

## Kerugian Tekanan dan Model Matematika Aliran Lumpur dalam Pipa Bulat

Ridwan

Program Studi Teknik Mesin FTI Universitas Gunadarma  
Jl. Margonda Raya 10 Depok, 16424  
E-mail : ridwan@staff.gunadarma.ac.id

### Abstrak

Kerugian tekanan (*pressure drop*) saat fluida dialirkan sangat penting untuk diketahui karena mempengaruhi kondisi/efisiensi sistem secara keseluruhan. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui karakteristik dan kerugian tekanan yang terjadi saat lumpur dialirkan pada pipa bulat. Pada penelitian ini fluida kerja yang dialirkan/digunakan adalah lumpur (*mud*) dengan variasi konsentrasi kepadatan/*weight concentration* (Cw) masing-masing: Cw = 40%, Cw = 30 % dan Cw = 20 %, serta air Cw = 0 % sebagai pembanding. Fluida kerja lumpur dengan konsentrasi kepadatan Cw = 40 % hal ini berarti bahwa kekentalan fluida kerja yang diuji adalah mengandung padatan (*solid*) 40 % dan air 60 %. Saluran (*test section*) berupa pipa bulat (*circular pipe*) dari bahan Polyvinil chloride (PVC) dengan variasi diameter 0,5 inci (12,7 mm), dan 1,5 inci (38,1 mm) sepanjang 2 m (2000 mm). Pada Penelitian ini lumpur dialirkan dengan menggunakan pompa lumpur (*slurry pump*), pengukuran tekanan dengan menggunakan *bottle manometer*, serta alat bantu pengukuran diantaranya *stop watch*, timbangan digital, gelas ukur dll. Dari hasil penelitian dan pengolahan data diketahui bahwa kerugian tekanan yang terjadi aliran lumpur pada pipa bulat dipengaruhi oleh konsentrasi kepadatan (Cw) lumpur dan perubahan diameter saluran dan kecepatan aliran. Semakin besar diameter pipa uji terlihat kecendrungan penurunan tekanan pada Cw dan kecepatan yang sama. Pada saat kondisi kecepatan aliran rendah (bilangan Reynolds rendah) perbedaan kerugian tekanan antara aliran lumpur dan air terlihat lebih tinggi, seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran maka kerugian tekanan antara aliran air dan lumpur semakin berkurang. Hal ini dapat terjadi karena lumpur memiliki sifat plastik semu (*pseudoplastis*) dimana viskositas/ kekentalannya dipengaruhi oleh kecepatan aliran. Kerugian tekanan lumpur pada pipa bulat untuk semua variasi Cw berada diatas kerugian tekanan aliran air. Model matematika nilai koefisien gesek merupakan fungsi konsentrasi kepadatan (Cw) dan kecepatan aliran (bilangan Reynolds). Model Matematika aliran lumpur pada pipa bulat memiliki kecendrungan/trend dan bersesuaian dengan model/persamaan Blasius.

**Keywords:** Aliran, Cw, kerugian tekanan, lumpur, pipa

### Pendahuluan

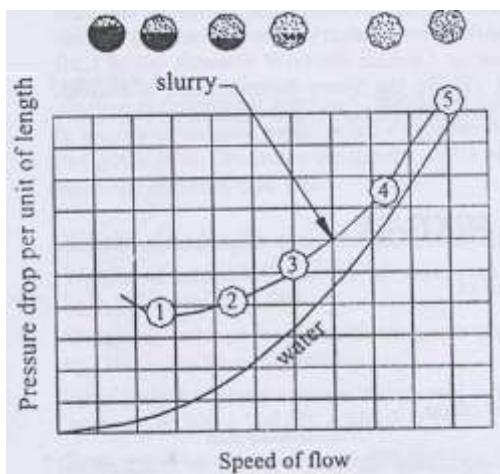
Suatu fluida yang mengalir akan mengalami penurunan tekanan seiring dengan bertambahnya panjang media alir atau saluran. Faktor lain yang mempengaruhi penurunan atau kerugian tekanan adalah kecepatan aliran. Penurunan tekanan dalam aliran fluida diupayakan sekecil mungkin karena hal ini merupakan suatu kerugian dalam pengangkutan fluida. Semakin jauh dari sisi masuk pipa uji, tekanan yang terjadi akan semakin kecil pula. Kerugian tekanan (*pressure drop*) saat fluida dialirkan sangat penting untuk diketahui karena mempengaruhi kondisi/efisiensi sistem secara keseluruhan.

