



## KONSEP FISIKA DALAM GERAK PERMAINAN ROKET AIR

Fairusy Fitria Haryani<sup>1</sup>, Rizki Amaliah<sup>2</sup>, Dian Fitrasari<sup>3</sup>, Sparisoma Viridi<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Insitut Teknologi Bandung, Bandung,

Email Korespondensi: [fairusy.fita@gmail.com](mailto:fairusy.fita@gmail.com)

### Abstrak

Roket air merupakan salah satu jenis mainan edukatif yang menarik untuk dikaji. Meskipun prinsip dasarnya sederhana, yaitu menggunakan air dan udara sebagai gaya dorong, analisis gerak pada tiap fasenya cukup rumit. Perumusan analisis gerak roket air melibatkan kajian termodinamika, fisika mekanika, dan algoritma integrasi numerik Euler. Berdasarkan hasil data yang didapatkan akan dijelaskan pengaruh variasi data masukan parameter terhadap gerak roket air dan ukuran efisiensi ketinggian maksimum yang mampu dicapai roket.

**Kata Kunci:** roket air, fraksi volum air, diameter *nozzle*, adiabatik.

### Pendahuluan

Berbagai kemajuan teknologi yang telah tercapai selama ini merupakan hasil pengembangan fenomena-fenomena fisika sederhana, salah satunya ialah roket. Roket merupakan kajian astrofisika yang selalu menarik untuk dibahas. Pengembangan roket ruang angkasa diawali dengan pendekatan roket-roket sederhana yang telah dikembangkan sebelumnya, seperti roket air. Prinsip dasar penggunaan roket air ialah dengan mengeluarkan sejumlah volume air dari *nozzle* roket yang juga diartikan perbedaan tekanan udara sebagai suplai energi untuk roket (Nelson, 1976). Sering kali, banyak yang beranggapan terkait roket air sebagai mainan (Finney, 2000). Padahal, jika melihat deskripsi semua variabel fisika yang terlibat pada gerak roket air cukup kompleks dan telah digunakan dalam beberapa dekade untuk menginspirasi siswa dalam mempelajari ilmu fisika dan terapannya (Gowdy, 1995) dan Kian (2014). Berbagai metode pun dikembangkan dalam menyelesaikan permasalahan fisika di kehidupan sehari-hari.

Tingkat kompleksitas analisis bergantung pada batasan permasalahan dan beberapa asumsi yang digunakan. Keterbatasan dalam menyelesaikan permasalahan secara analitik dalam gerak roket air dalam penelitian ini, diintegrasikan dengan bantuan metode numerik Euler. Metode numerik sangat cocok digunakan dalam menyelesaikan permasalahan

matematis dengan menggunakan komputasi digital modern yang sangat cepat dan efisien dalam menjalankan operasi aritmatika (Sahara, 2016).

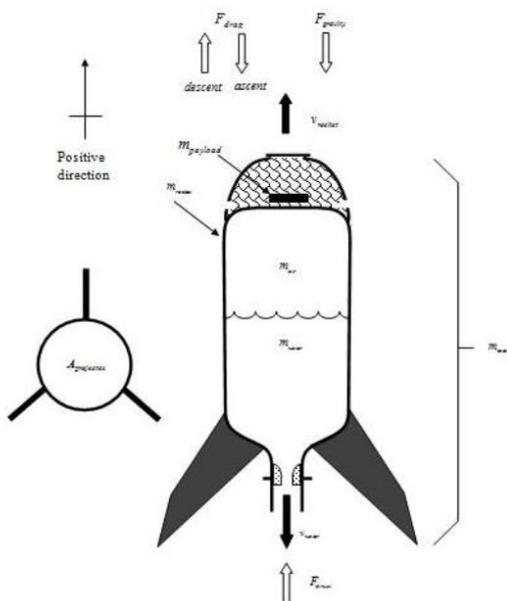
Dalam penelitian ini, definisi besaran fisis melalui analitik selanjutnya diiterasikan dengan numerik Euler yang didasarkan hukum Newton untuk mengetahui pengaruh variasi parameter masukan terhadap gaya dan ketinggian gerak roket air. Variasi data masukan yang digunakan yaitu fraksi volum (perbandingan volume air terhadap volum botol roket), diameter *nozzle* (diameter lubang/mulut keluarnya air pada tubuh roket), dan tekanan udara mula-mula.

### Metode Penelitian

Pada umumnya, percobaan roket air menggunakan bahan dasar botol plastik. Hal ini dikarenakan botol plastik mudah ditemukan. Oleh karena itu terdapat batasan variasi data masukan yang diberikan. Ukuran maksimum variasi diameter *nozzle* sebesar lubang/mulut tubuh botol plastik pada umumnya. Sedangkan besarnya fraksi maksimum bergantung pada besarnya tekanan udara mula-mula dalam roket karena akan mempengaruhi besarnya massa jenis udara yang ada di botol sesaat setelah seluruh air keluar. Gambar 1 menunjukkan skema representasi roket air dengan beberapa variabel yang teridentifikasi.

Asumsi yang digunakan dalam gerak roket dikelompokkan menjadi 4 (empat) fase (ENGR 112C, 2014) yaitu :

1. Fase 1 – Jika tabung peluncur digunakan, maka akan dihasilkan kecepatan mula-mula akibat perbedaan tekanan udara di dalam botol dengan tekanan atmosfer dan adanya energi akibat panjang tabung peluncur ( $t_0$  dihitung tepat saat roket lepas dari ujung tabung).
2. Fase 2 – Air yang dikeluarkan berperan sebagai bahan bakar roket, memberikan gaya dorong yang kemudian mempercepat roket.
3. Fase 3 – Udara yang dikeluarkan berperan sebagai bahan bakar roket setelah air di dalam roket kosong, memberikan gaya dorong yang kemudian mempercepat roket.
4. Fase 4 - Roket tidak memiliki gaya dorong, kemudian melintasi ketinggian maksimum, dan jatuh ke tanah.



