

PEMILIHAN SENSOR *ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM* (AHRS) DAN LASER ALTIMETER UNTUK PESAWAT LSA-02

ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM (AHRS) AND LASER ALTIMETER SENSOR SELECTION FOR LSA-02 AIRCRAFT

Fuad Surastyo Pranoto, Rizky Fitriansyah, Atik Bintoro
Pusat Teknologi Penerbangan-Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
fuad.pranoto@lapan.go.id

Abstrak

Tulisan ini membahas tentang bagaimana melakukan pemilihan sensor yang mampu memberikan kinerja sesuai dengan *requirement* yang telah ditentukan sebelumnya. *Requirement* yang menjadi acuan diturunkan dari *requirement flight control law*. Sensor yang dipilih harus mampu menyediakan data yang dibutuhkan oleh *flight control law*, sehingga *flight control law* dapat melakukan perhitungan dengan benar dan menghasilkan output berupa *actuator command*. Sensor yang akan diseleksi adalah sensor AHRS dan laser altimeter. Kedua sensor ini menjadi prioritas untuk diseleksi karena kedua sensor ini masuk ke dalam kategori sensor kritis. Setelah melakukan analisis pasar dan membandingkan spesifikasi teknis dengan *sensor requirement* maka untuk AHRS akan menggunakan produk Northrop Grumman LITEF GmbH LCR-100, sedangkan untuk laser altimeter menggunakan produk RIEGL LD90-3100HS.

Kata kunci: AHRS, Laser altimeter, LSA-02, Sensor.

Abstract

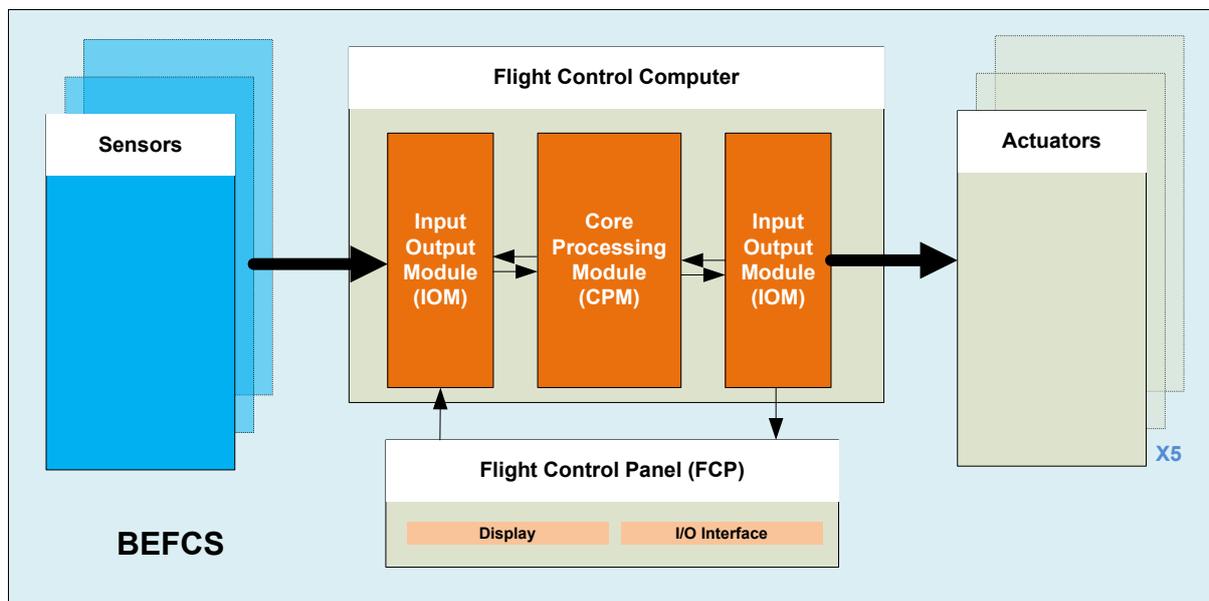
This paper discusses selection of sensors that are able to provide performance in accordance with the requirements that have been predetermined. Requirement of reference is derived from the requirement of flight control law. The selected sensor must be able to provide the data needed by the flight control law, so flight control law can perform the calculation correctly and produce the actuator command output. Sensors to be selected are AHRS sensors and laser altimeter. Both sensors are a priority to be selected because these two sensors fall into the category of critical sensors. After doing market analysis and comparing technical specifications with sensor requirement then for AHRS will use Northrop Grumman LITEF GmbH LCR-100, while for laser altimeter using RIEGL LD90-3100HS product

Keywords: AHRS, Laser altimeter, LSA-02, Sensor.

