

PENINGKATAN KUALITAS FOKUS CITRA IMAGER MULTISPEKTRAL SATELIT LAPAN-A3 (IMAGE-FOCUSING QUALITY IMPROVEMENT ON LAPAN-A3 SATELLITE MULTISPECTRAL IMAGER)

Andi Mukhtar Tahir¹, Patria Rachman Hakim, A. Hadi Syafruddin

Pusat Teknologi Satelit

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Cagak Satelit Km. 4, Bogor 16310 Indonesia

¹e-mail: andi.mukhtar@lapan.go.id

Diterima 2 Mei 2016; Direvisi 25 Mei 2015; Disetujui 27 Mei 2016

ABSTRACT

LAPAN-A3 satellite brings a multispectral imager as main payload which has four color channel, i.e.: red, green, blue and near-infrared. The imager optics system uses beam-splitter mechanism, which divides the incoming light passing lens system into each color channel detector. Since each channel detector has different position and orientation with respect to lens center, then images produced by each channel detector will have different image focus quality. Such factor could reduce the quality of image produced. This research aims to improve the composite image quality of LAPAN-A3 satellite multispectral imager by ensuring that every channel detector will have uniform focus setting. The method used in this research consists of taking series of observation of object with zebra-cross pattern, then processed them by using Imatest software. The determination of the quality of each image focus are based on Modulation Transfer Function (MTF) calculation in particular spatial frequency. After several observations and calculation, image focus level of each channel detector can be successfully uniformed by controlling the distance of each detector to the center of lens. Furthermore, the experiment also able to reduce distortion caused by channel co-registration in horizontal axes. As a result, image quality of LAPAN-A3 satellite multispectral imager can be improved significantly. These results can be used as reference on the actual LAPAN-A3 sattelite ground station operation, and to support the development of experimental multispectral imager that is prepared for the next LAPAN-A4 sattelite.

Keywords: *Multispectral imager, Image focusing, Modulation transfer function*

ABSTRAK

Satelite LAPAN-A3 membawa *imager* multispektral sebagai muatan utama, yang memiliki empat kanal warna yaitu merah, hijau, biru, dan *near-infrared*. Sistem optik *imager* dirancang dengan menggunakan *beam-splitter* yang akan membagi cahaya yang melewati sistem lensa menuju detektor masing-masing kanal warna. Karena setiap detektor memiliki posisi dan juga orientasi yang berbeda terhadap pusat lensa, maka akan terjadi ketidakseragaman derajat kefokusan untuk setiap citra yang dihasilkan oleh masing-masing kanal warna, yang dapat mengurangi kualitas citra komposit yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra komposit *imager* multispektral satelite LAPAN-A3 dengan cara memastikan agar setiap kanal warna akan menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang seragam. Metode yang digunakan yaitu dengan mengambil sejumlah data pengamatan terhadap obyek dengan pola geometri *zebra-cross*, dan kemudian diolah dengan menggunakan perangkat lunak Imatest. Penentuan kualitas fokus citra dilakukan dengan mengukur *Modulation Transfer Function* (MTF) pada frekuensi spasial tertentu. Berdasarkan sejumlah pengamatan dan perhitungan yang dilakukan, derajat kefokusan citra yang dihasilkan masing-masing detektor dapat diseragamkan dengan mengatur jarak detektor tersebut terhadap pusat lensa. Selain itu, percobaan yang dilakukan juga dapat mengurangi distorsi ko-registrasi kanal yang terjadi pada sumbu horizontal. Kedua hasil tersebut secara signifikan dapat meningkatkan kualitas citra *imager* multispektral satelite LAPAN-A3, terutama dalam aspek geometri. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai panduan dalam proses operasional satelite LAPAN-A3 selanjutnya dan juga dapat mendukung pengembangan *imager* multispektral eksperimen yang sedang dikembangkan untuk satelite LAPAN-A4.

Kata kunci: *Imager multispektral, Fokus citra, Modulation transfer function*

1 PENDAHULUAN

Satelite LAPAN-A3 merupakan satelite mikro eksperimental Indonesia dengan misi pemantauan bumi dan penginderaan jauh. Satelite LAPAN-A3 memiliki muatan optis berupa sebuah *imager* multispektral bertipe *pushbroom* dan sebuah kamera digital matriks. *Imager* multispektral yang dibawa memiliki empat buah kanal warna yaitu merah, hijau, biru dan inframerah dekat (*near-infrared*). Sistem optik yang dimiliki *imager* multispektral tersebut menggunakan mekanisme *beam-splitter*, dimana cahaya yang melewati lensa kemudian dipecah melalui sebuah prisma menjadi tiga bagian yang kemudian akan ditangkap oleh keempat detektor untuk setiap kanal warna tersebut, dimana detektor kanal biru dan hijau adalah satu kesatuan yang memiliki posisi geometri yang sama. Sebagai konsekuensi penggunaan *beam-splitter* tersebut, citra yang dihasilkan masing-masing detektor ini dapat memiliki kualitas geometri

yang berbeda, khususnya dalam hal derajat kefokusan citra dan distorsi ko-registrasi antar kanal.

Secara umum, derajat kefokusan citra yang dihasilkan sebuah sistem optik dapat ditentukan oleh dua hal, yaitu karakteristik pergerakan relatif obyek-kamera pada saat pengamatan dan kualitas sistem optik itu sendiri. Analisis kefokusan citra yang akan dihasilkan *imager* multispektral pada satelite LAPAN-A3 terkait pergerakan relatif kamera telah dilakukan (Hakim, dkk, 2013), berdasarkan teori koreksi dekonvolusi (Kaur, 2012). Sebagai kelanjutan pengembangan sistem pengolah data sistematik citra satelite LAPAN-A3 (Hakim, dkk, 2012), pada penelitian ini akan dianalisis kefokusan citra *imager* multispektral satelite LAPAN-A3 terkait kualitas sistem optik *imager* yang dimiliki, khususnya mengenai karakteristik geometri internal keempat detektor untuk kanal merah, hijau, biru dan NIR. Perbedaan fokus antar citra yang

dihadarkan masing-masing detektor akibat penggunaan *beam-splitter* akan dapat menurunkan kualitas citra komposit yang dihasilkan *imager* secara signifikan, sehingga derajat kefokusan untuk seluruh kanal warna harus diseragamkan.

