

# Penambahan Katup Pulsasi pada Nozzle Injeksi untuk memperbaiki Karakteristik dari Aliran Jet Turbulen

Hariyo Priambudi Setyo Pratomo<sup>1</sup>, Hanny Hosiana Tumbelaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Profesi Insinyur dan Prodi Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra,  
hariyo\_p@petra.ac.id

<sup>2</sup>Prodi Teknik Elektro dan Prodi Pendidikan Profesi Insinyur, Universitas Kristen Petra  
tumbekh@petra.ac.id

**Abstract**— Design of fuel injector system for internal combustion engine is one of crucial factors in automotive to which this directly relates with the engine performance and even is the effort of reducing the CO<sub>2</sub> emission in fuel combustion. The engine performance heavily relies on the characteristics of turbulent jet generated by the injecting nozzle. The present study thereby focuses on problem solving on less spreading turbulent jet emanating from a circular nozzle without excitation. The solution was achieved by introducing a pair of pulsing valves installed on the nozzle to excite the turbulent jet of a compressed air. Intermittent jets strongly impacting on their spreading and entrainment were gauged by a constant temperature hot-wire anemometer. These pulsed turbulent jets were generated within the ranges of the Reynolds number of 12000 - 38000 and the Strouhal number of 0,0068 - 0,0072. The results of measurement confirm the recent and earlier findings that excitation imposed leads to better entrainment and growth of the pulsed jet than ones produced by injecting nozzle without excitation. Nevertheless, less dispersive turbulent jet was demonstrated by a higher Reynolds number, and contradictory trends to the changing pulsing frequency were shown at low and high mass flow rates.

**Keywords:** hot-wire anemometer, turbulent jet, pulsation valve, injection nozzle, fuel mixing.

**Abstrak**— Desain sistem injector bahan bakar untuk motor pembakaran dalam merupakan salah satu faktor krusial dalam dunia otomotif yang mana hal ini langsung berhubungan dengan kinerja mesin dan bahkan merupakan upaya mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dari pembakaran bahan bakar. Kinerja mesin ini bergantung erat pada karakteristik aliran jet turbulen yang dihasilkan oleh nozzle injeksi. Studi ini oleh karena itu berfokus pada solusi permasalahan pada aliran jet turbulen yang kurang menyebar yang keluar dari nozzle sirkular tanpa eksitasi. Solusi dilakukan dengan menambahkan pasangan katup pulsasi pada nozzle untuk mengeksitasi aliran jet turbulen dari udara bertekanan. Aliran intermiten yang sangat berdampak pada penyebaran dan entrainment dari jet diukur dengan constant temperature hot-wire anemometer. Aliran jet turbulen terpulsasi ini dihasilkan dalam rentang angka Reynolds dari 12000 - 38000 dan angka Strouhal sebesar 0,0068 - 0,0072. Hasil-hasil pengukuran mengkonfirmasi penemuan-penemuan terkini dan sebelumnya bahwa eksitasi yang ditambahkan menghasilkan penyebaran dan entrainment jet terpulsasi yang lebih baik daripada yang dihasilkan oleh nozzle injeksi tanpa eksitasi. Namun demikian, jet turbulen yang kurang menyebar dihasilkan oleh angka Reynolds yang lebih tinggi dan tren yang saling berlawanan terhadap frekuensi pulsasi yang berubah ditunjukkan pada mass flow rate rendah dan tinggi.

**Kata Kunci :** hot-wire anemometer, jet turbulen, katup pulsasi, nozzle injeksi, pencampuran bahan bakar.

## I. PENDAHULUAN

Dewasa ini, upaya dalam mereduksi emisi CO<sub>2</sub> juga telah menjadi salah satu isu penting dalam dunia otomotif. Selain penggunaan kendaraan listrik, dalam hal ini perbaikan proses pembakaran campuran bahan bakar dan udara untuk menghasilkan hasil pembakaran yang lebih baik juga merupakan upaya dalam mengurangi emisi CO<sub>2</sub>. Tentu saja perbaikan proses pembakaran campuran tersebut juga untuk menghasilkan kinerja mesin atau *engine performance* yang lebih baik. Ini semua tidak bisa dipisahkan dari desain *nozzle* injeksi atau *injector*.

*Nozzle* injeksi merupakan elemen penting dalam motor pembakaran dalam atau *internal combustion engine* yang berfungsi untuk menyemprotkan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Bahan bakar yang disemprotkan dari *injector* ini merupakan aliran jet turbulen dimana karakteristik alirannya bergantung pada sistem dan geometri dari *nozzle* injeksi itu

sendiri. Karakteristik penting dari aliran jet turbulen yang keluar dari *nozzle* injeksi ialah kekuatan pencampuran atau *turbulence mixing* yang menghasilkan daya pencampuran yang baik antara bahan bakar dan udara. Kekuatan pencampuran dari aliran jet ini dinyatakan dengan penyebaran aliran jet (*jet growth*, *jet spreading*) dan penghisapan aliran jet (*jet entrainment*).