1. PENDAHULUAN

Pusat teknologi penerbangan (Pustekbang) adalah salah satu kepusatan yang berada di bawah instansi pemerintah lembaga penerbangan dan antariksa nasional (LAPAN). Kepusatan ini memiliki fokus penelitian pada pengembangan pesawat terbang, baik pesawat terbang berawak maupun tanpa awak. Salah satu program pengembangan pesawat terbang tanpa awak dinamakan dengan program LSA-02. Program ini merupakan program kerja sama internasional antara TU Berlin dengan Pustekbang. Tujuan dari program ini adalah untuk memahami proses rancang bangun sistem kendali terbang otomatis yang rencananya akan diintegrasikan ke dalam pesawat Stemme S15. Dengan kata lain, ide dasar program ini adalah bagaimana merubah pesawat terbang berawak (Stemme S15), menjadi pesawat terbang tanpa awak yang dapat terbang secara mandiri tanpa perlu dikendalikan dari *ground control station* (GCS). Agar dapat merealisasikan tujuan tersebut maka perlu dibuat suatu sistem kendali terbang otomatis yang diintegrasikan ke dalam pesawat berawak. Proses rancang bangun sistem kendali terbang otomatis ini diawali dengan mendefinisikan *design requirement dan objective*. Pesawat ini nantinya dapat dikendalikan secara manual melalui *mechanical flight control linkage* ataupun dapat terbang secara otomatis menggunakan sistem kendali terbang yang disebut dengan *electronic flight control system* (EFCS) [1].

Secara sederhana, EFCS merupakan sebuah sistem yang akan dikoupekan dengan *mechanical flight control linkage* pesawat Stemme S15. EFCS terdiri dari dua komponen utama, yakni *basic electronic flight control system* (BEFCS) dan *experimental system* (XS). BEFCS merupakan system utama di dalam EFCS yang memiliki tugas untuk mengendalikan pesawat secara otomatis berdasarkan inputan perintah yang diberikan oleh operator[2]. Secara umum, komponen yang terdapat di dalam BEFCS dapat dilihat di dalam Gambar 1 berikut ini. Secara mudah, cara kerja BEFCS adalah sebagai berikut. BEFCS membutuhkan mata dan telinga agar dapat mengidentifikasi kondisi lingkungan di sekitar pesawat, *attitude* pesawat, kecepatan, dsb. Informasi ini dapat diperoleh dengan menggunakan sensor yang dipasang di dalam pesawat. Setelah itu, informasi atau data tersebut diteruskan ke *flight control computer* (FCC) untuk diolah. Sebelumnya, di dalam FCC sudah diinstall sebuah *flight control law* (FCL) yang bertugas untuk mengolah data yang dihasilkan oleh sensor, dikombinasikan dengan input yang diberikan oleh operator pesawat sehingga diperoleh *command* ke *actuator*. Setelah itu, *actuator* akan bekerja dengan cara mendefleksikan *flight control surface* pesawat, sehingga pesawat tersebut dapat terbang sesuai kondisi yang diinputkan oleh operator / pilot.



Gambar 1. Konsep BEFCS

BEFCS dirancang agar dapat melakukan fungsi - fungsi kendali pesawat secara otomatis, seperti *attitude control*, *altitude acquire*, *airspeed control*, *vertical speed hold*, *heading/track acquire and hold*, dan *waypoint navigation*[3]. Agar dapat melakukan fungsi – fungsi tersebut, maka diperlukan perangkat sensor – sensor yang memiliki tingkat keakurasian yang baik dan memenuhi *requirement* yang tertera di dalam [3]. Dari semua jenis sensor yang diperlukan, terdapat dua tipe sensor yang masuk ke dalam kategori *critical sensor*, yakni *attitude heading reference system* (AHRS) dan *laser altimeter*. Sensor ini masuk ke dalam kategori *critical* karena jika mengalami kegagalan, dapat berdampak kepada keselamatan penerbangan pesawat tersebut. Oleh karenanya, kedua tipe sensor ini akan dipasang dengan konfigurasi *redundant*. Hal inilah yang mendasari ditulisnya makalah ini, di mana di dalam makalah akan dijelaskan proses seleksi yang dilalui hingga dapat menentukan vendor yang dipercaya untuk mensuplai sensor tersebut. Di akhir *makalah* ini akan disimpulkan vendor yang memenuhi kriteria untuk mensuplai sensor tersebut.