Salah satu cara yang cukup umum digunakan untuk mengukur kualitas derajat kefokusan sebuah citra adalah dengan cara menentukan *modulation transfer function* (MTF) citra tersebut. Secara umum, MTF merepresentasikan derajat ketajaman citra yang dihasilkan suatu sistem optik terhadap fungsi frekuensi spasial dari obyek yang diamati (Fliegel, 2004; McCluney, 1994). Terdapat beberapa metode untuk menentukan kurva MTF dari sebuah sistem optik, dimana secara umum seluruh metode tersebut menggunakan target obyek berpola geometri hitam-putih dengan resolusi spasial yang beragam. Citra pengamatan obyek yang dihasilkan kemudian diolah menggunakan berbagai algoritma pengolahan citra untuk dapat menghasilkan kurva MTF. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan mengimplementasikan transformasi *Fourier* pada *Edge Spread Function* (ESF) dan *Line Spread Function* (LSF) sebuah citra untuk menghasilkan kurva MTF (Crespi, et al, 2009; Choi, 2002; Khom, 2004). Metode komputasi lainnya seperti algoritma *neural network* juga dapat digunakan untuk menentukan kurva MTF (Delvit, 2004), walaupun metode ini cukup kompleks untuk keperluan pengolahan citra.

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk memastikan keempat kanal detektor pada *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 akan memiliki derajat kefokusan citra yang seragam. Diharapkan dengan hanya mengatur pengendali *stepper* pada sistem lensa yang berlaku untuk seluruh detektor, maka seluruh detektor dapat menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang sama. Metode yang digunakan adalah dengan mengatur jarak masing-

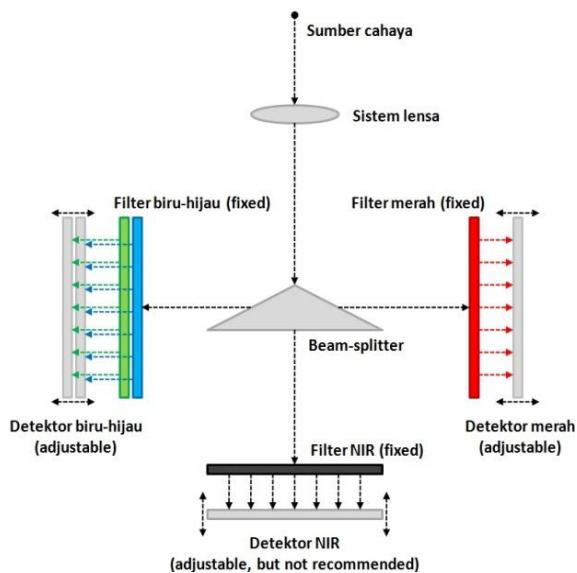
masing detektor terhadap pusat lensa, dan kualitas kefokusan citra yang dihasilkan ditentukan dengan menggunakan perangkat lunak Imatest. Selain permasalahan derajat kefokusan citra tersebut, penelitian ini juga bertujuan untuk meminimalisasi distorsi ko-registrasi pada sumbu horizontal detektor.

2 METODE PENELITIAN

Secara umum, penelitian dilakukan dalam beberapa tahap meliputi studi literatur, *setup* peralatan pengujian, pengambilan citra observasi, perhitungan kurva MTF, koreksi pengaturan jarak detektor terhadap pusat lensa dan analisis terhadap kualitas citra yang dihasilkan. Proses koreksi dan perhitungan kurva MTF dilakukan secara iteratif hingga diperoleh citra dengan kualitas yang cukup baik. Selanjutnya, berikut ini akan dijelaskan secara singkat mengenai karakteristik *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, teori MTF dan prosedur pengujian yang digunakan.

2.1 Karakteristik *Imager* LAPAN-A3

Imager multispektral satelit LAPAN-A3 memiliki empat buah detektor tipe *Charged-Coupled Device* (CCD) yang menghasilkan empat kanal warna yaitu merah-hijau-biru (RGB) dan inframerah dekat (NIR). Secara geometri, cahaya yang masuk melalui sistem lensa akan dibagi oleh *beam-splitter* menjadi tiga bagian, satu menuju detektor biru-hijau, satu menuju detektor merah dan satu menuju detektor NIR. Setiap *chip* detektor memiliki 8002 buah unit detektor dengan lebar 9 μm . Sementara itu, filter warna untuk masing-masing kanal ditempatkan tepat sebelum detektor. Gambar 2-1 menunjukkan ilustrasi geometri cahaya pada sistem optik *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, dimulai dari cahaya memasuki sistem lensa hingga cahaya yang telah dibagi oleh *beam-splitter* diterima oleh masing-masing detektor.

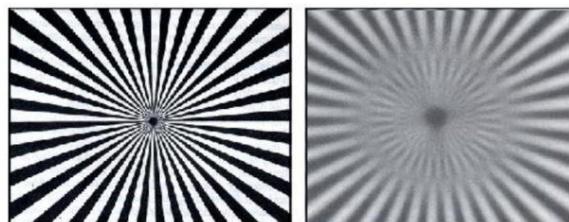


Gambar 2-1: Karakteristik geometri sistem optik pada imager multispektral satelit LAPAN-A3

Dengan menggunakan *beam-splitter*, sebuah obyek yang diamati akan memiliki karakteristik geometri yang berbeda untuk masing-masing kanal warna. Hal tersebut disebabkan karena posisi dan orientasi relatif detektor tiap kanal terhadap pusat lensa dapat berbeda, sehingga berdasarkan teori cahaya maka karakteristik geometri obyek pada citra yang dihasilkan menjadi berbeda. Beberapa akibat yang dapat ditimbulkan oleh adanya ketidakseragaman jarak antara detektor tiap kanal terhadap pusat lensa adalah perbedaan derajat kefokusan dan perbedaan posisi obyek pada masing-masing kanal citra. Hal ini tidak terjadi pada kamera matriks satelit LAPAN-A3 atau kamera jenis matriks pada umumnya karena ketiga kanal warna pada kamera tersebut ditangkap oleh detektor yang berada pada bidang yang sama, dengan menggunakan *filter Bayer*. Untuk mengatasi permasalahan ketidakseragaman kefokusan dan posisi citra tersebut, *imager* multispektral LAPAN-A3 telah dirancang agar posisi dan orientasi detektor untuk setiap kanal warna dapat dimodifikasi, dengan cara menggeser detektor dalam tiga arah sumbu, yaitu sumbu optik serta sumbu vertikal dan horizontal.

2.2 Modulation Transfer Function (MTF)

Berdasarkan pengertian MTF yang telah dipaparkan, semakin tinggi kualitas MTF suatu sistem optik, maka sistem optik tersebut akan dapat mengidentifikasi obyek dengan frekuensi spasial yang lebih tinggi. Sebaliknya, sebuah citra yang dihasilkan oleh sistem optik yang memiliki kualitas MTF rendah biasanya akan mengalami distorsi *blurring* ketika mengamati obyek dengan frekuensi spasial yang tinggi. Gambar 2-2 berikut menunjukkan ilustrasi perbedaan kualitas citra yang dihasilkan sistem optik dengan kualitas MTF tinggi dan kualitas rendah (Optikos Corporation, 1999). Pada citra yang dihasilkan sistem optik dengan kualitas MTF rendah, pola garis hitam-putih dengan frekuensi tinggi pada bagian tengah citra tidak dapat ditampilkan dengan baik.



