

# Studi Eksperimental Perubahan Amplitudo Gelombang Pada Aliran Minyak - Air Rezim *Stratified Wavy* Dalam Pipa Horizontal

A. I. Santosa\* dan A. Widyaparaga

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.  
Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia  
\*e-mail: ari.santosa03@gmail.com

## Abstrak

Penelitian mengenai amplitudo gelombang pada aliran dua fasa minyak-air rezim pola aliran *stratified wavy* telah dilakukan dalam beberapa penelitian sebelumnya. Namun mengingat banyaknya variasi *properties* fluida kerja, variasi dimensi dan geometri saluran, serta variasi kondisi parameter operasi maka menurut penulis, penelitian yang sudah ada saat ini masih belum mencukupi untuk memahami bagaimana pengaruh perubahan kecepatan *superfacial* dan jarak dari inlet sumber aliran terhadap amplitudo gelombang. Penelitian dilakukan untuk menginvestigasi perubahan amplitudo terhadap kenaikan kecepatan *superfacial* dan terhadap jarak *inlet* pada aliran dua fasa minyak air dalam rezim pola aliran *stratified wavy* dalam kondisi sebelum dan saat transisi ke rezim aliran *non stratified flow* pada fluida kerja. Fluida minyak yang digunakan adalah *kerosene* dengan masa jenis  $781,1 \text{ kg / m}^3$ , viskositas  $1,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  dan *interfacial tension*  $0,167 \text{ mN/m}$ . Kerosene dan air dialirkan pada pipa horizontal yang terbuat dari bahan akrilik dengan diameter 24 mm. Parameter operasi kecepatan *superfacial* minyak dijaga konstan sebesar  $0,073 \text{ m/s}$ . Perbandingan aliran kecepatan *superfacial* air terhadap kecepatan *superfacial* minyak pada kondisi *entry (input ratio)* sebesar 1; 2; 3 dan 4. Proses pengambilan data dilakukan pada titik pengamatan 10D, 40D, 100D dan 220D dari inlet, dimana D adalah diameter dalam pipa. Proses perekaman dilakukan dengan *high speed camera* frekuensi 600 fps. Data eksperimen diolah dengan menggunakan metode pengolahan citra untuk mendapatkan ketebalan lapisan air rata-rata dan distribusi probabilitas amplitudo pada setiap titik pengamatan. Kenaikan *input ratio* akan menyebabkan terjadinya kenaikan ketinggian lapisan air rata-rata sebesar 12 % dengan standard deviasi 5,7 %. Peningkatan input ratio ini juga akan meningkatkan besarnya amplitudo rata-rata pada setiap titik pengamatan dengan peningkatan tertinggi terjadi di titik 10 D dan terendah di titik 220 D. Kenaikan *input ratio* menyebabkan kenaikan amplitudo antarmuka gelombang dan ketebalan lapisan permukaan air. Munculnya *droplet* pada gelombang merupakan tanda bahwa gelombang mengamai ketidakstabilan dan masuk ke *fasa* transisi (*onset entrainment*).

**Kata kunci** : Pengolahan citra, stratified wavy, stratified mixing, kecepatan *superfacial*, kondisi onset.

## Abstract

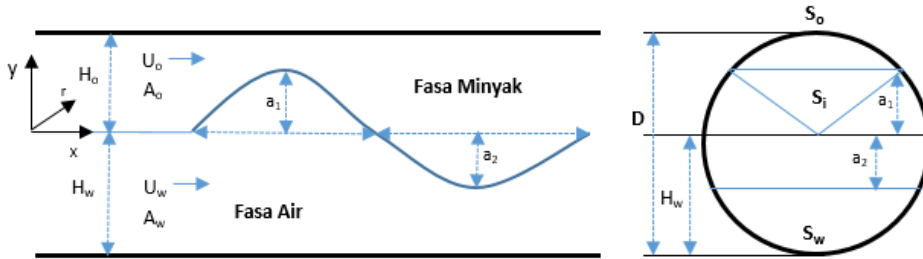
Research on the amplitude of the two-phase oil-water flow regime stratified wavy flow pattern has been carried out in several previous studies. However, considering the many variations of working fluid properties, variations in dimensions and geometry of the channel, as well as

