

## Simulasi Aliran Vortex pada Tangki Silindris dengan Variasi Bentuk Vortex Breaker

M. Hidayat Ramdani <sup>1)</sup>, Khasani <sup>2)</sup>, Adhika Widyaparaga <sup>3)</sup>

<sup>1),2),3)</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik,  
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta  
Email : emha.ramdani@gmail.com

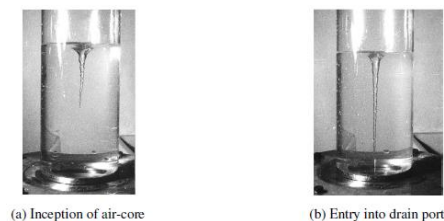
**Abstrak.** Dalam proses pengosongan tangki sering didapati fenomena vortex. Dalam studi ini proses pengosongan tangki disimulasikan menggunakan perangkat computational fluid dynamics. Aliran keluaran tangki divariasikan dengan kecepatan konstan 0.5-2 m/s untuk merepresentasikan kecepatan umum pada bagian hisap pompa sentrifugal di industri. Hasil yang didapatkan menunjukkan kenaikan tinggi kritis seiring dengan penambahan kecepatan pada saluran keluaran. Selain itu, diteliti juga pengaruh vortex breaker jenis dish dan cone terhadap pembentukan vortex. Jenis vortex breaker yang diamati menghasilkan penurunan tinggi kritis yang signifikan.

**Kata kunci:** tinggi kritis, vortex, vortex breaker, outlet constant velocity, dish dan cone

### 1. Pendahuluan

#### 1.1. Latar Belakang

Dalam proses pengosongan tangki, seringkali terjadi fenomena vortex. Yakni proses terbentuknya pusaran air dengan udara memenuhi bagian tengah dari pusaran. Proses ini dipicu oleh proses pengosongan/draining tangki. Ketika pusat dari pusaran tersebut memanjang hingga saluran keluaran tangki, udara memasuki saluran keluaran dan mengurangi *flow* keluaran. Pada saluran keluaran dapat mengakibatkan vibrasi yang dapat mengakibatkan kerusakan pada saluran keluar.



Gambar 1. Fenomena terbentuknya vortex pada tangki silindris (Sam, et.al. 2012)

Penelitian sebelumnya banyak membahas tentang proses pengosongan tangki dan fenomena vortex yang terjadi di dalamnya. Lubin dan Springer (1967) telah mengembangkan persamaan untuk memprediksi terbentuknya tinggi kritis, yakni tinggi fluida di dalam tangki dimana *free surface* dari cairan telah terdeformasi dan kolom udara telah menyentuh saluran keluaran. Dalam persamaan tersebut, didapati bahwa selain faktor dimensi dari saluran keluaran, debit aliran juga mempengaruhi terbentuknya tinggi kritis. Secara analitis, Odgaard (1986) juga mengembangkan persamaan untuk tinggi kritis yang merupakan fungsi dari Froude number ( $F_n$ ) aksial. Hal ini juga menegaskan bahwa debit aliran mempengaruhi pembentukan tinggi kritis.

Beberapa eksperimen terkait proses pengosongan tangki juga sudah banyak dilakukan dengan memvariasikan beberapa variable seperti: diameter tangki, diameter outlet, tinggi mula fluida dan variasi jenis fluida yang digunakan. Akan tetapi, kebanyakan dari eksperimen tersebut mengandalkan *gravity flow* untuk mengalirkan fluida keluar dari tangki.

Di dalam dunia industri seringkali aliran keluar dari tangki tidak tipikal *gravity flow* yang debit keluarannya tergantung elevasi fluida di dalam tangki, namun aliran keluar diatur sedemikian rupa hingga alirannya constant (misal dari pipa hisap pompa).

Selain itu, beberapa penelitian juga telah mengembangkan beberapa desain dari *vortex breaker* yang bertujuan untuk menghalangi pembentukan *vortex*. Desain umum dari *vortex breaker* yang sering ditemui adalah jenis flat plate diatas outlet maupun cross plate diatas outlet.