Tantangan dalam *nozzle* injeksi bahan bakar ialah desain *injector* itu sendiri. Dua aspek dalam desain *nozzle* injeksi meliputi rancangan pada sistem *nozzle* dan bentuk geometri dari keluaran *nozzle*. Keduanya berpengaruh terhadap karakteristik aliran jet turbulen. Permasalahan yang terjadi ialah *entrainment* dan *growth* yang kurang baik dari aliran jet turbulen yang keluar dari *nozzle* injeksi dengan geometri *circular* dan tanpa diberikan *excitation* (Bremhorst dan Hollis 1990, Crow dan Champagne 1971, Tanaka 1984, Zaman dan Hussein 1980). Aliran jet turbulen yang keluar

dari *injector* seperti ini dikenal dengan aliran jet turbulen *steady*.

Sebagai solusi dari permasalahan tersebut, studi eksperimen ini berfokus pada perbaikan desain dari *nozzle* injeksi. Perbaikan desain dilakukan dengan menambahkan *excitation* melalui katup pulsasi-*gear rollers* di dekat keluaran *injector*. Aliran jet turbulen *intermittent* dari *compressed unheated air* yang keluar dari *single circular nozzle* diatur dengan memvariasi *mass flow rate* dan *pulsing frequency* dalam rentang yang lebih besar daripada rentang yang digunakan dalam studi sebelumnya (Bremhorst dan Hollis 1990, Bremhorst dan Gehrke 1999). Hal ini untuk melihat pengaruhnya terhadap *jet entrainment* dan *jet growth* dan sekaligus merupakan basis pijakan untuk memahami karakteristik dari aliran jet turbulen *unsteady* itu sendiri sebelum diaplikasikan pada *spray* bahan bakar.

## II. LANDASAN TEORI

Studi mengenai penguatan daya pencampuran dari aliran jet yang keluar dari *nozzle* injeksi telah menjadi suatu fokus keilmuan oleh karena peranan penting dari aliran jet dalam *fuel sprays* pada motor pembakaran dalam. Beberapa tahun belakangan ini, sebagai contoh, Payri et al (2022) melakukan *numerical study* dengan menggunakan *Large Eddy Simulation* (LES) mengenai turbulensi dalam *spray* dari bahan bakar oleh karena pengaruh penambahan katup pulsasi pada *nozzle* injeksi *multi-holes*. Berfokus pada *Gasoline Direct Fuel Injector* (GDFI), Payri et al (2022) membuktikan bahwa keberadaan *needles* (di dalam katup pulsasi) yang berfungsi untuk menghasilkan aliran *intermittent* yang keluar dari *injector* bahan bakar memiliki pengaruh yang kuat terhadap karakteristik turbulensi dalam *gasoline spray*. Penambahan katup pulsasi tersebut merupakan salah satu bentuk *excitation* untuk menciptakan jet *unsteady* di dalam proses *spray* bahan bakar. Contoh lain ialah studi yang dilakukan oleh Erfan et al (2015) yang juga berfokus pada karakteristik aliran jet turbulen yang keluar dari *nozzle* injeksi. Berbeda dengan Payri et al (2022), Erfan et al (2015) menggunakan bahan bakar *natural gas* untuk menghasilkan jet turbulen yang dihasilkan oleh *single-hole nozzle direct injector*. Selain kedua studi tersebut (Erfan et al 2015, Payri et al 2022), Balz et al (2021) meneliti pengaruh dari geometri *nozzle* injeksi bahan bakar diesel terhadap *spray* dan pembakaran. Sama seperti Erfan et al (2015), Balz et al (2021) tidak menggunakan *excitation* untuk menciptakan aliran jet turbulen yang diciptakan oleh *nozzle* injeksi. Di antara ketiga studi tersebut (Balz et al 2021, Erfan et al 2015, Payri et al 2022), hanya Payri et al (2022) yang menggunakan *excitation* dalam menghasilkan jet turbulen *intermittent* atau *unsteady* dalam proses *spray*.

Berbagai upaya penguatan pencampuran dalam *steady jets* telah banyak dilakukan. Menggunakan *acoustic excitation* yang kecil pada *steady round jet*, Crow dan Champagne (1971) membuktikan *entrainment* yang meningkat secara signifikan. *Entrainment* ialah kemampuan aliran jet untuk menarik fluida sekeliling masuk ke dalam aliran jet. Sehingga, *entrainment* ini ialah wujud dari daya pencampuran dari aliran jet itu sendiri. Sejak itu, berbagai *excitation* telah digunakan untuk memperkuat pencampuran aliran jet; salah satunya ialah *mechanical excitation* oleh Bremhorst and Hollis (1990), Bremhorst dan Gehrke (1999)