Pengaliran *slurry* dengan saluran tertutup (*closed duct*) lebih banyak digunakan karena dengan sistem parit (*open channel*) *slurry* membutuhkan beda ketinggian yang ekstrim untuk bisa mengalir

(Abulnaga, 2002). Permasalahan pada aliran *slurry* yaitu mudah terbentuk *sludge*, pada kecepatan rendah padatan mulai mengendap sehingga tidak bisa mengalir, sementara pada kecepatan tinggi nilai kerugian tekanan besar sehingga membutuhkan daya pompa tinggi dan juga terjadi abrasi pada dinding pipa. Permasalahan yang terjadi pada aliran *slurry* (Weir, 2007).

Penggunaan pipa sebagai media transportasi fluida baik untuk fluida fase tunggal (*singgle phase*) maupun fase ganda (*multi phase*), demikian juga ukuran pipa sangat bervariasi dari yang berukuran kecil sampai besar, untuk pemakain rumah tangga maupun pada bidang industri. Pengetahuan tentang karakteristik fluida saat dialirkan sangat penting diketahui para praktisi khususnya dalam hal aplikasi industri. Selain itu diperlukan pemahaman yang mendalam dan keterampilan untuk dapat merencanakan dan memilih desain pipa yang tepat untuk menghasilkan sistem instalasi perpipaan yang optimal terutama untuk aliran *multi phase* seperti aliran lumpur sehingga dapat memberikan perbaikan penggunaan

energi yang lebih efisien dan bebas endapan. Aliran slurry termasuk lumpur dimana Abulnaga (2002) memberikan grafik hubungan antara kecepatan aliran dan kerugian tekanan dan membagi kategori aliran berdasarkan *region* sebagaimana dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 1.** Kerugian tekanan terhadap kecepatan aliran slurry dan air.

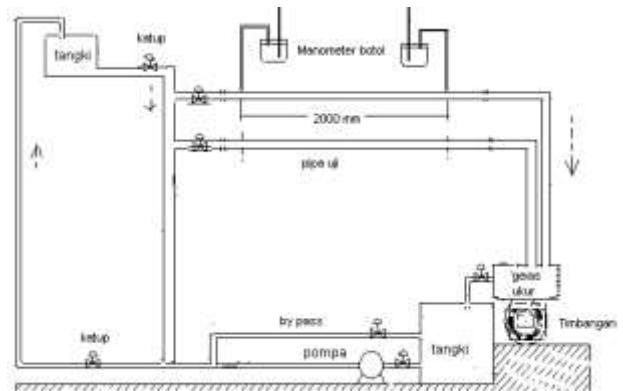
Pada Gambar 1 terlihat bahwa sistem aliran *slurry* memiliki kerugian jatuh tekanan yang lebih tinggi dibanding dengan fluida air, pada gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa ada daerah tertentu yakni daerah 3-4 (*asymmetric flow*) yang mana terlihat *pressure drop* slurry mendekati *pressure drop* fluida air yang berarti bahwa daerah tersebut adalah daerah (*region*) yang optimal untuk aliran slurry pada pipa bulat. Sebaliknya pada daerah 1-2 (*stationary bed*) terlihat *pressure drop* aliran slurry relatif jauh lebih tinggi diatas *pressure drop* fluida air. Hal ini mengindikasikan bahwa daerah tersebut seharusnya dihindari dalam aliran slurry sehingga didapatkan aliran yang optimal dalam hal meminimalkan pemakaian energi pada pompa. Sistem transportasi cairan yang mengandung partikel padat seperti lumpur, bubur kertas, biji besi, serbuk batubara, dan lain-lain. Cairan yang bercampur dengan partikel padat biasa disebut slurry. Sistem transportasi slurry dalam pipa harus menghindari dua kondisi ekstrem yaitu: kecepatan terlalu rendah yang akan membuat padatan mulai mengendap dan sulit mengalir, serta pada kecepatan terlalu tinggi yang menyebabkan tingkat abrasi pipa dan *pressure drop* yang berarti juga kebutuhan daya pompa berlebihan (Abulnaga, 2002).

