

**\PENENTUAN VISUALISASI WARNA *HEATMAP* PADA *GAME*
EDUKASI SIMULASI *URBAN HEAT ISLAND* KOTA MALANG
BERBASIS *VR* MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC***

SKRIPSI

Oleh :

MAULANA HILMI ARKAN

NIM. 210605110101



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

**PENENTUAN VISUALISASI WARNA *HEATMAP* PADA *GAME*
EDUKASI SIMULASI *URBAN HEAT ISLAND* KOTA MALANG
BERBASIS *VR* MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC***

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)**

**Oleh :
MAULANA HILMI ARKAN
NIM. 210605110101**

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2025**

HALAMAN PERSETUJUAN

PENENTUAN VISUALISASI WARNA *HEATMAP* PADA *GAME* EDUKASI SIMULASI *URBAN HEAT ISLAND* KOTA MALANG BERBASIS *VR* MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC*

SKRIPSI

Oleh :
MAULANA HILMI ARKAN
NIM. 210605110101

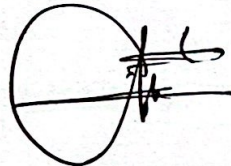
Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Tanggal: 16 Juni 2025

Pembimbing I,



Dr. Yunifa Miftahul Arif, M.T
NIP. 19830616 201101 1 004

Pembimbing II,



Ajib Hanani, M.T
NIP. 19840731 202321 1 013

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang




Dr. Ir. Fachrul Kurniawan, M.MT., IPU
NIP. 19771020 200912 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

PENENTUAN VISUALISASI WARNA *HEATMAP* PADA *GAME* EDUKASI SIMULASI *URBAN HEAT ISLAND* KOTA MALANG BERBASIS *VR* MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC*

SKRIPSI

Oleh :
MAULANA HILMI ARKAN
NIM. 210605110101

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal: 16 Juni 2025

Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji : Ahmad Fahmi Karami, M.Kom
NIP. 19870909 202012 1 001

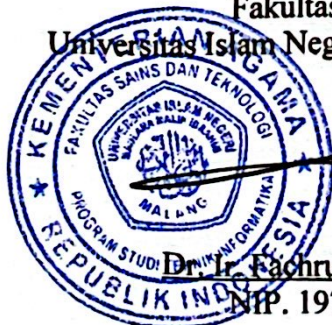
Anggota Penguji I : Nur Fitriyah Ayu Tunjung Sari, M.Cs
NIP. 19911226 202012 2 001

Anggota Penguji II : Dr. Yunifa Miftahul Arif, M.T
NIP. 19830616 201101 1 004

Anggota Penguji III : Ajib Hanani, M.T
NIP. 19840731 202321 1 013

()
()
()
()

Mengetahui dan Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang




Dr. Ir. Fachrul Kurniawan, M.MT., IPU
NIP. 19771020 200912 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : MAULANA HILMI ARKAN
NIM : 210605110101
Fakultas / Prodi : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika
Judul Skripsi : Penentuan Visualisasi Warna *Heatmap* pada *Game*
Edukasi Simulasi *Urban Heat Island* Kota Malang
Berbasis VR Menggunakan *Fuzzy Logic*

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini merupakan hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 16 Juni 2025
Yang membuat pernyataan,



Maulana Hilmi Arkan
NIM. 210605110101

MOTTO

Kawulo amung sadarmo, mobah mosik kersaning Hyang Sukmo

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, yang telah memberikan nikmat-Nya kepada umat manusia berupa ilmu dan amal. Semoga shalawat dan salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, nabi terakhir dan utusan bagi seluruh umat manusia. Penulis mengungkapkan rasa syukur yang mendalam kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan baik, sebagai bagian dari syarat untuk menyelesaikan pendidikan sarjana pada Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Terimakasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang menyukseskan berjalannya dan terjadinya skripsi ini, antara lain:

1. Prof. Dr. H. M. Zainuddin, MA, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Prof. Dr. Hj. Sri Harini, M.Si, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Fachrul Kurniawan, S.T., M.MT., IPU, selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Dr. Yunifa Miftahul Arif, M.T dan Ajib Hanani, M.T, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.

5. Ahmad Fahmi Karami, M. dan Nurfitriyah Ayu Tunjang Sari, M.Cs, selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran konstruktif dalam menyempurnakan skripsi ini.
6. Kedua orang tua penulis, yang selalu memberikan doa, dukungan moril dan materiil serta motivasi kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
7. Teman-teman yang senantiasa menemani dan memberikan semangat dalam keseharian penulis.
8. Kepada orang tua penulis, yang telah memberikan dukungan moril dan materiil kepada penulis serta menjadi motivasi atas suksesnya penulisan skripsi ini

Tak ada gading yang tak retak, tidak ada hal di dunia ini yang tidak luput dari kesempurnaan. Maka dari itu skripsi ini butuh masukan dan saran dari pihak yang lebih mumpuni di bidangnya.

Malang, 30 Juni 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
ABSTRAK.....	xiii
ABSTRACT	xiv
مستخلص البحث	xv
BAB I LATAR BELAKANG	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Pernyataan Masalah	6
1.3 Batasan Masalah.....	6
1.4 Tujuan Penelitian	7
1.5 Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Penelitian Terkait	8
2.1.1 Pengukuran Intensitas <i>Urban Heat Island</i>	8
2.1.2 Penerapan <i>Fuzzy Logic</i> pada sistem cuaca atau estimasi suhu	9
2.1.3 <i>Game</i> Edukasi Berbasis VR dan <i>Urban Heat Island</i>	11
2.1.4 Visualisasi <i>Heatmap</i> dan <i>Urban Heat Island</i>	13
2.2 <i>Urban Heat Island</i> (UHI).....	14
2.3 <i>Apparent Temperature</i>	16
2.4 <i>Temperature 2m</i> (Suhu pada ketinggian 2m).....	16
2.5 <i>Dew Point 2m</i>	17
2.6 <i>Relative Humidity 2m</i>	18
2.7 <i>Vapour Pressure Deficit</i>	18
2.8 <i>Evapotranspiration</i>	19
2.9 <i>Heatmap</i>	19
2.10 <i>Fuzzy Logic</i>	21
2.10.1 Himpunan <i>Fuzzy</i>	22
2.10.2 Fuzzifikasi.....	22
2.10.3 Inferensi	24
2.10.4 Defuzzifikasi.....	24
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI	25
3.1 Desain Sistem.....	25
3.2 Analisis dan Perancangan <i>Game</i>	26
3.3.1 Deskripsi <i>Game</i>	26
3.3.2 Rancangan Antarmuka.....	26

3.3.2.1 <i>Main Menu</i>	26
3.3.2.2 <i>Settings</i>	27
3.3.2.3 <i>Prolog</i>	27
3.3.2.4 <i>Storyboard</i>	28
3.3 <i>Finite State Machine</i>	30
3.4 <i>Data Collection</i>	32
3.4.1 <i>Study Area</i>	32
3.4.2 <i>Data Preprocessing</i>	33
3.4.3 <i>Data Cleaning</i>	33
3.6 <i>Implementasi Fuzzy Logic</i>	34
3.6.1 <i>Basis Pengetahuan</i>	34
3.6.1.1 <i>Derajat Temperature 2m</i>	35
3.6.1.2 <i>Dew Point 2m</i>	35
3.6.1.3 <i>Relative Humidity 2m</i>	36
3.6.1.4 <i>Wind Speed 10m</i>	37
3.6.1.5 <i>Vapour Pressure Deficit</i>	38
3.6.1.6 <i>Evapotranspiration</i>	38
3.6.1.7 <i>Apparent Temperature</i>	39
3.6.1.7 <i>Aturan Fuzzy</i>	40
3.6.2 <i>Fuzzifikasi</i>	43
3.6.3 <i>Inferensi</i>	44
3.6.4 <i>Defuzzification</i>	47
3.6.5 <i>Crisp Output</i>	48
3.7 <i>Kalkulasi Intensitas UHI</i>	49
3.8 <i>System Implementation</i>	49
3.9 <i>Evaluasi</i>	53
3.9.1 <i>Evaluasi Teknis Sistem Fuzzy</i>	53
3.9.2 <i>Evaluasi Persepsi Pengguna</i>	54
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	57
4.1 <i>Pengujian Sistem Fuzzy</i>	57
4.2 <i>Pengujian System Usability Scale</i>	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	65
5.1 <i>Kesimpulan</i>	65
5.1 <i>Saran</i>	66
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta Land Use Kota Malang pada 2016 dan 2020	2
Gambar 2.1 Profil Efek Urban Heat Island setelah tenggelamnya matahari	15
Gambar 2.2 Visualisasi Efek Urban Heat Island	20
Gambar 2.3 Proses <i>Fuzzy Logic</i>	21
Gambar 2.4 Visualisasi Fungsi Triangular	23
Gambar 2.5 Visualisasi Fungsi Trapezoidal	24
Gambar 3.1 Alur Desain Sistem	25
Gambar 3.2 Main Menu Concept	26
Gambar 3.3 Settings Menu Concept	27
Gambar 3.4 Opening Narrator Dialogue	27
Gambar 3.5 Narator Menjelaskan Urban Heat Island	28
Gambar 3.6 Narator Mengajak Pemain untuk mendalami UHI	28
Gambar 3.7 Diagram Finite State Machine	31
Gambar 3.8 Koordinat pengambilan data kota dengan visualisasi kadar NDVI dibelakangnya. Titik Merah adalah perkotaan dan titik kuning adalah daerah rural sekitar perkotaan	32
Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Temperature 2m	35
Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan Dew Point 2m	36
Gambar 3.11 Fungsi Keanggotaan Relative Humidity 2m	37
Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan Wind Speed	37
Gambar 3.13 Fungsi Keanggotaan Vapour Pressure Deficit	38
Gambar 3.14 Fungsi Keanggotaan Evapotranspiration	39
Gambar 3.15 Fungsi Keanggotaan Apparent Temperature	40
Gambar 3.16 Korelasi Ketujuh variable cuaca kota malang selama tahun 2023 ..	40
Gambar 3.17 Grafik inferensi data uji pada aturan ke-8 (kiri), dan ke-11 (kanan)	46
Gambar 3.18 Hasil Inferensi	46
Gambar 3.19 Colormap Inferno	48
Gambar 3.20 Alur Sistem	49
Gambar 3.21 Objek Mitigasi	50
Gambar 3.22 Objek Mitigasi	51
Gambar 3.23 Pilihan mitigasi Building (kiri) dengan hasilnya (kanan)	51
Gambar 3.25 Pilihan mitigasi Pohon (kiri) dengan hasilnya (kanan)	52
Gambar 3.26 Pilihan mitigasi Cat Reflektif (kiri) dengan hasilnya (kanan)	52
Gambar 3.27 Tampilan <i>Game Over</i>	52
Gambar 4.1 Hasil Perhitungan <i>Fuzzy</i> Ditampilkan pada Hotspot di <i>Game</i>	57
Gambar 4.2 Hasil Heatmap dari titik titik data <i>fuzzy</i>	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Pengukuran Intensitas UHI.....	9
Tabel 2.2 Penelitian Terkait Penerapan <i>Fuzzy</i> Logic pada sistem cuaca atau estimasi suhu	11
Tabel 2.3 Penelitian Terkait <i>Game</i> Edukasi Berbasis VR dan UHI	12
Tabel 2.4 Penelitian Terkait Visualisasi Heatmap dan UHI	14
Tabel 3.1 Storyboard <i>Game</i>	29
Tabel 3.2 Contoh Data	33
Tabel 3.3 Derajat Keanggotaan Temperature 2m	35
Tabel 3.4 Derajat Keanggotaan Dew Point 2m.....	36
Tabel 3.5 Derajat Keanggotaan Relative Humidity 2m	36
Tabel 3.6 Derajat Keanggotaan Wind Speed	37
Tabel 3.7 Derajat Keanggotaan Vapour Pressure Deficit	38
Tabel 3.8 Derajat Keanggotaan Evapotranspiration	39
Tabel 3.9 Derajat Keanggotaan Temperature 2m	39
Tabel 3.10 Aturan <i>Fuzzy</i>	42
Tabel 3.11 Data Uji Coba.....	43
Tabel 3.12 Derajat Keanggotaan Temperature 2m	44
Tabel 3.13 Derajat Keanggotaan Temperature 2m	45
Tabel 3.14 Derajat Keanggotaan Temperature 2m	47
Tabel 3.15 Skema warna <i>heatmap inferno</i>	48
Tabel 3.15 The Positive SUS, Sauro (2011)	55
Tabel 3.16 <i>The Sauro-Lewis CGS (Curved Grading Scale)</i> , Sauro et al. (2014) .	56
Tabel 4.1 Dataset Latih dan Uji	59
Tabel 4.2 Hasil evaluasi RMSE dan Normalized RMSE.....	60
Gambar 4.4 Tester guru SMA (kiri) dan Mahasiswa (kanan).....	60
Tabel 4.3 Hasil skor asli SUS	61
Tabel 4.4 Hasil akhir dan rata rata skor SUS	61

ABSTRAK

Arkan, Maulana Hilmi. 2025. **Penentuan Visualisasi Warna *Heatmap* Pada *Game Edukasi Urban Heat Island* Kota Malang Berbasis *VR* Menggunakan *Fuzzy Logic***. Skripsi. Program Studi Teknik Informatika. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing : (I) Dr. Yunifa Miftahul Arif, M.T (II) Ajib Hanani, M.T.

Kata Kunci: *Fuzzy Logic*, *Game Edukasi*, *Heatmap*, Kota Malang *Urban Heat Island*, *Virtual Reality*,

Fenomena *Urban Heat Island* (UHI) merupakan dampak negatif dari urbanisasi yang ditandai oleh peningkatan suhu di area perkotaan dibandingkan dengan wilayah sekitarnya. Kota Malang sebagai salah satu kota besar di Jawa Timur mengalami percepatan pembangunan yang signifikan dan berpotensi memperparah efek UHI. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem visualisasi intensitas UHI berbasis *Virtual Reality* (VR) melalui pendekatan *Fuzzy Logic* untuk mengolah variabel meteorologi menjadi *apparent temperature* (suhu yang dirasakan). Data diperoleh secara *real-time* dari *Open-Meteo API* mencakup enam variabel: suhu udara, titik embun, kelembapan relatif, kecepatan angin, evapotranspirasi, dan defisit tekanan uap. Selanjutnya, *apparent temperature* dihitung menggunakan sistem inferensi *Fuzzy Mamdani* dan divisualisasikan ke dalam bentuk *heatmap* dengan skema warna *perceptually-uniform*. Sistem ini diimplementasikan dalam *game* edukasi “Malang Heat” dan mengakomodasi mekanisme interaktif untuk meningkatkan kesadaran pengguna terhadap fenomena UHI. Evaluasi model menunjukkan akurasi prediksi yang baik dengan nilai MAE sebesar 0,7959°C dan RMSE sebesar 0,9181°C dari 1331 titik pengukuran. Selain itu, pengujian *usability* melalui *System Usability Scale* (SUS) terhadap 21 responden menghasilkan skor rata-rata 81,42 yang berada dalam kategori “A”. Temuan ini menunjukkan bahwa metode *fuzzy* mampu menangani ketidakpastian data cuaca dengan efektif dan visualisasi *heatmap* dalam lingkungan VR dapat meningkatkan pemahaman pengguna terhadap isu lingkungan urban. Penelitian ini memberikan kontribusi teoritis dalam penerapan *Decision Support System* berbasis *fuzzy* untuk lingkungan dinamis, serta manfaat praktis sebagai media pembelajaran interaktif bagi masyarakat umum.

ABSTRACT

Arkan, Maulana Hilmi. 2025. **Determination of Heatmap Color Visualization in VR-Based *Urban Heat Island* Educational Game in Malang City Using *Fuzzy Logic***. Thesis. Informatics Engineering Study Program. Faculty of Science and Technology. Maulana Malik Ibrahim State Islamic University of Malang. Advisors: (I) Dr. Yunifa Miftahul Arif, M.T (II) Ajib Hanani, M.T.

Keywords: *Fuzzy Logic*, Educational *Game*, Heatmap, Malang City Urban Heat Island, Virtual Reality,

The Urban Heat Island (UHI) phenomenon is a negative impact of urbanization which is characterized by an increase in temperature in urban areas compared to the surrounding areas. Malang City as one of the big cities in East Java is experiencing significant acceleration of development and has the potential to worsen the UHI effect. This study aims to develop a Virtual Reality (VR)-based UHI intensity visualization system through the *Fuzzy Logic* approach to process meteorological variables into apparent temperature (perceived temperature). Data obtained in real-time from the Open-Meteo API includes six variables: air temperature, dew point, relative humidity, wind speed, evapotranspiration, and vapor pressure deficit. Furthermore, apparent temperature is calculated using the Mamdani *Fuzzy* inference system and visualized into a heatmap with a perceptually-uniform color scheme. This system is implemented in the educational *game* “Malang Heat” and accommodates an interactive mechanism to increase user awareness of the UHI phenomenon. Model evaluation shows good prediction accuracy with an MAE value of 0.7959°C and an RMSE of 0.9181°C from 1331 measurement points. In addition, usability testing through the System Usability Scale (SUS) on 21 respondents resulted in an average score of 81.42 which is in the “A” category. These findings indicate that the *fuzzy* method is able to handle weather data uncertainty effectively and heatmap visualization in a VR environment can improve user understanding of urban environmental issues. This study provides theoretical contributions in the application of *fuzzy*-based Decision Support Systems for dynamic environments, as well as practical benefits as an interactive learning medium for the general public.

مستخلص البحث

أركان، مولانا حلمي ٢٠٢٥. تحديد تصور ألوان خريطة الحرارة في لعبة تعليمية قائمة على الواقع الافتراضي حول جزيرة الحرارة الحضرية في مدينة مالانج باستخدام *Fuzzy Logic*. قسم هندسة المعلوماتية. كلية العلوم والتكنولوجيا. جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية في مالانج : (أولا) يونيفة مفتاح العارف ، الماجستير (ثانيا) عجيب حناني، الماجستير .

