

ANALISA DAN PENINGKATAN STABILITAS WAHANA KENDALI RKX-200TJ DENGAN BALLAST

ANALYSIS AND ENHANCEMENT OF STABILITY FOR HIGH SPEED UAV RKX-200TJ USING BALLAST

Rahmat Alfi Duhri*, Andreas Prasetya Adi*
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
rahmat.alfi@lapan.go.id, andreas.prasetya@lapan.go.id

Abstrak

LAPAN telah mengembangkan wahana kendali berkecepatan tinggi RKX-200TJ berbasis mesin turbo jet sejak 2014. Pengembangan terus dilakukan untuk meningkatkan kinerja wahana, salah satunya adalah dengan memperbesar ruang tangki bahan bakar. Perubahan desain wahana ini sekaligus menggeser posisi mesin turbo jet serta lubang udara ke belakang, sehingga perlu dilakukan analisa ulang stabilitas wahana RKX-200TJ.

Makalah ini membahas analisa stabilitas wahana sekaligus upaya tindak lanjutnya. Pertama-tama dilakukan pengukuran titik berat (CG) wahana. Dari hasil analisa stabilitas diketahui bahwa titik berat wahana perlu digeser ke depan sekitar 13 cm. Langkah penanganannya adalah dengan menambah dan/atau menggeser pemberat (*ballast*). Untuk itu telah dilakukan perhitungan dimensi *ballast* yang optimal dengan memanfaatkan iterasi dari persamaan *Center of Mass* dari benda titik dengan sedikit modifikasi. Dari hasil perhitungan tersebut, diperoleh bahwa *ballast* harus ditambah 5 kg. Pengujian dilakukan menggunakan wahana dummy yang telah ditambah *ballast* tersebut, yang didorong menggunakan *booster*. Hasilnya, wahana berhasil *take off* dan terbang dengan stabil. Kata kunci: wahana kendali, stabilitas, titik berat, *ballast*.

Abstract

LAPAN has developed high speed UAV RKX-200TJ driven by mini turbojet engine since 2014. The development never cease to be conducted to enhance the performance of vehicle—e.g., to enlarge the dimension of fuel tank. The change of fuel tank not only enhance the performance but also decrease the stability of RKX-200TJ since it is the subject of engine position and intake to become more backward.

This paper will discuss about stability analysis of vehicle and the endeavor to solve the problem regarding that stability. Firstly, the center of gravity (CG) of vehicle was measured. The analysis of stability suggest that the CG of vehicle must be made more forward about 13 cm. This can be done by adding certain ballast with certain geometry at the area around nosecone. The calculation of optimal ballast was conducted by iteration using modification of center of mass equation. From this calculation, the mass of ballast that must be added was 5 kg. The test to confirm the stability of vehicle was conducted using dummy vehicle loaded with added-ballast which was pushed by solid propellant booster. The result of this test was the vehicle successfully take-off and have stable flight.

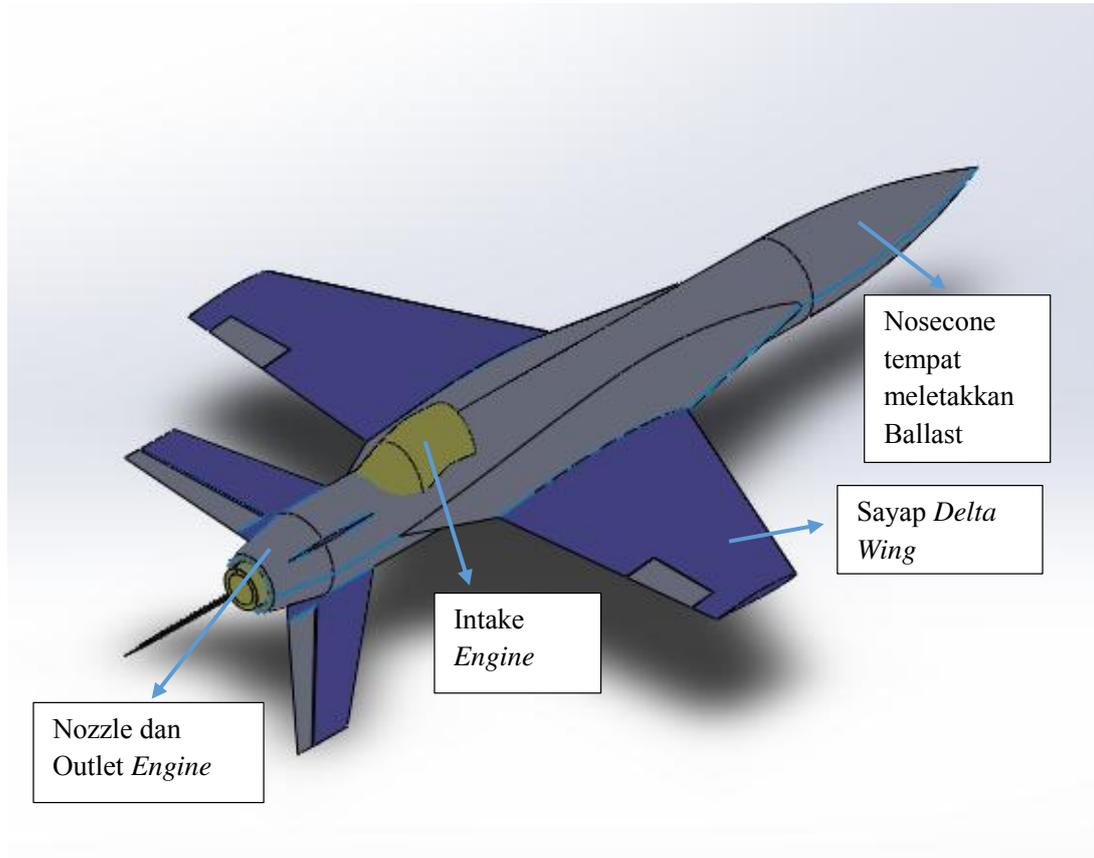
Keywords: high speed UAV, stability, center of gravity, ballast.

