

ANALISIS VARIASI FREKUENSI DAN GELOMBANG PADA PEMBENTUKAN CINCIN VORTEKS OLEH AKTUATOR JET SINTETIK

Engkos A. Kosasih^{1,a}, Harinaldi^{2,b}, Ramon Trisno^{3,c}, Safril Dwiky Darmawan^{4,d}

^{1,2}Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, Indonesia 16424

³Jurusan Teknik Mesin Universitas Pancasila, Jakarta, Indonesia 12640

⁴Laboratorium Mekanika Fluida Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia

^akosri@eng.ui.ac.id, ^bharinald@eng.ui.ac.id, ^cramontrisno@gmail.com, ^dsafrialdwky@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh variasi frekuensi dan bentuk gelombang pada pembentukan cincin vorteks oleh aktuator jet sintetik. Variasi frekuensi eksitasi yang digunakan dalam percobaan yaitu 20 Hz sampai dengan 200 Hz, dengan variasi bentuk gelombangnya adalah sinusoidal, *square* dan *triangle*. Bentuk *cavity* dari aktuator adalah kerucut dengan diameter orifis 3mm, 5mm, dan 8mm. Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental dan komputasional. Pengambilan data eksperimen dilakukan pada mulut orifis ($x/D = 0$ dan $y/D \approx 0$) dengan menggunakan *Constant Temperature Anemometer* (CTA) dengan *data rate* 60,000 data dalam 2 detik. Sedangkan data simulasi diperoleh dengan menggunakan *software* Fluent 6.2.36 dengan menggunakan model turbulensi *Reynold Stress Model*. Dari data yang diperoleh kemudian diolah untuk dimasukkan dalam kriteria pembentukan cincin vorteks. Dari hasil pengolahan data, didapatkan rentang frekuensi optimum serta bentuk gelombang yang paling baik untuk aktuator jet sintetik dalam pembentukan cincin vorteks. Hasil penelitian ini menyimpulkan bahwa *cavity* kerucut dengan diameter orifis mempunyai performa lebih baik dibandingkan dengan *cavity* lainnya, dimana frekwensi getaran membrannya 100 Hz – 120 Hz dengan gelombang *square*.

Kata Kunci : Aktuator Jet Sintetik, Frekuensi Eksitasi, Gelombang Eksitasi, Pembentukan Cincin Vorteks

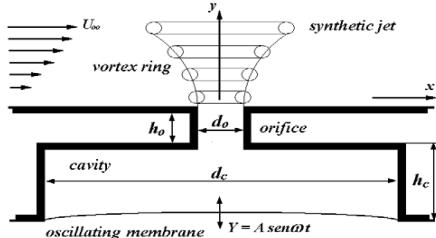
1. PENDAHULUAN

Aktuator jet sintetik (SJA) dapat digunakan sebagai kontrol aliran fluida^[1] serta kontrol termal dari aliran fluida^[8]. Gambar 1 menunjukkan skema tipikal dari aktuator jet sintetik. Aktuator jet sintetik disebut juga dengan *Zero-net Mass Flux* (ZNMF) karena memiliki net-massa fluida nol tetapi memiliki net-momentum tidak nol^[2, 5]. Pada implementasinya, sebuah membran piezoelektrik dipasangkan pada bagian bawah dari sebuah *cavity* yang memiliki sebuah orifis sebagai pintu masuk-keluarnya fluida. Saat membran berosilasi, fluida akan masuk-keluar orifis secara periodik. Selama proses ekspansi, sebuah cincin vorteks dapat terbentuk didekat mulut orifis, dan pada kondisi operasi tertentu, cincin vorteks dapat terlepas dari orifis. Sedangkan untuk kondisi yang lain, cincin

vorteks akan terhisap kembali kedalam *cavity* selama proses hisap.

Proses pembentukan cincin vorteks sangat berpengaruh terhadap cincin vorteks yang terbentuk beserta momentum yang dibawa oleh cincin vorteks^[3]. Cincin vorteks yang terbentuk akan mentransfer momentum pada aliran *crossflow* untuk meningkatkan tegangan gesernya. Aliran *crossflow* yang mendapat momentum dari cincin vorteks akan memiliki tekanan yang cukup untuk memperlambat terjadinya *adverse pressure gradient* sehingga dapat menunda terjadinya separasi aliran^[7]. pembentukan jet pada aliran yang diam merupakan langkah pertama yang krusial untuk menentukan performa dari aktuator jet sintetik. Penelitian ini akan membahas mengenai frekuensi dan bentuk gelombang (osilasi dari membran) yang optimum untuk

pembentukan cincin vorteks pada bentuk *cavity* yang telah ditentukan.



