

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pola aliran

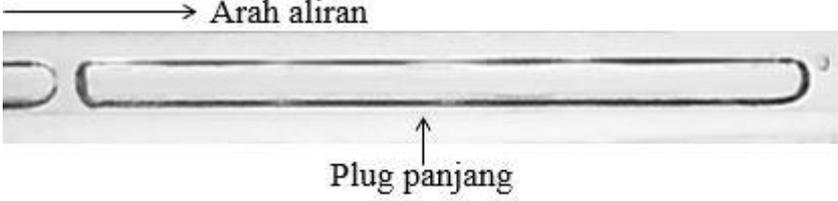
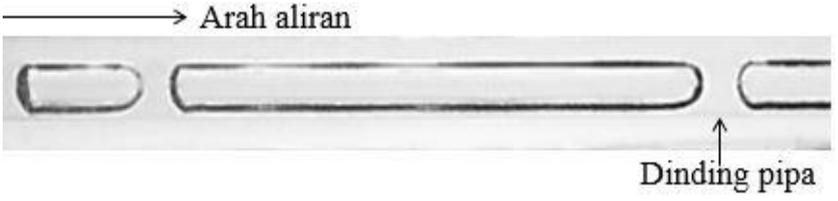
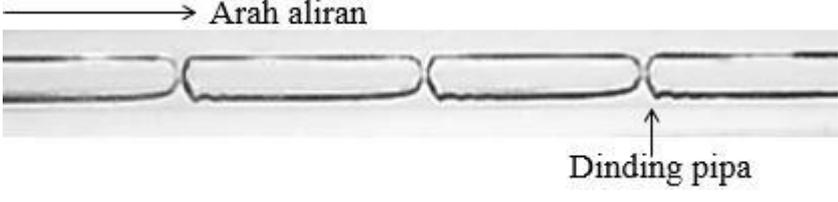
Penelitian aliran dua fasa pada pipa kecil dengan diameter dalam pipa 1,6 mm dan panjang pipa 400 mm dengan kemiringan pipa 30° dengan fluida kerja berupa campuran udara-aquades dan butanol 7% telah dilakukan. Dengan mengatur debit fluida gas (J_G) dan debit fluida cair (J_L) selanjutnya dilakukan pengambilan data yang diperoleh berupa video, kemudian diidentifikasi pola apa yang terdapat pada video yang telah diambil sebelumnya. Setelah teridentifikasi pola aliran kemudian diplot berdasarkan kecepatan superfisial gas dan cair. Dari hasil indentifikasi yang diperoleh dari video terdapat lima macam pola aliran yaitu : *plug*, *bubbly*, *slug-annular*, *annular*, dan *churn*.

4.1.1. Pola aliran *Plug*

Pola aliran *plug* yaitu pola aliran dimana terdapat kantung udara yang bentuknya mirip dengan peluru, pola aliran *plug* hampir sama dengan pola aliran *bubbly* tetapi lebih memanjang dan panjangannya lebih dari diameter saluran. Pola aliran *plug* terbentuk pada saat kecepatan superfisial gas cukup besar menembus suatu aliran fluida cair tapi tidak cukup besar untuk menerobos aliran fluida cair. Pola aliran *plug* terjadi saat nilai (J_G) lebih besar dibandingkan nilai (J_L) yang lebih rendah, bentuk pola aliran *plug* dipengaruhi dari kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cairan, semakin besar nilai kecepatan superfisial gas pola aliran *plug* menjadi semakin panjang sedangkan nilai kecepatan superfisial cairan semakin besar, aliran *plug* semakin pendek karena volume liquid lebih banyak dari udara yang masuk ke mixer maka udara yang masuk mulai tertekan oleh liquid.

Pola aliran *plug* mulai terbentuk pada kecepatan superfisial gas (J_G) = 0,025 m/s sedangkan kecepatan superfisial cair (J_L) = 0,033 m/s, Pola aliran *plug* bergerak dengan kecepatan konsisten dengan kondisi tertentu.

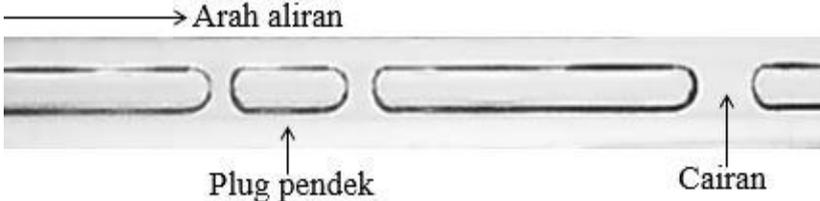
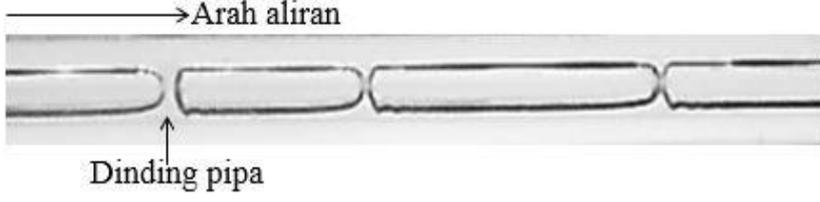
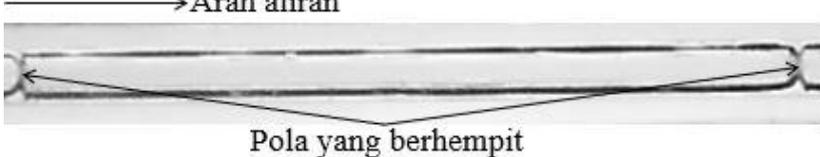
Tabel 4.1 Perbandingan pola aliran *plug* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G tetap 0,207 m/s dan nilai J_L bervariasi.

No	J_L	Gambar Pola Aliran
1	0,091 m/s	
2	0,149 m/s	
3	0,232 m/s	

Ketika kecepatan superfisial cairan dinaikkan panjang dari pemisah antar *plug* semakin panjang. Hal tersebut disebabkan oleh udara yang tertekan oleh air yang mengalami peningkatan. Dengan ini otomatis aliran *plug* yang terbentuk semakin pendek. Seperti pada tabel 4.1 yang menunjukkan bahwa dengan nilai J_G yang tetap dan J_L yang divariasikan meningkat sehingga terlihat pola yang dihasilkan semakin pendek.

Pada nilai kecepatan superfisial cairan yang bervariasi bentuk dari *plug* tidak banyak mengalami perubahan. Hanya saja, semakin besar nilai J_L untuk konsentrasi gliserin yang sama menimbulkan perubahan pada ekor *plug*.

Tabel 4.2 Perbandingan pola aliran *plug* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G bervariasi dan nilai J_L tetap 0,033 m/s.

No	J_L	Gambar Pola Aliran
1	0,207 m/s	
2	0,423 m/s	
3	0,871 m/s	

Ditunjukkan pada tabel 4.2, jika nilai J_G dinaikkan maka panjang dari *plug* akan bertambah. Kecepatan superfisial cairan dibuat tetap 0,232 m/s dan kecepatan superfisial gas (J_G) bervariasi yang dibuat meningkat panjang *plug* akan bertambah dan semakin bertambahnya nilai J_G maka jarak antar *plug* akan sangat berdekatan dapat dilihat pada J_G 0,871 m/s jarak antara ekor *plug* dengan kepala *plug* sangat berdekatan dikarenakan semakin bertambahnya nilai J_G dan nilai J_L tetap maka udara akan berusaha untuk menrobos air yang membatasi jarak antar *plug*.

4.1.2. Pola aliran *Bubbly*

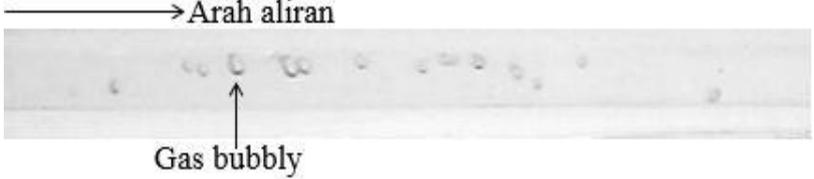
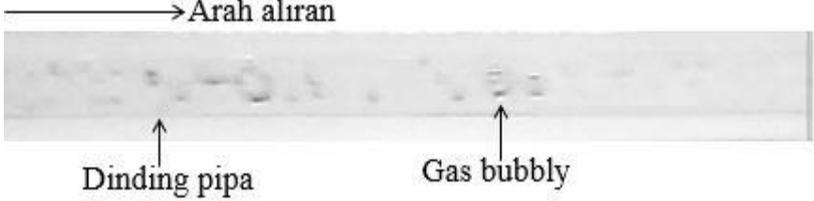
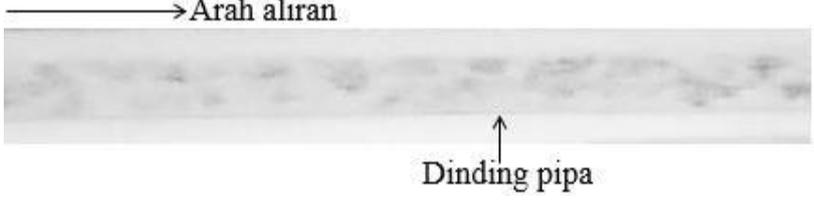
Pola aliran *bubbly* terbentuk ketika nilai kecepatan superfisial udara lebih rendah dari kecepatan superfisial cairan. Dengan debit air yang lebih tinggi daripada debit gas menyebabkan cairan di area *mixer* menumpuk, kemudian *bubbly* muncul ketika gas yang terkumpul dibagian atas dari *mixer* menerobos cairan yang terkumpul. Semakin kecilnya saluran pada *mixer* mengakibatkan udara yang

terkumpul terus mendorong cairan sehingga menyebabkan terjadinya aliran dua fasa, kemudian aliran udara yang berhasil keluar seperti terpotong-potong.

Pola *bubbly* yang berhasil diamati pada penelitian ini terkadang masih bercampur dengan aliran *plug*, kemunculan pola aliran seperti ini adalah ketika koordinat aliran *bubbly* berada setelah nilai koordinat aliran *plug*. Munculnya aliran *bubbly* penuh tanpa adanya aliran *plug*, hanya ketika nilai superfisial cairan tinggi, namun bentuk dari aliran yang muncul semakin tidak beraturan dan memiliki kecepatan yang tinggi. Dengan ditingkatkannya kecepatan superfisial cairan dan kecepatan superfisial udara aliran *bubbly* maka intensitas kemunculan *bubbly* semakin tinggi dan jarak antar *bubbly* semakin beragam. Debit fluida yang semakin membesar mengakibatkan fluida sulit ditembus oleh udara, sehingga gelembung menumpuk pada *mixer*. Ketika udara yang terkumpul sudah makin banyak dan kuat untuk mendorong fluida cair, aliran *plug* muncul terlebih dahulu yang diikuti aliran *bubbly* yang banyak.

Pola *bubbly* yang berhasil diamati pada penelitian ini muncul ketika nilai $(J_G) = 0,025$ m/s sedangkan nilai J_L berada jauh lebih tinggi yaitu di $(J_L) = 0,879$ m/s. Perbedaan akan terlihat ketika kecepatan superfisial air dan udara divariasikan.