1. PENDAHULUAN

Wahana RKX-200TJ merupakan wahana kendali yang dikembangkan LAPAN Pustekroket dalam rangka riset sistem kendali roket. *Roadmap* pengembangan sistem kendali yang dijalankan oleh LAPAN adalah dengan penerapan sistem kendali pada *high speed* UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Kecepatan wahana yang dikendalikan akan semakin ditingkatkan hingga sampai pada kecepatan *high speed*. RKX-200TJ mulai dikembangkan sejak tahun 2014 dengan menggunakan *engine mini turbojet*

* Kontributor utama

dengan *thrust* maksimal mencapai 250 N. Dengan *engine* tersebut, RKX-200TJ dapat terbang dengan kecepatan mencapai 250 km/jam. RKX-200TJ pada dasarnya dikembangkan dengan pesawat pemanding UAV F-16 yang menerapkan konsep *flying wing* dengan sayap delta[8].



Gambar 1. 1 Gambar Isometrik Wahana RKX-200TJ

Pada awal tahun 2018, wahana RKX-200TJ berada pada awal tahap pengembangan. Wahana sudah diberi *ballast* seberat 4 kg, tetapi masih belum stabil. Kesimpulan bahwa wahana belum stabil diperoleh dari melakukan pengukuran lokasi CG (*Center of Gravity*) dan perhitungan kestabilan wahana dengan *software Missile DATCOM*. *Software Missile DATCOM* merupakan *software* untuk memprediksi koefisien aerodinamika dan turunan kestabilan dengan metode semi-empirik. Metode semi-empirik ini memanfaatkan rumus dan hasil eksperimen. Dengan kata lain, *Missile DATCOM* ini bekerja dengan cara mengenali geometri wahana yang diinputkan kemudian mencocokkan dengan data hasil eksperimen untuk geometri serupa. Selanjutnya koefisien aerodinamika dan turunan kestabilan untuk geometri wahana yang diinputkan dapat diprediksi dengan hasil yang cukup memadai untuk desain awal. Secara lebih lengkap, penjabaran mengenai pengukuran lokasi CG dan perhitungan kestabilan dengan *Missile DATCOM* akan ditampilkan pada bagian metodologi. Selanjutnya, karena wahana belum stabil dengan jumlah *ballast* yang ada, maka perlu dilakukan penambahan *ballast*.

Penentuan berat *ballast* dapat dilakukan dengan berbagai macam cara. Salah satu cara yang sering dilakukan adalah dengan memanfaatkan instrumen pengukuran CG kemudian bagian depan wahana diberi lilin sedikit demi sedikit hingga posisi CG bergeser pada tempat yang diperkirakan. Akan tetapi, cara tersebut membutuhkan banyak tenaga dan waktu serta rawan terjadi kesalahan sehingga kurang efektif. Hal ini disebabkan oleh dua faktor yaitu: instrumentasi pengukuran CG dan teknis penambahan lilin. Secara teknis, untuk mengukur CG diperlukan dua timbangan untuk mengukur elemen massa dan jarak elemen massa dari suatu acuan selanjutnya CG ditentukan dengan rumus berikut[6][9].

$$r_{c.g} = \frac{r_1 m_1 + r_2 m_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots} \quad (1.1)$$

dengan $r_{c.g}$ adalah lokasi c.g, r_i adalah lokasi komponen massa dari wahana ke- i , dan m_i adalah massa dari komponen massa ke- i .

Proses pengukuran CG tersebut di LAPAN Pustekroket masih dilakukan secara manual sehingga cukup memakan waktu. Apalagi pengukuran CG harus mempertimbangkan akurasi sehingga pengukuran tidak boleh dilakukan sekali. Oleh karena itu, instrumentasi CG dapat membuat efektifitas proses penentuan *ballast* menjadi berkurang. Selanjutnya dalam hal penambahan lilin, teknis yang dilakukan adalah menambahkan secara bertahap, sedikit demi sedikit, agar CG tidak terlalu maju sehingga wahana tidak menjadi terlalu stabil sehingga susah dikendalikan. Misalkan lilin ditambahkan 1 kg secara bertahap, apabila ternyata lilin yang dibutuhkan (belum diketahui) adalah 10 kg, maka penambahan dilakukan sebanyak 10 kali. Oleh karena setiap penambahan lilin CG harus dicek, maka perlu dilakukan pengukuran CG minimal sebanyak 10 kali dan pengukuran sebelumnya mempengaruhi pengukuran setalahnya. Hal ini secara teknis tidak efektif dan dapat diperparah oleh faktor instrumentasi pengukuran CG.

