

Studi Numerik Pengaruh Kecepatan Angin terhadap *Critical radius* dan Distribusi Temperatur pada Pipa Uap

Eka Arisma Setyo Nugroho dan Prabowo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: prabowo@me.its.ac.id

Abstrak—Umumnya transmisi uap panas menggunakan pipa dengan diameter yang besar. Pada transmisi uap panas tersebut, kehilangan panas dan penurunan temperatur selalu terjadi. Penambahan insulasi pada pipa uap panas akan sangat menguntungkan, karena akan meminimalkan *heat loss*. Maka perlu dilakukan penelitian guna menentukan *critical radius* dan ketebalan optimum pada pipa uap panas. Pada penelitian ini, proses analisa dilakukan dengan menggunakan software *Gambit* dan *Fluent*. Pada *Gambit* dilakukan pembuatan domain simulasi dan meshing untuk diameter luar pipa sebesar 168 mm dan diameter 30 mm. Kedua, dilakukan penentuan kondisi batas pada kedua ukuran pipa. Ketiga, dilakukan entry properties pada *Fluent*, yaitu variasi kecepatan (1 m/s, 3 m/s, 5 m/s), temperatur uap panas (773 K), temperatur sekeliling (300 K), material pipa dan insulasi serta nilai konduktivitas masing-masing. Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah *critical radius* tidak terjadi pada pipa dengan diameter luar 168 mm. Sedangkan pipa dengan diameter 30 mm, terjadi pada ketebalan insulasi 2 mm. Temperatur permukaan luar pipa tanpa insulasi terendah didapatkan pada kecepatan angin 5 m/s sebesar 755,3 K. *Heat loss* terbesar terjadi pada pipa tanpa insulasi dengan kecepatan angin 5 m/s dan ketebalan insulasi 0 mm sebesar 11953,6 W/m dan terkecil pada kecepatan angin 1 m/s dengan ketebalan insulasi 100 mm sebesar 264,38 W/m. Sedangkan untuk hasil teori, *heat loss* terbesar pada pipa tanpa insulasi dengan kecepatan angin 5 m/s sebesar 11641,74 W/m dan terkecil pada pipa dengan insulasi 100 mm dengan kecepatan angin 1 m/s sebesar 263,77 W/m. Ketebalan optimum dari sumber panas batubara sebesar 38 mm, sumber panas fuel oil sebesar 100 mm dan sumber panas gas alam sebesar 43 mm.

Kata kunci—*critical radius*, distribusi temperatur, *heat loss*, insulasi, ketebalan optimum, pipa uap panas.

I. PENDAHULUAN

UMUMNYA penyaluran uap panas menggunakan pipa dengan diameter yang besar dan mempunyai nilai konduktivitas tertentu serta ditambahkan insulasi pada ketebalan tertentu. Penambahan insulasi ini dimaksudkan untuk meminimalkan *heat loss*. Tentunya hal tersebut berkaitan dengan konsumsi energi. Insulasi biasanya menggunakan satu material atau lebih. Penambahan insulasi ditentukan dari satu material atau kombinasi berbagai material insulasi, temperatur kerja, temperatur sekeliling. Konduktivitas thermal material, ketebalan dan harga insulasi. Penambahan insulasi mempunyai beberapa fungsi diantaranya menghemat energi dengan memperkecil *heat loss*, mengontrol temperatur permukaan untuk kenyamanan, mencegah kondensasi uap panas pada permukaan yang dingin dan meningkatkan efisiensi proses pemanasan dan mencegah

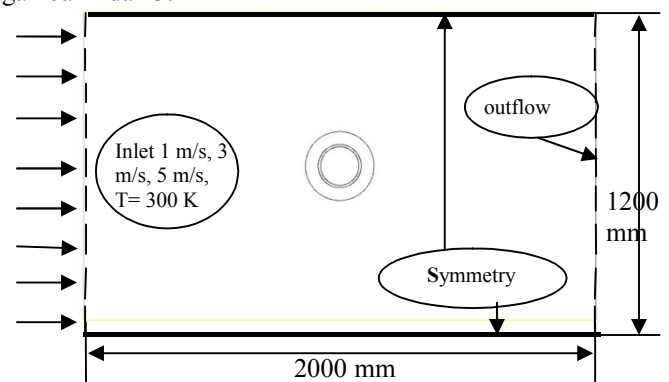
peralatan dari korosi [1]. Penelitian dalam mengembangkan insulasi thermal pada geometri silindris seperti pada pipeline, industri kimia dan *power plant* sering dilakukan. Seperti Ali Kecebas yang melakukan penelitian tentang analisa ekonomi pada pipa uap panas [1]. Dimana menentukan ketebalan optimum dari berbagai sumber panas dan ukuran diameter uap panas yang berbeda. Oemar Kaynakli, melakukan penelitian tentang ketebalan optimum insulasi pada saluran uap panas dengan material insulasi yang berbeda [2]. Alan Steven mempelajari terkait *critical radius* pada pipa dengan diameter dan nilai efisiensi konveksi yang kecil [3].

