
KARAKTERISISASI LAPISAN FILM JATUH (FLF) PADA DINDING DALAM TABUNG VERTIKAL OLEH PENGUMPAN PUSAR SECARA EKSPERIMEN DAN SIMULASI CFD

Yazid Bindar⁽¹⁾, Rusdi Wijisaksono⁽²⁾

⁽¹⁾ Kelompok Keahlian Teknik Kimia Bidang Energi dan Sistem Pemroses
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung
Labtek X, Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

⁽²⁾ PT. Petrokimia Gresik, Gresik, Jawa Timur
E-mail : yazid@che.itb.ac.id

Abstrak

Lapisan film jatuh (FLF) yang dihasilkan oleh pengumpatan pusar dikarakterisasi secara percobaan dan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD). Karakter FLF yang dikuantifikasi adalah ketebalannya. Karakter FLF dipengaruhi diameter lubang pusar, laju alir cairan, dan jenis cairan. Pengaruh laju alir, sifat fisik dan ukuran lubang pusar terhadap ketebalan FLF dimodelkan dalam bentuk persamaan tidak berdimensi. Ketebalan FLF tak berdimensi mempunyai korelasi pangkat dengan bilangan Reynolds dan bilangan Galileo. Ini didukung oleh konsep teoritisnya. Karakter-karakter lain dari FLF yang dikaji adalah nilai bilangan Reynolds minimum untuk pembentukan FLF dan diameter maksimum lubang pusar yang diizinkan. FLF pada rejim laminar beriak dan rejim turbulen lebih tebal dari FLF pada rejim laminar tak beriak. Simulasi CFD dilakukan dengan menggunakan model turbulen $k - \epsilon$ dan sistem multifasa campuran gas dan cair. Simulasi CFD memiliki kemampuan yang sangat lengkap untuk perkiraan nilai karakter FLF pada semua posisi tiga dimensinya. Hasil perkiraan ketebalan FLF dengan simulasi CFD berada dalam rentang nilai hasil percobaan. Kombinasi percobaan dan simulasi CFD untuk karakterisasi FLF ternyata sangat efektif dengan pendekatan percobaan yang sederhana dan murah.

Keywords: CFD Simulation, Falling film, Film Layer, Stripper

Abstract

Falling Liquid Film (FLF) from swirl feed holes were characterized through experiment and Computational Fluid Dynamic (CFD) simulation. The falling liquid film is quantified by its thickness. The effect of liquid flow rate, physical properties and diameter of swirl holes are successfully correlated to form a model that is based on the liquid film theory. The FLF dimensionless thickness linearly relates to power functions of Reynolds and Gallileo numbers. The minimum mass flow increases with the size of the swirl holes. The minimum Reynolds number of the inlet does not change with swirl hole sizes. The CFD investigations were conducted using $k - \epsilon$ turbulent model and multi phase system. Falling film thickness was calculated using axial velocity data resulted from CFD investigation. Calculated falling film thickness using CFD method agrees very well with measured one for both systems. Combination between physical and CFD experiments has the advantages in determining the critical diameter of the swirl hole that still produce good FLF characteristics.

Kata kunci: Falling film, Lapisan film, Simulasi CFD, Stripper

1. Pendahuluan

Pelucut gas (*stripper*) ammonia dan karbon dioksida digunakan di pabrik urea. Ini dilakukan untuk pengambilan kembali bahan baku bernilai ini untuk dikembalikan ke reactor urea. Larutan yang mengandung ammonia dibuat dalam bentuk lapisan film jatuh (FLF). Gas pelucut kontak dengan lapisan ini dalam arah aliran yang berlawanan.

Proses pelucutan memerlukan panas yang dipasang melewati system pemanasan dengan kukus. Panas dari kukus mengalir dari luar ke dalam pipa yang dialiri oleh FLF dan gas pelucut. Panas akan menguraikan larutan karbamat ($\text{NH}_2\text{COONH}_2$) menjadi gas ammonia dan gas karbondioksida. Kinerja pemanasan akan dipengaruhi oleh karakteristik FLF yang dihasilkan.

FLF dibuat dengan teknik pengumpanan pusar (*swirl*) dari permukaan luar ke permukaan dalam pipa. Maka dari itu, efektifitas pelucutan dalam pipa sangat ditentukan oleh karakteristik FLF yang dihasilkan oleh pengumpanan pusar ini. FLF menciptakan luas permukaan kontak yang cukup untuk terjadinya perpindahan panas dan massa.

Perhatian para peneliti selama ini tentang karakterisasi FLF lebih banyak pada pengaruh variabel-variabel laju alir cairan, laju alir gas, jenis cairan, dinamika ketidakstabilan dan orientasi tabung. Dao dan Balakotaiah (2000), memformulasikan korelasi daerah transisi pola aliran berdasar data percobaan dengan parameter-parameter tidak berdimensi. Kajian-kajian ketidakstabilan gelombang yang terjadi pada antarmuka diberikan antara lain oleh Krantz dan Goren (1971), Alekseenko dkk (1985), dan Liu dkk (1993).

Luas permukaan kontak yang diberikan FLF bergelombang lebih besar dari luas permukaan kontak FLF rata. Semakin besar luas permukaan kontak maka semakin besar pula laju perpindahan panas dan massa pada antara muka cairan dan gas. Permukaan bergelombang dapat menaikkan laju perpindahan panas dan massa 200% -300% (Chu dan Dukler, 1974).

Pembentukan FLF dimulai dari lokasi pengumpanan cairan tersebut. Karakteristik FLF yang selalu diinginkan adalah lapisan yang membasahi keseluruhan permukaan dinding tempat cairan mengalir. Apabila lapisannya terlalu tebal, laju pelucutan gas akan mengecil sehingga banyak gas yang tidak telucuti. Demikian juga kalau lapisannya terlalu tipis, kapasitas pelucut menjadi kecil dan temperatur cairan dan gas pelucut akan lebih besar. Dengan kata lain, permasalahan ini menimbulkan terganggunya

kinerja proses.

FLF dapat dibuat pada permukaan dinding luar atau pada permukaan dinding dalam sebuah tabung vertikal. Cairan umpan dilewatkan pada sistem pengumpan sehingga membentuk aliran tipis pada permukaan dinding luar atau dinding dalam. Tebal dan tipis FLF ditentukan juga oleh sistem pengumpan. Apabila sistem pengumpan berupa celah tipis, lebar celah tipis akan menjadi faktor penentu. Makin lebar celah, makin tebal FLF yang terbentuk. Demikian juga sebaliknya semakin tipis celah, FLF yang dihasilkan juga semakin tipis.

