

ANALISA PENGARUH AERODINAMIKA PADA MARGIN STABILITAS MORTIR LATIH 81 MM DENGAN SISTEM KOMPRESI UDARA

Akhmad Ali Imron

Mahasiswa S2
Teknik Mesin, Universitas Brawijaya
Staf Jurusan Teknik Mesin
Poltekad Kodiklatad
aliimron15@student.ub.ac.id

Agung Sugeng Widodo

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
agung_sw@ub.ac.id

Anindito Purnowidodo

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
anindito01@yahoo.com

Mortar is one type of weapon used by Infantry units. One type of mortar that is widely used, especially in technical training, is the 81 mm mortar prototype produced by PT. Pindad, which has a 7.62 mm caliber munitions thruster with an average range of 110 meters. However, this mortar still has unstable aerodynamics. Therefore, this study was conducted to design a safe mortar prototype with a stability margin value, so it can determine the range and improve the troop skills. Computational fluid dynamic simulation was conducted through the ANSYS software to simulate important aerodynamic properties in this study. The angle variation of the barrel in firing used is 450,550 and 650 with compression pressure variation of 16,18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32 bar. Meanwhile, the angle modification of the mortar fin is 330,440,550 and the aerodynamic simulation was carried out at 20, 30, 40 m/s speeds. The results showed that the design of an 81 mm mortar prototype which has a fin angle of 330 at a simulated speed of 20,30,40 m/s, an angle of attack of 450,550, 650 has the smallest drag force and lift force and the smallest number of postive pitch moments, but still has a standard margin of stability of about 1.57-1.81 caliber.

Keywords: Technical Drill, Range Distance, Margin Stability, Mortar

1. PENDAHULUAN

PT. Pindad telah memproduksi Granat Mortir Kaliber 81 mm Latih A1 yang memiliki massa 4.000-4.800 gram, badan mortir latih terbuat dari baja tempa, dan ekor terbuat dari aluminium [1]. Pendorong dari mortir ini menggunakan munisi tajam kaliber 7,62 mm x 51 mm ketika penembakaan jarak capai rata-rata 110 meter, maksimal dapat digunakan 20 kali [2]. Mahesa *et al.* [3] melakukan penelitian tentang pendeteksi kecepatan proyektil mortir 81 mm bertekanan udara menggunakan sinar inframerah. Panjang mortir diukur terlebih dahulu 670 mm, kemudian di inputkan pada program software yang telah dibuat. Alat pendeteksi kecepatan mortir dipasang pada saat mortir meluncur melewati laras akan memotong sensor infra merah, kemudian sistem akan menghitung waktu melintasnya mortir dari ujung kepala mortir sampai ujung ekor mortir sehingga dapat diketahui kecepatan mortir meluncur dari mulut laras. Hasil penelitian alat pendeteksi kecepatan mortir bertekanan udara, kemampuan photodiode mampu mendeteksi kecepatan 0,005 μ s, dan hasil pengukuran memiliki data error 3,37% [3]. Achara [4] melakukan penelitian tentang karakteristik aerodinamik untuk menghitung kecepatan flutter sirip suatu roket menggunakan CFD. Dengan menggunakan model matematika NACA 4 Digit, sirip mortir telah dianggap sebagai balok kantilever sederhana, dimodelkan dalam perangkat lunak CAD Solidworks dan dianalisis dengan tepat. Dalam pemodelan, sifat dasar bahan sirip serta variabel atmosfer telah dipertimbangkan. MATLAB dan ANSYS Work Bench, menganalisis fin dan domain udara. Terakhir, pola aliran dan karakteristik dinamis disekitar sirip mortir divisualisasikan menggunakan ANSYS fluent Post Processing. Hasil penelitian menunjukkan flutter sirip mortir dapat diketahui dan ditemukan bahwa tekanan aerodinamis tertinggi ada pada ujung depan sirip [4].

Analisa balistik menunjukkan bahwa kerja yang dilakukan oleh suatu mortir merupakan integral dari gaya dan panjang mortir [5]. Sedangkan gaya merupakan perkalian antara tekanan dan luas penampang,

sehingga kerja yang dilakukan oleh mortir sama dengan integral dari tekanan dikali luas penampang dan panjang laras. Selanjutnya jika unsur luas penampang disimbolkan A , maka dx differensial panjang laras, maka differensial volume merupakan luas penampang dikali dengan differensial panjang. Jika dianggap semua tekanan pada dinding laras konstan dan nilainya sama terhadap luas penampang laras maka persamaan menjadi kerja mortir merupakan integral dari tekanan dikali luas penampang laras dikalikan differensial luas penampang laras. Penentuan sudut elevasi dan azimuth suatu mortir dilakukan dengan melibatkan rumus-rumus fisika mengenai teori gerak peluru (gerak parabola), teorema Pythagoras sedangkan hasil pengujian di lapangan menjadi acuan dalam pembuatan tabel tembak mortir [6].

Bentuk bagian depan mortir (*nose cone*) merupakan ujung utama permukaan aerodinamis, bagian ini yang sangat berpengaruh terhadap gaya hambat dari suatu mortir. Umumnya bentuk ujung mortir dibuat dalam berbagai bentuk, diantaranya elips panjang, elips pendek, kerucut, parabolik dan lain-lain. Dari berbagai bentuk ujung depan mortir yang memiliki gaya hambat paling kecil adalah bentuk *long elliptical* pada kecepatan 17,55 m/s, temperatur 22°C, 0,0407 N, sehingga bentuk ini cocok untuk kecepatan subsonic [7]. Manimaran *et al.* [8] menunjukkan bahwa jarak antara *center of pressure* (CP) dan *center of gravity* (CG) memiliki peran penting dalam stabilitas mortir. Selama mortir meluncur, propelan terbakar menghasilkan daya dorong. Saat massa propelan dikeluarkan sebagai produk pembakaran, pusat gravitasi bergerak dari lokasi awal. Tetapi pusat tekanan tetap konstan karena tidak ada pengurangan luas penampang. Hal ini membuat jarak antara CG dan CP berubah dan kestabilan berubah [8]. Dengan demikian stabilitas kaliber harus lebih tinggi untuk memastikan perubahan CG tidak akan mempengaruhi stabilitas mortir di lintasan. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah pusat gravitasi: 470 mm; Pusat tekanan: 856 mm; dari Analisis ini, CG dan CP dihitung, dan diamati bahwa roket stabil dengan stabilitas kaliber 2,75.

Riyadl [9] menuliskan bahwa statik margin adalah besaran yang menunjukkan kemampuan roket untuk kembali kepada keadaan kesetimbangan jika roket mengalami gangguan pada saat terbang. Mayoritas riset yang dituangkan dalam paper jurnal menggunakan *static margin* (SM) sebagai parameter umum untuk memeriksa kestabilan statik dalam arah sumbu longitudinal dan menggunakan jarak longitudinal [10] sebagai parameter tolak ukur efektifitasnya. Frekuensi osilasi yang besar mudah menyebabkan roket mengalami gerakan tak terkendali [11], oleh karenanya SM telah diteliti agar dibatasi rentang gesernya [12].

