ANALISIS KENYAMANAN TERMAL MENGGUNAKAN *COMPUTER SIMULATED PERSON*

THERMAL COMFORT ANALYSIS USING COMPUTER SIMULATED PERSON

Nathanael Antonius.[1], Ery Djunaedy[2], Wahyu Sujatmiko[3],Amaliyah R.I.U.[4]
[1,2,3]Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
[1]natanaelantonius@rocketmail.com [2]erydjunaedy@gmail.ac.id [3]jtwsmiko@gmail.com
[4]amaliyahriu@telkomuniversity.ac.id

Dewasa ini manusia menghabiskan hampir sebagian waktunya di dalam ruangan, maka dari itu kenyamanan termal perlu diwujudkan. Namun kenyamanan termal dalam suatu ruangan hanya dapat dianalisa setelah ruangan tersebut telah dibangun. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi kondisi termal dalam ruangan. Prediksi tersebut diperoleh dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) terhadap *Computer Simulated Person* (CSP). CSP dianalogikan sebagai manusia dalam ruangan simulasi. Hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan hasil eksperimen menggunakan manikin fisik dalam suatu ruangan. Parameter yang dibandingkan adalah kecepatan udara (U) dan temperatur (T) yang diambil pada tiga titik uji. Perbandingan tersebut dilakukan untuk validasi model CSP dalam memprediksi kondisi termal. Kriteria validasi berupa *Normalized Mean Bias Error* (NMBE, *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CV RSME), dan *Coefficient of Determinatio*n (R^2). Nilai NMBE U dan T adalah 0.63% dan 0.003%, nilai CV RSME U dan T adalah 2.34% dan 0.016%, nilai R^2 U dan T adalah 0.99 dan 0.981. CSP yang telah divalidasi digunakan untuk memprediksi kenyamanan termal ruangan Laboratorium Fisika Bangunan Universitas Telkom. Hasil prediksi menunjukkan kenyamanan termal didapatkan pada posisi CSP yang berada pada bagian depan dan tengah ruangan.

Kata kunci : *Computer Simulated Person, Computational Fluid Dynamics,* Validasi Model, Kenyamanan Termal.

Recently,most people spend their live indoor, therefore thermal comfort needs to be realized. But the thermal comfort in a room can only be analyzed after the room has been built. Objective of this study is to predict the thermal conditions in the room. The prediction is obtained by using a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation to a Computer Simulated Person (CSP). CSP is analogous to humans in a simulation room. The simulation results are compared with the results of experiments using physical manikin in a room. Compared parameters are air velocity (U) and temperature (T) taken at the three test points. The purpose behind the comparison is to validate the CSP model in predicting thermal conditions. Validation criteria are Normalized Mean Bias Error (NMBE), Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CV RSME), and Coefficient of Determination (R^2). Value of NMBE U and T are 0.63% and 0.003%, value of CV RSME U and T are 2.34% and 0.016%, values of R^2 U and T are 0.99 and 0.981. The validated CSP is used to predict the thermal comfort of the Telkom University Building Physics Laboratory Room The prediction results show that thermal comfort is obtained at the CSP position in the section front and center of the room.

Keywords: Computer Simulated Person, Computational Fluid Dynamics, Model Validation, Thermal Comfort

1. Pendahuluan

Dalam perancangan sebuah bangunan, kenyamanan dalam ruangan merupakan hal yang perlu diperhatikan agar orang-orang yang berada di dalamnya dapat bekerja dengan maksimal. Kenyamanan terdiri atas kenyamanan psikis dan kenyamanan fisik. Kenyamanan psikis yaitu kenyamanan kejiwaan (rasa aman, tenang, gembira, dll) yang terukur secara subyektif. Sedangkan kenyamanan fisik dapat diukur secara obyektif, yang meliputi kenyamanan spasial, visual, auditorial dan termal. Kenyamanan termal adalah temperatur yang dirasakan oleh manusia yang dikondisikan oleh lingkungan dan benda-benda di sekitarnya [1]. Penilaian terhadap tingkat kenyamanan termal dilakukan oleh manusia di dalamnya ketika bangunan gedung sudah rampung atau sudah beroperasi. Hal ini yang seringkali menyebabkan dilakukannya penambahan jumlah pengkondisi suhu jika kenyamanan termal dalam gedung tidak terpenuhi. Menambah pengkondisi suhu berarti meningkatan pemakaian energi dan berakibat pada peningkatan biaya listrik bangunan. Untuk itu dilakukan

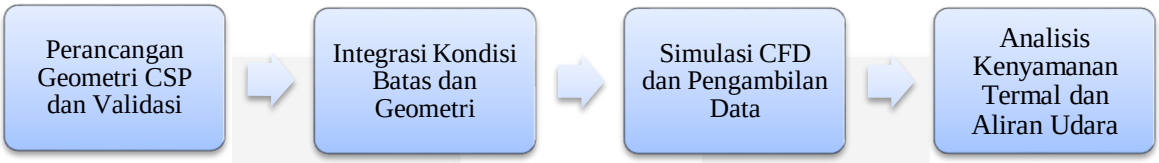
simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *Computer Simulated Person* pada tahap perancangan bangunan untuk mewakili peran manusia dalam menilai tingkat kenyamanan termal di dalam sebuah bangunan. Simulasi CFD mampu memprediksi keadaan termal ruangan sehingga dari hasil yang didapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan pengkondisi suhu dalam ruangan[2].

Computer Simulated Person (CSP) merupakan metode perancangan model manusia menggunakan komputer dari segi geometri dan fisiologis agar dapat mewakili keberadaan manusia pada proses simulasi. Pemanfaatan CSP merupakan bentuk efisiensi dari penelitian serupa namun menggunakan bentuk manusia buatan (manikin) secara fisik. Berbeda dengan CSP yang berbasis komputer, penelitian menggunakan manikin fisik ini membutuhkan kelengkapan alat pengkondisi ruangan dan berbagai macam sensor untuk dapat melakukan eksperimen. Dengan metode eksperimen, berbagai macam rekayasa dilakukan pada manikin fisik untuk semakin mendekati peran manusia dalam mengevaluasi kondisi termal ruangan. Penelitian menggunakan manikin fisik berbasis eksperimen inilah yang akan menjadi acuan penelitian ini dalam memvalidasi kemampuan CSP dalam memprediksi kondisi termal dalam ruangan.

Rancangan CSP divalidasi dengan metode *benchmarking* atau membandingkan. Metode ini membandingkan rancangan secara numerik dengan penelitian serupa namun menggunakan metode eksperimen. Validasi ini dilakukan untuk mendekati prediksi kondisi termal hasil simulasi dengan prediksi hasil eksperimen sehingga didapatkan CSP yang dapat mewakili prediksi termal lingkungan yang akan dirasakan oleh manusia di dalam ruangan.

2. Dasar Teori dan Metodologi

2.1 Skema Penelitian



Gambar 1 Diagram Alir Peneltian

Penelitian ini diawali dengan perancangan geometri seperti ditampilkan pada Gambar 1. Geometri yang dibentuk adalah geometri CSP dan ruangannya. Geometri disamakan dengan acuan untuk melakukan validasi. Hasil validasi berupa NMBE,CV RSME, dan R^2 yang berguna untuk mengetahui ketepatan prediksi CSP. Setelah validasi, dilakukan penyesuaian kondisi batas dengan geometri dan kondisi yang ingin kita dekati. Ketika kondisi batas sudah terintegrasi dengan baik maka dapat dilakukan simulasi dan pengambilan data temperatur dan kecepatan udara. Data diambil pada titik sampel dan titik uji berbeda untuk kemudian dapat dipakai untuk mengevaluasi kenyamanan termal ruangan.

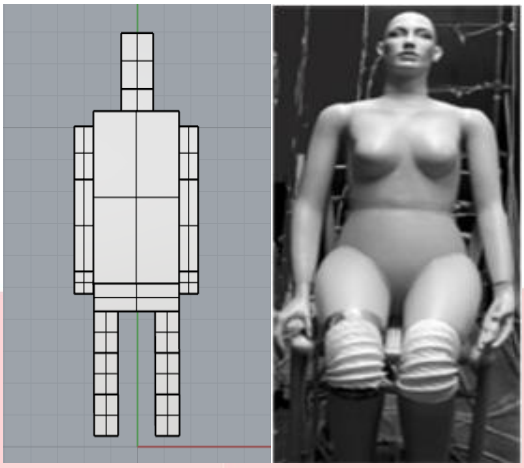
2,2 Perancangan Geometri

Geometri manikin fisik dari literatur acuan memiliki bentuk yang sangat menyerupai manusia dengan bagian-bagian tubuh yang mendetail. Geometri yang mendetail akan menyebabkan beban komputasi dan kebutuhan waktu yang lama dalam merancangnya. Maka dari itu pemakaian model berbentuk balok-balok akan sangat mempercepat komputasi dan meningkatkan efisiensi penelitian.