Kajian-kajian yang melihat pengaruh dari metoda pengumpan cairan ke permukaan tabung sehingga FLF dapat dibentuk ternyata belum diperhatikan dengan sungguh-sungguh. Ini mungkin disebabkan karena metoda pengumpanan cairan selama ini belum dikaitkan dengan karakteristik FLF yang dihasilkan. Metoda pengumpan jarang sekali dibahas secara rinci pada makalah-makalah rujukan seperti pada makalah-makalah di atas.

Penelitian ini dimaksudkan untuk menambah keragaman karakterisasi FLF dalam hal karakternya yang dipengaruhi oleh variabel pengumpan pusar. Metoda pengumpan pusar ini diperlukan dalam beberapa sistem pemroses seperti untuk sistem pelucut gas pada pabrik urea. Permasalahan yang ditemukan adalah lubang-lubang pusar dimana cairan dialirkan ke permukaan dalam tabung dari tangki penampung luar mengalami pengerusan akibat korosi yang terjadi. Diameter lubang-lubang pusar tersebut menjadi lebih besar setelah sekian lama sistem beroperasi. Maka dari itu, melalui penelitian diharapkan dapat mengkarakterisasi FLF yang dihasilkan akibat perubahan diameter lubang.

Pembentukan FLF untuk pelucutan gas ammonia (*ammonia stripper*) di pabrik urea, berbeda dari pelucutan gas ammoniak pada umumnya. FLF dibuat pada permukaan dalam dinding pipa. Sistem pengumpan cair ini dilakukan secara tangensial (pusar), Gambar 1. Pelucutan gas ammonia di pabrik urea dilakukan dalam sebuah unit yang disebut *stripper*. Komponen-komponen sistem pengumpan pusar di unit *stripper* ammonia pabrik urea dirinci seperti pada Gambar 2.

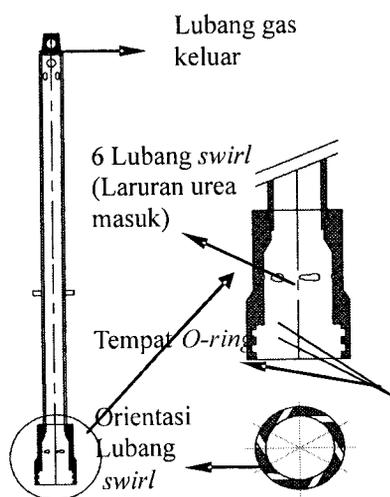
Ada beberapa permasalahan yang terjadi pada unit *stripper* ini. Pertama adalah diameter lubang *swirl* membesar karena korosi. Kedua material *O-ring* yang pecah dan membentuk tonjolan sehingga mengganggu pembentukan FLF. Larutan juga bisa masuk melalui *O-ring*. Ketiga larutan masuk di atas lubang *swirl* dan bukan pada

lubang swirl. Selanjutnya, diameter lubang pada *swirl* tidak sama besar. Semua permasalahan di atas akan berakibat pada karakteristik FLF yang terbentuk.

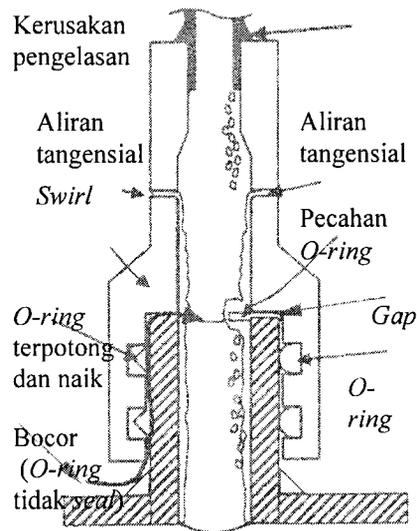
Permasalahan yang menjadi perhatian besar di kalangan praktisi pabrik pupuk urea saat ini adalah pembesaran lubang puser karena terkorosi oleh larutan urea. Pembesaran ini mengakibatkan perubahan ukuran dari FLF yang terbentuk. Pertanyaan yang perlu dijawab dalam hal ini adalah bagaimana pengaruh besarnya diameter lubang *swirl* terhadap karakteristik FLF yang berakibat pada efisiensi pelucutan.

Makalah ini melaporkan hasil penelitian yang telah dilakukan dalam upaya menjawab pertanyaan yang disampaikan di atas. Permasalahan yang dibahas dibatasi pada dinamika fluida FLF. Ini dilakukan hanya pada satu pipa saja. Perpindahan panas dan perpindahan massanya akan dibahas pada makalah terpisah. Diameter pipa yang dikaji sama dengan diameter pipa yang digunakan di pabrik. Penelitian dilakukan secara percobaan di laboratorium dan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*).

Hasil penelitian memberikan beberapa karakteristik FLF terbentuk dengan adanya perubahan ukuran diameter lubang pengumpan puser. FLF yang memenuhi kriteria pembasahan permukaan dinding dihasilkan pada laju alir cairan yang tidak boleh lebih kecil dari laju alir minimumnya. Laju alir minimum dikuantifikasi lewat penelitian ini. Laju alir minimum membesar dengan membesarnya diameter lubang. Simulasi CFD memberikan hasil yang sangat mendekati hasil eksperimen terhadap karakter FLF.



Gambar 1. Sistem pengumpan puser pembuatan Lapisan Film Jatuh (FLF)



Gambar 2. Sistem pengumpan puser pembuat lapisan film jatuh digunakan di industri

2. Fundamental

Antarmuka permukaan lapisan film jatuh (FLF) dengan gas terwujud dalam berbagai bentuk. Perbedaan bentuk ini dijadikan sebagai dasar penggolongan rejim FLF. Bentuk idealnya berupa antarmuka datar (bentuk ideal). Dao dan Balakotaiah (2000) menggolongkan FLF tidak ideal dalam tiga rejim yaitu rejim annular bergelombang (*annular wavy film*), rejim oklusi gelombang (*wave occlusion*), dan aliran gumpal (*slug flow*). Ini dipengaruhi oleh kecepatan alir cairan. Pada kecepatan alir tertentu akan mempunyai amplitudo yang cukup besar sehingga terbentuk jembatan cairan yang menghubungkan FLF yang berhadapan. Rejim seperti ini disebut oklusi gelombang (*wave occlusion*).