Gambar 2-2: Perbandingan kualitas citra yang dihasilkan sistem optik dengan kualitas MTF berbeda; kualitas tinggi (kiri) dan kualitas rendah (kanan)

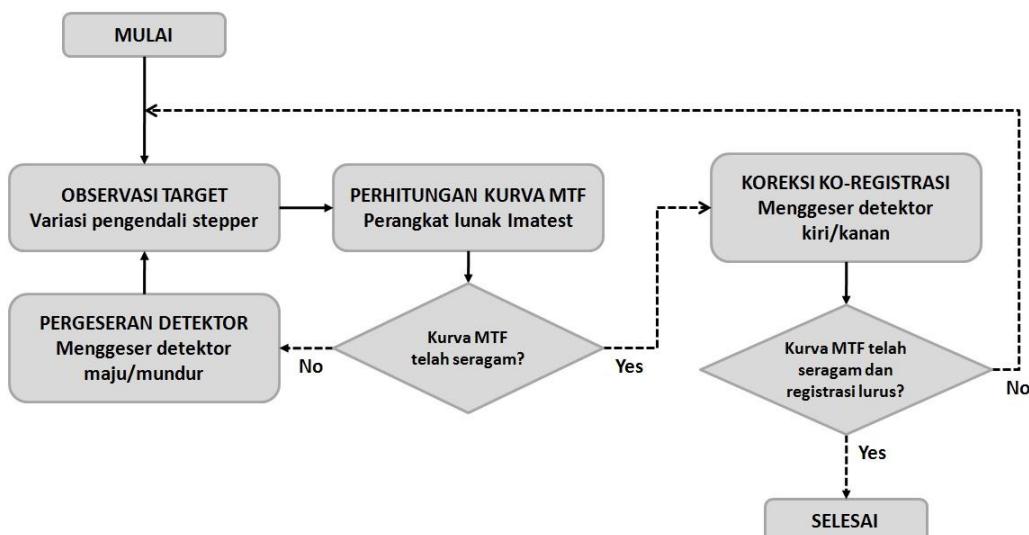
Penentuan kualitas MTF suatu sistem optik umumnya dilakukan dengan melakukan pengamatan terhadap target obyek dengan pola geometri standar. Target obyek yang umum digunakan dapat berpola seperti pada Gambar 2-2, atau dengan pola geometri hitam-putih lainnya. Pada prinsipnya, target obyek yang digunakan harus memiliki perbatasan yang jelas antara warna hitam dan putih, baik dapat berbentuk garis lurus, garis melingkar, bentuk dasar geometri seperti segitiga, atau bentuk lainnya sesuai dengan keperluan aplikasi. Dengan menggunakan beberapa citra hasil pengamatan target obyek tersebut, maka

kurva MTF dapat ditentukan menggunakan kombinasi beberapa algoritma pengolahan citra dan perhitungan statistik. Pada metode *Edge Spread Function* dan *Line Spread Function* (Crespi et al, 2009; Choi, 2002), algoritma akan mendeteksi dan menghitung fitur tepi pada citra, dan kurva ESF ditentukan dengan menggunakan regresi *least-square* untuk fitur tepi untuk seluruh baris citra. Selanjutnya, kurva LSF ditentukan dengan cara mendiferensialkan kurva ESF, dan kurva MTF diperoleh dengan menerapkan transformasi Fourier pada kurva LSF yang dihasilkan.

Pada penelitian ini, penentuan kurva MTF untuk sebuah citra hasil pengamatan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Imatest, yang secara efektif dan efisien dapat menghasilkan kurva MTF sebuah citra dan juga informasi data statistik turunannya. Perangkat lunak Imatest tersebut menerima data masukan berupa sebuah gambar yang memiliki fitur tepi yang tegas, baik dapat berupa tepi garis, lengkungan, atau bahkan tepi tanpa pola yang cukup jelas. Walaupun demikian, hasil perhitungan yang dihasilkan akan semakin baik jika menggunakan citra dengan fitur tepi berupa garis, seperti yang akan digunakan dalam penelitian ini.

2.3 Prosedur Pengujian

Proses observasi dan pengujian yang dilakukan dimulai dengan mengamati target obyek berpola dalam beberapa posisi fokus lensa yang berbeda, yang dapat diatur dengan menggunakan pengendali *stepper*. Kemudian satu set citra tersebut diolah menggunakan perangkat lunak Imatest untuk menghasilkan kurva MTF seluruh kanal citra. Selanjutnya jika terdapat perbedaan kurva MTF antar kanal yang signifikan, maka dilakukan proses pergeseran detektor tertentu untuk menggeser kurva MTF detektor tersebut. Proses tersebut kemudian terus diulang hingga keempat kurva MTF untuk seluruh detektor memiliki karakteristik titik optimum yang sama. Pada penelitian ini, detektor NIR dijadikan sebagai detektor referensi karena sulit dimodifikasi, dan detektor biru dan hijau dijadikan detektor yang menyesuaikan dengan detektor lainnya. Proses dilanjutkan dengan meminimalisasi distorsi ko-registrasi dalam sumbu horizontal, sedangkan koreksi dalam sumbu vertikal tidak dapat dilakukan karena karakteristik target yang digunakan. Gambar 2-3 menunjukkan diagram alir untuk prosedur observasi dan pengujian yang dilakukan.



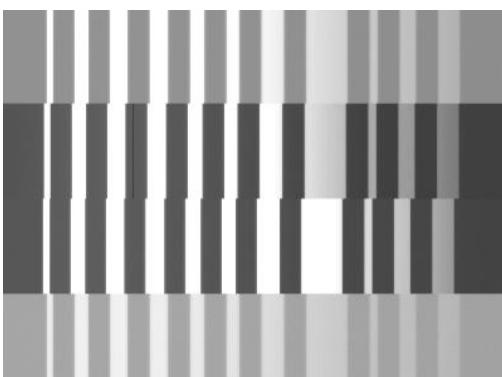
Gambar 2-3: Diagram alir prosedur observasi dan pengujian yang dilakukan

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil pengamatan imager terhadap target berpola dan analisis pengolahan data yang dilakukan perangkat lunak Imatest. Proses pengukuran dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu tahap awal sebelum dilakukannya perubahan jarak detektor, beberapa tahapan setelah dilakukan pergeseran detektor sesuai kebutuhan, dan tahap akhir dimana kurva MTF untuk seluruh kanal telah relatif seragam. Beberapa tahapan tersebut kembali dilakukan setelah proses koreksi ko-registrasi dilakukan sehingga citra yang dihasilkan setiap kanal akan memiliki derajat kefokusan yang seragam dan juga posisi registrasi yang bersesuaian.