Dari penelitian tersebut di atas, tentunya untuk menganalisa *critical radius* dan ketebalan optimum diperlukan berbagai aspek. Seperti konduktivitas thermal material insulasi, harga material insulasi, kondisi operasi peralatan dan *heat loss* yang terjadi pada kondisi operasi tersebut.

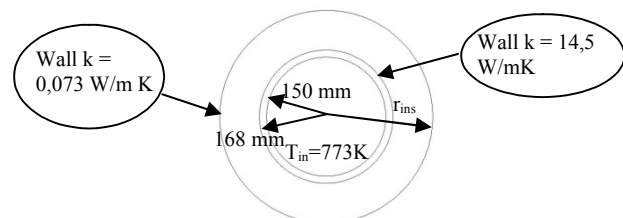
II. URAIAN PENELITIAN

A. Analisa *Heat loss* dengan Simulasi

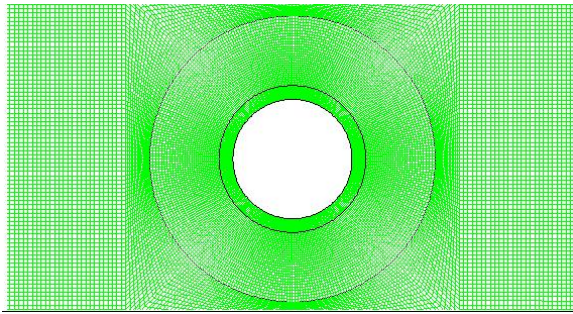
Dari diameter pipa yang ditentukan, dengan software *Gambit*, domain dan meshing dari simulasi seperti pada gambar 1 dan 3.



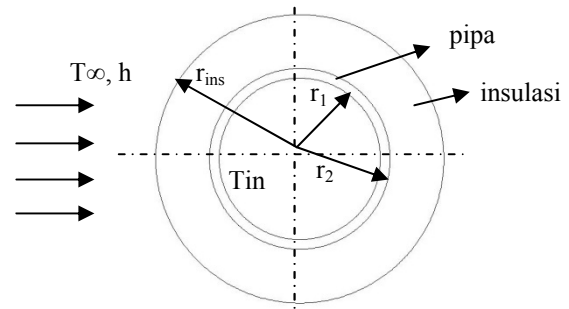
Gambar 1. Domain pada *Gambit*



Gambar 2. Domain pipa dan insulasi pada *Gambit*



Gambar 3 Meshing pipa dan insulasi pada Gambit



Gambar 4 Dimensi pipa uap panas dan insulasi

Domain tersebut dibuat untuk menganalisa nilai dari *heat loss* dengan menggunakan software *Fluent*. Dimana parameter pada *Fluent* ditentukan pada tabel 1.

Tabel 1. Parameter yang ditentukan

$D_{in, pipa}$	150 mm
$D_{out, pipa}$	168 mm
T_{in}	773 K
T_{∞}	300 K
material pipa	steel
k_{pipa}	14,5 W/mK
material insulasi	glass wool
k_{ins}	0,073 W/m2K
Biaya insulasi /mm/m	1,509 \$/m

Tabel 2. Harga, High heating value dan efisiensi dari sumber panas

Sumber panas	Harga Bahan bakar	HHV Bahan bakar	η bahan bakar
Batubara	0.0621 \$/kg	28.03×10^6 J/kg	0.7
Fuel-oil	0.668 \$/kg	41.868×10^6 J/kg	0.8
Gas alam	0.1504 \$/m3	35×10^6 J/m3	0.9

Dari hasil simulasi pada *Fluent*, akan didapatkan nilai dari *heat loss* dan distribusi temperatur akibat dari variasi kecepatan angin dan ketebalan insulasi.

