

# jTEP

## JURNAL KETEKNIKAN PERTANIAN

P-ISSN No. 2407-0475 E-ISSN No. 2338-8439

Vol. 10, No. 1, April 2022



Publikasi Resmi  
**Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia**  
(Indonesian Society of Agricultural Engineering)  
bekerjasama dengan  
**Departemen Teknik Mesin dan Biosistem - FATETA**  
Institut Pertanian Bogor



## DAFTAR ISI

### *Technical Paper*

1

**Limbah Padat Kelapa Sawit sebagai Alternatif Energi Pembangkit Listrik di Barat Selatan Aceh**  
*Palm Oil Solid Waste as an Alternative Energy Source of Electricity generation in The Southwest of Aceh*  
Agustiar, Tajuddin Bantacut, Bambang Pramudya

11

**Pengaruh Proses Torefaksi terhadap Kualitas Serbuk Kayu**  
*The Torrefaction Effect on The Sawdust Quality*  
Ismail, Erlanda Augupta Pane, I Gede Eka Lesmana, Rovida Camalia Hartantrie, Deni Rifki.

21

**Penerapan Metode Ekstraksi Microwave Untuk Meningkatkan Rendemen dan Mutu Oleoresin Lada Putih (*Piper nigrum L*)**  
*Application of Microwave-Assisted Extraction Method to Improve Yield and Quality of White Pepper (*Piper nigrum L*) Oleoresin.*  
Annisa Purnamasari Damanik, Edy Hartulistiyoso\*, Rokhani Hasbullah.

29

**Pengaruh Waktu Pemanasan, Jenis dan Konsentrasi Plasticizer Terhadap Karakteristik Edible Film K-karagenan**  
*The Effect of Heating Time, Type and Plasticizer Concentration on Characteristics of Edible Film K-carrageenan*  
Desi Juliani\*, Nugraha Edhi Suyatma, Fahim Muchammad Taqi.

41

**Pemanfaatan Water Power Generator di Saluran Irigasi Tersier untuk Penanganan Hama Padi**  
*Utilization of Water Power Generator in The Tertiary Irrigation Canal for Paddy's Pest Handling*  
Lilis Dwi Saputri, Elsa Wulandari, Febri Nur Azra, Afik Hardanto\*.

49

**Sistem Monitoring dan Kontrol Iklim Mikro pada Plant Factory Berbasis Internet of Things**  
*Microclimate Monitoring and Control System in a Plant Factory Using the Internet of Things*  
Ardiansyah\*, Ikhsan Nur Rahmaan, Eni Sumarni, Afik Hardanto.

59

**Portable/Handheld NIR sebagai Teknologi Evaluasi Mutu Bahan Pertanian secara Non-Destruktif**  
*Portable/Handheld NIR as a Non-Destructive Technology for Quality Evaluation of Agricultural Materials*  
Widyaningrum\*, Y Aris Purwanto, Slamet Widodo, Supijatno, Evi Savitri Iriani.

69

**Detection of Chilling Injury Symptoms of Salak Pondoh Fruit during Cold Storage with Near Infrared Spectroscopy (NIRS)**  
Sutrisno Suro Mardjan\* and Jerry Indriantoro.

77

**Studi Penentuan Daya Tampung Beban Pencemaran Sungai Bedadung Kabupaten Jember Menggunakan Program Qual2Kw**  
*Determination of Total Pollution Load Capacity at the Bedadung River, Jember Regency Using Qual2Kw Program*  
Elida Novita, Rodzika Diah Mauvi, Hendra Andianata Pradana\*.

85

**Analisis Orifice pada Reaktor Biodiesel Sistem Kavitasi Hidrodinamik dengan Computational Fluid Dynamics**  
*Orifice Analysis in Biodiesel Reactor with Hydrodynamic Cavitation System using Computational Fluid Dynamics*  
Yayan Heryana\*, Dyah Wulandani, Supriyanto.

---

#### Penerbit:

Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA) bekerjasama dengan Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor d/a Jurnal Keteknik Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026, E-mail: jtep@ipb.ac.id atau jurnaltep@yahoo.com. Website: <http://web.ipb.ac.id/~jtep>.



Jurnal Keteknikan Pertanian (JTEP) terakreditasi berdasarkan SK Dirjen Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset Dikti Nomor I/E/KPT/2015 tanggal 21 September 2015. Selain itu, JTEP juga telah terdaftar pada Crossref dan telah memiliki Digital Object Identifier (DOI) dan telah terindeks pada ISJD, IPI, Google Scholar dan DOAJ. JTEP terbit tiga kali setahun yaitu bulan April, Agustus dan Desember, Jurnal berkala ilmiah ini berkiprah dalam pengembangan ilmu keteknikan untuk pertanian tropika dan lingkungan hayati. Penulis makalah tidak dibatasi pada anggota **PERTETA** tetapi terbuka bagi masyarakat umum. Lingkup makalah, antara lain meliputi teknik sumberdaya lahan dan air, alat dan mesin budidaya pertanian, lingkungan dan bangunan pertanian, energi alternatif dan elektrifikasi, ergonomika dan elektronika pertanian, teknik pengolahan pangan dan hasil pertanian, manajemen dan sistem informasi pertanian. Makalah dikelompokkan dalam **invited paper** yang menyajikan isu aktual nasional dan internasional, **review** perkembangan penelitian, atau penerapan ilmu dan teknologi, **technical paper** hasil penelitian, penerapan, atau diseminasi, serta **research methodology** berkaitan pengembangan modul, metode, prosedur, program aplikasi, dan lain sebagainya. Penulisan naskah harus mengikuti panduan penulisan seperti tercantum pada website dan naskah dikirim secara elektronik (*online submission*) melalui <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>.

**Penanggungjawab:**

Ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, IPB  
Ketua Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia

**Dewan Redaksi:**

Ketua : Yohanes Aris Purwanto (Scopus ID: 6506369700, IPB University)  
Anggota : Abdul Hamid Adom (Scopus ID: 6506600412, University Malaysia Perlis)  
(*editorial board*) Addy Wahyudie (Scopus ID: 35306119500, United Arab Emirates University)  
Budi Indra Setiawan (Scopus ID: 55574122266, IPB University)  
Balasuriya M.S. Jinendra (Scopus ID: 30467710700, University of Ruhuna)  
Bambang Purwantana (Scopus ID: 6506901423, Universitas Gadjah Mada)  
Bambang Susilo (Scopus ID: 54418036400, Universitas Brawijaya)  
Daniel Saputera (Scopus ID: 6507392012, Universitas Sriwijaya)  
Han Shuqing (Scopus ID: 55039915600, China Agricultural University)  
Hiroshi Shimizu (Scopus ID: 7404366016, Kyoto University)  
I Made Anom Sutrisna Wijaya (Scopus ID: 56530783200, Universitas Udayana)  
Agus Arif Munawar (Scopus ID: 56515099300, Universitas Syahkuala)  
Armansyah H. Tambunan (Scopus ID: 57196349366, IPB University)  
Kudang Boro Seminar (Scopus ID: 54897890200, IPB University)  
M. Rahman (Scopus ID: 7404134933, Bangladesh Agricultural University)  
Machmud Achmad (Scopus ID: 57191342583, Universitas Hasanuddin)  
Muhammad Makky (Scopus ID: 55630259900, Universitas Andalas)  
Muhammad Yulianto (Scopus ID: 54407688300, IPB University & Waseda University)  
Nanik Purwanti (Scopus ID: 23101232200, IPB University & Teagasc Food Research Center Irlandia)  
Pastor P. Garcia (Scopus ID: 57188872339, Visayas State University)  
Rosnah Shamsudin (Scopus ID: 6507783529, Universitas Putra Malaysia)  
Salengke (Scopus ID: 6507093353, Universitas Hasanuddin)  
Sate Sampattagul (Scopus ID: 7801640861, Chiang Mai University)  
Subramaniam Sathivel (Scopus ID: 6602242315, Louisiana State University)  
Shinichiro Kuroki (Scopus ID: 57052393500, Kobe University)  
Siswoyo Soekarno (Scopus ID: 57200222075, Universitas Jember)  
Tetsuya Araki (Scopus ID: 55628028600, The University of Tokyo)  
Tusan Park (Scopus ID: 57202780408, Kyungpook National University)

---

**Redaksi Pelaksana:**

Ketua : Usman Ahmad (Scopus ID: 55947981500, IPB University)  
Sekretaris : Lenny Saulia (Scopus ID: 16744818700, IPB University)  
Bendahara : Dyah Wulandani (Scopus ID: 1883926600, IPB University)  
Anggota : Satyanto Krido Saptomo (Scopus ID: 6507219391, IPB University)  
Slamet Widodo (Scopus ID: 22636442900, IPB University)  
Liyantono (Scopus ID: 54906200300, IPB University)  
Leopold Oscar Nelwan (Scopus ID: 56088768900, IPB University)  
I Wayan Astika (Scopus ID: 43461110500, IPB University)  
I Dewa Made Subrata (Scopus ID: 55977057500, IPB University)  
Administrasi : Khania Tria Tifani (IPB University)

**Penerbit:** Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Institut Pertanian Bogor bekerjasama dengan Perhimpunan Teknik Pertanian Indonesia (PERTETA).