### Metoda Eksperimen & Fasilitas Yang Digunakan

Pada penelitian ini fluida kerja yang dialirkan/digunakan sebagai obyek penelitian

adalah lumpur (*mud*) dengan variasi konsentrasi kepadatan/*weight concentration* (*C<sub>w</sub>*) masing-masing: *C<sub>w = 40%, *C<sub>w = 30 % dan *C<sub>w = 20 %, serta air (*C<sub>w = 0 %) sebagai pembanding. Fluida kerja lumpur dengan konsentrasi kepadatan *C<sub>w = 40 % hal ini berarti bahwa kekentalan fluida kerja yang diuji adalah mengandung padatan (*solid*) 40 % dan air 60 %). Pipa uji (*test section*) berupa pipa bulat (*circular pipe*) dari bahan Polyvinil chloride (PVC) dengan variasi diameter masing-masing 0,5 inci (12,7 mm), dan 1,5 inci (38,1 mm) sepanjang 2 m (2000 mm). Pada Penelitian ini lumpur dialirkan dengan menggunakan pompa lumpur (*slurry pump*), pengukuran tekanan dengan menggunakan *bottle manometer*, serta alat bantu pengukuran diantaranya *stop watch*, timbangan digital, serta gelas ukur.</sub>*</sub>*</sub>*</sub>*</sub>*

Berikut ini adalah skematik dan setup alat yang digunakan dalam penelitian ini , dapat dilihat pada gambar 2.



**Gambar 2.** Setup alat Penelitian

Konsentrasi kepadatan lumpur dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_w = \frac{m_{lumpur\ padat}}{m_{pelarut} + m_{lumpur\ padat}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(1)$$

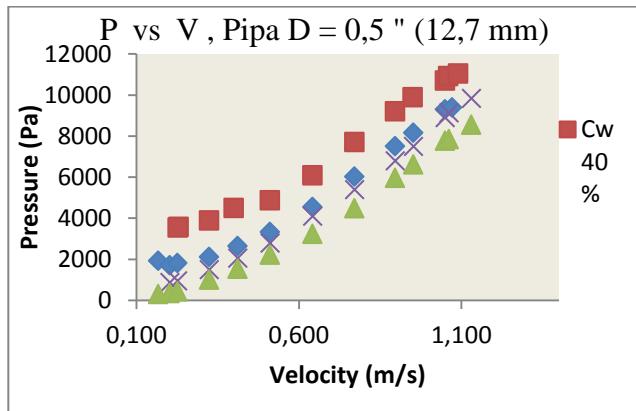
Dengan m adalah massa (kg)

### Hasil dan Pembahasan

#### Kerugian Tekanan (*pressure drop*)

Suatu fluida yang mengalir akan mengalami penurunan tekanan seiring dengan bertambahnya panjang media alir atau saluran. Faktor lain yang mempengaruhi penurunan atau kerugian tekanan adalah kecepatan aliran. Penurunan tekanan dalam aliran fluida diupayakan sekecil mungkin karena hal ini merupakan suatu kerugian dalam pengangkutan fluida. Semakin jauh dari sisi masuk pipa uji, tekanan yang terjadi akan semakin kecil pula. Nilai kerugian jatuh tekanan sangat penting untuk diketahui mengingat hal ini berkaitan dengan kinerja atau efisiensi sistem secara keseluruhan.

Berikut adalah grafik kerugian tekanan terhadap kecepatan untuk untuk pipa diameter 0,5 inci (12,7 mm).

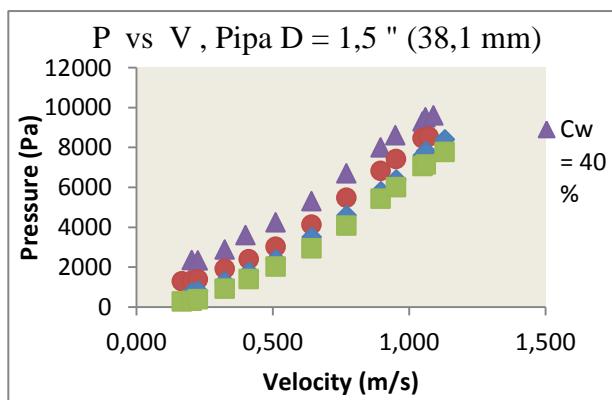


Gambar. 3 Kerugian Tekanan terhadap kecepatan aliran pipa 0,5 " (12,7 mm)

Pada Gambar. 3 disajikan grafik hubungan antara kecepatan aliran dan kerugian tekanan yang terjadi pada pipa dengan diameter 12,7 mm. Dari grafik tersebut terlihat bahwa semakin tinggi konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ) maka kerugian tekanan akan semakin besar. Kerugian tekanan yang terjadi pada aliran lumpur untuk semua kategori  $C_w$  yang diuji terlihat berada diatas kerugian tekanan untuk aliran air. Pada saat kecepatan aliran bertambah terlihat kecendrungan kerugian tekanan agak mendatar dan lebih mendekati kerugian tekanan untuk aliran air.