Gambar 1. Skema Representasi Roket Air [6]

Asumsi selanjutnya adalah tidak terdapat sirip (*fin*) yang terlepas pada tubuh roket dan tidak memakai parasut. Oleh karena itu, massa tubuh roket tanpa air tidak akan berubah.

Pada fase 1, gaya dorong pada roket diakibatkan oleh adanya perbedaan tekanan dalam roket dan di luar roket, yang secara matematis dituliskan sebagai berikut :

$$F_t = (P_{ud} - P_{atm}) A_n \quad (1)$$

Sedangkan besarnya kecepatan roket saat  $t_0$  ditentukan dengan mengalirkan kesetimbangan energi disekitar sistem tertutup. Dengan mengasumsikan bahwa terjadi proses ekspansi bebas karena tidak terjadi adanya perubahan suhu dan dengan mendefinisikan persamaan (1), maka kecepatan roket pada fase 1 adalah :

$$v_r = \sqrt{2 \frac{[(P_{ud} - P_{atm}) A_n L_t - m_t g L_t]}{m_t}} \quad (2)$$

dimana  $A_n$  merupakan luas mulut/lubang roket,  $L_t$  merupakan tinggi tabung peluncur,  $g$  merupakan percepatan gravitasi dan  $m_t$  merupakan massa total roket yang besarnya merupakan penjumlahan dari massa roket, massa air dan massa udara, seperti persamaan (3). Dalam hal ini massa udara dipertimbangkan akibat adanya tekanan udara yang berbeda antara di dalam dan diluar botol.

$$m_t = m_{botol} + m_{air} + m_{ud} \quad (3)$$

Besarnya massa air dan massa udara mula-mula dituliskan seperti persamaan (4) dan (5).

$$m_{air,0} = \rho_{air} f V_r \quad (4)$$

$$m_{ud,0} = \rho_{atm} V_{ud,0} \frac{P_{ud,0}}{P_{atm}} \quad (5)$$

dimana  $\rho_{air}$  adalah massa jenis air,  $\rho_{atm}$  adalah massa jenis udara di atmosfer,  $f$  adalah fraksi volum air ( $V_{air}/V_r$ ),  $V_r$  adalah volum roket,  $V_{ud,0}$  dan  $P_{ud,0}$  masing-masing adalah volum dan tekanan udara mula-mula, serta  $P_{atm}$  adalah tekanan udara di atmosfer. Dengan mengaitkan parameter data masukan, volum udara mula-mula dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$V_{ud,0} = (1 - f) V_r \quad (6)$$

Pada fase 2 dan 3 gaya dorong pada roket diakibatkan adanya perubahan massa yang dialami roket. Secara matematis untuk fase 2 dan fase 3 besarnya gaya dorong dituliskan berturut-turut oleh persamaan (7) dan (8).

$$F_t = \frac{dm_{air}}{dt} v_{air} \quad (7)$$

$$F_t = \frac{dm_{ud}}{dt} v_{ud} \quad (8)$$

Pada dasarnya laju perubahan massa dari roket sebanding dengan laju ekspansi zat, dalam hal ini air dan udara sebagai berikut.

$$\frac{dm_{ex}}{dt} = C A_n \rho_{ex} v_{ex} \quad (9)$$

dimana dimana  $C$  merupakan koefisien gesekan *nozzle*, yang nilainya mengacu pada bentuk geometri *nozzle* (Bailio, 2004), yaitu 0.98;  $A_n$  adalah luas lubang/mulut botol;  $\rho_{ex}$  merupakan massa jenis zat yang keluar; dan  $v_{ex}$  merupakan laju ekspansi zat. Pada fase 2, zat yang berekspansi adalah air, sehingga  $\rho_{ex}=\rho_{air}$  dan  $v_{ex}=v_{air}$ . Sedangkan pada fase 3, zat yang berekspansi adalah udara, sehingga  $\rho_{ex}=\rho_{ud}$  dan  $v_{ex}=v_{ud}$ .

Finney (2000) melakukan beberapa asumsi dalam solusi numeriknya, yaitu : udara dalam roket berlaku seperti gas ideal dan udara berkespansi secara isothermal. Sifat isothermal diterapkan karena untuk menyederhanakan perhitungan. Namun selanjutnya Gomme (2010) menjelaskan untuk proses isothermal, panas seharusnya berdifusi ke dalam roket dari luar untuk menjaga suhu dalam roket konstan. Namun karena perubahan posisi akibat difusi panas udara jauh lebih kecil dari pada jari-jari roket, sehingga ekspansi gas dimodelkan dengan proses adiabatik. Dengan demikian, asumsi ekspansi udara dan air yang bekerja pada roket diasumsikan sebagai proses adiabatik dimana udara bersifat sebagai gas diatomik dengan  $\gamma = 1.4$ . Dalam papernya, Kian (2014) menyebutkan ekspansi yang dialami roket air yaitu isothermal meskipun persamaan yang diungkapkannya adiabatik.