Perlu diketahui, proses pengukuran CG di LAPAN Pustekroket dilakukan dengan menggunakan *platform* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pengukuran dilakukan dengan mengukur jarak antara *nosecone* dengan penyangga 1 dan *nosecone* dengan penyangga 2. Masing-masing penyangga mewakili elemen massa 1 dan elemen massa 2. Langkah selanjutnya adalah mengukur massa dari masing-masing elemen massa ini dengan melihat pada timbangan. Setelah masing-masing elemen massa diketahui jarak dan massanya, kemudian rumus (1.1) dapat digunakan untuk menghitung lokasi CG (*Center of Gravity*) dari wahana RKX-200TJ.

Dengan menimbang kesulitan cara penentuan *ballast* seperti yang telah dijelaskan, maka perlu dicoba cara lain yang lebih efektif. Makalah ini akan menjelaskan cara lain tersebut hingga didapat tambahan *ballast* yang dapat membuat wahana stabil.

2. METODOLOGI

Pada bagian pendahuluan telah dijelaskan bahwa untuk meningkatkan kestabilan wahana RKX-200TJ, langkah yang telah dilakukan adalah pengukuran CG, perhitungan kestabilan wahana, dan desain *ballast* wahana. Selain, hal-hal tersebut, perlu dilakukan juga uji terbang untuk memastikan bahwa wahana memang benar terbang dengan stabil. Penjabaran dari tahapan-tahapan tersebut akan diuraikan pada bagian metodologi ini.

2.1. Pengukuran *Center of Gravity* (CG)

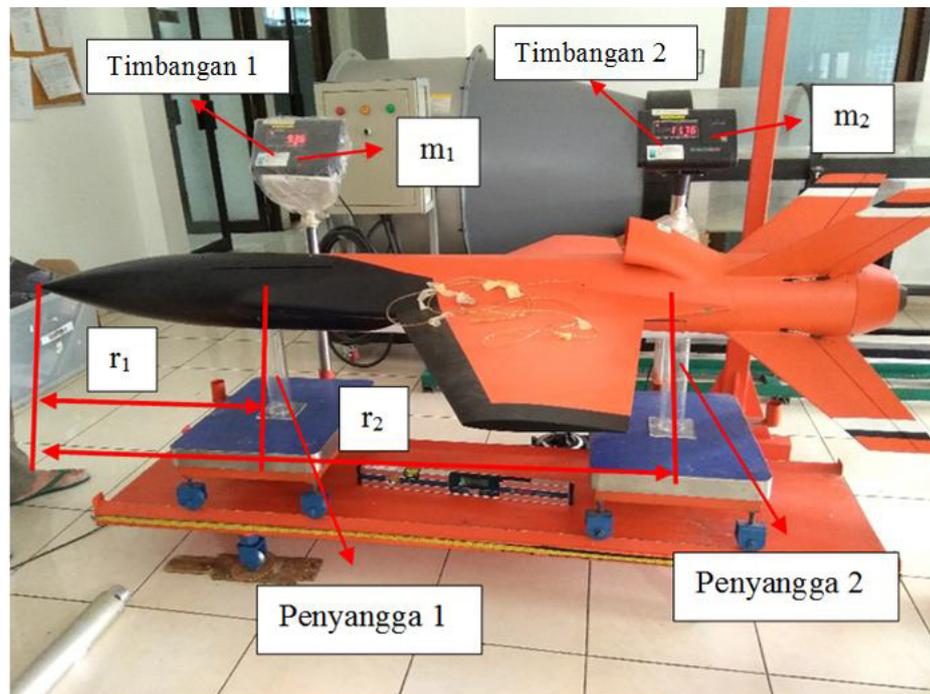
2.1.1. Alat dan Bahan

1. Penggaris 3 buah
2. Meteran panjang 1 buah
3. Timbangan digital besar 2 buah
4. *Platform* pengukuran c.g sumbu X
5. *Platform* pengukuran c.g sumbu Z
6. *Water pass*

2.2.2. Prosedur Pengukuran CG

Pada dasarnya pengukuran CG dilakukan dengan membagi elemen massa dan mengukur jarak serta massa dari masing-masing elemen massa. Selanjutnya, rumus (1.1) digunakan untuk menghitung posisi c.g dari wahana. Adapun prosedur untuk mengukur c.g pada sumbu X adalah:

1. Pasang wahana pada *platform* pengukur c.g seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Platform Pengukuran CG beserta dengan Wahana

2. Pastikan *platform* c.g datar tanpa membentuk sudut dengan permukaan tanah dengan menggunakan *waterpass*
3. Catat massa yang terukur pada dua timbangan
4. Ukur jarak penyangga wahana yang berada di atas timbangan. Perlu diingat bahwa pengukuran jarak yang dimaksud di sini adalah jarak dari ujung *nose* menuju bagian tengah penyangga.
5. Ukur c.g dari *nose* menggunakan persamaan (1.1) dan tandai posisi c.g tersebut.