Adapun urgensi penelitian ini juga dilatar belakangi suatu peristiwa yaitu 13 April 2016, Serka Sukamdani, seorang pelatih mortir di Rindam XVII Cenderawasih, tewas akibat terkena ledakan peluru mortir. Insiden itu terjadi dalam latihan menembak mortir 81 tampela menggunakan amunisi sabot [13]. Peristiwa itu terjadi di belakang rumah tembak simulasi Rindam XVII/Cendrawasih, Distrik Sentani, Kabupaten Jayapura. Pada bulan Maret 2013, tujuh Marinir AS dilaporkan tewas dalam latihan penembakkan mortir di Nevada. Diperlukan penelitian dalam mendesain mortir latih untuk mendukung latihan menembak mortir yang aman serta dapat meningkatkan keterampilan militer pengguna mortir. Selain itu, agar mengetahui jarak jangkauan dan kestabilan dari laju Prototype mortir 81 mm sebagai acuan dalam pembuatan tabel tembak.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini dilakukan secara simulasi menggunakan software *Ansys Work Bench 19* untuk mengetahui gaya hambat, gaya angkat pada prototipe mortir. Parameter penelitian yang digunakan terdiri dari variasi sudut laras dalam penembakan (45°, 55°, dan 65°) merupakan sudut yang paling sering digunakan dalam latihan menembak karena senjata mortir ini berada di belakang kompi bantuan pasukan infanteri sehingga jarak target penembakan yang berada di depan pasukan mempengaruhi sudut elevasi laras, variasi tekanan berdasarkan perhitungan balistik dalam untuk menentukan kecepatan mortir keluar laras dan jarak jangkauannya maksimal sesuai lapangan geladi 150 meter (16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32 bar), dan variasi sudut sirip mortir (33°, 44°, 55°). Simulasi aerodinamis pada penelitian ini dilakukan pada kecepatan 20, 30, dan 40 m/s. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah seni untuk merubah persamaan atur dinamika fluida dalam bentuk integral dan turunan menjadi bentuk aljabar yang terdiskritisasi, yang mana dapat diselesaikan dengan komputer untuk memperoleh nilai-nilai dari medan aliran pada titik atau waktu diskrit tertentu. Adapun persamaan atur dalam dinamika fluida ada tiga yaitu persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan persamaan energi (persamaan 1 sampai 6)

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (1)$$

Persamaan kontinuitas bentuk diverensial.

$$\partial \rho / \partial t + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

Persamaan momentum pada arah sumbu x.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3)$$

Persamaan momentum pada arah sumbu y,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (4)$$

Persamaan momentum pada arah sumbu z,

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (5)$$

Persamaan energi ditulis dalam bentuk internal energy.

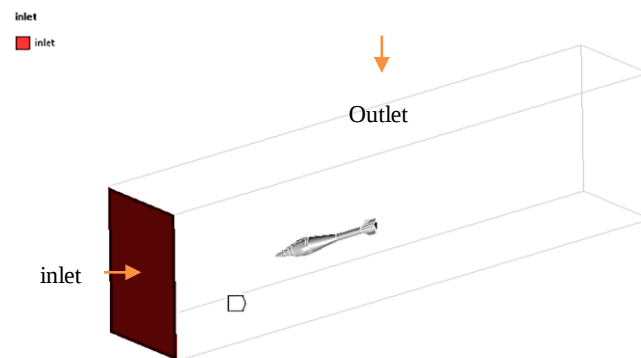
$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \dot{q} - \frac{\partial(\rho p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (6)$$

Solusi dari persamaan analitis diferensial parsial menghasilkan ekspresi dependent variable bentuk tertutup secara kontinyu pada seluruh domain. Sebaliknya, solusi persamaan numerik hanya dapat memberikan nilai pada titik diskrit dalam domain, disebut juga dengan titik grid.

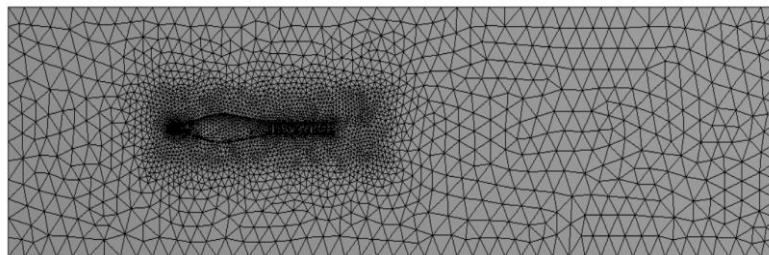
2.1 Boundary Condition

Boundary condition yang digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, lokasi keluarnya aliran dari domain, dan lokasi pengambilan data pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. Sementara itu, *meshing* pada penelitian ini dilakukan secara manual pada body mortir menggunakan *tetrahedral mesh* yang menghasilkan jumlah *nodes* 45.568 dan *element* 255.542 seperti pada Gambar 2. *Tetrahedral mesh* digunakan untuk memperoleh hasil yang akurat. *Tetrahedral mesh* memiliki perilaku perpindahan kuadrat yang cocok untuk memodelkan kemampuan aerodinamis. Selain itu tetrahedral mesh dalam simulasi mortir ini dapat memberikan hasil yang lebih halus, simple dan *cost efficient* [14,15].

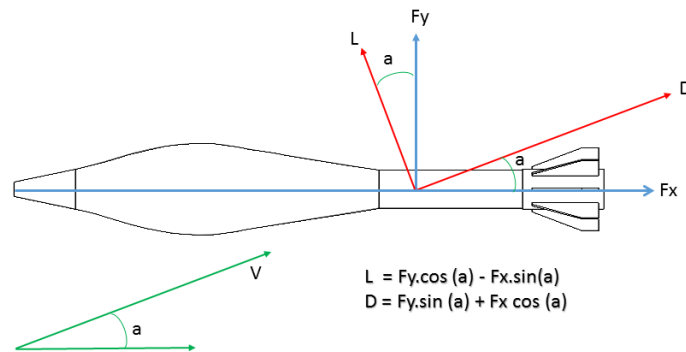
Persamaan k-omega digunakan untuk mengakomodasi aliran fluida yang dekat dengan dinding dengan detail yang tinggi seperti pada kasus ini, namun karena aliran juga didominasi oleh free stream yang luas, maka persamaan harus dimodifikasi dengan SST [16,17]. Kecepatan diinput dari lokasi inlet, dengan nilai sebesar 20-40 m/s dan arah/sudut serang yang divariasikan sesuai dengan skenario yang diberikan. Simulasi dilakukan dengan mengubah arah angin untuk merubah sudut serang, maka data yang diambil berupa FY dan FX kemudian menggunakan transformasi koordinat diubah menjadi *lift* dan *drag*.