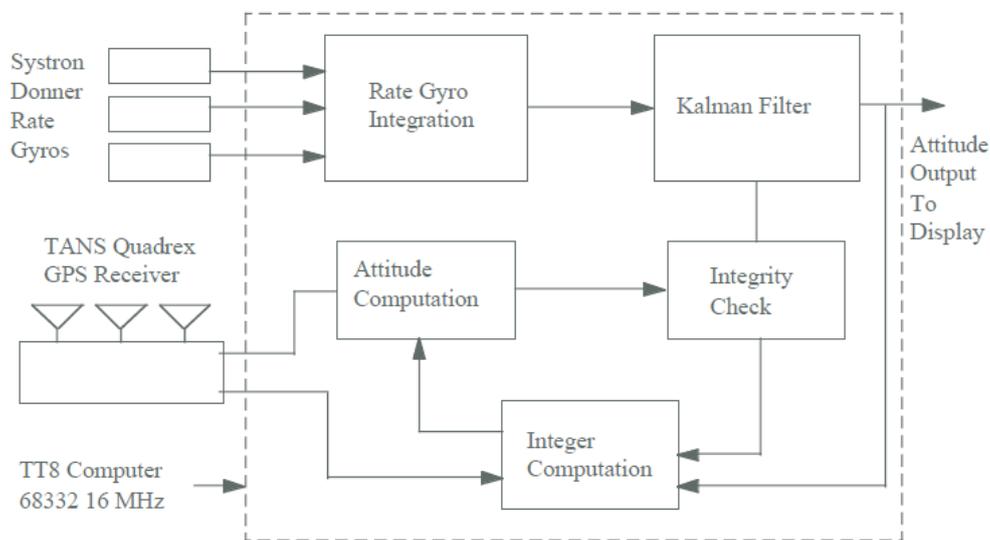
2. KAJIAN PUSTAKA

Dalam bab dua ini akan dikaji penjelasan dari sensor *attitude heading reference system* (AHRS) dan *laser altimeter*. Hal ini penting untuk dilakukan agar saat membuat *requirement* sensor, kita sudah memahami karakteristik sensor tersebut. Pembahasan diawali dengan sensor *attitude heading reference system* (AHRS) dan setelah itu dilanjutkan dengan sensor *laser altimeter*.

2.1. Attitude Heading Reference System (AHRS)

AHRS adalah sensor yang umum digunakan di dalam *general aviation applications*. Salah satu fungsi utama sensor ini adalah untuk memberikan informasi tentang *attitude* dan *heading* pesawat terbang. Informasi yang dihasilkan oleh sensor ini biasanya berasal dari *mechanical gyros*. *Mechanical gyros* yang digunakan untuk menampilkan informasi sudut *pitch* dan sudut *roll* biasanya terdiri dari komponen motor yang berputar dan motor ini dipasangkan ke gimbal 2 axis [4]. Selain *attitude* dan *heading*, AHRS juga dapat menampilkan informasi tentang *attitude rate*, seperti *yaw rate* maupun *pitch rate*. AHRS memiliki tingkat akurasi yang baik, walaupun masih menggunakan *mechanical gyros* sehingga dapat digunakan untuk aplikasi *flight control*, *stability augmentation*, maupun *autopilots*[5].

Salah satu contoh implementasi ke dalam pesawat adalah dengan menggunakan kombinasi antara GPS dengan AHRS. Kombinasi dari kedua sensor ini dapat menghasilkan output seperti *pitch*, *roll* dan *yaw* dan hasilnya ditampilkan ke panel *artificial horizon instrument* yang terletak di kokpit pesawat terbang. Skematik dari kombinasi GPS dan AHRS dapat dilihat di dalam Gambar 2 berikut. Uji terbang dilakukan dengan menggunakan pesawat Beechcraft Queen Air1[6].



