

**STUDI EFEK PENDINGINAN EVAPORASI DALAM CEROBONG
DENGAN BERBAGAI JENIS DISTRIBUSI DAN SUDUT
PENYEMPROTAN NOZZLE MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL
FLUID DYNAMIC (CFD)**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I pada
Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik**

Disusun oleh :

EKO BUDI UTOMO

NIM : D.200.110.120

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
2017**

HALAMAN PERSETUJUAN

**STUDI EFEK PENDINGINAN EVAPORASI DALAM CEROBONG DENGAN
BERBAGAI JENIS DISTRIBUSI DAN SUDUT PENYEMPROTAN NOZZLE
MENGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)**

PUBLIKASI ILMIAH

Oleh :

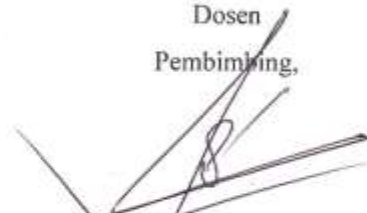


EKO BUDI UTOMO

NIM : D 200 110 120

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen
Pembimbing,



Ir. Sarjito, MT, Ph.D

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI EFEK PENDINGINAN EVAPORASI DALAM CEROBONG DENGAN
BERBAGAI JENIS DISTRIBUSI DAN SUDUT PENYEMPROTAN NOZZLE
MENGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)**

OLEH

EKO BUDI UTOMO

NIM : D.200.110.120

Telah Dipertahankan Didepan Dewan Penguji

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Muhammadiyah Surakarta

Pada Hari Selasa 31 Oktober 2017

Dan Dinyatakan Telah Memenuhi Syarat

Dewan Penguji :

- 1. Ir. Sarjito, M.T., Ph.D**
(Ketua Dewan Penguji)
- 2. Marwan Effendy, ST., M.T., Ph.D**
(Anggota I Dewan Penguji)
- 3. Taurista Perdana Syawitri, ST., MSc.**
(Anggota II Dewan Penguji)

(.....)
(.....)
(.....)



Dekan,


Ir. Sri Sunarjono, M.T., Ph.D
NIK.682



PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam naskah publikasi ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan bertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 3 November 2017



Eko Budi Utomo

D 200 110 120

STUDI EFEK PENDINGINAN EVAPORASI DALAM CEROBONG DENGAN BERBAGAI JENIS DISTRIBUSI DAN SUDUT PENYEMPROTAN NOZZLE MENGGUNAKAN COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC (CFD)

Abstrak

Tujuan penelitian ini adalah untuk melakukan studi efek pendinginan dalam cerobong evaporasi dengan variasi jenis-jenis distribusi semprotan nosel yang terdapat di program ansys, variasi jenis nosel yang terdapat di pasaran terhadap performa pendinginan dalam cerobong dan variasi sudut penyemprotan nosel terhadap distribusi temperatur yang dihasilkan. Penambahan variasi RH dan temperatur udara yang masuk dalam cerobong juga didiskusikan.

Penelitian ini dilakukan melalui pendekatan secara komputasi menggunakan program simulasi Ansys. Ukuran cerobong berdiameter 1 meter dengan panjang cerobongnya 1.5 meter. Kondisi temperatur awal dalam cerobong 30 °C, fluida evaporasi berupa air dengan temperatur 10 °C. Kondisi batas masuk cerobong opening pressure dan kondisi batas keluar cerobong outlet pressure. Jenis distribusi semprotan yang digunakan adalah jenis rosin rammler dan discrete diameter distribution.

Hasil simulasi profil kecepatan, fraksi volume uap air dan lintasan tetesan butiran uap air memiliki kemiripan dengan hasil eksperimen St. George dan Buchlin (1994) dan juga hasil simulasi Gant (2006). Analisis perhitungan teoritis temperatur rata-rata keluar cerobong dilakukan dan memiliki hasil yang sama dengan hasil proses simulasi. Dari proses penelitian diperoleh hasil akhir temperatur rata-rata keluar cerobong 21.47°C untuk nosel jenis BETE PJ32 dengan jenis distribusi semprotan nosel discrete diameter distribution dan sudut penyemprotan 90°.

Kata kunci : pendinginan evaporasi , nosel , sudut penyemprotan.

Abstract

The aim of this research is to study the effect of cooling to temperature distribution in evaporative cooling chimney with variation of distribution model in ansys and cone angle of nozzle. The addition of different types of relative humidity and air inlet temperature is also discussed.

This research is approached by computational method using ansys simulation program. The diameter and the length of chimney are 1 metres and 1.5 metres , respectively. The initial temperature of chimney is 30 °C and the evaporating fluid is water with 10 °C. The entrance boundary condition is opening pressure and outlet pressure for boundary condition of the bottom of chimney. The types of

distribution spray of ansys models are rosin rammler and discrete diameter distribution.

The results of velocity profile, water vapour volume fraction and droplet trajectories were identical with the experiment result by St. George and Buchlin (1996) and the research result by Gant (2006). Theoretical calculation of outlet average temperature was taken and the result was equal with computational method result. The final result of outlet average temperature was 21.47⁰C for nozzle BETE PJ32 with discrete diameter distribution type and 90⁰ of cone angle.

Keyword : evaporative cooling ,nozzle, cone angle.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan primer manusia diantaranya adalah tempat tinggal, untuk mewujudkan hunian yang nyaman manusia memanfaatkan kemajuan teknologi, dimana dalam beberapa tahun terakhir kemajuan teknologi berkembang pesat. Kemajuan teknologi bukan hanya membawa efek positif bagi manusia akan tetapi juga membawa efek negatif, termasuk juga dalam hal kenyamanan sebuah hunian.

Global warming merupakan dampak negatif yang disebabkan oleh meningkatnya temperatur di permukaan bumi. Semakin meningkatnya populasi manusia dan padatnya bangunan-bangunan baik industri maupun tempat hunian di perkotaan mengakibatkan berbagai polusi yang menyebabkan bumi ini mengalami efek rumah kaca, yang mana hal ini sangat mengganggu kenyamanan sebuah bangunan maupun tempat hunian.

Multistage Downdraft Evaporative Cooling Tower (DETC) adalah komponen yang digunakan untuk pengondisian udara pada bangunan dengan memanfaatkan hembusan angin yang melewati bangunan tersebut. Penggunaan komponen ini sangat ramah lingkungan dan tidak bergantung dengan aliran listrik. Seiring berjalannya waktu dilakukan modifikasi pada *downdraft evaporative cooling tower* dengan cara penambahan komponen *water spray nozzle* yang disusun di dalam cerobong agar didapatkan efek pendinginan yang lebih optimal.

Tambahan pengabutan air akan menghasilkan efek pendinginan yang lebih baik daripada hanya menggunakan udara saja.

Single spray cooling system merupakan fenomena aliran dua fase dan mengalami beberapa perlakuan ketika diinjeksikan ke udara termasuk : panas, transfer massa dan momentum. Analisa eksperimen aliran yang kompleks ini sangat mahal biayanya. Hal ini karena banyaknya parameter yang digunakan dan tidak memungkinkan untuk bisa secara independen. Selain itu interaksi fisik antara dua fase sering terjadi pada interval waktu yang sangat kecil dan berada di luar kemampuan peralatan eksperimen yang tersedia. Penggunaan simulasi numerik *Computational Fluid Dynamic*(CFD) memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan cara pendekatan secara eksperimental. CFD mampu mendapatkan data – data yang bisa membantu untuk memahami proses. Selain itu biaya yang dikeluarkan juga tidak semahal ketika melakukan sebuah eksperimen. Dengan cara simulasi ini beberapa dekade terakhir CFD menawarkan kemudahan dan bisa menjadi sebuah solusi dalam sebuah penelitian.