Gambar 1. Lokasi inlet dan outlet



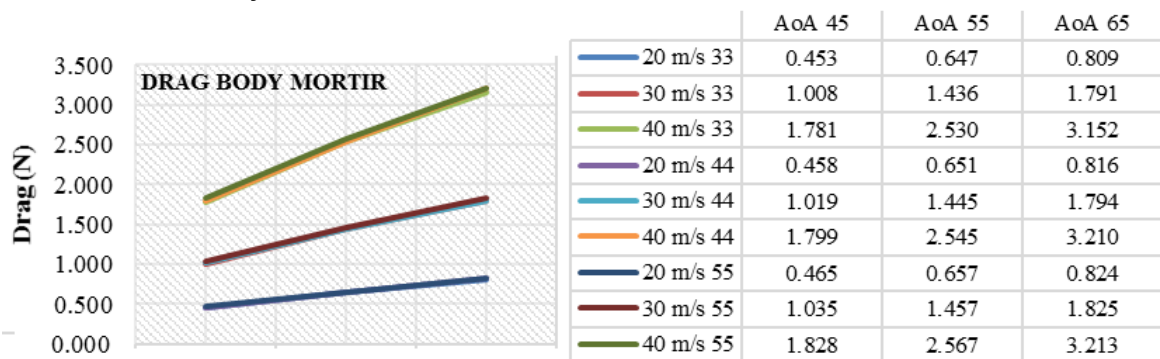
Gambar 2. Meshing model



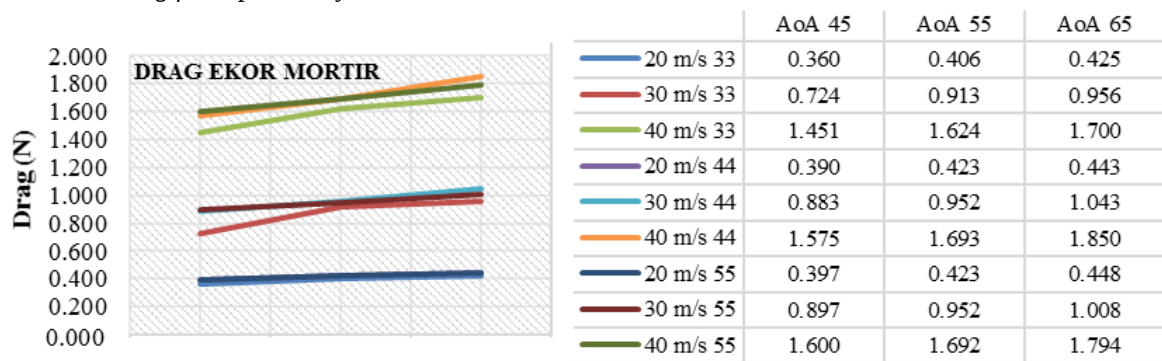
Gambar 3. Diagram benda bebas konversi koordinat *lift* dan *drag*

3. HASIL DAN DISKUSI

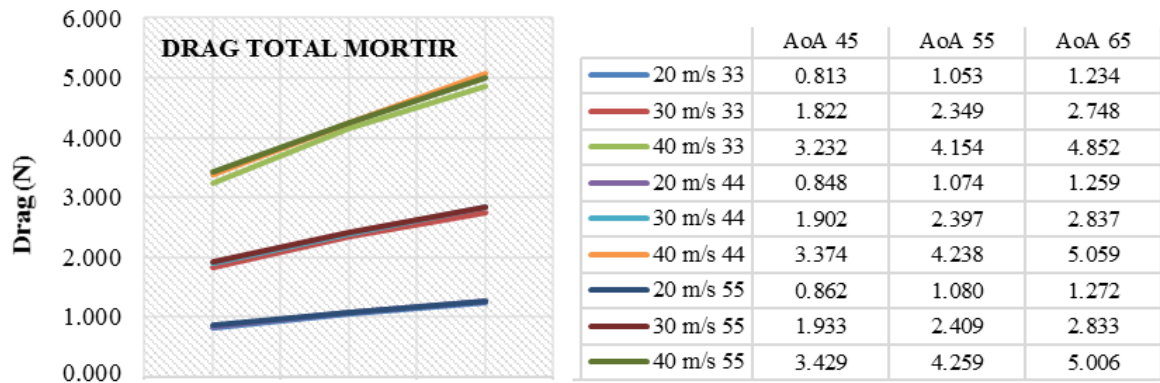
3.1. Hasil Simulasi Gaya Aerodinamika Pada Model Mortir