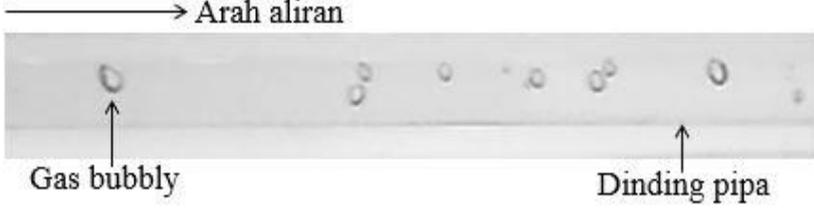
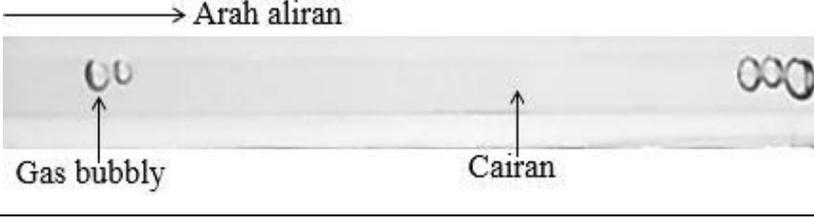
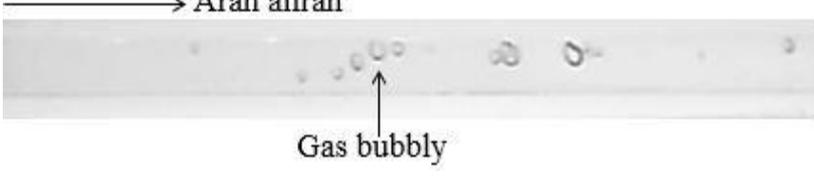
Tabel 4.3 Perbandingan pola aliran *bubbly* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G tetap 0,207 m/s dan nilai J_L bervariasi.

No	J_L	Gambar Pola Aliran
1	0,879 m/s	
2	2,297 m/s	
3	4,935 m/s	

Pola aliran *bubbly* mulai muncul penuh ketika nilai J_L tinggi namun semakin bertambahnya nilai J_L maka bentuk dari *bubbly* mulai mengecil dan semakin tidak beraturan. Dapat dilihat pada tabel 4.3 saat nilai J_G tetap 0,207 m/s dan nilai J_L dibuat bervariasi meningkat, pada nilai J_L 0,539 m/s *bubbly* yang muncul ukurannya relatif besar dan jumlahnya masih sedikit.

Pada nilai J_L 0,879 m/s jumlah *bubbly* yang muncul relatif banyak dan bentuknya mulai tidak beraturan. Fenomena ini juga terjadi pada nilai J_L 2,297 m/s dimana *bubbly* yang teramati ukuran dan bentuknya mulai tidak beraturan dan sangat kecil, hal ini disebabkan karena semakin tinggi nilai J_L maka gas akan sulit untuk menembus fluida cair sehingga ketika gas dapat menembus fluida cair maka gas yang keluar dari *mixer* akan bergerombol dan terpotong potong menjadi kecil.

Tabel 4.4 Perbandingan pola aliran *bubbly* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G bervariasi dan nilai J_L tetap 0,879 m/s.

No	J_G	Gambar Pola Aliran
1	0,025 m/s	
2	0,006 m/s	
3	0,116 m/s	

Hasil pengamatan yang dilakukan memiliki perbandingan bentuk pola *bubbly* dengan $J_L = 0,879$ m/s dengan J_G bervariasi yang ditunjukkan pada tabel 4.4. Pada saat *bubbly* berada pada $J_G = 0,066$ m/s terlihat bahwa jumlah *bubbly* yang sedikit dan berukuran kecil seiring dengan naiknya kecepatan superfisial udara pada $J_G = 0,116$ m/s terlihat jumlah *bubbly* yang meningkat, selanjutnya pada $J_G = 0,116$ m/s terlihat bahwa ukuran *bubbly* semakin tidak beraturan dan jarak antar *bubbly* semakin berdekatan, hal ini dikarenakan kecepatan udara yang semakin cepat dalam mendorong sebuah aliran membuat jarak antar *bubbly* semakin dekat.

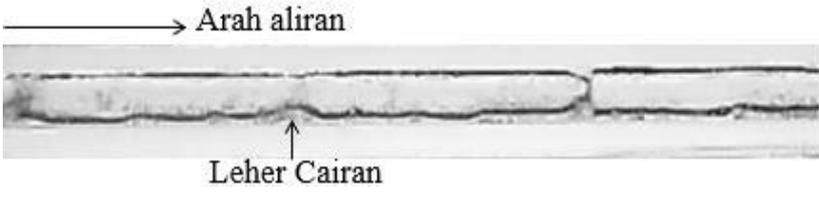
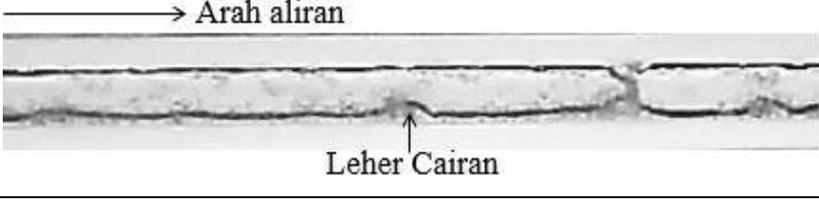
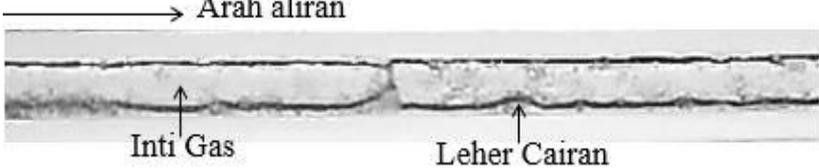
4.1.3. Pola aliran *Slug annular*

Pola aliran *slug annular* merupakan peralihan dari aliran *plug* ke aliran *annular*. Pola ini terjadi pada saat aliran udara sudah *continue* dan sementara aliran air bagian bawah maupun atas saluran pipa membentuk gelombang. Lapisan air yang ada pada bagian atas saluran pipa biasanya cenderung lebih tipis dari bagian bawah, terbentuknya pola aliran *slug annular* akibat adanya kenaikan pada

kecepatan superfisial gas (J_G). sehingga yang tadinya pola aliran *plug* yang terpotong oleh air kini berhasil ditembus oleh aliran udara, karena tegangan permukaan tak mampu mempertahankan bentuknya dan terbentuklah pola aliran *slug annular*.

Aliran *slug annular* mulai teramati pada (J_G) = 3 m/s dan (J_L) = 0,033 m/s. Ketika nilai kecepatan siperfisial gas dinaikkan mencapai (J_G) = 22,6 m/s, aliran *slug annular* menyerupai aliran *annular*. Kemunculan aliran *slug annular* selalu sama untuk setiap konsentrasi yang diujikan, perbedaannya yang terjadi pada total jumlah aliran *slug annular*.

Tabel 4.5 Perbandingan pola aliran *slug annular* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G tetap 9,62 m/s dan nilai J_L bervariasi.

No	J_L	Gambar Pola Aliran
1	0,033 m/s	
2	0,091 m/s	
3	0,149 m/s	

Perbedaan yang terjadi dengan meningkatnya nilai J_L tidak begitu jelas terlihat, tapi semakin besar nilai $J_L = 0,149$ m/s menyebabkan aliran *slug annular*, hampir putus dan akan membentuk aliran *plug*. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya volume air sehingga aliran udara mulai terdorong atau terhimpit sehingga terlihat pola *slug annular* yang hampir putus menyerupai aliran *plug*. Setiap naiknya nilai kecepatan superfisial cair maka aliran *slug annular* mulai

diikuti oleh *forthy bubbly* dan volume dari *forthy bubbly* ini meningkat seiring dengan naiknya kecepatan superfisial cair terdapat di bagian bawah pipa yang ditunjukkan pada tabel 4.5.

Tabel 4.6 Perbandingan pola aliran *slug annular* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G bervariasi dan nilai J_L tetap 0,091 m/s.

No	J_G	Gambar Pola Aliran
1	3 m/s	
2	4,238 m/s	
3	7 m/s	

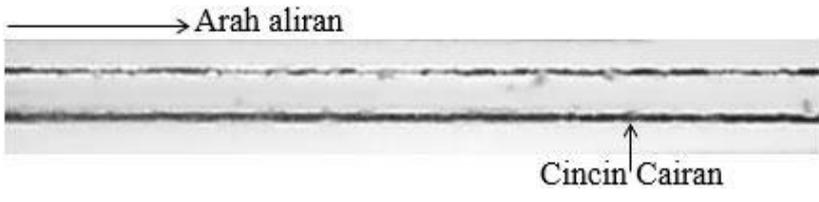
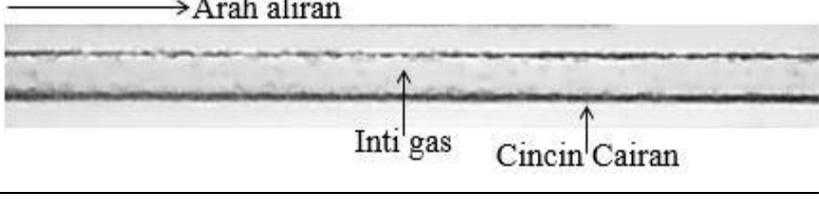
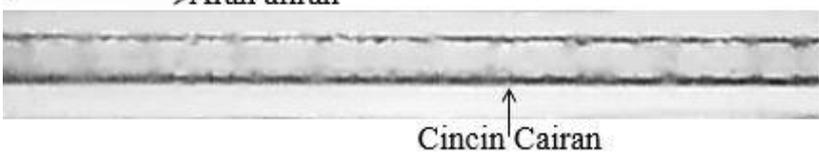
Pengaruh nilai J_L kenaikan nilai J_G tidak begitu jelas terlihat perbedaan yang terjadi akibat nilai J_G yang berubah. Nilai J_G yang divariasikan mengakibatkan terlihat sedikit perbedaan pada jumlah gelombang-gelombang air yang jauh lebih banyak, tetapi lebih kecil ketimbang pada J_G yang lebih kecil.

4.1.4. Pola aliran *Annular*

Bentuk pola aliran *annular* dengan aliran *slug annular* hampir mirip, terdapat gelombang di kedua aliran tersebut akan tetapi gelombang yang terdapat pada aliran *annular* lebih halus atau lebih tenang, hal ini dikarenakan kecepatan superfisial fluida gas (J_G) lebih besar dibandingkan dengan kecepatan superfisial fluida cair (J_L). Perbedaan fluida air dan udara yang cukup besar hal ini dapat menyebabkan aliran gas mengalir ditengah lapisan air yang tipis terdistribusi secara merata pada dinding pipa sepanjang saluran.

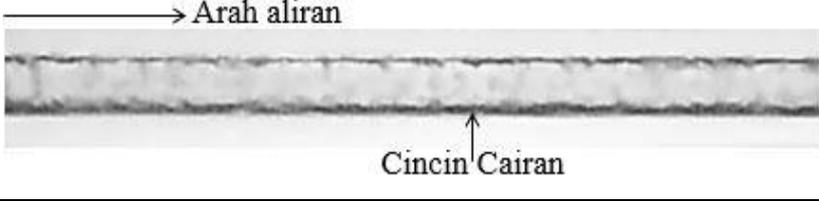
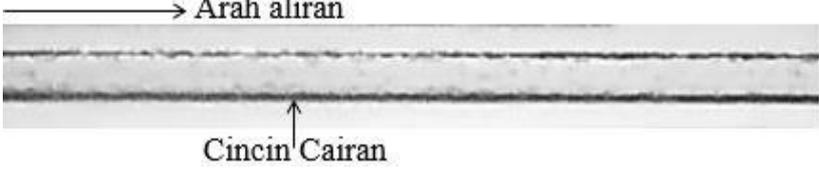
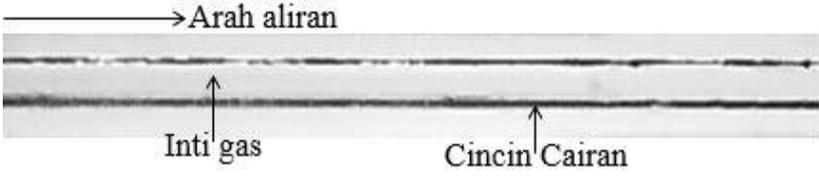
Terbentuknya pola aliran *annular* bermula ketika nilai $J_G = 50$ m/s dan $J_L = 0,033$ m/s. Aliran *annular* terlihat seperti aliran yang tenang, padahal jika diamati dengan seksama, aliran *annular* memiliki gelombang-gelombang kecil yang bergerak cepat

Tabel 4.7 Perbandingan pola aliran *annular* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G tetap 58,05 m/s dan nilai J_L bervariasi.

