

TESIS

OPTIMALISASI SIRKULASI DAN KUALITAS UDARA PADA LAPANGAN
INDOOR FUTSAL SCR DI KABUPATEN WAJO

*Optimization Of Circulation And Air Quality
At Indoor Futsal SCR Fields In Wajo District*



MUHAMMAD ZALDI SURADIN
D042201020



PROGRAM STUDI MAGISTER ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024

PERNYATAAN PENGAJUAN

OPTIMALISASI SIRKULASI DAN KUALITAS UDARA PADA LAPANGAN INDOOR FUTSAL SCR DI KABUPATEN WAJO

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar magister

Program Studi Teknik Arsitektur

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD ZALDI SURADIN
D042201020

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

TESIS

OPTIMALISASI SIRKULASI DAN KUALITAS UDARA PADA LAPANGAN INDOOR
FUTSAL SCR DI KABUPATEN WAJO

MUHAMMAD ZALDI SURADIN
D042201020

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Magister pada tanggal 19 bulan
November tahun 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Magister Arsitektur
Departemen Arsitektur
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa

Mengesahkan:

Pembimbing Utama



Dr.Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT.
NIP. 19700810 199802 1 001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. Nurul Jamala B, MT.
NIP. 19640904 199412 2 001

Ketua Program Studi
Magister Arsitektur



Dr. Eng. Ir. Hj. Asniawaty, ST., MT.
NIP. 19710925 199903 2 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli., ST. MT.
NIP. 19730926 200012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, tesis berjudul “**Optimalisasi Sirkulasi Dan Kualitas Udara Pada Lapangan Indoor Futsal SCR di Kabupaten Wajo**” adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing (Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT dan Dr. Ir. Nurul Jamala B, MT). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal (Nama, Volume, Halaman, dan DOI) sebagai artikel dengan judul “Optimization of Circulation and Air Quality on Indoor Futsal SCR Fields in Wajo District”. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, Desember 2024
Materai dan Tandatanganan



MUHAMMAD ZALDI SURADIN
D042201020

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih banyak kepada Allah SWT atas berkah dan Rahmat-Nya dalam penelitian saya kali ini. Penelitian yang saya lakukan juga dapat terlaksana dengan sukses dan tesis ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT sebagai pembimbing utama dan Dr. Ir. Nurul Jamala B, MT. sebagai pembimbing pendamping. Saya mengucapkan berlimpah terima kasih kepada mereka. Penghargaan yang tinggi juga saya sampaikan kepada Manajemen SCR Futsal Wajo dan segenap pihak terkait yang telah mengizinkan saya untuk melaksanakan penelitian di Lapangan Indoor Futsal SCR, Ucapan terima kasih juga saya ucapkan kepada pimpinan Universitas Hasanuddin dan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program Magister serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.

Akhirnya, kepada kedua orang tua dan mertua tercinta. Tak lupa kepada istri tercinta dan anak-anak kami. Saya mengucapkan banyak terima kasih atas doa, dukungan, pengorbanan dan motivasi untuk menempuh dan menyelesaikan pendidikan magister ini.

Penulis,

MUHAMMAD ZALDI SURADIN

ABSTRAK

MUH. ZALDI SURADIN. Optimalisasi Sirkulasi dan Kualitas Udara pada Lapangan Indoor Futsal SCR di Kabupaten Wajo

Latar Belakang. Banyaknya gedung olahraga yang dibangun tanpa memperhatikan sirkulasi dan kualitas udara menjadi suatu kekhawatiran tersendiri, terlebih lagi gedung olahraga yang biasa digunakan untuk pelatihan atlet seperti Lapangan Indoor SCR Futsal di Kabupaten Wajo. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan menganalisa kinerja sirkulasi udara dan level kualitas udara dalam gedung SCR Futsal guna mengoptimalkan kinerja sirkulasi udara dan meningkatkan kualitas udara dalam Gedung SCR Futsal. **Metode.** Hasil pengukuran dilapangan didistribusikan dalam bentuk tabel untuk mendapatkan tingkatan rata-rata untuk setiap titik ukur dengan menggunakan program microsoft excel. Kemudian di analisa dengan mensimulasikan temperatur serta kecepatan udara dalam lapangan futsal untuk melihat kinerja sirkulasi udara di dalam lapangan dengan menggunakan software CFD *OpenFOAM*. **Hasil Penelitian.** Hasil pengukuran selama tiga hari memperoleh data bahwa suhu maksimal sebesar 31,27°C terjadi pada hari pertama, suhu terendah 29,71% yang terjadi pada hari ketiga. Kelembapan udara maksimal sebesar 72,98% terjadi pada hari ketiga dan kelembapan udara terendah sebesar 52,25% terjadi pada hari kedua. Selanjutnya, rata-rata kecepatan aliran udara yang berhembus masuk bervariasi pada setiap bukaan. Kecepatan aliran udara yang masuk ke dalam gedung sebagian besar berada di bawah 1 m/s, bahkan pada waktu tertentu udara cenderung diam sehingga tidak ada udara yang bergerak masuk ke dalam gedung. Kecepatan aliran udara paling rendah yaitu 0,15 m/s sedangkan paling tinggi sebesar 3,30 m/s. dari kondisi ini yang akan dijadikan acuan untuk memasukkan data pada saat proses simulasi. Kemudian dari hasil pengukuran selama 3 hari terlihat kandungan CO dan CO₂ cenderung meningkat dari pagi hingga malam hari. Jika dilihat ini adalah hasil akumulasi yang terjadi sepanjang hari. Peningkatan kandungan CO dan CO₂ di udara terjadi akibat adanya aktifitas di dalam gedung. Aktifitas olahraga yang dilakukan tentu memproduksi lebih banyak CO₂. Pada saat pengguna baru saja selesai menggunakan lapangan dan diadakan pengukuran kandungan CO dan CO₂ jumlahnya langsung meningkat dan penurunan kadar CO dan CO₂ membutuhkan waktu 10 – 20 menit. Kandungan CO dan CO₂ tertinggi yaitu 425.90 ppm yang tercatat sekitar pukul 19.00 di hari pertama pengukuran pada lapangan 2. Nilai ACH pada kondisi eksisting yaitu sebesar 0,566 menunjukkan bahwa terjadi pergantian udara dalam ruang sebanyak 0,566 kali dalam 1 jam. Berdasarkan perhitungan penghawaan alami didapatkan $Q = 0,887 \text{ m}^3/\text{s}$ ini jauh di bawah standar yang mempersyaratkan sebuah gedung olahraga pergantian udaranya 10 m³/s. **Kesimpulan.** Proses pergantian udara (*air change*) akan lebih lancar bila didukung dengan kecepatan udara yang memadai. Pada kondisi udara hampir tidak bergerak (kecepatan sangat rendah) harus dibantu dengan desain jendela yang mampu mendorong terjadinya pergerakan yang lebih cepat atau memperbesar kecepatan udara. Semakin besar volume ruang maka dibutuhkan jendela semakin banyak (besar). Semakin padat bangunan di sekitarnya, semakin banyak (besar) jendela yang diperlukan agar penggunaan sistem pengkondisian udara buatan dapat dihindarkan dan penghematan energi operasional bangunan dapat diwujudkan.

Kata Kunci: *Futsal, Kualitas Udara, Sirkulasi Udara*

ABSTRACT

MUH. ZALDI SURADIN. Optimization Of Circulation And Air Quality On Indoor Futsal Scr Fields In Wajo District

Background Research. This research aims to analyze the performance of air circulation and air quality levels in the SCR Futsal building and to obtain a healing environment design model to optimize air circulation performance and improve air quality in the SCR Futsal Building. **Methods.** The results of measurements in the field are distributed in table form to obtain an average level for each measuring point using the Microsoft Excel program. Then it is analyzed by simulating the temperature and air speed in the futsal field to see the performance of air circulation in the field using CFD OpenFOAM software. **Result.** The results of measurements for three days showed that the maximum temperature of 31.27°C occurred on the first day, the lowest temperature of 29.71°C occurred on the third day. The maximum air humidity of 72.98% occurred on the third day and the lowest air humidity of 52.25% occurred on the second day. Furthermore, the average speed of the air flow that blows in varies at each opening. The speed of air flow entering a building is mostly below 1 m/s, in fact at certain times the air tends to be still so that no air moves into the building. The lowest air flow speed is 0.15 m/s while the highest is 3.30 m/s. This condition will be used as a reference for entering data during the simulation process. Then, from the measurement results for 3 days, it can be seen that the CO and CO₂ content tends to increase from morning to evening. If you look at this, this is the result of accumulation that occurs throughout the day. The increase in CO and CO₂ content in the air occurs due to activities inside the building. Sports activities carried out certainly produce more CO₂. When the user has just finished using the field and the CO and CO₂ content is measured, the amount immediately increases and the decrease in CO and CO₂ levels takes 10 - 20 minutes. The highest CO and CO₂ content was 425.90 ppm which was recorded at around 19.00 on the first day of measurement in field 2. The ACH value in existing conditions is 0.566, indicating that indoor air changes occur 0.566 times in 1 hour. Based on natural ventilation calculations, it is found that $Q = 0.887 \text{ m}^3/\text{s}$, this is far below the standard which requires a sports hall to have an air change of 10 m³/s. **Conclusion.** The air change process will be smoother if supported by adequate air speed. In conditions where the air is almost stationary (very low speed), it must be assisted by a window design that is able to encourage faster movement or increase the air speed. The larger the volume of space, the more windows are needed (larger). The denser the surrounding buildings, the more (large) windows are needed so that the use of artificial air conditioning systems can be avoided and building operational energy savings can be realized.

Keywords: *Futsal, Air Quality, Air Circulation*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN PENGAJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Kajian Teori	7
1.2.1 Standarisasi dalam Futsal.....	7
1.2.2 Tinjauan Sirkulasi Udara	8
1.2.3 Ventilasi.....	10
1.2.4 Kualitas Udara.....	15
1.2.6 Simulasi Pergerakan Udara	20
1.2.7 Software OpenFOAM	24
1.3 Rumusan Masalah	27
BAB II METODE PENELITIAN	28
2.1 Jenis Penelitian	28
2.2 Jenis dan Sumber Data.....	28
2.3 Metode Pengumpulan Data	29
2.4 Lokasi Penelitian	34
2.5 Populasi dan Sampel	36
2.6 Teknik Analisis Data.....	37
BAB III HASIL PENELITIAN	42
3.1 Gambaran Umum Objek Penelitian	42
3.1.1 Objek Penelitian Lapangan Futsal Indoor SCR	42
3.1.2 Bentuk dan Komponen.....	42
3.2 Kondisi Eksisting	45

3.2.1 Data hasil pengukuran hari pertama	45
3.2.2 Data hasil pengukuran hari kedua	60
3.2.3 Data hasil pengukuran hari ketiga.....	74
3.2.4 Pengolahan data pengukuran	89
BAB IV PEMBAHASAN	95
4.1 Simulasi kondisi eksisting	95
4.2 Strategi Peningkatan Kinerja Sirkulasi Udara	99
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	110
5.1 Kesimpulan.....	110
5.2 Saran.....	111
DAFTAR PUSTAKA	113

