

**UJI KARAKTERISTIK HIPOTESIS BANGUNAN RUMAH
TINGGAL YANG MEMANFAATKAN PENDINGINAN
EVAPORASI DENGAN COMPUTATIONAL FLUIDS
DYNAMICS (CFD)**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata Satu
Pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta**

Disusun Oleh :

RISKI YOGA NANDA

D 200 120 054

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA
TAHUN 2016**

HALAMAN PERSETUJUAN

**UJI KARAKTERISTIK HIPOTESIS BANGUNAN RUMAH TINGGAL
YANG MEMANFAATKAN PENDINGINAN EVAPORASI DENGAN
COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS (CFD)**

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA

PUBLIKASI ILMIAH

Oleh :

RISKI YOGA NANDA

D200 120 054

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh :

Dosen Pembimbing



Ir. Sarjito, MT., Ph.D

NIDN.0610116204

HALAMAN PENGESAHAN

UJI KARAKTERISTIK HIPOTESIS BANGUNAN RUMAH TINGGAL
YANG MEMANFAATKAN PENDINGINAN EVAPORASI DENGAN
COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS (CFD)

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA




OLEH :

RISKI YOGA NANDA

D 200 120 054

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji Fakultas Teknik Jurusan
Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta Pada Hari Jum'at, 2
Desember 2016 dan dinyatakan memenuhi syarat

Dewan Penguji :

1. Ir. H. Sarjito, M.T, Ph.D ()
(Ketua Dewan Penguji)
2. Ir. Sunardi Wiyono, M.T. ()
(Anggota I Dewan Penguji)
3. Ir. Pramuko Ilmu Purboputro, M.T ()
(Anggota II Dewan Penguji)

Dekan



(Dr. H. Sri Sunarjono, MT. Ph.D)

NIK.68

PERNYATAAN KEASLIAN PUBLIKASI ILMIAH

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 saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 2 Desember 2016

Penulis



RISKI YOGA NANDA

D 200.120.054

UJI KARAKTERISTIK HIPOTESIS BANGUNAN RUMAH TINGGAL YANG MEMANFAATKAN PENDINGINAN EVAPORASI DENGAN COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS (CFD)

Riski Yoga Nanda, Sarjito

Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta

Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan, Kartasura

Email : riskiyogananda22@gmail.com

ABSTRAK

Pengondisian udara di dalam rumah tinggal sangat diperlukan untuk memperoleh kenyamanan thermal, terutama di daerah perkotaan yang memiliki masalah keterbatasan lahan. Salah satu alternatif pengondisian udara ruangan yang ramah lingkungan untuk mengurangi penggunaan AC adalah pendinginan evaporasi.. Penelitian ini bertujuan untuk menguji karakteristik pengondisian udara rumah tinggal yang memanfaatkan pendinginan evaporasi menggunakan Computational fluids dynamics (CFD).

Penelitian dilakukan dengan menggambarkan 3 waktu yang berbeda yaitu 09.00-10.00(pagi), 12.00-13.00(siang) dan 19.00-20.00(malam) dengan karakteristik udara masuk yang berbeda. Uji karakteristik udara dilakukan dengan mengukur kecepatan angin, kelembaban relatif(RH) dan temperatur pada 28 Posisi Ukur (PU), dimana PU tersebut tersebar di 3 tempat, yaitu (1) di jalan depan rumah; (2) di interior ; dan (3) di eksterior. Pengukuran dilakukan dengan membuat plane berbentuk persegi berukuran 2x2m dengan tinggi 1,5 m diatas lantai untuk 28 PU.

Hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa efek pendinginan evaporasi terasa di lantai 1 dengan penurunan temperatur rata-rata 1,5 oC dari temperatur lingkungan dan kenaikan RH 6,75 % dari RH lingkungan. Sedangkan ventilasi vertikal bekerja efektif dalam mendukung sirkulasi udara di dalam rumah tinggal. Pergerakan angin dapat dirasakan di seluruh ruangan dengan kecepatan rata-rata mencapai 0,175 m/s.

Kata kunci : Kenyamanan Thermal, Pendinginan Evaporasi, CFD

ABSTRACT

Air conditioning in housing is required to obtain thermal comfort zone, especially at urban areas that have problems with the limitations of land. One of alternative room air conditioning (AC) that environmently-friendly to reduce refrigeration system is evaporative cooling system. The aim of the research is to investigate characteristic of air conditioning inside the house wich utilize evaporative cooling system using Computational fluids dynamics (CFD).

The research was done by describing 3 different times which are 09.00-10.00 (in the morning), 12.00-13.00 (at noon) and 19.00-20.00 (at night) with incoming air in different properties. The air characteristic test was done by measuring velocity of the wind, relative humidity (RH) and temperatures at 28 positions of measurement cup (PU), where PU were spreaded at 3 places, (1) in front of the house; (2) at the interior; and (3) at the exterior. The measurement was conducted by making square plane of 2x2m with high of 1.5 m above floor of 28 PU.

CFD simulation results showed that the cooling effect evaporative felt on the 1st floor with the average temperature reduction of 1.5 oC from the ambient temperature and increase RH of 6.75 % from ambient RH. While the vertical ventilation work effectively in supporting air circulation. The movement of the wind can be felt throughout the house with the average velocity of 0,175 m/s.

Key Words : Comfort zone, Evaporative cooling, CFD

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Pada umumnya rumah tinggal mempunyai halaman depan dan halaman belakang untuk memenuhi berbagai kenyamanan bagi para penghuninya, terutama kenyamanan thermal. Keberadaan *space* halaman juga memberikan *space* untuk angin bergerak, sehingga memperbaiki sirkulasi udara di dalam rumah. Namun demikian, seiring dengan keterbatasan lahan di perkotaan, keberadaan *space* mulai dihilangkan dan digantikan dengan berbagai ruang-ruang *funksional*. Penambahan ruang ini tentu dapat menghilangkan kenyamanan thermal di dalam rumah. Untuk mengembalikan kenyamanan itu, solusi-solusi ke arah teknologi modern sering dilakukan, misalnya penggunaan AC. Solusi ini terbukti menciptakan pemborosan energi dan memicu pemanasan global (Givoni, 1998). Sehingga diperlukan alternatif pendinginan yang alami untuk memperoleh kenyamanan thermal di dalam rumah tinggal.

Kenyamanan thermal secara alami salah satunya diperoleh melalui alternatif pendinginan evaporasi, dengan memberikan efek penguapan (evaporasi) pada ruangan. Pendinginan dengan efek evaporasi dapat bekerja dengan baik dengan didukung adanya sirkulasi udara yang baik di dalam ruangan. Sistem ventilasi atau bukaan pada rumah tinggal merupakan salah satu alternatif untuk memperbaiki sirkulasi udara di dalam rumah tinggal. Keberadaan ventilasi dapat dimanfaatkan sebagai *inlet* udara segar ke dalam ruangan dan juga sebagai *outlet* udara panas dalam ruangan, sehingga terjadi sirkulasi udara yang baik. Efek evaporasi dapat memberikan suhu dan kelembaban relatif di dalam ruangan yang lebih baik. Metode pendinginan evaporasi dan desain ventilasi vertikal yang digunakan pada proses pendinginan alami sangat mempengaruhi kenyamanan thermal yang dihasilkan. Sehingga diperlukan banyak penelitian untuk menguji alternatif pendinginan alami.

Penelitian eksperimen untuk menguji karakteristik kenyamanan thermal yang dihasilkan dari sebuah desain ventilasi dan metode evaporasi memerlukan banyak biaya, karena selain untuk pengadaan desain ventilasi dan metode evaporasi yang akan diuji, biaya juga dibutuhkan untuk pengadaan alat ukur yang digunakan selama pengujian. Disamping itu harus memerlukan alat ukur sebanyak posisi yang dijadikan sampel uji, untuk memperoleh karakteristik udara yang seragam antara posisi pengukuran satu dengan yang lain. Karena karakteristik udara selalu berubah setiap waktu.

Perkembangan penelitian dengan menggunakan perangkat lunak berbasis komputasi akan sangat memudahkan peneliti dalam proses simulasi penelitian. Salah satu metode yang dipakai dalam komputasi adalah *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Ansys adalah salah satu *software* yang digunakan untuk penyelesaian persamaan dalam analisis CFD. Ansys merupakan *software* dengan program paket yang dapat memodelkan elemen hingga untuk menyelesaikan masalah yang berhubungan dengan mekanika, masalah perpindahan panas, masalah fluida dan juga masalah yang berhubungan dengan akustik dan elektromagnetik. Jadi dalam tugas akhir ini akan menganalisis dan mensimulasikan karakteristik efek pendinginan evaporasi pada rumah tinggal yang dilengkapi ventilasi vertikal secara komputasional menggunakan *software Ansys 15.0 – CFX*.

1.2 Perumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang diatas, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana karakteristik kenyamanan thermal rumah tinggal yang memanfaatkan pendinginan evaporasi dan dilengkapi ventilasi dengan vertikal?
2. Bagaimana pengaruh arah angin terhadap sirkulasi udara di dalam rumah tinggal?