Secara teori nilai dari *heat loss* dan *critical radius* dapat ditentukan oleh analisa perpindahan panas. Perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran fluida. Semakin tinggi kecepatan aliran fluida, nilai koefisien konveksi akan semakin tinggi. Sehingga menyebabkan heat transfer semakin tinggi juga. Secara umum, koefisien konveksi untuk aliran melewati pipa tunggal didapatkan dari persamaan berikut.

$$R_{\phi} = \frac{\rho v D}{\mu} \dots \dots \dots (1)$$

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^{1/3} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

Re_D = Reynolds number, ρ = Massa jenis udara, μ = viskositas dinamik udara, D = diameter luar pipa, v = kecepatan angin, Nu_D = Nusselt number, Pr = Prandelt number, C & m = konstanta.

$$\bar{h} = \frac{\bar{N}u_b \times k}{D} \dots \dots \dots (3)$$

h = koefisien konveksi (W/m²K)

Heat loss yang terjadi pada pipa dengan insulasi untuk pipa uap panas, dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$q = \frac{\Delta T}{R_{tot}} \dots \dots \dots (4)$$

$$q = \frac{T_{in} - T_{\infty}}{R_{tot}} \dots \dots \dots (5)$$

q adalah *heat loss*, T_{in} adalah temperatur uap panas, T_{∞} adalah temperatur udara, R_{tot} adalah *thermal resistance* total akibat konduksi dan konveksi.

Thermal resistance total adalah jumlah dari *thermal resistance* akibat konveksi dan *thermal resistance* akibat dari konduksi untuk setiap lapisan pipa. Pada penelitian ini, *thermal resistance total* untuk pipa tanpa insulasi adalah

$$R_{tot} = \frac{1}{h 2\pi r_2 L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi k p i_j L} \dots \dots \dots (6)$$

Sedangkan untuk pipa dengan insulasi, nilai *thermal resistance* total adalah :

$$R_{tot,ins} = \frac{1}{h 2\pi r_{ins} L} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi k p i_j L} + \frac{\ln(\frac{r_{ins}}{r_2})}{2\pi k i_r L} \dots \dots \dots (7)$$

Dimana h adalah koefisien konveksi udara, k_{pipa} adalah konduktivitas thermal pipa, k_{ins} adalah konduktivitas thermal insulasi, r_1 adalah jari-jari dalam pipa, r_2 adalah jari-jari luar pipa, r_{ins} adalah jari-jari insulasi.

B. Analisa *Critical Radius*

Critical radius dari insulasi terjadi pada nilai *heat loss* yang maksimum atau nilai dari *thermal resistance* total minimum. Dimana saat ditambahkan insulasi, *heat loss* akan naik sampai mencapai maksimum, kemudian akan turun dengan penambahan insulasi. pada nilai *heat loss* maksimum tersebut, itulah nilai dari *critical radius*. Secara teori nilai dari *critical radius* dapat dicari dari persamaan berikut

$$q = \frac{2\pi L (T_1 - T_{\infty})}{\frac{\ln(\frac{r_{ins}}{r_2})}{k i_r} + \frac{1}{h r_{ins}}} \dots \dots \dots (8)$$

Untuk menentukan nilai dari *critical radius*, nilai dari *heat loss* harus maksimum. Dimana kondisi maksimum dari *heat loss* adalah

$$\frac{d \tau}{d r_{ins}} = 0 = \frac{-2\pi L (T_1 - T_\infty) \left(\frac{1}{k_{ins} r_{ins}} - \frac{1}{h r_{ins}^2} \right)}{\left[\ln \left(\frac{r_{ins}}{r_2} \right) + \frac{1}{h r_{ins}} \right]^2} \dots\dots\dots(9)$$

$$r_{cr,ins} = \frac{k_{ins}}{h} \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan 10 mengekspresikan nilai dari *critical radius* dari insulasi. Dimana jika nilai dari radius terluar insulasi kurang dari nilai pada persamaan 10, maka *heat loss* akan naik dengan penambahan insulasi sampai pada $r_{ins} = r_{cr,ins}$ kemudian akan turun dengan penambahan insulasi yaitu $r_{ins} > r_{cr,ins}$.