الكلمات المفتاحية: المنطق الضبابي، لعبة تعليمية، خريطة الحرارة، جزيرة الحرارة الحضرية في مدينة مالانج، الواقع الافتراضي

هي أثر سلبي للتحضر، وتتميز بارتفاع درجة الحرارة في المناطق الحضرية مقارنةً (UHI) ظاهرة جزيرة الحرارة الحضرية بالمناطق المحيطة بها .وقد شهدت مدينة مالانج، إحدى المدن الكبرى في جاوة الشرقية، تسارعاً ملحوظاً في التنمية، ومن المحتمل أن تُفاقم تأثير جزيرة الحرارة الحضرية. تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نظام تصور لشدة جزيرة الحرارة الحضرية قائم على الواقع الافتراضي من خلال نمج المنطق الضبابي لمعالجة المتغيرات الجوية وتحويلها إلى درجة حرارة ظاهرة (درجة حرارة مُدركة). (تتضمن البيانات (VR) ستة متغيرات :درجة حرارة الهواء، ونقطة الندى، والرطوبة النسبية، وسرعة Open-Meteo المحصلة آنياً من واجهة برمجة تطبيقات الرياح، والتبخّر والنتح، وعجز ضغط البخار .علاوة على ذلك، تُحسب درجة الحرارة الظاهرة باستخدام نظام الاستدلال الضبابي مامداني، وتُعرض في خريطة حرارية ذات نظام ألوان موحد إدراكياً .يُطبق هذا النظام في اللعبة التعليمية "حرارة مالانج"، ويشتمل على MAE آليات تفاعلية لزيادة وعي المستخدمين بظاهرة جزيرة الحرارة الحضرية .أظهر تقييم النموذج دقة تنبؤ جيدة، حيث بلغت قيمة درجة مئوية من 1331 نقطة قياس .إضافةً إلى ذلك، أسفر اختبار قابلية الاستخدام RMSE 0.9181 درجة مئوية و 0.7959 "على 21 مشاركاً عن متوسط درجة 81.42، وهو ما يُعدّ ضمن فئة "ممتاز (SUS) من خلال مقياس قابلية استخدام النظام تُظهر هذه النتيجة أن الطريقة الضبابية قادرة على معالجة عدم اليقين في بيانات الطقس بفعالية، وأن تصور الخرائط الحرارية في بيئة الواقع الافتراضي يُحسن فهم المستخدمين للقضايا البيئية الحضرية .تُقدّم هذه الدراسة مساهمات نظرية في تطبيق أنظمة دعم القرار القائمة على البيانات الضبابية في البيئات الديناميكية، بالإضافة إلى فوائد عملية كوسيلة تعليمية تفاعلية لعامة الناس

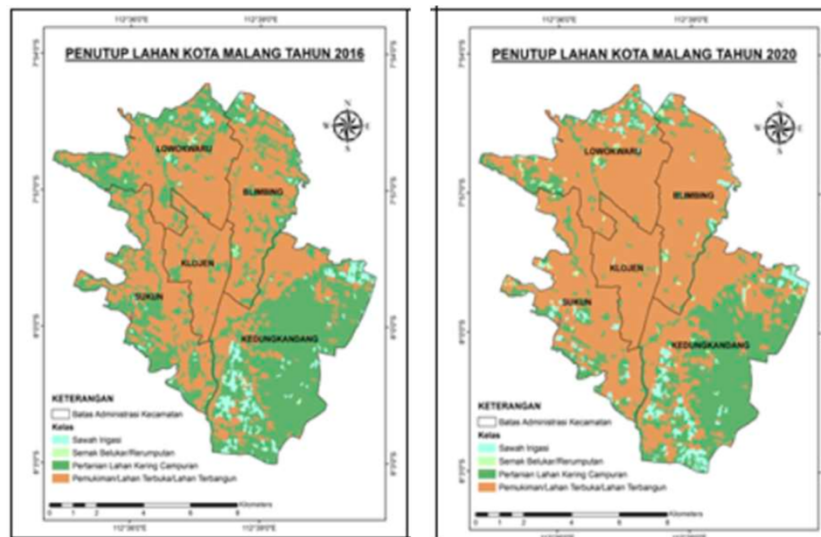
BAB I

LATAR BELAKANG

1.1 Latar Belakang

Perkembangan urbanisasi yang pesat telah memicu munculnya berbagai macam manfaat. Tetapi di samping aspek positif, terdapat pula beberapa kekurangan dari mengubah lingkungan yang alami menjadi lingkungan yang terbangun. Diantaranya adalah munculnya *Urban Heat Islands* (UHI). Fenomena ini dapat didefinisikan sebagai perbandingan dari meningkatnya temperatur daratan dan udara di area yang mengalami pembangunan infrastruktur dengan area rural disekitarnya (Ningrum, 2018). Salah satu penyebab UHI adalah peningkatan penggunaan material buatan seperti aspal dan beton yang memiliki kapasitas panas tinggi dan albedo rendah, sehingga menyerap dan memancarkan lebih banyak panas (Mohajerani et al., 2017). Selain itu, berkurangnya ruang terbuka hijau akibat urbanisasi mengurangi evapotranspirasi dan peningkatan suhu permukaan, yang semakin memperparah efek UHI (Gunawardena et al., 2017).

Di Indonesia, beberapa kota besar memiliki peluang untuk terpapar efek UHI, salah satu nya adalah Kota Malang. Kota Malang merupakan salah satu kota terbesar di Jawa Timur, dengan jumlah penduduk Kota Malang yang terus mengalami peningkatan dengan laju pertumbuhan sekitar 0,86% lebih tinggi dari pertumbuhan penduduk Jawa Timur (0,75%) per tahun 2010 (Mahendra & Pradoto, 2016), Pertumbuhan ini telah menyebabkan perubahan signifikan dalam penggunaan lahan dan pembangunan perkotaan.



Gambar 1.1 Peta Land Use Kota Malang pada 2016 dan 2020

Berdasarkan Gambar 1.1, disajikan bahwa di Kota Malang, luas daerah pemukiman/lahan terbuka/lahan terbangun mengalami peningkatan dari tahun 2016 hingga tahun 2020. Ini berpotensi memicu fenomena UHI karena adanya peningkatan pembangunan fasilitas dan infrastruktur yang menyebabkan alih fungsi lahan hijau menjadi area terbangun (Kusumaningrum et al., 2022). Menurut penelitian dari Subadyo, ketersediaan Ruang Terbuka Hijau (RTH) di Kota Malang totalnya hanya mencapai 39% dari luas kota, terdiri dari 34% RTH privat dan 5% RTH publik, ini masih belum memenuhi standar ideal (Subadyo et al., 2019).

RTH Kota Malang yang belum memenuhi standar ideal ini merupakan salah satu buah dari lalainya pembuat kebijakan tata kelola Kota Malang tentang dampak efek UHI yang akan dihasilkan nantinya. Salah satu cara untuk menanggulangi hal ini adalah dengan adanya edukasi atau dialog terbuka dengan pembuat kebijakan. Karena dengan edukasi, pembuat kebijakan dapat mengerti apa yang terabaikan dalam tata kelola Kota Malang saat ini, apa yang perlu difokuskan, dan mengetahui

solusi mitigasinya.

Maka dari itu edukasi tentang UHI sangat penting bagi pembuat kebijakan tata kelola Kota Malang maupun masyarakatnya sendiri. Pada pejabat pemerintah bagian tata kelola, pemahaman UHI yang mendalam dapat mendorong pengambilan keputusan yang lebih bijak dalam perencanaan kota dan implementasi kebijakan lingkungan yang berkelanjutan (Vlachopoulos & Makri, 2017). Cara mengkomunikasikan edukasi memiliki peran penting yang mempengaruhi keberhasilan pembelajaran, paham tidaknya lawan bicara tergantung dengan bagaimana penyampaian dan seperti apa mediumnya, dengan menyesuaikan dengan tema edukasi yang akan diutarakan (Aqsar, 2018).

Salah satu medium terbaik edukasi tentang efek UHI adalah video *game* berbasis VR, karena ada keterlibatan pengguna melalui eksplorasi mandiri, interaksi, dan simulasi efek UHI yang menarik (Lamb et al., 2018). Dalam konteks pembelajaran tentang UHI, VR dapat memvisualisasikan dan mensimulasikan dampak peningkatan suhu perkotaan secara mendalam, memungkinkan pengguna menjelajahi area terdampak dan memahami konsekuensi terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat (Sukaridhoto et al., 2020). Sehingga, cara memvisualisasikan efek UHI juga memainkan peran krusial untuk pemahaman pemain dalam menganalisa fenomena UHI.

Melalui visualisasi yang efektif, data kompleks mengenai variabilitas suhu dapat disajikan secara intuitif, memungkinkan identifikasi area dengan intensitas UHI yang tinggi dan membantu dalam pengambilan keputusan (Fajrin & Dwi Marsiska Driptufany, 2019). Salah satu teknik visualisasi yang efektif untuk data

distribusi suhu adalah *Heatmap*, karena kemampuannya menampilkan variasi suhu secara spasial menggunakan skala warna yang intuitif, sehingga memudahkan pemahaman perbedaan suhu antar wilayah bagi pengguna (Panecki & Pokojski, 2019; Triyatno & others, 2021). Untuk memvisualisasikan efek UHI, diperlukan proses mengukur data intensitas suhu di tiap titik yang akan divisualkan. Salah satu variabel data suhu yang cocok untuk mengukur efek UHI adalah *Apparent Temperature* atau suhu yang dirasakan.

Mengukur intensitas *Urban Heat Island* menggunakan *apparent temperature* (AT) atau suhu yang dirasakan dapat memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai dampak panas pada manusia dibandingkan dengan pengukuran suhu udara biasa. Karena AT diukur dengan memperhitungkan faktor-faktor seperti kelembapan relatif, kecepatan angin, dan lain sebagainya. Berbagai variabel cuaca tersebut juga sudah banyak tersedia data historis dan *realtime* nya secara mudah untuk diambil. Karena indeks ini mencerminkan bagaimana suhu dirasakan oleh tubuh manusia, maka AT menjadi salah satu parameter yang cocok untuk mengukur efek UHI dan juga untuk edukasi (Ho et al., 2016; Ngarambe et al., 2022). Dari berbagai variabel data cuaca yang telah disebutkan, seringkali mereka mempunyai karakteristik yang sifatnya tidak pasti, dinamis, dan sering kali sulit dikategorikan secara tegas (Azhari et al., 2016).

Maka dari itu diperlukan bantuan *teknologi Decision Support System* (DSS) atau sistem pendukung keputusan dalam menentukan *apparent temperature* dari data cuaca yang dinamis tersebut. DSS mampu menangani ketidakpastian dengan lebih fleksibel dan mudah untuk diimplementasikan, terutama di lingkungan

pengembangan video *game* yang membutuhkan optimasi agar pengalaman pemain yang baik. DSS ini diharapkan dapat menentukan nilai *apparent temperature* dari data meteorologi yang dapat divisualisasikan kepada pengguna.

Dalam perspektif Islam, pelestarian lingkungan seperti mitigasi UHI dapat diinterpretasikan melalui firman Allah dalam QS. *Al-Baqarah* ayat 205 tentang pentingnya menjaga keseimbangan dan kelestarian alam sebagai berikut:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ

“Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan tangan manusia. (Melalui hal itu) Allah membuat mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka agar mereka kembali (ke jalan yang benar).” (QS. *Al-Baqarah* (1:205))

Tafsir Ibnu Katsir menjelaskan bahwa kerusakan ini terjadi akibat perbuatan manusia yang mengabaikan keseimbangan alam dan melakukan maksiat. Dengan memahami dan memvisualisasikan fenomena UHI melalui pendekatan ilmiah seperti penggunaan *fuzzy logic* dalam *heatmap*, dapat meningkatkan kesadaran akan dampak pembangunan terhadap lingkungan, sesuai dengan prinsip menjaga alam dalam ajaran Islam.

Berdasarkan penelitian terdahulu terkait, beberapa peneliti telah menggunakan metode seperti *Naive Bayes*, *K-means Clustering*, *Simple Additive Weighting*, dan *Fuzzy Inference System*. Di antara beberapa metode tersebut, penentuan *apparent temperature* sebagai parameter UHI yang dikomputasi dan divisualisasikan dalam lingkungan pengembangan *game* menggunakan *Fuzzy Logic* dalam bentuk *Heatmap* masih kurang dieksplorasi.

Dengan demikian, penelitian ini mengusulkan *Fuzzy Logic* sebagai metode untuk menghasilkan *Apparent Temperature* guna menghitung Intensitas UHI Kota Malang yang di visualisasikan menjadi *Heatmap* pada *game* edukasi Malang Heat berbasis *Virtual Reality*. Melalui implementasi metode *Fuzzy Logic*, penelitian ini bermaksud untuk melakukan tugas penentuan *Apparent Temperature* serta melihat seberapa akurat hasil dari tugas tersebut dalam merepresentasikan intensitas UHI Kota Malang dalam konteks *game* edukasi *Malang Heat*.

1.2 Pernyataan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka pernyataan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana hasil evaluasi performa *fuzzy logic* dalam menghasilkan *value apparent temperature* dari berbagai data cuaca di Kota Malang? Seberapa efektif *game* dan metode visualisasi *heatmap* dalam memberikan pemahaman efek UHI kepada pemain?

1.3 Batasan Masalah

- a. Hanya mencakup simulasi UHI dengan *Region of Interest* (ROI) Kota Malang pada 1013 titik kawasan urban.
- b. Sumber data yang digunakan dari *Open-Meteo*, provider data cuaca dan meteorologi.
- c. Ditujukan untuk pemerintah daerah Kota Malang, peneliti lingkungan, dan masyarakat umum dalam memahami fenomena UHI.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dijelaskan, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi *game* dalam menghasilkan visualisasi warna *heatmap* yang akurat dan informatif, edukasi kepada pemain, dan akurasi prediksi *apparent temperature* dari sistem *fuzzy*.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan pengetahuan tentang bagaimana penerapan metode *Fuzzy Logic* dalam menentukan *Apparent Temperature* berdasarkan variabel cuaca di kota Malang guna divisualisasikan dalam *game* edukasi berbasis VR
2. Secara praktis, penelitian ini menawarkan alat bantu pembelajaran interaktif yang efektif untuk meningkatkan kesadaran masyarakat, terutama pelajar dan penata kelola kota Malang tentang UHI dan dampaknya

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

2.1.1 Pengukuran Intensitas *Urban Heat Island*

Penelitian oleh Venter, Chakraborty, dan Lee (2021) menunjukkan bahwa data satelit secara signifikan melebihi-lebihkan intensitas UHI dibandingkan pengukuran suhu langsung. Dengan menggunakan lebih dari 50.000 stasiun cuaca crowdsourced di Eropa, mereka menemukan bahwa *Surface UHI* (SUHI) rata-rata mencapai 1,45°C, enam kali lebih tinggi dari *Canopy UHI* (CUHI) yang hanya 0,26°C. Hasil ini menyoroti pentingnya data lapangan untuk penilaian UHI yang akurat dan mendukung penghijauan kota sebagai strategi mitigasi UHI yang efektif (Venter et al., 2021).

Penelitian oleh Li et al. (2018) menggunakan model WRF/UCM untuk mensimulasikan intensitas *Urban Heat Island* (UHII) dengan resolusi tinggi di Berlin. Studi ini mengembangkan metode baru untuk mengukur UHII dengan menghubungkan suhu udara pada ketinggian 2 meter (T2m) dengan area permukaan kedap air (ISAWRF). Hasilnya menunjukkan korelasi kuat antara T2m dan ISAWRF, terutama pada malam hari, dan menyoroti peran penting suhu permukaan serta fluks panas dalam menentukan UHII (H. Li et al., 2019).

Memon, Leung, dan Liu (2009) mengevaluasi keandalan intensitas *Urban Heat Island* (UHII) sebagai indikator pemanasan perkotaan. Studi mereka menunjukkan bahwa UHII berdasarkan suhu udara lebih efektif mencerminkan

pemanasan perkotaan pada malam hari dan pagi dini hari, sementara pada siang hari UHII cenderung rendah atau negatif. Hal ini menunjukkan bahwa UHII tidak sepenuhnya mencerminkan pemanasan perkotaan saat radiasi matahari mencapai puncaknya di siang hari (Memon et al., 2009).

Tabel 2.1 Penelitian Terkait Pengukuran Intensitas UHI

Sumber	Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
Venter, Chakraborty, dan Lee (2021)	<i>Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms</i>	Data satelit melebihi-lebihkan intensitas UHI hingga enam kali dibandingkan pengukuran langsung. SUHI rata-rata 1.45°C, CUHI 0.26°C. Data lapangan penting untuk akurasi UHI.	Fokus pada perbedaan intensitas SUHI dan CUHI menggunakan data crowdsourced dan satelit
Li et al. (2018)	<i>Quantifying urban heat island intensity and its physical mechanism using WRF/UCM</i>	Menggunakan model WRF/UCM di Berlin, menunjukkan korelasi kuat antara T2m dan area permukaan kedap air (ISAWRF), terutama pada malam hari. Suhu permukaan dan fluks panas berperan penting dalam UHII.	Menggunakan model simulasi untuk menghubungkan suhu udara dengan area permukaan kedap air untuk UHII
Memon, Leung, dan Liu (2009)	<i>An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating</i>	UHII lebih efektif mencerminkan pemanasan malam hari dan pagi hari, namun rendah atau negatif di siang hari. UHII tidak mencerminkan pemanasan saat puncak radiasi matahari.	Menunjukkan variasi UHII sepanjang hari dan efektivitasnya sebagai indikator pemanasan di malam hari.

2.1.2 Penerapan *Fuzzy Logic* pada sistem cuaca atau estimasi suhu

Uzoukwu dan Purqon mengembangkan model *fuzzy* untuk memprediksi Heat Index menggunakan data suhu dan kelembapan. Model ini memanfaatkan *fuzzy logic* untuk menghubungkan variabel suhu dan kelembapan secara linguistik dan mencapai tingkat akurasi yang tinggi dengan R^2 sebesar 0,974 dan RMSE 0,084. Hasil ini menunjukkan bahwa *fuzzy logic* merupakan metode yang efektif untuk memprediksi dan mengendalikan kondisi panas, memberikan prediksi yang akurat sekaligus memungkinkan penyederhanaan linguistik dari tren data (Uzoukwu & Purqon, 2022).

Liao et al. (2021) dalam “*User Knowledge, Data Modelling, and Visualization: Handling through the Fuzzy Logic-Based Approach*” membahas bagaimana *Fuzzy Logic* dapat digunakan untuk menangani ketidakpastian dan kompleksitas dalam pemodelan dan visualisasi data, khususnya dalam konteks fenomena lingkungan yang kompleks seperti UHI (Liao et al., 2021).

Pratama dan Andrianingsih (2024) dalam penelitiannya berjudul “Rancang Bangun Pemantau Suhu dan Kelembapan di Kota Depok dengan Metode *Fuzzy Logic* Berbasis Arduino” mengembangkan sistem pemantauan suhu dan kelembapan menggunakan *Fuzzy Logic* berbasis Arduino. Sistem ini mampu menangani ketidakpastian dalam data lingkungan dan memberikan prediksi suhu dengan tingkat kesalahan absolut $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan *Fuzzy Logic* efektif dalam memproses data lingkungan yang kompleks dan dapat digunakan untuk analisis fenomena seperti *Urban Heat Island* (UHI) (Pratama & Andrianingsih, 2024).

Rassarandi dan Tambunan (2019) dalam penelitian “Penerapan *Fuzzy Logic* dalam Pembuatan Peta Element at Risk Bencana Luapan Banjir Sungai Air Bengkulu Kota Bengkulu” menggunakan *Fuzzy Logic* untuk menginterpretasikan data yang ambigu mengenai tingkat kerusakan bangunan akibat banjir. Dengan mengklasifikasikan tingkat kerusakan menjadi “Berat”, “Sedang”, dan “Ringan”, penelitian ini menunjukkan bahwa *Fuzzy Logic* efektif dalam mengolah data dengan ketidakpastian tinggi, yang relevan dalam konteks visualisasi risiko lingkungan (Rassarandi & Tambunan, 2019).