**Alamat:** Jurnal Keteknikan Pertanian, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem,  
Fakultas Teknologi Pertanian, Kampus Institut Pertanian Bogor, Bogor 16680.  
Telp. 0251-8624 503, Fax 0251-8623 026,  
E-mail: [jtep@apps.ipb.ac.id](mailto:jtep@apps.ipb.ac.id)  
Website: <http://journal.ipb.ac.id/index.php/jtep>

**Rekening:** BRI, KCP-IPB, No.0595-01-003461-50-9 a/n: Jurnal Keteknikan Pertanian

**Percetakan:** PT. Binakerta Makmur Saputra, Jakarta

---

## Ucapan Terima Kasih

Redaksi Jurnal Keteknikan Pertanian mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bebestari yang telah menelaah naskah pada penerbitan Vol. 10, No. 1 April 2022. Ucapan terima kasih disampaikan kepada: Dr.Eng. Obie Farobie, S.Si, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Lilis Sucahyo, S.TP, M.Si (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Dr.Agr.Sc., Diding Suhandy, S.TP., M.Agr (Universitas Negeri Lampung), Yusuf Hendrawan, STP, M.App.Life Sc., PhD (Universitas Brawijaya), Dr.Ir. I Ketut Budaraga, M.Si (Universitas Ekasakti), Ir. Sri Endah Agustina, MS (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Asri Widyasanti, S.TP., M.Eng (Universitas Padjadjaran), Dr.Ir. Christina Winarti, MA (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pasca Panen Pertanian), Dr.Ir. I Dewa Made Subrata, M. Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Dr. Supriyanto, S.TP, M.Kom (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Bayu Dwi Apri Nugroho, S.T.P., M.Agr., Ph.D (Universitas Gadjah Mada), Ansita Gupitakingkin Pradipta, ST, M.Eng (Universitas Gadjah Mada), Dr. Andasuryani, S.TP, M.Si (Universitas Andalas), Dr.Ir. Lady Lengkey, M.Si (Universitas Sam Ratulangi), Dr.Ir. I Wayan Budiastara, M. Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University), Prof.Dr.Ir. Usman Ahmad, M.Agr (Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, IPB University).

---



*Technical Paper*

## **Analisis Orifice pada Reaktor Biodiesel Sistem Kavitas Hidrodinamik dengan Computational Fluid Dynamics**

### *Orifice Analysis in Biodiesel Reactor with Hydrodynamic Cavitation System using Computational Fluid Dynamics*

**Yayan Heryana\***, Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia. Staff BRIN. Email: [yayan.heryana.st@gmail.com](mailto:yayan.heryana.st@gmail.com)

**Dyah Wulandani**, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.

**Supriyanto**, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia.

#### **Abstract**

*Reactor technology for the trans-esterification process of vegetable oils or animal fats with methanol has been widely developed to obtain biodiesel products that comply with standards and at the lowest cost. The hydrodynamic cavitation reactor with orifice type is a choice for this purpose. Therefore, this study aims to determine the optimal orifice design from several types tested through CFD simulation. Furthermore, the simulation and experimental methods were used. The computer simulations performed on orifices A (2 holes with a diameter of 2 mm), B (4 holes with a diameter of 1.5 mm), C (9 holes with a diameter of 1 mm), and D (37 holes with a diameter of 0.5 mm) using the Schnerr and Sauer models showed that orifice C was optimal for cavitation at an absolute inlet pressure of  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> with the use of methanol as fluid. The parameters studied in the computer simulation include velocity, pressure, turbulent kinetic energy, and vapor volume fraction. At the absolute inlet pressure of  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>, the maximum speed was 28.69 m/s, the minimum pressure was 12,266 N/m<sup>2</sup>, the maximum vapor volume fraction was 0.98, and the maximum turbulent kinetic energy was 12.75 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. The simulation results were compared with experiments conducted on a hydrodynamic cavitation reactor using orifices C and D. Also, measurements of the velocity and pressure parameters showed that there were no significant deviations between the results of the computer simulation and the experiment.*

**Key words:** *biodiesel, cavitation, computational fluid dynamics (CFD), orifice, reactor.*

#### **Abstrak**

Teknologi reaktor untuk proses transesterifikasi minyak nabati atau lemak hewani dengan metanol telah banyak dikembangkan, dengan tujuan mendapatkan hasil biodiesel yang sesuai standar namun dengan biaya yang seminimal mungkin. Reaktor kavitas hidrodinamik tipe orifice merupakan alternatif pilihan untuk tujuan tersebut. Penelitian ini bertujuan menentukan desain orifice optimal dari beberapa desain orifice yang diuji melalui simulasi CFD. Penelitian ini menggunakan metode simulasi dan eksperimental. Simulasi komputer yang dilakukan terhadap orifice A (2 lubang dengan diameter 2 mm), B (4 lubang dengan diameter 1,5 mm), C (9 lubang dengan diameter 1 mm) dan D (37 lubang dengan diameter 0,5 mm) menggunakan model Schnerr dan Sauer menunjukkan bahwa orifice C merupakan yang optimal menghasilkan kavitas pada kondisi tekanan absolut inlet  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> dengan penggunaan fluida metanol. Hal tersebut berdasarkan parameter yang diteliti yaitu kecepatan, tekanan, energi kinetik turbulen dan fraksi volume uap. Pada tekanan absolut inlet  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> diperoleh kecepatan maksimum 28,69 m/s, tekanan minimum 12266 N/m<sup>2</sup>, fraksi volume uap maksimum 0,98 dan energi kinetik turbulen maksimum 12,75 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan eksperimen yang dilakukan pada reaktor kavitas hidrodinamik menggunakan orifice C dan D. Pengukuran yang dilakukan terhadap parameter kecepatan dan tekanan menunjukkan tidak terjadi penyimpangan yang signifikan antara hasil simulasi komputer dan eksperimen.

**Kata kunci:** biodiesel, kavitas, Computational Fluid Dynamics (CFD), orifice, reaktor

*Diterima: 17 Desember 2021; Disetujui: 5 April 2022*

## Pendahuluan

Volume impor BBM yang semakin besar sangat menguras devisa negara. Pada sektor transportasi, pengurangan impor BBM dilakukan dengan mewajibkan pencampuran biodiesel ke dalam minyak solar. Hal ini tertuang dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) no.12 tahun 2015 (Permen ESDM 2015).

Perbaikan kualitas biodiesel dan penggunaan teknologi yang dapat menekan biaya produksi biodiesel harus dicarikan solusinya, dikarenakan kualitas dan harga biodiesel saat ini belum dapat bersaing dengan minyak solar. Saat ini perhatian terhadap reaktor transesterifikasi semakin tumbuh karena kebutuhan dalam hal mengurangi biaya modal, konsumsi energi dan air, kebutuhan ruang, waktu reaksi, aliran limbah, beban lingkungan sekaligus meningkatkan kualitas biodiesel dan meningkatkan efisiensi konversi. Sangat penting mengembangkan reaktor transesterifikasi serba guna yang murah dan dapat dilakukan *scale-up* yang dapat diterapkan pada berbagai bahan baku dengan kualitas yang berbeda (Tabatabaei *et al.* 2019). Penelitian untuk membandingkan reaktor kavitas hidrodinamik dengan reaktor tangki berpengaduk dilakukan oleh Kolhe *et al.* (2017) dimana reaktor kavitas hidrodinamik tidak hanya meningkatkan konversi dan *yield* dalam waktu singkat tetapi juga mengurangi jumlah kebutuhan alkali (KOH), yang mana dapat membantu mengurangi waktu separasi.