Pemakaian model CSP berbentuk balok ini melakukan pendekatan terhadap geometri manikin fisik (Gambar 2) pada parameter luas permukaannya. Dilakukan perancangan bentuk acuan yang memiliki luas permukaan sama dengan manikin fisik sehingga geometri acuan ini nantinya dapat digunakan untuk validasi dan pembanding dengan geometri lain dengn bentuk serupa.

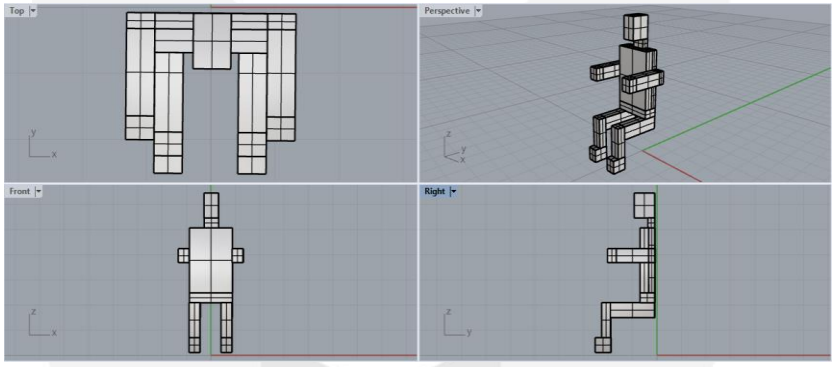
Gambar 2 Bentuk Geometri Manikin Fisik

Geometri manikin fisik ini [3] yang akan menjadi referensi geometri acuan. Geometri acuan merupakan alat untuk memvalidasi CSP sehingga dapat digunakan untuk simulasi dan dapat dinilai ketepatannya. Perbandingan geometri acuan dan manikin fisik digambarkan pada Gambar 3.



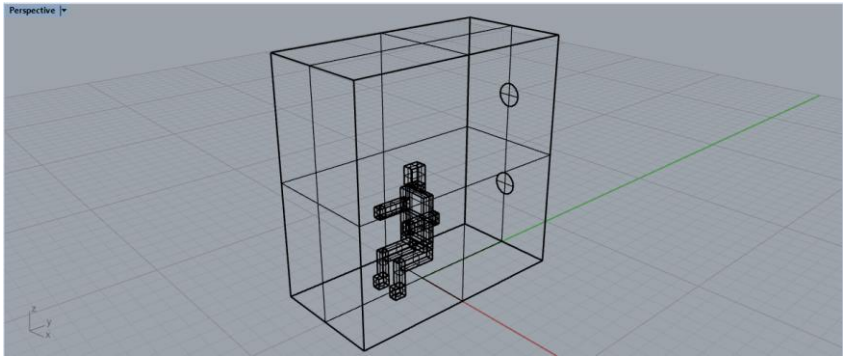
Gambar 3 Perbandingan Geometri Manikin Fisik dan Acuan

Geometri CSP adalah geometri rancangan yang akan divalidasi dahulu sebelum digunakan untuk simulasi, geometri CSP memiliki posisi yang sama dengan manikin fisik yaitu duduk seperti digambarkan pada Gambar 4. Perbedaan dengan geometri acuan adalah posisi tangan yang diangkat kedepan dan juga luas permukaannya.



Gambar 4 Rancangan Geometri CSP

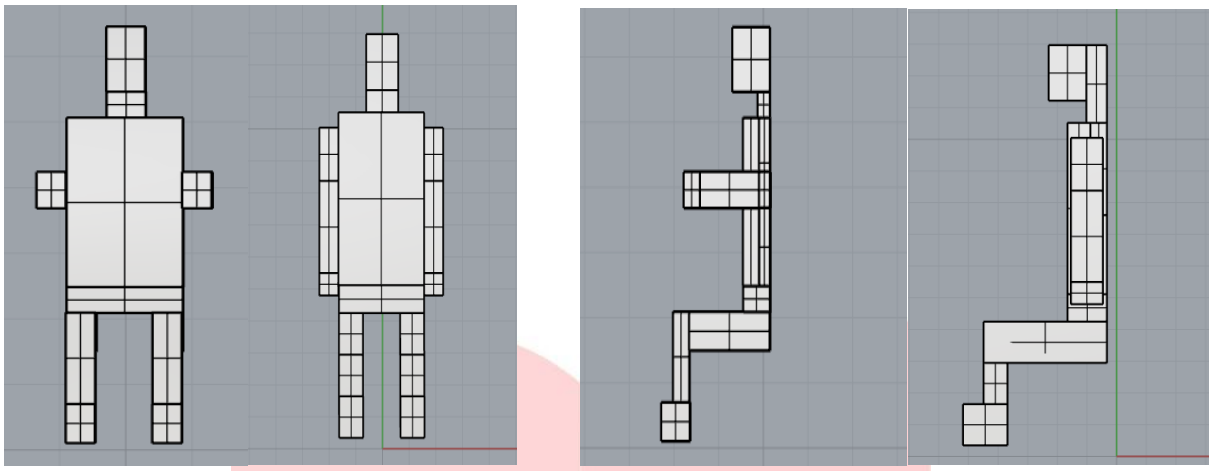
Geometri ruangan tempat CSP diletakkan dirancang sesuai penelitian sebelumnya yang berbasis eksperimen. Ruangan berdimensi 2.44 x 2.46 x 1.2 meter dengan CSP berjarak 0.7 meter dari bukaan, seperti digambarkan pada Gambar 5. Posisi bukaan ada di bagian depan CSP yang luasnya adalah seluruh sisi tersebut dengan ukuran 2.46 x 1.2 meter. Terdapat 2 keluaran berbentuk lingkaran di belakang CSP dengan diameter 0.25 m dengan jarak terhadap atap dan lantai masing-masing adalah 0.6 m. Tampak geometri ruangan beserta dimensinya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 5 Ukuran Geometri Ruangan Uji

2.3 Validasi CSP

Meskipun dalam bentuk balok namun pendekatan CSP terhadap manusia dilakukan pada luas permukaannya. Luas permukaan tiap bagian tubuh CSP disesuaikan dengan luas permukaan geometri manikin fisis yang dipakai pada eksperimen. Perbandingan antara geometri CSP dan manikin acuan digambarkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Perbandingan Geometri CSP dan Acuannya Tampak Depan dan Samping

Pendekatan terhadap bentuk secara detail sangat sulit dilakukan karena bentuk tubuh manusia yang berstruktur dan kompleks, maka dilakukan pendekatan lain dari luas permukaan yang menyerupai acuannya. Perbandingannya dijabarkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan Area Tiap Segmen

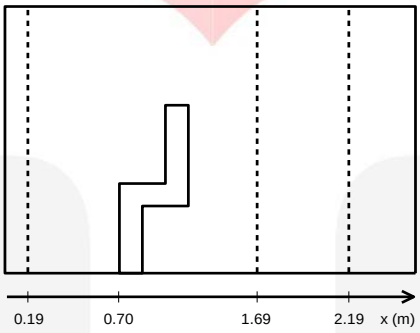
No	Bagian Tubuh	Luas Permukaan (m^2)	
		Geometri Acuan [4]	Geometri Rancangan
1	Scalp	0.080	0.081
2	Face	0.095	0.091
3	Chest	0.216	0.265
4	Upper Back	0.116	0.124
5	Left Upper Arm	0.050	0.024
6	Right Upper Arm	0.050	0.024
7	Left Forearm	0.072	0.098
8	Right Forearm	0.072	0.098
9	Left Hand	0.025	0.039
10	Right Hand	0.025	0.039
11	Left Thigh	0.187	0.139
12	Right Thigh	0.187	0.139
13	Left Low Leg	0.044	0.085
14	Right Low Leg	0.044	0.085
15	Left Foot	0.082	0.068
16	Right Foot	0.082	0.068
17	Lower Back	0.086	0.107
18	Pelvis	0.090	0.094
TOTAL AREA=		1.605	1.668