Gambar 59 Aktuator Jet Sintetik

Holman et al^[3] merumuskan parameter-parameter yang menentukan performa dari jet sintetik berdasarkan model profil kecepatan yang keluar dari orifis adalah bilangan non-dimensional *stroke length*^[6] L_0/D dan bilangan non-dimensional Reynolds $Re_{U_0} = U_0 D/v$ berdasarkan skala kecepatan

$$U_0 = f L_0 = f \int_0^{T/2} u_0(t) dt \quad (1)$$

dimana D adalah diameter orifis, v adalah viskositas kinematik dari fluida, $u_0(t)$ adalah kecepatan fluida di titik tengah mulut orifis, $T = 1/f$ adalah periode, f adalah frekuensi osilasi dari membran dan L_0 adalah jarak yang fluida tempuh melewati orifis selama proses ekspulsi. Smith dan Swift berpendapat bahwa profil kecepatan di titik tengah $u_0(t)$ secara umum didefinisikan sebagai rata-rata kecepatan spasial di mulut orifis.

Bilangan Reynold untuk rata-rata kecepatan aliran yang keluar dari orifis selama proses ekspulsi adalah

$$Re_{\bar{U}} = \bar{U} D/v \quad (2)$$

dimana \bar{U} adalah rata-rata kecepatan keluar spasial dan waktu

$$\bar{U} = \frac{2}{TA} \int_A \int_0^{T/2} u(t, y) dt dy \quad (3)$$

A adalah luas orifis, dan y adalah koordinat *cross-stream* diatas mulut orifis. Dari persamaan (1) dan (3) terungkap bahwa dua skala kecepatan berhubungan, $\bar{U} = 2U_0$.

Lebih jauh lagi, perhatikan bahwa $L_0/D = U_0/(fD)$ berhubungan dengan invers dari bilangan Strauhal melalui

$$\frac{1}{Sr} = \left(\frac{L_0/D}{\pi} \right) = \frac{\bar{U}}{\omega D} = \frac{(\bar{U}D/v)}{(\omega D^2/v)} = \frac{Re_{\bar{U}}}{S^2} \quad (4)$$

Dimana S adalah bilangan Stokes yang mewakili pengaruh frekuensi eksitasi dan didapatkan melalui

$$S = \sqrt{\frac{2\pi f D^2}{v}} \quad (5)$$

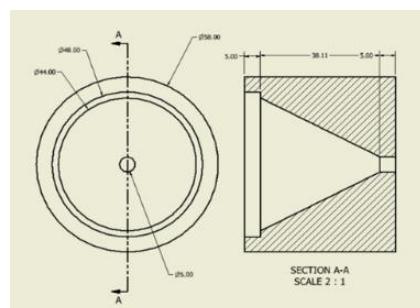
Kemampuan SJA untuk membentuk cincin vorteks dan mentransfer momentum sangat bergantung dari bilangan-bilangan non-dimensional diatas.

Secara umum, hasil penelitian Holman et al menunjukkan bahwa formasi dari cincin vorteks setelah langkah ekspusi didefinisikan sebagai pembentukan jet sintetik, yang diekspresikan melalui persamaan :

$$\frac{Re_{\bar{U}}}{S^2} > C \quad (6)$$

di mana C adalah konstanta yang sama dengan 0.16 untuk aksis simetris dan sama dengan 1 untuk sintetik jet 2 dimensi. Kriteria ini yang akan digunakan pada penelitian untuk menentukan pembentukan cincin vorteks akibat variasi frekuensi eksitasi dan gelombang dari osilasi membran piezoelektrik.