Dalam penelitian ini akan dianalisa pengaruh dari *constant outflow* terhadap terbentuknya *vortex* di dalam tangki silindris. Selain itu, akan diteliti pengaruh *vortex breaker* berbentuk kerucut (*cone*) dan piringan (*dish*) terhadap pembentukan *vortex*. Simulasi CFD akan dilakukan untuk memudahkan dalam mengkarakterisasi aliran di dalam tangki dengan variasi *outflow rate* dan bentuk *vortex breaker*.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dijabarkan diatas, maka permasalahan utama yang timbul adalah meneliti struktur aliran yang terbentuk dengan adanya flow keluar yang dijaga constant dari saluran outlet pada bagian bawah tangki dan pengaruh *vortex breaker* jenis *cone* dan *dish* terhadap pembentukan *vortex*.

## 1.3. Metode Penelitian

### 1.3.1. Computational Fluid Dynamic

Dalam penelitian ini digunakan software ANSYS Fluent 16.0 untuk mensimulasikan kondisi transient pengosongan tangki. FLUENT menggunakan metode volume hingga untuk memecah domain komputasi menjadi volume-volume kontrol dimana persamaan energi, momentum dan kontinuitas diselesaikan secara simultan. Berikut ini adalah persamaan kontinuitas dan momentum yang digunakan:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1.1)$$

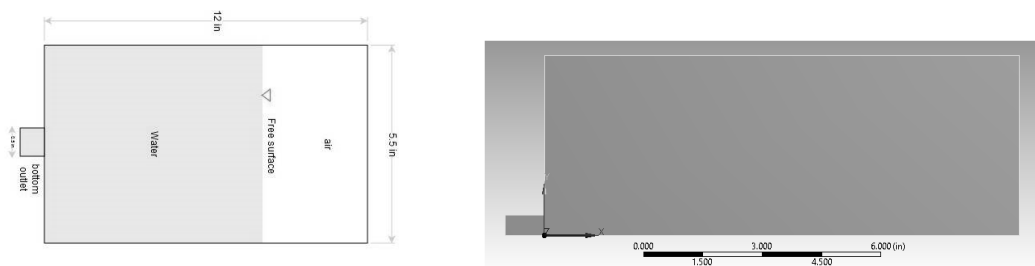
$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (1.2)$$

$$v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} - \frac{v_r v_\theta}{r} = \nu \left[ \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] \quad (1.3)$$

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + g \quad (1.4)$$

Model Volume of Fluid (VoF) akan digunakan untuk memonitor dan melacak perubahan pada free surface. Hal ini merujuk ke penelitian sebelumnya oleh Robinson (2010) dan Sohn (2011) yang menggunakan teknik ini dan mendapatkan hasil yang cukup realistis dibandingkan dengan hasil eksperimental.

Bentuk basis geometri untuk penelitian ini mengambil dari dimensi studi eksperimen yang dilakukan oleh Lubin (1967). Model domain fluida dibuat secara 2 dimensi dan Axisymmetric. Axisymmetric adalah pemodelan simplifikasi bentuk 3 dimensi dengan memutar bentuk 2 dimensi secara 360°. Dengan metode ini, jumlah elemen yang diperlukan jauh lebih sedikit dibandingkan model 3 dimensi dan waktu komputasi juga lebih singkat. Bentuk geometri yang dihasilkan dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2. Dimensi Tangki (kiri) dan Geometri 2 Dimensi Axisymmetric (kanan)

VOF multiphase method digunakan untuk melacak interface antara udara and air. Metode ini sudah digunakan sebelumnya dalam beberapa penelitian sejenis oleh Robinson (2010) dan Sohn (2011) yang menggunakan teknik ini dan mendapatkan hasil yang cukup realistis dibandingkan dengan hasil eksperimental.

Untuk model turbulensi digunakan K-ε standar. Model ini paling banyak digunakan di CFD untuk mensimulasikan karekteristik fluida untuk kondisi turbulen. Model ini dianggap mampu menghasilkan pendekatan yang baik untuk kondisi permodelan penelitian ini tanpa harus menggunakan model lain yang lebih kompleks (Robinson, 2010).

Tekanan di-diskretisasi menggunakan skema PRESTO!, sementara untuk pressure-velocity coupling menggunakan algoritma SIMPLE.