2.2. Perhitungan Kestabilan Wahana RXX-200TJ

Parameter kestabilan wahana dapat dilihat dari nilai koefisien turunan kestabilan $C_{M\alpha}$, $C_{l\beta}$, dan $C_{N\beta}$ [2] [3]. Secara berturut-turut, turunan kestabilan tersebut adalah: turunan kestabilan *moment pitch* terhadap sudut serang, turunan kestabilan *moment roll* terhadap sudut *slip* samping, dan turunan kestabilan *moment yaw* terhadap sudut *slip* samping. Agar wahana stabil, nilai turunan kestabilan harus memenuhi syarat-syarat antara lain [4], [5], [10]:

1. $C_{M\alpha} < 0$ atau CMA untuk hasil koefisien dari *Missile* DATCOM,
2. $C_{l\beta} < 0$ atau CLLB untuk hasil koefisien dari *Missile* DATCOM, dan
3. $C_{N\beta} > 0$ atau CLNB untuk hasil koefisien dari *Missile* DATCOM.

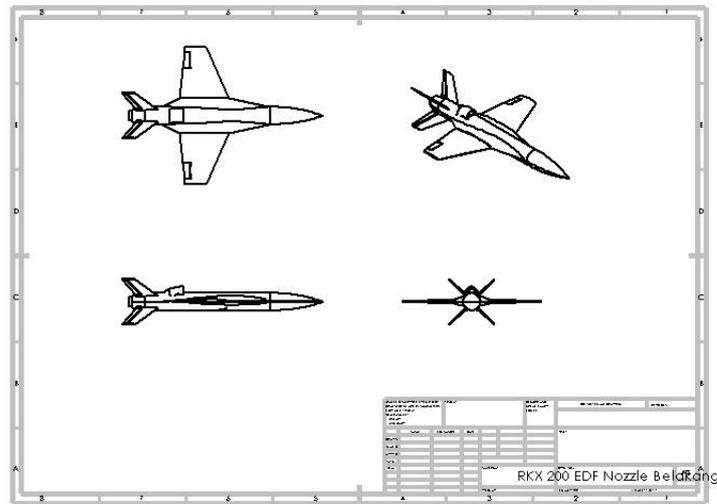
2.2.1. Pemodelan Wahana

Untuk melakukan perhitungan koefisien aerodinamika dengan menggunakan DATCOM, pemodelan wahana yang dilakukan menggunakan asumsi sebagai berikut:

1. Tinggi terbang diasumsikan pada *sea level*.
2. *Nosecone* dimodelkan sebagai *ogive*.
3. *Mid body* dimodelkan sebagai tabung axisimetris.
4. *Fin* depan dimodelkan dengan membagi *inner fin* dan *outer fin*.
5. Kondisi terbang yang dipilih adalah kondisi *cruise*.

2.2.2. Geometri Umum Wahana

Bentuk wahana hasil manufaktur dapat dilihat pada Gambar 2.1. Sedangkan gambar tiga pandangan dari wahana tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Three View Drawing Wahana RXX-200TJ

Dengan menggunakan gambar teknik dengan format. SLDPRT dapat diidentifikasi geometri wahana yang akan di-input pada *Software Missile DATCOM*.

2.2.3. Lokasi *Center of Gravity* Wahana

Lokasi *Center of Gravity* yang digunakan adalah lokasi yang diperoleh dari hasil pengukuran. Jika hasil pengukuran tersebut memberikan nilai parameter kestabilan yang stabil, maka nilai *Center of Gravity* dimajukan hingga memperoleh hasil parameter kestabilan yang stabil.

2.2.4. Bentuk *Airfoil* Wahana

Airfoil dari sayap wahana adalah NACA 64-208 sedangkan *airfoil* untuk *fin* adalah NACA 0006.

2.2.5. Import Geometry pada *Missile DATCOM*

Setelah identifikasi geometri dilakukan, langkah selanjutnya adalah memasukkan geometri pada *Software Missile DATCOM*. *Input* geometri pada *Missile DATCOM* beserta keterangannya dapat dilihat pada bagian lampiran.

2.3. Estimasi Dimensi dan Massa *Ballast* serta Pembuatan dan Penerapan *Ballast*

Pada subbagian 2.1. dan 2.2., pengukuran lokasi CG (*Center of Gravity*) dan perhitungan lokasi CP (*Center of Pressure*) telah dijabarkan. Data lokasi CG dan CP tersebut diperlukan untuk melakukan estimasi dimensi *ballast* dari RXX-200TJ. Dengan mengetahui lokasi CG wahana, maka dapat diketahui apakah lokasi CG tersebut berada di depan CP atau di belakang CP. Agar wahana stabil, lokasi CG harus berada di depan CP. Selain itu, lokasi CG juga dapat digunakan untuk perhitungan koefisien turunan kestabilan aerodinamika C_{m_α} yang mempunyai referensi terhadap CG. Langkah-langkah yang dilakukan untuk memperoleh dimensi *ballast* adalah sebagai berikut.