Selain geometri, kondisi batas juga menjadi parameter yang dikondisikan sebelum melakukan tahap benchmarking. Kondisi batas di samakan dengan penelitian menggunakan manikin fisis agar dapat dilakukan simulasi pada kondisi yang menyerupai. Kondisi batas yang tercantum adalah kondisi batas pada bukaan udaranya. Rincian kondisi batas [5] dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2 Kondisi Batas Penelitian Acuan

Parameter	Besarnya	Satuan
U *Inlet* (Kecepatan Udara)	0.2	m/s
T *Inlet* (Temperatur)	22	℃
ε *Inlet* (Disipasi Energi Kinetik Aliran Turbulen)	0.00031	m^2/s^3
k *Inlet* (Energi Kinetik Aliran Turbulen)	0.0096	m^2/s^2
I *Inlet* (Intensitas Aliran Tubulen)	40	%
L *Inlet* (Panjang Aliran Turbulen)	0.5	m
ρ (Densitas)	1.2	kg/m^3
Q (Heat Flux)	76	W

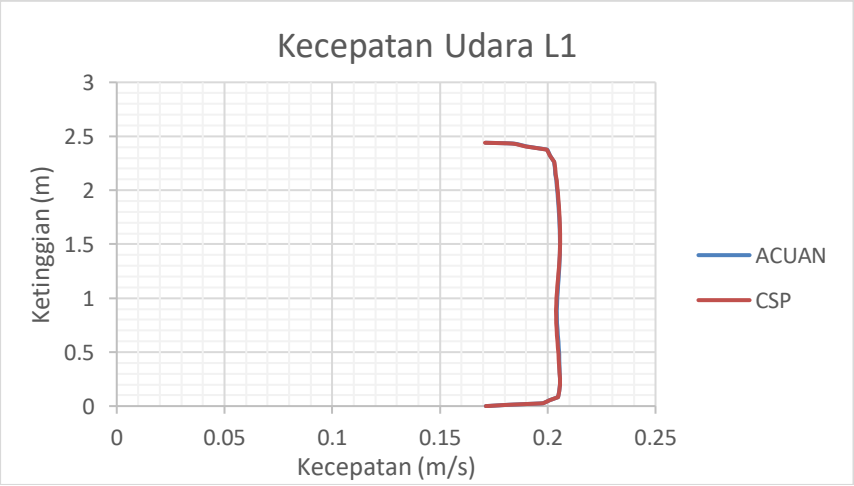
Kondisi yang disesuaikan lainnya adalah posisi titik uji untuk pengambilan data. Terdapat 3 titik uji untuk melihat profil aliran udaranya yaitu L1, L2, dan L3 dengan jarak terhadap bukaan secara berurutan adalah 0.19 m, 1.69 m, dan 2.19 m seperti pada Gambar 7 berikut.

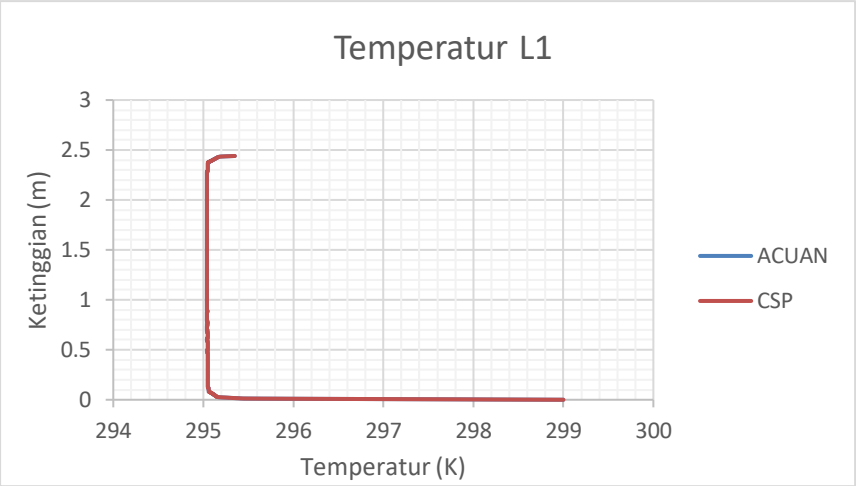


Gambar 7 Posisi Pengambilan data

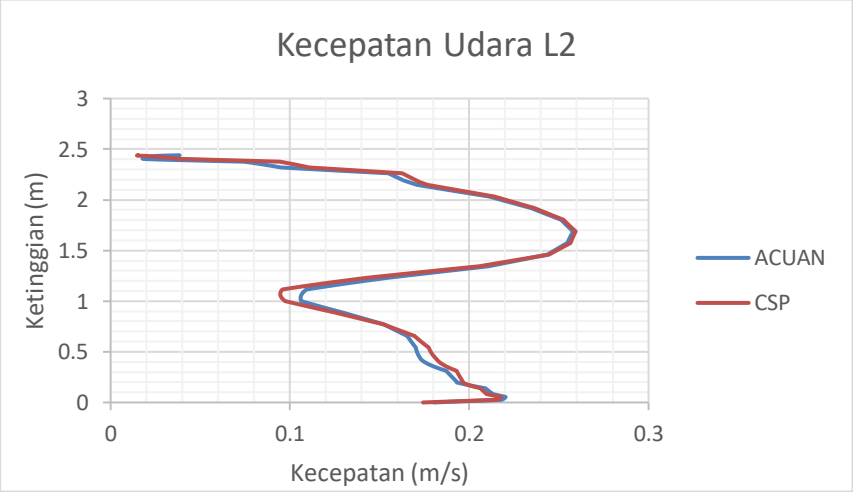
3. Pembahasan

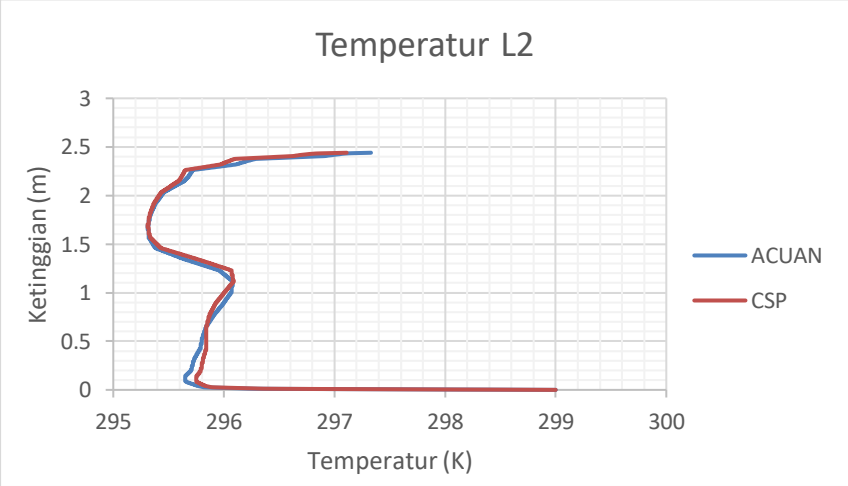
Pengambilan data dilakukan pada 3 titik yaitu L1, L2, dan L3 untuk membandingkan hasil kecepatan udara dan temperatur yang telah disimulasikan. Tabel perhitungan validasi terdapat pada tabel lampiran .Grafik hasil validasi kecepatan udara dan temperatur pada tiga titik uji ditunjukkan pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10.