### 1.3.2. Boundary Condition

Tabel berikut adalah ringkasan boundary conditions yang digunakan dalam penelitian:

Tabel 2.1 Boundary Conditions

| Boundary Condition         | Value                              |
|----------------------------|------------------------------------|
| Top Side                   | Pressure outlet (gauge pressure=0) |
| Bottom Side (drain outlet) | 0.5 - 2 m/s (velocity outlet)      |
| Tank Walls                 | No-slip walls                      |
| Interface                  | 0.0712 N/m (air-water)             |

### 1.3.4. Langkah Validasi

Validasi dilakukan degan memvariasikan dimensi radius tangki dan radius outlet sebagaimana dimensi yang digunakan pada eksperimen Lubin (1967). Sementara tinggi mula dari air dijaga pada ketinggian 0,05 m.

Hasil dari simulasi akan digunakan untuk menghitung critical discharge menggunakan persamaan tinggi kritis dari Lubin (1967) berikut:

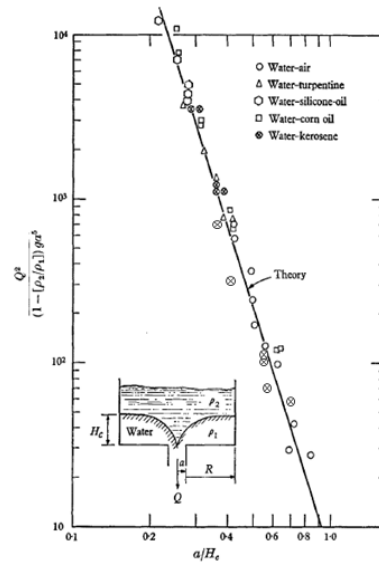
$$\frac{h_{cr}}{r} = 0.69 \left[ \frac{Q^2}{(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1}) g r^5} \right]^{1/5} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dari critical discharge yang sudah didapat, a/Hc bisa dibaca dari grafik (2.2) dan selanjutnya tinggi kritis dapat dihitung. Tinggi kritis tersebut lalu dibandingkan dengan tinggi kritis yang didapat dari hasil simulasi.

Tabel 2.2 Validasi tinggi kritis

| No | Tank Radius (R)<br>m | outlet radius (a)<br>m | Rho water<br>kg/m3 | Rho air<br>kg/m3 | Velocity at Outlet<br>m/s | Critical Discharge<br>- | a/Hc (calc.)<br>- | Hc Theoretical (calculated)<br>m | Hc by simulation<br>m |
|----|----------------------|------------------------|--------------------|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
| 1  | 0.11                 | 0.013                  | 1000               | 1.18             | 0.85                      | 57.30                   | 0.65              | 0.020                            | 0.018                 |
| 2  | 0.07                 | 0.006                  | 1000               | 1.18             | 0.81                      | 104.07                  | 0.59              | 0.011                            | 0.010                 |
| 3  | 0.04                 | 0.010                  | 1000               | 1.18             | 0.81                      | 69.38                   | 0.59              | 0.016                            | 0.015                 |
| 4  | 0.04                 | 0.003                  | 1000               | 1.18             | 0.61                      | 118.05                  | 0.58              | 0.005                            | 0.005                 |
| 5  | 0.11                 | 0.013                  | 1000               | 1.18             | 2.00                      | 317.25                  | 0.47              | 0.027                            | 0.027                 |
| 6  | 0.11                 | 0.013                  | 1000               | 1.18             | 3.00                      | 713.81                  | 0.4               | 0.032                            | 0.030                 |

Hasil diatas ditunjukkan juga pada grafik dibawah ini dengan tanda silang (⊗):



Gambar 3. Grafik  $a/H_c$  dengan critical discharge

Dari tabel dan grafik diatas, dapat dilihat bahwa tinggi kritis yang didapat dari hasil simulasi cukup dekat dengan hasil dari penelitian Lubin (1967). sehingga dapat disimpulkan bahwa model yang digunakan dalam simulasi cukup akurat merepresentasikan kondisi riil.