Gambar 2. Konsep kombinasi AHRS dengan GPS

Sensor AHRS yang digunakan di dalam contoh implementasi ini adalah 3 buah sensor Systron-Donner “Horizon” yang mampu menghasilkan informasi tentang *attitude rate*. Algoritma yang digunakan untuk menyatukan data antara GPS dan AHRS akan mengambil data *attitude rate* dengan *refresh rate* sebesar 20 Hz. Output dari AHRS akan diintegrasikan secara numerik agar dapat memperoleh nilai perkiraan parameter attitude (sudut Euler). Untuk GPS, akan menghasilkan output dengan *refresh rate* sebesar 2 Hz. Metode kalman filter digunakan untuk menyatukan antara data dari AHRS dan GPS. GPS juga digunakan mengestimasi *gyro drift rate*. Proses *filtering* dan integrasi dilakukan dengan sebuah mikrokomputer TattleTale™ Model 8 yang diproduksi oleh Onset Computer[6].

Contoh lainnya tentang implementasi penggunaan AHRS adalah untuk melakukan *flight attitude track reconstruction*, seperti tertulis di dalam [7]. Tujuan dari penelitian di dalam literatur ini adalah mengembangkan sebuah *system* yang dapat melakukan *tracking flight attitude* dan dapat melakukan rekonstruksi *flight attitude* tersebut. Sistem ini terdiri dari dua komponen utama, yakni komponen untuk melakukan pengukuran yang dapat menghasilkan data dan juga komponen untuk memproses data tersebut. Dalam penelitian ini, dua buah AHRS, 3DM-GX2, yang diproduksi oleh MicroStrain dan sebuah AHRS M3 yang diproduksi oleh Innalabs digunakan untuk keperluan verifikasi dan pengetesan. Data yang dapat dihasilkan dari kombinasi ini adalah data *percepatan*, *angular rate*, dan *magnetometers*.

AHRS yang akan digunakan di BEFCS harus mampu memiliki kemampuan untuk mengukur *attitude angle* (*yaw*, *pitch*, *roll*), *true* dan *magnetic heading*, *track angle – true* dan *magnetic*, *wind direction – True*, *attitude rate*, *acceleration* pada arah X, Y dan Z di dalam koordinat *body fixed*[8].

2.2. Laser Altimeter

Laser altimeter adalah sebuah sensor yang fungsi utamanya untuk mengukur secara langsung ketinggian atau elevasi *terrain* terhadap pesawat terbang. Laser altimeter mampu menyediakan data 3 dimensi tentang bentuk / kontur permukaan bumi. Prinsip pengukuran ini biasa disebut dengan *airborne laser mapping*, *LIDAR mapping* atau *Airborne Laser scanning*[9].

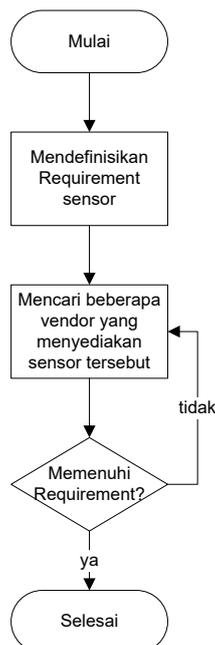
Salah satu contoh pemanfaatan *laser altimeter* adalah untuk *aircraft topographic survey*. Dalam contoh pemanfaatan ini, survey dilaksanakan di atas kaldera gunung berapi. Tujuan dari survey ini adalah untuk mendapatkan bentuk 3 dimensi dari kaldera gunung berapi tersebut. Pesawat yang digunakan adalah NASA T39 jet aircraft yang dilengkapi dengan sebuah *nadir-profiling altimetric laser*(ATLAS), dua buah P-code *GPS receivers*, sebuah Litton LTN92 *inertial unit* untuk mengetahui *attitude*, dan terakhir adalah *aerial cameras* untuk mengambil foto udara. Saat mengambil data, pesawat terbang dengan ketinggian sekitar 500 m di atas permukaan tanah dan kecepatan terbang sekitar 80-100 m s⁻¹. Laser yang digunakan untuk survey ini memiliki ukuran 1.7 mrad, dan memiliki refresh rate 50 hz[10].