yang menunjukkan *debatable distinctive parts of pulse dominated- and high turbulence-steady jet regions* dalam jet turbulen *intermittent* dari udara bertekanan. Oleh karena itu, pengetahuan mengenai *entrainment* dan *growth* dari *unsteady round jet* (Bremhorst and Hollis (1990), Bremhorst dan Gehrke 1999) belum mencapai kesimpulan yang menyeluruh. Hal ini tentu saja berdampak pada aplikasi aliran jet *unsteady* dalam proses *spray* dan pembakaran bahan bakar. Selanjutnya, melalui studi eksperimen, Johari et al (1993) membuktikan *entrainment* yang berkurang dalam *unsteady jet*. Lebih jauh, kebergantungan *jet growth* pada angka Strouhal dan angka Reynolds juga memerlukan studi lanjutan. Sebagai contoh, Tanaka (1984) membuktikan suatu kebergantungan linear dari *jet growth* pada angka Strouhal sebaliknya *unsteady jet* yang kurang *dispersive* dibuktikan oleh Lovett dan Turns (1990) pada angka Strouhal yang besar sementara Zaman dan Hussain (1980) menemukan kebergantungan yang kurang kuat dari *jet growth* pada angka Reynolds dan angka Strouhal. Selain itu, upaya-upaya penguatan pencampuran dalam *steady jets* juga telah banyak dilakukan dengan merubah geometri dari keluaran *injector*. Sebagai contoh, studi dari Quinn dan Azad (2013) serta Azad et al (2012) menggunakan *cruciform nozzle* dan *triangular nozzle*, secara berurutan untuk menggantikan *nozzle* sirkular. Para peneliti ini telah membuktikan pencampuran yang lebih kuat dari aliran jet bila dibandingkan dengan aliran jet yang keluar dari *nozzle* sirkular.

*Entrainment* dan *growth* dari *unsteady round jet* merupakan karakteristik yang penting yang menunjukkan daya pencampuran dari aliran jet turbulen *intermittent* itu sendiri. *Jet growth* ditentukan dari *growth of the half-velocity radius*,  $r_{1/2,U}$  dengan  $x/d$  ketika *axial velocity*,  $U$  bernilai setengah dari *centerline axial velocity*,  $U_0$ . Bremhorst dan Hollis (1990) memformulasikan *jet growth* sebagaimana dalam Persamaan 1 dimana  $A_2$  ialah konstanta laju penyebaran jet turbulen,  $x_{02}/d$  adalah *non-dimensional effective origin*. Persamaan 1 tersebut valid untuk *steady jet* dan *fully pulsed jet* dengan ketentuan bahwa kedua aliran jet turbulen tersebut berkembang secara linear ke arah *downstream*. Telah dibuktikan antara lain oleh Bogey dan Bailly (2009), Bremhorst dan Hollis (1990), dan Bremhorst dan Gehrke (1999) bahwa baik *steady jet* dan *fully pulsed jet* mengalami perkembangan secara linear ke arah *downstream*.

$$\frac{2r_{1/2,U}}{d} = A_2 \left( \frac{x}{d} + \frac{x_{02}}{d} \right) \quad (1)$$

Selanjutnya, evaluasi dari volume jet harus dilakukan untuk menentukan *jet entrainment*. Secara prinsip, volume jet dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2 dimana  $Q$  merupakan volume jet. Dengan mengetahui profil radial dari kecepatan aksial lokal dan mensubstitusikan profil radial tersebut ke dalam Persamaan 2 kemudian melakukan operasi integral di sepanjang radius  $r$ , volume jet dapat ditentukan.

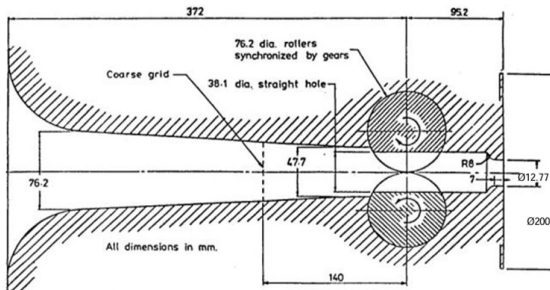
$$Q = 2\pi \int_0^{\infty} rU dr \quad (2)$$

## III. METODOLOGI PENELITIAN

*Fully pulsed jets* dihasilkan oleh *apparatus* sebagaimana dalam Gambar 1. Peralatan ini dikembangkan di Laboratorium Jet, Divisi Teknik Mesin, *University of*

Queensland. Sebagai basis keberlanjutan penelitian dan kelanjutan dari eksperimen-eksperimen sebelumnya dari Winter (1991) dan Bremhorst dan Gehrke (1999), geometri keluaran *nozzle* menggunakan bentuk *circular* yang memiliki diameter keluaran jet sebesar 12,77 mm (Winter 1991; Bremhorst dan Gehrke 1999) atau setengah dari diameter keluaran jet yang digunakan oleh Bremhorst dan Harch (1979). Lebih jauh, untuk menghasil *excitation*, katup pulsasi yang digerakkan oleh sepasang *geared rollers* ditambahkan di dekat keluaran *nozzle*. *Disk* dengan diameter 200 mm dipasang pada *nozzle* untuk menghindari *air entrainment* secara langsung di belakang *nozzle*, dengan demikian membuat aliran jet udara di dekat keluaran *nozzle* menjadi *axisymmetric*.

