

Analisa Frost Formation Pada Pipa Berinsulasi Reflux Accumulator Menuju Score Column Reflux Pump di Kilang LPG

Ahmad Nizar Zulfi^{1*}, Muhammad Shah², Burniadi Moballa³

Program Studi D-IV Teknik Perpipaan, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia¹

Program Studi D-III Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia^{2,3}

Email: ahmad.nizar.zul@gmail.com^{1*}; muh.shah59@yahoo.co.id^{2*}; bmoballa@ppns.ac.id^{3*};

Abstract - The LPG fluid has a very low operating temperature of about -90 °F. Thermal insulation to adjust the temperature to the surrounding environment, because of its elements and temperature as the main element for each-hydrocarbon. On the other hand, the activation of the Frost Formation phenomenon in the pipe process around the Score Column allows for the formation of moisture between pipe surfaces with insulation inner layers. In this paper, a CFD (Computational Fluid Dynamics) model is proposed to predict frost formation and growth with the benefit of the nucleation theory. The phenomena of frost formation on a cold surface placed in a stream of humid air are simulated using this model. The results show that the frost grows faster in the upstream region. In the initial period, the mass transfer from water vapor to frost layer mainly contributes to the increase of frost thickness. frost growth rate increase significantly due to flowtime. The effect of humidity and temperature are discussed.

Keyword: frost formation, LPG, numerical study

NOMENCLATUR

h	Convection heat transfer, W/ m ² C
A	Luas perpindahan panas, m ²
T_o	Temperature fluida, °C
T_∞	Temperature luar, °C
Rad	Reyligh Number
D	Diameter penampang, m
Pr	Angka Prandtl
Gr	Angka Grashof
β	Thermal expansion, °C ⁻¹
Nu	Angka Nusselt
$R3$	Radius kritis insulasi, m
k_{udara}	konduktivitas thermal udara, W/ m ² C
x_3	Radius kritis insulasi+ radius luar pipa, m
ρ	Densitas, kg/m ³
g	Percepatan gravitasi, m/s ²
μ	Viskositas dinamis, kg/ms
k_{iso}	Konduktivitas thermal insulasi, W/ m ² C
n_c	Koefisien nukleasi, l
σ	Energi interfacial tetesan es
K_b	Konstanta Boltzmann 1.3087x 10 ⁻²³ J/ K
M_w	Massa satu molekul air, kg
T_g	Temperatur uap air, K
θ	Faktor koreksi nonisothermal
Δh	Enthalpi spesifik desublimasi, J/ kg
γ	Rasio kapasitas panas, 1.32
r^*	Jari -jari kritis Kevin- Helmholtz, m
$d\bar{r}/dt$	Laju pertumbuhan nukleasi
T_i	Temperatur es, K
T_g	Temperatur udara, K
ρ_i	Densitas es, kg/m ³
h	Enthalpi statis dari kedua fase, J/kg
λ_g	Koefisien perpindahan panas, W/ mK

$T_{sat(p)}$	Temperatur saturasi pada tekanan p,
η	Jumlah tetesan per unit volume, #/m ³
M_{vi}	Laju perpindahan massa dari uap air menjadi embun es, kg/m ³ s

1. PENDAHULUAN

Gas alam memiliki komponen Hydrocarbon seperti Metana (C₁H₄), Ethana (C₂H₆), Propana (C₃H₈), i- butana, n- butana, i- pentana, dan lain-lain. Proses pemisahan Metana dan Ethana dilakukan di Score Column atau yang umum disebut dengan Deethanizer. Fluida LPG memiliki temperatur desain yang rendah yakni di sekitar -120 °F dan temperatur operasi sekitar -90 °F. Lingkungan sekitar kilang pengolahan memiliki suhu 86 °F sampai 93 °F. Perbedaan suhu antara lingkungan sekitar kilang pengolahan LPG dengan fluida yang ada di dalam pipa menyebabkan terjadinya Frost Formation antara permukaan pipa dan insulasi mulai dari outlet Turbo Expander hingga ke Score Column Reflux Pump.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisa pembentukan dan pertumbuhan frost pada permukaan pipa yang disebabkan oleh faktor- faktor lingkungan sekitar dan fluida yang dialirkan. Perhitungan Critical Insulation Thickness dan jenis material mutlak dilakukan untuk mendapatkan efisiensi thermal yang lebih baik dan meminimalisir terbentuknya bunga es (Frost Formation). Analisa laju pertumbuhan frost, distribusi frost thickness dan temperatur, simulasi 2 dimensi Transient Double Precision, dianalisa menggunakan software. Persebaran ketebalan es yang terbentuk turut