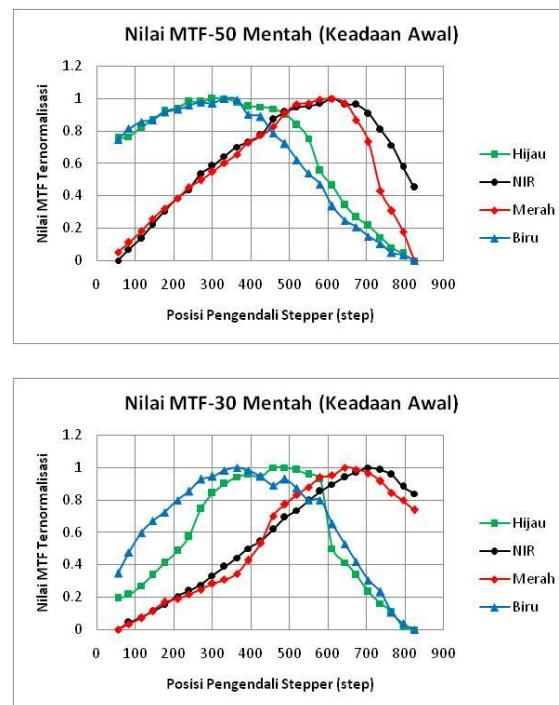
3.1 Data Pengukuran Awal

Pengukuran pertama dilakukan untuk mengetahui keadaan awal sebelum dilakukan perubahan posisi masing-masing detektor terhadap pusat lensa. Gambar 3-1 berikut ini menunjukkan citra hasil pengamatan untuk target berpola tersebut, dimana baris pertama merupakan hasil pengamatan detektor kanal hijau, baris kedua milik detektor kanal NIR, baris ketiga milik detektor kanal merah dan baris keempat milik detektor kanal biru. Citra pengamatan tersebut diambil pada saat kanal NIR menghasilkan citra terbaik.

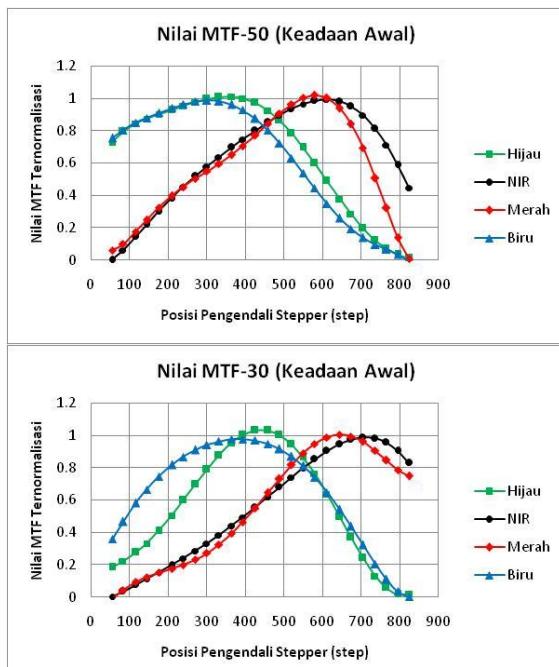


Gambar 3-1: Citra hasil pengamatan pada saat keadaan awal sebelum dilakukan perubahan jarak detektor terhadap pusat lensa

Pada gambar tersebut, secara visual tampak bahwa citra kanal NIR sangat fokus, sementara ketiga kanal lainnya tidak terlalu fokus, terutama kanal hijau dan biru. Gambar 3-2 menunjukkan kurva MTF-50 dan MTF-30 yang telah dinormalisasi untuk setiap kanal, yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak Imatest. Kurva normalisasi MTF-X merupakan fungsi frekuensi spasial pada saat MTF bernilai $X/100$ terhadap posisi pengendali stepper. Pengamatan dilakukan mulai dari posisi stepper terendah hingga posisi tertinggi. Gambar 3-3 merupakan hasil regresi polinomial orde-6 untuk kurva MTF pada Gambar 3-2. Warna kurva MTF pada kedua gambar tersebut disesuaikan dengan setiap kanal warna citra, kecuali warna hitam yang merepresentasikan kanal NIR.



Gambar 3-2: Kurva MTF ternormalisasi untuk keadaan awal sebelum dilakukan perubahan jarak detektor terhadap pusat lensa



Gambar 3-3: Hasil regresi polinomial orde-6 untuk kurva MTF ternormalisasi sebelumnya

Dari Gambar 3-2 dan Gambar 3-3, tampak bahwa kanal biru dan hijau memiliki karakteristik kurva yang hampir sama. Hal ini disebabkan karena detektor kanal biru dan hijau merupakan satu kesatuan unit sehingga memiliki jarak yang relatif sama terhadap pusat lensa. Selain itu, tampak bahwa kurva biru dan hijau tersebut masih cukup jauh jika dibandingkan dengan kurva kanal merah dan NIR. Tujuan utama proses perbaikan dalam penelitian ini adalah membuat keempat kurva masing-masing kanal tersebut berhimpit atau paling tidak menjadi saling berdekatan.

Regressi polinomial orde-6 dilakukan agar memudahkan penentuan titik optimum untuk masing-masing kurva MTF, dan untuk meminimalisasi pengaruh adanya *noise* baik yang berasal dari citra pengamatan maupun kesalahan perhitungan oleh perangkat lunak. Tabel 3-1 menunjukkan posisi *stepper* untuk masing-masing kanal warna pada saat kurva MTF bernilai optimum. Adanya perbedaan titik optimum yang signifikan antara MTF-50 dan MTF-30 tidak menjadi masalah, karena pada perhitungan ini hanya

dibutuhkan titik optimum relatif antara keempat kanal warna tersebut. Jika setelah proses perubahan jarak detektor terhadap pusat lensa, seluruh kurva MTF-50 telah berdekatan, maka idealnya seluruh kurva MTF-30 juga akan berdekatan, walaupun memiliki posisi step yang berbeda.

Tabel 3-1: POSISI PENGENDALI STEPPER PADA SAAT KURVA MTF MASING-MASING KANAL WARNA BERNILAI OPTIMUM

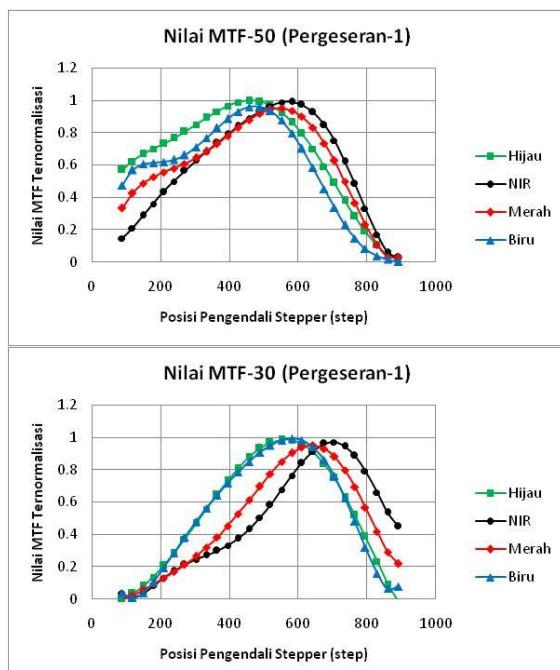
Pengamatan	Posisi Optimum				
	Stepper	R	G	B	NIR
Kurva MTF-50		580	350	300	610
Kurva MTF-30		650	440	380	710