Aplikasi lainnya menggunakan laser altimeter adalah untuk mengukur ketebalan es di *Greenland*. Dalam misi ini sebuah pesawat NASA P-3 dioperasikan dari landasan Kangerlussuaq dekat daerah Sondre Stromfjord. Pesawat ini dilengkapi dengan dua buah *tracking Global Positioning System* (GPS) *receivers*, sebuah *ring-laser gyro* (RLG) sebagai *inertial navigation system* (INS), dua buah *laser altimeters*, sebuah radar *altimeters* yang bekerja pada frekuensi 13.9 GHz dan 36 GHz. Dua alat terakhir didedikasikan khusus untuk mengukur ketebalan es yang terdapat di *Greenland*[11].

Laser altimeter yang digunakan di BEFCS fungsi utamanya akan digunakan untuk mengukur ketinggian pesawat di atas permukaan tanah. Sensor ini sangat dibutuhkan saat pesawat akan melakukan prosedur *landing* secara otomatis.

3. METODOLOGI

Metodologi yang akan dilaksanakan di dalam makalah ini dapat terlihat di dalam Gambar 3 berikut. *Requirement* sensor diperoleh dari *requirement* yang dipersyaratkan oleh *flight control law*. Setelah mendefinisikan *requirement*, maka dapat dicari beberapa vendor yang menyediakan tipe sensor tersebut. Setelah itu, berdasarkan data teknis dari vendor penyedia sensor, dapat dibandingkan dengan *requirement* yang telah ditentukan. Jika memenuhi, maka vendor penyedia sensor tersebut dapat dipilih untuk menyediakan sensor.



Gambar 3. Metodologi penelitian

4. SENSOR REQUIREMENT

Sensor *requirement* untuk sensor AHRS dan laser altimeter dapat dilihat di dalam Tabel 1 berikut ini. *Requirement* yang terdapat di dalam Tabel 1 ini berasal dari kebutuhan yang disyaratkan oleh *flight Tabel ARINC429*. Harga sensor tidak dipertimbangkan saat melakukan pemilihan sensor karena diasumsikan anggaran yang tersedia di Pustekbang mencukupi untuk pembelian sensor. Khusus untuk AHRS, dimensi dan berat dari sensor AHRS tidak dimasukkan ke dalam pertimbangan pemilihan sensor karena secara umum sensor ini memiliki ukuran dan berat yang hampir sama antara satu vendor dengan vendor lainnya.

Tabel 1. Sensor requirement untuk AHRS

AHRS						
No	Nama variabel	Unit	Rentang ukur	Resolusi	akurasi	Update rate [Hz]
1	<i>Yaw / Heading True angle</i>	°	±180	0.0055	<1	20
2	<i>Yaw / Heading Mag angle</i>	°	±180	0.0055	<1	20
3	<i>Pitch angle</i>	°	±90	0.01	<0.5	20
4	<i>Roll angle</i>	°	±180	0.01	<0.5	20
5	<i>roll rate – body fixed</i>	°/s	±128	0.015	<0.1	20
6	<i>pitch rate – body fixed</i>	°/s	±128	0.015	<0.1	20
7	<i>yaw rate – body fixed</i>	°/s	±128	0.015	<0.1	20
8	<i>Acceleration at X axis</i>	g	±4	0.001	<0.01	20
9	<i>Acceleration at Y axis</i>	g	±4	0.001	<0.01	20
10	<i>Acceleration at Z axis</i>	g	±4	0.001	<0.01	20
Laser altimeter						
1	<i>Height above ground</i>	m	0.5 - 150	0.015	0.1	20

Jika dilihat di Tabel 1 di atas, terdapat parameter resolusi dan akurasi sensor. Resolusi didefinisikan sebagai kemampuan sensor untuk menghasilkan output atau melakukan pengukuran dengan unit sekecil mungkin. Semakin baik kualitas sensor, maka mampu melakukan pengukuran hingga satuan unit terkecil. Akurasi adalah parameter yang menunjukkan kemampuan sensor dalam menjaga konsistensi saat menjalankan algoritma yang terdapat di dalamnya. Semakin baik kemampuan komputasi dari sensor, maka akurasinya semakin baik, alias error yang terjadi terjadi semakin kecil [13].