1. Tentukan lokasi CG yang diinginkan, dan pastikan lokasi tersebut berada di depan CP atau sesuai dengan *requirement* kestabilan wahana yang ditetapkan.
2. Untuk menentukan massa *ballast*, asumsikan elemen massa wahana sebagai benda titik begitu juga elemen massa *ballast*. Dengan asumsi tersebut, rumus (1.1) dapat digunakan. Olah rumus (1.1) tersebut sehingga diperoleh rumus sebagai berikut.

$$m_b = \frac{r_{cg}(m_b+m_v)-r_v m_v}{r_b} \quad (1.2)$$

Di mana:

m_b : massa *ballast*

r_{cg} : lokasi c.g

m_v : massa wahana kosong

r_v : lokasi pusat massa wahana kosong

r_b : lokasi pusat massa *ballast*.

3. Selanjutnya dengan rumus yang sama tentukan lokasi *ballast* sebagai benda titik di atas.
4. Ulangi langkah 2 dan 3 sampai didapat massa paling minimum dengan lokasi *ballast* yang masih bisa dimuat oleh wahana. Penentuan apakah bisa dimuat atau tidak sebenarnya cukup *tricky*. Pada makalah ini, penentuan tersebut dilakukan dengan melihat lokasi paling akhir *ballast*, yang merupakan dudukan *ballast*, dan melihat juga bahan yang akan digunakan sebagai *ballast*.
5. Setelah massa *ballast* didapat, tentukan bahan dengan massa jenis homogen dengan bentuk tertentu. Langkah kelima ini pada dasarnya adalah mewujudkan *ballast* dalam bentuk bukan benda titik. Karena pada kenyataannya, ukuran *ballast* cukup besar sehingga secara intuitif maupun kenyataan tidak dapat dianggap sebagai benda titik. Pada makalah ini, bahan yang digunakan adalah *steel* dengan massa jenis 7934,35 kg/m³ dengan bentuk silinder. Penentuan bentuk homogen ini akan memudahkan penentuan dimensi dan lokasi dari *ballast* sebagai benda rigid. Dengan menentukan bentuk homogen, misalnya silinder, parameter yang perlu diubah dari *ballast* sebagai benda rigid hanya tinggal lokasi titik massa *ballast* sebagai benda rigid dan panjang *ballast*. Pada tahap 4 telah disebutkan bahwa wahana RXX-200TJ mempunyai batas akhir tempat peletakan *ballast*, hal ini memudahkan juga dalam perhitungan tahap 5 sehingga parameter yang perlu dihitung hanya tinggal panjang dari *ballast*.

2.4. Uji Terbang RXX-200TJ

Uji terbang RXX-200TJ dilakukan dengan menggunakan wahana *dummy*. Wahana *dummy* ini dibuat dengan menggantikan *engine* mini turbojet wahana dengan pemberat. Uji terbang RXX-200TJ ini dilakukan di BUTPAAG Lapan, Pameungpeuk, Garut, Jawa Barat. Proses peluncuran dilakukan dengan *booster* propellan padat sebagai pendorong awal *fase take-off*. Diharapkan setelah *fase* ini, wahana akan *gliding* hingga jatuh kembali dengan lintasan membentuk parabola. Jika wahana stabil, lintasan parabola dan *fase* terbang *gliding* tersebut akan dapat tercapai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Teknis dari tahapan-tahapan yang telah dilakukan pada makalah ini telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, bagian 2. Bagian ini akan membahas hasil dan pembahasan dari tahapan-tahapan pada bagian 2 tersebut.

3.1. Hasil Pengukuran *Center of Gravity*

Pengukuran *Center of Gravity* telah dilakukan pada wahana RXX-200TJ yang mempunyai *ballast* sebesar 4 kg. Hasil dari pengukuran ini dapat ditunjukkan sebagai berikut.

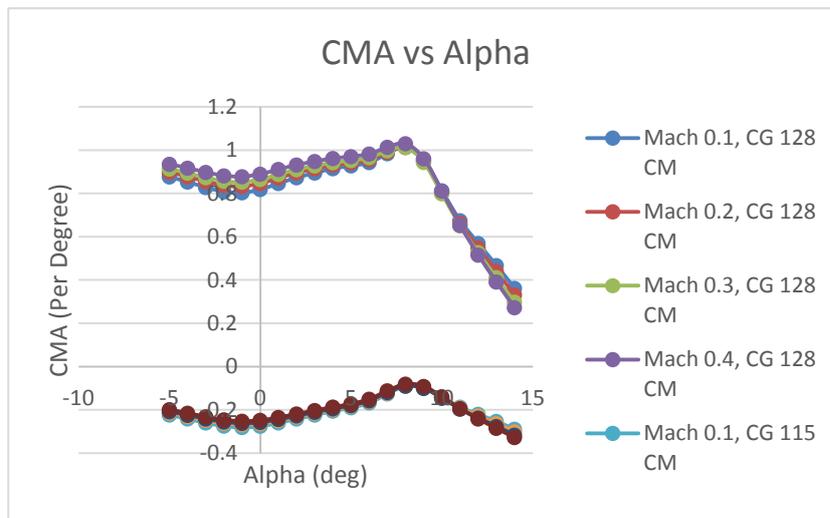
Tabel 3. 1 Tabel Hasil Pengukuran CG RXX-200TJ

