



Politeknik Negeri Batam
Magister Terapan Teknik Komputer

SISTEM PARKIR CERDAS BERBASIS IoT DENGAN INTEGRASI MONITORING REAL-TIME DAN PROTOKOL RESERVASI UNTUK OPTIMASI WAKTU PENCARIAN DI LINGKUNGAN KAMPUS

TESIS

Oleh:
RIAN DWI CAHYADI

NIM: 7312411006

Pembimbing: *Mir'atul Khusna Mufida Ph.D*

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Terapan
Program Studi Teknik Komputer
di
Politeknik Negeri Batam

Pernyataan Keaslian (Declaration)

Saya, **RIAN DWI CAHYADI**, mahasiswa Program Studi Magister Terapan Teknik Komputer, Jurusan Teknik Informatika, Politeknik Negeri Batam, menegaskan bahwa laporan tesis berjudul **"Sistem Parkir Cerdas Berbasis IoT dengan Integrasi Monitoring Real-Time dan Protokol Reservasi untuk Optimasi Waktu Pencarian di Lingkungan Kampus"** ini merupakan hasil karya saya sendiri. Seluruh gambar, tabel, persamaan, potongan kode, dan ilustrasi dalam laporan ini adalah asli dan belum pernah diambil dari karya orang lain, kecuali yang secara eksplisit diakui, dikutip, dan dirujuk. Saya memahami bahwa kelalaian dalam melakukan hal ini akan dianggap sebagai tindakan plagiarisme.

Saya memberikan izin agar salinan laporan tesis saya dapat dibagikan kepada mahasiswa lain di masa mendatang sebagai contoh.

Saya memberikan izin agar karya saya dapat diakses secara lebih luas oleh civitas akademika Politeknik Negeri Batam dan masyarakat umum yang memiliki ketertarikan dalam bidang pengajaran, pembelajaran, dan penelitian.

RIAN DWI CAHYADI
NIM: 7312411006

August 13, 2026

Abstract

Penelitian ini merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem parkir cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT) bernama Parkwell, yang dikembangkan untuk lingkungan kampus Politeknik Negeri Batam. Sistem Parkwell mengintegrasikan sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai detektor per-slot kendaraan, Raspberry Pi 4B sebagai *edge gateway* yang menjalankan *filtering* dan komputasi lokal, protokol MQTT/Mosquitto sebagai jalur komunikasi *publish/-subscribe*, serta kerangka kerja Django sebagai *backend* aplikasi web yang mengelola *dashboard* pemantauan *real-time*, modul reservasi berbasis waktu, dan otentikasi pengguna. Evaluasi menggunakan *KPI-driven evaluation framework* dengan enam indikator (KPI-1 hingga KPI-6), namun keenam KPI ini tidak seluruhnya diuji dengan metode yang setara: KPI-2 dan KPI-5 diverifikasi melalui pengukuran dan survei langsung, KPI-1 diukur langsung dari 559 *event* lapangan namun tidak memenuhi target, sedangkan KPI-3 dan KPI-4 baru berupa estimasi teoritis dan audit arsitektur yang belum diuji dengan data operasional nyata. Dataset lapangan (10–23 November 2025, 559 *event*, 270 *True Positive* dan 289 *False Positive*) menghasilkan *Precision* 48,30% dan *FP Rate* 51,70%, sehingga KPI-1 (target *Precision* $\geq 50\%$) dinyatakan tidak memenuhi target. Perlu ditegaskan bahwa *True Negative* dan *False Negative* tidak tercatat oleh arsitektur sistem, sehingga *Recall* dan *Accuracy* tidak dapat dihitung dan tidak diklaim dalam penelitian ini. Sebagai analisis tambahan bukan pengganti hasil utama *precision* pada 13 hari di luar anomali ekstrem 23 November 2025 mencapai 58,60%. KPI-2 (latensi *end-to-end*) menunjukkan rata-rata 5,205 detik (SD = 0,160 detik) dari 60 pengukuran manual *pra-deployment*, jauh di bawah *threshold* 10 detik; namun pengukuran ini belum mewakili kondisi 14 hari uji lapangan yang penuh gangguan karena tidak menggunakan pencatatan otomatis berbasis *timestamp* NTP yang sebenarnya sudah tersedia pada sistem. KPI-5 (kepuasan pengguna) dari 34 responden menghasilkan rata-rata keseluruhan 4,71/5 (SD = 0,46); namun periode survei (16–22 November) mendahului hari dengan anomali FP tertinggi (23 November), dan komposisi responden didominasi laki-laki (91,2%), sehingga skor ini tidak mencerminkan pengalaman pengguna pada kondisi sistem terburuk maupun populasi yang berimbang. KPI-6 (efisiensi pencarian parkir) yang pada draf sebelumnya diklaim mereduksi waktu pencarian sebesar 81,7% ternyata bersandar pada angka estimasi ($\pm 2,5$ menit) yang tidak pernah diukur di lapangan; angka tersebut dihapus dan status KPI-6 diturunkan menjadi hipotesis awal yang memerlukan verifikasi empiris lanjutan. Penelitian ini juga secara jujur mengakui sejumlah keterbatasan metodologis: *ground truth* ditentukan oleh satu peneliti tanpa validasi silang; tidak dilakukan uji statistik inferensial (misalnya uji korelasi) untuk mendukung dugaan hubungan antara kondisi cuaca dan *FP rate*, sehingga klaim tersebut tidak disajikan sebagai kesimpulan kausal; metode *sampling* kuesioner bersifat non-probabilistik tanpa perhitungan ukuran sampel; serta formula kalibrasi *threshold* belum memperhitungkan variasi tinggi kendaraan. Kontribusi utama penelitian ini bersifat empiris dan praktis dataset lapangan, dokumentasi keterbatasan operasional sensor ultrasonik di lingkungan tropis, dan *blueprint* arsitektur sistem bukan kontribusi teoretis baru. Rekomendasi pengembangan meliputi penggantian sensor *waterproof* (JSN-SR04T), pencatatan data cuaca terstruktur untuk uji korelasi, validasi *ground truth* dengan *observer* kedua, *logging*

latensi otomatis berbasis NTP, dan pengukuran waktu pencarian parkir secara langsung di lapangan.

Keywords: IoT, Smart Parking, MQTT, Raspberry Pi, Django, HC-SR04, reservasi parkir, kampus cerdas.

Ucapan Terima Kasih

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas rahmat, ridla, dan karunia-Nya, penyusunan laporan penelitian yang berjudul "*Parkwell: Sistem Parkir Cerdas Berbasis IoT di Lingkungan Kampus Politeknik Negeri Batam*" ini dapat menyelesaikan dengan baik.

Penyusunan penelitian ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dorongan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas segala nikmat kesehatan, kekuatan, dan kelancaran yang diberikan selama proses penelitian hingga penyusunan laporan ini.
2. Keluarga tercinta yang senantiasa memberikan dukungan moral, materiil, serta doa yang tidak pernah putus.
3. Ibu M. K. Mufida selaku dosen pembimbing akademik yang telah meluangkan banyak waktu untuk memberikan bimbingan, saran konstruktif, serta arahan dalam penulisan dan validasi penelitian ini.
4. Pimpinan dan rekan-rekan di lingkungan tempat kerja atas dukungan fasilitas serta lingkungan yang kondusif selama pelaksanaan penelitian dan pengujian lapangan.
5. Sivitas akademika Politeknik Negeri Batam yang telah memberikan izin dan dukungan ekosistem kampus untuk implementasi serta pengujian sistem Parkwell.
6. Seluruh responden kuesioner yang telah meluangkan waktu untuk berpartisipasi dalam evaluasi kepuasan pengguna sistem Parkwell.
7. Rekan-rekan seperjuangan yang saling mendukung, berbagi ilmu, dan memberikan semangat selama masa studi.

Penulis menyadari bahwa laporan penelitian ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan di masa mendatang. Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata bagi perkembangan teknologi automasi dan sistem cerdas, khususnya di lingkungan Politeknik Negeri Batam.

Batam, August 13, 2026

Rian Dwi Cahyadi

Acknowledgements

All praise and gratitude be to Almighty God for His grace and blessings, which enabled the completion of this research report entitled *"Parkwell: An IoT-Based Smart Parking System in the Campus Environment of Politeknik Negeri Batam"*.

The completion of this research would not have been possible without the guidance, support, and encouragement from various parties. Therefore, the author would like to express sincere gratitude to:

1. Almighty God for granting health, perseverance, and guidance throughout the research and writing process.
2. My beloved family for their endless moral and material support, as well as constant prayers.
3. Mrs. M. K. Mufida, as the academic supervisor, for her invaluable time, constructive guidance, and insightful direction during the research and manuscript validation.
4. Management and colleagues at the workplace for providing the necessary facilities and a supportive environment during the field testing phase.
5. The academic community of Politeknik Negeri Batam for providing the campus ecosystem and support for the deployment and testing of the Parkwell system.
6. All questionnaire respondents who generously dedicated their time to participate in the user satisfaction evaluation of the Parkwell system.
7. Fellow peers for their mutual support, shared knowledge, and encouragement throughout the study period.

The author acknowledges that this research report still has room for improvement. Constructive criticisms and suggestions are highly welcome. It is hoped that this research will provide a meaningful contribution to the development of automation technology and intelligent systems, particularly at Politeknik Negeri Batam.

Batam, August 13, 2026

Rian Dwi Cahyadi

Contents

Ucapan Terima Kasih	iv
Acknowledgements	v
1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
2 Tinjauan Pustaka	6
2.1 Sistem Parkir Cerdas Berbasis IoT	6
2.2 Sensor Ultrasonik HC-SR04: Prinsip Kerja, Karakteristik, dan Keterbatasan	7
2.2.1 Prinsip Kerja dan Spesifikasi Teknis	7
2.2.2 Keterbatasan dan Faktor Gangguan Lingkungan	7
2.3 Protokol MQTT, Edge Computing, dan Django Backend	8
2.3.1 Protokol MQTT dan Mosquitto Broker	8
2.3.2 Edge Computing pada Raspberry Pi	9
2.3.3 Django sebagai Backend Framework	9
2.4 Reservasi Parkir: Keamanan, Concurrency Control, dan Usability	10
2.4.1 Sistem Reservasi Berbasis Waktu dan Tantangan Concurrency	10
2.4.2 Keamanan Data dan Privacy by Design	11
2.5 Evaluasi Kepuasan Pengguna: Skala Likert dan Analisis Statistik	11
2.6 Penelitian Terdahulu dan Research Gap	12
2.7 Kerangka Teori Penelitian	13
2.8 Penjelasan Detail Kerangka Teori Penelitian	13
2.8.1 Permasalahan Parkir Kampus (Problem Domain)	14
2.8.2 Solusi: Sistem Parkir Cerdas IoT (PARKWELL)	14
2.8.3 Evaluasi Berbasis KPI (KPI-Driven Framework)	14
3 Methodology	16
3.1 Rancangan Penelitian	16
3.1.1 KPI-Driven Evaluation Framework	17
3.2 Desain Sistem Parkwell	17
3.2.1 Arsitektur Sistem Berlapis	17
3.2.2 Topologi Fisik dan Wiring Sensor	18
3.2.3 Alur Data <i>End to End</i>	19

3.3	Spesifikasi Komponen Hardware dan Software	20
3.3.1	Komponen Hardware	20
3.3.2	Komponen Software	21
3.4	Parameter Filtering	22
3.4.1	Debounce Filter dan Justifikasi Temporal Berbasis Data Empiris	22
3.5	Sinkronisasi Waktu NTP <i>Network Time Protocol</i>	23
3.6	Metode Pengumpulan Data	23
3.6.1	Dataset Data Sensor Lapangan (10–23 November 2025)	23
3.6.2	Data Latensi End-to-End	24
3.6.3	Kuesioner Kepuasan Pengguna	25
3.6.4	Analisis KPI-1: Akurasi Deteksi Sensor	26
3.6.5	Analisis Kepuasan Pengguna	27
3.6.6	Keterbatasan Pencatatan Data Cuaca dan Pengujian Statistik Inferensial	27
4	Implementasi Sistem	29
4.1	Implementasi Perangkat Keras	29
4.1.1	Pemasangan Sensor HC-SR04 pada Slot Parkir	29
4.1.2	Kalibrasi Threshold per Slot	29
4.2	Implementasi Firmware Edge (Raspberry Pi)	30
4.2.1	Struktur Firmware Python	30
4.2.2	Implementasi Debounce Filter	30
4.2.3	Implementasi Concurrency Control Reservasi	31
4.3	Implementasi Dashboard Web	31
4.3.1	Fitur-Fitur Dashboard Parkwell	31
4.3.2	Implementasi Pembaruan Real-Time Berbasis HTTP Polling	35
4.4	Pengujian Fungsional Sistem	36
4.5	Kondisi Lapangan Pengujian dan Tantangan Teknis	36
4.5.1	Konteks Lingkungan Pengujian	36
4.5.2	Temuan Anomali 23 November 2025	37
4.6	Rangkuman Implementasi	38
5	HASIL PENGUJIAN	39
5.1	Pendahuluan dan Ringkasan Hasil Pengujian	39
5.1.1	Ringkasan Hasil Seluruh KPI	39
5.2	KPI-1: Analisis Akurasi Deteksi Sensor (RQ1)	40
5.2.1	Hasil Keseluruhan: Precision dan FP Rate	40
5.2.2	Analisis Temporal Per Hari	42
5.2.3	Analisis Temporal Per Jam (<i>False Positive Hourly Distribution</i>)	42
5.2.4	Analisis Spasial Per Slot	43
5.2.5	Analisis Distribusi Durasi Event (TP vs FP)	45
5.2.6	Keterbatasan Metodologis: Ground Truth dan Uji Statistik Inferensial	45
5.3	KPI-2: Analisis Latensi End-to-End (RQ2)	46
5.3.1	Hasil Pengukuran Latensi Per Sensor	46
5.3.2	Statistik Deskriptif dan Analisis Latensi	46
5.4	KPI-3 Estimasi Skalabilitas Kapasitas MQTT	46
5.5	KPI-4: Evaluasi Keandalan Reservasi (RQ3)	47
5.5.1	Mekanisme Concurrency Control	47
5.5.2	Fitur Auto-Release dan Verifikasi Fungsional	48
5.6	KPI-5: Analisis Kepuasan Pengguna (RQ3)	48

5.6.1	Profil Responden	48
5.6.2	Hasil Statistik Per Butir Kuesioner	48
5.6.3	Segmentasi Kepuasan Berdasarkan Frekuensi Penggunaan Parkir	49
5.6.4	Keterbatasan Validitas Temporal dan Potensi Bias Demografis	49
5.7	KPI-6: Estimasi Efisiensi Pencarian Parkir (RQ3)	51
5.7.1	Metodologi dan Hasil Estimasi	51
5.8	Ringkasan Keterbatasan Metodologis dan Klaim yang Dapat Dipertanggungjawabkan	51
6	Kesimpulan dan Saran	53
6.1	Kesimpulan	53
6.1.1	RQ1: Akurasi Deteksi Sensor (KPI-1)	53
6.1.2	RQ2: Latensi End-to-End dan Skalabilitas MQTT (KPI-2 & KPI-3)	54
6.1.3	RQ3: Reservasi, Kepuasan Pengguna, dan Efisiensi (KPI-4, KPI-5, KPI-6)	54
6.2	Kontribusi Penelitian	55
6.2.1	Kontribusi Akademis	55
6.2.2	Kontribusi Praktis	56
6.3	Keterbatasan Penelitian	56
6.4	Saran Pengembangan	57
6.4.1	Prioritas Tertinggi: Validasi Empiris dan Perbaikan Metodologi (Tindak Lanjut Sidang)	57
6.4.2	Prioritas Tinggi: <i>Hardware</i> dan Sensor	58
6.4.3	Prioritas Tinggi: <i>Software</i> dan Algoritma	58
6.4.4	Prioritas Menengah: Infrastruktur dan Skala	59
6.4.5	Prioritas Menengah: Pengalaman Pengguna	59
6.4.6	Penelitian Lanjutan yang Disarankan	59
6.5	Penutup	60

List of Figures

1.1	Kondisi kendaraan di area parkir kampus Politeknik Negeri Batam	1
2.1	Arsitektur Berlapis Sistem <i>Smart Parking</i> Terintegrasi [1, 2]	10
2.2	Kerangka Teori Penelitian Hubungan antara Permasalahan, Solusi IoT, Evaluasi KPI, dan Rekomendasi	13
3.1	Skema <i>Wiring</i> dan Topologi Fisik Sensor HC-SR04 dengan Raspberry Pi 4B .	19
3.2	Ilustrasi Visual, Spesifikasi Teknis, dan Peran Komponen Perangkat Keras Sistem Parkwell	21
3.3	Ilustrasi Visual Alur Pengukuran dan Pengambilan Data Latensi End-to-End Sistem Parkwell	24
4.1	Tampilan <i>Monitoring</i> Real-Time Slot Parkir	32
4.2	Tampilan Reservasi Slot Parkir	33
4.3	Tampilan Riwayat Parkir	33
4.4	Tampilan Awal Login dan Register	34
4.5	Tampilan Admin Dashboard	34
4.6	Halaman Informasi Real-Time Slot Parkir	35
4.7	Proses Slot Parkir Terupdate	35
4.8	Instalasi Sensor Pengujian Lapangan	37

List of Tables

2.1	Spesifikasi Teknis Sensor HC-SR04 dan Implikasinya dalam Sistem Parkwell .	7
2.2	Kategorisasi Nilai Mean pada Skala Likert 5 Poin	11
2.3	Pemetaan Penelitian Terdahulu dan <i>Research Gap</i>	12
3.1	KPI-Driven Evaluation Framework Sistem Parkwell	17
3.2	Arsitektur Berlapis Sistem Parkwell	18
3.3	Spesifikasi Komponen Hardware Sistem Parkwell	20
3.4	Stack Software Sistem Parkwell	22
3.5	Justifikasi Parameter Temporal Filtering Berbasis Distribusi Empiris	22
3.6	Kuesioner Kepuasan Pengguna Sistem Parkwell	26
3.7	Standar Kategorisasi Interpretasi Skala Likert 5 Poin	27
4.1	Hasil Pengujian Fungsional Sistem Parkwell	36
4.2	Rangkuman Status Implementasi Seluruh Komponen Sistem Parkwell	38
5.1	Ringkasan Hasil Evaluasi Seluruh KPI Sistem Parkwell	40
5.2	Hasil Keseluruhan Akurasi Deteksi Sensor HC-SR04	42
5.3	Distribusi TP, FP, dan FP Rate Harian	43
5.4	Distribusi FP Berdasarkan Rentang Jam	44
5.5	Distribusi TP, FP, Precision, dan FP Rate Per Slot	44
5.6	Analisis Separasi Temporal TP vs FP, Justifikasi Parameter Temporal Filtering	45
5.7	Data Pengukuran Latensi End-to-End Per Sensor (10 Pengukuran $\times$ 6 Sensor = 60 Total)	46
5.8	Statistik Deskriptif Latensi End-to-End Per Sensor	47
5.9	Estimasi Teoritis Skalabilitas Kapasitas MQTT (Payload 150 bytes, Interval 500ms)	47
5.10	Hasil Pengujian Fungsional Sistem Reservasi Parkwell	48
5.11	Profil Responden Kuesioner Kepuasan Pengguna Parkwell	49
5.13	Segmentasi Mean Kepuasan Berdasarkan Frekuensi Penggunaan Parkir	49
5.12	Statistik Per Butir Kuesioner Kepuasan Pengguna ($n = 34$ responden)	50
5.14	Estimasi Efisiensi Pencarian Parkir (KPI-6)	51
5.15	Ringkasan Bukti Pendukung dan Keterbatasan Validitas Per KPI	52

Chapter 1

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang signifikan di lingkungan perkotaan, khususnya di kawasan kampus, telah menimbulkan permasalahan parkir yang semakin kompleks. Berdasarkan data statistik dan berbagai penelitian *urban mobility*, kepadatan kendaraan di lingkungan pendidikan tinggi cenderung meningkat seiring pertambahan jumlah mahasiswa, dosen, dan tenaga kependidikan yang menggunakan kendaraan pribadi sebagai moda transportasi utama [3, 4]. Di Politeknik Negeri Batam, kondisi ini terlihat jelas dalam bentuk penumpukan kendaraan pada jam-jam puncak perkuliahan, yakni pukul 07.00–09.00 (masuk pagi), 12.00–13.00 (istirahat siang), dan 15.00–17.00 (pulang perkuliahan), yang menyebabkan para sivitas akademika harus membuang waktu berharga hanya untuk mencari *slot* parkir yang tersedia.