C. Analisa Ketebalan Optimum

Cara sederhana untuk menentukan ketebalan optimum didapatkan dengan menentukan biaya dari energi yang hilang akibat kehilangan panas selama pembangkit beroperasi dalam satu tahun dan biaya dari penambahan insulasi. Biaya energi akibat kehilangan panas tersebut dapat ditentukan dari persamaan berikut

$$B = \frac{B_{en} 2\pi (T_{in} - T_\infty) N 3600}{\frac{q}{L} \times H_u \times \eta} \dots\dots\dots(11)$$

dimana B_{en} adalah biaya dari sumber energi yang digunakan, N adalah waktu operasi dalam satu tahun (jam). H_u adalah heating value dari sumber panas, η adalah efisiensi dari sumber panas, q/l adalah *heat loss* per satuan panjang. Biaya insulasi per satuan panjang adalah

$$B_{tot,ins} = B_{ins} \times t_{ins} \dots\dots\dots(12)$$

dimana B_{ins} adalah biaya penambahan insulasi per mm per panjang, t_{ins} adalah tebal insulasi. Setelah menghitung biaya energi dan insulasi, biaya total didapatkan dari persamaan berikut

$$C_{tot} = B + B_{tot,ins} \dots\dots\dots(13)$$

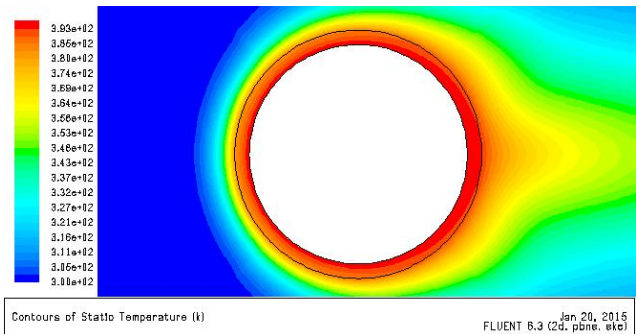
Dimana C_{tot} adalah biaya total \$/m.

Dari data parameter yang ditentukan seperti pada tabel 1, digunakan software *Fluent 6,2* untuk mendapatkan nilai *heat loss* dengan variasi kecepatan angin 1 m/s, 3 m/s dan 5 m/s serta ketebalan insulasi dari 10 mm sampai 100 mm dengan kelipatan 10 mm. kemudian dilakukan analisa untuk mendapatkan *critical radius* dan ketebalan optimum. Dan dilakukan analisa secara teori untuk membandingkan nilai *heat loss* hasil teori dan *heat loss* hasil simulasi.

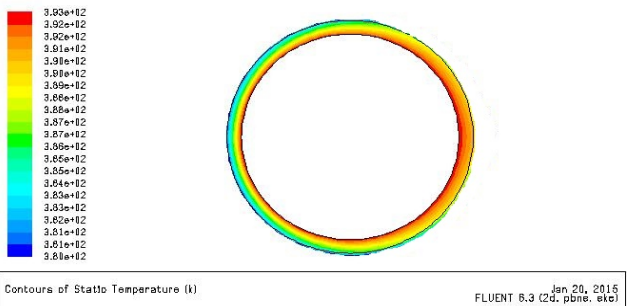
Selain untuk analisa *heat loss*, hasil simulasi digunakan untuk mengetahui distribusi temperatur pada pipa uap tanpa penambahan ketebalan insulasi dan penambahan insulasi.

III. ANALISA DAN PEMBAHASAN

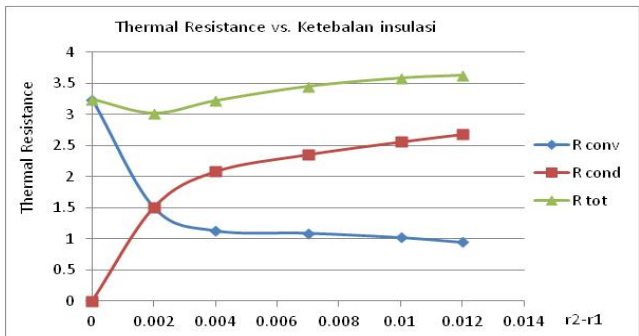
Hasil simulasi untuk pipa dengan diameter 30 mm adalah sebagai berikut



Gambar 5 Kontur distribusi temperatur pada pipa diameter 30 mm



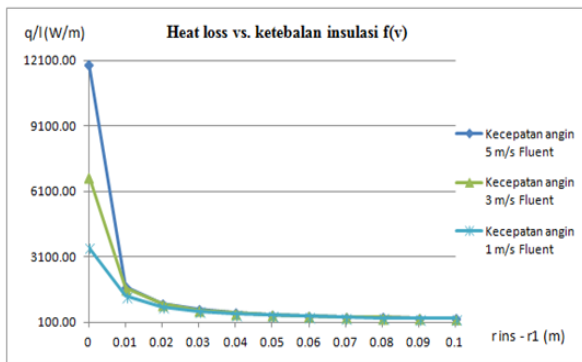
Gambar 6 Kontur distribusi temperatur pada pipa diameter 30 mm



Gambar 7 Thermal resistance konduksi, konveksi dan total pada pipa diameter 30 mm

Dari Gambar 7 terlihat bahwa nilai *thermal resistance* total akan turun dengan penambahan insulasi sebesar 2 mm. Kemudian akan naik jika ditambahkan ketebalan insulasi. pada keadaan thermal resistance total minimum, nilai dari *critical radius* didapat, yaitu pada ketebalan 2 mm. Sehingga nilai dari *critical radius* sebesar $r_{pipa} + \text{ketebalan insulasi} = 17$ mm.

