	1.4626731
400	0.030031	0.013321	0.024759	17.5548577
450	0.033703	0.013477	0.03031	10.0680094
500	0.036125	0.014106	0.034118	5.5568745
550	0.037753	0.014712	0.036762	2.626548
600	0.039041	0.015261	0.038697	0.8815575
650	0.039998	0.015674	0.039957	0.1043058
700	0.040723	0.016049	0.040949	0.5552038
750	0.041242	0.016424	0.041841	1.4531663
800	0.041709	0.016594	0.042102	0.9434672

3. Data Hasil Permodelan Intensitas pada sudut 60°

λ nm	I	Ij	Ikj	% error
250	0.157603	0.158285	0.222087	40.9157169
300	0.090424	0.076252	0.105706	16.9009772
350	0.071723	0.052192	0.077129	7.5370401
400	0.050702	0.025216	0.043384	14.434206
450	0.056565	0.025305	0.051344	9.2298801
500	0.060353	0.026346	0.057159	5.2917596
550	0.06312	0.02734	0.061127	3.1576724
600	0.065072	0.028258	0.064058	1.5592728
650	0.066684	0.028978	0.066014	1.0045902
700	0.067799	0.029762	0.067866	0.0978325
750	0.068791	0.030221	0.068759	0.0460878
800	0.069496	0.030684	0.069565	0.0999732

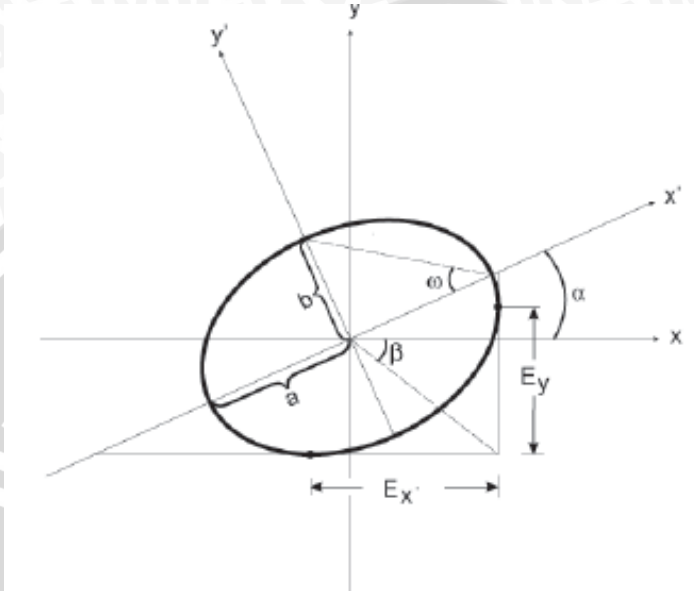
Keterangan :

I : intensitas pada sistem tanpa jendela

Ij : intensitas pada sistem jendela

Ikj : intensitas hasil koreksi

Lampiran 5. Normalisasi Vektor Jones.



$$\beta = \text{inv tan} \left(\frac{A_y}{A_x} \right)$$

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \\ \pm \sin(\beta) \cdot e^{i\Delta} \end{bmatrix}$$

$$\Delta = \varphi_x - \varphi_y$$

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \cdot e^{-i\Delta/2} \\ \sin(\beta) \cdot e^{i\Delta/2} \end{bmatrix}$$

Karena $\beta = \Psi$ (parameter ellipsometri) maka :

$$E_x = \cos(\Psi) \cdot \exp(-i\Delta/2)$$

$$E_y = \sin(\Psi) \cdot \exp(i\Delta/2)$$

Lampiran 6. Kronecker Product (Outer Product).

Operasi Kronecker Product dilambangkan dengan \otimes yang dapat beroperasi pada dua matrik dengan ukuran berbeda.

Definisi : Jika $A \in R^{m \times n}$, $B \in R^{p \times q}$ maka Kronecker Product A dan B. $C = A \otimes B$ adalah matrik dengan ukuran $m * p \times n * q$

$$C = A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{11}B & \cdots & a_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}B & \cdots & a_{mn}B \end{pmatrix} \in R^{mp \times nq}$$

dengan elemen-elemennya didefinisikan:

$$c_{\alpha\beta} = a_{ij}b_{kl}$$

dimana :

$$\alpha = p(i-1) + k$$

$$\beta = q(j-1) + l$$

Secara explicit menjadi :

$$A \otimes B = \begin{pmatrix} a_{11}b_{11} & a_{11}b_{12} & \cdots & a_{11}b_{1q} & \cdots & \cdots & a_{1n}b_{11} & a_{1n}b_{12} & \cdots & a_{1n}b_{1q} \\ a_{11}b_{21} & a_{11}b_{22} & \cdots & a_{11}b_{2q} & \cdots & \cdots & a_{1n}b_{21} & a_{1n}b_{22} & \cdots & a_{1n}b_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{11}b_{p1} & a_{11}b_{p2} & \cdots & a_{11}b_{pq} & \cdots & \cdots & a_{1n}b_{p1} & a_{1n}b_{p2} & \cdots & a_{1n}b_{pq} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}b_{11} & a_{m1}b_{12} & \cdots & a_{m1}b_{1q} & \cdots & \cdots & a_{mn}b_{11} & a_{mn}b_{12} & \cdots & a_{mn}b_{1q} \\ a_{m1}b_{21} & a_{m1}b_{22} & \cdots & a_{m1}b_{2q} & \cdots & \cdots & a_{mn}b_{21} & a_{mn}b_{22} & \cdots & a_{mn}b_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}b_{p1} & a_{m2}b_{p2} & \cdots & a_{p1}b_{pq} & \cdots & \cdots & a_{mn}b_{p1} & a_{mn}b_{p2} & \cdots & a_{mn}b_{pq} \end{pmatrix}$$

Misal

Matrik jones sampel isotropis

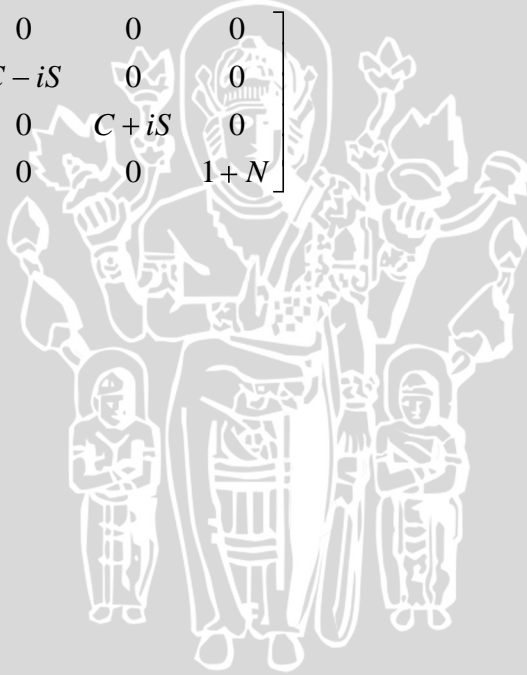
$$J = \begin{bmatrix} \rho_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \rho_{pp} = \tan \psi \cdot \exp i\Delta = \frac{C+iS}{1+N}$$

$$J \otimes J^* = \begin{bmatrix} \rho_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ρ' dan J^* adalah conjugate dari ρ dan J

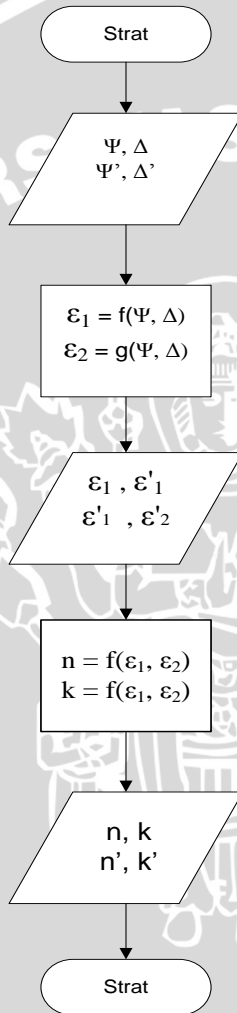
$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \rho_{pp} \cdot \begin{bmatrix} \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & 0 \cdot \begin{bmatrix} \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ 0 \cdot \begin{bmatrix} \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & 1 \cdot \begin{bmatrix} \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{pp} \cdot \rho'_{pp} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{pp} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho'_{pp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1-N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C-iS & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C+iS & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1+N \end{bmatrix}$$