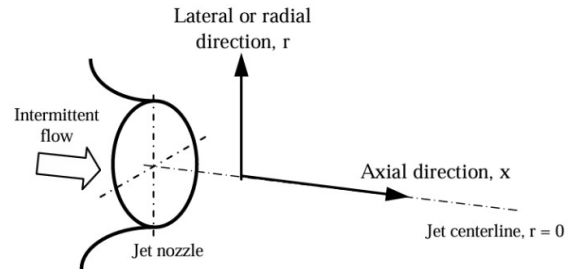
Fluida kerja dari aliran jet turbulen *intermittent* menggunakan udara bertekanan yang diberikan oleh *plenum chamber* yang kemudian dipancarkan ke udara ambien oleh *nozzle* injeksi. Dikarenakan eksitasi secara mekanik, kecepatan jet mengandung kecepatan aksial nol pada beberapa porsi dari satu siklus eksitasi. *Flow domain* dari aliran jet *intermittent* setelah keluaran *nozzle* injeksi dilukiskan dalam Gambar 2. Turbulensi di dalam *fully pulsed jet* kemudian diteliti dalam arah aksial dan arah radial. Serangkaian parameter turbulensi yang meliputi nilai rata-rata, *turbulence* order kedua, *turbulence* order ketiga, dan *turbulence* order keempat dari aliran jet turbulen *unsteady* diukur pada sejumlah lokasi dalam arah radial dan arah aksial, yang dipengaruhi oleh *mass flow rate* dan *pulsing frequency* yang dirubah. *Mass flow rate* dan *pulsing frequency* ini dinyatakan dengan angka Reynolds dan angka Strouhal, secara berurutan. Lebih jauh, *pulsing frequency* ini divariasikan dengan merubah putaran dari *geared rollers* pada katup pulsasi.



Gambar 1. Nozzle injeksi aliran jet turbulen *unsteady* dengan katup pulsasi (direproduksi dari Winter 1991)

Sebelum melakukan pengukuran-pengukuran turbulensi, profil simetris dari kecepatan lokal dalam arah radial dan uji propagasi aliran jet turbulen *intermittent* dalam arah aksial atau ke arah *downstream* harus dikaji. Profil simetris dari kecepatan lokal ini diperoleh dari rata-rata dari kecepatan lokal dan *turbulence* order kedua pada sejumlah lokasi dalam arah radial di dalam *flow field* dari aliran jet tersebut. Selanjutnya, propagasi aliran jet tersebut dilihat berdasarkan nilai rata-rata kecepatan lokal pada tiga lokasi dalam arah aksial. Hasil pengujian membuktikan bahwa aliran jet turbulen *unsteady* tersebut ialah *axisymmetric* dan memiliki propagasi yang mengikuti trayektori garis lurus ke arah *downstream* (Pratomo 2006). Setelah pengkajian kesimetrisan profil radial dan propagasi dari aliran jet turbulen terpulsasi tersebut, evaluasi dari *jet*

*entrainment* dan *jet growth* dilakukan. Setelah itu, *jet entrainment* yang dihasilkan oleh *nozzle* injeksi dengan *excitation* juga dibandingkan dengan *jet entrainment* yang dihasilkan oleh *nozzle* injeksi tanpa *excitation* untuk membuktikan pengaruh dari penambahan katup pulsasi terhadap karakteristik dari aliran jet *intermittent*. Pengukuran turbulensi ini dilakukan pada empat lokasi *cross section* dari aliran jet tersebut dengan kecepatan keluaran jet sebesar 13,7 m/s dan 34,4 m/s dan dengan *pulsing frequency* sebesar 10 Hz dan 25 Hz. *Jet entrainment* dan *jet growth* didapatkan dari nilai rata-rata kecepatan lokal, yang selanjutnya persamaan (1) dan persamaan (2) digunakan untuk mendapatkan *Jet entrainment* dan *jet growth*, secara berurutan.



