

## Analisis Gerakan Osilasi Pancaran Jet Nosel Kovergen-Divergen Akibat *Screech Noise*

La Ode Ichlas Syahrullah Yunus<sup>1\*</sup>, Akhmad Fadli Ibrahim<sup>1</sup>, Yuvita Satriani Djuli<sup>1</sup>, Panci Yocing<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Sembilanbelas November  
Jalan Pemuda No. 339, Kabupaten Kolaka Provinsi Sulawesi Tenggara 93514

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Mekongga  
Jalan Pemuda No 34 Lalombaa, Kabupaten Kolaka Provinsi Sulawesi Tenggara 93514

\*Email: ichlas.ode@gmail.com

Diajukan: 28 Juni 2022; Diterima: 14 Agustus 2022; Diterbitkan: 22 Agustus 2022

### Abstrak

Nosel merupakan suatu alat yang berfungsi sebagai alat bantu untuk menyalurkan atau mengalirkan fluida cair maupun fluida gas. Karakteristik aliran fluida yang bergerak melalui nosel mempunyai bentuk yang berbeda untuk setiap perubahan tekanan dan kecepatan aliran. Mekanisme *screech noise* merupakan suatu pusaran (*loop*) gelombang akustik yang menjalar ke hilir diantara lapisan batas jet nosel pada kecepatan suara lokal dan gelombang menjalar ke hulu pada kecepatan akustik di bagian luar atau sekitar jet nosel. Fenomena *loop* yang muncul pada meja analogi merupakan gelombang yang tidak stabil. Teknik visualisasi dengan metode bayangan, digunakan untuk melihat dan mengamati gerakan osilasi pancaran jet nosel. Analisis gambar diidentifikasi berdasarkan kontur distribusi intensitas yang diperoleh pada visualisasi gambar. Gerakan pancaran jet yang tidak stabil (berosilasi kekanan dan kekiri) pada rasio head  $R_h = 1,85$  atau rasio tekanan  $R_p = 3,4$ . Pancaran jet nosel menunjukkan gerakan yang relatif stabil pada kondisi rasio head  $R_h < 1,85$  dan gerakan osilasi pancaran jet terjadi ketika kapasitas aliran meningkat dengan rasio head antara  $R_h = 1,85$  sampai  $R_h = 2,1$ . Kapasitas aliran dinaikkan hingga rasio head mencapai  $R_h > 2,1$ , maka gerakan pancaran jet mulai stabil. Pengoperasian jet nosel dimana *screech noise* pada kondisi dominan, maka secara visual aliran jet nosel menunjukkan fenomena gerakan osilasi secara lateral.

**Kata kunci:** Aliran fluida; aliran gas; analogi hidrolik; *noise*; nosel

### Abstract

Nozzle is a tool that functions as a tool to channel or drain liquid or gas fluids. The Characteristics of fluid flow that moves through the nozzle has a different shape for each change in pressure and flow velocity. *Screech noise* mechanism is a vortex (*loop*) of acoustic waves that propagate downstream between the shear layer of the nozzle jet at the local sound speed and the waves propagate upstream at the acoustic velocity on the outside or around the nozzle jet. The *loop* phenomenon that appears on the analogy table is an instability waves. The visualization technique using the shadow method is used to see and observe the oscillating motion of the nozzle jet. Image analysis is identified based on the intensity distribution contours obtained on image visualization. Unstable jet motion (oscillating right and left) at head ratio  $R_h = 1.85$  or pressure ratio  $R_p = 3.4$ . The nozzle jet showed a relatively stable motion at the head ratio condition  $R_h < 1.85$  and jet nozzle oscillation motion occurred when the flow capacity increased with the head ratio between  $R_h = 1.85$  to  $R_h = 2.1$ . The flow capacity is increased until the head ratio reaches  $R_h > 2.1$ , then the nozzle jet movement get going to stabilize. Nozzle operation in conditions where *screech noise* is dominant, then the nozzle jet flow visually shows the phenomenon of lateral oscillating motion.

**Keywords:** Fluid Flow; Gas Flow; Hydraulic Analogy; Noise; Nozzle

### 1. Pendahuluan

Nosel merupakan suatu alat yang berfungsi sebagai alat ukur aliran dan alat bantu untuk menyalurkan atau mengalirkan fluida cair maupun fluida gas. Karakteristik aliran fluida yang keluar melalui jet nosel mempunyai bentuk yang berbeda untuk setiap perubahan tekanan dan kecepatan aliran [1,2]. Mekanisme *screech noise* merupakan suatu pusaran (*loop*) gelombang akustik yang menjalar ke hilir diantara lapisan batas (*shear layer*) pancaran jet pada kecepatan suara lokal dan gelombang menjalar ke hulu pada kecepatan akustik di bagian luar atau sekitar pancaran jet nosel [3,4]. Fenomena *loop* yang muncul pada meja analogi merupakan gelombang yang unstabil (*instability waves*) [5,6].