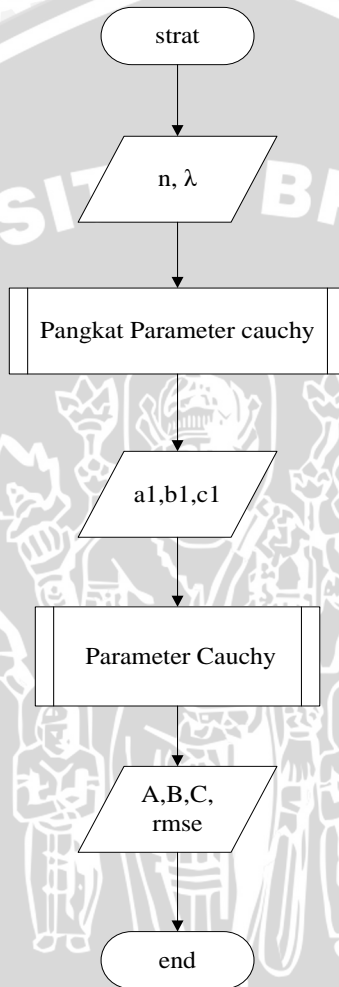


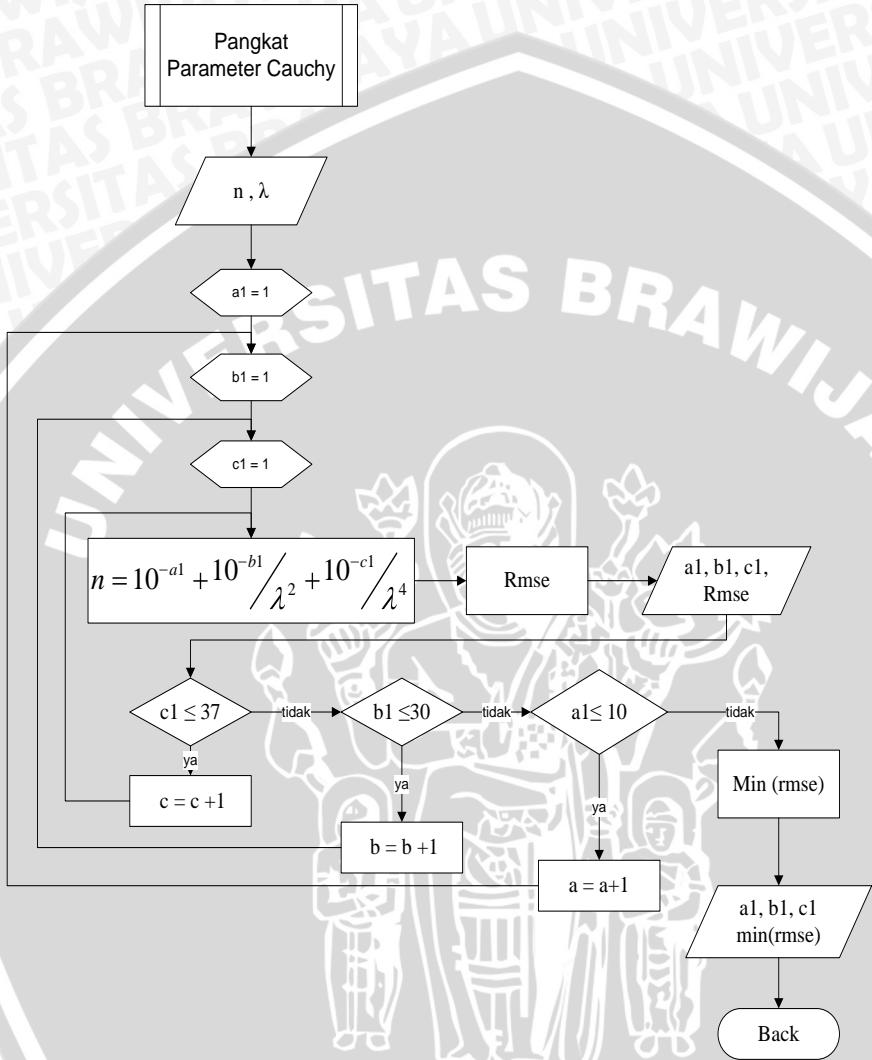
Lampiran 7. Flowchat Program

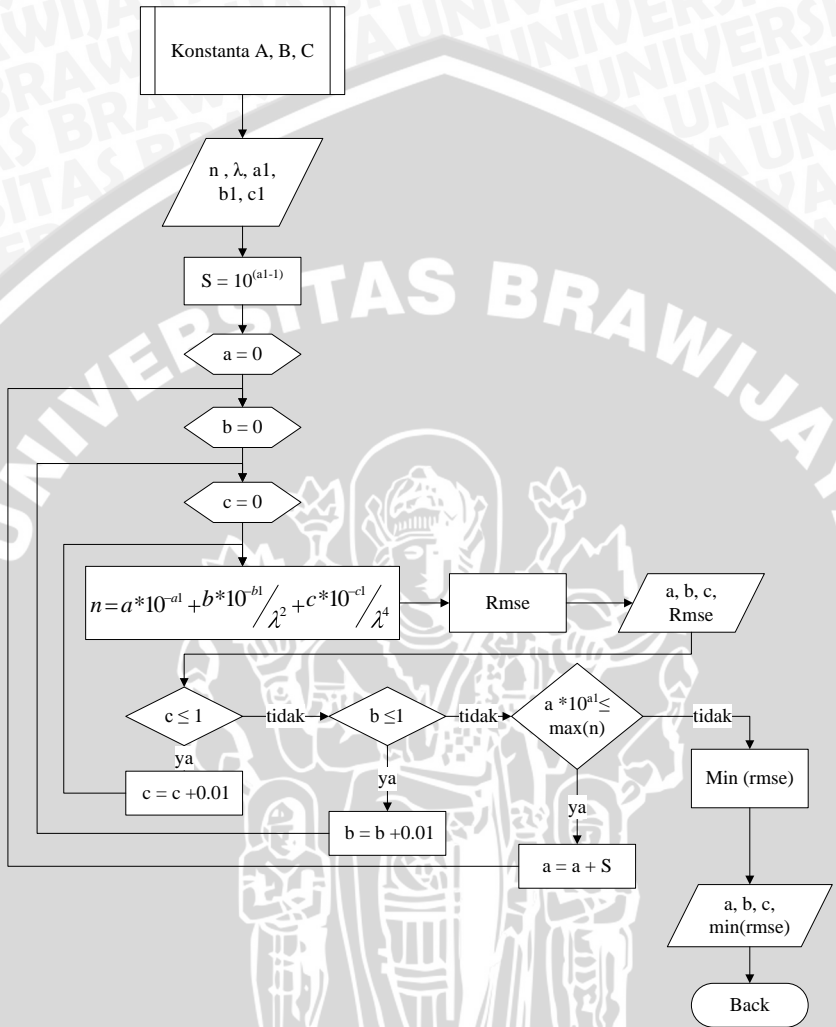
Lampiran 7.1 flowchart Perhitungan Konstanta Optik



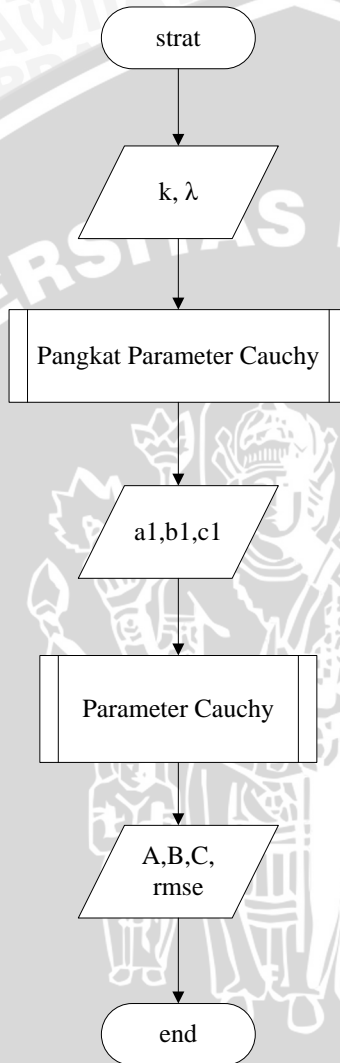
7.2 Flow chart Model Parameter Cauchy n.

