

**ANALISIS PENGARUH PELAPISAN MAGNESIUM PADA SALURAN TERTUTUP
TERHADAP *PRESSURE DROP* ALIRAN AIR**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

HERMANTORO WAHYU PRADANA

NIM. 115060200111057-62

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PERGURUAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

ANALISIS PENGARUH PELAPISAN MAGNESIUM PADA SALURAN TERTUTUP
TERHADAP *PRESSURE DROP* ALIRAN AIR

SKRIPSI

KONSENTRASI KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

HERMANTORO WAHYU PRADANA

NIM. 115060200111057-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Prof. Ir. , I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D.

NIP. 19590703 198303 1 002

Dosen Pembimbing II

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT

NIP : 19720903 199702 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH PELAPISAN MAGNESIUM PADA SALURAN TERTUTUP
TERHADAP *PRESSURE DROP* ALIRAN AIR**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**HERMANTORO WAHYU PRADANA
NIM. 115060200111057-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 04 Agustus 2015

Majelis Penguji

Skripsi I

Skripsi II

**Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng.
NIP. 19710310 199802 1 001**

**Purnami, ST., MT.
NIP.19770707 200812 1 005**

Skripsi III

**Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng
NIK. 201405 890102 1 2 001**

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

**Dr.Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.
NIP. 19750802 199903 2 002**

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur dan kemuliaan hanya kepada Allah SWT atas segala limpahan kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Analisa Pengaruh Pelapisan Magnesium pada Saluran Tertutup terhadap Pressure Drop Aliran Air”**.

Dalam menyusun skripsi ini penulis memperoleh bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr.Eng., Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Purnami, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang
3. Dr.Eng., Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Kepala Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Prof. Ir., I.N.G. Wardana, M.Eng, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan dan ilmu yang bermanfaat selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan, masukan dan ilmu yang bermanfaat selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Ayahanda Geger Subiyantoro dan Ibunda Ciwik Herminingsih, S.Pd. yang dengan penuh kesabaran dan kasih sayang mendukung serta memanjatkan doa hingga menghantarkan penulis dari awal sampai akhir penyusunan skripsi ini.
7. Rachmat Subagyo, ST., MT. yang telah bekerja bersama dalam penelitian ini
8. Saudara Sandy Pradita Hadi Utama, Rahmat Khoirul Huda, Cindy Mutiara Septani, dan Mariatul Khiftiyah yang telah menjadi kawan bertukar pikiran dan diskusi
9. Saudari Zul Farida Arini yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan skripsi dari awal hingga akhir



10. Teman-teman Asisten Laboratorium Mesin-mesin Fluida yang telah mendukung dan membantu kelancaran penilitian
11. Teman-teman M'11 untuk segala dukungan yang telah diberikan.
12. Seluruh pihak terkait yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun agar kedepannya menjadi lebih baik.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi yang ini bermanfaat bagi semua pihak.

Malang, Juli 2015



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 Jenis Fluida	5
2.3 Aliran Fluida	5
2.4 Bilangan <i>Reynold</i>	9
2.5 Persamaan Kontinuitas	10
2.6 Persamaan Bernoulli	11
2.7 Jari-jari Diameter Hidrolis	12
2.8 Aliran Berkembang Penuh	12
2.9 Aliran Dalam Pipa	13
2.10 Reaksi Magnesium dan Air	15
2.11 Hipotesis	16
BAB III METODE PENELITIAN	17
3.1 Metode Penelitian	17
3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	17
3.3 Variabel Penelitian	17



3.4	Peralatan Penelitian	18
3.5	Skema Instalasi Penelitian	24
3.6	Prosedur Penelitian	26
3.7	Diagram Alir Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Data Hasil Penelitian	29
4.2	Perhitungan Data	31
4.3	Analisa Grafik dan Pembahasan	38
4.3.1	Grafik hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap ukuran diameter rata-rata gelembung pada pelapisan pipa menggunakan magnesium	38
4.3.2	Grafik hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap standar deviasi pengukuran diameter rata-rata gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium	39
4.3.3	Grafik hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>skewness</i> pengukuran diameter gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium	41
4.3.4	Diagram perbandingan kekasaran pelapis saluran bagian dalam pipa	43
4.3.5	Grafik hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>friction factor</i> pada jenis pelapisan bagian dalam pipa yang berbeda	44
4.3.6	Grafik hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>pressure drop</i> pada bahan pelapis Mg dan tanpa pelapis	46
4.3.7	Grafik hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>pressure drop</i> pada bahan pelapis serbuk Mg dan Fe	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		50
5.1	Kesimpulan	50
5.2	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA		x
LAMPIRAN		xi

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1	Geometri pipa beralur	4
Gambar 2.2	Diagram <i>Rheology</i>	5
Gambar 2.3	Jenis aliran fluida	8
Gambar 2.4	Kecepatan di suatu titik dalam aliran turbulen <i>steady</i>	9
Gambar 2.5	Profil kecepatan aliran berkembang penuh	13
Gambar 2.6	Instalasi eksperimen untuk menentukan kerugian tinggi tekan pipa	14
Gambar 2.7	Percobaan Nikuradse dengan pipa-pipa yang dikasarkan dengan pasir	15
Gambar 3.1	Pompa air	18
Gambar 3.2	Bak penampung	18
Gambar 3.3	Bak pengukur volume	19
Gambar 3.4	Pipa suplai air	19
Gambar 3.5	Pipa <i>test section</i>	20
Gambar 3.6	Serbuk magnesium dan besi	20
Gambar 3.7	<i>Valve</i>	21
Gambar 3.8	Selang	21
Gambar 3.9	Termometer	22
Gambar 3.10	Penggaris	22
Gambar 3.11	<i>Stopwatch</i>	23
Gambar 3.12	Kamera Canon EOS 600D 18-55mm f/3.5-5.6 + <i>Extension tube</i>	23
Gambar 3.13	Instalasi penelitian	24
Gambar 3.14	Dimensi saluran pengamatan	25
Gambar 3.15	Pemasangan pita serbuk Mg/Fe	25
Gambar 4.1	Foto visualisasi gelembung pada berbagai bilangan <i>Reynold</i>	31
Gambar 4.2	Foto gelembung pada tekanan masuk 10 mmH ₂ O (Re 1540) ..	34

Gambar 4.3	Hasil foto visualisasi setelah diolah menggunakan <i>software</i> ImageJ	34
Gambar 4.4	Hasil perhitungan luas profil gelembung menggunakan ImageJ	35
Gambar 4.5	Hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap ukuran diameter rata-rata gelembung pada pelapisan pipa menggunakan magnesium	38
Gambar 4.6	Hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap standar deviasi pengukuran diameter rata-rata gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium	40
Gambar 4.7	Hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>skewness</i> pengukuran diameter gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium	41
Gambar 4.8	Jenis kesimetrisan persebaran data (<i>skewness</i>).....	42
Gambar 4.9	Diagram hasil uji kekasaran bahan pelapis saluran	43
Gambar 4.10	Hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>friction factor</i> pada jenis pelapisan bagian dalam pipa yang berbeda.....	44
Gambar 4.11	Hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>pressure drop</i> pada bahan pelapis Mg dan tanpa pelapis	46
Gambar 4.12	Hubungan bilangan <i>Reynold</i> terhadap <i>pressure drop</i> pada bahan pelapis serbuk Mg dan serbuk Fe	48
Gambar 4.13	Profil permukaan gelembung tampak samping	49



DAFTAR TABEL

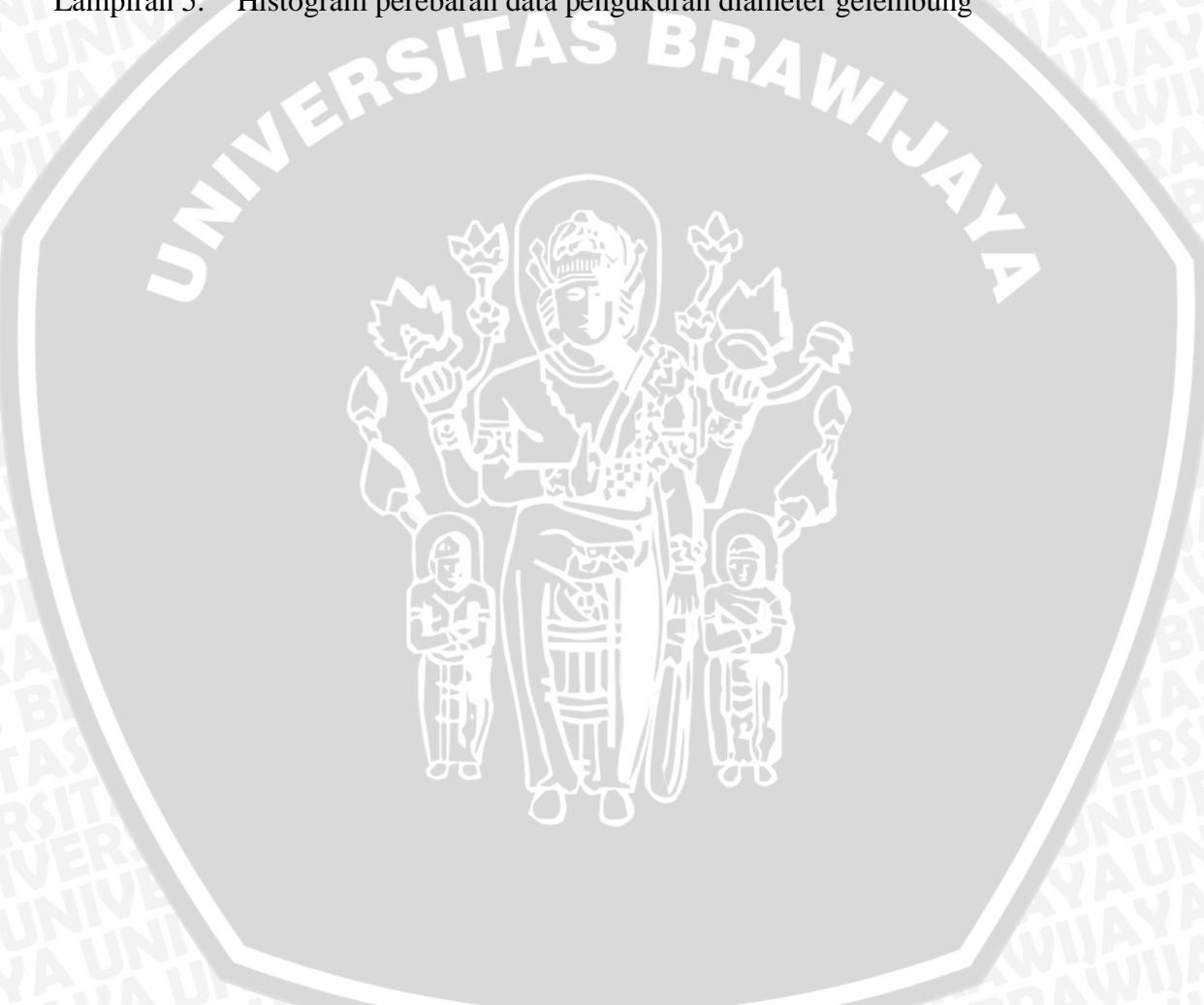
No.	Judul	Hal.
Tabel 4.1	Data hasil pelapisan pipa menggunakan serbuk magnesium (Mg) ukuran 160 μm	29
Tabel 4.2	Data hasil pelapisan pipa menggunakan serbuk besi (Fe) ukuran 160 μm	29
Tabel 4.3	Data hasil pipa tanpa pelapisan	30
Tabel 4.4	Data hasil pengujian kekasaran ketiga jenis pelapisan bagian dalam pipa	30
Tabel 4.5	Hasil Perhitungan <i>pressure drop</i> , bilangan <i>Reynold</i> , dan <i>friction factor</i>	33
Tabel 4.6	Hasil perhitungan luas dan diameter profil gelembung pada tekanan 10 mmH ₂ O (Re 1540)	35
Tabel 4.7	Perhitungan statistik data diameter gelembung pada tekanan 10 mmH ₂ O (Re 1540)	36
Tabel 4.8	Data hasil perhitungan statistik	38



DAFTAR LAMPIRAN

No. Judul

- Lampiran 1. Data hasil pengukuran kekasaran pelapis dan karakter aliran
- Lampiran 2. Data hasil perhitungan
- Lampiran 3. Visualisasi Gelembung
- Lampiran 4. Langkah pengukuran diameter gelembung dengan *software* ImageJ
- Lampiran 5. Histogram perebaran data pengukuran diameter gelembung



RINGKASAN

HERMANTORO W. PRADANA, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2015, *Analisa Pengaruh Pelapisan Magnesium pada Saluran Tertutup Terhadap Pressure Drop Aliran Air*, Dosen Pembimbing : Prof. Ir., I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D. dan Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.

Dalam instalasi pemipaan ada dua kerugian yang umum terjadi, yaitu *minor losses* dan *major losses*. *Major losses* merupakan kerugian yang paling banyak terjadi dalam instalasi pemipaan yang timbul akibat gesekan yang terjadi antara fluida dan dinding pipa sepanjang aliran. Kerugian ini bisa diamati dari penurunan tekanan pada aliran sepanjang pipa. Dalam perkembangan ilmu pengetahuan berbagai studi telah dilakukan dalam mengamati kerugian-kerugian yang terjadi dalam sistem pemipaan.

Dalam penelitian kali ini, penulis menggunakan serbuk logam magnesium (Mg) sebagai pelapis saluran untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pelapisan logam Mg pada saluran terhadap *pressure drop* aliran air. Obyek penelitian ini adalah adalah gelembung dari hasil reaksi yang terbentuk antara magnesium (Mg) dan air. Gelembung akan terbentuk secara acak pada dasar saluran. Diharapkan melalui penelitian ini dapat diketahui karakteristik aliran dengan saluran berlapis serbuk magnesium (Mg) pada aliran laminar, transisi, dan turbulen.

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental. Massa alir fluida yang mengalir sebesar 0,015 lt/s sampai 0,145 lt/s pada luas penampang saluran yang seragam. Sebagai perbandingan digunakan pipa jenis pipa dengan 3 jenis pelapisan, yaitu: pipa dengan pelapisan serbuk Mg, pipa dengan pelapisan serbuk Fe, dan pipa tanpa pelapisan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa saluran dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg) memiliki *pressure drop* yang lebih rendah dari saluran dengan pelapis serbuk besi (Fe) pada aliran diatas Re 4000 dan lebih rendah dari saluran tanpa pelapis saat aliran berada diatas Re 9000. Sehingga saluran dengan pelapis serbuk magnesium (Mg) efektif menurunkan *pressure drop* untuk aliran pada kondisi turbulen.

Kata Kunci: Magnesium, Saluran Tertutup, *Pressure Drop*, Bilangan Reynold

1.1 Latar Belakang

Dalam transfer fluida ada beberapa cara yang dapat dilakukan, yaitu dapat dilakukan melalui saluran terbuka atau saluran tertutup. Namun penggunaan saluran tertutup lebih banyak digunakan dalam berbagai instalasi, dalam debit aliran yang besar hingga debit aliran kecil. Instalasi saluran tertutup selalu menggunakan pipa sebagai media penghubung antara satu tempat ke tempat yang lain.

Pipa terdiri dari berbagai macam jenis berdasarkan material yang digunakan, ukuran, hingga fungsi dan kegunaannya. Dalam instalasi pemipaan ada dua kerugian yang umum terjadi, yaitu *minor losses* dan *major losses*. *Major losses* merupakan kerugian yang paling banyak terjadi dalam instalasi pemipaan yang timbul akibat gesekan yang terjadi antara fluida dan dinding pipa sepanjang aliran. Kerugian ini bisa diamati dari penurunan tekanan pada aliran sepanjang pipa.

Dalam perkembangan ilmu pengetahuan berbagai studi telah dilakukan dalam mengamati kerugian-kerugian yang terjadi dalam sistem pemipaan, tanpa terkecuali studi mengenai *major losses*. Helmizar (2010) meneliti pengukuran *head losses major* (pipa pvc diameter $\frac{3}{4}$ ") dan *head losses minor* (belokan *knee* 90° diameter $\frac{3}{4}$ ") pada sistem instalasi pipa. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui besarnya nilai kekasaran relatif dari pipa PVC $\frac{3}{4}$ " dan koefisien kerugian (K) pada belokan *knee* 90° berdiameter $\frac{3}{4}$ ". Dari hasil eksperimen didapat bahwa Bilangan *Reynold* terkorelasi dengan kecepatan, dan makin besar kecepatan yang menunjukkan makin tinggi bilangan *Reynold*, maka makin besar koefisien gesek (f) yang terjadi. Semakin tinggi koefisien gesek yang dialami suatu aliran maka semakin tinggi pula *head loss* yang terjadi.

Putu, dkk (2014) meneliti tentang karakter aliran turbulen pada pipa beralur. Penelitian ini dilakukan dengan jumlah alur sebanyak 24, 32 dan pipa halus sebagai pembanding. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa penentuan jumlah alur memperkuat atau justru melemahkan karakteristik aliran turbulen.

Dalam penelitian kali ini, penulis menggunakan logam magnesium (Mg) sebagai pelapis saluran untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pelapisan logam Mg pada saluran terhadap *pressure drop* aliran air serta menggunakan logam besi (Fe) sebagai pembanding. Pendekatan pada penilitian adalah reaksi yang terbentuk antara magnesium (Mg) dan air yang akan membentuk gelembung. Gelembung akan terbentuk secara acak pada dasar saluran. Diharapkan melalui penelitian ini dapat diketahui karakteristik aliran dengan saluran berlapis serbuk magnesium (Mg) pada aliran laminar, transisi, dan turbulen dengan membandingkannya dengan pelapisan pipa menggunakan besi (Fe) dan pipa tanpa pelapis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah yang diambil adalah bagaimana pengaruh pelapisan magnesium pada saluran tertutup terhadap *pressure drop* aliran air.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Viskositas fluida kerja disesuaikan dengan keadaan temperatur
2. Tekanan udara luar dipengaruhi temperatur lingkungan

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengamati pengaruh pelapisan magnesium pada saluran tertutup terhadap *pressure drop* aliran air.

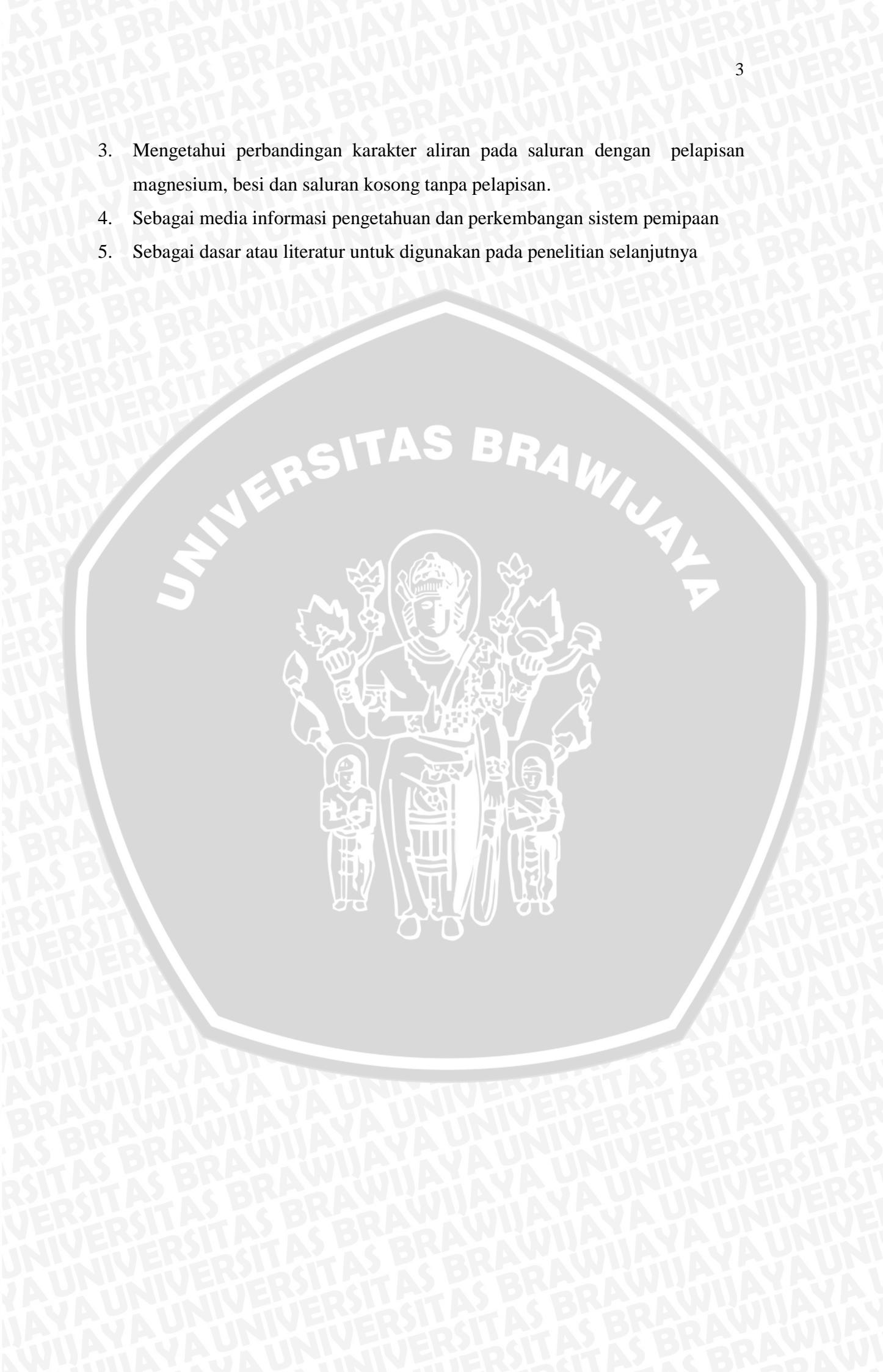
1.5 Manfaat penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui seberapa besar pengaruh magnesium yang bereaksi dengan fluida kerja (air) terhadap *pressure drop* aliran.
2. Mengetahui karakteristik aliran air dengan pelapisan magnesium pada aliran laminer, transisi, dan turbulen.



3. Mengetahui perbandingan karakter aliran pada saluran dengan pelapisan magnesium, besi dan saluran kosong tanpa pelapisan.
4. Sebagai media informasi pengetahuan dan perkembangan sistem pemipaan
5. Sebagai dasar atau literatur untuk digunakan pada penelitian selanjutnya



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



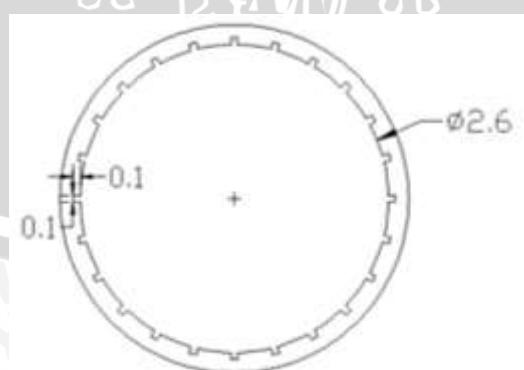
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Helmizar (2010) meneliti pengukuran *head losses major* (pipa pvc diameter $\frac{3}{4}$ ") dan *head losses minor* (belokan knee 90° diameter $\frac{3}{4}$ ") pada sistem instalasi pipa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya nilai kekasaran relatif dari pipa PVC $\frac{3}{4}$ " dan koefisien kerugian (K) pada belokan knee 90° berdiameter $\frac{3}{4}$ ". Penelitian ini dilakukan dengan cara melewatkkan fluida air pada pipa dengan panjang tertentu, kemudian diukur selisih tekanan yang terjadi dalam bentuk head dengan menggunakan manometer. Untuk mendapatkan karakteristik *head losses minor* pada belokan knee 90° diameter $\frac{3}{4}$ ", dilakukan dengan cara melewatkkan fluida air pada belokan knee 90° diameter $\frac{3}{4}$ ". Dengan menggunakan persamaan *head losses minor* maka akan didapatkan nilai koefisien kerugian (K) yang terjadi. Hasil eksperimen menunjukan nilai kekasaran relatif dari pipa PVC $\frac{3}{4}$ " sebesar 0,000562, sedangkan nilai koefisien kerugian (K) pada belokan knee 90° berdiameter $\frac{3}{4}$ " sebesar 0,297. Dari hasil eksperimen didapat bahwa makin besar kecepatan yang menunjukkan makin tinggi bilangan *Reynold*, maka makin besar koefisien gesek (f) yang terjadi. Semakin tinggi koefisien gesek yang dialami suatu aliran maka semakin tinggi pula *head loss* yang terjadi.