Pada kesempatan ini peneliti melakukan studi kasus jenis-jenis model distribusi yang terdapat di *software* ANSYS, jenis nosel dan variasi sudut semprot nosel terhadap efek pendinginan yang maksimal dan efisien menggunakan metode CFD *software* ANSYS R.15.0. dengan parameter-parameter yang disesuaikan dengan kondisi nyata di lapangan. Hasil simulasi bisa dijadikan acuan dalam perancangan alat apabila nantinya akan dibuat secara nyata.

1.2 Batasan Masalah

Agar penelitian menjadi jelas dan pembahasannya tidak meluas maka di tentukan batasan masalah sebagai berikut :

- 1). Diameter cerobong 1meter dan tinggi 1.5 meter.
- 2). Temperatur awal dalam cerobong 30⁰C.

- 3). Jumlah nosel yang digunakan sebanyak 1buah dan diposisikan di tengah-tengah cerobong.
- 4). Jenis nosel yang digunakan adalah BETE PJ32 dan TF6.
- 5). Fluida yang digunakan adalah udara dan air.
- 6). Kecepatan udara masuk dalam cerobong 10 m/s.
- 7). Variasi sudut semprot 30^0 , 37.5^0 , 60^0 , 90^0 , 120^0 , 150^0 , 180^0 .
- 8). RH 5%,10%,15%,20% dan 25%.
- 9). Komputasi dilakukan dengan pendekatan numerik, menggunakan *software* ANSYS R15.0

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk :

- 1). Menginvestigasi pengaruh dari perbedaan jenis distribusi semprotan nosel terhadap performa pendinginan dalam cerobong.
- 2). Menginvestigasi pengaruh dari perbedaan jenis nosel terhadap performa pendinginan dalam cerobong.
- 3). Menginvestigasi pengaruh variasi sudut semprot nosel terhadap performa pendinginan dalam cerobong.

1.4 Tinjauan Pustaka

Bahadori dkk (1985) membuat sebuah desain untuk meningkatkan kinerja menara angin untuk ventilasi alami dan pendinginan secara pasif. Desain ini mampu memberikan udara ke gedung pada aliran tingkat tinggi. Hal ini juga dapat mendinginkan udara evaporatif untuk menurunkan suhu. Analisis momentum, massa dan energi dilakukan untuk desain yang diusulkan dan hasilnya disajikan dalam bentuk grafis. Desain pertama menggunakan menara angin yang diberikan susunan pendingin evaporasi yaitu dengan air yang disemprotkan dan desain kedua dengan tidak menggunakan pendinginan evaporasi melainkan

memberikan lapisan yang dibasahi pada bagian pintu masuk menara angin sebagai pembandingnya. Dari kedua desain ini diketahui bahwa desain pertama yang menggunakan pendinginan evaporasi jauh lebih baik pada kondisi kecepatan angin yang tinggi. Sedangkan sebaliknya pada desain kedua dengan menggunakan lapisan basah memberikan performa yang lebih menjanjikan pada kondisi kecepatan angin yang rendah.

St. George and Buchlin (1994) melakukan eksperimen tentang efek pendinginan dari semprotan nosel tunggal. Dalam eksperimennya menggunakan sebuah nosel yang ada di pasaran dengan sudut semprot 30^0 dan ditunjang dengan sebuah pompa yang mampu menghasilkan debit $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ air dengan tekanan sebesar 800 kPa. Pompa digerakan dengan motor listrik dengan daya sebesar 1.5 kW dan laju aliran diatur menggunakan pulley yang bervariasi. Beberapa hasil eksperimen yang diperoleh diantaranya profil kecepatan dan sudut semprot yang dihasilkan lebih besar dari desain aslinya yaitu 37.5^0 .

Tambour dan Guetta (2006) melakukan penelitian dengan menggunakan dua jenis nosel yaitu BETE PJ32 dan TF6. Masing-masing nosel diberikan variasi diameter orifice sebanyak 16 macam. Dan dalam penelitian ini didapati bahwa nosel tipe PJ32 menghasilkan semprotan yang lebih baik pada area per unit volume daripada tipe TF6.

Gant (2006) dari *Health and Safety Laboratory* (HSL) UK melakukan penelitian dengan metode simulasi *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Model yang disimulasikan adalah proses pengabutan air menggunakan nosel tunggal dengan sudut semprot 37.5^0 yang diletakan di tengah bagian atas dari sebuah cerobong dengan ukuran $D = 0.5 \text{ m}$ dan $L = 1.5 \text{ m}$, diameter dari *orifice* nosel $d_o = 0.00625 \text{ m}$. Pengukuran dilakukan dengan cara meletakkan sebuah penampang di masing-masing ketinggian 0.25, 0.45, 0.65, 0.85, 1.05 m dari letak ujung nozle,

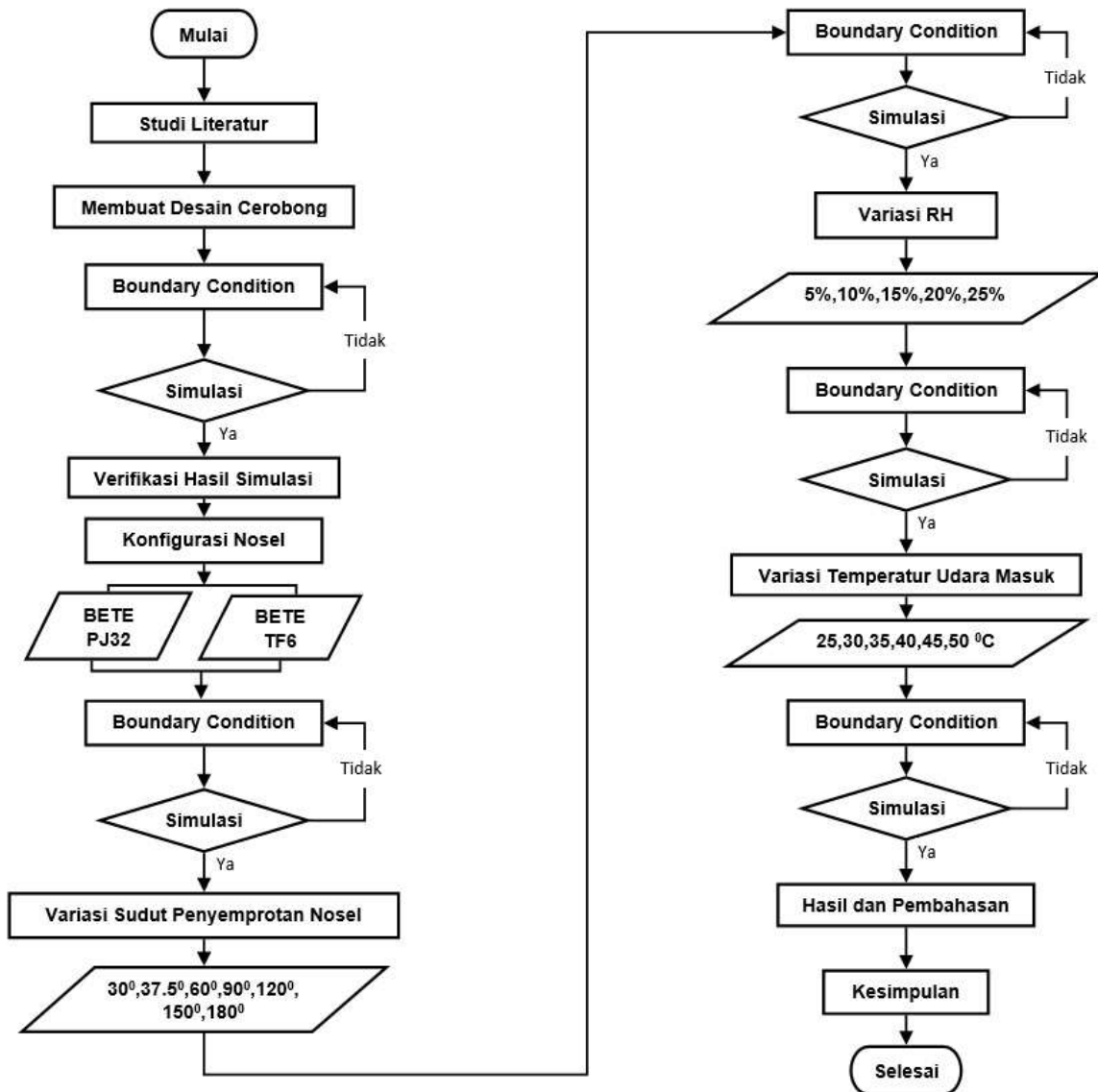
dan diperoleh profil kecepatan yang kemudian di bandingkan dengan hasil penelitian St. George and Buchlin yang hasilnya ternyata identik.