Kecepatan cairan yang menghasilkan perubahan rejim FLF dari annular bergelombang ke oklusi gelombang disebut sebagai kecepatan kritis yang dinyatakan sebagai kecepatan superfisial. Variabel kecepatan pada peralihan rejim ini lebih sering dinyatakan dalam bentuk bilangan Reynolds yang didefinisikan oleh $Re_{lc} = 4Q/(vD)$ dimana Q adalah laju alir volum cairan, v sebagai viskositas kinematik cairan dan D adalah diameter dalam tabung. Variabel-variabel lain yang digunakan untuk penentuan rejim FLF adalah bilangan Kapitza (Ka) dan Bond (Bo) dimana $Ka = \rho g D^3 / \sigma$ dan $Bo = g D^2 / \nu$. Parameter g , ρ , dan σ masing-masing adalah percepatan gravitasi bumi, densitas dan tegangan permukaan cairan. Percobaan Dao dan Balakotaiah (2000) menghasilkan korelasi untuk rejim peralihan dari annular ke oklusi yang dinyatakan oleh persamaan

$$Re_{LC} = 0,062Ka^{4/3}Bo^{2/3} \quad (1)$$

Korelasi di atas berlaku untuk bilangan Re_{LC} berkisar antara 0,1 - 200, Ka antara 0,2 - 55 dan Bo antara 7-50.

FLF dikuantifikasi oleh rejim, tebal dan profil kecepatan. FLF ideal berbentuk antarmuka datar yang terjadi pada aliran laminar. Pembentukan FLF dalam tabung untuk aliran laminar digambarkan oleh Gambar 3. Persamaan-persamaan profil kecepatan, kecepatan rata-rata cairan dan ketebalan FLF (δ) untuk FLF ideal dinyatakan oleh persamaan-persamaan (2)-(4).

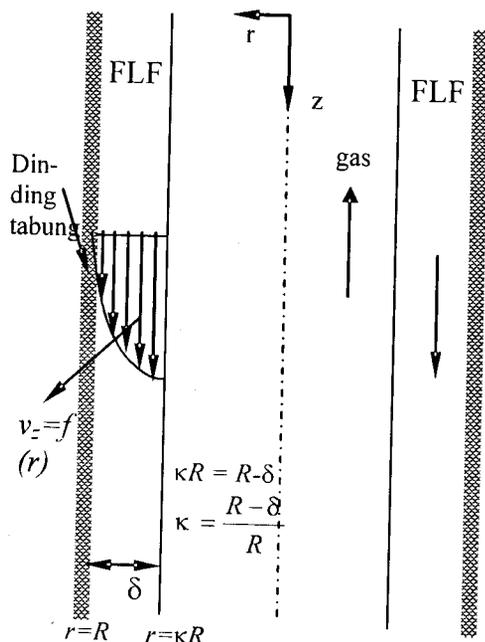
$$v_z = \frac{\rho g_z (\kappa R)^3}{4\mu} \left[\frac{1}{\kappa^2} - \left(\frac{r}{\kappa R}\right)^2 + \ln\left(\frac{r}{\kappa R}\right)^2 \right] \quad (2)$$

untuk $R < r < R$. Maka kecepatan rata-rata penampang menjadi :

$$\langle v_z \rangle = \frac{\rho g_z (R)^2}{4\mu} f(\kappa) \quad (3)$$

dimana,

$$f(\kappa) = \frac{[1 - 2\kappa^4 \ln(\kappa) (\ln(\kappa) - 1) - \kappa^2]}{1 - \kappa^2} \quad (4)$$



Gambar 3. Struktur lapisan film jatuhan

Bila bilangan Reynolds didefinisikan sebagai $Re = \rho \langle v_z \rangle D / \mu$ atau $Re = 4Q / (\mu D)$ dan tebal FLF, $\delta = R(1 - \kappa)$, dinyatakan dengan :

$$\delta = (1 - \kappa) \left(\frac{16\mu^2}{\rho^2 g} \right)^{1/3} \left(\frac{Re}{f(\kappa)} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Interaksi aliran cairan dan gas yang berlawanan arah mengakibatkan FLF terbentuk menjadi kompleks. Aliran tidak lagi laminar seperti yang disederhanakan di atas Aliran berada dalam rejim aliran turbulen. Maka dari itu, bentuk antarmukanya berubah dari bentuk ideal ke bentuk bergelombang.

Pemodelan aliran dua fasa yang tidak saling bercampur didekati dengan berbagai penyederhanaan. Model yang paling sederhana adalah model VOF (*volume of fluid*). Model ini didasarkan atas fasa-fasa yang tidak saling penetrasi. Masing-masing fasa menempati volum yang dikuantifikasi oleh besarnya fraksi volume. Penjumlahan fraksi volume untuk semua fasa pada volum yang ditempati menghasilkan nilai satu. Bila fraksi volum fasa i adalah α_i , dan jumlah fasa dalam volum itu adalah N, maka,

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad (6)$$

Apabila ruang dipenuhi oleh fasa gas, maka fraksi volum gas α_g memiliki nilai 1. Sebaliknya untuk ruang yang tidak ada gas di dalamnya, maka $\alpha_g = 0$. Demikian pula untuk fasa cair, ruang yang diisi semua oleh fasa cair memiliki $\alpha_c = 1$. Ruang yang tidak ada fasa cair mempunyai $\alpha_c = 0$. Bila nilai fraksi volum fasa diantara nol dan satu maka volum ini ditempati oleh campuran fasa.