Putu, dkk (2014) meneliti tentang karakter aliran turbulen pada pipa beralur. Penelitian ini dilakukan dengan jumlah alur sebanyak 24, 32 dan pipa halus sebagai pembanding.

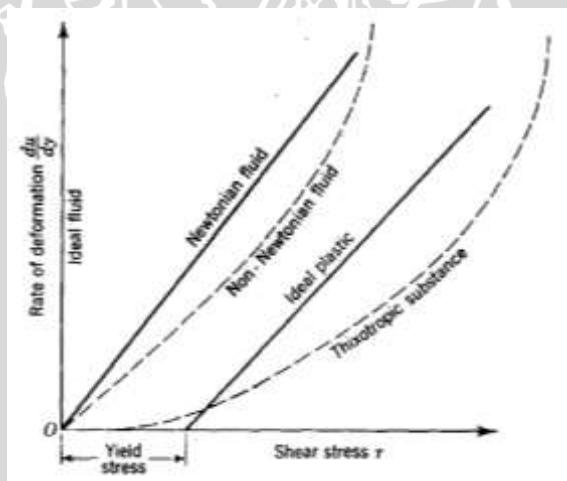


Gambar 2.1 Geometri pipa beralur
Sumber: Putu Wijaya Sunu, 2014

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada pipa dengan jumlah alur 24, ukuran *vortice* yang terbentuk lebih kecil dari lebar alur sehingga menyebabkan putaran pada aliran, menambah *radial velocity* dan menambah *pressure drop* aliran. Sedangkan pada pipa dengan jumlah alur 32, diameter *vortice* lebih besar dari lebar alur sehingga aliran fluida tidak berotasi serta mengurangi *radial velocity* dan *pressure drop*. Jadi penentuan jumlah alur memperkuat atau justru melemahkan karakteristik aliran turbulen.

2.2 Jenis Fluida

Fluida digolongkan menjadi menjadi dua, yaitu fluida *Newtonian* dan fluida *non-Newtonian*. Fluida *newtonian* memiliki hubungan linier antara tegangan geser yang dialami dengan laju perubahan bentuk yang timbul, seperti ditunjukkan Gambar 2.2. Sedangkan fluida *non-newtonian* memiliki hubungan tak linier antara tegangan geser yang dialami dengan laju perubahan bentuk. Contoh fluida *newtonian* adalah air dan udara, sedangkan untuk fluida *non-newtonian* contohnya adalah susu, gelatin, darah dan lumpur.



Gambar 2.2 Diagram *Rheology*
Sumber : Streeter (1985:5)

2.3 Aliran Fluida

Aliran fluida dibagi menjadi beberapa macam, diantaranya

1. Aliran terbuka (*External flow*) dan aliran tertutup (*Internal flow*)

Aliran terbuka adalah aliran fluida yang tidak ditutupi oleh permukaan saluran dan berhubungan langsung dengan tekanan



atmosfir. Contoh dari aliran terbuka adalah aliran air diatas plat atau aliran air diatas talang atau permukaan lengkung lainnya.

Aliran tertutup adalah aliran fluida didalam saluran yang tertutup secara menyeluruh dengan permukaan *solid* tanpa ada hubungan langsung dengan tekanan atmosfir. Jika aliran dalam pipa masih belum terisi penuh oleh fluida semisal air dan masih tersisa ruang untuk masukknya udara luar, aliran ini belum bisa dikatakan aliran tertutup dan karakteristik alirannya masih sama dengan aliran terbuka. Aliran tertutup meliputi aliran melaui pipa, *duct*, *nozzles*, *diffuser*, katup, dan *fitting* serta pipa dengan perubahan penampang secara tiba-tiba. (Robert W. Fox, 1994:304)

Dalam kasus aliran *incompressible* pada pipa, aliran alami (laminar dan turbulen) ditentukan melaui nilai parameter tak berdimensi, yaitu bilangan *Reynold*. Fenomena aliran turbulen pada aliran tertutup di dalam dunia *engineering* lebih sering terjadi. Namun aliran laminar lebih banyak dikembangkan pada bidang lubrikasi atau dalam proses reaksi kimia.

2. Aliran Laminar, Transisi, dan Turbulen

a. Aliran Laminar

Aliran laminar merupakan aliran fluida yang terbentuk atas lapisan (lamina-lamina) yang bergerak membentuk garis alir serta tanpa adanya pusaran-pusaran yang secara visual ditunjukkan oleh Gambar 2.2(a). Dalam aliran laminar, partikel-partikel fluida bergerak bersepjangan lintasan yang halus serta lancar dalam lapisan-lapisan, dengan satu lapisan meluncur secara mulus pada pipa yang bersebelahan. Kerja viskositas dalam aliran laminar meredam kecenderungan untuk membentuk aliran yang turbulen (Streeter 1985:83).

Dalam aliran laminar, total *head loss* dan penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi akibat gesekan yang terjadi

anatara dinding pipa horisontal dan fluida secara analitis dapat ditentukan melalui persamaan (2-1) dan (2-2) berikut:

$$h_f = 32 \frac{\mu L \vec{V}}{\rho g D^2} \quad (2-1)$$

$$\Delta P = 32 \frac{\mu L \vec{V}}{D^2} \quad (\text{R.W. Fox, 1994:331}) \quad (2-2)$$

Keterangan : ΔP = pressure drop (N/m^2)

h_f = head loss (m)

L = panjang saluran (m)

V = kecepatan aliran (m/s)

μ = viskositas dinamik fluida (Ns/m^2)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

b. Aliran Transisi

Aliran transisi merupakan aliran perpindahan dari aliran laminar menuju aliran turbulen. Dalam aliran ini gejolak aliran belum terlalu banyak terbentuk karena memang gejolak aliran banyak terbentuk saat aliran sudah dalam kondisi turbulen penuh seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (b).

c. Aliran Turbulen

Aliran turbulen membentuk gejolak atau olakan ataupun gelombang saat mengalir sehingga aliran tidak lagi mengalir pada lapisan-lapisan seperti aliran laminar, namun lintasan aliran yang mulanya halus justru saling memotong satu dengan lainnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3(c). Penyebab terjadinya aliran turbulen sangat beragam. Kecepatan aliran yang tinggi, viskositas yang rendah serta penampang aliran yang besar menjadi faktor untuk membentuk aliran turbulen.

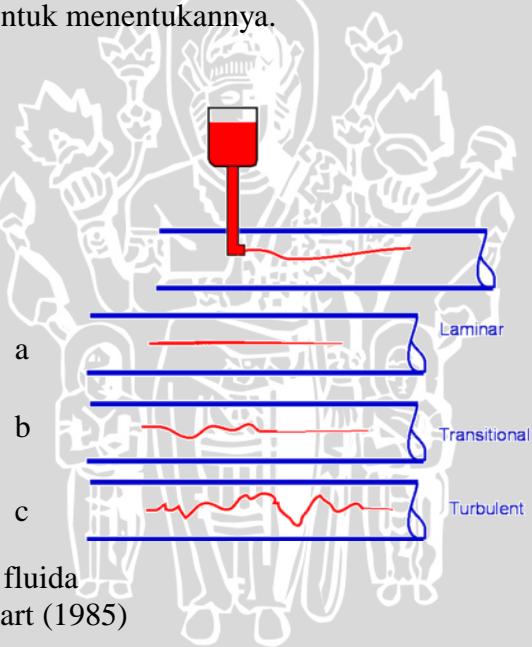
Secara teori dalam aliran turbulen memiliki sifat-sifat sebagai berikut:

- 1) Kerugian tinggi-tekan berbandng lurus dengan panjang pipa



- 2) Kerugian tinggi-tekan hampir sebanding dengan kuadrat kecepatan
- 3) Kerugian tinggi-tekan hampir berbanding terbalik dengan garis tengah
- 4) Kerugian tinggi-tekan bergantung pada kekasaran permukaan dinding pipa sebelah dalam
- 5) Kerugian tinggi-tekan bergantung pada sifat-sifat fluida, kerapatan dan viskositas
- 6) Kerugian tinggi-tekan tidak bergantung pada tekanan
(Streeter 1985:202)

Untuk aliran turbulen kita tidak dapat menghitung penurunan tekanan melalui analisa, kita harus melakukan eksperimen secara langsung untuk menentukannya.

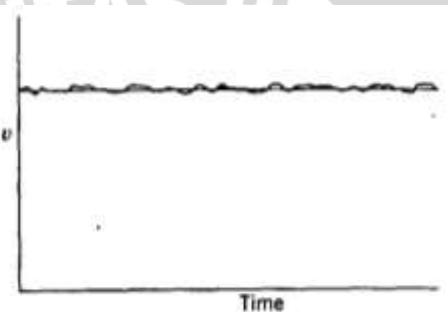


Gambar 2.3 Jenis aliran fluida
Sumber: Philip M. Gerhart (1985)

3. Aliran *steady* dan aliran *unsteady*

Aliran *steady* terjadi bila kondisi di titik manapun di dalam fluida tidak berubah dengan waktu. Contohnya, jika kecepatan di suatu titik tertentu adalah 3 m/s dalam arah +x dalam aliran *steady*, kecepatan tersebut tetap sebesar itu dalam arah itu untuk jangka waktu yang tidak terbatas. Demikian pula, dalam aliran *steady* tidak terdapat perubahan massa jenis, tekanan, atau suhu dengan waktu di titik manapun. (Streeter 1985:84)

Dalam aliran turbulen dikarenakan oleh gerakan yang tidak teratur dari partikel-partikel fluida, selalu terdapat fluktuasi kecil yang terjadi di setiap titik. Definisi aliran *steady* harus dibuat umum (digeneralisasikan) guna menampung fluktuasi ini. Pada Gambar 2.4 menunjukkan grafik kecepatan terhadap waktu, disuatu titik dalam aliran turbulen. Bila kecepatan rata-rata (ditunjukkan dengan garis horizontal) tidak berubah dengan waktu, maka aliran itu dikatakan *steady*. Penggeneralisasian ini berlaku untuk massa jenis, tekanan, dan suhu.



Gambar 2.4 Kecepatan di suatu titik dalam aliran turbulen *steady*
Sumber: Streeter (1985:84)

Aliran dikatakan *unsteady* bila kondisi (kecepatan, massa jenis, tekanan, dan temperatur) di titik mana pun berubah terhadap waktu. Air yang dipompakan pada sistem yang tetap dengan laju yang meningkat merupakan contoh aliran *unsteady*.

2.4 Bilangan *Reynold*

Bilangan *Reynold* ialah perbandingan gaya lembam terhadap gaya viskos. Bilangan *Reynold* memiliki nilai yang berbeda pada tiap jenis aliran, seperti aliran laminar, transisi, atau turbulen dalam pipa. Secara matematis bilangan *Reynold* dirumuskan pada persamaan (2-3) sebagai berikut:

$$Re = \frac{\text{Gaya lembam}}{\text{Gaya gaya viskos}} = \frac{VD}{\nu} = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (\text{Streeter } 1985: 165) \quad (2-3)$$

Keterangan : Re = bilangan *Reynold*

V	= kecepatan aliran fluida (m/s)
D	= ukuran linier yang mewakili skala panjang dalam aliran (m)
ν	= viskositas kinematik (m^2/s)
ρ	= massa jenis fluida (kg/m^3)
μ	= viskositas dinamik (Ns/m^2)

Aliran laminar memiliki nilai bilangan *Reynold* dibawah 2000. Pada aliran transisi memiliki nilai bilangan *Reynold* antara 2000-4000 atau biasa disebut dengan bilangan *Reynold* kritis dimana dapat terbentuk laminar atau turbulen. Dan aliran turbulen memiliki bilangan *Reynold* diatas 4000.

2.5 Persamaan Kontinuitas

Hukum kontinuitas menyatakan pada kondisi aliran *steady* massa fluida yang melalui semua bagian dalam arus fluida per satuan waktu adalah sama. Hal ini berarti massa fluida per satuan waktu yang mengalir pada sembarang titik adalah konstan. Persamaan kontinuitas dinyatakan dengan rumus pada persamaan (2-4):



$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (\text{Streeter, 1985:91}) \quad (2-4)$$

Keterangan : \dot{m} = Laju aliran massa (Kg/s)

ρ = Massa jenis fluida (kg/m^3)

v = Kecepatan aliran (m/s)

A = Luas penampang aliran (m^2)

Nilai massa jenis (ρ) adalah konstan untuk fluida tak mampu mampat (*incompressible*), maka persamaan kontinuitas dapat ditulis dalam bentuk:



$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (\text{Streeter, 1985:92}) \quad (2-5)$$

Keterangan : Q = Debit fluida (m^3/s)

v = Kecepatan aliran (m/s)

A = Luas penampang aliran (m^2)

Debit fluida sendiri adalah jumlah volume fluida yang mengalir per satuan waktu. Dari persamaan kontinuitas tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar luas penampang maka semakin kecil kecepatan aliran yang mengalir, sebaliknya semakin kecil luas penampang saluran akan semakin besar kecepatan aliran yang mengalir.

2.6 Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli dituliskan dalam bentuk:

$$gz + \frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1985:100}) \quad (2-6)$$

Keterangan: g = percepatan gravitasi (m/s^2)

z = beda ketinggian atau elevasi (m)

v = kecepatan aliran (m/s)

P = tekanan (N/m^2)

ρ = massa jenis (kg/m^3)

Persamaan Bernoulli menerangkan hubungan energi per satuan massa yang ada pada fluida yaitu energi potensial akibat ketinggian atau elevasi kedudukan fluida, energi tekanan, dan energi kinetik karena aliran fluida. Bila persamaan (2.6) dibagi dengan g , maka menjadi:

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} = \text{konstan} \quad (\text{Streeter, 1985:100}) \quad (2-7)$$

Keterangan : γ = berat jenis (N/m^3)

Persamaan (2.7) dapat diartikan sebagai energi per satuan berat atau sering dinyatakan dalam *head* dalam satuan panjang (m). Bentuk ini mudah dipergunakan untuk menyelesaikan masalah fluida cair dengan permukaan bebas.

2.7 Jari-jari dan Diameter Hidrolis

Untuk pipa dengan penampang selain lingkaran digunakan jari-jari hidrolis sebagai suatu persamaan untuk menyamakan kondisi penampang selain lingkaran tetap mendekati penampang lingkaran. Jari-jari hidrolis (R_h) didefinisikan sebagai luas penampang dibagi keliling.

$$R_h = \frac{\text{Luas Penampang}}{\text{Keliling Penampang}} \quad (\text{Streeter, 1985:451}) \quad (2-8)$$

Dengan asumsi luasan lingkaran, untuk nilai diameter hidrolis (D_h) dapat ditentukan sebagai berikut:

$$R_h = \frac{\text{Luas Penampang}}{\text{Keliling Penampang}} = \frac{\frac{1}{4}\pi(D_h^2)}{\pi D_h} = \frac{D_h}{4} \quad (\text{Streeter, 1985:451}) \quad (2-9)$$

atau

$$\begin{aligned} D_h &= 4R_h \\ R_h &= \frac{4 \times \text{Luas penampang}}{\text{Keliling penampang}} \end{aligned} \quad (2-10)$$

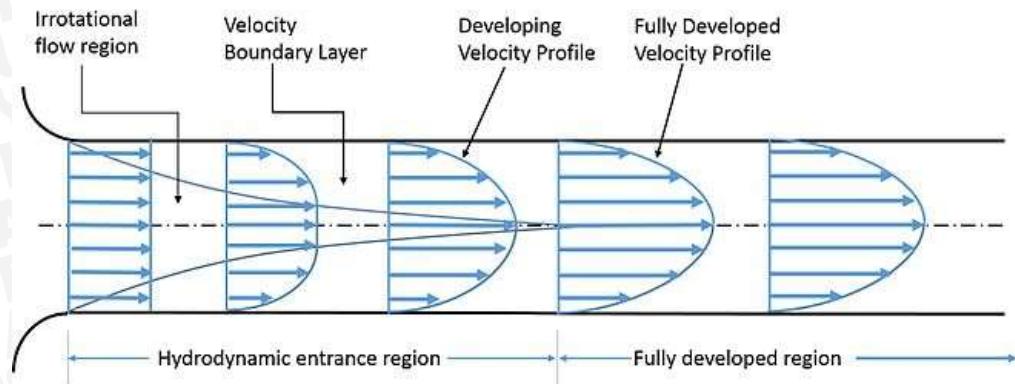
Untuk penampang kotak nilai diameter hidrolis dapat tentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} D_h &= \frac{4 \times (ab)}{2(a+b)} \\ D_h &= \frac{2ab}{a+b} \end{aligned} \quad (2-11)$$

2.8 Aliran Berkembang Penuh

Jika di dalam pipa kondisi kecepatan aliran bervariasi maka aliran dikatakan belum berkembang penuh. Pada aliran berkembang penuh profil aliran sudah stabil serta memenuhi semua penampang pipa, sehingga profil kecepatan secara grafis dapat digambarkan pada Gambar 2.5 sebagai berikut.





Gambar 2.5 Profil kecepatan aliran berkembang penuh

Sumber : Robert W. Fox (1994:95)

Panjang aliran berkembang penuh dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$L_{h,laminar} = 0,05 \text{ Re} \cdot D \quad (\text{R.W. Fox 1994:97})(2-12)$$

$$L_{h,turbulent} = 1,359 D \cdot (\text{Re})^{1/4} \quad (\text{R.W. Fox 1994:97})(2-13)$$

Di literatur lain menyatakan bahwa pada aplikasi di lapangan nilai panjang aliran berkembang penuh untuk aliran turbulen mendekati 10 kali diameternya.

- Nikuradse (1932), merekomendasikan panjang pipa untuk membentuk aliran berkembang penuh sebesar $L_h=40D$
- Lien K., et al (2004), merekomendasikan panjang pipa untuk membentuk aliran berkembang penuh pada aliran turbulen dengan angka *Reynold* sebesar $L_h=120D$

2.9 Aliran di Dalam Pipa

Dalam aliran tak mampu mampat stedi didalam pipa, ketidakmampuhan kalian dinyatakan dalam kerugian tinggi tekan. Untuk perhitungan aliran di dalam pipa pada umumnya dipakai persamaan Darcy-Weisbach seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2-14) berikut:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{\vec{V}^2}{2g} \quad (\text{Streeter, 1985:401}) (2-14)$$

Keterangan :

h_f = kerugian tinggi tekan (m)

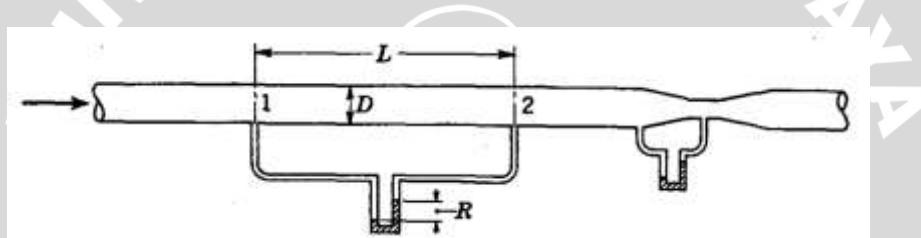
L = panjang pipa (m)

D = garis tengah pipa (m)



$$\begin{aligned}
 V &= \text{kecepatan rata-rata (m/s)} \\
 f &= \text{faktor gesekan} \\
 g &= \text{percepatan gravitasi} = 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

h_f mempunyai dimensi panjang yang dinyatakan dalam meter-newton per meter. Fator gesekan (f) merupakan salah satu faktor tanpa dimensi yang diperlukan untuk membuat persamaan tersebut memberikan harga kerugian yang benar. Semua besaran dalam persamaan 2.14 kecuali f dapat diukur secara eksperimental. Susunan peralatan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 2.6. dengan mengukur debit dan garis tengah pipa, maka dapat dihitung kecepatan rata-rata. Kerugian tinggi tekan h_f diukur dengan manometer yang dipasang pada penampang 1 dan penampang 2, yang berjaran antara L .



Gambar 2.6 Instalasi eksperiment untuk menentukan kerugian tinggi tekan pipa
Sumber : Streeter (1985:202)

Faktor gesekan (f) tidak dapat berupa konstanta tetap tetapi bergantung pada kecepatan (V), garis tengah (D), kerapatan (ρ) viskositas (μ) dan ciri-ciri tertentu untuk kekasaran dinding yang ditandai dengan ε , ε' , dan m , dimana ε menunjukkan ukuran tonjolan kekasaran dan mempunyai dimensi panjang, ε' merupakan jarak antara elemen kekasaran dan mempunyai dimensi panjang, dan m adalah faktor bentuk yang bergantung pada bentuk masing-masing elemen kekasaran dan tak memiliki dimensi. Untuk pipa kasar suku-suku ε , ε' dapat dibuat tanpa dimensi dengan membagi dengan diameter pipa (D). Oleh karena itu secara umum:

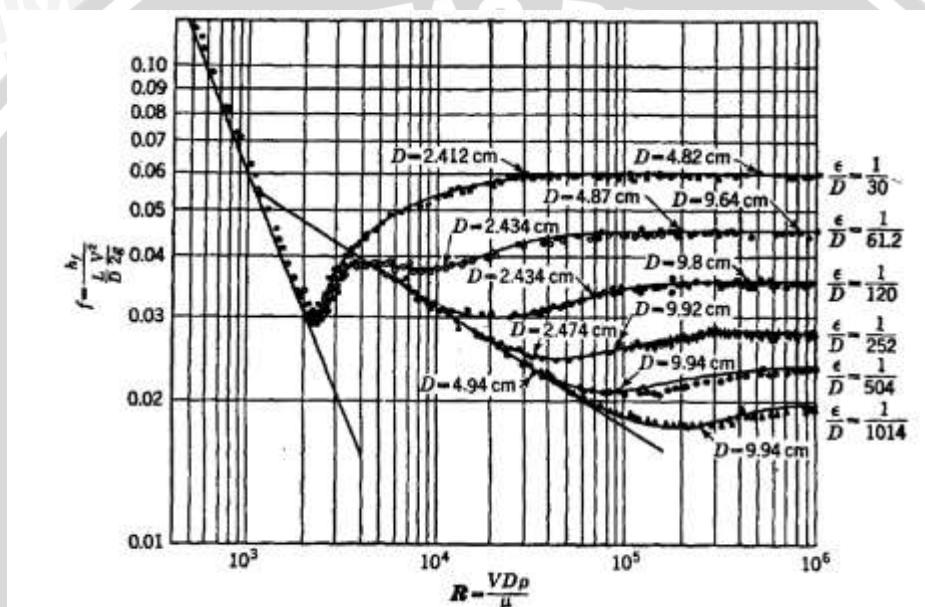
$$f = f \left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\varepsilon'}{D}, m \right) \quad (\text{Streeter, 1985:203}) \quad (2-15)$$

Untuk pipa kasar ε/D disebut kekasaran ralatif. Nikuradse (dalam Streeter 1985:203) membuktikan pengertian kekasaran relatif dengan pengujian pada pipa-

pipa yang dikasarkan dengan pasir. Dengan menggunakan tiga ukuran pipa dan merekatkan butir pasir (ε = garis tengah butir pasir) yang berukuran praktis konstan pada dinding. Hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 menunjukkan bahwa untuk satu nilai ε/D kurva f , R tersambung secara langsung. Pengujian ini tidak memungkinkan variasi ε'/D atau m tetapi membuktikan berlakunya persamaan

$$f = f\left(\frac{VD\rho}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$

untuk satu jenis kekasaran. (Streeter, 1985:202-204)



Gambar 2.7 Percobaan Nikuradse dengan pipa-pipa yang dikasarkan dengan pasir

Sumber : Streeter (1985:204)

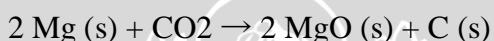
2.10 Reaksi Magnesium dan Air

Logam magnesium tersedia melimpah di alam. Magnesium (^{12}Mg) merupakan logam golongan II A dalam tabel periodik unsur yang memiliki elektron valensi +2. Unsur yang berada pada golongan II A memiliki tingkat keluratan yang rendah namun termasuk golongan yang reaktif. Begitu pula dengan logam magnesium, dalam bentuk bubuk logam magnesium mudah terbakar namun sulit terbakar jika dalam jumlah yang banyak atau padatan. (Sienko, 1961:109)

Magnesium mampu mengurai air menjadi gas hidrogen (H_2) dan membentuk $Mg(OH)_2$ sesuai dengan rumus:



Akibatnya, air tidak dapat digunakan untuk memadamkan kebakaran magnesium; gas hidrogen yang dihasilkan hanya akan mengintensifkan api. Reaksi antara bubuk magnesium dan air akan membentuk gelembung-gelembung gas hidrogen yang masih menempel diskitar butir bubuk magnesium. Namun gelembung-gelembung tersebut akan pecah terbawa arus jika air dialirkkan. Karena sifat kelarutan yang rendah dan sifat magnesium yang reaktif terhadap air, gelembunggas hidrogen akan terus terbentuk selama reaksi magnesium dan air terjadi meskipun terdaat aliran arus air. Magnesium juga bereaksi dengan karbon dioksida untuk membentuk magnesium oksida dan karbon:



Pemilihan bahan magnesium sebagai pelapis bagian dalam adalah reaksi yang terbentuk antara magnesium (Mg) dan air yang akan membentuk gelembung. Profil gelembung ini akan membentuk alur secara acak pada permukaan dalam saluran. Sehingga pengamatan karakteristik aliran dilakukan pada aliran fluida kerja yang mengalir diatas alur gelembung yang terbentuk.