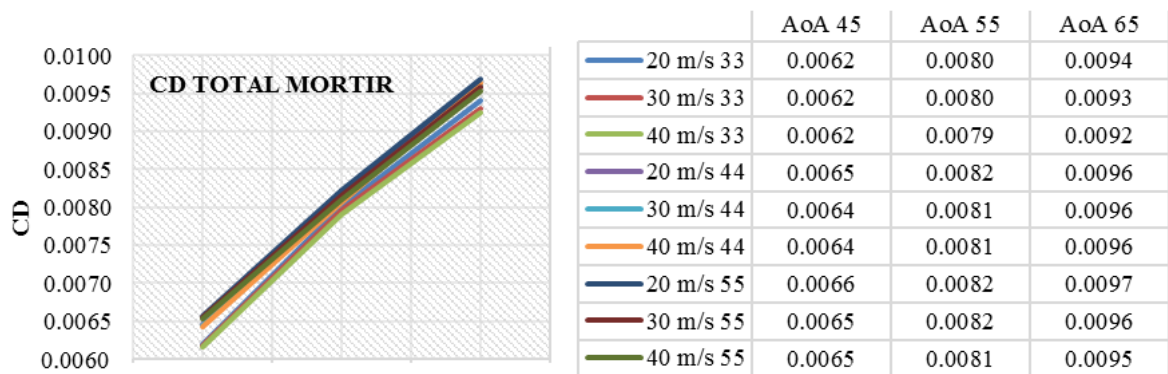
Gambar 4. Drag force pada body



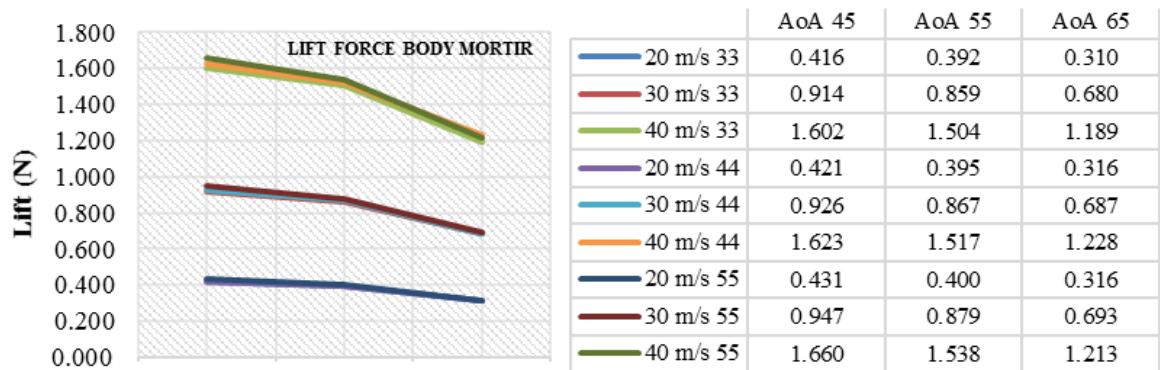
Gambar 5. Drag force pada ekor



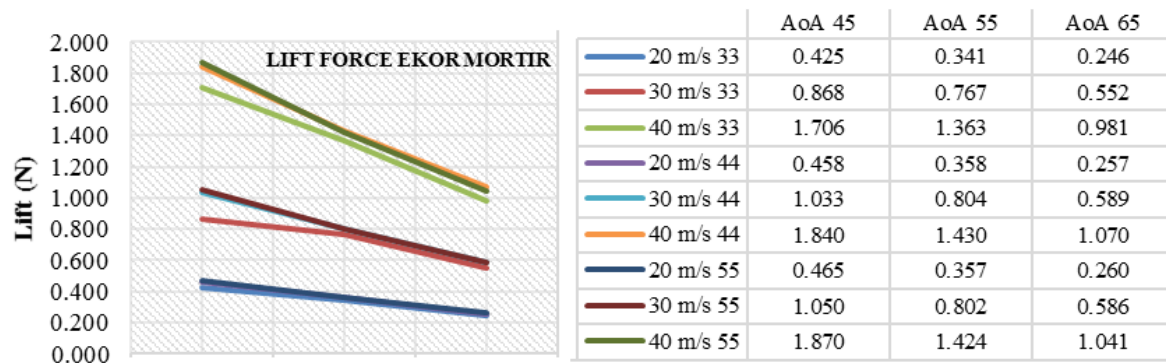
Gambar 6. Drag force total



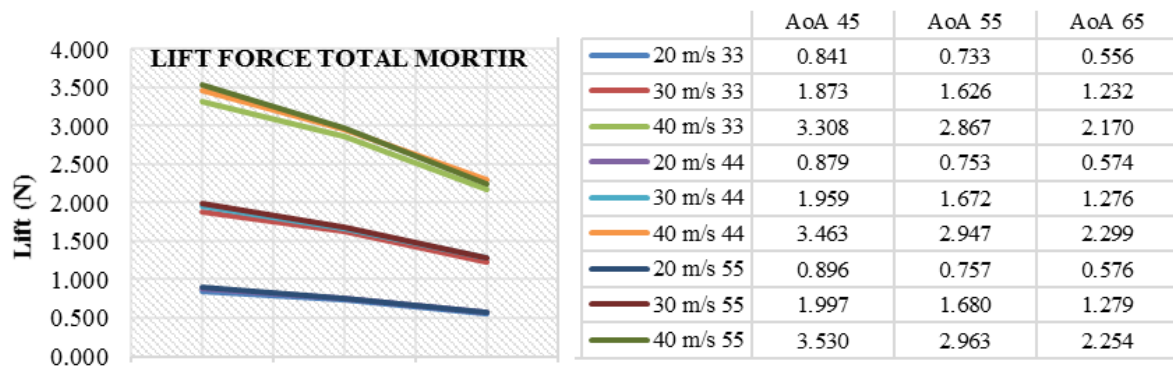
Gambar 7. Coefficient of drag (CD) total