Besaran dan sifat fisis fluida campuran adalah nilai rata-rata yang dikontribusikan oleh fasa-fasa yang ada. Densitas campuran ρ_m dan kecepatan campuran diperoleh dari persamaan-persamaan :

$$\rho_m = \alpha_g \rho_g + \alpha_l \rho_l \quad (8)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\alpha_g \rho_g \vec{v}_g + \alpha_l \rho_l \vec{v}_l}{\rho_m} \quad (9)$$

Antar muka yang dibentuk oleh fasa-fasa yang terlibat ditentukan dari solusi persamaan kontinuitas. Persamaan kontinuitas untuk aliran multifasa model VOF untuk fasa i dinyatakan oleh persamaan :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_m) = S_{\alpha_i} + \sum_{j=1}^N (\dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ji}) \quad (10)$$

dimana S_i , m_{ij} , dan m_i masing-masing adalah suku sumber, laju perpindahan massa dari fasa i ke j dan laju perpindahan massa dari fasa j ke fasa i . Bila nilai $\alpha_i = 0$, ini berarti volume itu tidak memiliki fasa i . Demikian juga untuk $\alpha_i = 1$, semua ruangan dalam volume diisi oleh fasa i . Untuk nilai α_i antara nol dan satu, maka volume itu memiliki antar muka fasa.

Momentum didefinisikan sebagai momentum campuran kedua fasa tersebut sehingga neraca momentum dinyatakan dalam persamaan momentum campuran. Persamaan momentum campuran itu adalah :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = \\ & -\nabla p + \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \mu_{m,t} \right) (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T) \right] \\ & + \rho_m \bar{g} + \bar{F} \end{aligned} \quad (11)$$

Viskositas laminar campuran diberikan oleh persamaan :

$$\mu_m = \alpha_g \mu_g + \alpha_l \mu_l \quad (12)$$

Viskositas campuran turbulen $\mu_{m,t}$ diperoleh dari pemodelan turbulen.

Pemodelan turbulen yang banyak digunakan untuk tujuan ini adalah model turbulen k - ϵ . Variabel k adalah energi kinetik turbulen untuk aliran dua fasa yang diperoleh dari fluktuasi kecepatan fluida campuran sebagai berikut

$$k_m = \frac{3}{2} \bar{v}_m'^2 \quad (13)$$

Pada dasarnya energi kinetik turbulen mengalami peristiwa dissipasi sebagai pertanda terjadi perpindahan energi yang dimiliki oleh aliran turbulen.

Besarnya laju perpindahan energi energi turbulen ini dinyatakan oleh laju dissipasi energi turbulen yang disimbolkan oleh variabel ϵ_m untuk fluida campuran. Dua variabel ini mengikuti kaidah variabel perpindahan yang memiliki persamaan perpindahannya. Model turbulen k - ϵ dibicarakan secara komprehensif dalam berbagai literatur pemodelan turbulen yang salah satunya adalah Lauder dan Spalding (1974).

Persamaan model turbulen k - ϵ yang sudah terbukti andal dalam perkiraan aliran turbulen pada berbagai kondisi adalah model turbulen k - ϵ standar. Model turbulen k - ϵ standar dinyatakan dalam persamaan-persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m k_m) = \\ & \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_k} \right) \nabla k_m \right] + \\ & G_{m,k} + G_{m,h} - \rho_m \epsilon_m - Y_{m,A} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \rho_m \epsilon_m + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \epsilon_m) = \\ & \nabla \cdot \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_{m,t}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon_m \right] + \\ & C_{1\epsilon} \frac{\epsilon_m}{k_m} (G_{m,k} + C_{3\epsilon} G_{m,h}) - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon_m}{k_m} \epsilon_m \end{aligned} \quad (15)$$

3. Metodologi

Bentuk pengumpan pusar yang digunakan pada percobaan ini ditunjukkan oleh Gambar 1. Pengumpan pusar memiliki 6 lubang ke arah tangensial. Laju alir umpam masuk ke lubang dipertahankan konstan dengan menggunakan tangki berisi cairan dengan ketinggian konstan juga. Kebocoran diatasi dengan penggunaan *seal*.

Percobaan di laboratorium dimaksudkan untuk mendapatkan data-data kuantitatif maupun kualitatif pada pembentukan lapisan cairan. Fluida yang digunakan dalam percobaan adalah air dan larutan urea 40%. Tahapan-tahapan yang dilakukan pada percobaan ini (i) penetapan ketinggian cairan, (ii) penentuan laju alir cairan, (iii) pengamatan karakteristik FLF secara visual dan pengukuran ketebalannya, (iv) penentuan laju alir minimum untuk penciptaan FLF yang masih utuh, (v) pengamatan karakteristik FLF pada kondisi aliran udara berlawanan, dan (vi) pengamatan karakteristik FLF yang tidak seragam.

Perangkat percobaan pipa meliputi tempat pembentukan FLF, pipa aliran luap, bak penampung, pompa, tabung pengatur ketinggian dan pengumpan pusar plastik. Rangkaian alat percobaan ditunjukkan pada Pipa (Gambar 4) dimana FLF yang diwujudkan mempunyai diameter dalam 26 mm, diameter luar 33 mm dengan panjang 2 m. Tabung pengatur ketinggian memiliki diameter 10 cm dan tinggi 15 cm. Diameter lubang pusar divariasikan pada nilai 2,71 mm, 2,82 mm, 3,23 mm, 3,57 mm, 3,78 mm dan 4,06 mm.

Laju alir cairan ditentukan oleh ketinggian cairan dalam tangki. Ketinggian cairan diatur dengan cara memindahkan letak pipa aliran luap sesuai dengan ketinggian yang dikehendaki. Apabila ketinggian cairan stabil, laju alir diukur dengan cara menampung cairan yang keluar dari tabung bagian bawah dalam waktu tertentu.

Pengukuran tebal lapisan cairan dilakukan secara bersamaan dengan pengukuran ketinggian dan laju alir. Lapisan cairan diukur dengan menggunakan alat ukur jarum. Alat ukur ketebalan FLF dibuat dari sebuah jarum ukur halus yang ditujukan ke dinding tabung sampai menembus FLF sehingga jarak dari permukaan dinding ke permukaan antarmuka dapat diukur. Alat ukur ini secara rinci dibahas oleh Wijisaksono (2004). Untuk keperluan pengukuran tebal FLF ini, pipa plastik dilengkapi dengan lubang kecil dengan diameter 1 mm pada jarak 25 cm, 75 cm dan 125 cm dari ujung atas pipa. Jumlah lubang untuk setiap posisi tersebut berjumlah 4 buah arah tangensial pada setiap posisi aksial.