3.2 Perubahan Posisi Detektor

Berdasarkan kurva MTF setiap kanal pada Gambar 3-3, tampak bahwa kurva biru dan hijau, yang merupakan satu kesatuan, harus digeser ke kanan untuk menyesuaikan dengan posisi kurva merah dan NIR. Pilihan lainnya adalah menggeser kurva merah dan NIR ke kiri untuk menyesuaikan posisi kurva biru dan hijau. Karena detektor biru dan hijau merupakan satu kesatuan, dan fakta bahwa detektor NIR paling sulit untuk dimodifikasi, maka selanjutnya akan diubah posisi detektor biru dan hijau, agar dapat menggeser kurva MTF ke kanan untuk menyesuaikan dengan kurva MTF merah dan NIR.

Berdasarkan beberapa pengamatan yang telah dilakukan, mengegeser kurva MTF ke kanan dilakukan dengan cara menjauhkan posisi detektor terhadap pusat lensa. Untuk pengamatan kedua berikut ini, posisi detektor kanal biru dan hijau dijauhkan dengan cara memutar sekrup pada detektor sebesar 180 derajat berlawanan dengan arah jarum jam (*counter-clockwise*). Gambar 3-4 menunjukkan kurva MTF setiap kanal warna setelah adanya perubahan posisi detektor biru dan hijau. Sama seperti gambar sebelumnya, kurva MTF berikut telah dinormalisasi, tetapi hanya

menampilkan kurva MTF setelah hasil regresi polinomial orde-6.

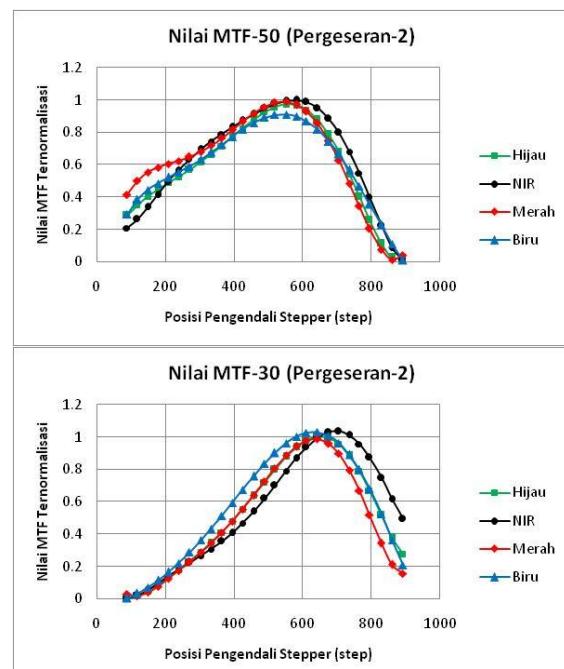


Gambar 3-4: Kurva MTF ternormalisasi setelah perputaran sekrup detektor biru dan hijau sebesar 180 derajat berlawanan dengan arah jarum jam

Tampak bahwa setelah posisi detektor biru dan hijau dimundurkan, kurva MTF-50 dan kurva MTF-30 untuk seluruh kanal lebih menyatu dan berhimpit dibandingkan dengan kurva pada keadaan awal. Nilai *step* optimum pada kurva MTF-50 untuk kanal BGR-NIR yaitu 470, 460, 550 dan 570, sedangkan pada kurva MTF-30 yaitu 580, 560, 640 dan 700. Jika sebelumnya terjadi selisih titik optimum kanal biru dan NIR sebesar 310 *step*, maka setelah pergeseran detektor biru dan hijau, selisih tersebut berkurang menjadi 100 *step*. Jadi tampak jelas bahwa baik secara visual maupun matematis, kurva MTF untuk setiap kanal menjadi lebih berdekatan.

Pergeseran detektor biru dan hijau ke belakang tersebut ternyata dapat menggeser kurva biru dan hijau ke kanan dan mendekat menuju kurva merah dan NIR. Walaupun demikian, tampak bahwa keempat kurva tersebut belum berhimpit sempurna, sehingga

masih diperlukan proses pergeseran detektor kanal biru dan hijau dengan arah sama seperti sebelumnya yaitu ke arah belakang. Karena puntiran sekrup detektor sebesar 180 derajat dapat menggeser kurva sekitar 200 *step* ke kanan, maka diperkirakan masih dibutuhkan puntiran sekrup detektor sebesar 90 derajat berlawanan dengan arah jarum jam untuk dapat menyatukan kurva biru/hijau dan kurva merah/NIR tersebut. Gambar 3-5 menunjukkan kurva MTF untuk setiap kanal warna setelah pergeseran kedua ini, yang secara total akibat perputaran sekrup detektor sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam.



Gambar 3-5: Kurva MTF ternormalisasi setelah perputaran sekrup detektor biru dan hijau sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam

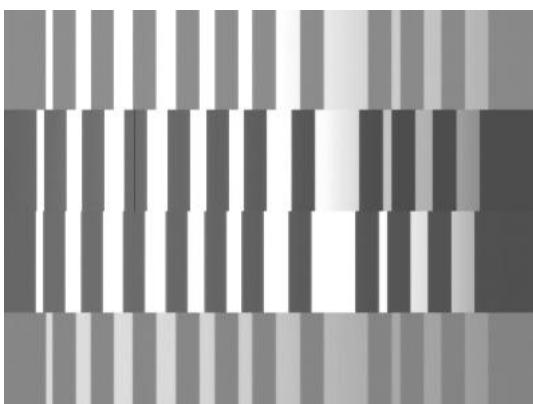
Berdasarkan kurva pada Gambar 3-5, terutama pada kurva MTF-50, tampak bahwa keempat kurva kanal RGB-NIR telah cukup berdekatan. Selisih posisi *step* optimum antar kanal untuk MTF-50 tidak melebihi 40 *step*, sedangkan untuk kurva MTF-30 sebesar 70 *step*. Dengan mempertimbangkan pengaruh *noise* pengukuran, maka selisih sebesar 40 *step* tersebut dapat diterima, sehingga

dapat dikatakan bahwa keempat detektor tersebut telah berada pada posisi relatif terhadap pusat lensa yang cukup ideal.

Satu catatan yang perlu diperhatikan yaitu adanya perbedaan kurva MTF optimum untuk kanal merah dan NIR, walau keduanya sama sekali tidak mengalami pergeseran. Karena perbedaan ini tidak terlalu signifikan, baik nilai nominal maupun pola kurvanya, maka perbedaan tersebut dapat disebabkan karena adanya *noise* pada data pengamatan yang digunakan.