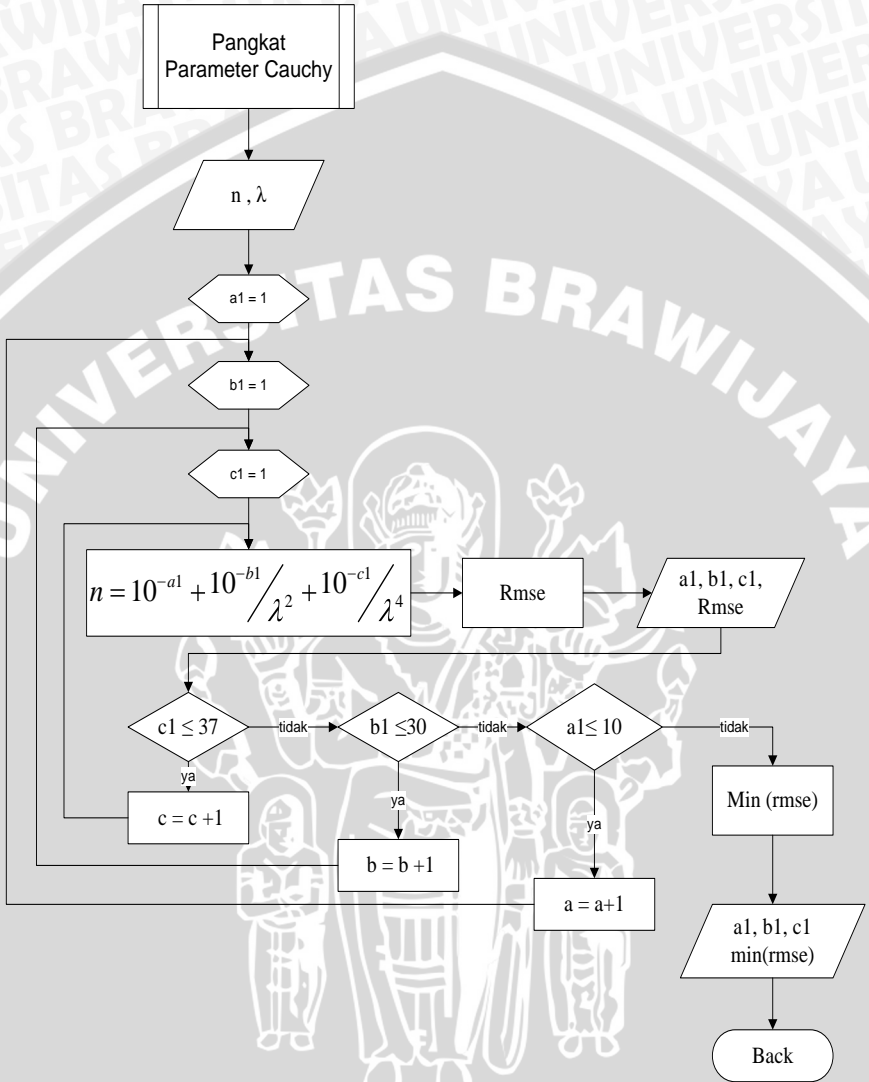


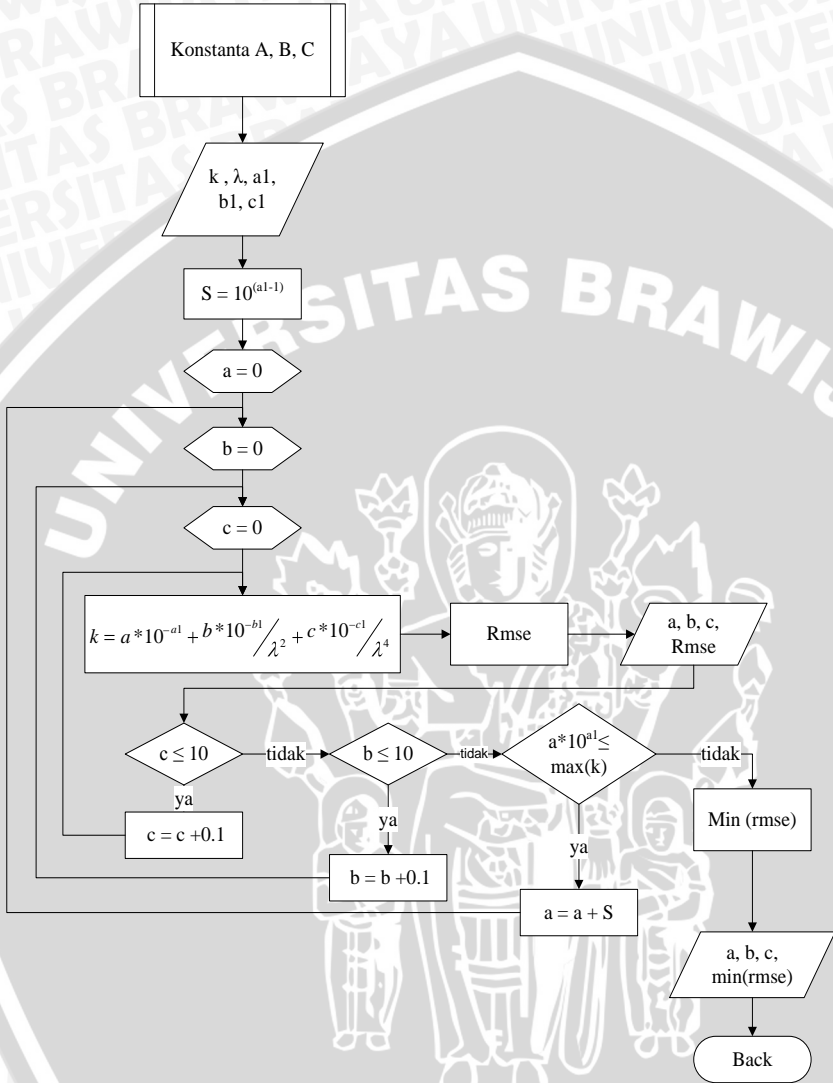




Lampiran 7.3 Flow chart Model Parameter Cauchy k.