Moholkar dan Pandit (2001) melakukan simulasi numerik dinamika gelembung pada reaktor kavitas hidrodinamik tipe venturi dan *orifice* hasilnya intensitas kavitas yang dihasilkan dalam aliran *orifice* jauh lebih besar dibandingkan dengan aliran venturi. Kuldeep dan Saharan (2016) melakukan simulasi CFD reaktor kavitas hidrodinamik tipe venturi dan *orifice*. Fluida yang digunakan dalam simulasi yaitu air. Simulasi dilakukan dalam model 3D untuk mengamati domain aliran dan domain aliran dipotong dalam model 2D sepanjang sumbu geometri untuk analisis. Kavitas optimal pada tekanan *inlet gauge* 8 atm baik *orifice* dengan lubang *single* maupun *multiple*. Li *et al.* (2008) melakukan simulasi CFD pelat *orifice* lubang tunggal menggunakan 2 (dua) model kavitas yaitu Zwart-Gerber-Belamri dan Schnerr-Sauer. Fluida yang digunakan dalam simulasi yaitu air. Hasilnya kedua model kavitas menghasilkan solusi yang hampir identik. Ebrahimi *et al.* (2017) melakukan penelitian sistematis aliran tekanan tinggi melalui pelat *orifice* tebal dalam pipa. Fluida yang digunakan dalam penelitian yaitu air. Penulis memperkirakan rasio tekanan kritis ( $P_1/P_2$ ) kurang dari 0.45 dimana kavitas dan aliran terhambat. Simpson dan Ranade (2018) melakukan simulasi CFD kavitas pada berbagai desain *orifice* dengan berbagai kondisi operasi. Parameter geometris meliputi ketebalan

*orifice*, ketajaman lubang masuk dan sudut dinding *orifice* berkaitan dengan perilaku kavitas dibahas secara kuantitatif. Penelitian menemukan bahwa ketebalan lubang secara signifikan mempengaruhi perilaku kavitas. Ferrarese *et al.* (2015) melakukan penelitian dan mengusulkan metode baru untuk memprediksi indeks awal kavitas menggunakan CFD. Simulasi CFD menggunakan pendekatan permodelan *single phase* pada pelat *orifice* dengan lubang banyak melalui berbagai konfigurasi  $\beta$ ,  $L/d_0$ ,  $n_0$ .

Kavitas merupakan suatu fenomena perubahan fase uap dari zat cair pada fluida yang mengalir ketika melewati sebuah lobang yang sempit seperti venturi atau *orifice* (Moholkar *et al.* 1999). Menurut Shah *et al.* (1999), kavitas merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung secara cepat. Kavitas secara definisi adalah pembentukan dan aktivitas gelembung atau rongga dalam suatu cairan. Kavitas hidrodinamik dihasilkan oleh perbedaan tekanan dalam cairan mengalir yang disebabkan oleh perbedaan kecepatan di dalam sistem.

Penelitian ini meliputi analisis *orifice* pada reaktor biodiesel sistem kavitas hidrodinamik dengan bantuan *software* berbasis *computational fluid dynamics* (CFD). Metode CFD memiliki keuntungan yaitu dapat melakukan analisis sistem atau alat yang sulit dibuat *prototype*-nya atau sulit untuk dilakukan pengujian, dapat memprediksi apa yang akan terjadi pada alat atau sistem yang didesain, selain itu dapat membantu mendesain lebih cepat dan hemat uang (Tuakia 2008). Penelitian ini bertujuan menentukan desain *orifice* optimal dari beberapa desain *orifice* yang diuji melalui simulasi CFD serta melakukan validasi melalui pengujian *orifice* pada reaktor biodiesel sistem kavitas hidrodinamik. Keterbaruan dari penelitian ini yaitu desain *orifice* disesuaikan dengan reaktor biodiesel kavitas hidrodinamik kapasitas 4 liter dan jumlah serta konfigurasi lubang *orifice* dirancang dengan kondisi tekanan seminimal mungkin (tekanan absolut maksimum  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>).

## Bahan dan Metode

Penelitian dilakukan dengan melakukan simulasi komputer dan eksperimental untuk validasi. Perangkat lunak yang digunakan untuk perancangan *orifice* yaitu CATIA dan untuk simulasi aliran fluida menggunakan ANSYS Fluent. Sedangkan alat untuk melakukan validasi hasil simulasi yaitu reaktor kavitas hidrodinamik tipe *orifice* (sistem *batch*). Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah metanol teknis dengan tingkat kemurnian 96%.

### Perancangan Peralatan Kavitas

Konfigurasi reaktor kavitas hidrodinamik

dapat dilihat pada Gambar 1. Reaktor kavitasasi hidrodinamik terdiri dari *storage tank* (untuk menyimpan metanol) yang dihubungkan ke pompa (untuk mengalirkan metanol menuju *storage tank* melewati *orifice*), kemudian pada *discharge* pompa dihubungkan pipa yang dicabang menjadi dua jalur yaitu jalur utama dan jalur *bypass*. Pada jalur utama setelah *discharge* pompa atau sebelum *storage tank* dipasang peralatan kavitasasi (*orifice*).

Peristiwa kavitasasi yang terjadi di dalam peralatan kavitasasi dan efeknya pada sintesis biodiesel digambarkan menggunakan bilangan tak berdimensi, yang dikenal sebagai bilangan kavitasasi ( $C_v$ ) yang dijabarkan pada persamaan 1 (Rajoriya *et al.* 2016). Bilangan tak berdimensi ini dapat digunakan untuk *scale up* reaktor kavitasasi hidrodinamik. Bila nilai  $C_v$  diketahui, area *throat* peralatan kavitasasi dapat ditentukan berdasarkan kecepatan pada *throat* dan laju aliran volumetrik cairan yang perlu dilewatkan melalui peralatan kavitasasi hidrodinamik (Bargole *et al.* 2019).

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (1)$$

$P_2$  adalah tekanan *downstream* yang *recovery* sepenuhnya ( $N/m^2$ ),  $P_v$  adalah tekanan uap cairan pada suhu operasi ( $N/m^2$ ),  $\rho$  adalah massa jenis cairan ( $kg/m^3$ ) dan  $v$  adalah kecepatan cairan pada *throat* peralatan kavitasasi ( $m/s$ ). Kavitasasi tidak optimum pada kondisi  $C_v > 1$  sedangkan intensitas kavitasasi meningkat karena nilai  $C_v$  di bawah 1.

Menurut Bargole *et al.* (2019) lebih banyak gelembung dihasilkan pada bilangan kavitasasi yang lebih rendah selama *cavity collapse*, aliran *microjet* yang terjadi dapat memecah permukaan antara minyak dan metanol. Selain itu, *shear* yang lebih tinggi terjadi di daerah *throat* karena kecepatan cairan yang tinggi pada  $C_v$  yang lebih rendah, menghasilkan laju perpindahan massa yang lebih tinggi dan dengan demikian rendemen biodiesel yang lebih tinggi diperoleh pada tekanan yang lebih tinggi dan  $C_v$  yang rendah. Ketika tekanan operasi meningkat melebihi nilai optimal, rendemen biodiesel menurun karena kondisi kavitasasi yang tersumbat terjadi pada tekanan yang lebih tinggi dan bagian *downstream* diisi oleh *cavity clouds* besar sehingga mengurangi intensitas kavitasasi dan rendemen biodiesel.

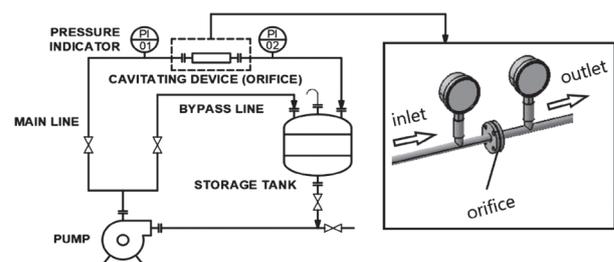
Menurut Bargole *et al.* (2019) parameter geometris  $\alpha$  yang merupakan rasio keliling *throat* terhadap luas penampang aliran dari setiap peralatan kavitasasi adalah signifikan karena setiap perubahan dalam  $\alpha$  mempengaruhi jumlah gelembung yang terjadi pada *throat* dan pada akhirnya mempengaruhi hasil kavitasasi. Nilai  $\alpha$  untuk area *throat* tertentu dapat diubah dengan memvariasikan keliling *throat*/lubang peralatan kavitasasi baik dengan mengubah bentuk *throat* dari melingkar menjadi persegi panjang dengan

tinggi dan panjang yang bervariasi atau dengan menambah jumlah lubang dengan ukuran yang lebih kecil.