variations in operating parameter conditions, according to the authors of the existing research is still not sufficient to understand how the influence of changes in superficial velocity and the effect of the distance from the flow source inlet to the wave amplitude. The study was conducted to investigate changes in amplitude due to the increment in superficial velocity and to the inlet distance in the two-phase water oil flow in the stratified wavy flow pattern regime. Observation was divided in conditions before transition (wave growth) and during the transition to the non-stratified flow regime in the working fluid. The oil used was kerosene which has density of  $781,1 \text{ kg/m}^3$ , viscosity of  $1,3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  and interfacial tension  $0,167 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ . Kerosene and water flowed in a horizontal acrylic pipe with an internal diameter of 24 mm. The operating parameter of oil superficial velocity were kept constant at  $0,073 \text{ m/s}$ . The ratio of the flow of superficial velocity of water against superficial velocity of oil at the entry point or input ratio was set to be 1; 2; 3 and 4. The data collection process was carried out using a high speed camera with observation points at  $10D$ ,  $40D$ ,  $100D$  and  $220D$  from the inlet, where  $D$  is the diameter in the pipe. The recording process was done with a frequency of 600 fps. The experimental data obtained were then processed using the image processing method to obtain the average water layer thickness and probability distribution of the amplitude at each observation point. An increment of the input ratio of the superficial water velocity to oil will cause an increment in average water layer height of  $12,3\%$  with a standard deviation of  $5,7\%$ . The increment in input ratio will also increase the magnitude of the average amplitude at each observation point with the highest increment occurs at the  $10 D$  and the lowest at the  $220 D$ . At a constant oil superficial velocity, an increment in the input ratio of the superficial water velocity to oil will make increasing in the amplitude of the wave interface and the thickness of the surface layer of water. The increment range of amplitude at the point that is farther from the inlet will tend to decrease / smaller than the point which closer to the inlet flow. The appearance of a droplet on a wave is a sign that the wave is matching instability and is entering the phase of transition (onset entrainment condition).

**Keywords** : image processing, stratified wavy, stratified mixing, superficial velocity, onset condition.

## 1. PENDAHULUAN

Studi mengenai amplitudo gelombang pada gelombang antarmuka yang terbentuk dalam aliran dua fasa minyak-air dalam rezim aliran *stratified wavy* merupakan hal yang sangat penting untuk memahami karakteristik fluida sebagai referensi dalam mendesain suatu sistem perpipaan. Studi tentang analisa stabilitas gelombang aliran dua fasa minyak air dalam pipa horizontal telah dilakukan secara sistematis oleh Al-Wahabai dan Angeli (2007). Gelombang antarmuka fluida minyak-air dimodelkan sebagai gelombang sinusoidal antara dua jenis fluida seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Masing-masing fluida memiliki kecepatan fasa, yaitu kecepatan fasa minyak ( $U_o$ ) dan kecepatan fasa air ( $U_w$ ) yang besarnya dipengaruhi oleh kecepatan *superficial* fluida dan hold up ratio aliran minyak dan air. Ketika kecepatan *superficial* aliran minyak atau air meningkat, maka gelombang antarmuka juga terus mengalami pertumbuhan amplitudo hingga mencapai amplitudo dan panjang gelombang tertentu yang menyebabkan pembentukan *droplet* yang terpisah dari fasa *continue* karena turunnya amplitudo kritis gelombang. Dalam penelitian tersebut maka amplitudo gelombang menjadi salah satu parameter untuk mengetahui transisi rezim aliran.



Gambar 1. Interfacial Wave Oil Water Two Phase Flow (Al-Wahabai and Angeli, 2007)

Stabilitas antarmuka gelombang pada aliran dua fasa air-minya dipengaruhi oleh gaya-gaya yang bekerja didalamnya. Tiga komponen gaya utama yang bekerja adalah gaya *suction pressure*, gaya gravitasi dan gaya *interfacial tension*. Amplitudo gelombang sangat berpengaruh terhadap ketiga komponen gaya tersebut. Gaya *suction pressure* akan membuat gelombang menjadi tidak stabil sedangkan gaya gravitasi dan gaya *interfacial tension* cenderung membuat gelombang menjadi stabil.

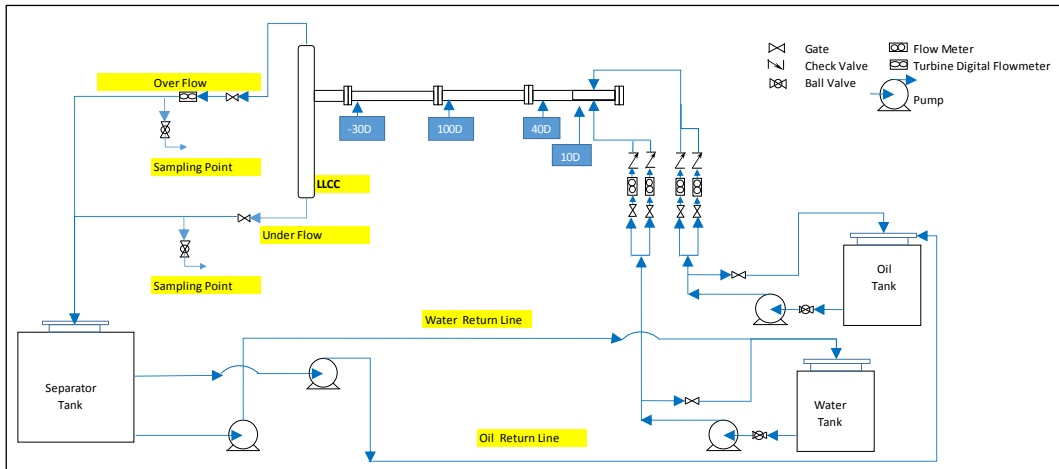
Metode pengolahan citra banyak diterapkan dalam menganalisa karakteristik gelombang yang terbentuk pada aliran 2 fasa. Marcelo S. dkk (2011) melakukan penelitian terkait amplitudo, panjang gelombang dan kecepatan gelombang pada antarmuka aliran dua fasa minyak air dengan metode pengolahan citra. Minyak yang digunakan memiliki massa jenis 828 kg/m<sup>3</sup>, viskositas 300 mPa·s dan *interfacial tension* 0,034 N/m. Fluida air dan minyak dialirkan pada pipa yang terbuat dari kaca dengan diameter dalam 0,026 m dengan variasi sudut kemiringan pipa dan input ratio kecepatan *superfacial* air terhadap minyak.