3.3 Perbandingan Kualitas Citra

Setelah pergeseran detektor biru dan hijau ke belakang tersebut, yang dilakukan dalam dua kali pergeseran, tampak bahwa kurva MTF seluruh kanal warna telah cukup berhimpit. Hal tersebut menyebabkan seluruh detektor untuk setiap kanal warna akan menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang lebih seragam. Gambar 3-6 berikut ini menunjukkan citra hasil pengamatan setelah sekrup detektor biru dan hijau diputar sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam. Sama seperti pada Gambar 3-1, seluruh citra pengamatan tiap kanal berikut diambil pada posisi step optimum kanal NIR yaitu 600, dan citra tersebut telah dikontraskan agar dapat ditampilkan dengan jelas dan baik.



Gambar 3-6: Citra hasil pengamatan setelah pergeseran detektor biru dan hijau ke belakang akibat putaran sekrup detektor 270 derajat CCW

Walaupun secara visual tidak terlihat dengan jelas, tetapi tampak

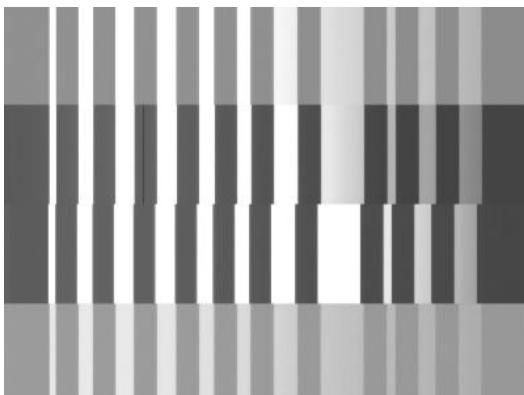
bahwa untuk keadaan awal pada Gambar 3-1, kualitas citra untuk kanal biru dan hijau relatif rendah jika dibandingkan dengan citra merah dan NIR. Hal tersebut sesuai dengan adanya perbedaan posisi *step* optimum yang signifikan antara kanal biru dan hijau terhadap kanal NIR. Sementara itu, setelah proses pergeseran detektor biru dan hijau pada Gambar 3-6, kualitas citra untuk keempat kanal tersebut sulit untuk dibedakan, setidaknya tidak dapat dibedakan secara jelas. Hal tersebut dapat ditunjukkan dengan perbedaan posisi *step* optimum yang tidak terlalu berbeda di antara seluruh kanal tersebut. Satu hal yang perlu dicatat adalah derajat kefokusan citra berbeda dengan derajat kecerahan citra, jadi bisa saja secara visual citra yang lebih cerah akan terlihat lebih fokus, walaupun sebenarnya tidak karena secara matematis citra tersebut memiliki nilai MTF yang lebih rendah pada frekuensi spasial tertentu tersebut.

3.4 Perbaikan Posisi Ko-Registrasi

Berdasarkan citra pengamatan pada Gambar 3-1 dan Gambar 3-6, tampak bahwa baik sebelum dan sesudah proses pergeseran detektor, terjadi distorsi ko-registrasi antar kanal di antara keempat detektor tersebut, dimana sebagian besar batas warna hitam-putih untuk setiap kanal tidak segaris. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi distorsi registrasi pada sumbu horizontal, terutama antara kanal biru-hijau terhadap kanal merah dan NIR. Distorsi ko-registrasi pada sumbu vertikal juga terjadi, tetapi sayangnya tidak dapat ditunjukkan pada citra pengamatan dengan menggunakan target obyek dengan pola vertikal seperti yang digunakan dalam penelitian ini.

Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan terjadinya distorsi ko-registrasi ini. Pada penelitian ini, distorsi tersebut akan diminimalisasi dengan menggeser detektor biru-hijau

pada sumbu horisontal detektor. Gambar 3-7 berikut menunjukkan citra yang dihasilkan setelah melakukan pergeseran ini. Tampak bahwa batas tepi hitam-putih untuk seluruh kanal menjadi lebih segaris. Distorsi ko-registrasi dalam sumbu horisontal masih terjadi, tetapi telah berkurang secara sangat signifikan jika dibandingkan dengan keadaan awal sebelum dilakukannya perbaikan.

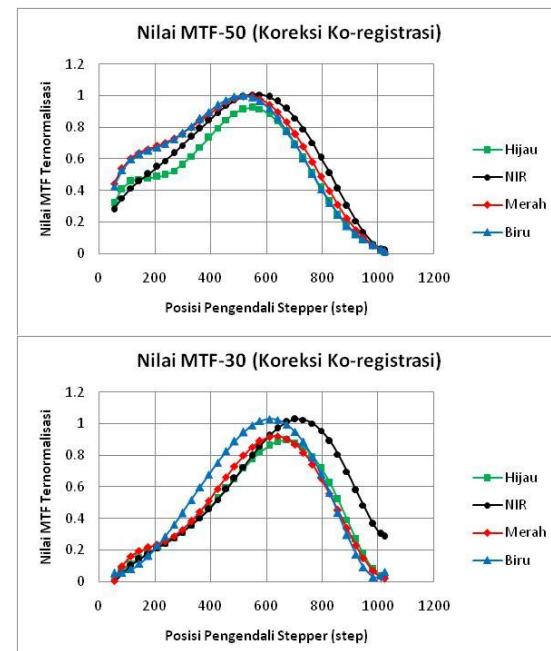


Gambar 3-7: Citra hasil pengamatan setelah proses perbaikan ko-registrasi kanal biru dan hijau

Setelah melakukan perbaikan distorsi registrasi, selanjutnya kembali dilakukan uji MTF, karena dengan melakukan perubahan posisi dan orientasi detektor biru dan hijau, dikhawatirkan kurva MTF yang dihasilkan menjadi berbeda. Gambar 3-8 berikut ini menunjukkan kurva MTF setelah dilakukan perbaikan tersebut, dimana tampak bahwa perbaikan ko-registrasi yang dilakukan tidak mengubah kurva MTF secara signifikan, jika dibandingkan terhadap kurva MTF pada Gambar 3-5 sebelum dilakukannya perbaikan ko-registrasi detektor biru dan hijau.

Distorsi registrasi lainnya yang masih tampak adalah terkait detektor merah yang memperlihatkan karakteristik distorsi yang bersifat non-linear terhadap kanal NIR. Hal tersebut tampak dimana pada bagian kiri citra, perbedaan batas tepi hitam-putih tidak signifikan, sementara pada sisi kanan citra, perbedaan batas tersebut cukup signifikan. Beberapa alternatif telah

dilakukan untuk meminimalisasi distorsi tersebut, tetapi tidak menghasilkan perubahan yang signifikan. Berdasarkan analisis dan pertimbangan yang dilakukan, diputuskan untuk mengembalikan keadaan detektor merah pada keadaan awal. Dengan demikian, distorsi ko-registrasi untuk kanal merah masih terjadi dan akan dijadikan pertimbangan dalam melakukan koreksi citra yang dihasilkan imager multispektral pada saat satelit LAPAN-A3 telah mengorbit.

