

MODEL DISTORSI PEMBIASAN ATMOSFER PADA CITRA SATELIT LAPAN-A2 DAN LAPAN-A3 (ATMOSPHERIC REFRACTION DISTORTION MODEL ON LAPAN-A2 AND LAPAN-A3 SATELLITE IMAGE)

Patria Rachman Hakim

Pusat Teknologi Satelit

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Cagak Satelit Km. 4, Bogor 16310 Indonesia

e-mail: patriarachmanhakim@yahoo.com

Diterima 19 Februari 2015, Direvisi 27 Februari 2015, Disetujui 6 Maret 2015

ABSTRACT

Satellite image generally has some geometric and radiometric distortions that degrade its quality. One of them is geometric distortion on satellite image that caused by atmospheric refraction. With the existence of atmospheric refraction, projection calculation of an object on earth surface onto camera space is more complicated and needs a long computation process. This paper models the atmospheric refraction distortion in a simple equation based on two variables, i.e: camera orientation and satellite altitude. Linear least square regression method is used to identify the best equation. Identification result shows that the atmospheric refraction distortion on LAPAN-A2 and LAPAN-A3 satellite image can be modelled by using third order rational function with one variable, i.e: camera orientation, or first order rational function with two variables, i.e: both camera orientation and satellite altitude. Image correction simulation result shows that by using the proposed equation models, the calculation of geometric distortion on satellite image can be done much faster without lossing its accuracy significantly.

Keywords: *Satellite image, Geometric distortion, Atmospheric refraction, Least-square*

ABSTRAK

Citra satelit umumnya memiliki distorsi baik dalam hal geometri maupun radiometri. Salah satu distorsi geometri yang umum terjadi pada citra satelit adalah distorsi yang diakibatkan karena terjadinya proses pembiasan cahaya oleh atmosfer. Dengan adanya pembiasan atmosfer, perhitungan proyeksi obyek di permukaan bumi pada bidang kamera menjadi rumit dan memerlukan proses komputasi yang cukup panjang. Makalah ini memodelkan distorsi pembiasan atmosfer tersebut dalam persamaan sederhana berdasarkan variabel orientasi kamera dan ketinggian satelit. Metode regresi linear *least square* digunakan untuk mengidentifikasi model persamaan dengan tingkat kesalahan terkecil. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa distorsi pembiasan atmosfer pada citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 dapat dimodelkan menggunakan persamaan rasional orde-3 dengan hanya satu peubah yaitu orientasi kamera atau persamaan rasional orde-1 dengan dua peubah yaitu orientasi kamera dan ketinggian satelit. Hasil simulasi modul koreksi citra menunjukkan bahwa dengan menggunakan model persamaan yang diajukan maka perhitungan distorsi geometri pada citra satelit dapat dilakukan dengan lebih cepat tanpa mengurangi akurasi geometri citra secara signifikan. Kata kunci: *Citra satelit, Distorsi geometri, Pembiasan atmosfer, Least-square*

1 PENDAHULUAN

Satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 merupakan satelit mikro eksperimental yang memiliki misi untuk pengamatan bumi dan penginderaan jauh. Selain muatan *Automatic Identification System* (AIS), *Automatic Packet Reporting System* (APRS) dan *voice repeater*, satelit LAPAN-A2 juga memiliki muatan optik berupa sebuah kamera video dan sebuah kamera digital [Suhermanto, dan Judianto C. T., 2013]. Sementara itu, satelit LAPAN-A3 selain memiliki sebuah kamera digital sebagai muatan optiknya, juga akan memiliki sebuah kamera *imager pushbroom* untuk menghasilkan citra penginderaan jauh dengan kualitas yang lebih baik. Untuk dapat mengolah data citra yang akan dihasilkan satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3, saat ini sedang dikembangkan modul pengoreksi data citra satelit yang akan diintegrasikan dalam perangkat penerima data pada stasiun bumi, yang juga sedang dikembangkan secara simultan.

Secara umum, modul pengoreksi data citra satelit tersebut akan meminimalisasi distorsi yang terdapat pada citra mentah yang diterima sehingga diperoleh sebuah citra satelit dengan kualitas yang cukup tinggi. Terdapat dua buah jenis distorsi yang umum terjadi pada citra satelit yaitu distorsi geometri dan distorsi radiometri. Distorsi

radiometri akan menyebabkan warna suatu obyek pada citra tidak merepresentasikan warna sebenarnya pada permukaan bumi, sedangkan distorsi geometri menyebabkan posisi dan bentuk obyek pada citra tidak merepresentasikan posisi dan bentuk obyek sesungguhnya [Cramer, M., *et al.*, 2000]. Beberapa contoh distorsi geometri pada citra satelit adalah sebuah jalan lurus dapat terlihat melengkung atau sebuah obyek berbentuk lingkaran dapat terlihat oval pada citra pengamatan yang dihasilkan.

Jenis kamera satelit yang digunakan dalam pengamatan akan mempengaruhi jenis distorsi geometri yang dihasilkan. *Imager pushbroom* yang dimiliki satelit LAPAN-A3 membutuhkan pengolahan data yang lebih rumit dibandingkan dengan kamera digital yang dimiliki oleh satelit LAPAN-A2. Hal tersebut disebabkan karena citra pada *imager pushbroom* akan memiliki distorsi geometri utama yang disebabkan karena adanya variasi orientasi *imager* selama pengamatan [Hakim, P.R., *et al.*, 2012]. Distorsi geometri tersebut dapat menurunkan kualitas citra yang dihasilkan secara signifikan. Selain distorsi geometri akibat variasi orientasi yang hanya dialami citra *imager pushbroom* tersebut, beberapa distorsi geometri lainnya akan dialami baik oleh

imager pushbroom maupun kamera digital biasa. Beberapa contoh distorsi geometri tersebut adalah distorsi internal kamera, distorsi akibat kelengkungan (*curvature*) permukaan bumi, distorsi *blurring* akibat pergerakan satelit dan distorsi akibat terjadinya pembiasan cahaya oleh atmosfer.