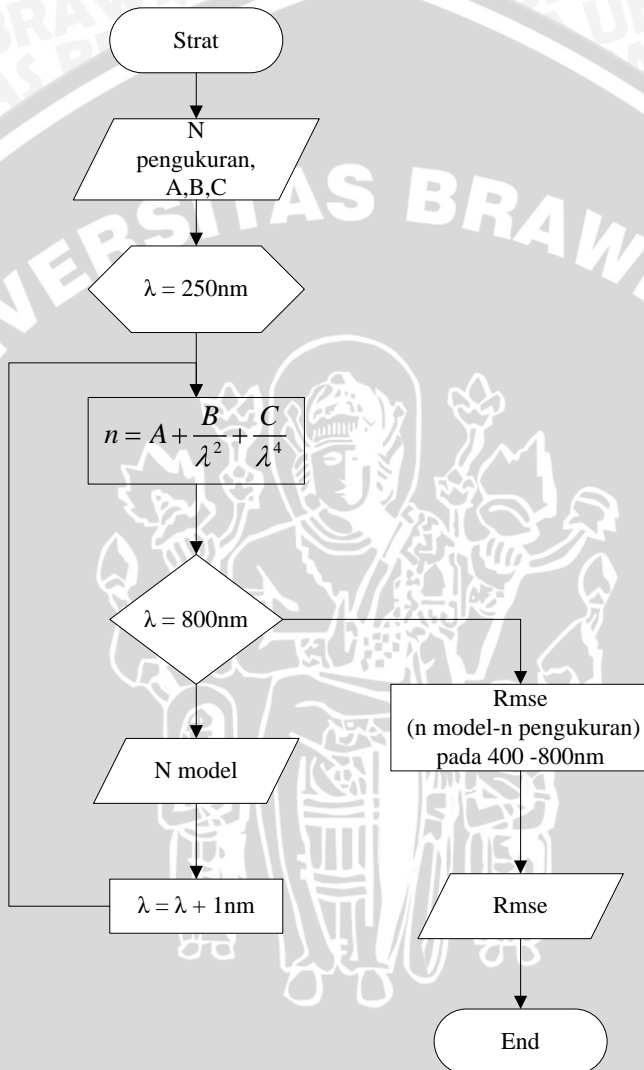




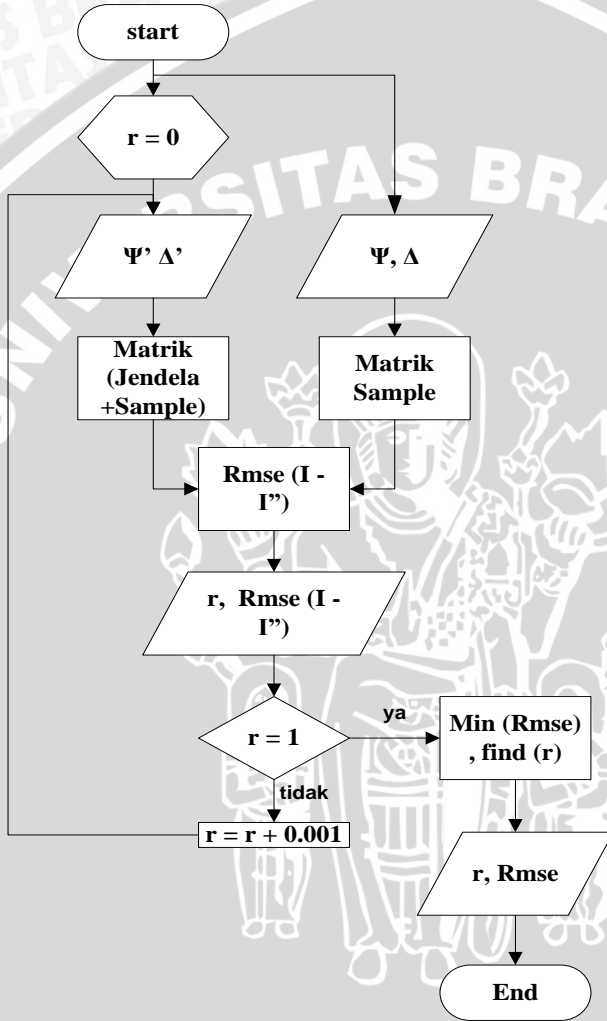
Keterangan :

- selisih iterasi dapat diperkecil untuk meningkatkan ketelitiannya
- Pada parameter A batas maksimumnya adalah nilai n atau k tertinggi.

Lampiran 7.4 Flowchart Pengujian model Cauchy



Lampiran 7.4 Flowchart Koreksi Jendela



Lampiran 8. Parameter Cauchy

Nilai Parameter Cauchy (A, B dan C) dengan akar kuadrat kesalahan terkecil yang dicapai dalam penentuan nilai parameter tersebut untuk 400 -800nm menghasilkan plot grafik.

Parameter		A	B	C	rmse
Sudut 50^0	n	3.4	6×10^{-14}	0	0.014568
	k	0.5	3.3×10^{-13}	1.8×10^{-26}	0.014084
Sudut 55^0	n	3.5	0	0	0.030192
	k	0.5	2.8×10^{-13}	8×10^{-27}	0.013353
Sudut 60^0	n	3.5	0	0	0.08111
	k	0.5	2.9×10^{-13}	0	0.0096783



Lampiran 9. Tabel Normalisasi Matrik Jones

Element Optik	Matrik Jones
Polarizer linier Horizontal	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$
Polarizer linier Vertikal	$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Polarizer linier pada 45^0	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$
Polarizer linier pada -45^0	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$
Quarte wave plat Fast axis vertical	$e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$
Quarter wave plate Fast axis horizontal	$e^{i\frac{\pi}{4}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}$
Polarizer lingkaran Ke kanan	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
Polarizer lingkaran Ke kiri	$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}$
Polarisasi Linier dengan sudut θ	$\begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}$
A Quarter Wave Plat Pada sumbu perlambatan θ	$\begin{bmatrix} C^2P + S^2Q & \sqrt{2}.i.C.S \\ \sqrt{2}.i.C.S & C^2Q + S^2P \end{bmatrix}$ $P = e^{i\frac{\pi}{4}}, C = \cos \theta ,$ $S = \cos \theta , Q = e^{-i\frac{\pi}{4}}$

Lampiran 10. Program Matlab

Lampiran 10.1 Program Perhitungan Konstanta Optik

```
%Program Konstanta Optik total
%PENGEMBANGAN pada input data
clear all;
clc;
%sudut 50 derajat
t50=50*pi/180;
sudut50=fopen('DATA_SUDUT_50.txt','r');
data50=fscanf(sudut50,'%f',[4,12]);
data50=data50';
x50=data50(:,4)*pi/180;
xj50=data50(:,2)*pi/180;%jendela
y50=data50(:,3)*pi/180;
yj50=data50(:,1)*pi/180;%jendela
z=[250:50:800];
[ind50,indj50]=indekbias(x50,xj50,y50,yj50,t50);
fclose(sudut50);

%sudut 55 derajat
t55=55*pi/180;
sudut55=fopen('DATA_SUDUT_55.txt','r');
data55=fscanf(sudut55,'%f',[4,12]);
data55=data55';
x55=data55(:,4)*pi/180;
xj55=data55(:,2)*pi/180;%jendela
y55=data55(:,3)*pi/180;
yj55=data55(:,1)*pi/180;%jendela
z=[250:50:800];
[ind55,indj55]=indekbias(x55,xj55,y55,yj55,t55);
fclose(sudut55);

%sudut 60 derajat
t60=60*pi/180;
sudut60=fopen('DATA_SUDUT_60.txt','r');
data60=fscanf(sudut60,'%f',[4,12]);
data60=data60';
x60=data60(:,4)*pi/180;
xj60=data60(:,2)*pi/180;%jendela
y60=data60(:,3)*pi/180;
yj60=data60(:,1)*pi/180; %jendela
z=[250:50:800];
```

```

[ind60,indj60]=indekbias(x60,xj60,y60,yj60,t60);
fclose(sudut60);

%Memplot grafik konstanta optik
%plot sudut 50
plot(z,indj50,'--*r','LineWidth',2)
hold on
plot(z,ind50,'--*k','LineWidth',2)
hold on
%plot sudut 55
plot(z,indj55,'--*r','LineWidth',2)
hold on
plot(z,ind55,'--*k','LineWidth',2)
hold on
%plot sudut 60
plot(z,indj60,'--*r','LineWidth',2)
hold on
plot(z,ind60,'--*k','LineWidth',2)
title('Pengukuran Konstanta dielektrik
','fontweight','bold',...
'fontsize',12)
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold')
ylabel('\epsilon_1','fontangle','italic','fontweigh
t','bold','fontsize',14)
xlim([200 850])
grid on
legend('Jendela','Tanpa Jendela',2)
text(800,indj50(11)+1,'50^0','fontweight','bold')
text(600,ind50(10)+0.5,'50^0','fontweight','bold')
text(800,indj55(11)+1,'55^0','fontweight','bold')
text(800,ind55(10),'55^0','fontweight','bold')
text(800,indj60(11)+1,'60^0','fontweight','bold')
text(700,ind60(10)-1,'60^0','fontweight','bold')

%program Pengukuran n dan k
[n50,k50,int50]=indek_absorbsi(ind50,t50,x50,y50);
[n55,k55,int55]=indek_absorbsi(ind55,t55,x55,y55);
[n60,k60,int60]=indek_absorbsi(ind60,t60,x60,y60);
[nj50,kj50,intj50]=indek_absorbsi(indj50,t50,xj50,y
j50);%jendela