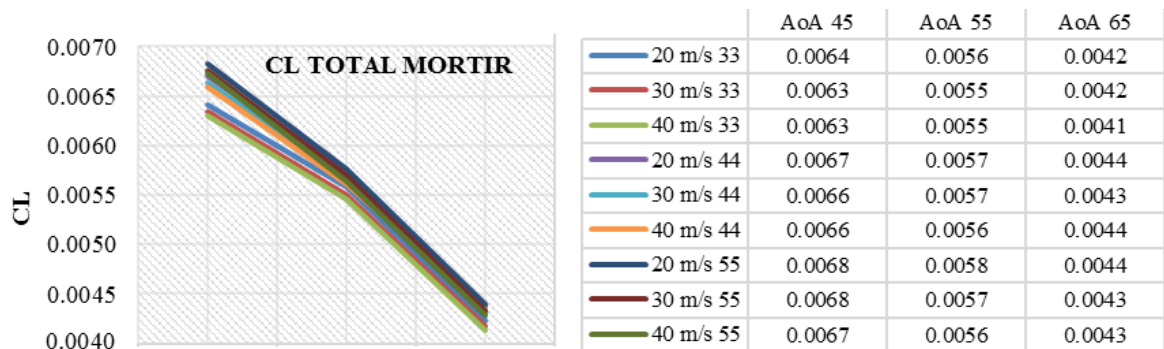
Gambar 8. Lift force pada body



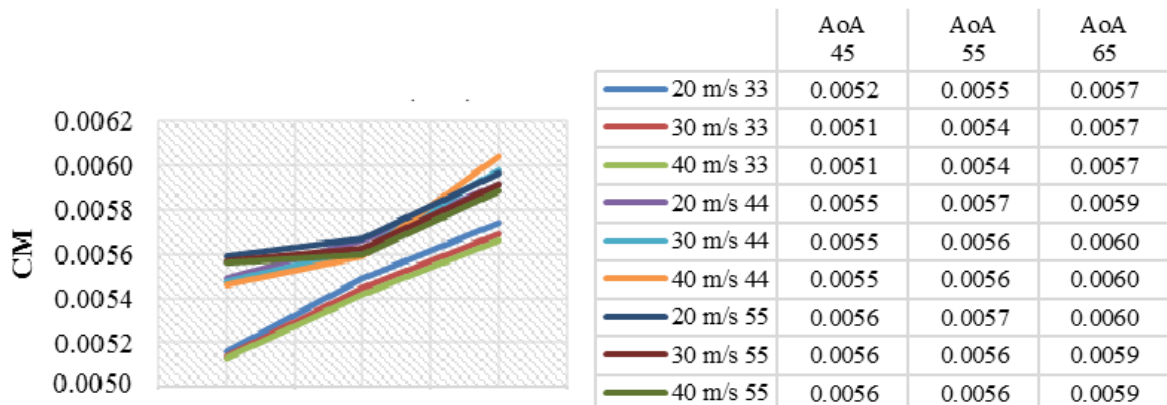
Gambar 9. Lift force pada ekor



Gambar 10. Lift force total

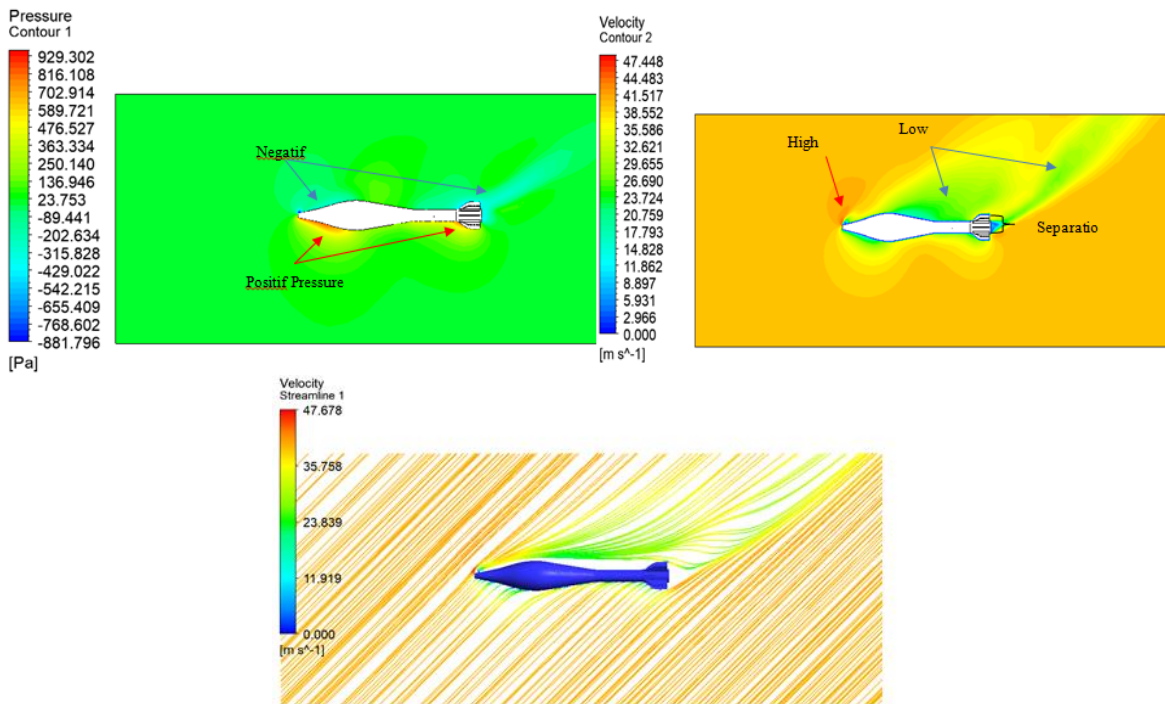


Gambar 11. Lift coefficient total



Gambar 12. Moment coefficient dan moment pitch

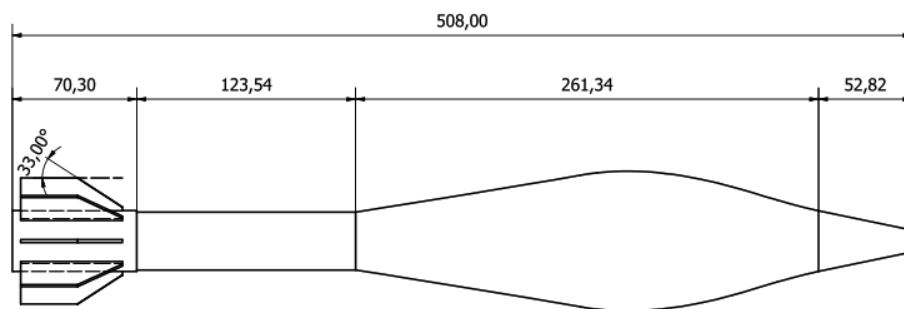
Gambar 4 dan Gambar 5 merupakan data hasil simulasi CFD untuk model Mortir Latih 81 mm dengan variasi sudut sirip 33° , 44° dan 55° sudut serang 45° , 55° dan 65° dan variasi kecepatan 20, 30 dan 40 m/s, dapat diketahui bahwa gaya drag meningkat seiring peningkatan sudut serang dan kecepatan. Gaya drag total tertinggi pada variasi sudut sirip 44° dan *angle of attack* (AoA) 65° pada kecepatan 40 m/s dengan nilai 5,06 N. Sedangkan nilai gaya drag terendah pada kecepatan 20 m/s, sudut sirip 33° sudut serang 45° sebesar 0,81 N. Peningkatan nilai koefisien drag (CD) berakibat menurunkan performa mortir seperti mengurangi gaya dorong yang berakibat menurunnya kecepatan mortir [18]. Semakin besar kecepatan mortir dan sudut serang maka gaya $F(x)$ maupun gaya $F(y)$ semakin meningkat, nilai dari cosinus sudut serang 45° lebih besar dibanding sudut serang 55° dan 65° , dan nilai dari sinus sudut serang 45° lebih kecil dibanding sudut serang 55° dan 65° , maka berdasarkan gambar diagram benda bebas konversi koordinat *lift* dan *drag* (gambar 3) sehingga gaya *lift* menurun seiring peningkatan sudut serang (45° , 55° , 65°) dan meningkat seiring kecepatan. Penurunan gaya lift disebut *stall*, karena sudut serangnya terlalu besar diatas 15° [19]. Gaya *lift* total tertinggi pada variasi sudut sirip 55° dan sudut serang 45° pada kecepatan 40 m/s dengan nilai 3,50 N. Sedangkan nilai gaya *lift* terendah pada kecepatan 20 m/s, sudut sirip 33° sudut serang 65° sebesar 0,56 N.



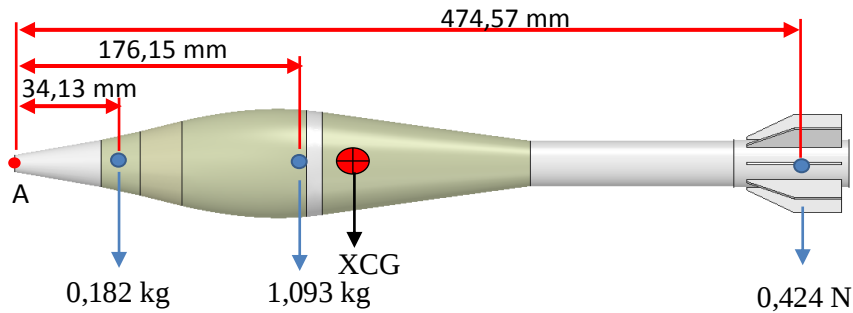
Gambar 13. Kontur tekanan dan kecepatan

Gambar 13 merupakan *pressure contour* salah satu sampel hasil simulasi desain mortir latih 81 mm dengan sudut sirip 33° dengan kecepatan 40 m/s, dengan sudut serang 45° menunjukkan bahwa tekanan dinamik terbesar di terima oleh bagian bawah hidung mortir dan di bawah sirip dengan tanda warna ■ dengan nilai sekitar 500 s.d. 800 Pa. Tekanan vakum terjadi di atas hidung mortir dan di atas dan di belakang ekor ditandai dengan warna ■ dengan nilai sekitar -200 s.d.-400 Pa. Gaya drag pada hidung sampai badan mortir sebesar 1,78 N sedangkan gaya drag pada ekor sebesar 1,45 N. Gaya *lift* pada bodi sebesar 1,60 N, pada ekor sebesar 1,71 N. Moment pitch 1,37 N bernilai positif berarti arah torsi searah jarum jam yang berdampak pitch up sehingga hal ini perlu dipertimbangkan untuk perencanaan letak *center of gravity* agar cenderung *heavy nose* sehingga bisa mempertahankan keseimbangan dengan *static margin* yang ideal. Semakin rendah kecepatan, maka moment pitch bernilai positif juga mengecil, selama nilai moment pitch positif maka mortir terjadi pitch up yang melawan *heavy nose*, jikalau desain mortir memiliki momen pitch negatif maka pada saat mortir mendapatkan gaya trust dari arah ekor mortir maka gerak mortir bisa terjadi *tumbling*. Gambar di atas merupakan *velocity contour*, daerah dengan aliran udara kecepatan rendah ditandai dengan warna ■ dengan nilai sekitar 17-26 m/s dominasi berada di atas bodi dan ekor mortir karena pengaruh tekanan vakum yang mengakibatkan *separation*, sedangkan daerah kecepatan tinggi berada di ujung atas hidung mortir ditandai dengan warna ■ dengan nilai sekitar 41-47 m/s.