Distorsi geometri pada citra yang disebabkan karena adanya proses pembiasan atmosfer pada umumnya diabaikan dalam proses koreksi citra satelit karena efeknya yang relatif cukup kecil. Walaupun demikian untuk dapat menghasilkan citra dengan kualitas maksimal, terutama dalam aspek geometrinya, seluruh jenis distorsi geometri yang terjadi pada citra harus dikoreksi dengan efektif dan efisien. Sayangnya proses koreksi terhadap distorsi geometri akibat pembiasan atmosfer ini membutuhkan proses komputasi yang panjang karena melibatkan perhitungan integrasi numerik yang bersifat iteratif, dimana pada dasarnya tidak terdapat sebuah rumusan yang bersifat *closed-form* untuk permasalahan distorsi ini [Schmid, H.H., 1963]. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk dapat menentukan model distorsi pembiasan atmosfer ini dengan beberapa asumsi agar permasalahan proses integrasi numerik yang dihadapi dapat disederhanakan [Noerdlinger, P.D., 1999; Nener, B.D., *et al.*, 2003; Balluch, M., dan D.J. Lary, 1997]. Sementara itu, penelitian mengenai permasalahan refraksi atmosfer pada pengamatan obyek astronomi juga telah banyak dilakukan [Auer, L.H., dan E.M. Standish, 2000; Schaefer, B.E., dan W. Liller, 1990; Young, A.T., 2006]. Walaupun beberapa model persamaan tersebut cukup akurat pada keadaan tertentu, tetapi model persamaan tersebut umumnya kurang efektif untuk diaplikasikan dalam mengoreksi citra penginderaan jauh satelit, khususnya citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

Dengan mengetahui rentang nilai ketinggian satelit serta tersedianya data

orientasi kamera pada saat pengamatan maka model persamaan pembiasan atmosfer dapat disederhanakan sehingga proses komputasi dapat dilakukan dengan relatif lebih cepat. Kecepatan pengolahan data citra tersebut sangat dibutuhkan agar stasiun bumi dapat menampilkan citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 yang telah terkoreksi sistematis secara *near real-time* (waktu nyata). Tujuan penelitian ini adalah memodelkan distorsi pembiasan atmosfer bumi dalam persamaan sederhana dengan menggunakan metode identifikasi regresi linear *least-square*, dimana persamaan tersebut selanjutnya akan digunakan pada modul koreksi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3. Penelitian ini mengasumsikan permukaan bumi berbentuk bola sempurna dan mengabaikan terjadinya proses dispersi cahaya oleh atmosfer. Dengan demikian, distorsi pembiasan atmosfer dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan *closed-form* dalam dua peubah yaitu orientasi kamera dan ketinggian satelit.

2 METODE PENELITIAN

Secara garis besar, beberapa tahapan penelitian yang dilakukan adalah proses sintesis dan identifikasi model persamaan untuk pembiasan atmosfer serta simulasi dan analisis distorsi geometri pada citra satelit akibat proses pembiasan atmosfer tersebut. Penelitian diawali dengan menentukan model pembiasan pada atmosfer bumi, termasuk menentukan model kerapatan atmosfer bumi hingga ketinggian 600 km dari permukaan laut. Dengan menggunakan model pembiasan atmosfer tersebut, selanjutnya akan dilakukan simulasi menggunakan Matlab™ untuk memperoleh hubungan antara nilai distorsi geometri pada citra terhadap orientasi kamera dan ketinggian satelit. Berdasarkan data hasil simulasi yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan identifikasi terhadap persamaan distorsi pembiasan atmosfer tersebut dengan

menggunakan metode regresi linear *least-square*. Persamaan yang diperoleh tersebut selanjutnya digunakan pada modul koreksi data citra LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 untuk dianalisis baik dalam hal kualitas geometri citra maupun waktu pengolahan data yang dibutuhkan. Berikut ini akan dipaparkan secara lengkap metodologi penelitian yang digunakan dalam penelitian ini.

2.1 Penentuan Model Kerapatan Atmosfer

Berdasarkan persamaan pembiasan (refraksi) Snellius atau yang umum dikenal dengan *Snell's Law*, cahaya yang melintasi perbatasan dua buah medium dengan nilai kerapatan yang berbeda akan mengalami perubahan arah. *Snell's Law* dapat dinyatakan dalam rumus berikut ini [Hecht, E., dan A.R. Ganesan, 2008]:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2-1)$$

Dimana θ_1 dan θ_2 merupakan sudut datang dan sudut pergi cahaya terhadap garis normal dari perbatasan kedua medium, sedangkan n_1 dan n_2 merupakan indeks refraksi medium asal dan tujuan cahaya tersebut. Umumnya indeks refraksi tersebut bernilai proporsional terhadap nilai kerapatan suatu medium.

Secara umum, lapisan atmosfer bumi memiliki karakteristik kerapatan udara yang heterogen dimana semakin tinggi posisi atmosfer maka kerapatan atmosfer tersebut akan semakin rendah. Kerapatan atmosfer ditentukan oleh nilai tekanan absolut dan temperatur atmosfer tersebut. Temperatur dan tekanan tersebut dapat bervariasi setiap saat sehingga kerapatan atmosfer pada suatu titik akan selalu berubah. Bahkan dua titik pada ketinggian yang sama tidak menjamin akan memiliki nilai kerapatan atmosfer yang sama, walaupun perbedaan nilai kerapatan tersebut sangat kecil.