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persyaratan Kualitas Fisik	19
Tabel 2. Persyaratan Kualitas Kimia	20
Tabel 3. Persyaratan Kontaminan Biologi.....	20
Tabel 5. Hasil pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 1	46
Tabel 6. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi depan hari 1	49
Tabel 7. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi kiri hari 1	51
Tabel 8. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang bawah hari 1	53
Tabel 9. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang atas hari 1	55
Tabel 10. Hasil pengukuran kandungan CO dan CO ₂ hari 1	57
Tabel 11. Hasil pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 2	61
Tabel 12. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi depan hari 2	64
Tabel 13. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi kiri hari 2.....	66
Tabel 14. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang bawah hari 2	68
Tabel 15. Hasil pengukuran kandungan CO dan CO ₂ hari 2.....	72
Tabel 16. Suhu dan kelembaban udara hari 3.....	75
Tabel 17. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi depan hari 3	78
Tabel 18. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi kiri hari 3.....	81
Tabel 19. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang bawah hari 3	83
Tabel 20. Kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang atas hari 3	84
Tabel 21. Hasil pengukuran kandungan CO dan CO ₂ hari 3	87
Tabel. 22 Rata-rata suhu dan kelembaban.....	89
Tabel 23. Rata-rata kecepatan aliran udara	91
Tabel 24. Rata-rata kandungan CO dan CO ₂	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Lapangan Futsal	7
Gambar 2. Ventilasi Satu Sisi	13
Gambar 3. Ventilasi Bersilangan	13
Gambar 4. Contoh Penggunaan CFD pada Model Bola	22
Gambar 5. Titik-titik Pengukuran Data.....	30
Gambar 6. Titik Ketinggian Pengambilan Data.....	31
Gambar 7. Meter Digital	31
Gambar 8. Anemometer Hot Wire	32
Gambar 9. Termometer dan Higrometer Digital	33
Gambar 10. Air Detector	34
Gambar 11. Peta Lokasi Penelitian	36
Gambar 12. Kondisi tapak gedung gelanggang futsal.....	42
Gambar 13. Denah gedung gelanggang futsal.....	43
Gambar 14. Tampak samping gedung gelanggang futsal.....	43
Gambar 15. Kondisi depan gedung gelanggang futsal.....	44
Gambar 16. Titik pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 1	45
Gambar 17. Grafik pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 1	47
Gambar 18. Titik pengukuran kecepatan aliran udara hari 1.....	48
Gambar 19. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi depan hari 1	50
Gambar 20. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi kiri hari 1.....	52
Gambar 21. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang bawah hari 1	54
Gambar 22. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang atas hari 1	56
Gambar 23. Titik pengukuran kualitas udara hari 1	57
Gambar 24. Grafik kandung CO hari 1	59
Gambar 25. Grafik kandungan CO ₂ hari 1	59
Gambar 26. Titik pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 2	60
Gambar 27. Grafik pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 2	62
Gambar 28. Titik pengukuran kecepatan aliran udara hari 2.....	63
Gambar 29. Grafik rata-rata kecepatan aliran udara ventilasi sisi depan hari 2.....	65
Gambar 30. Grafik Kecepatan aliran udara ventilasi sisi kiri hari 2	67
Gambar 31. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang bawah hari 2	70

Gambar 32. Titik pengukuran kualitas udara hari 2	71
Gambar 33. Grafik kandungan CO hari 2	73
Gambar 34. Grafik kandungan CO ₂ hari 2	73
Gambar 35. Titik pengukuran suhu dan kelembaban udara hari 3	74
Gambar 36. Grafik suhu dan kelembaban udara hari 3.....	76
Gambar 37. Titik pengukuran kecepatan aliran udara hari 3.....	77
Gambar 38. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi depan hari 3	80
Gambar 39. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi kiri hari 3.....	82
Gambar 40. Grafik kecepatan aliran udara ventilasi sisi belakang bawah hari 3	84
Gambar 41. Kecepatan aliran udara ventilasi belakang atas hari 3	86
Gambar 42. Titik pengukuran kualitas udara hari 3	87
Gambar 43. Grafik Kandungan CO hari 3.....	88
Gambar 44. Grafik kandungan CO ₂ hari 3.....	88
Gambar 45. Geometri Tampak Isometri (Eskterior).....	95
Gambar 46. Geometri Tampak Isometri (Interior).....	95
Gambar 47. Simulasi kecepatan aliran udara eksisting di luar ruangan	96
Gambar 48. Simulasi kecepatan aliran udara eksisting di dalam ruangan.....	96
Gambar 49. Simulasi <i>streamline</i> kecepatan aliran udara eksisting di dalam ruangan	97
Gambar 50. Simulasi streamline kecepatan aliran udara eksisting di dalam ruangan	98
Gambar 51. Model dan ukuran inlet alternatif 1	99
Gambar 52. Penampang simulasi aliran udara alternatif 1	100
Gambar 53. Tampak atas simulasi aliran udara alternatif 1	100
Gambar 54. <i>Streamline</i> aliran udara alternatif 1	101
Gambar 55. Model dan ukuran outlet alternatif 2	102
Gambar 56. Penampang simulasi aliran udara alternatif 2.....	102
Gambar 57. Tampak atas simulasi aliran udara alternatif 2	103
Gambar 58. <i>Streamline</i> aliran udara alternatif 2.....	103
Gambar 59. Model dan dimensi sirip pengarah aliran udara	104
Gambar 60. Penampang simulasi aliran udara alternatif 3.....	105
Gambar 61. Tampak atas simulasi aliran udara alternatif 3	105
Gambar 62. <i>Streamline</i> aliran udara alternatif 3.....	106
Gambar 63. Grafik distribusi temperatur.....	106

Gambar 64. Grafik kecepatan aliran udara.....	107
Gambar 65. Grafik pergantian udara	108

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengukuran Temperatur	116
Lampiran 2. Data Pengukuran CO dan CO2	117
Lampiran 3. Data Pengukuran Kecepatan Angin	118
Lampiran 4. Data Pengukuran Suhu Angin	120
Lampiran 5. Data Pengukuran Temperatur Lapangan (HOBO)	122
Lampiran 6. Dokumentasi Penelitian	123

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Olahraga futsal merupakan salah satu olahraga yang berkembang sangat pesat khususnya di Indonesia, di mana olahraga ini digemari disemua kalangan usia mulai dari anak-anak, remaja, dewasa, hingga orang tua, tak peduli laki-laki maupun perempuan (Wiyanto dkk., 2016). Hal ini bukannya tanpa alasan, mengingat futsal tidak terlalu banyak menggunakan lahan dan bisa dilangsungkan dengan hanya 10 orang pemain dan bisa dilaksanakan di lapangan terbuka maupun tertutup, yang berbanding jauh dengan sepakbola yang membutuhkan setidaknya 22 orang pemain dan harus dimainkan di lapangan terbuka. Selain kedua faktor tersebut, faktor biaya sewa lapangan yang jauh lebih murah juga menjadi alasan mengapa futsal begitu digandrungi di Indonesia (Syafaruddin, 2018). Perkembangan yang pesat ini tentu saja tidak semata pada level permainan semata, namun futsal telah mampu membawa Indonesia terbang tinggi di level regional maupun internasional. Berdasarkan rilis FIFA Futsal World Ranking per 12 Juni 2023, Indonesia saat ini menempati peringkat 38 dunia, peringkat 6 Asia, dan peringkat 3 di ASEAN. Raihan ini menunjukkan betapa superior dan berkembangnya futsal di Indonesia yang sangat berbanding jauh dengan raihan tim sepakbola (Astiwi dan Bulqini, 2021).

Kemajuan serta prestasi futsal Indonesia pada dasarnya kurang terekspos oleh media dan bahkan oleh PSSI yang merupakan induk organisasinya, namun tidak menghalangi manajemennya untuk terus berkembang maju serta mengukir prestasi. Terbukti, Indonesia bahkan bisa mengalahkan berbagai unggulan futsal dunia seperti Australia, Jepang, Iran, dan Thailand (Astiwi dan Bulqini, 2021).

Bukan hal yang tidak mungkin suatu saat Indonesia akan bisa setidaknya menembus 10-20 besar dunia, mengingat perkembangan jumlah lapangan futsal di Indonesia juga terus meningkat dalam realitasnya. Oleh karena itu, tentunya dibutuhkan lapangan futsal yang berkualitas agar kiranya mampu menunjang perkembangan para generasi futsal kita. Dikutip dari Pahlephi (2022) melalui laman detik.com, standar lapangan futsal yang ditetapkan oleh Federasi Futsal Indonesia yakni memiliki panjang antara 25 meter sampai dengan 42 meter. Sementara itu, untuk lebarnya sekitar 15 sampai dengan 25 meter. Jari-jari dari lingkaran yang berada di tengah lapangan berjarak 3 meter. Garis area penalti dibuat dengan dua garis seperempat lingkaran dengan jarak dari garis gawang sejauh 6 meter. Jika pemain melakukan pelanggaran di area ini maka wasit akan memberikan tendangan penalti kepada tim yang dilanggar. Kemudian untuk jarak tendangan penalti sendiri yaitu berjarak 10 meter dari garis gawang. Lapangan futsal juga memiliki area tersendiri bagi tim yang ingin melakukan pergantian pemain. Area ini terletak 5 meter dari garis tengah dan areanya sendiri memiliki lebar 5 meter. Pemain yang keluar dan masuk lapangan harus melewati area ini.

Selain itu, lapangan futsal juga memiliki bagian sendiri untuk tendangan sudut. Tendangan sudut dilakukan apabila bola keluar melalui garis gawang yang dilakukan oleh tim sendiri baik secara sengaja maupun tidak sengaja dan wasit akan memberikan tendangan sudut pada tim lawan. Banyaknya spot tendangan sudut sesuai dengan banyaknya titik sudut pada bangun persegi panjang, yaitu 4. Tempat untuk tendangan sudut dibuat dengan garis seperempat lingkaran dengan jari-jari 25 cm dari sudut lapangan. Pemain yang akan melakukan tendangan sudut harus meletakkan bola di area tersebut. Sebagai informasi, gawang futsal juga tentu memiliki ukuran yang lebih kecil dibanding dengan gawang sepak bola.

Gawang futsal memiliki tinggi 2 meter dengan lebar sebesar 3 meter. Hendrik dkk. (2018) menjelaskan bahwa perbedaan antara ukuran lapangan futsal standar nasional dan internasional adalah bahwa standar internasional memiliki ukuran yang lebih besar. Lapangan harus berbentuk persegi panjang dengan ukuran panjang 38 meter sampai dengan 42 meter. Sementara itu, untuk lebarnya adalah 19 meter sampai dengan 25 meter. Untuk ukuran lapangan futsal pada komponen lainnya seperti area penalti, area tendangan sudut, dan lingkaran di tengah lapangan umumnya memiliki ukuran yang sama dengan standar nasional. Ukuran gawangnya pun tidak terdapat perbedaan.

Berbicara soal lapangan futsal kita tidak boleh semata berfokus pada ukuran lapangan ataupun bahan yang digunakan untuk lapangannya sendiri. Lapangan futsal yang cenderung berada di area tertutup dan sempit tentunya memerlukan kualitas udara yang baik dan berkualitas (Kashira dkk., 2019). Untuk mendapatkan kualitas udara yang baik, dibutuhkan ventilasi ruangan untuk memaksimalkan pergerakan udara dari luar ke dalam ruangan, begitupun sebaliknya. Pergerakan udara tersebut dapat menimbulkan kualitas udara yang baik dikarenakan adanya pergantian udara. Hal ini tentu memberikan efek positif terhadap kualitas udara sehingga dapat menghindari "*sick syndrome*" (Roihah, 2020). Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, ventilasi dapat diartikan sebagai pertukaran udara secara bebas dalam ruangan. Untuk bangunan ada dua jenis ventilasi yaitu ventilasi alami dan ventilasi buatan. Fungsi ventilasi dalam bangunan untuk menjaga udara dalam ruangan tetap sehat dan nyaman. Ketersediaan udara yang berkualitas dalam ruangan sendiri tentunya sangat dipengaruhi oleh sirkulasi udara dari luar ruangan (Milenia dkk., 2023).