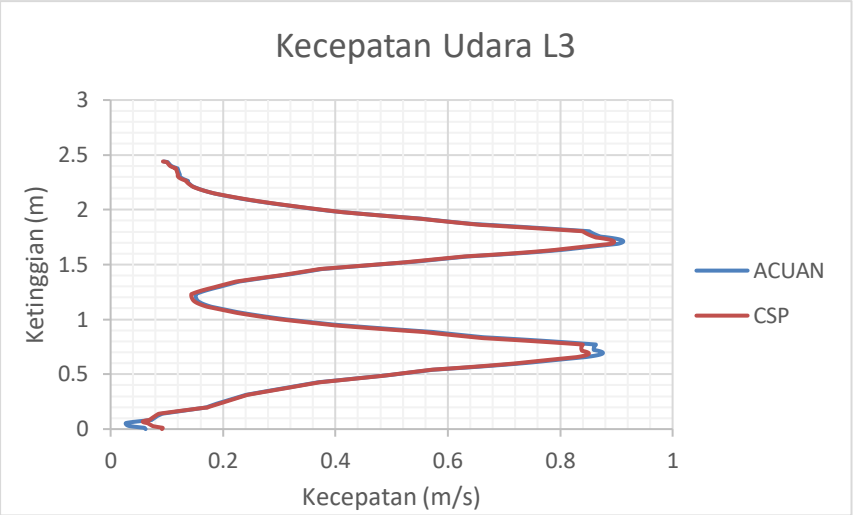


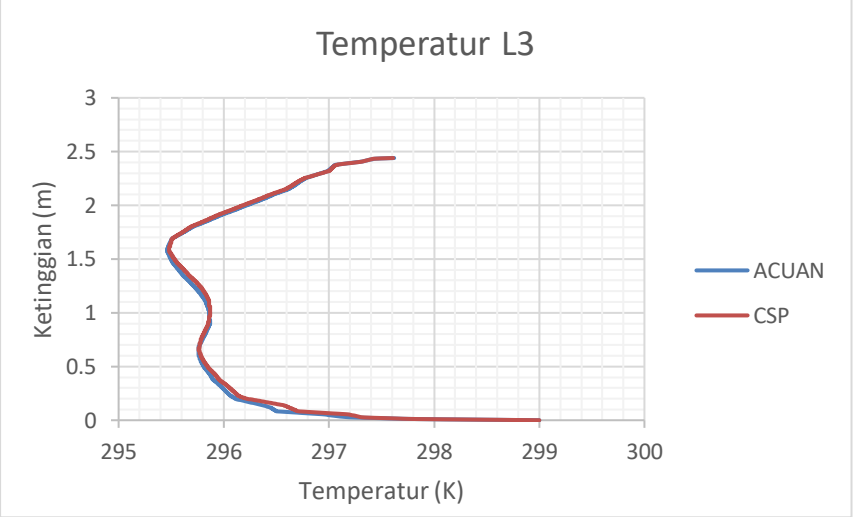
Gambar 8 Validasi pada L1





Gambar 9 Validasi pada L2





Gambar 10 Validasi pada L3

3,2 Pengukuran Nilai Prediksi CSP Terhadap Nilai Acuan

Untuk mengetahui seberapa dekat hasil simulasi dengan eksperimen, digunakan indeks perhitungan yaitu Normalized Mean Bias Error (NMBE) dan Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CV RSME) dan *Coefficient of Determinatio*n (R^2) seperti ditunjukkan pada Tabel 3 [6].

Tabel 3 Kriteria Validasi Model

No	Indeks Kriteria	Kriteria ASHRAE
1	NMBE	(+ -) 10%
2	CV RSME	30%
3	R^2	>0.75

Nilai NMBE adalah persentase nilai error dari prediksi hasil simulasi terhadap data eksperimen, dijabarkan pada persamaan (1).

$$\text{NMBE} = \frac{1}{m} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n}(mi-si)}{n-p} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

Dengan :

m = Rata-rata nilai acuan
mi = Nilai acuan
si = Nilai rancangan
n = Jumlah data

p = Jumlah parameter yang disesuaikan = 0

Nilai CV RSME adalah persentase variabilitas antara data simulasi dan data eksperimen, dijabarkan pada persamaan (2).

$$\text{CV RSME} = \frac{1}{m} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(mi-si)^2}{n-p}} \cdot 100(\%) \qquad (2)$$

Dengan :

m = Rata-rata nilai acuan
mi = Nilai acuan
si = Nilai rancangan
n = Jumlah data
p = Jumlah parameter yang disesuaikan = 1

Nilai R^2 menunjukkan seberapa dekat nilai simulasi dengan garis regresi nilai acuan. Indeks ini juga menunjukkan rekomendasi pemakaian model rancangan, dijabarkan pada persamaan (3).

$$R^2 = \left(\frac{n \cdot \sum_{i=1}^{n} mi \cdot si - \sum_{i=1}^{n} mi \cdot \sum_{i=1}^{n} si}{\sqrt{\left(n \cdot \sum_{i=1}^{n} mi^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} mi\right)^2\right) \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^{n} si^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} si\right)^2\right)}}\right)^2 \qquad (3)$$

Dengan :

mi = Nilai acuan
si = Nilai rancangan
n = Jumlah data

Tabel 4 Rekap Hasil Validasi Kecepatan Udara

Kecepatan (U)			
POSISI TITIK UJI	NMBE (%)	CV RSME (%)	R^2
L1 (0.19m)	0.047086007	0.118963697	0.99661404
L2 (1.69m)	0.553071822	4.024983453	0.981864431
L3 (2.19m)	1.29965047	2.86479068	0.999094539
RATA-RATA	0.633269433	2.336245943	0.992524336

Dari data validasi kecepatan udara pada Tabel 4 didapatkan nilai NMBE rata-rata dari L1,L2,L3 adalah 0.63 % . Semakin kecil nilai NMBE maka semakin baik prediksi simulasi dengan CSP.

Nilai CV RSME rata-rata dari L1,L2,L3 adalah 2.34 % . Semakin kecil nilai CV RSME maka penyimpangan data hasil simulasi terhadap nilai acuan juga semakin kecil. Kecilnya penyimpangan data menggambarkan sebaran data yang semakin homogeny (presisi) dan semakin mendekati nilai eksperimen.

Nilai R^2 rata-rata dari L1, L2, L3 adalah 0.99. Nilai $R^2 > 0.75$ merupakan kriteria rekomendasi model rancangan untuk dapat digunakan dalam simulasi.

Tabel 5 Rekap Hasil Validasi Temperatur

Temperatur (T)			
POSISI TITIK UJI	NMBE (%)	CV RSME (%)	R^2
L1 (0.19m)	0.000142	0.000743	0.999872434
L2 (1.69m)	0.001155236	0.026050205	0.954363006
L3 (2.19m)	0.008581837	0.02037816	0.988608789
RATA-RATA	0.003293092	0.015723629	0.980948077

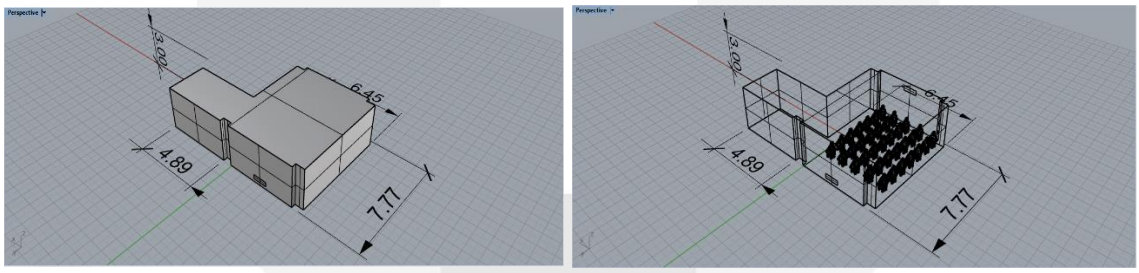
Dari data validasi temperatur pada Tabel 5 didapatkan nilai NMBE rata-rata dari L1,L2,L3 adalah 0.003 % . Semakin kecil nilai NMBE maka semakin baik prediksi simulasi dengan CSP.

Nilai CV RSME rata-rata dari L1,L2,L3 adalah 0.016 % . Semakin kecil nilai CV RSME maka penyimpangan data hasil simulasi terhadap nilai acuan juga semakin kecil. Kecilnya penyimpangan data menggambarkan sebaran data yang semakin homogeny (presisi) dan semakin mendekati nilai eksperimen.

Nilai R^2 rata-rata dari L1, L2, L3 adalah 0.981. Nilai $R^2 > 0.75$ merupakan kriteria rekomendasi model rancangan untuk dapat digunakan dalam simulasi.