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah menganalisa *datasheet* masing – masing calon sensor yang disediakan oleh *website* masing – masing vendor sensor, ternyata tidak semua parameter yang terdapat di dalam Tabel 1 tersedia. Oleh karena itu, agar parameter yang diperbandingkan setara antara satu vendor dengan vendor lainnya, maka parameter yang digunakan hanya parameter rentang ukur, resolusi, dan akurasi saja. Untuk AHRS, terdapat tiga buah kandidat kuat, yakni:

1. Northrop Grumman LITEF GmbH LCR-100
2. Navionex Corporation Go AHRS
3. MEMSIC AHRS 510

Ketiga kandidat kuat di atas mampu menghasilkan output dalam format ARINC429. Analisa yang dilakukan adalah dengan membandingkan data yang disediakan oleh vendor dengan *requirement* yang terdapat di dalam Tabel 1 di atas. Hasil perbandingan tersebut disajikan di dalam Tabel 2 hingga Tabel 4 berikut ini. Jika diamati secara lebih mendalam, sensor AHRS yang dapat memenuhi seluruh *requirement* yang terdapat di dalam Tabel 1 adalah Northrop Grumman LITEF GmbH LCR-100. Sensor ini menjadi kandidat terkuat sensor AHRS untuk BEFCS. Sedangkan kandidat kedua yang dapat dipertimbangkan adalah MEMSIC AHRS 510. Sensor ini mampu memenuhi kriteria akurasi lebih baik jika dibandingkan dengan sensor Navionex Corporation Go AHRS.

Tabel 2. Spesifikasi Teknis MEMSIC AHRS 510[14]

No	Nama variabel	Unit	Rentang ukur		akurasi		Resolusi	
			Spec	fullfil?	Spec	fullfil?	Spec	fullfil?
1	<i>Yaw / Heading True angle</i>	°	±180	Yes	<2.0	No	0.05	No
2	<i>Yaw / Heading Mag angle</i>	°	±180	Yes	<2.0	No	0.05	No
3	<i>Pitch angle</i>	°	±90	Yes	<1.0	No	0.05	No
4	<i>Roll angle</i>	°	±180	Yes	<1.0	No	0.05	No
5	<i>roll rate – body fixed</i>	%s	±200	Yes	<0.1	Yes	0.02	No
6	<i>pitch rate – body fixed</i>	%s	±200	Yes	<0.1	Yes	0.02	No
7	<i>yaw rate – body fixed</i>	%s	±200	Yes	<0.1	Yes	0.02	No
8	<i>Acceleration at X axis</i>	g	±10	Yes	15e-3	Yes	0.001	Yes
9	<i>Acceleration at Y axis</i>	g	±10	Yes	15e-3	Yes	0.001	Yes
10	<i>Acceleration at Z axis</i>	g	±10	Yes	15e-3	Yes	0.001	Yes

Tabel 3. Spesifikasi Teknis Navionex Corporation Go AHRS[15]

No	Nama variabel	Unit	Rentang ukur		akurasi		Resolusi	
			Spec	fullfil?	Spec	fullfil?	Spec	fullfil?
1	<i>Yaw / Heading True angle</i>	°	±180	Yes	<2.0	No	0.01	No
2	<i>Yaw / Heading Mag angle</i>	°	±180	Yes	<2.0	No	0.01	No
3	<i>Pitch angle</i>	°	±90	Yes	<1.0	No	0.01	Yes
4	<i>Roll angle</i>	°	±180	Yes	<1.0	No	0.01	Yes
5	<i>roll rate – body fixed</i>	%s	±200	Yes	<3.0	No	0.01	Yes
6	<i>pitch rate – body fixed</i>	%s	±200	Yes	<3.0	No	0.01	Yes
7	<i>yaw rate – body fixed</i>	%s	±200	Yes	<3.0	No	0.01	Yes
8	<i>Acceleration at X axis</i>	g	-4 - +6	Yes	7.5e-3	Yes	0.4e-3	Yes
9	<i>Acceleration at Y axis</i>	g	-4 - +6	Yes	7.5e-3	Yes	0.4e-3	Yes
10	<i>Acceleration at Z axis</i>	g	-4 - +6	Yes	7.5e-3	Yes	0.4e-3	Yes

Tabel 4. Spesifikasi Teknis Northrop Grumman LITEF GmbH LCR-100 [16]