Untuk hasil simulasi pipa dengan diameter dalam 150 mm dengan variasi kecepatan angin 1 m/s, 3 m/s, 5 m/s dan ketebalan insulasi dari 10 mm sampai 10 mm, didapat nilai *heat loss* seperti pada gambar 8 sebagai berikut.



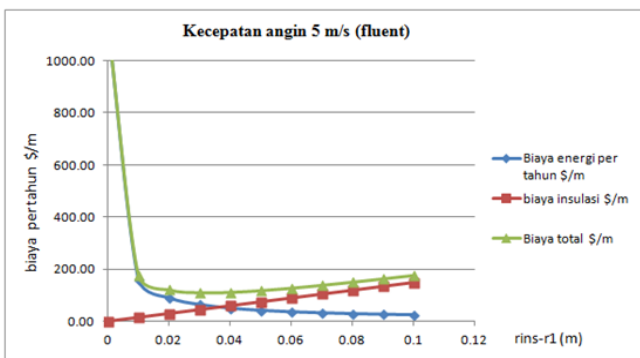
Gambar 8 Pengaruh kecepatan angin terhadap *heat loss* pada pipa tanpa insulasi dan dengan insulasi

Gambar 8 menunjukkan nilai *heat loss* yang semakin turun dengan penambahan insulasi. sesuai dengan persamaan 4 yaitu nilai dari R_{tot} semakin besar sehingga nilai dari q semakin kecil. sedangkan pengaruh dari kecepatan angin ditunjukkan pada pipa tanpa insulasi. Semakin besar kecepatan angin, nilai *heat loss* semakin besar. Sesuai dengan rumus

$$q/L = \frac{(T_{in} - T_{\infty})}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k p i_i} + \frac{1}{h 2\pi r_2}}$$

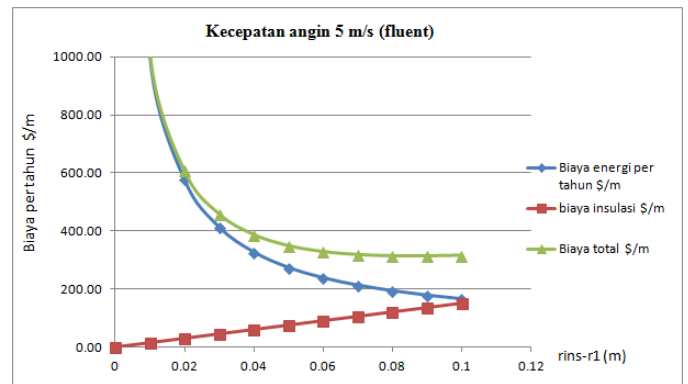
Semakin besar kecepatan angin, *reynolds number* dan *nusselt number* akan semakin besar. Dengan nilai *nusselt number* yang besar, koefisien konveksi (h) akan semakin besar. sehingga nilai *thermal resistance* total akan semakin kecil dan *heat loss* akan semakin besar. *Heat loss* terbesar didapat pada kecepatan angin 5 m/s dengan pipa tanpa insulasi yaitu 11953,6 W/m dan ter kecil pada kecepatan angin 1m/s dengan insulasi 100 mm sebesar 264,38 W/m.

Dari penjelasan terkait *critical radius*, akan terjadi jika dengan penambahan insulasi, nilai *heat loss* akan semakin besar sampai pada ketebalan tertentu akan mencapai maksimum dan kemudian akan turun dengan penambahan insulasi. Sedangkan pada grafik menunjukkan bahwa nilai dari *heat loss* semakin turun. Jadi pada pipa uap panas dengan diameter luar 168 mm, tidak terjadi *critical radius*.