Tabel 2.2 Penelitian Terkait Penerapan *Fuzzy Logic* pada sistem cuaca atau estimasi suhu

Sumber	Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
Venter, Chakraborty, dan Lee (2021)	<i>Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms</i>	Data satelit melebihi-lebihkan intensitas UHI hingga enam kali dibandingkan pengukuran langsung. SUHI rata-rata 1.45°C, CUHI 0.26°C. Data lapangan penting untuk akurasi UHI.	Fokus pada perbedaan intensitas SUHI dan CUHI menggunakan data crowdsourced dan satelit
Li et al. (2018)	<i>Quantifying urban heat island intensity and its physical mechanism using WRF/UCM</i>	Menggunakan model WRF/UCM di Berlin, menunjukkan korelasi kuat antara T2m dan area permukaan kedap air (ISAWRF), terutama pada malam hari. Suhu permukaan dan fluks panas berperan penting dalam UHII.	Menggunakan model simulasi untuk menghubungkan suhu udara dengan area permukaan kedap air untuk UHII
Memon, Leung, dan Liu (2009)	<i>An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating</i>	UHII lebih efektif mencerminkan pemanasan malam hari dan pagi hari, namun rendah atau negatif di siang hari. UHII tidak mencerminkan pemanasan saat puncak radiasi matahari.	Menunjukkan variasi UHII sepanjang hari dan efektivitasnya sebagai indikator pemanasan di malam hari.

2.1.3 Game Edukasi Berbasis VR dan *Urban Heat Island*

Crisman et al. (2023) mengembangkan *Chill City*, sebuah *game* edukatif interaktif yang bertujuan untuk meningkatkan pemahaman publik tentang strategi perencanaan perkotaan untuk menghadapi panas ekstrem akibat perubahan iklim dan efek *Urban Heat Island* (UHI). Melalui survei terhadap pemain dewasa yang bukan ahli, mereka menemukan bahwa *game* ini membantu pemain memahami strategi penanganan panas dan tradeoff lingkungan, sosial, dan ekonomi yang terkait. Studi ini menunjukkan potensi besar *game* lingkungan sebagai alat edukasi bagi masyarakat umum terkait isu panas ekstrem dan perubahan iklim (Crisman et al., 2023).

Mawsally & Sudarmilah (2019) dalam “*A Virtual-Reality Edu-Game: Save The Environment from the Dangers of Pollution*” mengembangkan *game* edukasi berbasis VR untuk meningkatkan pemahaman anak-anak tentang polusi dan cara

mengurangnya. Studi ini menunjukkan bahwa VR dapat meningkatkan keterlibatan dan motivasi dalam pembelajaran lingkungan (Mawsally & Sudarmilah, 2019).

Cheng, Yang, dan Andersen (2017) mengembangkan *Crystallize*, sebuah *game* 3D berbasis *Virtual Reality* (VR) yang berfungsi sebagai alat bantu pembelajaran bahasa dan budaya Jepang dengan perangkat *Oculus Rift*. Melalui *game* ini, pengguna dapat merasakan interaksi budaya yang diadaptasi, seperti gerakan membungkuk dalam sapaan Jepang. Dalam studi awal yang melibatkan 68 partisipan, *game* ini terbukti efektif dalam melatih peserta tentang cara dan waktu membungkuk, serta meningkatkan keterlibatan mereka dalam budaya Jepang. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi VR memiliki potensi besar untuk menggabungkan interaksi fisik berbasis budaya ke dalam desain pembelajaran bahasa (Cheng et al., 2017).

Tabel 2.3 Penelitian Terkait *Game* Edukasi Berbasis VR dan UHI

Sumber	Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
Crisman et al. (2023)	Chill City: An interactive <i>game</i> supporting public learning about urban planning for extreme heat	<i>Game</i> edukasi meningkatkan pemahaman publik tentang strategi perencanaan panas ekstrem dan UHI, serta tradeoff lingkungan, sosial, dan ekonomi.	Tidak berbasis VR dan 3D
Mawsally & Sudarmilah (2019)	A Virtual-Reality Edu-Game: Save The Environment from the Dangers of Pollution	<i>Game</i> VR edukatif membantu meningkatkan pemahaman anak-anak tentang polusi dan upaya pengurangannya melalui keterlibatan dan motivasi yang lebih tinggi.	Difokuskan pada edukasi polusi untuk anak-anak, menggunakan VR untuk meningkatkan keterlibatan dalam pembelajaran.
Cheng, Yang, and Andersen (2017)	Teaching Language and Culture with a Virtual Reality <i>Game</i>	Mengembangkan <i>game</i> VR untuk pembelajaran bahasa dan budaya Jepang. Meningkatkan keterlibatan dan mengajarkan interaksi budaya, seperti gerakan membungkuk, dengan 68 partisipan.	Fokus pada pembelajaran bahasa dan budaya melalui interaksi fisik berbasis VR, meningkatkan keterlibatan budaya pengguna.

2.1.4 Visualisasi *Heatmap* dan *Urban Heat Island*

Ujang, Azri, dan rekan-rekan (2018) mengembangkan model 3D untuk visualisasi mikro *Urban Heat Island* (UHI) di kota-kota padat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model kota 3D dapat menampilkan nilai radiasi matahari pada setiap fasad bangunan, memungkinkan simulasi prediksi UHI di masa depan. Pendekatan ini berguna untuk perencanaan sebelum pembangunan, memberikan visualisasi UHI yang lebih detail dan akurat dibandingkan peta tematik dua dimensi. Panecki (2019) dalam penelitiannya “*A missing link in cartographic visualization? A case study of ‘heat maps’ effectiveness*” membandingkan efektivitas heat map dengan metode visualisasi lainnya seperti peta koroplet dan peta titik dalam merepresentasikan data geospasial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *thermal map* lebih efektif dalam menampilkan distribusi data yang padat dan kompleks (Ujang et al., 2018).

Berger, Buš, dan Cristie (2015) mengembangkan *CityHeat*, sebuah sistem visualisasi interaktif berbasis *Unity3D* yang berfokus pada propagasi panas lalu lintas di kota. Dengan memanfaatkan mesin *game* interaktif seperti *Unity3D*, sistem ini memungkinkan pengamat untuk mengeksplorasi dinamika perkotaan serta distribusi energi dalam lingkungan buatan dengan cara yang lebih mendetail dibandingkan perangkat lunak CAD tradisional. *CityHeat* memungkinkan analisis penyebaran panas lalu lintas di lingkungan perkotaan, membantu pemahaman tentang dampaknya terhadap kualitas lingkungan luar ruangan. Studi kasus di Singapura menunjukkan bagaimana sistem ini bisa berfungsi sebagai alat

pendukung keputusan bagi pemangku kepentingan lintas disiplin dalam perencanaan kota dan kebijakan (Berger et al., 2015).

Nétek et al. (2018) dalam penelitian berjudul “*Implementation of Heat Maps in Geographical Information System – Exploratory Study on Traffic Accident Data*” menunjukkan bahwa heatmap adalah metode visualisasi GIS yang efektif untuk data spasial seperti kecelakaan lalu lintas. Meskipun fokus penelitian bukan pada UHI, temuan ini mendukung penggunaan *heatmap* dalam visualisasi data lingkungan yang kompleks dan dapat diterapkan dalam konteks UHI (Netek et al., 2018).

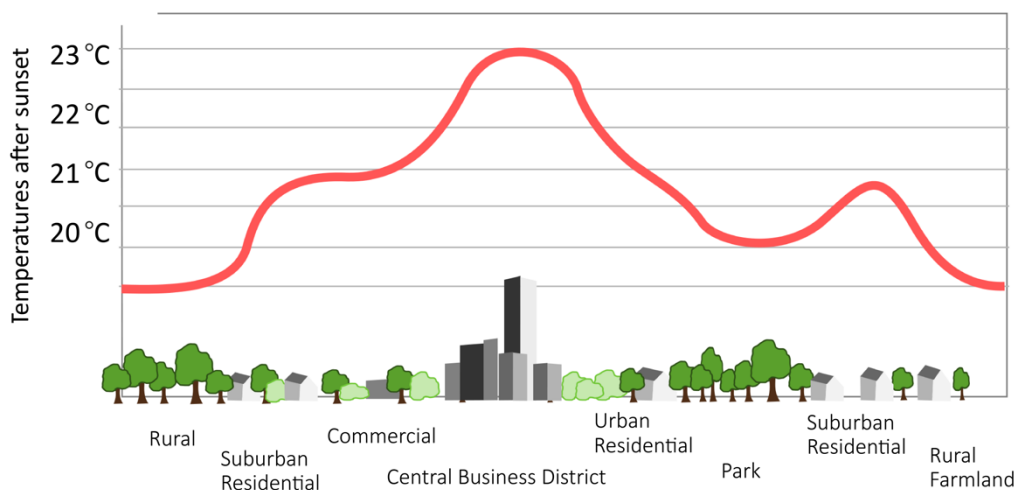
Tabel 2.4 Penelitian Terkait Visualisasi *Heatmap* dan UHI

Sumber	Judul	Hasil Penelitian	Perbedaan
Ujang, Azri, et al. (2018)	3D City Model for Micro-Mapping of Urban Heat Island	Model kota 3D dapat menampilkan radiasi matahari tiap fasad bangunan, mendukung simulasi prediksi UHI di masa depan, berguna untuk perencanaan pembangunan.	Berfokus pada model 3D untuk prediksi dan perencanaan UHI mikro di kota padat
Panecki (2019)	A missing link in cartographic visualization? A case study of ‘heat maps’ effectiveness	Membandingkan efektivitas <i>heatmap</i> dengan peta koroplet dan titik, menyimpulkan heatmap lebih efektif untuk distribusi data padat dan kompleks.	Membandingkan berbagai metode visualisasi untuk data geospasial, menilai keunggulan <i>heatmap</i> .
Berger, Buš, and Cristie (2015)	CityHeat: Interactive Visualisation System of Simulated Urban Traffic Heat Propagation	CityHeat menggunakan Unity3D untuk visualisasi panas lalu lintas, membantu analisis dan perencanaan perkotaan dengan pendekatan interaktif.	Menargetkan panas lalu lintas di perkotaan dengan analisis interaktif berbasis Unity3D
Nétek et al. (2018)	Implementation of Heat Maps in Geographical Information System – Exploratory Study on Traffic Accident Data	Heatmap sebagai metode visualisasi GIS yang efektif untuk data kecelakaan lalu lintas, mendukung penggunaan <i>heatmap</i> untuk data lingkungan kompleks.	Menggunakan heatmap dalam GIS untuk data kecelakaan, mendukung aplikasi serupa pada data lingkungan kompleks.

2.2 Urban Heat Island (UHI)

Urban Heat Island (UHI) adalah fenomena di mana area perkotaan mengalami suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah sekitarnya yang

lebih rural. Hal ini disebabkan oleh aktivitas manusia, struktur bangunan, dan permukaan yang menyerap dan memancarkan panas lebih tinggi (Nainggolan et al., 2019). Beberapa faktor yang mempengaruhi UHI yakni Penggunaan Lahan dan Tutupan Vegetasi. Kurangnya vegetasi dan banyaknya permukaan kedap air seperti beton dan aspal meningkatkan absorpsi panas (Zhang et al., 2017). Kepadatan Bangunan juga termasuk faktor yang mempengaruhi UHI. Area dengan kepadatan bangunan tinggi cenderung memiliki suhu yang lebih tinggi (Zheng et al., 2023).



Gambar 2.1 Profil Efek Urban Heat Island setelah tenggelamnya matahari

Efek urban heat island (UHI) biasanya paling terasa pada malam hari karena material konstruksi perkotaan melepaskan panas yang diserap sepanjang hari, mengakibatkan suhu tetap tinggi setelah matahari terbenam (Mathew et al., 2018)

Intensitas UHI secara umum didefinisikan sebagai perbedaan antara temperatur di perkotaan dan temperatur di kawasan rural pinggiran kota (Peng et al., 2012). Dengan demikian, intensitas UHI dari perkotaan ($UHII_{Kota}$) ditentukan oleh perbedaan antara rata-rata temperatur urban dan rata-rata temperatur rural:

$$UHII_{Kota} = \overline{T_{urban}} - \overline{T_{rural}} \quad (2.1)$$

$\overline{T_{urban}}$ = rata-rata temperatur dari seluruh suhu di setiap koordinat di dalam kota dan $\overline{T_{rural}}$ = rata-rata temperatur dari seluruh suhu di setiap koordinat di area *rural* sekitar kota tersebut.

2.3 *Apparent Temperature*

Apparent temperature adalah indikator yang menggabungkan suhu udara dengan faktor lingkungan seperti kelembaban relatif dan kecepatan angin untuk menggambarkan suhu yang sebenarnya dirasakan oleh tubuh manusia, lebih akurat daripada suhu udara saja (Steadman, 1984). Misalnya, suhu tinggi dengan kelembaban tinggi terasa lebih panas karena tubuh sulit mendinginkan diri melalui keringat.

Sebagai indikator UHI, *apparent temperature* memiliki relevansi langsung pada penilaian risiko kesehatan. Suhu yang dirasakan lebih tinggi daripada suhu aktual memperbesar risiko kesehatan, terutama bagi penduduk perkotaan dengan lingkungan padat dan ventilasi alami yang berkurang. Penelitian menunjukkan bahwa pemanasan permukaan tanah di perkotaan secara signifikan mempengaruhi kenyamanan termal dan risiko kesehatan penduduk kota (Venter et al., 2021). Beberapa indikator untuk mengukur AT adalah sebagai berikut:

2.4 *Temperature 2m (Suhu pada ketinggian 2m)*

Suhu pada ketinggian 2 meter (*Tair2m*) memiliki korelasi signifikan dengan suhu yang dirasakan (*Apparent Temperature*), terutama ketika faktor-faktor lingkungan seperti kelembapan dan kecepatan angin diperhitungkan. Pada suhu tinggi, hubungan antara *Tair2m* dan *apparent temperature* menjadi sangat kuat, dengan koefisien korelasi Pearson sekitar 0,91 pada suhu di atas 12,7°C (Nguyen

et al., 2014). Namun, pada suhu lebih rendah, korelasi ini cenderung melemah. Faktor-faktor seperti kelembapan yang tinggi dapat membuat suhu terasa lebih panas, sedangkan kecepatan angin dapat membuat suhu terasa lebih dingin daripada yang sebenarnya (Nguyen et al., 2014; Wang et al., 2022). Meskipun Tair2m mempengaruhi apparent temperature, variabel lingkungan lainnya juga memainkan peran penting dalam menentukan bagaimana suhu dirasakan.

2.5 Dew Point 2m

Dew Point 2m adalah Suhu di mana udara pada ketinggian 2 meter mencapai kelembapan relatif 100%, sehingga uap air mulai mengembun. Ini menunjukkan tingkat kelembapan di udara—semakin tinggi dew point, semakin lembap udara. Dew point pada ketinggian 2 meter memiliki korelasi signifikan dengan apparent temperature. Ketika dew point meningkat, udara menjadi lebih lembap, membuat suhu terasa lebih panas daripada yang terukur. Hal ini karena kelembapan tinggi mengurangi laju penguapan keringat dari kulit, sehingga tubuh kesulitan mendinginkan diri (Adams et al., 1992; J. Li et al., 2018; Wu & Wang, 2021). Penelitian menunjukkan adanya hubungan linier kuat antara dew point dan apparent temperature pada suhu di atas ambang tertentu, seperti 12,7°C (Nguyen et al., 2014). Namun, faktor lain seperti kecepatan angin dan suhu udara juga mempengaruhi bagaimana suhu dirasakan, sehingga dew point bukan satu-satunya penentu apparent temperature.

2.6 Relative Humidity 2m

Relative Humidity atau kelembapan relatif pada ketinggian 2 meter adalah persentase rasio antara jumlah uap air aktual di udara pada suhu tertentu dengan jumlah uap air maksimal yang dapat ditampung oleh udara pada suhu tersebut. Kelembapan relatif (RH) pada ketinggian 2 meter memiliki korelasi positif yang signifikan dengan Apparent Temperature (AT). di mana peningkatan RH membuat suhu terasa lebih panas daripada suhu aktual karena berkurangnya efisiensi mekanisme pendinginan tubuh melalui penguapan keringat (Awasthi et al., 2022; Guo et al., 2024). Model matematis seperti Heat Index menunjukkan bahwa peningkatan RH akan meningkatkan nilai AT (Awasthi et al., 2022; Wang et al., 2022), dan penelitian menegaskan bahwa AT cenderung meningkat seiring bertambahnya RH, terutama pada kondisi panas (Simpson et al., 2023; Wang et al., 2022). Ini menunjukkan adanya hubungan kausal di mana perubahan RH secara langsung mempengaruhi AT melalui dampaknya pada regulasi suhu tubuh, meskipun suhu udara juga berperan dalam dinamika ini (Awasthi et al., 2022; Wichmann et al., 2011).

2.7 Vapour Pressure Deficit

Vapor Pressure Deficit (VPD) adalah selisih antara tekanan uap air aktual di udara dan tekanan uap air pada keadaan jenuh. VPD yang tinggi berarti udara kering, meningkatkan laju evaporasi dan membuat tanaman serta manusia merasa lebih panas. VPD memiliki korelasi kuat dengan AT, di mana peningkatan VPD dapat meningkatkan persepsi panas pada manusia. VPD yang tinggi menunjukkan perbedaan besar antara tekanan uap air aktual dan tekanan uap air pada keadaan

jenuh, menandakan udara yang lebih kering (Slot et al., 2024). Dalam kondisi VPD tinggi, evaporasi keringat dari kulit menjadi kurang efektif, sehingga tubuh merasa lebih panas meskipun suhu udara mungkin sama (Slot et al., 2024). Studi menunjukkan bahwa peningkatan VPD berhubungan dengan peningkatan AT dan dapat mempengaruhi kenyamanan termal serta respons fisiologis tubuh (Simpson et al., 2023; Slot et al., 2024).

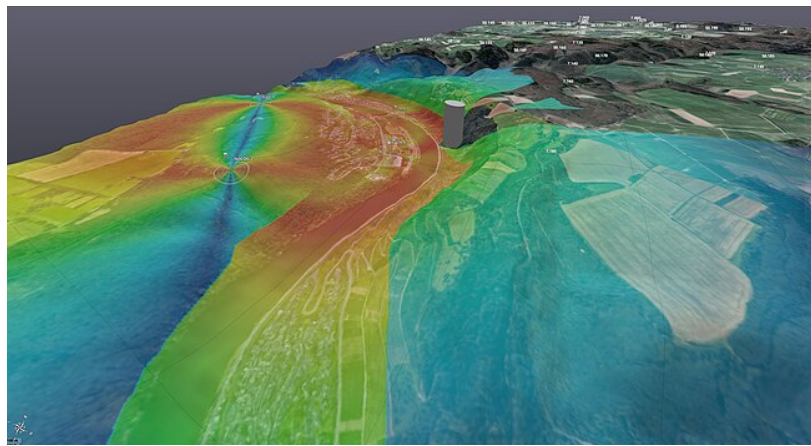
2.8 Evapotranspiration

ET adalah proses penguapan air dari permukaan tanah dan transpirasi dari tanaman ke atmosfer, yang dipengaruhi oleh suhu udara ((X. Li et al., 2024; Ma et al., 2017). ET penting dalam siklus air dan dipengaruhi oleh suhu, kelembapan, dan radiasi matahari. ET memiliki korelasi positif dengan AT, di mana peningkatan ET dapat menurunkan persepsi panas pada hari-hari panas. Peningkatan suhu biasanya meningkatkan laju ET karena lebih banyak energi tersedia untuk menguapkan air. Proses pendinginan melalui evaporasi selama ET dapat mengurangi AT, membuat suhu terasa lebih nyaman bagi manusia (Ha et al., 2024; Zou et al., 2019). Namun, pada kondisi kelembapan rendah, efek pendinginan ini mungkin kurang signifikan, dan peningkatan ET dapat berkontribusi pada peningkatan AT.