Sistem parkir konvensional yang masih banyak digunakan saat ini, seperti *barrier gate* dan penandaan manual, hanya mampu memberikan informasi pada tingkat makro yaitu jumlah akumulatif kendaraan yang masuk dan keluar area parkir [5]. Sistem tersebut memiliki keterbatasan mendasar karena tidak mampu menyediakan kepastian informasi pada tingkat mikro mengenai lokasi *slot* individual yang sedang kosong, *slot* yang telah terisi, serta status ketersediaan *slot* apakah sedang direservasi oleh pengguna lain [6, 7]. Ketiadaan informasi yang *real-time* dan presisi ini memaksa pengemudi melakukan pencarian fisik secara acak dengan berkeliling di area parkir.



Gambar 1.1: Kondisi kendaraan di area parkir kampus Politeknik Negeri Batam

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan paradigma baru yang

memungkinkan perangkat fisik, termasuk *slot* parkir individual, untuk mentransmisikan data statusnya secara digital dan *real-time* melalui jaringan komunikasi nirkabel [1, 8]. Penggunaan sensor ultrasonik pada tingkat *slot* sering menjadi pilihan utama untuk optimasi area parkir kampus karena efisiensi biayanya [9, 10]. Namun, dalam implementasi area terbuka (*outdoor*) beriklim tropis seperti di Kota Batam, penginderaan berbasis sensor ultrasonik menghadapi tantangan lingkungan yang kompleks serta potensi margin kesalahan pengukuran [11], sebagaimana akan dibuktikan secara empiris pada Bab V, Subbab 5.2.1 penelitian ini. Untuk mengeksplorasi tantangan tersebut secara jujur dan terukur, penelitian ini merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem parkir cerdas berbasis IoT yang diberi nama Parkwell, khusus dikembangkan untuk area parkir kampus Politeknik Negeri Batam.

Perlu ditegaskan sejak awal bahwa penelitian ini disusun dengan prinsip pelaporan yang jujur dan berimbang: hasil yang tidak memenuhi target dilaporkan apa adanya sebagai temuan yang sah secara ilmiah, bukan disamarkan atau ditutupi dengan klaim yang berlebihan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana akurasi sensor ultrasonik HC-SR04 dalam mendeteksi keberadaan kendaraan di setiap *slot* parkir kampus yang terekspos interferensi *noise* lingkungan terbuka, termasuk kondisi musim hujan?
2. Bagaimana respons latensi *end-to-end* sistem berbasis MQTT dalam memperbarui status *slot* pada *dashboard monitoring* secara *real-time*, serta bagaimana skalabilitas arsitektur untuk mendukung pengembangan sistem ke jumlah *slot* yang lebih besar di lingkungan kampus?
3. Bagaimana arsitektur protokol reservasi berbasis waktu dapat mengalokasikan *slot* secara adil, mencegah *race condition* dan *double booking* melalui mekanisme *concurrency control* yang tepat, serta bagaimana tingkat kepuasan dan penerimaan pengguna terhadap sistem Parkwell secara keseluruhan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah ditetapkan, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis tingkat akurasi dan performa deteksi sensor ultrasonik HC-SR04 dalam mengidentifikasi keberadaan kendaraan pada *slot* parkir kampus terhadap interferensi *noise* lingkungan terbuka, serta melaporkan secara jujur metrik apa saja yang dapat dan tidak dapat dihitung dari arsitektur pencatatan data yang digunakan.
2. Mengevaluasi respons latensi *end-to-end* transmisi data berbasis MQTT dalam memperbarui status *slot* pada *dashboard monitoring* secara *real-time*, serta menganalisis skalabilitas arsitektur sistem untuk cakupan area parkir yang lebih luas, dengan membedakan secara eksplisit antara hasil yang diukur langsung dan hasil yang masih berupa estimasi teoretis.
3. Merancang arsitektur protokol reservasi berbasis waktu yang dilengkapi mekanisme *concurrency control* guna mencegah *race condition* dan *double booking*, serta menganalisis

tingkat kepuasan dan penerimaan pengguna terhadap sistem Parkwell secara keseluruhan, berikut batasan validitas dari masing-masing evaluasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat Akademis

Dari sisi akademis, penelitian ini memberikan beberapa kontribusi kepada komunitas ilmiah, antara lain:

1. Menyediakan *dataset* empiris hasil pengujian lapangan nyata (559 *event*, 14 hari, 6 *slot*) yang dapat dijadikan rujukan dan pembandingan bagi peneliti lain dalam pengembangan sistem *Smart Parking* berbasis *Internet of Things* (IoT).
2. Mendokumentasikan secara jujur keterbatasan operasional sensor ultrasonik HC-SR04 pada lingkungan terbuka tropis, termasuk keterbatasan desain evaluasi (ketiadaan pencatatan *True Negative/False Negative*, *ground truth* tanpa validasi silang) yang menjadi pelajaran metodologis bagi penelitian sejenis.
3. Menyediakan contoh penerapan kerangka evaluasi berbasis *Key Performance Indicator* (KPI) yang secara eksplisit membedakan antara hasil yang diverifikasi secara empiris dan hasil yang masih berupa estimasi atau audit arsitektur, sehingga dapat direplikasi secara lebih ketat oleh peneliti lain.
4. Mengidentifikasi secara rinci celah metodologis (statistik inferensial, teknik *sampling*, validasi *ground truth*) yang dapat menjadi peta jalan penelitian lanjutan di domain *Smart Campus* maupun aplikasi IoT secara luas.

Manfaat Praktis

Dari sisi praktis, penelitian ini memberikan manfaat langsung kepada berbagai pemangku kepentingan, antara lain:

1. Pengelola kampus Politeknik Negeri Batam dapat memanfaatkan hasil evaluasi termasuk temuan bahwa target akurasi belum tercapai untuk mengambil keputusan investasi yang tepat, misalnya penggantian sensor *waterproof* sebelum perluasan skala sistem.
2. Mahasiswa dan sivitas akademika berpotensi memperoleh efisiensi waktu pencarian tempat parkir melalui *dashboard monitoring* secara *real-time* dan fitur reservasi *slot* berbasis waktu, meskipun besaran efisiensi ini belum terverifikasi secara empiris dan masih memerlukan pengukuran lapangan lanjutan.
3. Pengembang sistem IoT parkir cerdas mendapatkan rujukan arsitektur (*blueprint*) sistem Parkwell yang siap dikembangkan lebih lanjut, berikut daftar keterbatasan yang perlu diperbaiki sebelum implementasi produksi skala penuh.
4. Institusi pendidikan lain yang menghadapi permasalahan tata kelola parkir serupa dapat mengadopsi kerangka evaluasi berbasis KPI yang diterapkan dalam penelitian ini, termasuk pelajaran mengenai pentingnya membedakan status “terukur” dan “estimasi” pada setiap indikator.

1.5 Batasan Penelitian

Untuk menjaga fokus dan kejelasan lingkup penelitian, serta agar pembaca dapat menginterpretasikan hasil secara tepat, berikut adalah batasan yang berlaku dalam penelitian ini:

1. *Dataset* lapangan berasal dari *log* pengujian selama dua minggu (10–23 November 2025) pada enam *slot* parkir kampus Politeknik Negeri Batam. Data dikumpulkan pada periode akhir tahun yang bertepatan dengan musim hujan; kondisi ini dicatat secara kualitatif oleh peneliti, namun tidak disertai pencatatan data cuaca terstruktur (misalnya curah hujan terukur per jam), sehingga tidak dapat dijadikan dasar klaim sebab-akibat tanpa pengujian statistik lebih lanjut.
2. Data latensi *end-to-end* (KPI-2) menggunakan data pengujian manual pada fase *pre-deployment testing* sistem Parkwell (10 sampel per sensor, 6 sensor), bukan data *log* otomatis berbasis *timestamp* NTP sepanjang 14 hari uji lapangan. Akibatnya, angka latensi ini mencerminkan kondisi ideal *pra-deployment* dan belum tentu mewakili kondisi jaringan riil selama masa uji lapangan yang penuh gangguan.
3. Data transaksi reservasi tidak tersedia untuk periode pengujian lapangan, sehingga evaluasi KPI-4 (*Reservation Reliability*) dilakukan melalui audit arsitektur mekanisme *concurrency control* dan pengujian fungsional terkontrol, bukan melalui analisis *log* transaksi nyata dari pengguna di lapangan.
4. *Ground truth* (label *True Positive/False Positive*) pada *dataset* sensor ditentukan oleh satu peneliti melalui observasi manual tunggal, tanpa validasi silang oleh *observer* kedua atau rekaman video pembanding. Arsitektur pencatatan data juga hanya merekam *event* pada saat sensor aktif mendeteksi objek, sehingga *True Negative* dan *False Negative* tidak tercatat sama sekali ini adalah keterbatasan desain yang membatasi metrik yang dapat dihitung (lihat Bab III, Subbab 3.6.1 dan 3.6.4; lihat juga Bab V, Subbab 5.2.6).
5. Instrumen kuesioner kepuasan pengguna (KPI-5) disebarkan menggunakan teknik *convenience sampling* tanpa perhitungan ukuran sampel formal, kepada 34 responden yang telah menerima demonstrasi langsung. Periode penyebaran (16–22 November 2025) berakhir sebelum anomali FP tertinggi (23 November 2025), dan komposisi responden didominasi laki-laki (91,2%); kedua hal ini membatasi generalisasi hasil KPI-5 (lihat Bab V, Subbab 5.6.4).
6. Penelitian ini tidak melakukan uji statistik inferensial (misalnya uji korelasi Spearman/-Pearson atau uji *chi-square*) untuk memverifikasi dugaan hubungan antara kondisi cuaca dan FP *rate*, karena data cuaca terstruktur yang diperlukan tidak tersedia. Segala pernyataan terkait pengaruh cuaca dalam naskah ini disajikan sebagai observasi kualitatif, bukan kesimpulan yang teruji secara statistik (lihat Bab V, Subbab 5.2.6).
7. Estimasi skalabilitas kapasitas MQTT (KPI-3) dan estimasi efisiensi pencarian parkir (KPI-6) merupakan proyeksi teoretis berdasarkan kalkulasi *bandwidth* dan asumsi operasional, bukan hasil pengujian beban (*load testing*) aktual maupun pengukuran langsung terhadap perilaku pencarian pengguna riil di lapangan. Kedua indikator ini dilaporkan dengan status “Belum Diuji Empiris” dan “Hipotesis Awal” secara berturut-turut pada Bab V (lihat Subbab 5.4 dan 5.7.1).

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian ini disusun dalam enam bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I — PENDAHULUAN

Memaparkan latar belakang permasalahan tata kelola parkir di lingkungan kampus, tiga rumusan masalah utama, tujuan penelitian, manfaat akademis dan praktis, batasan penelitian yang telah diperluas untuk mencerminkan keterbatasan metodologis, serta sistematika penulisan laporan.

BAB II — TINJAUAN PUSTAKA

Mengulas landasan teori dan studi terdahulu yang relevan, meliputi arsitektur sistem parkir cerdas berbasis *Internet of Things* (IoT), prinsip kerja dan keterbatasan sensor ultrasonik HC-SR04, protokol MQTT dan *edge computing, framework* Django sebagai *backend*, sistem reservasi parkir dan *concurrency control*, serta identifikasi *research gap* yang diatasi dalam penelitian ini.

BAB III — METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan rancangan penelitian, arsitektur sistem Parkwell berlapis, pemetaan metrik KPI terhadap rumusan masalah berikut jenis verifikasinya (empiris/estimasi/audit), justifikasi parameter *temporal filtering*, metode pengumpulan data, sebagai bagian dari revisi pengakuan eksplisit atas keterbatasan *ground truth*, metode *sampling*, pengukuran latensi, dan ketiadaan uji statistik inferensial.

BAB IV — IMPLEMENTASI SISTEM

Mendeskripsikan implementasi perangkat keras dan perangkat lunak sistem Parkwell, termasuk catatan keterbatasan formula kalibrasi *threshold* terhadap variasi kendaraan, serta kondisi lapangan pengujian yang disajikan tanpa klaim kausal yang tidak teruji.

BAB V — HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM BERBASIS KPI

Menyajikan seluruh hasil pengujian dan evaluasi sistem yang dipetakan ke enam KPI, dengan status yang dibedakan secara eksplisit antara “Memenuhi Target” (terukur), “Tidak Memenuhi Target” (terukur namun gagal), “Belum Diuji Empiris” (estimasi/audit), dan “Hipotesis Awal” (klaim yang diturunkan statusnya karena tidak berdasar pengukuran nyata).

BAB VI — KESIMPULAN DAN SARAN

Merangkum kesimpulan final sebagai jawaban jujur atas ketiga rumusan masalah, termasuk pengakuan eksplisit atas keterbatasan penelitian, klarifikasi kontribusi akademis yang bersifat empiris-praktis, serta rekomendasi pengembangan dan penelitian lanjutan yang terperinci berdasarkan setiap celah metodologis yang teridentifikasi.

Chapter 2

Tinjauan Pustaka

2.1 Sistem Parkir Cerdas Berbasis IoT

Sistem parkir cerdas (*smart parking*) berbasis *Internet of Things* (IoT) telah menjadi topik penelitian yang berkembang pesat seiring meningkatnya teknologi perangkat terhubung dan kesadaran akan kebutuhan pengelolaan ruang publik yang lebih efisien [5]. Sistem ini mengintegrasikan sensor fisik, komunikasi digital, analitik data, dan antarmuka pengguna untuk menyajikan informasi ketersediaan *slot* secara *real-time* serta memfasilitasi pengambilan keputusan berbasis data pada tingkat pengguna maupun pengelola [5].

Secara arsitektural, sistem *smart parking* diklasifikasikan ke dalam empat lapisan utama yang saling bergantung [1]:

1. **Physical Sensing Layer:** Lapisan terbawah yang bertanggung jawab atas akuisisi data fisik dari lingkungan parkir menggunakan berbagai jenis sensor dan aktuator, termasuk sensor ultrasonik, inframerah, magnetik, dan kamera.
2. **Communication Layer:** Lapisan yang menangani transmisi data dari perangkat sensor ke lapisan pemrosesan menggunakan berbagai protokol komunikasi seperti MQTT, HTTP, LoRa, Zigbee, atau Wi-Fi.
3. **Data Processing Layer:** Lapisan yang melakukan analisis, *filtering*, klasifikasi, dan penyimpanan data dari sensor, dapat berupa *edge computing* pada *gateway* lokal maupun *cloud computing* pada server terpusat.
4. **Application/Service Layer:** Lapisan tertinggi yang menyajikan informasi terolah kepada pengguna akhir melalui antarmuka berbasis web, *mobile*, atau papan informasi digital.

Pemilihan teknologi merupakan keputusan desain yang paling menentukan karakteristik sistem *smart parking*, karena setiap teknologi memiliki kompromi tersendiri antara akurasi, biaya, konsumsi daya, dan ketahanan terhadap lingkungan [6]. Selain itu, aspek prediksi ketersediaan *slot* baik secara *online* maupun *offline* semakin menjadi komponen penting dalam sistem *smart parking* generasi berikutnya [3, 12]. Pendekatan *clustering* spatiotemporal terbukti efektif untuk berbagi model prediksi okupansi antar beberapa lahan parkir sekaligus pada skala kota, sehingga mengurangi biaya pelatihan model secara individual [13]. Sejalan dengan hal tersebut, integrasi faktor kontekstual seperti cuaca, jenis hari, dan jadwal *event* ke dalam model *Long Short-Term Memory* (LSTM) juga terbukti meningkatkan akurasi prediksi okupansi parkir di lingkungan perkotaan [4].

Dalam konteks implementasi di lingkungan fasilitas terkelola, sistem pemantauan *real-time* berbasis IoT terbukti dapat diterapkan secara efektif menggunakan *mini-PC* sebagai

gateway dan aplikasi web sebagai antarmuka [14]. Penggunaan platform berbasis *mini-PC* juga telah teruji keandalannya dalam mendukung operasional deteksi ruang parkir [9]. Lebih lanjut, integrasi sistem pemantauan *slot* dengan akses kontrol dan aplikasi perangkat bergerak terbukti mampu meningkatkan efisiensi serta kepuasan pengguna secara signifikan [15, 8].

2.2 Sensor Ultrasonik HC-SR04: Prinsip Kerja, Karakteristik, dan Keterbatasan

2.2.1 Prinsip Kerja dan Spesifikasi Teknis

Sensor HC-SR04 merupakan sensor jarak ultrasonik yang bekerja berdasarkan prinsip *Time of Flight* (ToF). Pulsa ultrasonik dipancarkan melalui pin TRIGGER, kemudian waktu perjalanan pulsa hingga penerimaan sinyal pantulan (*echo*) diukur secara digital [16, 9]. Jarak objek dihitung menggunakan persamaan dasar propagasi gelombang:

$$S = \frac{v \times t}{2} \quad (2.1)$$

di mana:

S = Jarak objek dari sensor (meter)

v = Kecepatan rambat gelombang suara di udara

t = Waktu perjalanan total gelombang dari emisi hingga penerimaan *echo* (detik)

2 = Faktor pembagi yang mencerminkan jarak tempuh bolak-balik gelombang (pergi ke objek dan kembali ke sensor)

Tabel 2.1: Spesifikasi Teknis Sensor HC-SR04 dan Implikasinya dalam Sistem Parkwell

Parameter	Nilai / Rentang	Implikasi untuk Sistem
Tegangan operasi	4,5 – 5,5 VDC	Membutuhkan <i>voltage divider</i> untuk GPIO Raspberry Pi (3,3 V).
Frekuensi ultrasonik	40 kHz	Dapat dipengaruhi oleh sumber suara tinggi frekuensi lain.
Jangkauan deteksi	2 – 400 cm	Sesuai untuk deteksi kendaraan standar (± 15 –200 cm dari sensor).
Akurasi teoritis	± 3 mm (kondisi ideal)	Akurasi <i>real-world</i> jauh lebih rendah pada kondisi lingkungan bervariasi.
Konsumsi arus	15 mA (operasi)	Rendah, cocok untuk sistem IoT berdaya terbatas.

2.2.2 Keterbatasan dan Faktor Gangguan Lingkungan

Meskipun sensor HC-SR04 banyak digunakan dalam sistem *smart parking* karena biayanya yang terjangkau dan kemudahan integrasinya, sensor ini memiliki sejumlah keterbatasan untuk penggunaan di lingkungan terbuka tropis [16, 10, 17]. Keterbatasan-keterbatasan utama tersebut meliputi [16, 10, 17]:

1. **Pantulan Spekular (*Specular Reflection*) pada Permukaan Basah:** Ketika permukaan tanah atau aspal dalam kondisi basah akibat hujan, gelombang ultrasonik dapat dipantulkan dengan pola yang berbeda dari kondisi normal, menghasilkan *echo* palsu yang diinterpretasikan sebagai objek nyata oleh sensor.
2. **Sensitivitas terhadap Objek Lintas:** Objek yang bergerak melewati area *sensing*, seperti pejalan kaki atau kendaraan yang bermanuver tanpa benar-benar parkir, dapat memicu deteksi sementara yang tercatat sebagai *False Positive* (FP) jika tidak difilter dengan tepat.
3. **Pengaruh Suhu dan Kelembapan terhadap Kecepatan Suara:** Kecepatan propagasi gelombang ultrasonik bergantung pada suhu dan kelembapan udara. Pada lingkungan tropis dengan variasi kelembapan signifikan (terutama saat hujan), kecepatan suara dapat berubah sehingga memengaruhi kalkulasi jarak.
4. **Interferensi Multi-Pantulan:** Di area parkir dengan banyak permukaan reflektif (dinding atau kendaraan bersebelahan), gelombang ultrasonik dapat mengalami pantulan multipel yang menghasilkan *echo* ganda atau sinyal tereduksi.
5. **Getaran Mekanis pada *Mounting Bracket*:** Getaran akibat angin kencang atau kendaraan yang melintas dapat menyebabkan sensor beserta *bracket*-nya bergetar, sehingga mengubah orientasi posisi sensor dan memengaruhi konsistensi pembacaan.

Evaluasi spesifik mengenai penggunaan HC-SR04 dalam konteks parkir kampus menunjukkan bahwa penempatan posisi sensor dan penentuan ambang jarak per slot merupakan faktor penentu akurasi yang sama pentingnya dengan spesifikasi teknis sensor itu sendiri [10]. Temuan ini konsisten dengan hasil pengujian lapangan dalam penelitian ini, di mana Slot4 menunjukkan *FP rate* sebesar 66,12%, jauh di atas rata-rata sistem, yang diduga terkait erat dengan karakteristik lokasi fisik Slot4 serta keterbatasan formula kalibrasi *threshold* yang digunakan (lihat Bab IV, Subbab 4.1.2; Bab V, Subbab 5.2.4).

2.3 Protokol MQTT, Edge Computing, dan Django Backend

2.3.1 Protokol MQTT dan Mosquitto Broker

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) adalah protokol komunikasi berbasis TCP/IP yang dirancang khusus untuk perangkat IoT. MQTT menggunakan pola *publish/subscribe* di mana perangkat *publisher* (dalam konteks ini Raspberry Pi) mengirimkan pesan ke topik tertentu pada *broker*, dan perangkat *subscriber* (dalam konteks ini *backend* Django) menerima pesan dari topik yang dilanggannya.