Perihal sirkulasi ini masih kurang mendapatkan perhatian dari para pengelola lapangan futsal yang cenderung mengabaikan kualitas udara dalam lapangan futsal. Bahkan dalam perkembangannya, banyak lapangan futsal yang kemudian sangat minim ventilasi dan hanya mengandalkan AC atau kipas angin sebagai *air maker*-nya (Prasetya dan Arsandrie, 2022). Padahal, kualitas udara yang baik akan mempengaruhi Kesehatan pengguna ruang. Untuk aktifitas olahraga tertentu konsumsi oksigen akan meningkat sesuai dengan tingkat aktifitas olahraga tersebut. Kapasitas udara paru-paru adalah 4.500-5.000 ml (4,55 liter) dengan proses inspirasi (dihirup) dan yang dihembuskan (ekspirasi) sekitar 10% (500 ml). Jadi kualitas udara yang baik di dalam ruangan sangat dibutuhkan khususnya untuk aktivitas olahraga seperti futsal (Pakaya dkk., 2021). Olehnya itu, diperlukan indikator atau alat ukur yang kiranya bisa digunakan untuk memperoleh lapangan informasi mengenai kualitas dan sirkulasi udara di lapangan futsal itu sendiri. Selain itu, dibutuhkan konsep atau desain yang kiranya dapat menjawab permasalahan mengenai sirkulasi dan kualitas udara yang baik. Berkenaan dengan hal tersebut, peneliti kemudian akan menggunakan *software OpenFOAM* guna melakukan pengukuran kualitas udara serta konsep atau pendekatan *healing environment* sebagai bagian dari solusi dalam penelitian ini.

OpenFOAM (Open Source Field Operation and Manipulation) adalah perangkat lunak opensource untuk *Computational Fluid Dynamics (CFD)* yang dikembangkan oleh OpenCFD Ltd sejak 2004. Software ini dirilis dengan lisensi GNU General Public License (GPL) dan dapat digunakan di berbagai sistem operasi, termasuk Windows, MacOS, dan Linux-Ubuntu. *OpenFOAM* sendiri memiliki beberapa karakteristik. Pertama, memiliki ketersediaan gratis dan terbuka. *OpenFOAM* adalah perangkat lunak yang dapat diakses secara gratis dan dibuat

oleh OpenFOAM Foundation. Lisensi GPL memastikan bahwa pengguna dapat memodifikasi dan mendistribusikan ulang perangkat lunak ini tanpa biaya. Kedua, dikembangkan oleh komunitas kredibel secara berkelanjutan. *OpenFOAM* dikembangkan oleh para ahli dan penggemar CFD dari seluruh dunia secara terbuka. Setiap enam bulan, versi baru dari *OpenFOAM* diluncurkan, yang melibatkan kontribusi dari komunitas dan dites secara independen oleh spesialis aplikasi dari ESI-OpenCFD dan para konsumen yang dipilih. Ketiga, memiliki berbagai fitur dan aplikasi. *OpenFOAM* memiliki berbagai fitur yang dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah CFD, termasuk dinamika fluida, termofisik, dan turbulensi. *Software* ini dapat digunakan untuk simulasi yang melibatkan reaksi kimia, pembakaran, aeroakustik, dan mekanika padat.

Kerangka kerja CFD *OpenFOAM* seringkali tampak menakutkan karena menuntut pemahaman yang kuat tentang fisika, numerik, dan teknik dari pengguna. *OpenFOAM* bersifat *open-source*, dan karena itu banyak aspek dari proses solusi terbuka bagi pengguna (berbeda dengan opasitas umum dalam produk simulasi komersial). Akses ke kode sumber memberikan kekuatan kepada pengguna untuk menyesuaikan hal-hal sesuai kebutuhan mereka. Namun, kekuatan ini datang dengan biaya untuk mempelajari cara menggunakan baris perintah dalam sistem Operasi Linux, mempelajari tentang file konfigurasi yang menentukan parameter yang digunakan oleh Metode Volume Terbatas terstruktur, dan lain-lain. Sedangkan konsep *healing environment* adalah membangun suasana melalui penyesuaian semua elemen desain untuk dapat memberikan rangsangan positif bagi indra.

Bihastuti dkk. (2017) menjelaskan bahwa *healing environment* adalah sebuah sistem dan tempat yang terdiri dari orang-orang, perilaku, perawatan, dan parameter psikologis dan fisik. Merujuk pada definisi tersebut, dapat dimaknai

bahwa healing environment adalah membangun suasana melalui penyesuaian semua elemen desain untuk dapat memberikan rangsangan positif bagi indra. Terkait dengan konsep yang ditawarkan, Penerapan *healing environment* digunakan sebagai dasar untuk mensintesa antara fenomena arsitektur dan fenomena non arsitektur yang menghasilkan kriteria desain. Kriteria desain menjadi dasar untuk menentukan konsep peruangan, tapak, bentuk dan tata masa bangunan, serta lansekap yang ditransformasikan kan menjadi sebuah desain. Konsep *healing environment* adalah membangun suasana melalui penyesuaian semua elemen desain untuk dapat memberikan rangsangan positif bagi indra..

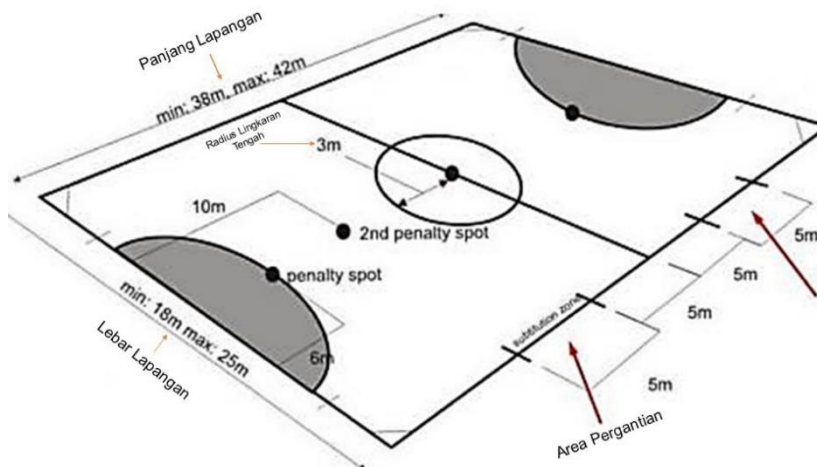
Penelitian ini merujuk kepada beberapa riset terdahulu seperti Amalia dkk. (2022) yang berjudul "Prototype Sistem Pengkondisian Sirkulasi Udara pada Lapangan Futsal dengan Metode *Fuzzy Logic* Berbasis IoT"; Prasetya dan Arsandrie (2022) dengan judul "Kajian Kenyamanan Termal Dan Sirkulasi Ruang Pada Bengawan Sport Center, Surakarta"; Nadzir dan Aqli (2020) yang berjudul "Kajian *Thermal Performance* pada Gymnasium UI, Depok"; dan beberapa penelitian lainnya. Penelitian ini sendiri akan dilakukan di Lapangan Indoor Futsal SCR di Kabupaten Wajo yang baru diresmikan oleh Bupati Kabupaten Wajo, Amran Mahmud, pada 27 November 2022 lalu. Dilansir dari laman nusantara-news.co (2022), lapangan ini diharapkan mampu menjadi wadah dalam pembinaan atlet atlet yang akan menghadapi pekan olahraga provinsi di Kabupaten Wajo tahun 2026 mendatang. Dijelaskan lebih lanjut bahwa lapangan tersebut didirikan demi mencetak atlet berprestasi baik di tingkat provinsi maupun di tingkat nasional. Olehnya itu, sangat wajar bila ekspektasi mengenai kualitas udara di tempat ini perlu menjadi sorotan dan diharapkan memiliki sirkulasi udara yang baik pula. Oleh karena itu, penelitian ini kemudian diterjemahkan ke dalam suatu tesis penelitian

berjudul “Optimalisasi Sirkulasi dan Kualitas Udara pada Lapangan Indoor Futsal SCR di Kabupaten Wajo”.

1.2 Kajian Teori

1.2.1 Standarisasi dalam Futsal

Seperti olahraga pada umumnya futsal memiliki standarisasi tersendiri mengenai ukuran lapangan sebagaimana disajikan pada gambar berikut ini:



Gambar 1. Lapangan Futsal

(<https://www.infoedukasi.com/2021/03/contoh-gambar-lapangan-futsal-beserta-ukurannya.html>) diakses Sabtu 31 Desember 2022.

Berdasarkan gambar 1 di atas, diketahui bahwa standar ukuran futsal yaitu ukuran Panjang 38-42 meter dan lebar 18-25 m dengan aturan garis batas sebesar 8 cm, yang berfungsi sebagai garis sentuh sisi, masing-masing garis gawang yang berada di ujung, garis tengah yang melintang, radius lingkaran tengah sebesar 3 m, tidak ada temok atau papan sebagai penghalang. Untuk daerah penalty terdapat busur dengan ukuran 6 m di setiap tiang gawang dan untuk titik penalty 6 m dari titik garis gawang. Terdapat titik penalty kedua dengan jarak 10 m dari titik tengah

garis gawang. Zona pergantian memiliki daerah 5 m dari garis tengah lapangan pada sisi tribun dari pelemparan (Sopianto, 2023).

1.2.2 Tinjauan Sirkulasi Udara

Sirkulasi udara adalah pergerakan udara dari luar ke dalam ruangan sehingga menimbulkan pergantian udara dari luar ke dalam ruangan. Beberapa faktor pendukung sirkulasi udara :

a. Suhu Udara (C)

Menurut Szokolay (1994), kenyamanan termperatur sangat erat kaitannya dengan kenyamanan dalam ruang. Meskipun pada dasarnya sangat tergantung dengan perasaan subjektif dan kenyamanan perilaku, namun hal ini diupayakan dalam melakukan pendekatan batas kenyamanan normal dikarenakan manusia memiliki kemampuan adaptasi yang terbatas. Keterkaitan antara faktor kenyamanan sangat mempengaruhi penyelesaian masalah ini. Dibutuhkan kombinasi temperature udara, kelembaba, dan kecepatan angin agar menghasilkan kenyamanan temperature yang dikatakan temperature efektif.