No	J_L	Gambar Pola Aliran
1	0,033 m/s	
2	0,091 m/s	
3	0,149 m/s	

Pada tabel 4.7 dimana pada nilai J_G yang dibuat tetap 58,05 m/s dan nilai J_L dibuat bervariasi meningkat berpengaruh pada semakin bertambahnya nilai J_L membuat kemunculan gelombang-gelombang kecil yang berada pada bagian bawah liquid film semakin banyak, hal tersebut dikarenakan semakin bertambahnya volume cairan yang berada pada *mixer* membuat udara yang berhasil menembus cairan kemudian menekan cairan sehingga semakin banyak cairan yang masuk membuat gelombang kecil yang semakin banyak.

Tabel 4.8 Perbandingan pola aliran *annular* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G bervariasi dan nilai J_L tetap 0,091 m/s.

No	J_G	Gambar Pola Aliran
1	50 m/s	
2	58,05 m/s	
3	66,3 m/s	

Pada tabel 4.8 dimana pada nilai J_L yang dibuat tetap 0,091 m/s dan nilai J_G dibuat bervariasi meningkat berpengaruh pada semakin bertambahnya nilai J_G membuat gelombang kecil yang berada pada bagian bawah liquid film semakin rata hal tersebut dikarenakan semakin bertambahnya volume gas pada *mixer* membuat gas akan menekan cairan sehingga bertambahnya fluida gas membuat cairan semakin tertekan dan mendekati rata.

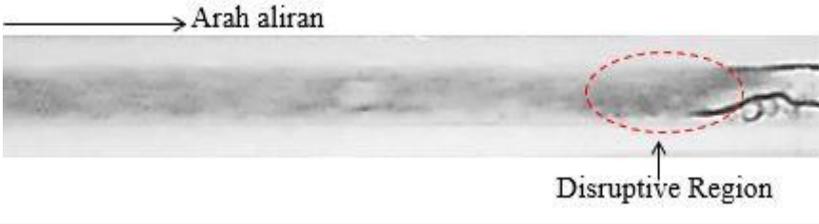
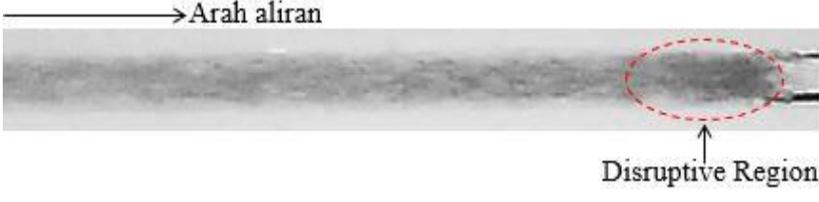
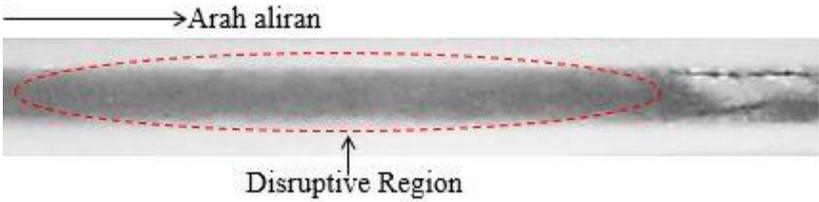
4.1.5. Pola aliran *Churn*

Terbentuknya pola aliran *churn* adalah ketika kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cairan tinggi. Ketika nilai J_L besar seharusnya aliran yang terbentuk adalah aliran *plug*, tetapi karena nilai J_G yang juga besar mengakibatkan air terdispersi menjadi kecil. Kecepatan alirannya pun sangat cepat sehingga pola yang teramati ketika melakukan pengambilan video hanya terlihat bayangan hitam pada ujung inti gas yang diikuti aliran fluida yang sangat cepat.

Pola aliran *churn* berbentuk *Plug* yang ekornya diikuti oleh gelembung-gelembung kecil yang bergerak sangat cepat, hal tersebut terjadi dikarenakan fluida

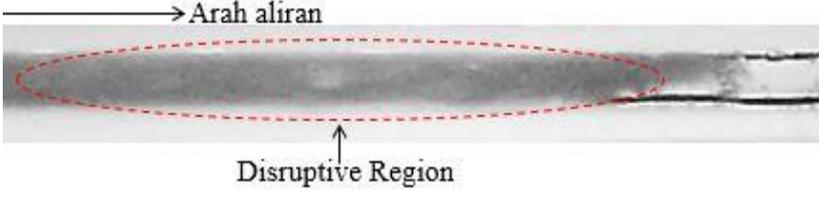
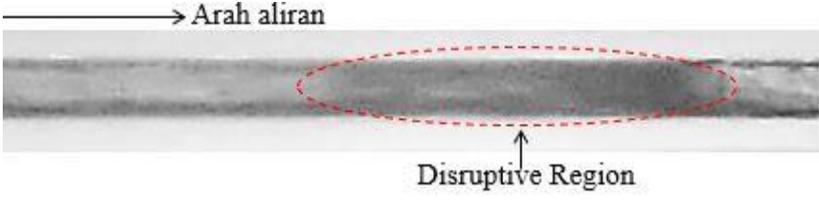
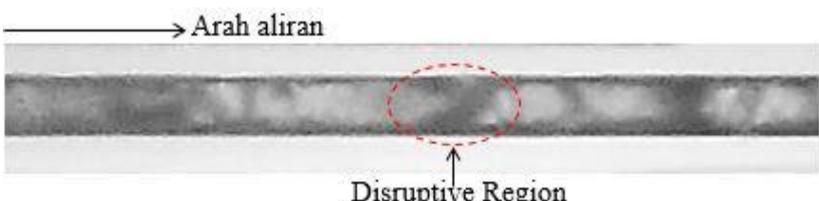
cair terdispersi menjadi kecil-kecil. Pola aliran *churn* yang muncul pada garis transisi antara *slug-annular* terdapat gelombang yang berada pada liquid film yang dibagian ekornya terdapat gelembung-gelembung kecil yang mengalir sangat cepat.

Tabel 4.9 Perbandingan pola aliran *churn* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G tetap 4,238 m/s dan nilai J_L bervariasi.

NO	J_L	GAMBAR POLA ALIRAN
1	0,7 m/s	
2	0,879 m/s	
3	2,297 m/s	

Pengamatan pola aliran *churn* terhadap pengaruh variasi nilai J_L terlihat seperti pada pada Tabel 4.9 dengan nilai J_G tetap, yaitu 4,238 m/s. Terlihat pengaruh kenaikan nilai J_L mengakibatkan bayangan hitam yang melaju pada pola aliran *churn* menjadi lebih tebal. Hal ini disebabkan debit aliran air yang lebih besar, sehingga aliran air yang melaju cepat dan terdispersi merata di dalam saluran dengan intensitas kemunculan yang tinggi.

Tabel 4.10 Perbandingan pola aliran *churn* dengan konsentrasi butanol 7%, dengan nilai J_G bervariasi dan nilai J_L tetap 0,879 m/s.

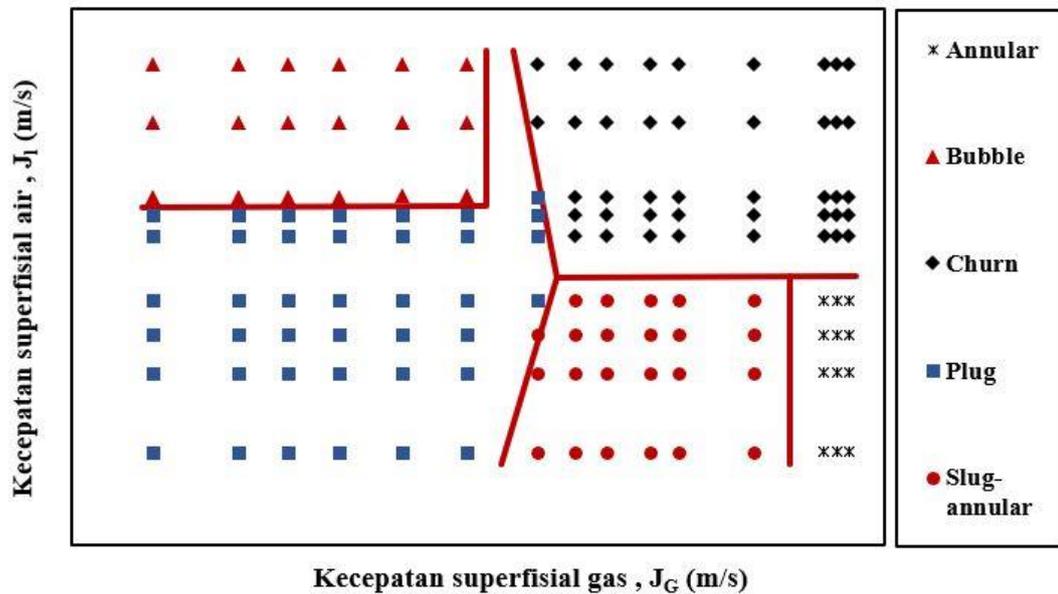
No	J_G	Gambar Pola Aliran
1	7 m/s	
2	9,62 m/s	
3	22,6 m/s	

Perbandingan pola aliran dengan peningkatan nilai J_G dan nilai J_L tetap, yaitu $J_L = 0,879$ m/s menyebabkan aliran udara menjadi lebih dominan. Hal ini ditandai dengan ciri ciri aliran yang melaju dengan cepat dan berkurangnya intensitas bayangan hitam yang muncul. Akan tetapi bentuk aliran *churn* menjadi semakin panjang seiring dengan kenaikan nilai J_G .

4.1.6. Peta Pola Aliran

Pola aliran yang telah dijustifikasi kemudian dipetakan berdasarkan variasi kecepatan superfisialnya. Pada peta pola aliran tersebut jarak titik menunjukkan kecepatan superfisial fluida gas (J_G) dengan nilai minimum 0,01 dan nilai maksimumnya 100, sedangkan titik kordinat kecepatan superfisial fluida cair (J_L) dengan nilai minimum 0,01 dan nilai maksimumnya 10. nilai pada kedua sumbu tersebut dinyatakan secara logaritmik. Pada peta pola aliran yang telah didapatkan terdapat pula garis transisi antar pola yang dimana garis transisi ini menunjukkan

titik kordinat aliran manakah yang berubah antar pola aliran satu dengan pola alirannya.



