

Metode Rekonstruksi Profil Indeks Bias Pandu Gelombang Optik dengan Pengolahan Intensitas Pola Medan Dekat

^aMuljono, ^bJohn E. Batubara, ^cHery Susanto, ^dHenri P. Uranus

Abstract

Refractive-index profile of optical waveguides, whether they are planar, channel, or cylindrical, can be determined by analyzing the near-field pattern of the waveguides. A mathematical model, the inverse Helmholtz equation, is derived in order to use these data to reconstruct the refractive-index profile of waveguide under consideration. For this nondestructive method, the measured near-field profile is preprocessed by a computer program coded in Delphi 3.0. The process procedure includes signal processing of the measured intensity profile by means of gamma correction, background noise subtraction, FIR digital filtering using several window functions, cubic-spline approximation, nearest neighbor averaging technique, and curve-fitting in order to reduce noises. The results are used to reconstruct the refractive index profile of the waveguide. The method is demonstrated in the determination of the refractive-index profile of a channel waveguide fabricated with *Annealed Proton Exchange (APE) on Z-cut Y-propagating LiNbO₃* (Lithium Niobate) substrate.

Keywords: refractive index profile, near-field, gamma correction, background noise subtraction, FIR digital filter, lithium niobate, annealed proton exchange

I. PENDAHULUAN

Dewasa ini, kemajuan teknologi memungkinkan fabrikasi chip optoelektronika dengan rugi daya yang rendah, bentuk yang lebih kompak, keandalan yang tinggi, ukuran yang kecil, dan biaya yang rendah bagi keperluan memadukan fungsi-fungsi elektronika dan optik dalam sebuah rangkaian. Pada sistem komunikasi optik, banyak komponen optik yang dibuat dalam struktur pandu gelombang. Di Indonesia,

^a Dosen Tetap pada Jurusan Teknik Industri, FTI-UPH

^b Dosen Tetap pada Jurusan Teknik Elektro, FTI-UPH

^c Alumni Jurusan Teknik Elektro, FTI-UPH

^d Dosen Tidak Tetap pada Jurusan Teknik Elektro, FTI-UPH

rekayasa optoelektronika dimulai sejak tahun 1977 dan telaah mengenai fabrikasi dan karakterisasi komponen-komponen elektronika sedang mendapat perhatian yang serius untuk dikembangkan, termasuk di dalamnya adalah penelitian mengenai pandu gelombang optik [1]. Pengembangan teknologi komponen-komponen optik sendiri mencakup teknik fabrikasi, aplikasi, dan karakterisasinya. Salah satu karakteristik yang penting dari sebuah pandu gelombang optik adalah profil indeks bias. Profil indeks bias sangat diperlukan untuk mengetahui dan menurunkan sifat-sifat lain dari pandu gelombang tersebut, seperti rugi-rugi (*insertion loss*), panjang gelombang *cut off* (λ_c) dari berbagai moda propagasi, dan distribusi intensitas dari tiap-tiap moda. Profil indeks bias dapat dimodifikasi untuk menekan rugidaya dengan menggunakan λ_c tertentu dan mengoptimalkan profil dari modanya dengan mengubah beberapa parameter dalam proses fabrikasi pandu gelombang tersebut. Semakin akurat pengukuran dan perhitungan profil indeks bias, maka akan diperoleh pula ketepatan dalam penghitungan karakteristik lain pandu gelombang tersebut[2].

I.1. Metode Karakterisasi Profil Indeks Bias

Karakterisasi untuk menentukan profil indeks bias pandu gelombang melalui pengolahan citra medan dekat merupakan salah satu cara dari sekian banyak cara yang digunakan, seperti *reflectivity measurement* [4], *surface plasmon resonance* [5], *incoherent light transmission* [6], *prism coupling* [5],[7], dan *measurement of surface topography after chemical etching* [8]. Teknik pengukuran pola medan dekat yang paling banyak dipergunakan saat ini adalah pengukuran dengan *prism coupler* dengan pendekatan metode WKB yang hanya dapat dipergunakan untuk merekonstruksi profil indeks bias pandu gelombang planar saja [9],[10]. Untuk perhitungan yang lebih teliti, maka metode WKB memerlukan jumlah moda yang relatif banyak sehingga untuk keperluan tersebut dipergunakan sumber cahaya dengan panjang gelombang yang lebih rendah dari panjang gelombang operasinya (*operating wavelength*), sehingga apabila pandu gelombang yang dikarakterisasi menggunakan sumber cahaya dengan panjang gelombang yang tidak tepat, maka akan menghasilkan profil indeks bias yang tidak benar pula. Teknik pengukuran lain adalah *reflectivity measurement of angular polished substrates* [11] yang dioperasikan pada panjang gelombang operasi, namun metode ini memiliki kekurangan, yaitu dapat merusak pandu gelombang yang dikarakterisasinya.

Karakterisasi profil indeks bias dari serat optik moda tunggal (*single mode fiber*) melalui analisa pola medan jauh juga telah dipergunakan sebelumnya melalui teknik pencocokan kurva (*curve fitting*) dengan fungsi Gauss-Laugerre, namun metode ini sensitif terhadap bising [12].

Dari sekian banyak cara yang telah dipergunakan, masing-masing memiliki beberapa kelemahan, yaitu resolusi yang sangat terbatas, memerlukan alat khusus, merusak pandu gelombang itu sendiri, dan kesulitan dalam memperoleh kondisi pengukuran yang dikehendaki. Penulis akan memaparkan dan menelaah suatu metode yang dapat digunakan untuk merekonstruksi profil indeks bias suatu pandu gelombang dari pengolahan profil intensitas melalui pengukuran pola medan dekat. Hal ini tidak akan merusak pandu gelombang, karena dilakukan tanpa melakukan kontak langsung atau memberikan perlakuan fisik terhadap pandu gelombang itu. Kelebihan lain dari metode ini adalah dapat dipergunakan untuk melakukan karakterisasi pandu gelombang moda tunggal pada panjang gelombang operasinya melalui analisa moda utama (*fundamental mode*) citra medan dekatnya, set-up pengukuran yang lebih mudah dibandingkan set-up pengukuran metode lain yang memerlukan ketelitian ekstra dalam mengatur posisi peralatan, dan dapat diterapkan untuk merekonstruksi berbagai struktur pandu gelombang.