dianalisa untuk mengetahui pengaruh gravitasi. Selain itu, *Frost growth rate* penting untuk dianalisa untuk mengetahui akibat dari *Heat Transfer Rate* pada masing- masing material insulasi.

2. METODOLOGI

2.1. Critical Insulation Thickness

Pada pipa silinder perpindahan panas konveksi terjadi pada fluida dengan tebal material pipa dan perpindahan panas dari material insulasi menuju lingkungan sekitar [5].

$$Q = h A (T_o - T_\infty) \quad (1)$$

Perpindahan panas yang terjadi diluar permukaan pipa merupakan 2 kombinasi perpindahan panas konveksi yaitu konveksi secara paksa (*Forced Convection*) dan konveksi secara alami (*Natural Convection*) [2].

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right\}^2 \quad (2)$$

Untuk mendapatkan nilai RaD dapat menggunakan persamaan berikut [3]:

$$RaD = Gr Pr \quad (3)$$

$$Gr = \left(\frac{x^3 \rho^2 g \beta (T_o - T_\infty)}{\mu^2} \right) \quad (4)$$

Sebagaimana persamaan diatas maka untuk mendapat nilai ekspansi thermal dapat menggunakan persamaan berikut [2]:

$$\beta = \frac{1}{(T_o - T_\infty)} \quad (5)$$

Perhitungan konveksi luar (*h*) menggunakan persamaan berikut [2]:

$$Nu = \frac{h D}{k_{udara}} \quad (6)$$

Maka perhitungan *Critical Radius Insulation* (R3) adalah sebagai berikut [2]:

$$R3 = \frac{k_{iso}}{h} \quad (7)$$

2.2. Material Insulasi

Insulasi merupakan isolator pada sebuah pipa yang dibuat dengan tujuan menjaga temperatur kerja dalam sistem tersebut dalam keadaan konstan. Pada tugas akhir ini digunakan jenis insulasi dingin.

a. Polyurethane

Untuk nilai kemampuan menahan panasnya, *Polyurethane* mampu menahan dari tempatrure -210 °C sampai 150 °C. *Polyurethane* sering digunakan karena bahan ringan, dapat di sesuaikan untuk

mendapatkan apa kemampuan insulasi yang dibutuhkan.

b. Cellular Glass

Cellular Glass, dapat di gunakan pada suhu rendah atau dalam kondisi dingin yang ekstrim. Disamping itu, bahan ini pula tidak mudah terbakar. Biasanya pula digunakan pula di bagian bawah dari tanki atau *vessel* dimana terdapat kemungkinan kelembaban yang tinggi.

c. Aerogel

Aerogel memiliki beberapa keunggulan antara lain:

1. Ramah lingkungan karena terbuat dari silika gel. Silika gel pada dasarnya adalah pasir. Bahan ini tidak mengandung serat fiber yang mampu terhisap dan bebas CFC dan HCFC.
2. Ringan dan tahan lama. *Aerogel* bersifat fleksibel dan mampu kembali ke bentuk asal meskipun ditekan dengan tekanan ratusan Psi dan ketahanan terhadap beban Impact yang tinggi.