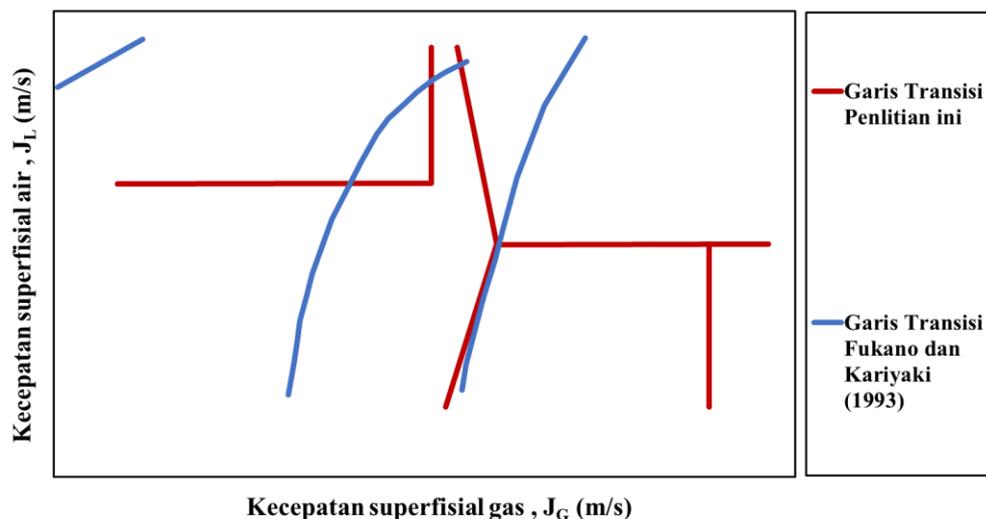
Gambar 4.1 Peta pola aliran pada konsentrasi butanol 7%

Pada gambar 4.1 diatas terlihat bahwa pola aliran *bubbly* terdapat pada posisi kiri atas peta pola aliran, nilai kecepatan superfisial fluida gas (J_G) yang kecil dan memiliki kecepatan superfisial fluida cair yang sangat besar. Aliran *bubbly* pada konsentrasi butanol 7% mulai terdapat pada $J_L = 0.879$ m/s dan meluas sampai $J_G = 0,871$ m/s. Pada peta pola aliran ini pola aliran *plug* sangat mendominasi serta aliran *churn* juga terlihat dominan tetapi tidak sampai melebihi aliran *plug*. Pola aliran *plug* mulai terbentuk pada kecepatan superfisial gas (J_G) rendah 0.025 m/s dan J_L rendah 0.033 m/s. Setelah itu meluas dengan peningkatan kecepatan superfisial fluida gas dan fluida cair sampai mencapai garis transisi dengan pola aliran *slug annular*. Pola aliran *slug annular* terbentuk di kecepatan superfisial fluida gas yang cukup tinggi 3 m/s, sementara untuk nilai kecepatan superfisial fluida cair rendah 0.033 m/s. Pola aliran *slug annular* terbentuk sampai kecepatan superfisial fluida cairnya mendekati garis transisi pola aliran *churn*, sedangkan untuk kecepatan superfisial fluida gas posisi garis transisi berdekatan dengan pola aliran *annular*, pola aliran *annular* posisinya berada pada kanan bawah peta pola aliran nilai $J_G = 50$ m/s dan nilai J_L 0.033 m/s sedangkan jika kecepatan superfisial

fluida cair dinaikan sampai $J_L = 0.232$ m/s maka aliran *annular* berbatasan dengan aliran *churn*. Pola aliran *churn* sendiri terbentuk ketika superficial gas (J_G) dan (J_L) sama-sama tinggi. Pola aliran *churn* berada di kanan atas pada peta pola aliran.

4.1.7. Perbandingan Peta Pola Aliran

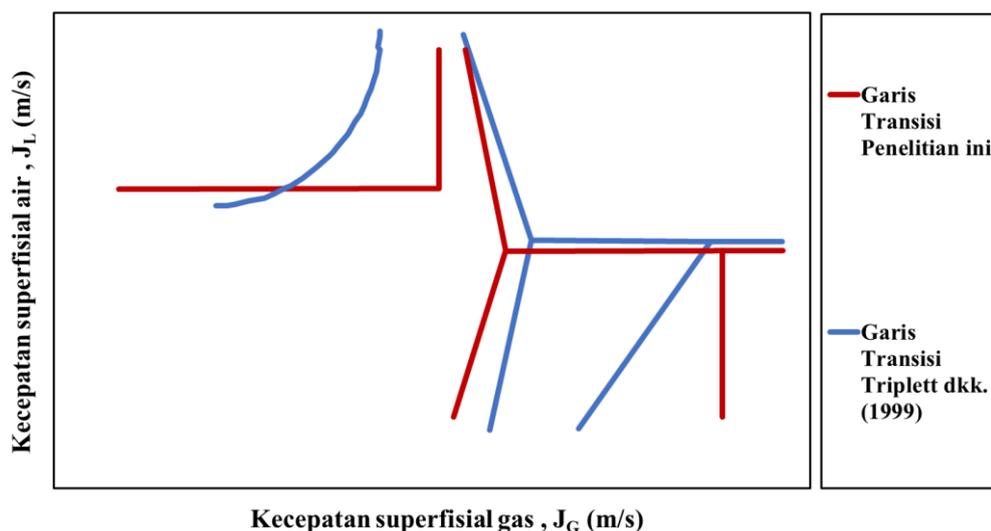
Perubahan garis transisi akibat dari perbedaan parameter yang digunakan serta untuk mengetahui konsistensi hasil penelitian perlu dilakukan perbandingan peta pola aliran dengan penelitian sebelumnya. Beberapa peneliti mencantumkan peta pola alirannya dan akan digunakan sebagai perbandingan peta pola aliran pada penelitian ini. Peta pola aliran yang akan digunakan adalah milik Fukano dan Kariyaki (1993), Triplett dkk. (1999), dan Chung dan Kawaji (2004).



Gambar 4.2 Perbandingan peta pola aliran dengan garis transisi
(Fukano dan Kariyaki, 1993)

Penelitian yang dilakukan oleh Fukano dan Kariyaki. (1993) tentang aliran dua fase menggunakan tiga variasi saluran yaitu 1 mm, 2,4 mm dan 4,9 mm dengan menggunakan fluida kerja air dan udara. Selain itu parameter yang dibahas pada penelitiannya adalah orientasi saluran. Fukano dan Kariyaki (1993) memvariasikan salurannya menjadi tiga arah yaitu horizontal, vertikal ke bawah dan vertikal ke atas. Perbandingan peta pola aliran Fukano dan Kariyaki (1993) terhadap butanol 7% dapat dilihat pada gambar 4.2. perbedaan yang sangat mencolok terjadi pada

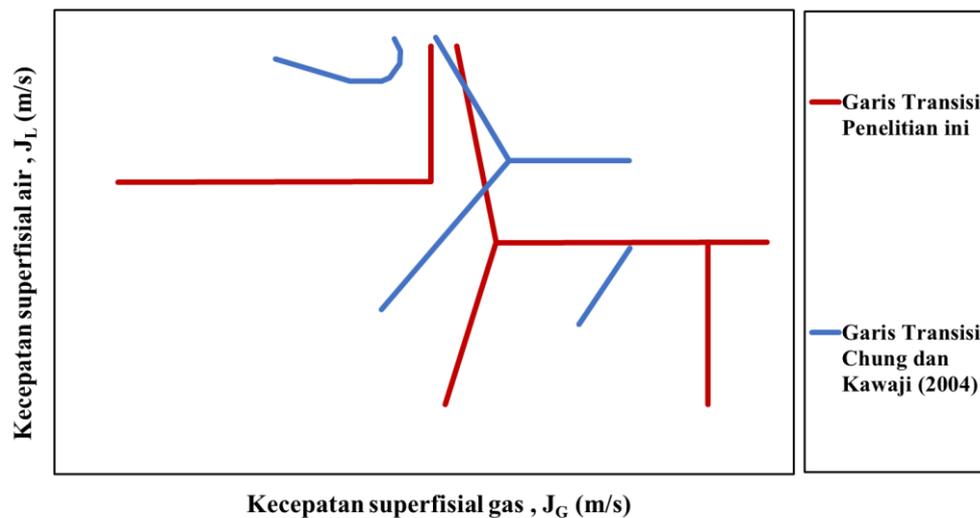
perbandingan peta pola aliran ini. Hal tersebut terjadi karena pada penelitiannya Fukano dan Kariyaki (1993) mengklasifikasikan pola alirannya menjadi tiga yaitu *bubbly*, *intermittent* dan *annular*. Garis transisi *intermittent/annular* Fukano dan Kariyaki (1993) hampir sejajar dengan garis transisi *plug/sluggannular* butanol 7%. Namun, garis transisi *intermittent/annular* muncul pada nilai J_G yang lebih kecil. Pola aliran *bubbly* yang muncul pada penelitian Fukano dan Kariyaki (1993) sangat sedikit bahkan *bubbly* kecil tidak muncul pada aliran *plug*. Oleh karena itu, garis transisi *bubbly/plug* Fukano dan Kariyaki (1993) sangat berbeda dengan butanol 7%.



Gambar 4.3 Perbandingan peta pola aliran dengan garis transisi (Triplett dkk., 1999)

Triplett dkk. (1999) melakukan penelitian aliran dua fase pada saluran 1,097 mm dan 1,45 mm menggunakan fluida kerja udara dan air. Pada penelitiannya terdapat lima pola aliran yang berhasil diamati yaitu *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*. Perbandingan peta pola aliran pada Gambar 4.3 menunjukkan peta pola aliran Triplett dkk. (1999) memiliki garis transisi yang menyerupai garis transisi butanol 7%. Namun, garis transisi antara *bubbly/plug* Triplett dkk. (1999) tidak seluas garis transisi butanol 7%. Selain itu, garis transisi antara *slug-annular/annular* bersilangan dengan garis transisi butanol 7% tetapi lebih condong

ke arah kiri dengan nilai J_G yang lebih kecil. Garis transisi antara *slug-annular/annular* yang condong ke kiri menandakan bahwa pola aliran *annular* Triplett dkk. (1999) muncul pada J_G yang lebih rendah dibandingkan dengan butanol 7%.



Gambar 4.4 Perbandingan peta pola aliran dengan garis transisi (Chung dan Kawaji 2004)

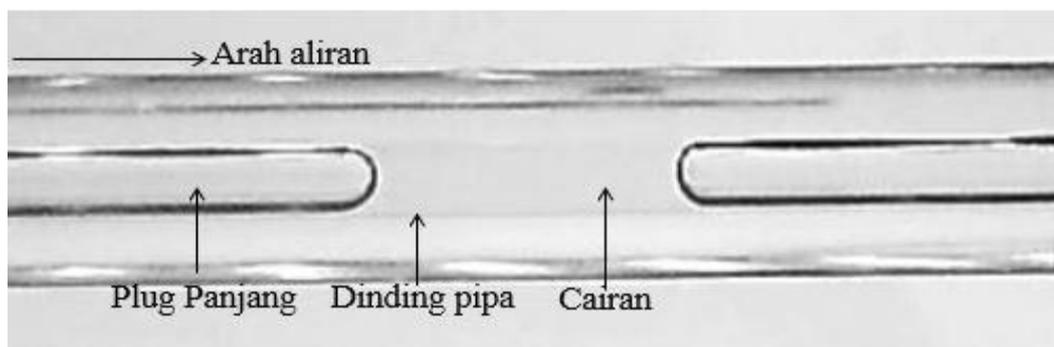
Peta pola aliran yang dihasilkan pada penelitian Chung dan Kawaji (2004) juga hampir menyerupai dengan peta pola aliran butanol 7%. Penelitian yang dilakukan Chung dan Kawaji (2004) membahas tentang pengaruh diameter saluran pipa terhadap karakteristik aliran dua fase. Pola aliran yang berhasil diamati yaitu *bubbly*, *slug*, *churn*, *slug-annular* dan *annular*. Gambar 4.4 menunjukkan *bubbly* yang terbentuk pada penelitiannya memiliki jumlah yang sedikit terlihat dari garis transisi antara *bubbly/plug* memiliki luas yang lebih kecil dibandingkan dengan garis transisi butanol 7%. Garis transisi antara pola *plug/churn* yang terbentuk pada penelitian Chung dan Kawaji (2004) hampir menyerupai garis transisi butanol 7%. Selain itu, perbedaan yang sangat mencolok dapat dilihat pada garis transisi *churn/slug-annular* yang sejajar dengan garis transisi butanol 7%. Namun, garis transisi *churn/slug-annular* Chung dan Kawaji (2004) muncul pada nilai J_L yang lebih tinggi dari kedua garis transisi *churn/slug-annular* lainnya.