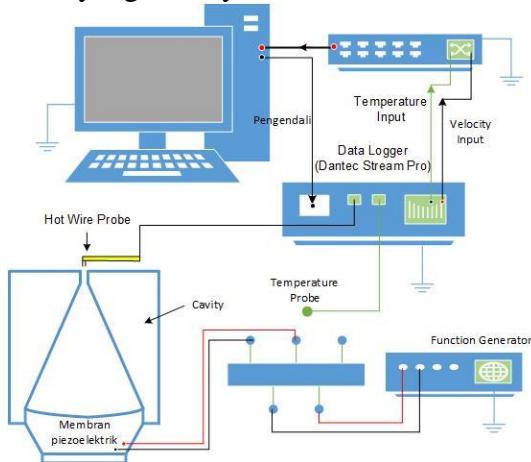
2. METODOLOGI



Gambar 60 Bentuk cavity

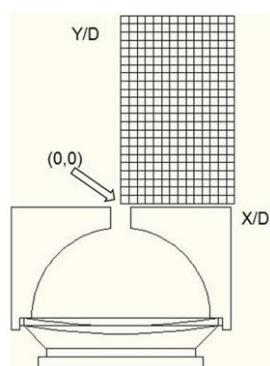
Penelitian ini akan menggunakan 2 metode pengambilan data, yaitu eksperimen dan komputasional. Eksperimen dilakukan dengan mengukur kecepatan fluida di mulut orifis ($x/D = 0$ dan $y/D \approx 0$) dengan menggunakan *Constant Temperature Anemometer* (CTA) sedangkan komputasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak CFD dari Ansys, yaitu Fluent 6.3.26. Penelitian ini akan menggunakan SJA dengan

bentuk *cavity* Kerucut dengan diameter orifis 3mm (K3), 5mm (K5), dan 8mm (K8) dengan variasi frekuensi 20 Hz sampai dengan 200 Hz untuk eksperimen dan 90Hz sampai dengan 130 Hz untuk komputasi. Variasi gelombang yang digunakan adalah sinusoidal (S), square (Q), dan triangle (T). Ketiga *cavity* memiliki volume yang sama yaitu 10,648 mm³.



Gambar 61 Skema pengambilan data eksperimen

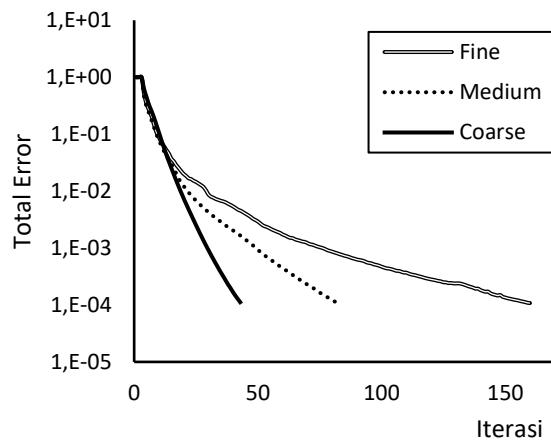
Data yang diperoleh saat eksperimen adalah data kecepatan fluida di mulut orifis ($x/D = 0$ dan $y/D \approx 0$) dengan *data rate* 60,000 data/detik.



Gambar 62 Grid titik pengambilan data kecepatan

Simulasi CFD dilakukan untuk meyakinkan hasil eksperimen serta menunjukkan contoh visualisasi proses pembentukan cincin vorteks. Simulasi dilakukan dengan menggunakan model turbulensi *Reynold Stress Model* (RSM) dengan terlebih dahulu menentukan jumlah *meshing* yang digunakan untuk simulasi CFD. Tahap awal simulasi dilakukan dengan

mengambil *meshing* yang paling sedikit total errornya diantara jumlah *meshing* 5,000 *mesh* (*coarse*), 20,000 *mesh* (*medium*), dan 60,000 *mesh* (*fine*).



Gambar 63 Grafik total error

Uji residu dilakukan dengan mengambil total error saat simulasi telah konvergen. Dari hasil uji residu, didapatkan *total error* untuk *Fine* (60000 *mesh*) sebesar 1.08e-04 sedangkan untuk jenis *mesh medium* (20000 *data*) memiliki total error sebesar 1.09e-4 dan jenis *mesh coarse* (5000 *mesh*) memiliki total error sebesar 1.10e-04. Dari hasil diatas, untuk seterusnya *mesh* jenis *fine* akan digunakan untuk simulasi CFD.