Gambar 2. *Flow field* dari aliran jet *intermittent* setelah keluaran *nozzle* injeksi (direproduksi dari Pratomo 2014)

*Constant temperature hot-wire anemometer* digunakan untuk mengukur semua parameter *turbulence* dari aliran jet turbulen *unsteady*. Mode temperatur konstan diaktifkan untuk memberikan respon frekuensi yang lebih tinggi. Dari kalibrasi *hot-wire anemometer*, akurasi sebesar  $\pm 0,03\%$  untuk *extended power-law equation* yang ditingkatkan dengan *look-up table method* dan *error* relatif *root-mean-square* sebesar 1,22% dari komponen kecepatan yang berfluktuasi dapat dicapai. Untuk menghasilkan pengukuran yang akurat dan dapat diulangi, evaluasi akurasi statistik menghasilkan frekuensi penyamplingan 10000 Hz, jumlah sampel 50000, dan waktu penyamplingan 50 detik. Dengan ketiga parameter ini, ketidak-pastian dari nilai rata-rata, *turbulence* order kedua, *turbulence* order ketiga, dan *turbulence* order keempat menghasilkan nilai-nilai 0,26%, 0,45%, 1,10%, dan 4,38% secara berurutan.

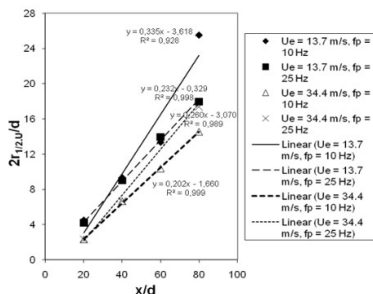
#### IV. ANALISIS DAN PENERAPAN SOLUSI

Gambar 3 mengilustrasikan *growth* dari *half-value radius* dari *mean axial velocity* dari *pulsed jets* di sepanjang 80 *diameters downstream* di bawah angka Reynolds dan angka Strouhal yang divariasikan. Hasil-hasil tersebut dievaluasi dari profil-profil radial dari *normalized mean axial velocity* ketika *local axial velocity* bernilai  $0,5 U_0$  yang juga merupakan *half-value radius*,  $r_{1/2,U}$ .

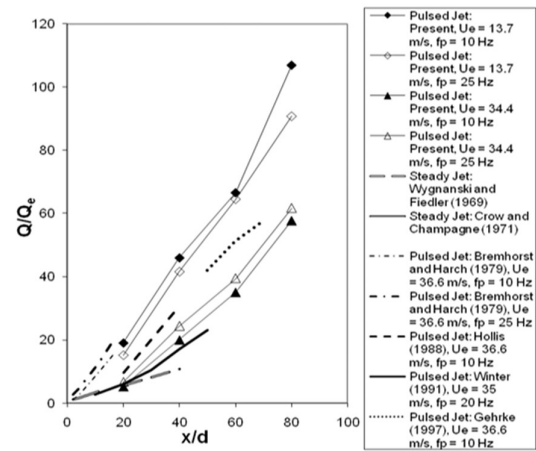
Sebagaimana terlihat dalam Gambar 3, *growth* dari aliran jet turbulen terpulsasi dari udara bergantung kuat pada angka Reynolds dan angka Strouhal yang dirubah sebagai konsekuensi dari profil radial dari *local mean axial velocity* yang dihasilkan oleh karena *excitation* yang ditambahkan. Angka Strouhal di sini merupakan manifestasi dari *pulsing frequency* sebagai akibat dari penambahan katup pulsasi pada *nozzle* injeksi. Katup pulsasi inilah yang menyebabkan turbulensi lebih kuat dalam jet *unsteady* sehingga jet

memiliki tambahan energi untuk menyebar. Hal yang sama juga dibuktikan oleh Payri et al (2022) ketika katup pulsasi yang diwujudkan dengan keberadaan *needles* ditambahkan pada *nozzle* injeksi untuk menghasilkan aliran jet *intermittent* bahan bakar. *Knowledge* seperti ini sangat mendorong penelitian lanjutan mengenai desain dari sistem *injector* bahan bakar untuk digabungkan dengan penemuan dari Wadekar et al (2021). Wadekar et al (2021) membuktikan bahwa *divergent and convergent shape nozzle hole geometries* sangat menentukan karakteristik *sprays* dan *air entrainment* dari jet turbulen meskipun berbeda kondisi dengan *controlled parameters* dari studi ini. Pertanyaan penting ialah bagaimana bila hal ini digabungkan dengan menambahkan katup pulsasi pada *nozzle* injeksi? Terlepas dari pertanyaan penelitian lanjutan ini, pembaca juga dirujuk pada studi dari Rakhsha et al (2023) yang berfokus pada aliran jet turbulen terpululasi dari udara yang keluar dari *nozzle* injeksi dengan *nozzle exit* berbentuk *circular, elliptic, rectangular, dan square*. Rakhsha et al (2023) membatasi aplikasi aliran jet turbulen *intermittent* tersebut pada *impinged jet* pada angka Reynolds sebesar 7000 dan rentang *pulsing frequency* dari 25 Hz – 100 Hz dengan melibatkan *heat transfer*. Meskipun demikian, *turbulence mechanism* dari jet turbulen terpululasi yang dihasilkan oleh Rakhsha et al (2023) perlu menjadi perhatian, khususnya ketika jet turbulen terpululasi berlaku sebagai *free jet* bukan sebagai *impinged jet*.