Kumar [7,8] mengungkapkan bahwa karakteristik dan gerakan osilasi pancaran jet nosel cukup rumit untuk diamati dan difahami karena struktur aliran yang terjadi sulit diamati secara langsung. Lain halnya dengan penelitian Kumar [9] dan Zapryagaevi [10] menggunakan teknik bayangan (*shadowgraph*) untuk mengamati aliran fluida cair (air) secara visual dengan mata telanjang.

Melalui prinsip analogi hidrolik dapat dipelajari secara lebih detail karakteristik aliran melalui saluran (nosel), yaitu menganalogikan aliran fluida cair (air) dengan aliran fluida gas (udara) seperti yang diungkapkan dalam penelitian yang dilakukan oleh Buchanan [11] dan Carbonaro [12]. Berdasarkan persamaan momentum dan kuantitas fisik, analogi untuk kedua jenis aliran fluida tersebut dirangkum dan disajikan pada Tabel 1. Penelitian sebelumnya, Abdul Makhsud [13] meneliti karakteristik pancaran aliran gas menggunakan variasi beberapa nosel. Namun *Screech noise* yang tidak stabil pada setiap perubahan rasio hidrolik diberbagai posisi dan sulit teridentifikasi. Sedangkan Gunter [14] menganalisis visualisasi gelombang dan pembentukan pancaran vertikal dengan metode komputasi. Dimana pencitraan pola aliran dapat terlihat sehingga mudah untuk diidentifikasi. Gerakan osilasi pada nosel akibat *screech noise* masih jarang diteliti sehingga diperlukan metode yang tepat untuk menampilkan pecitraan pola aliran tersebut.

Tulisan ini mencoba menampilkan hasil penelitian mengenai gerakan osilasi pancaran jet aliran air yang dianalogikan dengan aliran gas pada geometri nosel konvergen-divergen yang diuji. Melalui instalasi meja analogi hidrolik dan analisis pencitraan gambar menggunakan ImageJ, diharapkan dapat memberikan informasi dan gambaran secara detail mengenai gerakan osilasi pancaran jet, sehingga fenomenanya dapat difahami lebih baik.