1.3 Batasan Masalah dan Asumsi

Agar pembahasan masalah tidak terlalu meluas, maka batasan masalah yang diambil adalah :

1. Komputasi yang dilakukan merujuk pada eksperimen yang dilakukan oleh Ronim Azizah, Qomarun (2014), yaitu “Solusi Ventilasi Vertikal dalam Mendukung Kenyamanan Thermal pada Rumah Tinggal di Perkotaan”, baik dari segi desain maupun karakteristik udara lingkungannya.
2. Rumah tinggal menghadap ke timur dengan kondisi di sebelah barat dan selatan adalah perumahan, sedangkan di sebelah utara dan timur adalah jalan dan pekarangan.
3. Rumah tinggal dianggap kosong dan belum ada penghuninya
4. Efek penguapan transpirasi tumbuhan di dalam rumah tinggal diabaikan.
5. Perpindahan panas pada dinding rumah tinggal diabaikan.
6. Penelitian dilakukan untuk mengetahui karakteristik kenyamanan thermal yang dihasilkan oleh ventilasi vertikal dan efek penguapan pada rumah tinggal diantaranya : tingkat pemerataan sirkulasi udara, suhu dan kelembaban relatif udara.
7. Variasi arah angin merujuk pada waktu penelitian eksperimen Ronim Azizah, Qomarun (2014), yaitu angin dominan dari arah selatan dengan kecepatan 2 m/s.
8. Penelitian yang dilakukan dengan pendekatan Computational Fluid Dynamics (CFD) menggunakan software Ansys 15.0 - CFX.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui karakteristik kenyamanan thermal rumah tinggal yang memanfaatkan pendinginan evaporasi dan dilengkapi ventilasi vertikal di dalam ruangan lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 dengan CFD.
2. Untuk mengidentifikasi arah angin yang dapat memberikan sirkulasi udara paling merata di dalam ruangan dengan CFD.

2. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori

2.1. Tinjauan Pustaka

Ronim Azizah, Qomarun (2014), mengkaji tentang alternatif ventilasi vertikal dalam mendukung kenyamanan thermal rumah tinggal di daerah perkotaan. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimen. Pada tahap desain, dirancang model lantai dasar bersplit, berpori dan lahan berair. Sedangkan ventilasi vertikal didesain melalui peniadaan dinding belakang dan memberi jarak bebas 30 cm dengan dinding tetangga. Pengujian thermal dilakukan dengan mengukur suhu, kelembaban udara, dan kecepatan angin pada 28 titik di jalan depan rumah, di eksterior dan di interior. Hasil pengukuran thermal menunjukkan bahwa model ventilasi vertikal dan pemanfaatan evaporasi air dari lantai mampu menurunkan suhu rata-rata hingga 2°C dari suhu luar ruangan dan ada pergerakan udara dalam ruangan dengan kecepatan rata-rata 0,1 m/detik.

Masak dkk (2000), menggambarkan simulasi CFD pendinginan evaporative pasif di sebuah bangunan hipotetis, yang dirancang oleh Ford & Associates di pusat Seville, Spanyol menggunakan CFX-4.2. Simulasi CFD dilakukan untuk mengetahui aliran udara, suhu dan kelembaban relatif yang dihasilkan dalam gedung dengan sistem pendingin evaporasi pasif yang beroperasi pada kondisi tidak ada angin dan dengan kecepatan angin 4 m / s dari Selatan dan Utara. Dengan suhu 35°C dan kelembaban relatif 34% yang digunakan di daerah Sevilla. Hasil simulasi dengan kondisi tidak ada angin, suhu udara sekitar 29°C untuk ruangan yang lebih rendah dan untuk ruangan yang lebih tinggi cenderung suhunya meningkat. Untuk simulasi dengan angin, aliran ke bawah pada ruang atrium terlihat tidak seimbang akibat adanya kecepatan angin di *inlet* atas, suhu dan kelembaban relatif dalam kantor juga menunjukkan ketidakseimbangan.

Sarjito (2013), mengkaji tentang pendinginan evaporasi multi-stage downdraught. Simulasi CFD dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi performa pendinginan evaporasi multi-stage downdraught dengan menyertakan *water spray* dan *wind catcher* yang terbaik dari penelitiannya sebelumnya. Simulasi dilakukan dengan mengintegrasikan perangkat pendinginan evaporasi ke sebuah hipotesis gedung berlantai dua dengan menganggap kondisi cuaca panas dan kering. Dilakukan juga variasi kecepatan angin untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan terhadap efek pendinginan. Secara umum hasil simulasi menunjukkan akibat meningkatnya kecepatan angin dapat menurunkan suhu dan meningkatkan kelembaban relatif pada tiap lantai.

2.2. Dasar Teori

1. Pengondisian Udara dan Kenyamanan thermal

Sistem Pengondisian Udara adalah suatu proses mendinginkan atau memanaskan udara sehingga dapat mencapai temperatur dan kelembaban yang sesuai dengan yang dipersyaratkan terhadap kondisi kenyamanan thermal di dalam ruangan. Menurut Frick (2007) kenyamanan thermal tergantung oleh 3 hal, yaitu suhu udara, kelembaban udara dan pergerakan udara. Kenyamanan thermal untuk kondisi udara tidak bergerak dibagi menjadi tiga, yaitu: (1) sejuk nyaman, suhu efektif 20,5°C-22,8 °C (2) nyaman optimal, suhu efektif 22,8 °C -25,8 °C dan (3) hangat nyaman, suhu efektif 25,8 °C -27,1 °C. Jadi, daerah nyaman fisik manusia untuk tipe udara diam dapat dicapai pada kondisi ruang bersuhu 21 °C -27 °C dan berkelembaban 20%-70%. Selanjutnya, standar kenyamanan thermal untuk udara yang bergerak (dengan standar kecepatan angin 0,1m/s 1,0m/s), daerah nyaman dapat dicapai pada kondisi ruang bersuhu 25 °C -35 °C berkelembaban 5%-85%.

2. Pendinginan Evaporasi

Pendinginan evaporasi terjadi akibat penguapan air pada permukaan bebas dengan bantuan aliran udara (Stoeker, 1982). Pendinginan evaporasi juga terjadi ketika uap air ditambahkan ke udara yang memiliki kelembaban relatif di bawah 100%. Dalam aplikasinya pendinginan evaporasi terbagi menjadi 5 (Bowman, 2000), diantaranya:

1) Pendinginan Evaporasi pasif tak langsung

Pendinginan *evaporasi* pasif tak langsung melibatkan proses perpindahan panas konduksi dari benda padat ke sumber air, yang mana proses pendinginan berasal dari penguapan sumber air ke udara. Contohnya: Kolam air , Taburan (water Spray), Aliran air (*moving water*) di atap rumah tinggal.

2) Pendinginan Evaporasi aktif tak langsung

Udara lingkungan dilewatkan melalui menara pendingin, pendinginan evaporasi terjadi karena kontak antara udara lingkungan dengan permukaan perangkat penukar panas yang dibasahi. Transfer panas terjadi secara konveksi dan tidak terjadi peningkatan kelembaban pada ruang yang didinginkan.

3) Pendinginan Evaporasi langsung

Pendinginan Evaporasi langsung melibatkan penguapan air yang menetes dalam aliran udara. Contoh : proses transpirasi tumbuhan yang diletakkan di tempat yang lembab, air mancur, semprotan dan kolam air, Menara pendingin.

4) Pendinginan Evaporasi aktif langsung

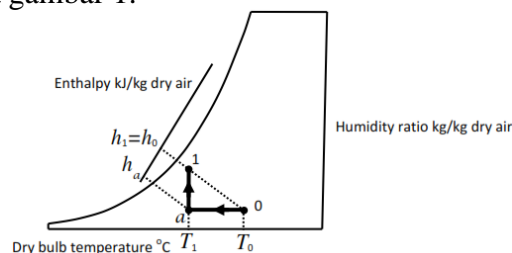
Prinsipnya sama dengan pendinginan evaporasi aktif tidak langsung, bedanya fluida yang didinginkan adalah udara (karena kontak dengan permukaan *pad* yang dibasahi) kemudian diteruskan ke ruang yang akan didinginkan.

5) Pendinginan Evaporasi dua tahap

Evaporasi dua tahap merupakan kombinasi antara evaporasi aktif langsung dengan evaporasi tak langsung, umumnya digunakan ketika suhu bola kering yang lebih rendah.

3. Psikometrik

Psikometrik merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air, yang mempunyai arti penting di dalam bidang teknik pengondisian udara, karena udara atmosfer tidak kering seutuhnya. Proses pendinginan evaporasi secara umum (0 ke 1), yang melibatkan pendinginan kalor sensibel dari udara masuk oleh penguapan air dapat ditunjukkan pada diagram psikometrik pada gambar 1.



Gambar 1 Proses pendinginan evaporasi

Pendinginan evaporasi yang ideal adalah sebuah proses adiabatic, dimana enthalpi akhir proses sama dengan enthalpi awal proses ($h_0=h_1$). Tidak ada kerugian atau keuntungan panas di dalam sistem, jumlah panas sensibel pendinginan seimbang dengan jumlah energi thermal yang diserap oleh penguapan air. Jika energi thermal tambahan ditambahkan ke dalam sistem maka *enthalpy-End state* akan meningkat.