Sarjito (2012) melakukan sebuah penelitian dengan metode simulasi CFD. Penelitian menggunakan desain cerobong yang dimodifikasi dengan diameter = 3m dan panjang = 4m dengan nosel tunggal yang diletakan di tengah bagian atas cerobong yang mana sebelumnya desain ini di verifikasi dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Gant dan St. George and Buchlin. Sudut semprot nosel 37.5° diameter lubang nosel 0.00625 m dengan kecepatan injeksi 16.2m/s. Dari penelitian tersebut diperoleh temperatur minimum sebesar 14°C .

Dari penelitian tersebut akan dikaji dan dilakukan studi penelitian tentang efek pendinginan dalam cerobong dengan berbagai jenis distribusi pada program simulasi ansys dan berbagai jenis sudut penyemprotan nosel. Karena efek pendinginan yang dihasilkan oleh variasi jenis distribusi dan sudut penyemprotan nosel belum diketahui pada penelitian sebelumnya.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Diagram alir penelitian

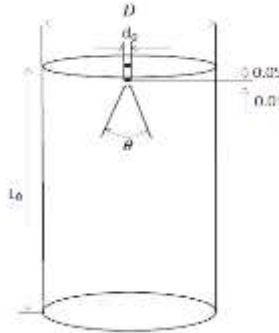


Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2 Langkah penelitian

- 1).Langkah pertama adalah penelitian dimulai.
- 2).Dilanjutkan studi literatur yang bersumber dari jurnal dan hasil-hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya yang memiliki ke-identikan dengan penelitian yang dilakukan sekarang.
- 3).Selanjutnya adalah proses desain cerobong dan nosel dengan menggunakan *Software Solid Work Premium 2014*.
- 4).Setelah itu dilakukan *setting boundary condition* pada *CFD Ansys 15.0* kemudian dilakukan simulasi dan di tindaklanjuti dengan verifikasi terhadap hasil penelitian oleh St. George and Buchlin dan Gant.
- 5).Simulasi selanjutnya dilakukan dengan menggunakan 2 tipe nosel yang berbeda yaitu BETE PJ32 dan TF6, dan dari hasil simulasi dipilih jenis nosel yang menghasilkan performa pendinginan yang paling baik.
- 6).Kemudian tahap simulasi berikutnya dilakukan dengan menggunakan variabel perbedaan sudut semprot nosel, dan dari hasil simulasi dipilih sudut penyemprotan nosel yang menghasilkan performa pendinginan yang paling optimal.
- 7).Pada tahapan selanjutnya digunakan variasi RH dan dilakukan langkah simulasi, dan dari hasil simulasi dipilih tingkat RH yang mempunyai performa pendinginan yang paling baik.
- 8).Terakhir dilakukan variasi temperatur udara masuk dan dari simulasi diperoleh hasil paling optimal yang nantinya akan dipilih.
- 9).Dari simulasi yang dijalankan didapatkan hasil yang paling optimal yang kemudian dilakukan analisa dan penarikan kesimpulan dari semua hasil simulasi yang dilakukan.
- 10). Penelitian telah selesai.

2.3 Geometri cerobong dan nosel



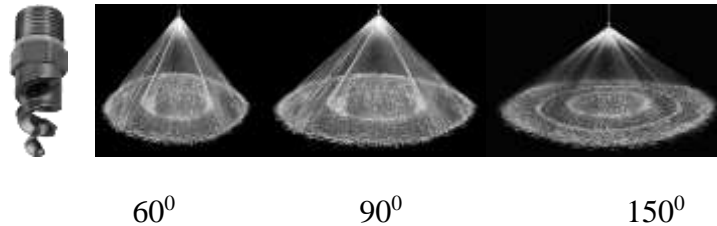
Gambar 2. Geometri Cerobong dan Nosel

Proses ini pembuatan desain benda kerja cerobong dan nosel yang akan digunakan dalam penelitian. Hal yang harus diperhatikan pada tahapan ini adalah ukuran dari benda kerja, mengingat hal ini nantinya akan berpengaruh terhadap tahapan-tahapan selanjutnya dan juga hasil perhitungan dari proses simulasi. Dalam penelitian ini peneliti menggunakan referensi dari desain cerobong hasil penelitian Sarjito (2012) yang juga meneliti tentang efek pendinginan *single spray nozzle* terhadap cerobong vertikal. Dalam prakteknya kami membuat 2 buah cerobong yang ukurannya sama, hal ini dimaksudkan dalam proses simulasi nantinya menggunakan 2 buah nosel yang berbeda. Dan ukuran benda kerja yang akan digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut :

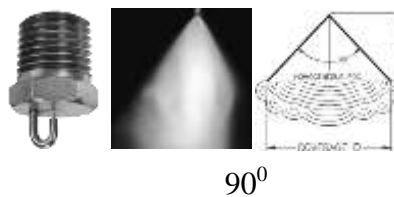
- 1). Ukuran cerobong, diameter cerobong (D) = 1 meter dan panjang cerobong (L_0) = 1,5 meter
- 2). Ukuran nosel, diameter lubang nosel (d_0) = 0,00625 meter, dan panjang nosel (l) = 0,05 meter.
- 3). Posisi semprotan nosel diberikan jarak 0.001 meter dari ujung nosel.

2.4 Konfigurasi nosel

Dalam penelitian ini menggunakan 2 jenis nosel yang berbeda yaitu BETE PJ32 dan TF6. Didalam cerobong vertikal terdapat 1 nosel yang terletak di bagian tengah atas dari cerobong.



Gambar 3. Karakteristik semprotan nosel TF6



Gambar 4. Karakteristik semprotan nosel PJ32

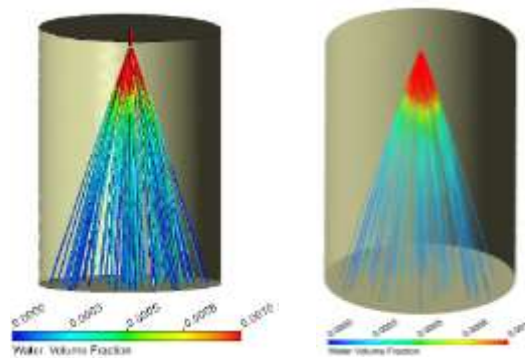
Nosel jenis TF6 memiliki keunggulan kecepatan debit yang tinggi dengan karakteristik semprotan dengan atomisasi yang halus, selain itu juga tersedia dalam berbagai macam jenis sudut semprot dan *mass flow rate*. Sedangkan nosel jenis PJ32 memiliki keunggulan efisiensi energi yang tinggi dan menghasilkan karakteristik semprotan dengan kabut yang paling halus untuk jenis nosel tipe *direct pressure*, pola semprotan yang dihasilkan berbentuk kerucut.