	Xcg (diukur dari <i>nose</i>) [cm]
Tanpa <i>booster</i> , tanpa <i>fuel</i>	128,2
Tanpa <i>booster</i> , dengan <i>fuel</i>	127,96
Dengan <i>booster</i> , dengan <i>fuel</i>	133,83

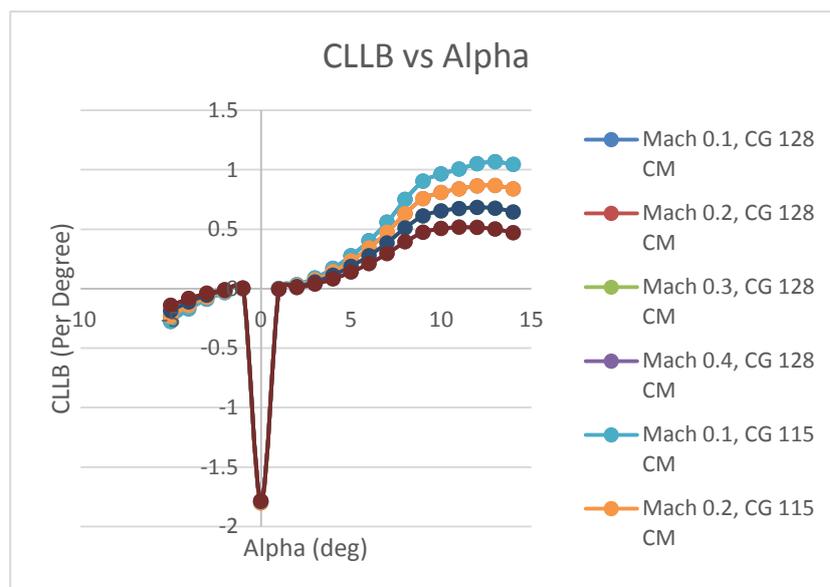
Hasil pengukuran yang akan digunakan adalah nilai X_{cg} tanpa *booster* dengan *fuel*. Hal ini disebabkan karena *booster* adalah benda yang terpisah dari wahana sehingga secara matematis dapat dimodelkan sebagai gaya eksternal.

3.2. Hasil Perhitungan Kestabilan Wahana RKX-200TJ

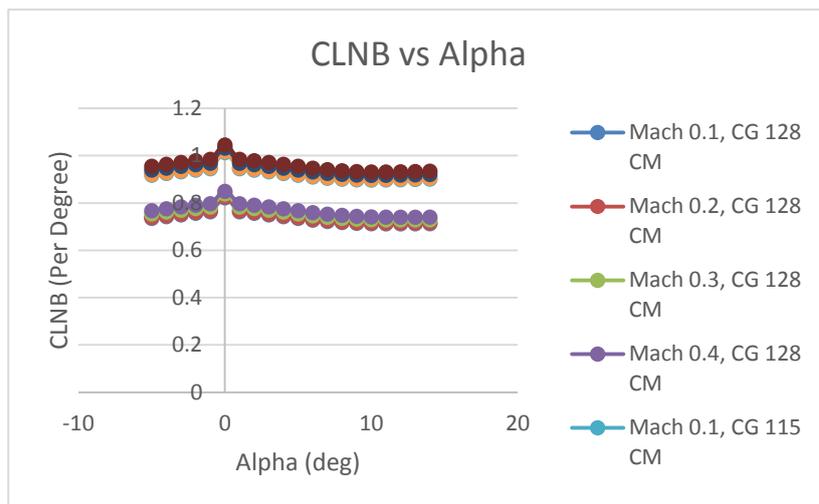
Hasil perhitungan turunan kestabilan wahana RKX-200TJ dapat dilihat pada grafik 3.1 hingga 3.3. Grafik-grafik tersebut menunjukkan koefisien CMA, CLLB, dan CLNB atau masing-masing menunjukkan koefisien turunan kestabilan $C_{M\alpha}$, $C_{l\beta}$, dan $C_{N\beta}$. Nilai CMA untuk CG 128 cm bernilai positif atau tidak stabil, sedangkan nilai CMA untuk CG 115 cm bernilai negatif atau stabil. Sehingga dapat disimpulkan bahwa agar stabil sesuai syarat-syarat kestabilan, lokasi CG harus berada maksimum 115 cm. Dengan melihat nilai ini, maka dapat diketahui bahwa lokasi CG harus digeser sejauh 13 cm dengan menambahkan *ballast*.