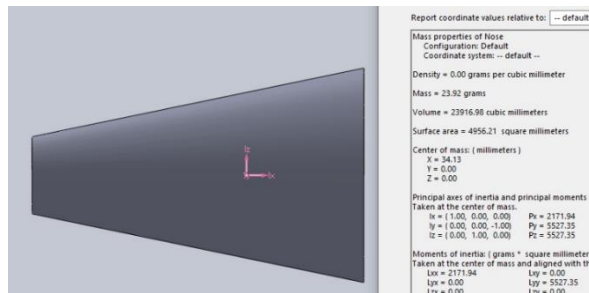
3.2 Penentuan Letak *Center of Gravity*



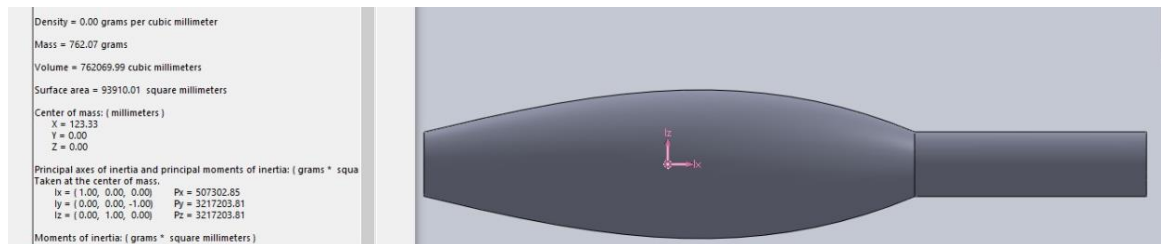
Gambar 14. Ukuran panjang prototipe mortir (ukuran dalam mm)



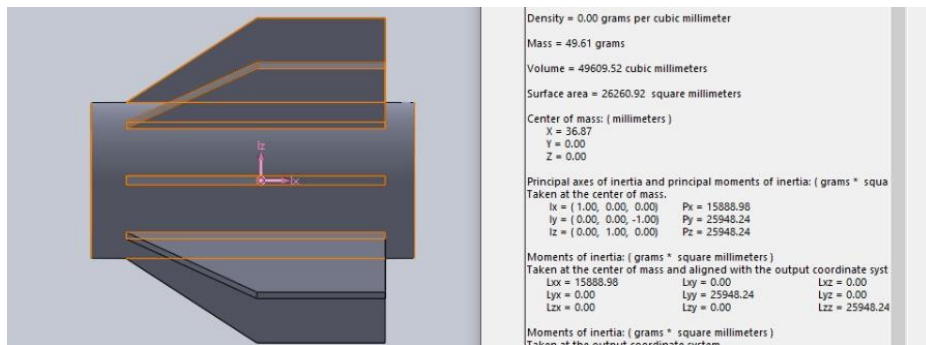
Gambar 15. Posisi CG berdasarkan hasil perhitungan (ukuran dalam mm)



Gambar 16. Letak CG hidung mortar



Gambar 17. Letak CG badan mortir

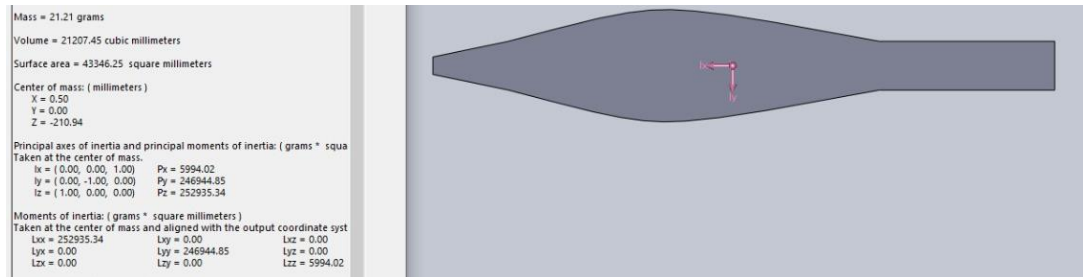


Gambar 18. Letak CG ekor mortar

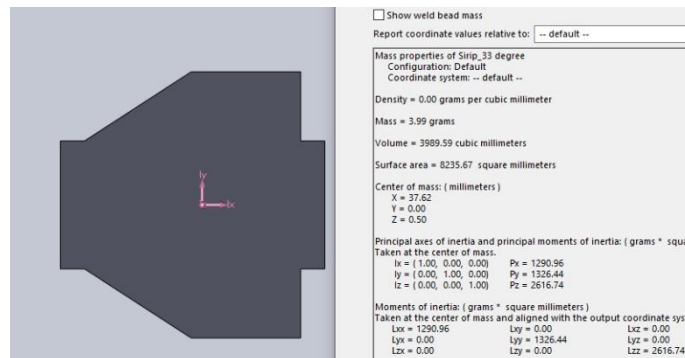
Perhitungan titik center of gravity (CG) dari prototipe mortir dengan cara mencari titik CG dari masing-masing komponen mortir bagian hidung, body, dan ekor dengan asumsi densitas tiap komponen homogen. Gambar 14 dan 15 menunjukkan bahwa CG pada sumbu x bagian hidung mortir berada pada jarak 34,13 mm dari titik referensi ujung hidung. Dari hasil analisis CG dari body mortir dengan software Solidwork (Gambar 16 sampai 18) dengan asumsi densitas homogen dapat diketahui bahwa letak CG berada pada jarak $X = 123,33$ mm, jika dihitungkan dari titik referensi ujung hidung mortir maka ditambah 52,82 mm (ukuran hidung mortir) maka menjadi 176,15 mm. Bagian ekor prototipe mortir memiliki letak CG pada sumbu $X = 36,87$ mm dari depan ekor mortir, Sedangkan jika dihitungkan dari titik referensi ujung hidung prototipe mortir, maka letak CG ekor 36,87 mm ditambah dengan panjang body dan hidung mortir 437,70 mm sehingga XCG ekor = 474,57 mm.

3.3. Penentuan Letak *Center of Pressure* (CP)

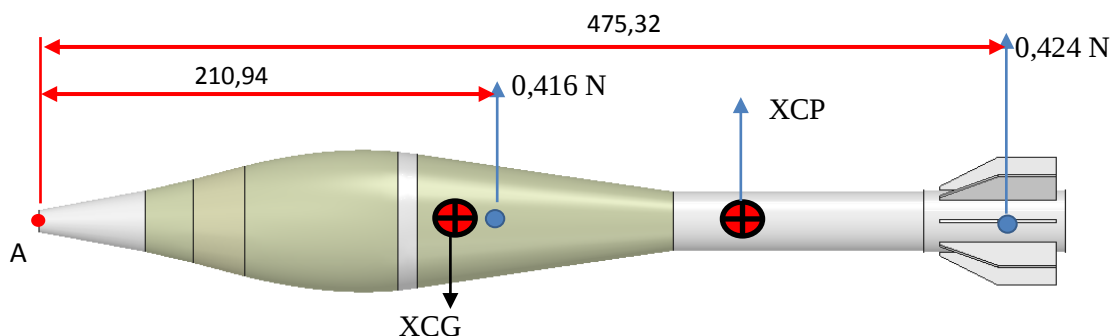
Perhitungan *center of pressure* (CP) menggunakan metode cut out mortir yaitu menduplikasi mortir pada bidang datar seperti kertas, pelat, papan dan lainnya kemudian dipotong sesuai Gambar 2 dimensi dari prototipe mortir, dengan menggunakan perangkat lunak *Solid Work*, dapat diketahui titik CP dari bagian mortir tersebut (Gambar 19 sampai 21). Letak center of mass pada sumbu x terhadap titik referensi ujung hidung berada pada jarak 210,94 mm adapun ketebalan pada cut out diabaikan. Letak CG ekor mortir dengan metode *cut out* adalah 37,62 mm dari depan ekor, sedangkan dari titik referensi A (hidung mortir) maka ditambah dengan panjang hidung dan badan mortir 437,70 mm sehingga menjadi 475,32 mm. Sebagai contoh pada mortir kecepatan 20 m/s, sudut serang 45 °, sudut sirip 33 ° dengan cara menjumlahkan lift momen dari setiap komponen dibagi dengan gaya lift total dengan cara yang sama dapat dicari nilai *margin of stability* (MoS) dengan variasi momen lift pada variasi sudut serang, sudut sirip dan kecepatan.