$$Froude = \frac{U_w - U_o}{\sqrt{g \cdot \cos \theta \cdot y_w \cdot \frac{\pi D}{4}}} \quad (1)$$

Marcelo S. dkk (2011) menggunakan perbandingan antara amplitudo terhadap panjang gelombang sebagai fungsi bilangan Froude untuk memperkirakan stabilitas gelombang. Perhitungan bilangan Froude dapat dilihat seperti pada persamaan (1), dimana  $\theta$  merupakan sudut kemiringan pipa,  $g$  merupakan konstanta gravitasi dan  $y_w$  merupakan fraksi volume air. Bilangan Froude menunjukkan perbandingan antara gaya yang cenderung menyebabkan tidak stabil akibat kecepatan relative antara fasa air dan minyak terhadap gaya yang cenderung menyebabkan gelombang menjadi stabil karena pengaruh gravitasi.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Peralatan Penelitian



Gambar 2. Skema Peralatan Penelitian

Skema diagram peralatan penelitian ditunjukkan pada Gambar 2. Air dan kerosene dialirkan ke dalam *T-junction mixer* menggunakan pompa sentrifugal. Setiap saluran minyak dan air dipasang dua jenis katup. *Gate valve* untuk mengatur aliran fluida dan *check valve* untuk mencegah aliran balik fluida guna meningkatkan akurasi pembacaan meter aliran. Antara dua katup, dipasang dua *flow meter* untuk mengukur jumlah aliran melalui sistem. Dua *rota meter* dipasang di saluran air dan dua *flow meter* dipasang di saluran minyak. Setelah melewati *T-junction mixer*, fluida campuran minyak-air akan mengalir di dalam pipa akrilik dengan diameter 24 mm sepanjang 6 meter. Titik pengamatan pengambilan data terdiri dari 4 titik dengan jarak dari inlet aliran sejauh 10D, 40D, 100D dan 220D, dimana D merupakan diameter dalam pipa. Guna menjaga kualitas pencahayaan citra yang diambil, maka pada titik pengamatan dipasang lampu LED serta dipasang *correction box* untuk menghilangkan efek pembiasan cahaya sehingga batas pipa dan aliran dapat terlihat lebih jelas pada saat pengambilan data. Proses penyimpanan data menggunakan alat *high speed camera* Phantom Micro M310.

### 2.2. Prosedur Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan fluida kerja minyak tanah (kerosene) dan air (*water*). Adapun massa jenis dan tegangan permukaan dari kedua fluida tersebut dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. *Properties* Fluida

<i>Properties</i>	Water	<i>kerosene</i>
Density	981,7 kg/m <sup>3</sup>	781,1 kg/m <sup>3</sup>
<i>IFT</i>	0,167 mN/m	

Investigasi karakteristik amplitudo gelombang dilakukan dengan mengatur parameter operasi kecepatan *superficial* fluida kerja, yaitu kecepatan *superficial* minyak dijaga konstan pada kecepatan 0,073 m/s sedangkan kecepatan *superficial* air bervariasi dengan rasio kecepatan air terhadap minyak sebesar 1, 2, 3 dan 4.

Tabel 2. Parameter Operasi Kecepatan *Superfacial* Penelitian

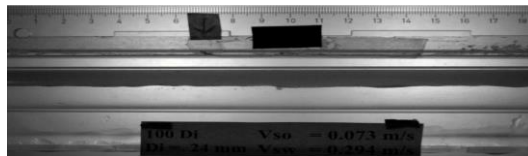
		Input Ratio ( $V_{sw} / V_{so}$ )			
		1	2	3	4
$V_{so} 0,073$ (m/s)	10D	1	2	3	4
	40D	5	6	7	8
	100D	9	10	11	12
	220D	13	14	15	16

Parameter operasi ini dilakukan di keempat titik pengamatan, sehingga total pengambilan data yang dilakukan sejumlah 16 data seperti yang terlihat pada Tabel 2. Pengamatan secara visual terhadap bentuk gelombang dan munculnya *droplet* dilakukan secara cermat guna mendukung proses analisa dan pengolahan citra.

### 2.3. Proses Pengolahan Citra

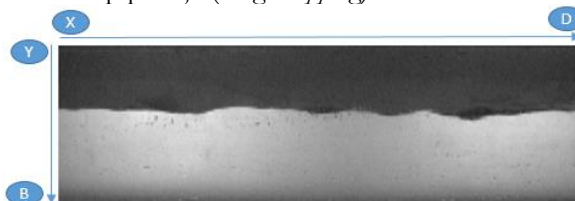
Proses penglahan citra hasil eksperimen untuk mengukur amplitudo gelombang dilakukan dengan menggunakan software MATLAB R2016a. Adapun langkah-langkah dalam melakukan pengolahan citra gelombang aliran dijelaskan sebagai berikut.