## 2. Pembahasan

### 2.1 Pengaruh constant outflow terhadap pembentukan vortex

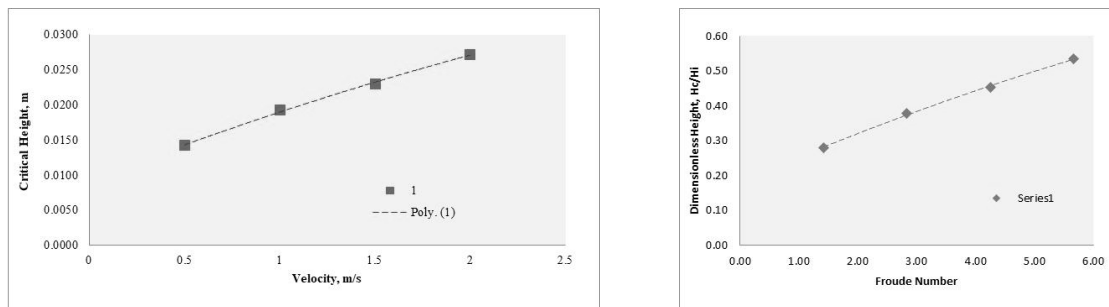
Setelah langkah validasi selesai, simulasi inti dari penelitian dapat dimulai. Model yang sudah dibuat divariasikan kecepatan aliran pada saluran buang dari 0,5-2 m/s, yakni kecepatan tipikal untuk kecepatan hisap pompa pada di industri *Oil & Gas*.

Tabel 3.1 Pengaruh constant outflow terhadap tinggi kritis

| Velocity,<br>v<br>m/s | Fr   | Critical<br>Height, Hc<br>m | Critical Height/initial<br>Height |
|-----------------------|------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 0.5                   | 1.42 | 0.0142                      | 0.28                              |
| 1                     | 2.83 | 0.0193                      | 0.38                              |
| 1.5                   | 4.25 | 0.0230                      | 0.45                              |
| 2                     | 5.67 | 0.0272                      | 0.54                              |

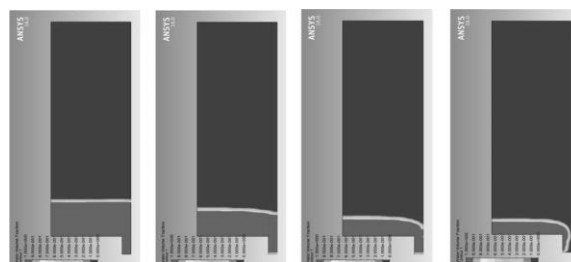
Secara konsisten hasil simulasi menunjukkan bahwa tinggi kritis dipengaruhi oleh kecepatan aliran di saluran buang. Semakin tinggi kecepatan pada saluran buang, maka tinggi kritis juga semakin tinggi. Hal ini konsisten dengan persamaan (2.1) dimana tinggi kritis merupakan fungsi dari debit aliran.

Grafik dibawah ini menunjukkan hubungan antara kecepatan alir pada saluran buang dengan tinggi kritis dan secara non-dimensional juga ditunjukkan dengan menggunakan parameter Froude number sebagai sumbu X dan  $H_c/H_i$  (perbandingan tinggi kritis dengan tinggi mula) di sumbu Y.

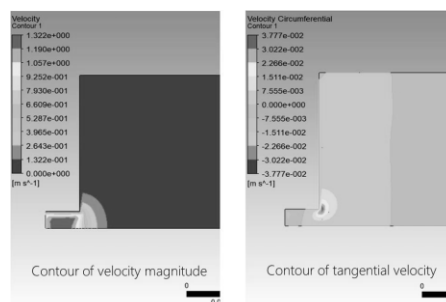


Gambar 4. Grafik hubungan kecepatan alir pada saluran buang dengan tinggi kritis (kiri) dan hubungan Froude number dengan  $H_c/H_i$  (kanan)

Untuk memahami pembentukan *vortex* dalam aliran, kita akan meninjau lebih lanjut antarmuka aliran dan profil kecepatan di dalam tangki sebagai berikut:



Gambar 5. Pembentukan *vortex* dengan constant outflow



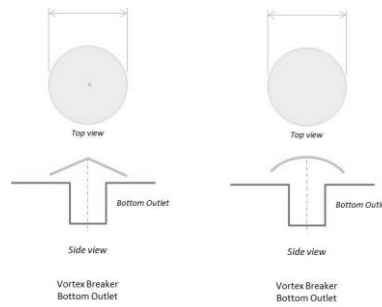
Gambar 6. Profil kecepatan dalam tangki dengan constant outflow

Bila kita lihat pada kontur kecepatan dalam tangki terlihat bahwa kecepatan aliran menuju outlet meningkat secara gradual. Sedangkan kecepatan tangensial dapat dilihat cukup tinggi pada bagian pinggir dari saluran keluaran.

## 2.2 Pengaruh *vortex breaker* dengan bentuk *dish* dan *cone* terhadap pembentukan *vortex*

Dalam penelitian ini juga akan diteliti pengaruh *vortex breaker* dalam pembentukan *vortex*. *Vortex breaker* yang akan diuji adalah berbentuk kerucut (*cone*) dan piringan (*dish*) diatas saluran keluaran.