2.9 Heatmap

Heatmap adalah representasi grafis data yang menggunakan skala warna untuk menunjukkan magnitudo fenomena di berbagai area geografis. *Heatmap* efektif dalam menampilkan distribusi spasial dan intensitas variabel tertentu, seperti suhu permukaan (Panecki & Pokojski, 2019). Ada beberapa keunggulan *Heat map*

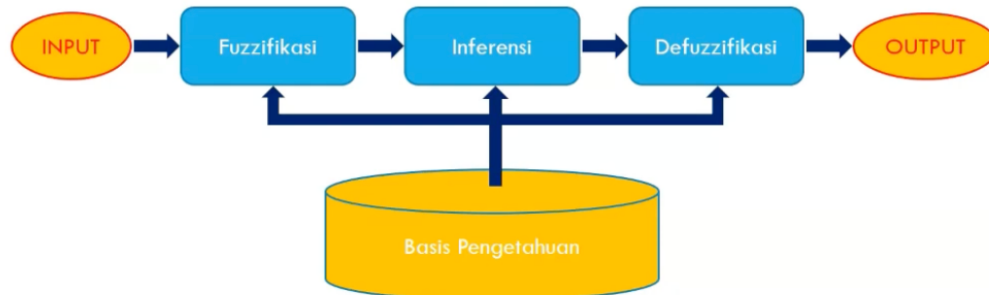
untuk visualisasi UHI, diantaranya merupakan representasi spasial yang intuitif, karena memudahkan identifikasi area dengan suhu tinggi (*hotspots*) (Almeida et al., 2021). Ditambah juga kemampuan dalam menangani data kompleks, karena dapat memvisualisasikan data suhu yang besar dan kompleks secara efektif.



Gambar 2.2 Visualisasi Efek *Urban Heat Island*

Umumnya, dalam pembuatan *heatmap* untuk UHI, diperlukan proses interpolasi spasial untuk mengisi data suhu antar titik pengukuran agar hasil visualisasi lebih seamless dan menyatu. Salah satu metode yang sering digunakan adalah *Inverse Distance Weighting* (IDW), yang menghitung nilai di antara titik-titik berdasarkan kedekatannya.

2.10 *Fuzzy Logic*



Gambar 2.3 Proses *Fuzzy Logic*

Fuzzy Logic adalah suatu metode komputasi yang diperkenalkan untuk menangani konsep kebenaran yang bersifat derajat (gradual) daripada absolut (benar atau salah). Berbeda dengan logika klasik biner yang hanya mengenal nilai 0 atau 1, *Fuzzy Logic* memungkinkan nilai kebenaran parsial antara 0 dan 1. Ini mencerminkan cara manusia berpikir dan membuat keputusan dalam kondisi ketidakpastian dan ambigu.

Konsep *Fuzzy Logic* pertama kali diperkenalkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965 dalam makalahnya yang berjudul “*Fuzzy Sets*”. Zadeh mengemukakan bahwa dalam kehidupan nyata, banyak konsep yang tidak dapat dinyatakan dalam nilai biner. Sejak itu, *Fuzzy Logic* telah berkembang dan diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti kontrol sistem, kecerdasan buatan, pengolahan citra, dan pengambilan keputusan.

Fuzzy Logic adalah metode komputasi yang menangani konsep kebenaran yang bersifat tingkat (gradual) daripada biner (hitam-putih). Hal ini memungkinkan pemodelan ketidakpastian dan ambigu dalam data (Liao et al., 2021).

2.10.1 Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *Fuzzy* merupakan perluasan dari himpunan klasik di mana elemen-elemen memiliki derajat keanggotaan yang berkisar antara 0 dan 1. Contohnya, suhu 30°C dapat memiliki derajat keanggotaan tertentu dalam kategori “hangat” dan “panas”.

Terdapat variabel linguistik didalam himpunan *fuzzy*, yakni Variabel yang nilainya dinyatakan dalam kata-kata atau kalimat, bukan angka. Misalnya, tingkat kecepatan: “lambat”, “sedang”, “cepat”.

Lalu terdapat fungsi keanggotaan (*Membership functions*). Yakni Fungsi matematis yang mendefinisikan derajat keanggotaan setiap elemen dalam himpunan *fuzzy*. Bentuk umum fungsi keanggotaan meliputi segitiga, trapesium, Gaussian, dan sigmoid.

Untuk aturan *fuzzy* sendiri berupa Pernyataan IF-THEN yang menghubungkan variabel input dan *output* dalam bentuk linguistik. Contoh: Jika suhu tinggi dan kelembaban rendah, maka kipas berputar cepat.

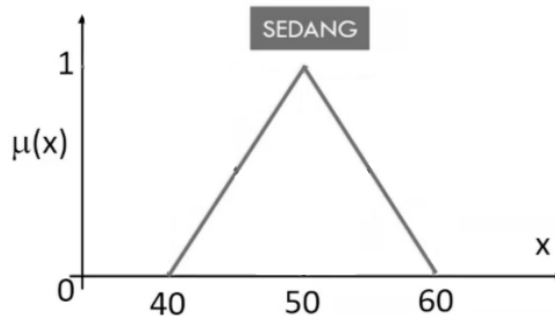
2.10.2 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah proses mengonversi crisp input menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*. Setiap variabel input dipetakan ke dalam kategori linguistik menggunakan fungsi keanggotaan tertentu. Derajat keanggotaan untuk kategori dengan fungsi triangular dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{jika } b < x \leq c \\ 0 & \text{jika } x \geq c \end{cases} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- a dan c : titik dimana nilai fungsi menjadi nol.
 b : titik di mana nilai fungsi mencapai 1.



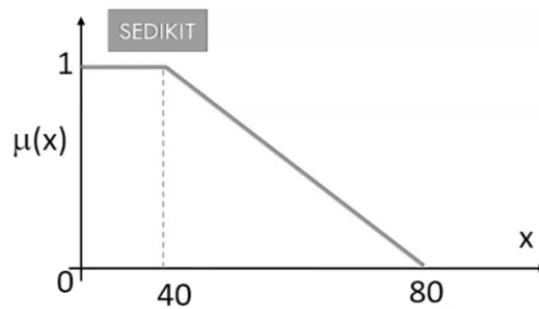
Gambar 2.4 Visualisasi Fungsi Triangular

Fungsi triangular memiliki puncak di satu titik b , memberikan bentuk segitiga (triangular). Lalu derajat keanggotaan untuk kategori dengan fungsi trapezoidal dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{jika } a < x \leq b \\ 1 & \text{jika } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-b} & \text{jika } c < x \leq d \\ 0 & \text{jika } x > d \end{cases} \quad (2.3)$$

Keterangan :

- a dan d : titik dimana nilai fungsi menjadi nol.
 b dan c : titik di mana nilai fungsi mencapai 1.



Gambar 2.5 Visualisasi Fungsi Trapezoidal

Fungsi trapezoidal memiliki puncak datar (konstan) di antara b dan c , memungkinkan nilai keanggotaan penuh untuk rentang tertentu.

2.10.3 Inferensi

Tahap inferensi adalah proses dalam sistem inferensi *fuzzy* di mana nilai-nilai *fuzzy* yang diperoleh dari tahap fuzzifikasi dikombinasikan berdasarkan aturan-aturan yang telah ditentukan untuk menghasilkan output *fuzzy*. Pada sistem ini, metode inferensi yang digunakan adalah Mamdani. Proses inferensi pada sistem *fuzzy* ini melibatkan penggunaan himpunan aturan *if-then* yang menghubungkan variabel input dengan variabel output melalui operator logika *fuzzy*.

2.10.4 Defuzzifikasi

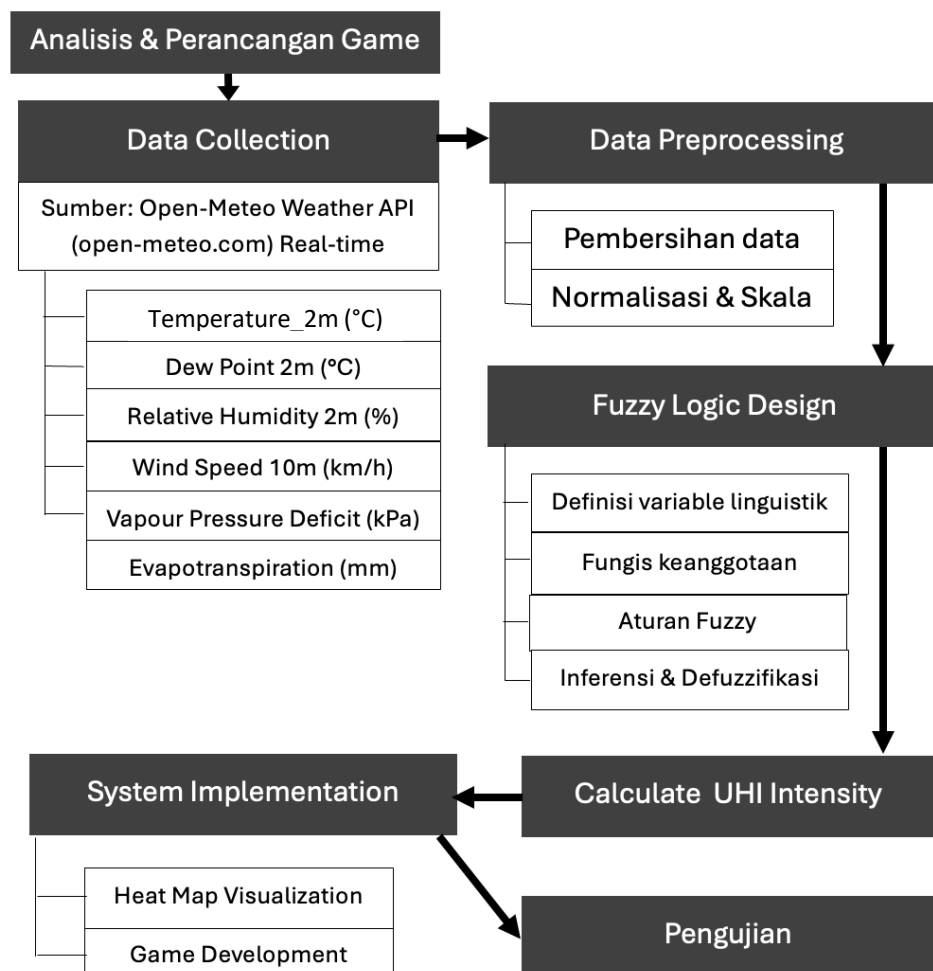
Mengonversi output *fuzzy* menjadi output tegas (crisp output) yang dapat digunakan untuk pengambilan keputusan atau kontrol. Metode defuzzifikasi umum meliputi *Centroid*, *Bisector*, *Mean of Maximum*.

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Desain Sistem

Dalam penelitian ini, penulis melaksanakan serangkaian langkah secara berurutan dan sistematis untuk memudahkan dalam menentukan langkah berikutnya, sehingga hasil yang diharapkan dapat tercapai.



Gambar 3.1 Alur Desain Sistem

3.2 Analisis dan Perancangan *Game*

Analisis *game* pada penelitian ini meliputi deskripsi singkat mengenai *game* “*Malang Heat*” yang dikembangkan, terdiri dari deskripsi *game*, storyboard, skenario, perancangan *fuzzy* mamdani untuk menentukan suhu, hingga pengujian usability.

3.3.1 Deskripsi *Game*

Game edukasi *Urban Heat Island* ini bernama “*Malang Heat*” yang ditujukan kepada pemain usia 13 tahun keatas, karena pengembang headset VR menyarankan minimal usia pemain di angka 13 tahun keatas (Tychsen & Foeller) dikarenakan terutama penduduk kota Malang sendiri sebagai sarana media pembelajaran untuk meningkatkan awareness mengenai UHI di Kota Malang.

3.3.2 Rancangan Antarmuka

3.3.2.1 *Main Menu*



Gambar 3.2 Main Menu Concept

Pada Main Menu Terdapat tiga tombol, *Play Game* untuk mulai bermain, *Settings* untuk melakukan setting suara, dan *Quit* untuk menutup permainan.

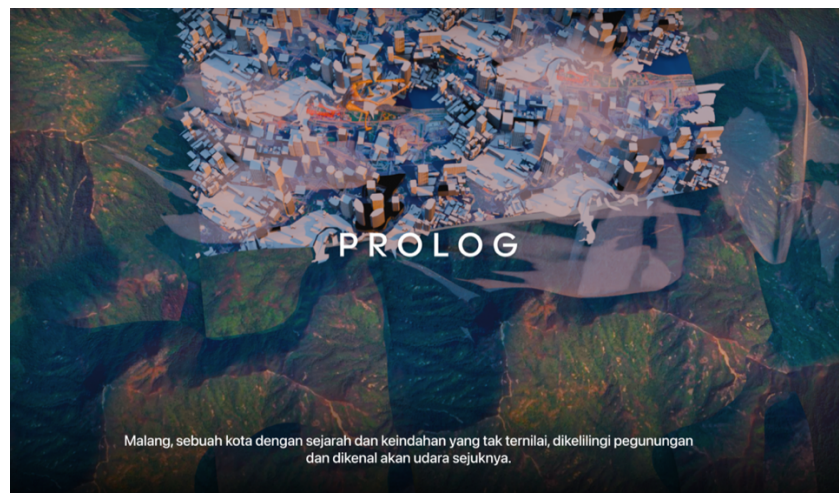
3.3.2.2 Settings



Gambar 3.3 Settings Menu Concept

Pada Menu *Settings* terdapat slider untuk mengatur segala jenis *Volume* dan Musik pada permainan.

3.3.2.3 Prolog



Gambar 3.4 Opening Narrator Dialogue

Ketika memulai *game* baru, pemain akan disambut dengan dialog oleh Narator, guna menjelaskan latar belakang keadaan kota malang, apa itu UHI, dan apa objective yang perlu dilakukan oleh pemain.



Gambar 3.5 Narator Menjelaskan *Urban Heat Island*

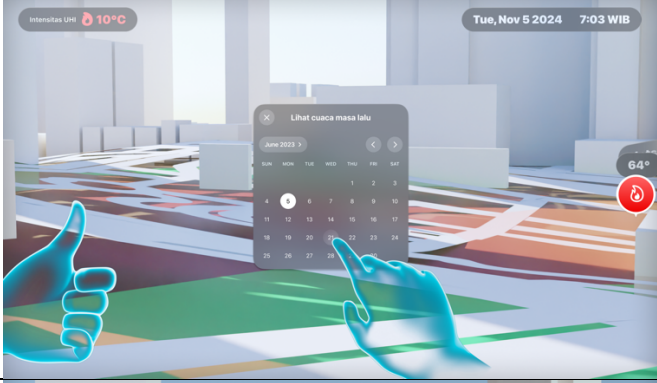
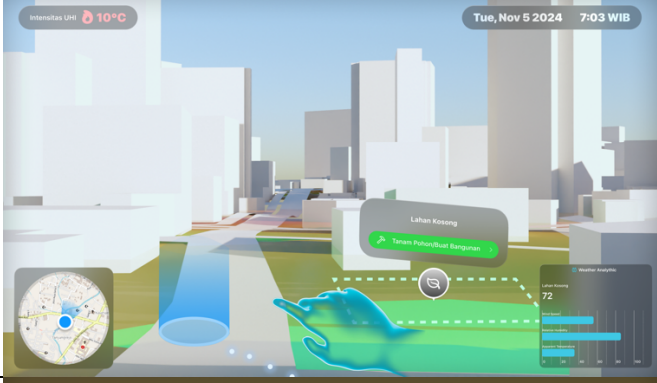


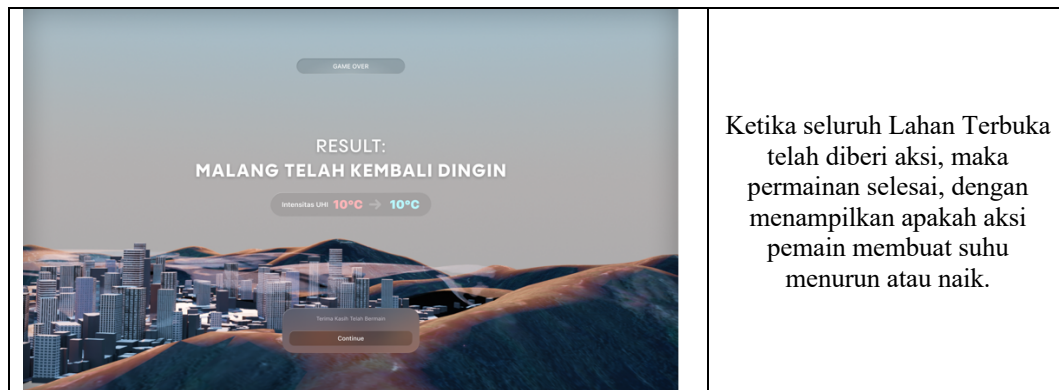
Gambar 3.6 Narator Mengajak Pemain untuk mendalami UHI

3.3.2.4 *Storyboard*

Objective pada *game* ini ada dua, yakni pemain diminta agar mengeksplor seluruh kota malang dan membuat action pada hotspot panas di seluruh titik dan pada titik dimana lahan masih terbuka, membuat pilihan, membangun bangunan atau vegetasi. Untuk fitur yang bisa dimainkan ada fitur lihat cuaca pada masa lalu, pergi ke siang atau malam hari, buat foto, dan buka tutup layer *heatmap*.