Langkah 1. Membaca citra video dengan terlebih dahulu mengubah format file video menjadi format .avi



Gambar 3. Pembacaan Gambar

Langkah 2. Memotong citra guna memfokuskan obyek yang akan diteliti yaitu hanya mencakup pada bagian dalam pipa saja (*image cropping*).



Gambar 4. Image Cropping

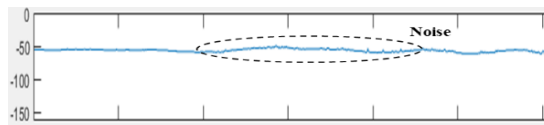
Langkah 3. Mengkonversi susunan warna dari format RGB (*Red Green Blue*) yang memiliki 255 elemen warna menjadi susunan warna binary yang hanya memiliki 2 elemen warna, yaitu 0 (hitam) or 1 (putih).



Gambar 5. Convert to Binary Image

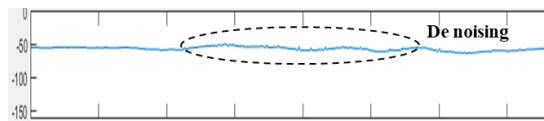
Langkah 4. Proses *filtering*, yaitu proses identifikasi garis antramuka aliran, dengan melakukan pembacaan warna *binary* secara vertikal dari atas ke bawah pada setiap kolom matrix

warna untuk mendapatkan elemen warna dengan nilai 1. Setelah elemen warna ini diperoleh maka mengkonversi elemen warna lain sebagai elemen warna dengan nilai 0.



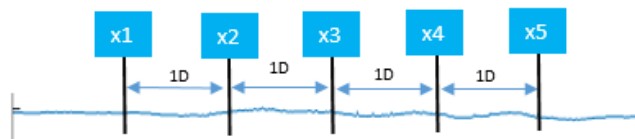
Gambar 6. Proses *Filtering*

Langkah 5. *Denoising*, meningkatkan keakurasian hasil pengolahan citra dengan mengeliminasi *noise* atau *spike* data.



Gambar 7. Proses *Denoising*

Langkah 6. Melakukan pengambilan data ketinggian lapisan air dan amplitudo. Identifikasi ketinggian lapisan air dilakukan pada 5 titik pengamatan dengan jarak antar titik pengamatan sejauh  $D$  (diameter dalam pipa). Amplitudo gelombang diperoleh dengan mencari selisih puncak ketebalan air tertinggi dikurangi ketebalan rata-rata. Dan jarak antar puncak gelombang diukur sebagai panjang gelombang.

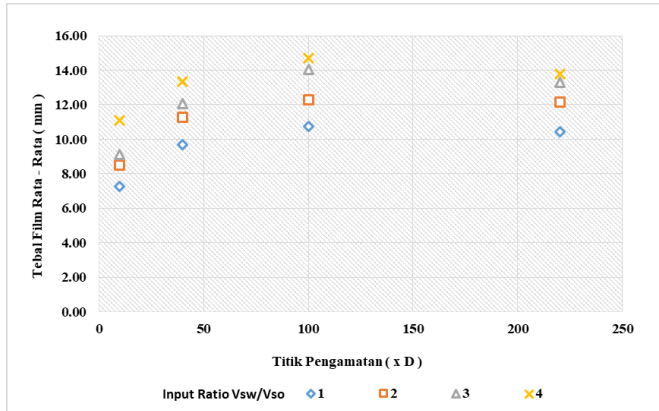


Gambar 8. Pengambilan Data Amplitudo dan Ketebalan Lapisan Air

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

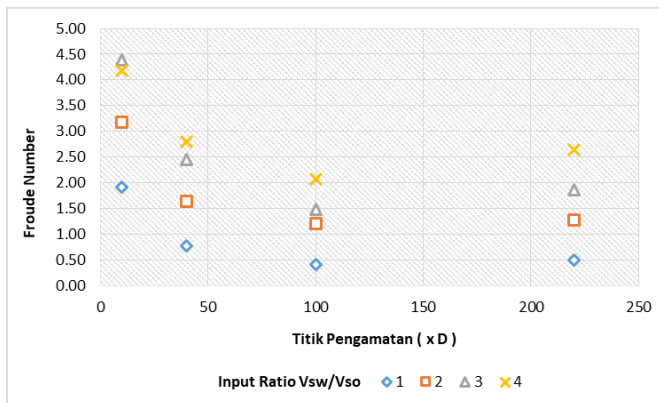
#### 3.1 Perubahan Ketebalan Film

Berdasarkan Gambar 9, maka ketebalan lapisan air mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan *input ratio* kecepatan *superficial* air. Prosentase rata-rata kenaikan ketebalan *film* untuk setiap kenaikan *input ratio* sebesar 12% dengan standard deviasi sebesar 5,4 %. Hal menarik apabila perubahan ketebalan lapisan air ditinjau berdasarkan titik pengamatan. Ketebalan lapisan air dengan input ratio yang sama pada titik 10D, 40D dan 100D akan terus mengalami peningkatan, namun ketika di titik 220D ketebalan lapisan air terlihat mengalami penurunan. Fenomena perbedaan kecenderungan perubahan ketebalan lapisan air antara titik pengamatan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan gaya inersia akibat kecepatan relatif antara kedua fasa minyak dan air yang bekerja pada fluida tersebut.