I.2. Prinsip-prinsip Rekonstruksi Profil Indeks Bias

Profil intensitas yang telah diukur melalui pengukuran pola medan dekat mengandung kesalahan pengukuran (*measurement-system errors*). Kesalahan ini dapat disebabkan oleh banyak faktor, di antaranya adalah bising (*noise*), kesalahan kuantisasi (*quantization error*), *defocusing* dan sifat nonlinear kamera. Bising bisa diakibatkan oleh bising dari kamera, yang dapat diinterpretasikan karena fluktuasi tingkat kecerahan gambar (*brightness*), sedangkan kesalahan kuantisasi disebabkan saat digitalisasi dari sinyal analog gambar. *Defocusing* disebabkan karena citra medan dekat yang diproyeksikan tidak tepat fokus akibat kecerobohan dalam *adjustment* set-up pengukuran. Sifat kamera yang tidak linear karena pemakaian panjang gelombang yang berbeda-beda akan mengakibatkan kesalahan pula. Untuk meningkatkan *signal to noise ratio* (S/N ratio) dari citra medan dekat terukur yang masih mengandung bising dan kesalahan pengukuran tersebut, maka akan dilakukan pengolahan citra, yaitu pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma. Bising pada citra medan dekat yang ditangkap (disebabkan oleh adanya cahaya *background* dari obyek yang diukur, adanya arus gelap (*dark current*) dari detektor

kamera, dan timbulnya bising dari rangkaian elektronik kamera dan kartu penangkap gambar) akan dikurangi dengan metode pengurangan bising latar belakang. Response kamera yang tidak linear terhadap intensitas cahaya yang ditangkapnya akan dikoreksi dengan metode koreksi gamma [14].

Data hasil pengukuran pola medan dekat dari proses pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma masih mengandung bising dalam representasi frekuensi tinggi, hal ini dapat terlihat dari hasil rekonstruksi profil indeks bias sampel pandu gelombang menggunakan inversi persamaan Helmholtz yang tidak sesuai dengan profil indeks bias pandu gelombang sebenarnya [15]. Untuk meminimalisasi bising yang masih ada tersebut, maka akan dilakukan pengolahan citra menggunakan *Low Pass Filter Digital FIR* dengan fungsi window melalui penerapan *Fast Fourier Transform (FFT)* [2], pendekatan spline kubik, teknik rata-rata tetangga terdekat, dan pencocokan kurva. Desain dan implementasi FIR diterapkan melalui penggunaan FFT untuk melakukan transformasi data dari daerah ruang ke frekuensi ruang. Metode ini selanjutnya akan dipergunakan untuk melakukan rekonstruksi profil indeks bias pada data hasil pengukuran pola medan dekat sebuah pandu gelombang kanal, hasil fabrikasi dengan metode *Annealed Proton Exchange (APE)* pada substrat LiNbO_3 (Lithium Niobate) potongan-Z arah propagasi-Y [3], yang diolah melalui program komputer dalam bahasa pemrograman Delphi 3.0.

I.3. Penurunan Rumus Inversi Persamaan Helmholtz

Pada *weakly guiding waveguide*, yang memiliki perubahan indeks bias sangat kecil, maka distribusi medan pada pandu gelombang dielektrik dua dimensi dapat direpresentasikan dengan persamaan gelombang skalar (persamaan Helmholtz):

$$\nabla_t^2 E(x, y) + (n^2(x, y)k^2 - \beta^2)E(x, y) = 0 \quad (1)$$

dengan ∇_t adalah operator Nabla, $k=2\pi/\lambda$ adalah bilangan gelombang, $n(x, y)$ adalah indeks bias, dan β adalah konstanta propagasi.

Profil indeks bias dapat dengan mudah diturunkan dari Pers. 1 [16]:

$$n(x, y) \frac{k}{\beta} = \left[1 - \frac{\nabla_t^2 E(x, y)}{E(x, y)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Pers. 2 bagian ruas kanan memiliki bentuk yang menyerupai bentuk $(1-x)^{1/2}$, sehingga dapat dilakukan pendekatan dengan deret MacLaurin, yaitu:

$$n(x, y) \frac{k}{\beta} = 1 - \frac{1}{2} \frac{\nabla_i^2 E(x, y)}{\beta^2 E(x, y)} - \frac{1}{4} \left[\frac{\nabla_i^2 E(x, y)}{\beta^2 E(x, y)} \right]^2 - \frac{3}{8} \left[\frac{\nabla_i^2 E(x, y)}{\beta^2 E(x, y)} \right]^3 - \dots \quad (3)$$

Dengan menganggap suku ke-2 dan seterusnya sangat kecil dibandingkan suku sebelumnya, maka akan diperoleh rumus pendekatan sebagai berikut:

$$n(x, y) \cong \frac{\beta}{k} - \frac{1}{2} \frac{\nabla_i^2 E(x, y)}{\beta k E(x, y)} \quad (4)$$

Kemudian diperkenalkan persamaan indeks bias dalam dua dimensi:

$$n(x, y) = n_s + \Delta n(x, y) \quad (5)$$

dengan n_s = indeks bias substrat dan $\Delta n(x, y)$ = perubahan nilai indeks bias. Karena besar $n_{\text{eff}} = \beta/k$ sangat mendekati nilai n_s pada *weakly guiding waveguide*, maka diperoleh pendekatan bahwa $n_s \cong \beta/k$. Dengan membandingkan Pers. 4 dan Pers. 5, selanjutnya mensubstitusikan nilai $\beta \cong n_s k$ maka akan didapat inversi persamaan gelombang skalar atau inversi persamaan Helmholtz sebagai berikut:

$$\Delta n(x, y) \cong - \frac{1}{2} \frac{\nabla_i^2 E(x, y)}{n_s k^2 E(x, y)} \quad (6)$$

Nilai intensitas adalah sebanding dengan kuadrat dari medan listrik, maka diperoleh $I(x, y) \approx E^2(x, y)$. Dalam hal ini kita mengasumsikan bahwa tidak ada beda fasa pada medan yang kita ukur saat dipandu melalui pandu gelombang, atau beda fasanya sangat kecil sehingga dapat kita abaikan. Persamaan dua dimensi indeks bias dari distribusi intensitas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\Delta n(x, y) \cong - \frac{1}{2} \frac{\nabla_i^2 \sqrt{I(x, y)}}{n_s k^2 \sqrt{I(x, y)}} \quad (7)$$

Selanjutnya dengan metode pemisahan variabel, Pers. 8 dapat diubah menjadi:

$$\Delta n(x, y) \cong - \frac{1}{2 n_s k^2} \left[\frac{1}{\sqrt{I(x)}} \frac{\partial^2 \sqrt{I(x)}}{\partial x^2} + \frac{1}{\sqrt{I(y)}} \frac{\partial^2 \sqrt{I(y)}}{\partial y^2} \right] \quad (8)$$

Untuk persamaan satu dimensi, maka tinggal membuat salah satu variabel menjadi tetap (dalam fungsi x saja atau fungsi y saja):