## 2. Metode Penelitian

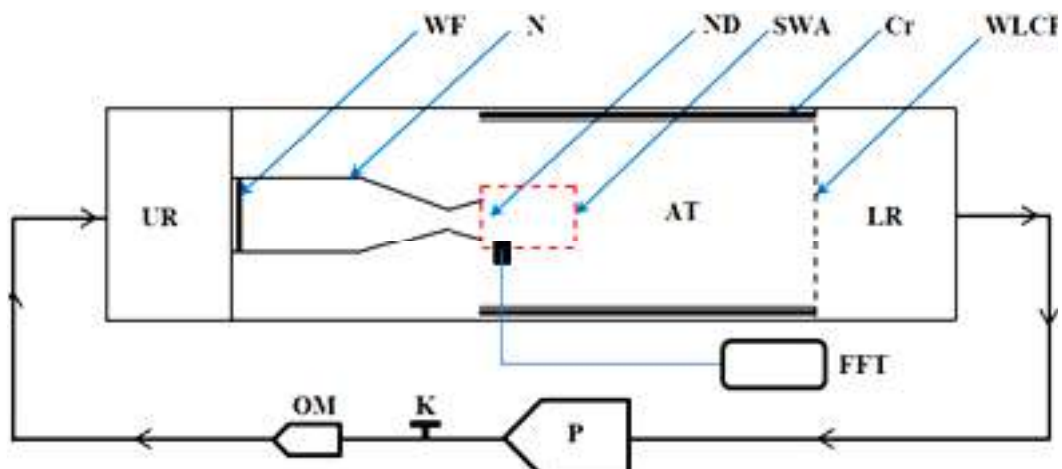
Instalasi meja analogi hidrolik didesain khusus untuk mempelajari karakteristik aliran dan gerakan osilasi jet nosel. Sebuah instalasi meja analogi hidrolik diperlihatkan pada Gambar 1, terdiri dari bak penampungan air yang terbuat dari baja tahan karat (*stainless steel*) dan dilengkapi dengan saringan air agar kondisi air senantiasa terjaga kebersihannya. Untuk mengurangi getaran dari pompa, maka kaki meja analogi ditumpu dengan peredam getaran (pasir) dan instalasi pipanya menggunakan pipa plastik elastis yang terpasang diantara pompa dan kedua saluran bak penampungan. Meja analogi, terbuat dari kaca (panjang 2,5 m, lebar 1,6 m, tebal 0,015 m), ditopang pada setiap sisinya agar defleksi yang terjadi sekecil mungkin ( $<1/10$  mm). Untuk menghindari adanya pantulan gelombang, maka dipasang gabus pada kedua sisi atau dinding meja analogi dan pada bagian hilir (belakang) dipasang pelat pengatur yang dimiringkan kurang dari  $4^\circ$ . Pelat pengatur tersebut berfungsi pula sebagai pengatur tinggi permukaan air diatas meja analogi. Teknik visualisasi dengan metode *shadowgraph*, digunakan untuk melihat dan mengamati karakteristik bentuk struktur pancaran jet. Sumber cahaya (lampu neon) ditempatkan sekitar 60 cm diatas meja analogi dan di bawah meja terdapat cermin yang dipasang  $45^\circ$ , agar bayangan dapat terlihat pada cermin. Bayangan yang muncul pada cermin dengan mudah dapat dilihat melalui mata telanjang dan dapat direkam dengan kamera foto atau kamera video. Kapasitas atau kecepatan aliran jet nosel diukur dengan bantuan alat ukur dengan orificemeter atau pitotmeter untuk mengetahui profil kecepatan. Jenis nosel konvergen-divergen digunakan dalam penelitian dengan lebar bagian keluar dan tenggorokan nosel = 60 mm. Level (tinggi) permukaan air diatas meja diukur dengan jarum yang terpasang pada mikrometer. Fluktuasi tinggi air dapat diukur dengan bantuan sensor optik (fiber optics) model MTI 1000 Fotonic Sensor. Sinyal yang tertangkap oleh sensor optik tersebut ditransfer ke FFT Analyser (HP 3582 A), dan dari alat ini dapat diketahui spektrum, koheren dan sudut fasa gelombangnya. Nilai fluktuasi tinggi air yang terukur pada alat FFT Analyser dikonversi menjadi nilai tingkat intensitas bunyi yang dihasilkan oleh aliran air (pancaran nosel). Nilai tingkat intensitas bunyi yang terukur pada

alat FFT analyzer menggunakan analogi perbandingan nilai kecepatan penjalaran bunyi (suara) dengan kecepatan penjalaran gelombang air (lihat Tabel 1). Hasil pengambilan gambar dianalisis menggunakan aplikasi ImageJ untuk memperoleh kontur gerakan osilasi jet nosel.

**Tabel 1.** Rangkuman prinsip analogi hidrolik

Aliran gas kompresibel dua dimensi	Aliran air pada permukaan bebas (gas hidrolik)
Gas hidrolik dengan $\gamma = C_p/C_v = 2$	Aliran fluida cair <i>incompressible</i> (air)
Rasio temperatur, $T/T_a$	Rasio ketinggian (kedalaman) air, $h/h_a$
Rasio massa jenis (densitas), $\rho/\rho_a$	Rasio ketinggian (kedalaman) air, $h/h_a$
Rasio tekanan, $p/p_a$	Rasio ketinggian air kuadrat $(h/h_a)^2$
Kecepatan aliran gas, $V$	Kecepatan aliran air, $v$
Kecepatan penjalaran bunyi (suara), $a = \sqrt{\gamma RT}$	Kecepatan penjalaran gelombang air, $c = \sqrt{gh}$
Bilangan Mach, $Ma = v/a$	Bilangan Froude, $Fr = v/c$
Gelombang kejut ( <i>shock wave</i> ) [15,16]	Lompatan hidrolik ( <i>hydraulic jump</i> ) [17]

$T_a$ ,  $p_a$ ,  $\rho_a$ ,  $h_a$ : nilai referensi (kondisi sekitar atau lingkungan dan  $h_a$ : ketinggian air di atas meja analogi),  $C_p$  &  $C_v$ : panas jenis, dan  $g$ : percepatan gravitasi bunyi