### Simulasi CFD

Simulasi CFD kavitasasi pada *orifice* dilakukan untuk memberikan gambaran geometri, aliran fluida serta perubahan fasa fluida yang dapat divisualisasikan agar mempermudah dalam menganalisis dan menentukan *orifice* yang optimum untuk reaktor kavitasasi hidrodinamik. Simulasi CFD kavitasasi pada *orifice* hanya menggunakan satu fluida yaitu metanol dikarenakan keterbatasan dalam pemodelan kavitasasi yang hanya dapat digunakan untuk satu proses kavitasasi. Dengan kata lain hanya satu fluida cair yang mengalami kavitasasi. ANSYS FLUENT tidak dapat mensimulasikan beberapa proses kavitasasi (ANSYS 2013). Alasan pemilihan metanol dalam simulasi kavitasasi yaitu pada reaksi biodiesel metanol diasumsikan membentuk gelembung uap. Adapun proses pembuatan biodiesel dengan bantuan katalis meliputi pencampuran atau reaksi transesterifikasi, pemisahan gliserol yang merupakan produk samping, dan pemurnian metil ester atau FAME dari katalis (Sivasamy *et al.* 2009). Kelebihan produksi biodiesel dengan bantuan katalis yaitu reaksi dapat berjalan lebih cepat pada temperatur reaksi rendah, sedangkan kekurangannya adalah proses pemurnian produk memerlukan tahapan yang panjang karena harus dilakukan pencucian berulang (Thompson dan He 2007; Sivasamy *et al.* 2009; Alamsyah 2010; Panggabean 2011). Selain itu, diperlukan pengadukan yang kuat pada saat reaksi karena sifat metanol dalam minyak yang sulit bercampur pada kondisi biasa atau bersifat imisibel (Sivasamy *et al.* 2009). Selain pengadukan yang kuat, pada metode non katalitik faktor yang mempengaruhi laju reaksi antara lain luas permukaan kontak antara metanol dan minyak (Joelianingsih *et al.* 2008). Pada reaktor kavitasasi hidrodinamik tipe *orifice*, gelembung kavitasasi yang optimal akan meningkatkan luas permukaan kontak antara metanol dan minyak. Penelitian ini mencoba mensimulasikan efek kavitasasi fluida metanol yang dihasilkan dari beberapa model *orifice* pada berbagai kondisi tekanan.

Prosedur simulasi CFD dimulai dengan pembuatan geometri *orifice* pada reaktor kavitasasi



Gambar 1. Konfigurasi reaktor kavitasasi hidrodinamik.

Tabel 1. Karakteristik bahan.

Bahan	Berat molekul (kg/kmol)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Kapasitas panas (J/kg.K)	Konduktivitas (W/m.K)	Viskositas (kg/m.s)
Metanol	32.03	785	2534	0.20	5.5x10 <sup>-4</sup>

Sumber: Nitamiwati (2018)

hidrodinamik menggunakan *software Catia*. Proses selanjutnya yaitu *meshing* menggunakan *software ANSYS FLUENT*. *Meshing* merupakan ikatan-ikatan pembentukan geometri, dimana *mesh* yang bisa diterima agar iterasi berjalan dengan baik adalah memiliki nilai *skewness* <0.9. Selanjutnya menentukan kondisi batas (*boundary layer*) yaitu nilai batas metanol yang dapat dilihat pada Tabel 1. Langkah selanjutnya visualisasi distribusi fluida dengan iterasi tertentu sesuai target yang diinginkan dengan memasukkan data inputan yang dibutuhkan.

Simulasi kavitasi yang dipilih yaitu menggunakan model Schnerr dan Sauer yang merupakan model *default*. Model ini dapat digunakan pada model *multiphase mixture*. Metode CFD yang digunakan melibatkan persamaan berikut ini (ANSYS 2013):

1. Persamaan *transport* uap

Dengan pendekatan pemodelan kavitasi multi fase, model kavitasi dua fase dasar terdiri dari penggunaan persamaan aliran viskos standar yang mengatur transportasi campuran (*mixture model*) dan model turbulensi konvensional (model  $k-\epsilon$ ). Dalam kavitasi, perpindahan massa uap-cair (evaporasi dan kondensasi) diatur oleh persamaan transpor uap berikut ini :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_v) = R_e - R_c \tag{2}$$

Pada persamaan 2,  $v$  adalah fase uap,  $\alpha_v$  adalah fraksi volume uap,  $\rho_v$  adalah densitas uap (kg/m<sup>3</sup>),  $\vec{v}_v$  adalah kecepatan fase uap (m/s), dan  $R_e-R_c$  adalah sumber perpindahan massa.

2. Persamaan dinamika gelembung

Persamaan dinamika gelembung diturunkan dari persamaan umum Rayleigh-Plesset dimana cairan yang mengalir dengan slip kecepatan antara fluida dan gelembung yaitu nol. Persamaan tersebut disederhanakan dengan mengabaikan suku orde dua dan gaya tegangan permukaan sehingga persamaannya menjadi sebagai berikut :

$$\frac{D\mathfrak{R}_B}{Dt} = \sqrt{\frac{2 P_b - P}{3 \rho_l}} \tag{3}$$

Pada persamaan 3,  $\mathfrak{R}_B$  adalah radius gelembung (m),  $\rho_l$  adalah densitas cairan (kg/m<sup>3</sup>),  $P_b$  adalah tekanan permukaan gelembung (N/m<sup>2</sup>), dan  $P$  adalah tekanan *local far-field* (N/m<sup>2</sup>).

3. Model Schnerr dan Sauer

Schnerr dan Sauer menggunakan persamaan berikut untuk menghubungkan fraksi volume uap dengan jumlah gelembung per volume cairan :

$$\alpha_v = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi \mathfrak{R}_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi \mathfrak{R}_B^3} \tag{4}$$

Pada persamaan 4,  $\alpha_v$  adalah fraksi volume uap,  $\mathfrak{R}_B$  adalah radius gelembung (m), dan  $n_b$  adalah densitas *bubble number* (m<sup>-3</sup>).

Model kavitasi yang dikembangkan Schnerr dan Sauer dijabarkan pada persamaan berikut ini :

Ketika  $P_v \geq P$

$$R_e = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2(P_v - P)}{3 \rho_l}} \tag{5}$$

Ketika  $P_v \leq P$

$$R_c = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{\mathfrak{R}_B} \sqrt{\frac{2(P - P_v)}{3 \rho_l}} \tag{6}$$

Di mana

$$\mathfrak{R}_B = \left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{7}$$

Pada persamaan 5, 6 dan 7,  $R_e-R_c$  adalah sumber perpindahan massa,  $\rho_v$  adalah densitas uap (kg/m<sup>3</sup>),  $\rho_l$  adalah densitas cairan (kg/m<sup>3</sup>),  $\alpha_v$  adalah fraksi volume uap,  $\rho$  adalah densitas campuran (kg/m<sup>3</sup>),  $P$  adalah tekanan *local far-field* (N/m<sup>2</sup>),  $P_v$  adalah tekanan uap saturasi (N/m<sup>2</sup>),  $\mathfrak{R}_B$  adalah radius gelembung (m), dan  $n$  adalah densitas *bubble number* (m<sup>-3</sup>).

Simulasi CFD *orifice* dalam pipa horizontal dilakukan dengan pemodelan 3D untuk mengamati pola aliran fluida akibat pemasangan pelat *orifice*. Analisis parameter kecepatan, tekanan, energi kinetik turbulen dan fraksi volume uap dilakukan pada bidang 2D yang dipotong sepanjang sumbu geometri. *Meshing* yang digunakan dalam model 3D *orifice* yaitu *polyhedral*. *Meshing* pada bagian lubang *orifice* lebih halus dibandingkan dengan area *inlet* dan *outlet* yang tidak mengalami gradasi tekanan. Pendekatan pemodelan kavitasi menggunakan *multiphase mixture model* pada kondisi *steady* dan mengabaikan kecepatan *slip* dekat dinding pipa. Fasa cair dan uap dianggap tidak dapat dimampatkan. Model turbulensi menggunakan *realizable k-ε*. Pada penentuan kondisi batas,

tekanan absolut *inlet* yaitu  $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  dan  $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  pada masing-masing *orifice* dan tekanan *outlet* diset pada kondisi atmosferik. Metode *solving* untuk *pressure velocity coupling* menggunakan skema *coupled*. Diskritisasi tekanan menggunakan PRESTO!, diskritisasi fraksi volume menggunakan *modified HRIC*, diskritisasi momentum, energi kinetik turbulensi dan *turbulent dissipation rate* menggunakan QUICK.

**Hasil dan Pembahasan**

**Rancangan Orifice Reaktor Kavitas Hidrodinamik**

Spesifikasi pelat *orifice* yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada tabel 2. Terdiri dari 4 (empat) pelat *orifice* dengan jumlah lubang ( $n_0$ ) dan diameter lubang ( $d_0$ ) yang berbeda, sementara tebal pelat orifice ( $L_0$ ) sama yaitu 2,9 mm. Konfigurasi lubang *orifice* dapat dilihat pada gambar 2.

**Simulasi CFD Orifice**

Tahap awal sebelum melakukan simulasi CFD yaitu pembuatan geometri fluida yang akan dianalisis. Geometri fluida dalam pipa melewati *orifice* dibuat dalam model 3D untuk mengetahui lebih jelas pola aliran yang terjadi. Model 3D dibuat menggunakan *software Catia*. Gambar 3 menggambarkan geometri 3D fluida untuk simulasi

Tabel 2. Spesifikasi pelat *orifice*.