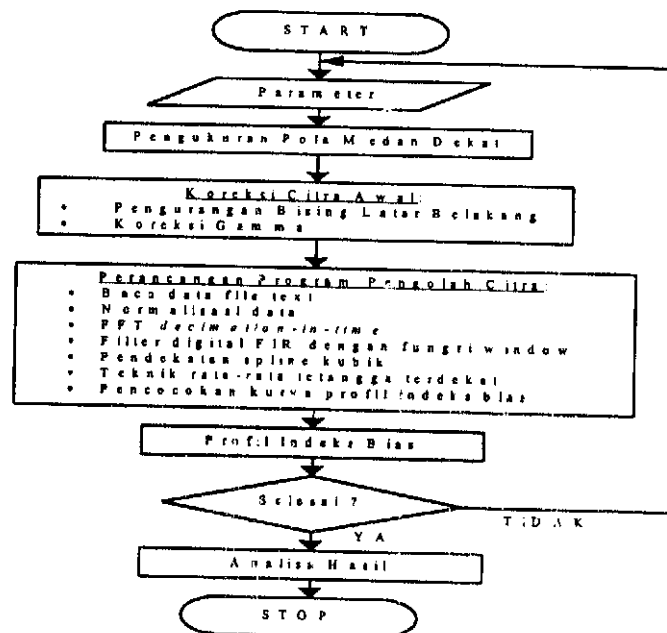
$$\Delta n(x) \cong -\frac{1}{2n_0 k^2 \sqrt{I(x)}} \left[\frac{\partial^2 \sqrt{I(x)}}{\partial x^2} \right] \quad (9)$$

Sehingga kita dapat memecahkan turunan kedua Pers. 9 dengan metode numerik dengan ketelitian yang tinggi dengan nilai beda langkah $\partial x = \Delta x = 1$ sebagai berikut [17]:

$$\frac{\partial^2 \sqrt{I(x)}}{\partial x^2} \cong \frac{-\sqrt{I(x+2)} + 16\sqrt{I(x+1)} - 30\sqrt{I(x)} + 16\sqrt{I(x-1)} - \sqrt{I(x-2)}}{12} \quad (10)$$

II. PERANCANGAN PROGRAM PENGOLAHAN CITRA MEDAN DEKAT

Pemrosesan profil intensitas selanjutnya akan direalisasikan dalam suatu program pengolah citra.



Gambar 1.
Diagram alir rekonstruksi profil indeks bias

II.1. Pengurangan Bising Latar Belakang

Pengurangan bising latar belakang dilakukan dengan menghitung daya untuk daerah yang didefinisikan sebagai gelap, lalu menghitung intensitas bising rata-rata per pixel (yang nantinya akan dikurangkan dari nilai keabuan tiap pixel) dengan persamaan berikut [14]:

$$I_n = \frac{P_{dark}}{w_{dark} \times h_{dark}} \quad (11)$$

dimana

- I_n : intensitas bising rata-rata untuk setiap pixel
- P_{dark} : daya optik terukur daerah gelap tanpa pengolahan
- w_{dark} : lebar daerah gelap
- h_{dark} : tinggi daerah gelap

II.2. Koreksi Gamma

Kamera yang digunakan untuk menangkap citra medan dekat mempunyai response yang tidak linear terhadap intensitas cahaya yang ditangkapnya. Untuk memperoleh hasil pengukuran daya optik yang akurat, maka nilai keabuan dari setiap pixel pada citra yang ditangkap perlu diskalakan kembali sebagai koreksi terhadap non linearitas kamera. Koreksi gamma tersebut dilakukan dengan memangkatkan tingkat keabuan ternormalisasi dari tiap pixel yang ada di antara tingkat keabuan terendah dan tingkat keabuan tertinggi dengan $1/\gamma$ sebagai berikut [14]:

$$G_{gc}(x,y) = g_m [g'(x,y)/g_m]^{1/\gamma} \quad (12)$$

dimana

- $g_{gc}(x,y)$: nilai keabuan pixel (x,y) setelah dikoreksi gamma
- g_m : nilai keabuan maksimum (255)
- $g'(x,y)$: nilai keabuan pixel(x,y) sesudah dikurangi bising tetapi belum dikoreksi gamma.

II.3. Filter Digital FIR dengan Fungsi Window

Filter Digital FIR dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad \text{dan} \quad H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)e^{-j\omega n} \quad (13)$$

Hal paling mudah membuat filter FIR adalah dengan memotong tanggapan barisan impuls filter IIR. Jika $h_d(n)$ merepresentasikan tanggapan impuls dari IIR yang dikehendaki, maka tanggapan impuls filter FIR adalah [18]:

$$h(n) = \begin{cases} h_d(n) & \text{untuk } 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{untuk lainnya} \end{cases} \quad (14)$$

Dan umumnya $h(n)$ dapat diinterpretasikan sebagai hasil perkalian antara $h_d(n)$ dengan fungsi window $w(n)$, yaitu:

$$h(n) = h_d(n) \cdot w(n) \quad (15)$$

Fungsi window yang sering digunakan dalam perancangan filter FIR adalah [18]:

1. Window persegi (*Rectangular Window*)

$$w_R(n) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{untuk yang lainnya} \end{cases} \quad (16)$$

2. Window Bartlett

$$w_B(n) = \begin{cases} \frac{2n}{N-1} & \text{untuk } 0 \leq n \leq \frac{N-1}{2} \\ 2 - \frac{2n}{N-1} & \text{untuk } \frac{N-1}{2} < n \leq N-1 \end{cases} \quad (17)$$

3. Window Hanning

$$w_{Han}(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right] \quad \text{untuk } 0 \leq n \leq N-1 \quad (18)$$

4. Window Hamming

$$w_{Ham}(n) = 0,54 - 0,46 \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \quad \text{untuk } 0 \leq n \leq N-1 \quad (19)$$

5. Window Blackman

$$w_B(n) = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \text{ untuk } 0 \leq n \leq N-1 \quad (20)$$

6. Window Kaiser

Window Kaiser merupakan window yang dapat diatur sesuai dengan kehendak perancang untuk memperoleh hasil filter yang optimum. Fungsi window Kaiser didefinisikan sebagai:

$$w_K(n) = \frac{I_0 \left[\omega_0 \left[\left(\frac{N-1}{2} \right)^2 - \left(n - \frac{N-1}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \right]}{I_0 \left[\omega_0 \left(\frac{N-1}{2} \right) \right]} \text{ untuk } 0 \leq n \leq N-1 \quad (21)$$

dengan I_0 adalah fungsi Bessel orde nol yang dimodifikasi.

Desain dan implementasi FIR diterapkan dengan penggunaan FFT. Perancangan filter adalah menentukan spesifikasi dari *low pass filter* dengan mengetahui data dalam frekuensi ruang setelah penerapan prosedur FFT. Batas frekuensi dinyatakan dalam besaran K_c (*cut-off*) dan K_r (*stop band*) dalam satuan dB. Untuk mentransformasikan fungsi diskrit dari daerah waktu/ daerah ruang ke daerah frekuensi/ frekuensi ruang, maka dipergunakan transformasi Fourier diskrit (*Discrete Fourier Transform/DFT*). DFT dapat dituliskan sebagai berikut [19]:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jk\omega_0 n} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \text{ untuk } k = 0 \leq n \leq N-1 \quad (22)$$

dengan $\omega_0 = 2\pi/N$, dan $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$, W adalah fungsi bobot bernilai kompleks.