**Gambar 1.** Instalasi penelitian meja analogi hidrolik (pandangan atas) P: pompa, K: katup, OM: orificemeter, UR: reservoir atas N: nosel, AT: meja analogi, WLCP: pelat pengatur tinggi muka air, LR: reservoir bawah, WF: penyaring air, ND: diameter nosel, SWA: area pengamatan, Cr: peredam gelombang terbuat dari gabus, FFT: analisis frekuensi

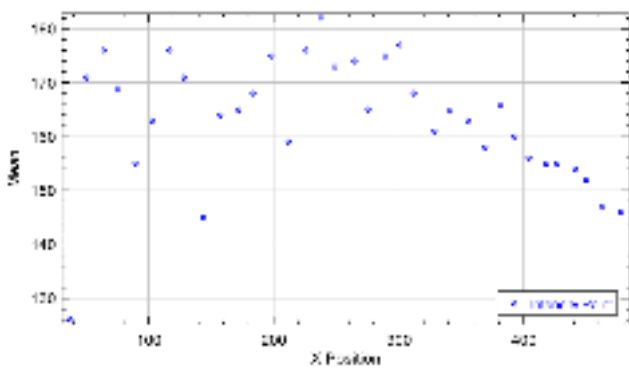
### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada meja analogi menunjukkan bahwa mekanisme bunyi *screech noise* merupakan suatu pusaran murni akustik yang menjalar ke hilir diantara *shear layer* jet nosel pada kecepatan suara lokal dan gelombang menjalar ke hulu pada kecepatan akustik dibagian luar atau sekitar jet nosel. Fenomena *loop* yang muncul pada meja analogi adalah murni akustik merupakan pusaran gelombang tidak stabil (*instability waves*).

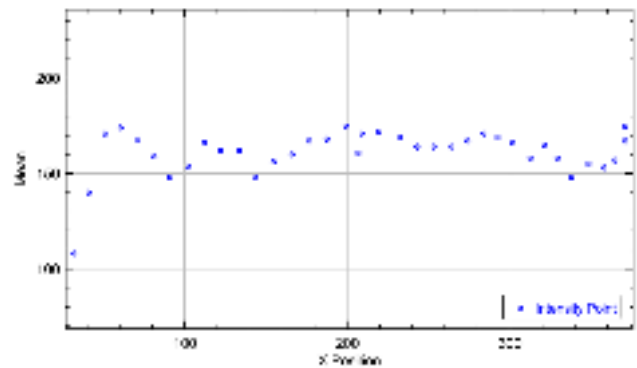
Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa panjang *loop* dianggap sebagai jarak  $L$  (sumber bunyi) yaitu jarak antara ujung nosel dan akhir sel kejut kedua. Dengan menganggap bahwa kecepatan suara di sekitar jet sama dengan kecepatan suara lokal (atmosfir), maka frekuensi *screech noise* dituliskan pada Persamaan (1).

$$1/f^* = L \left[ \left( \frac{1}{a} + V \right) + \left( \frac{1}{a} \right) \right] \quad (1)$$

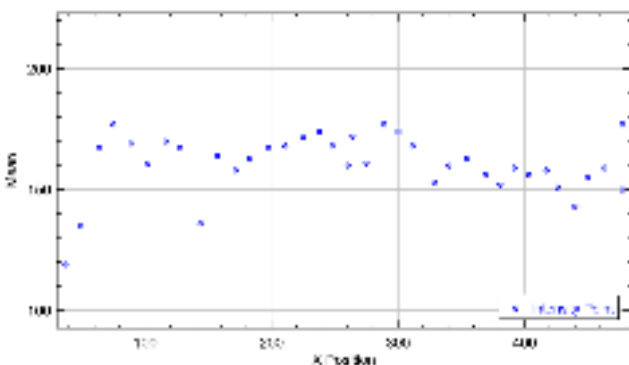
dengan  $M$  adalah bilangan Mach rata-rata sekitar lapisan batas pancaran jet. Pada Gambar 2 (a-e) terlihat bahwa fluktuasi aliran tidak stabil berdasarkan grafik intensitas selama posisi  $x$ . Hal ini dibuktikan dengan titik intensitas pada gambar 2.a yang teracak menjelaskan gerakan osilasi condong ke kanan dengan banyaknya sel kejut yang terbentuk disekitar pola aliran. Sedangkan fluktuasi aliran yang ditunjukkan pada Gambar 2(f-j) terlihat stabil. Hal ini dibuktikan dengan grafik intensitas pada posisi sebelah kanan dan kiri aliran terhadap posisi  $x$  yang kembali normal. Jumlah sel kejut pada sekitaran aliran juga semakin berkurang.