Baik pada nosel jenis BETE PJ32 maupun TF6 digunakan dua jenis diameter lubang semprot nosel yang berbeda dan besarnya yakni 0,000813 m dan 0,00238 m. Sedangkan laju aliran massa air yang di injeksikan yaitu = 0,012 kg/s dan 0,0096 kg/s. Dari kedua jenis diameter lubang semprot dan laju aliran massa tersebut nantinya akan diambil hasil yang paling optimal terhadap efek pendinginan

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1 Verifikasi Hasil Penelitian

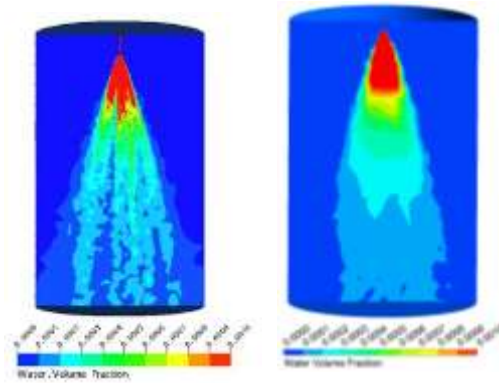
Hasil awal yang diperoleh akan diverifikasikan dengan hasil penelitian St.George dan Buchlin (1994) serta Gant (2006). Hal ini dimaksudkan untuk memastikan benda kerja layak dan sesuai untuk dilakukan tahap simulasi selanjutnya. Adapun hasil penelitian yang diverifikasi terhadap penelitian Gant (2006) meliputi : *contour of water vapour volume fraction, droplet trajectories*. Sedangkan hasil dari profil kecepatan diverifikasikan terhadap penelitian yang pernah dilakukan St. George and Buchlin (1994).



(a) Gant ,2006 (b) Hasil Simulasi CFD

Gambar 5. Droplet trajectories

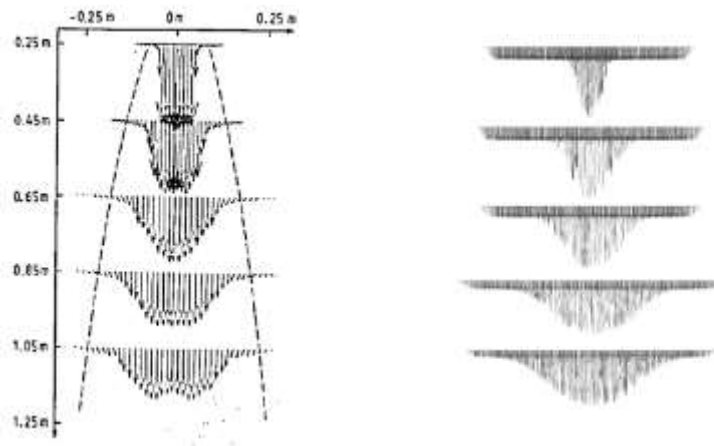
Dari gambar 5 terlihat *droplet trajectories* hasil dari penelitian menunjukkan hasil yang identik dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Gant (2006). *Droplet Trajectories* merupakan lintasan/ jalur yang dilalui oleh butiran-butiran air yang disemprotkan dari nosel. Skala pada *legend* diseragamkan yaitu 0.0000-0.0010 dan menggunakan jenis distribusi Rossin rammler.



(a) Gant, 2006 (b) Hasil Simulasi CFD

Gambar 6. Water vapour volume fraction

Pada gambar 6 terlihat bahwa *water vapour volume fraction* hasil dari penelitian menunjukkan hasil yang identik dengan yang pernah dilakukan Gant (2006). *Water vapour volume fraction* adalah kontur untuk fraksi volume hasil dari proses pengabutan campuran air dan udara sekitar yang dilakukan nosel. Hasil dari proses pengabutan ini sangat penting, karena untuk memaksimalkan efek pendinginan maka butiran-butiran partikel yang dihasilkan dari nosel sebisa mungkin berbentuk kabut yang sangat halus.

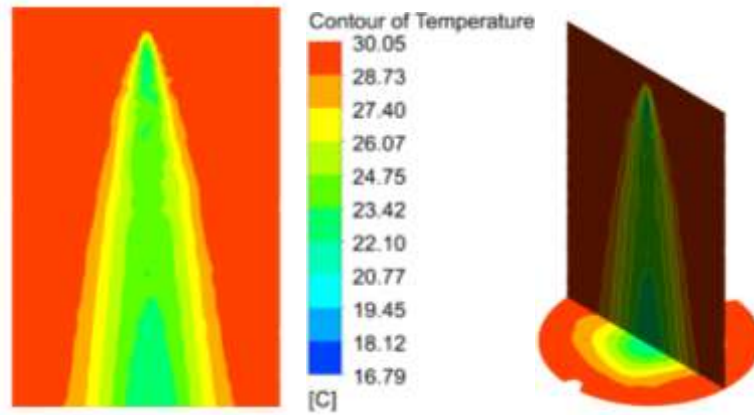


(a) St. George dan Buchlin,1994 (b) Hasil Simulasi CFD

Gambar 7. Profil kecepatan

Dalam cerobong diberikan 5 buah plane ZX axis dan jarak *axial* dari *nozzle* yang digunakan adalah 0.25 , 0.45 , 0.65 , 0.85 , 1.05 dan 1.25 meter.

Gambar 7 menunjukkan perbandingan profil kecepatan udara dalam cerobong. Terlihat bahwa dari profil kecepatan udara antara hasil eksperimen St. George and Buchlin dengan hasil simulasi memiliki kemiripan.

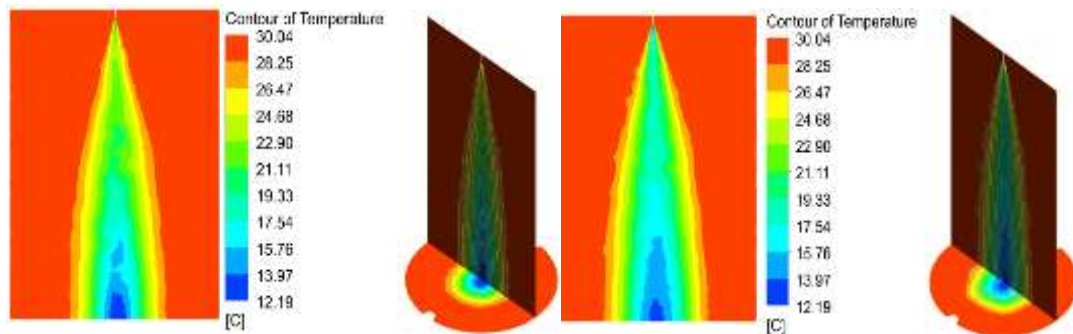


Gambar 8. Kontur temperatur hasil simulasi jenis Rossin rammler

Dari kontur temperatur diatas diketahui bahwa temperatur terendah yang dapat dicapai adalah $16,79^{\circ}\text{C}$. Sedangkan temperatur rata-rata adalah sebesar $29,17^{\circ}\text{C}$.