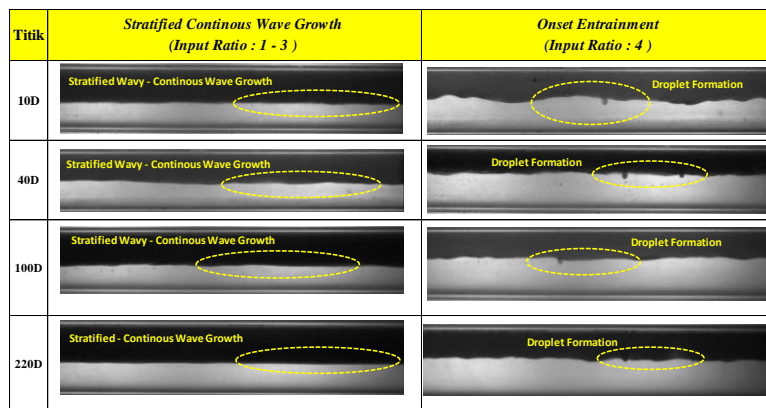
Gambar 9. Ketebalan Rata-Rata Lapisan Air Vso 0,073 m/s Pada Titik Pengamatan 10D, 40D, 100D dan 220D

Besarnya perubahan gaya inersia dapat dilihat pada hasil perhitungan *Froude Number* dengan mengacu ke persamaan (1) maka diperoleh hasil seperti pada Gambar 10. Pada kondisi gaya gravitasi yang konstan, maka pola tebal lapisan air berkebalikan dengan pola perubahan bilangan Froude. Gaya inersia dipengaruhi oleh kecepatan fasa fluida, dimana kecepatan fasa pada suatu titik (*in situ velocity*) dipengaruhi oleh *bold up fluid* (perbandingan luas penampang melintang suatu titik dibagi luas penampang awal).



Gambar 10. *Froude Number* Vso 0,073 m/s Pada Titik Pengamatan 10D, 40D, 100D dan 220D

### 3.2 Kondisi *Onset* dan Pertumbuhan Gelombang



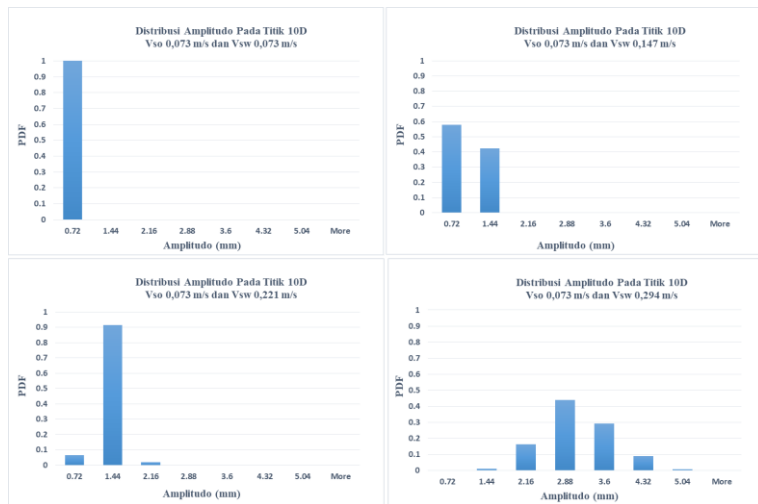
Gambar 11. Visualisasi Pertumbuhan Gelombang Terhadap *Input Ratio*

Proses pengamatan secara visual pada perubahan ketinggian lapisan air dan pertumbuhan amplitudo gelombang untuk setiap kondisi operasi *input ratio* dan titik pengamatan dilakukan secara cermat. Hasil observasi secara kualitatif dapat dilihat pada Gambar 11. Pada nilai *input ratio* kecepatan *superficial* 1 sampai dengan 3, terjadi kenaikan amplitudo gelombang tanpa disertai kemunculan *droplet* disepanjang aliran kontinu. Pada fasa ini maka kita sebut dengan *fasa* pertumbuhan gelombang. Hal menarik terjadi ketika nilai *input ratio* 4, dimana amplitudo gelombang mengalami kenaikan dengan disertai munculnya *droplet* di sepanjang aliran kontinu pada semua titik pengamatan. *Droplet* merupakan indikator aliran gelombang dalam kondisi tidak stabil. Ketika kondisi gelombang mulai muncul *droplet*, sering kita sebut dengan kondisi *onset*.