Gambar 19. Letak cut out center of mass body dan hidung mortir



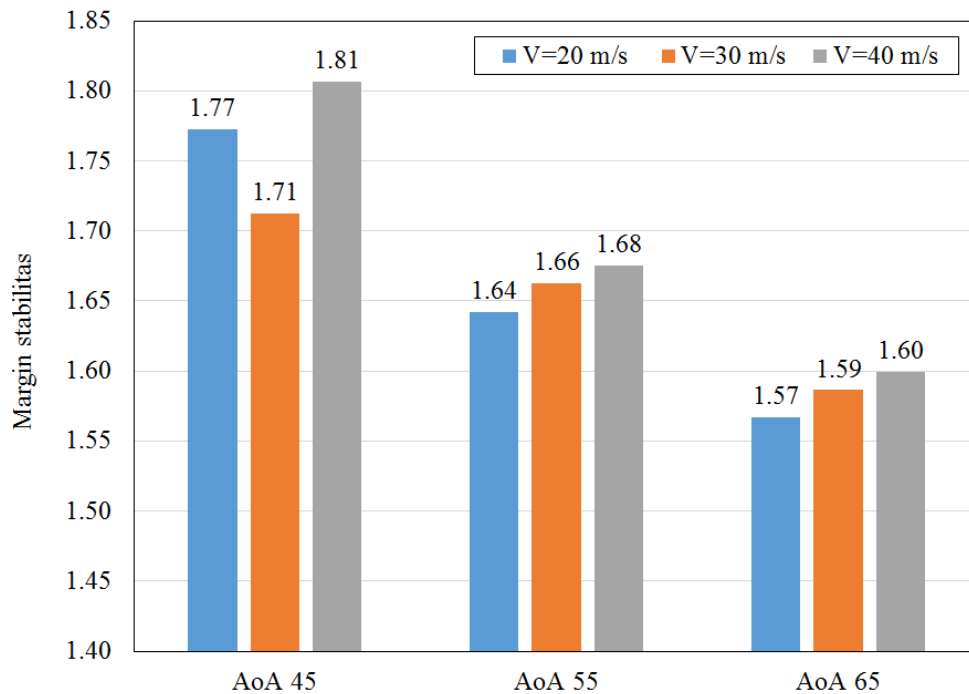
Gambar 20. Letak cut out center of mass ekor mortir sudut 33°



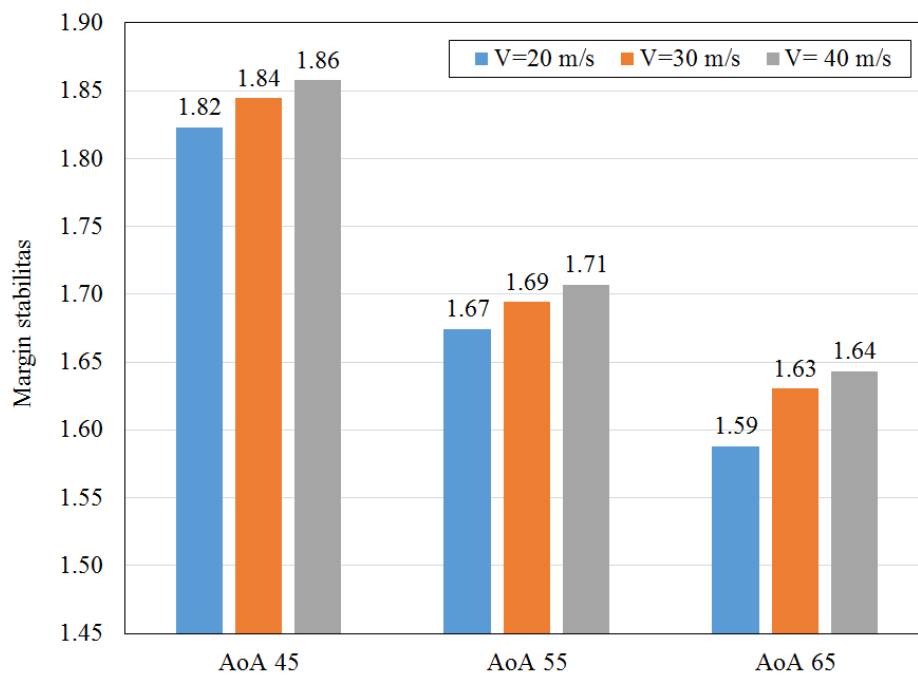
Gambar 21. Letak cut out center of mass untuk keseluruhan badan mortir (ukuran dalam mm)

Gambar 22 sampai 24 menunjukkan bahwa semakin besar sudut serang maka moment *lift* menurun yang berdampak letak XCP bergeser kedepan sehingga mengakibatkan jarak static margin lebih dekat dan margin stabilitas mortir menurun. Sebaliknya letak XCP bergeser kebelakang pada saat penurunan sudut serang sehingga margin stabilitas meningkat. Percepatan mortir semakin lama semakin menurun dikarenakan gaya dorong mortir yang menurun disertai dengan adanya gaya drag dan gaya berat dengan

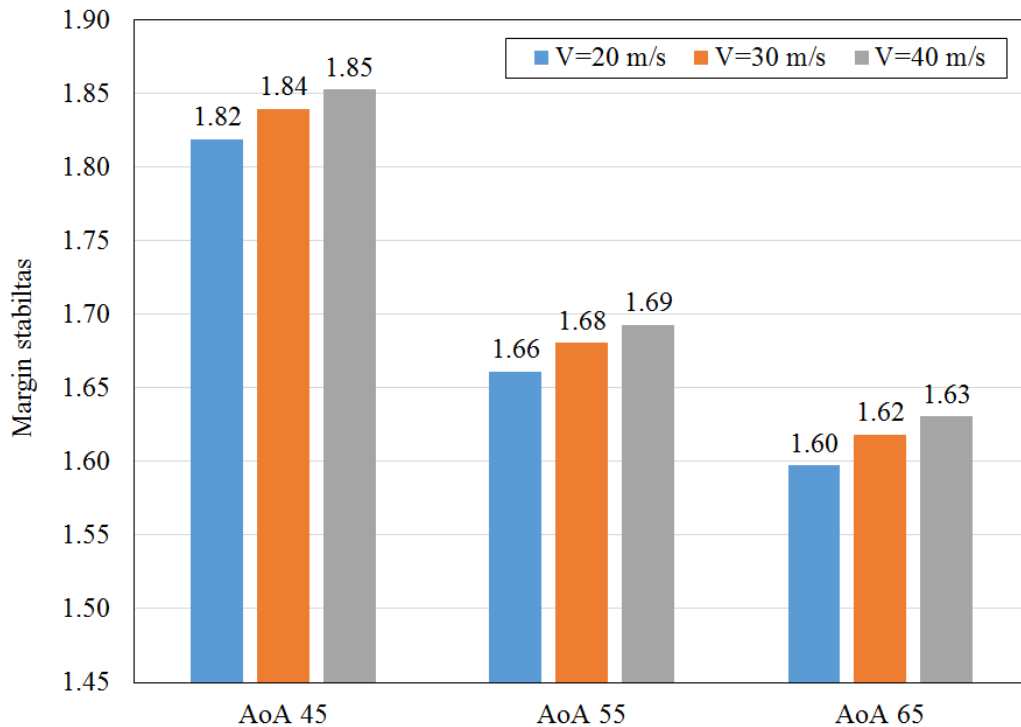
arah sinus sudut serang. Ketika kecepatan mortar menurun moment pitch juga menurun hingga gaya berat dari mortar dengan *heavy nose* yang dominan yang mengubah sudut serang secara bertahap akan menjadi negatif dan berakibat moment pitch juga negatif maka terjadilah pitch down yang berarti di akhir lintasannya, hidung mortar mengarah ke bawah.