Berdasarkan persamaan Bernouli, didapatkan perumusan laju keluarnya air yaitu :

$$v_{air} = C \sqrt{2 \frac{(P_{ud} - P_{atm})}{\rho_{air}}} \quad (10)$$

Karena sistem udara diasumsikan mengalami proses adiabatik, artinya tidak terjadi perubahan kalor, sehingga persamaan tekanan gas ideal yang digunakan selama proses keluarnya air yaitu :

$$P_{ud} = P_{ud,0} \left( \frac{V_0}{V_{ud}} \right)^\gamma \quad (11)$$

dimana  $V_0$  sebagai volum mula-mula,  $V_{ud}$  sebagai volum udara yang ada di dalam roket

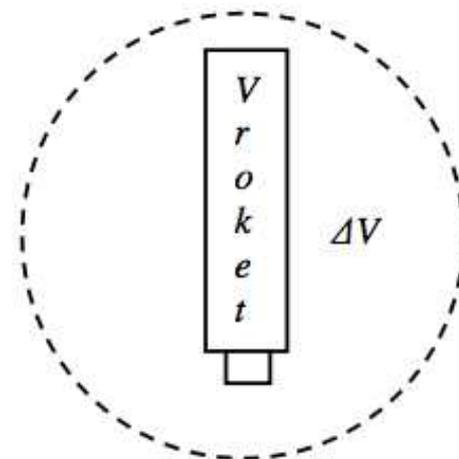
dan  $\gamma$  merupakan konstanta adiabatik. Pada sistem roket fase 2, volum mula-mula didefinisikan sebagai volum udara mula-mula  $V_0=V_{ud,0}$ . Sedangkan besarnya volum udara  $V_{ud}$  selama fase 2 ditentukan oleh perubahan volum udara di dalam roket yang besarnya sebanding dengan laju air yang keluar. Secara matematis dituliskan sebagai berikut :

$$dV = A_n v_{ex} dt \quad (12)$$

Apabila besarnya volum udara sudah mencapai volum roket ( $V_{ud}=V_r$ ), maka tekanan udara di dalam botol akan dengan cepat menyesuaikan diri terhadap lingkungan untuk mencapai kesetimbangan. Hal ini dilakukan dengan melakukan ekspansi volum udara ke luar roket, seperti diilustrasikan pada Gambar 2. Volum bayangan yang memfasilitasi penambahan volum udara hingga tekanan udara di dalam roket sama dengan tekanan atmosfer ( $P_{ud}=P_{atm}$ ) dan massa jenis udara di dalam roket sama dengan massa jenis atmosfer ( $\rho_{ud}=\rho_{atm}$ ). Dengan demikian besarnya massa udara akhir di dalam roket dapat dituliskan :

$$m_{ud,f} = \rho_{atm} V_r \quad (13)$$

Pada fase 3 telah disinggung bahwa gaya dorong oleh roket diakibatkan adanya sejumlah volum udara yang keluar dari roket supaya besarnya tekanan udara akhir di dalam roket sama dengan tekanan di luar roket, seperti digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Ekspansi volume udara bayangan

Sedangkan perumusan laju udara yang keluar sama dengan ekspansi laju air, sehingga perumusannya dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v_{ud} = \sqrt{2 \frac{P_{ud}}{P_{atm}}} \quad (14)$$

Selain gaya dorong, roket mengalami gaya gravitasi dan gaya gesek terhadap udara, yang besarnya masing-masing didefinisikan sebagai berikut :

$$F_g = m_t g \quad (15)$$

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A_r v_r^2 \left| \frac{v_r}{|v_r|} \right| \quad (16)$$

$m_t$  merupakan massa total roket;  $g$  merupakan percepatan gravitasi yang besarnya 9.81 m/s<sup>2</sup>;  $C_d$  merupakan koefisien hambatan udara yang besarnya untuk roket adalah 0.7 [4];  $A_r$  adalah luas permukaan roket; dan  $v_r$  merupakan kelajuan roket yang besarnya ditentukan dengan analisis numerik. Dengan demikian besarnya gaya total yang bekerja pada roket adalah :

$$F = F_t + F_g + F_d \quad (17)$$

Berdasarkan hukum II Newton dapat dituliskan bahwa :

$$a_r = \frac{F}{m_t} \quad (18)$$

Melalui integrasi numerik Euler besaran fisis hasil keluaran dapat dituliskan sebagai berikut :

$$v_r = v_r + a_r dt \quad (19)$$

$$h = h + v_r dt \quad (20)$$

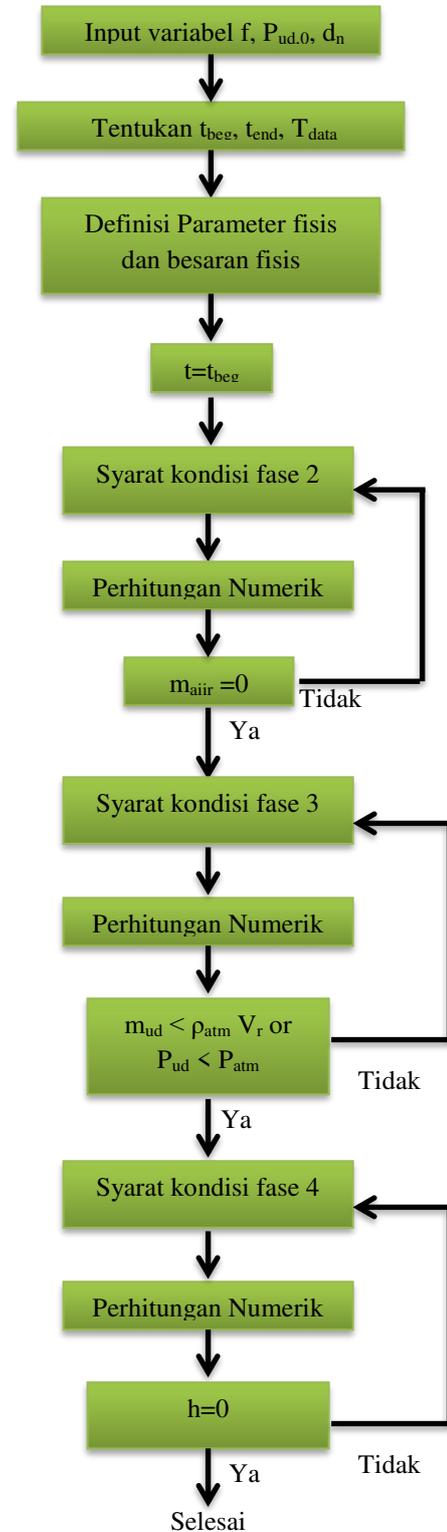
Secara keseluruhan analisis gerak roket dalam program ini dilakukan secara komputasi dengan definisi besaran melalui analitik dan diintegrasikan dengan metode numerik Euler.