Tabel 3.1 Storyboard *Game*

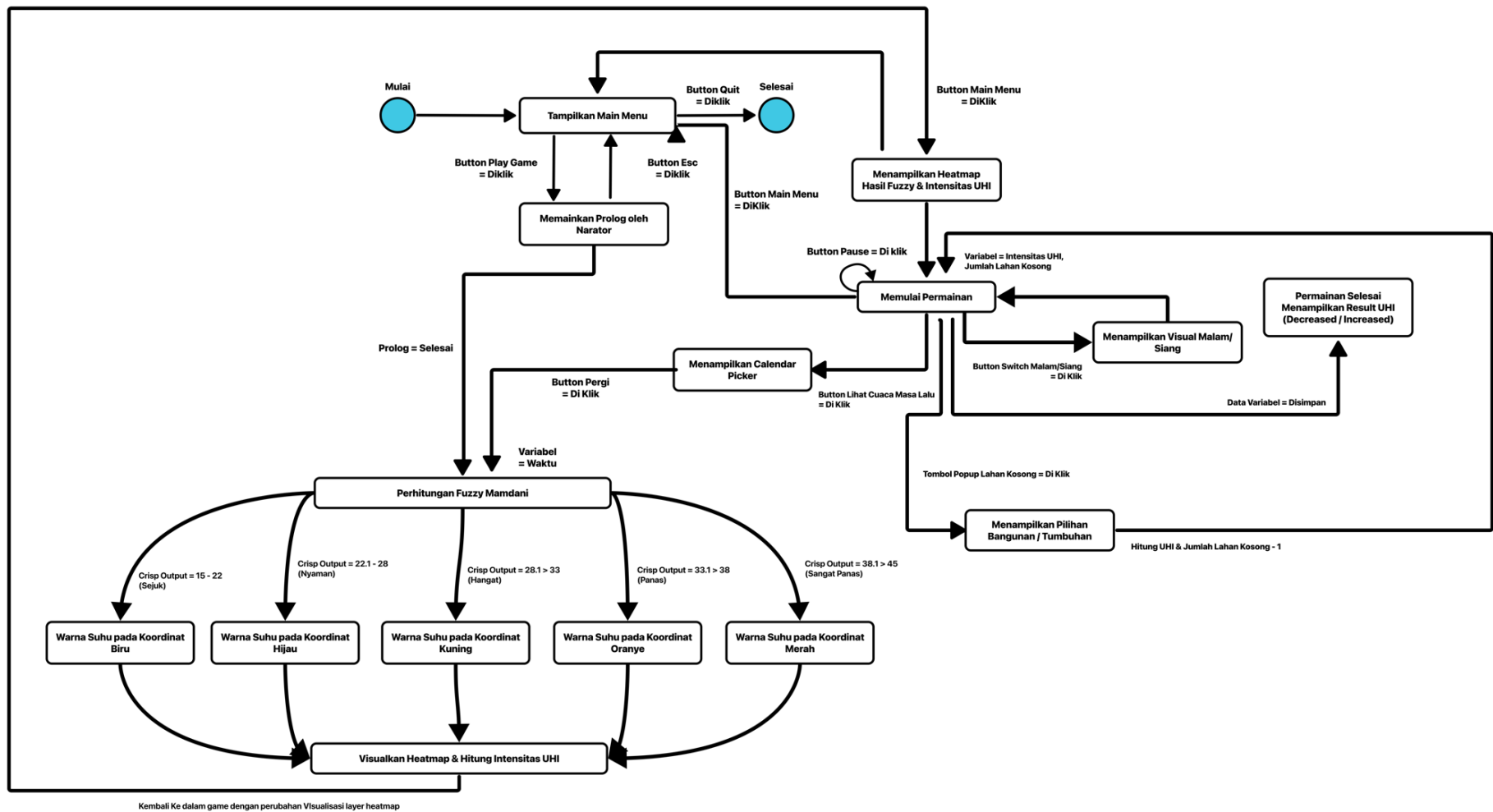
Mockup Concept	Keterangan
	Pemain dapat roaming secara bebas di seluruh area kota malang, disini dapat juga menggunakan fitur Take Photo
	Pemain dapat melihat suhu dan cuaca pada masa lalu sesuai inputan tanggal
	Untuk menang, pemain diharuskan mencari Lahan Kosong dan membangun bangunan atau pohon, agar mendapatkan pemahaman bagaimana aksi mereka berefek ke UHI
	Pemain dapat melihat visualisasi pada malam hari menggunakan fitur pada Action Wheel



3.3 *Finite State Machine*

Berikut merupakan diagram *Finite state machine* (FSM) yang digunakan untuk mengetahui semua alur yang terjadi dari awal *game* sampai *game* berakhir.

Berikut merupakan diagram FSM untuk permainan ini:

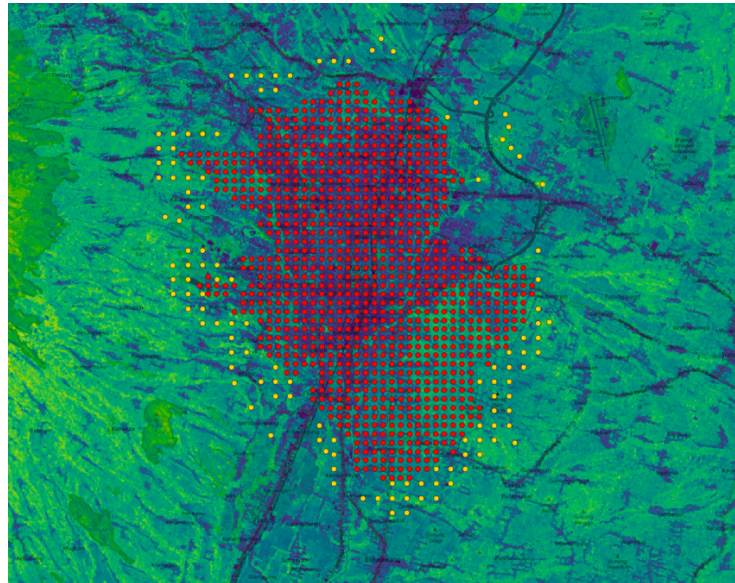


Gambar 3.7 Diagram Finite State Machine

3.4 Data Collection

3.4.1 Study Area

Area dari penelitian ini adalah Kota Malang, dengan koordinat lokasi yang akan diambil didalamnya adalah sebagai berikut:



Gambar 3.8 Koordinat pengambilan data kota dengan visualisasi kadar NDVI dibelakangnya. Titik Merah adalah perkotaan dan titik kuning adalah daerah rural sekitar perkotaan

Pada Gambar 3.8 diperlihatkan peta Kota Malang dan dibelakangnya visualisasi kadar NDVI pada tahun 2024, diambil dengan *Google Earth Engine* dengan warna biru gelap menunjukkan tutupan lahan lebih banyak sedangkan warna yang lebih hijau menunjukkan lahan yang masih asri. Data batas administrasi Kota Malang didapatkan melalui situs resmi Ina-Geoportal milik Badan Informasi Geospasial Negara Indonesia (Badan Informasi Geospasial, 2024). Koordinat yang mendefinisikan perkotaan malang yang diambil berjumlah 1012 titik dengan jarak antar titik sebesar 330 meter. Dan koordinat yang mendefinisikan Area rural disini merupakan jarak 1 hingga 10 km disekitar kota malang, disini dipilih 223 titik

koordinat dengan kustomisasi dipilih berdasarkan titik dengan kadar NDVI tertinggi.

3.4.2 Data Preprocessing

Langkah ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang diperoleh dari proses data collection siap untuk digunakan dalam model *Fuzzy Logic*. Proses ini melibatkan langkah pembersihan data, konversi tipe data, seleksi fitur dan normalisasi data.

Sebagai contoh, berikut adalah ekspektasi *outcome* data dari tiap koordinat yang akan diambil:

Tabel 3.2 Contoh Data

Lat	-7.93784688399999
Long	112.571947246
Temperature_2m	21.850000381469727
Relative_humidity_2m	96.0
Evapotranspiration (mm)	88.0
Surface_pressure	936.8128051757812
Wind_speed_10m	3.219938039779663

3.4.3 Data Cleaning

Data Cleaning adalah memastikan data bebas dari kesalahan dan siap untuk dianalisis. Dengan cara memeriksa nilai yang hilang, dengan melakukan inspeksi pada setiap kolom untuk mendeteksi nilai yang kosong atau tidak terdefinisi. Dalam data contoh, semua kolom memiliki nilai, sehingga tidak ada nilai hilang yang perlu ditangani.

3.6 Implementasi *Fuzzy Logic*

Dalam penelitian ini, *Fuzzy Logic* digunakan untuk menentukan dari berbagai macam variabel suhu yang didapatkan dari API menjadi output berupa suhu apparent. Sistem *Fuzzy* yang digunakan adalah *Fuzzy Mamdani*

3.6.1 Basis Pengetahuan

Melalui data yang didapat dari Open-Meteo, didapatkan tujuh macam variable data cuaca, yakni: *Temperature* (suhu), *dew point* (titik embun), *relative humidity* (kelembapan relatif), *wind speed* (kecepatan angin), *Vapour Pressure Deficit* (defisit tekanan uap), *Evapotranspiration* (pelepasan uap air ke atmosfer), dan *Apparent temperature* (suhu yang dirasakan).

Untuk model fungsi keanggotaan yang akan digunakan adalah fungsi trapezoidal pada awal dan akhir, dan triangular ditengahnya. Kombinasi ini dipilih untuk menangkap karakteristik distribusi data dan batasan variabel dengan lebih baik.

Fungsi *trapezoidal* digunakan di ujung karena bentuknya yang lebih fleksibel, memungkinkan nilai-nilai ekstrem untuk tetap mendapatkan nilai keanggotaan penuh (1) hingga batas tertentu. Fungsi triangular memiliki satu puncak yang jelas di tengah rentang, yang sangat efektif untuk merepresentasikan kategori “sedang” atau “normal” yang berada di antara dua ekstrem.

Berdasarkan hasil riset yang telah dilakukan ditemukan himpunan *fuzzy* untuk masing-masing variable sebagai berikut:

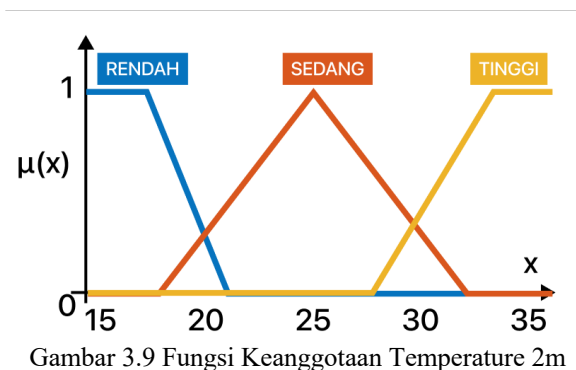
3.6.1.1 Derajat *Temperature 2m*

Berdasarkan penelitian dari Darmawi pada tahun 2020, standar pembagian himpunan *fuzzy* untuk temperature diatas 2m dibagi menjadi tiga, yakni “Dingin”, “Sedang”, dan “Panas” (Darmawi et al., 2020), dengan derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 3.3 Derajat Keanggotaan Temperature 2m

No	Kondisi	Rentang
1	Dingin	15 – 22
2	Sedang	18 - 32
3	Panas	28 - 35

Menggunakan rumus persamaan (1.1) dan (1.2) maka ditemukanlah kurva dari masing masing keanggotaan sebagai berikut:



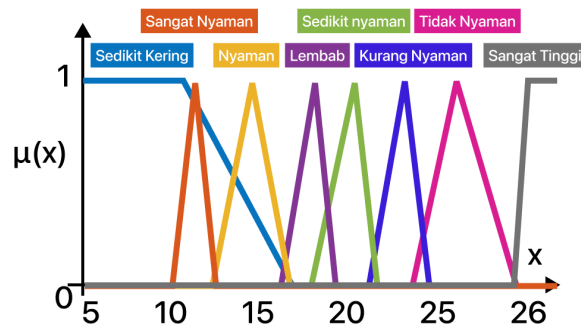
Gambar 3.9 Fungsi Keanggotaan Temperature 2m

3.6.1.2 Dew Point 2m

Berdasarkan penelitian dari Lab Kalibrasi PT ALMEGA Sejahtera pada tahun 2020, standar rentang dew point dan variabel linguistiknya dibagi menjadi delapan (almeganews, n.d.), yakni sebagai berikut:

Tabel 3.4 Derajat Keanggotaan Dew Point 2m

No	Kondisi	Rentang (°C)
1	Sangat Tinggi. Bahkan Tidak Baik Untuk yang Memiliki Penyakit Asma Karena Bisa Mematikan	Diatas 26 °C
2	Sangat Tidak Nyaman, Cukup Menekan	24 - 26
3	Sangat Lembab, Kurang Nyaman	21 - 24
4	Sedikit Tidak Nyaman Bagi Kebanyakan Orang	18 - 21
5	Baik Bagi Sebagian Besar, Tapi masi merasakan lembab	16 – 18
6	Nyaman	13 - 16
7	Sangat Nyaman	10 - 12
8	Sedikit Kering	Dibawah 10 °C



Gambar 3.10 Fungsi Keanggotaan Dew Point 2m

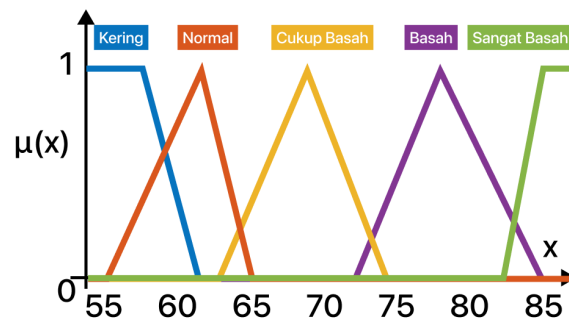
3.6.1.3 Relative Humidity 2m

Berdasarkan penelitian dari Sunardi pada tahun 2022, standar pembagian himpunan *fuzzy* untuk *relative humidity* dibagi menjadi lima (Sunardi et al., 2022), dengan derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 3.5 Derajat Keanggotaan Relative Humidity 2m

No	Kondisi	Rentang
1	Kering	> 57
2	Normal	55 - 65
3	Cukup Basah	63 - 75
4	Basah	73 – 85
5	Sangat Basah	> 83

Menggunakan rumus persamaan (1.1) dan (1.2) maka ditemukanlah kurva dari masing masing keanggotaan sebagai berikut:



Gambar 3.11 Fungsi Keanggotaan Relative Humidity 2m

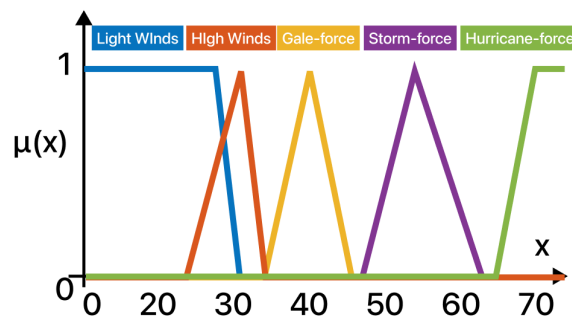
3.6.1.4 Wind Speed 10m

Berdasarkan penelitian dari Nikentari pada tahun 2018, standar pembagian himpunan *fuzzy* untuk kecepatan angin dibagi menjadi lima (Nikentari et al., 2018), dengan derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 3.6 Derajat Keanggotaan Wind Speed

No	Kondisi	Rentang
1	Light Winds	0 – 21 knots
2	High Winds	22 – 33 knots
3	Gale-force	34 – 47 knots
4	Storm-force	48 – 63 knots
5	Hurricane-force	Diatas 63 knots

Menggunakan rumus persamaan (1.1) dan (1.2) maka ditemukanlah kurva dari masing masing keanggotaan sebagai berikut:



Gambar 3.12 Fungsi Keanggotaan Wind Speed

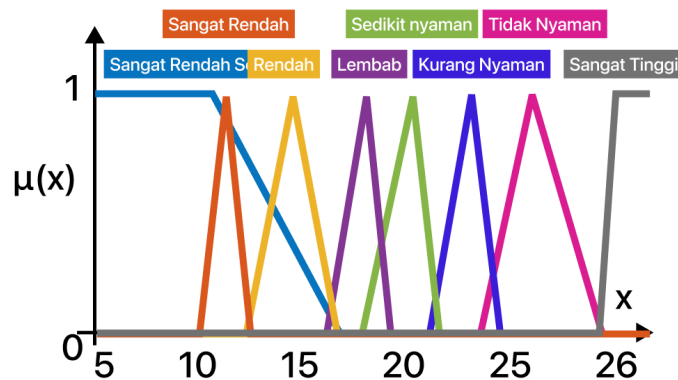
3.6.1.5 Vapour Pressure Deficit

Berdasarkan penelitian dari Ramos-Fernández pada tahun 2016, standar pembagian himpunan *fuzzy* untuk defisit uap air dibagi menjadi delapan (Ramos-Fernández et al., 2016), dengan derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 3.7 Derajat Keanggotaan Vapour Pressure Deficit

No	Kondisi	Rentang
1	Sangat Rendah Sekali	0 – 40
2	Sangat Rendah	20 – 50
3	Rendah	40 – 60
4	Agak Rendah	50 – 70
5	Sedang	60 – 80
6	Agak Tinggi	70 – 90
7	Tinggi	80 – 100
8	Sangat Tinggi	> 90

Menggunakan rumus persamaan (1.1) dan (1.2) maka ditemukanlah kurva dari masing masing keanggotaan sebagai berikut:



Gambar 3.13 Fungsi Keanggotaan Vapour Pressure Deficit

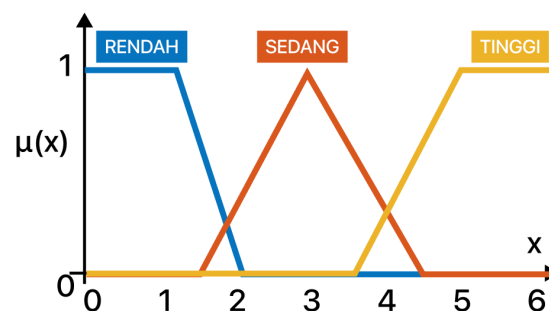
3.6.1.6 Evapotranspiration

Berdasarkan penelitian dari Darmawi pada tahun 2020, standar pembagian himpunan *fuzzy* untuk evapotranspiration dibagi tiga, dengan derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 3.8 Derajat Keanggotaan Evapotranspiration

No	Kondisi	Rentang
1	Dingin	0 - 2
2	Sedang	1.5 – 4.5
3	Panas	3.5 - 6

Menggunakan rumus persamaan (1.1) dan (1.2) maka ditemukanlah kurva dari masing masing keanggotaan sebagai berikut:



Gambar 3.14 Fungsi Keanggotaan Evapotranspiration

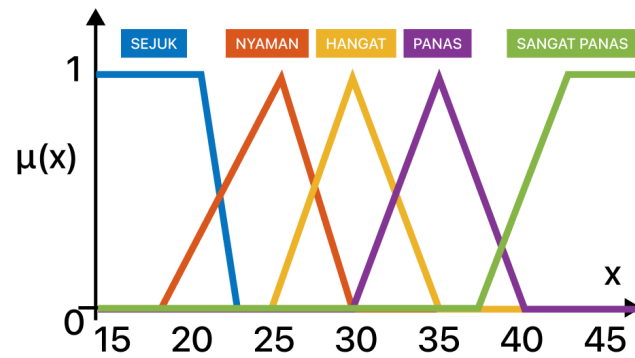
3.6.1.7 Apparent Temperature

Berdasarkan penelitian dari Darmawi pada tahun 2020, standar pembagian himpunan *fuzzy* untuk apparent temperature dibagi menjadi lima, dengan derajat keanggotaan sebagai berikut:

Tabel 3.9 Derajat Keanggotaan Temperature 2m

No	Kondisi	Rentang
1	Sejuk	15 - 22
2	Nyaman	18 – 30
3	Hangat	25 -35
4	Panas	30 – 40
5	Sangat Panas	38 – 45

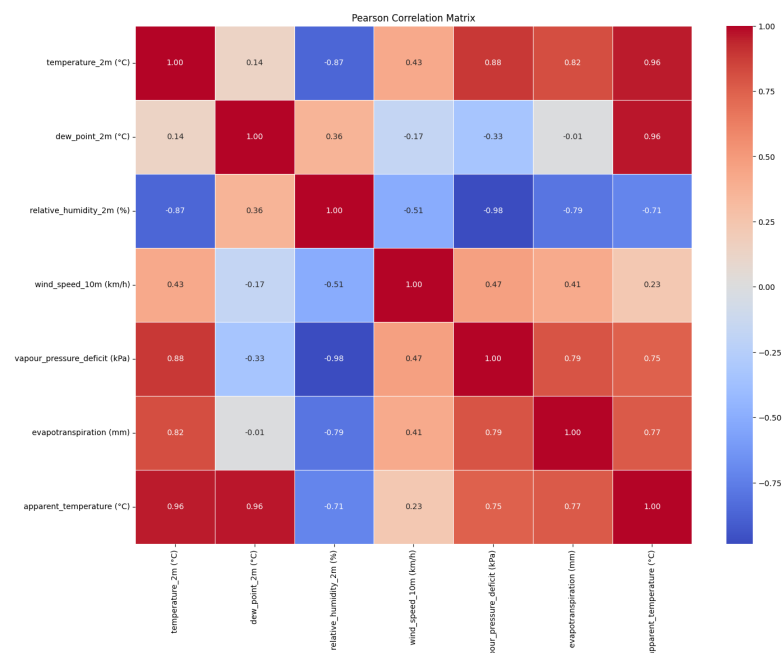
Menggunakan rumus persamaan (1.1) dan (1.2) maka ditemukanlah kurva dari masing masing keanggotaan sebagai berikut:



Gambar 3.15 Fungsi Keanggotaan Apparent Temperature

3.6.1.7 Aturan *Fuzzy*

Aturan *Fuzzy* didapatkan melalui analisa korelasi antara variable input dan output dari data historis cuaca kota malang selama tahun 2023:



Gambar 3.16 Korelasi Ketujuh variable cuaca di kota malang selama tahun 2023

Berdasarkan Gambar 3.16, hasil matriks korelasi Pearson menunjukkan hasil berikut dengan r adalah koefisien korelasi pearson terhadap apparent temperature:

- ***Temperature 2m* ($r = 0,959$)**

Sangat berkorelasi positif dengan apparent temperature, menegaskan suhu udara sebagai faktor utama yang memengaruhi panas yang dirasakan.