Deskripsi	Pelat			
	A	B	C	D
$d_0$ (mm)	2	1.5	1	0.5
$L_0$ (mm)	2.9	2.9	2.9	2.9
$\alpha$ (mm <sup>-1</sup> )	2	3	4	8
$L_0/d_0$	1.45	1.93	2.90	5.80
$n_0$	2	4	9	37

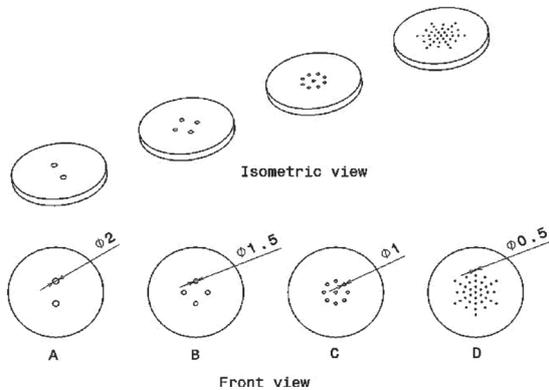
CFD dengan panjang total 200 mm, jarak *inlet* ke pusat *orifice* 50 mm dan jarak pusat *orifice* ke *outlet* 150 mm. Analisis dilakukan pada bidang 2D sepanjang sumbu z dengan center *orifice* di koordinat 0 mm.

*Software ANSYS Fluent* melakukan impor geometri yang dibuat pada *software Catia*. Tahap selanjutnya *meshing* menggunakan *mesh* jenis *polyhedral*. *Mesh* jenis *polyhedral* dipilih dengan alasan agar iterasi berjalan lebih cepat dengan akurasi hasil simulasi yang tinggi. Kualitas *mesh* mempengaruhi ketepatan hasil simulasi, oleh karena itu perlu dilakukan pengecekan yaitu dengan melihat nilai *skewness* (<0.9).

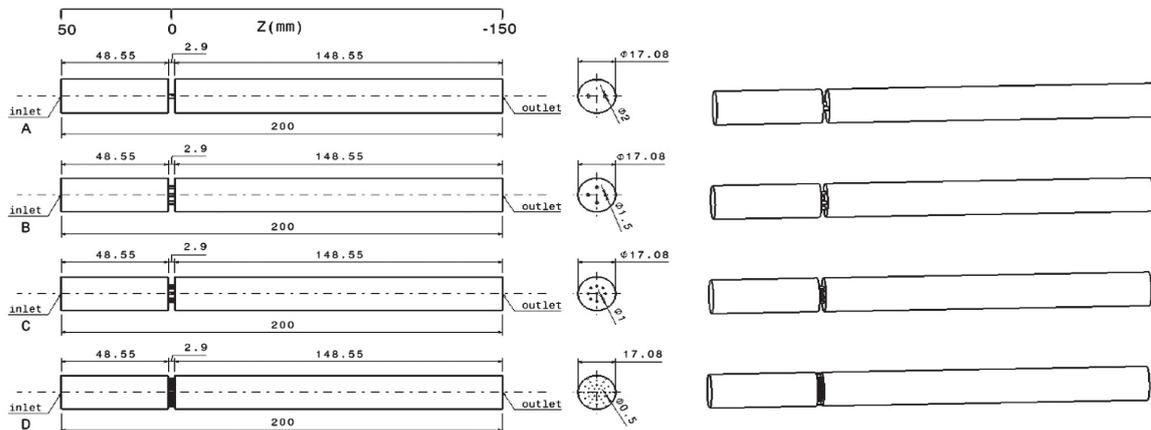
Kondisi batas pada pemodelan fluida meliputi *inlet*, *outlet* dan *wall*. Pada *inlet* tiap-tiap model diberi tekanan absolut  $1,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $2 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ ;  $2,5 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  dan  $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ , sedangkan pada *outlet* dikondisikan bertekanan atmosferik. Fluida yang digunakan yaitu metanol pada kondisi suhu ruang (20°C).

**Analisis Fluida pada Orifice**

Analisis yang dilakukan pada *orifice* A, B, C dan D meliputi beberapa parameter untuk memperoleh desain *orifice* yang optimal dalam menghasilkan kavitas namun dengan kondisi tekanan *inlet* seminimal mungkin. Hasil simulasi masing-masing *orifice* dapat dilihat pada tabel 3. Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa pada tekanan  $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  mengalami peningkatan kecepatan, fraksi volume uap dan energi kinetik turbulen, sedangkan pada suhu 20°C tekanan dapat mencapai tekanan uap metanol yaitu 12266 N/m<sup>2</sup> (NCBI 2022) yang



Gambar 2. Konfigurasi lubang *orifice*.



Gambar 3. Geometri fluida.

Tabel 3. Hasil simulasi *orifice* A, B, C dan D.

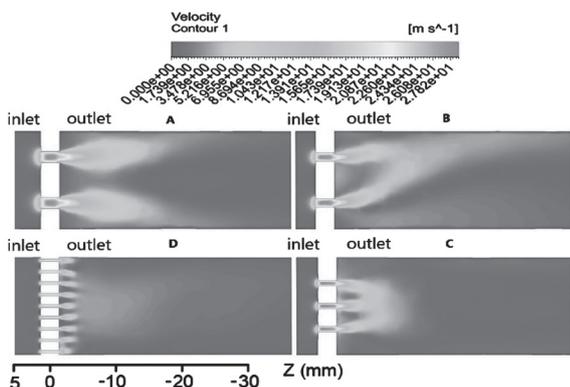
Parameter	Orifice	Tekanan (N/m <sup>2</sup> )			
		1.5x10 <sup>5</sup>	2x10 <sup>5</sup>	2.5x10 <sup>5</sup>	3x10 <sup>5</sup>
v maks (m/s)	A	12.73	18.10	22.04	28.59
	B	12.49	17.88	22.12	28.60
	C	12.69	18.11	25.94	28.69
	D	12.17	17.40	21.06	25.30
P min (N/m <sup>2</sup> )	A	40911.9	19638.1	12266.0	12266.0
	B	32658.7	18548.9	12266.0	12266.0
	C	25963.3	15706.2	12266.0	12266.0
	D	34383.3	17424.7	12266.0	12266.0
Fraksi volume uap maks	A	8.40E-28	0.14	0.97	0.99
	B	0.00	0.36	0.94	0.95
	C	0.00	0.76	0.97	0.98
	D	0.00	0.001	0.38	0.78
k maks (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	A	1.77	3.63	5.48	7.46
	B	1.57	3.13	4.72	15.3
	C	2.77	4.53	7.51	12.75
	D	2.02	3.75	4.78	6.49

mengindikasikan terjadinya kavitasi. Kavitasi yang optimum juga dapat ditentukan dengan nilai  $C_v < 1$ , sebagaimana dapat dilihat pada tabel 4. Bilangan kavitasi terkecil tiap-tiap *orifice* terjadi pada tekanan  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>.

Berdasarkan hasil simulasi tersebut maka yang akan dibahas lebih lanjut yaitu kondisi *orifice* dengan tekanan *inlet*  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>.

**Kecepatan.** Parameter kecepatan fluida merupakan faktor penting dalam pembentukan gelembung kavitasi. Pada area kecepatan tinggi (*downstream*) terbentuk tekanan fluida yang lebih rendah dari tekanan uapnya, hal inilah yang mengakibatkan terjadinya kavitasi. Gambar 4 menunjukkan perbandingan kontur kecepatan yang terjadi pada *orifice* A, B, C dan D pada tekanan *inlet*  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Berdasarkan warna yang terbentuk, kecepatan pada *orifice* D lebih rendah dibandingkan *orifice* lainnya.

Gambar 5 menunjukkan grafik kecepatan pada *orifice* A, B, C dan D mulai dari *inlet* di posisi 0.02 m, center *orifice* di posisi 0 m sampai *outlet* di posisi



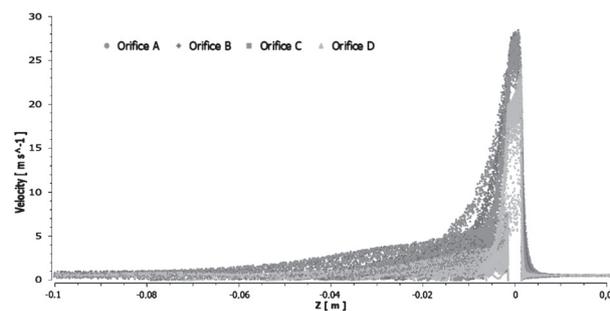
Gambar 4. Kontur kecepatan *orifice* A, B, C dan D.

Tabel 4. Bilangan kavitasi *orifice* A, B, C dan D.

Tekanan (N/m <sup>2</sup> )	Bilangan kavitasi ( $C_v$ )			
	Orifice A	Orifice B	Orifice C	Orifice D
1.5x10 <sup>5</sup>	1.40	1.45	1.41	1.53
2x10 <sup>5</sup>	0.69	0.71	0.69	0.75
2.5x10 <sup>5</sup>	0.47	0.46	0.34	0.51
3x10 <sup>5</sup>	0.28	0.28	0.28	0.35

-0.1 m. Pada grafik ini terlihat jelas bahwa sebaran kecepatan fluida pada *orifice* D lebih rendah dibandingkan dengan *orifice* lainnya, hal ini sesuai dengan kontur kecepatan yang terbentuk pada Gambar 4.