d. Cladding

Penggunaan jaket ini bertujuan untuk menghindari kontak langsung antara material insulasi dengan lingkungan sekitar sehingga diharapkan insulasi tidak cepat mengalami kerusakan karena faktor lingkungan. Jaket insulasi yang paling sering digunakan yaitu plat tipis yang terbuat dari aluminium dengan material Alloy 3003 dengan tebal 0.5 milimeter hingga 1 milimeter.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Teori Nukleasi

Pada permodelan ini digunakan model 2 dimensi *Double Precision Solver Transien*. Model multifase *Eulerian* dengan 3 fase digunakan untuk merepresentasikan pembentukan dan pertumbuhan *frost*. Fase utama adalah gas (udara sekitar) dan fase sekunder padat (tetesan es). Fase gas disusun oleh dua komponen, uap air dan udara kering. Interaksi antara fase yang diterapkan melalui persamaan source termasuk dalam kontinuitas, momentum, energi, dan fraksi volume. *Source* tersebut di kompilasikan dalam Fluent menggunakan *User Define Formulation*. Berikut model dari simulasi ini selengkapnya :

1. *Interaction source* menggunakan persamaan UDF.
2. Momentum sumbu x dan y menggunakan persamaan UDF.
3. *Mass transfer* menggunakan persamaan UDF.
4. Persamaan energi pada fase *water vapour* dan es menggunakan persamaan UDF.
5. *User defined memory* yang digunakan adalah 6 buah.

6. Model turbulensi *SST k- omega*.
7. Proses *Double precision*
8. *Turbulent*
9. temperatur udara masuk dan temperatur fluida dingin dianggap konstan.
10. Kelembapan udara dianggap konstan.

Pada pemodelan jurnal ini ada 2 fase yaitu, fase utama adalah gas dan fase kedua adalah padatan berupa *Ice Droplet*. Fase gas terdiri dari dua komponen berupa uap air dan udara sekitar. Proses munculnya lapisan es sebagai proses nukleasi homogen dijelaskan pada persamaan nukleasi. Laju nukleasi per volume per detik sekumpulan uap air adalah [4] :

$$I = \frac{n_c}{(1+\theta)} \left(\frac{\rho_g^2}{\rho_l} \right) \sqrt{\frac{2\sigma}{M_w^3 \pi}} \exp\left(-\frac{4\pi r^{*3} \sigma}{3K_b T_g}\right) \quad (8)$$

θ adalah faktor koreksi nonisothermal sebagai berikut [4]:

$$\theta = \frac{2(\gamma-1)}{(\gamma+1)} \frac{\Delta h}{RT_g} \left(\frac{\Delta h}{RT_g} - 0.5 \right) \quad (9)$$

r^* adalah jari-jari kritis Kevin- Helmholtz sebagai berikut [4]:

$$r^* = \frac{2\sigma}{\rho_l RT_g \ln\left(\frac{p_{va}}{p_{sat}}\right)} \quad (10)$$

R adalah konstanta gas dari uap air. Laju pertumbuhan nukleasi $d\bar{r}/dt$ didapat dari jurnal [4] sebagai berikut:

$$\frac{\delta \bar{r}}{\delta t} = \frac{\lambda_g (T_i - T_g)}{(h_g - h_i) \rho_i} \quad (11)$$

T_i adalah temperatur es, T_g adalah temperatur udara, ρ_i adalah densitas es, h adalah enthalpi statis dari kedua fase dan Koefisien perpindahan panas λ_g adalah:

$$\lambda_g = \frac{Nu K_g}{2r} \quad (12)$$

Sedangkan T_i adalah [4]:

$$T_i = T_{sat(p)} - [(T_{sat(p)} - T_g)] \frac{r^*}{r} \quad (13)$$

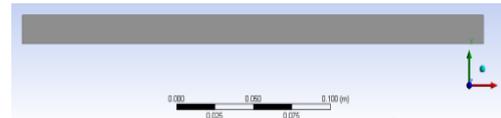
Dengan $T_{sat(p)}$ adalah temperatur saturasi pada tekanan p . Jumlah tetesan es per unit volume dapat diketahui dari persamaan berikut [4]:

$$\eta = \sum_t I(t) \quad (14)$$

Pada perkembangan tetesan es, proses nukleasi dibagi menjadi dua bagian, yaitu pembentukan dan pertumbuhan. Maka laju perpindahan massa (M_{vi}) dari uap air menjadi embun es adalah penjumlahan dari perpindahan massa saat nukleasi dan pertumbuhan dari embun es tersebut [4].