Grafik 3. 1 Grafik CMA vs Alpha



Grafik 3. 2 Grafik CLLB/CLRoll vs Alpha



Grafik 3.3 Grafik CLNB vs Alpha

Sementara itu, untuk koefisien CLLB dan CLNB, agar stabil koefisien ini harus bernilai positif. Secara garis besar, untuk lokasi CG 128 cm dan lokasi CG 115 cm koefisien CLLB bernilai mendekati nol dan positif kecuali pada sudut serang nol derajat, yang mengalami penurunan hingga $-1,75$ per *degree*. Kondisi tidak stabil ini dapat distabilkan dengan defleksi bidang kendali sehingga tidak akan menimbulkan masalah. Sementara itu, untuk koefisien CLNB pada CG 128 cm maupun CG 115 cm, wahana akan stabil karena koefisien ini bernilai positif berapapun sudut serang wahana.

3.3. Hasil Estimasi Dimensi dan Massa *Ballast*

Sesuai dengan hasil pengukuran CG dan perhitungan koefisien turunan kestabilan, didapat bahwa wahana akan stabil jika lokasi CG minimum 115 cm dari ujung *nosecone*. Hasil pengukuran CG wahana dengan *ballast* 4 kg, menghasilkan lokasi CG wahana berada 128 cm dari ujung *nosecone*. Sehingga agar wahana stabil, *ballast* perlu ditambah. Estimasi penambahan *ballast* sesuai dengan pembahasan bagian 2 dimulai dengan estimasi *ballast* dengan mengasumsikan *ballast* dan wahana sebagai benda titik. Kemudian dilakukan iterasi sebagai berikut.

Tabel 3. 2 Grafik Iterasi Penentuan Massa *Ballast*

Wahana dengan <i>Fuel</i> , Tanpa <i>Booster</i>								
Berat dengan <i>fuel</i> [kg]	25,75	Berat <i>ballast</i> [kg]	4,18	Berat kosong [kg]	21,57			
Lokasi CG [cm]	127,96	lokasi <i>ballast</i> [cm]	55					
CG=(mw.xw+mb.xb)/(Berat Total)								
mw.xw	3065,07	kg.cm						
Konfigurasi	1	2	3	4	5	6	7	8
lokasi <i>ballast</i> baru [cm]	55	50	45	40	35	30	25	20
Berat <i>ballast</i> baru [kg]	9,74	8,99	8,35	7,79	7,31	6,88	6,49	6,15
CG [cm]	115	115	115	115	115	115	115	115

Konstrain dari *ballast* pada RKX-200TJ adalah lokasi dudukan *ballast* tidak bisa dibuat lebih mundur karena bagian setelah dudukan *ballast* digunakan sebagai tempat untuk menyimpan muatan. Sehingga, untuk menambahkan *ballast*, cara yang dilakukan tidak bisa tidak adalah dengan menambah

diameter *ballast* yang ada atau memperpanjang *ballast* ke arah depan. Opsi memperpanjang *ballast* dipilih dengan pertimbangan lebih mudah diterapkan. Pada tabel di atas, dilakukan iterasi untuk beberapa konfigurasi *ballast* yang dapat menghasilkan lokasi CG wahana berada pada 115 cm. Dapat diketahui bahwa semakin dekat lokasi *ballast* dengan *nosecone*, maka berat *ballast* akan semakin kecil. Akan tetapi, berat *ballast* yang semakin kecil akan susah untuk diterapkan karena *nosecone* wahana yang semakin kecil akan mempersempit *space* yang dapat memuat *ballast*. Mengingat panjang *nosecone* adalah 60 cm dan diameter maksimum 20 cm dengan bentuk *ogive*, maka lokasi hingga 50 cm dari *nosecone* masih memberikan diameter maksimum 20 cm. Artinya untuk meletakkan *ballast* akan lebih mudah dilakukan pada bagian 50—60 cm karena *range* ini relatif datar. Oleh karena itu, *ballast* yang diperlukan adalah sebesar 9 kg, dengan berat *ballast* yang sudah ada adalah 4,18 kg, maka perlu adanya tambahan *ballast* sebesar kurang lebih 5 kg.

Setelah berat *ballast* ditentukan, langkah selanjutnya adalah menentukan geometri dari *ballast*. *Ballast* dengan berat 4,18 kg beserta tambahan 5 kg, terbuat dari *stainless steel* dengan massa jenis $7934,35 \text{ kg/m}^3$. *Ballast* beserta dengan massa tambahan dapat dilihat pada Gambar 3.1. Pada gambar tersebut, nomor 1 merupakan *ballast* lama dengan berat 4,18 kg dan nomor 2 merupakan massa tambahan. Penentuan panjang massa tambahan dilakukan dengan membuat Gambar 3.1 pada Solidworks. Kemudian lokasi CG dan massa *ballast* dihitung dengan memanfaatkan fitur yang ada pada Solidworks [7]. Dengan metode ini, didapat panjang *ballast* tambahan sebesar 15 cm dengan lokasi CG *ballast* baru berada pada 47,9 cm dari ujung *nosecone* dan berat *ballast* 9 kg. Tahapan selanjutnya adalah mencoba wahana dengan uji terbang untuk memastikan apakah *ballast* yang telah ditambahkan benar-benar dapat menstabilkan wahana RXX-200TJ.