**Tekanan.** Parameter tekanan dapat dijadikan acuan dalam analisis terbentuknya gelembung kavitasi. Indikasi terbentuknya gelembung kavitasi yaitu pada area *downstream* tekanan fluida lebih kecil dibandingkan area *upstream*, bahkan lebih kecil dari tekanan uapnya (ANSYS 2019). Gambar 6 menunjukkan kontur tekanan *orifice* A, B, C dan D pada kondisi tekanan *inlet*  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Berdasarkan gambar tersebut, tekanan lebih rendah



Gambar 5. Grafik kecepatan pada *orifice* A, B, C dan D.

terbentuk pada *orifice* A, B dan C bila dibandingkan dengan *orifice* D. Hal tersebut mengindikasikan terbentuknya gelembung uap pada *orifice* D lebih rendah bila dibandingkan *orifice* lainnya.

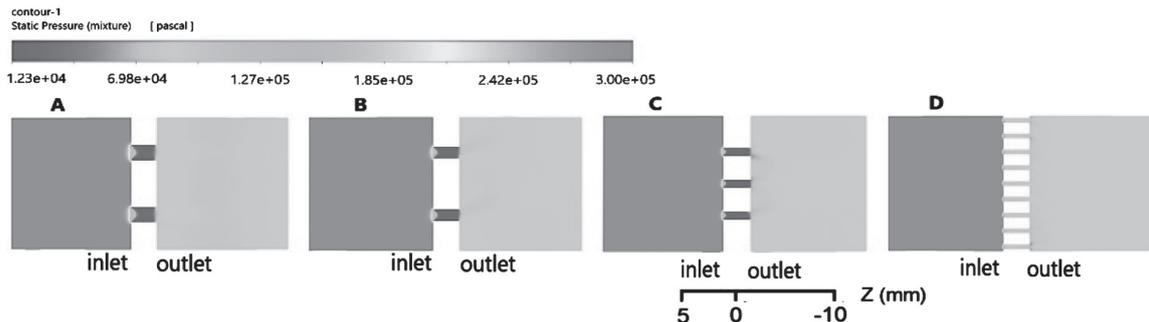
Gambar 7 menunjukkan grafik tekanan pada *orifice* A, B, C dan D mulai dari *inlet* di posisi 0.03 m, center *orifice* di posisi 0 m sampai *outlet* di posisi -0.03 m. Tekanan *inlet*  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup> mengalami penurunan drastis sampai  $12.266 \times 10^3$  N/m<sup>2</sup> saat melewati lubang *orifice*, namun pada *orifice* D penurunan hanya terjadi pada mulut *orifice* selanjutnya mengalami kenaikan kembali sedikit di atas tekanan atmosferik. Pada area tersebut terjadi hambatan yang mengakibatkan tidak maksimalnya pembentukan gelembung uap.

**Energi kinetik turbulen.** Parameter energi kinetik turbulen dapat menggambarkan pusaran arus pada aliran turbulen dan berkaitan dengan terjadinya fluktuasi tekanan dan kecepatan serta transfer masa pada area *downstream*. Hal ini berkontribusi terhadap kavitasi (ANSYS 2019). Gambar 8 menunjukkan perbandingan kontur energi kinetik turbulen yang terjadi pada *orifice* A, B, C dan D pada tekanan *inlet*  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Berdasarkan warna yang terbentuk, energi kinetik turbulen pada *orifice* D lebih rendah dibandingkan *orifice* lainnya. Hal tersebut berkaitan dengan terjadinya hambatan

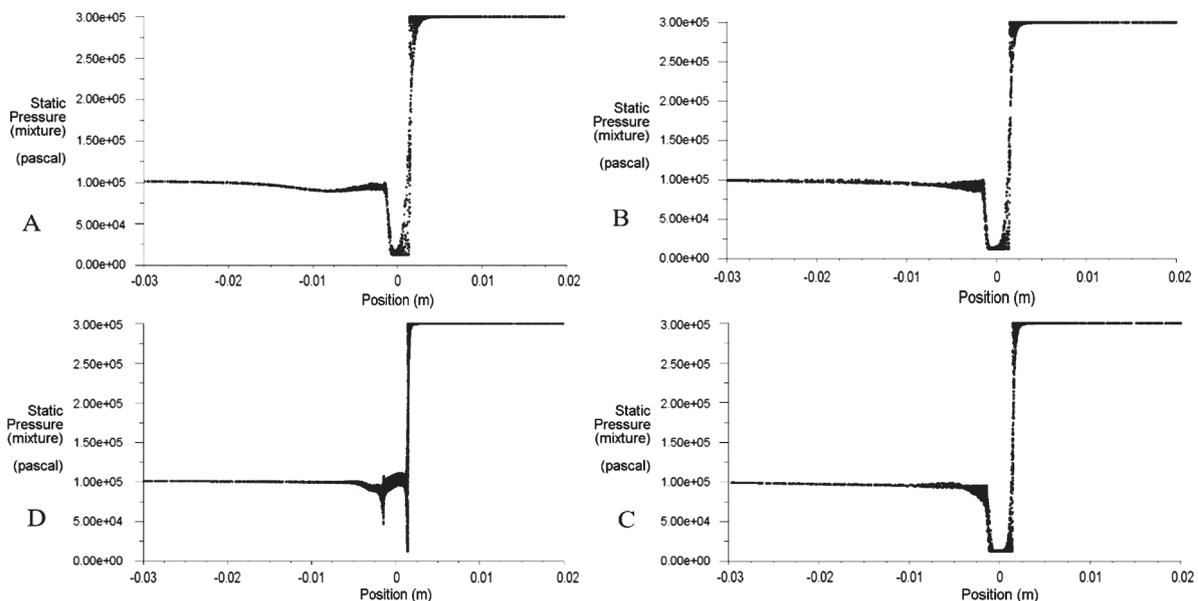
yang mengakibatkan tidak optimalnya kecepatan dan tekanan sebagaimana penjelasan pada parameter kecepatan dan tekanan.

Gambar 9 menunjukkan grafik energi kinetik turbulen pada *orifice* A, B, C dan D mulai dari *inlet* di posisi 0.005 m, center *orifice* di posisi 0 m sampai *outlet* di posisi -0.08 m. Pada grafik ini terlihat bahwa sebaran energi kinetik turbulen pada *orifice* D lebih rendah dibandingkan dengan *orifice* lainnya, hal ini sesuai dengan kontur energi kinetik turbulen yang terbentuk pada Gambar 8. Nilai tertinggi terjadi pada *orifice* B dan C di area *outlet*. Sedangkan setelah melewati *outlet*, sebaran energi kinetik turbulen tertinggi terjadi pada *orifice* A.

**Fraksi volume uap.** Energi kinetik turbulen tinggi di area dekat leher *orifice* seperti pada Gambar 8 dipadukan dengan fraksi volume uap tertinggi seperti pada Gambar 10 menunjukkan kebenaran prediksi dari laju perubahan fasa yang tinggi (ANSYS 2019). Uap kemudian dialirkan ke area *downstream* oleh aliran utama. Gambar 10 menunjukkan kontur fraksi volume uap *orifice* A, B, C dan D pada kondisi tekanan *inlet*  $3 \times 10^5$  N/m<sup>2</sup>. Berdasarkan warna yang terbentuk, fraksi volume uap pada *orifice* D lebih rendah dibandingkan *orifice* lainnya.



Gambar 6. Kontur tekanan *orifice* A, B, C dan D.



Gambar 7. Grafik tekanan pada *orifice* A, B, C dan D.

Gambar 11 menunjukkan grafik fraksi volume uap pada *orifice* A, B, C dan D mulai dari *inlet* di posisi 0.003 m, center *orifice* di posisi 0 m sampai *outlet* di posisi -0.002 m. Pada grafik ini terlihat bahwa sebaran fraksi volume uap pada *orifice* D lebih rendah dibandingkan dengan *orifice* lainnya, hal ini sesuai dengan kontur fraksi volume uap yang terbentuk pada Gambar 10. Nilai tertinggi terjadi pada *orifice* A, urutan kedua *orifice* C dan urutan ketiga *orifice* B. Sedangkan berdasarkan Gambar 12 yang menunjukkan histogram fraksi volume uap, jika dibandingkan antara *orifice* A dan C maka frekuensi tertinggi terjadi pada *orifice* C yang mengindikasikan pembentukan gelembung uap lebih banyak.