3.2 KONFIGURASI NOSEL

a. Nosel PJ32



(a) laju aliran massa air 0.012 kg/s

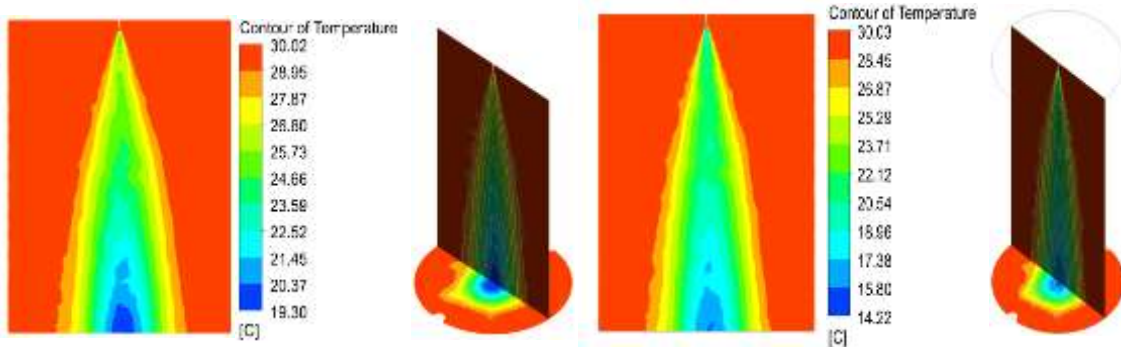
(b) laju aliran massa air 0.096 kg/s

Gambar 9. Kontur Temperatur Nosel PJ32

Dari simulasi yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa temperatur terendah yang dapat dicapai nosel PJ32 pada laju aliran massa air 0.012 kg/s

sebesar 15.47°C dan temperatur rata-rata sebesar 29.32°C . Pada laju aliran massa air 0.096 kg/s diperoleh temperatur terendah sebesar 12.19°C dan temperatur rata-rata 28.93°C .

b. Nosel TF6



(a) Laju Aliran Massa Air 0.012 kg/s

(b) Laju Aliran Massa Air 0.096 kg/s

Gambar 10. Kontur Temperatur Nosel TF6

Dari simulasi yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa temperatur terendah yang dapat dicapai nosel TF6 pada laju aliran massa air 0.012 kg/s sebesar 19.3°C dan temperatur rata-rata sebesar 29.47°C . Pada laju aliran massa air 0.096 kg/s diperoleh temperatur terendah sebesar 14.22°C dan Temperatur rata-rata sebesar 29.07°C .

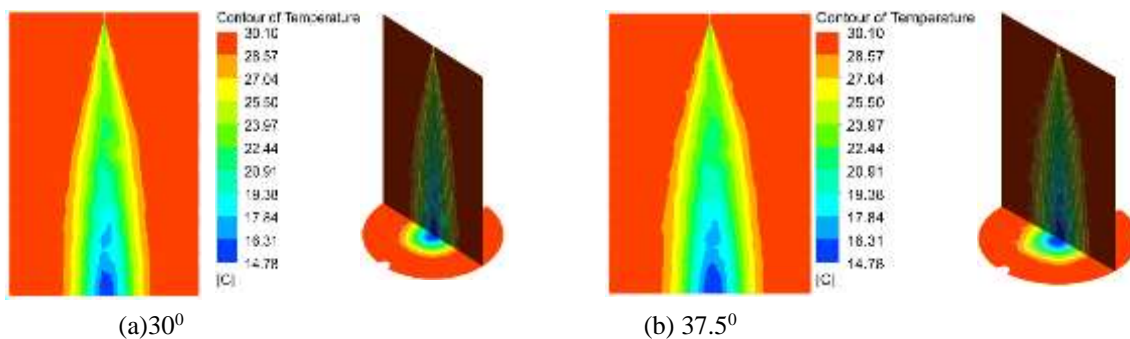
Tabel 1. Perbandingan jenis nosel BETE PJ32 dan TF6

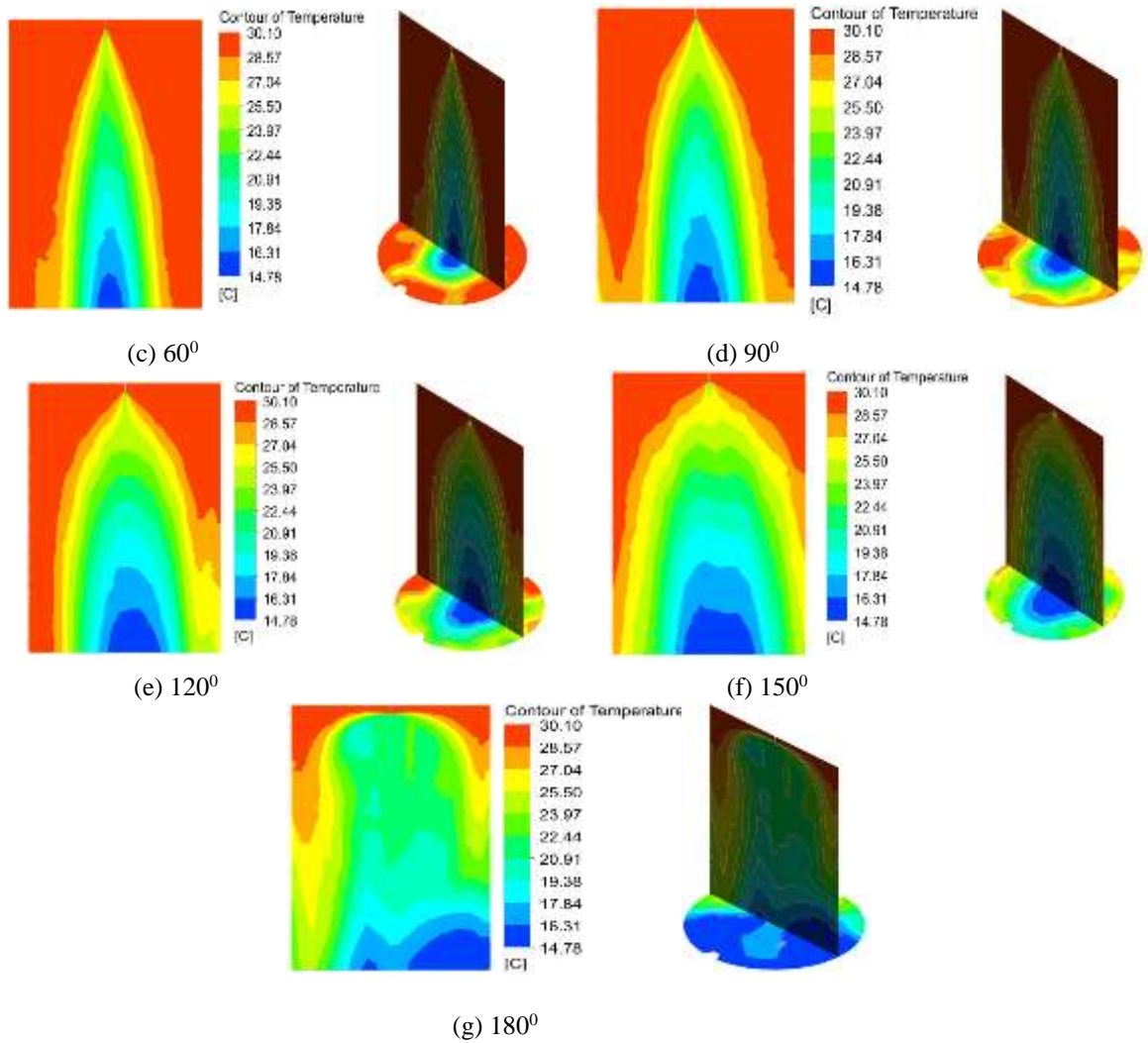
Jenis Nose l	Temperatur Awal Dalam Cerobong ($^{\circ}\text{C}$)	Laju aliran massa Air (kg/s)	Kecepatan Injeksi (m/s)	Diameter Lubang Nosel (m)	Temperatur rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatur Terendah ($^{\circ}\text{C}$)
PJ32	30	0.012	23.16	0.000813	29.32	15.47
TF6	30	0.012	23.16	0.000813	29.47	19.3
PJ32	30	0.096	21.57	0.00238	28.93	12.19
TF6	30	0.096	21.57	0.00238	29.07	14.22

Dari data table 1 terlihat bahwa performa nosel PJ32 lebih baik daripada nosel jenis TF6. Baik temperatur terendah maupun temperatur rata-rata yang dicapai. Hal ini dikarenakan nosel PJ32 memiliki capaian temperature terendah dan temperature rata-ratanya lebih baik daripada nosel jenis TF6. Nosel jenis PJ32 dipilih untuk studi penelitian pada tahap selanjutnya.