Algoritma program diungkapkan seperti Gambar 3. Program dijalankan dengan menggunakan C++ dengan menggunakan variasi data masukan parameter seperti pada Tabel 1, 2 dan 3. Parameter data masukan pada Tabel 1 dilakukan untuk mendapatkan nilai optimasi dt. Tabel 2 merupakan parameter konstan untuk mendapatkan hasil akhir yang divariasikan oleh data masukan seperti Tabel 3.

Tabel 1: Parameter Masukan Penentuan dt

Variabel	Nilai	Satuan
Tekanan udara mula-mula	600000	Pa
Diameter nozzle	0.022	m
Fraksi volum	0.467	-

	0.1	
	0.01	
Time step	0.001	s
	0.0001	
	0.00001	



Gambar 3. Algoritma Perhitungan

Tabel 2: Parameter Masukan Konstan

Parameter	Nilai	Satuan
$g$	9.81	$m/s^2$
$P_{atm}$	101325.000	$Pa$
$\rho_{atm}$	1.23	$kg/m^3$
$\rho_{air}$	1000	$kg/m^3$
$\gamma$	1.4	-
$C$	0.98	-
$C_D$	0.7	-
$d_r$	0.09	$m$
$V_r$	0.0015	$m^3$
$m_0$	0.214	$kg$

### Hasil Penelitian dan Pembahasan

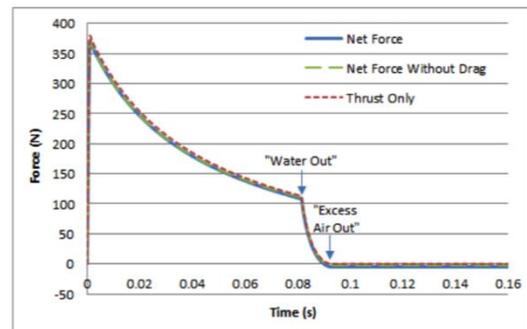
Optimasi nilai  $dt$  (*time step*) diperlukan untuk mendapatkan data yang konvergen. Selain itu untuk meningkatkan akurasi data yang diperoleh dapat dilakukan perbandingan terhadap data dari program lain atau data percobaan sebagai acuan. Dalam hal ini data acuan yang digunakan yaitu data numerik oleh Kian (2014), karena asumsi dan sistem fisis yang digunakan tidak jauh berbeda. Parameter data masukan dalam menentukan  $dt$  ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil data yang diperoleh dalam menentukan hubungan antara gaya terhadap waktu data acuan [4] ditunjukkan pada Gambar 1(a). Apabila dibandingkan dengan data hasil program, seperti pada Gambar 1(b), maka distribusi gaya total mendekati grafik acuan saat  $dt \leq 0.0001$ , dan saat  $dt = 0.0001$  data mulai bersifat konvergen. Oleh karena itu  $dt$  yang digunakan dalam program yaitu 0.0001.

Tabel 3: Variasi Data Masukan

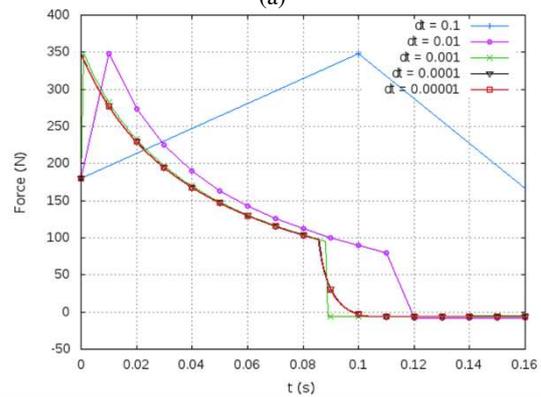
Variabel	Nilai	Satuan
Diameter <i>nozzle</i> ( $d_n$ )	0.010	$m$
	0.014	
	0.018	
	0.022	
	0.026	
Tekanan udara mula-mula ( $P_{ud,0}$ )	300	$Pa$
	350	
	400	
	450	
	500	
	550	

Variabel	Nilai	Satuan
Fraksi volum ( $f$ )	0.1	$m$
	0.2	
	0.3	
	0.4	
	0.5	
	0.6	

Setelah tahapan fiksasi didapatkan nilai  $dt$ , langkah selanjutnya adalah membandingkan beberapa variasi data masukan, seperti pada Tabel 3, terhadap hasil keluaran yaitu gaya total yang bekerja dan ketinggian roket.



(a)



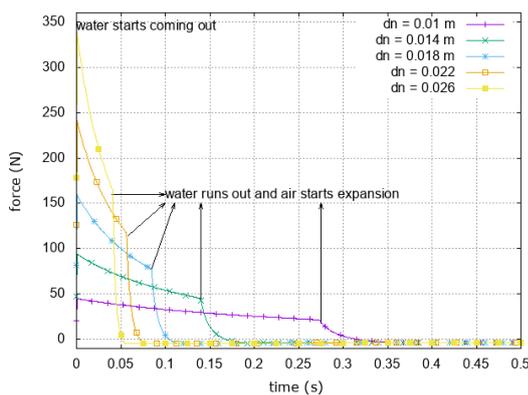
(b)

Gambar 4. (a) Grafik hubungan gaya total roket terhadap waktu [4] (b) Grafik hubungan gaya total yang bekerja pada roket terhadap waktu dengan program.