Pada saat kecepatan rendah maka terlihat perbedaan tekanan antara air dan lumpur untuk semua kategori  $C_w$  terlihat lebih renggang (lebar) hal ini berarti bahwa pada daerah tersebut terjadi perbedaan kerugian yang tinggi antara aliran air dan lumpur.

Gambar berikut adalah grafik hubungan antara kecepatan aliran dan kerugian tekanan untuk aliran lumpur dan air pada pipa dengan diameter 1,5 " (38,1 mm).



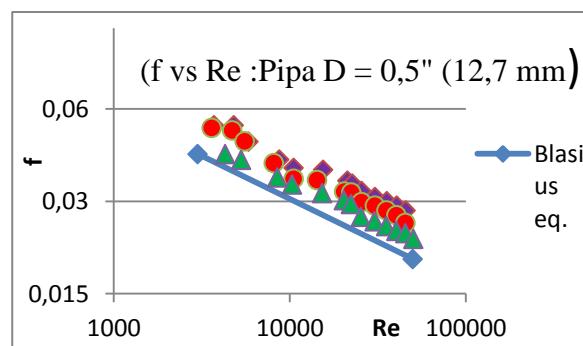
Gambar.4. Kerugian Tekanan terhadap kecepatan aliran pipa 1,5 " (38,1 mm)

Pada gambar 4, terlihat untuk kecepatan rendah perbedaan antara kerugian tekanan untuk aliran air dan lumpur menjadi lebih rapat dibanding dengan pada gambar sebelumnya, yakni untuk pipa dengan diameter 12,7 mm. Seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran makan kerugian tekanan antara air dan lumpur terlihat kecendrungan lebih rapat, hal ini mengindikasikan bahwa lumpur dengan kecepatan aliran yang lebih tinggi lebih mengalami perbaikan dalam hal kerugian tekanan. Lumpur dengan semua konsentrasi kepadatan baik 40 %, 30 % dan 20 % cernung mendekat dengan kondisi atau kerugian tekanan yang dialami air.

Lumpur dengan konsentrasi kepadatan ( $C_w$ ) yang tinggi memiliki massa jenis yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan tegangan geser yang terjadi juga lebih tinggi dibanding dengan air serta lumpur yang memiliki konsentrasi kepadatan ( $C_w$ ) yang lebih rendah pada kecepatan yang sama. Lumpur dengan konsentrasi kepadatan yang tinggi akan memiliki tegangan geser yang tinggi pada laju geseran yang sama, karena lumpur dengan  $C_w$  yang tinggi memiliki viskositas lebih tinggi dibanding dengan  $C_w$  yang lebih rendah. Sehingga kerugian jatuh tekanan selain dipengaruhi oleh massa jenis, viskositas dan kecepatan, sehingga konsentrasi kepadatan lumpur tersebut berpengaruh terhadap tegangan geser dan jatuh tekanan yang terjadi.