2.11 Hipotesis

Reaksi lapisan serbuk Mg pada pipa dan air menghasilkan gelembung gas H_2 . Semakin besar gelembung yang terbentuk pada dasar pipa, maka *pressure drop* aliran pada saluran dengan pelapis serbuk Mg akan semakin tinggi pula. Namun semakin kecil ukuran gelembung yang terbentuk pada dasar pipa, *pressure drop* saluran akan semakin rendah.

3.1 Metode penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental. Metode penelitian eksperimental merupakan metode penelitian dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mencari data hubungan sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen untuk memperoleh data empiris. Obyek penelitian ini adalah pengaruh pelapisan magnesium pada saluran tertutup terhadap *pressure drop* aliran air.

3.2 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian dilakukan di Laboratorium Mesin-Mesin Fluida, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya pada Januari – Juni 2015.

3.3 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini variabel-variabel yang digunakan adalah

1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- a. Massa alir dengan mengatur bukaan katup setiap kenaikan tekanan 10 mmH₂O pada sisi masuk *test section* yang ditunjukkan pada Gambar 3.13 dan dilakukan hingga katup terbuka sepenuhnya.
- b. Pelapisan saluran menggunakan pita serbuk Mg; pita serbuk Fe dan saluran kosong sebagai pembanding.

2. Variabel Terikat

Pada penelitian ini variabel terikat yang diamati adalah:

- a. *Pressure drop* saluran
- b. Debit aliran

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah:

- a. Ukuran penampang saluran



- b. Ukuran butir magnesium dan besi (sebagai pembanding) yang digunakan untuk pelapis saluran sebesar $160 \mu\text{m}$.

3.4 Peralatan Penelitian

1. Pompa Air

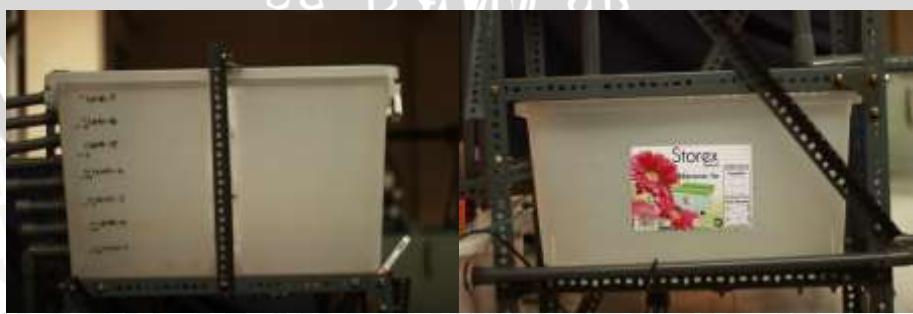
Pompa air, ditunjukkan Gambar 3.1, digunakan untuk mengalirkan air dari bak penampung ke bak pelimpah.



Gambar 3.1 Pompa air
Sumber : Dokumentasi pribadi

2. Bak Penampung

Bak penampung, ditunjukkan Gambar 3.2, digunakan untuk menampung air yang digunakan selama proses penelitian. Digunakan tiga bak penampung, masing-masing digunakan sebagai bak penampung awal, bak pelimpah, dan bak pembuangan.



Gambar 3.2 Bak Penampung
Sumber : Dokumentasi pribadi

3. Bak pengukur volume

Bak pengukur volume, ditunjukkan Gambar 3.3, digunakan untuk bak pengukur debit aliran yang keluar dari *test section*.



Gambar 3.3 Bak pengukur volume
Sumber : Dokumentasi pribadi

4. Pipa suplai air

Pipa suplai air, ditunjukkan Gambar 3.4, digunakan untuk mengalirkan air keluar atau menuju bak penampung. Digunakan jenis pipa PVC dengan ukuran diameter 1 inchi.



Gambar 3.4 Pipa suplai air
Sumber : Dokumentasi pribadi

5. Pipa *test section*

Pipa *test section*, ditunjukkan Gambar 3.5, digunakan sebagai pipa pengamatan dan visualisasi penelitian. Pada bagian ini pipa dibuat

menggunakan bahan *acrylic* untuk mempermudah merekam visualisasi aliran.



Gambar 3.5 Pipa *test section*
Sumber : Dokumentasi pribadi

6. Serbuk Magnesium dan Besi

Serbuk Magnesium yang ditunjukkan Gambar 3.6 digunakan sebagai bahan pelapis saluran untuk diamati pengaruhnya terhadap aliran air. Serbuk magnesium dan besi masing-masing ditaburkan diatas pita selotip yang ukurannya disesuaikan lebar saluran, kemudian saat pengujian dipasang di dasar saluran *test section*.



Gambar 3.6 Serbuk Magnesium dan Besi
Sumber : Dokumentasi pribadi

7. Valve

Valve, ditunjukkan Gambar 3.7, digunakan untuk membuka, menutup dan mengatur debit aliran.



Gambar 3.7 Valve

Sumber : Dokumentasi pribadi

8. Selang

Selang, ditunjukkan Gambar 3.8, digunakan untuk pengukuran tekanan pada pipa *test section*.

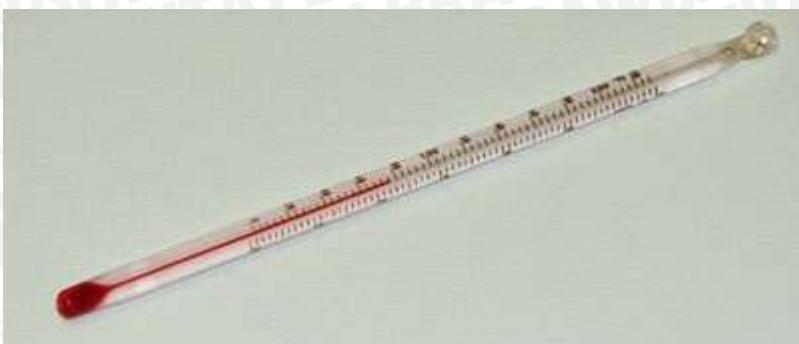


Gambar 3.8 Selang

Sumber : Dokumentasi pribadi

9. Termometer

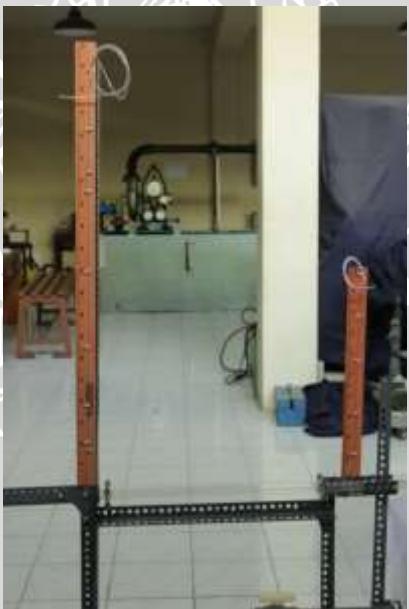
Termometer, ditunjukkan Gambar 3.9, digunakan untuk mengukur suhu fluida kerja.



Gambar 3.9 Termometer
Sumber : Dokumentasi pribadi

10. Penggaris

Penggaris, ditunjukkan Gambar 3.10, digunakan untuk mengukur tekanan pada *test section*.



Gambar 3.10 Penggaris untuk mengukur tekanan pada manometer terbuka
Sumber : Dokumentasi pribadi

11. Stopwatch

Stopwatch, ditunjukan Gambar 3.11, digunakan untuk menghitung waktu debit aliran pada penelitian.



Gambar 3.11 Digital stopwatch

Sumber : Dokumentasi pribadi

12. Kamera Digital + Extension Tube

Kamera digital (gambar 3.12) digunakan untuk merekam visualisasi dalam mengamati aliran air yang terjadi. *Extension tube* digunakan untuk meningkatkan perbesaran lensa kamera untuk memperoleh visualisasi makro. Berikut spesifikasi kamera digital yang digunakan:

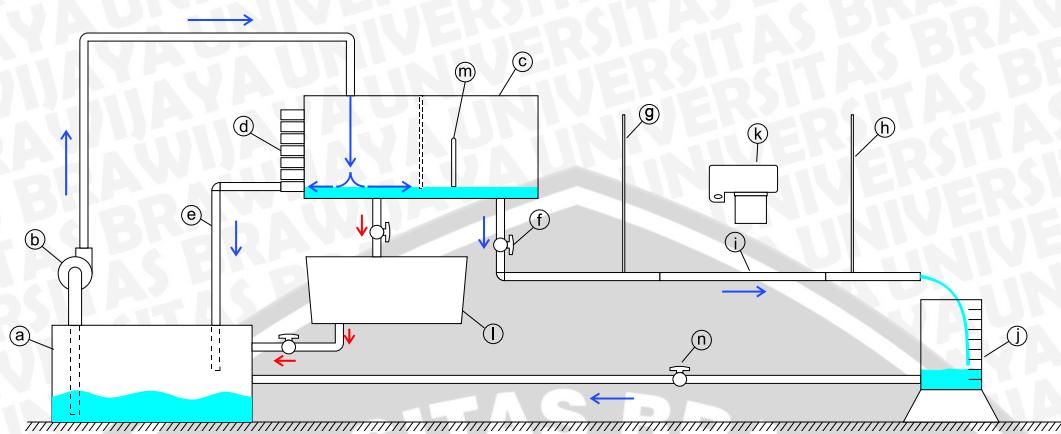
- Merk : Canon (Ditunjukan pada Gambar 3.12)
- Tipe : EOS 600D / Kiss X5 / Rebel T3i
- Spesifikasi : 18-megapixel CMOS sensor
Up to 3.7fps continuous shooting
Wide-area 9-point AF
- Lensa : EFS 18-55mm f/3.5-5.6 + Extension tube



Gambar 3.12 Kamera Canon EOS 600D 18-55mm f/3.5-5.6 + Extension tube

Sumber : Dokumentasi pribadi

3.5 Skema Instalasi Penelitian

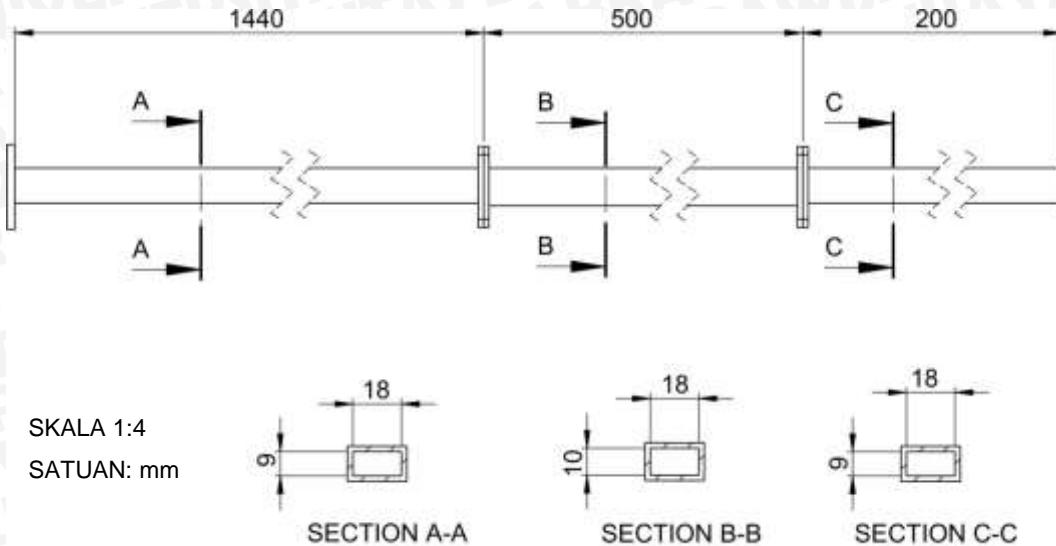


Gambar 3.13 Instalasi Penelitian

Sumber : Dokumentasi pribadi

Keterangan:

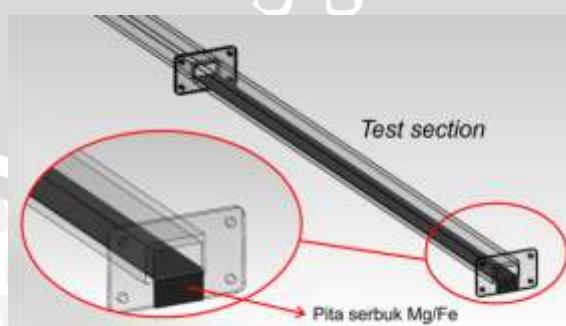
- a. Bak penampung utama
- b. Pompa
- c. Bak pelimpah ke saluran pengamatan
- d. Pengatur level (Level 1-7)
- e. Saluran penyeimbang level
- f. Katup pengatur debit
- g. Manometer terbuka tekanan masuk (A) *test section*
- h. Manometer terbuka tekanan keluar (B) *test section*
- i. *Test section*
- j. Bak pengukur debit
- k. Kamera
- l. Bak Penguras
- m. Termometer
- n. Katup saluran buang bak pengukur debit



Gambar 3.14 Dimensi Saluran Pengamatan

Sumber : Dokumentasi pribadi

Pemasangan pita serbuk Mg/Fe dilakukan dengan menempelkan pita pada dasar saluran *test section* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.15. Pada *test section* (*section B-B*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.14, terdapat selisih lebar 1mm terhadap saluran sebelum maupun sesudah *test section*. Hal ini dilakukan untuk memberikan ruang pemasangan pita serbuk Mg/Fe dengan tebal pita disesuaikan setebal 1mm pula. Untuk pengambilan data pipa kosong tanpa pelapisan, bagian kosong sebesar 1 mm akan diisi pipa akrilik setebal 1mm yang bertujuan untuk menyamakan kondisi dengan kedua pelapisan sebelumnya sehingga saluran tetap memiliki luas penampang yang sama untuk pengambilan data pada semua jenis pelapisan yang dilakukan.



Gambar 3.15 Pemasangan pita serbuk Mg/Fe

Sumber : Dokumentasi pribadi

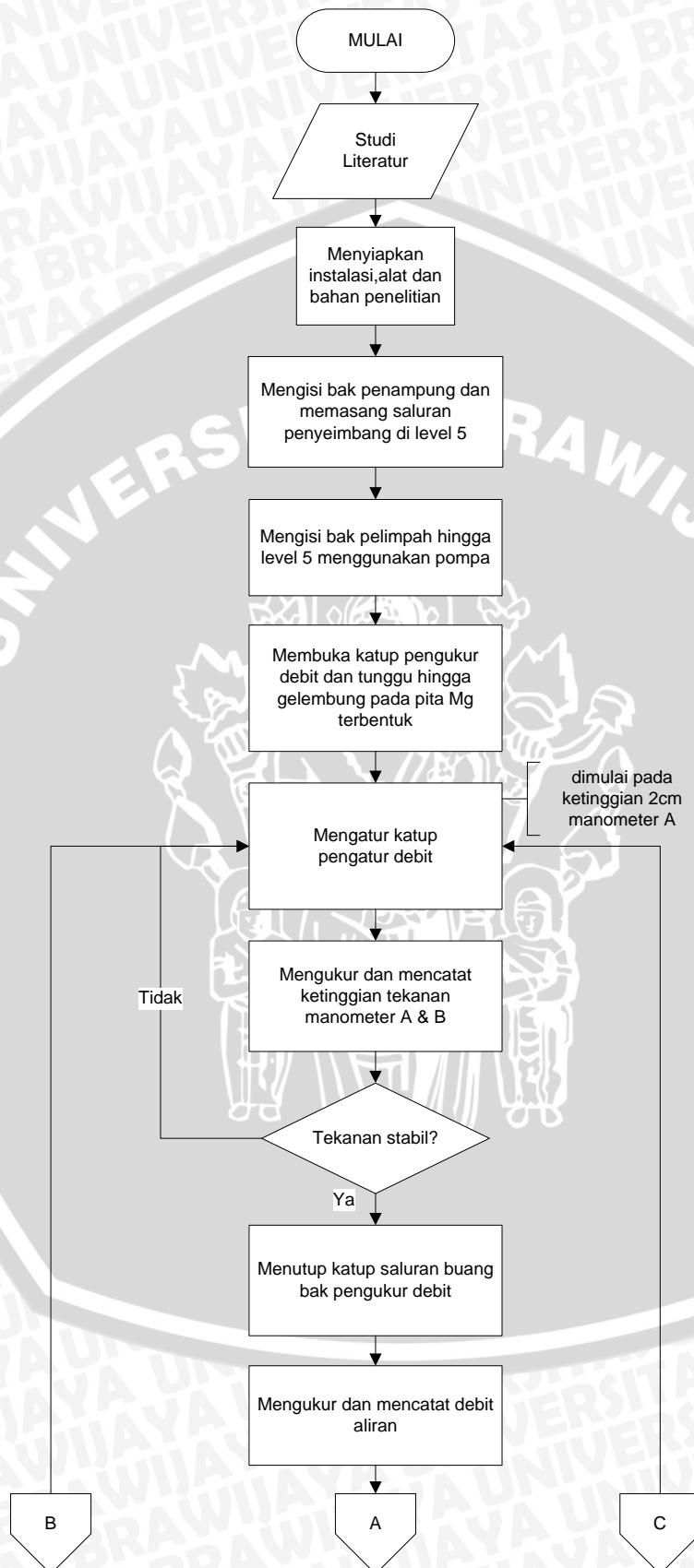
3.6 Prosedur Penelitian

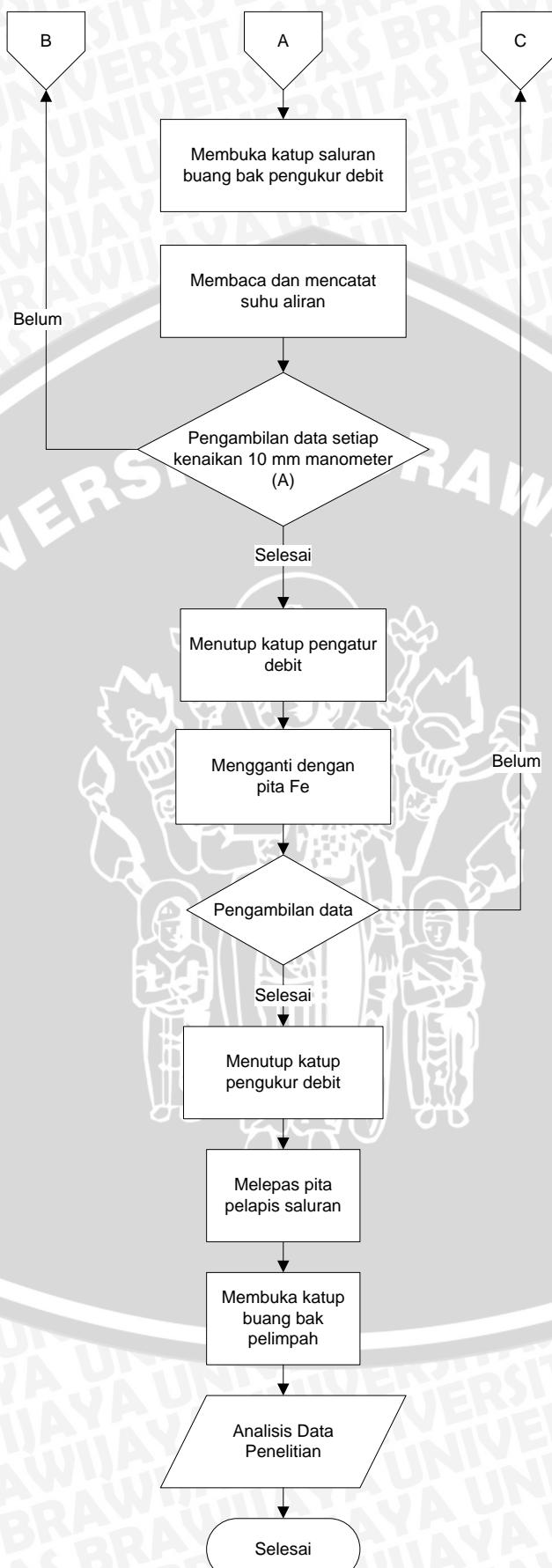
Prosedur penelitian yang dilakukan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat-alat yang diperlukan untuk penelitian, termasuk instalasi penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.
2. Memasang pita serbuk Mg pada *test section*.
3. Mengisi air pada bak penampung utama hingga cukup dipergunakan untuk mengisi instalasi dengan air
4. Memasang saluran penyeimbang level di level 5
5. Menyalakan pompa dan mengisi bak pelimpah hingga level 5
6. Membuka katup pengukur debit (f)
7. Tunggu beberapa saat hingga reaksi magnesium (Mg) dan air terbentuk sepurna.
8. Mengatur katup pengatur debit dimulai pada ketinggian 2cm pada manometer (A)
9. Mengukur dan mencatat ketinggian tekanan pada manometer (A) dan (B) menggunakan penggaris.
10. Menutup katup saluran buang bak pengukur debit (n)
11. Mengukur dan mencatat debit aliran dengan mencatat waktu untuk memenuhi 1lt bak pengukur debit (j)
12. Membuka kembali katup saluran buang bak pengukur debit (n)
13. Membaca dan mencatat suhu yang ditunjukkan termometer
14. Mengulangi langkah Nomer (8) sampai (13) dengan kenaikan tekanan pada manometer (A) sebesar 1 cm hingga data ke 50.
 - Mengambil foto visualisasi aliran setiap kenaikan 10 cm pada manometer (A).
15. Menutup katup pengatur debit (f) dan mengganti dengan pita sebuk Fe
16. Mengulangi langkah Nomer (6) sampai (14) tanpa melakukan langkah nomer (7).
17. Menutup katup pengatur debit (f) dan melepas pita pada *test section*.
18. Membuka katup buang bak pelimpah dan bak penguras agar air kembali ke bak penampung utama.
19. Merapikan peralatan dan instalasi penelitian.



3.7 Diagram Alir Penelitian





BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Data hasil pengukuran *pressure drop* dan debit aliran ditunjukkan pada Tabel 4.1 dengan variasi penambahan tekanan masuk *test section* setiap 10 mmH₂O hingga katup terbuka penuh.