Kelembaban Relatif (RH)

Kelembaban relatif adalah rasio dari tekanan parsial uap air dalam campuran terhadap tekanan uap jenuh air pada temperatur tertentu. Kelembaban relatif dapat dihitung dengan rumus:

$$\varphi = \frac{P(H_2O)}{P'(H_2O)} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana : φ = Relative Humidity (%)

$P(H_2O)$ = tekanan parsial uap air dalam campuran

$P'(H_2O)$ = tekanan uap jenuh air pada temperature tertentu

Temperatur Bola Kering (*Dry Bulb Temperature*)

Temperatur Bola Kering adalah suhu udara ruang yang diperoleh melalui pengukuran dengan Slink Psikrometer pada thermometer dengan bulb kering. Temperatur Bola Kering diplotkan garis vertikal yang berawal dari garis sumbu mendatar yang terletak di bagian bawah diagram psikometrik. Perubahan Temperatur Bola Kering menunjukkan adanya perubahan panas sensibel.

4. Wind Shear Effect

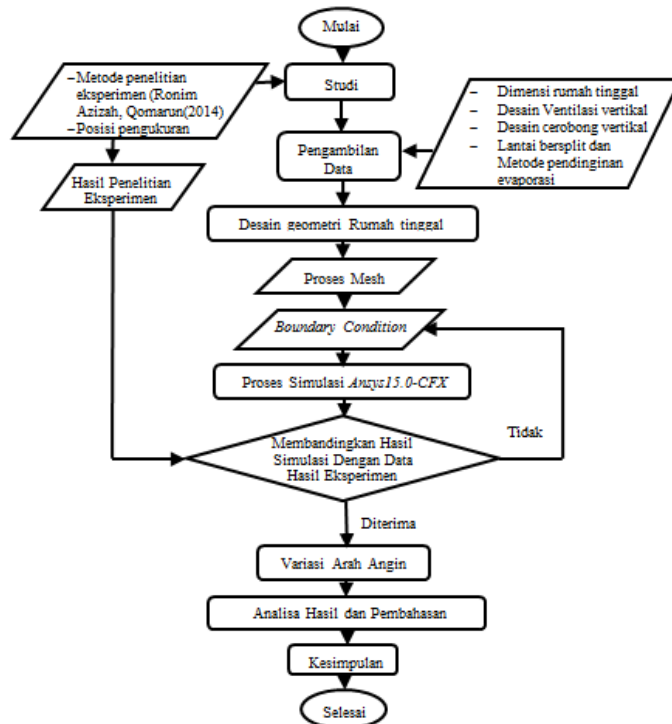
Angin didekat permukaan umumnya memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan lapisan udara yang lebih tinggi. Efek permukaan sering dikenal dengan *wind shear effect* yaitu Kondisi batas dinding adalah *no-slip adiabatic* diberlakukan pada seluruh permukaan dan kecepatan angin masuk diganti dengan efek gesekan angin dengan penampang $V(y)$ yang ditetapkan dengan persamaan berikut (Smith Et al. 2002)

$$\frac{V(y)}{V_{ref}} = \left(\frac{y}{H_{ref}}\right)^\alpha \quad (2)$$

Pada persamaan ini, $V(y)$ adalah kecepatan angin masuk (m/s) pada ketinggian y (m), V_{ref} adalah kecepatan angin referensi pada ketinggian referensi H_{ref} , dan pangkat α adalah nilai kekasaran permukaan daerah setempat.

3. Metodologi Penelitian

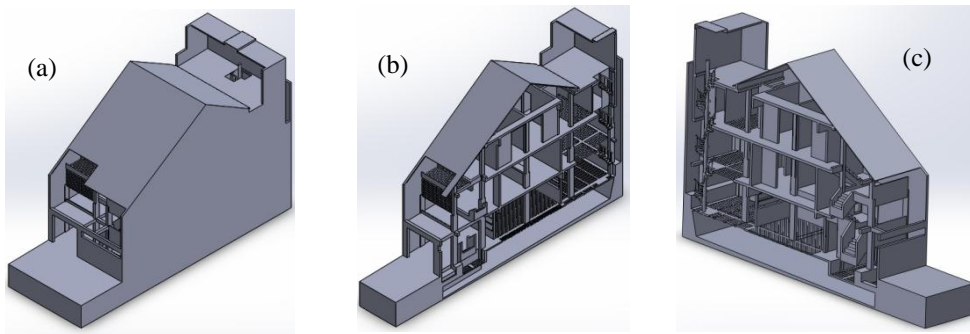
3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 2 Diagram alir penelitian

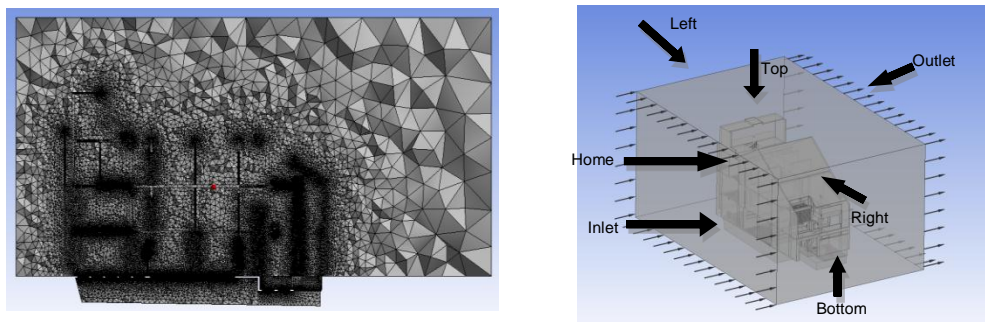
3.2. Langkah-Langkah Penelitian

1. Langkah pertama yaitu penelitian dimulai.
2. Studi literatur dan pengambilan data desain rumah tinggal dan model pendinginan evaporasi serta proses pengujian eksperimen dari Ronim Azizah, Qomarun (2014).
3. Membuat desain rumah tinggal 3 dimensi menggunakan software Solidworks 2014 merujuk pada desain Ronim Azizah, Qomarun(2014).



Gambar 3 hasil desain rumah tinggal 3 dimensi isometrik(a), samping kanan(b), samping kiri(c)

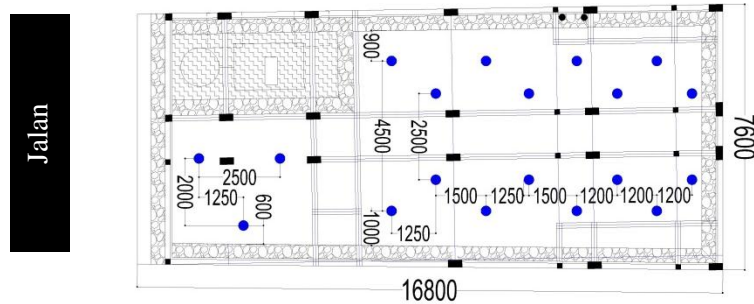
4. Selanjutnya, *import* desain rumah tinggal dari Solidwork 2014 ke software ansys workbench, kemudian membuat *computational domain*.
5. Kemudian proses *mesh*, tipe mesh yang digunakan adalah *unstructure mesh* dengan 27323020 elemen dan 5026715 titik. Selanjutnya yaitu *boundary conditions*.



Gambar 4 hasil mesh (kiri) dan *setting boundary conditions* (kanan)

<i>Domain</i>	<i>Boundary Type</i>	<i>Location</i>	<i>Mass and Momentum</i>	<i>Heat Transfer</i>	<i>Mass Fraction</i>
<i>Home</i>	<i>Wall</i>	<i>BodySurface</i>	<i>Free Slip</i>	-	-
<i>Bottom</i>	<i>Wall</i>	<i>Bottom</i>	<i>Free Slip</i>	-	-
<i>Inlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Inlet</i>	<i>Velpro</i>	$(28-33)^{\circ}C$	$0.016-0.021$
<i>Outlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Outlet</i>	<i>Free Slip</i>	-	-
<i>Left</i>	<i>Wall</i>	<i>Left</i>	<i>Free Slip</i>	-	-
<i>Right</i>	<i>Wall</i>	<i>Right</i>	<i>Free Slip</i>	-	-
<i>Top</i>	<i>Wall</i>	<i>Top</i>	<i>Free Slip</i>	-	-

6. Kemudian *input* Model pendinginan evaporasi langsung yang diterapkan pada rumah tinggal Ronim Azizah, Qomarun (2014), yaitu Aliran air dan kolam air yang terletak dibawah lantai dasar yang bersplit. Pada simulasi ini kolam air dimodifikasi dengan *water spray* yang diletakkan di bawah lantai bersplit sebagai sumber pendinginan evaporasinya. *water Spray* yang digunakan adalah jenis TF6 dengan jumlah 19. Posisi *Spray water* ditunjukkan pada gambar 5.