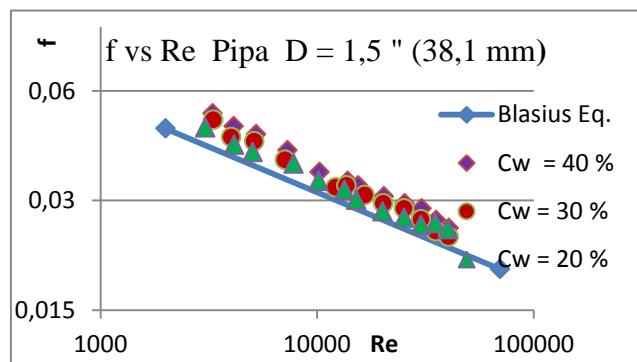
### Koefisien gesek

Pada Gambar. 5 terlihat koefisien gesek (*friction factors*) yang terjadi pada aliran lumpur pipa dengan diameter 12,7 mm, koefisien gesek lumpur berada diatas garis Blasius untuk seluruh konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ), yang paling dekat dengan garis Blasius adalah  $C_w = 20\%$  diikuti dengan  $C_w 30\%$  dan yang paling diatas adalah  $C_w 40\%$ . Dari grafik juga terlihat dimana pada  $Re$  lebih rendah antara  $C_w 20\%$  dengan  $C_w 30\%$  dan  $40\%$  terlihat lebih renggang, seiring dengan bertambahnya kecepatan/bilangan Reynolds koefisien gesek terlihat lebih rapat dan mendekati garis Blasius. Hal ini dapat terjadi karena konsentrasi kepadatan lumpur dipengaruhi oleh kecepatan aliran, dengan bertambahnya kecepatan aliran viskositas atau tingkat kepadatan lumpur mengalami penurunan.



Gambar. 5 Hubungan koefisien gesek terhadap bilangan Reynolds pipa diameter 12,7 mm.

Pada Gambar. 6 terlihat koefisien gesek yang terjadiliran lumpur pada pipa dengan diameter 38,1 mm, koefisien gesek lumpur juga berada diatas garis Blasius untuk seluruh konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ), yang paling dekat dengan garis Blasius adalah  $C_w = 20\%$  diikuti dengan  $C_w 30\%$  dan yang paling diatas adalah  $C_w 40\%$ . Terlihat ada perbedaan dengan gambar sebelumnya untuk pipa 12,7 mm dimana dengan bertambahnya ukuran diameter pipa maka koefisien gesek lumpur terlihat lebih rapat dimulai dengan pada kisaran Bilangan Reynolds 12.000 terlihat lebih rapat dan mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya kecepatan aliran/ Re. pada Re yang lebih rendah sekitar Re 4000 juga terlihat lebih rapat untuk masing-masing variasi konsentrasi kepadatan ( $C_w$ ).



**Gambar. 6.** Hubungan koefisien gesek terhadap bilangan Reynolds pipa diameter 38,1 mm.

Garis lurus menunjukkan tempat kedudukan data dari persamaan Blasius untuk aliran turbulent pipa mulus. Hubungan koefisien gesek lumpur pada pipa bulat terhadap perubahan bilangan Reynolds (Re) pada gambar menunjukkan nilai koefisien gesek lumpur lebih tinggi dari koefisien gesek pelarut air.

Pada aliran yang lebih tinggi /turbulent nilai koefisien gesek mengecil pada kenaikan bilangan Reynolds, nilai kerugian tekanan (pressure drop) meningkat sebagai fungsi kwadrat kecepatan dan kekentalan fluida tersebut. Pengaruh perubahan nilai kekentalan menghasilkan perubahan koefisien gesek. Untuk  $C_w = 40\%$  dan  $30\%$  memiliki nilai koefisien gesek yang berdekatan. Nilai koefisien gesek pada  $C_w = 20\%$ ,  $30\%$  dan  $40\%$  lebih tinggi dari koefisien gesek air.

### Model Matematika

Pembuatan persamaan atau model matematika aliran lumpur pada pipa bulat dimaksudkan untuk

dapat memudahkan dan mempercepat perhitungan nilai koefisien gesek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien gesek aliran lumpur dipengaruhi oleh kecepatan aliran atau bilangan Reynolds (Re), dan konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ). Persamaan matematik aliran lumpur pada pipa bulat, dibuat dan dikembangkan berdasarkan hasil penelitian tersebut serta persamaan yang telah dikembangkan oleh Blasius yakni aliran air pada pipa bulat. Persamaan koefisien gesek ( $f$ ) Blasius telah dikenal dan dipakai secara luas khususnya untuk aliran air pada pipa bulat. Bentuk umum persamaan Blasius adalah : $(f = a Re^b)$ , dengan  $a$  dan  $b$  adalah konstanta serta  $Re$  adalah bilangan Reynolds. Persamaan model matematika yang dikembangkan untuk aliran lumpur pada pipa bulat adalah sebagai berikut:

$$f = a Re^b C_w^c$$

dengan:  $f$  adalah faktor gesek (*friction factors*), bilangan Reynolds ( $Re$ ), konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ), dan konstanta : $a$ ,  $b$ , dan  $c$ .