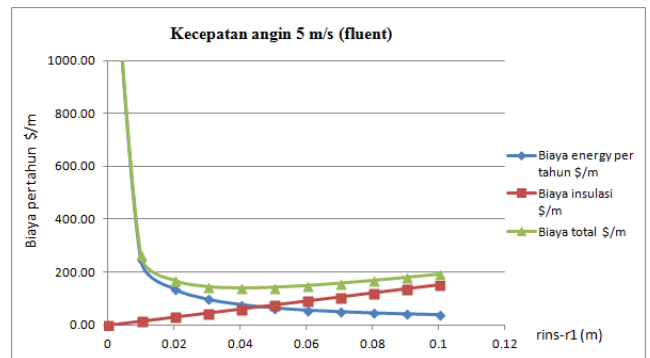
Gambar 9 Biaya insulasi dan energi investment sumber panas batubara dengan kecepatan angin 5 m/s

Dari gambar 9 ketebalan optimum insulasi yang didapat dengan sumber panas batubara sebesar 38 mm. Dengan parameter seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 dan persamaan 11, 12, 13. untuk sumber panas fueloil, ketebalan optimum didapat seperti pada gambar 10.



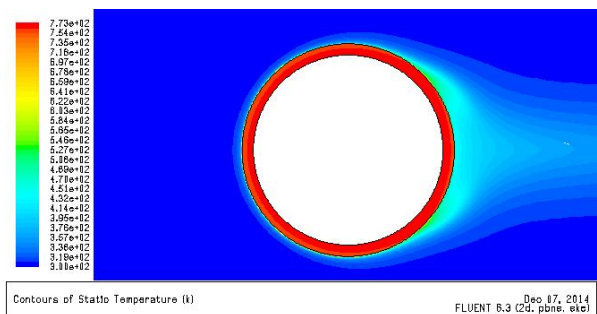
Gambar 10 Biaya insulasi dan energi investment sumber panas *fuel-oil* dengan kecepatan angin 5 m/s

Untuk *heat loss* yang sama, ketebalan insulasi optimum sumber panas *fuel-oil* didapatkan sebesar 100 mm. hasil tersebut didapatkan dengan menggunakan persamaan untuk mencari ketebalan insulasi optimum dari sumber panas batubara. Hal yang berbeda juga didapatkan jika menggunakan sumber panas gas alam. Seperti ditunjukkan pada gambar 11 dimana ketebalan insulasi optimum didapatkan sebesar 43 mm.

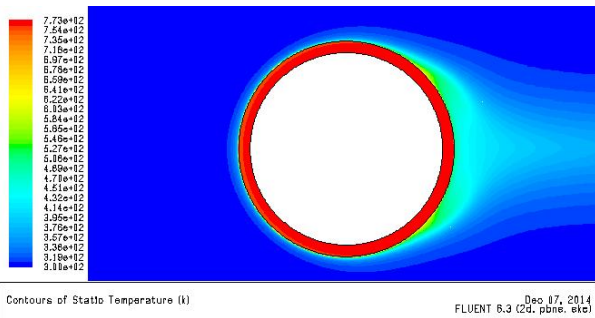


Gambar 11 Biaya insulasi dan energi investment sumber panas gas alam dengan kecepatan angin 5 m/s

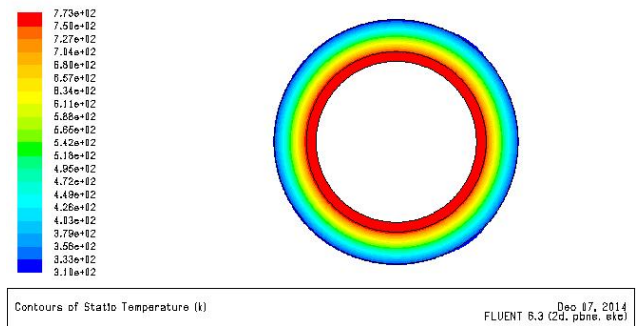
Perbedaan ketebalan optimum dari insulasi dikarenakan harga dari setiap sumber panas berbeda. Semakin tinggi harga dari sumber panas, ketebalan insulasi optimum akan semakin tinggi.



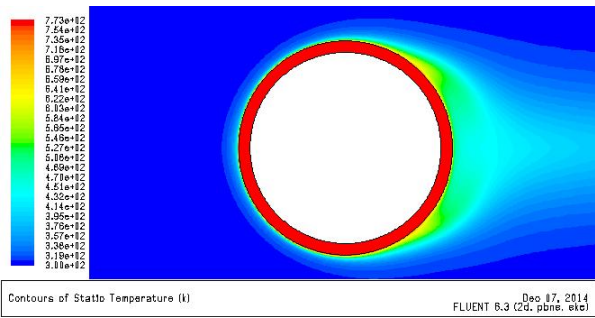
Gambar 12 Kontur distribusi temperatur pada pipa tanpa insulasi dengan kecepatan angin 5 m/s