Tabel 4.1 Data hasil pelapisan pipa menggunakan serbuk magnesium (Mg) ukuran 160µm

No	Level Air	P _{masuk} (mmH ₂ O)	P _{keluar} (mmH ₂ O)	Waktu Debit (sekon/2lt)	Temp. (°C)
1		10	3	110,67	27
2		20	10	74,31	27,5
3		30	27	62,62	28
4	Lv.5	40	33	55,60	28
5		50	43	51,32	28
...	
63		650	605	15,34	32

Sebagai pembanding, dalam penelitian ini menggunakan tiga jenis saluran, yaitu: pipa saluran dengan lapisan dalam serbuk magnesium, serbuk besi, dan pipa tanpa pelapisan. Berikut hasil pengambilan data untuk pipa dengan lapisan dalam serbuk besi dan tanpa pelapisan ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan 4.3:

Tabel 4.2 Data hasil pelapisan pipa menggunakan serbuk besi (Fe) ukuran 160 µm

No.	Level air	P _{masuk} (mmH ₂ O)	P _{keluar} (mmH ₂ O)	Waktu Debit (sekon/2lt)	Temp. (°C)
1		10	2	89.97	28
2		20	16	71.43	28
3	Lv.1	20	25	63.15	28
4		40	33	55.45	28,5
5		50	43	49.54	28,5
...
65	Lv.5	650	602	15,13	33,5

Tabel 4.3 Data hasil pipa tanpa pelapisan

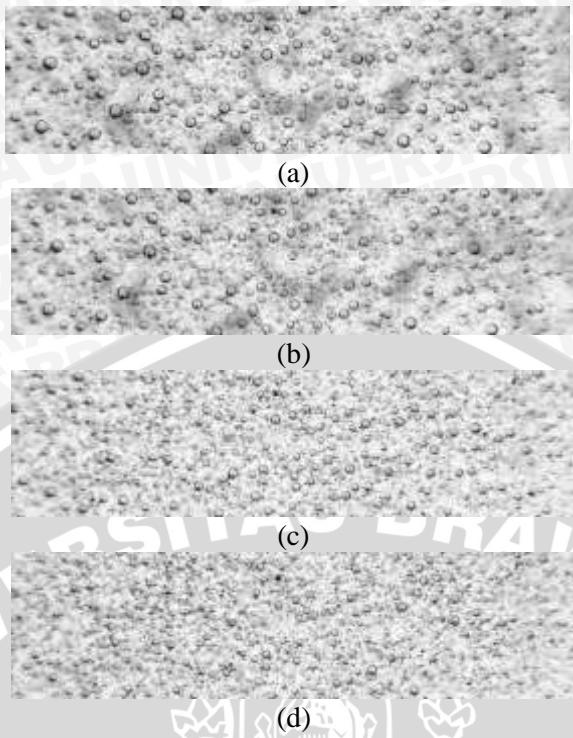
No.	Level air	P _{masuk} (mmH ₂ O)	P _{keluar} (mmH ₂ O)	Waktu Debit (sekon/2lt)	Temp. (°C)
1		10	8	98.25	26
2		20	19	70.90	27
3		20	28	58.53	27
4	Lv.5	40	36	52.43	27
5		50	48	46.78	27
...	
65		647	612	15,02	31

Untuk mengetahui tingkat kekasaran ketiga jenis pelapis bagian dalam saluran, maka dilakukan pengujian kekasaran terhadap ketiga jenis lapisan dengan hasil data yang ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data hasil pengujian kekasaran ketiga jenis pelapisan bagian dalam pipa

No	Jenis Pelapisan		
	Mg	Fe	Tanpa pelapisan (Akrilik)
1	17,33 µm	18,92 µm	
2	20,14 µm	21,73 µm	0,64 µm
3	26,76 µm	21,60 µm	
Rata-rata	21,41 µm	20,75 µm	0,64 µm

Hasil pengambilan foto visualisasi aliran yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 digunakan untuk mengetahui bagaimana perkembangan pembentukan gelembung dari hasil reaksi magnesium dan air pada saluran berlapis serbuk magnesium.



Perbesaran 6x

Gambar 4.1 Foto visualisasi gelembung pada berbagai bilangan *Reynold*

- a. $Re = 1540,27$
- b. $Re = 4863,38$
- c. $Re = 6694,07$
- d. $Re = 9530,05$

Sumber : Dokumentasi pribadi

4.2 Perhitungan Data

Data berikut merupakan data nomer 1 pada pipa dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg):

- Ukuran penampang pipa

$$\text{Lebar} \quad (l) = 9 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang} \quad (p) = 18 \text{ mm}$$

$$\text{Luas penampang} \quad (A) = 162 \text{ mm}^2 = 1,62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\text{Diameter hidrolik} \quad (D_H) = \frac{2pl}{p+l} = \frac{2(18 \times 9)}{18+9} = 12 \text{ mm} = 0,012 \text{ m}$$

- Panjang *test section* (L) = 0,5 m
- Percepatan gravitasi (g) = 9,8 m/s²

a. Perhitungan *pressure drop* (ΔP)

Pressure drop dihitung berdasarkan selisih antara tekanan masuk dan keluar *test section*

$$P_{\text{masuk}} = 10 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$P_{\text{keluar}} = 3 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\Delta P = P_{\text{masuk}} - P_{\text{keluar}} = 10 - 3 = 7 \text{ mmH}_2\text{O} = 7 \times 10^{-3} \text{ mH}_2\text{O}$$

$$h_f = 7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

b. Perhitungan kecepatan aliran

Dari pengambilan data diketahui bahwa waktu debit sebesar 92,86 sekon/2 lt, maka untuk mengisi volume sebesar 2lt, aliran membutuhkan waktu sebesar 92,86 s. Sehingga debit dan kecepatan dapat dihitung sebagai berikut:

✓ Debit aliran (Q)

$$V = 2 \text{ liter} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$t = 92,86 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{2 \times 10^{-3}}{92,86} = 1,807 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

✓ Kecepatan aliran (\vec{V})

$$\vec{V} = \frac{Q}{A} = \frac{1,807 \times 10^{-5}}{1,62 \times 10^{-4}} = 0,112 \text{ m/s}$$

c. Perhitungan bilangan *Reynold*

$$\text{Diameter hidrolis } (D_h) = 0,012 \text{ m}$$

$$\text{Kecepatan aliran } (\vec{V}) = 0,112 \text{ m/s}$$

Viskositas kinematik (ν) = $0,8598 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (berdasarkan tabel sifak fisik air)

$$Re = \frac{\vec{V} \times D_h}{\nu} = \frac{0,112 \times 0,012}{0,8598 \times 10^{-6}} = 1556,93$$



d. Perhitungan *friction factor*

$$f = \frac{h_f}{\frac{L}{D_H} \frac{\vec{V}^2}{2g}} = \frac{7 \times 10^{-3}}{\frac{0,5}{0,012} \times \frac{(0,112)^2}{2 \times 9,8}} = 0,266$$

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan *pressure drop*, bilangan *Reynold*, dan *friction factor*

No	Mg			Fe			Tanpa pelapis		
	ΔP	Re	f	ΔP	Re	f	ΔP	Re	f
1	7	1556,93	0,266	8	1887,58	0,266	2	1655,30	0,079
2	10	2344,09	0,171	4	2377,51	0,084	1	2343,46	0,021
3	3	2812,44	0,037	5	2689,24	0,082	2	2838,74	0,028
4	7	3167,54	0,067	7	3096,91	0,088	4	3169,02	0,045
5	7	3431,71	0,057	7	3466,37	0,071	2	3551,77	0,018
...
...
60	44	12227,44	0,034	44	12550,97	0,041	36	11560,49	0,036
61	42	12401,55	0,031	44	12402,34	0,042	39	11863,32	0,037
62	45	12441,81	0,033	45	12947,03	0,040	34	11816,89	0,033
63	45	12490,48	0,033	45	12571,01	0,042	34	12028,74	0,032
64				46	12671,38	0,043	33	12092,98	0,030
65				48	12587,62	0,045	35	12060,78	0,032

Ket.: ΔP = *pressure drop* (mmH₂O); Re = bilangan *Reynold*; f = *friction factor*

e. Menentukan ukuran gelembung gas yang terbentuk pada permukaan pelapisan pipa dengan serbuk magnesium menggunakan *software ImageJ*

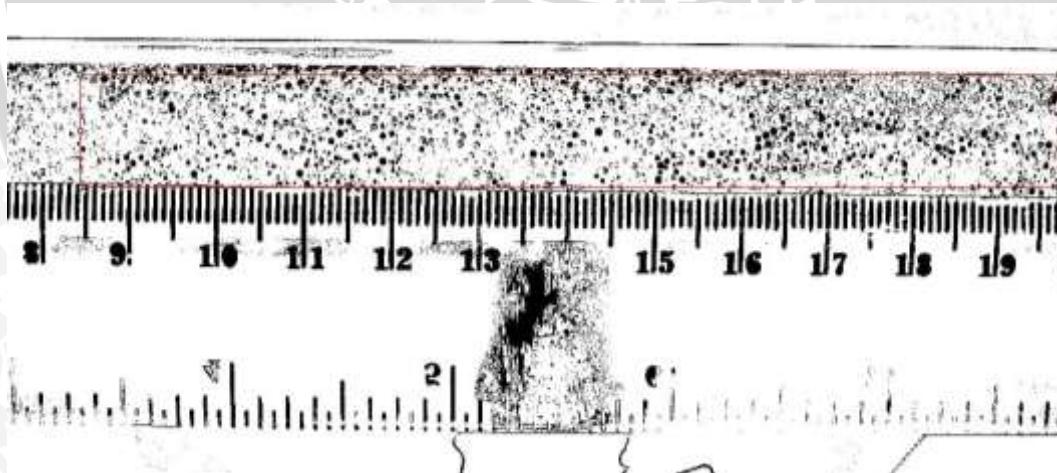
Untuk memperoleh ukuran diameter gelembung gas H₂ yang terbentuk dari reaksi antara serbuk Mg dan air dilakukan dengan cara menempatkan kamera tegak lurus secara vertikal di atas saluran pengamat. Pengambilan visualisasi gelembung dilakukan setiap kenaikan 10 mmH₂O dengan mengatur katup yang menuju saluran pengamatan. Setelah didapatkan data yang cukup, foto hasil visualisasi diolah menggunakan *software ImageJ*. Salah satu contoh foto hasil visualisasi ditunjukkan oleh Gambar 4.2 berikut.





Gambar 4.2 Foto gelembung pada tekanan masuk 10 mmH₂O (Re 1540)
Sumber : Dokumentasi pribadi

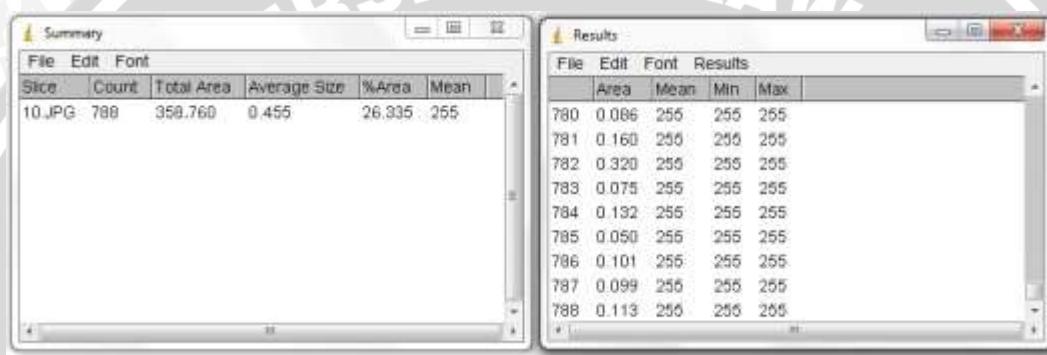
Pada pengolahan menggunakan *software* ImageJ, foto yang diambil dari berbagai nilai Re diproses dengan merubah warna foto menjadi dua warna saja yaitu hitam dan putih. Selanjutnya area pada bagian tengah saluran dipilih secara acak untuk mengambil sampel ukuran diameter yang akan diproses secara langsung oleh *software* ImageJ. Pemilihan area dapat dilakukan sepanjang saluran *test section*. Pada Gambar 4.3 berikut ditunjukkan hasil foto setelah diolah menggunakan ImageJ.



Gambar 4.3 Hasil foto visualisasi setelah diolah menggunakan *software* ImageJ
Sumber : Dokumentasi pribadi

Pada Gambar 4.3 daerah yang dibatasi oleh garis berwarna merah menunjukkan area yang digunakan untuk menghitung sampel diameter gelembung. Bercak hitam pada foto menunjukkan gelembung yang

terbentuk pada saluran pipa dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg). Software ImageJ hanya akan menghitung luas area yang berwarna hitam dan akan menghitung rata-rata luasan yang terbentuk pada daerah sampel. Hasil pengukuran yang dilakukan sudah dalam satuan mm². Penggaris pada foto digunakan untuk mengatur skala panjang yang akan dibandingkan dengan panjang dalam satuan pixel dalam foto digital. Hasil perhitungan luasan dari ImageJ, selanjutnya diolah untuk mendapatkan diameter dari gelembung. Berikut hasil perhitungan diameter yang ditunjukkan oleh Gambar 4.4 dan Tabel 4.6.



Gambar 4.4 Hasil perhitungan luas profil gelembung menggunakan ImageJ
Sumber : Dokumentasi pribadi

Tabel 4.6 Hasil perhitungan luas dan diameter profil gelembung pada tekanan 10 mmH₂O (Re 1540)

No	Luas gelembung (mm ²)	Diameter gelembung (mm)
1.	1.765	1.499
2.	3.592	2.139
3.	0.044	0.237
4.	0.076	0.311
5.	0.034	0.208
...
788.	0.113	0.124

Hasil perhitungan diameter profil gelembung dikelompokkan menjadi beberapa kelas untuk selanjutnya digunakan menghitung standar deviasi dan *skewness*. Data dikelompokkan kedalam 51 kelas dengan interval masing-masing kelas sebesar 0,04 dimulai dengan kelas paling kecil 0 – 0,04 mm yang ditunjukkan oleh Tabel 4.7 berikut:



Tabel 4.7 Perhitungan statistik data diameter gelembung pada tekanan 10 mmH₂O
(Re 1540)

No.	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1.	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2.	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3.	0.08	0.12	21	21	0.1	0.01	2.1	0.210
4.	0.12	0.16	168	189	0.14	0.0196	23.52	3.293
5.	0.16	0.20	58	247	0.18	0.0324	10.44	1.879
6.	0.20	0.24	107	354	0.22	0.0484	23.54	5.179
...
...
49.	1.92	1.96	0	788	1.94	3.7636	0	0.000
50.	1.96	2.00	0	788	1.98	3.9204	0	0.000
51.	2.00	2.04	0	788	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH		788			358.76	273.499		

- Diameter rata-rata

Diameter rata-rata gelembung dihitung melalui Persamaan (4-1)

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n f_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (\text{H.M. Hifni, 1993:43})(4-1)$$

$$\bar{D} = \frac{358,76}{788}$$

$$\bar{D} = 0,4553$$

Keterangan :

D = diameter rata-rata gelembung

f_i = frekuensi kelas ke-i

m_i = nilai tengah kelas

- Median

Median atau nilai tengah data berkelompok dihitung melalui persamaan (4-2) berikut:

$$Me = L_0 + \left(\frac{\frac{1}{2}n - f_k}{f_0} \right) c \quad (\text{H.M. Hifni, 1993:43})(4-2)$$



$$Me = 0,28 + \left(\frac{\frac{1}{2}788 - 369}{49} \right) 0,04$$

$$Me = 0,3004$$

Keterangan:

Me = median

L_0 = batas bawah kelas median

n = banyak data

f_k = frekuensi kumulatif sebelum kelas median

f_0 = frekuensi kelas median

c = panjang interval kelas

- Standar deviasi

Standar deviasi dihitung berdasarkan persamaan (4-3)

$$s = \sqrt{\frac{n \cdot \sum f_i \cdot m_i^2 - (\sum f_i \cdot m_i)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (\text{Walpole, 1995:36})(4-3)$$

$$s = \sqrt{\frac{788 \cdot 273,499 - 358,76^2}{788 \cdot (788 - 1)}}$$

$$s = 0,3741$$

- *Skewness*

Untuk nilai skewness dihitung berdasarkan persamaan (4-4)

$$Sk = \frac{3(\bar{D} - Me)}{s} \quad (\text{Walpole, 1995:58})(4-4)$$

$$Sk = \frac{3(0,4553 - 0,3004)}{0,3741}$$

$$Sk = +1,829$$

Berikut adalah hasil perhitungan statistik diameter rata-rata gelembung, standar deviasi, dan *skewness* ditampilkan pada Tabel 4.8:

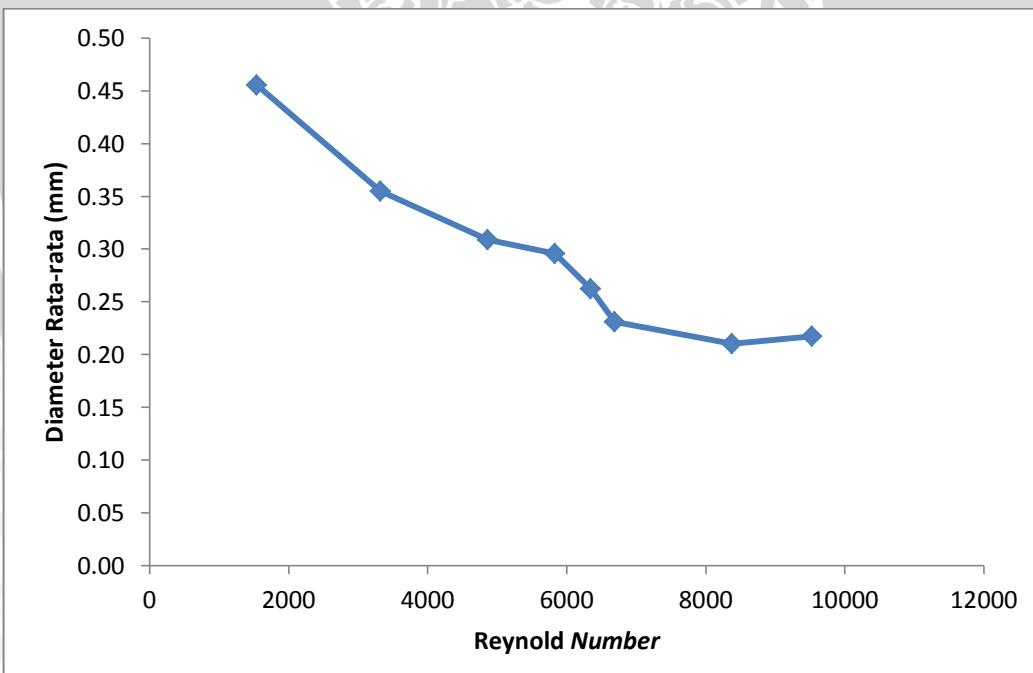


Tabel 4.8 Data hasil perhitungan statistik

No.	Re	Skewness	Standar deviasi	Diameter rata-rata (mm)
1	1540.27	1.829	0.374	0.455
2	3321.54	1.489	0.244	0.355
3	4863.38	1.381	0.198	0.309
4	5830.98	1.588	0.203	0.296
5	6341.75	1.615	0.150	0.262
6	6694.07	1.541	0.101	0.231
7	8382.55	2.066	0.099	0.210
8	9530.05	2.517	0.073	0.218

4.3 Analisa Grafik

4.3.1 Grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap ukuran diameter rata-rata gelembung pada pelapisan pipa menggunakan magnesium



Gambar 4.5 Hubungan bilangan *Reynold* terhadap ukuran diameter rata-rata gelembung pada pelapisan pipa menggunakan magnesium
Sumber : Dokumentasi pribadi

Perbedaan pelapisan saluran menggunakan serbuk magnesium dibandingkan dengan kedua jenis pelapisan yang lain (pelapisan dengan serbuk Fe

dan tanpa pelapisan) adalah kemampuan magnesium bereaksi dengan air dan menghasilkan gas H₂ yang sesuai dengan reaksi kimia berikut:



Hasil reaksi berupa gas H₂ terbentuk menjadi gelembung yang menempel di dasar saluran. Pembentukan gelembung inilah yang tidak terjadi pada jenis pelapisan menggunakan serbuk Fe ataupun saluran tanpa pelapisan.

Pada Gambar 4.5 menunjukkan ukuran gelembung yang terbentuk pada berbagai nilai bilangan *Reynold* aliran. Dari grafik tersebut nampak bahwa semakin tinggi bilangan *Reynold* aliran diameter rata-rata gelembung yang dihasilkan semakin kecil. Semakin besar bilangan *Reynold* menunjukkan semakin tinggi kecepatan fluida yang mengalir sesuai dengan rumus:

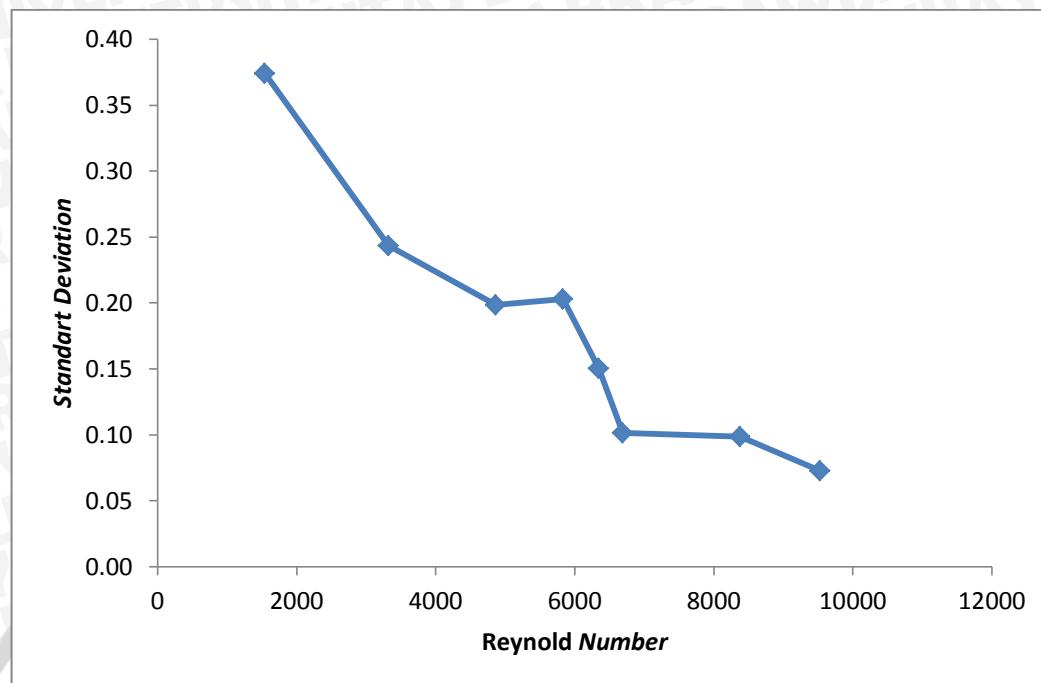
$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Keterangan :
Re = bilangan *Reynold*
V = kecepatan aliran fluida (m/s)
D = ukuran linier yang mewakili skala panjang (m)
v = viskositas kinematik (m²/s)

Dengan kecepatan aliran yang semakin tinggi, ukuran gelembung yang terbentuk dari hasil reaksi magnesium (Mg) dan air (H₂O) akan semakin berkurang. Sehingga diameter rata-rata gelembung akan semakin kecil seiring dengan semakin tingginya nilai bilangan *Reynold* dan kecepatan aliran.

4.3.2 Grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap standar deviasi pengukuran diameter rata-rata gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium

Standar deviasi merupakan nilai statistik yang digunakan untuk menentukan bagaimana sebaran data dalam sampel, dan seberapa dekat titik data individu ke atau rata-rata nilai sampel. Semakin tinggi nilai standar deviasi maka, penyimpangan data dari nilai rata-ratanya semakin tinggi. Demikian pula jika nilai standar deviasi semakin rendah maka persebaran data semakin mendekati nilai rata-ratanya dengan kata lain penyimpangannya semakin rendah.