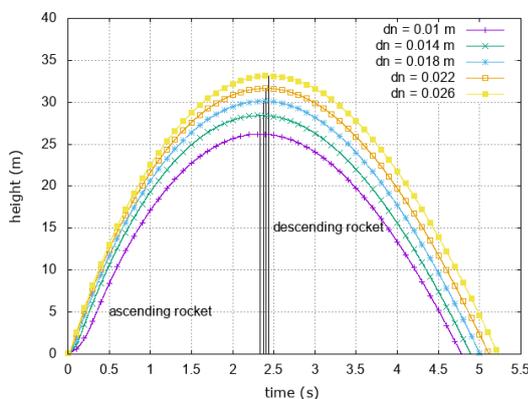
Pengaruh diameter *nozzle* terhadap gaya total yang bekerja pada gerak roket air dijelaskan pada Gambar 5. Dalam simulasi tersebut dilakukan variasi diameter *nozzle* dengan nilai  $P_{ud,0} = 450$  kPa dan  $f = 0.3$ . Berdasarkan Gambar 5 dapat dinyatakan bahwa semakin besar ukuran *nozzle*, maka laju berkurangnya air akan semakin besar. Hal ini mengakibatkan waktu pengosongan air jauh lebih cepat. Hal serupa juga berlaku untuk laju berkurangnya massa udara, karena semakin besar diameter *nozzle* akan

menyebabkan sistem semakin cepat menyesuaikan diri dengan lingkungan. Selain itu, berdasarkan Gambar 5 juga mengungkapkan bahwa dengan ukuran *nozzle* yang lebih besar, maka roket air akan mengalami fase perlambatan lebih awal, karena gaya dorong akibat air dan udara bekerja lebih singkat, namun besarnya gaya yang bekerja jauh lebih besar.

Sedangkan pengaruh variasi diameter *nozzle* terhadap ketinggian gerak roket diilustrasikan pada Gambar 6. Semakin besar ukuran *nozzle*, ketinggian maksimum yang dicapai roket air semakin besar. Rentang perbedaan ketinggian untuk variasi diameter *nozzle* mencapai 5 m. Namun demikian, perbedaan waktu tempuh untuk mencapai ketinggian maksimum pada variasi diameter *nozzle* terbesar dan terkecil kurang dari 0.1 sekon.

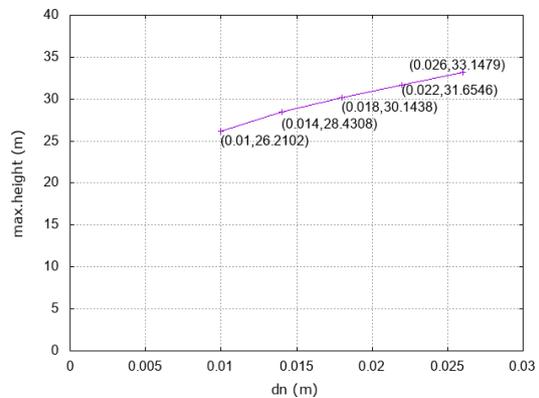


Gambar 5. Pengaruh variasi diameter *nozzle* ( $d_n$ ) terhadap gaya total ( $F_t$ ) yang bekerja pada roket air



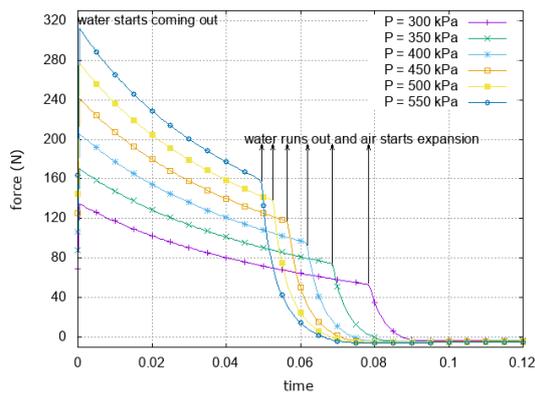
Gambar 6. Pengaruh variasi diameter *nozzle* ( $d_n$ ) terhadap ketinggian ( $h_t$ ) roket air.

Berdasarkan hukum Newton, semakin besar gaya total yang bekerja pada roket air, maka roket air akan memiliki percepatan yang lebih besar. Dengan demikian, lebih besar kemungkinannya untuk dapat mencapai ketinggian yang lebih tinggi. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 7, yaitu hubungan antara ketinggian maksimum dengan diameter *nozzle*. Namun demikian, semakin besar lubang, maka akan menyebabkan fase roket semakin sulit diamati, karena gaya dorong akibat udara dan air akan semakin cepat. Oleh karena itu, besar lubang yang dipilih untuk simulasi selanjutnya tidak lebih besar daripada diameter mulut botol mula-mula, yaitu 0.022 m.



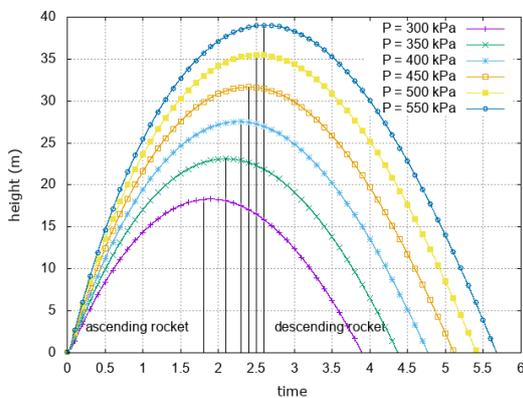
Gambar 7. Hubungan diameter *nozzle* ( $d_n$ ) terhadap ketinggian maksimum ( $h_t$ ) yang dicapai roket air

Pengaruh variasi selanjutnya adalah tekanan udara mula-mula terhadap gaya total yang dialami roket air, seperti Gambar 8, dan terhadap ketinggian roket air, seperti Gambar 9. Dalam simulasi tersebut, data masukan untuk  $f$  dan  $d_n$  berturut-turut sebesar 0.3 dan 0.022 m. Gambar 8 dan 9 mengungkapkan bahwa tekanan udara yang makin besar akan mengakibatkan roket memiliki gaya dorong yang makin besar dan hasilnya, ketinggian maksimum yang dapat dicapai roket juga makin tinggi.