No	Nama variabel	Unit	Rentang ukur		akurasi		Resolusi	
			Spec	fullfil?	Spec	fullfil?	Spec	fullfil?
1	<i>Yaw / Heading True angle</i>	°	±180	Yes	<1.0	Yes	6.8e-4	Yes
2	<i>Yaw / Heading Mag angle</i>	°	±180	Yes	<1.0	Yes	6.8e-4	Yes
3	<i>Pitch angle</i>	°	±180	Yes	<0.5	Yes	6.8e-4	Yes
4	<i>Roll angle</i>	°	±180	Yes	<0.5	Yes	6.8e-4	Yes
5	<i>roll rate – body fixed</i>	%s	±128	Yes	<0.02	Yes	4.8e-4	Yes
6	<i>pitch rate – body fixed</i>	%s	±128	Yes	<0.02	Yes	4.8e-4	Yes
7	<i>yaw rate – body fixed</i>	%s	±128	Yes	<0.02	Yes	4.8e-4	Yes
8	<i>Acceleration at X axis</i>	g	±4	Yes	5e-3	Yes	1.5e-5	Yes
9	<i>Acceleration at Y axis</i>	g	±4	Yes	5e-3	Yes	1.5e-5	Yes
10	<i>Acceleration at Z axis</i>	g	±4	Yes	5e-3	Yes	1.5e-5	Yes

Setelah kandidat untuk AHRS diperoleh, setelah itu akan dilakukan investigasi dengan metode yang sama untuk laser altimeter. Hasil analisa tersebut disajikan di dalam Tabel 5. Sensor *requirement* mengacu kepada Tabel 1. Selain itu, laser altimeter yang menjadi kandidat harus dapat diaplikasikan untuk pesawat terbang. Dari hasil *market study*, diperoleh tiga buah kandidat kuat untuk laser altimeter yakni:

1. RIEGL LD90-3100HS
2. AgLaser
3. Renishaw ILM-150-R

Tabel 5. Perbandingan antara spesifikasi teknis dari vendor dengan sensor *requirement* untuk laser altimeter [17][18][19]

No	Produk laser altimeter	Unit	Rentang ukur		akurasi		Resolusi	
			Spec	fullfil?	Spec	fullfil?	Spec	fullfil?
1	RIEGL LD90-3100HS	m	0.5 - 150	Yes	0.015	Yes	0.02	Yes
2	AgLaser	m	0.5 - 150	Yes	0.05	No	0.01	Yes
3	Renishaw ILM-150-R	m	0.5 - 150	Yes	0.1	No	0.01	Yes

Sesuai dengan hasil analisa dari Tabel 5 di atas, kandidat terkuat laser altimeter untuk digunakan pada BEFCS adalah RIEGL LD90-3100HS. Jika opsi pertama ini tidak tersedia, maka pilihan kedua adalah Renishaw ILM-150-R.

6. KESIMPULAN

Setelah melalui proses analisis pasar dan analisis yang cukup panjang maka dapat disimpulkan untuk sensor AHRS menggunakan produk dari Northrop Grumman, yakni LITEF GmbH LCR-100. Sedangkan untuk laser altimeter, produk yang dipilih adalah RIEGL LD90-3100HS. Kedua produk tersebut memenuhi *requirement* yang telah ditentukan. Investigasi lanjutan yang dapat dilakukan adalah melakukan pengetesan komunikasi data antara sensor dengan *flight control computer*. Sensor harus mampu memberikan data yang diminta oleh *flight control computer* dengan benar, sesuai dengan prosedur komunikasi data yang digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ditujukan kepada kepala pusat teknologi penerbangan bapak Gunawan Setyo Prabowo dan bapak Ari Sugeng atas fasilitas dan dukungan dalam melakukan kegiatan penelitian.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Bahri, "Technical Report WP1100: Specification and Concept of LSA-02 (Technology Demonstrator) v01," LAPAN-TU Berlin, Berlin, 2016.
- [2] T. M. Ichwanul Hakim, "Technical Report WP1300: EFCS *Requirements* and Concept v01," LAPAN-TU Berlin, Berlin, 2016.
- [3] T. M. Ichwanul Hakim, "Technical Report WP1500: BEFCS Definition, *Requirement* and Concept v01," LAPAN-TU Berlin, Berlin, 2016.
- [4] D. Gebre-Egziabher, R. C. Hayward and J. D. Powell, "A Low-Cost GPS/Inertial Attitude Heading Reference System (AHRS) for General Aviation Applications," in *Position Location and Navigation Symposium, IEEE*, Palm Springs, CA, 1996.
- [5] N. Barbour, J. Elwell and R. H. Setterlund, "Inertial instruments - Where to now?," in *Guidance, Navigation and Control Conference, Guidance, Navigation, and Control and Co-located Conferences*, 1992.
- [6] R. C. Hayward, D. Gebre-Egziabher, M. Schwall, J. Wilson and J. D. Powell, "Inertially Aided GPS Based Attitude Heading Reference System (AHRS) for General Aviation Aircraft," in *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Kansas City, 1997.