Gambar 4.6 Hubungan bilangan *Reynold* terhadap standar deviasi pengukuran diameter rata-rata gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium

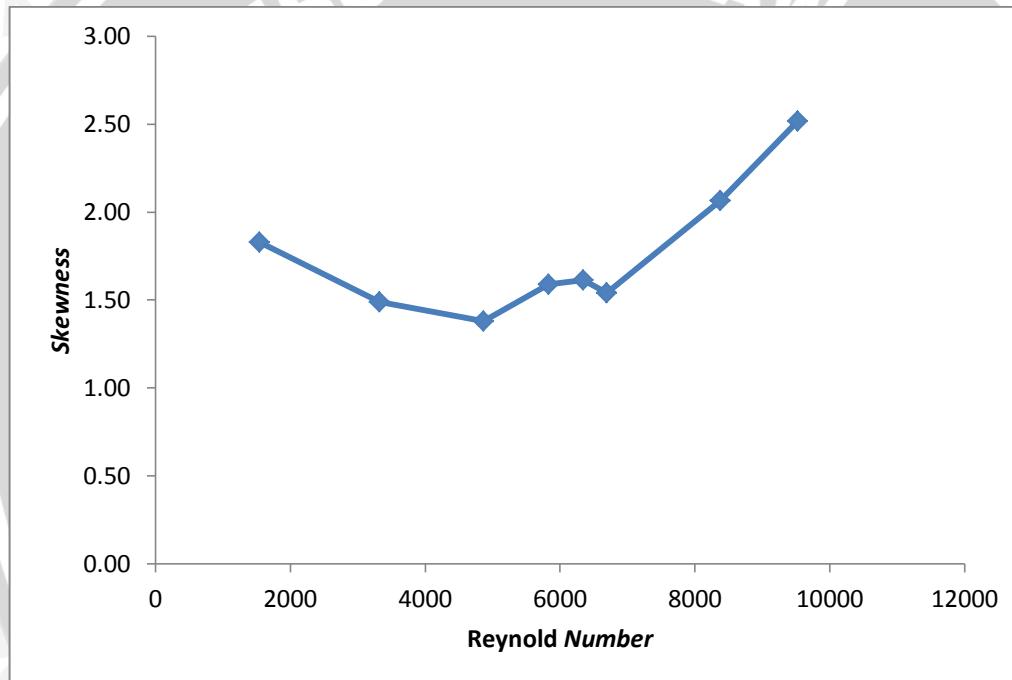
Sumber : Dokumentasi pribadi

Jika ditinjau dari Gambar 4.6, nilai standar deviasi pengukuran diameter rata-rata gelembung semakin menurun ketika nilai bilangan *Reynold* semakin tinggi. Pada bilangan *Reynold* rendah nilai standar deviasi yang masih tinggi pada angka sekitar 0,374 menunjukkan persebaran data diameter gelembung masih tinggi terhadap diameter rata-rata. Ukuran gelembung masih bervariasi dari yang berukuran kecil hingga berukuran besar. Seiring pertambahan nilai bilangan *Reynold*, nilai standar deviasi semakin turun mendekati angka 0,073. Hal ini menunjukan bahwa persebaran data semakin menurun dan mendekati nilai rata-ratanya. Ukuran gelembung yang terbentuk akan semakin seragam dari pada sebelumnya. Nilai standar deviasi pengukuran diameter gelembung yang semakin kecil menunjukkan pula bahwa ukuran diameter gelembung semakin rata dengan bertambahnya bilangan *Reynold* aliran.

Mengcilnya diameter gelembung ini dikarenakan semakin singkatnya reaksi yang berlangsung antara serbuk magnesium pada pita pelapis di dasar saluran dengan air yang mengalir diatasnya karena semakin tingginya massa alir aliran. Saat aliran mengalir pada angka *Reynold* rendah, kecepatan dan massa

aliran pun juga rendah dengan demikian memberikan kesempatan magnesium bereaksi lebih banyak dengan air. Namun dengan meningkatnya massa aliran menyebabkan kecepatan dan angka *Reynold* semakin tinggi pula, sehingga reaksi antara magnesium dan air juga semakin singkat dan membentuk ukuran gelembung yang semakin kecil.

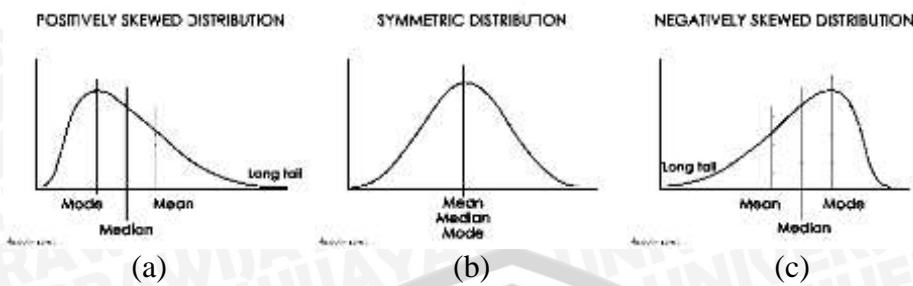
4.3.3 Grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap *skewness* pengukuran diameter gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium



Gambar 4.7 Hubungan bilangan *Reynold* terhadap *skewness* pengukuran diameter gelembung pada pengujian pipa dengan pelapisan magnesium

Sumber : Dokumentasi pribadi

Skewness merupakan derajat kemiringan dari persebaran data. Sebuah distribusi dikatakan simetris apabila nilai-nilainya tersebar merata disekitar nilai rata-ratanya yang berarti data di bawah nilai rata-rata sebanding dengan variasi data diatas nilai rata rata. Jenis kesimetrisan data ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Jenis kesimetrisan persebaran data (*skewness*)

- (a) *Skewness* bernilai positif
- (b) *Skewness* bernilai nol
- (c) *Skewness* bernilai negatif

Sumber : Sridianti (2014)

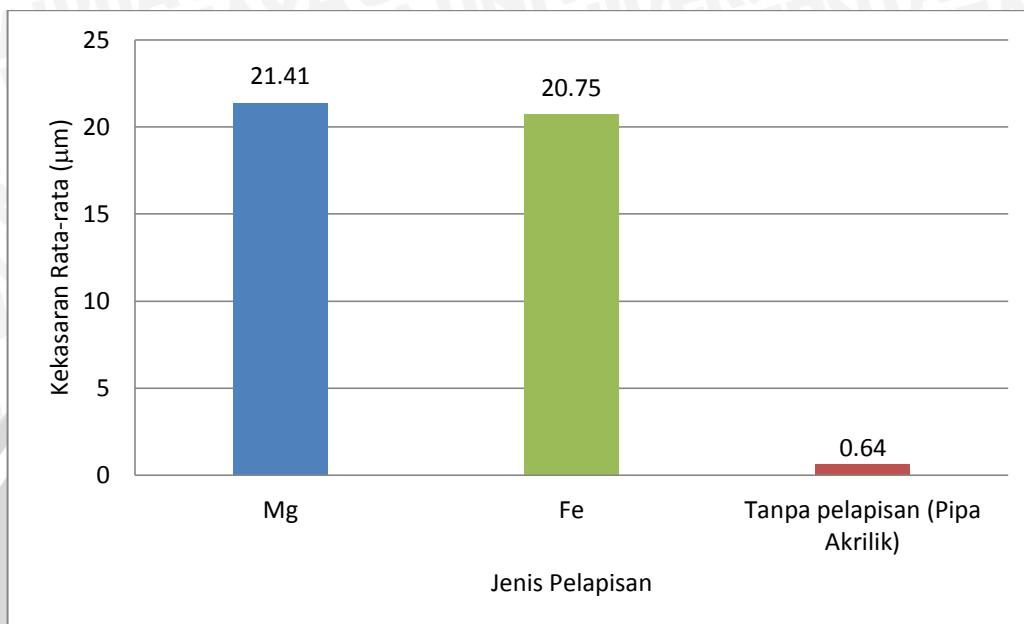
Jika *skewness* bernilai negatif maka variasi data di atas nilai rata-rata lebih banyak dibandingkan variasi data di bawah nilai rata-rata seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7 (c). Sedangkan jika *skewness* bernilai positif maka variasi data di bawah nilai rata-rata lebih banyak dari pada variasi data di atas rata-rata. Jika nilai *skewness* bertambah, maka persebaran data menjauhi distribusi normal (*skewness* menjauhi nilai nol). Dan sebaliknya jika nilai *skewness* berkurang maka persebaran data mendekati distribusi normal (*skewness* mendekati nilai nol).

Dari hasil perhitungan, *skewness* data pengukuran diameter gelembung menghasilkan nilai positif seperti yang ditunjukkan grafik pada Gambar 4.7. Pada angka *Reynold* sebelum 5000, nilai *skewness* menurun dari 1,829 ke 1,489. Penurunan ini menunjukkan sebagian gelembung masih mampu bertambah besar disamping rata-rata gelembung memang bertambah kecil (seperti ditunjukkan Gambar 4.7 bahwa diameter rata-rata semakin mengecil dengan kenaikan angka *Reynold*). Pada angka *Reynold* diatas 5000 nilai *skewness* meningkat kembali. Dengan meningkatnya *skewness* hal ini menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi ukuran diameter gelembung di bawah diameter rata-rata semakin meningkat seiring semakin tingginya bilangan *Reynold*. Dengan kata lain semakin banyak gelembung yang berkurang ukuran diameternya pada bilangan *Reynold* 5000 keatas. Dapat diketahui bahwa ukuran gelembung yang terbentuk pada saluran dengan pelapis serbuk Mg sangat dipengaruhi oleh kenaikan bilangan Reynod aliran.

Jadi pada aliran laminar hingga turbulen awal (sebelum Re 5000) sebagian gelembung hasil reaksi Mg dan H₂O masih mampu tumbuh membesar.

Namun pada bilangan *Reynold* 5000 keatas, rata-rata gelembung tidak dapat tumbuh membesar dan justru terus semakin berkurang diameternya.

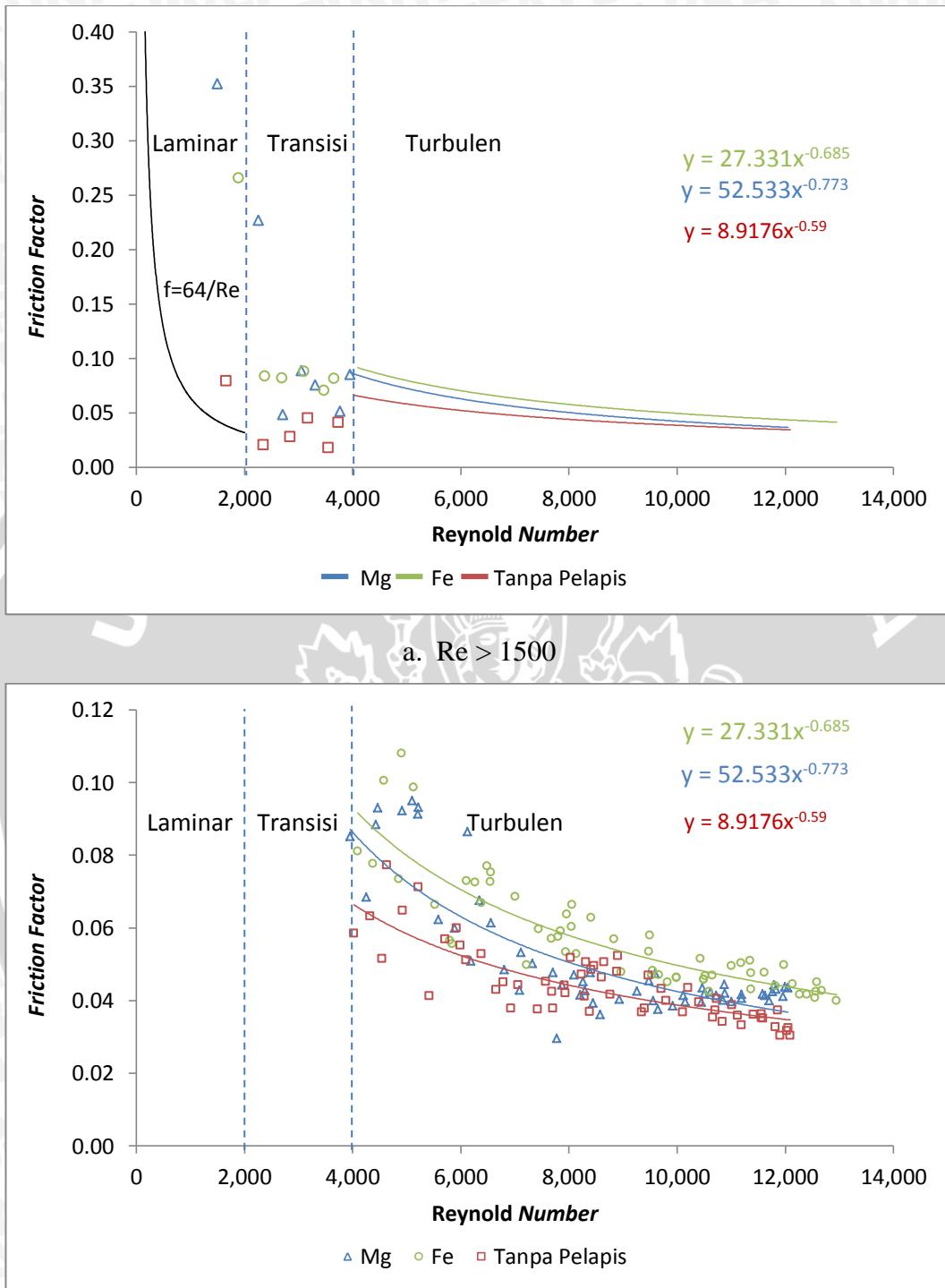
4.3.4 Diagram perbandingan kekasaran pelapis saluran bagian dalam pipa



Gambar 4.9 Diagram hasil uji kekasaran bahan pelapis saluran
Sumber : Dokumentasi pribadi

Dari hasil uji kekasaran yang ditunjukkan Gambar 4.9, serbuk Mg memiliki kekasaran yang paling tinggi diantara ketiga jenis pelapisan. Walaupun ukuran butir Fe dan Mg sama, namun tingkat kekasaran yang dibentuk oleh serbuk Mg lebih tinggi. Hal ini dikarenakan bentuk serbuk Mg yang cenderung lebih lancip dan kasar jika dibandingkan dengan serbuk Fe yang lebih rata dan bulat, seperti ditunjukkan pada visualisasi foto mikro permukaan pita serbuk Mg (terlampir). Bentuk serbuk yang lancip akan membentuk permukaan yang lebih kasar walaupun dengan ukuran butir yang sama. Pipa akrilik kosong tanpa pelapisan memiliki kekasaran yang paling rendah, jauh lebih rendah dari kedua jenis pelapisan lainnya (pelapisan serbuk Mg dan Fe) karena memang pipa akrilik memiliki permukaan yang sangat rata dan halus.

4.3.5 Grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap *friction factor* pada jenis pelapisan bagian dalam pipa yang berbeda



Gambar 4.10 Hubungan bilangan *Reynold* terhadap *friction factor* pada jenis pelapisan bagian dalam pipa yang berbeda
Sumber : Dokumentasi pribadi

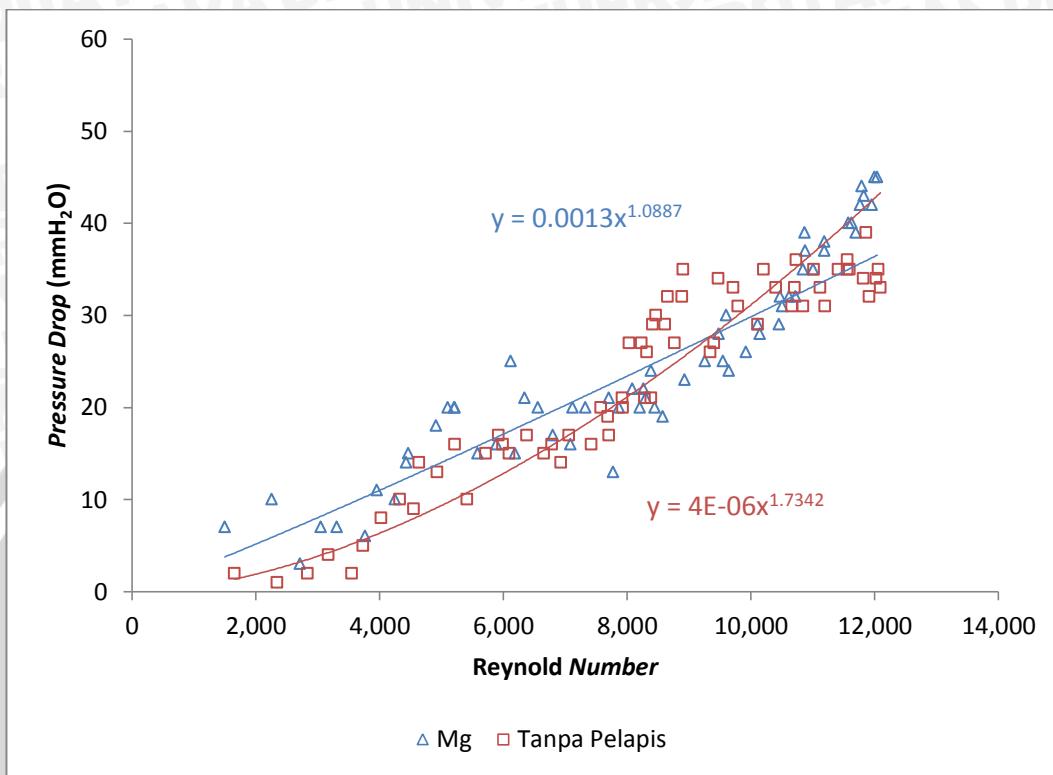
Dapat dilihat pada Gambar 4.10, berdasarkan hasil perhitungan data *friction factor* menunjukkan urutan dari yang paling tinggi adalah pipa dengan pelapisan serbuk besi (Fe), pipa dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg) dan yang paling bawah adalah pipa tanpa pelapisan. *Friction factor* menunjukkan seberapa besar fluida mengalami gesekan. Semakin tinggi nilai *friction factor* maka semakin besar pula fluida mengalami gesekan dengan permukaan pipa. Begitu pula sebaliknya, semakin rendah nilai *friction factor* maka fluida tersebut semakin sedikit mengalami gesekan dengan dinding saluran. *Friction factor* juga berhubungan dengan tingkat kekasaran saluran dimana fluida mengalir. Semakin kasar permukaan yang bergesekan dengan fluida, maka akan semakin meningkatkan nilai *friction factor* fluida.

Pada Gambar 4.10 (a), kondisi transisi nilai *friction factor* masih terbentuk acak dan nilainya belum bisa didekati secara matematis. Hal ini dikarenakan aliran masih sering berubah antara membentuk laminar atau turbulen. Untuk aliran laminar ($Re < 2000$) secara teori nilai *friction factor* mendekati kurva $f=64/Re$, namun pada pengukuran nilai *friction factor* menyimpang dari kurva. Hal ini disebabkan permukaan saluran yang tidak rata sulit untuk membentuk aliran laminar secara penuh.

Berdasarkan Gambar 4.10 (b), dengan nilai kekasaran pita serbuk Mg sebagai pelapis saluran yang lebih tinggi dari pita serbuk Fe, nilai *friction factor* dari pipa dengan pelapisan serbuk Mg justru lebih rendah dibandingkan menggunakan serbuk Fe. Jika hanya ditinjau dari tingkat kekasaran tentu karakter yang dihasilkan oleh aliran pada pipa dengan pelapisan serbuk Mg berbeda dengan teori yang ada. Namun ada faktor lain selain kekasaran yang perlu ditinjau bahwa pada pipa dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg) terbentuk gelembung gas di dasar pipa yang pada jenis pelapisan lain tidak terbentuk. Maka hal ini menunjukkan bahwa gelembung berpengaruh pada sifat yang dibentuk oleh aliran air tersebut.



4.3.6 Grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap *pressure drop* pada bahan pelapis Mg dan tanpa pelapis



Gambar 4.11 Hubungan bilangan *Reynold* terhadap *pressure drop* pada bahan pelapis Mg dan tanpa pelapis.

Sumber : Dokumentasi pribadi

Gambar 4.11 menjelaskan hubungan antara bilangan *Reynold* terhadap *pressure drop* yang terjadi pada bahan pelapis serbuk Mg dan saluran tanpa pelapis (pipa akrilik kosong). Hasil dari grafik menunjukkan bahwa *pressure drop* untuk pipa dengan pelapisan serbuk Mg sebelum Re 9000 lebih tinggi dari pada pipa tanpa pelapisan. Pita serbuk Mg memiliki rata-rata kekasaran 21,41 μm sedangkan pipa akrilik tanpa pelapisan memiliki rata-rata kekasaran 0,64 μm . Dengan nilai kekasaran yang jauh lebih tinggi dari pada pipa akrilik tanpa pelapis, pipa dengan pelapisan serbuk magnesium memiliki kecenderungan *pressure drop* yang lebih tinggi. Selain itu pada bilangan *Reynold* yang lebih rendah gelembung yang terbentuk masih sangat beragam dari ukuran gelembung besar hingga kecil. Munculnya gelembung berukuran besar diantara gelembung-gelembung kecil masih mengganggu aliran dan menimbulkan kerugian yang berlebih. Ukuran

gelembung yang besar mengurangi luas penampang pipa dan menghambat aliran dalam saluran. Sesuai dengan persamaan berikut,

$$h_f = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g}$$

dimana: h_f = head loss (m)

D = diameter saluran (m)

L = panjang saluran (m)

f = friction factor

V = kecepatan aliran (m/s)

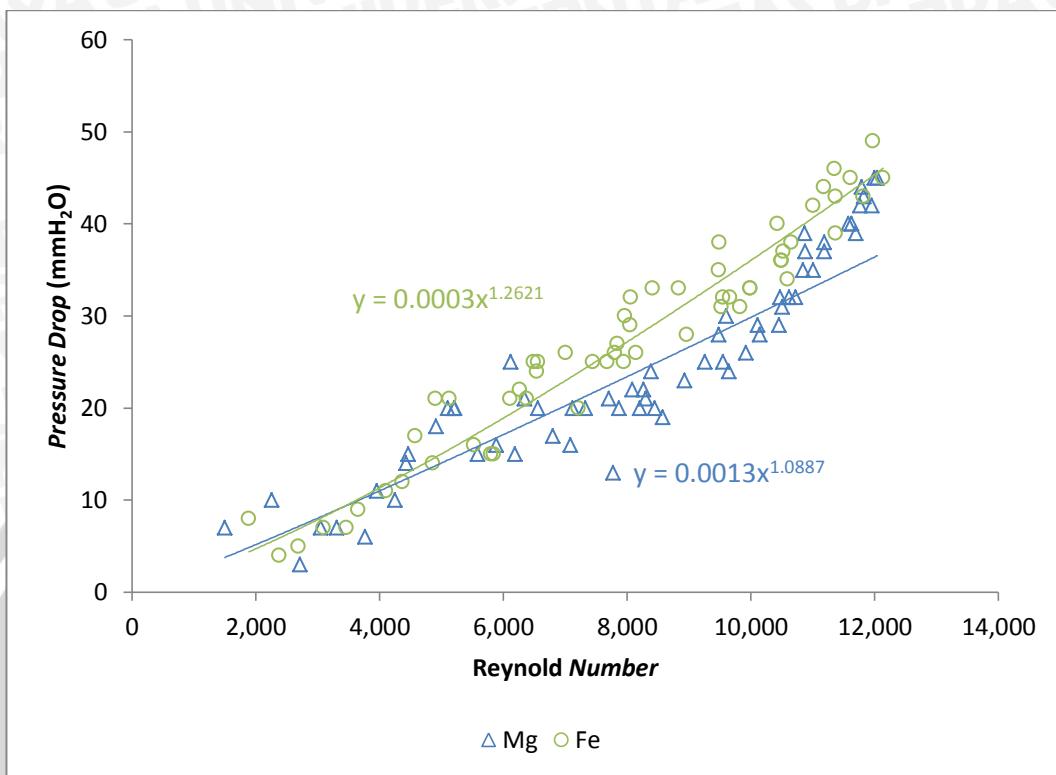
g = percepatan gravitasi = $9,8 \text{ m/s}^2$

head loss berbanding terbalik dengan diameter saluran, maka semakin kecil luas penampang (diwakili oleh diameter saluran) kerugian yang dialami aliran justru semakin besar yang ditunjukkan oleh penurunan tekanan sepanjang saluran.

Setelah melewati Re 9000, *pressure drop* aliran pada pipa dengan lapisan serbuk magnesium lebih rendah dari pada pipa tanpa pelapisan. Pada grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap standar deviasi telah dipaparkan bahwa gelembung terbentuk semakin kecil dan rata. Hal ini berarti luas penampang saluran semakin melebar dengan berkurangnya ukuran gelembung dan menghasilkan *pressure drop* yang cenderung lebih rendah dari pada pipa kosong tanpa pelapisan.