Untuk dapat menyederhanakan dan memudahkan penentuan model kerapatan atmosfer, beberapa lembaga internasional telah memodelkan nilai kerapatan atmosfer bumi berdasarkan ketinggian (*altitude*) dari permukaan laut. Model kerapatan atmosfer yang digunakan pada penelitian ini adalah model kerapatan atmosfer yang dikeluarkan oleh *International Standard Atmosphere* (ISA), seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2-1 berikut [Torenbeek, E., 2013]. Dengan mengetahui data kerapatan atmosfer maka data indeks refraksi atmosfer bumi dapat ditentukan secara proposional. Sebagai referensi, indeks refraksi atmosfer pada permukaan bumi adalah sebesar $n_g=1,003$ dan indeks refraksi pada ruang hampa adalah sebesar $n_v=1$ [Torenbeek, E., 2013].

Tabel 2-1: MODEL KERAPATAN ATMOSFER VERSI ISA [Torenbeek, E., 2013]

Ketinggian (km)	Tekanan (Pascal)	Temperatur (Kelvin)	Kerapatan (kg/m ³)
0	101325	288,0	1,2256
11	22632	216,5	0,3642
20	5474,9	216,5	0,08809
32	868,02	228,5	0,01323
47	110,91	270,5	0,001428
51	66,939	270,5	0,0008621
71	3,9564	214,5	0,00006425
85	0,3734	186,7	0,000006966

2.2 Penentuan Model Pembiasan Atmosfer

Proses perhitungan pembiasan arah cahaya oleh atmosfer melibatkan perhitungan integrasi numerik yang panjang. Hal tersebut disebabkan karena berdasarkan data pada Tabel 2-1, atmosfer bumi terdiri dari beberapa lapisan dengan nilai kerapatan yang berbeda sehingga cahaya yang melintasi atmosfer tersebut mengalami beberapa kali proses pembiasan.

Pada penelitian ini atmosfer bumi diasumsikan terdiri dari beberapa

lapisan medium dengan indeks refraksi yang berbeda setiap 1 km, artinya cahaya akan mengalami proses pembiasan setiap melintasi atmosfer sejauh 1 km. Untuk citra satelit yang diambil pada ketinggian 600 km dari permukaan laut, seperti satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3, maka akan terjadi 600 kali proses pembiasan, walaupun proses pembiasan cahaya yang terjadi pada ketinggian di atas 100 km relatif sangat kecil.

Seperti yang telah dijelaskan, pada penelitian ini diasumsikan bumi berbentuk bola sempurna dengan radius sebesar 6371 km. Bentuk permukaan bumi tersebut mempengaruhi model pembiasan atmosfer yang dikembangkan karena bidang normal yang digunakan dalam persamaan *Snell's Law* bergantung pada bentuk perbatasan kedua medium. Kelengkungan permukaan bumi akan menguatkan efek pembelokan arah cahaya yang terjadi di atmosfer.

Berdasarkan deskripsi penentuan model pembiasan atmosfer di atas, termasuk model kerapatan dan kelengkungan atmosfer bumi, berikut diturunkan perhitungan yang dilakukan untuk setiap proses pembiasan. Ilustrasi proses pembiasan atmosfer yang dimodelkan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2-1.

Berdasarkan Gambar 2-1, cahaya dari zona atmosfer Z_0 memasuki zona atmosfer Z_1 dengan sudut datang θ_{i1} dan akan mengalami proses pembiasan oleh perbatasan atmosfer N_1 sehingga memiliki sudut keluar θ_{o1} sebagai berikut:

$$\theta_{o1} = \text{asin}\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_{i1}\right) \tag{2-2a}$$

Kemudian cahaya tersebut melintasi atmosfer zona Z_1 dan akan memasuki atmosfer zona Z_2 dengan sudut datang θ_{i2} yang besarnya berbeda dengan sudut θ_{o1} akibat faktor kelengkungan permukaan bumi sebagai berikut:

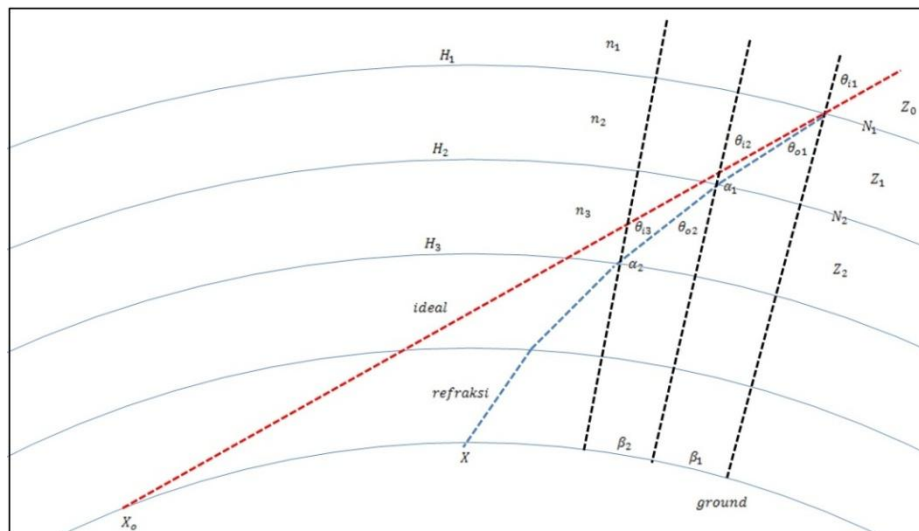
$$\alpha_1 = \text{asin}\left(\frac{R + H_1}{R + H_2} \sin \theta_{o1}\right) \tag{2-2b}$$

$$\theta_{i2} = 180^\circ - \alpha_1 \tag{2-2c}$$

Hal yang penting dalam pemodelan ini adalah sebuah variabel integrasi sudut pembiasan untuk menentukan jarak antara titik proyeksi cahaya di permukaan bumi terhadap titik nadir sebagai berikut:

$$\beta_1 = 180^\circ - \theta_{o1} - \alpha_1 \tag{2-2d}$$

$$\gamma_1 = \beta_1 \tag{2-2e}$$



Gambar 2-1: Ilustrasi proses pembiasan atmosfer bumi

Selanjutnya cahaya tersebut akan dibiaskan oleh perbatasan atmosfer N_2 untuk menghasilkan sudut pergi θ_{o2} . Perhitungan selanjutnya adalah identik dengan beberapa perhitungan sebelumnya:

$$\theta_{o2} = \text{asin}\left(\frac{n_2}{n_3} \sin \theta_{i2}\right) \quad (2-3a)$$

$$\alpha_2 = \text{asin}\left(\frac{R + H_2}{R + H_3} \sin \theta_{o2}\right) \quad (2-3b)$$

$$\theta_{i3} = 180^\circ - \alpha_2 \quad (2-3c)$$

$$\beta_2 = 180^\circ - \theta_{o2} - \alpha_2 \quad (2-3d)$$

$$\gamma_2 = \gamma_1 + \beta_2 \quad (2-3e)$$

Perhitungan tersebut terus dilakukan untuk setiap zona atmosfer yang dalam penelitian ini digunakan 600 lapisan zona atmosfer. Ketika perhitungan zona terakhir dilakukan maka akan diperoleh proyeksi titik potong cahaya dengan permukaan bumi yang memiliki sudut terhadap garis nadir awal sebesar γ_{600} . Nilai sudut tersebut ekuivalen dengan jarak pada permukaan:

$$X = \frac{\gamma_{600}}{360^\circ} 2\pi R \quad (2-4)$$

Tanpa terjadinya proses pembiasan bumi, cahaya tersebut akan memiliki jarak pada permukaan bumi sebesar:

$$\delta = \text{asin}\left(\frac{R + H_1}{R} \sin \theta_{i1}\right) \quad (2-5a)$$

$$\tau = 180^\circ - \theta_{i1} - \delta \quad (2-5b)$$

$$X_o = \frac{\tau}{360^\circ} 2\pi R \quad (2-5c)$$

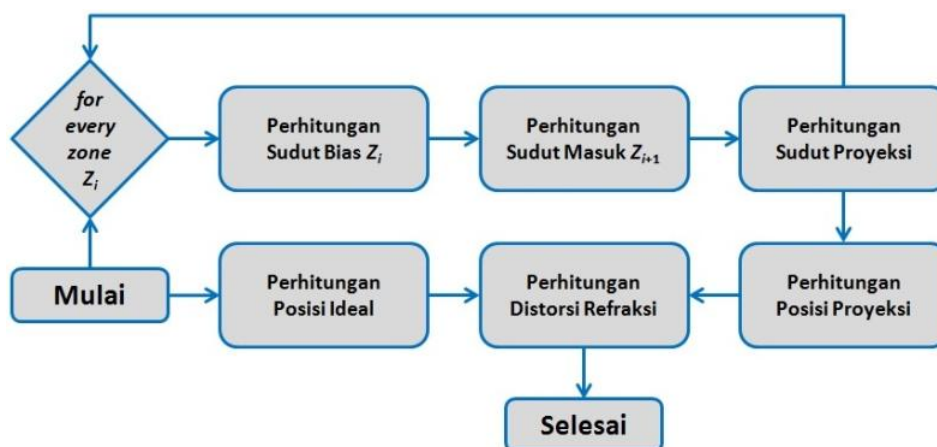
Dengan demikian, distorsi geometri yang terjadi pada citra adalah sebesar:

$$d = X - X_o \quad (2-6)$$

Diagram alir (*flowchart*) algoritma proses penentuan model distorsi pembiasan atmosfer tersebut dapat dilihat pada Gambar 2-2.

2.3 Identifikasi Model Persamaan

Untuk dapat memodelkan distorsi pembiasan atmosfer dalam bentuk persamaan sederhana, langkah pertama adalah dengan mengumpulkan data yang menghubungkan antara besarnya distorsi yang terjadi pada citra dengan beberapa variabel penyebabnya. Untuk pendekatan yang paling sederhana, hanya digunakan variabel kemiringan atau orientasi kamera dalam proses identifikasi ini. Sementara itu, nilai ketinggian satelit ditetapkan konstan sesuai dengan ketinggian satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 yaitu 600 km. Dua buah asumsi lain yaitu bumi berbentuk bola sempurna dan tidak terjadi proses dispersi selama cahaya melintasi atmosfer bumi. Dispersi cahaya merupakan fenomena perbedaan proses pembiasan yang terjadi pada spektrum pembentuk cahaya, contohnya adalah terbentuknya pelangi di atmosfer.



Gambar 2-2: Flowchart perhitungan distorsi pembiasan atmosfer

Selanjutnya dilakukan pendekatan dengan menggunakan dua variabel. Pada pendekatan ini, baik nilai orientasi kamera maupun ketinggian satelit divariasikan untuk menghasilkan nilai distorsi geometri pada citra satelit. Rentang ketinggian satelit yang digunakan pada penelitian ini yaitu 400 hingga 1000 km. Sedangkan untuk orientasi kamera digunakan nilai dari posisi nadir atau 0° hingga sudut horizon, dimana untuk satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 adalah 66°. Orientasi ini dinyatakan dalam satu dimensi sumbu satelit saja karena pada dasarnya distorsi refraksi ini hanya terjadi pada satu dimensi ruang.

Setelah memperoleh data hubungan tersebut, maka selanjutnya dilakukan proses identifikasi terhadap model persamaan distorsi refraksi. Proses identifikasi terhadap kedua model tersebut dilakukan dengan menggunakan metode regresi linear *least-square* untuk menentukan model persamaan dengan nilai kesalahan paling kecil. Bentuk persamaan umum regresi linear *least-square* adalah sebagai berikut:

$$C = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2-7)$$

Dimana matriks **C** merupakan matriks koefisien dari model persamaan pembiasan, matriks **X** merupakan matriks regresi yang terdiri dari komposisi variabel bebas dan matriks **Y** merupakan matriks nilai distorsi geometri yang dihasilkan.