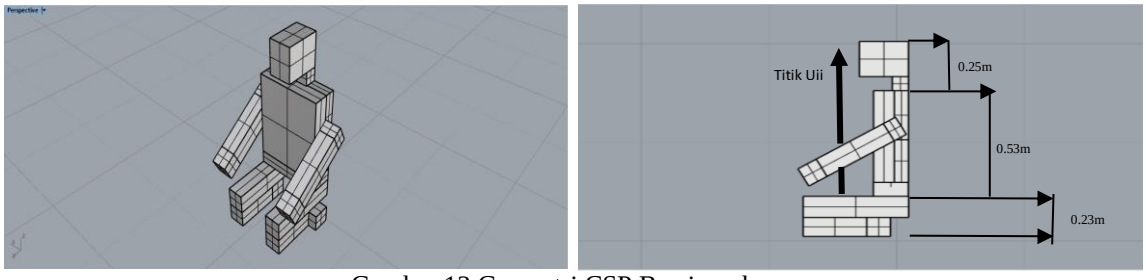
4. Implementasi CSP

CSP mampu digunakan untuk prediksi keadaan termal pada ruangan, salah satu implementasi adalah Lab Fisika Bangunan Universitas Telkom (Gambar 11). Lab akan dijadikan tempat ibadah (Musholla) dengan prediksi kapasitas manusia yang mampu ditampung adalah 35 orang. Kapasitas ini hanya mampu ditampung pada bagian ruangan 6.45 x 7.77 m dikarenakan bagian sisanya merupakan tempat meletakan alas kaki dan jalur lalu lalang (pintu masuk).



Gambar 11 Geometri Lab Fisika Bangunan

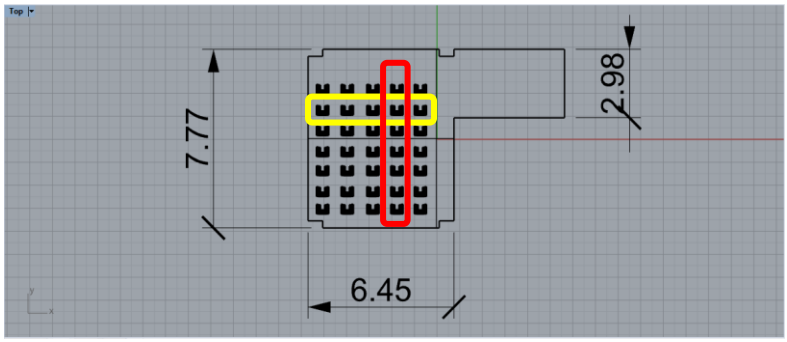
Pada implementasi untuk keperluan musholla ini, geometri CSP tidak berposisi duduk melainkan berposisi bersimpuh. CSP pada posisi ini memiliki tinggi 1.01 meter dari lantai Lab namun tetap memiliki luas permukaan yang sama dengan CSP dengan posisi sebelumnya seperti digambarkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Geometri CSP Bersimpuh

Terdapat bukaan dan keluaran dengan dimensi 1 x 0.32 m. Bukaan berada pada bagian depan dengan jarak 1.55 m dari baris pertama sedangkan keluaran berada pada jarak 0.6 m dari baris ke-7.

Pengukuran profil temperatur pada lab dilakukan pada satu baris dan kolom dari kumpulan CSP. Pengukuran dilakukan pada kolom 2 dari pintu masuk (merah) dan baris 3 dari bukaan (kuning) seperti pada Gambar 13.



Gambar 13 Posisi Baris dan Kolom Pengambilan Data

Dari garis 3m ini hanya diambil rentang ketinggian dari geometri CSP dengan posisi bersimpuh. Ketinggian yang diambil adalah 1.01 meter dengan rentang lantai ke daerah pinggang berjarak 0.23 meter, rentang dari pinggang ke leher berjarak 0.53 meter, dan rentang leher ke ujung kepala adalah 0.25 meter.

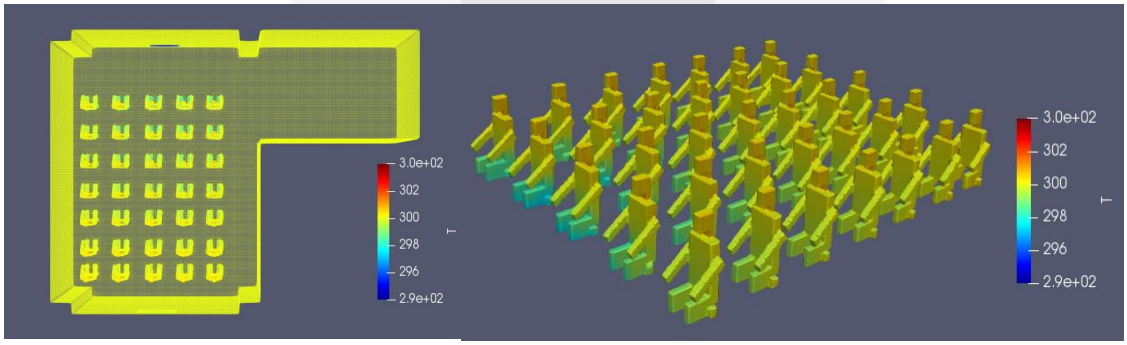
Implementasi menggunakan CSP pada Lab ini dilakukan dengan kondisi batas berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 6

Tabel 6 Kondisi Batas Simulasi Lab

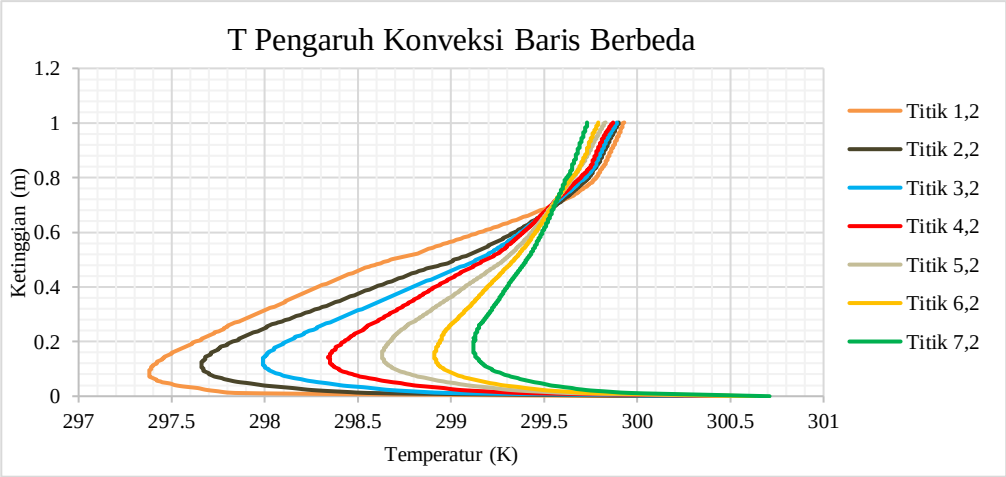
Parameter	Besarnya	Satuan
U *Inlet* (Kecepatan Udara)	0.2	m/s
T *Inlet* (Temperatur)	22	℃
ε *Inlet* (Disipasi Energi Kinetik Aliran Turbulen)	0.00000447	m^2/s^3
k *Inlet* (Energi Kinetik Aliran Turbulen)	0.000172	m^2/s^2
I *Inlet* (Intensitas Aliran Tubulen)	5.35	%
L *Inlet* (Panjang Aliran Turbulen)	0.034	m
nu *inlet* (Viskositas Kinematik)	0.00001524	m^2/s
ρ (Densitas aliran udara)	1.2	kg/m^3
Q CSP (Laju Aliran Kalor)	76	W

4.1 Pengaruh Konveksi

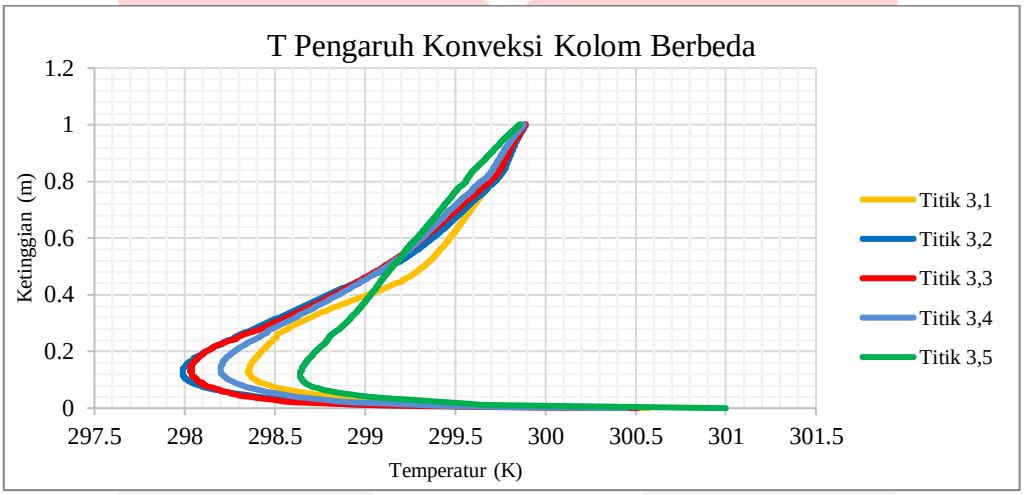
Data diambil dari seluruh CSP pada kolom 2 dan baris 3 untuk mengetahui profil temperatur pada Lab Fisika Bangunan dengan pengaruh perpindahan panas konveksi. Persebaran temperatur akibat pengaruh konveksi secara keseluruhan digambarkan pada Gambar 14.