Selain itu gelembung gas yang terbentuk kecil dan rata pada dasar saluran menutupi permukaan kasar serbuk magnesium sehingga aliran mengalir diatas permukaan gelembung, bukan diatas permukaan kasar magnesium. Aliran air yang mengalir diatas permukaan gelembung gas tentu akan lebih lancar dari pada aliran air yang mengalir diatas permukaan benda padat (dalam hal ini permukaan pipa akrilik). Oleh karena itu *pressure drop* aliran di dalam pipa berlapis serbuk magnesium yang menghasilkan gelembung gas H_2 lebih rendah jika dibandingkan aliran pada pipa akrilik kosong.

4.3.7 Grafik hubungan bilangan *Reynold* terhadap *pressure drop* pada bahan pelapis serbuk Mg dan Fe



Gambar 4.12 Hubungan bilangan *Reynold* terhadap *pressure drop* pada bahan pelapis serbuk Mg dan serbuk Fe.

Sumber : Dokumentasi pribadi

Pada Gambar 4.12 menjelaskan hubungan antara bilangan *Reynold* terhadap *pressure drop* yang terjadi pada bahan pelapis serbuk Mg dan serbuk Fe. Pada bilangan *Reynold* dibawah 2000 sampai mendekati 4000, *pressure drop* pelapis Mg lebih tinggi dari pada pipa dengan pelapis Fe. Pada rentang bilangan *Reynold* tersebut aliran masih berapa pada kondisi laminar hingga transisi, sehingga aliran yang dibentuk masih cenderung lemah. Gelembung yang terbentuk dari reaksi serbuk Mg dan H₂O (air) pada pipa dengan pelapisan magnesium banyak menimbulkan *head loss* pada aliran. Aliran yang masih terbentuk lemah memungkinkan gelembung terbentuk semakin besar dan tidak rata karena masih mampu menahan aliran yang lemah.

Seiring semakin kuatnya aliran ukuran gelembung yang terbentuk semakin mengecil dan rata. Gelembung yang awalnya banyak mengganggu aliran semakin lama memberikan ruang yang lebih luas untuk aliran mengalir lebih bebas,

sehingga selisih *pressure drop* antara pelapis Mg dan Fe semakin mengecil dan akhirnya berpotongan. Jika diamati pada Gambar 4.12, aliran diatas bilangan *Reynold* 4000 pipa dengan pelapisan Mg memiliki *pressure drop* yang cenderung lebih rendah dibanding dengan pipa berlapis Fe. Walaupun dari hasil uji kekasaran pita lapisan Mg lebih tinggi dari pada pita lapisan Fe.Ukuran gelembung gas H₂ terbentuk di dasar saluran semakin kecil dan rata dari pada aliran pada bilangan *Reynold* yang lebih rendah sehingga kerugian aliran semakin kecil dengan semakin luasnya penampang saluran yang tak tertutup gelembung.



Gambar 4.13 Profil permukaan gelembung tampak samping

Sumber : Dokumentasi pribadi

Selain itu dengan semakin kecilnya ukuran gelembung yang terbentuk dibawah saluran, aliran air akan mengalir diatas permukaan gelembung dan tidak mengalir diatas permukaan serbuk magnesium yang kasar seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13. Jika pada pelapisan pipa menggunakan serbuk besi (Fe) aliran langsung kontak langsung dengan permukaan serbuk besi, maka pada pipa dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg) aliran tidak kontak langsung dengan permukaan kasar serbuk magnesium melainkan aliran mengalir pada bantalan gelembung. Hal inilah yang menyebabkan, *pressure drop* aliran pada saluran berlapis serbuk magnesium lebih rendah dari pada saluran berlapis serbuk besi pada aliran diatas bilangan *Reynold* 4000 atau pada kondisi aliran turbulen.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Saluran dengan pelapisan serbuk magnesium (Mg) memiliki *pressure drop* yang lebih rendah dari saluran dengan pelapis serbuk besi (Fe) pada aliran diatas Re 4000 dan lebih rendah dari saluran tanpa pelapis saat aliran berada diatas Re 9000. Semakin tinggi bilangan *Reynold* aliran ukuran gelembung gas H₂ yang dihasilkan semakin kecil dan rata, sehingga pelapisan serbuk magnesium efektif menurunkan *pressure drop* untuk aliran pada kondisi turbulen.

5.2 Saran

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut seberapa lama serbuk magnesium dapat bertahan dalam kondisi aliran turbulen
2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut hingga bilangan *Reynold* berapa pembentukan gelembung efektif menurunkan *pressure drop* aliran
3. Perlu diteliti lebih lanjut pengaruh pelapisan magnesium dengan pemasangan pita serbuk magnesium pada seluruh bagian dalam pipa

DAFTAR PUSTAKA

- Douglas, J. F. (1979). *Fluid Mechanics*. London: Pitman Publishing Limited
- Fox, R. W. and McDonald, A. T. (1985). *Introduction to Fluid Mechanics, 3rd ed.* New York (USA):McGraw-Hill Book Company, Inc
- Gerhart, Philip M. and Gross, Richard J. (1985). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Canada: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Helmizar. (2010). Studi Eksperimental Pengukuran *Head Losses Major* (Pipa Pvc Diameter $\frac{3}{4}$ ") Dan *Head Losses Minor* (Belokan Knee 90° Diameter $\frac{3}{4}$ ") Pada Sistem Instalasi Pipa. Universitas Negeri Bengkulu
- Hifni, H. M. (1993). *Statistika Teknik*. Malang: Kopma Press Universitas Brawijaya.
- Lien, K. et al. (2004). "The Entrance Length for Fully Developed Turbulent Channel Flow". 15th Australasian Fluid Mechanics Conference.
- Sienko, Michell J. (1961). *Chemistry*. New York (USA):McGraw-Hill Book Company, Inc
- Streeter, Victor L. (1985). *Fluid Mechanics*. New York (USA): McGraw-Hill Book Company, Inc
- Sunu, Putu Wijaya, *et al.* (2014). Turbulent Flow Characteristics in Internally Grooved Pipe. Brawijaya University
- Walpole, Ronald E. (1995). *Pengantar Statistika Edisi ke-3*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



Lampiran 1. Data hasil pengukuran kekasaran pelapis dan karakter aliran

a. Data uji kekasaran

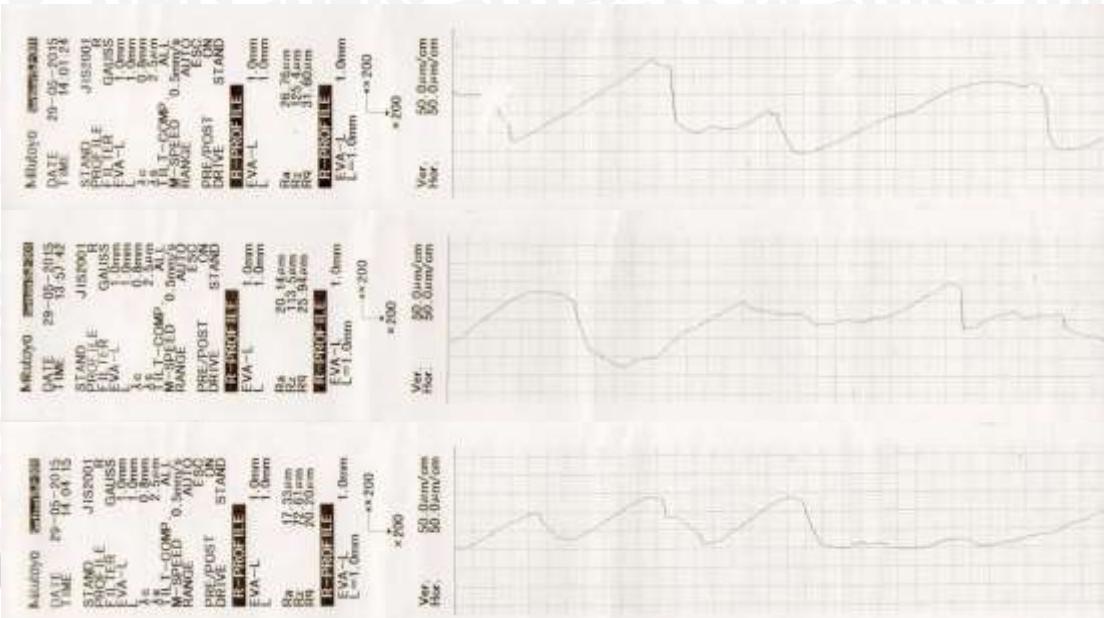
- Foto mikro pita pelapis saluran



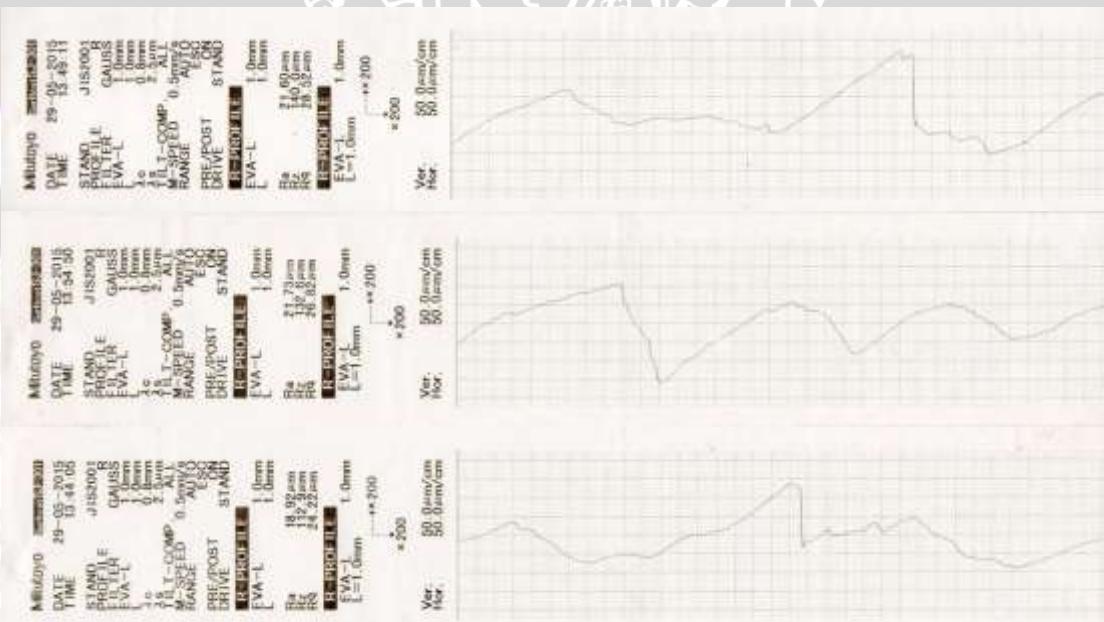
Gambar 1. Foto pita serbuk magnesium (Mg)



Gambar 2. Foto pita serbuk besi (Fe)



Gambar 3. Hasil uji kekasaran permukaan pita serbuk magnesium (Mg)



Gambar 4. Hasil uji kekasaran permukaan pita serbuk besi (Fe)



- Uji kekasaran pipa akrilik tanpa pelapis



Gambar 5. Hasil uji kekasaran permukaan pipa akrilik

b. Data penelitian karakteristik aliran pada pipa pelapisan serbuk Mg

No	P _{masuk} (mmH ₂ O)	P _{keluar} (mmH ₂ O)	Waktu Debit (s)	Temperatur (°C)
1	10	3	110.67	27.0
2	20	10	74.31	27.5
3	30	27	62.62	28.0
4	40	33	55.60	28.0
5	50	43	51.32	28.0
6	60	54	45.62	28.5
7	70	59	43.43	28.5
8	80	70	40.84	29.0
9	90	76	39.22	29.0
10	100	85	38.87	29.0
11	110	92	35.33	29.0
12	120	106	34.02	29.0
13	130	110	33.35	29.0
14	140	120	33.68	29.5
15	150	135	31.81	30.0
16	160	144	30.19	30.0
17	170	155	28.73	30.0
18	180	155	29.02	30.0
19	190	169	28.00	30.0
20	200	180	27.34	30.5
21	210	193	26.37	30.5
22	220	204	25.56	31.0
23	230	210	25.45	31.0
24	240	220	24.72	31.0
25	250	229	23.52	31.0
26	260	247	23.54	31.5
27	270	250	23.24	31.5
28	280	258	22.84	32.0
29	290	268	22.36	32.0
30	300	279	22.27	32.0
31	310	291	21.54	32.0
32	320	300	21.88	32.0
33	330	306	22.02	32.0
34	340	320	22.51	32.0
35	350	327	20.69	32.0
36	360	335	20.37	33.0
37	370	345	19.73	33.0
38	380	352	19.89	33.0
39	390	360	19.64	33.0

40	400	376	19.54	33.0
41	410	384	19	33.0
42	420	392	18.58	33.0
43	430	401	18.64	33.0
44	440	411	18.22	33.5
45	450	419	18.13	34.0
46	460	428	18.19	34.0
47	470	438	17.94	34.0
48	480	448	17.76	34.0
49	510	475	16.7	30.0
50	520	483	16.65	30.0
51	530	491	16.66	30.0
52	540	503	16.35	31.5
53	550	515	16.62	31.5
54	560	522	16.35	31.5
55	570	530	15.89	32.0
56	580	540	15.96	32.0
57	590	551	15.79	32.0
58	600	558	15.7	32.0
59	610	567	15.62	32.0
60	620	576	15.67	32.0
61	630	588	15.45	32.0
62	640	595	15.4	32.0
63	650	605	15.34	32.0

c. Data penelitian karakteristik aliran pada pipa pelapisan serbuk Fe

No	P _{masuk} (mmH ₂ O)	P _{keluar} (mmH ₂ O)	Waktu Debit (s)	Temperatur (°C)
1	10	2	89.97	28.0
2	20	16	71.43	28.0
3	30	25	63.15	28.0
4	40	33	55.45	28.5
5	50	43	49.54	28.5
6	60	51	46.95	28.5
7	70	59	42.37	29.0
8	80	68	39.71	29.0
9	90	73	37.94	29.0
10	100	86	35.75	29.0
11	110	89	35.39	29.0
12	120	99	33.84	29.0
13	130	114	31.77	29.5
14	140	125	30.30	29.5
15	150	135	30.06	29.5
16	160	139	29.08	30.0
17	170	148	28.34	30.0
18	180	159	27.86	30.0
19	190	166	27.15	30.0
20	200	175	27.38	30.0
21	210	185	27.08	30.0
22	220	194	25.36	30.0
23	230	210	24.62	30.0
24	240	215	24.10	30.5
25	250	225	23.58	31.0
26	260	233	23.10	31.0
27	270	244	23.23	31.0
28	280	255	22.80	31.0
29	290	260	22.75	31.0
30	300	274	22.25	31.0
31	310	281	22.51	31.0
32	320	288	22.47	31.0
33	330	297	21.53	31.0
34	340	307	20.50	31.0
35	350	322	20.41	31.5
36	360	329	19.20	31.5
37	370	338	18.93	31.5
38	380	345	19.30	31.5
39	390	358	19.15	31.5

40	400	362	19.27	31.5
41	410	379	18.81	32.0
42	420	387	18.50	32.0
43	430	397	18.49	32.0
44	440	400	17.71	32.0
45	450	414	17.61	32.0
46	460	424	17.60	32.0
47	470	436	17.44	32.0
48	480	443	17.56	32.0
49	490	452	17.34	32.0
50	500	458	16.96	32.5
51	510	466	16.69	32.5
52	520	477	16.41	32.5
53	530	484	16.44	32.5
54	540	501	16.42	32.5
55	550	505	16.07	32.5
56	560	517	15.79	32.5
57	570	521	15.74	33.0
58	580	535	15.53	33.0
59	590	547	15.37	33.0
60	600	556	15.02	33.0
61	610	566	15.20	33.0
62	620	575	14.71	33.5
63	630	585	15.15	33.5
64	640	594	15.03	33.5
65	650	602	15.13	33.5

d. Data penelitian karakteristik aliran pada pipa tanpa pelapisan

No	P _{masuk} (mmH ₂ O)	P _{keluar} (mmH ₂ O)	Waktu Debit (s)	Temperatur (°C)
1	10	8	98.25	26.0
2	20	19	70.90	27.0
3	30	28	58.53	27.0
4	40	36	52.43	27.0
5	50	48	46.78	27.0
6	60	55	44.96	27.5
7	70	62	42.18	28.0
8	80	70	39.25	28.0
9	90	81	37.34	28.0
10	100	86	36.65	28.0
11	110	97	34.84	28.5
12	120	104	32.93	28.5
13	130	120	31.71	28.5
14	140	125	30.40	29.0
15	150	133	29.31	29.0
16	160	144	28.98	29.0
17	170	155	28.81	29.5
18	180	163	27.53	29.5
19	190	175	26.40	29.5
20	200	184	26.18	30.0
21	210	196	25.65	30.0
22	220	203	25.18	30.0
23	230	214	23.93	30.0
24	240	220	23.46	30.0
25	250	231	23.33	30.5
26	260	243	23.29	30.5
27	270	249	22.65	30.5
28	280	260	22.62	30.5
29	290	269	21.86	31.0
30	300	274	21.78	31.0
31	310	283	21.62	29.0
32	320	299	20.71	29.0
33	330	303	20.63	28.0
34	340	310	20.06	28.0
35	350	321	20.19	28.0
36	360	328	19.63	28.0
37	370	341	19.73	28.0
38	380	353	19.38	28.0
39	390	358	19.11	28.0



40	400	365	19.07	28.0
41	410	383	18.47	29.0
42	420	394	18.58	29.0
43	430	396	18.33	29.0
44	440	407	17.88	29.0
45	450	419	17.73	29.0
46	460	431	17.58	30.0
47	470	435	17.41	30.0
48	480	447	17.08	30.0
49	490	459	16.66	30.0
50	500	467	16.60	30.0
51	510	479	16.39	30.0
52	520	484	16.56	30.0
53	530	499	16.18	31.0
54	540	505	16.44	31.0
55	550	515	15.87	31.0
56	560	527	16.29	31.0
57	570	538	15.21	31.0
58	580	545	15.67	31.0
59	590	555	15.63	31.0
60	600	564	15.67	31.0
61	610	571	15.27	31.0
62	620	586	15.33	31.0
63	630	596	15.06	31.0
64	640	607	14.98	31.0
65	647	612	15.02	31.0

Lampiran 2. Data hasil perhitungan

- a. Data hasil perhitungan karakteristik aliran pada pipa dengan pelapisan serbuk Mg, Fe, dan tanpa pelapis

No	Mg			Fe			Tanpa pelapis		
	ΔP	Re	f	ΔP	Re	f	ΔP	Re	f
1	7	1556,93	0,266	8	1887,58	0,266	2	1655,30	0,079
2	10	2344,09	0,171	4	2377,51	0,084	1	2343,46	0,021
3	3	2812,44	0,037	5	2689,24	0,082	2	2838,74	0,028
4	7	3167,54	0,067	7	3096,91	0,088	4	3169,02	0,045
5	7	3431,71	0,057	7	3466,37	0,071	2	3551,77	0,018
6	6	3903,64	0,039	9	3657,59	0,081	5	3735,95	0,042
7	11	4100,49	0,064	11	4098,78	0,081	8	4026,21	0,058
8	10	4409,83	0,052	12	4373,34	0,078	10	4326,76	0,063
9	14	4591,98	0,067	17	4577,37	0,101	9	4548,08	0,052
10	15	4633,33	0,070	14	4857,77	0,073	14	4633,71	0,077
11	18	5097,58	0,070	21	4907,19	0,108	13	4928,93	0,065
12	14	5293,87	0,050	21	5131,96	0,099	16	5214,82	0,071
13	20	5400,22	0,069	16	5528,84	0,066	10	5415,45	0,041
14	20	5408,46	0,070	15	5797,07	0,057	15	5712,68	0,057
15	15	5792,64	0,047	15	5843,35	0,056	17	5925,12	0,060
16	16	6103,47	0,045	21	6110,14	0,073	16	5992,59	0,055
17	15	6413,64	0,038	22	6269,69	0,073	15	6096,88	0,051
18	25	6349,55	0,065	21	6377,71	0,067	17	6380,36	0,053
19	21	6580,85	0,051	24	6544,49	0,073	15	6653,46	0,043
20	20	6804,89	0,046	25	6489,52	0,077	16	6786,98	0,045
21	17	7055,20	0,037	25	6561,41	0,075	14	6927,21	0,038
22	16	7349,85	0,032	26	7006,43	0,069	17	7056,51	0,044
23	20	7381,62	0,040	20	7217,02	0,050	16	7425,12	0,038
24	20	7599,60	0,038	25	7444,03	0,060	20	7573,87	0,045
25	21	7987,34	0,036	25	7682,48	0,057	19	7689,72	0,042
26	13	8059,24	0,022	27	7842,12	0,059	17	7702,93	0,038
27	20	8163,28	0,034	26	7798,23	0,058	21	7920,58	0,044
28	22	8388,96	0,036	25	7945,30	0,053	20	7931,09	0,042
29	22	8569,05	0,034	30	7962,76	0,064	21	8286,96	0,041
30	21	8603,68	0,032	26	8141,70	0,053	26	8317,39	0,051
31	19	8895,26	0,027	29	8047,66	0,060	27	8032,63	0,052
32	20	8757,03	0,030	32	8061,99	0,066	21	8385,58	0,037
33	24	8701,36	0,036	33	8413,97	0,063	27	8231,96	0,047
34	20	8511,95	0,031	33	8836,72	0,057	30	8465,87	0,050
35	23	9260,70	0,031	28	8963,21	0,048	29	8411,36	0,049
36	25	9597,33	0,032	31	9528,08	0,047	32	8651,32	0,051
37	25	9908,65	0,030	32	9663,98	0,047	29	8607,47	0,046
38	28	9828,94	0,034	35	9478,71	0,054	27	8762,92	0,042
39	30	9954,06	0,036	32	9552,96	0,048	32	8886,73	0,048
40	24	10005,00	0,028	38	9493,47	0,058	35	8905,37	0,052
41	26	10289,35	0,029	31	9822,48	0,045	27	9402,57	0,038



42	28	10521,94	0,030	33	9987.08	0.046	26	9346.90	0.037
43	29	10488,07	0,031	33	9992.48	0.046	34	9474.38	0.047
44	29	10839,99	0,030	40	10432.58	0.052	33	9712.83	0.043
45	31	10893,80	0,032	36	10491.82	0.046	31	9795.00	0.040
46	32	10857,86	0,033	36	10497.78	0.046	29	10107.11	0.037
47	32	11009,17	0,032	34	10594.09	0.042	35	10205.80	0.044
48	32	11120,75	0,031	37	10521.69	0.047	33	10402.99	0.040
49	35	11249,23	0,030	38	10655.19	0.047	31	10665.25	0.035
50	37	11283,02	0,032	42	11003.50	0.050	33	10703.80	0.037
51	39	11276,24	0,034	44	11181.51	0.050	31	10840.94	0.034
52	37	11603,34	0,031	43	11372.30	0.048	36	10729.65	0.041
53	35	11414,84	0,030	46	11351.54	0.051	31	11196.10	0.033
54	38	11603,34	0,032	39	11365.37	0.043	35	11019.03	0.039
55	40	12058,14	0,031	45	11612.91	0.048	35	11414.80	0.036
56	40	12005,26	0,032	43	11818.83	0.044	33	11120.49	0.036
57	39	12134,51	0,030	49	11976.85	0.050	32	11910.12	0.030
58	42	12204,07	0,032	45	12138.80	0.045	35	11560.49	0.035
59	43	12266,58	0,033	43	12265.17	0.042	35	11590.07	0.035
60	44	12227,44	0,034	44	12550.97	0.041	36	11560.49	0.036
61	42	12401,55	0,031	44	12402.34	0.042	39	11863.32	0.037
62	45	12441,81	0,033	45	12947.03	0.040	34	11816.89	0.033
63	45	12490,48	0,033	45	12571.01	0.042	34	12028.74	0.032
64				46	12671.38	0.043	33	12092.98	0.030
65				48	12587.62	0.045	35	12060.78	0.032