Algoritma DFT kurang efisien dan memakan waktu yang lama untuk transformasi sejumlah data yang cukup besar. Selanjutnya dikembangkan suatu algoritma baru yang lebih cepat, dinamakan FFT, untuk melakukan transformasi sinyal diskrit dari daerah ruang ke frekuensi ruang maupun sebaliknya. Kecepatan FFT berangkat dari kenyataan bahwa algoritma tersebut memanfaatkan keperiodikan dan kesimetrian fungsi-fungsi trigonometri. Kalau DFT memerlukan N^2 operasi perkalian kompleks dan $N(N-1)$ operasi penjumlahan kompleks, maka FFT dapat hanya memerlukan $N^2 \log N$ (tanpa *butterfly*) dan $N/2^2 \log N$ operasi (dengan *butterfly*) [18]. Ide dasar FFT adalah DFT dengan panjang N dipecah menjadi DFT lain yang lebih kecil secara beruntun atau sebaliknya. Ada dua metode algoritma untuk melakukan FFT, yaitu spesifikasi daerah waktu/ daerah ruang (*time-domain*

specification) dan spesifikasi daerah frekuensi/ frekuensi ruang (frequency-domain specification).

Prosedur desain FIR *low pass filter* adalah sebagai berikut:

1. Menentukan tipe fungsi window yang akan dipergunakan berdasarkan Tabel 1 dan parameter untuk menentukan batas redaman dan batas frekuensi *cut off*.

Tabel 1. Desain *low pass filter* FIR [18]

Tipe Window	Side Lobe [dB]	Lebar Transisi	Minimum Kr [dB]
Rectangular	-13	$4\pi/N$	-21
Bartlett	-25	$8\pi/N$	-25
Hanning	-31	$8\pi/N$	-44
Hamming	-41	$8\pi/N$	-53
Blackman	-57	$12\pi/N$	-74

2. Menentukan jumlah titik pada window untuk memenuhi lebar transisi dari tipe yang digunakan. N disebut sebagai panjang filter dan bernilai ganjil.

$$N \geq \frac{k \cdot 2\pi}{(\omega_r - \omega_c)} \quad \text{dipilih N ganjil} \quad (23)$$

3. Menentukan tanggapan impuls diskrit:

$$h(n) = \frac{\sin[\omega_c(n - \alpha)]}{\pi(n - \alpha)} \cdot w(n) \quad (24)$$

$\alpha = (N-1)/2$ dan α adalah unit penundaan filter

4. Membuat tanggapan frekuensi $H(e^{j\omega})$

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j\omega\alpha} \left\{ h(\alpha) + \sum_{n=0}^{\frac{N-1}{2}} 2h(n) \cos[\omega(n - \alpha)] \right\} \quad (25)$$

Jika stop band pada ω_c tidak terpenuhi, mulailah iterasi langkah ke-4 dengan nilai ω_c yang baru untuk mendapatkan tanggapan frekuensi yang diharapkan dengan hasil optimal. Setelah tanggapan frekuensi terpenuhi, dicoba untuk mengurangi panjang filter (nilai N). Kalau tidak dimungkinkan lagi memperkecil nilai N, berarti desain filter $h(n)$ telah selesai.

II.4. Pendekatan Spline Kubik

Pemakaian spline kubik dimaksudkan untuk memperhalus data profil intensitas setelah dilakukan filter digital FIR. Tujuan spline kubik adalah menurunkan polinom orde ketiga untuk tiap selang diantara simpul, seperti dalam [16]:

$$f_i = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i \quad \text{untuk } i=0,1,2,\dots,n \quad (26)$$

terdapat n selang dan n+1 titik data, sehingga harus dihitung 4n konstanta.

II.5. Teknik Rata-rata Tetangga Terdekat

Teknik rata-rata tetangga terdekat digunakan untuk lebih memperhalus data profil intensitas dengan membuang bising yang masih ada setelah dilakukan filter digital FIR dan pendekatan spline kubik. Ukuran skala pixel CCD yang dipergunakan dibawah resolusi optik memungkinkan teknik memperhalus kurva secara numerik yang diterapkan pada titik data lokal sekitarnya. Teknik memperhalus kurva ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$f_i = \begin{cases} \frac{1}{w} \sum_{j=0}^{w-1} I_{i+j-w/2} & \text{untuk } i = \frac{w}{2}, \dots, N-w \\ I_i & \text{untuk lainnya} \end{cases} \quad (27)$$

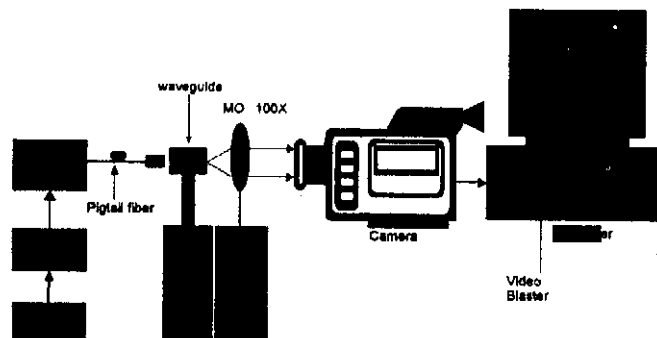
dengan N adalah jumlah titik data, dan w (window) adalah jumlah elemen pixel yang berdekatan terhadap rata-rata elemen i dalam data dan bernilai genap. Pemilihan ukuran w dipilih untuk lebar 4 elemen pixel yang masih di bawah batas resolusi optik saat pengukuran pola medan dekat.

II.6. Pencocokan Kurva

Hasil profil indeks bias akan dilakukan pencocokan kurva dengan galat RMS terkecil dengan beberapa kurva profil indeks bias yang umum ditemui, seperti profil Gaussian (*Gaussian profile*), profil parabola (*parabolic profile*), profil $1/\cosh^2$ (*$1/\cosh^2$ profile*), dan profil eksponensial (*exponential profile*). Metode regresi tak linear (*nonlinear regression*) akan dipergunakan karena fungsi yang akan dicocokkan memiliki ketergantungan yang tidak linear terhadap parameter-parameternya. Regresi taklinear didasarkan pada penentuan nilai parameter yang meminimumkan jumlah kuadrat dari sisanya dengan cara iterasi. Metode *Gauss-Newton* merupakan suatu algoritma untuk meminimumkan jumlah kuadrat sisa antara data dan persamaan taklinear. Konsep kunci yang mendasari teknik tersebut adalah uraian deret Taylor yang digunakan untuk menyatakan persamaan taklinear semula dalam suatu bentuk hampiran yang linear. Dengan demikian, teori kuadrat terkecil dapat digunakan untuk memperoleh taksiran-taksiran baru dari parameter-parameter yang bergerak dalam arah yang meminimumkan sisa tersebut. Perbedaan antara profil indeks bias sebelum dan sesudah dilakukan pencocokan kurva dapat diperlihatkan secara matematik dengan penghitungan galat (*error*), yang dinamakan galat rms (*Root Mean Square*) [18].