Untuk menentukan konstanta  $a$ ,  $b$  dan  $c$  untuk masing-masing pengaruh diameter pipa ( $D$ ) dan konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ) dapat dilihat pada tabel 1. Hasil diperoleh dengan pengolahan data menggunakan *tools solver* diperoleh nilai-nilai tersebut untuk masing-masing variasi diameter pipa dan konsentrasi kepadatan lumpur.

**Tabel 1.** Perhitungan konstanta model matematik

	$D = 12,7 \text{ mm}$	$D = 38,1 \text{ mm}$
$C_w$ $40\%$	$a = 0,41$ $b = -0,25$ $c = -0,001$	$a = 0,46$ $b = -0,26$ $c = -0,015$
$C_w$ $30\%$	$a = 0,56$ $b = -0,26$ $c = -0,09$	$a = 0,61$ $b = -0,26$ $c = -0,14$
$C_w$ $20\%$	$a = 0,035$ $b = -0,24$ $c = -0,03$	$a = 0,036$ $b = -0,22$ $c = -0,015$

Penelitian ini dilakukan dengan variasi konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ )  $40\%$ ,  $30\%$  dan  $20\%$  serta variasi terhadap diameter pipa ( $D$ ): 0,5 inci (12,7 mm), dan 1,5 inci (38,1 mm) temperatur saat pengujian  $\pm 27^\circ$  Celsius. Orientasi pipa uji arah horizontal dengan homogenitas lumpur terjaga. Dengan demikian persamaan matematik yang dibangun akan valid dengan kondisi tersebut diatas, untuk kondisi diluar range yang diteliti dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk memastikan kevalidan persamaan tersebut.

## Kesimpulan

Kerugian tekanan yang terjadi dipengaruhi oleh konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ), perubahan diameter pipa, dan kecepatan aliran. Semakin besar diameter pipa terjadi kecendrungan penurunan tekanan pada  $C_w$  dan kecepatan yang sama. Pada saat kondisi kecepatan aliran rendah (bilangan Reynolds rendah) perbedaan kerugian tekanan antara aliran lumpur dan air terlihat lebih tinggi (signifikan), seiring dengan bertambahnya kecepatan maka kerugian tekanan semakin berkurang. Kerugian tekanan lumpur pada pipa bulat untuk semua variasi  $C_w$  berada diatas kerugian tekanan aliran air. Model matematika nilai koefisien gesek merupakan fungsi konsentrasi kepadatan lumpur ( $C_w$ ), dan bilangan Reynolds. Model Matematika aliran lumpur pada pipa bulat memiliki kecendrungan bersesuaian dengan model/persamaan Blasius

Sumer M. Peker, Serife S. Helvacı. 2008. Solid-Liquid Two Phase Flow. Elsevier. Oxford OX2 8DP. UK.

Weir. Pumping non-Newtonian Slurries. Technical Bulletin, no. 14 (2007)

Usui, H., 2002, Prediction of Dispersion Characteristik and Rheology in Dense slurry, Journal Chemical Engineering of Japan. Vol.35. No.9, pp 815- 829.

## Ucapan Terima kasih

Terima kasih kepada Prof. Budiarso dan Prof. Yanuar atas segala saran dan masukannya selama ini. Manajemen dan Yayasan UG atas *support* yang diberikan, serta saudara Andrik alumni Teknik Mesin FTI – UG atas bantuannya saat pengambilan data.

## Nomenklatur

$C_w$	Konsentrasi kepadatan lumpur (%)
$m$	Massa (kg)
$P$	tekanan ( $Nm^{-2}$ )
$Re$	Reynolds number
$V$	Kecepatan aliran ( $ms^{-1}$ )

## Referensi

B.E.Abulnaga, Slurry Handbook. McGraww-Hill. New York (2002).

Plumlee, Geoffrey, et al., Preliminary Analytical Result for a Mud sample collected from the LUSI Mud vulcano, Sidoarjo, East Java, Indonesia. USGS. Science (2008).

Ridwan., Yanuar., Budiarso., Raldi A K. .Flow curves and Viscous Properties of Mud Slurry. Proceeding of The 1<sup>st</sup> International Meeting on Advances in Thermo-Fluids (IMAT). University Teknologi Malaysia (UTM). Johor Bahru, Malaysia (2008)