Ket.: ΔP = pressure drop (mmH₂O); Re = bilangan Reynold; f = friction factor

- b. Data perhitungan statistik pengukuran diameter gelembung pada saluran dengan pelapis serbuk Mg

1. Re 1540

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi^2	fi . mi	$fi . mi^2$
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	21	21	0.1	0.01	2.1	0.210
4	0.12	0.16	168	189	0.14	0.0196	23.52	3.293
5	0.16	0.20	58	247	0.18	0.0324	10.44	1.879
6	0.20	0.24	107	354	0.22	0.0484	23.54	5.179
7	0.24	0.28	15	369	0.26	0.0676	3.9	1.014
8	0.28	0.32	49	418	0.3	0.09	14.7	4.410
9	0.32	0.36	26	444	0.34	0.1156	8.84	3.006
10	0.36	0.40	12	456	0.38	0.1444	4.56	1.733
11	0.40	0.44	16	472	0.42	0.1764	6.72	2.822
12	0.44	0.48	33	505	0.46	0.2116	15.18	6.983
13	0.48	0.52	51	556	0.5	0.25	25.5	12.750
14	0.52	0.56	4	560	0.54	0.2916	2.16	1.166
15	0.56	0.60	22	582	0.58	0.3364	12.76	7.401
16	0.60	0.64	15	597	0.62	0.3844	9.3	5.766
17	0.64	0.68	1	598	0.66	0.4356	0.66	0.436
18	0.68	0.72	29	627	0.7	0.49	20.3	14.210
19	0.72	0.76	8	635	0.74	0.5476	5.92	4.381
20	0.76	0.80	2	637	0.78	0.6084	1.56	1.217
21	0.80	0.84	15	652	0.82	0.6724	12.3	10.086
22	0.84	0.88	15	667	0.86	0.7396	12.9	11.094
23	0.88	0.92	7	674	0.9	0.81	6.3	5.670
24	0.92	0.96	15	689	0.94	0.8836	14.1	13.254
25	0.96	1.00	21	710	0.98	0.9604	20.58	20.168
26	1.00	1.04	14	724	1.02	1.0404	14.28	14.566
27	1.04	1.08	0	724	1.06	1.1236	0	0.000
28	1.08	1.12	8	732	1.1	1.21	8.8	9.680
29	1.12	1.16	7	739	1.14	1.2996	7.98	9.097
30	1.16	1.20	7	746	1.18	1.3924	8.26	9.747
31	1.20	1.24	0	746	1.22	1.4884	0	0.000
32	1.24	1.28	14	760	1.26	1.5876	17.64	22.226
33	1.28	1.32	7	767	1.3	1.69	9.1	11.830
34	1.32	1.36	0	767	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	767	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	767	1.42	2.0164	0	0.000





37	1.44	1.48	0	767	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	7	774	1.5	2.25	10.5	15.750
39	1.52	1.56	0	774	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	0	774	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	774	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	7	781	1.66	2.7556	11.62	19.289
43	1.68	1.72	0	781	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	781	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	781	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	7	788	1.82	3.3124	12.74	23.187
47	1.84	1.88	0	788	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	788	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	788	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	788	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	788	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			788				358.76	273.4992



2. Re 3321

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	50	50	0.1	0.01	5	0.500
4	0.12	0.16	172	222	0.14	0.0196	24.08	3.371
5	0.16	0.20	101	323	0.18	0.0324	18.18	3.272
6	0.20	0.24	112	435	0.22	0.0484	24.64	5.421
7	0.24	0.28	85	520	0.26	0.0676	22.1	5.746
8	0.28	0.32	83	603	0.3	0.09	24.9	7.470
9	0.32	0.36	39	642	0.34	0.1156	13.26	4.508
10	0.36	0.40	47	689	0.38	0.1444	17.86	6.787
11	0.40	0.44	35	724	0.42	0.1764	14.7	6.174
12	0.44	0.48	35	759	0.46	0.2116	16.1	7.406
13	0.48	0.52	30	789	0.5	0.25	15	7.500
14	0.52	0.56	25	814	0.54	0.2916	13.5	7.290
15	0.56	0.60	19	833	0.58	0.3364	11.02	6.392
16	0.60	0.64	27	860	0.62	0.3844	16.74	10.379
17	0.64	0.68	26	886	0.66	0.4356	17.16	11.326
18	0.68	0.72	21	907	0.7	0.49	14.7	10.290
19	0.72	0.76	12	919	0.74	0.5476	8.88	6.571
20	0.76	0.80	14	933	0.78	0.6084	10.92	8.518
21	0.80	0.84	9	942	0.82	0.6724	7.38	6.052
22	0.84	0.88	9	951	0.86	0.7396	7.74	6.656
23	0.88	0.92	7	958	0.9	0.81	6.3	5.670
24	0.92	0.96	9	967	0.94	0.8836	8.46	7.952
25	0.96	1.00	7	974	0.98	0.9604	6.86	6.723
26	1.00	1.04	5	979	1.02	1.0404	5.1	5.202
27	1.04	1.08	4	983	1.06	1.1236	4.24	4.494
28	1.08	1.12	8	991	1.1	1.21	8.8	9.680
29	1.12	1.16	3	994	1.14	1.2996	3.42	3.899
30	1.16	1.20	1	995	1.18	1.3924	1.18	1.392
31	1.20	1.24	3	998	1.22	1.4884	3.66	4.465
32	1.24	1.28	1	999	1.26	1.5876	1.26	1.588
33	1.28	1.32	0	999	1.3	1.69	0	0.000
34	1.32	1.36	0	999	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	999	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	999	1.42	2.0164	0	0.000
37	1.44	1.48	0	999	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	999	1.5	2.25	0	0.000



39	1.52	1.56	1	1000	1.54	2.3716	1.54	2.372
40	1.56	1.60	0	1000	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	1000	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	0	1000	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	1000	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	1000	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	1000	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	1000	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	1000	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	1000	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	1000	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	1000	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	1000	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			1000				354.68	185.0656



3. Re 4863

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	58	58	0.1	0.01	5.8	0.580
4	0.12	0.16	201	259	0.14	0.0196	28.14	3.940
5	0.16	0.20	141	400	0.18	0.0324	25.38	4.568
6	0.20	0.24	107	507	0.22	0.0484	23.54	5.179
7	0.24	0.28	79	586	0.26	0.0676	20.54	5.340
8	0.28	0.32	65	651	0.3	0.09	19.5	5.850
9	0.32	0.36	50	701	0.34	0.1156	17	5.780
10	0.36	0.40	45	746	0.38	0.1444	17.1	6.498
11	0.40	0.44	37	783	0.42	0.1764	15.54	6.527
12	0.44	0.48	27	810	0.46	0.2116	12.42	5.713
13	0.48	0.52	36	846	0.5	0.25	18	9.000
14	0.52	0.56	25	871	0.54	0.2916	13.5	7.290
15	0.56	0.60	25	896	0.58	0.3364	14.5	8.410
16	0.60	0.64	21	917	0.62	0.3844	13.02	8.072
17	0.64	0.68	14	931	0.66	0.4356	9.24	6.098
18	0.68	0.72	16	947	0.7	0.49	11.2	7.840
19	0.72	0.76	12	959	0.74	0.5476	8.88	6.571
20	0.76	0.80	10	969	0.78	0.6084	7.8	6.084
21	0.80	0.84	10	979	0.82	0.6724	8.2	6.724
22	0.84	0.88	7	986	0.86	0.7396	6.02	5.177
23	0.88	0.92	6	992	0.9	0.81	5.4	4.860
24	0.92	0.96	5	997	0.94	0.8836	4.7	4.418
25	0.96	1.00	0	997	0.98	0.9604	0	0.000
26	1.00	1.04	0	997	1.02	1.0404	0	0.000
27	1.04	1.08	1	998	1.06	1.1236	1.06	1.124
28	1.08	1.12	0	998	1.1	1.21	0	0.000
29	1.12	1.16	0	998	1.14	1.2996	0	0.000
30	1.16	1.20	0	998	1.18	1.3924	0	0.000
31	1.20	1.24	1	999	1.22	1.4884	1.22	1.488
32	1.24	1.28	0	999	1.26	1.5876	0	0.000
33	1.28	1.32	1	1000	1.3	1.69	1.3	1.690
34	1.32	1.36	0	1000	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	1000	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	1000	1.42	2.0164	0	0.000
37	1.44	1.48	0	1000	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	1000	1.5	2.25	0	0.000



39	1.52	1.56	0	1000	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	0	1000	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	1000	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	0	1000	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	1000	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	1000	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	1000	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	1000	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	1000	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	1000	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	1000	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	1000	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	1000	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			1000				309	134.8224



4. Re 5830

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	56	56	0.1	0.01	5.6	0.560
4	0.12	0.16	250	306	0.14	0.0196	35	4.900
5	0.16	0.20	134	440	0.18	0.0324	24.12	4.342
6	0.20	0.24	102	542	0.22	0.0484	22.44	4.937
7	0.24	0.28	73	615	0.26	0.0676	18.98	4.935
8	0.28	0.32	62	677	0.3	0.09	18.6	5.580
9	0.32	0.36	47	724	0.34	0.1156	15.98	5.433
10	0.36	0.40	49	773	0.38	0.1444	18.62	7.076
11	0.40	0.44	26	799	0.42	0.1764	10.92	4.586
12	0.44	0.48	37	836	0.46	0.2116	17.02	7.829
13	0.48	0.52	33	869	0.5	0.25	16.5	8.250
14	0.52	0.56	30	899	0.54	0.2916	16.2	8.748
15	0.56	0.60	19	918	0.58	0.3364	11.02	6.392
16	0.60	0.64	20	938	0.62	0.3844	12.4	7.688
17	0.64	0.68	10	948	0.66	0.4356	6.6	4.356
18	0.68	0.72	10	958	0.7	0.49	7	4.900
19	0.72	0.76	7	965	0.74	0.5476	5.18	3.833
20	0.76	0.80	8	973	0.78	0.6084	6.24	4.867
21	0.80	0.84	5	978	0.82	0.6724	4.1	3.362
22	0.84	0.88	5	983	0.86	0.7396	4.3	3.698
23	0.88	0.92	5	988	0.9	0.81	4.5	4.050
24	0.92	0.96	0	988	0.94	0.8836	0	0.000
25	0.96	1.00	4	992	0.98	0.9604	3.92	3.842
26	1.00	1.04	1	993	1.02	1.0404	1.02	1.040
27	1.04	1.08	1	994	1.06	1.1236	1.06	1.124
28	1.08	1.12	0	994	1.1	1.21	0	0.000
29	1.12	1.16	0	994	1.14	1.2996	0	0.000
30	1.16	1.20	0	994	1.18	1.3924	0	0.000
31	1.20	1.24	0	994	1.22	1.4884	0	0.000
32	1.24	1.28	1	995	1.26	1.5876	1.26	1.588
33	1.28	1.32	0	995	1.3	1.69	0	0.000
34	1.32	1.36	2	997	1.34	1.7956	2.68	3.591
35	1.36	1.40	0	997	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	1	998	1.42	2.0164	1.42	2.016
37	1.44	1.48	0	998	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	998	1.5	2.25	0	0.000

39	1.52	1.56	0	998	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	1	999	1.58	2.4964	1.58	2.496
41	1.60	1.64	1	1000	1.62	2.6244	1.62	2.624
42	1.64	1.68	0	1000	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	1000	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	1000	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	1000	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	1000	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	1000	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	1000	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	1000	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	1000	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	1000	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			1000				295.88	128.6432



5. Re 6341

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	54	54	0.1	0.01	5.4	0.540
4	0.12	0.16	235	289	0.14	0.0196	32.9	4.606
5	0.16	0.20	132	421	0.18	0.0324	23.76	4.277
6	0.20	0.24	142	563	0.22	0.0484	31.24	6.873
7	0.24	0.28	91	654	0.26	0.0676	23.66	6.152
8	0.28	0.32	97	751	0.3	0.09	29.1	8.730
9	0.32	0.36	55	806	0.34	0.1156	18.7	6.358
10	0.36	0.40	48	854	0.38	0.1444	18.24	6.931
11	0.40	0.44	44	898	0.42	0.1764	18.48	7.762
12	0.44	0.48	31	929	0.46	0.2116	14.26	6.560
13	0.48	0.52	13	942	0.5	0.25	6.5	3.250
14	0.52	0.56	14	956	0.54	0.2916	7.56	4.082
15	0.56	0.60	8	964	0.58	0.3364	4.64	2.691
16	0.60	0.64	7	971	0.62	0.3844	4.34	2.691
17	0.64	0.68	6	977	0.66	0.4356	3.96	2.614
18	0.68	0.72	3	980	0.7	0.49	2.1	1.470
19	0.72	0.76	5	985	0.74	0.5476	3.7	2.738
20	0.76	0.80	2	987	0.78	0.6084	1.56	1.217
21	0.80	0.84	3	990	0.82	0.6724	2.46	2.017
22	0.84	0.88	2	992	0.86	0.7396	1.72	1.479
23	0.88	0.92	1	993	0.9	0.81	0.9	0.810
24	0.92	0.96	2	995	0.94	0.8836	1.88	1.767
25	0.96	1.00	1	996	0.98	0.9604	0.98	0.960
26	1.00	1.04	1	997	1.02	1.0404	1.02	1.040
27	1.04	1.08	0	997	1.06	1.1236	0	0.000
28	1.08	1.12	1	998	1.1	1.21	1.1	1.210
29	1.12	1.16	1	999	1.14	1.2996	1.14	1.300
30	1.16	1.20	1	1000	1.18	1.3924	1.18	1.392
31	1.20	1.24	0	1000	1.22	1.4884	0	0.000
32	1.24	1.28	0	1000	1.26	1.5876	0	0.000
33	1.28	1.32	0	1000	1.3	1.69	0	0.000
34	1.32	1.36	0	1000	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	1000	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	1000	1.42	2.0164	0	0.000
37	1.44	1.48	0	1000	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	1000	1.5	2.25	0	0.000



39	1.52	1.56	0	1000	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	0	1000	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	1000	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	0	1000	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	1000	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	1000	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	1000	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	1000	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	1000	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	1000	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	1000	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	1000	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	1000	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			1000				262.48	91.5168



6. Re 6694

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	54	54	0.1	0.01	5.4	0.540
4	0.12	0.16	251	305	0.14	0.0196	35.14	4.920
5	0.16	0.20	160	465	0.18	0.0324	28.8	5.184
6	0.20	0.24	164	629	0.22	0.0484	36.08	7.938
7	0.24	0.28	103	732	0.26	0.0676	26.78	6.963
8	0.28	0.32	96	828	0.3	0.09	28.8	8.640
9	0.32	0.36	60	888	0.34	0.1156	20.4	6.936
10	0.36	0.40	45	933	0.38	0.1444	17.1	6.498
11	0.40	0.44	27	960	0.42	0.1764	11.34	4.763
12	0.44	0.48	11	971	0.46	0.2116	5.06	2.328
13	0.48	0.52	14	985	0.5	0.25	7	3.500
14	0.52	0.56	5	990	0.54	0.2916	2.7	1.458
15	0.56	0.60	5	995	0.58	0.3364	2.9	1.682
16	0.60	0.64	4	999	0.62	0.3844	2.48	1.538
17	0.64	0.68	0	999	0.66	0.4356	0	0.000
18	0.68	0.72	0	999	0.7	0.49	0	0.000
19	0.72	0.76	0	999	0.74	0.5476	0	0.000
20	0.76	0.80	1	1000	0.78	0.6084	0.78	0.608
21	0.80	0.84	0	1000	0.82	0.6724	0	0.000
22	0.84	0.88	0	1000	0.86	0.7396	0	0.000
23	0.88	0.92	0	1000	0.9	0.81	0	0.000
24	0.92	0.96	0	1000	0.94	0.8836	0	0.000
25	0.96	1.00	0	1000	0.98	0.9604	0	0.000
26	1.00	1.04	0	1000	1.02	1.0404	0	0.000
27	1.04	1.08	0	1000	1.06	1.1236	0	0.000
28	1.08	1.12	0	1000	1.1	1.21	0	0.000
29	1.12	1.16	0	1000	1.14	1.2996	0	0.000
30	1.16	1.20	0	1000	1.18	1.3924	0	0.000
31	1.20	1.24	0	1000	1.22	1.4884	0	0.000
32	1.24	1.28	0	1000	1.26	1.5876	0	0.000
33	1.28	1.32	0	1000	1.3	1.69	0	0.000
34	1.32	1.36	0	1000	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	1000	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	1000	1.42	2.0164	0	0.000
37	1.44	1.48	0	1000	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	1000	1.5	2.25	0	0.000



39	1.52	1.56	0	1000	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	0	1000	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	1000	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	0	1000	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	1000	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	1000	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	1000	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	1000	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	1000	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	1000	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	1000	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	1000	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	1000	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			1000				230.76	63.4944



7. Re 8382

No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	93	93	0.1	0.01	9.3	0.930
4	0.12	0.16	302	395	0.14	0.0196	42.28	5.919
5	0.16	0.20	176	571	0.18	0.0324	31.68	5.702
6	0.20	0.24	137	708	0.22	0.0484	30.14	6.631
7	0.24	0.28	94	802	0.26	0.0676	24.44	6.354
8	0.28	0.32	83	885	0.3	0.09	24.9	7.470
9	0.32	0.36	44	929	0.34	0.1156	14.96	5.086
10	0.36	0.40	23	952	0.38	0.1444	8.74	3.321
11	0.40	0.44	18	970	0.42	0.1764	7.56	3.175
12	0.44	0.48	8	978	0.46	0.2116	3.68	1.693
13	0.48	0.52	8	986	0.5	0.25	4	2.000
14	0.52	0.56	5	991	0.54	0.2916	2.7	1.458
15	0.56	0.60	4	995	0.58	0.3364	2.32	1.346
16	0.60	0.64	2	997	0.62	0.3844	1.24	0.769
17	0.64	0.68	0	997	0.66	0.4356	0	0.000
18	0.68	0.72	0	997	0.7	0.49	0	0.000
19	0.72	0.76	2	999	0.74	0.5476	1.48	1.095
20	0.76	0.80	0	999	0.78	0.6084	0	0.000
21	0.80	0.84	0	999	0.82	0.6724	0	0.000
22	0.84	0.88	0	999	0.86	0.7396	0	0.000
23	0.88	0.92	0	999	0.9	0.81	0	0.000
24	0.92	0.96	0	999	0.94	0.8836	0	0.000
25	0.96	1.00	0	999	0.98	0.9604	0	0.000
26	1.00	1.04	1	1000	1.02	1.0404	1.02	1.040
27	1.04	1.08	0	1000	1.06	1.1236	0	0.000
28	1.08	1.12	0	1000	1.1	1.21	0	0.000
29	1.12	1.16	0	1000	1.14	1.2996	0	0.000
30	1.16	1.20	0	1000	1.18	1.3924	0	0.000
31	1.20	1.24	0	1000	1.22	1.4884	0	0.000
32	1.24	1.28	0	1000	1.26	1.5876	0	0.000
33	1.28	1.32	0	1000	1.3	1.69	0	0.000
34	1.32	1.36	0	1000	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	1000	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	1000	1.42	2.0164	0	0.000
37	1.44	1.48	0	1000	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	1000	1.5	2.25	0	0.000



39	1.52	1.56	0	1000	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	0	1000	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	1000	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	0	1000	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	1000	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	1000	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	1000	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	1000	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	1000	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	1000	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	1000	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	1000	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	1000	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			1000				210.44	53.9904



8. Re 9530

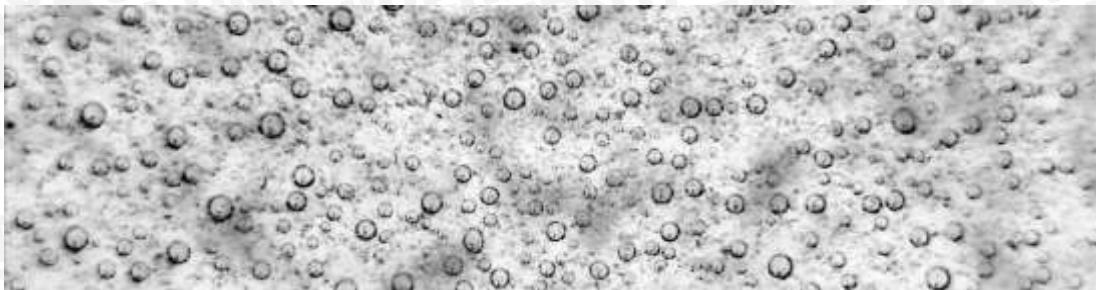
No	Kelas diameter gelembung		fi	fk	mi	mi ²	fi . mi	fi . mi ²
	Batas Bawah	Batas Atas						
1	0.00	0.04	0	0	0.02	0.0004	0	0.000
2	0.04	0.08	0	0	0.06	0.0036	0	0.000
3	0.08	0.12	10	10	0.1	0.01	1	0.100
4	0.12	0.16	31	41	0.14	0.0196	4.34	0.608
5	0.16	0.20	451	492	0.18	0.0324	81.18	14.612
6	0.20	0.24	150	642	0.22	0.0484	33	7.260
7	0.24	0.28	79	721	0.26	0.0676	20.54	5.340
8	0.28	0.32	39	760	0.3	0.09	11.7	3.510
9	0.32	0.36	29	789	0.34	0.1156	9.86	3.352
10	0.36	0.40	18	807	0.38	0.1444	6.84	2.599
11	0.40	0.44	12	819	0.42	0.1764	5.04	2.117
12	0.44	0.48	3	822	0.46	0.2116	1.38	0.635
13	0.48	0.52	4	826	0.5	0.25	2	1.000
14	0.52	0.56	2	828	0.54	0.2916	1.08	0.583
15	0.56	0.60	2	830	0.58	0.3364	1.16	0.673
16	0.60	0.64	1	831	0.62	0.3844	0.62	0.384
17	0.64	0.68	1	832	0.66	0.4356	0.66	0.436
18	0.68	0.72	0	832	0.7	0.49	0	0.000
19	0.72	0.76	0	832	0.74	0.5476	0	0.000
20	0.76	0.80	1	833	0.78	0.6084	0.78	0.608
21	0.80	0.84	0	833	0.82	0.6724	0	0.000
22	0.84	0.88	0	833	0.86	0.7396	0	0.000
23	0.88	0.92	0	833	0.9	0.81	0	0.000
24	0.92	0.96	0	833	0.94	0.8836	0	0.000
25	0.96	1.00	0	833	0.98	0.9604	0	0.000
26	1.00	1.04	0	833	1.02	1.0404	0	0.000
27	1.04	1.08	0	833	1.06	1.1236	0	0.000
28	1.08	1.12	0	833	1.1	1.21	0	0.000
29	1.12	1.16	0	833	1.14	1.2996	0	0.000
30	1.16	1.20	0	833	1.18	1.3924	0	0.000
31	1.20	1.24	0	833	1.22	1.4884	0	0.000
32	1.24	1.28	0	833	1.26	1.5876	0	0.000
33	1.28	1.32	0	833	1.3	1.69	0	0.000
34	1.32	1.36	0	833	1.34	1.7956	0	0.000
35	1.36	1.40	0	833	1.38	1.9044	0	0.000
36	1.40	1.44	0	833	1.42	2.0164	0	0.000
37	1.44	1.48	0	833	1.46	2.1316	0	0.000
38	1.48	1.52	0	833	1.5	2.25	0	0.000

39	1.52	1.56	0	833	1.54	2.3716	0	0.000
40	1.56	1.60	0	833	1.58	2.4964	0	0.000
41	1.60	1.64	0	833	1.62	2.6244	0	0.000
42	1.64	1.68	0	833	1.66	2.7556	0	0.000
43	1.68	1.72	0	833	1.7	2.89	0	0.000
44	1.72	1.76	0	833	1.74	3.0276	0	0.000
45	1.76	1.80	0	833	1.78	3.1684	0	0.000
46	1.80	1.84	0	833	1.82	3.3124	0	0.000
47	1.84	1.88	0	833	1.86	3.4596	0	0.000
48	1.88	1.92	0	833	1.9	3.61	0	0.000
49	1.92	1.96	0	833	1.94	3.7636	0	0.000
50	1.96	2.00	0	833	1.98	3.9204	0	0.000
51	2.00	2.04	0	833	2.02	4.0804	0	0.000
JUMLAH			833				181.18	43.818