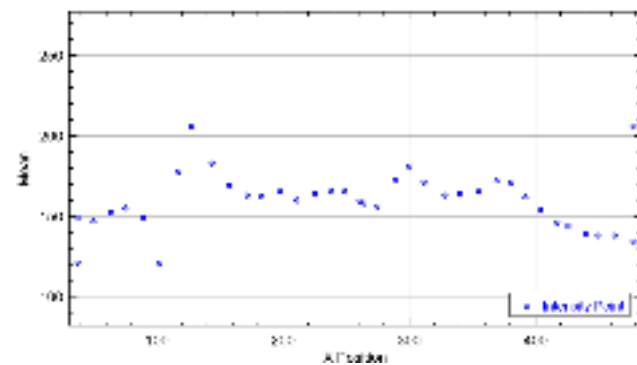
(a)



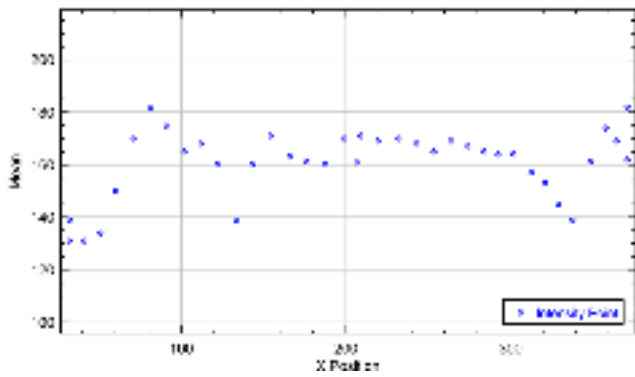
(f)



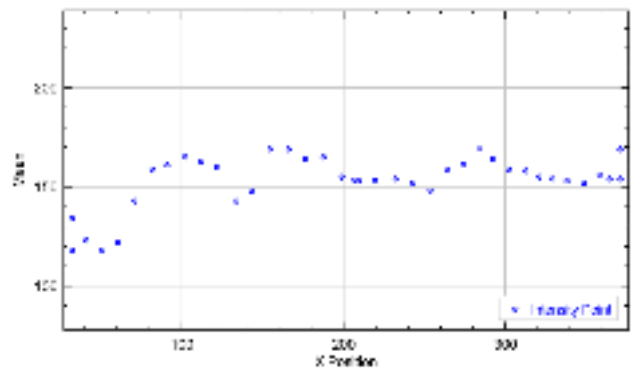
(b)



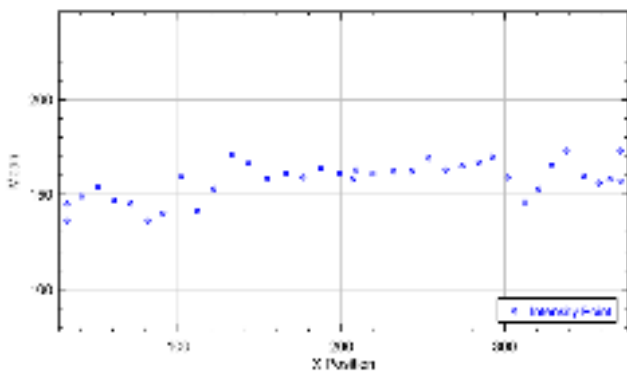
(g)



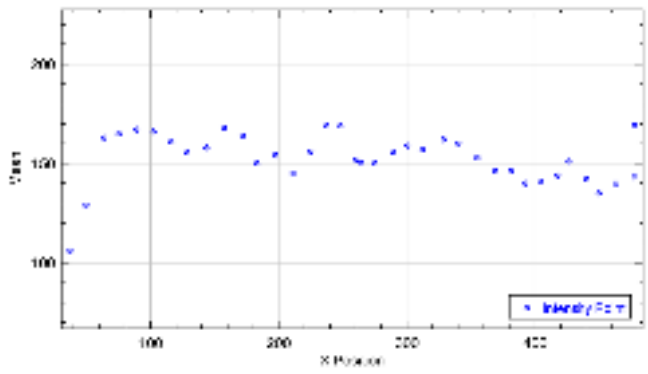
(c)