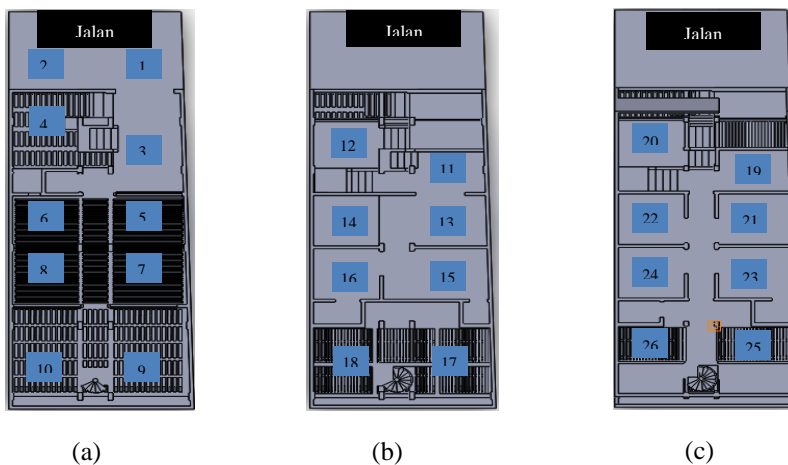
Gambar 5 letak *water spray* 1,25 m dibawah lantai dasar bersplit

7. Selanjutnya proses *running* simulasi.
8. Hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen(Ronim Azizah dan Qomarun, 2014) untuk mengetahui perbandingan karakteristik keduanya.
9. Dari hasil simulasi, diambil kondisi yang memiliki kecepatan angin di dalam rumah tinggal paling identik dengan data eksperimen untuk dilakukan variasi arah angin. Variasi yang dilakukan adalah 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° .
10. Kemudian dilakukan analisa dan penarikan kesimpulan dari hasil simulasi.
11. Penelitian selesai.

4. Hasil dan Pembahasan

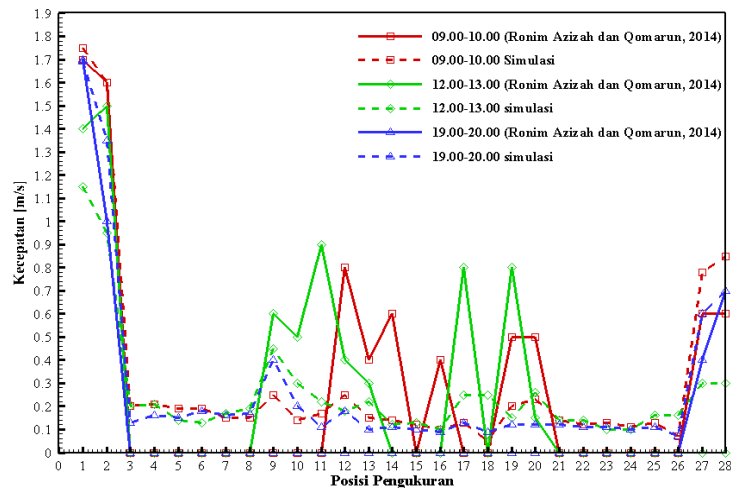
4.1. Perbandingan Hasil Simulasi dan Eksperimen

Uji karakteristik pendinginan rumah tinggal yang memanfaatkan pendinginan evaporasi dan ventilasi vertikal dilakukan dengan membuat *plane* berbentuk persegi dengan ukuran 2m x 2m dengan titik pusat persegi adalah titik pengukuran eksperimen dengan tinggi 1,5 m di atas lantai, ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6 Posisi pengukuran simulasi lantai 1(a), lantai 2 (b), lantai 3 (c)

Gambar 6 menunjukkan posisi pengukuran dimana posisi 1 dan 2 berada di jalan depan rumah, posisi 3-10 berada di dalam rumah lantai 1, 11-18 berada di lantai 2 dan 19-26 berada di lantai 3. Sedangkan posisi 27 dan 28 berada di balkon atas bagian belakang rumah. Setelah simulasi selesai, nilai kecepatan, temperatur, dan kelembaban relatif dapat diketahui dengan *tool function calculator* pada *software ANSYS CFX-Post*. Didapatkan hasil simulasi yang identik dengan hasil pengukuran eksperimen di 28 posisi pengukuran sebagai berikut :

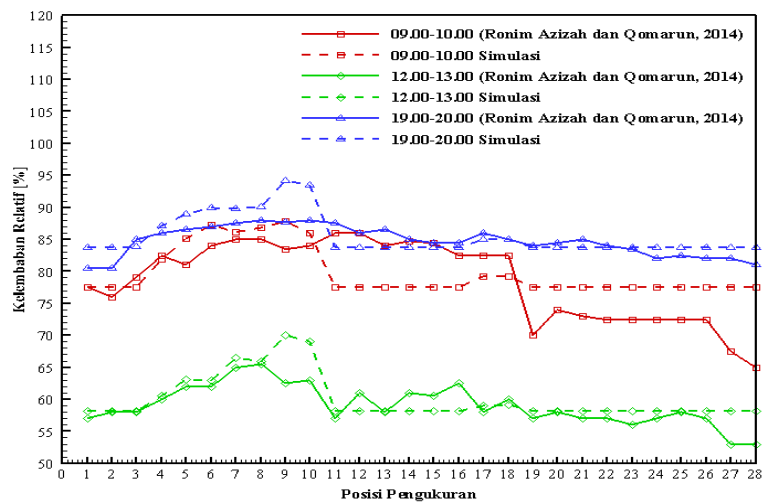


Gambar 7 grafik kecepatan angin hasil simulasi

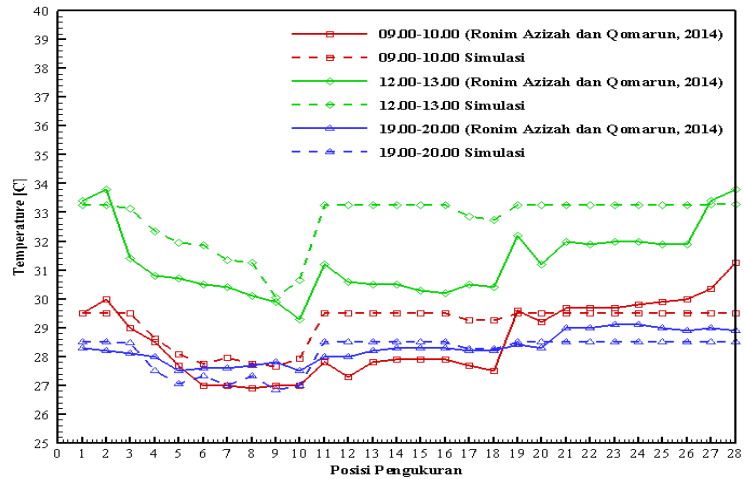
Dari gambar 7, dapat dilihat adanya kesamaan antara profil kecepatan hasil simulasi dan eksperimen. Kecepatan tertinggi keduanya terjadi pada PU 1 dan 2 yaitu pengukuran eksperimen pada kecepatan 1,7m/s sedangkan hasil simulasi pada kecepatan 1,75 m/s.

Kemiripan juga terjadi dimana keduanya cenderung memiliki kecepatan konstan dapat dilihat pada PU 3 - 8 dan 21 - 26, dimana pengukuran eksperimen memiliki kecepatan 0 m/s sedangkan simulasi memiliki kecepatan 0,1 - 0,2 m/s. kecepatan 0 m/s pada pengukuran eksperimen diduga disebabkan oleh alat ukur yang digunakan kurang sensitif pada kecepatan rendah.

Terjadi Kecepatan yang fluktuatif pada PU 9 - 20 baik dari data eksperimen maupun simulasi meskipun memiliki nilai yang berbeda. Perbedaan ini disebabkan oleh kondisi angin pada saat proses pengukuran eksperimen tidak konstan, karena pengukuran pada posisi satu dengan yang lain tidak dilakukan satu waktu melainkan berurutan (Ronim Azizah dan Qomarun, 2014). Pada PU 27 dan 28 kecepatan mengalami kenaikan baik hasil simulasi maupun eksperimen masing-masing mencapai 0,8 m/s dan 0,7 m/s



Gambar 8 grafik kelembaban relatif simulasi



Gambar 9 grafik temperatur simulasi

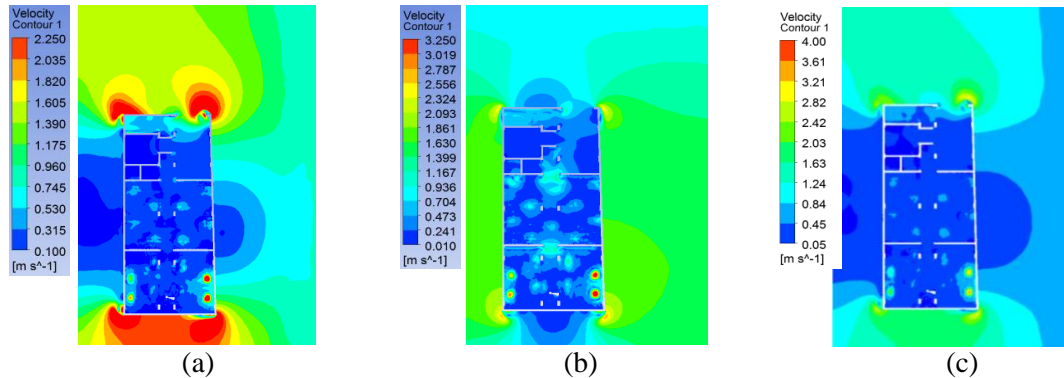
Dari gambar 8 dan 9 RH dan temperatur hasil simulasi identik dengan data eksperimen. Pada PU 1 – 10 (lantai 1) dari ketiga waktu memiliki nilai hampir sama antara hasil simulasi dan pengukuran eksperimen, hal ini menggambarkan bahwa modifikasi pendinginan evaporasi dengan *spray water* pada simulasi dapat menghasilkan karakteristik udara yang identik dan mendekati data eksperimen.