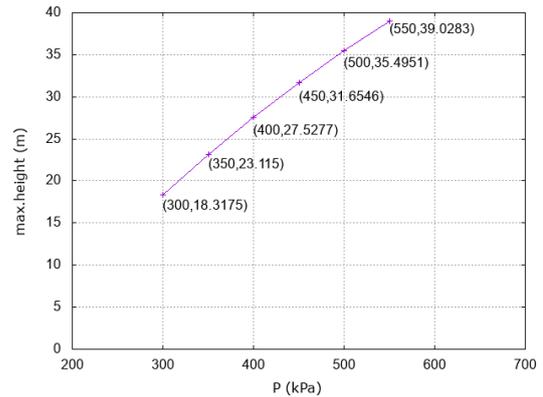


Gambar 8. Pengaruh variasi tekanan udara mula-mula ( $P_{ud,0}$ ) terhadap gaya total ( $F_t$ ) yang bekerja pada roket air

Namun demikian Finney (2000) menyebutkan berdasarkan eksperimen yang dilakukan untuk bahan botol plastik tekanan udara mula-mula yang diberikan harus kurang dari 500 kPa, karena jika tidak botol plastik akan meledak. Dengan demikian untuk variasi diameter *nozzle* dan fraksi volum dilakukan pada tekanan udara mula-mula sebesar 450 kPa. Gambar 10 merangkum hubungan variasi tekanan udara mula-mula ( $P_{ud,0}$ ) terhadap ketinggian maksimum ( $h_{max}$ ) roket air.



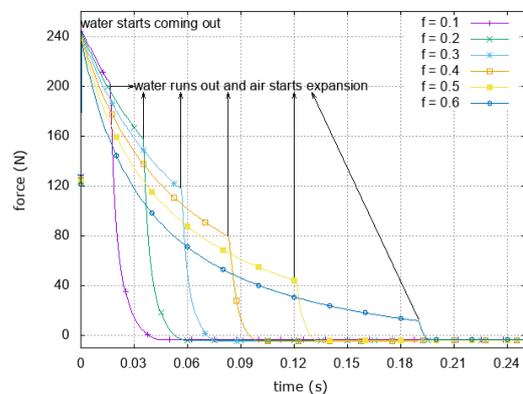
Gambar 9. Pengaruh variasi tekanan udara mula-mula ( $P_{ud,0}$ ) terhadap ketinggian ( $h_i$ ) roket air



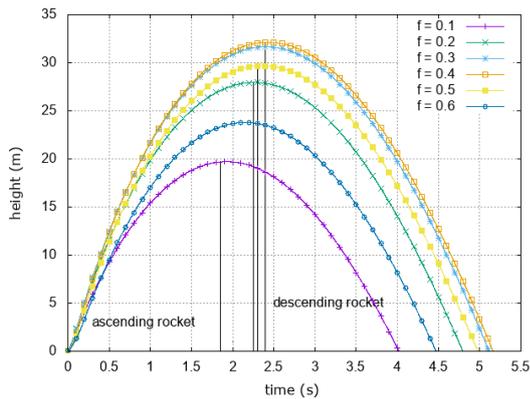
Gambar 10. Hubungan tekanan udara mula-mula ( $P_{ud,0}$ ) terhadap ketinggian maksimum ( $h_{max}$ ) roket air

Fraksi perbandingan maksimum hanya dapat dilakukan hingga 0.65, namun 0.6 dipilih untuk menyamaratakan selisih kenaikan tiap fraksi. Hal ini dikarenakan massa jenis udara yang ada di roket sesaat setelah kondisi pengosongan air akan lebih kecil daripada massa jenis udara pada suhu normal ( $P_{atm}$ ). Dengan demikian penentuan nilai variasi fraksi maksimum bergantung pada besarnya tekanan udara mula-mula yang diberikan pada roket.

Pengaruh variasi fraksi volum terhadap gaya total yang bekerja pada roket, diilustrasikan pada Gambar 11. Gaya maksimum yang paling besar dicapai oleh  $f = 0.1$ , namun dalam waktu yang jauh lebih singkat dibanding fraksi volum lainnya. Sedangkan untuk ketinggian maksimum yang paling tinggi dicapai oleh roket dengan rentang  $f = 0.3 - 0.4$ , seperti diilustrasikan pada Gambar 12.

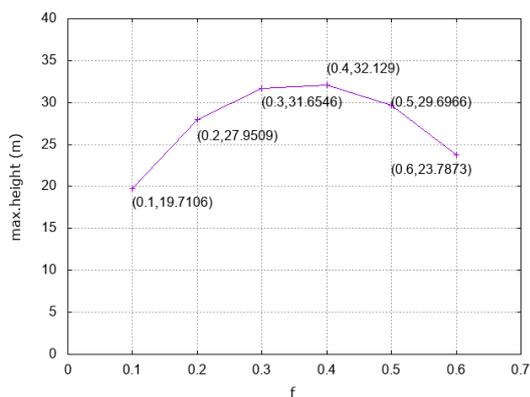


Gambar 11. Pengaruh variasi fraksi volum air ( $f$ ) terhadap gaya total ( $F_t$ ) yang bekerja pada roket air.



Gambar 12. Pengaruh variasi fraksi volum air ( $f$ ) terhadap ketinggian ( $h_t$ ) roket air.