Gambar 3.1 *Ballast* Lama dan Massa Tambahan

3.4. Uji Terbang Wahana

Tahapan terakhir dari makalah ini adalah uji terbang wahana dengan *ballast* 9 kg. Tahapan ini dilakukan dengan menggunakan wahana *dummy*, yaitu wahana tanpa dipasang *engine*. Adapun massa *engine* diganti dengan *stainless steel* yang sesuai dari sisi massa dan lokasi titik berat. Setelah dilakukan uji terbang, didapat cuplikan *fase* terbang sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 2 Cuplikan Hasil Uji Terbang *Dummy* RDX-200TJ

Hasil uji terbang menunjukkan bahwa wahana RDX-200TJ menghasilkan wahana terbang dengan stabil dan dapat menempuh jarak *gliding* sebesar sekitar 90 meter.

4. KESIMPULAN

Dari tahapan perhitungan koefisien turunan kestabilan dan pengukuran lokasi CG didapat bahwa agar wahana stabil, CG harus digeser sebesar 13 cm. Metode untuk menggeser CG ini dapat dilakukan dengan penambahan *ballast*. Komponen yang perlu diperhatikan agar *ballast* yang ditambahkan bisa menggeser CG sesuai dengan *requirements* yang diinginkan antara lain: massa *ballast*, massa wahana, lokasi CG wahana, dan lokasi titik berat *ballast*. Hasil kegiatan dari makalah ini adalah massa *ballast* sebesar 9 kg, dengan massa 4,18 kg sudah ditempatkan pada wahana sehingga kurang sekitar 5 kg. Massa tambahan tersebut mempunyai panjang 15 cm. Setelah *ballast* ditambahkan, wahana berhasil terbang stabil dengan jarak *gliding* sebesar 90 meter.

Penambahan *ballast* sebenarnya bisa berdampak penurunan performa dari wahana UAV. Hal ini disebabkan karena berat wahana menjadi semakin besar yang dapat berdampak pada *range* maupun *endurance*. Hal ini sesuai dengan prinsip dasar fisika bahwa untuk bergerak (terbang) dengan berat yang lebih besar, maka energi yang diperlukan akan semakin besar. Apabila ketersediaan energi sama, maka *range* (jarak terbang maksimum) dan *endurance* (waktu terbang maksimum) tentu saja akan

menjadi lebih kecil. Akan tetapi, *ballast* pada UAV dapat memberikan desain struktur yang lebih efektif mengingat ukuran UAV yang kecil dan tanpa awak. Ukuran UAV yang kecil dapat menyebabkan keterbatasan manufaktur struktur karena tidak mungkin struktur dimanufaktur secara kompleks. Selain itu, karena UAV tanpa awak, maka *ballast* yang tepat tidak akan merugikan dari sisi performa. Hal ini disebabkan karena penurunan *endurance* maupun *range* masih dalam angka yang diinginkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Bu Sri Kliwati, Soleh Fajar Junjuna, Mirza Zulfikar Ahmad, Galang Ilman Islami, M. Arjuna Putera Perdana, Pak Maksu, Pak Lesta, Pak Tisna, Pak Agus yang telah membantu selama proses pengerjaan pengukuran CG maupun memberikan masukan-masukan yang berharga dalam hal analisis dan pembuatan *ballast* serta uji terbang.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi makalah ini merupakan tanggung jawab penulis. Kedua penulis merupakan kontributor utama.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rosema C. et al. *Missile DATCOM User's Manual*, US Army, United State, 2011.
- [2] Roskam, Jan. *Methods for Estimating Stability and Control Derivatives of Conventional Subsonic Airplanes*, The University of Kansas, Kansas, 1971.
- [3] Schmidt, David K. *Modern Flight Dynamics*, McGraw-Hill, New York, 2012.
- [4] Mulder, J.A. et al. *Flight Dynamics Lecture Notes*. TUDelft, Belanda, 2006.
- [5] Muhammad, Hari. *Diktat Kuliah Dinamika Terbang*, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2014.
- [6] H. Nancy. *Center of Gravity – cg Aircraft Application*, tersedia di: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/acg.html>, diakses Januari 2019.
- [7] Solidworks. *Displaying Mass Properties*, tersedia di: https://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/sldworks/t_displaying_mass_properites.htm, diakses Februari 2019.
- [8] AeroPrecision. *F-16 XL Cranked-Arrow Wing*, tersedia di: http://www.f-16.net/f-16_versions_article1.html, diakses Juni 2019.
- [9] Giancoli, Douglas C. *Physics Principles with Application*, Sixth Edition, Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [10] Etkin B., *Dynamics of Flight Stability and Control*, John Wiley & Sons, Canada, 1996