Data yang telah diperoleh dari hasil eksperimen dan simulasi akan terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan nilai ketidakpastian (*uncertainty*) dari hasil pengukuran sehingga data yang diperoleh memiliki tingkat kepercayaan tertentu dan dapat digunakan. Pengambilan data pada eksperimen dilakukan sebanyak 60,000 data selama 6 detik (10.000 data/detik). Sedangkan untuk data simulasi diambil sebanyak 1,000 data selama 0.003 detik. Berikut persamaan yang digunakan untuk mencari nilai prosentase *uncertainty* data untuk tingkat kepercayaan 95%:

$$U_x = \frac{\sigma_{\bar{x}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (7)$$

Dimana \bar{x} adalah rata-rata dari data, dan $\sigma_{\bar{x}}$ merupakan standar deviasi populasi. Standar

deviasi populasi diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{2S_x}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

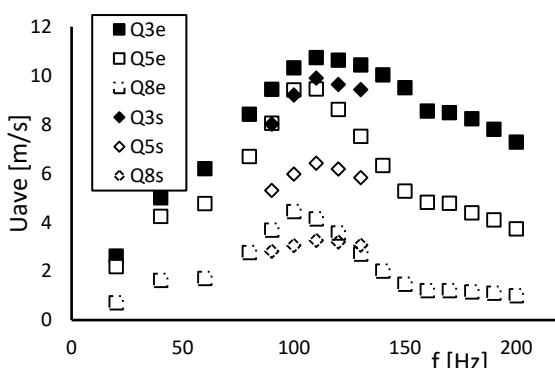
dimana S_x merupakan standar deviasi sampel dan N adalah banyaknya data.

Penghitungan nilai *uncertainty* data dilakukan secara bertahap dengan menaikkan jumlah data yang dihitung. Untuk data eksperimen tahapan penghitungannya adalah 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 10000, 20000, 40000, dana yang terakhir 60000 data. Sedangkan untuk data simulasi, tahapan penghitungannya adalah 125, 250, 500, dan yang terakhir 1000 data. Hasil perhitungan nilai *uncertainty* dari data yang telah diperoleh menunjukkan bahwa data yang diperoleh saat eksperimen dan simulasi sudah memenuhi nilai kepercayaan 95% saat jumlah data ≥ 1000 data. Dari hasil perhitungan nilai *uncertainty*, data pengukuran yang diperoleh dapat dilanjutkan untuk diolah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Rata-rata Kecepatan Jet dari Variasi Frekuensi dan Gelombang

Uji frekuensi dan gelombang ini dilakukan untuk menentukan perbedaan karakteristik jet dari aktuator jet sintetik. Pengujian eksperimen dan simulasi dilakukan dengan memberikan variasi frekuensi dan bentuk gelombang dari aktuator.



Gambar 64 Grafik kecepatan rata-rata untuk tiap-tiap frekuensi pada jenis gelombang *square* dari hasil eksperimen dan simulasi

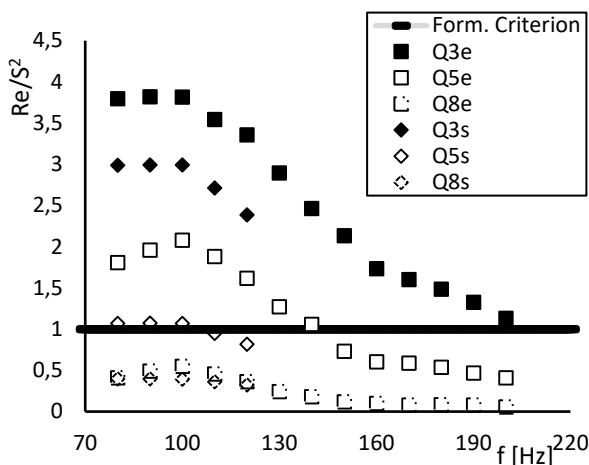
Gambar 6 menunjukkan tren dari kecepatan rata-rata dari SJA untuk gelombang *square* dari hasil eksperimen dan simulasi. Tren tersebut juga terjadi untuk gelombang sinusoidal serta triangular. Secara umum, rata-rata kecepatan dari frekuensi 20 Hz akan naik hingga mencapai optimumnya di rentang 100 Hz sampai dengan 120 Hz dan kemudian akan kembali turun.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa gelombang *Square* (gelombang persegi) cenderung memiliki kecepatan rata-rata yang lebih besar dibanding bentuk gelombang lain serta diameter orifis 3mm juga memiliki kecenderungan untuk menghasilkan jet dengan kecepatan rata-rata yang lebih tinggi dibanding ukuran orifis yang lain. Kecepatan rata-rata jet dari hasil eksperimen yang paling besar yaitu 10.73 m/s pada diameter orifis 3mm, bentuk gelombang *square* pada frekuensi 110 Hz sedangkan kecepatan rata-rata jet dari hasil simulasi yang paling besar yaitu 9.89 m/s pada diameter orifis 3mm, bentuk gelombang *square* pada frekuensi 110 Hz. Hasil eksperimen dan hasil simulasi sama-sama menunjukkan rentangan nilai frekuensi yang optimum untuk menciptakan aliran jet yang memiliki rata-rata kecepatan tinggi yaitu antara 100Hz sampai dengan 120Hz.