Menurut ASHRAE temperature yang nyaman adalah sebuah kondisi yang dirasakan dan memberikan kepuasan terhadap suhu yang ada disekitarnya. Pekerja rumah sakit harus bekerja dalam kondisi duduk dan melakukan pekerjaannya secara berulang-ulang dalam waktu berjam-jam, aktifitas personal, pakaian, dan tingkat kebugaran serta kondisi pergerakan udara adalah faktor yang memberikan pengaruh terhadap suhu dan kelembaba yang rendah akan menghasilkan suhu menjadi semakin dingin, begitu pula sebaliknya (Binardi, 2003).

b. Angin

Menurut Ahrens (2007:123), angin merupakan Gerakan udara yang memiliki kekuatan berdasarkan tingkat gradien tekanan dan berpengaruh terhadap

perpindahan panas, kelembaban, uap air mikro organis dan material lainnya dari tempat yang satu ke tempat yang lain. Adapun karakteristik angin diantaranya adalah :

- 1) Bergerak dari tekanan tinggi ke area tekanan rendah;
- 2) Kandungan utama angin adalah gas yang menyebarkan angin tidak dapat dilihat;
- 3) Bila kelembaban udara lebih kering dibandingkan manusia maka akan terjadi evaporasi dari kulit dan angin akan masuk ke dalam kulit sehingga terasa lebih sejuk;
- 4) Jika suhu udara lebih dingin dari kulit manusia maka akan terjadi perpindahan panas dari kulit, sehingga kulit akan terasa lebih dingin.

c. Bukaan

Sistem ventilasi berkaitan dengan pergerakan udara dari dalam ruang ke luar ruang. Dengan pergerakan udara yang terus terjadi diharapkan memberikan kualitas udara yang baik pula sehingga berdampak terhadap kenyamanan udara. Ventilasi yang dimaksud adalah proses masuknya udara bersih dan keluarnya udara kurang baik dari ruangan. Pertukaran udara yang terjadi dapat secara alami maupun dengan bantuan alat (buatan). Ventilasi alami memungkinkan udara bergerak secara alamiah tanpa menggunakan alat, sehingga sangat bergantung pada pergerakan angin dan perbedaan tekanan udara dan temperature di luar ruang dan dalam ruang. Angin yang bergerak ke arah bangunan memberikan tekanan positif pada bidang penerima angin. Pergerakan ini mengakibatkan tekanan negatif pada bidang berlawanan. Hal ini menyebabkan udara masuk ke dalam ruang dengan melewati ventilasi dari berbagai tekanan angin pada bangunan tergantung dari beberapa faktor, yaitu kecepatan angin, ukuran dan bentuk bangunan

erdasarkan arah angin. Luas bukaan ventilasi dan penempatan harus didesain agar memenuhi kebutuhan pengguna ruang.

d. Pergerakan Udara

Pergerakan udara disebabkan oleh pemanasan lapisan udara yang berbeda. Upaya pencegahan Gerakan kuat dari aliran angin diupayakan untuk memperbaiki iklim mikro. Gerakan udara yang berada di permukaan tanah bersifat sangat berbahaya dengan Gerakan udara dipermukaan yang tinggi. Hal ini sangat bergantung dengan permukaan yang dilalui, semakin kasar permukaan maka semakin tebal lapisan udara. Pergerakan udara terjadi bila adanya perbedaan tekanan udara. Udara yang erpindah dari tekanan tinggi ketekanan rendah. Selain tekanan udara, suhu udara juga sangat mempengaruhi pergerakan udara. Udara panas akan berpindah ke tempat yang lebih tinggi, sedangkan udara yang dingin selalu berpindah denga menggantikan udara panas yang bergerak.

1.2.3 Ventilasi

a. Fungsi dan tujuan ventilasi

Ventilasi diperlukan untuk menyediakan oksigen ke dalam ruang, untuk pertukaran udara di dalam ruang dan untuk menukar udara kotor (udara polusi) yang termasuk di dalamnya karbon dioksida dan bau ruangan. Ventilasi juga berfungsi untuk mempertahankan kualitas udara yang baik dan sejuk di dalam ruangan dengan mengeluarkan udara-udara kotor yang kemudian digantikan dengan udara bersih yang masuk dari luar ruangan. Sebagai fungsi tambahan, ventilasi digunakan untuk pendingin udara alami dan (biasanya di rumah-rumah) menyediakan oksigen yang cukup. Sistem ventilasi yang baik berperan penting dalam kenyamanan dan kesehatan pengguna bangunan. Adapun tujuan dari ventilasi di antaranya:

1. Menghilangkan emisi gas-gas polusi yang dihasilkan oleh pengguna ataupun alat-alat pada ruangan, yaitu gas-gas berupa bau yang dihasilkan oleh keringat pengguna, kentut (Amonia), pernafasan (CO₂), bau-bau taksedap lainnya.
2. Menghilangkan uap air yang dapat meningkatkan kelembaban ruangan dan membuat tidak nyaman bagi pengguna, seperti uap masakan, uap pernafasan, uap air sewaktu mandi, dan uap air dari penampungan seperti bak mandi, ember, dan sebagainya.
3. Menghilangkan kalor yang berlebihan di ruangan yang membuat ruangan panas dan tidak nyaman.
4. Secara alami meningkatkan kenyamanan termal pada ruangan.

c. Hubungan sistem ventilasi dan bau dalam ruangan

Bau dalam ruangan merupakan salah satu udara “polusi” atau sebagai indikasi ruangan tersebut ter-“polusi”. Bau di dalam ruangan ini secara tidak langsung dapat membuat kesehatan pengguna ruangan menurun, meskipun ini tidak terlalu berbahaya seperti udara beracun, contohnya radon, karbon monoksida yang tidak kasat mata. Secara umum, bau di dalam ruangan menyebabkan ketidaknyamanan, terutama pada kantor-kantor atau rumah tinggal. Tingkat kesulitan dalam menghadapi masalah bau ini tinggi, dimana suatu ruangan dikatakan bau, tidak dapat diukur dengan menggunakan alat. Studi mengenai bau dan cara mengontrolnya ditulis oleh (Fanger 1988) yang mengatakan bahwa satuan dari analisa bau itu adalah ‘Olf’. Olf adalah satuan bau yang dikeluarkan secara rata-rata oleh manusia pada umumnya.

d. Ventilasi ruangan

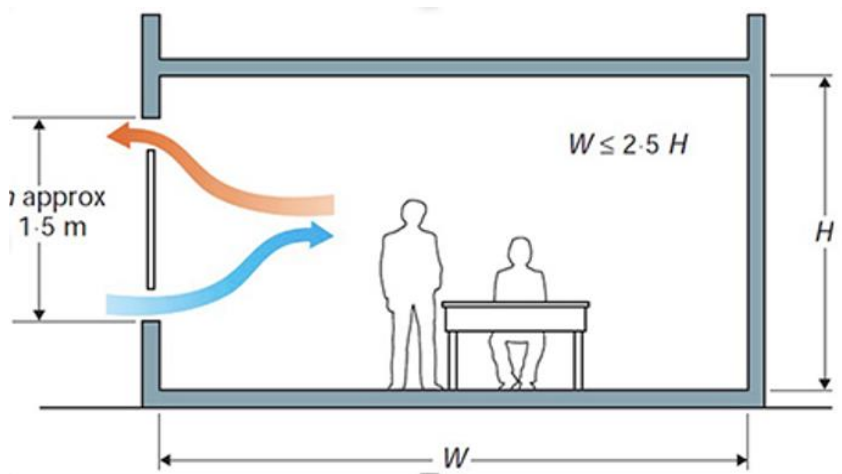
Ventilasi alami adalah ventilasi yang berupa bukaan-bukaan permanen, jendela, pintu, void, dan semua bukaan yang menghubungkan ruangan pada

ruangan lain ataupun langsung ke area luar. Berdasarkan SNI 03-3647-1994, Standar Tata Cara Perencanaan Teknik Bangunan Olahraga, ventilasi alami ruangan diperlukan minimal 6% dari luasan ruangan yang membutuhkan ventilasi. Perletakan ventilasi alami harus diatur mengikuti pergerakan udara silang. Merancang sistem ventilasi alami harus diawali dengan menentukan kebutuhan ventilasi udara yang sesuai dengan kebutuhan ruangan, dan menentukan ventilasi gaya angin serta gaya termal yang akan diterapkan. Adapun Faktor-faktor yang mempengaruhi gaya angin secara umum adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan angin rata-rata yang berasal dari luar bangunan,
2. Arah angin,
3. Waktu harian, yang menyebabkan kekuatan angin dan arah angin yang bervariasi,
4. Waktu musim, yaitu musim panas dan musim dingin yang mempengaruhi arah angin dari Barat atau Timur,

Hal-hal yang dapat menghambat laju angin seperti: pohon, bangunan lainnya, dan lain-lain.

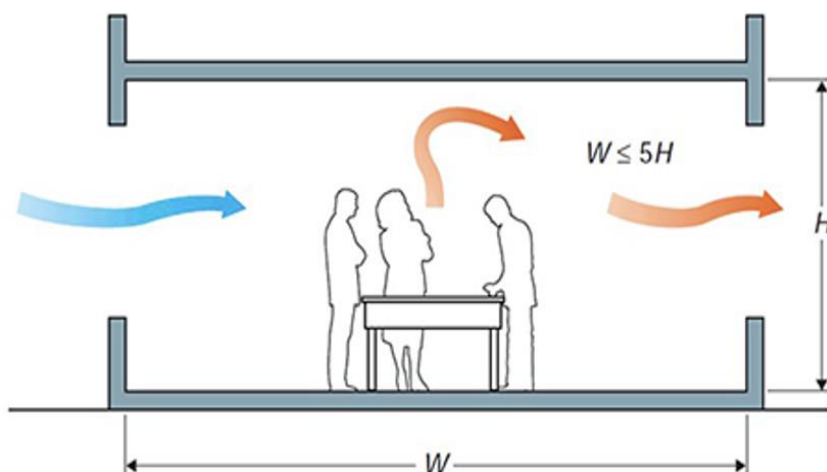
1. Ventilasi buatan adalah ventilasi yang menggunakan alat-alat elektronik, seperti AC (*Air Conditioner*), *cooling fan*, dan sebagainya. Ventilasi alami digunakan apabila sistem ventilasi alami tidak mencapai kenyamanan suatu ruangan. Berdasarkan SNI 03-3647-1994, Standar Tata Cara Perencanaan Teknik Bangunan Olahraga, apabila sebuah gedung olahraga menggunakan ventilasi buatan, maka harus memenuhi
2. Volume pergantian udara minimum sebesar 10–15 m³/jam/orang
3. Alat ventilasi buatan tidak menimbulkan kebisingan di dalam arena dan tempat penonton



Gambar 2. Ventilasi Satu Sisi

(Sumber : <https://www.abec.co.uk/blog/automatic-natural-ventilation-simple-or-complicated#.Y7UKS-xBzoe>, diakses 4 Januari 2023)

Single Sided-Ventilation seperti pada gambar 2 hanya cocok digunakan pada ruangan yang kecil, dimana arah angin dari luar ruangan cenderung searah, sehingga pada ruangan yang besar, *Single Sided-Ventilation* juga menimbulkan analogi botol..



Gambar 3. Ventilasi Bersilangan

(Sumber : <https://www.abec.co.uk/blog/automatic-natural-ventilation-simple-or-complicated#.Y7UKS-xBzoe>, diakses 4 Januari 2023)

Ventilasi silang atau *cross ventilation* seperti pada gambar 3 adalah dua bukaan berupa jendela atau pintu yang letaknya saling berhadapan di dalam satu ruangan. Ventilasi ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan zona bertekanan tinggi dan rendah yang tercipta oleh udara. *Cross-Ventilation* adalah sistem ventilasi udara yang paling baik, dimana letak bukaannya ada di dua sisi ruangan, sehingga angin dapat bergerak lurus setelah menjangkau seluruh ruangan. Berdasarkan sintesis beberapa penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa tidak ada alasan untuk mengubah angka presentase minimum ventilasi yang sebesar 5% ini. Angka 4 - 5% tersebut masih dirasa masih cukup untuk menggambarkan luas minimum ventilasi alami terhadap luas ruangan bersih dengan catatan ventilasi tersebut dapat membuat aliran udara dalam ruangan sesuai dengan persyaratan aliran udara berdasarkan fungsi ruangan seperti pada ASHRAE (Ishak, 2018). Hal tersebut selaras dengan penelitian yang menjelaskan lingkungan dalam ruangan masih memiliki kemungkinan yang sangat tinggi untuk mencapai kenyamanan yang memuaskan dengan ventilasi alami murni dengan desain fasad yang dapat menyesuaikan kondisi angin di sekitar gedung sehingga nilai presentase minimum ventilasi dapat diabaikan (Winardo dan Wimala, 2023).