Metoda simulasi digunakan apabila tujuan pekerjaan tidak dalam hal pengembangan model matematik dan metoda numeriknya. Model matematik aliran turbulen dua fasa diformulasikan dalam persamaan perpindahan tiga dimensi ruang dan satu dimensi waktu seperti yang dinyatakan oleh persamaan-persamaan (6) sampai (23) di atas. Pengembangan model dan metoda numerik untuk semua fenomena perpindahan dalam bentuk persamaan differensial parsial telah berlangsung lama. Ini dimulai setelah tahun 1960-an saat perangkat komputasi menggunakan komputer mulai diperkenalkan. Penyelesaian aliran turbulen melalui pemodelan dan metoda numerik telah dikerjakan banyak ilmuwan, salah satu contohnya oleh kelompok ilmuwan di Imperial College London, Launder dan Spalding (1974).

Metoda numerik penyelesaian persamaan perpindahan didasari oleh metoda beda hingga (*finite difference*) dan elemen hingga (*finite element*). Patankar (1990) membahas metoda volume hingga dimana persamaan perpindahan itu diintegrasikan dulu pada volume hingga dan kemudian didiskritisasi menggunakan metoda beda hingga. Metoda ini dikenal dengan nama *Finite Volume (FV)* atau volume hingga yang mempunyai banyak kelebihan

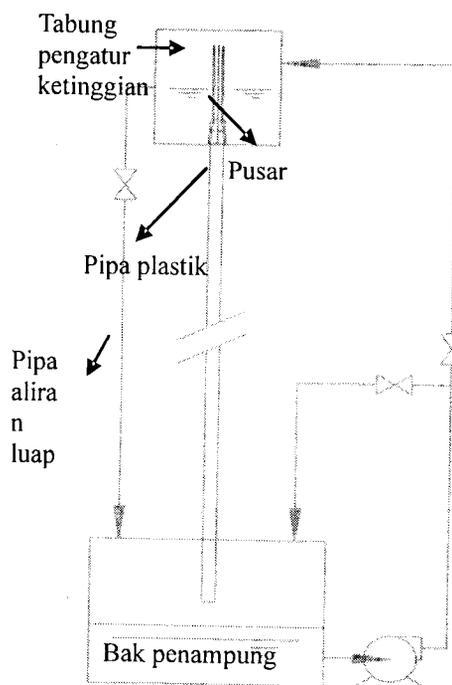
Metoda penyelesaian numerik fenomena perpindahan fluida yang melibatkan berbagai perubahan baik perubahan fisik maupun kimia di dalam dimensi ruang dan waktu. Metoda ini dikenal dengan nama umum *Computational Fluid Dynamic* yang disingkat dengan nama *CFD*. Penyelesaian mengikuti cara ini disebut juga penyelesaian CFD.

Perangkat-perangkat lunak CFD yang komersial sekarang ini bermunculan dalam bentuk komersial seperti FLUENT, CFX, STARCD, FIRE, PHOENIC, FLOW3D dan lain-lain. Pada dasarnya, apapun nama perangkat lunak CFD yang digunakan akan memberikan hasil yang sama untuk kondisi dan parameter simulasi yang sama.

Kajian simulasi ini menggunakan perangkat lunak FLUENT 6.2. Informasi lengkap tentang CFD dimuat dalam www.cfd-online.com.

Pertanyaan kritis yang selalu muncul adalah validitas hasil perkiraan dengan simulasi CFD. CFD dikembangkan dengan melibatkan tahap validasi teoritik dan validasi eksperimen. Perkiraan profil aliran yang melibatkan hanya aliran fluida saja yang dikendalikan oleh persamaan momentum dan model turbulensi memberikan hasil yang sangat akurat. Sudah banyak sekali makalah-makalah ilmiah yang menunjukkan kemampuan perkiraan dengan metoda CFD untuk aliran fluida dalam berbagai kompleksitas seperti yang diberikan oleh Shih dkk. (1995). Hal yang sama juga disampaikan oleh Bindar (1996). Permasalahan yang melibatkan kompleksitas yang tinggi akan memberikan keakuratan perkiraan yang lebih rendah dibanding untuk permasalahan sederhana. Keakuratan perkiraan dengan metoda CFD antara 40 – 80 % untuk permasalahan kompleks ini sudah sangat baik karena pengukuranpun mengalami banyak permasalahan dan bahkan sulit untuk dilakukan untuk permasalahan kompleks.

Simulasi CFD melibatkan semua fenomena fisik yang terjadi dan geometri sistem pemroses, maka CFD sendiri dapat bertindak sebagai sistem pemroses secara simulasi.



Gambar 4. Sistem peralatan percobaan

Geometri sistem pemroses diterjemahkan langsung dalam bentuk geometri yang sama dengan yang diperlukan CFD. Variasi percobaan yang dilakukan di laboratorium juga bisa dilakukan pada simulasi CFD.

Simulasi CFD untuk pengkajian karakteristik lapisan film jatuhnya (FLF) mengikuti tahapan-tahapan dasar. Tahapan itu adalah (i) penterjemahan geometri sistem pemroses dalam bentuk format informasi yang bisa dibaca CFD, (ii) penyelesaian persamaan kontinuitas, momentum, turbulen dan model dua-fasa dengan perangkat lunak CFD pada geometri sistem pemroses di atas, (iii) visualisasi dan analisa hasil percobaan, dan (iv) lanjutkan dengan variasi lain seperti geometri dan kondisi proses.

4. Hasil dan Pembahasan

Fluida yang digunakan pada percobaan ini adalah air dan larutan urea 40 % berat. Air yang digunakan mempunyai densitas $992,64 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas $0,001003 \text{ kg/m.s}$. Sedang larutan urea mempunyai densitas 1.105 kg/m^3 dan viskositas $0,00163 \text{ kg/m.s}$.