```



```
[nj55,kj55,intj55]=indek_absorbsi(indj55,t55,xj55,y
j55);
[nj60,kj60,intj60]=indek_absorbsi(indj60,t60,xj60,y
j60);
```

```
figure
%Memplot komponen imaganary 2nk
%plot sudut 50
plot(z,intj50,'--*r','LineWidth',2)
hold on
plot(z,int50,'--*k','LineWidth',2)
hold on
%plot sudut 55
plot(z,intj55,'--*r','LineWidth',2)
hold on
plot(z,int55,'--*k','LineWidth',2)
hold on
%plot sudut 60
plot(z,intj60,'--*r','LineWidth',2)
hold on
plot(z,int60,'--*k','LineWidth',2)
title('Pengukuran Konstanta
Dielektrik','fontweight','bold',...
'fontsize',12)
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold')
ylabel('\epsilon_2','fontangle','italic','fontweigh
t','bold','fontsize',14)
xlim([200 850])
grid on
legend('Jendela','Tanpa Jendela',1)
text(z(5),intj50(5)-1,'50^0','fontweight','bold');
text(z(5),intj55(5)-1,'55^0','fontweight','bold');
text(z(5),intj60(5)-1,'60^0','fontweight','bold');
text(z(5),int50(5)+1,'50^0','fontweight','bold');
text(z(4),int55(4)+1,'55^0','fontweight','bold');
text(z(4),int60(4)-1.5,'60^0','fontweight','bold');
xlim([200 850]);

figure
plot(z,n50,'--*k','linewidth',2)
hold on
```

```

plot(z,k50,'--*', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,n55,'--*k', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,k55,'--*', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,n60,'--*k', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,k60,'--*', 'linewidth',2)
grid on
legend('n','k',2)
title('Pengukuran n dan k Sistem Tanpa
Jendela','fontweight','bold','fontsize',12)
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold');
ylabel('(n ,
k)','fontweight','bold','fontangle','italic');
xlim([200 850])

```

```

text(400,k50(4), '50^0','fontweight','bold')
text(400,k55(4), '55^0','fontweight','bold')
text(400,k60(4)-0.1, '60^0','fontweight','bold')
text(225,n50(1), '50^0','fontweight','bold')
text(225,n55(1), '55^0','fontweight','bold')
text(225,n60(1), '60^0','fontweight','bold')

```

%n dan k jendela

```

figure;
plot(z,nj50,'--*r', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,kj50,'--*g', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,nj55,'--*r', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,kj55,'--*g', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,nj60,'--*r', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,kj60,'--*g', 'linewidth',2)
legend('n jendela','k jendela',2)
grid on

```

```

title('Pengukuran n dan k Sistem
Jendela','fontweight','bold','fontsize',12)
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold')
ylabel('(n ,
k)','fontweight','bold','fontangle','italic')
xlim([200 850])

text(220,nj50(1),'50^0','fontweight','bold')
text(220,nj55(1),'55^0','fontweight','bold')
text(220,nj60(1),'60^0','fontweight','bold')
text(400,kj50(4),'50^0','fontweight','bold')
text(400,kj55(4),'55^0','fontweight','bold')
text(400,kj60(4),'60^0','fontweight','bold')

%Menyimpan Data konstanta optik total fungsi
dielektrik real

freal=fopen('Data Hasil Simulasi konstanta optik
(n^2 - k^2).txt','wt');
fprintf(freal, '\n');
fprintf(freal, 'Data Hasil Simulasi konstanta optik
(n.^2 - k.^2) pada Sudut 50 derajat\n');
fprintf(freal, '\n');
fprintf(freal, '-----
-----\n');
fprintf(freal, '%1s %10s %1s %11s %2s %8s
%1s\n', '|', 'panjang gelombang', '|', '(n^2-
k^2)', '|', '(n^2-k^2) jendela', '|');
fprintf(freal, '-----
-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(freal, '|%12.0f | %13.6f | %16.6f |
\n', z(i), ind50(i), indj50(i));
end;
fprintf(freal, '-----
-----\n');
fprintf(freal, '\n');
%sudut 55 derajat
fprintf(freal, '\n');

```

```
fprintf(freal, 'Data Hasil Simulasi konstanta optik  
(n.^2 - k.^2) pada Sudut 55 derajat\n');
```

```
fprintf(freal, ' \n');
```

```
fprintf(freal, '-----  
-----\n');
```

```
fprintf(freal, '%1s %10s %1s %11s %2s %8s  
%1s\n', '|', 'panjang gelombang', '|', '(n^2-  
k^2)', '|', '(n^2-k^2)jendela', '|');
```

```
fprintf(freal, '-----  
-----\n');
```

```
for i=1:length(z)  
    fprintf(freal, '|%12.0f          |%13.6f | %16.6f |  
\n', z(i), ind55(i), indj55(i));
```

```
end;
```

```
fprintf(freal, '-----  
-----\n');
```

```
fprintf(freal, ' \n');
```

```
%sudut 60 derajat
```

```
fprintf(freal, ' \n');
```

```
fprintf(freal, 'Data Hasil Simulasi konstanta optik  
(n.^2 - k.^2) pada Sudut 60 derajat\n');
```

```
fprintf(freal, ' \n');
```

```
fprintf(freal, '-----  
-----\n');
```

```
fprintf(freal, '%1s %10s %1s %11s %2s %8s  
%1s\n', '|', 'panjang gelombang', '|', '(n^2-  
k^2)', '|', '(n^2-k^2)jendela', '|');
```

```
fprintf(freal, '-----  
-----\n');
```

```
for i=1:length(z)  
    fprintf(freal, '|%12.0f          |%13.6f | %16.6f |  
\n', z(i), ind60(i), indj60(i));
```

```
end;
```

```
fprintf(freal, '-----  
-----\n');
```

```
fprintf(freal, ' \n');
```

```
fclose(freal);
```

```
%Menyimpan Data konstanta optik fungsi dielektrik  
imaginary
```

```

fim=fopen('Data Hasil Simulasi konstanta optik
fungsi dilektrik imaginary (2nk).txt','wt');
fprintf(fim, '\n');
fprintf(fim, 'Data Hasil Simulasi konstanta optik
dielektrik imaginary (2nk) pada Sudut 50
derajad\n');
fprintf(fim, '\n');
fprintf(fim, '-----\n');
fprintf(fim, '%1s %10s %1s %11s %2s %10s
%3s\n', '|', 'panjang
gelombang', '|', '(2nk)', '|', '(2nk) jendela', '|');
fprintf(fim, '-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(fim, '|%12.0f          |%13.6f | %14.6f |
\n', z(i), int50(i), intj50(i));
end;
fprintf(fim, '-----\n');
fprintf(fim, '\n');
% sudut 55 derajat
fprintf(fim, '\n');
fprintf(fim, 'Data Hasil Simulasi konstanta
dielektrik imaginary (2nk) pada Sudut 55
derajad\n');
fprintf(fim, '\n');
fprintf(fim, '-----\n');
fprintf(fim, '%1s %10s %1s %11s %2s %10s
%3s\n', '|', 'panjang
gelombang', '|', '(2nk)', '|', '(2nk) jendela', '|');
fprintf(fim, '-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(fim, '|%12.0f          |%13.6f | %14.6f |
\n', z(i), int55(i), intj55(i));
end;
fprintf(fim, '-----\n');