***Dew Point 2m* ($r = 0,961$)**

Memiliki korelasi positif sangat kuat dengan apparent temperature, menunjukkan bahwa kandungan uap air (kelembapan absolut) berpengaruh signifikan dalam meningkatkan persepsi panas.

***Relative Humidity* ($r = -0,713$)**

Berkorelasi negatif dengan apparent temperature, yang diduga akibat efek suhu tinggi cenderung menurunkan kelembapan relatif. Saat suhu naik, udara sanggup menampung lebih banyak uap air, sehingga persentase kelembapan relatif menurun.

- ***Vapour Pressure Deficit* ($r = 0,747$)**

Makin tinggi VPD (udara makin kering), makin besar pula persepsi panasnya. Hal ini sejalan dengan fakta bahwa kelembapan rendah memicu evaporasi keringat yang kurang efisien, sehingga tubuh merasa lebih panas.

- ***Evapotranspiration* ($r = 0,774$)**

Pada suhu tinggi, laju penguapan air dari tanah/tanaman meningkat, yang turut menaikkan suhu yang dirasakan. Ini menjelaskan mengapa area perkotaan dengan vegetasi minim cenderung terasa lebih panas.

- ***Wind speed* ($r = 0,232$)**

Menunjukkan korelasi yang relatif lebih rendah. Angin bisa membantu menyejukkan, tetapi dalam data ini, pengaruhnya tidak sebesar variabel lain.

Hasil ini menunjukkan pola yang konsisten antara suhu, kelembapan absolut, kelembapan relatif, dan tekanan uap yang dapat dimanfaatkan untuk model prediksi *fuzzy* dalam simulasi UHI. Dengan hasil dari analisa korelasi ini digabungkan dengan studi pustaka terkait korelasi dan kausalitas keenam variabel tersebut, dibuatlah aturan *fuzzy* sebagai berikut:

Tabel 3.10 Aturan *Fuzzy*

No	Rule
1.	If Temperature 2m (°C) is Tinggi and Relative Humidity 2m (%) is Kering and Wind Speed 10m (km/h) is Light Winds then Apparent Temperature (°C) is Sangat Panas
2.	If Temperature 2m (°C) is Panas and Relative Humidity 2m (%) is Kering and Wind Speed 10m (km/h) is High Winds then Apparent Temperature (°C) is Panas
3.	If Temperature 2m (°C) is Sedang and Dew Point 2m (°C) is Sedikit Tidak Nyaman and Relative Humidity 2m (%) is Normal then Apparent Temperature (°C) is Nyaman
4.	If Temperature 2m (°C) is Dingin and Wind Speed 10m (km/h) is High Winds then Apparent Temperature (°C) is Sejuk
5.	If Temperature 2m (°C) is Panas and Vapour Pressure Deficit (kPa) is Tinggi and Evapotranspiration (mm) is Panas then Apparent Temperature (°C) is Panas
6.	If Dew Point 2m (°C) is Sangat Tinggi and Relative Humidity 2m (%) is Sangat Basah then Apparent Temperature (°C) is Hangat
7.	If Temperature 2m (°C) is Sedang and Wind Speed 10m (km/h) is High Winds then Apparent Temperature (°C) is Sejuk
8.	If Relative Humidity 2m (%) is Sangat Basah and Vapour Pressure Deficit (kPa) is Sangat Rendah Sekali and Evapotranspiration (mm) is Dingin then Apparent Temperature (°C) is Sejuk
9.	If Temperature 2m (°C) is Panas and Dew Point 2m (°C) is Sangat Tinggi and Wind Speed 10m (km/h) is High Winds then Apparent Temperature (°C) is Hangat
10.	If Temperature 2m (°C) is Sedang and Dew Point 2m (°C) is Sangat Nyaman and Relative Humidity 2m (%) is Kering then Apparent Temperature (°C) is Sejuk
11.	If Temperature 2m (°C) is Dingin and Relative Humidity 2m (%) is Sangat Basah then Apparent Temperature (°C) is Sejuk
12.	If Temperature 2m (°C) is Panas then Apparent Temperature (°C) is Panas

Aturan *Fuzzy* pada Tabel 3.10 dibuat dengan mempertimbangkan arah dan kekuatan korelasi berdasarkan hasil matriks Pearson pada Gambar 3.9, korelasi positif berarti variabel input dan output bergerak searah. Korelasi negatif berarti variabel input dan output bergerak berlawanan arah. Variabel dengan korelasi kuat (diatas [0.5]) diberikan prioritas dalam pembuatan aturan. Lalu aturan kombinasi membantu menangkap interaksi kompleks antara variabel input.

3.6.2 Fuzzifikasi

Tabel 3.11 Data Uji Coba

No	Variable	Nilai
1	Temperature	20,320
2	Dew Point	19,994
3	Relative Humidity	98
4	Wind Speed	6,45
5	Vapour Pressure Deficit	0,048
6	Evapotranspiration	0

Pada tahap ini, sistem *fuzzy* menerima input berupa angka pasti / crisp input. Di tahap ini, crisp input diubah menjadi nilai keanggotaan di setiap himpunan *fuzzy*. Sebagai contoh, Temperature memiliki tiga variable linguistik, ketika dimasukkan data Temperature dengan nilai 20,320 maka perhitungan setiap kategori nya yakni seperti berikut:

$$\mu_{\text{Temp Dingin}}(x) = \begin{cases} 0; & x \geq 22 \\ \frac{22-x}{22-15}; & 15 \leq x \leq 22 \\ 1; & x \leq 15 \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\mu_{\text{Temp Dingin}}(20,320) = \frac{22-20,320}{22-15} = 0,42 \quad (3.1a)$$

$$\mu_{\text{Temp Sedang}}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 18 \text{ or } x \geq 32 \\ \frac{x-18}{25-18}; & 18 \leq x \leq 25 \\ \frac{32-x}{32-25}; & 25 \leq x \leq 32 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\mu_{\text{Temp Sedang}}(20,320) = \frac{20,320-18}{25-18} = 0,33 \quad (3.2a)$$

$$\mu_{\text{Temp Panas}}(x) = \begin{cases} 0; & x \leq 28 \\ \frac{x-28}{35-28}; & 28 \leq x \leq 35 \\ 1; & x \geq 35 \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\mu_{\text{Temp Panas}}(20,320) = 0 \quad (\text{karena } x \leq 28) \quad (3.3a)$$

Sehingga derajat keanggotaan untuk tingkat relative humidity sebesar 96.0 yang paling sesuai adalah Tinggi dengan keanggotaan penuh (1), tanpa ambiguitas atau overlap dengan kategori lain. Variabel lain dihitung juga derajat keanggotaan nya masing masing untuk seluruh kategori. Maka dihasilkan berikut:

Tabel 3.12 Derajat Keanggotaan Temperature 2m

Variabel	Himpunan linguistik (a-b-c)	Rumus $\mu(x)$	$\mu(x_0)$
Temperature	Dingin (15-18-22)	$(22-x)/(22-18)$	0,42
	Sedang (18-25-32)	$(x-18)/(25-18)$	0,33
	Panas (28-31,5-35)	$0 \ (x < 28)$	0
Dew Point	Sedikit Tidak Nyaman (18-19,5-21)	$(21-x)/(21-19,5)$	0,67
	Sangat Tinggi ≥ 26	0	0
	Sangat Nyaman 10-11-12	0	0
Relative Humidity	Sangat Basah 83-91,5-100	1	1,00
	Normal 55-60-65	0	0
	Kering ≤ 57 -57-67	0	0
Wind Speed	Light 0-10,5-21	$6,45/10,5$	0,61
	High 22-27,5-33	0	0
VPD	Sangat Rendah Sekali 0-20-40	$6,45/20$	0,0024
	Tinggi 80-90-100	0	0
ET	Dingin 0-0-2	$1 \ (0 \leq 2)$	1,00
	Panas 3,5-4,75-6	0	0

3.6.3 Inferensi

Metode inferensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Mamdani, yang dipilih karena salah satunya keterbacaan aturan. Sistem ini menggunakan variabel linguistik seperti “Dingin,” “Sedang,” dan “Panas,” yang

intuitif dan mudah dipahami. Kedua, kesesuaian dengan variabel lingkungan. Sistem lingkungan sering kali membutuhkan interpretasi hasil yang jelas bagi pengguna, dan metode Mamdani mendukung kebutuhan ini. Ketiga, penggunaan fungsi keanggotaan. Mamdani bekerja optimal dengan fungsi keanggotaan trapezoidal dan triangular, menghasilkan output yang halus dan sesuai dengan aturan linguistik. Jika aturan pertama adalah:

[R1] Jika *Temperature* **Panas** dan *Relative Humidity* **Kering** dan *Wind Speed* **Ligh Winds** maka *Apparent Temperature* **Sangat Panas**

Karena ini metode Mamdani dengan operator logika AND = MIN, maka diambil nilai keanggotaan terendah di antara ketiga input:

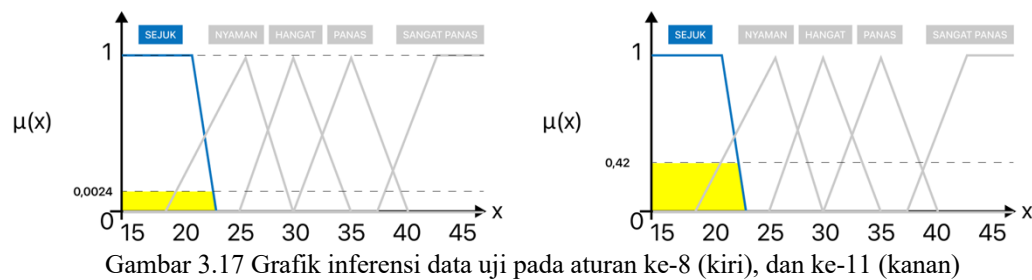
$$\alpha_{Rule1} = \min(\mu_{Panas}(20,3), \mu_{Kering}(98), \mu_{Light Winds}(6,45)) = \min(0, 0, 0.61) = 0$$

Untuk inferensi pada seluruh aturan maka sebagai berikut:

Tabel 3.13 Derajat Keanggotaan Temperature 2m

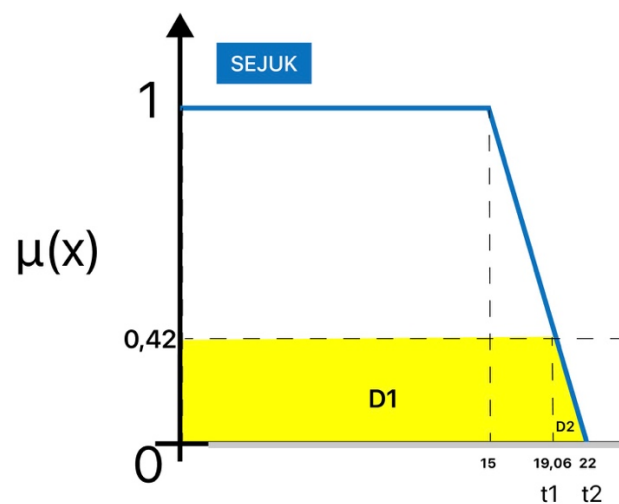
Aturan	Antecedent (μ)	π_i
1 (Panas $\wedge$ Kering $\wedge$ Light)	0 ; 0 ; 0,61	0
2 (Panas $\wedge$ Kering $\wedge$ High)	0 ; 0 ; 0	0
3 (Sedang $\wedge$ Sedikit-NN $\wedge$ Normal)	0,33 ; 0,67 ; 0	0
4 (Dingin $\wedge$ High)	0,42 ; 0	0
5 (Panas $\wedge$ VPD Tinggi $\wedge$ ET Panas)	0 ; 0 ; 0	0
6 (DP Sangat Tinggi $\wedge$ RH Sangat Basah)	0 ; 1	0
7 (Sedang $\wedge$ High)	0,33 ; 0	0
8 (RH Sangat Basah $\wedge$ VPD SRS $\wedge$ ET Dingin)	1 ; 0,0024 ; 1	0,0024
9 (Panas $\wedge$ DP Sangat Tinggi $\wedge$ High)	0 ; 0 ; 0	0
10 (Sedang $\wedge$ DP Sangat Nyaman $\wedge$ Kering)	0,33 ; 0 ; 0	0
11 (Dingin $\wedge$ RH Sangat Basah)	0,42 ; 1	0,42
12 (Panas)	0	0

Mamdani menggunakan komposisi aturan dengan fungsi MAX, menggabungkan grafik keanggotaan berdasarkan tiap anggotanya, sejuk dengan sejuk, nyaman dengan nyaman, dan seterusnya. Karena pada anggota selain sejuk bernilai 0, maka diabaikan, maka tersisa dua grafik pada satu anggota Sejuk:



Karena yang tertinggi (MAX) dari keanggotaan Sejuk adalah grafik aturan ke 11, maka yang dipakai adalah grafik aturan ke 11 saja.

$$\text{Tinggi klip maksimum} = \max(0,42; 0,002) = \mathbf{0,42} \quad (3.2a)$$



Gambar 3.18 Hasil Inferensi

Selanjutnya mencari titik potong garis miring pada ketinggian 0,42 yakni sebagai berikut dengan dipisah menjadi dua daerah, yakni D1 dan D2:

$$0,42 = \frac{22 - x_{t1}}{22 - 15} \Rightarrow t1 = x_{t1} = 19,06 \quad (3.3a)$$

Sehingga didapatkan titik kanan dari D1 (t_1) adalah 19,06. Selanjutnya mencari luas aktif dari kedua daerah persegi panjang D1 dan segitiga D2, yakni A_1 dan A_2 , serta momen M_1 dan M_2 .

Tabel 3.14 Derajat Keanggotaan Temperature 2m

Bagian	Rentang x (°C)	Tinggi	Luas (A)	Titik Berat $\bar{x}$
Persegi panjang	0 – 19,06	0,42	$A_1 = 19,06 \times 0,42 = \mathbf{8,01}$	$x_1 = 19,06/2 = \mathbf{9,53}$
Segitiga	19,06 - 22	0 – 0,42	$A_2 = \frac{1}{2} (22 - 19,06) 0,42 = \mathbf{0,62}$	$x_2 = 19,06 + \frac{1}{3} (22 - 19,06) = \mathbf{20,04}$

3.6.4 Defuzzification

Defuzzifikasi adalah proses mengonversi output *fuzzy* menjadi nilai tegas (crisp output) yang dapat digunakan dalam visualisasi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah Centroid (Center of Gravity). Rumus Defuzzifikasi:

$$Z^* = \frac{\int \mu(z)z \, dz}{\int \mu(z) \, dz} \quad (3.4)$$

Keterangan :

μ : derajat keanggotaan output.

Z : nilai representatif (nilai tengah) dari himpunan *fuzzy* output.

Pada rumus diatas kita bisa menghitung momen :

$$M_1 = \int_0^{15} 0,42z \, dz = \left[0,42 * \frac{1}{2} \right]$$

$$M = A_1 X_1 + A_2 X_2 = 8,01 (9,53) + 0,62(20,04) = 86,0$$

$$A_{tot} = A_1 + A_2 = 8,63$$

$$Z^* = \frac{M}{A_{tot}} = 10,3^\circ C$$

Nilai 10,3 °C berada dalam rentang “Sejuk”; karena persegi panjang 0–19 °C dominan, pusat massa bergeser ke kiri (lebih dingin) dibanding batas 15 °C.

3.6.5 Crisp Output

Crisp output adalah nilai numerik hasil defuzzifikasi yang mewakili intensitas warna pada *heatmap*. Nilai ini akan dipetakan ke skala warna yang halus dalam *heatmap* sebagai berikut:

Tabel 3.15 Skema warna *heatmap inferno*

Hex	Keterangan	Suhu
#000004	Hitam kebiruan (paling dingin)	< 18
#1B0C41	Ungu gelap	18-22
#4D0A6D	Ungu tua	22-24
#781C6D	Magenta keunguan	24-28
#A42C60	Merah magenta sedang	28-30
#CF4446	Merah jingga	30-32
#ED6925	Oranye tua	32-36
#FB9B06	Kuning-oranye terang	36-40
#FCFFA4	Kuning pucat (paling panas)	> 40



Gambar 3.19 Colormap Inferno

Berdasarkan Tabel 3.15 dan gambar 3.19, Skema warna yang digunakan merupakan salah satu dari *perceptual-uniform colormap* yang artinya palet warna yang dirancang supaya perubahan kecil pada nilai data menghasilkan perubahan warna yang terasa sama besarnya oleh mata manusia di seluruh rentang warnanya dan juga ramah untuk buta warna.

