

## SIMULASI NUMERIK DAN VALIDASI EKSPERIMENTAL OPTIMASI KINERJA COOLING TOWER

**Bambang Teguh Prasetyo**

Balai Termodinamika, Motor dan Propulsi (BTMP) –BPPT, Puspiptek Serpong

Telp. 021 7560539, Fax. 021 7560538

Jurusan Teknik Mesin, FTI, Universitas Trisakti, Jl. Kyai Tapa, No. 1, Grogol, Jakarta 11440

e-mail [prasetyo@doctor.com](mailto:prasetyo@doctor.com), bambang@btmp-bppt.net

### Abstrak

*Simulasi Numerik dan Validasi Eksperimental Optimasi Kinerja Cooling Tower (CT) telah dilakukan. Studi ini dilatar belakangi oleh rendahnya kinerja CT yang salah satunya adalah besarnya jumlah air penambah. Analisis awal penyebab rendahnya kinerja CT tersebut adalah distribusi aliran udara yang tidak merata di dalam CT. Studi terdahulu [4, 5] secara simulasi numerik dan eksperimental menunjukkan ada kecenderungan distribusi aliran udara yang tidak merata di dalam CT. Fokus dalam studi ini adalah mengkaji lebih lanjut kaitannya kehilangan air dengan distribusi aliran udara. Oleh sebab itu studi diawali dengan melakukan pengukuran konsumsi air penambah pada kondisi dingin dan panas untuk geometri CT original. Pengukuran ini dimaksudkan untuk mengestimasi kehilangan akibat fragmentasi dan evaporasi. Selanjutnya dilakukan perhitungan desain pemerata aliran. Sebelum difabrikasi, desain tersebut disimulasi secara numerik dengan bantuan perangkat lunak CFD. Hasil simulasi menunjukkan ada perbaikan profil kecepatan udara. Secara eksperimental, dengan menambahkan alat pemerata aliran udara pada CT, ada hasil yang cukup memuaskan yaitu turunnya konsumsi air penambah sekitar 52% dibanding geometri yang original.*

Katakunci: aliran udara, air penambah, cooling tower, fragmentasi, evaporasi, CFD

### Pendahuluan

Cooling Tower (CT) adalah komponen penting pada sistem refrigerasi/pengkondisian udara maupun pada sistem proses dalam industri dimana diperlukan pendinginan ulang air yang digunakan dalam sistem tersebut. CT bekerja menggunakan kombinasi perpindahan panas dan perpindahan massa untuk mendinginkan air. Air yg didinginkan didistribusikan ke dalam tower dengan *spray nozzles*, *splash bars*, atau *filming fill* sebagai cara untuk membuat luas permukaan air yg berhubungan udara atmosfer sebesar mungkin. Sirkulasi udara atmosfer sebagai pendingin bisa dengan cara paksa menggunakan fans, atau secara natural.

Akibat kontak langsung aliran air panas dan udara dingin akan terjadi pelepasan panas sensibel dan panas latent yang menimbulkan efek pendinginan. Pelepasan panas latent akan disertai penguapan sebagian kecil cairan yang menyebabkan kehilangan air. Kehilangan air bisa juga dalam bentuk kabut akibat fragmentasi butiran air oleh aliran udara yang relatif cepat.

Hasil pemantauan yang dilakukan terhadap penggunaan salah satu produk CT yang banyak digunakan di Indonesia menunjukkan adanya in-efficiency yaitu jumlah pemakaian air penambah berkisar 21 liter per menit atau 10m<sup>3</sup> selama 8 jam beroperasi [1]. CT yang diuji mempunyai spesifikasi sebagai berikut: daya motor 3HP, laju aliran air 1300 liter/menit.

Jumlah pemakaian air penambah tersebut cukup besar, terlebih apabila dikaitkan dengan upaya penghematan penggunaan air bersih di kota-kota besar seperti Jakarta.

Analisis awal terhadap penyebab besarnya konsumsi air penambah adalah adanya kelemahan desain distribusi aliran udara. Desain distribusi aliran udara pada CT tersebut mengakibatkan kecepatan relatif aliran udara terhadap air di beberapa bagian tertentu melebihi harga nominal sehingga memungkinkan terjadinya penguapan dan pengkabutan yang berlebihan. Simulasi numerik dan eksperimental tentang distribusi aliran udara di dalam CT telah dilakukan [4, 5]. Simulasi numerik dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics* (CFD) [2, 3], sedangkan eksperimental dilakukan dengan menggunakan untai uji yang keduanya ada di Balai Termodinamika,

Motor dan Propulsi (BTMP) - BPPT. Ada kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan eksperimental sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, 4 dan 5. Dengan demikian analisis awal terjadinya ketidak rataan aliran udara di dalam CT dapat dibenarkan.

Namun demikian untuk memvalidasi apakah ketidak rataan aliran udara tersebut sebagai penyebab utama dari tingginya konsumsi air penambah masih perlu dilakukan pengujian lanjutan.

Pernyataan terakhir inilah yang menjadi fokus dalam studi ini, dan dilanjutkan dengan studi perbaikan desain distribusi aliran udara untuk memperbaiki kinerja CT khususnya penghematan pemakaian air.

## Metodologi

Untuk mencapai tujuan perbaikan kinerja CT sebagaimana disebutkan di atas maka studi dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

### Validasi eksperimental untuk geometri CT original

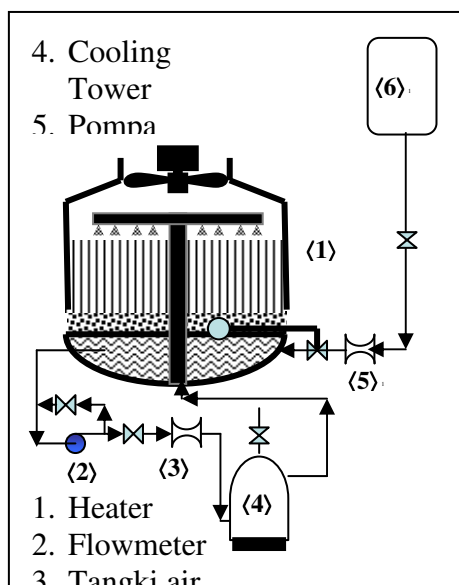
Untuk memvalidasi secara eksperimental apakah ketidak rataan distribusi aliran udara adalah sebagai penyebab utama dari tingginya konsumsi air penambah perlu dilakukan eksperimental pengukuran konsumsi air penambah pada kondisi dingin dan kondisi panas. Pengukuran pada kondisi dingin dimaksudkan untuk mendapatkan harga pendekatan kehilangan air akibat fragmentasi dengan asumsi bahwa kehilangan akibat evaporasi relatif sangat kecil mengingat suhu air dan suhu udara relatif sama. Pengukuran pada kondisi panas adalah pengukuran kehilangan air yang dilakukan pada suhu operasional air (sekitar 35°C). Pengukuran pada kondisi ini dimaksudkan untuk mendapatkan harga pendekatan kehilangan air total akibat fragmentasi dan evaporasi. Dengan demikian upaya perbaikan dalam rangka menekan kehilangan air penambah dapat direncanakan dengan baik.

Pengujian dilakukan pada sebuah untai uji CT skala laboratorium. Diagram skematik untai uji seperti tersaji dalam Gambar 1.

Untai uji terdiri dari peralatan yang antara lain adalah: *Coling Tower* (1), sebagai benda uji, mempunyai debit air 130 liter/min dan debit udara 85 m<sup>3</sup>/jam, buatan Indonesia. Pompa sirkulasi (2), berfungsi untuk mensirkulasikan air. Pompa tersebut mempunyai kapasitas 3 m<sup>3</sup>/jam, buatan EBARA, Japan. *Flow-meter* (3), berfungsi untuk mengukur debit aliran air, dengan kapasitas 40 liter/min, buatan DWYER, USA. *Heater* (4), berfungsi sebagai sumber panas untuk memanaskan air, dengan daya 45 kW, buatan INCO, Indonesia. *Flow-meter* air penambah (5), berfungsi untuk mengukur jumlah air penambah, dengan kapasitas 5 m<sup>3</sup>/jam, buatan BR, Indonesia dan yang terakhir adalah tangki air penambah (6), berfungsi untuk mencatu air penambah, dengan kapasitas 20 liter

Prinsip kerja dari instalasi tersebut adalah sebagai berikut. Setelah instalasi terisi penuh oleh air, maka sirkulasi air dilakukan oleh pompa (2). Debit aliran air diukur dengan *flow-meter* (3) dan diatur dengan menggunakan sistem bypass. Air tersebut selanjutnya dipanaskan dengan menggunakan heater (4). Pengaturan daya input ke pemanas digunakan sebuah regulator buatan OKI yang mampu mengatur daya 0 - 250 W. Pengaturan dilakukan secara bertahap sesuai dengan temperatur air yang diinginkan. Temperatur maksimum yang dapat dicapai adalah 90°C. Air panas tersebut kemudian dialirkan ke dalam CT (1). Proses perpindahan panas antara air dan udara terjadi dengan kontak langsung di dalam CT. Air dingin ditampung di dalam basin CT dan selanjutnya disirkulasikan kembali oleh pompa (2). Aliran udara di CT dihasilkan oleh fan isap yang ada di CT. Pengukuran temperatur air dan udara dilakukan dengan termokopel tipe K dengan ketelitian sekitar 0,1°C. Kekurangan air akibat adanya penguapan dan pengkabutan akan ditambah dari tangki air penambah (6) yang jumlahnya diukur oleh *flow-meter* (5).

Hasil pengukuran konsumsi air penambah ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 1. Diagram skematik untai uji

### Desain pemerata aliran dan simulasi numerik aliran untuk geometri yang dimodifikasi

Berangkat dari hasil pengukuran profil kecepatan aliran udara untuk geometri original [4, 5], dilakukan simulasi numerik dengan memasukkan harga-harga hambatan dalam pemodelan. Harga-harga inisial hambatan dihitung dari persamaan Bernoulli (persamaan 1) dengan pendekatan bahwa aliran adalah isothermal.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

Dimana P adalah tekanan statik aliran udara, v adalah kecepatan aliran udara dan z adalah ketinggian titik yang ditinjau diukur dari datum. Sedangkan subskrip 1 dan 2 masing-masing menunjukkan titik di sisi masuk dan sisi keluar (di bawah dan di atas sisi) pemerata aliran.

Dengan mengasumsikan bahwa pemerata aliran tidak terlalu tebal sehingga  $z_1$  bisa dianggap mendekati  $z_2$ , maka persamaan (1) bisa ditulis:

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \left( \frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} \right) = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \quad (2)$$

Semua parameter P, v dan z adalah fungsi jari-jari CT "r" kecuali  $v_2$  ( $v_2$  konstan pada penampang keluar pemerata aliran). Dengan diketahui  $v_2$  dan  $v_1(r)$  maka akan diperoleh  $\Delta P(r)$ . Harga  $\Delta P$  secara iteratif dioptimasi dengan CFD sampai mendapatkan harga profil kecepatan aliran udara di dalam CT optimum. Profil kecepatan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.

Harga  $\Delta P(r)$  yang terbaik kemudian diimplementasikan dalam bentuk fisik berupa hambatan-hambatan pada pemerata aliran. Hambatan-hambatan tersebut berupa perbedaan ketebalan pengarah aliran pada setiap segmen sebagai fungsi jari-jari. Perbedaan ketebalan tersebut ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) dan (4) berikut ini.

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = \lambda \frac{L}{d} \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

Dimana  $\lambda$  adalah koefisien gesekan aliran melalui lobang-lobang pemerata aliran, L adalah tebal pemerata aliran, dan d adalah diameter lobang-lobang pemerata aliran. Karena  $\Delta P(r)$  maka dengan membandingkan  $\Delta P$  setiap r akan diperoleh persamaan (4) sebagai berikut:

$$\frac{\Delta P_{i+1}}{\Delta P_i} = \frac{l_{i+1}}{l_i} \quad (4)$$

Dimana  $i = 1, 2, 3, \dots$  menunjukkan nomor segmen pada pemerata aliran yang masing-masing mempunyai jarak  $r_i$  dari pusat CT. Gambar 8 menunjukkan salah satu bentuk pemerata aliran.

#### Eksperimental untuk geometri yang dimodifikasi

Setelah pemerata aliran udara selesai difabrikasi sesuai dengan koefisien hambatan yang telah dioptimalkan, selanjutnya dilakukan pengujian kualitas dari pemerata aliran tersebut. Kualitas yang dimaksud dalam studi ini adalah kerataan aliran udara setelah melewati alat tersebut dan besarnya hambatan terhadap aliran akibat pemasangan alat tersebut.

Pengujian dilakukan dengan cara memasang alat tersebut pada CT pada untai uji (Gambar 1) dan menjalankan fan udara tanpa aliran air. Pada uji ini dilakukan pengukuran profil kecepatan udara sepanjang jari-jari CT. Pengukuran profil kecepatan aliran dilakukan dengan menggunakan alat ukur *turbine anemometer* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Rentang pengukuran dari alat tersebut sekitar 0,6 m/s sampai dengan 20 m/s dengan ketelitian berkisar pada  $0,2 \text{ m/s} + 1\%$  dari harga terukur. Selanjutnya dari profil tersebut dapat ditentukan besarnya debit aliran udara sehingga dengan demikian dapat ditentukan pula besarnya hambatan aliran yang dalam hal ini berupa pengurangan debit aliran udara.



Gambar 2. Turbine Anemometer

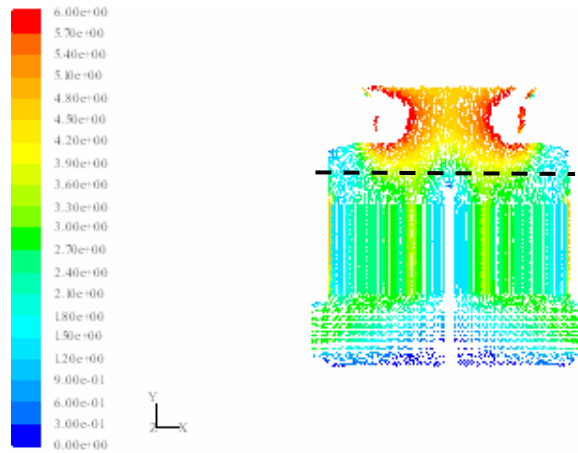
Dari pengujian kualitas pemerata aliran tampak bahwa jenis pemerata aliran udara tipe 2 memberikan profil kecepatan lebih baik dengan kerataan kecepatan aliran mendekati 90% (Gambar 9). Oleh sebab itu pemerata aliran tipe 2 dipilih sebagai solusi yang diimplementasikan. Untuk selanjutnya dilakukan serangkaian pengujian unjuk kerja CT setelah dipasang pemerata aliran udara tersebut.

Uji unjuk kerja dimulai dengan uji kondisi dingin kemudian dilanjutkan dengan uji kondisi panas untuk geometri yang telah dimodifikasi. Yang dimaksud uji kondisi dingin dan kondisi panas telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Selama eksperimental dilakukan pengukuran konsumsi air penambah, yang selanjutnya dibandingkan dengan hasil pengukuran pada geometri original (sebelum dipasang pengarah aliran).

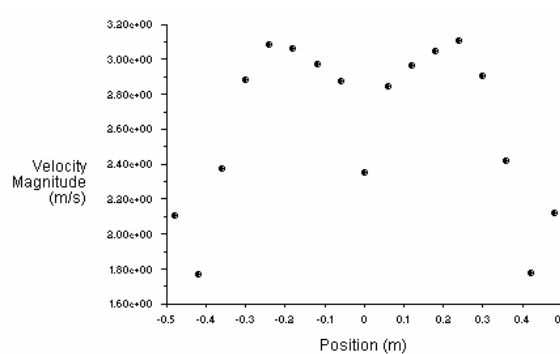
#### **Hasil Dan Pembahasan**

##### Simulasi numerik dan eksperimental aliran udara geometri original [4, 5]

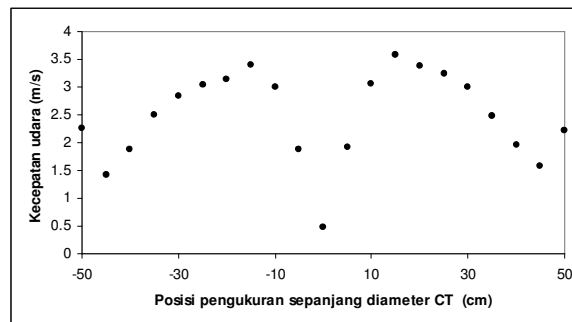
Hasil simulasi numerik profil kecepatan udara di dalam CT geometri original [4] ditunjukkan pada Gambar 3. Pada daerah pemasukan (di bawah fill) tampak bahwa kontour kecepatan tinggi mendominasi pada daerah pinggir sampai mendekati pusat CT, sedangkan pada daerah sekitar pipa air relatif lebih rendah. Setelah melalui fill, pada daerah di atas fill (ditunjukkan dengan garis -----) tampak kontour kecepatan tinggi mendominasi daerah pusat CT di sekitar pipa air, dan ada di sebagian daerah dekat dinding CT. Harga kecepatan pada daerah yang ditunjukkan dengan garis ----- selanjutnya dapat dilihat pada Gambar 4. Dari hasil pengamatan, hal ini sangat dimungkinkan mengingat fan isap berada di pusat daerah leher, sedangkan pada daerah dinding CT terdapat celah antar fill yang lebih lebar.



Gambar 3. Kontour kecepatan udara di dalam CT [4]



Gambar 4. Harga kecepatan pada daerah yang ditunjukkan dengan garis ----- pada Gambar 3, [4]



Gambar 5. Profil kecepatan hasil pengukuran pada garis -----pada Gambar 3, [5]

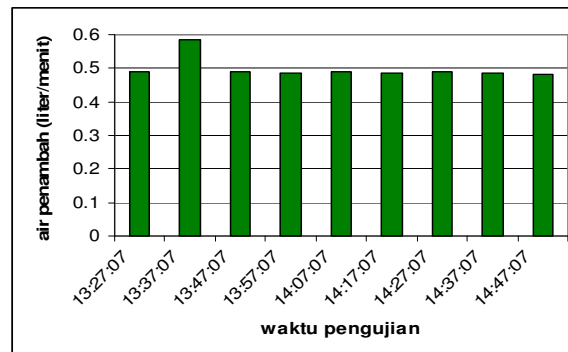
Untuk memvalidasi hasil simulasi numerik seperti Gambar 4, maka dilakukan pengukuran kecepatan aliran udara pada lokasi yang sama dengan garis. Hasil pengukuran ditunjukkan seperti pada Gambar 5.

Bila dibandingkan antara Gambar 4 dan Gambar 5, kedua profil kecepatan udara sepanjang diameter CT menunjukkan kecenderungan yang sama, walaupun harga kuantitatif kecepatan ada perbedaan. Hal ini telah menunjukkan kebenaran asumsi bahwa terjadi ketidak merataan aliran udara di dalam CT.

Konsumsi air penambah uji kondisi dingin dan panas geometri original

Hasil pengukuran konsumsi air penambah pada kondisi aliran dingin disajikan dalam bentuk kurva hubungan antara debit air penambah yang dihitung dari pembacaan penunjukkan oleh flowmeter yang sudah dikoreksi pada setiap rentang waktu 10 menit. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan pada

Gambar 6. Dari hasil pengamatan, konsumsi air penambah pada kondisi dingin rata-rata sekitar 0,49 liter/menit atau sekitar 0.38% kapasitas CT. Konsumsi tersebut untuk sementara diidentifikasi akibat fragmentasi.

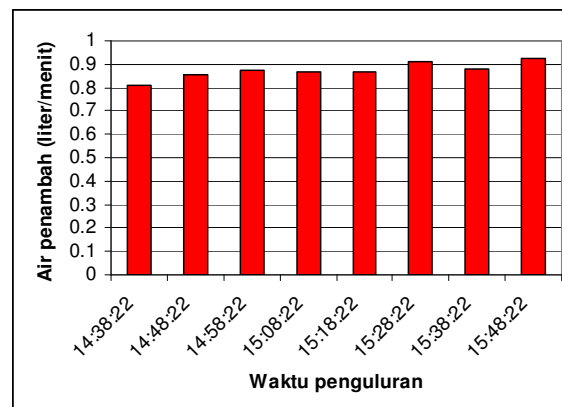


Gambar 6. Konsumsi air penambah pada uji dingin geometri original

Pengukuran konsumsi air penambah pada kondisi panas dilakukan dengan memanaskan air yang bersirkulasi. Suhu air sirkulasi masuk dalam CT disusahakan mendekati temperatur operasi yaitu sekitar 37°C. Namun demikian dengan keterbatasan peralatan yang tersedia saat ini, pengukuran dilakukan pada suhu air sirkulasi sekitar 35°C. Hasil pengukuran tersebut ditunjukkan pada Gambar 7.

Dari hasil pengamatan, konsumsi air penambah pada kondisi panas rata-rata sekitar 0,85 liter/menit atau sekitar 0.66% kapasitas CT. Ada kenaikan sekitar 100% dibanding pada kondisi dingin. Kenaikan konsumsi air penambah pada kondisi panas untuk sementara diidentifikasi akibat evaporasi

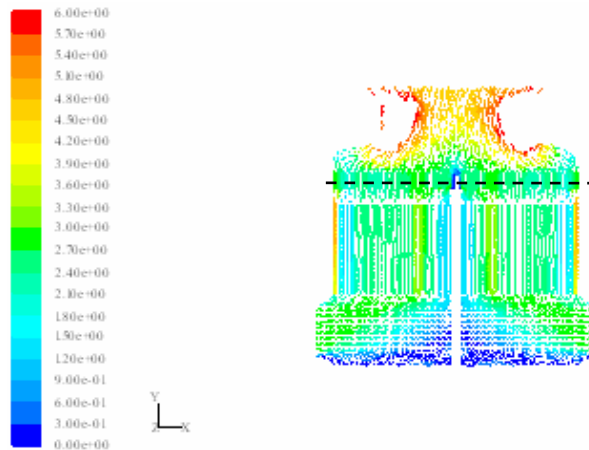
Selama pengukuran konsumsi air penambah baik kondisi dingin maupun panas, seluruh parameter yaitu; debit aliran air sirkulasi, temperatur air, temperatur udara, dan lain-lain diukur dan disusahakan berlangsung pada kondisi konstan/permanan. Untuk debit air sirkulasi dipertahankan sesuai dengan kondisi operasional yaitu sekitar 130 liter/menit.



Gambar 7. Konsumsi air penambah pada kondisi aliran panas untuk geometri CT original

#### Perata aliran dan profil kecepatan udara geometri yang dimodifikasi

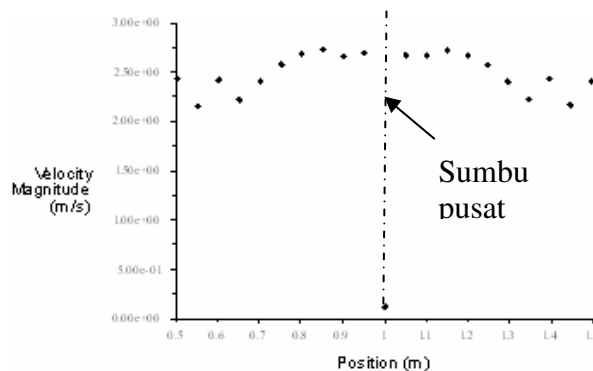
Dari harga hambatan hasil perhitungan dengan persamaan 2, kemudian disimulasikan dengan bantuan CFD untuk mendapatkan  $\Delta P(r)$  yang optimum. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8. Profil kecepatan hasil simulasi pada posisi pengukuran (garis-----) ditunjukkan pada Gambar 9. Tampak pada hasil tersebut bahwa distribusi kecepatan sepanjang jari-jari CT sudah mendekati merata, dan lebih baik bila dibandingkan dengan profil kecepatan sebelum dilengkapi perata aliran (Gambar 5, dan 6).



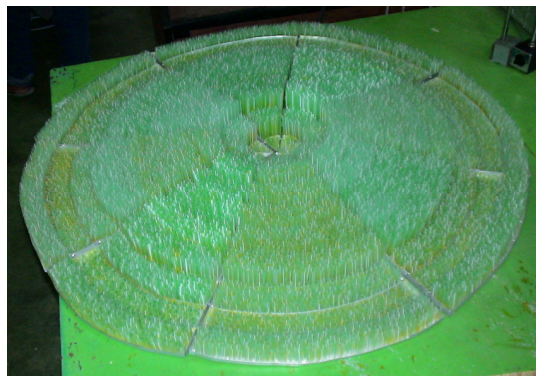
Gambar 8. Simulasi numerik aliran udara dengan hambatan pemerata aliran

Berdasarkan hasil simulasi tersebut di atas, kemudian dilakukan fabrikasi alat perata aliran yang mempunyai koefisien hambatan yang sesuai. Ada dua tipe yang difabrikasi yaitu, tipe 1 terbuat dari pipa-pipa plastik dan tipe 2 (dalam proses pengurusan paten). Gambar 10 adalah contoh perata aliran yang terbuat dari pipa-pipa plastik (tipe 1).

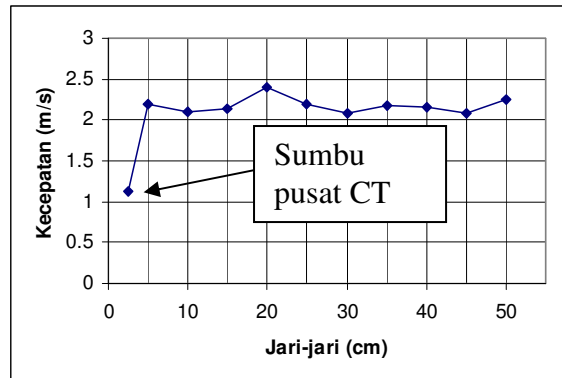
Hasil eksperimental pengukuran distribusi aliran udara pada CT yang dilengkapi dengan perata aliran tipe 2 ditunjukkan pada Gambar 11. Tampak ada kesesuaian dengan hasil simulasi pada Gambar 8, sehingga untuk eksperimental selanjutnya digunakan perata aliran tipe 2.



Gambar 9. Profil kecepatan pada (-----) Gambar 7.



Gambar 10. Pemerata aliran terbuat dari pipa plastik (tipe 1)



Gambar 11. Profil kecepatan hasil pengukuran pada (-----) Gambar 8

Pengukuran konsumsi air penambah setelah dilengkapi perata aliran

Pengukuran konsumsi air penambah pada kondisi panas dilakukan sesuai dengan eksperimental terdahulu, sebelum CT diberi perata aliran. Hasil pengukuran konsumsi air penambah pada kondisi aliran panas disajikan dalam Gambar 12. Dari hasil pengamatan, konsumsi air penambah pada kondisi panas rata-rata sekitar 0,5 liter/menit atau sekitar 0,41% kapasitas CT. Bila dibandingkan dengan konsumsi air penambah sebelum ada perata aliran (Gambar 7) tampak ada pengurangan sebesar kurang lebih 0.35 liter/menit atau sekitar 52%.



Gambar 12. Konsumsi air penambah pada kondisi aliran panas setelah CT dilengkapi perata aliran

**Kesimpulan**

Dengan memperhatikan hasil-hasil penelitian pendahuluan berupa simulasi aliran udara dan pengukuran kecepatan aliran udara di dalam CT, analisis awal terjadinya ketidak rataan aliran udara di dalam CT dapat dibenarkan.

Selanjutnya dengan memperhatikan hasil-hasil pengukuran konsumsi air penambah untuk geometri CT original, ada kehilangan air pada kondisi aliran dingin yang cukup signifikan, yaitu sekitar 50% dari kehilangan total pada saat kondisi aliran panas (*normal operation*). Kehilangan ini diidentifikasi akibat fragmentasi oleh distribusi aliran udara yang kurang merata.

Setelah dipasang perata aliran udara, pada kondisi aliran panas ada penurunan kehilangan air setelah dilengkapi perata aliran sebesar 52%. Dengan demikian, selain mengurangi fragmentasi perata aliran yang ditempatkan diantara fillet dan kipas bisa berfungsi juga sebagai demister. Untuk itu penelitian ini sudah pada jalur yang benar.

Bila diamati lebih lanjut, selama pengujian beda temperatur aliran air masuk dan keluar CT (*range*) sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Dengan demikian sedikit hambatan aliran udara akibat perata aliran tidak meurunkan kinerja termal CT.



## Ucapan Terimakasih

Ucapan terimakasih disampaikan pada rekan-rakan di BTMP–BPPT dan Pak Suratman dari program magister Teknik Mesin ISTN atas kolaborasinya sehingga studi ini bisa terlaksana dengan baik.

## Daftar Pustaka

- A. Halili, B. Teguh P., Sarwono, *Laporan Pengujian Karakteristik Prestasi Kerja Menara Pendingin Basah*, No: 94.14.01.1, 7 Nopember 1994, LTMP-BPPT, Serpong.
- H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, Longman, 1999.
- Concentration, Heat & Momentum Limited (CHAM) “*PHOENICS Introductory Lectures*”, - 1998.
- Bambang Teguh P., Madinah, *Simulasi Numerik Aliran Udara di Dalam Cooling Tower*, Jurnal Sainstech, Volume 16, Nomor 3, Desember 2006, ISSN 1410 – 7104
- Bambang Teguh Prasetyo., *Simulasi Numerik dan Validasi Eksperimental Distribusi Aliran Udara di Dalam Cooling Tower*, Jurnal Ilmiah Teknik Mesin “MESIN” Vol. 9, Nomor 3, Oktober 2007, ISSN 1411-1330