Pernyataan tersebut juga didukung oleh penelitian yang membuktikan bangunan yang memiliki rata-rata tingkat ventilasi di bawah persyaratan peraturan masih dapat digunakan secara layak, tetapi tetap memakai acuan wajib berupa standar tingkat aliran udara yang sesuai dengan fungsi ruangnya (Asikainen *et. al.*, 2013). Efektivitas ventilasi alami yang sudah sesuai dengan presentase minimal area sangat sensitif terhadap perubahan posisi jendela, diikuti oleh orientasi bangunan dan posisi pintu (Aflaki *et. al.*, 2015). Studi menunjukkan bahwa bangunan di bagian depan memiliki potensi ventilasi alami tertinggi untuk setiap

sudut tertentu (θ), tata letak dan orientasi optimal bangunan terhadap angin yang berlaku adalah $\theta = 30^\circ$ [16]. Bangunan yang memiliki ventilasi di bawah persyaratan peraturan dapat digunakan secara layak dengan memakai acuan wajib berupa standar tingkat aliran udara yang sesuai dengan fungsi ruangnya (Asikainen *et. al.*, 2013).

Dengan adanya prosedur yang mengatur ventilasi alami berdasarkan fungsi ruangan, desain ventilasi alami akan menjadi semakin spesifik sesuai dengan fungsi ruangan yang didesain. Oleh karena itu maka perlu adanya prosedur yang mengatur standar tersebut. Dibandingkan standar Norme Européenne, standar ASHRAE dirasa lebih sesuai dengan keadaan gedung di Indonesia dikarenakan jika memakai kriteria dengan standar Norme Européenne maka dalam pemakaian ruangan terhadap populasinya akan menjadi terbatas. Seringkali ruangan yang ditujukan sesuai fungsinya akan memiliki keterbatasan luasan area ruangan sehingga dalam kasus ini lebih tepat jika data populasi ruangan yang didesain dan luasan ruangan yang didesain yang terbatas dapat didapat besaran ventilasi yang sesuai dengan fungsi ruangan. Standar Norme Européenne memiliki pendekatan alur yang terbalik yang dimana jika bangunan memiliki ruangan yang tetap maka populasi dalam ruangan tersebut akan terbatas sesuai dengan luasan ventilasinya. (Aflaki *et. al.*, 2015).

1.2.4 Kualitas Udara

a. Kenyamanan Termal *Indoor*

Kenyamanan termal dapat didefinisikan sebagai suatu kondisi pikiran yang mengekspresikan kepuasan dengan lingkungan termal. Definisi yang lain menyebutkan sebagai lingkungan indoor dan faktor pribadi yang akan menghasilkan kondisi lingkungan termal yang dapat diterima sampai 80% atau

lebih dari penghuni dalam sebuah ruang, namun tidak pernah tepat didefinisikan oleh standar, secara umum disepakati dalam komunitas riset kenyamanan termal yang diterima adalah identik dengan 'Kepuasan', dan kepuasan dikaitkan dengan sensasi panas 'sedikit hangat,' netral', dan 'Sedikit dingin'. Pemaknaan berdasarkan pada pendekatan psikologis lebih banyak digunakan oleh para pakar pada bidang termal. ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating Air Conditioning Engineer) memberikan definisi kenyamanan thermal sebagai kondisi pikir yang meng ekspresikan tingkat kepuasan seseorang terhadap lingkungan termalnya. Dengan pemaknaan kenyamanan thermal sebagai kondisi pikir yang mengekspresikan tingkat kepuasan seseorang terhadap lingkungan termalnya maka berarti kenyamanan thermal akan melibatkan tiga aspek yang meliputi fisik, fisiologis dan psikologis, sehingga pemaknaan kenyamanan termal berdasarkan pendekatan psikologis adalah pemaknaan yang paling lengkap.

Kenyamanan termal di daerah beriklim tropis lembab untuk bangunan (indoor) dengan menggunakan penghawaan alami atau ventilasi sulit untuk menjangkau standar kenyamanan internasional ASHRAE 55- 92, karena rata-rata suhu udara dan kelembaban relatif tinggi sehingga suhu netral tidak memenuhi zona kenyamanan yang disyaratkan yaitu antara 23 °C sampai 26 °C. Sementara dari beberapa penelitian yang dilakukan oleh Nugroho (2011), Roonak et al. (2009), Henry dan Nyuk (2004), Sulaiman et al. (2011), Iftikhar et al. (2001) dan Alison (2003) di daerah beriklim tropis lembab dengan objek beberapa jenis bangunan menunjukkan suhu netral antara 26.1°C t 29.8 °C. Berdasarkan beberapa penelitian sulitnya mencapai suhu netral yang sesuai zona kenyamanan termal dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya karena disain yang menyebabkan radiasi sinar matahari cukup tinggi (Nugroho, 2011), sirkulasi udara yang disebabkan kecepatan

udara relatif kecil (Roonak et al., 2009) dan tingginya kelembaban udara karena faktor iklim (tropis lembab).

Pada bangunan-bangunan di daerah dengan iklim tropis lembab banyak mengalami kesulitan untuk memenuhi standar yang disyaratkan sesuai zona kenyamanan ASHRAE 55. Hal ini disebabkan karena variabel yang mempengaruhi kenyamanan termal kurang mendukung, diantaranya suhu udara, kelembaban relatif, radiasi sinar matahari dan kecepatan udara dalam ruang. Untuk mencapai kenyamanan termal yang diinginkan perlu dilakukan kontrol atau tindakan adaptif dari penghuni diantaranya dengan mengatur sistim ventilasi, mengatur sirkulasi angin secara mekanik, memberikan tirai pada bagian bangunan yang langsung terkena radiasi matahari bahkan disarankan untuk membuat disain perangkat shading matahari untuk meminimalkan panas radiasi. Suhu udara di luar zona kenyamanan dapat diterima oleh penghuni di daerah tropis lembab. Hal ini menunjukkan bahwa standar internasional kenyamanan termal ASHRAE 55 tidak mutlak berlaku di daerah beriklim tropis lembab, sehingga perlu diusulkan standard khusus untuk daerah beriklim tropika lembab.

Kenyamanan ruang efektif akan terfokus pada temperatur dan kelembaban udara. Hal ini harus sejalan untuk menghasilkan efektifitas kenyamanan termal. Indeks kenyamanan dipengaruhi oleh temperatur dan kelembapan udara, dimana respon termal dari orang dan kondisi keduanya adalah sama, meskipun pada dasarnya temperature dan kelembaban ruangan berbeda, namun konsistensi kecepatan angin sangat dibutuhkan untuk mencapai tingkat kenyamanan sebuah ruang. Menurut standar ASHRAE, Temperatur efektif yang dimaksud apabila pengguna ruangan menggunakan pakaian standar, kegiatan yang sama, dan emisi uap keringat dan pernafasan yang sama. Temperatur ruangan nyaman untuk daerah

tropis di Indonesia berada pada kisaran 20,5°C sampai dengan 27,1°C, dengan kelembaban rata-rata di 50% dari kelembaban udara jenuh ruangan tersebut.

Untuk pengukuran kondisi termal seringkali menggunakan temperature efektif (TE), yaitu perpaduan antara temperature udara, kelembaban, dan kecepatan angin sehingga membentuk temperatur nyaman di waktu yang saat ini, hal ini yang sering dikatakan dengan temperatur efektif (TE). Szokolay (1980) menyebutkan bahwa faktor-faktor yang mempengaruhi temperatur efektif adalah temperature udara, kelembaban udara, radiasi matahari, dan pergerakan udara. Untuk mengetahui nilai temperatur efektif yang dirasakan oleh manusia yang berada di lokasi tertentu dapat dilakukan dengan melakukan pendekatan diagram Monogram. Diagram ini digunakan untuk memerikan gambaran mengenai hubungan faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kenyamanan termal.

b. Standar Udara Dalam Ruang (*Indoor*) di Indonesia

Pencemaran udara dalam ruang (*indoor air pollution*) terutama rumah sangat berbahaya bagi kesehatan manusia, karena pada umumnya orang lebih banyak menghabiskan waktu untuk melakukan kegiatan di dalam rumah sehingga rumah menjadi sangat penting sebagai lingkungan mikro yang berkaitan dengan risiko dari pencemaran udara. Dampak dari adanya pencemar udara dalam ruang rumah terhadap kesehatan dapat terjadi baik secara langsung maupun tidak langsung. Gangguan kesehatan secara langsung dapat terjadi setelah terpajan, antara lain yaitu iritasi mata, iritasi hidung dan tenggorokan, serta sakit kepala, mual dan nyeri otot (*fatigue*), termasuk asma, hipersensitivitas pneumonia, flu dan penyakit–penyakit virus lainnya. Sedangkan gangguan kesehatan secara tidak langsung dampaknya dapat terjadi beberapa tahun kemudian setelah terpajan, antara lain penyakit paru, jantung, dan kanker, yang sulit diobati dan berakibat fatal.

Dalam upaya melindungi kesehatan masyarakat dari pencemar udara dalam ruang rumah, maka diperlukan adanya peraturan perundang-undangan yang dapat memberikan acuan dalam pengendalian pencemaran udara dalam ruang rumah dalam wujud Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/Menkes/PER/V/2011 Tentang Pedoman Penyehatan Udara Dalam Ruang Rumah. Meskipun memiliki embel “rumah”, namun Kementerian Lingkungan Hidup menetapkan peraturan ini sebagai acuan regulasi untuk udara dalam ruangan (*indoor*) di Indonesia. Adapun persyaratan kualitas udara dalam ruang berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/Menkes/PER/V/2011 meliputi beberapa aspek yakni:

- a. Kualitas fisik, terdiri dari parameter: partikulat (Particulate Matter/PM_{2,5} dan PM₁₀), suhu udara, pencahayaan, kelembaban, serta pengaturan dan pertukaran udara (laju ventilasi);

Tabel 1. Persyaratan Kualitas Fisik

No.	Jenis Parameter	Satuan	Kadar yang Dipersyaratkan
1	Suhui	°C	18-30
2	Pencahayaan	Lux	Min. 60
3	Kelembaban	%Rh	40-60
4	Laju Ventilasi	m/dtk	0,15-0,25
5	PM _{2,5}	ug/m ³	35 dalam 24 Jam
6	PM ₁₀	ug/m ³	≤ 70 dalam 24 Jam

Sumber: Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/Menkes/PER/V/2011

- b. Kualitas kimia, terdiri dari parameter: Sulfur dioksida (SO₂), Nitrogen dioksida (NO₂), Karbon monoksida (CO), Karbon dioksida (CO₂), Timbal (Plumbum=Pb), asap rokok (Environmental Tobacco Smoke/ETS), Asbes, Formaldehid (HCHO), Volatile Organic Compound (VOC).

Tabel 2. Persyaratan Kualitas Kimia

No.	Jenis Parameter	Satuan	Kadar yang Dipersyaratkan	Ket.
1	Sulfur Dioksida (SO ₂)	ppm	0,1	24 Jam
2	Nitrogen Dioksida (NO ₂)	ppm	0,04	24 Jam
3	Karbon Monoksida (CO)	ppm	9,00	8 Jam
4	Karbon Dioksida (CO ₂)	ppm	1000	8 Jam
5	Timbal (Pb)	ug/m ³	1,5	15 Menit
6	Asbes	Serat/ml	5	Panjang serat 5u
7	Formaldehid (HCHO)	ppm	0,1	30 Menit
8	Volatile Organic Compound (VOC)	ppm	3	8 Jam
9	Environmental Tobacco Smoke (ETS)	ug/m ³	35	24 Jam

Sumber: Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/Menkes/PER/V/2011

c. Kualitas biologi terdiri dari parameter: bakteri dan jamur.