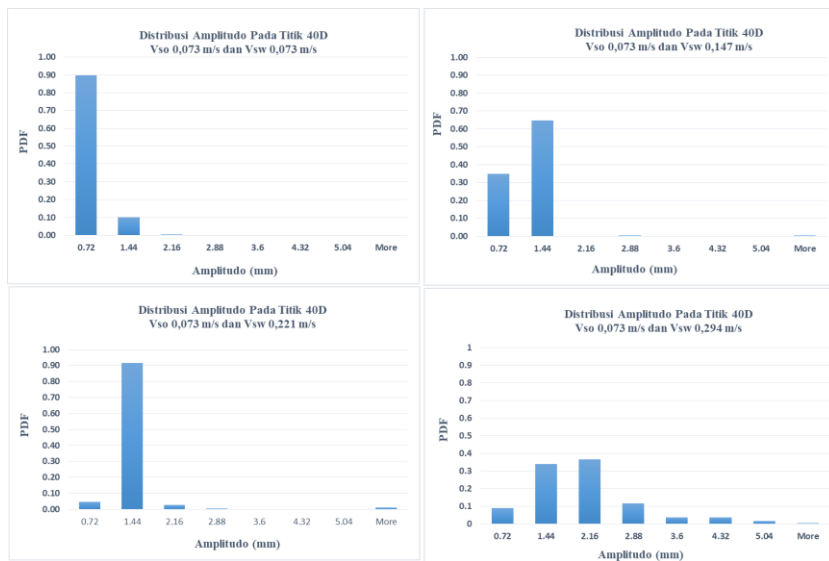
Hasil pengolahan citra amplitudo gelombang dalam grafik *Probability Distribution Function* (PDF) untuk setiap *input ratio* kecepatan *superficial* air terhadap minyak pada setiap titik pengamatan dapat dilihat pada Gambar 12 – 15. Pada titik pengamatan 10D dan 40D yang ditunjukkan oleh Gambar 12 dan 13, besarnya amplitudo ketika dalam *fasa* pertumbuhan gelombang mengalami kenaikan dari rentang 0,72 mm menjadi 0,72 mm - 1,44 mm. Pada kondisi *onset*, maka amplitudo mengalami kenaikan menjadi 1,44 mm - 4,32 mm dengan amplitudo maximum 5,04 mm. Pada titik pengamatan 100D pada Gambar 14, amplitudo gelombang pada *fasa* pertumbuhan gelombang mengalami kenaikan dari rentang 0,72 mm – 1,44 mm menjadi 1,44 mm - 2,88 mm. Sedangkan pada kondisi *onset*, nilai amplitudo relatif konstan pada rentang 1,44-2,88 mm. Pada titik pengamatan 220D pada Gambar 15, besarnya rentang perubahan kenaikan amplitudo relatif sama baik pada *fasa* pertumbuhan gelombang maupun dalam kondisi *onset* sebesar 0,72 mm – 1,44 mm.

Secara keseluruhan, kenaikan *input ratio* kecepatan *superficial* air terhadap minyak akan menyebabkan terjadinya kenaikan amplitudo gelombang. Kenaikan *input ratio* kecepatan *superficial* fluida akan menyebabkan terjadinya kenaikan gaya *suction pressure* sebagai fungsi kecepatan relatif antara kecepatan fasa kontinu dengan kecepatan gelombang. *Suction pressure force* akan menyebabkan gelombang bergerak ke atas dan ke bawah sehingga menyebabkan kenaikan amplitudo dan gelombang menjadi tidak stabil. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Al-Wahabai dan Angeli (2007) yang dapat dilihat pada Bab I.