Gambar 14 Hasil Pengaruh Konveksi



Gambar 15 Grafik Temperatur Hasil Pengaruh Konveksi pada Baris Berbeda



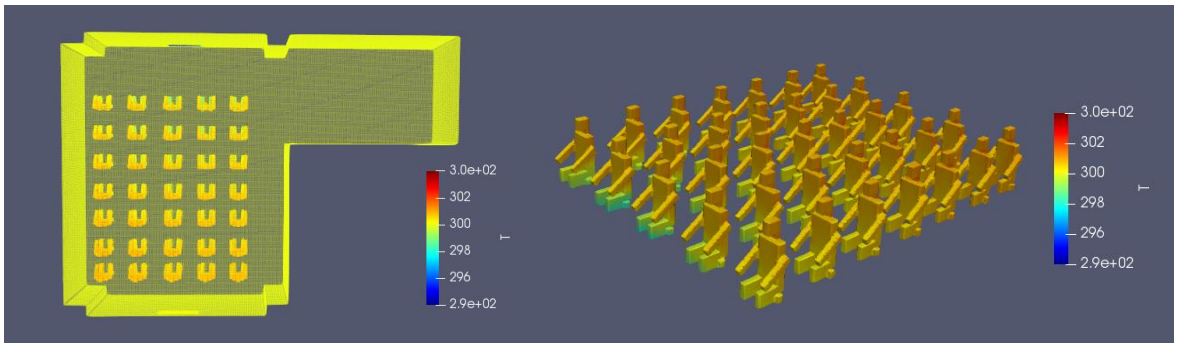
Gambar 16 Grafik Temperatur Hasil Pengaruh Konveksi pada Kolom Berbeda

Pada Gambar 15 didapatkan bahwa pada ketinggian garis uji 0-0.7 meter menunjukan bahwa posisi yang semakin ke belakang menyebabkan temperatur yang dirasakan akan lebih tinggi akibat jarak terhadap bukaan yang lebih jauh dibandingkan bagian depan. Pada ketinggian garis uji 0.7-1.01 meter menunjukkan garis temperatur mengalami titik temu namun berubah kembali dengan kondisi titik 7.2 memiliki suhu sedikit lebih rendah dari yang lain. Hal ini dikarenakan pada posisi depan lebih dekat terkena hembusan udara dingin. Udara dingin memiliki massa jenis yang lebih rendah dari udara panas sehingga udara panas didorong ke atas dan posisinya di bawah digantikan oleh udara dingin. Fenomena ini disebabkan oleh penggunaan *displacement ventilation* atau peletakan bukaan di posisi bawah.

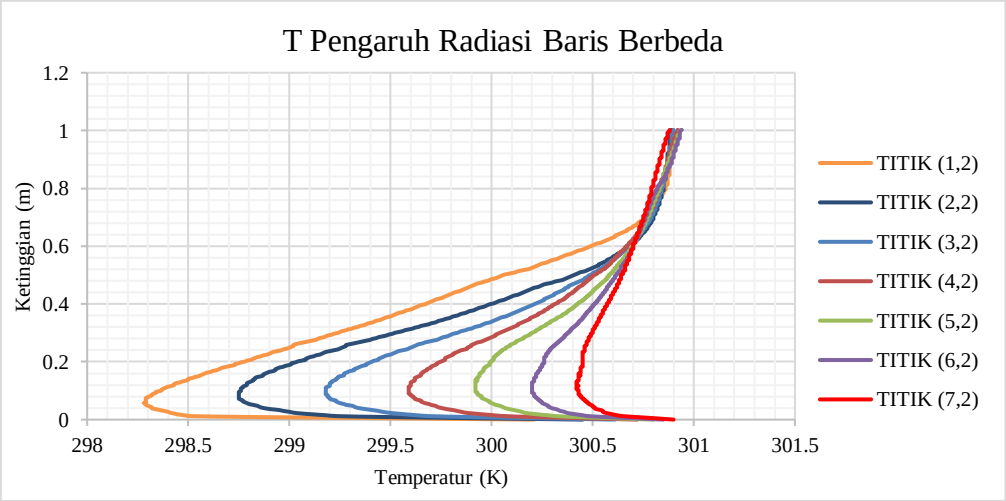
Pada Gambar 16 didapatkan bahwa pada ketinggian garis uji 0-0.4 meter menunjukan bahwa posisi yang semakin di tengah akan merasakan temperatur yang lebih rendah dari yang lain. Sedangkan pada posisi samping dihasilkan suhu yang lebih tinggi. Pada ketinggian garis uji 0.4-1.01 meter menunjukkan garis temperatur mulai mengalami perubahan. Perubahan ini dikarenakan adanya perpindahan panas konveksi akibat adanya perbedaan suhu udara.

4.2 Pengaruh Radiasi

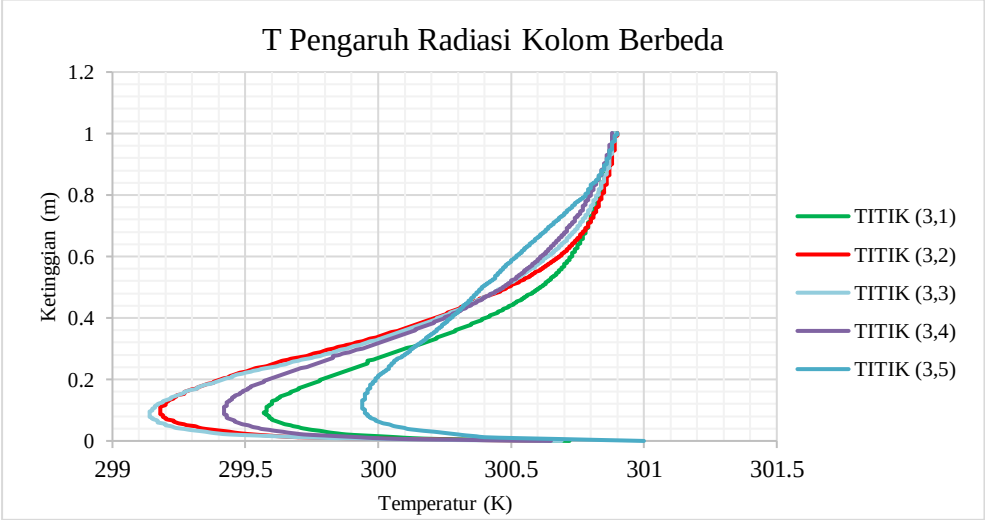
Data diambil dari seluruh CSP pada kolom 2 dan baris 3 untuk mengetahui profil temperatur pada Lab Fisika Bangunan dengan pengaruh perpindahan panas radiasi. Persebaran temperatur akibat pengaruh radiasi secara keseluruhan digambarkan pada Gambar 17.



Gambar 17 Hasil Pengaruh Radiasi



Gambar 18 Grafik Temperatur Hasil Pengaruh Radiasi pada Baris Berbeda



Gambar 19 Grafik Temperatur Hasil Pengaruh Radiasi pada Kolom Berbeda

Pada Gambar 18 didapatkan pada ketinggian garis uji 0-0.7 meter bahwa posisi baris yang semakin ke belakang mengakibatkan temperatur yang dirasakan semakin tinggi.