4.2. Fraksi Hampa

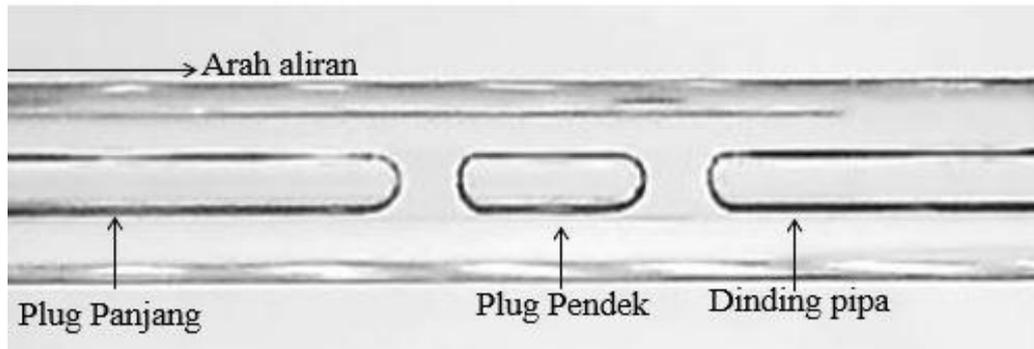
Fraksi hampa pada penelitian ini didapatkan dari pengolahan data pola aliran yang berhasil didapatkan dari pembahasan sebelumnya yaitu *plug*, *bubbly*, *slug-annular*, *annular* dan *churn*. Pola aliran yang didapat kemudian diproses menggunakan *image processing* pada posisi 26 *pixel* (6,879 mm) dari sisi *inlet* yang kemudian menghasilkan *time-average* dengan fungsi antara nilai fraksi hampa dengan waktu yaitu 1 detik. Hasil *time-average* yang didapat kemudian digunakan untuk mengetahui nilai *Probability Distribution Function* (PDF) dengan fungsi fraksi hampa (ϵ [-]).

4.2.1. Fraksi Hampa Pola Aliran *Plug*

Pola aliran *plug* pada saluran mini muncul ketika nilai J_G dan nilai J_L sama-sama rendah ditandai dengan munculnya *elongated bubbly* atau yang biasa disebut dengan *plug*. Pola aliran *plug* seringkali ditandai dengan adanya gelembung-gelembung udara yang menutupi seluruh dinding pipa dengan panjang pola aliran yang bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa diameter *plug* sama dengan diameter pipa mini. Berdasarkan fasenya pola aliran *plug* dibedakan menjadi dua yaitu *plug* udara dan *plug* air. *Plug* adalah pola aliran yang berdasarkan bentuknya dikategorikan sebagai aliran *bubbly* yang memanjang (*elongated bubbly*).



(a)

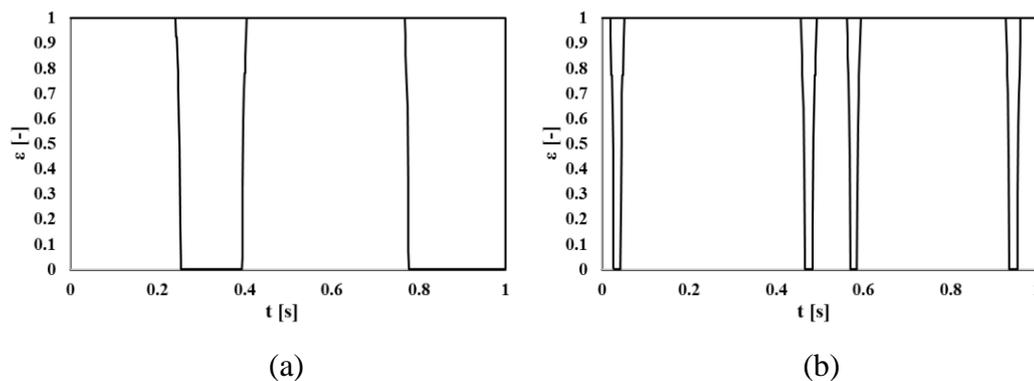


(b)

Gambar 4.5 Fraksi hampa pola aliran *plug* (a) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

(b) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s

Gambar 4.5 menunjukkan fraksi hampa pola aliran *plug* dengan variabel (a) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s. Perbedaan mencolok terlihat pada kedua gambar pola aliran *plug*. Variabel a memiliki pola aliran *plug* panjang yang cenderung berdekatan. Sementara itu, variabel b memiliki kombinasi antara *plug* panjang dan *plug* pendek dengan jarak yang berjauhan dan juga memiliki *bubbly* yang tidak banyak.



(a)

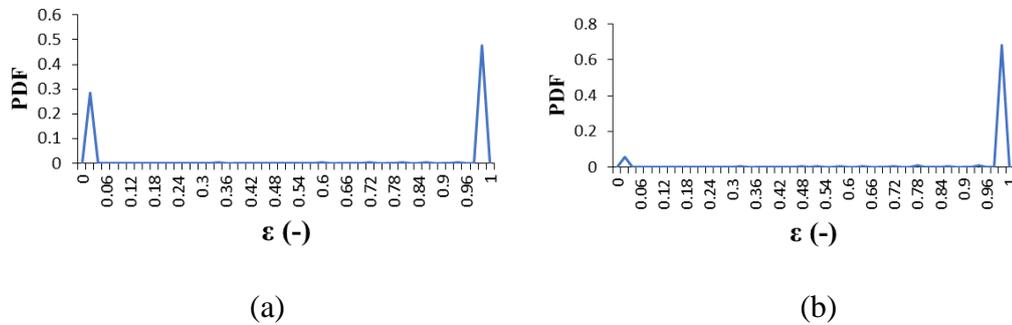
(b)

Gambar 4.6 *Time-Average* pola aliran *plug* (a) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

(b) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s

Grafik *time-average* pada gambar 4.6 menunjukkan variabel a memiliki *plug* yang panjang dengan nilai fraksi hampa maksimum yaitu 1. Sementara itu, aliran *plug* variabel b juga memiliki nilai fraksi hampa maksimum yaitu 1. Namun, pada variabel b jumlah *plug* yang berhasil diamati dalam satu detik berjumlah 3

buah. Variabel b memiliki jumlah *plug* lebih banyak dibandingkan dengan variabel a karena pada variabel b aliran fluida mengalir lebih cepat.



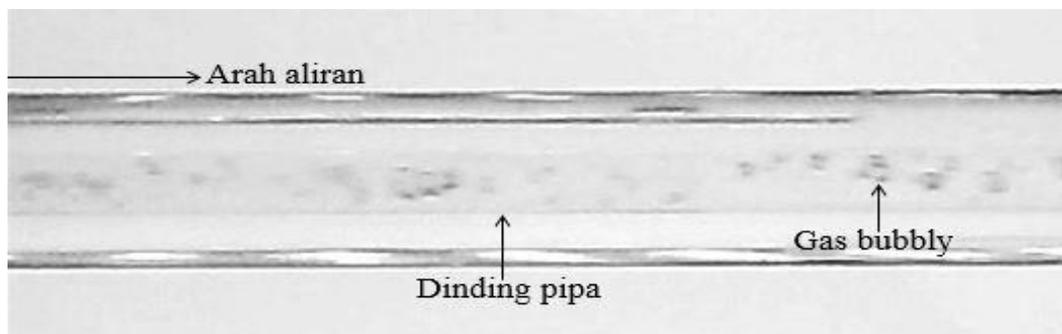
Gambar 4.7 PDF pola aliran *plug* (a) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

(b) $J_G = 0,207$ m/s, $J_L = 0,232$ m/s

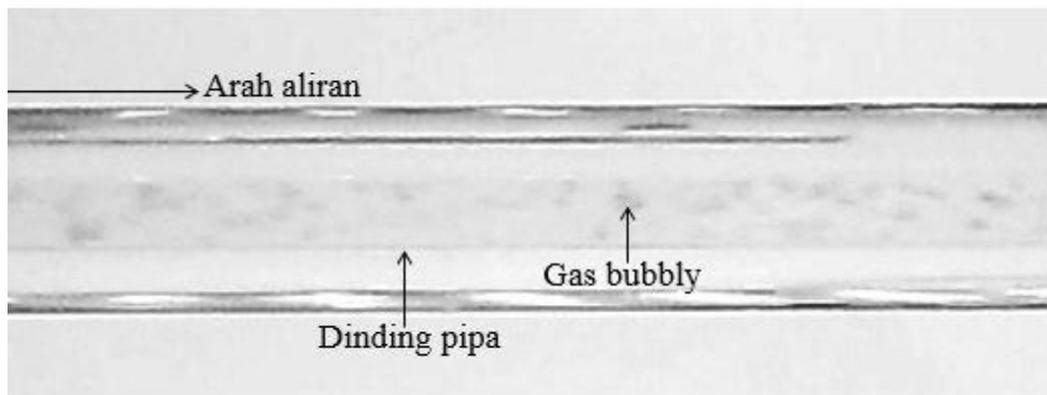
Grafik *Probability Distribution Function* (PDF) pada gambar 4.7 menunjukkan pada variabel a nilai fraksi hampa 0 dan 1 mendominasi dengan nilai probabilitas 0,5 dan 0,3 dan sedangkan pada variabel b nilai fraksi hampa didominasi oleh 0 dan 1 dengan nilai probabilitas 0,78.

4.2.2. Fraksi Hampa Pola Aliran *Bubbly*

Pola aliran *bubbly* muncul ketika nilai J_G rendah dan nilai J_L tinggi. Diawali dengan munculnya gelembung-gelembung udara dengan diameter sama dengan diameter dalam pipa atau lebih kecil dari diameter pipa. Naiknya nilai J_L menyebabkan semakin banyaknya *bubbly* yang muncul dengan ukuran *bubbly* yang semakin mengecil.



(a)

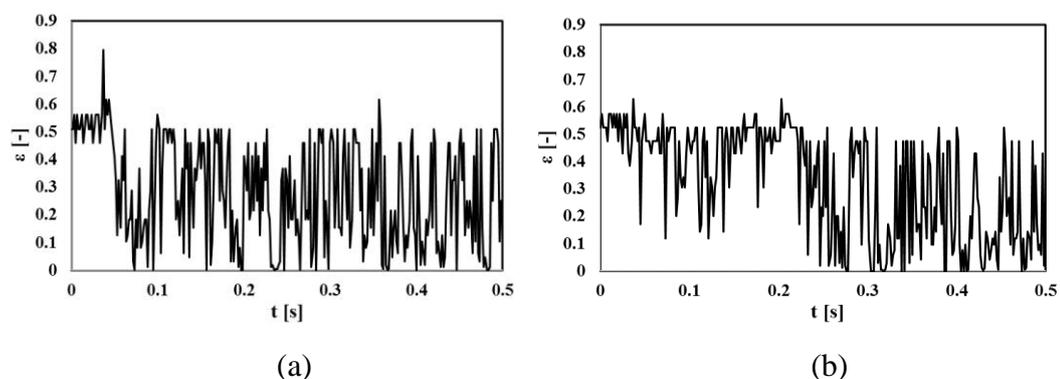


(b)

Gambar 4.8 Fraksi hampa pola aliran *bubbly* (a) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

(b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

Gambar 4.8 menunjukkan fraksi hampa pola aliran *bubbly* dengan variabel (a) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s dan (b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s. Perbedaan pola aliran pada kedua variabel tidak begitu terlihat. Variabel b memiliki nilai J_G yang lebih tinggi dibandingkan variabel a. Kedua variabel didominasi oleh *bubbly* kecil dengan ukuran yang bervariasi.



(a)

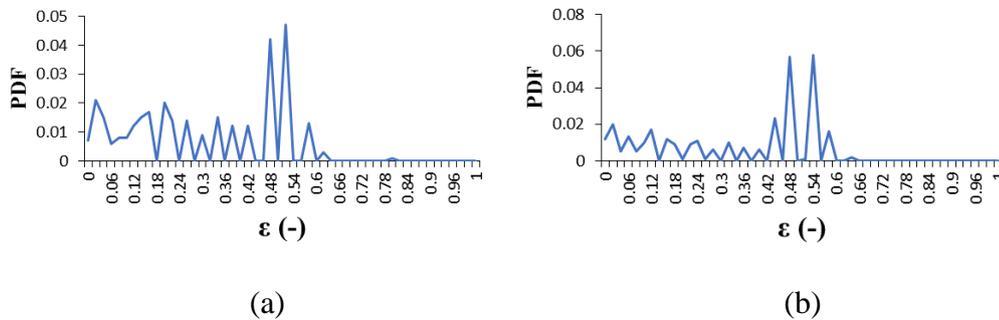
(b)

Gambar 4.9 *Time-Average* pola aliran *bubbly* (a) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

(b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

Grafik *time-average* pada gambar 4.9 menunjukkan kedua variabel aliran *bubbly* memiliki nilai fraksi hampa tidak mencapai 1. Hal tersebut terjadi karena pada kedua aliran didominasi oleh *bubbly* kecil. Nilai fraksi hampa terbesar pada variabel a yaitu 0,8, sedangkan nilai fraksi hampa terbesar pada variabel b yaitu

0,62 Aliran *bubbly* pada kedua variabel cenderung terlalu dekat sehingga ada beberapa *bubbly* yang berdempetan.