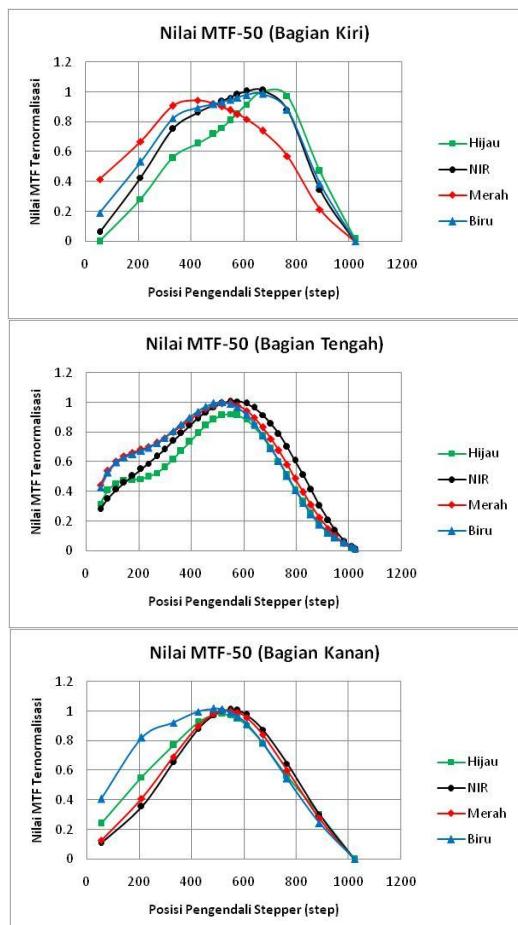


Gambar 3-8: Kurva MTF ternormalisasi setelah perbaikan ko-registrasi kanal biru dan hijau

3.5 Pengaruh Posisi Piksel terhadap MTF

Aspek lain yang diinvestigasi dalam penelitian ini adalah pengaruh posisi piksel pada detektor terhadap kualitas MTF yang dihasilkan. Berdasarkan teori, semakin dekat terhadap pusat lensa, maka bagian citra tersebut akan semakin fokus dibandingkan bagian citra pada daerah pinggir. Gambar 3-9 menunjukkan kurva MTF yang dihasilkan pada beberapa bagian citra setelah seluruh proses perbaikan dilakukan, yaitu bagian kiri, tengah dan kanan relatif terhadap pusat lensa atau titik tengah detektor.

Analisis terhadap kurva pada Gambar 3-9 cukup rumit, tetapi secara umum terlihat bahwa konvergensi titik optimum untuk setiap kanal warna akan berbeda untuk setiap bagian citra tersebut. Pada bagian tengah mungkin telah tercapai konvergensi keempat titik optimum MTF, tetapi pada daerah lain tidak demikian. Walaupun demikian, wilayah bagian tengah citra umumnya lebih penting jika dibandingkan dengan kedua bagian tepi karena pada akhirnya setelah proses koreksi geometri sistematik, bagian citra pada daerah tepi umumnya dipotong secara signifikan. Untuk penelitian selanjutnya, analisis yang lebih mendalam mengenai perbedaan derajat kefokusan citra sebagai fungsi jarak piksel terhadap pusat citra harus dilakukan.



Gambar 3-9: Perbandingan kurva MTF-50 antara beberapa bagian citra, i.e.: kiri, tengah dan kanan

3.6 Pembahasan Komprehensif

Setelah melakukan beberapa tahapan pengamatan, pengujian dan

analisis di atas, terdapat beberapa benang merah yang dapat diambil. Pertama adalah perubahan posisi detektor dalam sumbu optikal, yaitu sumbu maju-mundur pada sumbu pusat lensa, akan secara signifikan mengubah kefokusan citra yang dihasilkan. Hal tersebut ditunjukkan pada percobaan dengan menggeser detektor biru-hijau mundur ke belakang setara dengan 270 derajat putaran detektor berlawanan arah jarum jam, yang menyebabkan kurva MTF akan bergeser ke arah kanan. Tabel 3-2 berikut menjelaskan secara ringkas hubungan antara beberapa pergeseran detektor yang telah dilakukan terhadap pergeseran posisi *stepper* optimum pada kurva MTF-50 untuk masing-masing kanal warna citra, mulai dari keadaan awal hingga setelah dilakukannya koreksi ko-registrasi.

Tabel 3-2: RINGKASAN HUBUNGAN ANTARA PERGESERAN DETEKTOR TERHADAP POSISI OPTIMUM KURVA MTF

Pengamatan	Posisi Optimum			
	R	G	B	NIR
Keadaan awal	580	350	300	610
Pergeseran 180°	550	460	470	570
Pergeseran 270°	540	560	540	580
Ko-Registrasi	530	550	510	560

Tampak bahwa pergeseran detektor dapat menyeragamkan posisi optimum kurva MTF. Fenomena tersebut secara langsung menyiratkan bahwa derajat kefokusan citra masing-masing kanal warna ditentukan oleh dua faktor yang saling berkaitan. Faktor pertama adalah variabel fokus lensa yang dapat diatur dengan pengendali *stepper*, dimana variabel ini berlaku untuk seluruh detektor. Sementara itu faktor kedua adalah jarak masing-masing detektor terhadap pusat lensa, yang dapat diatur secara terpisah antar setiap kanal warna. Dapat dikatakan, derajat kefokusan citra

ditentukan oleh jarak efektif detektor terhadap lensa, yang dalam hal ini merupakan fungsi non-linear antara kedua variabel tersebut, yaitu variabel fokus lensa (pengendali *stepper*) dan variabel jarak setiap detektor terhadap pusat lensa.

Berdasarkan Tabel 3-2, setelah proses perbaikan ko-registrasi, posisi *stepper* pada nilai 550 dapat menghasilkan kualitas citra komposit yang cukup baik. Tabel 3-3 menunjukkan nilai frekuensi spasial pada saat MTF bernilai 0,5, sebelum normalisasi untuk masing-masing kanal citra pada posisi *stepper* di sekitar nilai 550 tersebut.