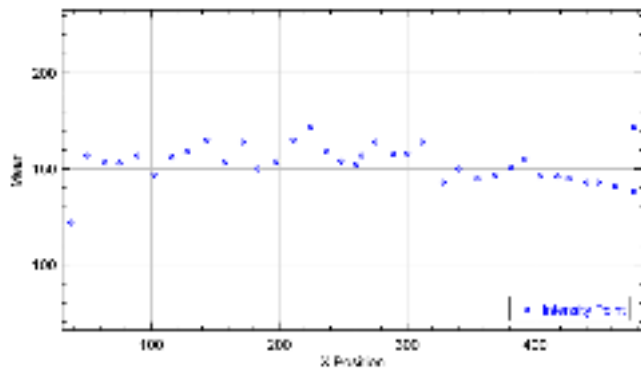
(h)



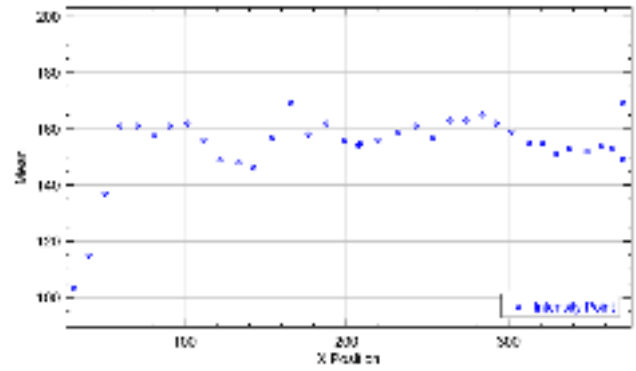
(d)



(i)



(e)