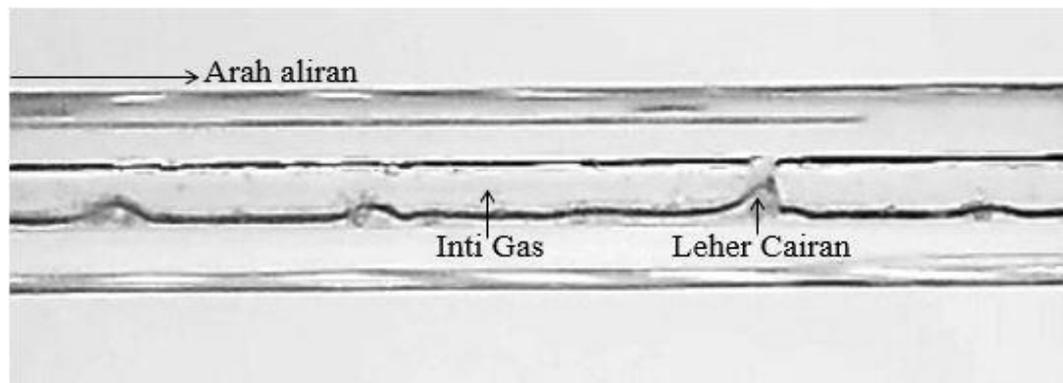
Gambar 4.10 PDF pola aliran *bubbly* (a) $J_G = 0,066$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

(b) $J_G = 0,116$ m/s, $J_L = 2,297$ m/s

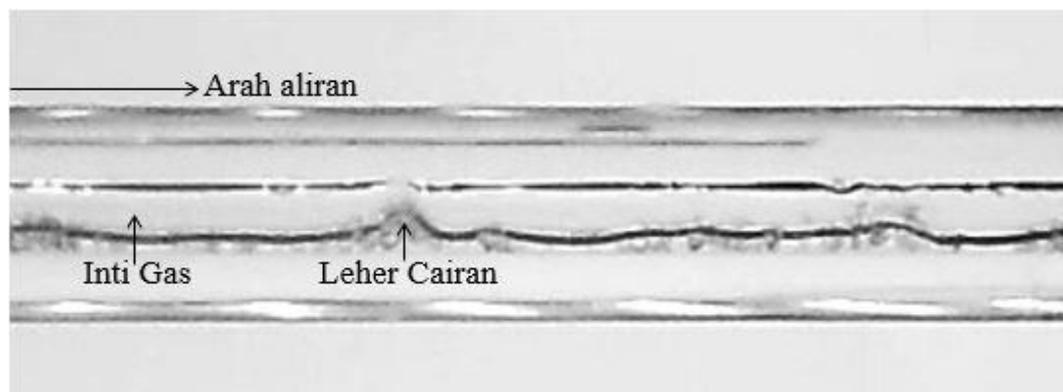
Grafik *Probability Distribution Function* (PDF) pada gambar 4.10 menunjukkan kedua variabel memiliki bentuk yang serupa. Namun, pada variabel b nilai fraksi hampa antara 0,4 sampai 0,6 lebih tinggi dibandingkan dengan variabel a pada nilai fraksi hampa yang sama. Sementara itu, nilai fraksi hampa yaitu 0,54 pada variabel b lebih tinggi dibandingkan variabel a dengan nilai probabilitas variable a yaitu 0,47 dan variable b yaitu 0,58.

4.2.3. Fraksi Hampa Pola Aliran *Slug-annular*

Pola aliran *slug-annular* terbentuk karena aliran *plug* yang mengalami kenaikan nilai J_G . Debit udara yang meningkat mampu menembus *water bridge* sehingga *plug* yang terpisah menjadi satu dan terbentuk leher cairan. Pola aliran *slug-annular* dapat dikatakan sebagai transisi dari pola aliran *plug* menjadi *annular* yaitu fase cairan terdistribusi secara simetris pada dinding pipa bersamaan dengan naiknya nilai J_G .



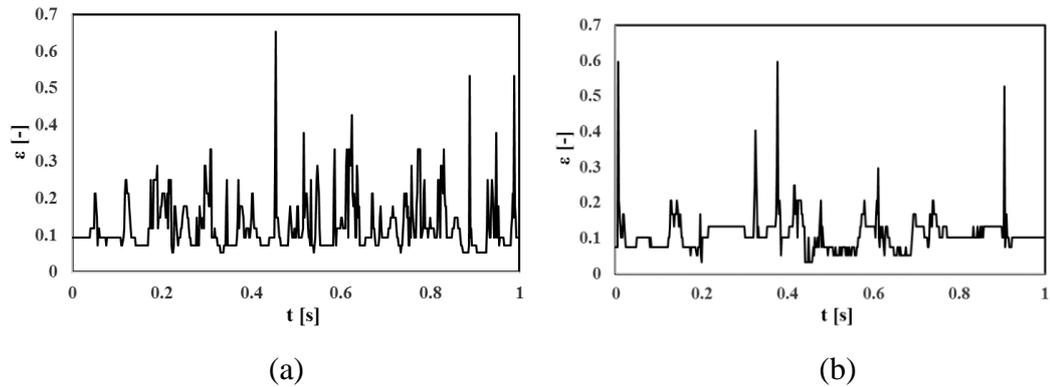
(a)



(b)

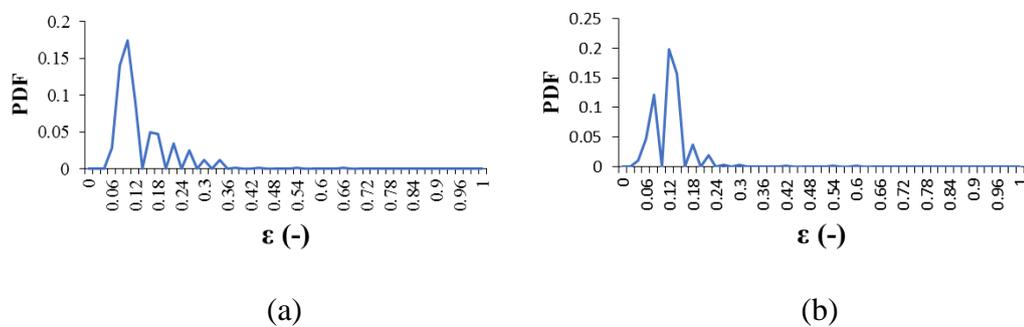
Gambar 4.11 Fraksi hampa pola aliran *slug annular* (a) $J_G = 4,238$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

Gambar 4.11 menunjukkan fraksi hampa pola aliran *slug-annular* dengan variabel (a) $J_G = 4,238$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s. Perbedaan mencolok terlihat pada kedua gambar pola aliran *slug-annular*. Variabel a memiliki pola aliran *slug-annular* dengan leher cairan atau *liquid neck* yang jarang. Sementara itu, pada variabel b terdapat banyak leher cairan dengan sesekali muncul *forthy bubbly* pada lapisan cairan bawah.



Gambar 4.12 *Time-Average* pola aliran *slug annular* (a) $J_G = 4,238$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

Grafik *time-average* pada gambar 4.12 menunjukkan variabel b memiliki grafik yang lebih stabil dibandingkan dengan variabel a. Nilai fraksi hampa variabel a cenderung konstan tetapi pada detik 0,45 leher cairan yang muncul lebih condong ke dalam pipa. Untuk Nilai fraksi hampa variabel b cenderung konstan dan leher cairan yang terbentuk tidak sebanyak pada variabel a, tetapi pada detik 0,06 dan 0,37 leher cairan yang muncul lebih condong ke dalam pipa.



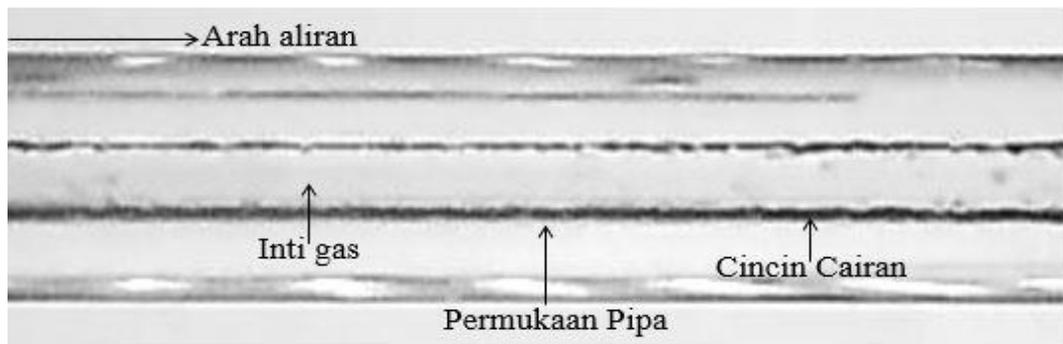
Gambar 4.13 PDF pola aliran *slug annular* (a) $J_G = 4,238$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s (b) $J_G = 9,62$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

Grafik *Probability Distribution Function* (PDF) pada tabel 4.13 menunjukkan bahwa kedua variabel memiliki grafik yang hampir serupa. Namun, pada variabel a terdapat enam nilai probabilitas yang mendominasi dengan nilai tertingginya yaitu 0,174. Sementara itu, pada variabel b hanya didominasi oleh empat nilai probabilitas dengan nilai tertinggi yaitu 0,2. Berdasarkan hal tersebut

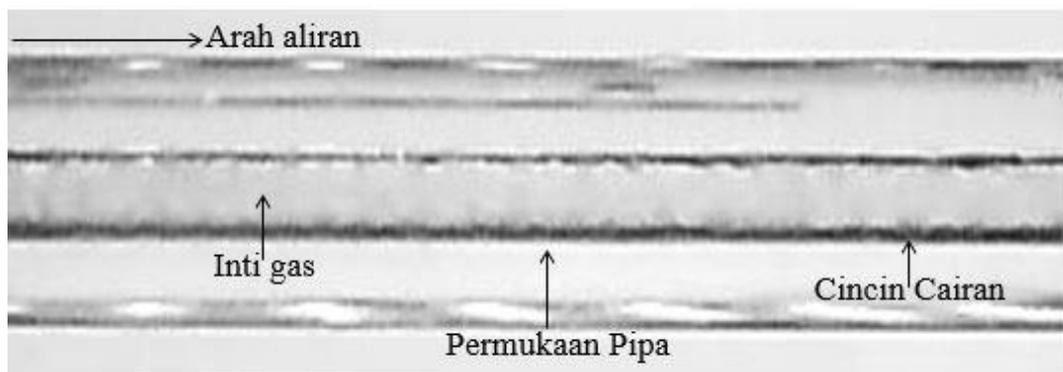
kita dapat mengetahui bahwa pada variabel a aliran *slug-annular* cenderung lebih stabil berdasarkan tingginya nilai probabilitas.

4.2.4. Fraksi Hampa Pola Aliran *Annular*

Setelah aliran *slug-annular* meningkatnya nilai J_G dengan J_L konstan menyebabkan terjadinya aliran *annular*. Aliran udara mengalir di tengah pipa sebagai gas inti, sedangkan aliran cairan mengalir pada dinding pipa sebagai film cairan. Perbedaan nilai superficial sangat terlihat jelas pada aliran *annular* sehingga terjadi slip.