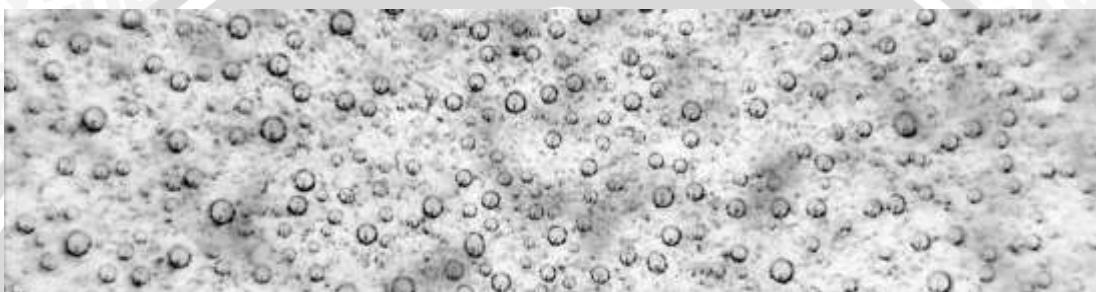


Lampiran 3. Visualisasi Gelembung

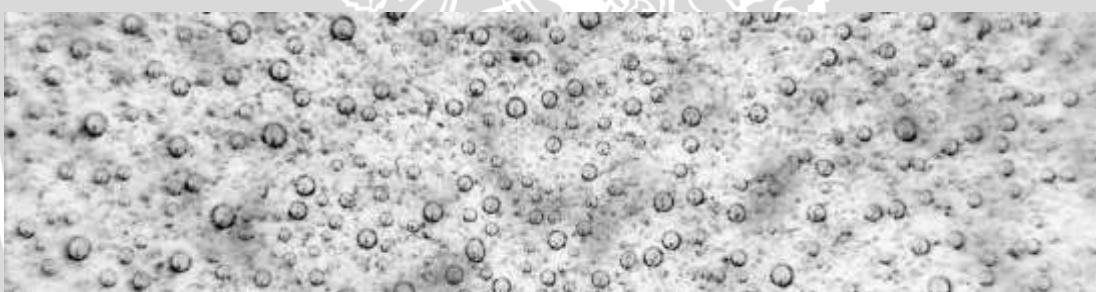
a. Foto visualisasi makro pertumbuhan gelembung



Re 1540,27



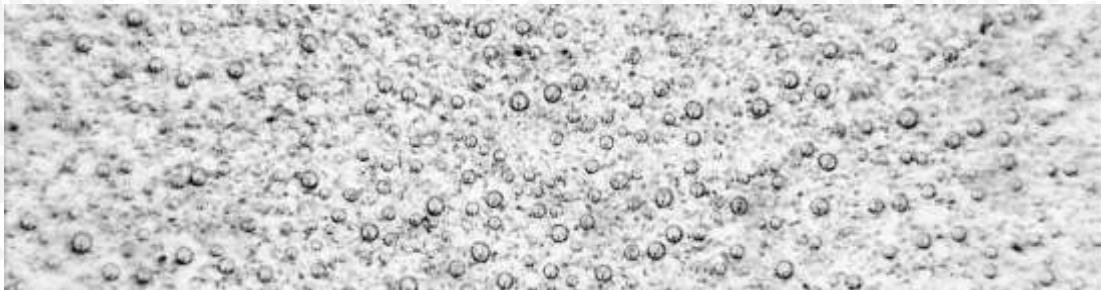
Re 3321,54



Re 4863,38



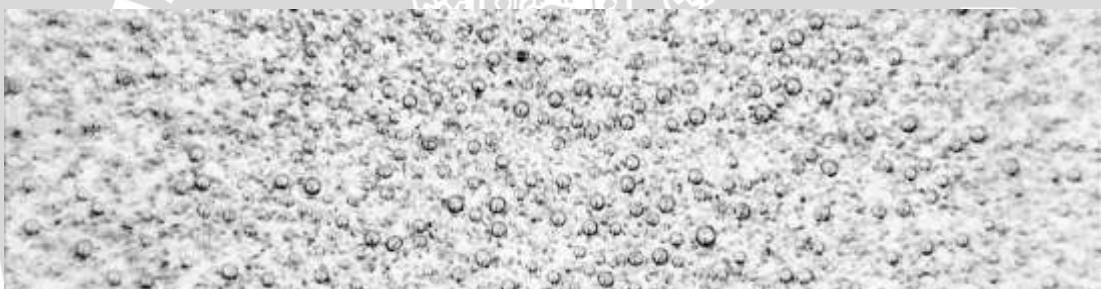
Re 5830,98



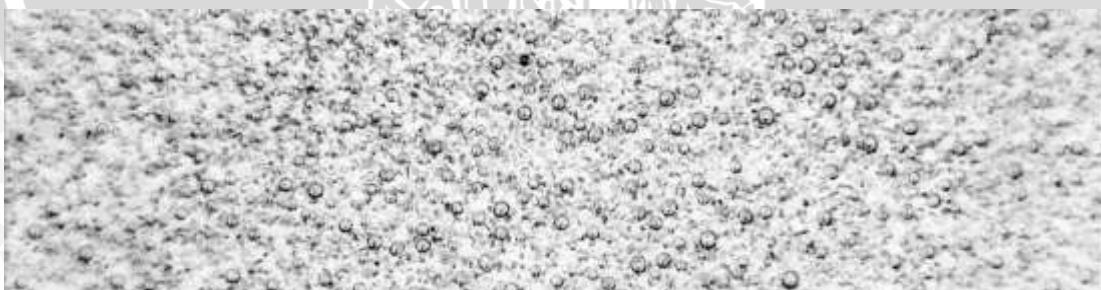
Re 6341,75



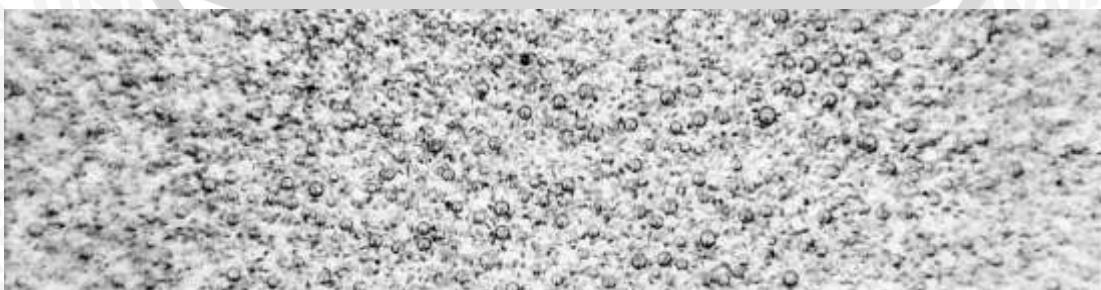
Re 6694,07



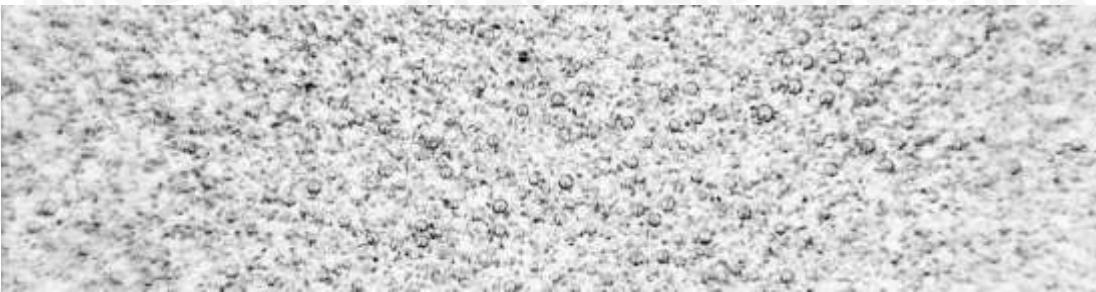
Re 8382,55



Re 9530,05



Re 10197,76



Re 10602,97



Re 11347,63



b. Foto pengukuran diameter rata-rata gelembung



$P_{\text{masuk}}: 10 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 1540,27$



$P_{\text{masuk}}: 200 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 6341,75$



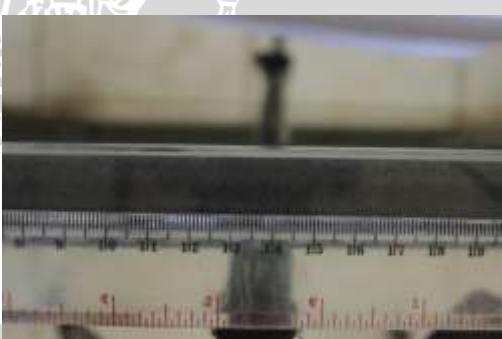
$P_{\text{masuk}}: 50 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 3321,54$



$P_{\text{masuk}}: 250 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 6694,07$



$P_{\text{masuk}}: 100 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 4863,38$



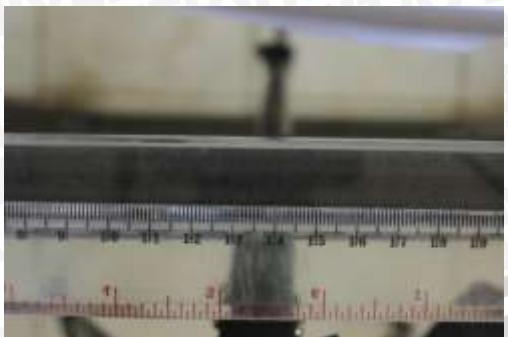
$P_{\text{masuk}}: 300 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 7896,17$



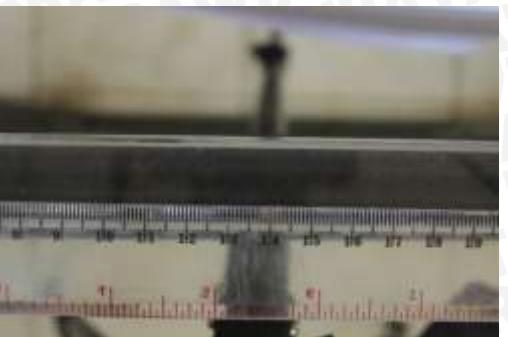
$P_{\text{masuk}}: 150 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 5830,98$



$P_{\text{masuk}}: 350 \text{ mmH}_2\text{O}; Re 8382,55$



P_{masuk}: 400 mmH₂O; Re 8978,84



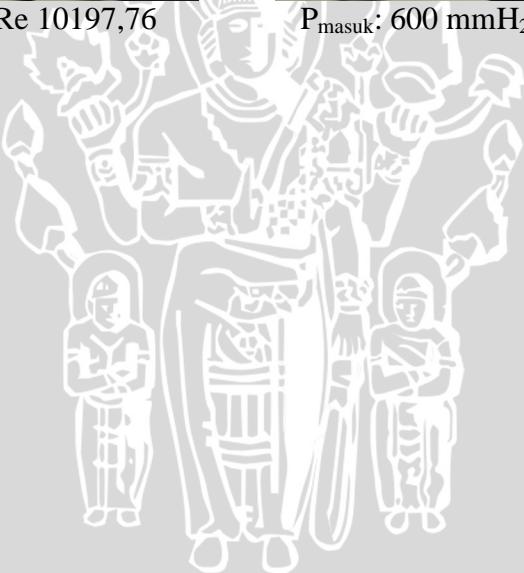
P_{masuk}: 550 mmH₂O; Re 10602,97



P_{masuk}: 500 mmH₂O; Re 10197,76



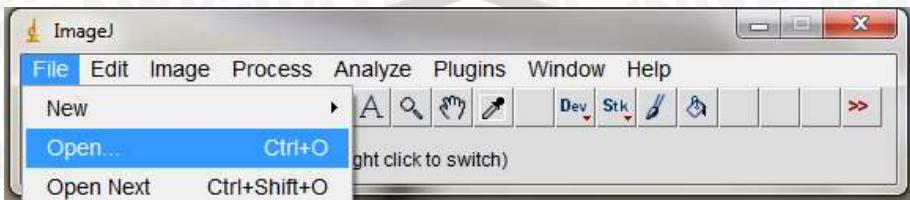
P_{masuk}: 600 mmH₂O; Re 11347,63



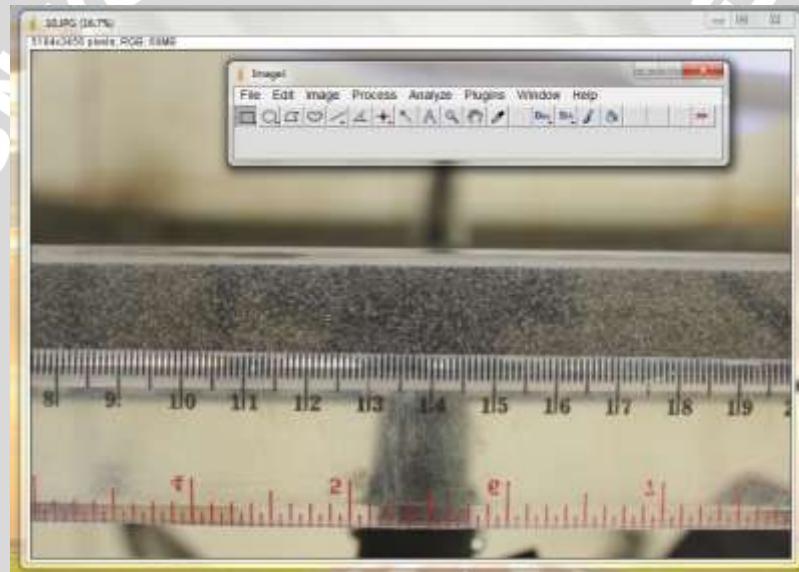
Lampiran 4. Langkah pengukuran diameter gelembung dengan *software* ImageJ

1. Membuka file yang akan diolah menggunakan *software* ImageJ

Klik *File* → klik *Open* → Pilih *File* yang akan digunakan.

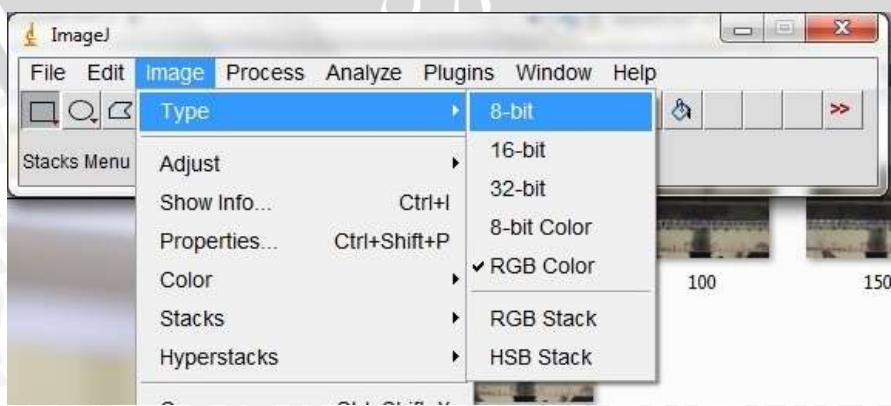


Setelah foto masuk pada area kerja ImageJ, maka akan muncul dengan tampilan sebagai berikut:



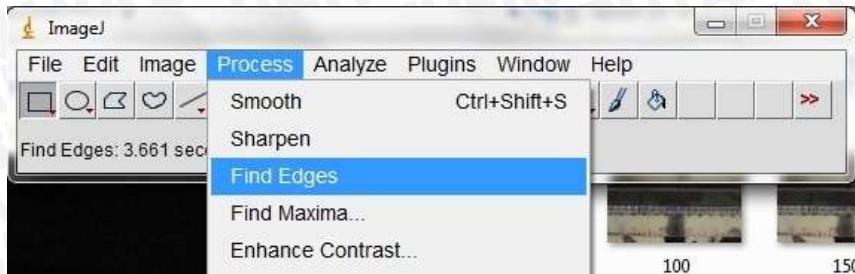
2. Mengubah tipe file foto menjadi *grayscale* 8-bit.

Klik *Image* → Pilih *Type* → klik 8-bit



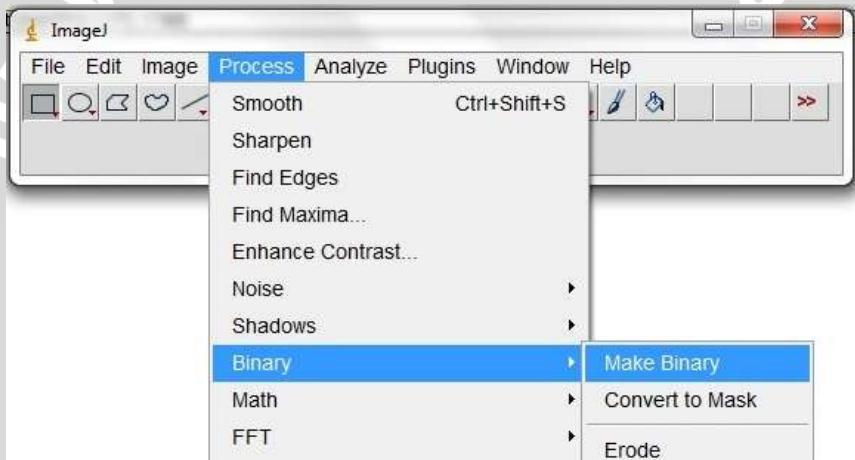
- Untuk memunculkan batas sudut hasil foto, maka dilakukan dengan mengaktifkan fitur “*Find Edges*”.

Klik *Process* → pilih *Find Edges*



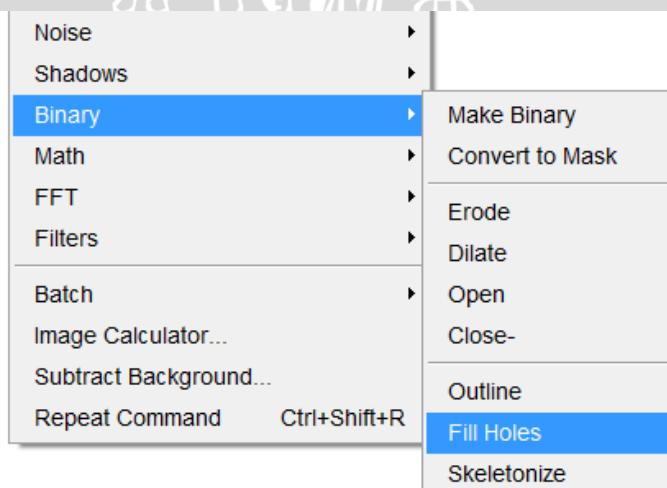
- Foto diubah menjadi 2 warna *binary* yaitu hitam dan putih. Karena ImageJ akan memproses luasan area dengan prinsip perbedaan dua warna tersebut.

Klik *Process* → pilih *Binary* → klik *Make Binary*



- Untuk area berlubang perlu diisi dengan mengaktifkan “*Fill hole*” pada opsi *Binary*

Klik *Process* → pilih *Binary* → klik *Fill Holes*



- Membuat skala pengukuran dengan mengambil ukuran pada foto penggaris pada hasil foto.

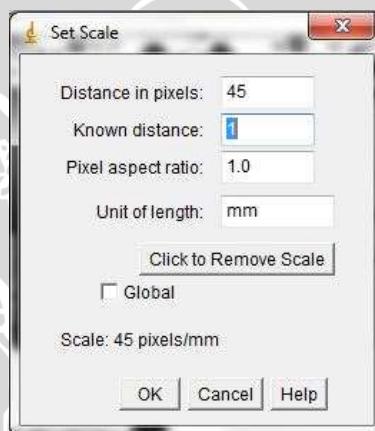
Klik *Straight* → Buat garis yang mewakili panjang 1 mm.

(untuk memperbesar tampilan tekan tombol “+” pada keyboard)

Klik *Analyze* → klik *Set scale*



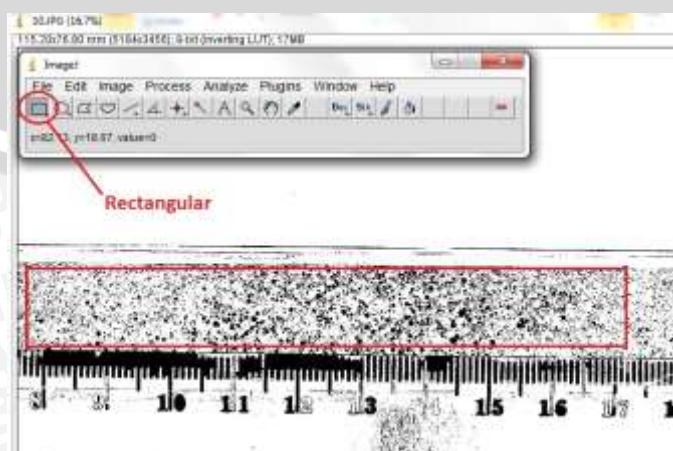
Maka akan muncul tampilan sebagai berikut:



Garis merah yang dibuat memiliki panjang 45 pixel. Isi “Known distance” sebesar 1. Kemudian “Unit of length” dalam mm. → Klik “OK”

- Menganalisa partikel

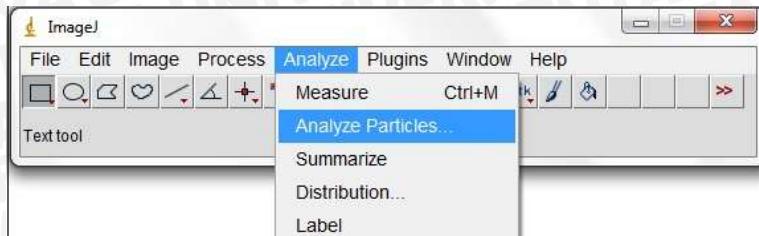
- Memilih area sampel : Klik “Rectangular” → pilih area sampel



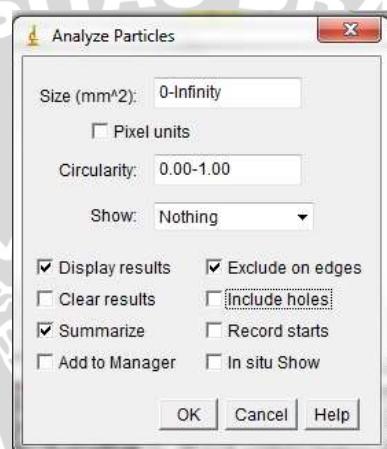
- Melakukan pengukuran

Untuk melakukan pengukuran analisa partikel :

Klik *Analyze* → pilih *Analyze Particles*

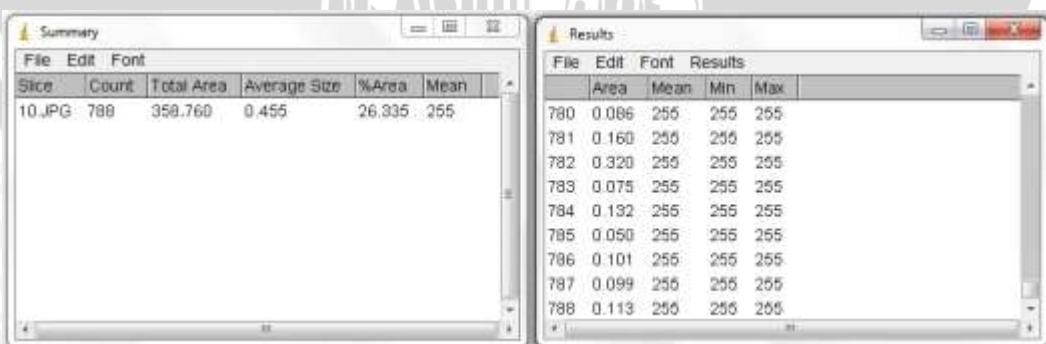


Selanjutnya akan muncul tampilan untuk mengatur parameter pengukuran sebagai berikut:



Centang opsi “*Display results*”, “*Summarize*”, dan “*Exclude on edge*”
→klik “OK”

8. Maka akan didapat hasil sebagai berikut:



Count = menunjukkan jumlah partikel pada area sample

Total area = menunjukkan luas total area

Average size = menunjukkan rata-rata ukuran partikel (mm^2)

Area = menunjukkan luasan pada tiap partikel (mm^2)

Lampiran 5. Histogram perebaran data pengukuran diameter gelembung