3.3 VARIASI SUDUT PENYEMPROTAN NOSEL

Variasi sudut semprot yang digunakan dalam simulasi ini adalah 30° , 37.5° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° . Dan berikut adalah hasil dari simulasi studi variasi sudut yang telah dilakukan :





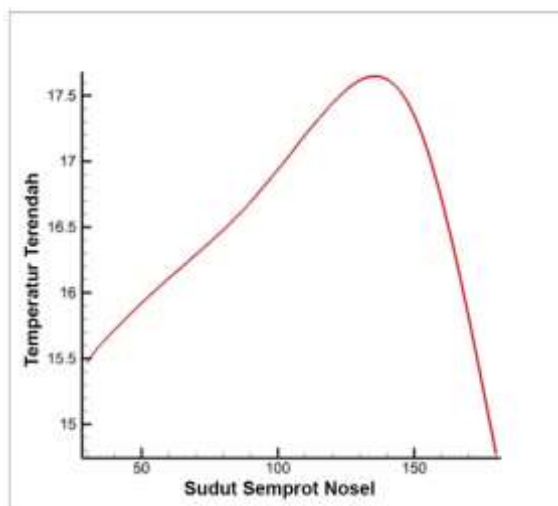
Gambar 11. Kontur temperatur variasi sudut penyemprotan nosel

Pada plot kontur Gambar 11 terlihat distribusi temperatur yang terjadi di dalam cerobong. daerah yang berwarna merah merupakan daerah yang memiliki temperatur lebih tinggi, sebaliknya daerah dengan temperatur rendah diwakili daerah yang berwarna biru. Sudut semprot 90° yang mana merupakan sudut semprot yang didesain pabrikan untuk nosel jenis PJ32 ini memiliki hasil semprotan yang cukup merata walaupun ada sedikit spot yang berwarna merah.

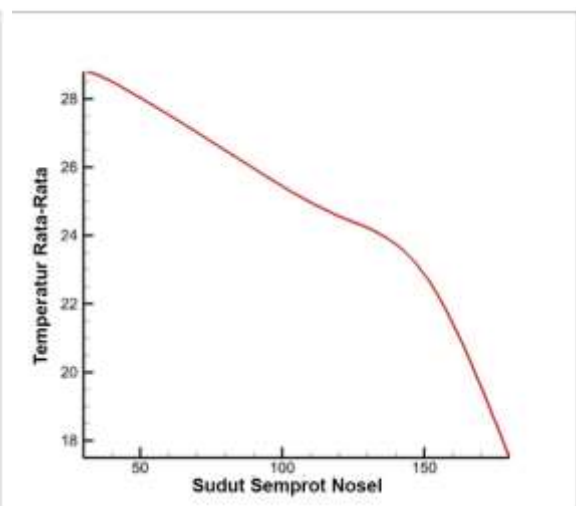
Hal yang menarik terjadi pada sudut semprot 150⁰ yang memiliki hasil semprotan yang menjanjikan serta capaian temperatur rata-ratanya lebih bagus dari sudut semprot yang didesain oleh pabrik. Pada sudut semprot 180⁰ meskipun banyak daerah yang berwarna biru namun hasil semprotan menabrak dinding dan membuatnya tidak relevan untuk desain cerobong dengan diameter 1m.

Tabel 2. Tabel temperatur dan variasi sudut semprot

Sudut Semprot Nosel	Temperatur Terendah	Temperatur rata-rata
	C	C
30 ⁰	15.467	28.788
37.5 ⁰	15.66	28.605
60 ⁰	16.11	27.533
90 ⁰	16.69	25.964
120 ⁰	17.444	24.562
150 ⁰	17.348	22.869
180 ⁰	14.775	17.499



(a) Temperatur Terendah



(b) Temperatur Rata-rata

Gambar 12. Grafik temperatur terhadap besarnya sudut semprot nosel

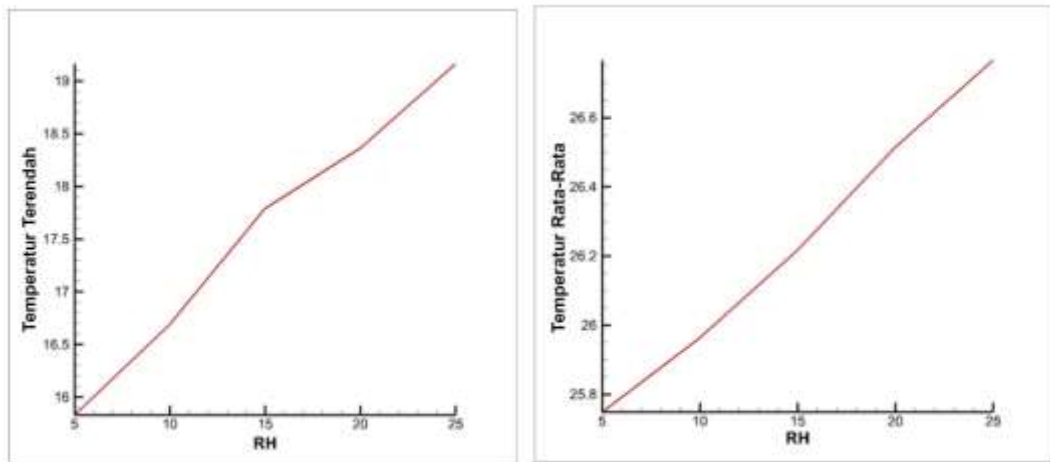
Dari tabel 2 dan gambar 12 didapati hasil temperatur terendah yang paling optimal dihasilkan oleh sudut semprot Nosel 180⁰ yaitu sebesar 14.775 °C, begitu juga dengan temperatur rata-ratanya yaitu sebesar 17.499 °C. Namun hasil semprotan yang dihasilkan kurang bagus sebagaimana yang terlihat pada kontur temperatur . sudut semprot 150⁰ dengan tempratur rata-rata 22.87 °C dinilai sebagai hasil yang lebih relevan. Sedangkan sudut semprot 90⁰ yang merupakan desain asli PJ32 menghasilkan temperatur rata-rata 25.96 °C dan temperatur terendahnya 16.69 °C. Sudut inilah yang nantinya akan dipilih untuk studi pengembangan variasi pada tahap selanjutnya.