3.2 Pembentukan Cincin Vorteks

Dari hasil penghitungan menggunakan persamaan (6) didapatkan nilai konstanta C yang menunjukkan terbentuk atau tidaknya cincin vorteks saat langkah ekspansi dari aktuator jet sintetik yang digambarkan pada gambar 7. Gambar 7 menunjukkan nilai Re/S^2 dari masing-masing frekuensi untuk jenis gelombang *square* dari hasil eksperimen dan simulasi. Jika nilai Re/S^2 berada diatas garis kriteria pembentukan cincin vorteks, aktuator jet sintetik tersebut menghasilkan cincin vorteks yang berhasil membentuk *time-averaged jet* yaitu cincin vorteks yang terlepas dari mulut orifis. Tren nilai C pada tiap-tiap frekuensi pada gelombang *square* juga terjadi pada jenis gelombang yang lain seperti terlihat pada gambar 9 dan gambar 10. Nilai C akan naik sampai di rentang frekuensi 90 Hz sampai dengan 120 Hz dan kemudian akan turun

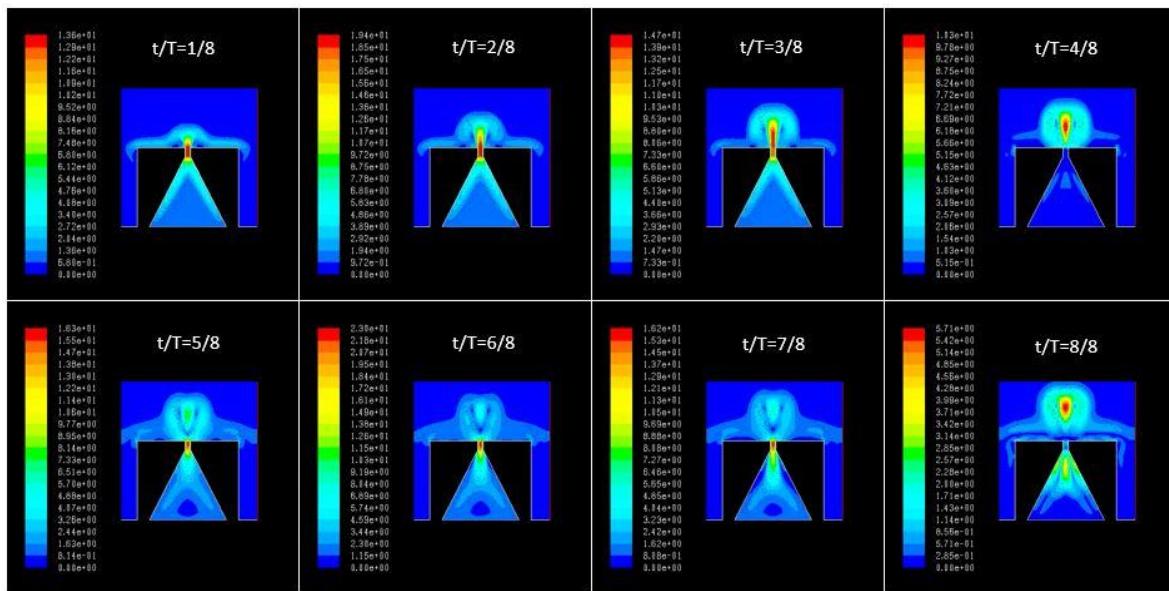
kembali seiring meningkatnya frekuensi eksitasi.