Tabel 3-3: NILAI FREKUENSI SPASIAL UNTUK MTF-50 PADA POSISI PENGENDALI STEPPER DI SEKITAR NILAI 550

Posisi Stepper	Frekuensi Spasial (Nyquist)			
	R	G	B	NIR
425	0.087	0.081	0.086	0.072
456	0.089	0.082	0.088	0.075
486	0.092	0.083	0.089	0.076
518	0.093	0.084	0.091	0.075
549	0.097	0.084	0.091	0.075
577	0.101	0.085	0.091	0.075
610	0.101	0.085	0.089	0.076
640	0.090	0.085	0.089	0.072
673	0.086	0.083	0.085	0.066

Tampak bahwa posisi *stepper* pada nilai 577 memberikan kombinasi terbaik untuk keempat kanal tersebut. Posisi 577 ini sedikit berbeda dengan nilai 550 yang telah diperoleh sebelumnya karena data tersebut belum mengalami proses regresi. Walaupun demikian, perbedaan posisi tersebut tidak signifikan sehingga masih dalam batas yang dapat ditoleransi. Terdapat dua hal penting yang dapat diangkat berdasarkan data pada Tabel 3-3 tersebut. Pertama adalah posisi pengendali *stepper* berapapun tidak dapat mengakomodasi kurva MTF optimum untuk seluruh kanal. Pada posisi pengendali *stepper* 577, kanal merah, hijau dan biru memiliki frekuensi spasial optimum, tetapi kanal NIR masih sedikit berada di bawah nilai optimum.

Walaupun demikian, posisi *stepper* pada nilai 577 ini memberikan komposisi terbaik untuk keempat kanal tersebut. Hal kedua yaitu mengenai perbedaan nilai frekuensi spasial yang cukup signifikan antar keempat kanal tersebut. Contohnya, walaupun pada posisi *stepper* pada nilai 577, kanal NIR telah memiliki frekuensi spasial yang relatif cukup optimum yaitu 0,075, tetapi nyatanya nilai tersebut masih jauh di bawah frekuensi spasial kanal merah sebesar 0,101. Hal ini dapat disebabkan karena perbedaan detail obyek yang diamati atau perbedaan kualitas antar detektor itu sendiri. Penggunaan target obyek dengan kualitas tinggi dapat mengatasi permasalahan tersebut.

Selain keseragaman fokus antar kanal citra, hal penting lainnya adalah mengenai distorsi ko-registrasi yang terjadi pada sumbu horizontal tidak dapat diminimalisasi dengan sempurna. Untuk kanal warna biru dan hijau, distorsi tersebut mungkin dapat diselesaikan secara sederhana dengan menggeser detektor dalam sumbu tersebut. Walaupun demikian, metode tersebut tidak dapat digunakan pada distorsi kanal merah, dimana karakteristik distorsi yang terjadi tampak bersifat tidak linear seperti yang telah dijelaskan. Karena metode di atas tidak dapat meminimalisasi distorsi yang terjadi, maka distorsi tersebut mungkin disebabkan karena detektor merah mengalami *bending* akibat struktur mekanik yang tidak bersifat ideal. Ketidakidealannya struktur mekanik tersebut, walaupun hanya dalam orde mili-derajat, secara teori dapat menyebabkan distorsi registrasi yang bersifat non-linear tersebut. Karena permasalahan itu, maka dalam penelitian ini tidak dilakukan perbaikan lebih lanjut pada detektor merah.

4 KESIMPULAN

Salah satu distorsi geometri yang terjadi pada citra *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 adalah distorsi fokus internal dan distorsi ko-registrasi antar

kanal yang diakibatkan karena penggunaan *beam-splitter* pada sistem optik. Proses pengamatan, pengujian dan perbaikan yang dilakukan dapat memperbaiki kualitas citra yang dihasilkan *imager*, terutama dalam aspek geometri, yaitu dalam hal keseragaman derajat kefokusan antar kanal citra, dan juga dalam hal keseragaman ko-registrasi dalam sumbu horisontal.

Pada *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, derajat kefokusan antar kanal citra telah dapat diseragamkan dengan cara menggeser detektor biru-hijau ke belakang, dengan memutar sekrup detektor sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam. Sementara itu distorsi ko-registrasi detektor biru-hijau pada sumbu horisontal juga dapat diminimalisasi dengan menggeser detektor pada arah sumbu detektor tersebut. Kedua metode perbaikan tersebut secara signifikan telah dapat meningkatkan kualitas geometri citra yang dihasilkan, yang dapat ditunjukkan baik secara visual berupa citra pengamatan *imager* dan secara matematis berupa kurva MTF antar kanal.

Beberapa pengembangan masih perlu dilakukan untuk meningkatkan kualitas citra *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, terutama mengenai distorsi ko-registrasi pada detektor kanal merah yang bersifat non-linear dan juga mengenai ketidakseragaman derajat kefokusan citra pada beberapa bagian citra yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Wahyudi Hasbi, M.Sc, atas semua bimbingan dan arahannya sehingga karya tulis ilmiah ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Bapak Drs. Abdul Rahman, MT dan Ir. Suhermanto, MT, atas bimbingan dan arahannya dalam membangun modul pengoreksi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

DAFTAR RUJUKAN

- Bu, F; Qiu, Y; and X. Yan, 2013. *Improvement of MTF Measurement and Analysis Using Knife-Edge Method*, Journal of Computational Information Systems 9:3, 987-994.
- Choi, T., 2002. *IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method*, Master Thesis, South Dakota State University, Brookings, SD.
- Crespi, M., and L.D. Vendictis, 2009. *A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment*, Sensors Journal Vol. 9, 3289-3313.
- Delvit, J.M; Leger; Roques, S; and C. Valorge, 2004. *Modulation Transfer Function Estimation from Nonspecific Images*, Optical Engineering, Vol. 43, 1355-1365.
- Fliegel, K., 2004. *Modelling and Measurement of Image Sensor Characteristics*, Radio Engineering Vol. 13, No. 4, 27-34.
- Hakim, P.R; Rachim, E; dan A. Rahman, 2013. *Model Koreksi Distorsi Blurring pada Citra Imager Pushbroom Menggunakan Algoritma Dekonvolusi Filter Wiener*, Pengembangan Teknologi Satelit di Indonesia: Sistem, Subsistem dan Misi Operasi, IPB Press, Bogor, 79-91.
- Hakim, P.R; Rahman, A; Suhermanto, dan E. Rachim, 2012. *Model Koreksi Geometri Sistematik Data Imager Pushbroom Menggunakan Metode Proyeksi Kolinear*, Jurnal Technologi Dirgantara Vol. 10 No. 2, 121-132, LAPAN, Jakarta.
- Kaur, A. and V. Chopra, 2012. *A Comparative Study and Analysis of Image Restoration Techniques Using Different Images Formats*, International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends, Vol. 2, 7-14.
- Kohm, K., 2004. *Modulation Transfer Function Measurement Method and Results for the OrbView-3 High Resolution Imaging Satellite*, IAPRS, Vol. 35, 7-12.
- McCluney, R., 1994. *Introduction to Radiometry and Photometry*, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- Optikos Corporation, 1999. *How to Measure MTF and Other Properties of Lenses*, User Manual Rev. 2.0, Wakefield, MA.