$$M_{vi} = \frac{4}{3} \pi \rho_i I r^{*3} + 4 \pi \rho_i \eta r^2 \frac{\delta r}{\delta t} \quad (15)$$

3.2. Validasi

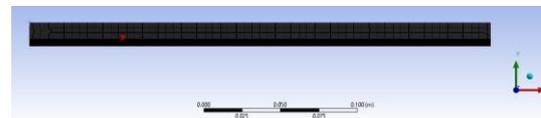


Gambar 1. Geometri validasi.

Suhu plat aluminium dipertahankan pada suhu rendah, T_s , di bawah titik beku. Udara lembab, dengan T_{in} suhu tinggi konstan dan kelembapan relatif, mengalir di atas piring dengan kecepatan di permukaan *inlet*. Panjang pelat adalah 300 mm dan jarak antara pelat dan dinding adiabatik atas adalah 15 mm [4]. Kondisi eksperimental yang digunakan dijelaskan secara singkat sebagai: kecepatan udara masuk dan suhu masing-masing 0,6 m/ s dan 19,8 C; kandungan air *inlet* adalah 0,00827 kg/ kg udara kering dan kelembapan relatif yang sesuai adalah 58%; suhu permukaan dingin pada -20,5 C. Permodelan ini menggunakan *automated mesh* dengan tipe *uniform*. *Maximum face size* mengikuti standar dengan ukuran 4.385e-003 meter. Pada sekitar dinding aluminium diberi perlakuan *inflation* sebanyak 50 *layer* dengan ukuran 1.e-004 meter.

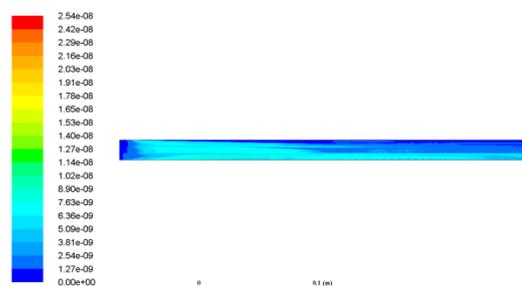
Tabel 1. Jumlah Mesh Validasi.

Ukuran Utama	100 mm
Jumlah node	34046
Jumlah elemen	33479



Gambar 2. Mesh validasi.

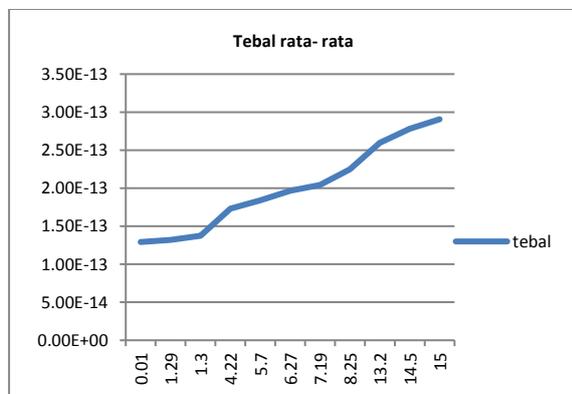
Dari hasil simulasi, diperoleh data baik berupa kualitatif maupun kuantitatif. Data kualitatif berupa kontur dan data kuantitatif berupa plot grafik data yang telah didapatkan akan di pindahkan pada Excel untuk diolah kembali. Kontur *volume fraction* fase 3 yaitu es. Sedangkan, plot *volume integral* dari fase 3 untuk menghitung ketebalan *frost* yang terbentuk.