Korelasi tebal FLF teoritis yang diturunkan dari persamaan perpindahan momentum aliran laminar. Korelasi itu adalah

$$\frac{\delta}{R} = \left(\frac{16}{Ga} \right)^{1/3} \left(\frac{Re}{f\kappa} \right)^{1/3} \quad (16)$$

dimana bilangan Galileo (Ga) didefinisikan

$$Ga = \frac{R^3 \rho^2 g}{\mu^2} \quad (17)$$

Data percobaan dialurkan berdasarkan korelasi ini. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7. Korelasi yang diperoleh dari data percobaan dalam bentuk persamaan model matematik untuk air oleh Pers. (18) dan untuk larutan urea ditunjukkan oleh Pers.(19).

$$\frac{\delta}{R} = 2.45 \left(\frac{Re}{Ga} \right)^{1/3} \quad (18)$$

$$\frac{\delta}{R} = 2.16 \left(\frac{Re}{Ga} \right)^{1/3} \quad (19)$$

Apabila efek dari jenis fluida dapat diabaikan, maka persamaan model yang diperoleh adalah

$$\frac{\delta}{R} = 2.30 \left(\frac{Re}{Ga} \right)^{1/3} \quad (20)$$

Lapisan cairan hasil percobaan laboratorium lebih tebal dari lapisan cairan teoritis, yaitu sebesar 1,6 kalinya. Hal ini bisa

diterima karena persamaan tebal lapisan cairan teoritis didapatkan dari penurunan persamaan laminar tanpa adanya riak gelombang aliran (*rippling*). Batasan terjadinya riak gelombang aliran dapat dilihat dari bilangan Reynold lapisan cairan. Sherwood dan Pigford dalam Bird dkk (1994) menyatakan bahwa (i) FLF laminar tanpa riak terjadi pada bilangan $Re < 4$, (ii) FLF laminar beriak pada bilangan Re antara 4 sampai 500 dan (iii) FLF turbulen pada bilangan Re di atas 500.

Percobaan sekarang berada pada rentang bilangan Reynolds antara 150 dan 780. Berdasarkan batasan di atas, maka FLF percobaan berada pada rejim yang merentang dari laminar beriak sampai turbulen. Aliran yang disertai riak gelombang mempunyai lapisan cairan yang lebih tebal dari aliran laminar tanpa riak gelombang. FLF turbulen mempunyai lapisan cairan yang lebih tebal dari aliran laminar tanpa riak gelombang maupun aliran laminar beriak.

Seperti ditunjukkan oleh grafik tebal lapisan cairan versus bilangan Reynolds pada Gambar 5, diameter lubang *pusar* tidak berpengaruh pada tebal lapisan cairan yang terbentuk. Hal ini menunjukkan bahwa pada laju alir yang sama, untuk diameter lubang berbeda, akan menghasilkan tebal lapisan yang sama. Diameter lubang *pusar* berpengaruh pada laju alir minimum untuk terbentuknya lapisan cairan. Semakin besar diameter lubang *pusar*, semakin besar laju alir minimum.

Laju alir minimum adalah laju alir cairan yang masuk melalui lubang *pusar* dimana pada kondisi ini lapisan cairan mulai terbentuk secara seragam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar diameter lubang *pusar*, maka makin besar laju alir minimum. Untuk menghasilkan lapisan cairan yang seragam, *pusar* dengan diameter lubang yang lebih besar membutuhkan laju alir yang lebih besar. Laju alir massa minimum (W_{min}) pada diameter lubang yang sama, tidak dipengaruhi oleh jenis fluida. Laju alir massa minimum air sama dengan larutan urea. Pengaruh diameter lubang *pusar* pada laju alir massa minimum ditunjukkan pada Gambar 6.

Percobaan CFD mempunyai tujuan untuk menyelesaikan persamaan kontinuitas dan momentum. Model turbulen yang dipilih adalah $k-\epsilon$ standar dengan *standard wall function*. Permasalahan yang dihadapi pada penelitian ini adalah aliran dua fasa, yaitu larutan urea yang mengalir ke bawah dalam bentuk lapisan cairan dan campuran gas yang mengalir ke atas. Persamaan kontinuitas dan momentum diselesaikan dengan pemilihan model multi fasa. Model multi fasa yang digunakan adalah model VOF (*volume of fluid*). Solver yang digunakan

adalah *segregated* dan dalam kondisi *steady state*. Penyelesaian persamaan momentum dan kontinuitas menghasilkan profil kecepatan lapisan cairan. Profil kecepatan selanjutnya digunakan untuk menyelesaikan persamaan neraca energi dan neraca massa komponen.

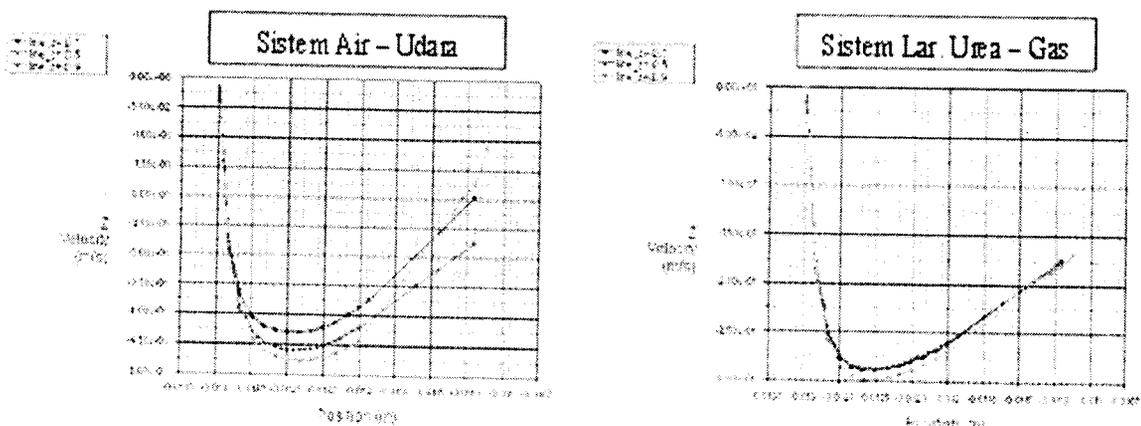
Hasil percobaan CFD dengan fluida air dan udara menunjukkan bahwa semakin besar jarak ke arah axial (z), kecepatan lapisan cairan cenderung semakin besar, meskipun kenaikannya sangat kecil. Lapisan cairan mempunyai kecepatan maksimum pada titik tertentu. Kecepatan maksimum pada jarak z yang berbeda mempunyai nilai yang berbeda. Titik maksimum adalah titik dimana tidak ada perbedaan kecepatan (*zero gradient*) ke arah radial atau $du/dr = 0$. Hal yang menarik dari percobaan ini adalah jarak titik maksimum dari dinding relatif sama, meskipun jarak ke arah aksialnya (z) berbeda. Percobaan dengan variasi diameter lubang *swirl*, jarak titik maksimum dari dinding tetap sama. Titik maksimum lapisan cairan untuk fluida air dan udara terjadi pada sekitar 0,58 mm dari dinding. Profil kecepatan lapisan cairan untuk *swirl* berdiameter lubang 2,8 mm dengan fluida air dan udara ditunjukkan pada Gambar 7.