Tabel 3. Persyaratan Kontaminan Biologi

No.	Jenis Parameter	Satuan	Kadar Maksimal
1	Jamur	CFU/m ³	0 CFU/m ³
2	Bakteri Patogen	CFU/m ³	0 CFU/m ³
3	Angka Kuman	CFU/m ³	< 700 CFU/m ³

Sumber: Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/Menkes/PER/V/2011

1.2.6 Simulasi Pergerakan Udara

Sejarah CFD berawal pada tahun 60-an dan mulai terkenal pada tahun 70-an, awalnya pemakaian konsep CFD hanya digunakan untuk aliran fluida dan reaksi kimia, namun seiring dengan berkembangnya industri di tahun 90-an membuat CFD makin dibutuhkan pada berbagai aplikasi lain. Contohnya sekarang ini banyak sekali paket-paket software CAD menyertakan konsep CFD yang dipakai

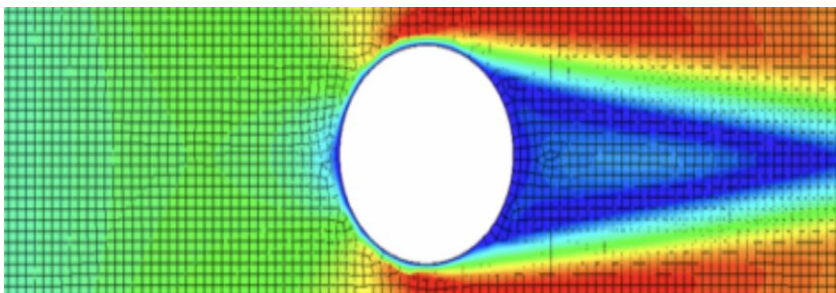
untuk menganalisa stress yang terjadi pada design yang dibuat. Secara Definisi CFD merupakan ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika) dan ini memungkinkan untuk melakukan percobaan numerik di dalam laboratorium virtual (Rekayana dan Widyaparaga, 2020).

Berdasarkan definisi yang telah diuraikan, dapat disimpulkan bahwa CFD adalah metode penghitungan, memprediksi, dan pendekatan aliran fluida secara numerik dengan bantuan komputer. Trend riset ke arah komputerisasi dengan CFD ini dikarenakan pesatnya perkembangan software-software program di bidang engineering khususnya mengenai dinamika fluida dan dikarenakan juga oleh para periset tidak mau dipusingkan dengan metode-metode perhitungan (Hidayat, 2016). CFD sendiri melakukan pendekatan dengan metode numerasi serta menggunakan persamaan-persamaan fluida karena aliran fluida dalam kehidupan nyata memiliki banyak sekali jenis dan karakteristik tertentu yang begitu kompleks. Berikut ini beberapa contoh aliran fluida yang sering kita temui sehari-hari:

- a. Bernafas, minum, pencernaan, mencuci, berenang merokok.
- b. Laundry pakaian dan mengeringkannya.
- c. Pemanas ruangan, ventilasi ruangan, memadamkan api dengan air.
- d. Pembakaran bensin pada engine dan tentunya juga polusi.
- e. Membuat sup, campuran minyak pada pembuatan plastik Pesawat, parasut, berselancar, berlayar
- f. Menyolder, pembuatan besi atau baja, elektrolisis air.

Adapun Pemakain CFD secara umum dipakai untuk memprediksi banyak hal antara lain:

- a. Aliran dan panas.
- b. Transfer massa.
- c. Perubahan fasa seperti pada proses melting, pengembunan dan pendidihan.
- d. Reaksi kimia seperti pembakaran.
- e. Gerakan mekanis seperti piston dan fan.
- f. Tegangan dan tumpuan pada benda solid.
- g. Gelombang elektromagnet



Gambar 4. Contoh Penggunaan CFD pada Model Bola

(Sumber : <https://www.aeroengineering.co.id/2020/01/meshing-and-discretization-in-computational-fluid-dynamics-cfd/> diakses 4 Januari 2023)

Berdasarkan apa yang ditampilkan pada gambar 4, diketahui bahwa pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika kita melakukan simulasi yaitu *Preprocessing*, *Solving*, dan *Postprocessing*. *Preprocessing* adalah tahap dimana data diinput mulai dari pendefinisian domain serta pendefinisian kondisi batas atau *boundary condition*. Ditahap itu juga sebuah benda atau ruangan yang akan analisa dibagi-bagi dengan jumlah grid tertentu atau sering disebut juga dengan meshing. Tahap selanjutnya adalah *solving*, pada tahap ini dilakukan proses penghitungan data-data input dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Artinya penghitungan dilakukan hingga hasil menuju error terkecil atau hingga mencapai nilai yang konvergen. Penghitungan dilakukan secara menyeluruh terhadap volume kontrol dengan proses integrasi persamaan diskrit. Tahap akhir

merupakan tahap postprocessor dimana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik bahkan animasi dengan pola-pola warna tertentu. Hal yang paling mendasar mengapa konsep CFD (software CFD) banyak sekali digunakan dalam dunia industri adalah dengan CFD dapat dilakukan analisa terhadap suatu sistem dengan mengurangi biaya eksperimen dan tentunya waktu yang panjang dalam melakukan eksperimen tersebut. Atau dalam proses design engineering tahap yang harus dilakukan menjadi lebih pendek.

1. Persamaan-persamaan konservasi

Dalam membuat model CFD diperlukan definisi dari model itu sendiri, apakah model tersebut memepertimbangkan faktor reaksi kimia, mass transfer, heat transfer atau hanya berupa aliran fluida non kompressible dan laminar. Definisi dari model sebenarnya adalah memilih persamaan mana yang akan diaktifkan dalam suatu proses CFD. Banyak sekali persamaan yang digunakan dalam konsep CFD secara umum karena semua persamaan tersebut merupakan pendekatan dari karakteristik fluida yang akan mendekatkannya pada kondisi real.

2. Persamaan Konservasi Momentum

Persamaan konservasi momentum adalah persamaan yang mendefinisikan gerakan fluida ketika terjadi gaya-gaya pada partikel-partikelnya pada setiap elemen fluida yang didefinisikan di dalam model CFD. Persamaan diatas adalah persamaan diferensial umum dari gerakan fluida. Kenyataannya persamaan tersebut dapat diaplikasikan untuk setiap continuum (solid atau fluid) ketika bergerak ataupun diam.

3. Solusi Persamaan

Setelah semua terdefinisi maka seluruh variabel yang diketahui dimasukkan kedalam persamaan dan diselesaikan menggunakan operasi numerik. Ketika iterasi

dimulai maka seluruh persamaan konservasi yang didefinisikan diselesaikan secara bersamaan secara paralel. Disinilah peran komputer yang sebenarnya. Berikut ini flow charts dari salah satu aplikasi CFD (Fluent) dalam penyelesaian persamaan.

1.2.7 Software OpenFOAM

a. Gambaran Umum dan Karakteristik *OpenFOAM*

OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) adalah perangkat lunak opensource untuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dikembangkan oleh OpenCFD Ltd sejak 2004. Software ini dirilis dengan lisensi GNU General Public License (GPL) dan dapat digunakan di berbagai sistem operasi, termasuk Windows, MacOS, dan Linux-Ubuntu. *OpenFOAM* sendiri memiliki beberapa karakteristik. Pertama, memiliki ketersediaan gratis dan terbuka. *OpenFOAM* adalah perangkat lunak yang dapat diakses secara gratis dan dibuat oleh OpenFOAM Foundation. Lisensi GPL memastikan bahwa pengguna dapat memodifikasi dan mendistribusikan ulang perangkat lunak ini tanpa biaya. Kedua, dikembangkan oleh komunitas kredibel secara berkelanjutan. *OpenFOAM* dikembangkan oleh para ahli dan penggemar CFD dari seluruh dunia secara terbuka. Setiap enam bulan, versi baru dari *OpenFOAM* diluncurkan, yang melibatkan kontribusi dari komunitas dan dites secara independen oleh spesialis aplikasi dari ESI-OpenCFD dan para konsumen yang dipilih. Ketiga, memiliki berbagai fitur dan aplikasi. *OpenFOAM* memiliki berbagai fitur yang dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah CFD, termasuk dinamika fluida, termofisik, dan turbulensi. *Software* ini dapat digunakan untuk simulasi yang melibatkan reaksi kimia, pembakaran, aeroakustik, dan mekanika padat.

Kerangka kerja CFD *OpenFOAM* seringkali tampak menakutkan karena menuntut pemahaman yang kuat tentang fisika, numerik, dan teknik dari pengguna.

OpenFOAM bersifat *open-source*, dan karena itu banyak aspek dari proses solusi terbuka bagi pengguna (berbeda dengan opasitas umum dalam produk simulasi komersial). Akses ke kode sumber memberikan kekuatan kepada pengguna untuk menyesuaikan hal-hal sesuai kebutuhan mereka. Namun, kekuatan ini datang dengan biaya untuk mempelajari cara menggunakan baris perintah dalam sistem Operasi Linux, mempelajari tentang file konfigurasi yang menentukan parameter yang digunakan oleh Metode Volume Terbatas terstruktur, dll.

b. Tujuan Analisis CFD dengan *OpenFOAM*

Tujuan dari analisis CFD adalah untuk memperoleh pemahaman yang lebih dalam tentang masalah yang sedang di temui. Karena hasil simulasi sering kali disertai dengan data eksperimental, validitas hasil, dan tujuan keseluruhan dari simulasi perlu di perhatikan. Selain itu, proses fisik yang disimulasikan perlu dimodelkan secara matematis dengan benar. Selanjutnya membutuhkan insinyur CFD untuk membuat pilihan yang valid dari solver yang sesuai dalam kerangka *OpenFOAM*. Daftar ini hanya mewakili beberapa pertanyaan yang sering ketika kita sudah menggunakan analisis CFD.

c. Langkah-langkah Analisis CFD *OpenFOAM*

OpenFOAM adalah perangkat lunak *opensource* untuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah mekanika kontinum, termasuk dinamika fluida komputasi. Berikut adalah penjelasan rinci tentang *OpenFOAM* dan tahapan dalam analisis CFD:

1. *Problem Definition*

Tahap pertama dalam analisis CFD adalah memahami dan mendefinisikan masalah yang akan disimulasikan. Ini termasuk menentukan jenis aliran, kondisi batas, dan detail data yang akan diproses.

2. *Mathematical Modeling*

Pada tahap ini, persamaan matematika yang mewakili fenomena yang sedang disimulasikan ditentukan. Persamaan diferensial parsial (PDE) ditransformasi menjadi persamaan aljabar yang dapat dipecahkan menggunakan metode diskritisasi ruang dan waktu.

3. *Pre-processing and Mesh Generation*

Tahap ini melibatkan pembuatan geometri, penentuan domain, dan pembuatan mesh atau grid yang akan digunakan dalam simulasi. Proses ini sangat penting untuk mendefinisikan model dari geometri, domain, dan tingkat detail data yang akan disimulasikan.

4. *Solving*

Pada tahap ini, persamaan matematika yang telah ditentukan sebelumnya diselesaikan menggunakan solver. Pengguna harus mendefinisikan kondisi batas dan jenis aliran yang akan digunakan dalam simulasi. Solver sering dioperasikan sebagai "kotak hitam" dalam kode CFD komersial, tetapi intervensi pengguna diperlukan untuk menentukan metode solusi dan memilih diskritisasi.

2. *Post-processing*

Setelah simulasi selesai, data hasil simulasi dianalisis dan diinterpretasi. Ini termasuk visualisasi data, seperti vektor kecepatan dan aliran, serta pengukuran parameter seperti fluks dan volume aliran.

3. *Verification and Validation*

Tahap terakhir adalah verifikasi dan validasi hasil simulasi. Proses ini melibatkan berbagai pengujian untuk memastikan bahwa simulasi telah dijalankan dengan benar dan hasilnya sesuai dengan ekspektasi. Pengujian ini

melibatkan pengujian regresi, penggunaan memori, performa kode, dan skalabilitas simulasi.