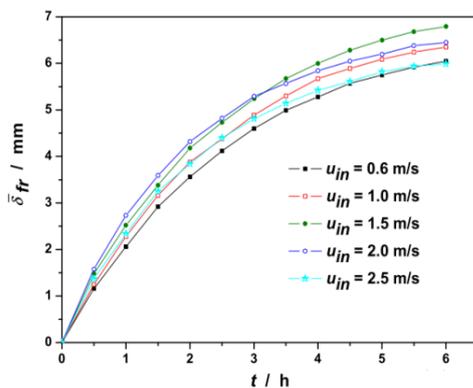
Gambar 3. Hasil kontur fraksi volume fase es.

Pada kontur fraksi volume dapat diambil data berupa volume integral pada *timestep* tertentu. Data volume integral pada *timestep* diperlukan untuk menghitung tebal rata-rata lapisan *frost*. Data

volume integral yang telah didapat akan dikalikan dengan luasan geometri secara keseluruhan untuk mendapatkan nilai volume es total. Kemudian volume es total tersebut dibagi dengan panjang sumbu x untuk mendapatkan tebal rata-rata lapisan *frost* yang muncul pada *timestep* tertentu. Ukuran *timestep* yang digunakan adalah 0,1 detik. Berikut adalah hasil tebal rata-rata lapisan *frost*. Dari gambar 4.a dan 4.b dapat terlihat pada ketebalan es yang tumbuh di atas permukaan plat cenderung semakin tebal dari waktu ke waktu. Selaras dengan grafik ketebalan es dari jurnal [4] yang memiliki trend semakin bertambahnya ketebalan es seiring dengan waktu *flowtime*. Dapat disimpulkan bahwa kedua grafik pada memiliki trend kecenderungan pertumbuhan ketebalan es yang sama. Maka *User Defined Formulation* yang digunakan pada tugas akhir ini dapat dikatakan valid.



Gambar 4.a. Grafik pemodelan validasi



Gambar 4.b. Perbandingan grafik pemodelan dengan jurnal.

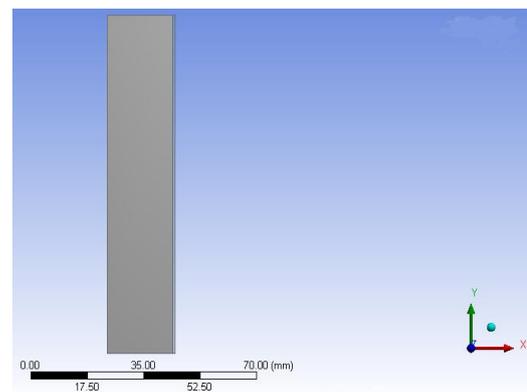
3.3. Variasi

Pada geometri variasi terbagi menjadi 2 zona yaitu zona a sebagai material insulasi, dan zona b sebagai *aluminium jacket* dengan tebal 0.5 milimeter. Tebal zona mengikuti hasil *critical radius* dari masing- masing material insulasi. Pada zona a yakni material insulasi tipe fluida sedangkan zona b tipe solid. Pada kondisi lapangan, insulasi berupa material berpori (*Porous Zone*) yang memiliki kandungan udara pada pori- porinya. Perhitungan *Critical Radius Thickness* pada masing- masing material insulasi diperlukan untuk pemodelan

ketebalan geometri. Detail spesifikasi dan tebal dari material insulasi terdapat pada tabel 2 [1].

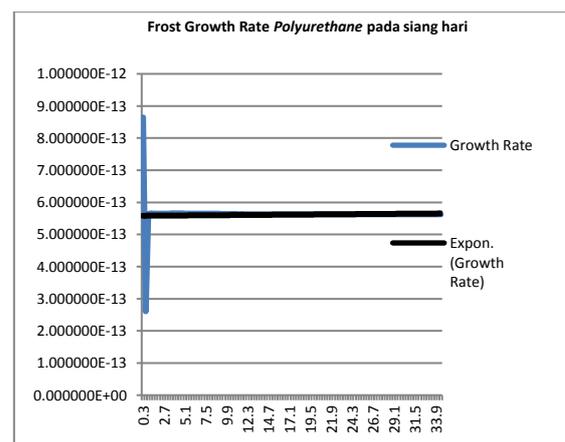
Tabel 2. Detail material insulasi.