(a)



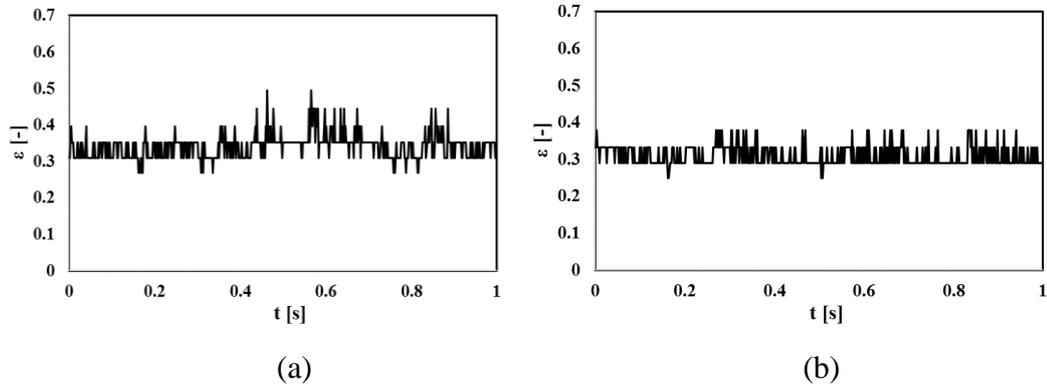
(b)

Gambar 4.14 Fraksi hampa pola aliran *annular* (a) $J_G = 58,05$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

(b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

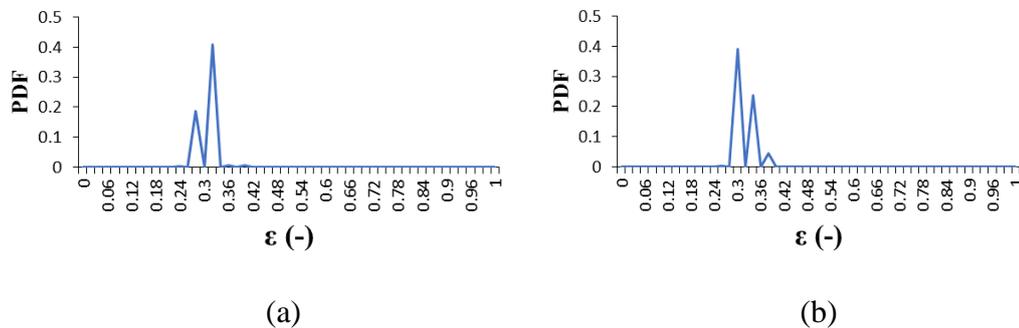
Gambar 4.14 menunjukkan fraksi hampa pola aliran *annular* dengan variabel (a) $J_G = 58,05$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s dan (b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s. Perbedaan pada kedua gambar tidak terlihat signifikan. Namun, jika diperhatikan

secara seksama variabel b memiliki lapisan film cairan yang lebih tebal dibandingkan dengan lapisan film cairan variabel a.



Gambar 4.15 *Time-Average* pola aliran *annular* (a) $J_G = 58,05$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s
(b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

Grafik *time-average* pada tabel 4.15 menunjukkan variabel b memiliki nilai fraksi hampa yang lebih stabil dibandingkan dengan variabel a. Selain itu, nilai fraksi hampa tertinggi ada pada variabel a yaitu 0,495 dan pada variabel b 0,378.



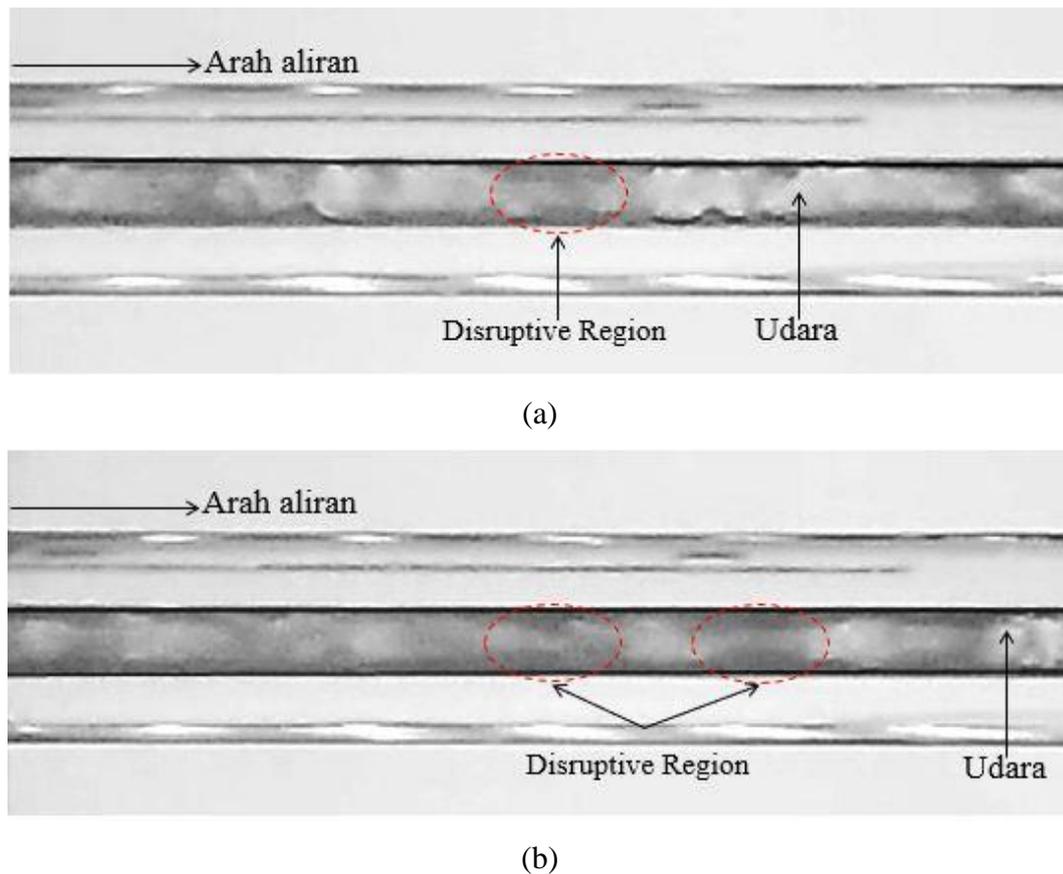
Gambar 4.16 PDF pola aliran *annular* (a) $J_G = 58,05$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s
(b) $J_G = 66,3$ m/s, $J_L = 0,033$ m/s

Grafik *Probability Distribution Function* (PDF) pada gambar 4.16 menunjukkan pada variabel a nilai fraksi hampa 0,32 mendominasi dengan nilai probabilitas 0,4, sedangkan pada variabel b nilai fraksi hampa didominasi oleh 0,3 dengan nilai probabilitas 0,39.

4.2.5. Fraksi Hampa Pola Aliran *Churn*

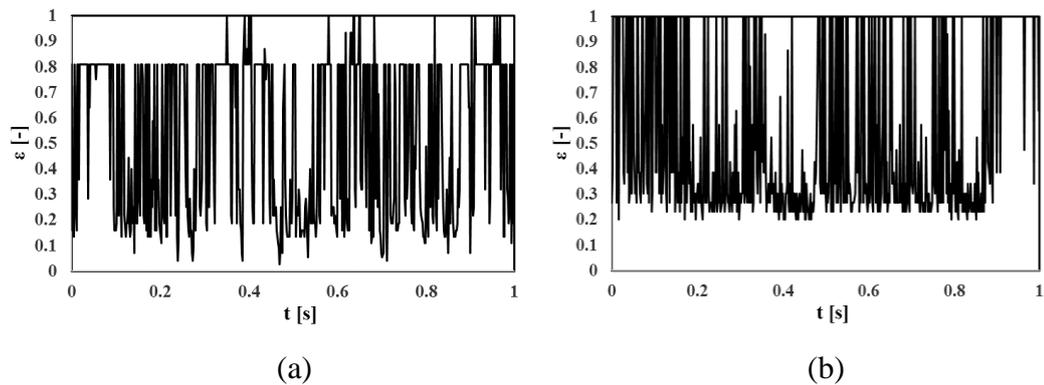
Pola aliran *churn* terbentuk ketika nilai J_G dan J_L samasama tinggi dengan bentuk yang tidak berbentuk atau acak. Pola aliran *churn* ditandai dengan kabut

hitam yang muncul akibat dari aliran cairan yang terdispersi menjadi butiran halus karena nilai kecepatan superfisial gas (J_G) yang tinggi. Tidak jarang pola aliran *churn* pada kecepatan superfisial gas (J_G) yang cukup tinggi mengandung sedikit *plug* panjang yang ekornya terdispersi menjadi butiran halus.



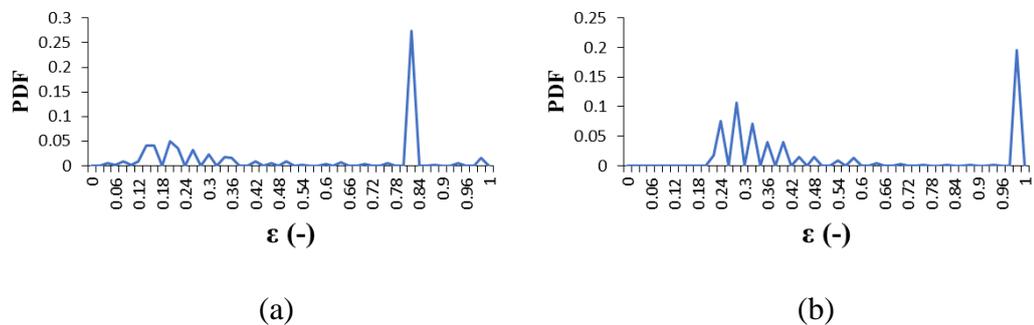
Gambar 4.17 Fraksi hampa pola aliran *churn* (a) $J_G = 22,6$ m/s, $J_L = 0,539$ m/s
(b) $J_G = 50$ m/s, $J_L = 0,7$ m/s

Gambar 4.17 menunjukkan fraksi hampa pola aliran *churn* dengan variabel (a) $J_G = 22,6$ m/s, $J_L = 0,539$ m/s dan (b) $J_G = 50$ m/s, $J_L = 0,7$ m/s. Perbedaan mencolok terlihat pada kedua gambar pola aliran *churn*. Pola aliran *churn* pada variabel b memiliki area distorsi yang lebih banyak dibandingkan dengan variabel a. Udara pada variabel b terlihat lebih gelap dibandingkan variabel a karena variabel b memiliki nilai J_G yang lebih tinggi dan nilai J_L yang lebih tinggi dibandingkan dengan variabel a.



Gambar 4.18 *Time-Average* pola aliran *churn* (a) $J_G = 22,6$ m/s, $J_L = 0,539$ m/s
(b) $J_G = 50$ m/s, $J_L = 0,7$ m/s

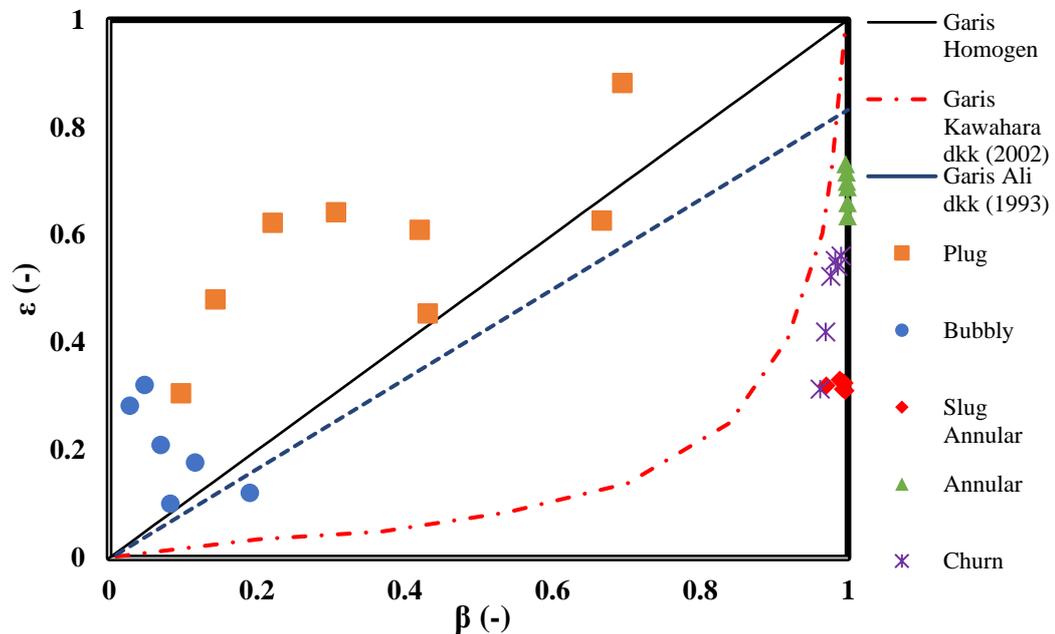
Grafik *time-average* pada gambar 4.18 menunjukkan variabel b memiliki banyak kenaikan nilai fraksi hampa dibandingkan dengan variabel a. Kenaikan nilai fraksi hampa terjadi akibat dari distorsi yang terjadi pada aliran *churn*. Nilai fraksi hampa maksimum pada variabel b didominasi oleh 1, sedangkan pada variabel a nilai maksimum fraksi hampanya adalah 1 tetapi tidak dominan.