Berbeda dengan PU 1 – 10 (lantai 1), pada PU 11-18 (lantai 2) dan 19-28 (lantai 3) khususnya untuk waktu simulasi 09.00-10.00 dan 12.00-13.00 terjadi selisih cukup signifikan antara RH dan temperatur hasil simulasi dengan data eksperimen. Perbedaan diduga disebabkan oleh diabaikannya pendinginan evaporasi dari transpirasi tumbuhan air yang berada di dalam rumah tinggal dan kurang detailnya pendefinisian radiasi matahari saat simulasi. Kondisi yang sama tidak terjadi pada waktu simulasi 19.00 – 20.00, karena pada waktu tersebut RH dan temperatur di dalam rumah tinggal hampir sama dengan lingkungan, sehingga hasil simulasi selalu mendekati data eksperimen.

Dari uraian hasil simulasi diatas, dapat diketahui bahwa simulasi dapat menggambarkan sirkulasi udara dan efek pendinginan evaporasi di dalam rumah tinggal, ditandai dengan hasil simulasi yang identik dengan data eksperimen. Sehingga data hasil simulasi adalah valid dan bisa dilanjutkan untuk pembahasan dan studi selanjutnya.

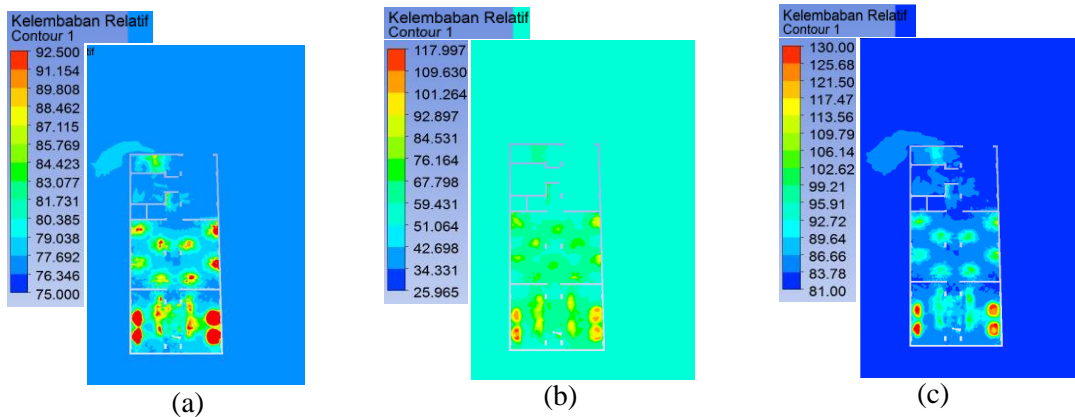
4.2 Visualisasi Kontur Kecepatan Angin, RH Dan Temperatur Di Dalam Rumah Tinggal

1) Visualisasi Kontur Kecepatan Angin, RH Dan Temperatur di lantai 1



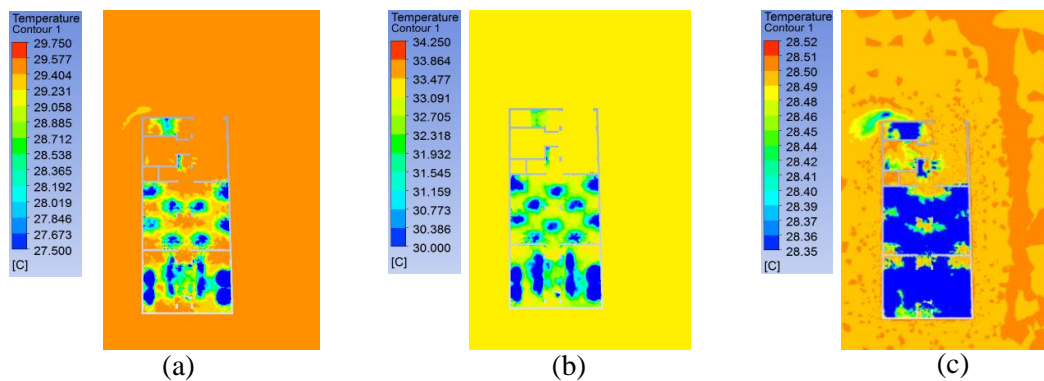
Gambar 10 kontur kecepatan di lantai 1 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

Dari gambar 10 dapat dilihat profil kecepatan di dalam rumah tinggal untuk ketiga waktu hampir sama, dimana pada waktu simulasi 09.00-10.00, 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 memiliki kecepatan rata-rata masing masing yaitu 0,18 m/s, 0,19 m/s dan 0,22 m/s. Dengan kecepatan tertinggi di dalam rumah pada lantai 1 terdapat pada PU 9 dan 10 tepatnya di depan ventilasi vertikal.



Gambar 11 kontur RH di lantai 1 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pada pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

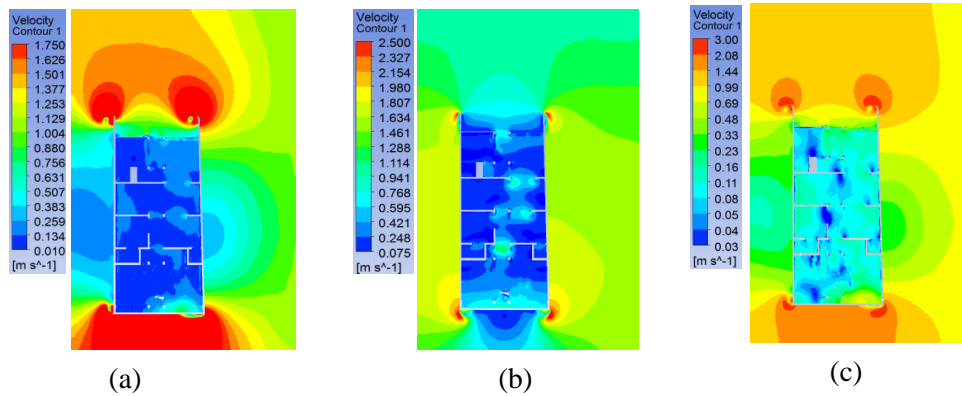
Dari gambar 11 dapat dilihat RH yang merata di dalam rumah tinggal dan menunjukkan perbedaan dengan RH lingkungan sekitar, akan tetapi terdapat bercak di titik-titik tertentu yang memiliki RH yang lebih tinggi akibat penggunaan *spray water sebagai* pengganti pancuran air ketika simulasi. Terjadi perbedaan RH antara ketiga waktu simulasi diakibatkan RH lingkungan yang berbeda pula, dimana pada waktu simulasi 09.00-10.00, 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 memiliki RH rata-rata masing-masing adalah 84,8%, 64,5 %, 89,7 %.



Gambar 12 temperatur di lantai 1 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

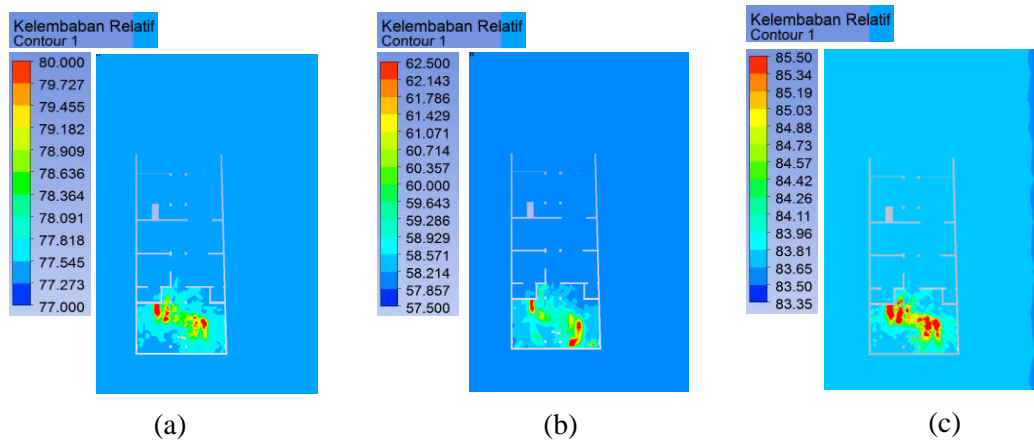
Dari gambar 12 dapat dilihat adanya perbedaan temperatur dalam rumah dibandingkan dengan lingkungan akibat adanya pendinginan evaporasi. Turunnya temperatur dalam rumah bersamaan dengan bertambahnya kelembaban relatif. Tingkat pemerataan temperatur juga hampir sama dengan kelembaban relatif dimana temperatur rata-rata pada waktu simulasi 09.00-10.00, 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 masing masing adalah 28,15 °C, 31,57 °C dan 27,3 °C.