No	Material	Cp J/Kg K	Densitas Kg/M3	Konduktivitas W/M K	Tebal (mm)
1	Stainless Steel	500	8000	16.2	
2	Polyurethane	1381	48	0.023	30.06
3	Aerogel	858	20	0.014	20.41
4	Cellular Glass	840	120	0.042	44.9

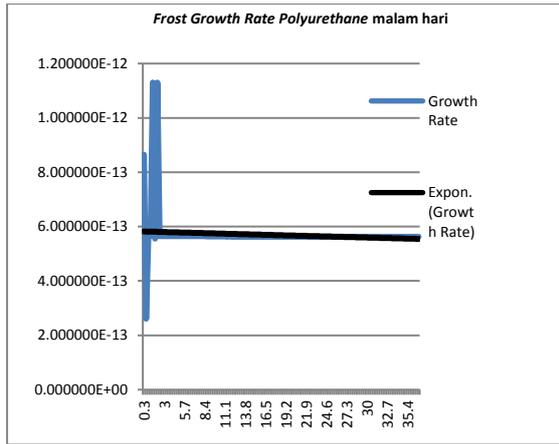


Gambar 5. Geometri variasi

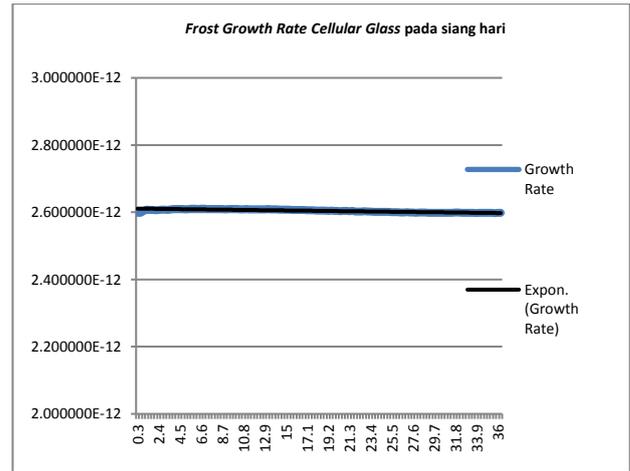
Dari hasil simulasi, diperoleh data baik berupa kualitatif maupun kuantitatif. Data kualitatif berupa kontur dan data kuantitatif berupa plot grafik data yang telah didapatkan akan di pindahkan pada Excel untuk diolah kembali. Kontur *Volume Fraction* fase 3 yaitu es. Sedangkan, plot *Volume Integral* dari fase 3 untuk menghitung ketebalan *frost* yang terbentuk. Simulasi dilakukan dengan dua kondisi operasi yang berbeda, yaitu pada siang hari dan malam hari dengan temperatur dan kelembapan berbeda.



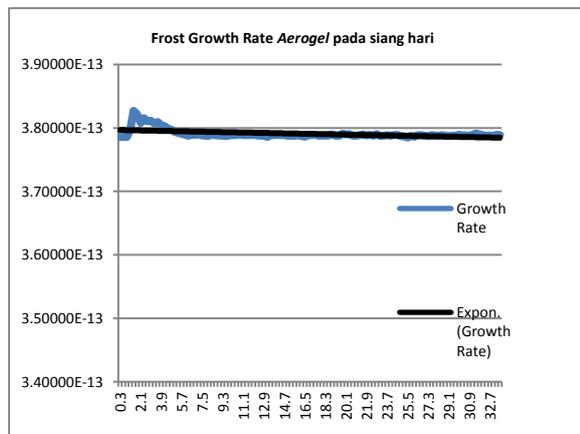
Gambar 6.b. Hasil plot Frost Growth Rate material insulasi Polyurethane pada siang hari.