Gambar 65 Grafik pembentukan cincin vorteks menurut kriteria Holman dari hasil eksperimen dan simulasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerucut dengan diameter orifis sebesar 3mm dengan gelombang *square* memiliki nilai konstanta (C) lebih dari 1 untuk frekuensi 80 Hz sampai dengan 200 Hz. Selain itu, untuk masing-masing besar diameter, nilai konstanta (C) dari bentuk gelombang *square* selalu melebihi bentuk gelombang yang lain. Hal tersebut menunjukkan bahwa gelombang *square* memiliki kemampuan untuk mentransfer momentum (dari aktuator ke fluida) yang lebih baik dibandingkan bentuk gelombang sinusoidal dan *triangle*. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa frekuensi optimum untuk pembentukan jet sintetik berkisar dari 100 Hz hingga 120 Hz.

Berikut ini akan ditampilkan gambar mengenai contoh proses pembentukan cincin vorteks pada *cavity* berdiameter orifis 3mm dengan frekuensi 110Hz pada gelombang *square* yang terbagi pada 8 gambar dimana masing-masing gambar merepresentasikan periode dari membran piezoelektrik dalam satu kali osilasi.



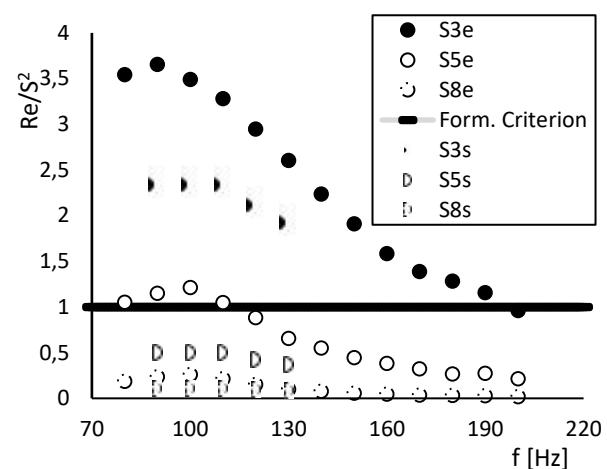
Gambar 66 Visualisasi pembentukan cincin vorteks pada cavity kerucut dengan diameter 3mm pada gelombang *square* dengan frekuensi 110 Hz

Gambar 8 memperlihatkan kontur kecepatan akibat gerakan membran pada *cavity* dengan diameter orifis 3mm pada gelombang *square* dengan frekuensi 110 Hz. Pada saat membran berada pada $t/T=1/8$, membran melakukan langkah ekspulsi, sehingga terlihat adanya aliran udara yang keluar melalui orifis. Dari $t/T=1/8$, gerakan membran akan mengalami perlambatan sampai akhirnya berhenti secara instan di amplitudo maksimumnya yaitu pada $t/T=2/8$. Pada $t/T=2/8$, kontur aliran ini mulai memperlihatkan terbentuknya cincin vorteks. Setelah sampai di amplitudo maksimumnya, membran bergerak ke bawah dengan mengalami kenaikan kecepatan dan aktuator jet sintetik melakukan langkah hisap. Saat membran berada pada posisi $t/T=3/8$, cincin vorteks terlihat semakin jelas meskipun aktuator jet sintetik telah masuk ke proses hisap. Pada saat membran berada pada posisi $t/T=4/8$, cincin vorteks telah terbentuk sempurna meskipun belum berhasil terlepas dari mulut orifis akibat adanya hisapan dari aktuator sehingga momentum yang dibawa oleh cincin vorteks berkurang. Gerakan isap