2) Visualisasi Kontur Kecepatan Angin, RH Dan Temperatur di lantai 2



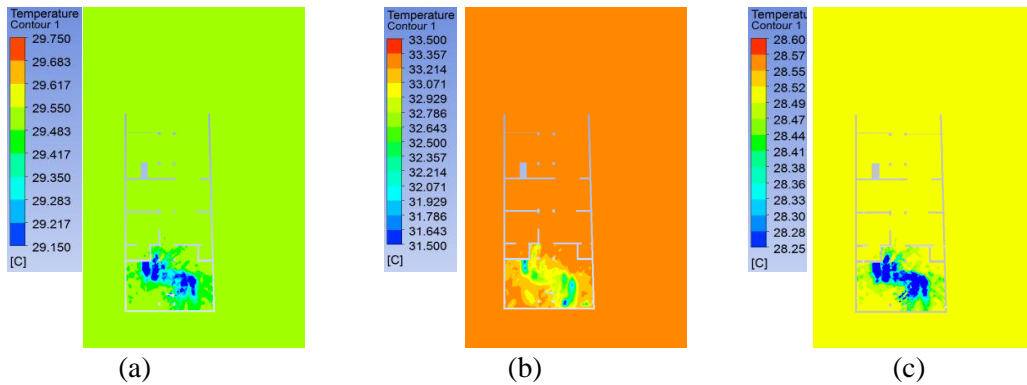
Gambar 13 kontur kecepatan di lantai 2 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

Dari gambar 13 dapat dilihat bahwa profil kecepatan di dalam rumah tinggal pada lantai dua, dimana pada waktu simulasi 19.00-20.00 memiliki tingkat sirkulasi paling merata dibanding dengan simulasi pada waktu yang lain dengan kecepatan rata-rata 0,12 m/s, disusul simulasi pada waktu 09.00-10.00 dengan kecepatan rata-rata 0,14 m/s dan yang terakhir simulasi pada waktu 12.00-13.00 dengan kecepatan rata-rata 0,18 m/s. seperti halnya di lantai 1, di lantai dua kecepatan tertinggi juga terjadi di depan ventilasi vertikal yaitu pada PU 17 dan 18 dengan kecepatan rata-rata pada waktu 09.00-10.00, 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 masing-masing mencapai 0,13 m/s, 0,25 m/s, 0,12 m/s.



Gambar 14 kontur RH di lantai 2 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

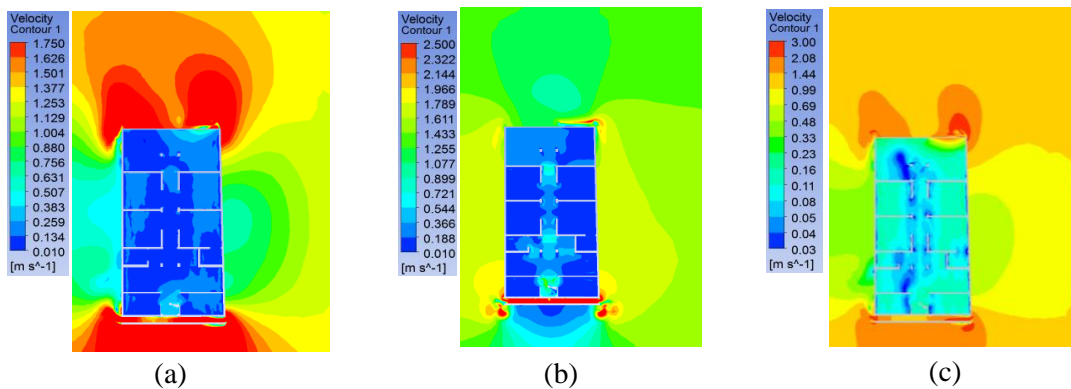
Dari gambar 14 dapat dilihat kontur RH yang sama dengan RH lingkungan. Perbedaan RH terjadi pada ruang belakang dimana pada ruangan tersebut lantai tidak dibuat cor, melainkan dibuat dari anyaman besi bersplit, sehingga pengaruh pendinginan evaporasi dari lantai dasar masih terasa sampai ke lantai 2. Kondisi ini berlaku untuk ketiga waktu simulasi, dan memiliki pemerataan hampir sama, dimana simulasi pada waktu 09.00-10.00 memiliki RH rata-rata 77,95 %, kemudian simulasi pada waktu 12.00-13.00 memiliki RH rata-rata 58,4 % dan simulasi pada waktu 19.00-20.00 memiliki RH rata-rata 84,06 %.



Gambar 15 temperatur di lantai 2 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

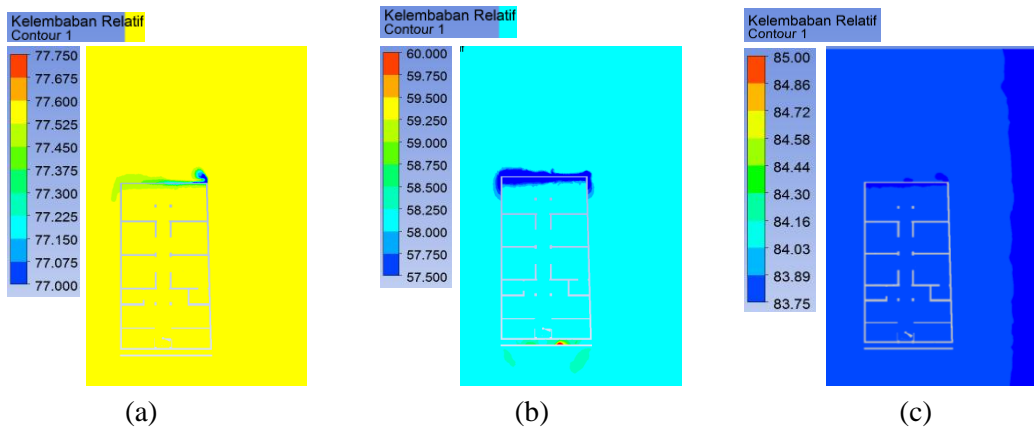
Dari gambar 15 dapat dilihat kontur temperatur, sama halnya dengan RH, temperatur di lantai 2 sebagian besar sama dengan temperatur lingkungan. Perbedaan temperatur juga terjadi pada ruang belakang yang berlantai anyaman besi bersplit. Tingkat pemerataan temperatutnya pun hampir sama dengan tingkat pemerataan RH untuk ketiga waktu simulasi. Simulasi pada waktu 09.00-10.00 memiliki temperatur rata-rata 29,4 °C, kemudian simulasi pada waktu 12.00-13.00 memiliki temperatur rata-rata 33,1 °C dan simulasi pada waktu 19.00-20.00 memiliki temperatur rata-rata 28,4 °C.

3) Visualisasi Kontur Kecepatan Angin, RH Dan Temperatur di lantai 3



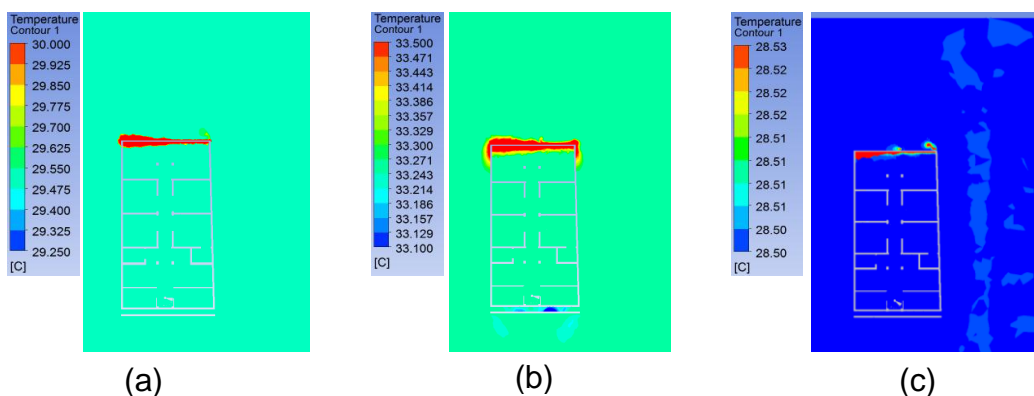
Gambar 16 kontur kecepatan di lantai 3 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

Dari gambar 16 dapat dilihat bahwa profil kecepatan di dalam rumah tinggal di lantai tiga. Seperti halnya di lantai 2, dari ketiga waktu simulasi memiliki tingkat pemerataan yang berbeda, dimana pada waktu simulasi 19.00-20.00 memiliki tingkat sirkulasi paling merata dibanding dengan simulasi pada waktu yang lain dengan kecepatan rata-rata 0,11 m/s, disusul simulasi pada waktu 09.00-10.00 dengan kecepatan rata-rata 0,14 m/s dan yang terakhir simulasi pada waktu 12.00-13.00 dengan kecepatan rata-rata 0,15 m/s. Berbeda dengan di lantai 1 dan lantai 2, di lantai 3 kecepatan hampir sama, baik ruang bagian depan, tengah maupun belakang. Karena pada lantai 3 ventilasi vertikal sudah tertutup oleh dinding ruangan sehingga tidak begitu terlihat *supply* udara ke dalam ruangan lantai 3.



Gambar 17 kontur RH di lantai 3 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c) 1,5 m

Dari gambar 17 terlihat bahwa RH di dalam rumah tinggal lantai 3 sama dengan RH lingkungan pada ketiga waktu simulasi. Terdapat kontur yang berbeda di bagian depan disebabkan oleh atap dari rumah yang memiliki temperatur lebih tinggi sehingga menurunkan nilai RH. Pada waktu simulasi 09.00-10.00 memiliki RH rata-rata 77,5 %. Sedangkan pada waktu simulasi 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 memiliki RH rata-rata 58,2 % dan 83,76 %.