Keunggulan MQTT dibandingkan *HTTP polling* untuk kasus pengiriman status parkir secara *real-time* meliputi:

1. **Mekanisme Push Berbasis Broker:** Pembaruan status dikirimkan segera saat terjadi perubahan, sehingga secara prinsip dapat mengurangi latensi dibandingkan pendekatan *polling* yang bergantung pada interval pengecekan berkala.
2. **Overhead Protokol yang Relatif Kecil:** MQTT menggunakan format *header* yang lebih ringkas dibandingkan HTTP, sehingga berpotensi lebih hemat *bandwidth* pada jaringan dengan kapasitas terbatas.

3. **Dukungan Sesi Persisten:** MQTT dapat dikonfigurasi dengan sesi persisten, sehingga pesan yang terlewat selama *subscriber* (Django) terputus berpotensi tetap tersimpan di *broker* dan dikirimkan kembali saat koneksi pulih.
4. **Skalabilitas Koneksi:** Arsitektur *broker* MQTT pada umumnya dirancang untuk mendukung banyak koneksi klien secara paralel, meskipun jumlah pastinya bergantung pada spesifikasi perangkat keras *broker* dan konfigurasi jaringan yang digunakan.

Karakteristik ini sejalan dengan hasil perbandingan kebutuhan sumber daya jaringan antara HTTP dan MQTT untuk aplikasi IoT [18]. Mosquitto adalah implementasi *broker* MQTT *open-source* yang dikembangkan oleh Eclipse Foundation, yang umum digunakan untuk skenario pengujian skala kecil hingga menengah karena kemudahan instalasi dan konfigurasinya [18].

2.3.2 Edge Computing pada Raspberry Pi

Edge computing merujuk pada paradigma komputasi di mana data diproses sedekat mungkin dengan sumbernya, alih-alih mengirimkan semua data mentah ke *cloud* atau server pusat untuk diproses. Dalam arsitektur Parkwell, Raspberry Pi 4B berperan sebagai *edge gateway* yang melakukan beberapa fungsi pra-pemrosesan sebelum data dikirimkan ke *backend*:

1. **Debounce Filter:** Mensyaratkan pembacaan yang konsisten ('terisi') selama minimal 1 menit berturut-turut sebelum status slot berubah, guna mencegah perubahan status yang dipicu oleh pergerakan objek sangat singkat [9, 10].
2. **Validasi Outlier:** Menolak pembacaan sensor yang berada di luar rentang fisik yang valid (0–400 cm untuk HC-SR04), sehingga mencegah pembacaan *error* masuk ke dalam *pipeline* data [16].

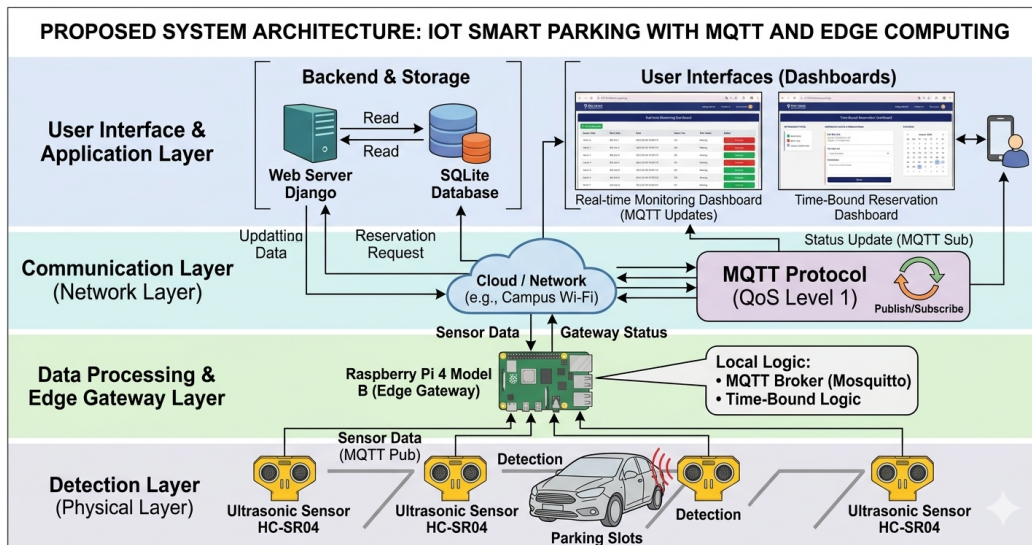
Pendekatan *edge computing* ini meningkatkan ketahanan (*resilience*) sistem jika koneksi internet ke *backend* terputus sementara, di mana *gateway* tetap dapat mengumpulkan data dan mengirimkannya saat koneksi pulih [9]. Selain itu, pra-pemrosesan (*preprocessing*) di tingkat *edge* mengurangi beban jaringan dan latensi persepsi pengguna.

2.3.3 Django sebagai Backend Framework

Django merupakan *framework backend* berbasis Python yang mengimplementasikan pola arsitektur *Model-View-Template* (MVT) serta menyediakan *Object Relational Mapping* (ORM) yang memungkinkan interaksi dengan basis data relasional seperti PostgreSQL atau SQLite tanpa penulisan kueri SQL secara manual. Dalam arsitektur berlapis sistem *smart parking*, Django berperan sebagai *application/service layer* yang menjembatani data yang diterima dari *edge gateway* melalui protokol MQTT dengan antarmuka pengguna berbasis web [1, 2]. Visualisasi arsitektur berlapis sistem ini ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Beberapa komponen Django yang relevan dengan implementasi Parkwell meliputi:

1. **Pengelolaan Model Data:** Digunakan untuk pengelolaan model data slot parkir, reservasi, dan pengguna secara terstruktur.
2. **Django Admin:** Berperan sebagai antarmuka administratif bawaan untuk pemantauan dan pengelolaan data tanpa memerlukan pengembangan tambahan.



Gambar 2.1: Arsitektur Berlapis Sistem *Smart Parking* Terintegrasi [1, 2]

3. **Django REST-style JSON View (JsonResponse):** Berfungsi sebagai *endpoint* API yang menyediakan data status slot parkir terkini, diakses secara berkala oleh sisi klien melalui mekanisme *HTTP polling* menggunakan JavaScript *Fetch API* (interval 2 detik), sehingga pembaruan status slot parkir dapat ditampilkan secara *real-time* pada *dashboard*.
4. **Mekanisme Concurrency Control Bawaan:** Penggunaan fitur `transaction.atomic()` dan `select_for_update()` yang menjadi fondasi keandalan sistem reservasi.

Pemilihan Django sebagai *backend framework* didasarkan pada pertimbangan kematangan ekosistem, dukungan komunitas yang luas, serta kesesuaian model dengan kebutuhan pengelolaan data relasional pada sistem parkir yang melibatkan entitas saling terkait, yaitu slot, reservasi, penggunaan, dan log sensor.

2.4 Reservasi Parkir: Keamanan, Concurrency Control, dan Usability

2.4.1 Sistem Reservasi Berbasis Waktu dan Tantangan Concurrency

Sistem reservasi parkir berbasis waktu memungkinkan pengguna untuk memesan slot parkir tertentu pada rentang waktu yang ditentukan di masa mendatang. Namun, sistem reservasi ini menghadirkan tantangan teknis yang signifikan dalam hal *concurrency control* penanganan situasi di mana dua atau lebih pengguna mencoba memesan slot yang sama pada rentang waktu yang tumpang tindih secara bersamaan. Tanpa mekanisme penguncian yang tepat, permintaan reservasi dapat mengakibatkan *double booking*, yaitu kondisi kritis di mana dua pengguna berhasil memesan slot yang sama pada waktu yang tumpang tindih [19, 7].

Solusi standar dalam sistem basis data relasional untuk mengatasi masalah ini adalah kombinasi dari dua mekanisme utama:

1. **SELECT FOR UPDATE (Database Level Row Locking):** Mencegah baris data yang sedang dibaca dan akan ditulis diakses oleh transaksi lain sebelum transaksi saat ini selesai.

2. **transaction.atomic()**: Memastikan seluruh urutan operasi (*read-check-write*) dieksekusi dalam satu unit atomik yang tidak dapat diinterupsi oleh proses lain.

Perlu dicatat bahwa kedua mekanisme di atas adalah solusi standar pada tingkat *desain arsitektur*. Sejauh mana keandalan keduanya terverifikasi pada kondisi operasional riil sistem Parkwell dibandingkan dengan verifikasi melalui audit kode dan simulasi terkontrol dibahas secara jujur pada Bab V, Subbab 5.5.2.

2.4.2 Keamanan Data dan Privacy by Design

Penerapan pendekatan *privacy by design* merupakan aspek krusial dalam sistem parkir digital, mengingat sistem tersebut menyimpan informasi sensitif pengguna termasuk identitas akun, nomor kendaraan, riwayat pergerakan, dan pola aktivitas harian [20]. Prinsip-prinsip keamanan yang perlu diterapkan meliputi:

1. Enkripsi data dan autentikasi berbasis token atau sesi yang aman.
2. Pencatatan *audit log* yang tidak dapat diubah untuk setiap aksi pengguna.
3. Kebijakan retensi data yang jelas sesuai regulasi perlindungan data yang berlaku.

2.5 Evaluasi Kepuasan Pengguna: Skala Likert dan Analisis Statistik

Evaluasi kepuasan pengguna dalam penelitian sistem IoT umumnya menggunakan instrumen kuesioner terstruktur berbasis Skala Likert, yang memungkinkan responden mengekspresikan tingkat persetujuan atau kepuasan pada rentang yang terstandar. Skala Likert 5 poin (1 = Sangat Tidak Setuju, 2 = Tidak Setuju, 3 = Netral, 4 = Setuju, 5 = Sangat Setuju) paling umum digunakan karena memberikan granularitas yang cukup sambil menjaga beban kognitif responden pada level yang wajar.

Analisis statistik deskriptif yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi:

1. *Mean* (rata-rata) per butir pertanyaan.
2. *Standard Deviation* (SD) untuk mengukur tingkat variabilitas jawaban responden.
3. *Overall mean* dan *overall SD* dari keseluruhan instrumen evaluasi.
4. Segmentasi data berdasarkan karakteristik responden.

Kategorisasi interpretasi nilai *mean* pada Skala Likert 5 poin yang digunakan untuk mengelompokkan tingkat kepuasan pengguna ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2: Kategorisasi Nilai Mean pada Skala Likert 5 Poin

Rentang Mean	Nilai	Kategori Kepuasan	Interpretasi
1,00 – 1,80		Sangat Tidak Puas	Sistem perlu perbaikan menyeluruh
1,81 – 2,60		Tidak Puas	Banyak aspek perlu diperbaiki
2,61 – 3,40		Cukup / Netral	Sistem memenuhi ekspektasi minimal
3,41 – 4,20		Puas	Sistem memenuhi ekspektasi pengguna
4,21 – 5,00		Sangat Puas	Sistem melampaui ekspektasi pengguna

2.6 Penelitian Terdahulu dan Research Gap

Bagian ini menyajikan pemetaan penelitian terdahulu yang relevan dan mengidentifikasi *research gap* secara spesifik yang ditutup oleh penelitian ini. Pemetaan penelitian terdahulu dan sintesis celah penelitian ditunjukkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3: Pemetaan Penelitian Terdahulu dan *Research Gap*

Ref.	Fokus Penelitian	Kontribusi Utama	Metode / Platform	Gap yang Ditutup Penelitian Ini
[5, 6, 1]	Review <i>smart parking</i> global	Arsitektur berlapis, <i>roadmap</i> digitalisasi, taksonomi <i>sensing</i>	<i>Systematic review</i>	Implementasi nyata di kampus tropis dengan KPI empiris dan analisis anomali cuaca.
[16, 17, 10]	Sensor ultrasonik/IoT untuk parkir kampus	<i>Feasibility</i> HC-SR04, <i>threshold detection</i>	<i>Prototype testing</i>	Analisis FP temporal-spasial-durasi, identifikasi <i>outlier</i> per slot, dampak musim hujan.
[7, 19]	Reservasi parkir digital	Manajemen <i>demand</i> dan algoritma alokasi slot	Simulasi, analisis teoritis	Implementasi <i>concurrency safety</i> dengan <code>select_for_update()</code> dan <i>time-bound auto-release</i> .
[14, 9, 8]	Monitoring IoT dan <i>mini-PC platform</i>	<i>Dashboard real-time</i> berbasis Raspberry Pi, <i>mobile app</i>	Raspberry Pi, NodeMCU	Integrasi KPI teknis (latensi, skalabilitas) dan KPI pengguna dalam satu <i>framework</i> terukur.
[3, 12, 15, 2]	Sensor alternatif dan prediksi ML	LiDAR, <i>geomagnetic</i> , <i>computer vision</i> , ML untuk parkir	RNN, <i>ensemble model</i>	Fondasi teknis untuk rekomendasi pengembangan Parkwell ke arah sensor <i>hybrid</i> dan <i>edge AI</i> .
[20, 18, 13, 4]	Prediksi <i>occupancy</i> dan <i>sustainability</i>	Prediksi okupansi berbasis <i>clustering</i> spatiotemporal dan integrasi faktor kontekstual (cuaca, jenis hari, <i>event</i>)	<i>Probabilistic model</i> , K-means/K-prototype, DTW, LSTM	Data log durasi <i>event</i> sebagai input potensi prediksi <i>occupancy</i> berbasis pola historis dan faktor kontekstual.

Dari pemetaan di atas, teridentifikasi bahwa penelitian ini memberikan kontribusi yang membedakan dirinya dari literatur yang ada dalam empat dimensi utama:

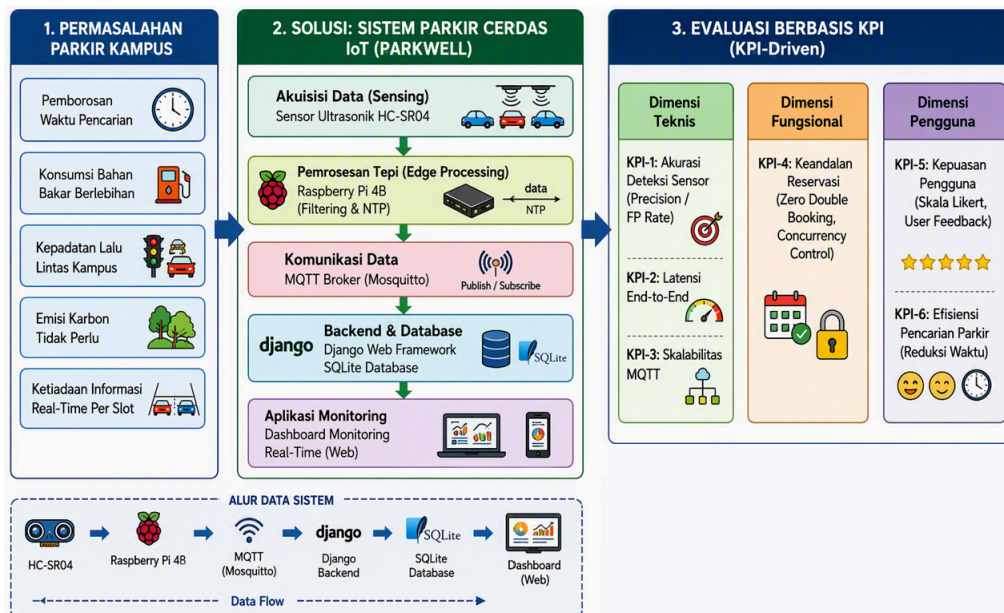
1. **Evaluasi Empiris di Lingkungan Tropis dengan Cuaca Ekstrem:** Kebanyakan penelitian terdahulu dilakukan di lingkungan laboratorium atau iklim *temperate*. Pengujian dalam kondisi musim hujan wilayah Batam memberikan wawasan tentang keterbatasan nyata sensor ultrasonik.
2. **Analisis Temporal-Spasial Durasi FP yang Komprehensif:** Penelitian ini mendekomposisi *False Positive* (FP) berdasarkan jam, tanggal, slot, dan durasi untuk menghasilkan *insight* yang dapat ditindaklanjuti secara operasional.
3. **KPI-Driven Evaluation Framework Terpadu:** Pendekatan enam KPI yang memetakan secara eksplisit hubungan antara *Research Question* (RQ), sumber data, formula, dan hasil memungkinkan auditabilitas penuh terhadap setiap klaim performa.

4. **Justifikasi Parameter Filtering Berbasis Distribusi Empiris:** Parameter *debounce* dan *moving average* ditentukan berdasarkan analisis distribusi durasi *event* nyata.

Sebagaimana ditegaskan pada Bab VI, Subbab 6.2.1, keempat dimensi di atas bersifat kontribusi empiris dan praktis, bukan kebaruan teoretis dalam bidang IoT atau *smart parking* secara umum.

2.7 Kerangka Teori Penelitian

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah disajikan, kerangka teori penelitian ini menempatkan permasalahan parkir kampus sebagai titik berangkat, yang dijawab melalui sistem IoT berlapis. Performa sistem kemudian dievaluasi secara menyeluruh menggunakan *KPI-driven framework* yang mencakup dimensi teknis (*sensor accuracy, network latency, scalability*), fungsional (*reservation reliability*), dan pengguna (*user satisfaction, search time reduction*). Temuan dari evaluasi ini menghasilkan rekomendasi pengembangan yang menutup lingkaran umpan balik antara penelitian dan implementasi. Visualisasi kerangka teori penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2: Kerangka Teori Penelitian Hubungan antara Permasalahan, Solusi IoT, Evaluasi KPI, dan Rekomendasi

2.8 Penjelasan Detail Kerangka Teori Penelitian

Gambar 2.2 menggambarkan alur kerangka teori dan metodologi sistematis penelitian *Parkwell*. Kerangka ini dirancang secara berkesinambungan yang menghubungkan empat blok utama: (1) Identifikasi Permasalahan Parkir Kampus, (2) Arsitektur Solusi Sistem Parkir Cerdas berbasis IoT, (3) Kerangka Evaluasi berbasis KPI (*KPI-Driven Evaluation*), serta (4) Temuan Evaluasi, *Insight* Manajerial, dan Rekomendasi Pengembangan.

2.8.1 Permasalahan Parkir Kampus (Problem Domain)

Titik awal dari penelitian ini berakar pada lima kendala utama manajemen parkir di lingkungan perguruan tinggi yang saling terkait:

1. **Pemborosan Waktu Pencarian (*Search Time Waste*):** Pengendara menghabiskan waktu signifikan secara acak untuk mengelilingi area parkir demi menemukan slot kosong akibat ketiadaan petunjuk ketersediaan.
2. **Konsumsi Bahan Bakar Berlebihan (*Excess Fuel Consumption*):** Durasi pencarian slot yang panjang menyebabkan pembakaran bahan bakar fosil berlebih saat kendaraan bergerak lambat (*cruising/cruising-for-parking*).
3. **Kepadatan Lalu Lintas Kampus (*Campus Traffic Congestion*):** Penumpukan kendaraan yang mencari parkir secara bersamaan di jam-jam sibuk menciptakan kemacetan lokal di sekitar jalan akses utama kampus.
4. **Emisi Karbon Tidak Perlu (*Unnecessary Carbon Emissions*):** Tingginya durasi mesin menyala (*idle* dan *low-speed driving*) berkontribusi langsung pada peningkatan emisi gas buang CO₂ yang mencemari lingkungan kampus.
5. **Ketiadaan Informasi Real-Time Per Slot (*Lack of Real-Time Slot Information*):** Pengelola kampus dan pengguna tidak memiliki akses ke visibilitas data status tingkat slot secara presisi dan seketika.

2.8.2 Solusi: Sistem Parkir Cerdas IoT (PARKWELL)

Untuk menjawab kelima permasalahan di atas, dikembangkan sistem *Parkwell* berbasis arsitektur IoT berlapis lima tingkat:

1. **Sensing Layer (Sensor Ultrasonik HC-SR04):** Bertindak sebagai garda terdepan untuk melakukan akuisisi data jarak secara fisik per slot parkir menggunakan prinsip waktu tempuh gelombang (*time-of-flight*).
2. **Edge Processing Layer (Raspberry Pi 4B):** Berperan sebagai *edge gateway* yang menjalankan algoritma *filtering* (seperti *debounce filter* dan validasi *outlier*) serta sinkronisasi waktu presisi melalui *Network Time Protocol* (NTP) sebelum data dikirim ke server.
3. **Communication Layer (MQTT Broker Mosquitto):** Mengelola transmisi data ringan berbasis protokol TCP/IP *Publish/Subscribe* yang menjamin pengiriman pembaruan status slot secara hemat *bandwidth* dan berlatensi rendah.
4. **Backend & DB Layer (Django Framework + SQL Lite):** Mengelola logika bisnis, penyimpanan basis data relasional, serta kontrol konkurensi data (`transaction.atomic()` dan `select_for_update()`) guna menjamin keandalan proses reservasi.
5. **Application Layer (Web Dashboard Real-Time):** Menjadikan data status parkir terolah dapat diakses langsung oleh pengguna melalui antarmuka web interaktif berbasis mekanisme *polling* cepat (interval 2 detik).