Lebih jauh, terlihat jelas dari Gambar 3 bahwa *growth* dari jet turbulen terpululasi dari udara berlaku secara *linear*. Hal yang sama juga dibuktikan oleh Bremhorst dan Hollis (1990), Bremhorst dan Gehrke (1999). Selanjutnya, *growth* pada *mass flow rate* yang lebih kecil memiliki nilai yang lebih tinggi daripada *growth* pada angka Reynolds yang lebih tinggi. Hal seperti ini tidak terjadi pada *steady jets* oleh karena *self similarity* dari profil radial dari *local mean axial velocity* yang dihasilkan di sepanjang *downstream* meskipun dalam rentang angka Reynolds yang besar (Bogey dan Bailly 2009, Hussein et al 1994). Terlepas dari itu, menariknya, tren-tren yang berbeda dari *jet growth* pada *mass flow rate* yang rendah dan tinggi sebagai konsekuensi dari frekuensi pulsasi yang digunakan juga terlihat dengan jelas dalam Gambar 3. Pada angka Reynolds yang rendah, Crow dan Champagne (1971), Lovett dan Turns (1990), dan Winter (1991) membuktikan tren *non-linear* sebagaimana hal ini terjadi pada *jet exit velocity* sebesar 13,7 m/s. Sebaliknya, tren *linear* yang terjadi pada angka Reynolds yang tinggi dalam studi ini juga dibuktikan, sebagai contoh, oleh Tanaka (1984). Jadi, ketika angka Strouhal ditingkatkan jet turbulen terpululasi dari udara menjadi *less dispersive* pada *mean exit velocity* yang rendah dan hal yang sebaliknya berlaku pada angka Reynolds yang lebih tinggi.



Gambar 3. *Growth* dari aliran jet turbulen *unsteady* dari udara (direproduksi dari Pratomo 2006)



Gambar 4. Perbandingan *entrainment rates* dari *unsteady jets* dan *steady jets* (direproduksi dari Pratomo 2006)

Gambar 4 menjelaskan perbandingan-perbandingan dari evaluasi *jet volume flow rate*,  $Q$  yang dinormalisasi dengan *jet volume flow rate* pada *jet exit* yang didapatkan dari *mass flow rate*,  $Q_e$  antara jet-jet turbulen terpululasi (Pratomo 2006, Bremhorst dan Harch 1979; Hollis 1988; Winter 1991; Gehrke 1997) dan *steady jets* (Wygnanski and Fiedler 1969; Crow and Champagne 1971). Terlihat bahwa jet-jet turbulen *intermittent* menghasilkan *jet entrainment* yang lebih baik daripada *entrainment* dari jet turbulen *steady*. Hal ini menunjukkan bahwa pencampuran dalam jet-jet turbulen terpululasi tersebut lebih kuat daripada pencampuran dari jet-jet turbulen *steady*. Daya pencampuran yang lebih baik dari aliran jet turbulen terpululasi ini oleh karena *excitation* yang ditambahkan sehingga menyebabkan lebih banyak udara sekeliling yang ditarik masuk ke dalam *flow field* dari jet-jet turbulen *intermittent*. Selanjutnya, dibandingkan dengan studi-studi dari Bremhorst dan Harch (1979), Hollis (1988), Winter (1991), Gehrke (1997), studi dari Pratomo (2006) menambahkan *volume flow rate* dari jet turbulen terpululasi pada angka Reynolds yang lebih rendah dengan frekuensi pulsasi yang dirubah. Berbeda dengan Bremhorst dan Harch (1979) serta Hollis (1988) yang menggunakan diameter *nozzle exit* 25,54 mm, studi-studi dari Winter (1991), Gehrke (1997), dan Pratomo (2006) menggunakan diameter yang lebih kecil, yaitu setengah dari diameter *jet exit* yang digunakan oleh Bremhorst dan Harch (1979) serta Hollis (1988). Lebih jauh, hasil-hasil *jet entrainment* pada angka Reynolds yang lebih rendah (yaitu dengan kecepatan *nozzle exit* sebesar 13,7 m/s) memiliki tren yang berlawanan dengan tren dari Bremhorst dan Harch (1979). Namun demikian, hal ini tidak terjadi pada kecepatan *nozzle exit* sebesar 34,4 m/s, menghasilkan tren linear sebagaimana tren yang sama dari Bremhorst dan Harch (1979).