Gambar 4.19 PDF pola aliran *churn* (a) $J_G = 22,6$ m/s, $J_L = 0,539$ m/s
(b) $J_G = 50$ m/s, $J_L = 0,7$ m/s

Grafik *Probability Distribution Function* (PDF) pada gambar 4.19 menunjukkan perbedaan yang signifikan pada kedua grafik PDF di atas. Pada variabel a nilai fraksi hampa 0,82 mendominasi dengan nilai probabilitas 0,274, sedangkan pada variabel b nilai fraksi hampa didominasi oleh 1 dengan nilai probabilitas 0,195.

4.2.6. Hubungan Parameter



Gambar 4.20 Hubungan antara fraksi hampa homogen dengan fraksi hampa hasil penelitian ini

Gambar 4.20 menunjukkan hasil pengukuran fraksi hampa dengan model homogenya yaitu $\beta = J_G/(J_G+J_L)$. Garis berwarna hitam menunjukkan persamaan homogen dimana $\varepsilon = \beta$, garis berwarna biru menunjukkan persamaan Ali dkk (1993) dimana $\varepsilon = 0,8\beta$ dan garis berwarna merah menunjukkan persamaan kawahara dkk (2002) dimana $\varepsilon = (0,03\beta^{0,5})/(1-0,97\beta^{0,5})$ Pada gambar 4.20 terdapat banyak data yang menjauhi garis homogenya. Hal ini menandakan terjadinya slip rasio yang besar pada data tersebut. Besarnya nilai slip rasio tersebut dikarenakan kecepatan superfisial gas jauh lebih besar daripada kecepatan superfisial cairan. Tetapi pada beberapa data tertentu terdapat data yang mendekati garis homogenya. Hal ini menandakan perbandingan kecepatan superfisial gas dan kecepatan superfisial cairan mendekati satu. Dalam hal ini pola aliran yang terjadi adalah *plug* dimana fase gas dari pola aliran tersebut memenuhi diameter dinding pipa sehingga fase air tidak dapat melewati fase gas tersebut.

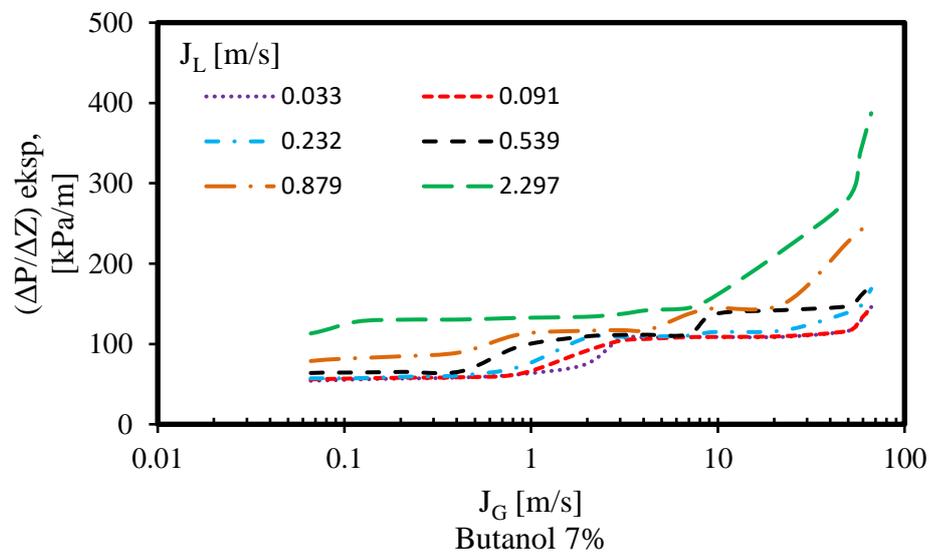
Fraaksi Hampa dan Gradien tekanan memiliki hubungan dengan pola aliran yaitu grafik fraksi hampa menggambarkan karakteristik dari setiap pola aliran dan

mengetahui komposisi fasa gas dan fasa air pola aliran tersebut. Nilai fraksi hampa dipengaruhi oleh J_G dan J_L yang bervariasi dan pola aliran yang terjadi. Nilai gradien tekanan berpengaruh terhadap pola aliran, grafik gradien tekanan terhadap waktu menggambarkan pola aliran yang terjadi.

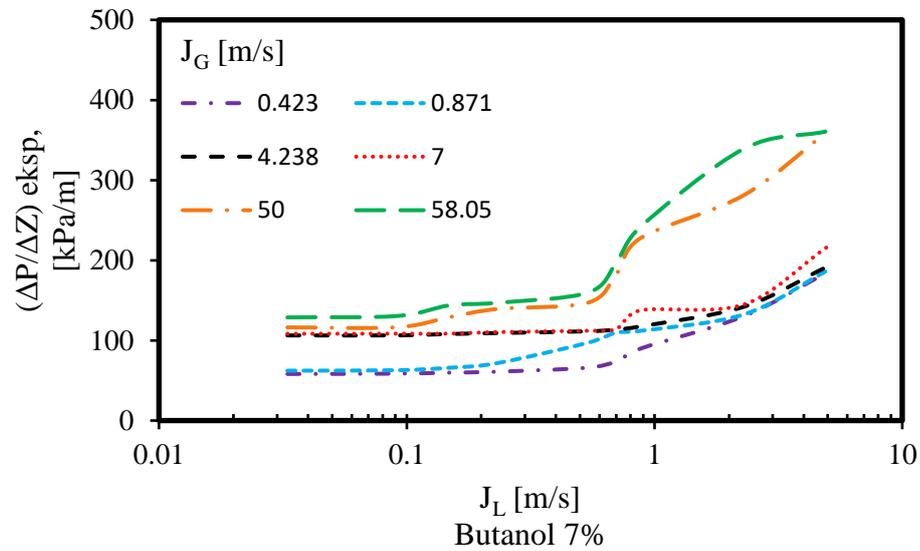
4.3. Gradien Tekanan

Penelitian ini membahas tentang penurunan tekanan per satuan panjang (gradien tekanan) aliran dua fase pada pipa kaca dengan diameter 1,6 mm dan panjang 400 mm dengan variasi J_G dan J_L . Pada penelitian ini data yang diambil yaitu penurunan tekanan tiap satuan panjang (gradien tekanan). Data gradien tekanan diambil menggunakan sensor *Pressure transducer MPX System* yang telah dipasang dan data disambungkan ke komputer.

4.3.1. Pengaruh Kecepatan Superfisial Terhadap Gradien Tekanan pada Aliran Dua Fase Udara-Akuades dan Butanol 7%



(a)



(b)

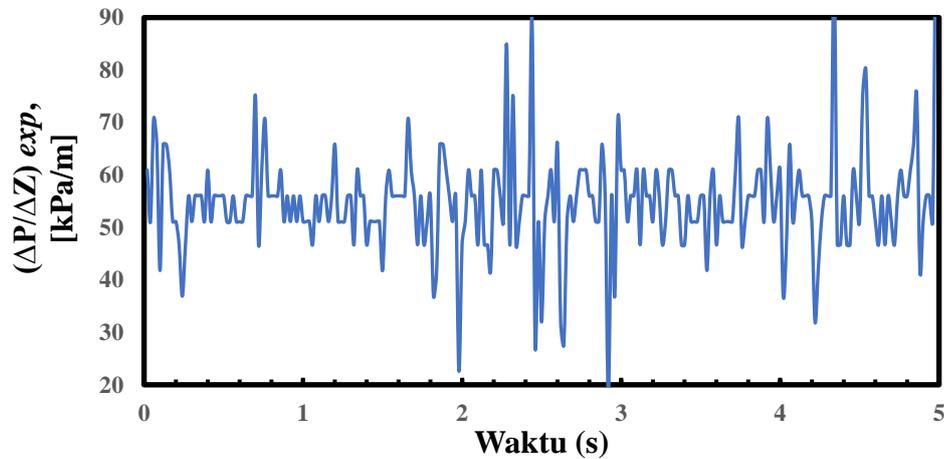
Gambar 4.21 (a) Pengaruh J_L terhadap gradien tekanan dengan variasi J_G ,

(b) Pengaruh J_G terhadap gradien tekanan dengan variasi J_L

Pada penelitian ini kecepatan superfisial gas (J_G) dan kecepatan superfisial cairan (J_L) dibuat bervariasi agar mengetahui efek yang terjadi akibat kenaikan maupun penurunan kecepatan superfisial terhadap gradien tekanan. Penelitian ini dilakukan agar terlihat pengaruh dari perubahan kecepatan superfisial terhadap nilai gradien tekanan.

Seperti ditunjukkan pada gambar 4.20 (a) dan 4.20 (b) jika kecepatan superfisial gas (J_G) mengalami peningkatan maka nilai dari gradien tekanan juga akan meningkat dan jika kecepatan superfisial cairan (J_L) mengalami peningkatan maka nilai gradien tekanan juga akan semakin meningkat.

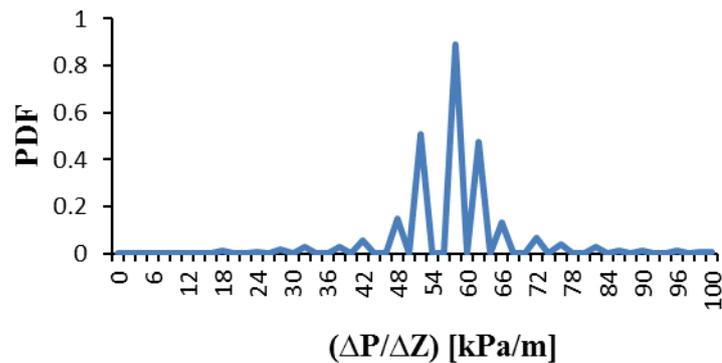
4.3.2. Gradien Tekanan Terhadap Waktu



Gambar 4.22 Pengaruh gradien tekanan terhadap waktu dengan butanol 7% pada $J_G = 0,025$ m/s dan $J_L = 0,232$ m/s

Gambar 4.21. menunjukkan grafik data time series pada $J_G = 0,025$ m/s dan $J_L = 0,232$ m/s yang membandingkan antara nilai gradien tekanan terhadap waktu yang diambil selama 5 detik dengan rata-rata 56,45821 kPa/m.

4.3.3 PDF Gradien Tekanan



Gambar 4.23 PDF gradien tekanan dengan butanol 7% pada $J_G = 0,025$ m/s dan $J_L = 0,232$ m/s

Grafik *Probability Distribution Function* (PDF) pada gambar 4.22 menunjukkan nilai gradien tekan didominasi oleh angka 52 dengan nilai PDF 0,9.