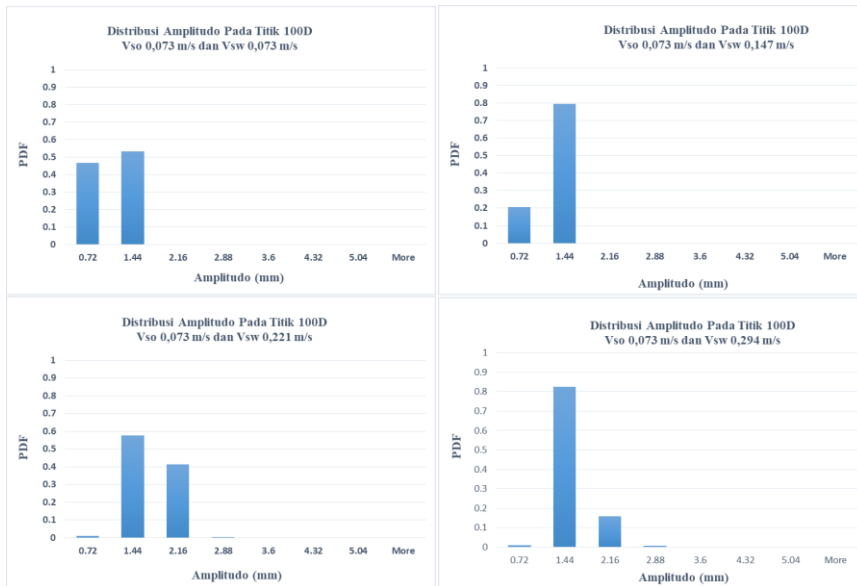




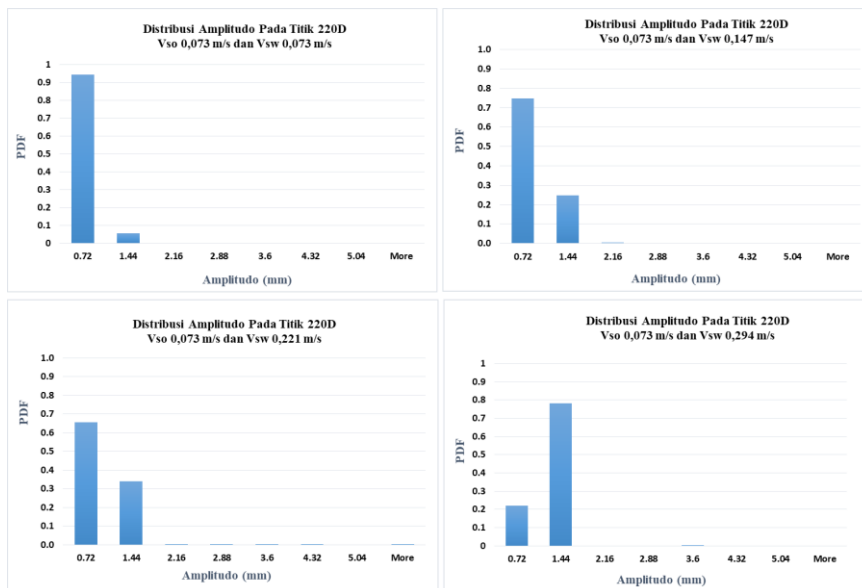
Gambar 12. *Probability Distribution Function (PDF) Amplitudo Pada Titik 10D*



Gambar 13. *Probability Distribution Function (PDF) Amplitudo Pada Titik 40D*

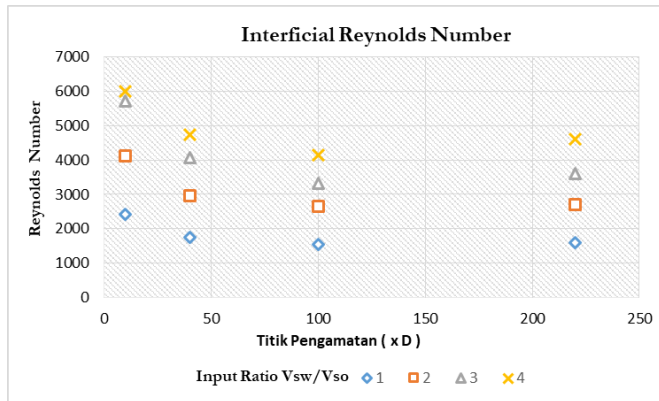


Gambar 14. *Probability Distribution Function (PDF) Amplitudo Pada Titik 100D*



Gambar 15. *Probability Distribution Function (PDF) Amplitudo Pada Titik 220D*

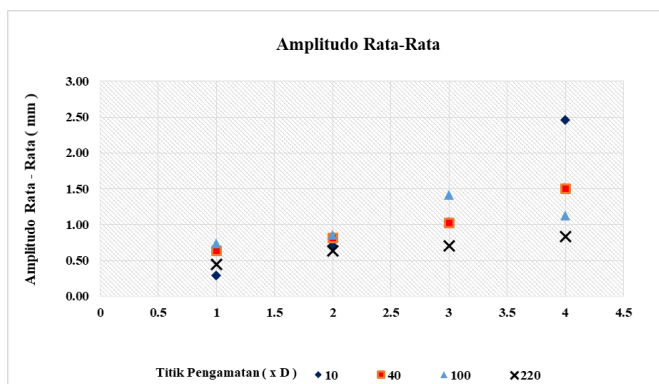
Pengaruh kenaikan *input ratio* kecepatan *superficial* air terhadap minyak akan cenderung mengalami penurunan pada titik menjauhi inlet sumber aliran. Kondisi perubahan pola kenaikan amplitudo terhadap *inlet* ini sangat dipengaruhi oleh gaya viskositas *interfacial* aliran. Besarnya gaya viskositas *interfacial* aliran dapat dilihat dengan bilangan Reynolds. Pada titik yang menjauhi *inlet* sumber aliran maka nilai *interfacial* Reynolds Number akan cenderung mengalami penurunan. Grafik *interfacial* Reynolds Number dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. *Interfacial* Reynolds Number  $V_{so}$  0,073 m/s Pada Titik Pengamatan 10D, 40D, 100D dan 220D

### 3.3 Perbandingan Amplitudo Rata-Rata Terhadap Penelitian Lain

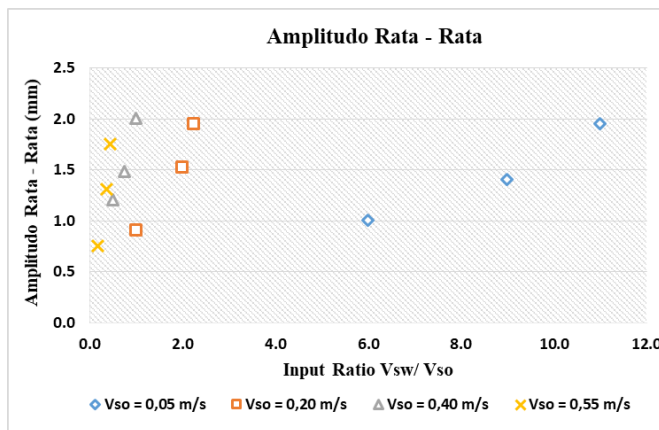
Besarnya amplitudo rata-rata dalam penelitian ini diperoleh dengan mengambil nilai rata-rata dari 5543 sample nilai amplitudo pada setiap *input ratio* kecepatan *superficial* air terhadap minyak dalam satu titik pengamatan. Standard deviasi hasil rata-rata amplitudo berkisar 7,4 % sampai dengan 19,8 % dan *error* rata-rata 2,8 %. Seperti yang terlihat pada Gambar 17, untuk rezim aliran *stratified wavy*, kenaikan amplitudo terjadi seiring dengan kenaikan *input ratio* kecepatan *superficial* air-minyak. Pada rentang *input ratio* 1 - 4, maka selisih kenaikan amplitudo tertinggi sebesar 2,2 mm pada titik 10D atau 0,24 meter dari inlet aliran dan kenaikan amplitudo terendah sebesar 0,4 mm pada titik 220D atau 5,28 meter dari inlet aliran.