Gambar 13 Kontur distribusi temperatur pada pipa tanpa insulasi dengan kecepatan angin 3 m/s



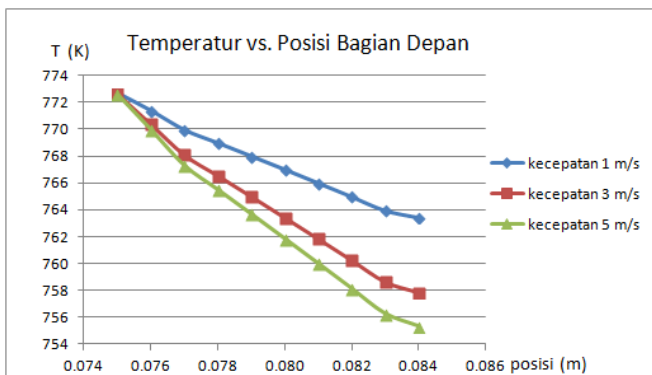
Gambar 16 Kontur distribusi temperatur pada pipa dengan insulasi 30 mm



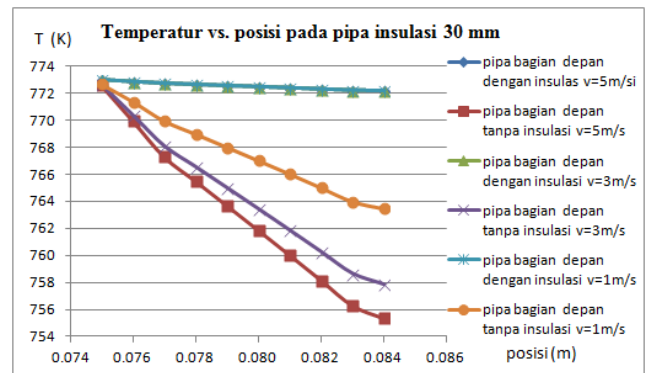
Gambar 14 Kontur distribusi temperatur pada pipa tanpa insulasi dengan kecepatan angin 1 m/s

Dari hasil simulasi gambar 16, terlihat bahwa distribusi temperatur pada bagian insulasi menunjukkan distribusi yang sama. Hal ini dikarenakan nilai dari konduktivitas dari material insulasi jauh lebih kecil dibandingkan efek dari konveksi. Saat diinsulasi nilai temperatur pada diameter terluar pipa sebesar 772 K. jika dibandingkan, nilai temperatur pada pipa tanpa dan dengan insulasi, ditunjukkan pada gambar 17 terlihat jelas perbedaan nilai dari temperatur untuk pipa tanpa insulasi dan dengan insulasi. untuk pipa dengan insulasi, penurunan temperatur pada pipa tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan pipa tanpa insulasi. Perbedaan kecepatan angin, tidak mempunyai pengaruh yang besar untuk pipa dengan insulasi. hal yang sama akan didapat ketika menambahkan ketebalan insulasi. seperti ditunjukkan pada gambar 18.

Dari hasil simulasi seperti pada gambar 12, 13 dan 14, hasil distribusi temperatur diolah dan didapatkan seperti pada gambar 15



Gambar 15 Pengaruh kecepatan angin terhadap distribusi temperatur pada pipa tanpa insulasi



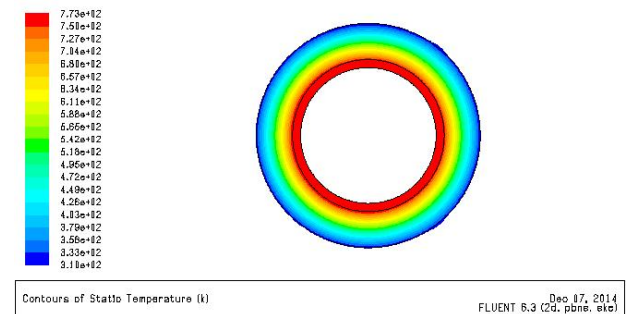
Gambar 17 Pengaruh kecepatan angin terhadap distribusi temperatur pada pipa tanpa insulasi dan dengan insulasi 30 mm

Gambar 15 menunjukkan hasil dari distribusi temperatur pada ketebalan pipa bagian depan ($\theta=0^\circ$). Semakin tinggi kecepatan angin, temperatur permukaan terluar pipa semakin rendah. Hal ini sesuai dengan rumus

$$Q_{konveksi} = Q_{konduksi}$$

$$\frac{(T_1 - T_\infty)}{\frac{1}{h \cdot 2\pi \cdot r_2 \cdot L}} = \frac{(T_{in} - T_1)}{2\pi \cdot k \cdot p \cdot i \cdot L}$$