OpenFOAM didistribusikan secara eksklusif di bawah Lisensi Publik Umum (GPL), yang memberikan kebebasan kepada pengguna untuk memodifikasi dan mendistribusikan ulang perangkat lunak ini. Software ini dikembangkan oleh para ahli dan penggemar CFD dari seluruh dunia secara terbuka dan diterbitkan setiap enam bulan dengan kontribusi dari komunitas dan dites secara independen oleh spesialis aplikasi dari ESI-OpenCFD dan para konsumen yang dipilih.

1.3 Rumusan Masalah

Merujuk pada apa yang telah diuraikan, rumusan masalah yang akan dijawab dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja sirkulasi udara dalam Gedung SCR Futsal?
2. Bagaimana level kualitas udara dalam Gedung SCR Futsal?
3. Bagaimana model desain *healing environment* yang mampu mengoptimalkan kinerja sirkulasi udara dan meningkatkan kualitas udara dalam Gedung SCR Futsal?

BAB II

METODE PENELITIAN

Metode penelitian dalam hal ini berfungsi untuk menjawab permasalahan yang diangkat dalam penelitian. Guna menjawab dan mencari pemecahan permasalahan maka penelitian ini akan menggunakan metode penelitian kuantitatif.

2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan strategi penelitian permodelan dan simulasi komputer. Penelitian dilakukan dengan melalui beberapa tahapan mulai tahap persiapan, pengumpulan data, permodelan dan simulasi, interpretasi data dan analisis, serta penyimpulan hasil penelitian (Adi, 2019). Ditinjau dari segi jenis penelitian kuantitatif, maka dapat dikatakan bahwa penelitian ini bersifat eksperimental. Penelitian ini menggunakan jenis penelitian metode survey dan observasi pengukuran secara fisik di lapangan futsal. Dengan mengumpulkan data-data sekarang secara langsung dengan mendokumentasi sarana dan prasarana lapangan futsal yang menjadi objek penelitian.

2.2 Jenis dan Sumber Data

Data yang diteliti bersumber dari data primer dan data sekunder. Data primer yaitu data yang diperoleh dari pengukuran langsung di lapangan serta pengukuran dengan simulasi komputer. Sedangkan data sekunder adalah data yang diperoleh dari dokumen-dokumen dan referensi yang di anggap relevan dengan masalah yang diteliti. Salah satu pengambilan data sekunder dengan membagikan kuisioner. Dalam penelitian ini, jenis data yang dibutuhkan disesuaikan dengan variabel kenyamanan termal yang digunakan. Adapun jenis data yang dibutuhkan bersumber dari beberapa aspek berikut ini:

a. Dimensi bangunan dan dimensi bukaan ventilasi

Pengukuran ini dilakukan paling awal untuk mendapatkan data mengenai ukuran ruangan, ukuran bukaan ventilasi.

b. Kecepatan aliran udara

Pengukuran ini dilakukan untuk mendapatkan kecepatan angin pada bukaan di ruangan.

c. Temperatur udara

Pengukuran temperatur udara dilakukan selama sehari penuh. untuk mengetahui perubahan suhu yang terjadi dalam ruangan.

d. Kualitas Udara, kandungan CO₂ dan CO₂

Pengukuran hanya dilakukan untuk mengetahui kadar CO₂ dan CO₂ karena kandungan CO₂ tersebut yang banyak diproduksi oleh manusia sebagai pengguna lapangan. Sedangkan kandungan gas CO dihasilkan dari material lapangan yang ada dan dari pakaian yang dipergunakan.

2.3 Metode Pengumpulan Data

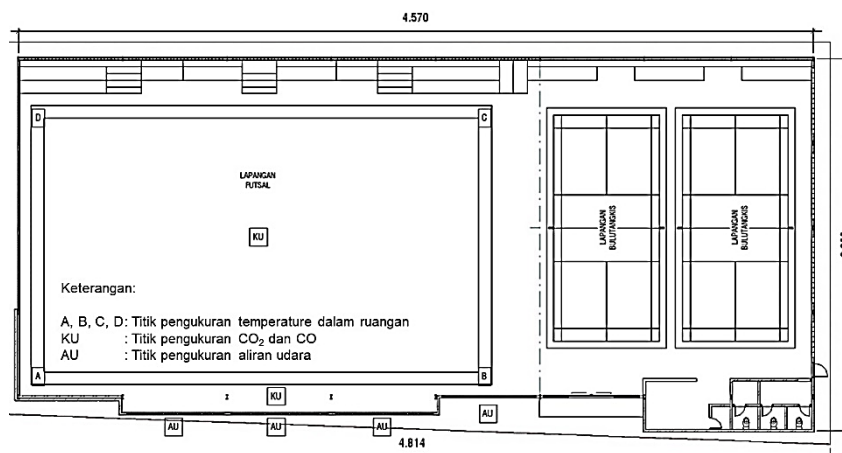
Penelitian ini meninjau langsung apa yang terjadi di lapangan. Proses penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan suatu informasi dan data tentang bangunan yang terkait dengan teknologi bukaan bangunan.

1. Alat Pengumpul Data

Alat yang digunakan untuk mengukur dalam penelitian ini adalah untuk mengukur temperatur udara dan kelembaban udara digunakan alat higrometer dan thermometer, dan kecepatan angin diukur dengan alat Anemometer hot wire, kandungan CO₂ dan CO₂ diukur menggunakan radio loger, untuk elemen bangunan digunakan meter digital.

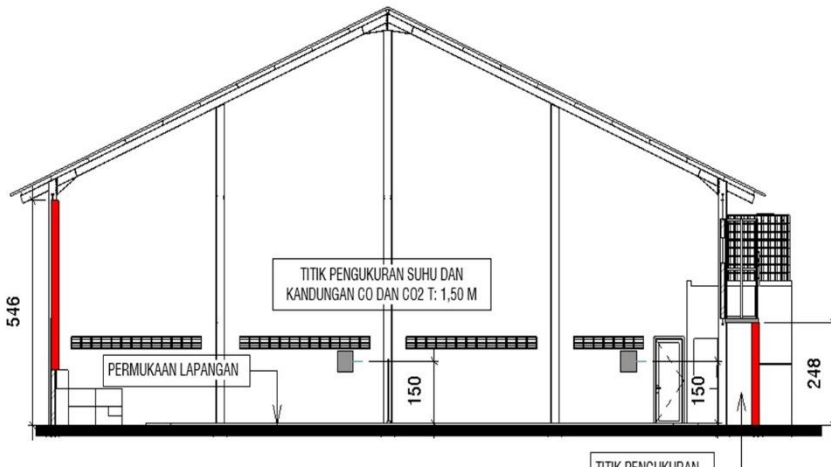
2. Pengambilan Data Awal

Observasi lapangan dengan mengukur temperatur ($^{\circ}\text{C}$), kecepatan angin (m/s) serta kelembaban (RH %) yang terjadi didalam ruangan dengan ventilasi alami dan digabungkan dengan buatan seperti kipas angin (m/s) dari hasil pengukuran dilapangan didistribusikan dalam bentuk tabel untuk mendapatkan tingkatan rata-rata untuk setiap titik ukur dengan menggunakan program microsoft excel. Serta mengukur kandungan CO_2 dan CO_2 di udara. Kemudian di analisa dengan mensimulasikan temperatur serta kecepatan udara dalam lapangan futsal untuk melihat kinerja sirkulasi udara di dalam lapangan dengan menggunakan software CFD “OpenFOAM”.



Gambar 5. Titik-titik Pengukuran Data

Gambar 5 memberikan informasi terkait dengan titik-titik yang akan menjadi objek penelitian nantinya. Titik pertama diberi kode “KU” merupakan titik pengukuran CO_2 dan CO, sedangkan titik kedua dengan kode “AU” merupakan titik pengukuran aliran udara. Adapun 4 titik lainnya dengan kode A, B, C, D, dan E adalah titik pengukuran temperatur dalam ruangan.



Gambar 6. Titik Ketinggian Pengambilan Data

Gambar 6 menyajikan ketinggian titik-titik pengukuran, di mana ketinggian titik pengukuran suhu serta kandungan CO₂ dan CO adalah 1,50 m. Adapun tinggi bangunan adalah 5,46 m serta tinggi titik ventilasi udara adalah 2,48 cm.

3. Dimensi Bangunan dan Dimensi Bukaannya Ventilasi

Pengukuran langsung ini dilakukan paling awal untuk mendapatkan data mengenai ukuran ruangan, ukuran bukaan ventilasi. Data ini dipergunakan dalam proses penggambaran model untuk simulasi. Pengukuran dilakukan menggunakan meter digital dengan kemampuan sampai 45 m.



Gambar 7. Meter Digital

Meter Digital merupakan salah satu alat untuk mengukur besarnya energi listrik pada peralatan rumah tangga. KWH meter dalam penelitian ini berfungsi sebagai digitalisasi data dari sinyal arus dan tegangan. Penggunaan alat ini dipilih karena simpel dan fleksibel dibawa kemana-mana selain akurasinya yang tergolong sangat baik.

4. Kecepatan Aliran Udara

Pengukuran ini dilakukan melalui Anemometer Hot Wire yang memiliki kemampuan mengukur aliran udara 0.1 m/s – 25 m/s. untuk mendapatkan kecepatan angin pada bukaan di ruangan. Kecepatan pergerakan udara yang diukur adalah kecepatan udara yang berhembus masuk ke dalam dan ke luar ruangan.



Gambar 8. Anemometer Hot Wire

Data ini diperoleh dengan meletakkan alat khusus mengukur kecepatan pergerakan udara pada titik-titik bukaan ventilasi. Satu titik untuk tiap bukaan ventilasi. Data akan diambil tiap jam dan dicatat. Data ini dipergunakan dalam proses simulasi. Data ini memperlihatkan sirkulasi udara yang terjadi.

5. Temperatur dan Kelembaban udara

Pengukuran temperatur dan kelembaban udara dilakukan selama sehari penuh. untuk mengetahui perubahan suhu yang terjadi dalam ruangan. Pengukuran dilakukan dengan mempergunakan alat yang diletakkan pada ke empat sudut lapangan. Pengukuran temperatur setiap 60 menit, kemudian data dicatat..



Gambar 9. Termometer dan Higrometer Digital

Alat yang dipergunakan adalah Termometer/Higrometer Digital Hobo sebagaimana telah ditunjukkan pada gambar 9. HOBO Data Logger Temperature/Relative Humidity MX1101 adalah sebuah termometer canggih yang berfungsi untuk memonitoring suhu dan kelembaban pada suatu ruang yang sudah dilengkapi dengan sistem IoT. Sensor kelembaban adalah perangkat yang mengukur jumlah uap air di udara, dan digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk pemantauan cuaca, sistem HVAC, penyimpanan makanan, dan perangkat medis, juga untuk konsumen, industri, biomedis, dan lingkungan.