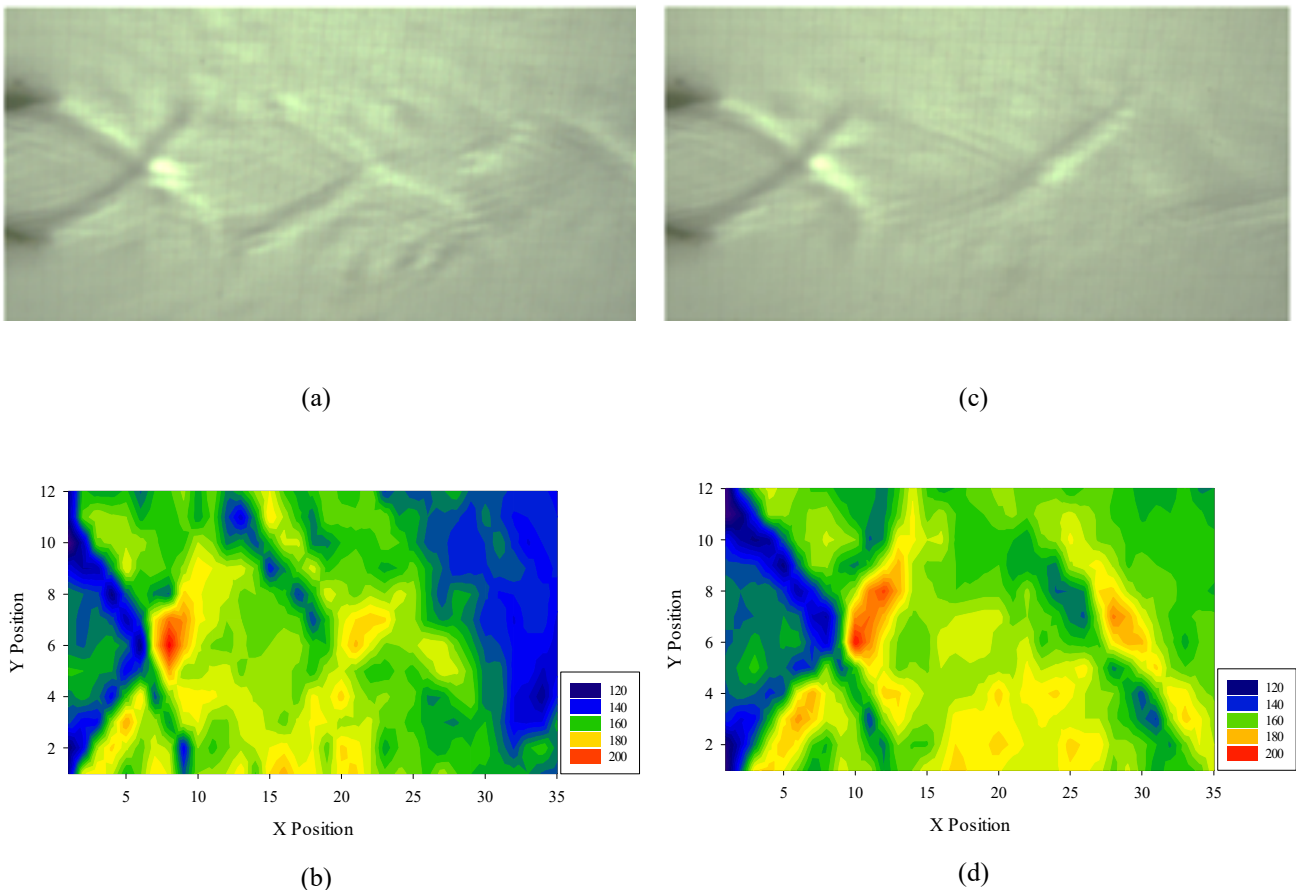


(j)

**Gambar 2.** (a), (b), (c), (d) dan (e) fluktuasi gerakan osilasi jet nosel pada  $R_h=1,85$ ; (f), (g), (h), (i) dan (j) fluktuasi gerakan osilasi jet nosel pada  $R_h > 2,1$

Ketidakstabilan aliran pancaran gas yang telah dijelaskan oleh Seiner et al (1987) terjadi pula pada aliran pancaran jet. Pada Gambar 3 diperlihatkan gerakan pancaran jet yang tidak stabil (berosilasi kekanan dan kekiri) hasil rekaman melalui kamera foto pada rasio head  $R_h = 1,85$  atau ratio tekanan  $R_p = 3,4$  untuk nosel konvergen-divergen. Pada gambar tersebut terlihat jelas bahwa pancaran jet berosilasi kekanan (Gambar 3(a)) pada kondisi tertentu dan pada kondisi (waktu) berikutnya pancaran jet berosilasi kekiri (Gambar 3 (c)). Hasil pencitraan gambar menggunakan

aplikasi ImageJ dengan menentukan 35 titik secara acak menunjukkan fenomena pergerakan distribusi aliran. Hasil pengambilan menggunakan media kamera dan pencitraan gambar menggunakan aplikasi ImageJ terlihat sama. Penggunaan media kamera membutuhkan pencahayaan yang stabil sehingga nilai intensitasnya dapat teridentifikasi. Sedangkan menggunakan aplikasi ImageJ berdasarkan hasil gambar dapat menunjukkan kontur aliran yang baik. Pada Gambar 3(b) mencitrakan Gambar 3(a) dimana distribusi intensitas setiap titik menunjukkan kontur berosilasi ke kanan, sedangkan Gambar 3(d) mencitrakan Gambar 3(c) dimana distribusi intensitas setiap titik menunjukkan kontur berosilasi ke kiri menuju kontur yang stabil. Pancaran jet menunjukkan gerakan yang relatif stabil pada kondisi rasio head  $R_h < 1,85$  dan gerakan osilasi pancaran jet terjadi ketika kapasitas aliran meningkat dengan rasio head antara  $R_h = 1,85$  sampai  $R_h = 2,1$ . Selanjutnya, ketika kapasitas aliran dinaikkan hingga rasio head mencapai  $R_h > 2,1$ , maka gerakan pancaran jet mulai stabil. Kondisi seperti ini dapat terjadi karena ketika kapasitas aliran meningkat, maka kecepatan aliran dan energi gerak juga akan meningkat, sehingga energi tersebut mampu menembus dan mengarahkan gerakan jet kembali stabil. Pengoperasian jet nosel pada kondisi dominan saat *screech noise*, maka secara visual aliran jet nosel menunjukkan fenomena gerakan osilasi yang lateral. Fenomena seperti ini sangat jelas terlihat dengan mata telanjang (tanpa alat bantu) pada pengujian instalasi meja analogi hidrolis.



**Gambar 3.** (a) Gerakan osilasi jet nosel yang tidak stabil: berosilasi kekiri, (b) hasil pencitraan gambar (a), (c) Gerakan osilasi jet nosel yang tidak stabil: berosilasi ke kanan, (d) hasil pencitraan gambar (c)

#### 4. Kesimpulan

Dari pengolahan data dan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa instalasi analogi hidrolik mampu memberikan gambaran lebih detail tentang karakteristik dan gerakan osilasi aliran jet nosel, sel kejut yang terjadi, dan mekanisme terjadinya *screech noise*. Dimana karakteristik pancaran jet aliran air yang dihasilkan dari penggunaan instalasi meja analogi hidrolik secara visual sama dengan hasil penelitian aliran pancaran gas. Hasil pencitraan menunjukkan mekanisme *screech noise* yaitu *loop* murni gelombang akustik yang menjalar ke hilir didalam *shear layer* sekitar pancaran jet dan gelombang yang menjalar ke hulu dibagian luar jet nosel. Karena pengoperasian jet nosel dimana *screech noise* pada kondisi dominan, maka secara visual aliran jet nosel menunjukkan fenomena gerakan osilasi secara lateral.