III. PENGUKURAN POLA MEDAN DEKAT

Set-up pengukuran pola medan dekat dengan memanfaatkan komputer dapat dilihat pada Gambar 2 dibawah ini.

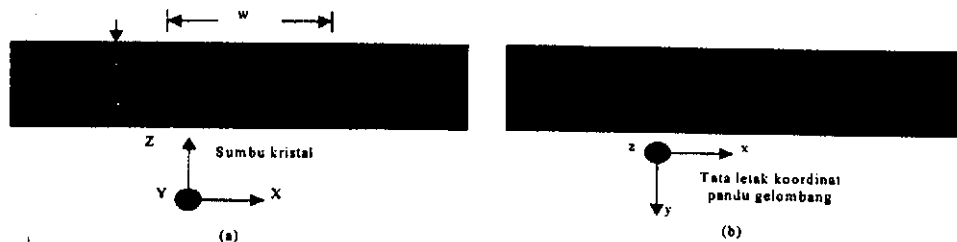


Gambar 2.

Set-up pengukuran pola medan dekat [17]

Komponen yang akan diukur, yaitu pandu gelombang diletakkan pada suatu 3-axis stage. Karena pandu gelombang yang akan diukur adalah komponen pasif, maka masukannya perlu dieksitasi oleh sumber cahaya dengan panjang gelombang $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ yang di dalamnya telah termasuk pigtail. Cahaya laser dikopling masuk pandu gelombang dengan lensa mikro batang. Pola distribusi intensitas keluarannya ditangkap oleh lensa obyektif dengan perbesaran 100X yang juga ditempatkan pada 3 axis stage. Bidang fokus lensa ini berada di dekat ujung keluaran tersebut, sehingga bayangan distribusi intensitas ujung keluaran komponen yang diukur akan terletak pada bidang detektor dari kamera video yang lensanya dilepas. Kamera dihubungkan ke kartu penangkap gambar (*frame capture/ grabber card*) yang terpasang di dalam komputer. Di komputer dijalankan perangkat lunak penangkap gambar dan perangkat lunak observasi dan akuisisi data. Kedua perangkat lunak dijalankan dalam sistem operasi Windows. Distribusi intensitas cahaya citra medan dekat yang ditangkap kamera dapat di-*scan* untuk garis *scan* yang diinginkan, baik secara vertikal maupun horizontal.

Dalam pengukuran pola medan dekat digunakan laser diode QLM3S813 ($\lambda = 1.3 \mu\text{m}$) dari Lasertron yang digerakkan oleh laser diode driver yang diatur arusnya menjelang *threshold*. Hal ini dilakukan untuk membatasi cahaya keluaran laser agar tidak membuat citra tangkapan citra saturasi dan tidak merusak detektor kamera. Ujung keluaran serat optik moda tunggal pigtail model tight buffer dengan ukuran core/cladding 8,3/125 μm yang dihubungkan ke polarisator dan kemudian menggunakan *Polarization Maintaining Fiber* (PMF). Cahaya keluaran dikopel secara end fire oleh micro rod lens $\frac{1}{4}$ pitch dengan panjang pitch 6,3 mm ke port masukan directional coupler. Ujung keluaran dari directional coupler tersebut diletakkan dekat bidang fokus dari lensa MO 100X yang akan mencitrakan pola medan dekat keluaran sampel ke bidang sensor dari kamera vidicon (TV Camera) tipe Micron Viewer 7290 dari Electrophysics yang lensanya dilepas. Untuk membatasi daya optik yang masuk ke sensor kamera dipasang NDF dari Edmund Scientific tepat di depan kamera. Keluaran video dari kamera diberikan ke kartu penangkap gambar Video Blaster SE100 dari Creative.



Gambar 3.

Penampang iris pandu gelombang kanal pada substrat LiNbO_3 potongan-Z arah propagasi-Y
 (a) *Proton Exchange* (b) *Annealed Proton Exchange* [3]

Pengukuran medan dekat dilakukan terhadap directional coupler yang difabrikasi dengan metode APE pada substrat LiNbO_3 *Z-cut Y-propagating* dengan sumber proton asam benzoat dengan lama pertukaran proton $t_x = 90$ menit pada suhu $T_x = 175$ °C dengan *annealing* pada suhu $T_a = 360$ °C selama $t_a = 2$ jam. Struktur directional coupler tersebut dapat digunakan untuk merepresentasikan struktur kanal apabila dipergunakan satu kanal saja, dengan lebar kanal $w = 8 \mu\text{m}$, lebar celah $g = 6 \mu\text{m}$, panjang lengan interaksi $L = 12$ mm, dan pemisahan antara kedua keluaran $d = 250 \mu\text{m}$ [3]. Citra medan dekat hasil penangkapan tersebut selanjutnya diolah dengan program komputer.

IV. PERCOBAAN, HASIL, DAN DISKUSI

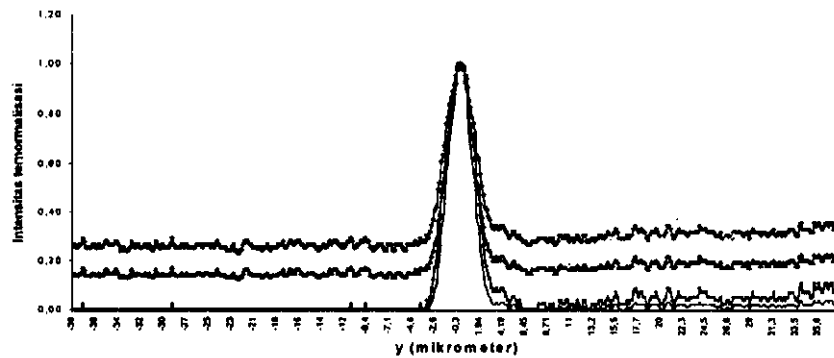
Pengamatan pola medan dekat dilakukan terhadap sampel pandu gelombang kanal hasil *scanning* secara vertikal dan *scanning* secara horizontal. Hasil *scanning* tersebut berupa profil intensitas horizontal dan vertikal. Profil horizontal diperoleh dengan melakukan *scanning* secara paralel terhadap sampel pandu gelombang yang sedang diamati (searah sumbu-x), sedangkan profil vertikal diperoleh dengan melakukan *scanning* secara tegak lurus terhadap permukaan sampel (searah sumbu-y). Citra medan dekat tersebut dibaca oleh program komputer pada posisi (240,166). Ada lima buah data profil intensitas pandu gelombang kanal yang dibuat dengan metode *Annealed Proton Exchange* (APE) pada substrat LiNbO_3 (*Lithium Niobate*) potongan-Z arah propagasi-Y yang akan dijadikan sumber data untuk merekonstruksi profil indeks biasnya dengan menggunakan program pengolah citra. Profil intensitas yang tersimpan dalam file tipe text terdiri atas:

1. profil intensitas horizontal setelah dilakukan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma
2. profil intensitas vertikal tanpa pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma
3. profil intensitas vertikal setelah dilakukan pengurangan bising latar belakang saja
4. profil intensitas vertikal setelah dilakukan koreksi gamma saja
5. profil intensitas vertikal setelah dilakukan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma.