Untuk menentukan model persamaan yang paling sesuai untuk kedua pendekatan tersebut maka dibutuhkan beberapa kandidat model persamaan untuk setiap pendekatan. Pada penelitian ini, beberapa kandidat model persamaan yang digunakan adalah fungsi polinomial orde-*n* dan fungsi rasional orde-*n*, baik untuk model pada pendekatan pertama maupun pendekatan kedua.

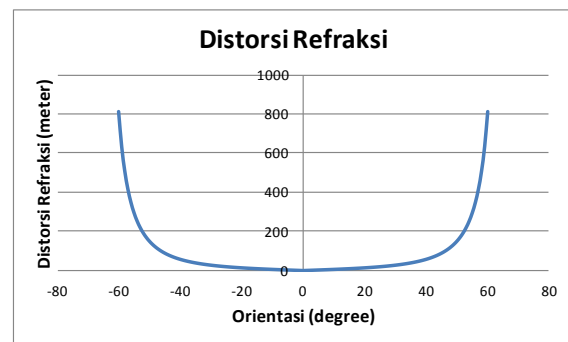
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan

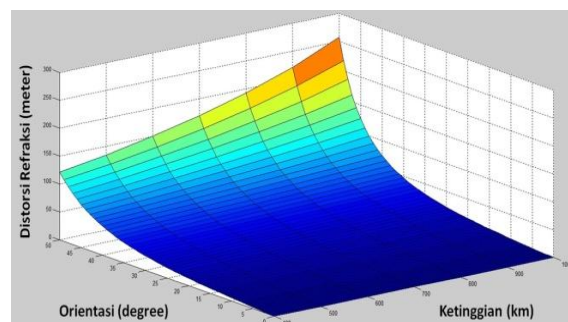
perangkat lunak Matlab™ agar lebih cepat dan akurat serta untuk menyesuaikan dengan modul koreksi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

3.1 Data Simulasi Distorsi Refraksi

Gambar 3-1 menunjukkan data hasil perhitungan simulasi dengan menggunakan pendekatan pertama dimana nilai distorsi diperoleh dengan cara memvariasikan sudut orientasi atau kemiringan kamera sementara ketinggian satelit dibuat tetap. Sementara itu, Gambar 3-2 menunjukkan data hasil simulasi menggunakan pendekatan kedua dengan memvariasikan nilai orientasi kamera dan juga ketinggian satelit untuk menghasilkan distorsi geometri pada citra satelit.



Gambar 3-1: Data hubungan distorsi refraksi terhadap orientasi kamera satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3



Gambar 3-2: Data hubungan distorsi refraksi terhadap orientasi kamera dan ketinggian satelit

Dari Gambar 3-1 dan Gambar 3-2 tampak bahwa kedua grafik tersebut memiliki pola khusus tertentu. Grafik pada Gambar 3-1 misalnya, nilai distorsi refraksi tersebut bernilai proporsional terhadap nilai kemiringan kamera, tetapi tidak bersifat linear. Model sesungguhnya

dapat berbentuk fungsi polinomial orde- n atau berbentuk fungsi rasional orde- n . Hal yang sama juga terjadi pada Gambar 3-2, dimana secara umum grafiknya memiliki pola tertentu tetapi bentuk persamaannya belum dapat diketahui secara pasti. Kedua data simulasi tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai kemiringan orientasi kamera, maka akan semakin besar distorsi yang dihasilkan. Hal tersebut terjadi karena semakin besar sudut kemiringan kamera akan memperbesar sudut datang yang digunakan dalam persamaan *Snell's Law* pada Gambar 2-1, sehingga akumulasi distorsi yang terjadi juga akan semakin meningkat.

Akurasi data simulasi yang dihasilkan terhadap nilai distorsi yang sesungguhnya ditentukan oleh model pembiasan atmosfer bumi yang digunakan. Pada penelitian ini, diasumsikan bahwa atmosfer terdiri dari beberapa lapisan dengan ketebalan 1 km. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin tipis ketebalan lapisan atmosfer tersebut maka akan semakin akurat pemodelan yang dilakukan. Walaupun demikian, peningkatan akurasi untuk ketebalan di bawah 1 km relatif kecil, yaitu di bawah 1 meter, sehingga data simulasi yang dihasilkan ini cukup dapat merepresentasikan proses distorsi pembiasan atmosfer sesungguhnya.

3.2 Proses Identifikasi Model Persamaan

Data simulasi untuk distorsi refraksi atmosfer tersebut kemudian diidentifikasi dengan menggunakan metode regresi linear *least-square* dengan dua pendekatan, yaitu pendekatan satu peubah dan pendekatan dua peubah. Akurasi proses identifikasi yang dilakukan ditentukan berdasarkan perbedaan (*error*) antara nilai distorsi yang dihasilkan model persamaan hasil proses identifikasi terhadap nilai distorsi dari data simulasi. Nilai *error* dihitung berdasarkan *Root Mean Square* (RMS)

untuk seluruh data pada grafik yang sedang diidentifikasi.

Tabel 3-1 menunjukkan beberapa hasil identifikasi terhadap kandidat model persamaan untuk pendekatan pertama sesuai grafik pada Gambar 3-1. Hasil identifikasi terhadap kandidat model persamaan pada pendekatan kedua sesuai grafik pada Gambar 3-2 dapat dilihat pada Tabel 3-2. Secara umum tampak bahwa persamaan rasional menghasilkan identifikasi yang relatif lebih baik jika dibandingkan dengan persamaan polinomial. Sementara itu, semakin tinggi orde persamaan yang digunakan, maka hasil identifikasi yang dilakukan semakin akurat, baik untuk persamaan rasional maupun untuk persamaan polinomial. Berdasarkan beberapa simulasi tersebut tampak bahwa persamaan rasional orde tinggi akan menghasilkan identifikasi yang sangat akurat.