Gambar 22. Margin stabilitas mortar dengan sudut sirip 33 derajat sebagai fungsi dari *angle of attack* (AoA) dan kecepatan jelajah



Gambar 23. Margin stabilitas mortar dengan sudut sirip 44 derajat sebagai fungsi dari *angle of attack* (AoA) dan kecepatan jelajah



Gambar 24. Margin stabilitas mortir dengan sudut sirip 55 derajat sebagai fungsi dari *angle of attack* (AoA) dan kecepatan jelajah

4. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan dapat diambil dari proses dan analisis data penelitian ini. Desain mortir latih 81 mm dengan variasi sudut sirip 33°, 44° dan 55° memiliki margin stabilitas memenuhi standar yaitu antara 1,5-2,5. Hal ini menunjukkan kemampuan mortir untuk mempertahankan keadaan kesetimbangan pada saat terbang dengan variasi sudut serang 45°, 55°, dan 65° serta kecepatan 20-40 m/s. Nilai margin stabilitas menurun terhadap sudut serang dan meningkat terhadap kecepatan, nilai margin stabilitas pada desain mortir latih 81mm dengan sudut sirip 33°, 44°, 55° masing-masing mempunyai nilai rata-rata 1,67, 1,72, dan 1,71. Desain mortir latih 81 mm sudut sirip 33° merupakan desain paling ideal karena memiliki gaya drag dan gaya lift yang terkecil sehingga gaya dorong mortir lebih maksimal yang berpengaruh terhadap jarak jangkauan lebih maksimal, sedangkan moment pitch memiliki nilai torsi positif terkecil untuk meminimalisir mortir pitching up yang harus dilawan oleh gaya momen dari desain mortir dengan letak CG lebih dekat dengan hidung mortir (*heavy nose*).

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PINDAD, *Technical Data Granat Mortir Kaliber 81mm Latih A1(MU29-LAT A1)*, Nomor Register JB.13.00525, 31 Oktober 2019.
- [2] KUSUMO, R.S., *Uji Fungsi Granat Mortir Latih Kaliber 81mm di Lapangan Tembak AWR Pandan Wangi-Lumajang*, Nomor:Trak/564/PDN/AD/VII/2017/AD, 13 Mei 2020.
- [3] JENAR, A.M., *et al*, "Pendeteksi kecepatan proyektil mortir bertekanan udara menggunakan sinar inframerah", *SinarFe7*, vol. 3, no. 1, pp. 201-205, Sep. 2020.
- [4] ACHARA, N., *et al*, "Aerodynamic characterisation of rocket fin flutter using computational fluid dynamics", *World Journal of Innovative (WJR)*, vol 5, August 2018.
- [5] CARLUCCI, D., *et al*, *Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition*, 3 ed, Boca Raton, CRC Press Taylor & Francis Group, 2018.
- [6] ARIANTO, W.D., *et al*, "Rancang bangun aplikasi perhitungan sudut tembak mortir jenis 81 mm pindad", *SENSITEK*, 2018.
- [7] BLANDINO, JOHN J., *et al*, *Design, Analysis, and Test of a High-Powered Model Rocket*, A Major Qualifying Project Report Submitted to the Faculty of the Worcester Polytechnic Institute in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Bachelor of Science in Aerospace Engineering, April, 2020.

- [8] MANIMARAN, HP, *et al*, “Stability analysis of conventional rocket model using CFD Tool”, *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol, 9 Issue 01, Jan. 2020.
- [9] RIYAD, A., “Pengaruh dari posisi pusat massa roket yang tidak terletak pada sumbu axis simetri terhadap dinamika terbang roket balistik”, *Jurnal Teknologi Dirgantara*, vol. 13 No. 2:139-148, Dec. 2015.
- [10] BRYSON, J. T., *et al*, “Approach for understanding range extension of gliding indirect fire amunitions”, AIAA 2018-3160, Jun.2018.
- [11] YANG, D., *et al*, “Nutation instability of spinning solid rocket motor spacecraft”, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, No. 4, pp. 1363–1372, Agustus, 2017
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.06.005>.
- [12] GARCIA, A. AND SILVEIRA, G., "Proposal of Static Margin Limit during Launch Phase for the VS-30 Orion Sounding Rocket," SAE Technical Paper 2015-36-0160, Sep. 2015,
<https://doi.org/10.4271/2015-36-0160>.
- [13] PERDANA, G., “Mortir latih, solusi latihan tembak dengan cara aman” Indomiliter, <https://www.indomiliter.com/mortir-latih-berpendorong-air-solusi-latihan-tembak-dengan-cara-aman/> diakses: 4 Januari 2021.
- [14] PETERS, C., D., *et al*, “Aerodynamic damping of an oscillating fan blade: Mesh-based and meshless fluid structure interaction analysis”, *Journal of Fluid and Structures*, vol, 82 Issue 01, July 2018.
- [15] ZAAREER, M., AND MOURAD, A., Effect of vehicle side mirror bse position on aerodynamic forces and acoustics”, *Alexandria Engineering Journal*, vol 61, July 2021
- [16] WIRATAMA, C, *Teori dan Best Practices Computational Fluid Dynamics (CFD)*, Yogyakarta, AE Publisher, 2021.
- [17] DAHALAN, *et al*, “Aerodynamic Study of Air Flow over A Curved Fin Rocket”, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Volume 40, Issue 1 (2017) 46-58, Dec 2017.
- [18] ISRABUDI, ANDREAS MAULANA, “Karakteristik Aerodinamika Pontoon Pesawat NXXX Versi Amfibi”, *Jurnal Rekayasa Mesin*, pp. 475 – 485, Sep. 2021.
- [19] KEWAS, *et al*, “Analisis Gaya Angkat Akibat Perubahan Kecepatan Aliran Udara Dan Sudut Serang Pada Airfoil Naca 0015 Dalam Wind Tunnel Sub Sonic”, *Jurnal Frontiers*, Volume 3 Nomor 1 P-ISSN: 2621-0991 E-ISSN: 2621-1009 pp.78, April 2020.