3.4 VARIASI RH%

Variasi RH% yang diberikan adalah (5,10,15,20,25) %. Dan berikut adalah hasilnya :

Tabel 3. Tabel RH% dan temperatur

RH%	Temperatur Terendah	Temperatur Rata-rata
5	15.83	25.75
10	16.69	25.96
15	17.79	26.22
20	18.36	26.51
25	19.16	26.77



Gambar 13. Grafik temperatur terhadap variasi RH%

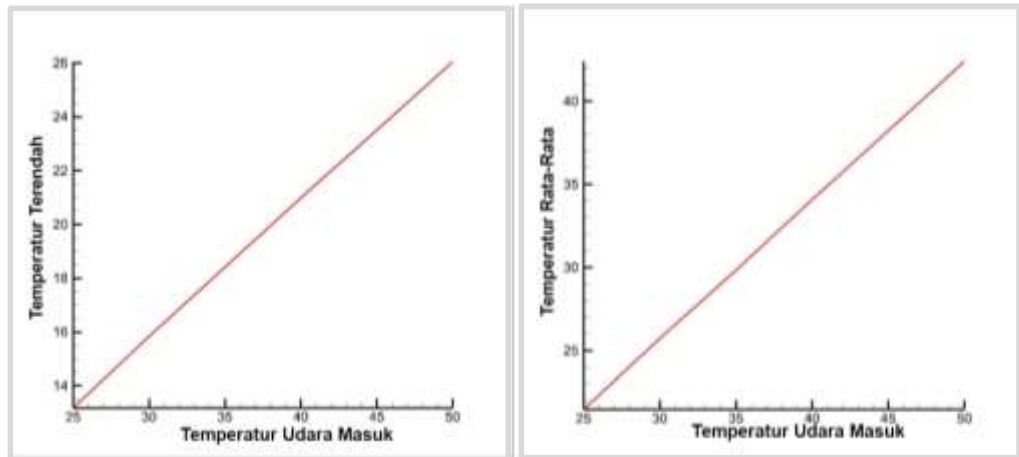
Temperatur terendah optimum dihasilkan dari variasi RH 5% yaitu 15.83 °C, begitu pula dengan temperatur rata-ratanya yaitu 25.75 °C. Hal ini dikarenakan semakin besar RH maka semakin besar pula kandungan uap air pada udara tersebut, sehingga efek pendinginan yang diberikan oleh semprotan nosel kurang berpengaruh.

3.5 VARIASI TEMPERATUR UDARA MASUK

Variasi temperatur udara masuk yang diberikan adalah (25,30,35,40,45,50) °C. Dan berikut adalah hasilnya :

Tabel 4. Tabel variasi temperatur udara masuk

Temperatur Udara Masuk	Temperatur Terendah (°C)	Temperatur Rata-rata (°C)	% Penurunan Temperatur
25	13.18	21.47	14.11
30	15.83	25.75	14.17
35	18.41	29.85	14.7
40	20.97	34.1	14.8
45	23.5	38.21	15.1
50	26	42.38	15.23

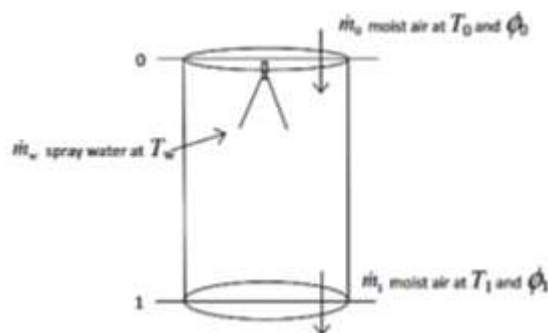


Gambar 14. Grafik temperatur terhadap variasi temperatur yang dihasilkan

Terlihat pada tabel temperatur terendah optimal didapat dari variasi temperatur udara masuk 25°C yaitu 13.18°C . Begitu pula dengan temperatur rata-rata optimum yang dihasilkan adalah 21.47°C . Besarnya presentase penurunan temperatur dalam cerobong berkisar 14% sampai 15% dari temperatur awal masuk cerobong. Semakin besar kenaikan temperatur udara masuk, semakin besar pula prosentase penurunan temperatur yang terjadi.

3.6 ANALISIS PERHITUNGAN

Analisis perhitungan dilakukan untuk membandingkan hasil dari perhitungan menggunakan CFD dengan perhitungan menggunakan teori yang ada. Investigasi dilakukan untuk mengetahui penurunan suhu yang terjadi akibat efek pendinginan evaporasi.



Gambar 4.11 Sistem Aliran Massa Pada Cerobong Evaporasi
(Sarjito, 2012)

Rasio kelembaban dan *mass fraction* uap air dijelaskan oleh Stoecker dan Jones (1982).

$$W = \frac{R}{R_w} \times \frac{P_w}{P_{atm} - P_w} = \frac{mf}{1 - mf}$$

- W : rasio kelembaban (kg/kg)
 R : konstanta udara (287 J/kg.K)
 R_w : konstanta uap air (461 J/kg.K)
 P_{atm} : tekanan atmosfer (101325 Pa)
 P_w : tekanan uap air = $\phi \times P_{sat}$
 ϕ : kelembaban relatif udara
 P_{sat} : tekanan saturasi air
 mf : *mass fraction* uap air
 $P_w = \phi \times P_{sat}$, P_{sat} (Pa) maka :

$$W = \frac{0.6219 \cdot \phi \cdot P_{sat}}{101325 - \phi \cdot P_{sat}}$$

P_{sat} Dihitung menggunakan persamaan Antoine :

$$P_{sat} = 10^5 \cdot \exp\left(A - \frac{B}{T + C}\right)$$

- A : konstanta $5.11564 \cdot \ln(10) = 11.7792$
 B : konstanta $1687.54 \cdot \ln(10) = 3885.7$
 C : -42.92
 T : temperatur awal dalam cerobong $30^\circ\text{C} = 303.2 \text{ K}$

Kelembaban relatif udara (ϕ) dapat dicari dengan rumus berikut :

$$\phi = \frac{1.01325 \cdot W}{(0.6219 + W) \cdot P_{sat}} = \frac{1.01325 \cdot W}{(0.6219 + W)} \cdot \exp\left(\frac{B}{T + C} - A\right)$$

$$W = \frac{mf}{1 - mf}$$

$$\phi = \frac{1.01325 \cdot mf}{0.6219 \cdot (1 - mf) + mf} \cdot \exp\left(\frac{B}{T + C} - A\right)$$

Dari hasil studi penelitian yang dilakukan diketahui :

$$mf \quad \quad \quad : 0.0021$$

$$v \text{ udara} \quad \quad \quad : 10 \text{ m/s}$$

$$\rho \text{ udara} \quad \quad \quad : 1.185 \text{ kg/m}^3$$

$$A \text{ penampang} : 0.785 \text{ m}^2$$

$$\dot{m} \text{ udara} \quad \quad \quad : \rho \cdot v \cdot A = 9.302 \text{ kg/s}$$

$$\phi = \frac{1.01325 \cdot mf}{0.6219 \cdot (1 - mf) + mf} \cdot \exp\left(\frac{B}{T + C} - A\right)$$

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{1.01325 \cdot 0.0021}{0.6219 \cdot (1 - 0.0021) + 0.0021} \cdot \exp\left(\frac{3885.7}{303.2 - 42.92} - 11.7792\right) \\ &= 0.07895 \end{aligned}$$

Diketahui temperatur awal dalam cerobong = 30⁰C (303.2K) dengan RH 5%
maka :

$$P_{sat} = 10^5 \cdot \exp\left(11.7792 - \frac{3885.7}{303.2 - 42.92}\right) = 4826 \text{ Pa}$$

$$P_w = 0.05 \cdot 4826 = 214.3 \text{ Pa}$$

$$W_0 = \frac{0.6219 \cdot P_w}{101325 - P_w} = \frac{0.6219 \cdot 214.3}{101325 - 214.3} = 0.00132 \text{ kg/kg}$$

Besarnya rasio kelembaban pada outlet W_1 dan besarnya laju aliran massa udara basah pada *inlet* \dot{m}_0 adalah sebagai berikut :

$$W_1 = \frac{0.6219 \cdot \phi \cdot P_{sat}}{101325 - \phi \cdot P_{sat}} = \frac{0.6219 \cdot 0.07895 \cdot 4286}{101325 - 0.07895 \cdot 4286}$$

$$= 0.00235 \text{ kg/kg}$$

$$\dot{m}_0 = \dot{m} \text{ udara} = 9.302 \text{ kg/s}$$

Sedangkan jumlah laju aliran massa uap air $\dot{m}v_0$ adalah :

$$\dot{m}v_0 = \frac{\dot{m}_0 \cdot W_0}{1 + W_0} = \frac{9.302 \cdot 0.00132}{1 + 0.00132} = 0.012 \text{ kg/s}$$