Tabel 3-1: HASIL IDENTIFIKASI PENDEKATAN PERTAMA

No.	Persamaan	Error (m)
1.	Linear	76,2
2.	Polinomial Orde-2	51,3
3.	Polinomial Orde-3	32,2
4.	Polinomial Orde-4	19,6
5.	Polinomial Orde-5	11,4
6.	Polinomial Orde-6	6,75
7.	Rasional Orde (1,1)	8,30
8.	Rasional Orde (2,1)	3,33
9.	Rasional Orde (3,1)	0,937
10.	Rasional Orde (1,2)	1,95
11.	Rasional Orde (2,2)	1,94
12.	Rasional Orde (3,2)	0,157
13.	Rasional Orde (1,3)	0,0566
14.	Rasional Orde (2,3)	0,0304
15.	Rasional Orde (3,3)	0,0135

Tabel 3-2: HASIL IDENTIFIKASI PENDEKATAN KEDUA

No.	Persamaan	Error (m)
1.	Linear	17,1
2.	Polinomial Orde-2	8,79
3.	Polinomial Orde-3	4,25
4.	Polinomial Orde-4	2,07
5.	Polinomial Orde-5	1,000
6.	Polinomial Orde-6	0,480
7.	Rasional Orde (1,1)	0,644
8.	Rasional Orde (2,1)	0,499
9.	Rasional Orde (3,1)	0,109
10.	Rasional Orde (1,2)	0,457
11.	Rasional Orde (2,2)	1,15
12.	Rasional Orde (3,2)	0,0262
13.	Rasional Orde (1,3)	0,0442
14.	Rasional Orde (2,3)	0,00631
15.	Rasional Orde (3,3)	0,00204

Dari hasil identifikasi persamaan tersebut, berdasarkan pendekatan pertama dengan satu peubah pada Tabel 3-1, nilai kesalahan terkecil sebesar 0,0135 meter dihasilkan oleh persamaan rasional orde (3,3) yaitu persamaan rasional dengan nominator orde-3 dan denominator orde-3. Persamaan yang dihasilkan adalah sebagai berikut:

$$z = \frac{C_1x^3 + C_2x^2 + C_3x + C_4}{C_5x^3 + C_6x^2 + C_7x + 1} \tag{3-1}$$

Dengan $C_i=[0,000032 \ -0,00257 \ 0,568 \ -0,0043 \ 0,0000053 \ -0,00053 \ -0,00331]$. Sebenarnya proses simulasi dan identifikasi dapat dilanjutkan dengan menggunakan orde persamaan yang lebih tinggi lagi, tetapi hal tersebut akan menambah kompleksitas dan memperpanjang proses komputasi, sehingga pada penelitian ini dibatasi pada penggunaan persamaan orde-3.

Sementara itu, berdasarkan hasil pendekatan kedua dengan dua peubah pada Tabel 3-2, nilai kesalahan terkecil juga dihasilkan oleh persamaan rasional orde (3,3) yaitu sebesar 0,00204 meter. Walaupun demikian, persamaan rasional orde-3 ini memiliki kompleksitas yang sangat tinggi, sehingga diperlukan persamaan lain yang lebih sederhana.

Sebuah anomali terjadi pada persamaan rasional orde (2,2) yang justru menghasilkan nilai *error* yang lebih besar jika dibandingkan dengan persamaan orde lain yang lebih sederhana. Hal tersebut dimungkinkan karena terjadinya singularitas pada model persamaan tersebut. Dari data pada Tabel 3-2, persamaan rasional orde (1,2) memiliki akurasi yang cukup baik tetapi dengan kompleksitas model yang tidak terlalu tinggi. Dengan mempertimbangkan faktor akurasi dan kompleksitas model, maka model persamaan pembiasan atmosfer dapat dimodelkan dengan persamaan rasional orde (1,2) sebagai berikut:

$$z = \frac{C_1x + C_2y + C_3}{C_4x^2 + C_5y^2 + C_6xy + C_7x + C_8y + 1} \tag{3-2}$$

Dengan nilai $C_i=[0,348 \ -0,000589 \ 0,855 \ 4,1 \times 10^{-5} \ 3,4 \times 10^{-8} \ 1,2 \times 10^{-6} \ -0,0178 \ -0,00024]$. Selanjutnya jika akurasi citra dapat lebih dikompromikan lagi maka distorsi pembiasan atmosfer tersebut dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan rasional orde (1,1) dengan persamaan sebagai berikut:

$$z = \frac{C_1x + C_2y + C_3}{C_4x + C_5y + 1} \tag{3-3}$$

Dengan nilai $C_i= [0,406 \ -0,00012 \ 0,303 \ -0,0155 \ -0,000152]$.

3.3 Simulasi Modul Koreksi Citra Satelit

Setelah model persamaan pembiasan atmosfer yang berbentuk *closed-form* dan sederhana tersebut telah ditentukan, maka model persamaan ini selanjutnya digunakan dalam modul koreksi data citra LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 dengan menggunakan simulator *imager pushbroom*. Dari simulasi yang dilakukan, waktu pengolahan yang dibutuhkan untuk beberapa model persamaan dapat dilihat pada Tabel 3-3. Simulasi dilakukan dengan mengolah 100 baris citra, dimana setiap baris memiliki 8002 piksel.