Hasil-hasil dari studi ini didapatkan dari *numerical integration* dari *rU products* dalam Persamaan 2 sebagaimana profil-profil radial dari *local mean axial velocity* meninggalkan *Gaussian curve-fit*. Oleh sebab itu, persamaan

$$Q = \frac{\pi U_0 r_1^2 U}{\alpha} \text{ yang diperkenalkan oleh Hollis (1988) beserta asumsinya tidak dapat digunakan. Lebih jauh, persamaan}$$

$$\frac{Q}{Q_e} = \frac{A_1 A_2^2 (x+x_{02})^2}{\alpha d(x+x_{01})}$$

juga tidak dapat digunakan untuk mengevaluasi laju dari *normalized jet volume flow* sebagaimana dalam studi ini dibuktikan dua nilai berbeda dari  $A_1$  dan  $x_{01}$  di seluruh 100 *diameters downstream* sebagai

konsekuensi dari eksitasi mekanis yang ditambahkan yang menyebabkan terjadinya dua *distinct regions*, yaitu *pulse dominated region* dan *high turbulence steady jet field* dalam jet turbulen terpulsasi dari udara.

Sehubungan dengan *numerical integration, integration* dari rU dilakukan dimana *local axial velocity* telah mencapai nilai di bawah 0,1 dari *mean centerline velocity* untuk menghindari permasalahan *integration*. Permasalahan *integration* ini telah dibuktikan oleh Bremhorst dan Harch (1979), Crow dan Champagne (1971) sebagaimana rU *products* tidak akan pernah mencapai tepat 0 menggantikan suatu konstanta sebagai hasil dari pengukuran-pengukuran kecepatan. Terlepas dari itu, mempertimbangkan postulasi dari Breidenthal (1986) dan hasil-hasil eksperimen dari Johari et al (1993), terlihat bahwa tidak ada bukti dari hasil-hasil studi ini yang setuju dengan teori dari Breidenthal (1986) dan hasil-hasil dari Johari et al (1993). Terlihat dengan jelas bahwa eksitasi mekanis yang diberlakukan dalam studi ini berhasil memperkuat *jet entrainment* dan *jet growth*. Hal ini juga dibuktikan sebagai contoh oleh Bremhorst and Hollis (1990), Winter (1991), Crowling (2007). Lebih jauh, sebagaimana ditunjukkan dari hasil-hasil studi ini, pada *mean exit velocity* sebesar 13,7 m/s laju *normalized jet volume flow* ialah lebih tinggi daripada laju *jet volume flow* pada *mean exit velocity* sebesar 34,4 m/s. Fenomena seperti ini membuktikan penemuan-penemuan dari Ricou dan Spalding (1960) bahwa laju *jet volume flow* berkurang secara bertahap seiring dengan meningkatnya angka Reynolds.

## V. KESIMPULAN

Desain *nozzle* injeksi dengan menambahkan katup pulsasi pada lokasi dekat dengan *nozzle exit* atau *excitation* yang telah dilakukan pada aliran jet turbulen telah berhasil mengatasi buruknya *jet entrainment* dan *jet growth* yang dihasilkan oleh *injecting nozzle without excitation*. *Nozzle* injeksi dengan *pulsing valves* yang digerakkan oleh sepasang *gear roller* berhasil menciptakan *entrainment* yang jauh lebih baik daripada *entrainment* dari *nozzle* injeksi tanpa *excitation*. Hal ini menyebabkan kinerja mesin pembakaran dalam yang lebih baik dan emisi CO<sub>2</sub> juga bisa direduksi. Penemuan-penemuan sebelum studi ini dan terkini juga menghasilkan *knowledge* yang sama. Sebagai potensi untuk studi lanjutan, desain dari *injecting nozzle with excitation* perlu dikembangkan untuk *nozzle* dengan geometri yang lain. Langkah-langkah seperti ini merupakan scientific effort untuk menjawab: 1) apakah *jet growth* yang dihasilkan oleh *nozzle* injeksi dengan geometri non-circular dimana *excitation* digunakan terjadi secara *linear*?, 2) apakah *trend* yang berbeda dari *jet entrainment* ketika *pulsing frequency* dirubah tetap terjadi pada *mass flow rate* yang rendah dan tinggi?

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama mengucapkan terimakasih kepada (emeritus) Prof. Klaus Bremhorst, PhD, Australian Orders, pembimbing penelitian *turbulence and unsteady jet* di the University of Queensland, the Technological Professional and Skill Development Project - Asian Development Bank (INO 1792) atas *research fellowship scholarship* di the University of Queensland, dan Mr. George Dick dari Jet

Laboratory di the University of Queensland atas berbagai *support* untuk *hot-wire repairs*.

## VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Azad, M., Quinn, W. R., Groulx, D., 2012, Mixing in Turbulent Free Jets issuing from Isosceles Triangular Orifices with Different Apex Angles, *Experimental Thermal and Fluid Science* 39: 237-251.
- [2] Balz, R., Bernardasci, G., von Rotz, B., Sedarsky, D. 2021, Influence of Nozzle Geometry on Spray and Combustion Characteristics related to Large Two-Stroke Engine Fuel Injection Systems, *Fuel*, 294, 120455. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120455>.
- [3] Bogey, C., Bailly C., 2009, Turbulence and Energy Budget in a Self-preserving Round Jet: Direct Evaluation using Large Eddy Simulation. *Journal of Fluid Mechanics* 627: 129-160.
- [4] Breidenthal, R., 1986, The Turbulent Exponential Jet. *Physics of Fluid*, 29(8), pp. 2346-2347.
- [5] Bremhorst, K., Gehrke, P. J., 1999, Measured Reynolds Stress Distribution and Energy Budgets of a Fully Pulsed Round Air Jet. *Experiments in Fluids*, 28, pp. 519-531.
- [6] Bremhorst, K., Harch, W. H., 1979, Near Field Velocity Measurements in a Fully Pulsed Subsonic Air Jet. *Turbulent Shear Flows I*, Springer Verlag, Berlin, pp. 37-54.
- [7] Bremhorst, K., Hollis, P. G., 1990, Velocity Field of an Axisymmetric Pulsed, Subsonic Air Jet. *AIAA Journal*, 28(12), pp. 2043-2049.
- [8] Cowling, R. A., 2007, Investigation of Free Pulsed Jets, *Proceedings of the 45<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Reno, NV, pp. 2009-2018.
- [9] Crow, S. C., Champagne, F. H., 1971, Orderly Structure in Jet Turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(3), pp. 547-591.
- [10] Erfan, I., Chitsaz, I., Ziabasharhagh, M., Hajjalimohammadi, A., Fleck, B., 2015, Injection Characteristics of Gaseous Jet injected by a Single-Hole Nozzle Direct Injector, *Fuel*, 160, pp. 24 – 34.
- [11] Hollis, P. G., 1988, Velocity Field Investigation of A Fully Pulsed Air Jet with A Laser Doppler Anemometer. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Queensland, Brisbane.
- [12] Hsu, C. M., Jhan, W. C., Chang, Y. Y., 2020, Flow and Heat Transfer Characteristics of a Pulsed Jet impinging on a Flat Plate. *Heat Mass Transfer*, 56, pp. 143–160. <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02696-w>
- [13] Hussein, J. H., Capp, S. P., George, W. K., 1994, Velocity Measurements in a High-Reynolds-Number-Momentum Conserving, Axisymmetric, Turbulent Jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 258, pp. 31-75.
- [14] Johari, H., Medina, R., Kouros, H., 1993, Spreading Rate of an Unsteady Turbulent Jet. *AIAA Journal*, 31(8), pp. 1524-1526.
- [15] Lovett, J. A., Turns, S. R., 1990, Experiments on Axisymmetric Pulsed Turbulent Jet Flames. *AIAA Journal*, 28(1), pp. 38-46.
- [16] Payri, R., Gimeno, J., Marti-Aldaravi, P., Martinez, M., 2022, Transient Nozzle Flow Analysis and Near Field Characterization of Gasoline Direct Fuel Injector using Large Eddy Simulation, *International Journal of Multiphase Flow*, 148, 103920.
- [17] Pratomo, Hariyo P. S., 2006, Mean Velocity and Turbulence Measurements in a Pulsed Jet. MPhil Thesis, Division of Mechanical Engineering, The University of Queensland, Brisbane.
- [18] Pratomo, Hariyo P. S., 2014, Mixing Enhancement by using Turbulent Jets. *Proceedings of the ASME 2014 4<sup>th</sup> Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting* collocated with the ASME 2014 12<sup>th</sup> International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. Chicago, Illinois, USA. August 3–7, 2014. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2014-22086>
- [19] Quinn, W. R., Azad, M., 2013, Mean Flow and Turbulence Measurements in a Turbulent Free Cruciform Jet, *Flow, Turbulence and Combustion* 91: 773-804.
- [20] Rakhsha, S., Zargarabadi, M. R., Saedodin, S., 2023, The Effect of Nozzle Geometry on the Flow and Heat Transfer of Pulsed Impinging Jet on the Concave Surface, *International Journal of Thermal Sciences*, 184, 107925. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107925>.
- [21] Ricou, F. P., Spalding, D. B., 1960, Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 11, pp. 21-32.
- [22] Tanaka, Y., 1984, On the Structure of Pulse Jet. *Bulletin of JSME*, 27(230), pp. 1667-1674.
- [23] Wadekar, S., Yamaguchi, A., Oevermann, M., 2021, Large-Eddy Simulation Study of Ultra-High Fuel Injection Pressure on Gasoline

- Sprays, Flow, Turbulence and Combustion, 107, pp. 149-174.  
<https://doi.org/10.1007/s10494-020-00231-0>
- [24] Winter, A. R., 1991, A Laser Doppler Anemometer Investigation into Fully Pulsed Jet Flows with an Examination of Velocity Bias Error. PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Queensland, Brisbane.
- [25] Zaman, K. B. M. Q., Hussain, A. K. M. F., 1980, Vortex Pairing in a Circular Jet under Controlled Excitation, Part 1: General Jet Response. *Journal of Fluid Mechanics*, 101(3), pp. 449-491.