Gambar 18 temperatur di lantai 3 pada ketinggian 1,5 m diatas lantai pukul 09.00-10.00 (a), 12.00-13.00 (b), 19.00-20.00 (c)

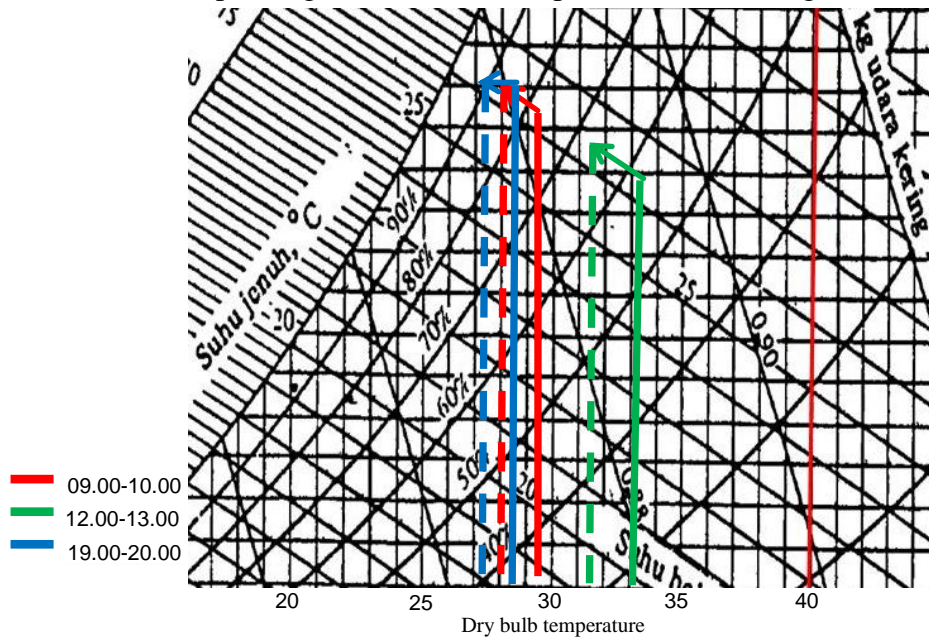
Dari gambar 18 terlihat bahwa kontur temperatur memiliki pemerataan yang sama dengan kontur RH di dalam rumah tinggal lantai 3 yaitu sama dengan temperatur lingkungan pada ketiga waktu simulasi. Temperatur meningkat di bagian depan rumah yang disebabkan oleh semakin dekat dengan atap rumah yang memiliki temperatur lebih tinggi. Pada waktu simulasi 09.00-10.00 memiliki temperatur rata-rata 29,5 °C. Sedangkan pada waktu simulasi 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 memiliki temperatur rata-rata adalah 33,25 °C % dan 28,5 °C

4.3 Diagram Psikometrik dan *Comfort Zone*

1) Diagram Psikometrik

Diagram psikometrik untuk proses pendinginan evaporatif rumah tinggal khususnya di lantai 1, baik pada waktu simulasi 09.00-10.00, 12.00-13.00 maupun 19.00-20.00 dapat dilihat pada gambar 19. Yang mana pada waktu simulasi 09.00-10.00 udara lingkungan masuk memiliki temperatur 29,5 °C dengan RH 77,5 % dan kondisi setelah pendinginan memiliki temperatur 28,1 °C dengan RH 84,8 %. Kemudian Pada waktu simulasi 12.00-13.00 udara lingkungan masuk memiliki temperatur 33,25 °C dengan RH 58 % dan kondisi setelah pendinginan memiliki temperatur 31,57 °C dengan RH 64,5 %. Sedangkan Pada waktu simulasi

19.00-20.00 udara lingkungan masuk memiliki temperatur 28,5 °C dengan RH 83 % dan kondisi setelah pendinginan memiliki temperatur 27,3 °C dengan RH 89,7 %.

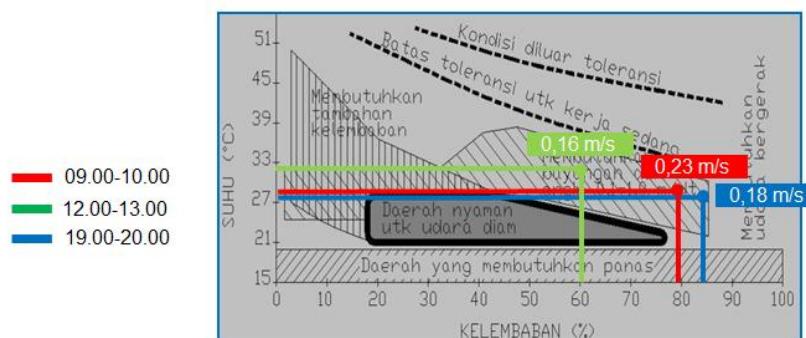


Gambar 19 diagram psikometrik proses pendinginan evaporasi pada waktu simulasi 09.00-10.00, 12.00-13.00, 19.00-20.00

Dari gambar 19 menunjukkan bahwa simulasi proses pendinginan evaporasi pada waktu 09.00-10.00 dan 12.00-13.00 menggambarkan proses pendinginan evaporasi yang ideal karena memiliki enthalpi kondisi awal sama dengan kondisi setelah pendinginan ($h_0=h_1$). Sedangkan proses pendinginan evaporasi pada waktu 19.00-20.00 terjadi kurang ideal karena enthalpi kondisi awal tidak sama dengan kondisi setelah pendinginan ($h_0 \neq h_1$).

2) Comfort Zone

Menurut Frick (2007) standar kenyamanan thermal untuk tipe udara yang bergerak (dengan standar rentang kecepatan angin 0,1m/s-1,0m/s), daerah nyaman dapat dicapai pada kondisi ruang bersuhu 25 °C -35 °C berkelembaban 5%-85%. Pada hasil simulasi waktu 09.00-10.00 memiliki kecepatan rata-rata 0,23 m/s dengan temperatur rata-rata 29,1 °C dan kelembaban relatif 79,7 %. Kemudian pada hasil simulasi waktu 12.00-13.00 memiliki kecepatan rata-rata 0,16 m/s dengan temperatur rata-rata 32,7 °C dan kelembaban relatif 60,1 %. Sedangkan Pada hasil simulasi waktu 19.00-20.00 memiliki kecepatan rata-rata 0,18 m/s dengan temperatur rata-rata 28,1 °C dan kelembaban relatif 84,5 %. Comfort zone pada waktu simulasi 09.00-10.00, 12.00-13.00 dan 19.00-20.00 dapat dilihat pada gambar 20.

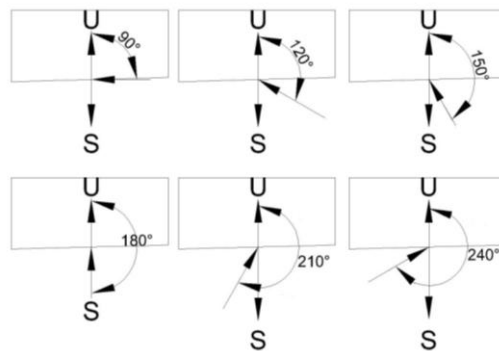


Gambar 20 diagram daerah nyaman (*comfort zone*).

Dari gambar 20 dapat disimpulkan bahwa dari ketiga waktu simulasi dengan kondisi lingkungan yang berbeda, rumah tinggal yang memanfaatkan efek pendinginan evaporasi dan ventilasi vertikal dapat memberikan kondisi nyaman untuk katategori udara yang bergerak (Frick,2007).

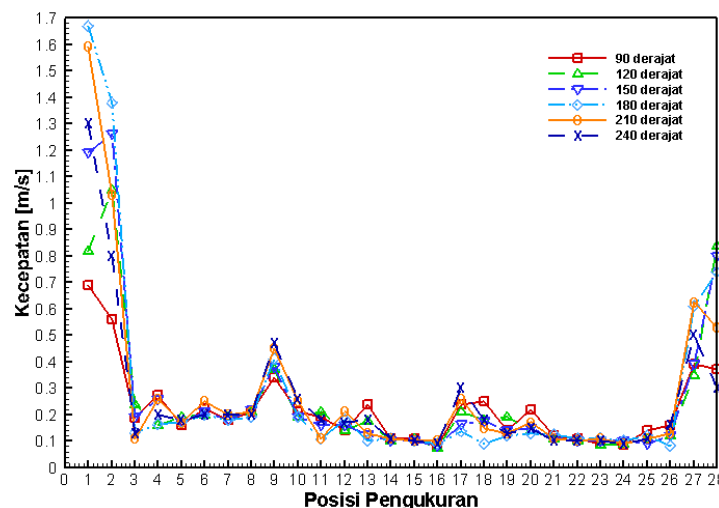
4.4 Studi Variasi Arah Angin untuk Mendapatkan Sirkulasi Udara dalam Rumah Tinggal yang Paling Optimal

Penggunaan ventilasi vertikal dalam rumah tinggal sangat bermanfaat untuk memberikan sirkulasi udara yang lebih baik. Penempatan ventilasi vertikal pada rumah tinggal juga sangat mempengaruhi kinerjanya jika dikaitkan dengan arah datangnya arah angin. Pada penelitian ini ventilasi vertikal di tempatkan di bagian belakang rumah (Ronim Azizah, Qomarun 2014). Untuk mengetahui kinerja ventilasi vertikal dilakukan variasi arah datangnya angin untuk mengetahui arah angin yang mendukung kinerja ventilasi vertikal untuk memberikan sirkulasi udara dalam ruangan paling optimal. Variasi yang dilakukan merujuk pada penelitian eksperimen yang mana arah angin dominan dari arah selatan dan timur yaitu pada arah 90°, 120°, 150°, 180°, 210° dan 240°. Variasi arah angin dapat dilihat pada gambar 21.