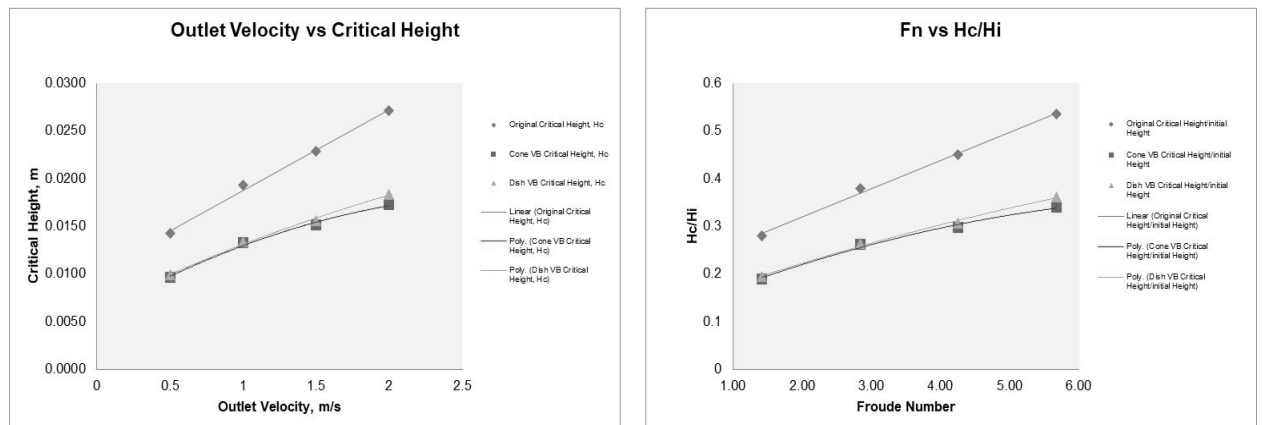
Untuk lebih jelasnya, berikut ini adalah gambaran *vortex breaker* yang akan diteliti:



Gambar 7. *Vortex breaker* tipe kerucut (kiri) dan piringan (kanan)

Dengan metode simulasi yang sama, maka didapatkan data perubahan tinggi kritis sebagai berikut:  
Tabel 3.2 Pengaruh *Dish* dan *Cone vortex breaker* terhadap tinggi kritis

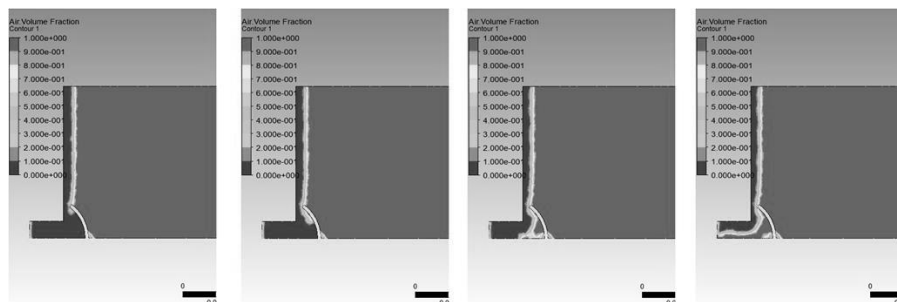
| Velocity,<br>$v$<br>m/s | $Fr$ | Original Critical<br>Height, $H_c$<br>m | Original Critical<br>Height/initial<br>Height | Cone VB Critical<br>Height, $H_c$<br>m | Cone VB Critical<br>Height/initial<br>Height | Dish VB Critical<br>Height, $H_c$<br>m | Dish VB Critical<br>Height/initial<br>Height |
|-------------------------|------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|
| 0.5                     | 1.42 | 0.014                                   | 0.280                                         | 0.010                                  | 0.190                                        | 0.010                                  | 0.195                                        |
| 1                       | 2.83 | 0.019                                   | 0.380                                         | 0.013                                  | 0.262                                        | 0.013                                  | 0.264                                        |
| 1.5                     | 4.25 | 0.023                                   | 0.450                                         | 0.015                                  | 0.298                                        | 0.016                                  | 0.307                                        |
| 2                       | 5.67 | 0.027                                   | 0.535                                         | 0.017                                  | 0.340                                        | 0.018                                  | 0.362                                        |