Berdasarkan hasil simulasi CFD pada *orifice* A, B, C dan D, parameter kecepatan, tekanan, energi kinetik turbulen dan fraksi volume uap optimum terjadi pada *orifice* A dan C pada tekanan *inlet*  $3 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ . Namun berdasarkan grafik histogram fraksi volume uap, *orifice* C memiliki frekuensi lebih tinggi dibandingkan *orifice* A yang mengindikasikan terbentuknya gelembung kavitas lebih banyak. Sehingga *orifice* yang dipilih untuk reaktor kavitas hidrodinamik yaitu *orifice* C dengan diameter lubang 1 mm dan jumlah lubang sebanyak 9 (sembilan) buah. Adapun pentingnya gelembung kavitas yang dihasilkan optimum yaitu dapat menghasilkan turbulensi dan sirkulasi mikro cairan pada saat hancur yang meningkatkan laju perpindahan

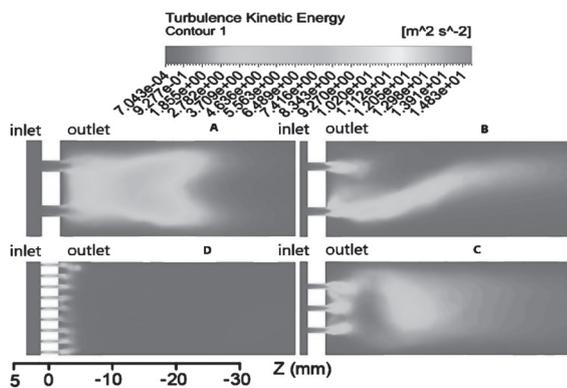
massa, momentum dan panas sehingga dapat meningkatkan laju reaksi.

**Pabrikasi dan Validasi Orifice**

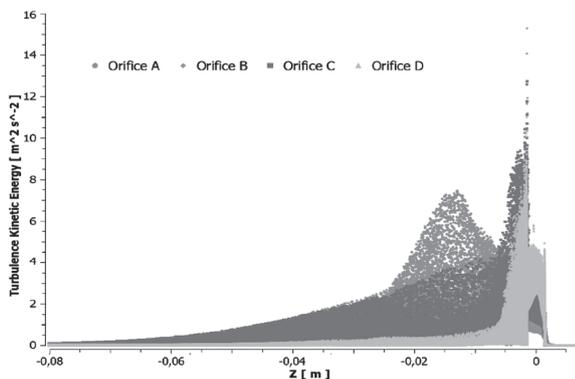
*Orifice* yang dipilih berdasarkan hasil simulasi CFD untuk dilakukan pabrikasi yaitu *orifice* C (9 buah lubang dengan diameter 1 mm). Sebagai bahan pembanding dalam melakukan validasi maka dilakukan pabrikasi pada *orifice* D (37 lubang dengan diameter 0.5 mm). Alasan pemilihan *orifice* D sebagai bahan pembanding karena berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan Bargole et al. (2019) yaitu dengan meningkatkan keliling lubang atau jumlah lubang dengan ukuran yang lebih kecil maka akan menghasilkan lebih banyak gelembung dan meningkatkan hasil kavitas.

Validasi *orifice* meliputi parameter tekanan dan kecepatan dengan membandingkan hasil simulasi CFD dan eksperimen. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa fluida yang digunakan dalam simulasi yaitu metanol, sehingga dalam eksperimen pun menggunakan metanol.

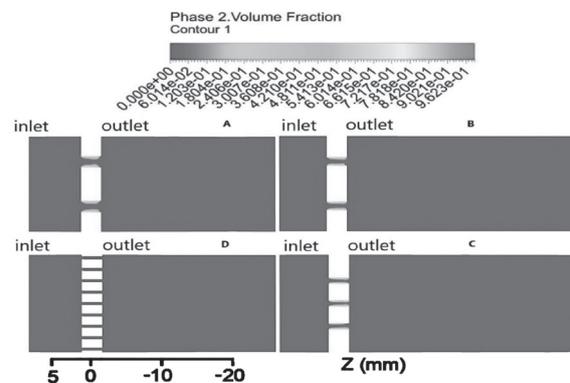
**Validasi tekanan.** Tekanan *upstream* dan *downstream* hasil simulasi dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mengetahui keberhasilan simulasi CFD yang telah dilakukan. Gambar 13 menunjukkan tekanan *upstream* dan *downstream* hasil simulasi dan eksperimen. Pada tekanan *upstream* diatur sesuai simulasi CFD yaitu  $1,5 \times 10^5$



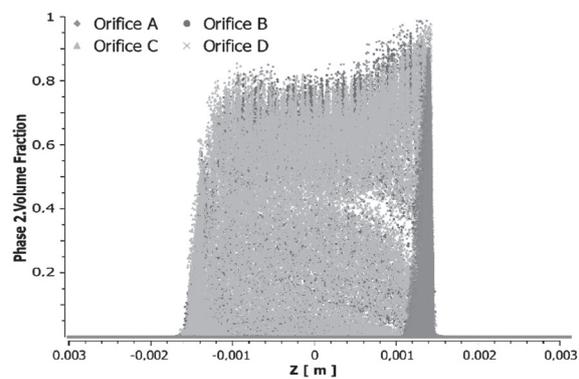
Gambar 8 Kontur energi kinetik turbulen pada *orifice* A, B, C dan D.



Gambar 9 Grafik energi kinetik turbulen pada *orifice* A, B, C dan D..



Gambar 10 Kontur fraksi volume uap pada *orifice* A, B, C dan D



Gambar 11 Grafik fraksi volume uap pada *orifice* A, B, C dan D.

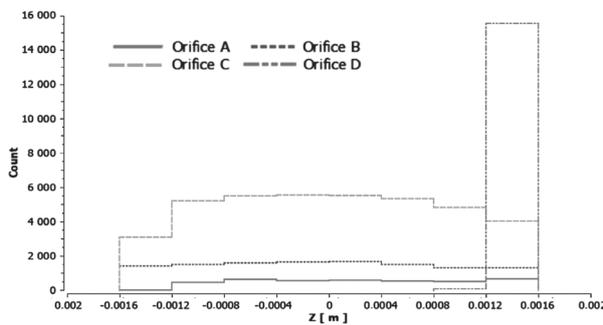
$N/m^2$ ;  $2 \times 10^5 N/m^2$ ;  $2,5 \times 10^5 N/m^2$  dan  $3 \times 10^5 N/m^2$ . Hasilnya menunjukkan bahwa tekanan *downstream* pada posisi 0,035 m dari center pelat *orifice* tidak menunjukkan penyimpangan yang berarti baik pada *orifice* C maupun *orifice* D.

**Validasi kecepatan.** Parameter kecepatan hasil simulasi CFD dan eksperimen dibandingkan untuk mengetahui keberhasilan simulasi CFD. Hal ini dilakukan agar data pembandingan lebih banyak lagi selain yang dilakukan pada parameter tekanan sehingga keakuratannya lebih baik. Gambar 14 menunjukkan kecepatan *downstream* hasil simulasi dan eksperimen dimana tekanan *upstream* yaitu  $1,5 \times 10^5 N/m^2$ ;  $2 \times 10^5 N/m^2$ ;  $2,5 \times 10^5 N/m^2$  dan  $3 \times 10^5 N/m^2$ . Hasilnya menunjukkan bahwa kecepatan *downstream* pada posisi 0.12 m dari center pelat

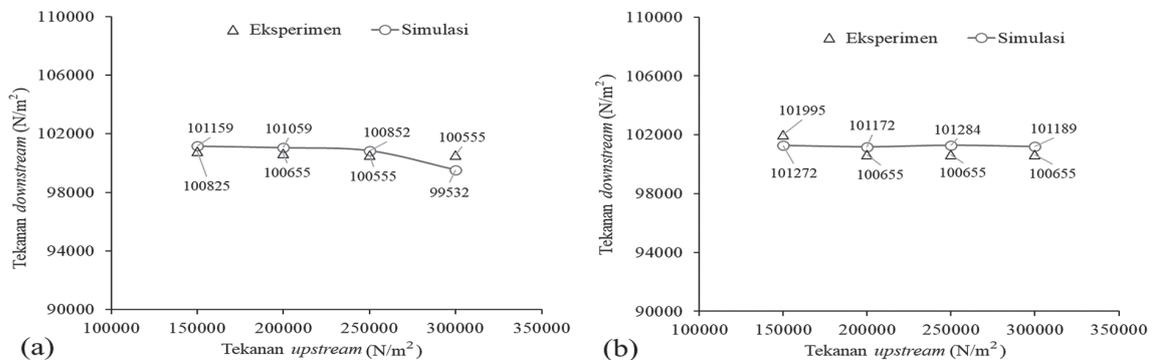
*orifice* C dan D yang diukur menggunakan *flowmeter* tidak menunjukkan penyimpangan yang berarti.