```

```

fprintf(fim, ' \n');

%sudut 60 derajat
fprintf(fim, ' \n');
fprintf(fim, 'Data Hasil Simulasi konstanta
dielektrik imaginary pada Sudut 60 derajat\n');
fprintf(fim, ' \n');
fprintf(fim, '-----
-----\n');
fprintf(fim, '%1s %10s %1s %11s %2s %10s
%3s\n', '|', 'panjang
gelombang', '|', '(2nk)', '|', '(2nk) jendela', '|');
fprintf(fim, '-----
-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(fim, '|%12.0f | |%13.6f | %14.6f |
\n', z(i), int60(i), intj60(i));
end;
fprintf(fim, '-----
-----\n');
fprintf(fim, ' \n');
fclose(fim);

%Menyimpan Data n dan k
fout=fopen('Data Hasil Simulasi n dan k.txt', 'wt');
fprintf(fout, ' \n');
fprintf(fout, 'Data Hasil Simulasi Ellipsometry pada
Sudut 50 derajat\n');
fprintf(fout, ' \n');
fprintf(fout, '-----
-----\n');
fprintf(fout, '%1s %8s %1s %5s %6s %5s %5s %6s %5s
%6s %4s\n', '|', 'panjang
gelombang', '|', 'n', '|', 'k', '|', 'n"', '|', 'k"', '|');
fprintf(fout, '-----
-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(fout, '|%12.0f | |%11.6f | %9.6f |
%11.6f | %9.6f |
\n', z(i), n50(i), k50(i), nj50(i), kj50(i));

```

```

end;
fprintf(fout, '-----\n');
fprintf(fout, ' \n');

fprintf(fout, 'Data Hasil Simulasi Ellipsometry pada
Sudut 55 derajat\n');
fprintf(fout, ' \n');
fprintf(fout, '-----\n');
fprintf(fout, '%1s %8s %1s %5s %6s %5s %5s %6s %5s
%6s %4s\n', '|', 'panjang
gelombang', '|', 'n', '|', 'k', '|', 'n"', '|', 'k"', '|');
fprintf(fout, '-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(fout, '|%12.0f      |%11.6f | %9.6f |
%11.6f | %9.6f |
\n', z(i), n55(i), k55(i), nj55(i), kj55(i));
end;
fprintf(fout, '-----\n');
fprintf(fout, ' \n');

fprintf(fout, 'Data Hasil Simulasi Ellipsometry pada
Sudut 60 derajat\n');
fprintf(fout, ' \n');
fprintf(fout, '-----\n');
fprintf(fout, '%1s %8s %1s %5s %6s %5s %5s %6s %5s
%6s %4s\n', '|', 'panjang
gelombang', '|', 'n', '|', 'k', '|', 'n"', '|', 'k"', '|');
fprintf(fout, '-----\n');

for i=1:length(z)
    fprintf(fout, '|%12.0f      |%11.6f | %9.6f |
%11.6f | %9.6f |
\n', z(i), n60(i), k60(i), nj60(i), kj60(i));
end;
fprintf(fout, '-----\n');

```

```

fprintf(fout, '\n');
fprintf(fout, 'keterangan :\n');
fprintf(fout, '      n : indek bias pada sistem
tanpa jendela \n');
fprintf(fout, '      k : koefisien absorpsi pada
sistem tanpa jendela \n');
fprintf(fout, '      n" : indek bias pada sistem
jendela \n');
fprintf(fout, '      k" : koefisien absorpsi pada
sistem jendela \n');
fclose(fout);

```

```

% Penyimpanan data n dan k untuk input program
selanjutnya

```

```

% sudut 50 derajat

```

```

fout=fopen('Data n dan k 50.txt','w');
for i=1:length(n50)
    fprintf(fout, '%8.6f %10.6f\n', n50(i), k50(i));
end
fclose(fout);

```

```

% sudut 55 derajat

```

```

fout=fopen('Data n dan k 55.txt','w');
for i=1:length(n55)
    fprintf(fout, '%8.6f %10.6f\n', n55(i), k55(i));
end
fclose(fout);

```

```

% sudut 60 derajat

```

```

fout=fopen('Data n dan k 60.txt','w');
for i=1:length(n60)
    fprintf(fout, '%8.6f %10.6f\n', n60(i), k60(i));
end
fclose(fout);

```

```

% Plot setiap sudut

```

```

% plot sudut 50

```

```

figure
plot(z, n50, '--*k', 'linewidth', 2)
hold on
plot(z, k50, '--*l', 'linewidth', 2)
hold on

```



```

plot(z,nj50,'--*r','linewidth',2)
hold on
plot(z,kj50,'--*g','linewidth',2)
grid on
title('Pengukuran Konstanta Optik Pada Sudut
50^0','fontweight','bold',...
'fontsize',12);
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold');
ylabel('(n ,
k)','fontweight','bold','fontangle','italic');
legend('n','k','n jendela','k jendela',2);
xlim([200 850]);

% plot sudut 55
figure
plot(z,n55,'--*k','linewidth',2)
hold on
plot(z,k55,'--*', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,nj55,'--*r','linewidth',2)
hold on
plot(z,kj55,'--*g','linewidth',2)
grid on
title('Pengukuran Konstanta Optik Pada Sudut
55^0','fontweight','bold',...
'fontsize',12);
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold');
ylabel('(n ,
k)','fontweight','bold','fontangle','italic');
legend('n','k','n jendela','k jendela',2)
xlim([200 850]);

%plot sudut 60
figure
plot(z,n60,'--*k','linewidth',2)
hold on
plot(z,k60,'--*', 'linewidth',2)
hold on
plot(z,nj60,'--*r','linewidth',2)
hold on

```

```

plot(z,kj60,'--*g','linewidth',2)
grid on
title('Pengukuran Konstanta Optik Pada Sudut
60^0','fontweight','bold',...
'fontsize',12);
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold')
ylabel('(n ,
k)','fontweight','bold','fontangle','italic')
legend('n','k','n jendela','k jendela',2);
xlim([200 850]);

%plot konstanta dielektrik real dan imaginary
figure
plotyy(z,int50,z,ind50);
hold on
plotyy(z,int55,z,ind55);
hold on
plotyy(z,int60,z,ind60);
[ax,h1,h2]=plotyy(z,int50,z,ind50);
set(h1,'LineStyle','--')
set(h2,'LineStyle',':')
set(get(ax(1),'Ylabel'),'String','\epsilon_2','font
size',13);
text(z(2)-25,int50(2),'50^0','fontweight','bold')
text(z(1)-30,int55(1),'55^0','fontweight','bold')
text(z(2)-10,int60(2),'60^0','fontweight','bold')
set(get(ax(2),'Ylabel'),'String','\epsilon_1','font
size',13);
xlabel('Panjang Gelombang','fontweight','bold')
title('\epsilon^sim = \epsilon_1
+i\epsilon_2','fontweight','bold',...
'fontsize',14)
grid on
%-----

```

Lampiran 10.2 Program Model Cauchy

```

%program parameter cauchy indeks bias (n)
clc;
clear all;
z=[250:50:800];
pgel=z*(10^-9);