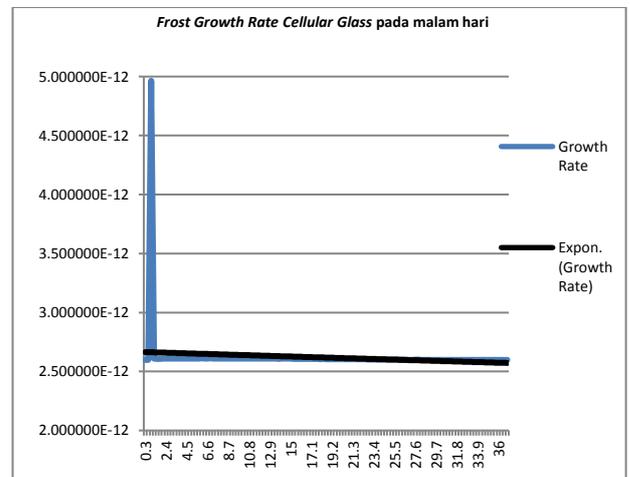
Gambar 6.b. Hasil plot Frost Growth Rate material insulasi Polyurethane pada malam hari.



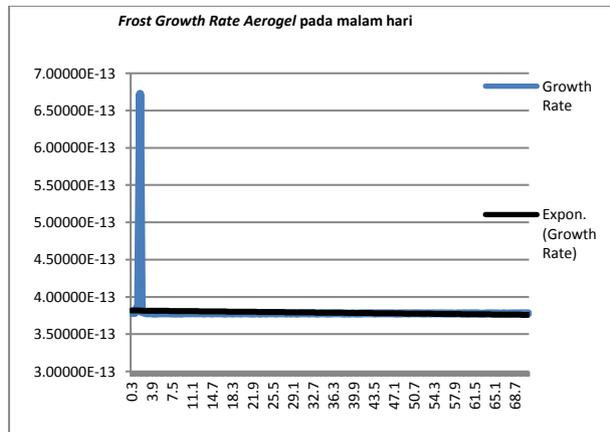
Gambar 8.a. Hasil plot Frost Growth Rate material insulasi Cellular Glass pada siang hari.



Gambar 7.a. Hasil plot Frost Growth Rate material insulasi Aerogel pada siang hari.



Gambar 8.b. Hasil plot Frost Growth Rate material insulasi Cellular Glass pada malam hari.



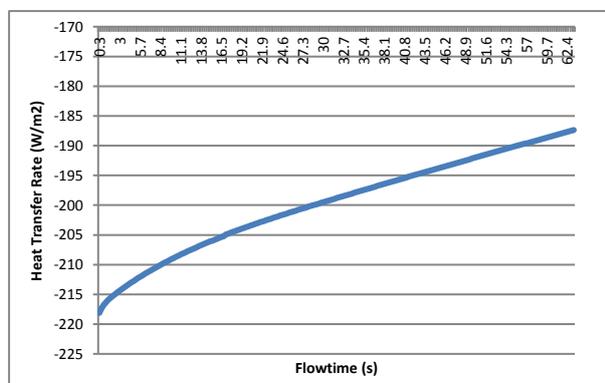
Gambar 7. Hasil plot Frost Growth Rate material insulasi Aerogel pada malam hari.