2.8.3 Evaluasi Berbasis KPI (KPI-Driven Framework)

Performa sistem *Parkwell* tidak hanya diuji secara teknis tetapi dievaluasi secara holistik melalui tiga dimensi utama yang mencakup enam Indikator Kinerja Utama (*Key Performance Indicator* / KPI):

1. Dimensi Teknis

1. **KPI-1 (Akurasi Deteksi Sensor):** Mengukur presisi (*precision*) dan tingkat kesalahan positif (*False Positive Rate*) dari sensor HC-SR04 dalam merespons dinamika lingkungan.
2. **KPI-2 (Latensi *End-to-End*):** Mengukur total durasi waktu yang dibutuhkan mulai dari perubahan objek fisik di slot parkir hingga data terbaru di layar *dashboard* pengguna.
3. **KPI-3 (Skalabilitas MQTT):** Memproyeksikan ketahanan dan performa jaringan komunikasi *broker* Mosquitto saat menangani beban lonjakan paket data secara simultan.

2. Dimensi Fungsional

1. **KPI-4 (Keandalan Reservasi):** Menguji efektivitas *concurrency control* dalam memastikan kondisi *zero double booking* saat dua pengguna melakukan pemesanan slot yang sama pada waktu yang bersamaan.

3. Dimensi Pengguna

1. **KPI-5 (Kepuasan Pengguna):** Mengukur persepsi kualitatif dan penerimaan pengguna akhir memanfaatkan instrumen kuesioner berbasis Skala Likert 5 poin dan umpan balik subjektif (*user feedback*).
2. **KPI-6 (Efisiensi Pencarian Parkir):** Menguantifikasi besarnya persentase reduksi waktu yang berhasil dihemat pengguna dalam menemukan slot kosong setelah menggunakan sistem *Parkwell*.

Keenam KPI di atas mendefinisikan *apa* yang hendak diukur pada tingkat kerangka konseptual. Status verifikasi aktual dari masing-masing KPI termasuk pembedaan eksplisit antara hasil yang diukur langsung secara empiris (KPI-1, KPI-2), hasil yang masih berupa estimasi teoretis atau audit arsitektur (KPI-3, KPI-4), dan hasil yang berstatus hipotesis awal (KPI-6) dijabarkan secara rinci pada Bab V, khususnya pada Subbab 5.8.

Chapter 3

Methodology

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan metode campuran (*mixed methods*) dengan desain campuran tertanam (*Embedded Mixed Methods Design*). Pendekatan ini dipilih untuk menggabungkan kekuatan pengujian eksperimental kuantitatif berbasis data telemetri sensor dengan analisis kualitatif terhadap perilaku pengguna dan anomali lingkungan, sehingga menghasilkan evaluasi sistem yang komprehensif, obyektif, dan berorientasi pada pengalaman nyata pengguna [21].

Dalam arsitektur penelitian *Parkwell*, komponen kuantitatif bertindak sebagai metode utama (*primary strand*) untuk menguji keandalan teknis dan fungsional sistem, sedangkan komponen kualitatif bertindak sebagai metode pendukung (*secondary strand*) untuk memberikan konteks mendalam terhadap temuan kuantitatif tersebut. Rincian kedua komponen metode disajikan sebagai berikut:

1. Komponen Kuantitatif (*Quantitative Strand*):

- (a) **Eksperimen Teknis dan Telemetri IoT:** Pengukuran kuantitatif terhadap log data mentah dari sensor ultrasonik HC-SR04, latensi jaringan *end-to-end* (milidetik), komunikasi MQTT (paket/detik), tingkat presisi deteksi (%), dan *False Positive Rate* (%).
- (b) **Pengujian Konkurensi Fungsional:** Uji eksperimental berbasis skenario beban *load testing* untuk menghitung tingkat keberhasilan transaksi reservasi simultan (*zero double booking rate*).
- (c) **Survei Terstruktur Skala Likert:** Pengumpulan data kuantitatif dari responden pengguna akhir memanfaatkan kuesioner berbasis Skala Likert 5 poin untuk mengukur tingkat kepuasan pengguna (*User Satisfaction Score*) dan persentase reduksi waktu pencarian parkir.

2. Komponen Kualitatif (*Qualitative Strand*):

- (a) **Umpan Balik Terbuka Pengguna (*Qualitative User Feedback*):** Pengumpulan tanggapan deskriptif kualitatif melalui pertanyaan terbuka pada akhir kuesioner mengenai pengalaman antarmuka pengguna (*User Experience/UX*), kendala navigasi, dan harapan fitur.
- (b) **Analisis Deskriptif Log Anomali Cuaca:** Observasi dan dokumentasi kualitatif terhadap fenomena fisik lingkungan (seperti curah hujan tinggi, embun, dan pa-

paran sinar matahari langsung di wilayah Batam) yang dikorelasikan dengan log kejadian anomali (*event-log anomaly analysis*) pada sensor.

Kerangka evaluasi yang menaungi seluruh pengumpulan data ini adalah *KPI-Driven Evaluation Framework*. Kerangka ini memetakan setiap pertanyaan penelitian (*Research Question* / RQ) secara eksplisit ke sumber data, formula kalkulasi, dan indikator kinerja kunci (*Key Performance Indicator* / KPI). Pendekatan terstruktur ini memastikan bahwa seluruh klaim kinerja teknis maupun efektivitas fungsional sistem *Parkwell* dapat ditelusuri (*traceable*), diverifikasi (*verifiable*), dan direplikasi (*replicable*) oleh peneliti lain.

3.1.1 KPI-Driven Evaluation Framework

Sistem *Parkwell* dievaluasi menggunakan enam *Key Performance Indicator* (KPI) yang terpetakan ke tiga *Research Question* (RQ) utama penelitian. Tabel 3.1 menyajikan pemetaan lengkap antara RQ, KPI, metrik yang diukur, sumber data, serta *target/threshold* yang ditetapkan dan jenis verifikasi yang digunakan.

Tabel 3.1: KPI-Driven Evaluation Framework Sistem *Parkwell*

KPI	RQ	Metrik yang Diukur	Sumber Data	Target / Threshold	Jenis Verifikasi
KPI-1	1	<i>Precision</i> , <i>FP Rate</i> , distribusi temporal-spasial-durasi	Raw_Data.csv (559 event)	$Precision \geq 50\%$, $FP Rate \leq 50\%$	Empiris (Pengukuran Lapangan Langsung)
KPI-2	2	Latensi <i>end-to-end</i> (sensor $\rightarrow$ MQTT $\rightarrow$ dashboard)	Data_Akurasi.csv (10 sampel $\times$ 6 sensor)	Latensi < 10 detik	Empiris (Pengukuran Manual, Fase Pra-Deployment)
KPI-3	2	Estimasi kapasitas MQTT	Analisis teoritis berbasis <i>payload</i> & <i>bandwidth</i>	Mampu ≥ 60 slot	Estimasi Teoritis Belum Diuji Empiris
KPI-4	3	Keandalan reservasi (<i>concurrency safety</i> , <i>auto-release</i>)	Audit arsitektur Django backend	Zero double booking	Audit Arsitektur Belum Diuji dengan Data Transaksi Nyata
KPI-5	3	Kepuasan pengguna (Likert 5 poin, 10 butir, 34 responden)	Kuesioner Google Forms (16–22 Nov 2025)	Mean $\geq 4,00$ (kategori Puas)	Empiris (Survei) dengan Keterbatasan Validitas Temporal & Demografis
KPI-6	3	Efisiensi pencarian parkir (<i>search time reduction</i>)	Data durasi TP/FP (tanpa pengukuran waktu pencarian riil)	Reduksi $\geq 40\%$	Hipotesis Awal Belum Diverifikasi Empiris

3.2 Desain Sistem *Parkwell*

3.2.1 Arsitektur Sistem Berlapis

Sistem *Parkwell* dirancang menggunakan arsitektur berlapis lima tingkat yang merujuk pada klasifikasi Ma et al. [1], yaitu: *Physical Sensing Layer*, *Edge Processing Layer*, *Communication Layer*, *Backend & DB Layer*, dan *Application Layer*. Setiap lapisan memiliki peran teknis yang saling melengkapi dan dapat dikembangkan secara independen (*modular architecture*). Ringkasan komponen, fungsi, dan teknologi pada setiap lapisan disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2: Arsitektur Berlapis Sistem Parkwell

Lapisan	Komponen	Fungsi	Teknologi / Protokol
Physical Sensing	Sensor HC-SR04 ($\times 6$)	Deteksi keberadaan kendaraan per-slot berbasis <i>time-of-flight</i>	Ultrasonik 40 kHz, GPIO Raspberry Pi
Edge Processing	Raspberry Pi 4B	<i>debounce filter</i> , NTP <i>sync</i>	Python, RPi.GPIO, paho-mqtt
Communication	MQTT Broker (Mosquitto)	<i>Publish/subscribe</i> status slot	MQTT 3.1.1, TCP/IP
Backend & DB	Django + SQLite	ORM, autentikasi, reservasi, <i>concurrency control</i> , REST API, HTTP <i>Polling</i>	Django 4.x, SQLite
Application	Web Dashboard	Monitoring <i>real-time</i> , reservasi slot, manajemen akun, notifikasi <i>buzzer</i>	HTML5, CSS3, JavaScript

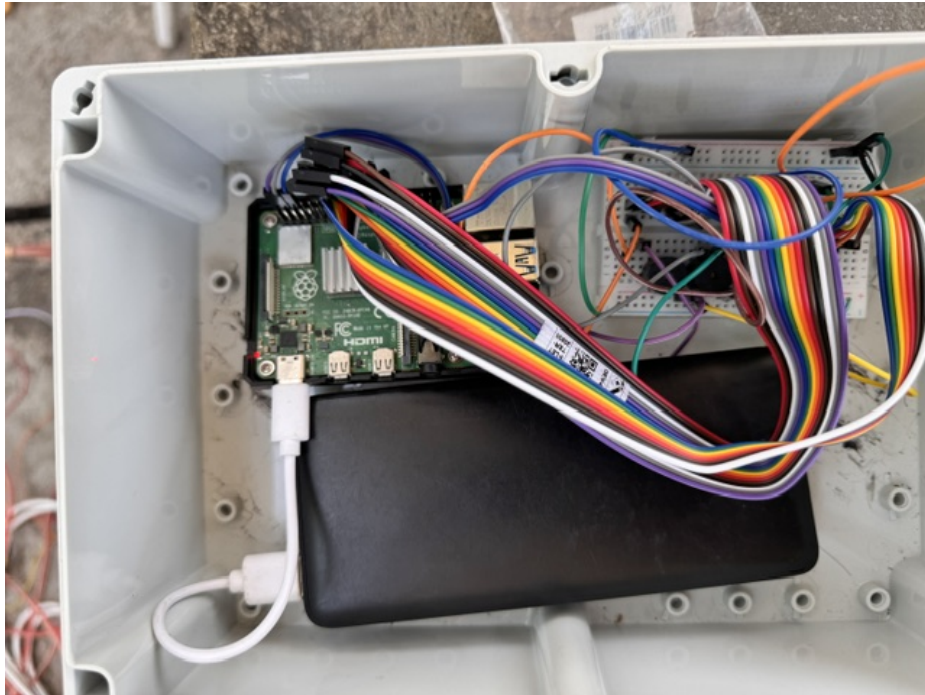
3.2.2 Topologi Fisik dan Wiring Sensor

Sistem Parkwell menggunakan enam unit sensor ultrasonik HC-SR04 yang dipasang pada masing-masing slot parkir (Slot 1 hingga Slot 6, di mana 4 slot di antaranya difungsikan khusus untuk sistem reservasi) pada area parkir kampus Politeknik Negeri Batam.

Setiap sensor dihubungkan ke *single-board computer* Raspberry Pi 4B memanfaatkan antarmuka GPIO (*General Purpose Input/Output*). Rincian konfigurasi perkabelan (*pinout wiring*) untuk masing-masing sensor adalah sebagai berikut:

1. **Pin VCC:** Dihubungkan ke sumber daya tegangan 5V pada *header* GPIO Raspberry Pi.
2. **Pin GND:** Dihubungkan ke *ground* bersama (*common ground*) sistem untuk menjaga kestabilan acuan tegangan.
3. **Pin TRIGGER:** Dihubungkan ke pin GPIO *output* Raspberry Pi (3,3V) untuk memicu pemancaran gelombang ultrasonik.
4. **Pin ECHO:** Dihubungkan ke pin GPIO *input* Raspberry Pi

Secara fisik, sensor dipasang pada tiang dan *bracket* plastik yang ditempatkan di bagian atas tengah setiap slot parkir dengan orientasi sensor menghadap tegak lurus ke bawah. Skema perkabelan (*wiring diagram*) dan topologi keterhubungan antarmuka fisik sensor dengan Raspberry Pi 4B ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1: Skema *Wiring* dan Topologi Fisik Sensor HC-SR04 dengan Raspberry Pi 4B

3.2.3 Alur Data *End to End*

Alur data lengkap sistem *Parkwell* dari akuisisi oleh sensor fisik hingga pembaruan tampilan *dashboard* mencakup lima tahapan utama yang saling berurutan:

1. **Akuisisi Sinyal Fisik (*Physical Sensing*):** Sensor ultrasonik HC-SR04 memancarkan pulsa gelombang melalui pin TRIGGER. Jika gelombang pantul (*echo*) diterima dalam rentang jarak yang telah dikalibrasi (objek kendaraan terdeteksi), pin ECHO akan mengirimkan sinyal ke pin GPIO *input* Raspberry Pi untuk mencatat kondisi HIGH.
2. **Pemrosesan Data *Edge* (*Edge Processing & Filtering*):** Firmware berbasis Python yang berjalan pada Raspberry Pi membaca nilai status dari pin GPIO, kemudian menerapkan algoritma debounce filter (dengan ambang batas durasi konsisten minimum selama 1 menit) guna mengeliminasi noise atau anomali pembacaan sesaat.
3. **Transmisi Pesan (*Communication Layer*):** Setelah terjadi perubahan status slot yang tersaring, Raspberry Pi mempublikasikan paket pesan (*payload*) berformat JSON yang berisi status slot terbaru ke *broker* Mosquitto berbasis protokol MQTT.
4. **Pemrosesan *Backend* dan Basis Data (*Backend Processing & Persistence*):** *Backend* Django menerima pesan dari MQTT *broker*, memperbarui status ketersediaan slot pada basis data SQLite, dan menyiapkan pembaruan data *real-time* untuk disajikan ke sisi klien.
5. **Visualisasi pada Antarmuka (*Dashboard Visualization*):** *Web dashboard* secara *real-time* menampilkan perubahan status slot kepada pengguna melalui indikator visual berwarna:
 - **Hijau:** Menunjukkan status slot Kosong (*Available*).

- **Merah:** Menunjukkan status slot Terisi (*Occupied*).
- **Kuning:** Menunjukkan status slot Dipesan (*Reserved*).

3.3 Spesifikasi Komponen Hardware dan Software

Penerapan sistem *Parkwell* didukung oleh pemilihan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang andal untuk menjamin kinerja akuisisi data, transmisi komunikasi, hingga antarmuka pengguna berjalan secara optimal.

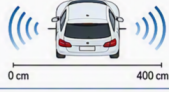
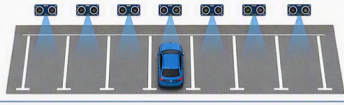
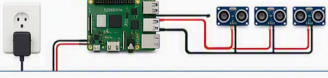
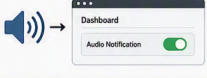
3.3.1 Komponen Hardware

Perangkat keras yang digunakan dalam pembangunan sistem *Parkwell* terdiri dari unit sensor, pemroses tepi, rangkaian pengaman tegangan, media tumpu fisik, pencatu daya, hingga perangkat keluaran audio. Rincian spesifikasi teknis dan peran masing-masing komponen perangkat keras disajikan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3: Spesifikasi Komponen Hardware Sistem *Parkwell*

Komponen	Spesifikasi Teknis	Peran dalam Sistem
Sensor HC-SR04 (×6)	Jangkauan 0–400 cm, akurasi $\pm 3\text{mm}$ (ideal), tegangan 5V	Deteksi keberadaan kendaraan per-slot
Raspberry Pi 4B	Processor Cortex-A72 4-core 1.8GHz, RAM 4GB, GPIO 40-pin, Wi-Fi 2.4/5GHz, USB 3.0	<i>Edge gateway: sensor reading, filtering, MQTT publishing</i>
Bracket/Mounting	Tiang <i>height</i> 80–120 cm	Pemasangan sensor menghadap ke bawah di atas setiap slot parkir
Power Supply	5V/3A (untuk Raspberry Pi) + 5V <i>auxiliary</i> (untuk sensor)	Sumber daya sistem keseluruhan
Buzzer	<i>Buzzer</i> aktif 5V	Notifikasi audio yang dapat dinonaktifkan via <i>dashboard</i>

Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai wujud fisik, parameter spesifikasi, serta skema implementasi di lapangan, ilustrasi visual yang merangkum komponen perangkat keras sistem *Parkwell* disajikan secara terperinci pada Gambar 3.2.

Komponen	Spesifikasi Teknis	Peran dalam Sistem
Sensor HC-SR04 (x6) 	- Jangkauan 0–400 cm - Akurasi $\pm 3\text{mm}$ (ideal) - Tegangan 5V 	Deteksi keberadaan kendaraan per-slot 
Raspberry Pi 4B 	- Processor Cortex-A72 4-core 1.8GHz - RAM 4GB - GPIO 40-pin - Wi-Fi 2.4/5GHz - USB 3.0 	Edge gateway: sensor reading, filtering, MQTT publishing 
Bracket/Mounting 	Tiang plastik height 80–120 cm 	Pemasangan sensor menghadap ke bawah di atas setiap slot parkir 
Power Supply 	5V/3A (untuk Raspberry Pi) + 5V auxiliary (untuk sensor)	Sumber daya sistem keseluruhan 
Buzzer 	Buzzer aktif 5V	Notifikasi audio yang dapat dinonaktifkan via dashboard 

Gambar 3.2: Ilustrasi Visual, Spesifikasi Teknis, dan Peran Komponen Perangkat Keras Sistem Parkwell

Berdasarkan ilustrasi di atas, terlihat jelas bagaimana setiap perangkat keras berinteraksi dalam satu kesatuan sistem:

1. **Sensor Ultrasonik HC-SR04:** Dipasang di setiap titik slot parkir dengan orientasi menghadap ke bawah
2. **Raspberry Pi 4B:** Berfungsi sebagai pusat kendali jaringan (*edge gateway*) yang membaca data GPIO, menyaring *noise*, dan mempublikasikannya melalui protokol MQTT.
3. **Bracket dan Mounting:** Menjadi struktur mekanis penyangga agar sensor berada pada ketinggian ideal (80–120 cm) di atas slot parkir.
4. **Power Supply:** Menyalurkan sumber daya listrik yang stabil, baik tegangan utama 5V/3A untuk mini pc papan tunggal maupun jalur tambahan *auxiliary* untuk sensor.
5. **Buzzer Aktif:** Memberikan umpan balik yang dapat dikontrol langsung melalui antarmuka *dashboard*.

3.3.2 Komponen Software

Pengembangan sistem *Parkwell* didukung oleh pemanfaatan berbagai perangkat lunak (*software*), pustaka pemrograman (*libraries*), dan protokol komunikasi yang terdistribusi ke dalam beberapa lapisan arsitektur. Rincian perangkat lunak, versi yang digunakan, beserta fungsinya masing-masing disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4: Stack Software Sistem Parkwell

Layer	Software / Library	Versi	Fungsi
Firmware Edge	Python 3	3.0	Logika pembacaan sensor, <i>filtering</i> , <i>loop</i> utama
Firmware Edge	RPi.GPIO	0.7.1	Kontrol GPIO Raspberry Pi
Firmware Edge	paho-mqtt	1.6.1	MQTT <i>client</i> untuk <i>publish</i> status sensor
Firmware Edge	ntplib	0.4.0	Sinkronisasi waktu NTP untuk <i>timestamp</i> akurat
Broker MQTT	Mosquitto	2.0.2	MQTT <i>broker</i> : <i>routing</i> <i>publish/subscribe</i> , QoS 1, <i>persistent session</i>
Backend	Django	4.2.1	Framework web: MVT, ORM, autentikasi, <i>routing</i> , <i>admin</i>
Backend	Django JsonResponse (built-in)	—	Endpoint JSON API status slot, dikonsumsi via HTTP <i>polling</i> (<i>Fetch API</i>) dari sisi klien
Backend	paho-mqtt (server)	1.6.1	MQTT <i>subscriber</i> di sisi <i>backend</i> Django
Frontend	HTML5 + CSS3 + JS	—	<i>Dashboard monitoring real-time</i> , UI reservasi

3.4 Parameter Filtering

3.4.1 Debounce Filter dan Justifikasi Temporal Berbasis Data Empiris

Debounce filter mensyaratkan bahwa pembacaan status “terisi” harus konsisten selama minimal T_{debounce} detik sebelum status ketersediaan slot pada sistem berubah secara resmi. Nilai parameter $T_{\text{debounce}} = 1$ menit ditentukan berdasarkan analisis distribusi empiris durasi *event* dari pengumpulan dataset historis (Raw_Data.csv dengan total 559 *event*).