Gambar 17. Amplitudo Rata-Rata  $V_{so}$  0,073 m/s Pada Titik Pengamatan 10D, 40D, 100D dan 220D (Penelitian)

Al-Wahabai dan Angeli (2011) melakukan penelitian karakteristik amplitudo pada aliran dua fasa air-minyak yang dilirkan pada pipa *stainless steel* dengan diameter 38 mm dengan 12 variasi *input ratio* kecepatan *superficial* air terhadap minyak di titik pengamatan 6 meter dari inlet aliran. Minyak yang digunakan memiliki properties massa jenis  $828 \text{ kg/m}^3$  dan viskositas  $5,5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . Pengambilan data amplitudo dilakukan dengan *wire probe* yang dapat mendeteksi ketinggian lapisan air dan minyak berdasarkan perbedaan nilai konduktansi nya. Hasil pengukuran amplitudo rata –rata untuk *input ratio* kecepatan *superficial* air terhadap minyak dari 0,2 – 11

diperoleh nilai amplitudo terendah 0,8 mm dan tertinggi 2 mm atau mengalami kenaikan amplitudo sebesar 1,2 mm dengan persebaran seperti terlihat pada Gambar 18 dan *error* rata – rata sebesar 2,3 %.



Gambar 18. Amplitudo Rata-Rata Variasi Input Ratio Pada Titik Pengamatan 6 Meter Dari Inlet (Al-Wahabai dan Angeli, 2011)

Berdasarkan grafik pada Gambar 17 dan Gambar 18, maka dapat terlihat kesesuaian bahwa pada kecepatan *superfacial* minyak yang dijaga konstan maka untuk setiap kenaikan *input ratio* kecepatan *superfacial* air terhadap minyak akan menyebabkan kenaikan amplitudo gelombang antarmuka. Besarnya kenaikan amplitudo pada rezim *stratified wavy* akan berhenti pada nilai tertentu sebelum terjadi proses transisi ke rezim *non stratified*.

#### 4. KESIMPULAN

Kenaikan *input ratio* kecepatan *superfacial* air terhadap minyak ( $v_{sw}/v_{so}$ ) pada aliran dua fasa air – minyak dalam rezim aliran *stratified wavy* akan menyebabkan terjadinya kenaikan amplitudo antarmuka gelombang dan ketinggian rata-rata lapisan air. Perubahan amplitudo dipengaruhi oleh perubahan gaya *suction pressure* yang bekerja pada antarmuka gelombang. Pada titik yang semakin menjauhi inlet aliran maka rentang kenaikan amplitudo untuk setiap kenaikan *input ratio* kecepatan *superfacial* akan semakin kecil dibandingkan pada titik yang dekat dengan inlet aliran. Perubahan range kenaikan amplitudo ini dipengaruhi oleh gaya viskositas fluida yang bekerja pada antarmuka fasa.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Al-Sarkhi, A., Pereyra, E., Mantilla, I., Avila, 2017, *Dimensionless oil-water stratified to non-stratified flow pattern transition*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 151, 281-291.
- Al-Wahabai, T., Angeli, Panagiota, 2011, *Experimental study on interfacial waves in stratified horizontal oil-water flow*, *International Journal of Multiphase Flow*, 37, 930-940.
- Al-Wahaibi, Talal, Angeli, Panagiota, 2007, *Transition Between Stratified and Non Stratified Horizontal Oil Water Flows Part I: Stability Analysis*, *Chemical Engineering Science*, 62, 2915-2928.
- Angeli, P., Hewitt, G.F., 2000, *Flow structure in horizontal oil water Flow*, *International Journal of Multiphase Flow* 26, 1117-1140.

- De Castro, Marcelo S., Pereira, Cleber C., Dos Santos, Jorge N., Rodriguez, Oscar M.H., 2011, *Geometrical and kinematic properties of interfacial waves in stratified oil-water flow in inclined pipe*, *Journal Experimental and Fluid Science* 37 (2012) 171-178.
- Kuntoro, Hadiyan Yusuf, Hudaya, Akhmad Zidni, Dinaryanto, Okto, Majid , Akmal Irfan, Deendarlianto. 2016, *An improved algorithm of image processing technique for film thickness measurement in a horizontal stratified gas-liquid two-phase flow*. *AIP Conference Proceedings* 1737, 040010.