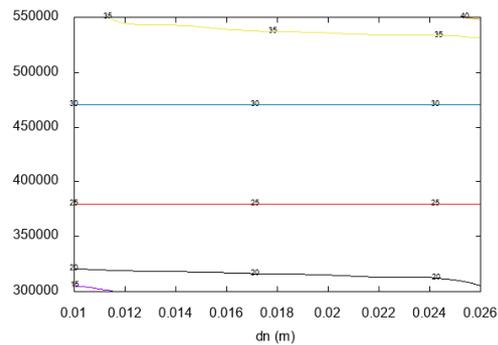
Berdasarkan Gambar 7, 10 dan 13 dapat diilustrasikan efisiensi untuk ketinggian maksimum terkait hubungannya dengan diameter *nozzle*, fraksi volum dan tekanan udara mula-mula yang digambarkan secara berturut-turut pada Gambar 14, 15, dan 16. Gambar 14 mengilustrasikan efisiensi ketinggian maksimum dalam variasi diameter *nozzle* dan tekanan udara mula-mula. Semakin besar ukuran diameter *nozzle* dan semakin besar tekanan udara mula-mula pada roket, ketinggian maksimum yang dicapai akan makin besar. Namun demikian perlu diperhatikan besarnya gaya gesek pada roket akan semakin besar jika diameter *nozzle* makin besar dan besarnya tekanan udara mula-mula terbatas terkait dengan jenis botol roket air.



Gambar 13. Hubungan fraksi volum air ( $f$ ) terhadap ketinggian maksimum ( $h_{max}$ ) roket air

Sedangkan efisiensi ketinggian maksimum dalam variasi fraksi volum dan tekanan udara mula mula diilustrasikan pada Gambar 15. Berdasarkan Gambar 15,

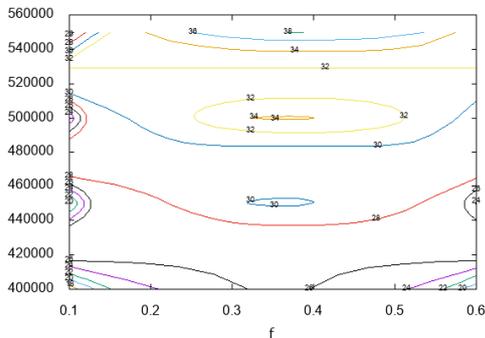
ketinggian maksimum yang paling efektif berada pada rentang  $f = 0.3 - 0.4$ , dan jika tekanan udara mula-mula yang diberikan lebih besar, maka ketinggian maksimum yang dicapai pada fraksi tersebut akan lebih besar. Tidak jauh berbeda dengan Gambar 15, Gambar 16 juga mengungkapkan bahwa ketinggian maksimum yang paling besar dicapai roket pada rentang  $f = 0.3 - 0.4$ .



Gambar 14. Efisiensi ketinggian maksimum variasi  $d_n$  dan  $P_{ud,0}$

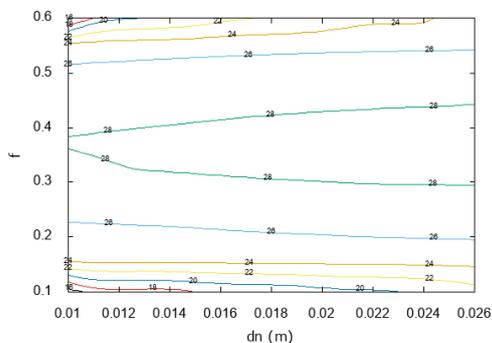
Hal yang cukup menarik adalah ketinggian maksimum tidak didasarkan semakin besar fraksi volum, melainkan hanya pada rentang  $f = 0.3 - 0.4$ , seperti yang diungkapkan pada Gambar 16. Pada dasarnya ketinggian maksimum dipengaruhi oleh banyak faktor besaran fisis seperti gaya gesek, bahan botol roket air, dan lain sebagainya. Namun keterkaitan besaran fisis yang dibahas yaitu hanya pada gaya total yang bekerja. Besar kemungkinan dalam rentang fraksi tersebut yaitu  $f = 0.3 - 0.4$  adalah rentang fraksi volum yang dianggap paling seimbang untuk kondisi dan asumsi roket air yang digunakan. Pada rentang fraksi volum tersebut waktu tempuh gaya total baik oleh air ataupun udara dianggap lebih stabil, seperti ditunjukkan pada Gambar 11. Meskipun pada  $f = 0.6$  waktu tempuh untuk gaya dorong akibat ekspansi air jauh lebih lama, namun besar gaya yang bekerja tiap waktunya lebih kecil dibandingkan variasi fraksi lainnya. Sedangkan untuk fraksi terendah yaitu  $f = 0.1$  memiliki gaya yang paling maksimum selama masa pengosongan air, namun waktu tempuhnya jauh lebih singkat, akibatnya gaya gesek yang bekerja selama masa pengosongan

udara lebih besar dibanding variasi fraksi volum lainnya.



Gambar 15. Efisiensi ketinggian maksimum variasi  $f$  dan  $P_{ud,0}$

Pada persamaan (16) dijelaskan bahwa gaya gesek yang bekerja sebanding dengan kecepatan roket tiap waktunya dan kecepatan roket sangat dipengaruhi oleh laju ekspansi akibat air dan udara pada roket. Laju ekspansi tersebut terkait dengan besarnya tekanan udara dalam botol roket. Berdasarkan persamaan (11) besarnya tekanan udara dalam botol sangat berkaitan dengan jumlah volum air yang ada dalam botol roket. Oleh karenanya, pada  $f = 0.1$  besarnya tekanan udara dalam botol sesaat setelah air habis jauh lebih besar, akibatnya gaya gesek yang bekerja saat itu jauh lebih besar dibandingkan variasi fraksi volum lainnya. Sebaliknya, pada  $f = 0.6$ , gaya gesek yang bekerja selama masa pengosongan air jauh lebih besar dibandingkan fraksi volum lain dan besarnya tekanan udara sesaat setelah air habis jauh lebih kecil, akibatnya gaya total yang bekerja selama masa pengosongan udara jauh lebih singkat.