Pada Gambar 19 didapatkan bahwa pada ketinggian 0-0.3m temperatur pada posisi semakin ke tengah akan merasakan temperatur yang lebih rendah dibandingkan pada posisi pinggir. Hal ini disebabkan bukaan yang berada pada posisi tengah dan pergerakan udara yang bergerak ke tengah terlebih dahulu.

Kecenderungan ini menyerupai kondisi pada penambahan konveksi. Perbedaan dengan konveksi adalah temperatur pada radiasi mengalami kenaikan sebesar 1 Kelvin menyebabkan kondisi dengan kondisi radiasi menjadi lebih panas.

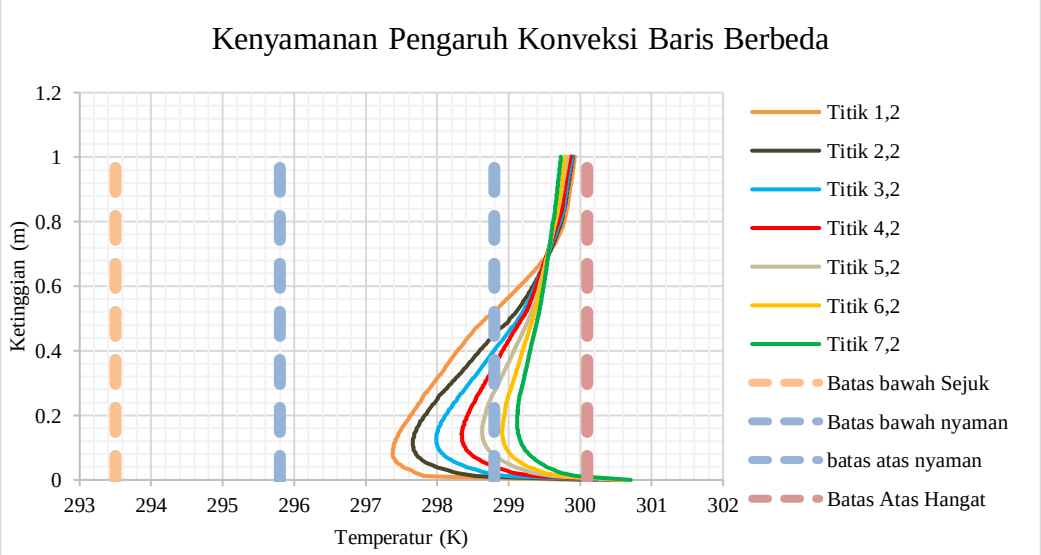
4.3 Tingkat Kenyamanan Termal

Kenyamanan termal adalah temperatur yang dirasakan oleh manusia yang dikondisikan oleh lingkungan dan benda-benda di sekitarnya. Rentang kondisi termal daerah tropis menurut SNI 03-6572-2001 mengenai Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung [1] digunakan untuk menentukan tingkat kenyamanan manusia di dalam ruangan, dijabarkan pada Tabel 7 di bawah ini.

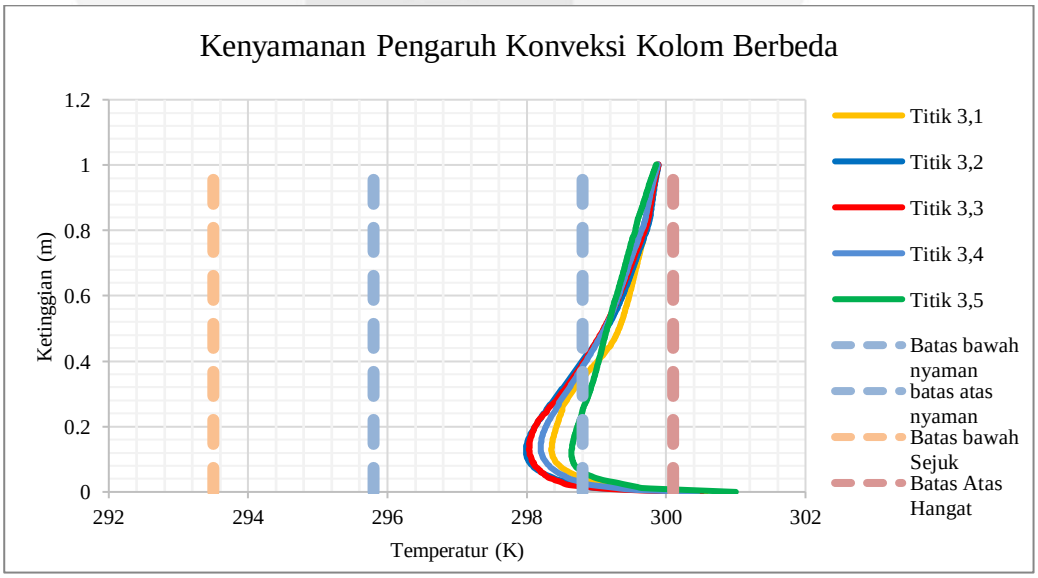
.

Tabel 7 Rentang Kenyamanan Termal Ruangan

Kondisi	**Batas Bawah Temperatur**	**Batas Atas Temperatur**
Sejuk Nyaman	20,5°C	22,8°C
Nyaman Optimal	22,8°C	25,8°C
Hangat Nyaman	25,8°C	27,1°C



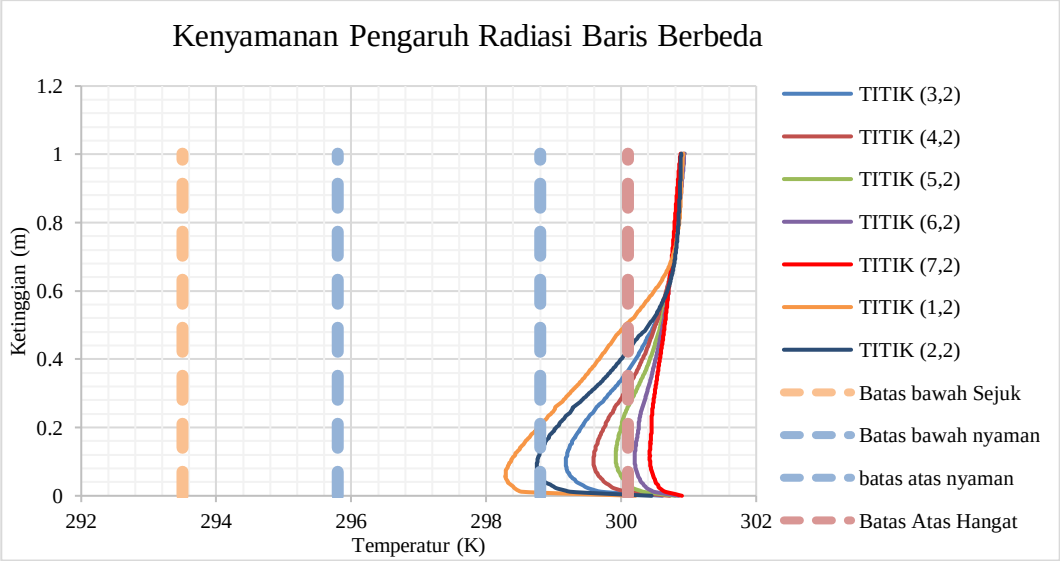
Gambar 20 Rentang Kenyamanan Termal dengan Pengaruh Konveksi Baris Berbeda