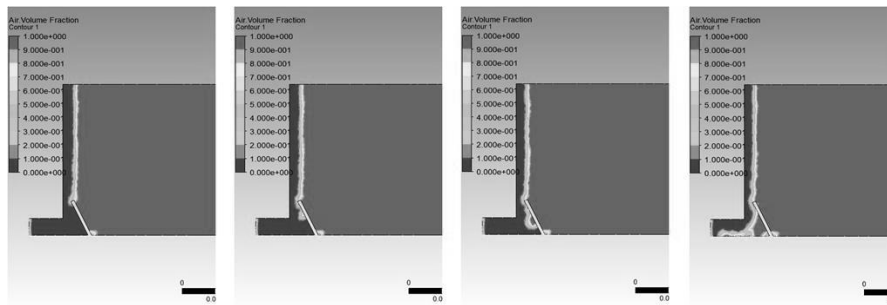
Gambar 8. Grafik Pengaruh *Dish* dan *Cone vortex breaker* terhadap tinggi kritis

Tabel dan grafik diatas menunjukkan tren yang cukup menarik, dimana *vortex breaker* jenis *dish* maupun *cone* secara konsisten mendapatkan hasil tinggi kritis yang lebih rendah secara signifikan dibandingkan dengan kasus pengosongan tangki tanpa *vortex breaker*.

Untuk memahami karakteristik aliran lebih lanjut, maka kita akan meninjau profil transien dari antarmuka aliran di dalam tangki sebagai berikut:



Gambar 9. Pembentukan *vortex* pada *vortex breaker* bentuk *dish*



Gambar 10. Pembentukan vortex pada vortex breaker bentuk cone

Dari 2 gambar diatas, kita bisa melihat terdapat fenomena yang sangat menarik. Kolom udara tampak jelas berusaha mengisi volume dibawah vortex breaker sebelum akhirnya memasuki saluran keluaran.

Fenomena ini dikarenakan sifat dari berat jenis udara yang lebih ringan dari air dan juga dikarenakan dinamika air yang secara konstan keluar dari saluran buang meninggalkan volume kosong yang kemudian diisi udara.

Dengan adanya vortex breaker jenis dish maupun cone, terdapat 2 efek yang bekerja untuk mengurangi pembentukan vortex, yakni: (a) Tambahan jarak bagi kolom udara untuk mencapai saluran buang, dan (b) Tendensi kolom udara untuk mengisi volume dibawah vortex breaker.

### 3. Kesimpulan

1. *Constant velocity* pada saluran buang tangki silindris mempengaruhi pembentukan vortex didalam tangki. Pada kecepatan aliran yang diamati, 0,5-2 m/s; tinggi kritis akan terbentuk lebih tinggi seiring dengan bertambahnya kecepatan alir di saluran buang.
2. Vortex breaker jenis dish dan cone yang diteliti memberikan hasil yang positif dalam hal menurunkan tinggi kritis di dalam tangki silindris. Hal ini sangat menarik untuk dikembangkan lebih jauh untuk aplikasi di industry mengingat bentuk geometri yang sederhana dan relatif murah dan mudah untuk difabrikasi.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis ingin mengucapkan terimakasih banyak kepada Dr. Khasani dan Dr. Adhika untuk bimbingannya dalam penulisan karya ilmiah ini.

### Daftar Pustaka

- [1]. Mathew, Sam and Tharakan, T.J., 2012. *Numerical simulation of air core vortex and its dynamics during liquid draining from a cylindrical tank*, 14th Annual CFD Symposium, BangalorePark.
- [2]. Lubin, B. T., and Springer, G. S., 1967, *The Formation of a Dip on the Surface of a Liquid Draining from a Tank*, Journal of Fluid Mechanics, 29, pp. 385-390.
- [3]. Odgaard, A. J., 1986, *Free Surface Air Core Vortex*, Journal of Hydraulic Engineering, 112, pp. 610-620.
- [4]. Robinson, A., Morvan, H., and Eastwick, C., 2010, *Computational Investigations into Draining in an Axisymmetric Vessel*, Journal of Fluids Engineering, 132, pp. 121104-1 - 121104-2.
- [5]. Park and Sohn, C. H., 2011, *Experimental and Numerical Study on Air Cores for Cylindrical Tank Draining*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38, pp. 1044-1049.