#### Referensi

- [1] Panda, J., An experimental investigation of screech noise generation. J. Fluid Mech. 1995; 378: p.71-96. DOI: 10.1017/S0022112098003383.
- [2] Rani, S.L., Wooldridge, M.S., Quantitative flow visualization using the hydraulic analogy. Experiment in Fluids. 2000; 27: p.165-169. DOI: 10.1007/s003480050021.
- [3] Brocher, E., Makhsud, A., A new look at the screech tone mechanism of underexpanded jets. European Journal of Mechanics. B, Fluids. 1997; 16: p.877-891.
- [4] Lavicka, D., Boiron, O., Polansky, J., CFD Simulation of Analogy between Compressible and Free Surface Flow. Fluent Forum; 2007; Paris France.
- [5] Andre, B., Castelain, T., Bailly, C., Broadband shock-associated noise in screeching and non-screeching underexpanded supersonic jets. AIAA Journal. 2013; 51 : p.313-318. DOI: 10.2514/1.J052058.
- [6] Brocher, E., Makhsud, A., Experimental Study on the Influence of Nozzle Inlet Geometry on Screech Noise. First Joint CEAS/AIAA Aeroacoustics Conference; 1995.
- [7] Kumar, V., Ng, I., Sheard, G.J., Hourigan, K., Fouras, A., Hydraulic analogy examination of underexpanded jet shock-cells using reference image topography. Proceeding of the 8th International Symposium on Particle Image Velocimetry PIV; 2009; 09. p.0086.
- [8] Kumar, V., Ng, Ivan, Sheard, G. J., Brocher, E., Hourigan, K., Fouras, A., Application of particle image velocimetry and reference image topography to jet shock-cells using the hydraulic analogy. Exp Fluids. 2011; 51: p.543-551. DOI: 10.1007/s00348-011-1072-8.
- [9] Zapryagaevi, V.I., Kudryavtsev, A.N., Lokotko, A.V., Solotchin A.V., Pavlov A.A., Hadjadj, A., An Experimental and Numerical Study of a Supersonic Jet Shock-waves Structure. Approved for public release, distribution unlimited. Russia,1-7 July 2002: P:09499-0014.
- [10] Tam, C.K.W., Supersonic jet noise. Annual Review of Fluid Mechanics. 1995; 27: p.17-43. DOI: 10.1146/annurev.fl.27.010195.000313.
- [11] Buchanan, A., Macartney R., Thompson, M.C., Brocher, E., Hourigan, K., Hydraulic analogy study of supersonic rectangular jet screech control with cylinders. AIAA Journal. 2007; 45: p.1539-1545. DOI: 10.2514/1.26714.
- [12] Carbonaro, M., Van der Haegen, V., Hydraulic Analogy of Supersonic Flow-Lab Notes. EUROAVIA Symposium. Von Karman Institute for Fluid Dynamics; 2002.
- [13] Makhsud, A., Yunus, L.O.I.S., Gas flow characteristics using variation of nozzle with hydraulic analogy method. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017; 12(24): p.7583-7589. DOI: 10.36478/jeasci.2017.7583.7589.

- [14] Gunter, A.L., Smadi, O., Kadem, L., Ng, H.D., Visualization of an imploding circular wave front and the formation of a central vertical jet. *Journal of Visualization*. 2011; 14: p. 19-22. DOI: 10.1007/s12650-010-0068-4.
- [15] Seiner, J.M., Manning, J.C., Model and full scale study of twin supersonic plume resonance. 1987. AIAA 87-0244. DOI: 10.2514/6.1987-244.
- [16] Makhsud, A., Yunus, L.O.I.S., *Mekanika Fluida : teori dan aplikasi*. Makassar: Nasmedia Pustaka; 2021. p. 275.
- [17] A, Makhsud. *Experimental Study of the Acoustic Radiation and Instability of Underexpanded Supersonic Jets (Simulation with Hydraulic Analogy)*. Marseille Perancis: Universite de la Mediterranee (Aix Marseille II). 1996. P.254