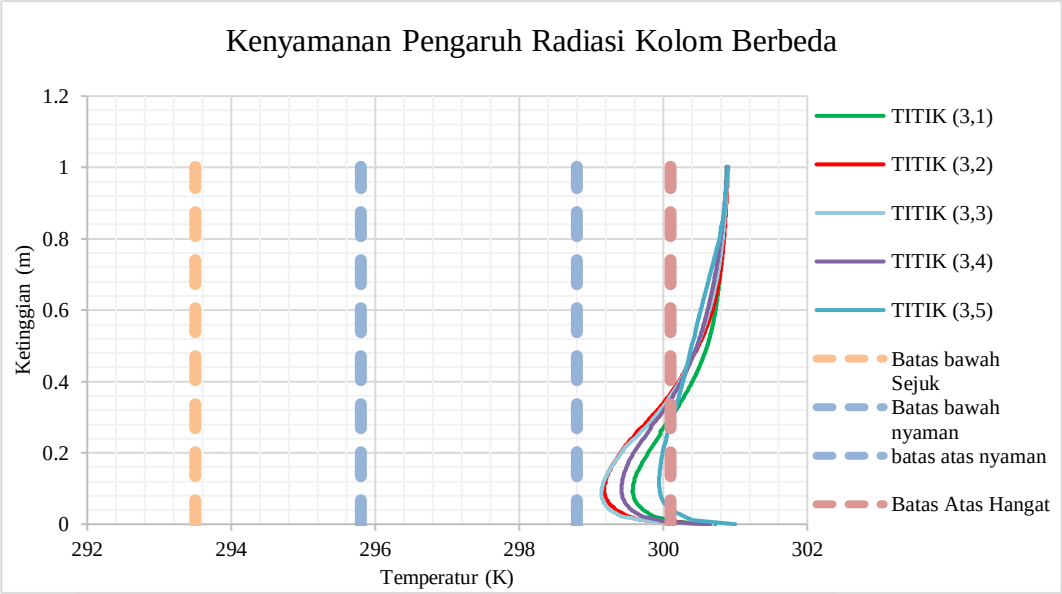
Gambar 21 Rentang Kenyamanan Termal dengan Pengaruh Konveksi Kolom Berbeda

Dari Gambar 20 didapatkan bahwa kecenderungan temperatur yang dirasakan CSP pada titik uji berada pada kategori nyaman dan hangat. Pada titik 1,2, CSP merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.52 m. Namun pada ketinggian uji 0.52-1.01 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat. CSP pada titik 2,2 merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.43 m. Namun temperatur lambat laun hangat saat memasuki ketinggian uji 0.43-1.01 m,. Pada titik 3,2 temperatur pada ketinggian uji yang mencapai keadaan nyaman hanya sampai 0.4 m dari lantai ruangan. Sedangkan ketinggian uji di atas 0.4 m sampai 1.01 m temperatur masuk ke golongan hangat. Pada titik 4,2 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0.37 m ke bawah sampai pada dasar lantai. Sedangkan temperatur yang tergolong hangat ada pada ketinggian uji 0.37 m ke atas sampai sejajar ujung kepala CSP pada ketinggian 1.01 m. Pada titik 5,2 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.27 m. Namun pada ketinggian uji di atas 0.27 sampai ketinggian 1.01 m, temperatur yang dirasakan tergolong hangat. Pada titik 6,2 dan 7,2 , temperatur yang dirasakan CSP dari dasar lantai sampai ujung kepala pada titik 1.01 m adalah hangat.

Dari Gambar 21 temperatur yang dirasakan CSP berada pada kecenderungan kondisi nyaman dan hangat. Pada titik uji berada pada kategori nyaman dan hangat. Pada titik 3,1 ,CSP merasakan temperatur nyaman hanya pada ketinggian uji 0-0.35 m sedangkan ketinggian uji 0.35-1.01 m temperatur yang dirasakan tergolong hangat. CSP pada titik 3,2 merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.39 m. Namun pada ketinggian uji 0.39 sampai pada sejajar dengan ujung kepala yaitu 1.01 m, temperatur yang dirasakan tergolong hangat. Pada titik 3,3 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.38 m. Namun pada ketinggian uji 0.38-1.01 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat. Pada titik 3,4 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.37 m. Namun seiring kenaikan ketinggian sampai pada ketinggian 1.01 m, temperatur yang dirasakan tergolong hangat. Pada titik 3,5 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong nyaman pada ketinggian uji 0-0.26 m. Namun pada ketinggian uji 0.26-1.01 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat.



Gambar 22 Rentang Kenyamanan Termal dengan Pengaruh Radiasi Baris Berbeda



Gambar 23 Rentang Kenyamanan Termal dengan Pengaruh Radiasi Kolom Berbeda

Dari Gambar 22 terlihat kecenderungan temperatur yang dirasakan CSP pada titik uji berada pada kategori nyaman, hangat, dan panas dengan satu-satunya titik yang mencapai keadaan nyaman yaitu titik 1.2 pada ketinggian uji 0-0.21 m. Untuk ketinggian uji 0.21-0.5 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat. Namun pada ketinggian uji 0.5-1.01 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong panas. Pada titik 2,2 , temperatur hangat dirasakan pada ketinggian uji 0-0.43 m. Namun di atas 0.43 m sampai titik sejajar ujung kepala CSP yaitu 1.01 m, temperaturnya tergolong panas. CSP pada titik 3,2 merasakan temperatur hangat pada ketinggian uji 0-0.37 m. Sedangkan temperatur panas dirasakan pada ketinggian uji 0.37 sampai 1.01 m .Pada titik 4,2 ,kondisi hangat kembali dirasakan dari dasarl lantai sampai ketinggian uji 0.31 m. Namun temperatur menjadi panas pada ketinggian uji 0.31-1.01 m. Pada titik 5,2 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat pada ketinggian uji 0-0.25 m. Namun pada ketinggian uji 0.25-1.01 m, temperatur naik dan masuk kategori panas. Pada titik 6,2 dan 7,2 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong panas dari ujung bawah sampai ujung titik 1.01 m yang sejajar kepala CSP.

Dari Gambar 23 ,temperatur yang dirasakan CSP berada pada kecenderungan kondisi hangat dan panas. CSP pada titik 3,1 merasakan temperatur yang tergolong hangat pada ketinggian uji 0-0.28 m. Namun pada ketinggian uji 0.28-1.01 m, temperatur yang dirasakan tergolong panas. Pada titik 3,2 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat pada ketinggian uji 0-0.36 m. Namun seiring tinggi titik uji ,temperatur yang dirasakan tergolong panas yaitu pada titik 0.36-1.01 m. Pada titik 3,3 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat pada ketinggian uji 0-0.35 m. Namun pada ketinggian uji 0.35-1.01 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong panas. Pada titik 3,4 ,dari dasar lantai sampai ketinggian 0.37 m, termperatur yang dirasakan tergolong hangat. Namun pada ketinggian 0.37 sampai 1.01 m, temperatur masuk pada golongan panas. Pada titik 3,5 ,CSP merasakan temperatur yang tergolong hangat pada ketinggian uji 0-0.26 m. Namun pada ketinggian uji 0.26-1.01 m, CSP merasakan temperatur yang tergolong panas.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengambilan data yang telah dilakukan, maka didapat kesimpulan sebagai berikut.

1. Geometri CSP memiliki keakuratan luas permukaan rancangan sebesar 96.07%
2. Nilai NMBE dan CV RSME menunjukkan CSP memiliki prediksi yang yang akurat dan presisi karena masuk kedalam kriteria ASHRAE.
3. Hasil R^2 menunjukkan bahwa CSP masuk dalam kriteria rekomendasi model simulasi menurut ASHRAE
4. Pengaruh konveksi maupun radiasi mengakibatkan temperatur yang semakin tinggi untuk posisi yang semakin jauh dari bukaan.
5. Lab dengan pengaruh konveksi pada titik uji menunjukkan kecenderungan berada pada keadaan nyaman dan hangat
6. Lab dengan pengaruh radiasi pada titik uji menunjukkan kecenderungan berada pada keadaan hangat dan panas

Daftar Pustaka

[1] A. Sarinda, “ANALISIS PERUBAHAN SUHU RUANGAN TERHADAP KENYAMANAN TERMAL DI GEDUNG 3 FKIP UNIVERSITAS JEMBER,” p. 7.
[2] H. H. Hu, “Computational Fluid Dynamics,” in *Fluid Mechanics*, Elsevier, 2012, pp. 421–472.
[3] H. O. Nilsson, H. Brohus, and P. V. Nielsen, “CFD Modeling of Thermal Manikin Heat Loss in a Comfort Evaluation Benchmark Test,” p. 8.
[4] International Thermal Manikin and Modelling Meeting and J. Fan, Eds., *Thermal manikins and modelling*. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 2006.
[5] P. V. Nielsen, S. Murakami, S. Kato, C. Topp, and J.-H. Yang, “Benchmark Tests for a Computer Simulated Person,” p. 8.
[6] G. Ruiz and C. Bandera, “Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors,” *Energies*, vol. 10, no. 10, p. 1587, Oct. 2017.