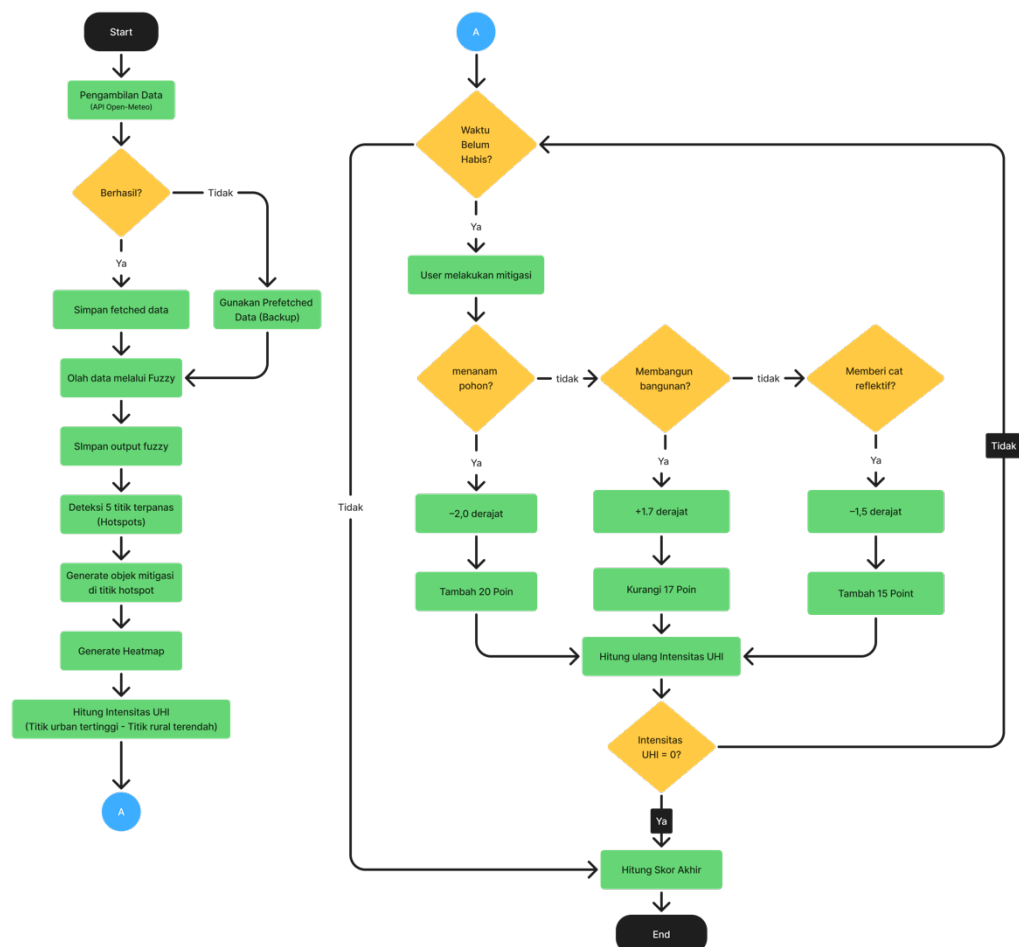
3.7 Kalkulasi Intensitas UHI

Setelah didapatkan hasil suhu AT pada setiap koordinat di rural dan kota, maka dilakukan perhitungan intensitas UHI agar dapat dihitung apakah terdapat UHI atau tidak di kawasan Kota Malang. Hasil Kalkulasi akan di taruh di *interface* permainan dan diupdate ketika user melakukan aksi pergi ke waktu tertentu untuk melihat suhu pada waktu tersebut. Contoh perhitungannya sebagai berikut:

$$UHI_{Kota} = 40 - 30 \quad (3.7)$$

$$UHI_{Kota} = 10^{\circ}\text{C} \quad (3.7a)$$

3.8 System Implementation



Gambar 3.20 Alur Sistem

Berdasarkan Gambar 3.20, Ketika pemain memulai permainan, sistem akan mengambil enam data cuaca yang telah disebutkan pada Gambar 3.1 pada waktu saat itu juga untuk seluruh titik yang telah ditentukan pada Lampiran 1 melalui API ke Open-Meteo.

Setelah didapat, data cuaca akan dimasukkan ke model *Fuzzy* didalam *game* dan menghasilkan output berupa *Apparent Temperature* untuk seluruh titik ROI. Lalu akan diubah oleh sistem menjadi warna yang akan divisualisasikan dalam bentuk *heatmap* pada *game*.

Intensitas UHI akan dihitung dengan cara mengambil *mean* dari seluruh data AT di seluruh titik rural Kota Malang, lalu setiap nilai AT disetiap titik didalam Kota Malang satu-persatu akan di selisihkan dengan hasil *mean* suhu rural. Setelah itu, hasil dari setiap perhitungan tadi akan di lakukan operasi *mean* untuk menjadi satu *value* Intensitas UHI.



Gambar 3.21 Objek Mitigasi 1

Selain itu, ada tambahan berupa *pop up* berwarna merah di semua hotspot di titik dengan suhu tertinggi dari rata-rata suhu di titik lain seperti pada gambar 3.22. Pemain dapat memonitor setiap titik, melihat intensitas suhu dan pilihan

mitigasi antara penanaman tumbuhan atau pengubahan albedo dengan mengecat menjadi warna hijau dan reflektif, sesuai info yang didapatkan penulis melalui salah satu sarjana lulusan arsitektur.

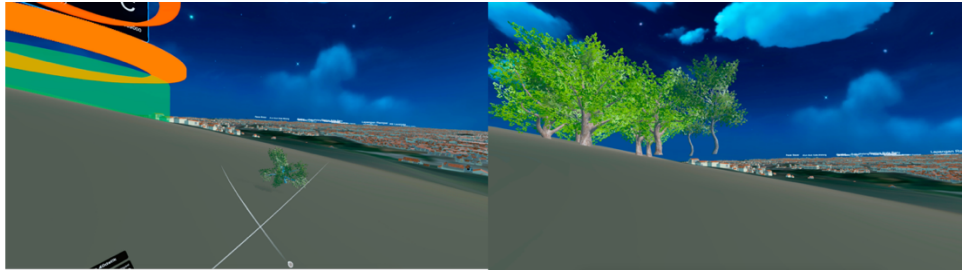


Gambar 3.22 Objek Mitigasi 2

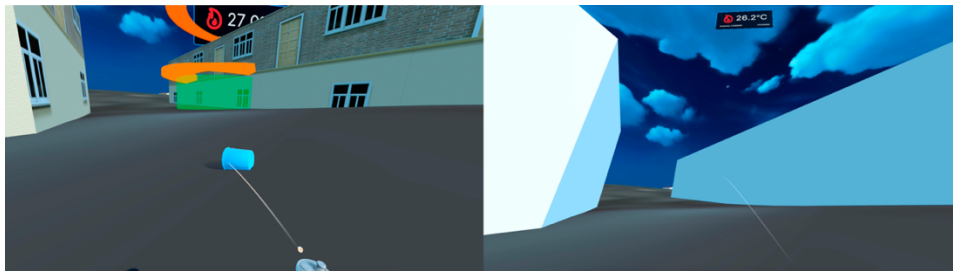
Gambar 3.22 memperlihatkan obyek mitigasi yang perlu di bawa pemain ke tempat Hotspot perlu dimana saat pemain melakukan aksi mitigasi, suhu AT pada beberapa titik terdekat dari hotspot dengan nilai AT diatas rata-rata titik lain akan dikurangi dan akan dilakukan perhitungan intensitas UHI kembali. Ketika pemain melakukan aksi melihat UHI pada masa lampau juga akan men-*trigger* perhitungan ulang intensitas UHI.



Gambar 3.23 Pilihan mitigasi Building (kiri) dengan hasilnya (kanan)



Gambar 3.24 Pilihan mitigasi Pohon (kiri) dengan hasilnya (kanan)



Gambar 3.25 Pilihan mitigasi Cat Reflektif (kiri) dengan hasilnya (kanan)

Gambar 3.23 hingga 3.25 memperlihatkan obyek mitigasi yang perlu di bawa pemain ke tempat Hotspot perlu dimana saat pemain melakukan aksi mitigasi, suhu AT pada beberapa titik terdekat dari hotspot dengan nilai AT diatas rata-rata titik lain akan dikurangi dan akan dilakukan perhitungan intensitas UHI kembali. Ketika pemain melakukan aksi melihat UHI pada masa lampau juga akan *trigger* perhitungan ulang intensitas UHI. Ketika Memitigasi Pohon, maka titik tersebut berkurang 0.3 suhunya, ketika mitigasi cat, maka titik tersebut berkurang 0.5 suhu. Lalu ketika mitigasi bangunan, maka bertambah 0.3 suhunya.



Gambar 3.26 Tampilan *Game Over*

Gambar 3.26 memperlihatkan menu ketika permainan selesai. Dimana terhubung dengan tantangan yang terdapat dalam *game* diantaranya terdapat tantangan waktu terbatas untuk mitigasi hanya 10 menit di sejumlah hotspot sebelum UHI mencapai tingkat berbahaya. Ini mendorong manajemen waktu dan strategi. Lalu Keterbatasan sumber daya, pemain hanya memiliki jumlah pojong, cat reflektif, dan bangunan terbatas, dan terdapat poin setiap melakukan pilihan mitigasi.

3.9 Evaluasi

Penelitian ini menggunakan dua jenis evaluasi, dari segi teknis sistem *fuzzy* dan dari pemain permainan.

3.9.1 Evaluasi Teknis Sistem *Fuzzy*

Untuk mengevaluasi sistem *fuzzy*, akan dihitung *Root Mean Square Error* (RMSE) dari dataset ketujuh variabel cuaca yang didapatkan selama tahun 2023 sebagai data latih dan dataset realtime yang diambil pada saat hari uji coba sebagai data uji. Dataeset mencakup kombinasi input yang relevan dengan sistem yang dirancang. Lalu digunakan data uji yang terpisahkan dari data pelatihan untuk memastikan hasil pengujian yang objektif. Berikut merupakan rumus dari RMSE:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\sum \frac{(\hat{Y}-Y)^2}{n}} \quad (3.8)$$

Keterangan:

$\hat{Y}$ = nilai prediksi
 Y = nilai aktual
 n = jumlah data

Untuk menginterpretasikan hasil dari RMSE, pertama dihitung skala output, Untuk data yang akan digunakan, range nilai dari AT adalah 15°C sampai 35°C, maka:

$$\text{Range Target} = 35 - 15 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

Selanjutnya yakni menormalisasikan nilai RMSE menggunakan formula berikut:

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\text{Range Target}} \times 100\% \quad (3.8)$$

Misalnya, RMSE hasil *fuzzy* adalah 0.9181 °C, maka perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$\text{Normalized RMSE} = \frac{0.9181}{20} \times 100\% = 4.59\% \quad (3.8)$$

Untuk menginterpretasikan hasil dari Normalized RMSE, seperti yang dijelaskan oleh Despotovic et al. (2016), NRMSE < 10% dianggap sangat baik, baik jika 10% < NRMSE < 20%, cukup jika 20% < NRMSE < 30%, dan buruk jika NRMSE > 30%.

3.9.2 Evaluasi Persepsi Pengguna

Untuk mengevaluasi persepsi pengguna terhadap *game* VR yang dikembangkan, penelitian ini menggunakan System Usability Scale (SUS). SUS adalah metode standar yang digunakan secara luas dalam evaluasi kegunaan (*usability*) dan memberikan cara yang cepat dan efisien untuk mengukur pengalaman pengguna dalam menggunakan sistem atau aplikasi tertentu, termasuk aplikasi berbasis VR.

Menurut Brooke (1996), SUS terdiri dari sepuluh pernyataan yang mencakup berbagai aspek kegunaan sistem, seperti kemudahan penggunaan, efisiensi, dan tingkat kepuasan pengguna. Pengguna diminta memberikan tanggapan terhadap setiap pernyataan dengan memilih nilai pada skala Likert 5 poin, dari sangat tidak setuju (1) hingga sangat setuju (5).

Tabel 3.15 The Positive SUS, Sauro (2011)

No	Pernyataan
1.	Saya ingin sering menggunakan <i>game</i> ini
2.	Saya merasa <i>game</i> ini terlalu rumit untuk digunakan
3.	Saya merasa <i>game</i> ini mudah digunakan
4.	Saya merasa perlu bantuan teknis untuk dapat memainkan <i>game</i> ini
5.	Saya merasa fitur-fitur dalam <i>game</i> ini saling terintegrasi dengan baik
6.	Saya merasa <i>game</i> ini memiliki banyak inkonsistensi
7.	Saya yakin sebagian besar orang akan cepat belajar memainkan <i>game</i> ini
8.	Saya merasa percaya diri saat memainkan <i>game</i> ini
9.	Saya tidak perlu banyak belajar sebelum bisa memainkan <i>game</i> ini
10.	Saya merasa harus mempelajari banyak hal terlebih dahulu untuk bermain

Pada Tabel 3.15 diperlihatkan 10 pertanyaan standard untuk menguji SUS, yakni menggunakan *The Positive SUS*, atau versi positif dari pertanyaan SUS, dengan langkah - langkah dalam perhitungan *System Usability Scale* sebagai berikut:

1. Jika pertanyaan positif, maka skor jawaban dikurangi 1, sehingga ditulis $x_i - 1$.
2. Jika pertanyaan negatif, maka 5 dikurangi skor jawaban, ditulis $5 - x_i$.
3. Menjumlahkan seluruh skor pertanyaan setiap responden.
4. Langkah selanjutnya yakni total skor dikalikan dengan 2,5 untuk menormalkan skor *SUS* menjadi rentang antara 0 hingga 100 (Lewis, 2018).
5. Skor *SUS* dari keseluruhan responden diperoleh dari rata-rata skor *SUS* untuk setiap responden menggunakan rumus $\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$.

Tabel 3.16 *The Sauro-Lewis CGS (Curved Grading Scale)*, Sauro et al. (2014)

SUS Score range	Grade	Percentile Range
84.1 – 100	A+	96 – 100
80.8 – 84.0	A	90 – 95
78.9 – 80.7	A-	85 – 89
77.2 – 78.8	B+	80 – 84
74.1 – 77.1	B	70 – 79
72.6 – 74.0	B-	65 – 69
71.1 – 72.5	C+	60 – 64
65.0 – 71.0	C	41 – 59
62.7 – 64.9	C-	35 – 40
51.7 – 62.6	D	15 – 34
0.0 – 51.6	F	0 – 14

Setelah didapatkan hasil akhir dari SUS untuk sistem, selanjutnya diukur grade dari sistem tersebut menggunakan *Sauro-Lewis CGS* untuk mendapatkan interpretasinya (lihat Tabel 3.16).

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Sistem *Fuzzy*

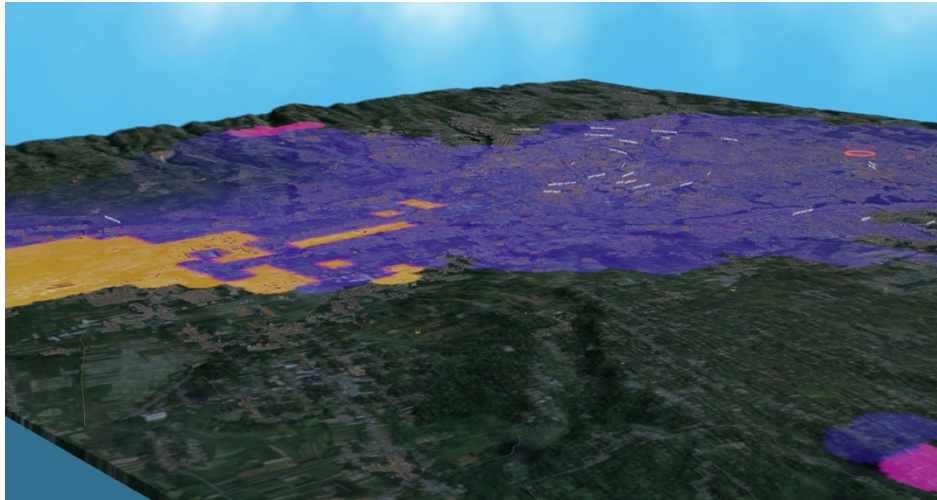
Pengujian sistem *Fuzzy* pada *Game “Malang Heat”* ditujukan untuk mengetahui seberapa akurat metode yang telah dibangun ini dalam mengukur *Apparent Temperature* di seluruh titik kota Malang. Pengujian dilakukan menggunakan *Root Mean Square Error (RMSE)* dan *Mean Absolute Error (MAE)*.

4.1.1 Hasil *Fuzzy* pada *Game*

Fuzzy dijalankan tepat setelah sistem *game* berhasil mendapatkan data dari *Open-Meteo* ketika *game* dijalankan. Sistem *Fuzzy* akan mengolah seluruh data dan menyimpannya pada file CSV di dalam *game*. Berikut merupakan hasil perhitungan *Fuzzy*:

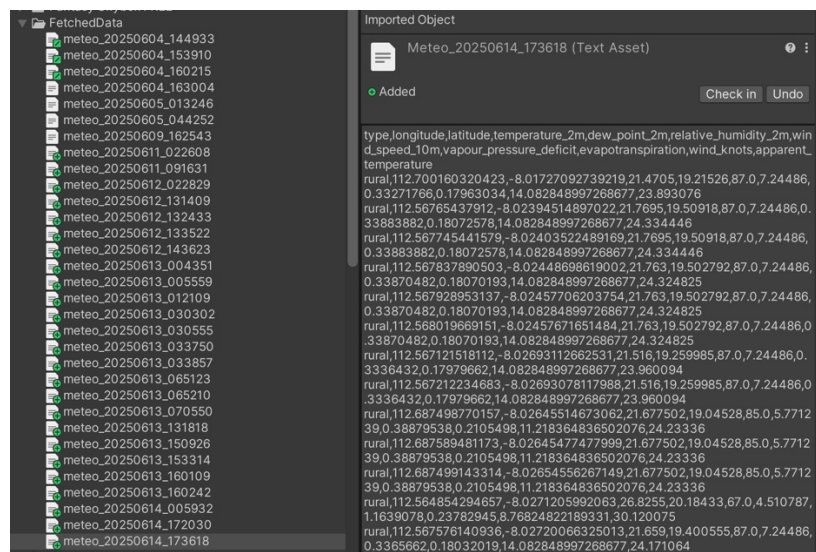


Gambar 4.1 Hasil Perhitungan *Fuzzy* Ditampilkan pada Hotspot di *Game*



Gambar 4.2 Hasil *Heatmap* dari titik titik data *fuzzy*

Gambar 4.1 dan Gambar 4.2 memperlihatkan informasi hasil Intensitas UHI dan hasil *heatmap*.



Gambar 4.3 File Output perhitungan *Fuzzy*

Pada gambar 4.3 diperlihatkan isi file .csv berisi data hasil prediksi AT yang berhasil digenerate sistem *Fuzzy* yang sudah sesuai dengan rancangan perhitungan di MATLAB. File ini nantinya digunakan untuk bahan visualisasi *heatmap* dan informasi pada antarmuka didalam *game*.

4.1.2 Data yang Digunakan Untuk Evaluasi

Dataset latih yang dipakai adalah data *Apparent Temperature* aktual yang diambil bersamaan saat pengambilan data dari *Open-Meteo* di awal *game* dimulai. Sedangkan dataset uji yang dipakai adalah data *Apparent Temperature* hasil prediksi sistem *Fuzzy*.

Tabel 4.1 Dataset Latih dan Uji

No.	Tipe	Longitude	Latitude	AT Actual (x)	AT Predicted ($\hat{y}$)	Residual
1.	<i>Rural</i>	112.70016	-8.01727	23.893076	25.5	-1.6069
2.	<i>Rural</i>	112.56765	-8.02394	24.334446	25.5	-1.1655
3.	<i>Rural</i>	112.56774	-8.02403	24.334446	25.5	-1.1655
...						
1330	<i>urban</i>	112.63720	-7.99762	29.37313	29.499997	-0.126867
1331	<i>urban</i>	112.69157	-7.98384	28.02904	27.499729	0.529315

Tabel 4.1 merupakan dataset latih dan uji yang akan digunakan untuk evaluasi. Jika dilihat data selengkapnya, didapatkan rentang data AT Actual sebesar 23.349 – 30.120°C, lalu untuk *Predicted AT* dengan rentang 25.500 - 31.225°C, dan residual ada pada rentang 2.431 - 2.151°C. Juga Tidak ditemukan nilai prediksi yang kosong (*NaN*) sehingga semua prediksi valid.