Gambar 4.
Citra medan dekat sampel pandu gelombang

IV.1. Pengamatan Pola Medan Dekat Sampel Pandu Gelombang



Gambar 5.
Profil intensitas hasil scanning vertikal sebelum dilakukan pengolahan citra lanjutan

Pada profil intensitas tanpa pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma, untuk daerah di luar lapisan film masih terlihat adanya tingkat kecerahan yang diakibatkan adanya cahaya dari latar belakang yang ditangkap oleh kamera dan nilai intensitas yang berfluktuasi cukup besar untuk pixel yang berdekatan diakibatkan respon kamera yang tidak linier terhadap sumber cahaya yang dipergunakan.

Pada profil intensitas dengan pengurangan bising latar belakang saja, maka cahaya latar belakang yang tadinya berkontribusi terhadap profil intensitas sudah tidak terlihat. Hal ini tampak pada daerah di luar lapisan film yang memiliki nilai intensitas menuju nol. Namun fluktuasi nilai intensitas masih terlihat jelas untuk tiap pixel yang berdekatan akibat respon kamera yang tidak linier terhadap sumber cahaya yang dipergunakan.

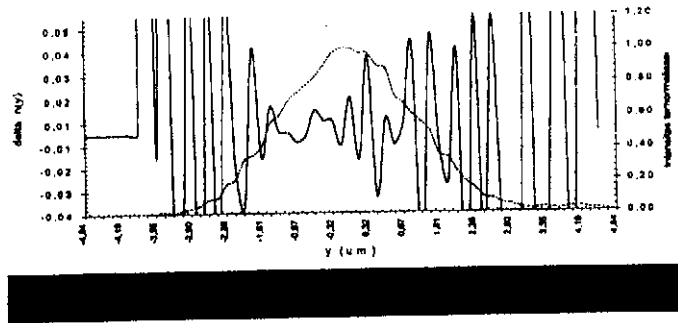
Pada profil intensitas dengan koreksi gamma saja terlihat bahwa nilai intensitas di luar lapisan film seharusnya adalah nol, sedangkan pada daerah tertentu masih didapati nilai intensitas yang tidak memiliki kecenderungan menuju nilai nol. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai akibat dari adanya cahaya latar belakang, yang memiliki kontribusi bising terhadap profil intensitas, terukur oleh kamera.

Pada profil intensitas dengan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma dapat diketahui cahaya latar belakang yang tadinya berkontribusi terhadap profil intensitas sudah tidak terlihat dan profil intensitas juga memiliki nilai intensitas yang sudah tidak berfluktuasi cukup besar untuk pixel yang berdekatan. Hal ini sebagai akibat dari koreksi gamma yang diterapkan sehingga nonlinearitas kamera terhadap cahaya yang dipergunakan dapat dikurangi.

IV.2. Rekonstruksi Profil Indeks Bias tanpa Pengolahan Citra Lanjutan

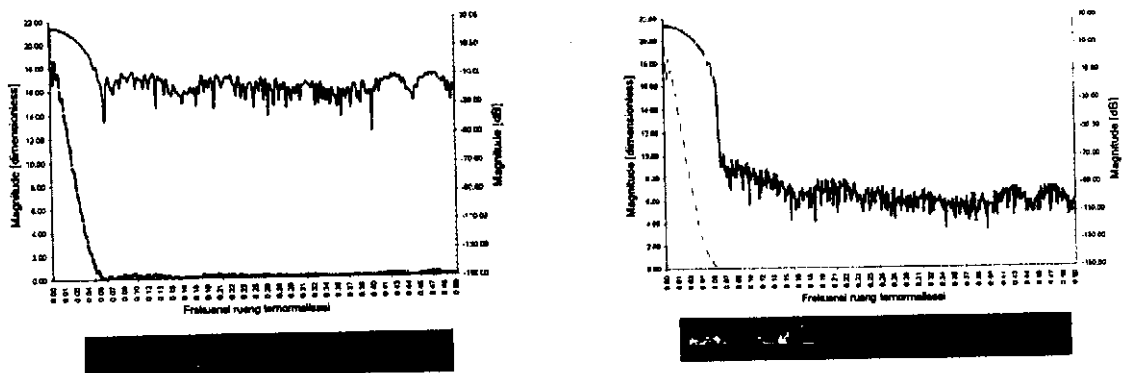
Seperti yang terlihat pada Gambar 5 di bawah ini, profil indeks bias yang direkonstruksi dari profil intensitas, dengan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma sebelum dilakukan pengolahan citra, menggunakan inversi persamaan Helmholtz ternyata mempunyai bentuk yang tidak sesuai dengan profil indeks sebenarnya, yaitu diperlihatkan nilai delta indeks bias yang berfluktuasi dari nilai positif ke nilai negatif maupun sebaliknya. Secara fisis hal ini berarti adanya bising yang berpengaruh besar pada profil intensitas berupa frekuensi tinggi akibat

fluktuasi nilai intensitas pada pixel yang berdekatan. Pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma untuk mengolah citra medan dekat saja belum cukup untuk merekonstruksi profil indeks bias, sehingga perlu pengolahan citra lanjutan agar diperoleh hasil yang sesuai dengan yang diharapkan.



Gambar 6.
Rekonstruksi profil indeks bias sebelum dilakukan pengolahan citra lanjutan

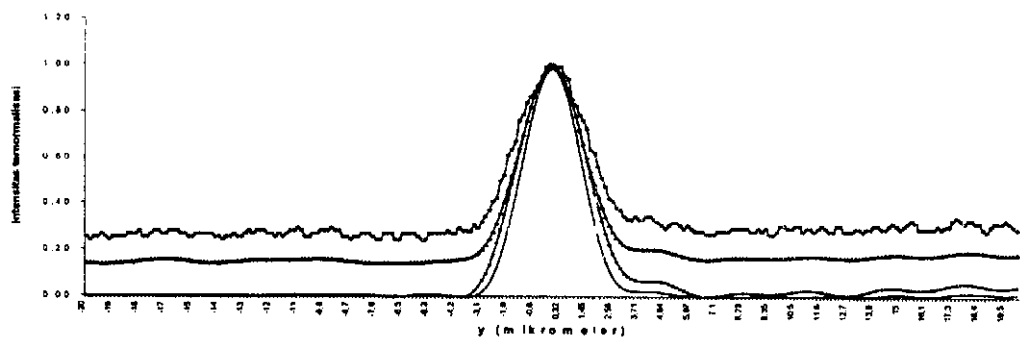
IV.3. Aplikasi FFT dalam Filter Digital FIR dengan Fungsi Window



Gambar 7.
Profil intensitas sebelum dan sesudah pengolahan citra dalam frekuensi ruang

Sebelum dilakukan filter digital FIR, dalam frekuensi ruang nampak adanya bising yang muncul dalam frekuensi tinggi dalam bentuk *ripple*. Bising dalam frekuensi tinggi tidak nampak lagi setelah dilakukan *low pass filter* dengan menggunakan window tertentu. Hasil FIR menunjukkan window Hanning dan Hamming telah mengeliminasi bising lebih dengan baik pada parameter frekuensi ruang $N_c=75$, $N_r=70$, $K_c=-49,085$ dB, dan $K_r=-30,472$ dB.