Sesuai dengan teori *falling film* laminar, gradien kecepatan ke arah radial (r) pada permukaan lapisan cairan adalah nol. Cairan mempunyai kecepatan maksimum pada permukaan cairan. Teori ini hanya berlaku untuk *falling film* dimana aliran gas searah dengan cairan, atau untuk *falling film* tanpa aliran gas. Aliran gas berlawanan arah mempunyai *interfacial shear stress* yang menyebabkan gradien kecepatan tidak nol pada permukaan cairan. Hasil percobaan CFD menunjukkan kebenaran teori ini, dimana kecepatan

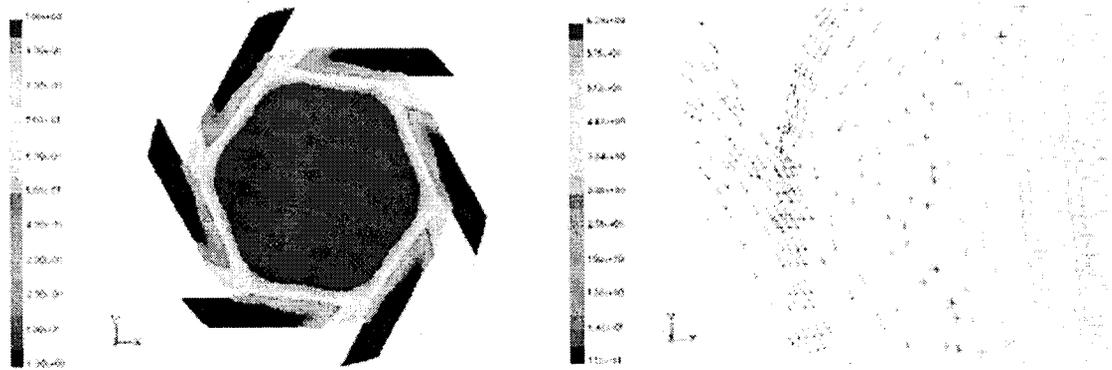
tidak nol pada permukaan cairan. Hasil percobaan CFD menunjukkan kebenaran teori ini, dimana kecepatan maksimum tidak terjadi pada permukaan cairan. Hal ini ditunjukkan oleh masih tingginya fraksi volum cairan pada titik maksimum. Kecepatan maksimum sistem air – udara terjadi pada jarak sekitar 0,58 mm dari dinding dengan fraksi volum cairan sekitar 0,6. Kecepatan maksimum sistem larutan urea - campuran terjadi pada jarak sekitar 0,46 mm dari dinding dengan fraksi volum cairan sekitar 0,97.

Tebal lapisan cairan untuk sistem air – udara dengan diameter lubang *swirl* 2,8 mm pada laju alir 0,02 kg/detik adalah sebesar 0,686 mm dengan kecepatan rata-rata 0,367 m/detik. Fraksi volum cairan pada jarak tersebut adalah sekitar 0,5. Tebal lapisan cairan hasil percobaan di laboratorium pada laju alir 0,02 kg/detik adalah sebesar 0,7375 mm. Percobaan CFD dan percobaan di laboratorium sekilas menghasilkan nilai tebal lapisan cairan yang berbeda. Tetapi secara statistik, kedua nilai tersebut adalah sama karena percobaan di laboratorium mempunyai ketelitian sebesar 0,1002 mm. Sehingga tebal lapisan cairan dari percobaan CFD masih masuk rentang percobaan di laboratorium sebesar 0,64 – 0,84 mm.

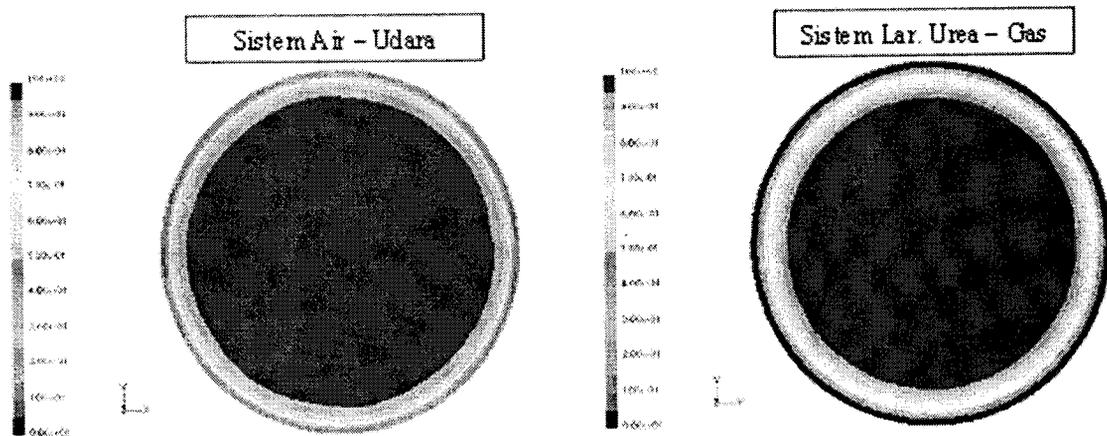
Profil lapisan cairan hasil percobaan CFD dapat ditampilkan dalam bentuk kontur fraksi volume baik cair ataupun gas dan dalam bentuk vektor kecepatan. Fraksi volume cairan mempunyai nilai 1 ditunjukkan dengan warna biru tua dan fraksi volume cairan mempunyai nilai 0 ditunjukkan dengan warna merah tua. Profil lapisan cairan yang akan ditunjukkan dalam pembahasan di sini hanya pada posisi-posisi penting saja, diantaranya adalah pada lubang masuk, pada jarak 2 mm dari lubang, pada jarak 5 mm dari lubang dan pada jarak 0,5 m dari lubang.