Gambar 16. Efisiensi ketinggian maksimum variasi  $d_n$  dan  $f$

Berbagai analisis dan studi kajian tentang roket air dengan berbagai metode dirangkum Tabel 4. Asumsi dan batasan yang digunakan semakin berkembang supaya meruncing pada keadaan riil roket air dan dihasilkan optimasi keluaran yang presisi dan akurat.

Tabel 4: Perbandingan Hasil Penelitian

Peneliti	Eksperimen	Output
Fairusy, dkk	-	$P_{ud,0}$ dan $f$ terhadap ketinggian dan gaya
Finney	-	$V_{air,0}$ terhadap ketinggian
Kian	-	Grafik gerak roket (ketinggian, percepatan, gaya dan kecepatan) untuk satu ukuran tertentu
Lockette, dkk	✓	$P_{ud,0}$ dan $f$ terhadap jangkauan terjauh
Dietzel, M	-	$P_{ud,0}$ , $m_{air}$ , $C$ (koef. gesek <i>nozzle</i> ), koefisien eksponen polytropik terhadap kecepatan relatif, kecepatan roket, ketinggian
Barjah, dkk	✓	Sudut kemiringan terhadap jangkauan terjauh
Gommes	✓	$P_{ud,0}$ terhadap ketinggian dan kecepatan

## Simpulan, Saran, dan Rekomendasi

Berbagai asumsi dan batasan kasus sangat penting dalam analisis penyelesaian kasus fisika sederhana, seperti roket air. Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang dilakukan dengan analisis numerik dapat disimpulkan pengaruh variasi masukan terhadap besaran fisis dalam gerak roket air sebagai berikut : (1) diameter *nozzle*, tekanan udara mula-mula dan fraksi volum sangat berpengaruh terhadap gerak roket air; (2) semakin besar diameter *nozzle* semakin besar gaya dan ketinggian maksimum gerak roket; (3) semakin besar tekanan udara mula-mula, semakin besar pula gaya dan ketinggian maksimum roket; (3) semakin besar fraksi volum, semakin besar pula gaya maksimum gerak roket; namun ketinggian maksimum tertinggi didapatkan untuk fraksi volum  $f = 0,3 - 0,4$ .

Diharapkan, hasil analisis yang telah dilakukan dapat dijadikan sebagai referensi pendukung dalam melakukan percobaan (eksperimen) roket air dan dapat

dikembangkan berbagai asumsi yang semakin memperkecil tingkat perbedaan kondisi riil yang ada.

## Daftar Pustaka

- Bailio, P.A. (2004). Simple orifices have an edge – Complex entrance profiles boost orifice-flow efficiency but at the expense of repeatability. Retrieved 12 Mei 2016. <http://machinedesign.com/article/simple-orifices-have-an-edge-0318>.
- Barjah, N.N., Sambas, A., Sanjaya, M. Rancang Bangun Alat Eksperimen Roket Air dari Barang Bekas Sebagai Media Pembelajaran Mekanika. Prosiding Pertemuan Ilmiah XXV HFI Jateng & DIY.
- Dietzel, M. (2000). Modelling and Simulation of a Model Rocket Driven by Pressured Water as a Function of Start Parameter Variations ENGR 112C (527). (2014). Water Rocket Project. Retrieved 12 Mei 2016. [http://research.che.tamu.edu/groups/Seminario/ENGR112\\_Spring\\_2014\\_files/Water%20Rocket%20Project\\_19js\\_FINAL%20INSTRUCTIONS.doc](http://research.che.tamu.edu/groups/Seminario/ENGR112_Spring_2014_files/Water%20Rocket%20Project_19js_FINAL%20INSTRUCTIONS.doc).
- Finney, G.A. (2000). Analysis of a water-propelled rocket : A problem in honors physics”. American Journal of Physics, 68 (3), 233-237.
- Gommes, C.J. (2010). A more thorough analysis of water rockets: Moist adiabats, transient flows, and inertial forces in a soda bottle. Am. J. Phys. 78, (3). March
- Gowdy, Robert H. (1995). The Physics of Perfect Rocket. American Journal of Physics, 63 (3), 229-232.
- H, Rodrigues and N, Panda. (2014). The Motion of Leaking Oscillator : A Study for the Physics Class. Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- Kian, J.T. (2014). Learn Physics with a Water-Propelled Rocket. Journal National Sapce Agency. Retrieved 12 Mei 2016. [http://stemstates.org/assets/files/430\\_fullpaper\\_abstract%20number%20430.pdf](http://stemstates.org/assets/files/430_fullpaper_abstract%20number%20430.pdf).

- Lockette, P.V., Acciani, D., Courtney, J., Diao, C., Riddell, W., Dahm, K., Harvey, R. (2016). Bottle Rockets and Parametric Design in A Converging-Diverging Design Strategy. American Society for Engineering Education, 497.
- Muslow, M. (2011). Modelling and Optimization of multi-stage water rockets, Bachelor Thesis. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald.
- Nelson, Robert A, Wilson, Mar E. (1976). Mathematical Analysis of a Model Rocket Trajectory. Part I : The powered phase. The Physics Teacher, 150-161.
- Santanu Sahara. (2016). Numerical Analysis with Algorithm and Programming. Boca Raton : CRC Press.
- Singleton IV, L.C. (2001). Bottle Rocket Handbook.

## Pertanyaan:

1. Apa yang perlu diperhatikan jika ingin membuat roket air agar aman dan tidak terjadi hal yang membahayakan? (Muryanto)
2. Dewasa ini sering diadakan perlombaan roket air baik di jenjang SMA, SMP bahkan SD, bagaimana menjelaskan konsep fisika dalam gerak permainan roket air terutama berkaitan dengan variasi dn, dan lain sebagainya agar siswa tidak sekedar membuat saja ?

## Jawaban:

Kapasitas penelitian saya belum mencakup hal tersebut. Mungkin hal buruk (insiden) dapat diminimalisir dengan penggunaan komputasi dalam kegiatan tersebut