6. Kualitas Udara, Kandungan CO dan CO₂

Pengukuran dilakukan untuk mengetahui kadar CO dan CO₂ karena kandungan CO₂ tersebut yang banyak diproduksi oleh manusia sebagai pengguna lapangan. Sedangkan kandungan gas CO dihasilkan dari material lapangan yang ada dan dari pakaian yang dipergunakan. Pengukuran kualitas udara ini dilakukan

untuk mendapatkan data kandungan CO dan CO₂ dalam ruangan. Alat yang dipergunakan adalah alat *air detector* sensor yang terdiri dari sensor kelembapan udara, sensor CO dan sensor CO₂ sebagaimana dapat diperhatikan pada gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. Air Detector

Air detector atau alat pemantau kualitas udara adalah perangkat yang dapat mengukur dan memantau kualitas udara di sekitar kita. Dengan menggunakan *air detector*, Anda dapat mengetahui tingkat polusi udara dan memantau lingkungan dengan lebih akurat. Pengukuran ini dilakukan setiap sebelum dan setelah penggunaan lapangan dengan mempergunakan alat yang diletakkan pada titik yang letaknya tepat di tengah lapangan. Pengukuran juga terus dilakukan pada luar lapangan disaat orang sedang bermain futsal. Begitu pula pada saat lapangan tidak dipergunakan maka pengukuran berpindah ke dalam lapangan.

2.4 Lokasi Penelitian

Kabupaten Wajo dengan Ibukota Sengkang, terletak di bagian tengah Provinsi Sulawesi Selatan dengan jarak 242 km dari Makassar Ibukota Provinsi Sulawesi Selatan mempunyai luas 2.506,19 km² atau 4,01% dari luas wilayah

Provinsi Sulawesi Selatan, terletak diantara $3^{\circ} 39' \rightarrow 4^{\circ} 16' \text{ LS}$ dan $119^{\circ} 53' \rightarrow 120^{\circ} 27' \text{ BT}$ yang berbatasan :

- a. Sebelah Utara berbatasan dengan Kabupaten Luwu dan Kabupaten Sidrap.
- b. Sebelah Timur berbatasan dengan Teluk Bone.
- c. Sebelah Selatan berbatasan dengan Kabupaten Bone dan Kabupaten Soppeng.
- d. Sebelah Barat berbatasan dengan Kabupaten Sidrap.

Dilihat dari Topografinya, Kabupaten Wajo terletak di tengah-tengah Provinsi Sulawesi Selatan dan berdasarkan fotografi Sulawesi yang dibagi 3 (tiga) Zone Utara, Tengah dan Selatan, maka Kabupaten Wajo terletak pada zone tengah yang merupakan suatu depresi yang memanjang pada arah laut tenggara dan terakhir merupakan selat. Menurut Iklim, Kabupaten Wajo tergolong beriklim tropis yang termasuk type B dengan $29^{\circ}\text{C} - 31^{\circ}\text{C}$ atau suhu rata-rata 29°C siang hari. Daerah ini tahunnya berlangsung agak pendek yaitu rata-rata 3 (tiga) bulan yaitu Bulan April sampai dengan Bulan Juli, dan Bulan Agustus sampai dengan Bulan Oktober, curah hujan rata-rata 8.000 mm dengan 120 hari hujan. (https://wajokab.go.id/page/detail/kondisi_geografi, diakses 4 Januari 2023).



Gambar 11. Peta Lokasi Penelitian

Secara spesifik berdasarkan apa yang ditampilkan pada gambar 11, penelitian akan dilakukan pada lapangan futsal *indoor* SCR, berlokasi di dalam kompleks perumahan Silk City Residence Jalan Sawerigading, Sengkang Kabupaten Wajo. Lokasi ini dipilih karena merupakan salah satu gedung olahraga terbesar di Kabupaten Wajo khususnya Kota Sengkang. Lokasi ini juga merupakan tempat pengembangan bakat dan pelatihan bagi atlit-atlit futsal dan bulutangkis Kabupaten Wajo.

2.5 Populasi dan Sampel

Populasi adalah suatu kelompok yang terdiri dari objek dan subjek yang mempunyai kualitas dan karakteristik tertentu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari dan ditarik kesimpulan (Sugiyono, 2018). Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh data terkait dengan Lapangan SCR Futsal Kabupaten Wajo. Sampel sendiri adalah sebagian dari populasi yang meliputi suhu, radiasi, kelembaban dan velocity (kecepatan angin) dengan beberapa variasi perlakuan

pengguna. Teknik Sampling yang digunakan adalah teknik *purposive sampling* dalam proses pengambilan data. *Purposive sampling* adalah teknik penentuan sampel dengan pertimbangan atau tujuan tertentu, dalam hal ini seperti suhu udara, kelembaban udara, dan kecepatan angin sebagaimana tujuan penelitian yang telah disebutkan pada bagian awal proposal penelitian ini. Alasan menggunakan teknik *purposive sampling* ini karena sesuai untuk digunakan untuk penelitian kuantitatif, atau penelitian-penelitian yang tidak melakukan generalisasi (2019:85)

2.6 Teknik Analisis Data

OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) adalah perangkat lunak opensource untuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang dikembangkan oleh OpenCFD Ltd sejak 2004. Software ini dirilis dengan lisensi GNU General Public License (GPL) dan dapat digunakan di berbagai sistem operasi, termasuk Windows, MacOS, dan Linux-Ubuntu. *OpenFOAM* sendiri memiliki beberapa karakteristik. Pertama, memiliki ketersediaan gratis dan terbuka. *OpenFOAM* adalah perangkat lunak yang dapat diakses secara gratis dan dibuat oleh OpenFOAM Foundation. Lisensi GPL memastikan bahwa pengguna dapat memodifikasi dan mendistribusikan ulang perangkat lunak ini tanpa biaya. Kedua, dikembangkan oleh komunitas kredibel secara berkelanjutan. *OpenFOAM* dikembangkan oleh para ahli dan penggemar CFD dari seluruh dunia secara terbuka. Setiap enam bulan, versi baru dari *OpenFOAM* diluncurkan, yang melibatkan kontribusi dari komunitas dan dites secara independen oleh spesialis aplikasi dari ESI-OpenCFD dan para konsumen yang dipilih. Ketiga, memiliki berbagai fitur dan aplikasi. *OpenFOAM* memiliki berbagai fitur yang dapat digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah CFD, termasuk dinamika fluida,

termofisik, dan turbulensi. *Software* ini dapat digunakan untuk simulasi yang melibatkan reaksi kimia, pembakaran, aeroakustik, dan mekanika padat.

Kerangka kerja CFD *OpenFOAM* seringkali tampak menakutkan karena menuntut pemahaman yang kuat tentang fisika, numerik, dan teknik dari pengguna. *OpenFOAM* bersifat *open-source*, dan karena itu banyak aspek dari proses solusi terbuka bagi pengguna (berbeda dengan opasitas umum dalam produk simulasi komersial). Akses ke kode sumber memberikan kekuatan kepada pengguna untuk menyesuaikan hal-hal sesuai kebutuhan mereka. Namun, kekuatan ini datang dengan biaya untuk mempelajari cara menggunakan baris perintah dalam sistem Operasi Linux, mempelajari tentang file konfigurasi yang menentukan parameter yang digunakan oleh Metode Volume Terbatas terstruktur, dll.

a. Tujuan Analisis CFD dengan *OpenFOAM*

Tujuan dari analisis CFD adalah untuk memperoleh pemahaman yang lebih dalam tentang masalah yang sedang di temui. Karena hasil simulasi sering kali disertai dengan data eksperimental, validitas hasil, dan tujuan keseluruhan dari simulasi perlu di perhatikan. Selain itu, proses fisik yang disimulasikan perlu dimodelkan secara matematis dengan benar. Selanjutnya membutuhkan insinyur CFD untuk membuat pilihan yang valid dari solver yang sesuai dalam kerangka *OpenFOAM*. Terdapat beberapa jenis pertanyaan terkait dengan CFD ini sebagai berikut:

1. Pertanyaan Umum dalam analisis CFD yaitu:
 - a) Apa kesimpulan yang harus diperoleh dari analisis CFD dan metode hasil akan divalidasi?
 - b) Bagaimana tingkat akurasi hasil didefinisikan?
 - c) Berapa banyak waktu yang tersedia untuk proyek ini?

2. Pertanyaan Teoritis Menyangkut Termo-fisika meliputi:
 - a) Apakah aliran laminar, turbulen, atau transisi dan aliran melibatkan beberapa fase fluida atau spesies kimia?
 - b) Apakah properti material adalah fungsi dari variabel dependen? Sebagai contoh, fluida yang makin menipis propertiesnya.
 - c) Apakah informasi yang tersedia sudah cukup untuk mewakili kondisi batas, boundary condition, dan kondisi awal, initial?
3. Geometri dan Mesh yaitu sebagai berikut:
 - a) Apakah representasi diskrip memungkinkan untuk dilakukan dan domain akan berubah bentuk atau bergerak selama simulasi?
 - b) Di mana kompleksitas domain dapat dikurangi tanpa memengaruhi akurasi solusi?
4. Pertanyaan Sumber Daya Komputasi meliputi sebagai berikut:
 - a) Berapa banyak waktu komputasi yang digunakan untuk simulasi?
 - b) Apa Sumber daya komputasi yang tersedia?

Pertanyaan-pertanyaan ini berkontribusi pada analisis CFD yang akurat dari masalah aliran apa pun. Menggunakan *OpenFOAM* atau perangkat lunak simulasi CFD lainnya memerlukan pemahaman yang tepat tentang fisika, metode numerik, serta sumber daya komputasi yang tersedia.

b. Langkah-langkah Analisis CFD *OpenFOAM*

OpenFOAM adalah perangkat lunak *opensource* untuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD) yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai masalah mekanika kontinum, termasuk dinamika fluida komputasi. Berikut adalah penjelasan rinci tentang *OpenFOAM* dan tahapan dalam analisis CFD:

1. *Problem Definition*

Tahap pertama dalam analisis CFD adalah memahami dan mendefinisikan masalah yang akan disimulasikan. Ini termasuk menentukan jenis aliran, kondisi batas, dan detail data yang akan diproses.

2. *Mathematical Modeling*

Pada tahap ini, persamaan matematika yang mewakili fenomena yang sedang disimulasikan ditentukan. Persamaan diferensial parsial (PDE) ditransformasi menjadi persamaan aljabar yang dapat dipecahkan menggunakan metode diskritisasi ruang dan waktu.

3. *Pre-processing and Mesh Generation*

Tahap ini melibatkan pembuatan geometri, penentuan domain, dan pembuatan mesh atau grid yang akan digunakan dalam simulasi. Proses ini sangat penting untuk mendefinisikan model dari geometri, domain, dan tingkat detail data yang akan disimulasikan.

4. *Solving*

Pada tahap ini, persamaan matematika yang telah ditentukan sebelumnya diselesaikan menggunakan solver. Pengguna harus mendefinisikan kondisi batas dan jenis aliran yang akan digunakan dalam simulasi. Solver sering dioperasikan sebagai "kotak hitam" dalam kode CFD komersial, tetapi intervensi pengguna diperlukan untuk menentukan metode solusi dan memilih diskritisasi.

5. *Post-processing*

Setelah simulasi selesai, data hasil simulasi dianalisis dan diinterpretasi. Ini termasuk visualisasi data, seperti vektor kecepatan dan aliran, serta pengukuran parameter seperti fluks dan volume aliran.

6. *Verification and Validation*

Tahap terakhir adalah verifikasi dan validasi hasil simulasi. Proses ini melibatkan berbagai pengujian untuk memastikan bahwa simulasi telah dijalankan dengan benar dan hasilnya sesuai dengan ekspektasi. Pengujian ini melibatkan pengujian regresi, penggunaan memori, performa kode, dan skalabilitas simulasi.

OpenFOAM didistribusikan secara eksklusif di bawah Lisensi Publik Umum (GPL), yang memberikan kebebasan kepada pengguna untuk memodifikasi dan mendistribusikan ulang perangkat lunak ini. Software ini dikembangkan oleh para ahli dan penggemar CFD dari seluruh dunia secara terbuka dan diterbitkan setiap enam bulan dengan kontribusi dari komunitas dan dites secara independen oleh spesialis aplikasi dari ESI-OpenCFD dan para