4. KESIMPULAN

Laju pertumbuhan es pada permukaan pipa sangat bergantung pada ketebalan rata-rata pada *flowtime* tertentu. Perubahan ketebalan rata-rata akan dibagi dengan perubahan waktu yang terjadi. Dari keseluruhan material insulasi didapatkan kesimpulan bahwa semakin lama waktu *flowtime*, laju pertumbuhan es akan semakin berkurang. Hal ini disebabkan lama kelamaan permukaan es akan semakin tebal dan proses laju nukleasi semakin menurun akibat semakin menjauhnya jarak antara fase *water vapour* yang ada di udara dengan permukaan pipa yang dingin. Lama-kelamaan laju nukleasi akan mencapai nilai nol yakni saat es *droplet* tidak lagi terbentuk karena saat udara kering berubah fase menjadi *water vapour*, permukaan *droplet* tidak menyentuh pipa dingin namun permukaan es yang semakin tebal. *Water Vapour Droplet* tersebut kemudian akan menetes turun akibat gravitasi sebelum mampu membentuk *droplet* es. Saat itulah tidak ada penambahan ketebalan es dan laju pertumbuhan es bernilai nol. Dengan metode perhitungan *Critical Thickness insulation*, desain awal yang semula memiliki ketebalan insulasi

sebesar 38,1 mm, didapatkan nilai 30,615 mm untuk material insulasi *Polyurethane*. Hal ini menunjukkan bahwa *frost* akan tetap terbentuk pada permukaan pipa meskipun telah menggunakan material insulasi yang baik dan jauh melebihi nilai *Critical Thickness*. Instalasi insulasi panas tidak akan mampu memblokir udara sekitar untuk masuk ke dalam sela-sela jaket Aluminium. Hal tersebut lumrah terjadi mengingat instalasi sistem insulasi pada jaringan perpipaan tidak mungkin dilakukan secara vakum. Demikian halnya material insulasi pasti memiliki porositas yang dapat menjadi tempat bagi udara terperangkap. Ketebalan es rata-rata pada malam hari lebih tebal dari saat kondisi siang hari. Hal tersebut juga berlaku bagi ketiga material insulasi. Pada malam hari kandungan uap air di dalam udara sekitar lebih besar persentasenya dibandingkan saat siang hari. Kelembapan udara sebagai acuan dari poin ini. Kelembapan yang digunakan pada siang hari adalah 48,3% sedangkan pada malam hari adalah 70,67%. Dari poin tersebut dapat disimpulkan bahwa kelembapan udara sekitar berpengaruh terhadap ketebalan es rata-rata yang terbentuk. Ketebalan es rata-rata kondisi malam hari pada material insulasi *Polyurethane* adalah 1,93X 10⁻¹¹, pada material insulasi *Aerogel* adalah 1,28X 10⁻¹¹, dan pada material *Cellular Glass* adalah 8,82X 10⁻¹¹. Maka pada material insulasi *Cellular Glass* terdapat es paling tebal dibanding material insulasi pada *flowtime* yang sama.

- [2] Bergman, Theodore, Frank Incropera, David P. Dewitt (2011). *Fundamental Of Heat And Mass Transfer* 7th Edition. John Wiley & Sons, Inc. 111 River Street, Hoboken, NJ, US.
- [3] Cao, E. (2010). *Heat Transfer In Process Engineering*. United States of America: McGraw-Hill Companies Inc. 1221 Avenue of the Americas, New York, US.
- [4] Cui, J., Liu W. Z., Liu Y., & Jiang Z. Y. (2011). A New Time and Space-dependent Model for Predicting *Frost Formation*. *Applied Thermal Engineering* 31, 447-457, Shanghai, PR China.
- [5] Holman, J. P., (2010). *Heat Transfer* 10th Edition. McGraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue of the Americas, New York, US.



Gambar 9. Plot Grafik Heat Transfer Rate.

Pada Gambar 9 grafik *Heat Transfer Rate* memiliki trend naik. Dengan nilai mula-mula bernilai negatif akan semakin membesar. Semakin besar nilai *Heat Transfer Rate* semakin kecil nilai *Frost Growth Rate* karena semakin banyak kalor yang masuk dari lingkungan ke sistem. Semakin tebal es, suhu es pada bagian terluar tidak akan serendah suhu pada permukaan pipa.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bahadori, Alireza, (2014). *Thermal Insulation Handbook For The Oil, Gas, and Petrochemical Industries*. Elsevier Inc. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK.