

VISUALISASI PERILAKU ANGIN VENTILASI ALAMI RUANG BAWAH TANAH DENGAN METODE CFD DAN KOTAK ASAP

Oleh :

Serfie B Mansauda¹

(¹ Staf Pengajar UNPI Manado, Mahasiswa Program studi S2 Arsitektur Unsrat, Manado)
mansaudaserfie@yahoo.com

ABSTRAK

Pada masa kontemporer ini ruang bawah tanah banyak dibangun dan lajim digunakan sebagai lantai basement untuk parkir, ruang pertemuan, pertokoan bahkan untuk kamar hunian. Hal mengenai ventilasi ruang bawah tanah menjadi perhatian serius karena berhubungan dengan pola aliran pergantian angin dan kebutuhan udara segar bagi pemakainya.

Studi ini fokus pada konteks ventilasi alami ruang bawah tanah tipe satu ruang (monozone) dengan menerapkan cerobong udara masuk dan keluar pada ketinggian di ruang luar di atasnya. Hendak diketahui pola aliran angin dan distribusi kecepatan udara dalam ruang dengan variabel sudut vertikal arah udara masuk. Metode yang digunakan meliputi CFD (paket versi demo/limited) dan Kotak Asap yang dibuat khusus untuk ini. Pemodelan dengan CFD dibatasi hanya 2D. Kotak asap dibuat berdasarkan ide teknologi fogging dan berukuran skala 1:20 terhadap bangunan nyata. Ukuran ruang yang dimodelkan adalah panjang 7,6 m, lebar 4.5 m dan tinggi 5.3 m.

Hasilnya menunjukkan bahwa perilaku angin yang diketahui melalui visualisasi asap ternyata mirip dengan visualisasi grafis dengan CFD. Dengan demikian maka Kotak Asap tervalidasi dengan baik terhadap CFD. Sudut angin masuk ke cerobong (inlet) yang divariasikan 30^o, 40^o dan 50^o tidak menunjukkan efek perbedaan yang signifikan terhadap kecepatan dan pola aliran dalam ruangan. Kecepatan angin pada ketinggian manusia duduk (sekitar 1.5 m) ditengah ruangan ternyata hampir sama dengan kecepatan angin masuk pada cerobong.

Kata kunci : Kotak asap ventilasi, pola aliran, CFD, basement

PENDAHULUAN

Di daerah permukiman dan perkotaan, dalam rangka memanfaatkan ruang luar sebanyak-banyaknya untuk penghijauan dan resapan air, maka diterapkan model pembangunan vertical, serta membatasi pembangunan horizontal. Tipe bangunan vertical bisa berarti menjulang diatas permukaan tanah namun juga termasuk yang berada bertingkat-tingkat dibawah permukaan tanah. Fakta juga menunjukkan bahwa di era teknologi modern ini ruang bawah tanah sudah lajim digunakan sebagai ruang kegiatan seperti area parkir, pertokoan, ruang utilitas, bahkan ruang-ruang hunian.

Sebagai ruang yang juga berisi manusia didalamnya, maka ruang bawah tanah harus mendapat perhatian utama bagi perencana sebab wajib mempertimbangkan

aspek-aspek arsitektur perencanaan ruang antara lain seperti penghawaan, kenyamanan, ventilasi sebagai faktor-faktor yang harus dipenuhi suatu ruang kegiatan bagi keberlangsungan kehidupan manusia. Untuk keperluan kesehatan telah diatur standarisasi angka pergantian udara suatu ruangan misalnya standarisasi yang berlaku di Indonesia (Sangkertadi, 2006) maupun di negara lain (Szokolay, 1980, ASHRAE, 1973). Untuk memenuhi standar tersebut, maka diperlukan suatu penanganan rancangan ventilasi, baik berbasis sistim ventilasi alami maupun buatan, atau kombinasi alami dan mekanik. Berbagai resiko dialami pada ruangan bawah tanah, apabila tidak dilakukan perancangan sistim ventilasi yang baik. Apabila terjadi kebakaran, maka aliran asap dan udara panas

yang terperangkap dalam ruangan bawah tanah beresiko menyebabkan banyak kerugian. Faktor kelembaban yang demikian tinggi karena dekat dan menempel pada lapisan tanah (terutama didaerah beriklim basah), apabila tidak mendapat aliran angin yang memadai maka akan menyebabkan terlalu lembabnya ruangan bawah tanah. Akibat kelembaban yang terlalu tinggi juga menyebabkan resiko patologi bangunan dan mengganggu pernafasan manusia. Praktek ventilasi basement secara alami tidaklah mudah, karena terdapat ketergantungan terhadap dorongan angin yang masuk kedalam ruangan, sekaligus perlu dibantu oleh tarikan (hisapan) angin yang keluar. Lubang angin masuk dan keluar pada sistim ruang bawah tanah, dalam konstruksinya hanya bisa rasional apabila dibuatkan suatu bentuk cerobong atau menara angin diatas lantai basement. Studi tentang ventilasi basement juga tergolong langka apalagi yang secara spesifik fokus pada sistim ventilasi alami ruang bawah tanah iklim tropis lembab. Sekalipun langka namun diantaranya tercatat studi oleh Bradley Turk dan Jack Hughes (Turk & Hughes, 2009) yang mengkhususkan riset tentang metoda *active soil depressurization (ASD) radon control systems* yang ternyata dapat mengurangi tingkat kelembaban pada ruang bawah tanah rumah-rumah tinggal di AS. Selain itu ada pula studi dari Koffi J (2010) tentang perbedaan kadar polutan SF₆ di ruang bawah tanah yang diterapkan sistim ventilasi mekanik dan sistim balancing ventilation, dengan mengambil kasus di Perancis. Hasil dari studi oleh Koffi tersebut menunjukkan bahwa sistim ventilasi mekanik, tetap lebih baik daripada hanya mengandalkan kesetimbangan tekanan angin antara dalam dan luar ruangan.

Berbeda dengan studi yang sudah ada, dimana studi ini bertujuan untuk mendapatkan visualisasi pola aliran angin ruang bawah tanah dengan menerapkan sistim ventilasi alami. Faktanya sistim ventilasi ruang bawah tanah lebih banyak menerapkan ventilasi mekanik (sistim *exhaust fan*), namun disini dilakukan fokus

ventilasi alami. Dimaksudkan bahwa dengan diketahuinya potensi ventilasi alami, maka akan didapatkan saran-saran positif apabila dilakukan kombinasi dengan sistim ventilasi mekanik pada kasus ruang bawah tanah. Dampak efisiensi energy dapat diperoleh pada penerapan sistim ventilasi mekanik apabila dipadukan dengan sistim ventilasi alami. Pada sistim konstruksi bangunan bawah tanah, tidak memungkinkan sistim ventilasi alami dengan cara sistim ventilasi silang, sehingga perlu dilakukan rekayasa dengan teknik *stack-effect*, yaitu dengan menerapkan cerobong penangkapan dan pelepasan angin diatas permukaan tanah. Mekanisme tersebut yang akan menjadi fokus tujuan dari studi ini.

Pengertian sistem ventilasi ruang bawah tanah yakni satu kesatuan proses pengaliran udara mulai dari bukaan masuk ruang (ventilasi inlet) terus ke ruang bawah tanah lalu keluar melalui bukaan keluar ruang (ventilasi outlet) secara terus menerus. Sistem ventilasi ruang bawah tanah pada iklim tropis lembab khusus ruang yang dibangun di bawah permukaan tanah tidak semudah dengan sistem ventilasi pada ruang bangunan di atas permukaan tanah atau ruang yang dibangun sebagian dibawah tanah. Ruang yang dibangun di bawah permukaan tanah memerlukan perlakuan/teknik khusus untuk merancang sistem sirkulasi udara yang baik, yaitu membangun menara ventilasi vertikal diatas permukaan tanah yang terletak di sisi atas pelat bangunan berdiri vertikal sebagai inlet dan outlet ventilasi, desain detailnya akan sangat tergantung pada perilaku arah angin setempat. Faktor rancangan detail bukaan juga menjadi parameter penentu dalam menghasilkan efektifitas ventilasi. Studi dari Munir (2003) juga menekankan bahwa diperlukan optimasi rancangan detail bukaan untuk mendapatkan ventilasi efektif dalam ruang meskipun studi tersebut bukan spesifik pada kasus ruang bawah tanah. Namun dalam studi ini fokus utama bukanlah pada detail bukaan, tetapi pada perilaku angin didalam ruang.

PRINSIP LANDASAN TEORI

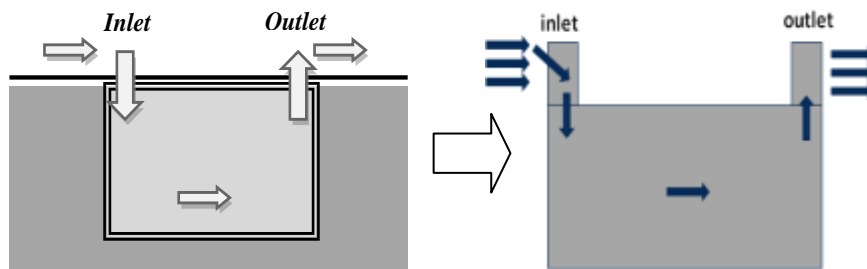
Secara teoretik, dalam sistim ventilasi alami yang menerapkan ventilasi silang, selalu terjadi pengurangan angka kecepatan angin rata-rata didalam ruangan, yang menghasilkan suatu koefisien kecepatan angin C_v (Kindangen, 1996). Penyebab dari menurunnya angka kecepatan angin adalah karena factor turbulensi disekitar bukaan, dan adanya dissipasi energy aliran didalam ruangan akibat turbulensi didalam ruangan. Sebaliknya desain dari bentuk detail bukaan jendela juga menyebabkan adanya *jetflow* dan dapat mempengaruhi perubahan kecepatan angin dalam ruangan (Kindangen, 2003). Ventilasi alami itu sendiri dibagi menjadi tiga kelompok yaitu sistim ventilasi silang, sirkular dan *stack-effect* (Sangkertadi, 2006). Namun dalam kasus ventilasi ruang bawah tanah yang menerapkan bukaan inlet dan outlet di ketinggian, maka diberlakukan teori ventilasi dengan sistim *stack-effect* yang mengandalkan mekanisme beda tekanan antara ketinggian yang tidak sama di sisi inlet dan outlet serta dorongan atau tenaga angin masuk pada posisi inlet. Di sisi lain, terdapat persamaan Bernoulli dan hukum kontinuitas yang dapat dipakai sebagai pendekatan perhitungan praktis ventilasi yang melewati celah bukaan yang tidak sampai 20% terhadap bidang dinding penangkap angin (Aynsley, 1977). Persamaan Bernoulli tersebut mengandung variabel kecepatan angin, tekanan, masa jenis udara serta ketinggian yang juga menggambarkan hukum kekekalan energi diterapkan pada sistim energi ventilasi (keseimbangan energi udara masuk dan udara keluar). Liddament dalam manualnya (Liddament, 1996) membuat AIDA, sebuah program komputer untuk menghitung debit ventilasi satu ruangan (monozone) baik dengan sistim silang maupun *stack-effect*. Suhu udara dan beda ketinggian antara bukaan masuk dan bukaan keluar menjadi

variabel penentu dalam perhitungan debit ventilasi alami.

Mengenai visualisasi pola aliran dan kecepatan angin dalam ruangan, hanya dapat dilakukan dengan cara eksperimen atau dengan menggunakan program komputer jenis CFD (Computational Fluid Dynamic). Cara experiment diantaranya visualisasi asap atau jenis fluida lain (misalnya air) pada kasus suatu bangunan. Visualisasi asap bisa dilakukan di suatu cerobong angin (wind tunnel) atau dibuatkan alat khusus. Sedangkan visualisasi dengan air mesti dibuatkan peralatan khusus. Adapun experimentasi laboratorium dengan menggunakan maket model dalam kasus bangunan, bisa dengan membuat model berskala paling besar sekitar 1:20 (Husein A. 1999) agar didapatkan hasil mendekati keadaan nyata. Penggunaan CFD sudah banyak dilakukan pada kasus sejenis, namun memerlukan ketelitian dan kapasitas pemakai dalam hal pengetahuan mengenai mekanika fluida dan analisa numerik. Basis program model matematika dan fisik yang diterapkan dalam CFD adalah volume hingga (*finite volume*) dengan solusi optimasi menggunakan prinsip analisa numerik (misalnya algoritma SIMPLER). Sedangkan formula fisika fluida yang diterapkan umumnya model *Bernoulli* maupun *Navier Stokes*, yakni yang sudah mengadopsi energi turbulensi dan hukum kekekalan energi dalam proses aliran.

METODE

Studi ini menerapkan dua metode yaitu visualisasi dengan bantuan CFD dan dengan alat Kotak Asap yang dibuat khusus untuk studi ini. Namun terlebih dahulu dibuat pemodelan sistim untuk memudahkan pembuatan model Kotak Asap maupun pemodelan geometri dengan CFD. Pemodelan sistim aliran sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1.

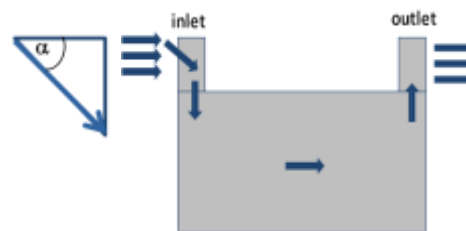


Gambar – 1. Pemodelan sistim aliran udara

Kotak asap yang dibuat khusus untuk studi ini diilhami oleh teknologi alat pengasapan “*fogging*” yang biasanya dipakai sebagai alat penyemprot asap anti demam berdarah oleh Dinas Kesehatan Kota. Namun alat kotak asap untuk uji ventilasi ini terbuat dari dua bagian komponen, yaitu komponen bangunan berskala 1:20, terbuat dari kaca bening dilengkapi dengan dua cerobong masing-masing fungsi inlet dan outlet dibagian atas kotak kaca. Komponen kedua, adalah unit alat produksi asap yang merupakan asap bahan bakar solar dipanasi oleh suatu *filament* dan didorong dengan fan. Proses visualisasi terjadi dimana asap putih (dari bagian unit alat produksi asap) didorong masuk kedalam kotak kaca dan dapat dilihat pola aliran asap menuju menara bukaan outlet. Menara ventilasi vertikal dirancang secara khusus dilengkapi dengan pengarah angin yang dapat diatur sudut kemiringannya sebagai pengarah angin masuk ataupun keluar ruang bangunan seperti pada gambar-2. Sudut pengarah angin pada menara ventilasi vertikal *inlet* dengan sudut (α) = 30°, 40° dan 50°.

Peralatan penunjang seperti handycam dan foto camera digunakan untuk

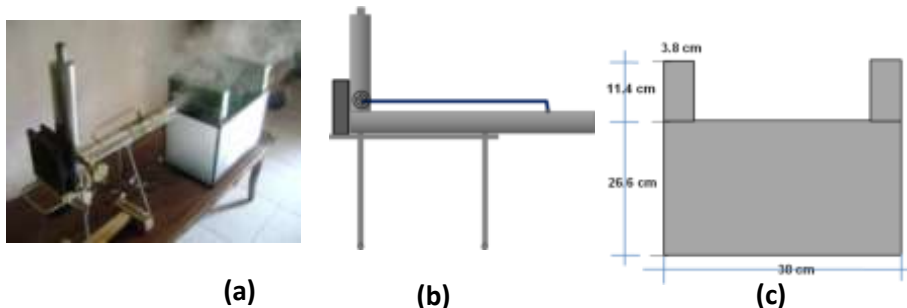
memvisualisasi aliran asap dengan Kotak Asap. Selain itu juga digunakan anemometer (merk Meterman) untuk mengukur kecepatan angin udara inlet dan outlet.



Gambar - 2 : Sudut kemiringan pengarah angin pada menara ventilasi vertikal

Spesifikasi Kotak Asap adalah sebagai berikut:

- Bahan Kotak model bangunan (kotak uji) : kaca bening tebal 3 mm
- Dimensi kotak uji (p,l,t) : 38cm x 24cm x 26,6 cm
- Menara ventilasi vertikal (p, t, tm) : 24cm x 3,8cm x 11,4cm, (inlet = outlet)
- Bukaan ventilasi (p, tm₁) : 24cm x 7,6cm, (inlet = outlet)



Gambar - 3 : Foto model alat uji, dan sketsa posisi model
(a) Foto perangkat simulasi visualisasi asap, (b) Alat pembangkit angin dan asap
(c) Model bangunan dengan menara ventilasi vertikal

Dengan metode CFD, digunakan program Flo++ versi demo, diterapkan pada kasus 2D. Jumlah sel (cell) volume dalam kasus ini adalah sebanyak 304 *volume cell*. Pengaruh suhu udara dan tekanan udara diabaikan, karena studi ini hanya difokuskan pada pola aliran angin akibat suatu gaya dorongan/ gerakan angin. Pemodelan geometri dalam CFD juga mengikuti pemodelan fisik model reduksi Kotak Asap (Gambar 2). Tidak ada pengaruh turbulensi disekitar masa bangunan, karena bangunan utama, faktanya adalah tertanam didalam tanah, sehingga yang muncul dipermukaan tanah hanya dua menara yaitu untuk udara masuk dan angin keluar. Tidak ada pengaruh turbulensi disekitar menara inlet tersebut, juga tidak ada pengaruh hisapan dari posisi outlet (*free outflow*). Hanya diterapkan pada kasus satu ruang (monozone) dan tidak diterapkan adanya penghalang didalam ruang bangunan (ruangan kosong).







HASIL

a) Simulasi visualisasi asap

Simulasi ini disebut juga simulasi

visualisasi asap buatan yakni alat pembangkit asap dan angin dihembuskan bersamaan pada kotak uji, akan menunjukkan pola aliran udara masuk ke kotak uji melalui ventilasi *inlet* kedalam ruang kotak uji dan selanjutnya aliran udara akan terus keluar ke ventilasi *outlet*.

Pengamatan dan rekaman di lakukan saat proses eksperimen sedang berlangsung dengan menggunakan alat rekaman *handycam* (video) juga pengukuran kecepatan angin dilakukan bersamaan dan diukur pada mulut luar bukaan ventilasi *inlet* dengan menggunakan alat pengukur kecepatan angin anemometer. Eksperimen dilakukan secara serial sesuai tahapan. Hasil eksperimen (Gambar.4) menunjukkan bahwa terdapat pergumulan udara diarea bagian tengah dan atas dari ruangan (kotak), yang artinya terdapat pola turbulensi diposisi tersebut, sedangkan dibagian tengah dan bawah cenderung bersifat laminar (angin / asap mengalir secara bebas menuju bukaan keluar).

Arah Angin Inlet	Data Experimen	Hasil simulasi Eksperimen (Pola aliran udara)
 <p>Exp -1 (α) = 30°</p>	<p>Kecepatan udara di mulut inlet (pakai alat ukur Anemometer) : 1,20 m/det Jarak : Kotak Uji – Alat : 40 cm</p>	
 <p>Exp -2 (α) = 40°</p>	<p>Kecepatan udara di mulut inlet (pakai alat ukur Anemometer) : 1,20 m/det Jarak Kotak – Alat : 40 cm</p>	
 <p>Exp -3 (α) = 50°</p>	<p>Kecepatan udara di mulut inlet (pakai alat ukur Anemometer) : 1,20 m/det Jarak Kotak – Alat : 40 cm</p>	

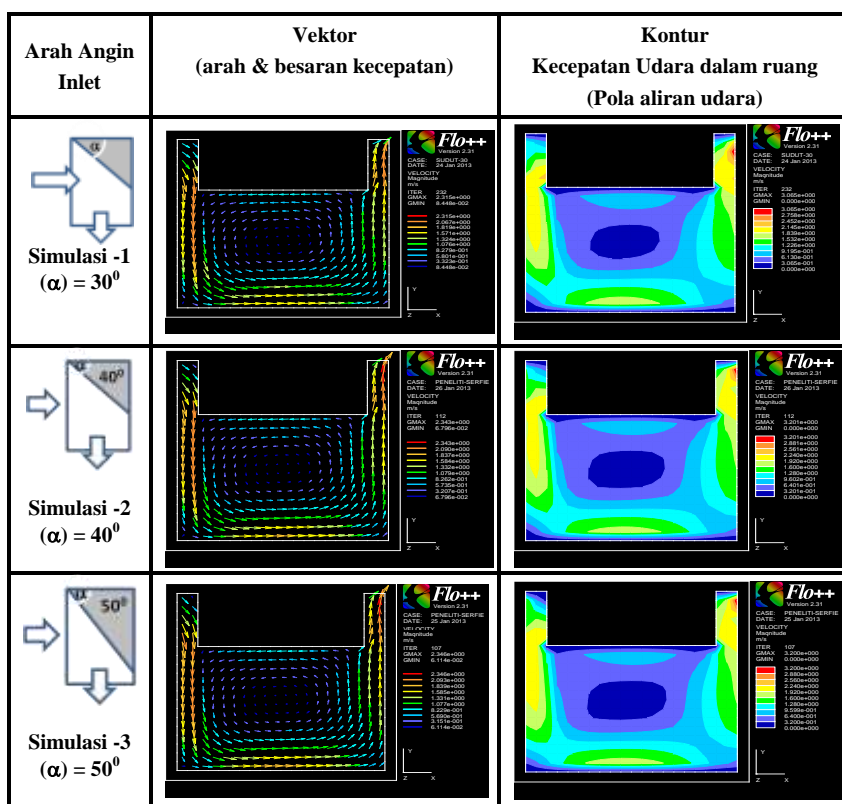
Gambar - 4 : Hasil simulasi visualisasi asap
Sumber : Peneliti, 2013

b) Simulasi CFD (Software Flo++2.3)

Simulasi dengan program komputer CFD ini, dilakukan dalam 3 tahap yaitu (1) Pra-Proses yakni pemodelan geometri untuk membentuk modul seperti bangunan yang terdiri dari *boundary*, sel, simpul lalu di-*saving*, (2) Proses *Running (Calculation)* yaitu eksekusi sesuai jumlah iterasi yang diminta sampai didapatkan konvergensi, (3) Post-Proses, yaitu prosedur pengolahan hasil proses, dapat berupa pemetaan kontur, vector maupun raster dan dapat pula berupa

tabulasi angka hasil perhitungan oleh program.

Dalam kasus ini divisualisasikan pola aliran udara dalam bentuk gambar kontur raster dan vector kecepatan angin. Nampak hasilnya pada Gambar.5, terdapat dua karakteristik utama dalam satu ruangan yaitu adanya daerah dengan pola aliran yang cenderung laminar (mengalir linier atau curvelinier) dan adanya daerah dengan pola aliran yang cenderung turbulen (pusaran angin).



Gambar - 5 : Hasil simulasi CFD (Flo++2.30)

PEMBAHASAN

Simulasi visualisasi dengan asap buatan dan simulasi CFD, menunjukkan pola aliran udara dengan sudut kemiringan pengarah angin $\alpha = 30^0, 40^0$ dan 50^0 , tidak ada perubahan yang menyolok. Pola aliran udara yang terdistribusi di dalam ruang tidak ada perbedaan yang berarti. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar-5 dan 6. Selain itu pola aliran udara yang


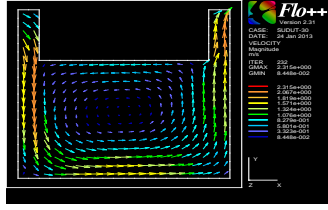

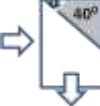
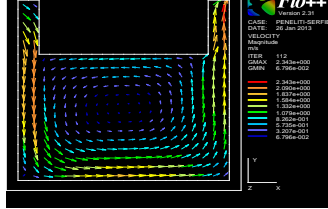
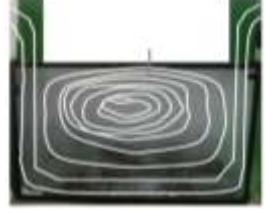

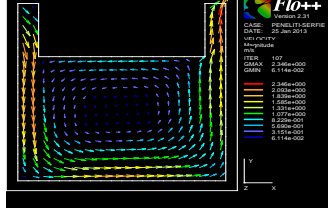

terpetakan melalui simulasi *CFD* ternyata sangat mirip dengan simulasi visualisasi asap buatan (Gambar 6).

Visualisasi tersebut juga menunjukkan adanya pengelompokan karakteristik pola aliran, yakni pola aliran menghunjam kebawah (bagian kiri), laminar (bawah, tengah bawah dan bagian atas), turbulen (tengah atas) dan menaik keatas (bagian kanan). Pola turbulen di bagian tengah ruangan, berkecepatan sangat rendah dan

menjadi bagian dari angin yang diam (stagnant).

Metode simulasi dengan CFD, selain dapat menghasilkan keluaran berupa gambar-gambar visualisasi pola aliran, ternyata juga dapat menghasilkan keluaran berupa angka-angka besarnya kecepatan udara pada setiap sel. Sehingga bisa diketahui kecenderungan perubahan besarnya angka kecepatan angin

pada setiap posisi didalam ruang. Adapun profil kecepatan udara didalam ruangan (dari hasil simulasi CFD) dengan kasus sudut kemiringan udara masuk (inlet) $\alpha = 30^0$, ditunjukkan pada gambar 7 dan 8. Adapun pada kasus sudut kemiringan arah angin inlet $\alpha = 40^0$ dan 50^0 (tidak ditampilkan gambarnya) ternyata juga memiliki kemiripan dengan profil sudut inlet 30^0 .

Arah angin Inlet	CFD (software Flo++2.30)	Eksperimen (simulasi visualisasi asap)
 <p>Simulasi -1 ($\alpha = 30^0$)</p>		
 <p>Simulasi -2 ($\alpha = 40^0$)</p>		
 <p>Simulasi -3 ($\alpha = 50^0$)</p>		

Gambar - 6 : Perbandingan visual aliran dengan cara CFD dan Kotak Asap

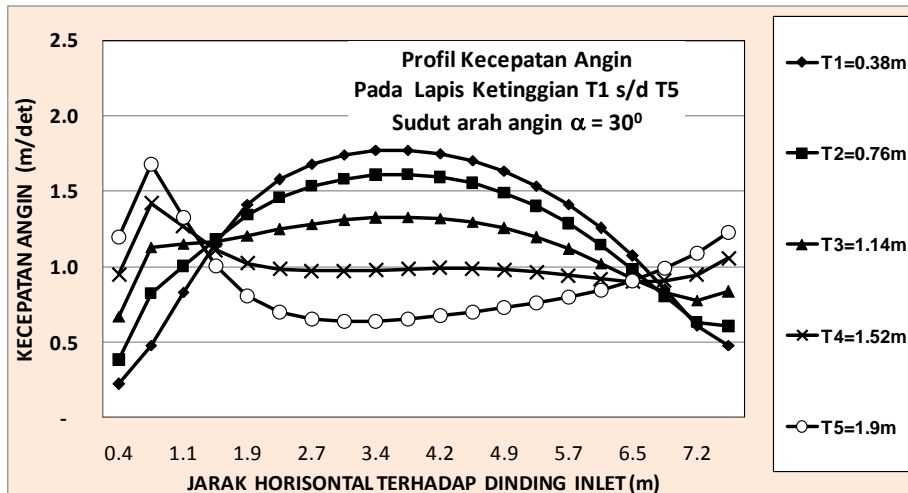
Nampak pada gambar 7 dan 8 bahwa terdapat perbedaan pola kecepatan angin pada kedua gambar tersebut. Pada gambar 7, dimana menunjukkan pola kecepatan angin pada area ruangan di bagian bawah dekat lantai sampai pada posisi relatif ketinggian manusia (sampai sekitar 1.5 m), ternyata menunjukkan angka kecepatan angin yang cukup baik khususnya di area tengah ruangan terhadap dinding kiri dan kanan. Yakni mendapatkan angka kecepatan angin yang hampir sama dengan kecepatan angin inlet (angin masuk dari cerobong atas). Kecenderungan ini mengarahkan pada

pemanfaatan ruang untuk kegiatan manusia di bagian tengah, yang mendapat angin cukup baik, sebagai daerah nyaman ditinjau dari kecukupan debit volume udara.

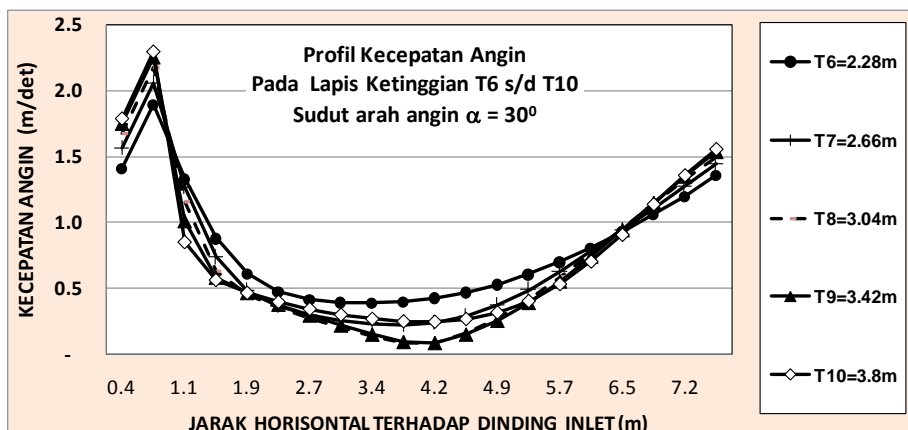
Pada gambar 8, yang menunjukkan pola kecepatan angin pada posisi ketinggian pintu sampai dengan plafond (sekitar 2.2 s/d 3.8), ternyata didapat angka kecepatan angin yang rendah khususnya di area tengah ruangan, dibandingkan dengan yang terjadi pada gambar 7. Kecenderungan ini mengarah pada anjuran untuk memanfaatkan ruang aktifitas manusia di bagian tengah ruangan dimana pada daerah ini pada

ketinggian manusia posisi duduk (sekitar 1.5 m) justru didapat angin maksimal sehingga bersifat positif bagi kesehatan dan kebutuhan udara bersih. Sebaliknya disekitar

dinding-dinding ruangan pada posisi ketinggian manusia, ternyata angka kecepatan anginnya rata-rata lebih rendah sehingga kurang baik bagi aktifitas manusia.



Gambar - 7 : Profil kecepatan angin dalam ruangan pada lapis ketinggian 0.4 s/d 1.9 m; Kasus sudut inlet, $\square = 30^{\circ}$



Gambar - 8 : Profil kecepatan angin dalam ruangan pada lapis ketinggian 2.2 s/d 3.8 m. Kasus sudut inlet, $\square = 30^{\circ}$

KESIMPULAN

Studi ini menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengembangan Sistem ventilasi vertikal pada sistim ventilasi ruang bawah tanah tidak tergantung pada sudut kemiringan pengarah angin ($\alpha = 30^{\circ}$, 40° dan 50°) di menara ventilasi vertikal pada bukaan inlet. Distribusi dan pola aliran

udara dalam ruang tidak terpengaruh secara signifikan.

2. Pola aliran yang terpetakan melalui model alat uji visualisasi dengan Kotak Asap ventilasi ternyata sangat mirip dengan simulasi CFD. Dengan demikian, maka model alat uji simulasi visualisasi asap ventilasi yang dikreasikan dalam penelitian ini, dinyatakan valid.
3. Angka kecepatan angin rata-rata pada ketinggian manusia duduk (sekitar 1.5 m) ditengah-tengah

ruangan, ternyata tidak berbeda jauh dengan angka kecepatan angin inlet. Sebaliknya angin berkecepatan lemah terjadi di pinggir dinding-dinding vertikal. Sehingga disarankan bahwa dalam penerapan ruang bawah tanah, pada zona tengah-tengah ruangan dapat difungsikan untuk kegiatan manusia, sedangkan di zona sekitar dinding, hendaknya dihindari bagi manusia.

4. Pola aliran juga menunjukkan bahwa terdapat dua kelompok area (*zona*), yakni *zona* angin cenderung laminar dan *zona* cenderung tipe pusaran angin dengan kecepatan rendah, yakni di ruang tengah pada ketinggian tengah-tengah agak keatas, sehingga pada area tersebut, masih beresiko terdapat kantong ruang berudara lembab, maka perlu dibantu dengan ventilasi mekanik untuk mendapatkan sirkulasi udara bersih secara total dalam ruang bawah tanah.

UCAPAN TERIMAKASIH.

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Ditjen Pendidikan Tinggi Kemdikbud, atas Beasiswa BPPS Aliansi selama mengikuti Program Pendidikan S2 Arsitektur di Unsrat Manado (2010 s/d 2012). Tulisan ini adalah bagian penelitian tesis yang menggunakan dana beasiswa tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

-----, 1999, Flo++ version 2.30 – CFD Package User's Manual, Potchefstroom, South Africa, Last revised, 1999.

Aynsley R M, Melbourne W, Vickery B J, 1977, *Architectural Aerodynamics* Applied Sciences Publisher Ltd, London.

Kindangen, J.I., 1996. "Investigation of Natural Ventilation with Computational Fluid Dynamics. A Comparison Study

with Wind Tunnel Result" Jurnal Dimensi Teknik Arsitektur Universitas Kristen Petra, Vol. 39 Nomor 2.

- Kindangen, J.I., 2003. "Pengaruh tipe jendela terhadap pola aliran udara dalam ruang" Jurnal Dimensi Teknik Arsitektur Universitas Kristen Petra, Vol. 31 Nomor 2.
- Koffi J, 2010, Assesment of Pollutant Spread From A Building Basement With Three Ventilation Systems. Research Report, LEPTIAB, Univ De La Rochelle, France
- Liddament. M. 1996. *A Guide to Eergy Efficient Ventilation*. Annex V. Air Infiltration and Ventilation Centre. Great Britain. P.197, 202
- Munir, A., 2004. *Optimasi Sistem ventilasi alami satu-sisi melalui desain dan konfigurasi tipe jendela*, Penelitian S2., ITB. Bandung.
- Mathias Cehlin. 2006. *Visualization of Airflow, Temperature and Concentration Indoors Whole-field measuring methods and CFD*.KTH Research School, Centre of Built Environment- Department of Technology and Built Environment, University of Gävle.
- Husein A. 1999. *Pengukuran Akustik Ruangan Dengan Teknik Pemodelan Skala Fisik*. Puslitbang KIM-LIPI. Serpong-Tangerang. ISSN 0852-002X, PPI-KIM.
- Nishizawa. S., 2004. *A Wind Tunnel Full-Scale Building Model Comparison between Experimental and CFD Results Based on the Standard k-ε Turbulence Representation*. International Journal of Ventilation, 2, nomor (4), p419- 430.
- Szokolay S V. 1980. *Environmental Science Handbook-Passive Thermal controls*-P.295. The Construction Press. London, New York.

Standards for Natural and Mechanical Ventilation - ASHRAE Standard P.60-73,. (1973). *ASHRAE Handbook of Fundamentals*.

Sangkertadi. 2006. *Fisika Bangunan untuk Mahasiswa Teknik dan Arsitektur*, Pustaka Wirausaha Muda, Bogor

Turk B and Hughes J, 2009 , *Movement and Sources of Basement Ventilation Air and Moisture During ASD Radon Control*, Contractor Report to: U.S. Environmental Protection Agency Indoor Environments Division Washington, DC Under Cooperative Agreement No. XA83146010