Gambar 7. Profil kecepatan lapisan cairan pada jarak 0,1 m, 0,5 m dan 0,9 m dari lubang *swirl* dengan diameter lubang *swirl* 2,8 mm. Posisi dalam arah radial yang bermula dari dinding



Gambar 8. Profil lapisan cairan atau kontur fraksi volume air dan *velocity vector* pada lubang masuk dengan diameter lubang *swirl* 2,8 mm untuk sistem air – udara



Gambar 9. Profil lapisan cairan atau kontur fraksi volume air pada jarak 0,5 m dari lubang masuk dengan diameter lubang *swirl* 2,8 mm

Profil lapisan cairan pada lubang masuk, pada jarak 2 mm dan 5 mm dari lubang untuk melihat proses pembentukan awal lapisan cairan. Profil pada jarak 0,5 m dari lubang untuk melihat kondisi lapisan cairan yang mewakili kondisi *fully developed*.

Profil lapisan cairan dan vektor kecepatan pada lubang masuk untuk sistem air – udara dengan diameter lubang *swirl* 2,8 mm ditunjukkan pada Gambar 8. Pada lubang masuk, udara masih menempati ruangan di antara cairan, sehingga pada tempat ini belum terjadi tumbukan cairan yang keluar dari lubang *swirl*. Belum terjadinya tumbukan cairan menunjukkan belum terjadinya lapisan cairan. Semakin besar lubang *swirl*, maka semakin besar ruang yang ditempati udara, seperti ditunjukkan pada Hal ini disebabkan oleh semakin rendahnya kecepatan tangensial cairan pada saat masuk lubang. Kombinasi antara gaya gravitasi dan rendahnya kecepatan tangensial akan menyebabkan pendeknya jarak tempuh cairan ke

Profil lapisan cairan, pada jarak 0,5 m dari lubang, untuk *swirl* dengan diameter lubang 2,8 mm, terbentuk dengan seragam, seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Percobaan dengan lubang *swirl* yang lebih besar juga dihasilkan profil lapisan cairan yang seragam. Perbedaan profil lapisan cairan antara lubang *swirl* kecil dan besar terletak pada fraksi volume udara. Fraksi volume udara untuk lubang *swirl* yang besar masih cukup besar, meskipun profil lapisan cairan seragam. Sebagai contoh untuk lubang *swirl* 3,4 mm, fraksi volum udara pada sebagian area mencapai 0,5.

5. Kesimpulan

Makalah ini menyajikan penggunaan gabungan metoda percobaan fisik dan metoda percobaan numerik CFD (computational fluid dynamic) dan pengkarakterisasian lapisan film jatuhnya (FLF) secara percobaan. FLF pada rejim lamier beriak dan rejim turbulen lebih tebal dari

FLF pada rejim laminar tak beriak. Model empiris untuk ketebalan FLF yang dibangun berdasar teori telah dirumuskan dengan keberlakuan luas sebagai pengaruh dari parameter operasi. Simulasi CFD memberikan hasil yang sangat mendekati hasil percobaan fisik terhadap karakter FLF. Simulasi CFD memiliki kemampuan yang sangat lengkap untuk memperkirakan semua variabel dalam bentuk nilai numerik pada semua posisi tiga dimensinya sebagai pengkarakterisasian FLF yang terbentuk.

Daftar Notasi

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$ = tetapan empirik model turbulen
 D_{hole} = diameter lubang *swirl*
 D_{tube} = diameter dalam *tube*
 ε_m = dissipasi energi turbulen campuran
 Ga = bilangan Galileo
 G_b = produksi energi kinetik turbulen *buoyancy*
 G_k = produksi energi kinetik turbulen
 k = energi kinetik turbulen
 Q = laju alir volume
 R = jari-jari *tube*
 Re = bilangan Reynold
 \vec{v} = vektor kecepatan rata-rata campuran
 v' = fluktuasi kecepatan campuran
 W_{min} = laju alir massa minimum
 α = fraksi kosong
 δ = tebal lapisan cairan kucuran (FLF)
 κ = konstanta von Karman
 μ = viskositas
 μ_t = viskositas turbulen
 ρ = densitas
 σ_k = bilangan Prandtl turbulen untuk k
 σ_ε = bilangan Prandtl turbulen untuk ε
 l = cair
 g = gas
 m = campuran gas cair

Daftar Pustaka

[1] Alekseenko, S.V., Nakoryakov, V.Ye, dan Pokusaev, B.G., (1985), "Wave formation on a vertical falling liquid", *AIChE J.*, No.31, hal 1446.

[2] Bindar, Y., (1996), "Experimental and Numerical Investigation of A Multiburner Furnace Operated with various Heat Transfer Boundary Conditions", *Ph.D Thesis*, Queens University, Canada.

[3] Bird R. B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. (1994), *Transport phenomena*, John Wiley Wiley & Sons, p. 37-42, p. 83-85, p. 318-319, 349-350.

[4] Chu, K. J. and Dukler, A. E., (1974), "Statistical characteristics of thin, wavy films", *AIChE Journal*, Vol. 20, No. 4, 695-706.

[5] Dao E. K. and Balakotaiah V., (2000), "Experimental study of wave occlusion on falling films in a vertical pipe", *AIChE Journal*, Vol 46, No. 7, 1300-1307.

[6] Krantz, W.B., dan Goren, S.L., (1971), "Stability of thin liquid films flowing down a plane", *Ind. Eng. Chem. Fundam*, No.10, hal. 91.

[7] Launder, B. E. and Spalding, D. B., (1974), "The Numerical Computation of Turbulent Flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3:269-289.

[8] Liu, J., Paul, J.D. dan Gollub, J.P., (1993), "Measurements of the primary instabilities", *J. Fluid Mech*, No. 250, hal. 69.

[9] Manninen, M., Taivassalo, V., and S. Kallio, S., (1996), "On the mixture model for multiphase flow", *Technical Research Centre of Finland*, VTT Publications 288.

[10] Patankar S. V., (1980), *Numerical heat transfer and fluid flow*, McGraw-Hill Book Company, New York, 30-39, 50-54, 101-102.

[11] Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. dan Zhu, J., (1995), "A New $k - \varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation", *Computers Fluids*, 24(3):227-238.

[12] Wijisaksono, R., (2004), "Pengaruh Diameter Lubang Swirl terhadap Pembentukan Lapisan Cairan dan Penguraian Amonium Karbamat Menjadi NH_3 dan CO_2 pada Stripper Pabrik Urea", *Tesis Magister*, Departemen Teknik Kimia, ITB.