IV.4. Penerapan Program Pengolah Citra Lanjutan



Gambar 8.
Profil intensitas vertikal setelah dilakukan pengolahan citra lanjutan.

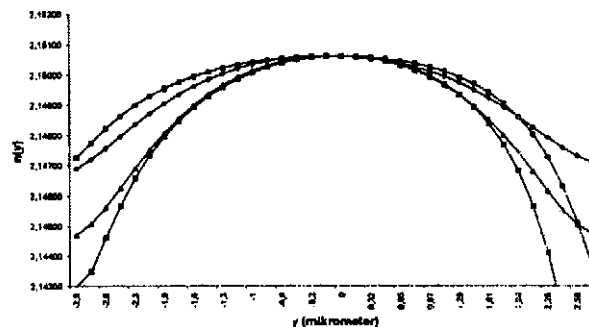
Pengaruh penerapan pengolahan citra lanjutan adalah berkurangnya nilai fluktuasi intensitas maksimum antara pixel yang berdekatan, termasuk pada daerah puncak intensitas ternormalisasi maksimum. Penurunan tersebut mempunyai pengaruh pada rekonstruksi profil indeks bias saat penghitungan turunan kedua di titik puncak kurva, yaitu perubahan kurva menjadi semakin halus dan tidak berfluktuasi lagi. Perbedaan besar tampak setelah dilakukan pengolahan citra lanjutan terhadap kemulusan kurva, yaitu berkurangnya fluktuasi nilai intensitas akibat bising. Secara matematis, fluktuasi yang berkurang ini menyebabkan penghitungan turunan kedua dari inversi persamaan pandu gelombang skalar menjadi tidak berfluktuasi dari nilai positif ke nilai negatif ataupun sebaliknya.

Tabel 2.
Perbandingan profil intensitas vertikal setelah dilakukan pengolahan citra

No.	Profil intensitas vertikal	Perubahan fluktuasi maksimum (%)
1.	Tanpa pengurangan bising dan koreksi gamma	42,19
2.	Pengurangan bising latar belakang saja	42,69
3.	Koreksi gamma saja	25,78
4.	Dengan pengurangan bising dan koreksi gamma	31,17

Pada Tabel 2 terlihat bahwa koreksi gamma (25,78%) lebih berpengaruh dibandingkan pengurangan bising latar belakang (42,69) dalam memperhalus profil intensitas dari fluktuasi nilai.

Gambar 9 di bawah ini memperlihatkan profil indeks bias pada sampel yang sama dengan perbedaan pada pengolahan citra pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma. Nilai indeks bias maksimum mendekati sama, hanya sedikit ada perbedaan pada lebar dari profil indeks bias. Nilai indeks bias maksimum, $n(y)$ maksimum = 2,15061 dan nilai indeks bias maksimum, $\Delta n(y)$ maksimum = 0,004645 atau 0,216 % terhadap indeks bias substrat. Profil intensitas yang telah dilakukan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma memiliki profil indeks bias paling sempit. Sedangkan profil intensitas yang tidak dilakukan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma mempunyai profil paling lebar.



Gambar 9. Profil indeks bias setelah dilakukan pengolahan citra

Koreksi gamma memperlihatkan pengaruh yang lebih dominan dibandingkan pengurangan bising latar belakang, ini terlihat pada profil intensitas setelah dilakukan koreksi gamma saja telah memiliki bentuk yang mendekati terhadap profil indeks bias yang telah dilakukan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma. Secara fisis koreksi gamma telah mengurangi fluktuasi nilai intensitas dalam bentuk bising frekuensi tinggi yang memiliki arti penting saat penghitungan turunan keduanya. Profil indeks bias tanpa koreksi gamma sebelum dilakukan pengolahan citra lanjutan mempunyai profil indeks bias yang lebih lebar dan nilai indeks bias yang tidak mendekati nilai substrat pada jarak y yang menuju tak hingga.

IV.5. Perbandingan Profil Indeks Bias Horizontal dan Vertikal

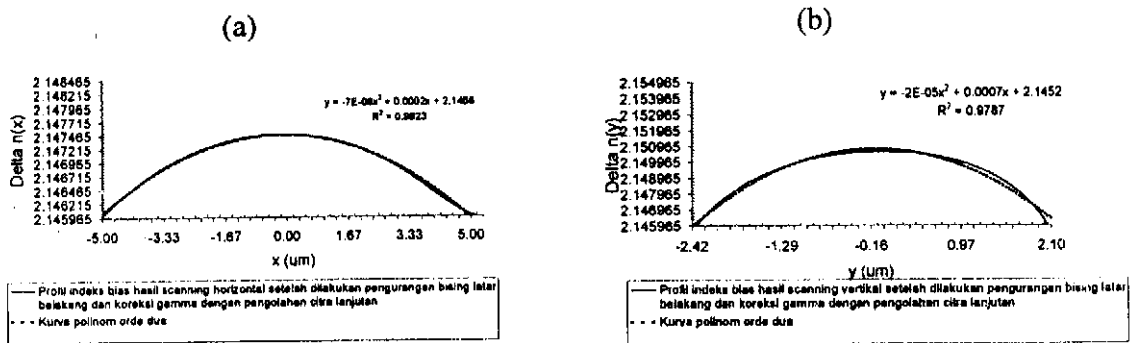
Perbandingan profil indeks bias yang telah direkonstruksi antara profil indeks bias hasil *scanning* horizontal dan hasil *scanning* vertikal nampak secara kuantitatif dari segi kesimetrian kurva pada nilai maksimum indeks biasnya. Secara grafis, pengamatan menunjukkan bahwa profil indeks bias hasil *scanning* horizontal memiliki profil yang simetri terhadap garis $x=0$. Hal ini berbeda jika dibandingkan dengan hasil *scanning* vertikal yang memiliki bentuk kurang simetri terhadap garis $y=0$.

Tabel 3. Nilai R^2 setelah pencocokan terhadap kurva polinomial orde dua

Profil indeks bias hasil <i>scanning</i>	R^2 (%)
<i>Scanning</i> horizontal dengan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma	99,23
<i>Scanning</i> vertikal dengan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma	96,62
<i>Scanning</i> vertikal dengan pengurangan bising latar belakang saja	93,03
<i>Scanning</i> vertikal dengan koreksi gamma saja	94,70
<i>Scanning</i> vertikal dengan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma	97,87

Profil indeks bias akan dicocokkan terhadap suatu kurva yang mempunyai bentuk simetri pada nilai intensitas maksimumnya. Interpolasi polinom orde dua dikenal memiliki bentuk selalu simetri dengan nilai maksimum atau minimumnya.

Dengan melakukan pencocokan terhadap kurva profil indeks biasanya dengan kurva polim orde dua (parabola) tersebut, maka dapat dilakukan analisa tentang kesimetrian kurva profil indeks bias. Nilai R^2 (*R squared value*) diharapkan akan menunjukkan secara kuantitatif ketepatan pencocokan kurva tersebut.



Gambar 10.
Pencocokan kurva polinom orde dua
(a) profil indeks bias horizontal (b) profil indeks bias vertikal

Perbandingan pencocokan kurva hasil scanning vertikal dengan pengurangan bising latar belakang dan koreksi gamma mempunyai bentuk paling simetri dan tingkat kecocokan kurva terbesar ($R^2 = 97,87\%$). Sedangkan hasil scanning vertikal dengan pengurangan bising latar belakang saja mempunyai bentuk kurang simetri dan tingkat kecocokan kurva terkecil ($R^2 = 93,03\%$). Sehingga dapat dikatakan bahwa koreksi gamma mempunyai pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan pengurangan bising latar belakang terhadap bentuk simetri kurva.

V. KESIMPULAN

Pada tulisan ini telah berhasil dilakukan rekonstruksi profil indeks bias menggunakan inversi persamaan Helmholtz melalui pengolahan citra medan dekat. Metode pengolahan citra ini termasuk di dalamnya pengurangan bising latar belakang, koreksi gamma, filter digital FIR dengan fungsi window, pendekatan

spline kubik, dan teknik rata-rata tetangga terdekat. Pengolahan citra yang paling dominan dalam mengeliminasi bising adalah low pass filter digital FIR. Dalam hal ini pendekatan spline kubik dan teknik rata-rata tetangga terdekat lebih memperhalus kurva hasil filtering. Untuk meminimalisasi kekurangan metode ini (saat terjadi perubahan nilai indeks bias yang mendadak), maka dilakukan pencocokan kurva terhadap kurva profil indeks bias pada umumnya. Profil indeks bias horizontal mempunyai bentuk yang jauh lebih simetris dibandingkan dengan profil indeks bias vertikal secara visual.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. H. Susanto, "Rekonstruksi profil indeks bias pandu gelombang dengan pengolahan citra medan dekat", *Tugas Akhir SI*, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Pelita Harapan, 1999.
2. H. Susanto, H.P. Uranus, Muljono, dan J.E. Batubara, "Applications of FFT and Digital Filtering in Reconstruction of Refractive Index Profile of Surface Channel Waveguides from Near-field Intensity Pattern", *Proceeding of International Symposium on Photonics and Applications 1999*, Singapura, 1999.
3. W. Charczenko, I.P. Januar, dan A.R Michelson, "Modelling of proton-exchanged and annealed waveguides and directional couplers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 73, No. 7, hal. 3139-3148, 1993.
4. P.D. Townsend, "Optical effects of ion implantation", *Rep.Prog.Phys.*, Vol. 50, hal. 501-588, 1987.
5. Y.Dai, T. Okamoto, I. Yamaguchi, dan M. Iwaki, "Optical characterization of ion-implanted glass surface layers with surface plasmon resonance method", *Japan J. Appl. Phys.*, Vol. 32, hal. L1269-L1272, 1993.
6. D. Gloge dan E.A. Marcatili, "Multimode theory of graded core fibers", *Bell. Syst. Tech. J.*, Vol. 52, No. 9, hal. 1563-1578, 1973.

7. P.J. Chandler dan F.L. Lama, "A new approach to the determination of planar waveguide profiles by means of a nonstationary mode index calculation", *Optica Acta*, Vol. 33, No. 2, hal. 127-143, 1986.
8. Q. Zhong dan D. Inniss, "Characterization of the light guiding structure of optical fibers by atomic force microscopy", *J. Lightwave Technology*, Vol. 12, hal. 1517-1523, 1996.
9. J.M. White dan P.F. Heidrich, "Optical waveguide refractive index profiles determined from measurement of mode indices: A simple analysis", *Appl. Opt.*, Vol. 15, hal. 151-155, 1978.
10. J. Noda, M. Minakata, S. Saito, dan N. Uchida, "Precise determination of refractive index and thickness in the Ti-diffused LiNbO₃", *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 68, hal. 1690-1693, 1978.
11. J. Steffen, A. Neyer, dan E. Voges, "Direct measurement of refractive-index profiles of Ti: LiNbO₃ planar and stripe waveguides by reflectivity profiling", *GWO 1989 Tech. Dig. Ser.*, Vol. 4, hal. 121-124
12. W. Freude dan A. Sharma, "Refractive-index profile and modal dispersion prediction for a single-mode optical waveguide from its far-field radiation pattern", *J. Lightwave Technology*, Vol. LT-3, hal. 628-634, 1985.
13. Mark L. von Bibra dan Ann Roberts, "Refractive index reconstruction of graded index buried channel waveguides from their mode intensities", *J. Lightwave Technology*, Vol. 15, hal. 1695-1699, 1997.
14. H.P. Uranus dan I.P. Januar, "Pengukuran power ratio dari divais fotonik berkeluaran banyak melalui pengolahan citra medan dekat," *Proceeding of National Seminar on Optoelectronics*, Jakarta, August 27-28, 1997.
15. Jochen Helms, Joachim Schmidtchen, Bernd Schuppert, dan Klaus Petermann, "Error analysis for refractive-index profile determination from near-field measurements", *J. Lightwave Technology*, Vol. 8, No. 5, hal. 625-633, May 1990.

16. S.C. Chapra dan R.P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, 2nd ed. Singapura: Mc. Graw-Hill, 1990.
17. H.P. Uranus, I.P. Januar, dan A. Ahmad, "Perangkat lunak untuk observasi and akuisisi data pengukuran pola medan dekat optik", *Proceeding of Jakarta Physics Seminar*, Puspiptek, Serpong, September 18, 1996.
18. Allan V. Oppenheim dan Ronald W. Schaffer, *Digital Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, 1975.
19. E. Oran Brigham, *The Fast Fourier Transform and Its Applications*. New Jersey: Prentice-Hall, 1998.
20. H.Kolgenik, *Theory of optical waveguide*, dalam Guided-wave optoelectronics. Second ed. Theodor Thamir, Ed. New York: Springer-Verlag, 1990.