Analisis perbandingan menunjukkan adanya pemisahan temporal yang jelas antara *False Positive* (FP) akibat objek transien atau gangguan sesaat dengan *True Positive* (TP) berupa kendaraan nyata. Rekapitulasi parameter statistik, nilai empiris, satuan, serta keterangan dari distribusi data tersebut disajikan secara lengkap pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5: Justifikasi Parameter Temporal Filtering Berbasis Distribusi Empiris

Parameter	Nilai Empiris	Satuan	Keterangan
Median durasi FP	3,75	menit	Dasar penentuan <i>threshold debounce</i> awal
Median durasi TP	142,73	menit	Konfirmasi separasi temporal TP–FP
Mean durasi FP	13,66	menit	Dipengaruhi <i>outlier</i> FP berdurasi panjang (hujan deras)
Mean durasi TP	143,50	menit	Konsisten — distribusi TP lebih normal
FP < 5 menit	178 dari 289 (61,6%)	—	Mayoritas FP berdurasi sangat singkat
FP < 10 menit	216 dari 289 (74,7%)	—	Tiga perempat FP dapat dieliminasi dengan <i>threshold</i> < 10 menit
TP > 30 menit	264 dari 270 (97,8%)	—	Hampir semua TP berdurasi jauh di atas <i>threshold debounce</i>
T_{debounce} (sistem)	1	menit	Konservatif untuk responsivitas; cukup untuk eliminasi objek transien sesaat

Berdasarkan temuan data empiris tersebut, pendekatan *temporal filtering* terbukti sangat valid secara statistik. Pemilihan nilai $T_{\text{debounce}} = 1$ menit bertindak sebagai nilai yang konservatif namun efektif untuk menjaga tingkat responsivitas sistem sekaligus mengeliminasi gangguan dari objek transien yang melintas sekilas.

3.5 Sinkronisasi Waktu NTP *Network Time Protocol*

Sinkronisasi waktu yang akurat merupakan syarat kritikal untuk menjamin konsistensi *timestamp* setiap *event* yang direkam di dalam *dataset*. Tanpa sinkronisasi waktu yang tepat, analisis temporal (seperti distribusi per jam atau per hari) tidak dapat diandalkan karena *timestamp* yang tercatat akan mengalami penyimpangan (*drift*) dari waktu kejadian nyata di lapangan.

Sistem *Parkwell* mengimplementasikan sinkronisasi waktu berbasis *Network Time Protocol* (NTP) dengan memanfaatkan pustaka *ntplib* pada perangkat Raspberry Pi. Raspberry Pi secara berkala melakukan sinkronisasi (*sync*) ke server NTP publik setiap 30 menit sekali, guna memastikan waktu sistem senantiasa aktual dan akurat.

3.6 Metode Pengumpulan Data

3.6.1 Dataset Data Sensor Lapangan (10–23 November 2025)

Data sensor lapangan dikumpulkan selama **2 minggu** (dalam periode bulan November tahun 2025, tepatnya tanggal 10 hingga 23 November 2025) di area parkir kampus Politeknik Negeri Batam, mencakup enam slot parkir (*Slot1–Slot6*). Pengambilan data dilakukan secara kontinu dengan interval *sampling* sensor sebesar 500 ms per sensor, yang kemudian diproses dan direkam ke dalam bentuk *event-log*.

Setiap *event* yang direkam di dalam dataset mencakup atribut-atribut terperinci berikut:

1. **Date:** Tanggal terjadinya *event*.
2. **SlotID:** Identifikasi spesifik slot parkir.
3. **Start Time:** Waktu mulai deteksi kendaraan.
4. **End Time:** Waktu akhir deteksi kendaraan.
5. **Parking Duration:** Durasi parkir dalam format HH:MM:SS.
6. **Observasi Manual:** Nilai diskrit (0 = tidak ada kendaraan, 1 = ada kendaraan).
7. **Hasil Klasifikasi:** Kesesuaian (*cocok / tidak cocok*) antara pembacaan sensor dan hasil observasi manual.
8. **Kategori:** Klasifikasi performa berupa *True Positive* (TP) atau *False Positive* (FP).

Ground truth (label *True Positive/False Positive*) pada penelitian ini ditentukan oleh satu peneliti melalui observasi manual tunggal, tanpa validasi silang oleh *observer* kedua maupun pembandingan rekaman video. Pada kasus-kasus ambigu misalnya objek yang melintas singkat di tepi jangkauan sensor keputusan klasifikasi berpotensi dipengaruhi oleh bias konfirmasi peneliti tunggal. Keterbatasan ini diakui secara eksplisit, dan validasi silang untuk penelitian lanjutan direkomendasikan menggunakan *observer* kedua yang independen atau rekaman video sinkron waktu sebagai pembandingan objektif. Selain itu, arsitektur pencatatan data pada

sistem Parkwell hanya merekam *event* pada saat sensor aktif mendeteksi objek. Akibatnya, *True Negative* dan *False Negative* tidak pernah tercatat dalam *log* sistem ini merupakan keterbatasan desain arsitektur data sejak awal, sehingga *Recall* dan *Accuracy* tidak dapat dihitung sama sekali dari *dataset* yang tersedia.

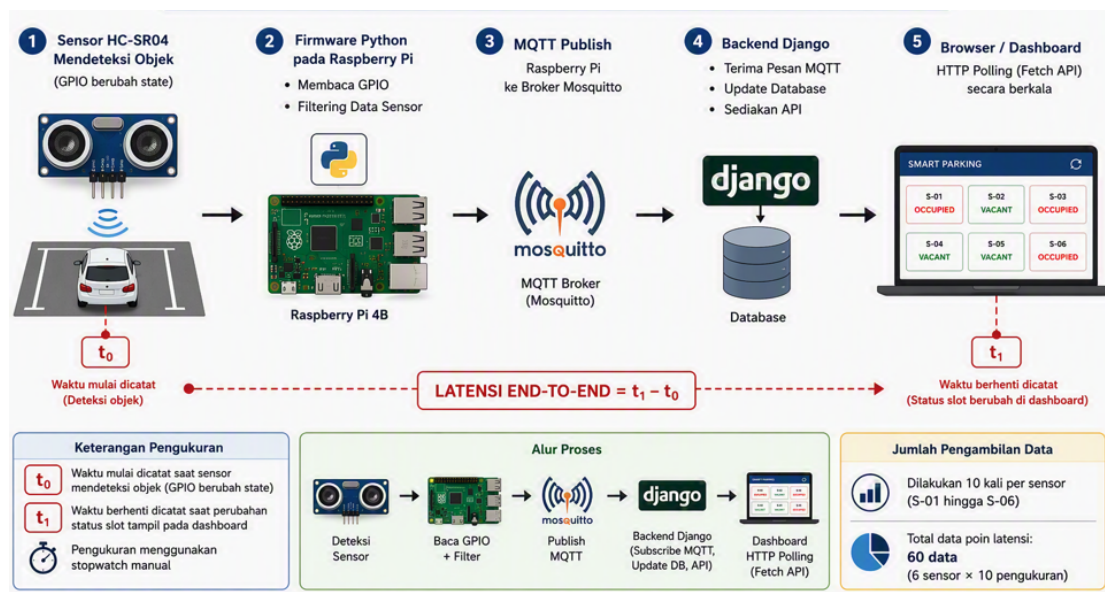
3.6.2 Data Latensi End-to-End

Data latensi diukur pada fase pengujian pra-penerapan (*pre-deployment testing*) sebelum sistem diaktifkan untuk pengujian penuh secara operasional. Pengukuran dilakukan menggunakan bantuan *stopwatch* manual, di mana waktu mulai (t_0) dicatat saat sensor mendeteksi objek (perubahan *state* GPIO), dan waktu berhenti (t_1) dicatat saat status slot parkir berhasil diperbarui pada halaman *dashboard* berbasis web.

Secara ringkas, alur pengukuran latensi *end-to-end* melibatkan lima tahapan utama sistem, mulai dari penginderaan sensor di tepi jaringan (*edge*), publikasi pesan melalui broker, pemrosesan di sisi pangkalan data, hingga pembaruan antarmuka web melalui teknik *HTTP polling*. Besaran nilai latensi dihitung berdasarkan selisih waktu mutlak:

$$\text{Latensi End-to-End} = t_1 - t_0 \quad (3.1)$$

Ilustrasi visual yang merinci tahapan alur proses, parameter pengukuran, serta jumlah pengambilan data latensi sistem *Parkwell* disajikan secara komprehensif pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3: Ilustrasi Visual Alur Pengukuran dan Pengambilan Data Latensi End-to-End Sistem Parkwell

Pengukuran ini dilakukan sebanyak 10 kali pengulangan pada masing-masing titik sensor secara bergantian (mulai dari S-01 hingga S-06), perlu ditegaskan bahwa keenam puluh data poin latensi di atas diperoleh secara manual menggunakan *stopwatch* pada fase *pre-deployment* (kondisi ideal, sebelum gangguan lingkungan 14 hari uji lapangan berlangsung), bukan dari pencatatan otomatis berbasis *timestamp* NTP yang sesungguhnya sudah tersedia pada arsitektur sistem. Akibatnya, angka latensi 5,205 detik yang dilaporkan di Bab 5 mencerminkan kondisi jaringan yang relatif ideal, dan belum tentu merepresentasikan kondisi

nyata selama 14 hari uji lapangan yang penuh gangguan. Pengukuran latensi otomatis berbasis *timestamp* NTP sepanjang periode uji lapangan penuh direkomendasikan sebagai prioritas metodologis pada penelitian lanjutan.

3.6.3 Kuesioner Kepuasan Pengguna

Populasi target penelitian ini adalah sivitas akademika pengguna area parkir kampus Politeknik Negeri Batam yang telah menerima demonstrasi langsung sistem Parkwell. Teknik pengambilan sampel yang digunakan adalah *convenience sampling* (*non-probability sampling*) responden direkrut dari individu yang tersedia dan bersedia mengikuti demonstrasi dalam rentang waktu penyebaran kuesioner, bukan melalui pengambilan sampel acak dari kerangka populasi yang terdefinisi. Penelitian ini tidak melakukan perhitungan ukuran sampel formal (misalnya rumus Slovin atau tabel Krejcie-Morgan) sebelum penyebaran kuesioner. Total 34 responden valid diperoleh dari proses ini.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.11, komposisi responden didominasi laki-laki (91,2%) dan kelompok usia 18–25 tahun (52,9%). Karena *convenience sampling* tidak menjamin keterwakilan proporsional terhadap populasi sivitas akademika secara keseluruhan, skor kepuasan KPI-5 berpotensi bias terhadap preferensi kelompok yang terlalu terwakili. Generalisasi hasil KPI-5 perlu dilakukan dengan hati-hati, dan penelitian lanjutan disarankan menggunakan *probability sampling* dengan kuota gender dan usia yang berimbang.

Pemilihan metode dan instrumen pengumpulan data ini didasarkan pada beberapa pertimbangan metodologis yang kuat:

- **Skala Likert 5 Poin:** Dipilih karena merupakan standar yang paling umum dan efektif dalam evaluasi interaksi manusia dan komputer (*Human-Computer Interaction*) untuk mengkuantifikasikan persepsi subjektif pengguna ke dalam bentuk nilai numerik yang terstruktur, mulai dari skala 1 (Sangat Tidak Setuju) hingga 5 (Sangat Setuju).
- **Google Forms:** Dipilih sebagai platform penyebaran karena efisiensi distribusi secara digital, kemudahan akses bagi responden melalui perangkat seluler atau komputer, serta kemampuannya dalam mengumpulkan rekapitulasi data secara otomatis guna meminimalisir kesalahan rekapitulasi manual.
- **10 Butir Aspek Evaluasi:** Dirancang secara komprehensif untuk mencakup berbagai dimensi penting performa non-fungsional sistem, mulai dari antarmuka pengguna (*UI*), akurasi data, kecepatan, kemudahan penggunaan, efisiensi waktu, notifikasi, integrasi IoT, kenyamanan, hingga kepuasan umum dan loyalitas pengguna.

Rincian kode, singkatan, beserta seluruh butir pernyataan yang diujikan untuk mengukur kebutuhan non-fungsional kepuasan pengguna tersebut disajikan secara terperinci pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6: Kuesioner Kepuasan Pengguna Sistem Parkwell

Kode	Singkatan	Butir Pernyataan Kuesioner
Q1	UI	Tampilan website <i>Parkwell</i> mudah dipahami dan menarik.
Q2	Akurasi	Informasi ketersediaan tempat parkir yang ditampilkan akurat dan <i>real-time</i> .
Q3	Kecepatan	Proses pencarian tempat parkir melalui sistem <i>Parkwell</i> cepat dan efisien.
Q4	Kemudahan	Fitur-fitur pada <i>Parkwell</i> mudah digunakan oleh pengguna baru.
Q5	Hemat Waktu	Sistem <i>Parkwell</i> membantu saya menghemat waktu dalam mencari parkir.
Q6	Notifikasi	Notifikasi dan informasi yang diberikan sistem jelas dan bermanfaat.
Q7	Integrasi IoT	Integrasi antara sensor IoT dan tampilan <i>dashboard</i> berjalan dengan baik.
Q8	Kenyamanan	Sistem <i>Parkwell</i> memberikan pengalaman parkir yang lebih nyaman.
Q9	Kepuasan	Saya merasa puas dengan penggunaan sistem <i>Parkwell</i> .
Q10	Loyalitas	Saya bersedia menggunakan <i>Parkwell</i> kembali jika tersedia di area lain.

3.6.4 Analisis KPI-1: Akurasi Deteksi Sensor

Formula yang digunakan untuk menganalisis akurasi deteksi sensor pada KPI-1 didasarkan pada kerangka evaluasi metrik performa standar dalam sistem pemantauan berbasis IoT dan analisis kesalahan (*error analysis*) [11].

Parameter *Precision* mengukur proporsi deteksi “terisi” yang benar-benar valid (kendaraan nyata ada) terhadap total prediksi positif sistem, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.2)$$

Sementara itu, tingkat positif palsu (*FP Rate*) mengukur proporsi deteksi “terisi” yang tidak valid (tidak ada kendaraan nyata) akibat gangguan lingkungan atau objek transien, yang dirumuskan sebagai:

$$\text{FP Rate} = \frac{FP}{TP + FP} \quad (3.3)$$

Catatan penting: *False Negative* (FN) tidak tercatat secara eksplisit dalam log sistem karena arsitektur sistem hanya merekam *event* saat sensor aktif mendeteksi objek. Oleh karena itu, *Recall* dan *Accuracy* sejati tidak dapat dihitung langsung dari dataset yang tersedia, sehingga *Precision* (Persamaan 3.2) dan *FP Rate* (Persamaan 3.3) ditetapkan sebagai metrik utama evaluasi KPI-1 [11].

Analisis ini dilakukan dalam empat dimensi utama:

1. **Temporal per jam:** Distribusi *False Positive* berdasarkan jam dalam sehari untuk mengidentifikasi jam-jam dengan tingkat kerawanan anomali tinggi.
2. **Temporal per hari:** Distribusi berdasarkan tanggal pengujian untuk mengidentifikasi hari-hari yang mengalami anomali lingkungan spesifik.
3. **Spasial per slot:** Distribusi per slot (*Slot1–Slot6*) guna mengidentifikasi adanya *outlier* spasial pada titik sensor tertentu.

4. **Distribusi durasi event:** Analisis statistik deskriptif terhadap durasi *True Positive* dan *False Positive* sebagai landasan justifikasi parameter *temporal filtering*.

3.6.5 Analisis Kepuasan Pengguna

Analisis kuesioner kepuasan pengguna pada KPI-5 bertujuan untuk mengevaluasi pengalaman subjektif dan tingkat penerimaan operasional pengguna terhadap sistem *Parkwell*. Pengolahan data kuantitatif dari 34 responden valid mencakup beberapa tahapan metodologis utama:

1. **Pemetaan Skala Likert:** Seluruh respons kuesioner dipetakan ke dalam nilai numerik diskrit dengan ketentuan: Sangat Setuju = 5, Setuju = 4, Netral = 3, Tidak Setuju = 2, dan Sangat Tidak Setuju = 1.
2. **Analisis Statistik Deskriptif per Butir:** Menghitung nilai rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (*standard deviation* / *SD*) untuk masing-masing butir pernyataan (Q1–Q10) dari 34 responden valid.
3. **Analisis Keseluruhan (*Overall*):** Menghitung *overall mean* (rata-rata dari seluruh respons akumulatif seluruh butir) dan *overall SD* untuk melihat performa kepuasan makro sistem.
4. **Kategorisasi Interpretasi:** Hasil skor rata-rata dikonversikan ke dalam interpretasi kualitatif menggunakan acuan rentang skala Likert 5 poin yang disajikan pada Tabel 3.7.
5. **Segmentasi Frekuensi Pengguna:** Menganalisis variasi tingkat kepuasan berdasarkan karakteristik intensitas penggunaan fasilitas parkir oleh responden (kategori: Setiap Hari, Sering, Kadang-kadang, dan Jarang).

Tabel 3.7: Standar Kategorisasi Interpretasi Skala Likert 5 Poin

No	Rentang Nilai Rata-rata	Interpretasi Kualitatif
1	1,00 – 1,80	Sangat Tidak Puas / Sangat Rendah
2	1,81 – 2,60	Tidak Puas / Rendah
3	2,61 – 3,40	Cukup / Netral
4	3,41 – 4,20	Puas / Tinggi
5	4,21 – 5,00	Sangat Puas / Sangat Tinggi

3.6.6 Keterbatasan Pencatatan Data Cuaca dan Pengujian Statistik Inferensial

Penelitian ini **tidak** melakukan pencatatan data cuaca terstruktur (misalnya curah hujan terukur dalam mm per jam, kelembapan terukur otomatis, atau data BMKG/API cuaca) yang disinkronkan dengan *timestamp event* sensor selama masa uji lapangan. Data cuaca yang tersedia hanya berupa catatan kualitatif peneliti (observasi "hujan lebat", "gerimis", dan sebagainya) tanpa nilai numerik yang presisi dan bertimestamp. Akibatnya, uji korelasi atau uji inferensial lain antara kondisi cuaca dan *FP rate* **tidak dapat** dilakukan secara valid pada data yang tersedia.

Sebagai konsekuensinya, seluruh klaim kausal "hujan menyebabkan lonjakan FP" pada draf sebelum revisi diubah menjadi pernyataan observasional yang menyatakan ketiadaan pengujian statistik. Penjelasan utama yang diajukan untuk tingginya *FP rate* secara keseluruhan

adalah keterbatasan inheren sensor ultrasonik yang tidak memiliki kemampuan klasifikasi objek serta arsitektur sistem yang tidak mencatat *True Negative* (TN) dan *False Negative* (FN). Pencatatan data cuaca terstruktur yang disinkronkan dengan *timestamp* sensor, diikuti uji korelasi formal, dicantumkan sebagai prioritas utama penelitian lanjutan.

Chapter 4

Implementasi Sistem

4.1 Implementasi Perangkat Keras

4.1.1 Pemasangan Sensor HC-SR04 pada Slot Parkir

Implementasi perangkat keras dimulai dengan pemasangan fisik enam unit sensor ultrasonik HC-SR04 pada masing-masing slot parkir (Slot1 hingga Slot6) di area parkir kampus Politeknik Negeri Batam. Setiap sensor dipasang pada tiang menggunakan braket plastik dengan ketinggian 80–120 cm dari permukaan tanah. Orientasi *downward-facing* dipilih karena dapat memaksimalkan area deteksi bodi kendaraan yang lebih luas dan reflektif, meminimalkan interferensi dari objek bergerak horizontal (seperti pejalan kaki dan kendaraan yang melintas) yang memiliki sudut pantulan berbeda, serta konsisten dengan *best practice* instalasi sensor parkir dalam literatur [10].

4.1.2 Kalibrasi Threshold per Slot

Setelah pemasangan fisik dan pengkabelan (*wiring*) selesai, setiap sensor dikalibrasi secara individual untuk menentukan ambang batas (*threshold*) jarak optimal. Proses kalibrasi dilakukan melalui beberapa tahapan berikut:

1. Mengukur jarak sensor ke permukaan aspal saat slot kosong (*baseline_empty*).
2. Memarkirkan kendaraan standar di dalam slot dan mengukur jarak sensor ke atap kendaraan (*baseline_occupied*).
3. Menetapkan nilai *threshold* menggunakan persamaan:

$$\text{Threshold} = \frac{\text{baseline_empty} + \text{baseline_occupied}}{2} \quad (4.1)$$

dengan toleransi sebesar ± 10 cm.