Tabel 3-3: HASIL SIMULASI MODUL KOREKSI CITRA

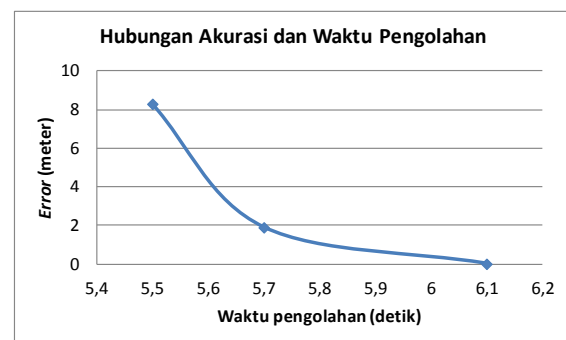
No.	Metode	Waktu (s)	Akurasi (m)
1.	M1: Polinomial Orde 6	1,63	6,75
2.	M1: Rasional Orde (1,1)	5,54	8,30
3.	M1: Rasional Orde (2,2)	5,74	1,94
4.	M1: Rasional Orde (3,3)	6,10	0,0135
5.	M2: Rasional Orde (1,1)	5,68	0,644
6.	M2: Rasional Orde (2,2)	5,75	1,15
7.	M2: Rasional Orde (3,3)	6,65	0,00204

Percobaan 1-4 menunjukkan waktu pengolahan yang diperlukan oleh algoritma pada model pendekatan pertama dengan satu peubah, sedangkan percobaan 5-7 merupakan waktu yang diperlukan algoritma persamaan pada model pendekatan kedua dengan dua peubah. Dari tabel tersebut tampak bahwa waktu yang diperlukan oleh persamaan rasional jauh besar dibandingkan dengan persamaan polinomial, tetapi persamaan rasional memiliki akurasi yang jauh lebih baik. Selain itu semakin tinggi orde model persamaan tersebut maka akan semakin lama waktu pengolahan yang diperlukan.

Model persamaan rasional orde 1 dan orde 3 untuk satu peubah memiliki perbedaan waktu sebesar 0,5 detik. Untuk citra yang berukuran 8000x8002 piksel, perbedaan 0,5 detik tersebut akan menyebabkan perbedaan waktu komputasi sebesar 40 detik. Idealnya citra 8000x8002 ini dapat ditampilkan secara *near real-time* dalam 20 detik, sehingga penundaan selama 40 detik dari sebuah sumber distorsi dinilai terlalu besar. Hal tersebut menyebabkan persamaan dengan orde tinggi sebaiknya dihindari, dengan catatan bahwa akurasi

yang dihasilkan sudah mencukupi sesuai dengan resolusi citra satelit. Satu hal yang pasti, seluruh model persamaan *closed-form* tersebut memerlukan waktu yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan model pembiasan atmosfer yang sebenarnya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk mengolah data 100 baris citra, dibutuhkan waktu pengolahan 120 detik. Tampak bahwa dengan menggunakan model persamaan sederhana maka pengolahan dapat dilakukan 20 kali lebih cepat.

Gambar 3-3 berikut memperlihatkan hubungan antara peningkatan akurasi citra terhadap kenaikan waktu pengolahan yang diperlukan untuk model pendekatan pertama, yaitu model persamaan dengan menggunakan satu peubah yaitu sudut orientasi kamera. Persamaan rasional orde satu memiliki waktu pengolahan paling cepat tetapi memiliki akurasi (*error*) yang relatif buruk, sedangkan persamaan rasional orde dua dan orde tiga memiliki akurasi yang jauh lebih baik dengan waktu pengolahan yang lebih lama.



Gambar 3-3: Hubungan akurasi citra terhadap waktu pengolahan yang dibutuhkan

Pada Gambar 3-3 tersebut dapat dilihat bahwa peningkatan waktu pengolahan yang diakibatkan karena penggunaan model yang lebih kompleks akan meningkatkan akurasi citra, tetapi dengan gradien yang semakin rendah. Artinya semakin lama waktu pengolahan, rasio peningkatan akurasi terhadap waktu pengolahan akan semakin tidak efisien. Dari gambar tersebut, tampak bahwa rasio peningkatan akurasi terhadap penambahan waktu pengolahan data

untuk persamaan orde dua adalah sebesar 3,18 meter untuk setiap 100 milidetik, sedangkan persamaan orde tiga memiliki rasio sebesar 0,535 meter per 100 milidetik. Semakin tinggi orde persamaan yang digunakan maka nilai rasio tersebut akan semakin kecil, atau dengan kata lain, model persamaan rasional dengan orde tinggi belum tentu menghasilkan kinerja yang lebih baik. Pada penelitian ini, model persamaan rasional orde 3 dinilai memiliki *trade-off* antara akurasi dan waktu pengolahan yang cukup baik karena akurasi yang dihasilkan sudah berada di bawah satu meter, jauh di bawah resolusi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

3.4 Analisis dan Pembahasan

Secara intuitif, distorsi geometri pada citra satelit yang terjadi karena proses pembiasan atmosfer akan memiliki nilai yang proporsional terhadap sudut kemiringan kamera, karena semakin besar sudut datang cahaya dalam suatu proses pembiasan akan memperbesar pembelokkan arah cahaya yang terjadi. Hal tersebut dapat ditunjukkan dengan hasil proses identifikasi yang telah dilakukan, baik dengan menggunakan satu peubah maupun dengan dua peubah. Peubah ketinggian satelit pada proses identifikasi pendekatan kedua juga mempengaruhi nilai distorsi geometri pada citra tetapi tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan orientasi kamera. Dari hasil simulasi tampak bahwa distorsi pembiasan atmosfer tidak terjadi pada posisi di sekitar nadir. Walaupun demikian, distorsi geometri pembiasan ini akan meningkat secara eksponensial dengan meningkatnya sudut orientasi kamera. Pada satelit LAPAN-A3 dengan sudut orientasi sebesar 10° , hanya terjadi distorsi sebesar 5 meter. Distorsi tersebut relatif rendah mengingat nilai resolusi citra sebesar 18 meter. Namun untuk satelit dengan resolusi 1 meter, distorsi tersebut cukup signifikan.