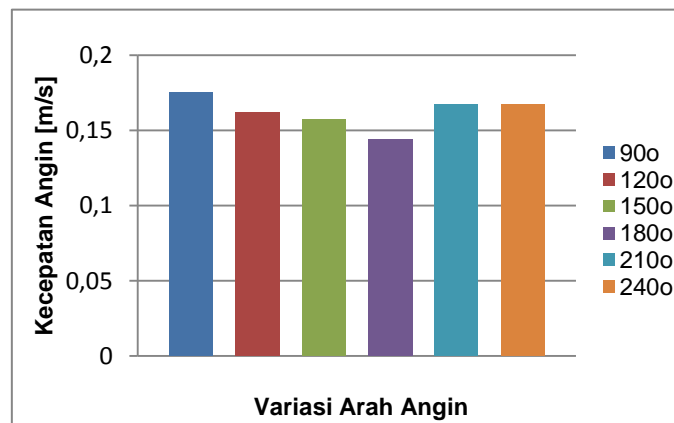
Gambar 21 variasi arah angin 90°, 120°, 150°, 180°, 210° dan 240°

Simulasi dilakukan dengan kecepatan angin masuk 2 m/s dengan menambahkan *wind shear effect*. Dari hasil simulasi keenam variasi arah angin didapatkan grafik kecepatan di setiap posisi pengukuran sebagaimana ditunjukkan pada gambar 22.



Gambar 22 kecepatan simulasi pada variasi arah angin 90°, 120°, 150°, 180°, 210° dan 240°

Dari gambar 22 dapat diketahui arah angin yang memberikan sirkulasi udara dalam rumah yang paling optimal adalah dari arah 90° dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,23 m/s, 0,17 m/s dan 0,135 m/s. Kedua adalah arah angin 240° dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,23 m/s, 0,16 m/s dan 0,117 m/s. Ketiga adalah arah angin 210° dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,23 m/s, 0,145 m/s dan 0,11 m/s. Keempat adalah arah angin 120° dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,218 m/s, 0,14 m/s dan 0,11 m/s. Kelima adalah arah angin 150° dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,22 m/s, 0,13 m/s dan 0,11 m/s. Terakhir adalah arah angin 180° dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,2 m/s, 0,11 m/s dan 0,11 m/s. Perbandingan kecepatan rata-rata di dalam rumah tinggal ditunjukkan pada gambar 23.



Gambar 4.23 perbandingan kecepatan rata-rata seluruh ruangan

5. Penutup

5.1. Kesimpulan

1. Simulasi CFD dapat menggambarkan karakteristik udara di dalam rumah tinggal yang memanfaatkan pendinginan evaporasi dan ventilasi vertikal pada tiga kondisi berbeda yaitu:
 - Pada waktu simulasi 09.00-10.00 di lantai pertama memiliki kecepatan rata-rata 0,18 m/s, RH rata-rata 84,8%, dan temperatur rata-rata 28,15°C. Di lantai dua memiliki kecepatan rata-rata 0,14 m/s, RH rata-rata 77,95 %, dan temperatur rata-rata 29,4 °C. Sedangkan di lantai tiga memiliki kecepatan rata-rata 0,14 m/s, RH rata-rata 77,5 % dan temperatur rata-rata 29,5 °C.
 - Pada waktu simulasi 12.00-13.00 di lantai pertama memiliki kecepatan rata-rata 0,19 m/s, RH rata-rata 64,5%, dan temperatur rata-rata 31,57°C. Di lantai dua memiliki kecepatan rata-rata 0,18 m/s, RH rata-rata 58,4 %, dan temperatur rata-rata 33,1 °C. Sedangkan di lantai tiga memiliki kecepatan rata-rata 0,15 m/s, RH rata-rata 58,2 %, dan temperatur rata-rata 33,25 °C.
 - Pada waktu simulasi 19.00-20.00 di lantai pertama memiliki kecepatan rata-rata 0,22 m/s, RH rata-rata 89,7 % dan temperatur rata-rata 27,3 °C. Di lantai dua memiliki kecepatan rata-rata 0,12 m/s, RH rata-rata 84,06 %, dan temperatur rata-rata 28,4 °C. Sedangkan di lantai tiga memiliki kecepatan rata-rata 0,11 m/s, RH rata-rata 83,76 %, dan temperatur rata-rata 28,5 °C.

Ketiga waktu simulasi mampu memberikan kondisi nyaman di dalam ruangan untuk udara yang bergerak menurut Frick (2007).

2. Arah angin yang dapat memberikan sirkulasi udara paling optimal adalah arah 90o dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,23 m/s, 0,17 m/s dan 0,135 m/s. Sedangkan arah angin yang memberikan sirkulasi paling rendah adalah arah 180o dengan kecepatan rata-rata di lantai 1, lantai 2 dan lantai 3 adalah 0,2 m/s, 0,11 m/s dan 0,11 m/s.

PERSANTUNAN

Puji syukur alhamdulillah, penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkah, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir dapat terselesaikan :

Tugaas akhir berjudul “UJI KARAKTERISTIK HIPOTESIS BANGUNAN RUMAH TINGGAL YANG MEMANFAATKAN PENDINGINAN EVAPORASI DENGAN COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS (CFD)” dapat diselesaikan atas dukungan dari beberapa pihak. Untuk itu pada kesempatan ini, penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua yang dengan segala kasih sayang, kesabaran, keikhlasan dan pengorbanannya senantiasa memberi dukungan dan mendo'akan penulis.
2. Bapak Dr. H. Sri Sunarjono MT. Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta
3. Bapak Tri Widodo BR. ST. MSc., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta.
4. Bapak Ir. Sarjito, MT., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing utama yang senantiasa memberi arahan dan masukan yang sangat bermanfaat bagi penulis.
5. Bapak Dr. Qomarun selaku narasumber rumah tinggal yang senantiasa membimbing dalam mengumpulkan data dalam proses desain rumah tinggal.
6. Bapak Ir. Bibit Sugito, MT. Selaku pembimbing akademik.
7. Teman-teman seperjuangan dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini

DAFTAR PUSTAKA

- Azizah, Ronim dan Qomarun (2014). Solusi Ventilasi Vertikal dalam Mendukung Kenyamanan Thermal Pada Rumah Di Perkotaan, Prosiding RAPI XIII Fakultas Teknik UMS, Surakarta.
- Bowman, N. T., Eppel, H., Lomas, K. J., Robinson, D., & Cook, M. J. (2001). Passive draught evaporative cooling. *Indoor and Built Environment*, 9(5), 284-290.
- Cook, M. J., Robinson, D., Lomas, K. J., Bowman, N. T., & Eppel, H. (2001). Passive draught evaporative cooling. *Indoor and Built Environment*, 9(6), 325-334.
- Givoni, Baruch (1998). *Climate Consideration in Building and Urban Design*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Frick, Heinz, Ardiyanto, A. dan Darmawan, A. (2007). *Ilmu Fisika Bangunan: Pengantar Pemahaman Cahaya, Kalor, Kelembaban, Iklim, Gempa Bumi, Bunyi dan Kebakaran*, Penerbit Kanisius, Yogyakarta.

- Cook, M. J., Robinson, D., Lomas, K. J., Bowman, N. T., & Eppel, H. (2001). Passive downdraught evaporative cooling. *Indoor and Built Environment*, 9(6), 325-334.
- Givoni, Baruch (1998). *Climate Consideration in Building and Urban Design*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Frick, Heinz, Ardiyanto, A. dan Darmawan, A. (2007). *Ilmu Fisika Bangunan: Pengantar Pemahaman Cahaya, Kalor, Kelembaban, Iklim, Gempa Bumi, Bunyi dan Kebakaran*, Penerbit Kanisius, Yogyakarta.
- Hidayatullah, R.N. (2010). *Desain Alat Konversi Energi Angin Type Savonius Sebagai Pembangkit Listrik Pada Pulau Bawean*.
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2005). *Mekanika Fluida Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Riyadi, T. W. B. (2014). A Parametric Study of Wind Catcher Model in a Typical System of Evaporative Cooling Tower Using CFD. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 660, pp. 659-663). Trans Tech Publications.
- Sarjito. (2012). *An Investigation of the Design and Performance of a Multi-stage Downdraught Evaporative Cooler* (Doctoral dissertation, Kingston University).
- Stoecker, W. F., & Jerald, W. J. (1992). *Refrigerasi dan Pengkondisian Udara*, alih bahasa Supratman Hara. Edisi Kelima. Penerbit Erlangga. Jakarta.