4. Memverifikasi *threshold* tersebut dengan melakukan pengujian berupa memarkir dan mengeluarkan kendaraan sebanyak 10 kali berturut-turut.

Selama proses kalibrasi, Slot4 teridentifikasi sebagai slot yang memerlukan perhatian khusus karena menghasilkan *False Positive Rate* (FP Rate) tertinggi sebesar 66,12% pada pengujian lapangan. Indikasi terkuat dari observasi lapangan adalah ketidakstabilan tanah di lokasi Slot4 yang menyebabkan sensor dan braket sedikit bergeser. Tingginya nilai FP tersebut diduga berkaitan dengan kombinasi faktor lingkungan, posisi pemasangan sensor, karakteristik area sekitar slot, serta kemungkinan perlunya kalibrasi yang lebih spesifik untuk kondisi Slot4.

Formula kalibrasi di atas menggunakan satu nilai *baseline_occupied* tunggal yang diperoleh dari satu jenis kendaraan standar saat kalibrasi awal, dan tidak mengakomodasi variasi tinggi bodi antar kelas kendaraan (misalnya sedan bertubuh rendah, SUV/MPV bertubuh tinggi, hingga sepeda motor yang jauh lebih rendah dan sempit). Ketidaksesuaian *threshold* dengan kelas kendaraan aktual yang parkir kemungkinan menjadi salah satu kontributor variasi *FP rate* antar *slot* maupun antar *event* yang belum dianalisis secara terpisah dalam penelitian ini, karena *dataset* lapangan tidak mencatat jenis/kelas kendaraan pada setiap *event*. Kalibrasi *threshold* adaptif berbasis kelas kendaraan, atau penggunaan rentang *threshold* (bukan nilai tunggal), direkomendasikan sebagai perbaikan pada penelitian lanjutan.

Analisis lebih lanjut mengenai performa Slot4 dibandingkan kelima slot lainnya — termasuk dugaan kontribusi keterbatasan formula kalibrasi ini terhadap tingginya FP Rate — disajikan pada Bab V, Subbab 5.2.4.

4.2 Implementasi Firmware Edge (Raspberry Pi)

4.2.1 Struktur Firmware Python

Firmware Python yang berjalan pada Raspberry Pi mengimplementasikan tiga komponen utama: *sensor reading loop*, *signal processing pipeline*, dan *MQTT publishing module*. Firmware dirancang dengan pendekatan *multi-threading* untuk memastikan pembacaan sensor yang konsisten tanpa *blocking* pada proses *MQTT publishing*.

4.2.2 Implementasi Debounce Filter

Definisi dan Konsep Dasar *Debounce Filter*: Secara konseptual, *debounce filter* adalah teknik penyaringan sinyal digital yang dirancang untuk menghilangkan fluktuasi transien, pantulan sinyal yang tidak stabil (*chattering*), atau perubahan status sesaat pada pembacaan sensor. Filter ini memastikan bahwa sebuah perubahan status fisik hanya akan diakui dan diproses oleh sistem apabila sinyal tersebut terbukti stabil melampaui batas waktu penundaan (*threshold duration*) tertentu.

Alasan Kebutuhan *Debounce Filter* dalam Sistem Parkir IoT: Dalam implementasi nyata di lingkungan kampus atau area terbuka, penggunaan *debounce filter* pada sensor ultrasonik menjadi sangat krusial atas beberapa pertimbangan teknis berikut:

1. **Eliminasi Objek Transien dan Gangguan Lingkungan:** Sensor ultrasonik HC-SR04 sangat sensitif terhadap objek bergerak cepat yang melintas sekilas di area tangkapan sensor—seperti pejalan kaki, hewan, dedaunan yang tertiup angin, atau cipratan air hujan. Tanpa adanya filter, objek-objek ini akan memicu pembacaan status terisi atau palsu (*false positive*).
2. **Mencegah Lonjakan Pesan dan Beban Jaringan (*State Churn*):** Tanpa mekanisme penundaan waktu, sistem akan mengalami *flapping* (perubahan status bolak-balik yang terlalu cepat) setiap kali terjadi gangguan kecil. Hal ini akan membanjiri antrean paket data pada MQTT broker dan menyebabkan basis data mencatat log transaksi sampah yang tidak akurat.
3. **Validasi Berdasarkan Karakteristik Empiris Data:** Berdasarkan analisis dataset historis sistem *Parkwell*, sebagian besar gangguan anomali (*False Positive*) memiliki durasi yang sangat singkat, sedangkan durasi parkir kendaraan yang valid (*True Positive*) jauh lebih lama (lihat Bab V, Tabel 5.6). Oleh karena itu, filter berbasis waktu mutlak

diperlukan untuk menciptakan batas pemisah yang tegas antara gangguan transien dan aktivitas parkir yang sah.

Mekanisme Implementasi Teknis: Dalam realisasi *firmware* pada Raspberry Pi, *debounce filter* diimplementasikan menggunakan pewaktuan (*timer*) berbasis *timestamp* yang disinkronkan melalui *Network Time Protocol* (NTP). Ketika sensor mendeteksi adanya transisi status baru, sistem menginisiasi pencatatan waktu awal. Status baru tersebut **hanya akan dikonfirmasi dan dipublikasikan** ke broker MQTT apabila nilai status bertahan secara konsisten tanpa interupsi selama minimal 1 menit ($T_{\text{debounce}} = 1$ menit). Apabila dalam rentang waktu tersebut status kembali ke nilai semula (misalnya objek yang lewat sudah pergi sebelum 1 menit), *timer* akan diatur ulang (*reset*) dan tidak ada perubahan status yang dikirimkan ke jaringan.

4.2.3 Implementasi Concurrency Control Reservasi

Untuk mencegah *race condition* dan *double booking* pada sistem reservasi, *backend* Django mengimplementasikan kombinasi dua mekanisme *concurrency control*:

1. **transaction.atomic():** Seluruh operasi baca-cek-tulis reservasi (membaca status slot, memeriksa ketersediaan, dan menulis data reservasi) dieksekusi dalam satu transaksi tunggal pada basis data SQLite yang tidak dapat diinterupsi. Jika salah satu operasi mengalami kegagalan, seluruh transaksi akan dikembalikan secara otomatis (*rollback*).
2. **select_for_update():** Kueri *SELECT* yang membaca status slot menggunakan klausa *FOR UPDATE*, yang mengunci baris data (*row-level locking*) slot tersebut di tingkat basis data sehingga transaksi paralel lainnya tidak dapat membaca atau mengubah baris tersebut hingga transaksi yang sedang berjalan selesai.

Kombinasi kedua mekanisme ini memastikan bahwa dalam skenario di mana dua pengguna mencoba memesan slot yang sama secara bersamaan, hanya satu permintaan yang akan berhasil. Permintaan kedua akan mendapatkan respons galat (*error*) berupa pesan “slot tidak tersedia” setelah transaksi pertama selesai dan kunci pangkalan data dilepas. Selain itu, sistem juga mengimplementasikan mekanisme *auto-release*, di mana reservasi yang telah melewati batas waktu tanpa digunakan akan otomatis dilepas kembali ke status tersedia.

Perlu digarisbawahi bahwa deskripsi mekanisme di atas menjelaskan *desain arsitektur* sistem, bukan klaim keberhasilan operasional. Evaluasi menyeluruh terhadap keandalan mekanisme ini pada kondisi operasional riil termasuk keterbatasan terkait ketersediaan data transaksi reservasi dari pengguna aktif di lapangan dibahas lebih lanjut pada Bab V, Subbab 5.5.2.

4.3 Implementasi Dashboard Web

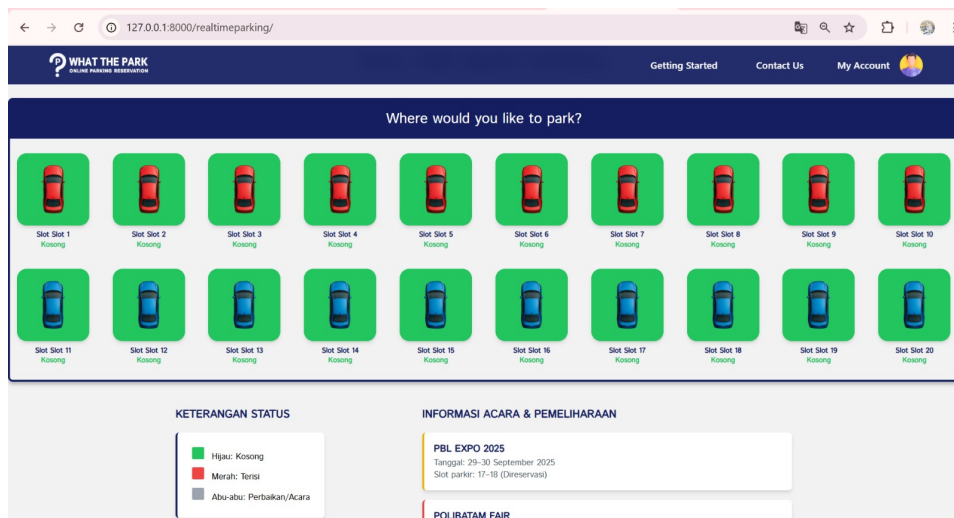
4.3.1 Fitur-Fitur Dashboard Parkwell

Dasbor web *Parkwell* diimplementasikan menggunakan HTML5, CSS3, dan JavaScript dengan mekanisme pembaruan data berbasis *HTTP polling* (*Fetch API*) ke *backend* Django. Dasbor ini menyediakan berbagai fitur utama sebagai berikut:

1. **Monitoring Real-Time:** Tampilan status 20 slot (dengan 6 slot yang terpasang sensor secara *real-time*) disertai indikator warna (hijau = kosong, merah = terisi, kuning = dipesan) yang diperbarui otomatis melalui *HTTP polling* (*Fetch API*) setiap 2 detik tanpa melakukan penyegaran halaman (*refresh*).

2. **Reservasi Slot:** Formulir reservasi berbasis waktu yang memungkinkan pengguna terautentikasi memesan slot untuk rentang waktu tertentu di masa mendatang. Sistem mencegah terjadinya *double booking* melalui mekanisme *concurrency control* di sisi *backend*.
3. **Riwayat Parkir:** Pengguna dapat melihat riwayat penggunaan parkir mereka berdasarkan catatan log sistem.
4. **Manajemen Akun:** Fitur registrasi, masuk (*login*), keluar (*logout*), dan manajemen profil pengguna.
5. **Kontrol Buzzer IoT:** Administrator dapat menonaktifkan pengeras suara (*buzzer*) di slot tertentu melalui antarmuka dasbor, di mana perintah dikirimkan kembali ke Raspberry Pi melalui protokol MQTT pada topik `parkwell/buzzer/{slot_id}/control`.
6. **Tampilan Admin:** Antarmuka khusus administrator untuk melakukan pemantauan mendalam serta tindakan pengelolaan pada slot dan data reservasi.
7. **Papan Informasi:** Menampilkan jumlah slot kosong dan terisi secara agregat guna memberikan tinjauan cepat mengenai ketersediaan ruang parkir.

Visualisasi dari masing-masing antarmuka fitur dasbor web *Parkwell* disajikan melalui beberapa gambar berikut:



Gambar 4.1: Tampilan *Monitoring* Real-Time Slot Parkir

WHAT THE PARK
ONLINE PARKING RESERVATION

Getting Started Contact Us My Account

Reserve Your Spot

Select date [View place](#)

Date :

Parking Slot :

From : Until :

Car Image: No file chosen

Where would you like to park?

Slot 1

Available

Slot 2

Available

Slot 3

Available

Slot 4

Available

Gambar 4.2: Tampilan Reservasi Slot Parkir

LOGO About Us Contact Us My Account

[Home](#) > My Account

My Account

[Account](#) [Reservations](#) [User Guide](#)

[Reserve Now](#)

Date	Spot	Car Details				Time	Status	Actions
		Brand	Model	Color	License Plate			
23-03-2025	3	Toyota	RAVANZA	Silver	BP 123 XYZ	04:00:00	Reserved	Cancel
22-03-2025	1	Toyota	RAVANZA	Silver	BP 123 XYZ	00:30:00	About To End	Extend

Gambar 4.3: Tampilan Riwayat Parkir

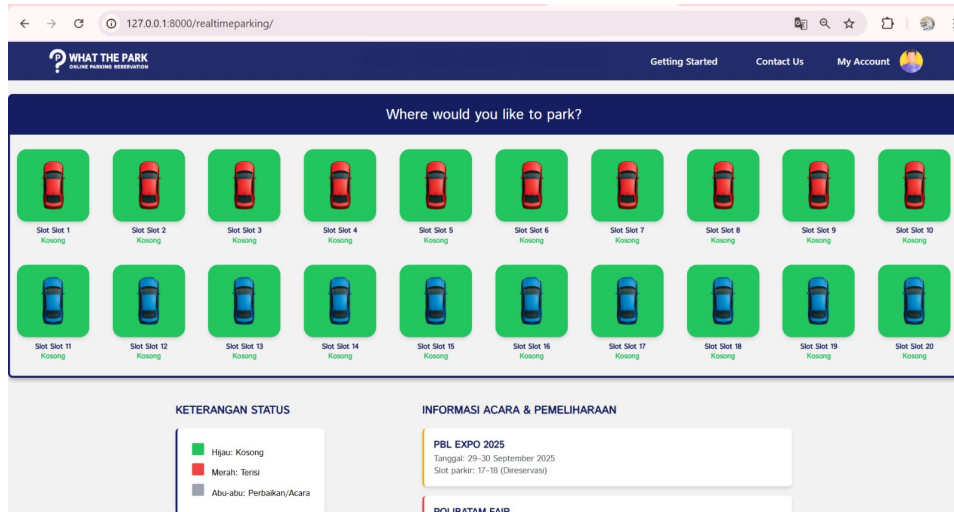
The image shows two side-by-side web forms. The left form is titled 'Login' and has a 'LOGO' placeholder. It contains fields for 'Username' and 'Password', a 'Sign In' button, and a link 'Don't Have An Account? Sign Up'. The right form is titled 'Register' and also has a 'LOGO' placeholder. It contains fields for 'Username', 'Email', 'Password', and 'Phone Number', a 'Sign Up' button, and a link 'Already Have An Account? Sign In'. Both forms feature a blue sidebar on the left with the text 'RESERVE YOUR PARK EASILY!!' and an illustration of cars in a parking lot.

Gambar 4.4: Tampilan Awal Login dan Register

The image shows an 'Admin Dashboard' titled 'Client Data Center'. It has a dark blue header with a 'LOGO' placeholder. Below the header, there are three tabs: 'Area Overview' (selected), 'Reservations', and 'Account'. The main content area is titled 'Park Area Informations' and displays a visual representation of a parking lot with three slots. Below this, there are three sections for individual slots:

- SLOT 1**: Status: **Occupied** (red). Username: DammyUser404. Time: 07:00 AM - 11:00 AM. Actions: **Call** (green), **Reset slot** (red).
- SLOT 2**: Status: **Reserved** (yellow). Username: DammyUser404. Time: 07:00 AM - 11:00 AM. Actions: **Call** (green), **Cancel** (red). A link 'See all reservations' is also present.
- SLOT 3**: Status: **Available** (green). Actions: **Set as Occupied** (red).

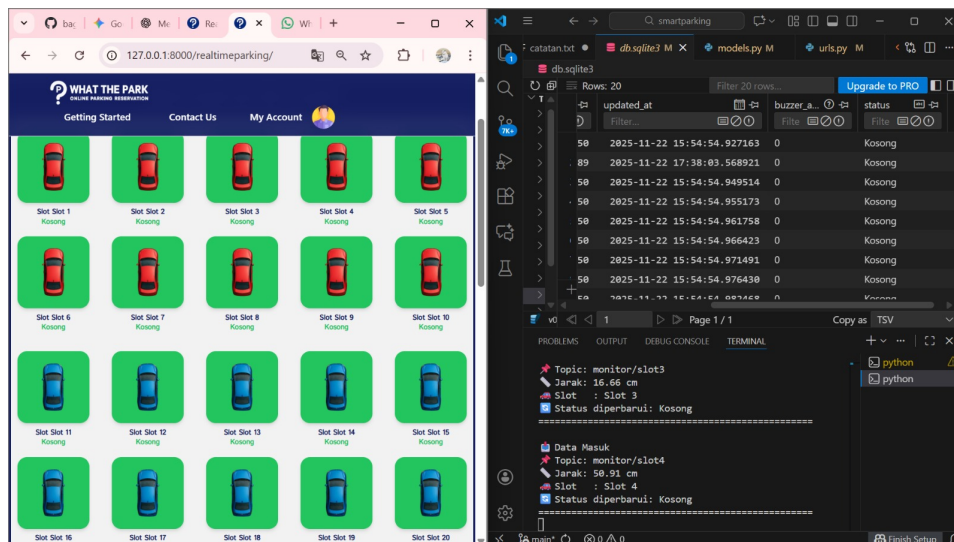
Gambar 4.5: Tampilan Admin Dashboard



Gambar 4.6: Halaman Informasi Real-Time Slot Parkir

4.3.2 Implementasi Pembaruan Real-Time Berbasis HTTP Polling

Mekanisme pembaruan status pada dasbor *Parkwell* menggunakan pendekatan *HTTP polling*, di mana peramban (*browser*) klien secara berkala—dengan interval 2 detik untuk halaman *monitoring* real-time dan 3 detik untuk halaman reservasi—mengirimkan permintaan menggunakan *JavaScript Fetch API* ke *endpoint* JSON Django untuk memeriksa status slot parkir terkini. Setiap kali MQTT *subscriber* menerima pesan perubahan status dari Raspberry Pi, *backend* akan memperbarui basis data. Dengan demikian, pada siklus *polling* berikutnya, setiap klien yang aktif membuka halaman dasbor akan menerima data status terbaru melalui respons JSON, sehingga konsistensi informasi antar-pengguna dapat terjaga tanpa konflik. Visualisasi dari proses pembaruan status slot parkir tersebut disajikan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7: Proses Slot Parkir Terupdate

4.4 Pengujian Fungsional Sistem

Sebelum pengujian lapangan formal (10–23 November 2025), seluruh fitur sistem *Parkwell* telah diuji fungsionalnya secara terpisah melalui skenario terkontrol di lingkungan pengembangan. Tabel 4.1 merangkum hasil pengujian fungsional sistem *Parkwell*. Perlu ditegaskan bahwa hasil pada tabel ini merupakan verifikasi bahwa setiap fitur *bekerja sesuai desain* dalam skenario terkontrol, bukan hasil validasi terhadap data operasional riil selama 14 hari pengujian lapangan — pembahasan performa pada kondisi lapangan riil disajikan secara terpisah pada Bab V.

Tabel 4.1: Hasil Pengujian Fungsional Sistem Parkwell

No	Fitur yang Diuji	Skenario Pengujian	Hasil	Keterangan
1	Deteksi sensor <i>real-time</i>	Parkir dan keluarkan kendaraan dari tiap slot	Lulus (Uji Terkontrol)	Semua 6 slot terdeteksi dengan benar
2	Pembaruan <i>dashboard</i> (<i>HTTP polling</i>)	Buka <i>dashboard</i> di 3 <i>browser</i> berbeda, ubah status slot	Lulus (Uji Terkontrol)	Semua <i>browser</i> diperbarui ≤ 2 detik (sesuai interval <i>polling</i>)
3	Reservasi slot normal	Buat reservasi slot kosong untuk rentang waktu valid	Lulus (Uji Terkontrol)	Reservasi berhasil dibuat dan ditampilkan
4	<i>Concurrency control</i> reservasi	Dua pengguna memesan slot yang sama secara bersamaan (simulasi)	Lulus (Uji Terkontrol)	Hanya satu reservasi berhasil, yang lain mendapat <i>error</i>
5	<i>Auto-release</i> reservasi	Tunggu <i>grace period</i> 15 menit setelah batas waktu reservasi	Lulus (Uji Terkontrol)	Slot dilepas otomatis dan tersedia kembali
6	Kontrol <i>buzzer</i> via <i>dashboard</i>	Aktifkan dan nonaktifkan <i>buzzer</i> slot tertentu dari <i>dashboard</i>	Lulus (Uji Terkontrol)	<i>Buzzer</i> merespons perintah dalam < 2 detik
7	Autentikasi pengguna	<i>Register</i> , <i>login</i> , <i>logout</i> , akses halaman terlindungi tanpa <i>login</i>	Lulus (Uji Terkontrol)	<i>Redirect</i> ke halaman <i>login</i> untuk akses tanpa autentikasi
8	Persistensi MQTT	Matikan <i>backend</i> Django selama 30 detik, hidupkan kembali	Lulus (Uji Terkontrol)	Pesan tersimpan di <i>broker</i> dan diterima saat <i>backend online</i>

Catatan: seluruh hasil pada tabel ini berasal dari pengujian fungsional terkontrol di lingkungan pengembangan sebelum pengujian lapangan 14 hari (10–23 November 2025), bukan dari data operasional riil.