```

```

l=[400:50:800];
lambda=1*(10^-9);
sdt=input('DATA PADA SUDUT : ');
sudut=(['Data n dan k ',num2str(sdt),'.txt']);
sdt50=fopen(sudut,'r');
data50=fscanf(sdt50,'%f',[2,12]);
data50=data50';
bias=data50(:,1);
n50=data50(4:12,1);

[a1,b1,c1]=pangkat(n50,lambda);
a1; b1; c1;
disp(['pangkat konstanta a : -',num2str(a1)]);
disp(['pangkat konstanta b : -',num2str(b1)]);
disp(['pangkat konstanta c : -',num2str(c1)]);
[a,b,c,mse]=caucyl(a1,b1,c1,n50,lambda);
a; b; c;
disp(['Nilai konstanta a : ',num2str(a)]);
disp(['Nilai konstanta b : ',num2str(b)]);
disp(['Nilai konstanta c : ',num2str(c)]);
disp(['nilai rmse : ',num2str(mse)]);

figure;
n=a*(10^-a1)+b*(10^-b1)./(pgel.^2)+c*(10^-
c1)./(pgel.^4);
plot(z,n,'--r','linewidth',2)
hold on
plot(z,bias,'--*','linewidth',2)
grid on

legend('cauchy model','n',4)
title(['Konstanta Optik n pada Sudut
',num2str(sdt)],'fontweight','bold',...
'fontsize',11);
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold');
ylabel('n','fontweight','bold');
ylim([0 4.5]);
%-----
%program parameter cauchy koefisien absorpsi (k)
clc;
clear all;

```

```

z=[250:50:800];
pgel=z*(10^-9);
l=[400:50:800];
lambda=l*(10^-9);
sdt=input('DATA PADA SUDUT : ');
sudut=(['Data n dan k ',num2str(sdt),'.txt']);
sdt50=fopen(sudut,'r');
data50=fscanf(sdt50,'%f',[2,12]);
data50=data50';
absorbsi=data50(:,2);
k=data50(4:12,2);

```

```

[a1,b1,c1]=pangkat(k,lambda);
a1; b1; c1;
disp(['pangkat konstanta a : ',num2str(a1)]);
disp(['pangkat konstanta b : ',num2str(b1)]);
disp(['pangkat konstanta c : ',num2str(c1)]);
[a,b,c,mse]=caucyabsorbsi(a1,b1,c1,k,lambda);
a; b; c;
disp(['Nilai konstanta a : ',num2str(a)]);
disp(['Nilai konstanta b : ',num2str(b)]);
disp(['Nilai konstanta c : ',num2str(c)]);
disp(['nilai rmse : ',num2str(mse)]);

```

```

figure;
k=a*(10^-a1)+b*(10^-b1)./(pgel.^2)+c*(10^-c1)./(pgel.^4);
plot(z,k,'--r','linewidth',2.5);
hold on
plot(z,absorbsi,'--*', 'linewidth',2)
grid on
legend('cauchy model','k',0)
title(['Konstanta Optik k pada Sudut ',num2str(sdt)], 'fontweight','bold',...
'fontsize',11);
xlabel('Panjang Gelombang (nm)', 'fontweight','bold');
ylabel('k', 'fontweight','bold');
%-----
function [a1,b1,c1]=pangkat(n,lambda);
i=1;
nk=length(lambda);

```

```

m=zeros(10,4);
for a1=0:1:10
    for b1=0:1:30
        for c1=0:1:37
            i;
            nc=(10^-a1)+(10^-b1)./(lambda.^2)+(10^-
c1)./(lambda.^4);
            mse=sqrt(sum(((n-nc).^2)./(nk)));
            m(i,1)=a1;
            m(i,2)=b1;
            m(i,3)=c1;
            m(i,4)=mse;
            i=i+1;
        end
    end
end
mse=m(:,4);
error=min(mse);
no=find(mse==error);
a1=m(no,1);
b1=m(no,2);
c1=m(no,3);
%-----
%program mencari nilai konstanta a,b dan c pada n
function [a,b,c,mse]=caucyl1(a1,b1,c1,n,lambda);

selisih=10^(a1-1);
batas=max(n)*10^(abs(a1));
i=1;
nk=length(n);
m=zeros(10,4);
for a=0:selisih:batas
    for b=0:.01:1
        for c=0:.01:1
            i;
            nc=a*(10^-a1)+b*(10^-
b1)./(lambda.^2)+c*(10^-c1)./(lambda.^4);
            mse=sqrt(sum(((n-nc).^2)./(nk)));
            m(i,1)=a;
            m(i,2)=b;
            m(i,3)=c;
            m(i,4)=mse;
            i=i+1;
        end
    end
end

```

```

end
end
end
m;
mse=m(:,4);
errorx=min(mse);
no=find(mse==errorx);
a=m(no,1);
b=m(no,2);
c=m(no,3);
mse=errorx;
%-----
%program mencari nilai konstanta a,b dan c pada k
function
[a,b,c,mse]=caucyabsorbsi(a1,b1,c1,k,lambda);
i=1;
selisih=10^(a1-1);
batas=max(k)*10^(abs(a1));
nk=length(k);
m=zeros(10,4);
for a=0:selisih:Batas
    for b=0:.1:10
        for c=0:.1:10
            i;
            kc=a*(10^-a1)+b*(10^-
b1)./(lambda.^2)+c*(10^-c1)./(lambda.^4);
            mse=sqrt(sum(((k-kc).^2)./(nk)));
            m(i,1)=a;
            m(i,2)=b;
            m(i,3)=c;
            m(i,4)=mse;
            i=i+1;
        end
    end
end
end
m;
mse=m(:,4);
error=min(mse);
no=find(mse==error);
a=m(no,1);
b=m(no,2);
c=m(no,3);
mse=error;

```

```

%-----
Lampiran 10. 3 Pengujian Model Cauchy
% Program uji coba model dispersi Cauchy
clc;
clear all;
z=[250:50:800];

% data input
fn50=fopen('Data n dan k 50.txt','r');
datan50=fscanf(fn50,'%f',[2 12]);
datan50=datan50';
n50=datan50(:,1);
k50=datan50(:,2);

fn55=fopen('Data n dan k 55.txt','r');
datan55=fscanf(fn55,'%f',[2 12]);
datan55=datan55';
n55=datan55(:,1);
k55=datan55(:,2);

fn60=fopen('Data n dan k 60.txt','r');
datan60=fscanf(fn60,'%f',[2 12]);
datan60=datan60';
n60=datan60(:,1);
k60=datan60(:,2);

%range panjang gelombang yang diujikan 1nm
gl=[250:1:800];
pg=gl*10.^-9;

%model Cauchy yang dihasilkan
%n sudut 50
figure
nc50=3.4+((6*10^-14)./pg.^2);
plot(z,n50,'--*','linewidth',2);
hold on
plot(gl,nc50,'--r','linewidth',2)
grid on
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)','fontweight','bold')
title('Konstanta Optik n pada Sudut
50^0','fontweight','bold');

```

```

legend('n pengukuran', 'cauchy model', 4);
ylabel('n', 'fontweight', 'bold');

```

```

%n sudut 55
figure
nc55=3.5+0./pg.^2;
plot(z,n55,'--*', 'linewidth', 2);
hold on
plot(gl,nc55,'--r', 'linewidth', 2)
grid on
title('Konstanta Optik n pada Sudut
55^0', 'fontweight', 'bold');
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)', 'fontweight', 'bold')
legend('n pengukuran', 'cauchy model', 4);
ylabel('n', 'fontweight', 'bold');

```

```

%n sudut 60
figure
nc60=3.5+0./pg.^2;;
plot(z,n60,'--*', 'linewidth', 2);
hold on
plot(gl,nc60,'--r', 'linewidth', 2);
grid on
ylim([0 4]);
title('Konstanta Optik n pada Sudut
60^0', 'fontweight', 'bold');
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)', 'fontweight', 'bold')
legend('n pengukuran', 'cauchy model', 4);
ylabel('n', 'fontweight', 'bold');

```

```

% k pada sudut 50
figure
kc50=0.6+((2.7*10.^-13)./(pg.^2))+((1.8*10^-
26)./(pg.^4));
plot(gl,kc50,'--r', 'linewidth', 2);
hold on
plot(z,k50,'--*', 'linewidth', 2);
grid on
title('Konstanta Optik k pada Sudut
50^0', 'fontweight', 'bold');