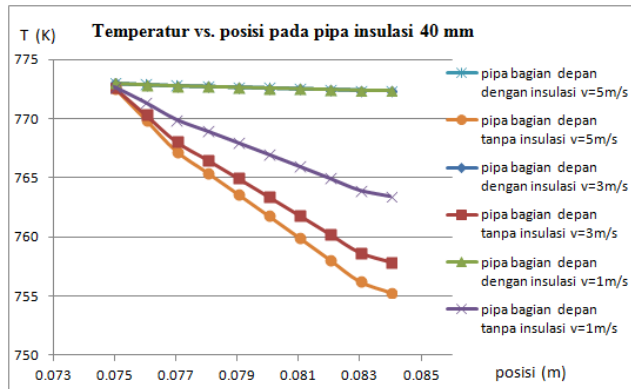
Semakin tinggi kecepatan angin, nilai dari koefisien konveksi (h) akan semakin besar. Sehingga nilai dari $(T_{in} - T_1)$ akan semakin besar. Nilai temperatur permukaan terkecil didapat pada kecepatan angin 5 m/s sebesar 755,34 K.



Gambar 18 Kontur distribusi temperatur pada pipa dengan insulasi 40 mm

Gambar 18 menunjukkan hasil simulasi dari pipa dengan penambahan ketebalan insulasi 40 mm. pola distribusi temperatur menunjukkan pola yang sama dengan ketebalan 30 mm. Tetapi, untuk nilai temperature permukaan luar

menunjukkan hasil yang berbeda. Pada ketebalan insulasi 30 mm, temperature permukaan luar insulasi sebesar 326,79 K. sedangkan pada insulasi 40 mm sebesar 320,53K.



Gambar 19 Pengaruh kecepatan angin terhadap distribusi temperatur pada pipa tanpa insulasi dan dengan insulasi 40 mm

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai dari *critical radius* pada pipa dengan diameter luar 30 mm sebesar 17 mm. sedangkan pada pipa diameter luar 168 mm, tidak terjadi *critical radius*.
2. Semakin rendah kecepatan angin, *Heat loss* akan semakin kecil dan semakin besar ketebalan insulasi, *Heat loss* juga akan semakin kecil. *Heat loss* terbesar terjadi pada kecepatan angin 5 m/s dengan ketebalan insulasi 0 mm sebesar 11953,6W/m. *Heat loss* terkecil terjadi pada kecepatan angin 1 m/s dengan ketebalan insulasi 100 mm sebesar 264,38 W/m.
3. Ketebalan optimum dari insulasi untuk sumber panas batubara sebesar 38 mm, gas alam 43 mm, fuel oil 100 mm.
4. Penurunan temperatur pada pipa dengan insulasi akibat variasi kecepatan angin, tidak terlalu signifikan dan dapat diabaikan tetap yaitu sekitar 772 K.
5. Semakin besar kecepatan angin, temperatur permukaan luar pipa tanpa insulasi akan semakin kecil. Temperatur permukaan luar pipa tanpa insulasi terkecil terjadi pada kecepatan angin 5 m/s, yaitu sebesar 755,3K dan terbesar terjadi pada kecepatan angin 1 m/s, yaitu 763,4K.
6. Semakin tebal insulasi, temperatur permukaan luar insulasi akan semakin kecil. Temperatur permukaan luar terkecil terjadi pada pipa dengan insulasi 100 mm dengan kecepatan angin 5 m/s sebesar 307,68K.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng selaku dosen yang selalu membimbing, memberi motivasi dan banyak masukan yang baik hingga terselesaikannya artikel ilmiah ini. Bapak Ary Bachtiar KP., ST., MT., Ph.D, bapak Dr. Ir. Budi Utomo K.W., ME dan bapak Ir. Kadarisman yang telah memberi banyak motivasi dan masukan untuk kesempurnaan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kecebas, Ali, dkk. Thermo-Economic Analysis of Pipe Insulation for District Heating Piping System. ScienceDirect. Department of Mechanical Engineering Technology Faculty, Afyon Kocatepe University, turkey, 2011
- [2] Kaynakli, Omer. Economic Thermal Insulation Thickness for Pipes and Duct: A Review Study. ScienceDirect. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Uludag, Bursa, Turkey. 2014Febriani.
- [3] Dr Steven, Alan. Steam Pipe Insulation. The Royal Academy of Engineering. International Journal.