Butir No. 4 (*concurrency control*) dan No. 1 (deteksi sensor) memiliki evaluasi lanjutan berbasis data lapangan riil pada Bab V, Subbab 5.5.2 dan 5.2.1.

4.5 Kondisi Lapangan Pengujian dan Tantangan Teknis

4.5.1 Konteks Lingkungan Pengujian

Pengujian lapangan dilaksanakan pada periode 10–23 November 2025, yang bertepatan dengan musim hujan di Pulau Batam. Kondisi lingkungan selama periode pengujian di antaranya meliputi hujan dengan intensitas bervariasi (gerimis hingga lebat) terutama pada minggu kedua pengujian (18–23 November 2025) kelembapan relatif udara yang tinggi (80–95%) yang memengaruhi kecepatan propagasi gelombang ultrasonik pada permukaan aspal basah, peningkatan risiko pantulan spekular (*specular reflection*) gelombang ultrasonik, serta tiupan angin yang menggerakkan daun dan serpihan (*debris*) sehingga menciptakan objek transien tambahan di area deteksi sensor. Sebagaimana catatan cuaca di atas bersifat kualitatif dan tidak disertai instrumen pengukuran cuaca terstruktur, sehingga tidak dijadikan dasar klaim sebab-akibat statistik (lihat pembahasan lebih lanjut mengenai keterbatasan uji inferensial ini pada Bab V, Subbab 5.2.6).

Visualisasi dari instalasi sensor pada pengujian lapangan tersebut disajikan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8: Instalasi Sensor Pengujian Lapangan

4.5.2 Temuan Anomali 23 November 2025

Tanggal 23 November 2025 mencatat anomali paling ekstrem dalam seluruh periode pengujian: 129 *event* terekam dengan 111 *False Positive* (*FP rate* sebesar 86,05%) dan hanya 18 *True Positive* (13,95%). Pola ini sangat berbeda dari rata-rata sistem (*FP rate* sebesar 51,70%) dan mengindikasikan kondisi lingkungan yang ekstrem.

Penelitian ini **tidak** menyimpulkan bahwa hujan lebat "menyebabkan" lonjakan *False Positive* (FP) pada 23 November 2025, karena tidak ada data cuaca terstruktur maupun uji statistik yang mendukung klaim sebab-akibat tersebut. Yang dapat dilaporkan secara jujur hanyalah: (1) *FP rate* pada tanggal tersebut jauh di atas rata-rata sistem; (2) peneliti mencatat secara kualitatif adanya hujan lebat pada tanggal tersebut; dan (3) kedua fakta ini terjadi berbarengan (*co-occurrence*), tanpa hubungan sebab-akibat yang telah diuji secara statistik (lihat Bab V, Subbab 5.2.6 untuk pembahasan lebih lanjut mengenai keterbatasan uji inferensial ini, termasuk alasan mengapa uji korelasi formal tidak dapat dilakukan pada penelitian ini).

Penjelasan yang lebih mendasar dan dapat dipertanggungjawabkan langsung dari desain sistem adalah bahwa sensor ultrasonik HC-SR04 secara inheren tidak memiliki mekanisme klasifikasi objek, sehingga tidak dapat membedakan pantulan dari kendaraan sungguhan dengan pantulan dari genangan air, tetesan hujan pada sudut pancaran sensor (*beam angle*), atau objek transien lain. *Precision* keseluruhan sebesar 48,30% pada seluruh 14 hari uji bukan hanya pada 23 November mencerminkan keterbatasan mendasar ini (lihat Bab V, Subbab 5.2.1). Anomali 23 November hanyalah manifestasi paling ekstrem dari keterbatasan yang sama, bukan penyebab terpisah yang dapat dijadikan alasan pengecualian hasil.

Temuan ini menjadi bukti empiris bahwa sensor ultrasonik HC-SR04 memiliki keterbatasan

signifikan untuk aplikasi luar ruangan (*outdoor*) di lingkungan tropis yang sering hujan, sekaligus menjadi dasar rekomendasi pengembangan sistem ke arah penggunaan sensor tahan air (*waterproof*), seperti JSN-SR04T, untuk implementasi produksi jangka panjang.

4.6 Rangkuman Implementasi

Tabel 4.2 merangkum status keseluruhan dari implementasi seluruh komponen sistem *Parkwell*, mulai dari perangkat keras sensor hingga antarmuka dasbor web dan kontrol *backend*.

Tabel 4.2: Rangkuman Status Implementasi Seluruh Komponen Sistem *Parkwell*

No	Komponen Sistem	Status Implementasi	Kondisi	Catatan
1	Sensor HC-SR04 (Slot1–Slot6)	Terpasang & Terkalibrasi	Beroperasi	<i>Intermittent</i> pada kondisi hujan lebat
2	<i>Wiring voltage divider</i> GPIO	Lengkap	Normal	Semua 6 sensor dengan <i>voltage divider</i> yang benar
3	<i>Firmware</i> Python Raspberry Pi	<i>Deployed</i>	Normal	<i>debounce filter</i> aktif
4	Sinkronisasi NTP	Aktif	Normal	<i>Sync</i> setiap 10 menit ke <code>pool.ntp.org</code>
5	Mosquitto MQTT Broker	<i>Deployed & Configured</i>	Normal	<i>Auth, QoS, persistent session</i> aktif
6	Django Backend	<i>Deployed</i>	Normal	REST API JSON (<i>HTTP Polling</i>), SQLite
7	<i>Dashboard</i> Web (<i>Monitoring</i>)	<i>Published</i>	Normal	Dapat diakses via URL kampus
8	Fitur Reservasi	<i>Deployed</i>	Normal	<i>Concurrency control select for update()</i> aktif; evaluasi keandalan pada data riil belum tersedia (lihat Bab V, Subbab 5.5.2)
9	Notifikasi Buzzer IoT	<i>Deployed</i>	Normal	Kontrol via <i>dashboard</i> , MQTT <i>command</i>

Rangkuman menyeluruh mengenai bukti pendukung dan keterbatasan validitas hasil evaluasi tiap KPI yang berkaitan dengan komponen-komponen implementasi di atas disajikan sebagai penutup pembahasan hasil pada Bab V, Subbab 5.8.

Chapter 5

HASIL PENGUJIAN

5.1 Pendahuluan dan Ringkasan Hasil Pengujian

Bab ini menyajikan seluruh hasil pengujian sistem *Parkwell* yang dipetakan secara eksplisit ke dalam enam *Key Performance Indicator* (KPI) yang telah ditetapkan pada Bab III. Setiap angka yang disajikan dapat ditelusuri secara langsung ke sumber data primer masing-masing: berkas *Raw_Data.csv* (559 event, 14 hari, 6 slot), *Data_Akurasi.csv* (60 pengukuran latensi, 10 per sensor $\times$ 6 sensor), serta kuesioner kepuasan pengguna (34 responden, 10 butir pernyataan). Pendekatan kerangka evaluasi berbasis KPI (*KPI-driven evaluation framework*) ini diterapkan untuk memastikan transparansi serta reproduktibilitas hasil evaluasi sistem.

Status setiap KPI dinyatakan secara eksplisit dan jujur **Memenuhi Target**, **Tidak Memenuhi Target**, **Belum Diuji Empiris**, atau **Hipotesis Awal** sesuai dengan tingkat bukti empiris yang benar-benar mendukungnya. Penentuan status ini mengikuti arahan tim penguji pada sidang tesis, agar tidak terjadi generalisasi berlebihan (*overclaiming*) terhadap capaian sistem yang belum sepenuhnya diverifikasi dengan data operasional riil.

5.1.1 Ringkasan Hasil Seluruh KPI

Sebagai gambaran komprehensif dari evaluasi sistem *Parkwell*, Tabel 5.1 menyajikan ringkasan hasil pengukuran dari keenam *Key Performance Indicator* (KPI) yang dibandingkan langsung terhadap *threshold* atau target yang telah ditetapkan sebelumnya.

Tabel 5.1: Ringkasan Hasil Evaluasi Seluruh KPI Sistem Parkwell

KPI	Aspek Evaluasi	Hasil Pengukuran	Threshold / Target	Status
KPI-1	Akurasi Deteksi Sensor	Precision 48,30% FP Rate 51,70% (559 event)	Precision $\geq$ 50% FP Rate $\leq$ 50%	Tidak Memenuhi Target
KPI-2	Latensi <i>End-to-End</i>	Mean 5,205 detik (SD = 0,160 detik), 60 pengukuran	< 10 detik	Memenuhi Target (bersyarat, lihat Subbab 5.3.2)
KPI-3	Skalabilitas MQTT	6 slot = 12 msg/s 120 slot = 240 msg/s <i>bandwidth</i> minimal	Mampu $\geq$ 60 slot	Belum Diuji Empiris (Estimasi Teoritis)
KPI-4	Keandalan Reservasi	<i>Zero double booking</i> pada uji terkontrol (audit arsitektur <code>transaction.atomic + select_for_update</code>)	<i>Zero double booking</i>	Belum Diuji Empiris (Audit Arsitektur)
KPI-5	Kepuasan Pengguna	<i>Overall mean</i> 4,71/5 (SD = 0,46), 34 responden, 10 butir	Mean $\geq$ 4,00 (Puas)	Memenuhi Target (bersyarat, lihat Subbab 5.6.4)
KPI-6	Efisiensi Pencarian Parkir	Estimasi reduksi waktu pencarian $\sim$ 81,7% (dari 13,66 $\rightarrow$ $\pm$ 2,5 menit, <i>belum diukur langsung</i>)	Reduksi $\geq$ 40%	Hipotesis Awal (Belum Diverifikasi Empiris)

Dari enam KPI yang dievaluasi: dua KPI (KPI-2 dan KPI-5) memenuhi target berdasarkan pengukuran/survei langsung namun tetap disertai catatan keterbatasan metodologis; satu KPI (KPI-1) dinyatakan secara eksplisit tidak memenuhi target berdasarkan data lapangan penuh; dua KPI (KPI-3 dan KPI-4) belum dapat dinyatakan “memenuhi target” karena belum diuji secara empiris dengan data operasional nyata — statusnya murni estimasi teoritis dan audit arsitektur; dan satu KPI (KPI-6) statusnya menjadi hipotesis awal karena angka pembandingnya belum diukur langsung di lapangan. Rincian bukti pendukung dan keterbatasan masing-masing KPI dirangkum kembali pada Subbab 5.8 sebagai penutup bab ini.

5.2 KPI-1: Analisis Akurasi Deteksi Sensor (RQ1)

5.2.1 Hasil Keseluruhan: Precision dan FP Rate

Dari total 559 *event* yang terekam selama 14 hari pengujian pada 6 slot parkir, terdapat 270 *True Positive* (TP) dan 289 *False Positive* (FP). Perhitungan metrik akurasi dijabarkan melalui persamaan berikut:

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} = \frac{270}{270 + 289} = 48,30\% \quad (5.1)$$

$$\text{FP Rate} = \frac{\text{FP}}{\text{TP} + \text{FP}} = \frac{289}{270 + 289} = 51,70\% \quad (5.2)$$

Makna Fungsional dari Nilai Metrik: Secara konseptual dan agar lebih mudah dipahami dalam konteks operasional nyata:

- **True Positive (TP = 270):** Menunjukkan jumlah kejadian di mana sistem mendeteksi kendaraan secara akurat saat slot benar-benar terisi oleh mobil atau motor.

- **False Positive (FP = 289):** Menunjukkan jumlah kejadian alarm palsu (*false alarm*), di mana sistem melaporkan slot terisi padahal kondisi fisik slot sebenarnya kosong. Hal ini dipicu oleh gangguan lingkungan seperti tiupan angin yang menggerakkan dedaunan, pejalan kaki yang melintas di sekitar sensor, atau pantulan sinyal ultrasonik akibat permukaan aspal basah.
- **Nilai Precision (48,30%):** Artinya, dari setiap 100 kali peringatan atau status “terisi” yang dikirimkan oleh sistem ke dasbor, hanya sekitar 48 kali yang benar-benar menunjukkan adanya kendaraan terparkir, sedangkan sisanya merupakan deteksi anomali lingkungan.
- **Nilai False Positive Rate (51,70%):** Menandakan bahwa lebih dari setengah dari total sinyal peringatan yang dihasilkan sistem merupakan respons terhadap gangguan luar alih-alih kendaraan aktual.

Nilai *precision* 48,30% berada di bawah *threshold* KPI-1 ($\geq 50\%$), sedangkan FP Rate 51,70% sedikit melampaui batas maksimum ($\leq 50\%$). Dengan demikian, **KPI-1 dinyatakan secara eksplisit dan jujur tidak memenuhi target** berdasarkan hasil pengukuran utama dari seluruh 14 hari data lapangan riil. Status ini bersifat final dan tidak digantikan oleh analisis tambahan apa pun.

Sebagai analisis tambahan yang bersifat deskriptif **bukan pengganti status KPI-1 utama** apabila data tanggal 23 November 2025 (hari dengan FP Rate ekstrem sebesar 86,05%) dikeluarkan dari perhitungan, *precision* pada 13 hari tersisa mencapai 58,60%. Angka ini sama sekali tidak mengubah status resmi KPI-1 yang tetap dinyatakan tidak memenuhi target berdasarkan seluruh 14 hari data lapangan riil; angka tersebut semata-mata memberikan gambaran mengenai variasi performa harian dan tidak boleh dikutip sebagai hasil akhir *precision* sistem.

Sementara itu, analisis lengkap KPI-1 mengindikasikan bahwa sensor ultrasonik HC-SR04 menghadapi kendala operasional pada kondisi *outdoor* tropis dengan curah hujan yang tinggi, yang tercermin dari capaian *precision* sebesar 48,30%. Keterbatasan ini dipengaruhi oleh karakteristik fisik sensor dan bukan merupakan defisiensi pada arsitektur sistem Parkwell. Temuan ini memberikan dasar rasional bagi rekomendasi transisi ke sensor *waterproof* pada pengembangan selanjutnya.

Untuk *False Negative* (FN) dan *True Negative* (TN), keduanya tidak tercatat oleh arsitektur sistem karena log hanya merekam *event* saat sensor aktif mendeteksi objek. Oleh karena itu, metrik *Recall* dan *Accuracy* tidak dapat dihitung serta tidak diklaim dalam penelitian ini. Seluruh klaim performa deteksi dibatasi secara eksplisit pada metrik Precision dan FP Rate untuk menghindari penafsiran yang keliru mengenai akurasi sistem secara keseluruhan.

Tabel 5.2 menyajikan rangkuman hasil keseluruhan akurasi deteksi sensor HC-SR04 selama periode pengujian.

Tabel 5.2: Hasil Keseluruhan Akurasi Deteksi Sensor HC-SR04

Metrik	Nilai	Keterangan
Total Event	559	14 hari pengujian pada 6 slot parkir
True Positive (TP)	270	Kendaraan nyata terdeteksi dengan benar
False Positive (FP)	289	Deteksi terjadi tanpa adanya kendaraan nyata
Precision	48,30%	Hasil utama, target $\geq 50\%$ Tidak Tercapai
FP Rate	51,70%	Hasil utama, target $\leq 50\%$ Tidak Tercapai
Precision (Hari Normal, 13 hari)	58,60%	Analisis tambahan deskriptif, bukan pengganti hasil utama
Recall	Tidak dapat dihitung	TN dan FN tidak tercatat oleh arsitektur sistem
Accuracy	Tidak dapat dihitung	TN dan FN tidak tercatat oleh arsitektur sistem

5.2.2 Analisis Temporal Per Hari

Tabel 5.3 menyajikan rincian distribusi harian dari *True Positive* (TP), *False Positive* (FP), total event, *False Positive Rate* (FP rate), dan *Precision* selama 14 hari penuh masa pengujian lapangan (10–23 November 2025).

Analisis terhadap angka-angka harian tersebut memberikan beberapa temuan pola operasional yang jelas:

1. **Performa Terbaik (12–14 November 2025):** Pada pertengahan minggu pertama pengujian, sistem menunjukkan performa tertinggi dengan tingkat *precision* berkisar antara 76,19% hingga 80,00% (dan *FP rate* terendah mencapai 20,00% pada 14 November).
2. **Stabilitas pada Hari Normal:** Sebagian besar hari pengujian (seperti 11, 15, 16, 17, 19, 20, dan 21 November) konsisten menunjukkan tingkat *precision* di atas 50% dan *FP rate* di bawah 50%.
3. **Titik Balik Penurunan Performa (18 & 22 November):** Mulai tanggal 18 November, jumlah event mulai meningkat (*FP rate* naik menjadi 51,92%). Penurunan kembali terlihat pada 22 November (*precision* turun menjadi 39,13%).
4. **Anomali Ekstrem (23 November 2025):** Tanggal terakhir pengujian mencatat lonjakan anomali paling drastis dengan total 129 event dalam sehari, 111 di antaranya FP, menghasilkan *FP rate* 86,05% dan *precision* 13,95%. Angka ekstrem ini merupakan kontributor terbesar terhadap *FP Rate* rata-rata keseluruhan sistem selama 14 hari.

Sesuai prinsip transparansi akademik, data harian di atas disajikan apa adanya berdasarkan pencatatan langsung di lapangan, tanpa perlakuan eksklusi apa pun pada perhitungan KPI-1 utama. Sebagaimana ditegaskan pada Subbab 5.2.6, variasi performa harian yang teramati termasuk lonjakan pada 23 November kemungkinan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling bertumpuk (cuaca, pola pergerakan pejalan kaki, dinamika aktivitas kampus), sehingga atribusi tunggal ke satu faktor cuaca tertentu tidak dapat dijustifikasi secara ilmiah berdasarkan data yang tersedia.

5.2.3 Analisis Temporal Per Jam (*False Positive Hourly Distribution*)

Analisis sebaran waktu per jam memberikan wawasan mendalam mengenai bagaimana pola aktivitas kampus memengaruhi performa sensor ultrasonik. Tabel 5.4 menyajikan distribusi

Tabel 5.3: Distribusi TP, FP, dan FP Rate Harian

Tanggal	TP	FP	Total	FP Rate (%)	Precision (%)
10 Nov 2025	21	21	42	50,00%	50,00%
11 Nov 2025	19	13	32	40,63%	59,38%
12 Nov 2025	16	5	21	23,81%	76,19%
13 Nov 2025	14	4	18	22,22%	77,78%
14 Nov 2025	16	4	20	20,00%	80,00%
15 Nov 2025	17	11	28	39,29%	60,71%
16 Nov 2025	17	13	30	43,33%	56,67%
17 Nov 2025	27	17	44	38,64%	61,36%
18 Nov 2025	25	27	52	51,92%	48,08%
19 Nov 2025	27	15	42	35,71%	64,29%
20 Nov 2025	23	20	43	46,51%	53,49%
21 Nov 2025	21	14	35	40,00%	60,00%
22 Nov 2025	9	14	23	60,87%	39,13%
23 Nov 2025	18	111	129	86,05%	13,95%
TOTAL	270	289	559	51,70%	48,30%

False Positive (FP), *True Positive* (TP), serta *FP Rate* berdasarkan rentang jam operasional sistem.

Untuk memudahkan pemahaman terhadap dinamika sistem sepanjang hari, interpretasi dari angka-angka tersebut dapat diuraikan ke dalam beberapa kelompok waktu operasional utama:

- **Jam Non-Operasional Malam hingga Dini Hari (00:00–05:59):** Tercatat 55 *False Positive* dan 0 *True Positive* (*FP rate* 100%). Seluruh deteksi murni alarm palsu akibat gangguan lingkungan malam (angin, embun/hujan, atau pantulan lantai).
- **Pagi Hari (06:00–06:59):** Aktivitas mulai terlihat (5 TP), namun *FP rate* masih tinggi (54,55%) karena kondisi transisi pagi.
- **Jam Sibuk Pagi (07:00–11:59):** Salah satu waktu paling stabil dengan 93 TP dan *FP rate* rendah (23,77%), didominasi kendaraan parkir nyata durasi panjang.
- **Jam Siang (12:00–14:59):** Performa akurasi tertinggi dengan *FP rate* paling rendah (17,02%) dari 78 TP dan pola parkir yang sangat stabil.
- **Jam Pulang Perkuliahan / Sore Hari (15:00–17:59):** Titik anomali tersibuk (117 FP, *FP rate* 70,06%) akibat tingginya mobilitas kendaraan yang lalu-lalang/bermanuver di depan slot tanpa parkir.
- **Malam Hari (18:00–23:59):** Saat aktivitas kampus menurun, *FP rate* naik ke 60,00% (66 FP), disumbangkan oleh faktor lingkungan nokturnal.

5.2.4 Analisis Spasial Per Slot

Analisis spasial per slot dilakukan untuk mengevaluasi bagaimana karakteristik fisik, posisi penempatan, serta lingkungan sekitar masing-masing titik sensor memengaruhi tingkat akurasi deteksi. Tabel 5.5 menyajikan rincian distribusi *True Positive* (TP), *False Positive* (FP), total event, nilai *Precision*, dan *FP Rate* untuk keenam slot parkir yang diuji.