Secara umum, pemilihan model persamaan distorsi yang ideal harus mempertimbangkan dua faktor yaitu akurasi citra dan kecepatan pengolahan data citra tersebut. Dengan menggunakan model persamaan pembiasan yang diperoleh di atas, akurasi geometri dari citra hasil koreksi akan menurun dibandingkan jika menggunakan model refraksi yang lebih kompleks. Tetapi walaupun demikian penurunan kualitas geometri ini relatif kecil sehingga dapat dimaklumi. Sementara itu, waktu pengolahan yang dibutuhkan berkurang secara signifikan, yang secara langsung mengurangi waktu pengolahan data yang dibutuhkan modul koreksi geometri sistematis data citra LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

Sementara itu, jika data citra ingin ditampilkan secara *near real-time* maka dibutuhkan model dengan waktu pengolahan secepat mungkin. Berdasarkan data pada Tabel 3-3, model polinomial orde-6 membutuhkan waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan model persamaan rasional, dan berdasarkan data akurasi pada Tabel 3-1, model polinomial orde-6 memiliki akurasi 6,75 meter. Walaupun akurasi tersebut jauh lebih buruk dibandingkan dengan model rasional, tetapi mengingat resolusi citra *imager* LAPAN-A3 sebesar 18 meter dan citra kamera digital LAPAN-A2/A3 sebesar 5 meter, maka akurasi 6,75 meter ini masih dapat diterima. Dengan demikian untuk keperluan penampilan citra secara *near real-time (quicklook)*, model polinomial orde-6 atau orde tinggi lainnya dapat digunakan. Tetapi untuk pengolahan koreksi sistematis di stasiun bumi, bukan untuk keperluan *quicklook*, maka penggunaan model rasional harus diutamakan.

Selanjutnya perlu dilakukan suatu penelitian menggunakan model kerapatan atmosfer bumi yang lebih merepresentasikan karakteristik atmosfer di Indonesia agar model persamaan pembiasan yang diperoleh dapat digunakan secara lebih akurat

pada citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 pada saat mengamati wilayah khatulistiwa khususnya Indonesia. Selain itu juga perlu dipertimbangkan penggunaan bentuk model persamaan lain dalam proses identifikasi, misalnya persamaan eksponensial, untuk dapat melihat perbandingan kinerja modul koreksi citra baik dalam hal akurasi maupun waktu pengolahan data yang dibutuhkan. Sementara itu, penggunaan *look-up table* (LUT) untuk menggantikan perhitungan distorsi pembiasan atmosfer ini juga dapat dipertimbangkan sebagai alternatif dalam keperluan penampilan citra satelit secara *near real-time* di stasiun bumi.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, distorsi refraksi atmosfer bumi yang akan terjadi pada citra mentah satelit LAPAN-A2 dan satelit LAPAN-A3 dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan rasional orde-3 dengan satu peubah yaitu sudut orientasi kamera. Sementara itu, model distorsi refraksi atmosfer untuk kasus yang lebih umum dapat dimodelkan menggunakan persamaan rasional orde-1 dengan dua peubah yaitu sudut orientasi kamera dan ketinggian satelit. Dengan menggunakan model persamaan pembiasan atmosfer yang relatif sederhana tersebut, modul koreksi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3 dapat melakukan perhitungan nilai distorsi geometri dengan relatif lebih cepat tanpa mengurangi akurasi geometri pada citra hasil koreksi, dengan kesalahan perhitungan di bawah 1 meter, masih jauh berada di bawah nilai resolusi citra sebesar 5 meter. Untuk keperluan penampilan data citra secara *near real-time* (*quicklook*), model persamaan polinomial orde-6 dengan satu peubah yaitu sudut orientasi kamera sebaiknya digunakan karena model ini tidak membutuhkan waktu pengolahan yang panjang, dengan asumsi bahwa akurasi

model tersebut masih dalam batas resolusi citra.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Prof. Dr. Fahmi Amhar atas semua bimbingan dan arahnya sehingga karya tulis ilmiah ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Bapak Ir. Suhermanto, MT, selaku Kepala Pusat Teknologi Satelit (Pusteksat) LAPAN atas bimbingan dan arahnya dalam membangun modul pengoreksi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

DAFTAR PUSTAKA

- Auer, L. H., dan E.M. Standish, 2000. *Astronomical Refraction: Computational Method for All Zenith Angles*, *Astronomical Journal* Volume 119, 2472-2474.
- Balluch, M., dan D.J. Lary, 1997. *Refraction and Atmospheric Photochemistry*, *Journal of Geospatial Research: Atmospheres* Vol. 102, no. 7, 8845-8854.
- Cramer, M., D. Stallmann, dan N. Haala, 2000. *Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications*, *IAPRS* Vol. XXXIII Part B3, 198-205.
- Hakim, P. R., et al., 2012. *Model Koreksi Geometri Sistematis Data Citra Imager Pushbroom Menggunakan Metode Proyeksi Kolinear*, *Jurnal Teknologi Dirgantara* Vol. 10 No. 2, LAPAN, 121-132.
- Hecht, E., dan A.R. Ganesan, 2008. *Optics: Fourth Edition*, Dorling Kindersley (India) Pvt. Ltd., New Delhi, India.
- Nener, B.D., N. Fowkes, dan L. Borredon, 2003. *Analytical Models of Optical Refraction in the Troposphere*, *Optical Society of America Journal* Volume 20, 867-875.
- Noerdlinger, P. D., 1999. *Atmospheric Refraction Effects in Earth Remote Sensing*, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 360-373.
- Schaefer, B.E., dan W. Liller, 1990. *Refraction Near the Horizon*, *Astronomical Society of the Pacific* Vol. 102, 796-805.

- Schmid, H. H., 1963. *The Influence of Atmospheric Refraction on Directions Measured to and from a Satellite*, GIMRADA Research Note No. 10, Virginia.
- Suhermanto, dan Judianto C. T., 2013. *Penyiapan Stasiun Pengendali Satelit Pita-S untuk Misi Satelit Eksperimental dan Operasional Orbit LEO*, Pengembangan Teknologi Satelit di Indonesia: Sistem, Subsistem dan Misi Operasi, IPB Press, Bogor, 141-160.
- Torenbeek, E., 2013. *Advanced Aircraft Design: Conceptual Design, Analysis and Optimization of Subsonic Civil Airplanes (Aerospace Series), First Edition*, John Wiley & Sons.
- Young, A.T., 2006. *Understanding Astronomical Refraction*, The Observatory Vol. 126, 82-115.