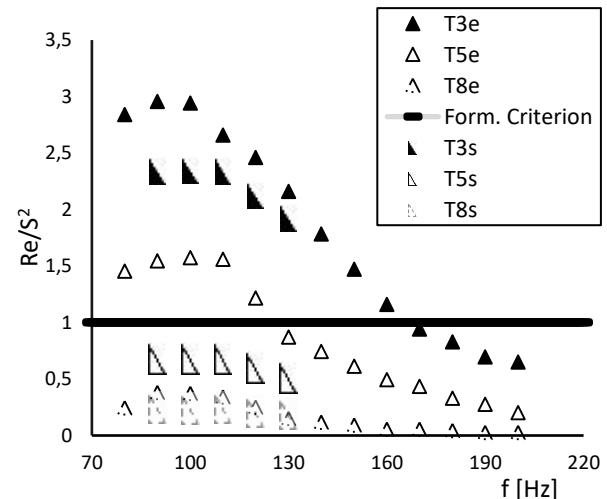
dilanjutkan ke tahap $t/T=5/8$. Pada posisi ini sebagian udara yang berada dibawah cincin vorteks akan terhisap masuk kembali ke dalam *cavity*. Hal ini dapat mempengaruhi bentuk cincin vorteks yang telah terbentuk oleh tiupan aktuator jet sintetik. Tapi pada *cavity* berdiameter 3mm ini, cincin vorteks yang sudah terbentuk tetap masih ada walaupun bentuknya sudah terganggu dan selanjutnya semakin melemah pada posisi $t/T=6/8$. Kemudian pada posisi $t/T=7/8$, membran kembali bergerak ke atas dan aktuator melakukan langkah tiupan kembali. Pada bagian ini cincin vorteks sudah terbentuk dan siap melepaskan diri karena adanya pembentukan cincin vorteks yang baru. Pada posisi $t/T=1$, cincin vorteks terlihat telah melepas diri dari ujung orifis. Dari visualisasi diatas, dapat disimpulkan bahwa pada aktuator jet sintetik dengan diameter orifis 3mm pada gelombang *square* dengan frekuensi 110 Hz terbentuk cincin vorteks yang berhasil terlepas dari mulut orifis pada langkah ekspulsi kedua dari aktuator jet sintetik.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rentang frekuensi antara 100 Hz hingga 120 Hz merupakan rentang frekuensi paling optimum dalam pembentukan cincin vorteks. Dalam langkah ekspulsi aktuator untuk pembentukan cincin vorteks, aktuator harus bergerak cukup cepat (frekuensi cukup tinggi) sehingga dapat mentransfer cukup momentum kepada fluida agar dapat memiliki bilangan Reynolds yang cukup untuk mengatasi efek viskos dari aliran sehingga memungkinkan terjadinya separasi aliran dan membentuk cincin vorteks. Sebaliknya saat langkah hisap, frekuensi aktuator harus cukup rendah agar tidak menghancurkan cincin vorteks yang telah terbentuk akibat adanya hisapan dari aktuator. Rentang frekuensi yang kuat untuk membentuk cincin vorteks dan cukup lambat untuk membiarkan cincin vorteks berkembang dan melepaskan diri dari mulut orifis berada diantara 100 Hz sampai dengan 120 Hz. Sedangkan untuk bentuk gelombang yang optimum dalam pembentukan cincin vorteks, hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk gelombang *square* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan bentuk gelombang yang lain. Bentuk gelombang *square* terbukti dapat mentransfer momentum dari aktuator ke fluida dengan lebih baik. Hal tersebut terjadi karena, meskipun memiliki frekuensi yang sama dengan bentuk gelombang yang lain, kecepatan gerak aktuator dari titik setimbang menuju titik puncak dari gelombang *square* saat proses ekspulsi lebih cepat jika dibandingkan dengan kecepatan gerak aktuator dari titik setimbang menuju titik puncak dari gelombang yang lain. Perbandingan kecepatan gerak aktuator dari titik setimbang menuju titik puncak dari gelombang *square*, sinusoidal, dan *triangle* adalah $1.273 (4/\pi)$, 1, dan $0.8 (8/\pi^2)$.



Gambar 67 Grafik pembentukan cincin vorteks menurut kriteria Holman dari hasil eksperimen dan simulasi



Gambar 68 Grafik pembentukan cincin vorteks menurut kriteria Holman dari hasil eksperimen dan simulasi

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Crook, A. The Development and Implementation of Synthetic Jets for the Control of Separated Flow. 17th Applied Aerodynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics, (1999).
- [2] Glezer, A. Synthetic Jets. Annu. Rev. Fluid Mech, 34:503-29, (2022)
- [3] Holman, R. Formation Criterion for Synthetic Jets. American Institute of

- Aeronautics and Astronautics, 2110-2116, (2005).
- [4] MacLatchy, R. M. Formation and Structure of Vortex Ring, (1963).
 - [5] Pinzon, C. F. An Experimental and Computational Study of a Zero-Net Mass-Flux (ZNMF) Actuator. American Institute of Aeronautics and Astronautics, (2008)
 - [6] Smith, B. L. Synthetic Jets at Large Reynolds Number and Comparison to Continuous Jets. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., (2001)
 - [7] Yehoshua, T. Boundary Condition Effects on Oscillatory Momentum Generator. American Institute oF Aeronautics and Astronautics, (2003).
 - [8] Beratis, N. Optimization of Synthetics Jets Cooling for Microelectronics Applications. Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement Symposium, 66-73, (2003).