```



```
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)', 'fontweight', 'bold')
legend('cauchy model', 'k pengukuran', 1);
ylabel('k', 'fontweight', 'bold');
```

```
% k pada sudut 55
```

```
figure
kc55=0.5+((2.8*10.^-13) ./ (pg.^2))+((0.8*10^-
26) ./ (pg.^4));
plot(gl, kc55, '--r', 'linewidth', 2);
hold on
plot(z, k55, '--*', 'linewidth', 2);
grid on
title('Konstanta Optik k pada Sudut
55^0', 'fontweight', 'bold');
legend('cauchy model', 'k pengukuran', 1);
ylabel('k', 'fontweight', 'bold');
```

```
% k pada sudut 60
```

```
figure
kc60=0.5+((2.9*10.^-13) ./ (pg.^2));
plot(gl, kc60, '--r', 'linewidth', 2);
hold on
plot(z, k60, '--*', 'linewidth', 2);
grid on
title('Konstanta Optik k pada Sudut
60^0', 'fontweight', 'bold');
xlabel('Panjang Gelombang
(nm)', 'fontweight', 'bold')
legend('cauchy model', 'k pengukuran', 1);
ylabel('k', 'fontweight', 'bold');
```

```
%perhitungan akar kuadrat kesalahan terkecil.
```

```
b=50:50:550;
c=150:50:550;
disp('Perhitungan Pada n');
%for n
%sudut 50
nm50=nc50(b)';
nmc50=nc50(c)';
serror50=(nc50(1)-n50(1))^2;
```

```

rmse50=sqrt(sum((nm50-
n50(2:12,1)+serror50).^2)./12);
rmsec50=sqrt(sum((nmc50-n50(4:12,1)).^2)./12);
disp(['Rmse pada semua range panjang gelombang
untuk sudut 50 :',num2str(rmse50)]);
disp(['Rmse pada range dispersi normal (400-
800nm):',num2str(rmsec50)]);
disp(' ');

```

```

% sudut 55
nm55=nc55(b)';
nmc55=nc55(c)';
serror55=(nc55(1)-n55(1))^2;
rmse55=sqrt(sum((nm55-
n55(2:12,1)+serror55).^2)./12);
rmsec50=sqrt(sum((nmc55-n55(4:12,1)).^2)./12);
disp(['Rmse pada semua range panjang gelombang
untuk sudut 55 :',num2str(rmse55)]);
disp(['Rmse pada range dispersi normal (400-
800nm):',num2str(rmsec50)]);
disp(' ');

```

```

% sudut 60
nm60=nc60(b)';
nmc60=nc60(c)';
serror60=(nc60(1)-n60(1))^2;
rmse60=sqrt(sum((nm60-
n60(2:12,1)+serror60).^2)./12);
rmsec60=sqrt(sum((nmc60-n60(4:12,1)).^2)./12);
disp(['Rmse pada semua range panjang gelombang
untuk sudut 60 :',num2str(rmse60)]);
disp(['Rmse pada range dispersi normal (400-
800nm):',num2str(rmsec60)]);
disp(' ');

```

```

disp('Perhitungan Pada k');
%for k
% sudut 50
km50=kc50(b)';
kmc50=kc50(c)';
serror50=(kc50(1)-k50(1))^2;

```

```

rmsek50=sqrt(sum((km50-
k50(2:12,1)+serror50).^2)./12);
rmsekc50=sqrt(sum((kmc50-k50(4:12,1)).^2)./12);
disp(['Rmse pada semua range panjang gelombang
untuk sudut 50 :',num2str(rmsekc50)]);
disp(['Rmse pada range dispersi normal (400-
800nm):',num2str(rmsekc50)]);
disp(' ');

```

```

%sudut 50
km55=kc55(b)';
kmc55=kc55(c)';
serror55=(kc55(1)-k55(1))^2;
rmsek55=sqrt(sum((km55-
k55(2:12,1)+serror55).^2)./12);
rmsekc55=sqrt(sum((kmc55-k55(4:12,1)).^2)./12);
disp(['Rmse pada semua range panjang gelombang
untuk sudut 55 :',num2str(rmsekc55)]);
disp(['Rmse pada range dispersi normal (400-
800nm):',num2str(rmsekc55)]);
disp(' ');

```

```

%sudut 60
km60=kc60(b)';
kmc60=kc60(c)';
serror60=(kc60(1)-k60(1))^2;
rmsek60=sqrt(sum((km60-
k60(2:12,1)+serror50).^2)./12);
rmsekc60=sqrt(sum((kmc60-k60(4:12,1)).^2)./12);
disp(['Rmse pada semua range panjang gelombang
untuk sudut 60 :',num2str(rmsekc60)]);
disp(['Rmse pada range dispersi normal (400-
800nm):',num2str(rmsekc60)]);
disp(' ');
fclose(fn50);
fclose(fn55);
fclose(fn60);

```

Lampiran 10.4 Program Koreksi Jendela

```

%program koreksi jendela

```

```

clc;

```

```

clear all;
z=[250:50:800];
sdt=input('DATA PADA SUDUT : ');
sdt=([ 'DATA_SUDUT_', num2str(sdt), '.txt' ]);
t=sdt*pi/180;
source=fopen(sdt, 'r');
data=fscanf(source, '%f', [4, 12]);
data=data';
x=data(:, 4)*pi/180;      %delta
xj=data(:, 2)*pi/180;
yj=data(:, 1)*pi/180;   %psi
y=data(:, 3)*pi/180;
[z, I]=intensitas(x, y);
[z, Ij]=intensitas(xj, yj);
d=faktorretardasi(xj, yj, t, z, I);
[z, Ikj]=intensitasjendela(xj, yj, t, d);

%plot grafik
plot(z, I, '-*', 'linewidth', 2)
hold on
plot(z, Ij, '-*r', 'linewidth', 2)
hold on
plot(z, Ikj, '--k', 'linewidth', 2)
grid on
legend('Io', 'Ij', 'Ikj', 1)
title(['PENGUKURAN INTENSITAS PADA SUDUT ', num2str(sdt)], ...
      'fontweight', 'bold');
xlabel('Panjang Gelombang (nm)', 'fontweight', 'bold');
ylabel('Watt/m^2', 'fontweight', 'bold');
fclose(source);

%error
error=(abs(Ikj-I) ./ I) * 100;

intensitas=fopen(['Hasil Permodelan Intensitas Pada Sudut ', num2str(sdt), '.txt'], 'w');
fprintf(intensitas, 'Data Hasil Permodelan Intensitas\n');
fprintf(intensitas, '-----\n');

```

```

fprintf(intensitas, '|Panjang Gelombang(nm) | I
| Ij | Ikj |percent error|\n');
fprintf(intensitas, '-----
-----\n');
for i=1:length(z)
    fprintf(intensitas, '|%13.0f |%11.6f |
%9.6f | %11.6f | %10.7f
|\n', z(i), I(i), Ij(i), Ikj(i), error(i));
end;
fprintf(intensitas, '-----
-----\n');
fprintf(intensitas, ' \n');
fclose(intensitas)

```

Catatan :

- Pada penulisan program yang sampai berganti baris diberi tanda hubung berupa titik 3 (...)

Contoh :

```

for i=1:length(z)
fprintf(intensitas, '|%13.0f |%11.6f |
%9.6f | %11.6f | %10.7f
|\n', z(i), I(i), Ij(i), Ikj(i), error(i));

```

Menjadi :

```

for i=1:length(z)
fprintf(intensitas, '|%13.0f |%11.6f...
| %9.6f | %11.6f | %10.7f ...
|\n', z(i), I(i), Ij(i), Ikj(i), error(i));

```

- Kalimat yang berwarna hijau berupa keterangan program sehingga tidak tereksekusi ketika program dijalankan. Hanya berfungsi penjelas program jadi dapat tidak ditulis pada M-file.