4.1.3 Hasil Evaluasi Model *Fuzzy*

Berikut adalah hasil evaluasi nilai *RMSE* dan *Normalized RMSE* untuk model *Fuzzy* yang telah diterapkan:

Tabel 4.2 Hasil evaluasi RMSE dan Normalized RMSE

Paramater Evaluasi	Nilai
<i>Root Mean Square Error (RMSE)</i>	0.9181°C
<i>Normalized RMSE</i>	$\frac{0.9181}{30.120-23.349} \times 100\% = 13.56\%$

Pada tabel 4.2 diperlihatkan dari pengujian yang dilakukan terhadap total 1331 titik data (*urban* dan *rural*), diperoleh nilai *Root Mean Square Error (RMSE)* sebesar 0.9181°C, yang menggambarkan kesalahan kuadrat rata-rata prediksi, dan *Normalized RMSE* sebesar 13.56%, yang mana menurut Despotovic et al. (2016), masuk kategori cukup.

4.2 Pengujian *System Usability Scale*

Untuk mengukur seberapa efektif metode visualisasi *heatmap* dalam memberikan pemahaman efek UHI kepada pemain maka dilakukan *System Usability Scale*.



Gambar 4.4 Tester guru SMA (kiri) dan Mahasiswa (kanan)

Tabel 4.3 Hasil skor asli SUS

No	Responden	Skor Asli										Jumlah Skor
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	
1	R1	3	3	2	4	5	3	4	4	2	4	34
2	R2	3	2	5	4	3	3	4	5	5	2	38
3	R3	4	2	4	4	4	3	4	4	4	3	36
4	R4	5	3	4	4	4	2	4	4	5	4	39
5	R5	4	4	3	4	4	3	2	4	4	1	33
6	R6	4	3	4	4	4	0	3	1	4	4	31
7	R7	4	3	4	4	4	0	4	4	4	4	35
8	R8	3	0	3	1	4	0	3	1	4	0	19
9	R9	4	4	4	4	4	0	4	4	4	4	36
10	R10	4	4	4	3	4	0	4	4	4	4	35
11	R11	4	1	4	4	4	0	4	3	4	4	32
12	R12	4	0	3	3	3	0	4	3	4	4	28
13	R13	4	3	4	4	4	1	4	3	4	4	35
14	R14	4	3	4	4	4	0	4	3	4	4	34
15	R15	4	2	4	3	4	0	4	3	4	4	32
16	R16	4	4	4	4	3	1	3	4	3	4	34
17	R17	4	2	4	4	4	0	4	4	4	4	34
18	R18	4	3	4	4	4	0	4	3	4	4	34
19	R19	4	3	4	3	4	0	4	4	4	4	34
20	R20	4	4	4	4	4	0	3	4	4	4	35
21	R21	4	3	4	4	3	0	4	4	4	4	34

Tabel 4.3 mengungkapkan bahwa skor asli SUS (rentang 0–40) untuk 21 responden bervariasi dari 19 (R8) hingga 36 (R1, R4, R9), dengan rata-rata tepat 33. Mayoritas responden merupakan mahasiswa, siswa SMA, dan guru SMP di Kota Malang.

Tabel 4.4 Hasil akhir dan rata rata skor SUS

Responden (R)	Hasil Dikali 2.5
R1	85
R2	95
R3	90
R4	97,5
R5	82,5
R6	77,5
R7	87,5
R8	47,5
R9	90
R10	87,5
R11	80
R12	70
R13	87,5
R14	85

R15	80
R16	85
R17	85
R18	85
R19	85
R20	87,5
R21	85
Rata - Rata	83,42

Berdasarkan 21 responden pada Tabel 4.4, skor SUS rata-rata sebesar 83,42 (rentang 47,5–97,5) menempatkan sistem pada kategori “A” menurut skala *Sauro-Lewis Curved Grading Scale* (2014). Mayoritas responden (lebih dari 70 %) memberi nilai di kisaran 77,5–90, yang mencerminkan konsistensi persepsi positif terhadap kemudahan penggunaan dan kepuasan antarmuka.

Namun, terdapat outlier signifikan pada R8 (47,5) serta beberapa skor sedikit lebih rendah (misalnya R12 = 70; R6 = 77,5), yang mengindikasikan hambatan khusus. Keberadaan satu atau dua nilai rendah ini menegaskan perlunya pengecekan kualitatif (wawancara atau *usability walkthrough*) untuk menggali titik friksi pengguna tersebut. Secara keseluruhan, tingginya konsentrasi skor di atas ambang 80 membuktikan sistem telah berhasil memenuhi standar kegunaan yang sangat baik (nilai A), namun penyempurnaan pada area-area dengan skor rendah dapat mendorong kepuasan pengguna hingga memasuki kategori “A+” (≥ 84).

4.3 Integrasi Islam

Setelah mengetahui hasil pengujian efektivitas visualisasi *heatmap* dalam meningkatkan pemahaman pemain mengenai efek *Urban Heat Island* (UHI) melalui evaluasi menggunakan *System Usability Scale* (SUS), maka penting pula untuk menelaah hasil tersebut dalam perspektif nilai-nilai Islam.

Dalam Islam, proses edukasi yang bertujuan memperluas wawasan, meningkatkan pemahaman, dan menumbuhkan kesadaran untuk melakukan kebaikan merupakan hal yang sangat dianjurkan. Setiap metode atau media pembelajaran yang digunakan, selama ia membantu seseorang untuk lebih memahami ciptaan Allah dan menumbuhkan kesadaran untuk menjaga keseimbangan lingkungan, sesungguhnya merupakan implementasi nyata dari perintah agama.

Hal ini selaras dengan firman Allah dalam QS. *Al-Mujadalah* ayat 11:

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ ءَامَنُوا إِذَا قِيلَ لَكُمْ تَفَسَّحُوا فِي الْمَجَالِسِ فَافْسَحُوا يَفْسَحِ اللَّهُ لَكُمْ ؕ وَإِذَا قِيلَ انشُزُوا فَانْشُزُوا ۚ وَالَّذِينَ ءَامَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۗ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

“Wahai orang-orang yang beriman, apabila dikatakan kepadamu “Berilah kelapangan di dalam majelis-majelis,” lapangkanlah, niscaya Allah akan memberi kelapangan untukmu. Apabila dikatakan, “Berdirilah,” (kamu) berdirilah. Allah niscaya akan mengangkat orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat. Allah Mahateliti terhadap apa yang kamu kerjakan.” (QS. Al-Mujadalah (58:11))

Menurut Tafsir Jalalain, ayat ini secara jelas menegaskan pentingnya sikap keterbukaan dan kesediaan untuk menerima ilmu dan nasihat dalam majelis ilmu, serta semangat untuk senantiasa aktif dalam melakukan amal-amal kebaikan. Allah menjanjikan derajat tinggi di sisi-Nya kepada dua kelompok manusia: yaitu mereka yang memiliki iman yang kuat dan mereka yang terus-menerus menuntut ilmu serta mengamalkannya dengan sungguh-sungguh.

Dalam konteks penelitian ini, penggunaan visualisasi *heatmap* yang telah diuji efektivitasnya mencerminkan secara langsung nilai-nilai yang terkandung dalam ayat tersebut. Proses pengujian yang melibatkan pemain untuk membuka

wawasan melalui media interaktif seperti *heatmap*, menggambarkan implementasi sikap berlapang dada dalam menerima ilmu pengetahuan baru.

Selain itu, hasil evaluasi menggunakan *System Usability Scale* juga memperlihatkan bahwa media pembelajaran yang digunakan dapat diterima dengan baik oleh pengguna. Dalam perspektif Islam, media pembelajaran yang efektif dan mudah dipahami akan mendorong umat Islam lebih bersemangat dalam menuntut ilmu serta mengamalkannya dalam kehidupan sehari-hari. Oleh karena itu, penggunaan media edukasi yang efektif seperti *heatmap* dalam penelitian ini turut mendukung prinsip Islam dalam menjaga kelestarian alam, dengan membentuk kesadaran manusia tentang pentingnya keseimbangan lingkungan dan tanggung jawab sebagai khalifah di muka bumi.

Semua ini sejalan dengan janji Allah dalam QS. *Al-Mujadalah* ayat 11, bahwa Allah akan mengangkat derajat mereka yang sungguh-sungguh beriman dan berilmu, serta mengamalkannya demi kemaslahatan kehidupan manusia dan alam semesta.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem penentuan visualisasi warna *heatmap* pada *game* edukasi simulasi *Urban Heat Island* Kota Malang berbasis VR dengan menggunakan logika *Fuzzy Mamdani*. Dengan data yang digunakan yaitu 1331 titik di Kota Malang dan sekitarnya. Dari setiap titik dengan enam variabel cuaca yang digunakan terdiri dari *temperature*, *dew point*, *evapotranspiration*, *vapour pressure deficit*, *wind speed*, dan *relative humidity* dengan masing masing fungsi keanggotaan. Keenam variable ini menjadi input pada sistem *fuzzy* dalam memprediksi suhu yang dirasakan. Kemudian output *apparent temperature* tadi divisualisasikan dalam bentuk *heatmap* sesuai dengan derajat warna pada skema colormap *inferno*.

Hasil pengujian sistem menunjukkan bahwa model *fuzzy* yang dirancang cukup akurat untuk memprediksi *apparent temperature* melalui beberapa data cuaca di Kota Malang, terbukti dengan skor RMSE sebesar 0.9181°C dan MAE sebesar 0.7959°C, dimana angka tersebut cukup rendah. Pengujian *System Usability Scale* (SUS) pada 21 responden menghasilkan rata-rata skor 83, masuk kategori “A” menurut skala *Sauro-Lewis Curved Grading Scale* (2014).. Ini menegaskan bahwa antarmuka dan interaksi *game* VR secara umum memuaskan, meski masih terdapat beberapa outlier (misal R8, R12) yang mengalami hambatan *learnability*.

5.1 Saran

Berdasarkan temuan tersebut, penulis mengajukan beberapa rekomendasi untuk penyempurnaan dan penelitian lanjutan:

1. Perluasan sampel dan demografis

Untuk memperkuat temuan, disarankan melakukan uji coba pada populasi yang lebih besar dan heterogen seperti rentang usia yang lebih banyak, latar belakang pendidikan, dan profesi. Hal ini dapat mengevaluasi sejauh mana efektivitas visualisasi *heatmap* VR “*Malang Heat*” berlaku pada kelompok pengguna yang berbeda.

2. Penyempurnaan Usability Melalui Studi Kualitatif

Beberapa hasil SUS terdeteksi rendah, sehingga baiknya dilakukan studi kualitatif (misalnya wawancara terstruktur atau *usability walkthrough*) dengan responden berskor rendah. Temuan dari studi ini akan menjadi dasar rekomendasi perbaikan pada tutorial awal, *tooltips*, dan penempatan kontrol antarmuka, sehingga pengalaman pengguna menjadi lebih intuitif dan meminimalkan kurva belajar saat pertama kali menggunakan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- almeganews. (n.d.). *Titik Embun (Dew Point) dan Bagaimana Mengukurnya*. Almega News. <https://almeganews.wordpress.com/2020/04/09/titik-embun-dew-point-dan-bagaimana-mengukurnya/>
- Al-Mahalli, J. al-Din, & al-Suyuti, J. al-Din. (2003). *Tafsir Jalalain*. Beirut: Dar al-Kutub al-Ilmiyah.
- Aqsar, M. A. (2018). Komunikasi Dalam Pendidikan. *Jurnal Ilmiah Al-Hadi*, 3(2), 699. <https://doi.org/10.54248/alhadi.v3i2.356>
- Azhari, F., Sukoco, N. B., & Fatoni, K. I. (2016). Studi Karakteristik Parameter Meteorologi dan Gelombang untuk Operasi Amfibi di Perairan Singkawang Kalimantan Barat. *Jurnal Chart Datum*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v6i1.169>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Darmawi, D. Y., Nurcahyo, G. W., & Sumijan, S. (2020). *Fuzzy Sistem Fuzzy Menggunakan Metode Sugeno Dalam Akurasi Penentuan Suhu Kandang Ayam Pedaging*. *Jurnal Informasi Dan Teknologi*. <https://doi.org/10.37034/jidt.v3i2.95>
- Despotovic, M., Nedic, V. M., Despotovic, D., & Cvetanovic, S. (2016). Evaluation of empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 246–260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.058>
- Fajrin, & Dwi Marsiska Driptufany. (2019). Identifikasi Urban Heat Island Kota Padang Menggunakan Teknik Pengindraan Jauh dan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang*, 6(1 SE-Artikel), 1–7. <https://doi.org/10.21063/jts.2019.V601.01-7>
- Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584–585, 1040–1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Ho, H. C., Knudby, A., Xu, Y., Hodul, M., & Aminipouri, M. (2016). A comparison of urban heat islands mapped using skin temperature, air temperature, and apparent temperature (Humidex), for the greater Vancouver area. *Science of The Total Environment*, 544, 929–938. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.021>
- Ibnu Katsir. (2000). *Tafsir al-Qur'an al-Azhim* (Tahqiq: Sami bin Muhammad al-Salamah, Vol. 1–8). Dar Thayyibah.

- Kesavan, R., & Anitha, R. (2014). MARSpline model for lead seven-day maximum and minimum air-temperature prediction in Chennai, India. *Theoretical and Applied Climatology*, 118, 665-672. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1070-2>
- Kusumaningrum, K. W., Saraswati, R., & Wibowo, A. (2022). Green Open Space Development Based On Urban Heat Island Phenomenon in Malang City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 950(1), 012066. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012066>
- Lamb, R. L., Annetta, L., Firestone, J., & Etopio, E. (2018). A meta-analysis with examination of moderators of student cognition, affect, and learning outcomes while using serious educational *games*, serious *games*, and simulations. *Computers in Human Behavior*, 80, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.10.040>
- Lewis, J. R. (2018). The System Usability Scale: Past, Present, and Future. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 34(7), 577–590. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307>
- Mahendra, Y. I., & Pradoto, W. (2016). Transformasi Spasial di Kawasan Peri Urban Kota Malang. *Jurnal Pembangunan Wilayah & Kota*, 12(1), 112. <https://doi.org/10.14710/pwk.v12i1.11462>
- Mathew, A., Khandelwal, S., & Kaul, N. (2018). Analysis of diurnal surface temperature variations for the assessment of surface urban heat island effect over Indian cities. *Energy and Buildings*, 159, 271–295. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.062>
- Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *Journal of Environmental Management*, 197, 522–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095>
- Ngarambe, J., Santamouris, M., & Yun, G. Y. (2022). The Impact of Urban Warming on the Mortality of Vulnerable Populations in Seoul. *Sustainability*, 14(20), 13452. <https://doi.org/10.3390/su142013452>
- Nguyen, J. L., Schwartz, J., & Dockery, D. W. (2014). The relationship between indoor and outdoor temperature, apparent temperature, relative humidity, and absolute humidity. *Indoor Air*, 24(1), 103–112. <https://doi.org/10.1111/ina.12052>
- Nikentari, N., Bettiza, M., & Sastypratiwi, H. (2018). Prediksi Kecepatan Angin Menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy (ANFIS) dan Radial Basis Function Neural Network (RBFNN). *Jurnal Edukasi Dan Penelitian Informatika (JEPIN)*, 4(1), 70. <https://doi.org/10.26418/jp.v4i1.25558>
- Ningrum, W. (2018). Urban Heat Island towards Urban Climate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1), 012048.

<https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012048>

Panecki, T., & Pokojski, W. (2019). A missing link in cartographic visualization? A case study of “heat maps” effectiveness. *Abstracts of the ICA, 1*, 1–1. <https://doi.org/10.5194/ica-abs-1-288-2019>

Ramos-Fernández, J. C., Balmat, J.-F., Márquez-Vera, M. A., Lafont, F., Pessel, N., & Espinoza-Quesada, E. S. (2016). *Fuzzy Modeling Vapor Pressure Deficit to Monitoring Microclimate in Greenhouses***This work was supported in part by the CONACYT-México, by grant program: sabbatical stay abroad I0010-2014-02, under grant No. 246344. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 371–374. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.068>

Sidharta, M. N., & Putri, L. (2023). Evaluasi Desain Aplikasi Delivery Menggunakan Metode System Usability Scale. *JNATIA (Jurnal Nasional Teknologi Informasi dan Aplikasinya)*, 2(1).

Subadyo, A. T., Tutuko, P., & Bimatyugra Jati, R. M. (2019). Implementation Analysis of Green City Concept in Malang - Indonesia. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 7(2), 36–52. https://doi.org/10.14246/irspsd.7.2_36

Sukaridhoto, S., Rante, H., Agus Zainuddin, M., & Putri Nourma Budiarti, R. (2020). Pengenalan Teknologi Virtual Reality Dan Augmented Reality Sebagai Pendukung Edukasi Untuk Sekolah Menengah Di Gresik. *Community Development Journal*, 4(1). <https://doi.org/10.33086/cdj.v4i1.1410>

Sunardi, S., Yudhana, A., & Furizal, F. (2022). Optimasi Pengendalian Suhu dan Kelembapan Ruangan di Kota Yogyakarta Menggunakan Metode Fuzzy. *JURIKOM (Jurnal Riset Komputer)*, 9(6), 1749. <https://doi.org/10.30865/jurikom.v9i6.5060>

Triyatno, T., & others. (2021). Identifikasi Suhu Permukaan Darat Menggunakan Teknologi Geospasial: Studi Kasus Kota Bukittinggi, Provinsi Sumatera Barat (Identification of Land Surface Temperature Using Geospatial Technology: Case Study in Bukittinggi City, West Sumatra Province). *J SIG (Jurnal Sains Informasi Geografi)*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.31314/jsig.v4i1.711>

Uzoukwu, N., & Purqon, A. (2023). Fuzzy logic model for predicting the heat index [arXiv:2210.16051]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.16051>

Venter, Z. S., Chakraborty, T., & Lee, X. (2021). Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms. *Science Advances*, 7(22). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9569>

Vlachopoulos, D., & Makri, A. (2017). The effect of games and simulations on higher education: a systematic literature review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 14(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s41239-017-0062-1>

Wang, Z., Zhang, A., & Liu, M. (2022). Daily Spatial Distribution of Apparent Temperature Comfort Zone in China Based on Heat Index. *Remote Sensing*, 14(19), 4999. <https://doi.org/10.3390/rs14194999>

LAMPIRAN

Lampiran 1 Titik Koordinat Area Studi

1. Daerah Kota Malang (1231 Titik)

No	X	Y
1	112.571947246	-7.93784688399999
2	112.574947246	-7.93784688399999
3	112.574947246	-7.94084688399999
4	112.577947246	-7.93784688399999
5	112.577947246	-7.94084688399999
...		
1011	112.688947246	-7.99484688399999
1012	112.691947246	-7.98284688399999
1013	112.691947246	-7.98584688399999

2. Daerah Rural sekitar Kota Malang (100 Titik)

No	X	Y
1	112.564067952	-7.93087097800001
2	112.564067952	-7.93587097800001
3	112.564067952	-7.94087097800001
4	112.564067952	-7.94587097800001
5	112.564067952	-7.93087097800001
...		
221	112.681930776698	-7.93279173061268
222	112.684792907977	-7.93565386189185
223	112.697958711862	-7.99547240562644