**Simpulan**

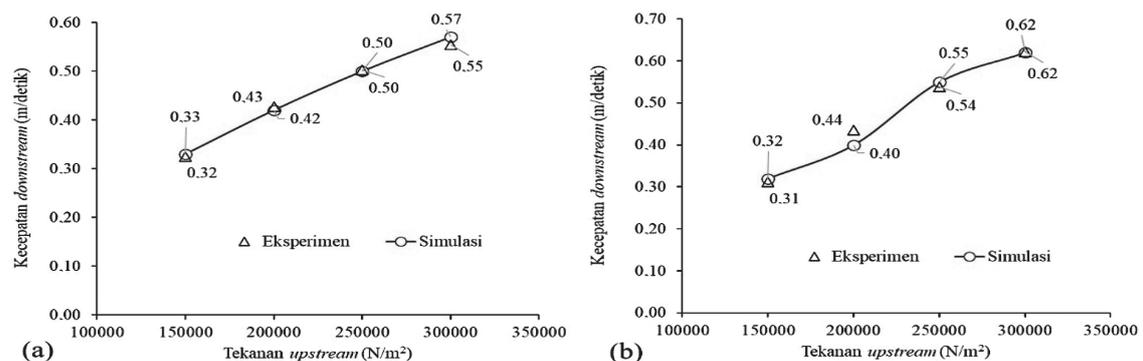
Simulasi komputer yang dilakukan terhadap *orifice* A (2 lubang dengan diameter 2 mm), B (4 lubang dengan diameter 1.5 mm), C (9 lubang dengan diameter 1 mm) dan D (37 lubang dengan diameter 0.5 mm) menggunakan model Schnerr dan Sauer menunjukkan bahwa *orifice* C merupakan yang optimal menghasilkan kavitas pada kondisi tekanan absolut *inlet*  $3 \times 10^5 N/m^2$  dengan penggunaan fluida metanol. Hal tersebut berdasarkan parameter yang diteliti yaitu kecepatan, tekanan, energi kinetik turbulen dan fraksi volume uap. Pada tekanan absolut *inlet*  $3 \times 10^5 N/m^2$  diperoleh kecepatan maksimum 28.69 m/s, tekanan minimum 12266  $N/m^2$ , fraksi volume uap maksimum 0.98 dan energi kinetik turbulen maksimum  $12.75 m^2/s^2$ . Hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan eksperimen yang dilakukan pada reaktor kavitas hidrodinamik menggunakan *orifice* C dan D. Pengukuran yang dilakukan terhadap parameter kecepatan dan tekanan menunjukkan tidak terjadi penyimpangan yang signifikan antara hasil simulasi komputer dan eksperimen. Berkaitan dengan produksi biodiesel, berdasarkan kavitas optimal yang diperoleh maka rendemen dan kadar metil ester *orifice* C berpotensi lebih tinggi dibandingkan *orifice* lainnya.



Gambar 12. Histogram fraksi volume uap pada *orifice* A, B, C dan D.



Gambar 13. Perbandingan tekanan *downstream* hasil simulasi dan eksperimen pada *orifice* C (a) dan *orifice* D (b).



Gambar 14. Perbandingan kecepatan *downstream* hasil simulasi dan eksperimen pada *orifice* C (a) dan *orifice* D (b).

### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada BRIN selaku pemberi beasiswa SAINTEK. Terima kasih juga kepada Laboratorium Teknologi Termodinamika, Motor, dan Propulsi (Sistem Termal dan Refrigerasi) BRIN yang telah memberi fasilitas *software*, serta Kantor Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain-BRIN yang telah memberi fasilitas untuk melakukan pengujian.

### Daftar Pustaka

- [Permen ESDM] Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2015. Permen ESDM No. 12 tentang Penyediaan, Pemanfaatan, dan Tata Niaga Bahan Bakar Nabati (Biofuel) sebagai Bahan Bakar Lain. Jakarta (ID): Kementerian ESDM.
- Alamsyah, R. 2010. Studi Proses Mekanisme Pengadukan dengan Metode *Static-Mixer* untuk Meningkatkan Efisiensi Transesterifikasi Minyak Sawit Menjadi Biodiesel [disertasi]. Bogor(ID):Institut Pertanian Bogor.
- ANSYS. 2013. *ANSYS Fluent Theory Guide, Release 15.0*. Canonsburg (US): Ansys, Inc.
- ANSYS. 2019. *ANSYS Fluent Tutorial Guide, Release 2019 R1*. Canonsburg (US): Ansys, Inc.
- Bargole, S., S. George, V.K. Saharan. 2019. Improved rate of transesterification reaction in biodiesel synthesis using hydrodynamic cavitating devices of high throat perimeter to flow area ratios. *Chem Eng Process - Process Intensif*. 139:1–13. doi:10.1016/J.CEP.2019.03.012.
- Ebrahimi, B., G. He, Y. Tang, M. Franchek, D. Liu, J. Pickett, F. Springett, D. Franklin. 2017. Characterization of high-pressure cavitating flow through a thick orifice plate in a pipe of constant cross section. *Int J Therm Sci*. 114:229–240. doi:10.1016/J.IJTHERMALSCI.2017.01.001.
- Ferrarese, G., G. Messa, M. Rossi, S. Malavasi. 2015. New method for predicting the incipient cavitation index by means of single-phase computational fluid dynamics model. *Adv Mech Eng*. 7:1–11. doi:10.1177/1687814015575974.
- Joelianingsih, H. Maeda, S. Hagiwara, H. Nabetani, Y. Sagara, T.H. Soerawidjaya, A.H. Tambunan, K. Abdullah. 2008. Biodiesel fuels from palm oil via the non-catalytic transesterification in a bubble column reactor at atmospheric pressure: A kinetic study. *Renew Energy*. 33(7):1629–1636. doi:10.1016/J.RENENE.2007.08.011.
- Kolhe, N.S., A.R. Gupta, V.K. Rathod. 2017. Production and purification of biodiesel produced from used frying oil using hydrodynamic cavitation. *Resour Technol*. 3(2):198–203. doi:https://doi.org/10.1016/j.refit.2017.04.008.
- Kuldeep, and V.K. Saharan. 2016. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. *J Hydrodyn Ser B*. 28(2):293–305. doi:10.1016/S1001-6058(16)60631-5.
- Li, H., F. Kelec, A. Egelja-Maruszewski, S. Vasquez. 2008. Advanced Computational Modeling of Steady and Unsteady Cavitating Flows. *ASME Int Mech Eng Congr Expo Proc*. 10:413–423. doi:10.1115/IMECE2008-67450.
- Moholkar, V.S., and A.B. Pandit. 2001. Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. *Chem Eng Sci*. 56(21–22):6295–6302. doi:10.1016/S0009-2509(01)00253-6.
- Moholkar, V.S., P.S. Kumar, A.B. Pandit. 1999. Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects. *Ultrason Sonochem*. 6(1–2):53–65. doi:10.1016/S1350-4177(98)00030-3.
- NCBI. 2022. PubChem Compound Summary for CID 887, Methanol. [diakses 2022 Jan 19]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methanol>.
- Nitamiwati, N.P.D., A.H. Tambunan, L.P.E. Nugroho. 2018. Simulasi pencampuran reaktan untuk produksi biodiesel pada reaktor berpengaduk statik. *J Tek Per*. 28(3):252–261.
- Panggabean, S. 2011. Analisis Kinetika Reaksi Transesterifikasi Pada Produksi Biodiesel Secara Katalitik dengan *Static Mixing Reactor* [tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.
- Rajoriya, S., S. Bargole, V.K. Saharan. 2016. Degradation of a cationic dye (Rhodamine 6G) using hydrodynamic cavitation coupled with other oxidative agents: Reaction mechanism and pathway. *Ultrason Sonochem*. 34:183–194. doi:10.1016/j.ultsonch.2016.05.028.
- Shah, Y.T., A.B. Pandit, V.S. Moholkar. 1999. *Cavitation Reaction Engineering*. New York (US): Springer Science+Business Media.
- Simpson, A., and V.V. Ranade. 2018. Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. *Chem Eng Res Des*. 136:698–711. doi:10.1016/J.CHERD.2018.06.014.
- Sivasamy, A., K.Y. Cheah, P. Fornasiero, F. Kemausuor, S. Zinoviev, S. Miertus. 2009. Catalytic applications in the production of biodiesel from vegetable oils. *ChemSusChem*. 2(4):278–300. doi:10.1002/cssc.200800253.
- Tabatabaei, M., M. Aghbashlo, M. Dehghani, H.K.S. Panahi, A. Mollahosseini, M. Hosseini, M.M. Soufiyan. 2019. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Prog Energy Combust Sci*. 74:239–303. doi:10.1016/j.pecc.2019.06.001.
- Thompson, J.C., and B.B. He. 2007. Biodiesel production using static mixers. *Trans ASABE*. 50(1):161–165.
- Tuakia, F. 2008. *Dasar-Dasar CFD Menggunakan Fluent*. Bandung (ID): Bandung Informatika.