Besarnya laju aliran massa udara kering \dot{m} adalah :

$$\dot{m} = \dot{m}_0 - \dot{m}v_0 = 9.302 - 0.012 = 9.29 \text{ kg/s}$$

Besarnya jumlah laju aliran massa uap air pada *outlet* $\dot{m}v_1$ adalah :

$$\dot{m}v_1 = \dot{m} \cdot W_1 = 9.29 \cdot 0.00235 = 0.0218 \text{ kg/s}$$

Besarnya laju evaporasi air yang disemprotkan $\Delta\dot{m}v_{01}$ adalah :

$$\Delta\dot{m}v_{01} = \dot{m}v_1 - \dot{m}v_0 = 0.0218 - 0.012 = 0.00983 \text{ kg/s}$$

Dengan besarnya kalor jenis air $Cp_w = 4.19 \text{ kJ/kg.K}$ dan kalor laten evaporasi air $L = 2430 \text{ kJ/kg}$, penyerapan energi atau daya thermal yang diserap oleh air dengan temperatur 10°C dan besarnya $T1$ yang keluar pada bagian *outlet* dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P_{01} = \Delta\dot{m}v_{01} \cdot Cp_w \cdot (T1 - T0) + \Delta\dot{m}v_{01} \cdot L$$

$$= 0.0983 \cdot 4.19 \cdot (T1 - 10) + 0.0983 \cdot 2430$$

$$= 0.0412T1 + 23.475$$

Dengan besarnya kalor jenis udara kering $Cp = 1.004 \text{ kJ/kg.K}$ dan kalor jenis uap air $Cp_v = 1.86 \text{ kJ/kg}$ daya thermal yang diserap oleh udara basah adalah

$$P_{01} = (\dot{m} \cdot Cp + \dot{m} \cdot W_0 \cdot Cp_v) \cdot (T0 - T1)$$

$$= (9.29 \cdot 1.004 + 9.29 \cdot 0.00132 \cdot 1.86) \cdot (25 - T1)$$

$$= 233.75 - 9.35T1$$

Dengan menggunakan kesetimbangan energi diatas maka besarnya temperatur akhir yang dihasilkan $T1$ adalah :

$$0.0412T1 + 23.475 = 233.75 - 9.35T1$$

$$9.39T1 = 210.275$$

$$T1 = 22.39 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dari hasil hitung menggunakan CFD didapatkan $T1 = 21.47 \text{ } ^\circ\text{C}$ selisihnya dengan hasil hitung menggunakan teori adalah $0.92 \text{ } ^\circ\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa simulasi yang dilakukan valid karena mendekati hasil hitungan secara teori.

Besarnya presentase tingkat penguapan yang dihasilkan nosel pj32 dengan jumlah laju aliran masa air $\dot{m}_{air} = 0.012 \text{ kg/s}$ dihitung menggunakan rumus :

$$\frac{\Delta \dot{m} v_{01}}{\dot{m}_w} \cdot 100 = \frac{0.00983}{0.012} \cdot 100 = 82\%$$

Dari hasil presentase tingkat penguapan menunjukkan performa evaporasi nosel pj32 dengan besarnya air yang di injeksikan 0.012 kg/s mengalami penguapan sebesar 82% , sementara sisanya masih dalam bentuk *liquid*.

4. PENUTUP

4.1 Hasil verifikasi penelitian memiliki kemiripan dengan eksperimen yang dilakukan oleh St. George and Buchlin (1994) dan penelitian Gant (2006). Perbedaan jenis distribusi semprotan nosel mempengaruhi performa pendinginan dalam cerobong. Jenis distribusi *Discreate Diameter Distribution* pada nosel BETE PJ32 dan TF6 dipilih karena dari segi temperatur terendah maupun temperatur rata-rata yang dihasilkan lebih baik daripada jenis distribusi *Rossin rammler*.

4.2 Dalam kasus variasi jenis nosel, perbedaan jenis nosel mempengaruhi performa pendinginan dalam cerobong. Penggunaan nosel PJ32 dipilih karena dari segi

performa pendinginan yang dihasilkan lebih baik daripada jenis nosel TF6 dengan temperatur terendah yang dapat dicapai adalah 13.18 °C dan temperatur rata-ratanya sebesar 21.47 °C dengan presentase penurunan temperatur 14.11% dan presentase tingkat penguapan 82%.

4.3 Dalam kasus variasi sudut penyemprotan nosel terhadap performa pendinginan, besarnya sudut penyemprotan nosel mempengaruhi performa pendinginan dalam cerobong. Sudut semprot 90⁰ dipilih karena *coverage diameter* yang dinilai masih cukup bagus untuk cerobong dengan geometri benda kerja dalam penelitian ini. Selain itu juga karena faktor ketersediaanya di pasaran karena tidak seperti jenis TF6 yang tersedia dalam berbagai variasi sudut penyemprotan, jenis nosel PJ32 hanya diproduksi dengan sudut 90⁰ saja. Namun patut menjadi catatan bahwasanya sudut semprot lebih dari 90⁰ memiliki performa pendinginan yang patut diperhitungkan dan menjadi gambaran dikemudian hari apabila jenis nosel PJ32 akan diproduksi dengan variasi sudut yang lebih banyak lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- A.M. Alkhedhair (2015). *Modelling and experimental study of spray cooling system for inlet air pre-cooling in natural draft dry cooling towers*, School of mechanical engineering and mining engineering Queensland University, Australia.
- Ansys,Inc. (2009). *Ansys workbench user's guide*, Southpointe 275 technology drive Canonsburg, PA 15317, <http://www.ansys.com>
- Blog Hasnan. *Memahami sifat-sifat dasar aliran*. Diperoleh 7 November 2017, <http://bloghasnan.blogspot.co.id/2012/04/memahami-sifat-sifat-dasar-aliran.html>
- Bahadori, M. N. (1985). *An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling*, Solar Energy, (35), pp. 119–129.

- Gant, S. E. (2006). *CFD Modelling of Water Spray Barriers*, Harpur Hill, Buxton Derbyshire, SK17 9JN. UK.
- Pearlmutter, D. (1996). *A multi-stage down-draft evaporative cool tower for semi-enclosed spaces*, Part II: water Spraying System. PLEA-23rd Conference on Passive and low Energy Architecture. Geneva. Switzerland.
- Rodriguez, E.A, S. Alvarez and R. Martin (1991). *Direct air cooling from water drop evaporation*, PLEA-91, Seville, Spain.
- Roy J. Issa and Byungik Chang (2012). *Performance prediction of a multistage wind tower for indoor cooling*, Department of engineering and computer science, West Texas A&M University Canyon, USA.
- Sarjito. (2012). *An investigation of the design and performance of a multi-stage downdraught evaporative cooler*, Faculty of Science Engineering and Computing kingston University, London.
- St.Georges, M. and Buchlin, J. M. (1994). *Detailed single spray experimental measurements and one-dimensional modelling*, Int. J. Multiphase flow, (20), pp. 979-992.
- Stoecker, W.F and jones, J.W. (1982). *Refrigeration and air conditioning*, second edition, McGRAW-HILL International edition, pp. 43-44.
- Tambur, Y. and Gueta, S. (2006). *Optimizing the design and operation of the sprayers in the tower*, Faculty of Aerospace engineering, Tachnion-Israel Institute of Technology, Appendix B., Israel.