- [7] M. Sipos, P. Paces, M. Reinstein and J. Rohac, "Flight Attitude Track Reconstruction Using Two AHRS Units under Laboratory Conditions," in *IEEE SENSORS Conference*, 2009.
- [8] R. Fitriansyah, "Technical Report WP1540: Sensing System *Requirements* and Definition v01d04," LAPAN-TU Berlin, Berlin, 2016.
- [9] "Home : GeoLas Consulting," [Online]. Available: <http://www.geolas.com/Pages/laser.html>. [Accessed 26 May 2017].
- [10] J. R. Ridgway, J. B. Minster, N. Williams, J. L. Bufton and W. B. Krabil, "Airborne laser altimeter survey of Long Valley, California," *Geophys. J. Int.*, no. 131, pp. 267 - 280, 1997.
- [11] W. B. Krabil, R. H. Thomas, C. F. Martin, R. N. Swift and E. B. Frederick, "Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, no. 7, pp. 1211 - 1222, 2007.
- [12] S. Bahri, "Technical Report WP3500: *Requirement*, Definition, and Concept of FCL for BEFCS v01d02," LAPAN-TU Berlin, Berlin, 2014.
- [13] N. Piotrowski, "Understanding the Difference Between Resolution and Accuracy," Associated Power Technologies, Diamond Bar, CA.
- [14] MEMSIC INC., "AHRS510 ATTITUDE & HEADING REFERENCE SYSTEM," MEMSIC INC., San Jose, California.
- [15] Navionex Corporation, "Go (AD)AHRS," Navionex Corporation, Ontario Canada.
- [16] Northrop Grumman LITEF GmbH, "ATTITUDE AND HEADING REFERENCE SYSTEM (AHRS) LCR-100 PART NO. 145130-xxxx INSTALLATION/MAINTENANCE INSTRUCTION," Northrop Grumman LITEF GmbH, Freiburg, 2015.
- [17] AgLasers, LLC, "Contact Us: AgLasers, LLC," [Online]. Available: <http://aglasers.com/>. [Accessed 27 May 2017].
- [18] RENISHAW, "ILM-R Industrial Laser Module Data sheet," Renishaw plc., Yorkshire, 2015.
- [19] RIEGL, "LD90-3100HS General Purpose Distance Meter Technical Specification," RIEGL, Horn, Austria, 2010.
- [20] V. Gupta, T. H. Chung, B. Hassibi and R. M. Murray, "On a stochastic sensor selection algorithm with applications in sensor scheduling and sensor coverage," *Automatica*, no. 42, pp. 251 - 260, 2006.
- [21] A. V. Savkin, R. J. Evans and E. Skafidas, "The problem of optimal robust sensor scheduling," *Systems & Control Letters*, no. 43, pp. 149 - 157, 2001.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

DATA UMUM

Nama Lengkap : Fuad Surastyo Pranoto
Tempat & Tgl. Lahir : Semarang, 3 September 1987
Jenis Kelamin : Laki - Laki
Instansi Pekerjaan : Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional
NIP. / NIM. : 198709032014021004



DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMA Taruna Nusantara Tahun: 2002
STRATA 1 (S.1) : AE ITB Tahun: 2005
STRATA 2 (S.2) : AE ITB Tahun: 2009

ALAMAT

Alamat Kantor / Instansi : Jalan Pemuda Persil Nomor 1 Jakarta
Email : fuad.pranoto@lapan.go.id, fuadtarnus2000@gmail.com