Berdasarkan data spasial tersebut, beberapa temuan penting dapat diidentifikasi:

- **Slot dengan Performa Terbaik (Slot2 dan Slot5):** Slot2 menunjukkan tingkat *precision* tertinggi sebesar 59,74% (*FP rate* terendah 40,26%), disusul oleh Slot5 dengan

Tabel 5.4: Distribusi FP Berdasarkan Rentang Jam

Rentang Jam	Total FP	Total TP	FP Rate (%)	Interpretasi
00:00–05:59	55	0	100%	Jam non-operasional; seluruh deteksi adalah FP (objek lingkungan/hujan).
06:00–06:59	6	5	54,55%	Awal pagi, kendaraan mulai masuk, FP masih tinggi akibat transisi.
07:00–11:59	29	93	23,77%	Jam sibuk pagi; FP rate rendah, dominasi TP kendaraan parkir nyata.
12:00–14:59	16	78	17,02%	Jam siang; FP rate terendah, akurasi paling tinggi dan stabil.
15:00–17:59	117	50	70,06%	Jam pulang; FP rate sangat tinggi akibat pergerakan transien cepat/manuver.
18:00–23:59	66	44	60,00%	Malam hari; aktivitas menurun, FP didorong faktor lingkungan nokturnal.

precision 56,79% (FP rate 43,21%). Posisi kedua slot ini berada di area tengah yang terlindung dari terpaan angin langsung dan memiliki kondisi fisik yang paling ideal serta relatif bersih.

- **Slot dengan Performa Terendah (Slot4):** *Slot4* mencatatkan jumlah *False Positive* tertinggi (80 *event*) dengan total *event* mencapai 121, sehingga menghasilkan *precision* terendah sebesar 33,88% dan FP rate tertinggi mencapai 66,12%. Kondisi ini dipicu oleh faktor fisik tanah yang kurang stabil, menyebabkan struktur tiang dan sensor bergeser serta rentan terhadap gangguan eksternal. Selain itu, formula kalibrasi *threshold* tunggal yang belum mengakomodasi variasi tinggi bodi kendaraan (lihat Bab IV, Subbab 4.1.2) juga diduga turut berkontribusi terhadap tingginya FP Rate pada slot ini, meskipun kontribusi relatif masing-masing faktor belum dapat dipisahkan secara statistik dari dataset yang ada.
- **Slot Tepi dan Akses Masuk (Slot1, Slot3, dan Slot6):** *Slot1* dan *Slot3* memiliki tingkat *precision* di kisaran 48%–49% karena posisinya di bagian tepi yang terekspos angin barat serta potensi tangkapan *beam angle* pada jalan akses. Sementara itu, *Slot6* yang berada paling dekat dengan pintu masuk area parkir rentan mendeteksi kendaraan yang lalu-lalang hendak masuk namun belum melakukan parkir.

Tabel 5.5: Distribusi TP, FP, Precision, dan FP Rate Per Slot

Slot ID	TP	FP	Total	Precision (%)	FP Rate (%)
Slot1	47	50	97	48,45%	51,55%
Slot2	46	31	77	59,74%	40,26%
Slot3	48	49	97	49,48%	50,52%
Slot4	41	80	121	33,88%	66,12%
Slot5	46	35	81	56,79%	43,21%
Slot6	42	44	86	48,84%	51,16%
TOTAL	270	289	559	48,30%	51,70%

5.2.5 Analisis Distribusi Durasi Event (TP vs FP)

Analisis distribusi durasi *event* dilakukan untuk membedakan karakteristik temporal antara *True Positive* (TP) dan *False Positive* (FP). Tabel 5.6 mengonfirmasi adanya separasi temporal yang sangat signifikan antara TP dan FP. Median durasi TP (142,73 menit) terbukti sekitar 38 kali lebih besar dari median durasi FP (3,75 menit), dengan selisih absolut mencapai 138,98 menit.

Separasi yang kontras ini menjustifikasi secara empiris bahwa penerapan pendekatan *temporal filtering* menggunakan threshold $T_{\text{debounce}} = 1$ menit sangat efektif untuk mengeliminasi objek transien sesaat (seperti gangguan bayangan, angin, atau orang lewat), sekaligus tetap mempertahankan seluruh kejadian TP yang memiliki durasi parkir jauh lebih panjang.

Tabel 5.6: Analisis Separasi Temporal TP vs FP, Justifikasi Parameter Temporal Filtering

Analisis Separasi Temporal	Nilai	Persentase
FP dengan durasi < 5 menit	178 dari 289	61,6%
FP dengan durasi < 10 menit	216 dari 289	74,7%
TP dengan durasi > 30 menit	264 dari 270	97,8%
TP dengan durasi > 60 menit	262 dari 270	97,0%
Perbedaan Median (TP – FP)	138,98 menit	$\approx 38 \times$ lipat

5.2.6 Keterbatasan Metodologis: Ground Truth dan Uji Statistik Inferensial

Dua keterbatasan metodologis penting perlu diakui secara eksplisit terkait evaluasi KPI-1 di atas, sebagaimana ditegaskan dalam sidang tesis.

Pertama, validitas *ground truth*. Label TP atau FP untuk setiap *event* pada penelitian ini ditentukan sepenuhnya melalui observasi manual oleh peneliti tunggal di lapangan, tanpa validasi silang oleh *observer* kedua maupun rekaman video sebagai pembanding independen. Pada kasus-kasus ambigu (misalnya kendaraan yang bermanuver perlahan di tepi slot tanpa benar-benar parkir), keputusan klasifikasi TP/FP berpotensi dipengaruhi oleh bias konfirmasi peneliti (*confirmation bias*). Keterbatasan ini diakui secara terbuka sebagai batas validitas hasil KPI-1 dan direkomendasikan untuk ditutup melalui mekanisme *inter-rater reliability* (*observer* kedua atau rekaman video sinkron) pada penelitian lanjutan (lihat Bab VI).

Kedua, ketiadaan uji statistik inferensial. Seluruh pernyataan pada Subbab 5.2.2 dan Bab IV, Subbab 4.5.2 mengenai keterkaitan antara kondisi cuaca (hujan) dan lonjakan *False Positive* bersifat deskriptif dan naratif berbasis *co-occurrence*, bukan hasil pengujian statistik formal. Penelitian ini tidak melakukan uji korelasi (misalnya uji Chi-Square atau korelasi Spearman antara kategori cuaca dan status TP/FP) karena tidak tersedianya data cuaca terstruktur (seperti curah hujan per jam dalam satuan mm) yang tercatat secara paralel dengan log sensor selama periode pengujian. Akibatnya, klaim sebab-akibat antara hujan dan FP Rate termasuk pada anomali 23 November 2025 tidak dapat dan tidak boleh dijustifikasi secara statistik dalam penelitian ini. Pengumpulan data cuaca kuantitatif secara paralel dan pengujian korelasi formal ditetapkan sebagai prioritas metodologis untuk penelitian lanjutan.

5.3 KPI-2: Analisis Latensi End-to-End (RQ2)

5.3.1 Hasil Pengukuran Latensi Per Sensor

Pengukuran latensi *end-to-end* dilakukan untuk mengetahui total waktu yang dibutuhkan mulai dari sensor ultrasonik mendeteksi perubahan objek di fisik slot, data diproses oleh mikrokontroler Raspberry Pi, dikirimkan melalui broker MQTT, hingga berhasil direkam dan ditampilkan pada sistem. Tabel 5.7 menyajikan rincian hasil dari 10 kali pengulangan pengukuran pada masing-masing dari 6 sensor ($10 \times 6 = 60$ total pengukuran).

Tabel 5.7: Data Pengukuran Latensi End-to-End Per Sensor (10 Pengukuran $\times$ 6 Sensor = 60 Total)

Sensor	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Mean (s)	SD (s)
S-01 (Slot1)	5,02	5,15	4,90	5,25	5,08	5,11	4,95	5,20	5,10	5,05	5,081	0,107
S-02 (Slot2)	5,30	5,25	5,10	5,35	5,20	5,40	5,15	5,08	5,22	5,32	5,237	0,107
S-03 (Slot3)	4,88	4,95	5,12	5,05	4,99	5,18	4,92	5,06	5,00	5,15	5,030	0,100
S-04 (Slot4)	5,50	5,38	5,45	5,28	5,55	5,40	5,32	5,51	5,48	5,33	5,420	0,092
S-05 (Slot5)	5,18	5,09	5,25	5,10	5,28	5,14	5,30	5,12	5,22	5,19	5,187	0,075
S-06 (Slot6)	5,30	5,42	5,08	5,19	5,35	5,27	5,40	5,18	5,33	5,21	5,273	0,108
Overall	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5,205	0,160

5.3.2 Statistik Deskriptif dan Analisis Latensi

Hasil pengukuran menunjukkan latensi *end-to-end* rata-rata keseluruhan sebesar 5,205 detik dari total 60 pengukuran. Seluruh 60 pengukuran berada dalam rentang nilai 4,88–5,55 detik, yang seluruhnya jauh berada di bawah *threshold* KPI-2 sebesar < 10 detik.

Nilai *Coefficient of Variation* (CV) yang rendah pada semua sensor (berkisar antara 1,44% hingga 2,11%) mengonfirmasi tingkat konsistensi latensi pengiriman data yang sangat tinggi dan stabil di seluruh node sensor. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa KPI-2 dinyatakan **Memenuhi Target**, dengan catatan keterbatasan metodologis berikut.

Keterbatasan yang harus dinyatakan secara jujur: pengukuran latensi di atas dilakukan secara manual menggunakan *stopwatch* oleh peneliti pada fase *pre-deployment testing*, bukan menggunakan pencatatan otomatis berbasis *timestamp* tersinkronisasi NTP yang sesungguhnya telah tersedia pada arsitektur sistem (lihat Bab III, Subbab 3.5). Selain itu, 60 pengukuran ini diambil pada kondisi ideal sebelum penerapan lapangan penuh, sehingga tidak merepresentasikan kondisi jaringan dan beban sistem selama 14 hari pengujian lapangan yang penuh gangguan (hujan, lalu lintas data tinggi saat anomali FP 23 November). Oleh karena itu, status “Memenuhi Target” pada KPI-2 berlaku khusus untuk kondisi pengujian *pre-deployment*, bukan representasi latensi selama periode operasional 14 hari secara keseluruhan. Pengukuran latensi otomatis berbasis log *timestamp* NTP selama periode operasional penuh direkomendasikan sebagai perbaikan metodologis pada penelitian lanjutan.

Tabel 5.8 merangkum statistik deskriptif latensi *end-to-end* secara rinci per sensor.

5.4 KPI-3 Estimasi Skalabilitas Kapasitas MQTT

Estimasi skalabilitas kapasitas MQTT dilakukan untuk memproyeksikan performa jaringan dan beban kerja broker MQTT apabila jumlah node sensor diperluas. Tabel 5.9 menyajikan estimasi teoretis penggunaan *bandwidth* serta status beban terhadap kapasitas jaringan Wi-Fi 25 Mbps dengan asumsi ukuran *payload* sebesar 150 bytes dan interval pengiriman 500 ms.

Tabel 5.8: Statistik Deskriptif Latensi End-to-End Per Sensor

Sensor	Mean (s)	SD (s)	Min (s)	Max (s)
S-01 (Slot1)	5,081	0,107	4,90	5,25
S-02 (Slot2)	5,237	0,107	5,08	5,40
S-03 (Slot3)	5,030	0,100	4,88	5,18
S-04 (Slot4)	5,420	0,092	5,28	5,55
S-05 (Slot5)	5,187	0,075	5,09	5,30
S-06 (Slot6)	5,273	0,108	5,08	5,42
Overall (60 pengukuran)	5,205	0,160	4,88	5,55

Tabel 5.9: Estimasi Teoritis Skalabilitas Kapasitas MQTT (Payload 150 bytes, Interval 500ms)

Jumlah Slot	Laju Publish (msg/s)	Bandwidth (kbps)	Status vs Kapasitas Wi-Fi	Kesimpulan
6 (existing)	12	14,4	0,06% dari 25 Mbps Wi-Fi	Beroperasi saat ini sangat ringan
60	120	144,0	0,6% dari 25 Mbps Wi-Fi	10× lipat dari <i>existing</i> , Mosquitto mampu menangani
120	240	288,0	1,2% dari 25 Mbps Wi-Fi	20× lipat masih dalam kapasitas normal
300	600	720,0	2,9% dari 25 Mbps Wi-Fi	Perlu migrasi ke WebSocket (Django Channels + Redis) dan uji beban lanjutan

Perlu ditegaskan secara jujur bahwa seluruh angka pada Tabel 5.9 merupakan **proyeksi teoritis** berbasis kalkulasi *bandwidth*, bukan hasil *load testing* aktual dengan sensor fisik yang terhubung secara simultan pada skala yang diproyeksikan (60, 120, atau 300 slot). Tidak ada pengujian beban nyata yang dilakukan pada penelitian ini di luar konfigurasi 6 slot *existing*. Oleh karena itu, **KPI-3 dinyatakan Belum Diuji Empiris**, dan uji beban nyata pada skala yang lebih besar direkomendasikan sebagai langkah verifikasi pada penelitian lanjutan (lihat Bab VI).

5.5 KPI-4: Evaluasi Keandalan Reservasi (RQ3)

5.5.1 Mekanisme Concurrency Control

Sistem Parkwell mengimplementasikan dua lapis perlindungan terhadap *race condition* pada operasi reservasi:

- **transaction.atomic():** Seluruh operasi baca-cek-tulis reservasi dieksekusi dalam satu transaksi atomik SQLite yang tidak dapat diinterupsi. Jika salah satu operasi gagal, seluruh transaksi di-*rollback* secara otomatis.
- **select_for_update():** Query *SELECT* yang membaca status slot menggunakan klausa *FOR UPDATE*, yang mengunci baris data slot di tingkat *database* sehingga transaksi paralel lain tidak dapat membaca atau mengubah baris tersebut hingga transaksi saat ini selesai.

Kombinasi kedua mekanisme ini memastikan bahwa dalam skenario *concurrent request*,

hanya satu permintaan yang berhasil (*commit*), sementara permintaan kedua akan menunggu kunci dilepas, lalu menerima respons 'slot tidak tersedia'.

5.5.2 Fitur Auto-Release dan Verifikasi Fungsional

Berdasarkan audit arsitektur dan pengujian fungsional terkontrol, seluruh skenario termasuk simulasi *concurrent booking* menunjukkan hasil *zero double booking* (0% kegagalan isolasi data) dengan tingkat keberhasilan pengujian sebesar 100%. Namun, status ini harus dibedakan secara jujur dari KPI-2 yang diukur langsung dari data operasional riil: log transaksi reservasi dari penggunaan lapangan aktif tidak tersedia secara memadai selama periode pengujian 10–23 November 2025, akibat rendahnya adopsi fitur reservasi oleh pengguna nyata (lihat Bab VI, Keterbatasan Penelitian). Oleh karena itu, **KPI-4 dinyatakan Belum Diuji Empiris dengan data operasional riil**; hasil *zero double booking* yang dilaporkan bersumber murni dari audit arsitektur dan simulasi skenario terkontrol, bukan dari transaksi pengguna sesungguhnya di lapangan.

Tabel 5.10: Hasil Pengujian Fungsional Sistem Reservasi Parkwell

Skenario Pengujian	Mekanisme	Hasil	Catatan
Reservasi slot kosong	Django ORM + <code>transaction.atomic()</code>	Lulus (Uji Terkontrol)	Slot berhasil dipesan, status berubah ke 'reserved' di dashboard
Concurrent booking 2 user (slot sama, waktu sama)	<code>select_for_update()</code> + <code>transaction.atomic()</code>	Lulus – <i>Zero Double Booking</i> (Uji Terkontrol)	Hanya 1 reservasi berhasil; user ke-2 mendapat respons error
Reservasi slot yang sudah terisi sensor	Validasi status slot sebelum confirm reservasi	Lulus (Uji Terkontrol)	Sistem menolak reservasi, notifikasi dikirim ke user
Auto-release setelah grace period	Background scheduler Django (15 menit)	Lulus (Uji Terkontrol)	Slot dilepas otomatis dan tersedia kembali setelah 15 menit
Notifikasi buzzer via dashboard	MQTT publish ke topic <code>parkwell/buzzer/control</code>	Lulus (Uji Terkontrol)	Buzzer merespons perintah dalam < 2 detik

Catatan: seluruh hasil pada tabel ini berasal dari skenario pengujian terkontrol (simulasi), bukan dari data transaksi pengguna riil di lapangan. Lihat penjelasan status KPI-4 pada Subbab 5.5.2.

5.6 KPI-5: Analisis Kepuasan Pengguna (RQ3)

5.6.1 Profil Responden

Evaluasi tingkat kepuasan pengguna terhadap sistem Parkwell dilakukan menggunakan instrumen kuesioner. Pengumpulan data melibatkan total 34 responden valid dari kalangan civitas akademika. Tabel 5.11 menyajikan rincian profil responden berdasarkan karakteristik demografi dan frekuensi penggunaan fasilitas parkir.

5.6.2 Hasil Statistik Per Butir Kuesioner

Analisis statistik deskriptif dilakukan untuk mengevaluasi skor rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (*standard deviation*) dari masing-masing butir pernyataan kuesioner. Keterangan kategori penilaian menggunakan rentang skala Likert, di mana SP = Sangat Puas dengan rentang nilai *Mean* 4,21–5,00.

Tabel 5.11: Profil Responden Kuesioner Kepuasan Pengguna Parkwell

Karakteristik	Kategori	Jumlah / Persentase
Total Responden	Valid	34 responden
Jenis Kelamin	Laki-laki	31 (91,2%)
	Perempuan	3 (8,8%)
Kelompok Usia	18–25 tahun	18 (52,9%)
	26–35 tahun	11 (32,4%)
	> 35 tahun	5 (14,7%)
Frekuensi Parkir	Setiap Hari	12 (35,3%)
	Sering	17 (50,0%)
	Kadang-kadang	2 (5,9%)
	Jarang	3 (8,8%)

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 5.12, seluruh 10 butir kuesioner masuk dalam kategori **Sangat Puas**. Butir Q8 (Kenyamanan dengan skor 4,85) dan Q2 (Akurasi dengan skor 4,82) meraih nilai tertinggi. Nilai *overall mean* sebesar 4,71 jauh melampaui *threshold* KPI-5 yang ditetapkan sebesar 4,00. Dengan demikian, KPI-5 dinyatakan **Memenuhi Target**, dengan keterbatasan validitas yang diuraikan pada Subbab 5.6.4.

5.6.3 Segmentasi Kepuasan Berdasarkan Frekuensi Penggunaan Parkir

Analisis segmentasi kepuasan berdasarkan frekuensi penggunaan parkir dilakukan untuk mengevaluasi apakah intensitas pemanfaatan fasilitas memengaruhi tingkat penilaian pengguna terhadap sistem Parkwell. Tabel 5.13 menyajikan perbandingan nilai rata-rata kepuasan (*mean overall*) yang dikelompokkan berdasarkan frekuensi kunjungan responden.

Tabel 5.13: Segmentasi Mean Kepuasan Berdasarkan Frekuensi Penggunaan Parkir

Frekuensi Parkir	Jumlah Responden	Mean Overall	Kategori
Setiap Hari	12 (35,3%)	4,70	Sangat Puas
Sering	17 (50,0%)	4,68	Sangat Puas
Kadang-kadang	2 (5,9%)	4,65	Sangat Puas
Jarang	3 (8,8%)	4,90	Sangat Puas
RATA-RATA KESELURUHAN	34	4,71	Sangat Puas

5.6.4 Keterbatasan Validitas Temporal dan Potensi Bias Demografis

Dua keterbatasan penting perlu diakui secara eksplisit terhadap hasil KPI-5 di atas, sebagaimana ditegaskan dalam sidang tesis.

Pertama, keterbatasan validitas temporal. Kuesioner disebar dan ditutup pada 16–22 November 2025, sedangkan anomali *False Positive Rate* paling ekstrem (86,05%) justru terjadi pada 23 November 2025 satu hari setelah survei ditutup. Akibatnya, skor kepuasan keseluruhan sebesar 4,71/5 mencerminkan pengalaman pengguna pada kondisi sistem yang relatif normal, dan **belum mencerminkan** persepsi pengguna terhadap performa sistem saat mengalami gangguan akurasi sensor paling parah. Skor KPI-5 pada laporan ini harus dibaca sebagai gambaran kepuasan pada kondisi operasional tipikal selama masa survei, bukan sebagai evaluasi menyeluruh terhadap seluruh rentang kondisi sistem yang teramati selama 14 hari pengujian.

Tabel 5.12: Statistik Per Butir Kuesioner Kepuasan Pengguna ($n = 34$ responden)

Kode	Dimensi	Butir Pernyataan	Mean	SD	Kategori
Q1	UI	Tampilan website Parkwell mudah dipahami dan menarik.	4,79	0,41	Sangat Puas
Q2	Akurasi	Informasi ketersediaan tempat parkir yang ditampilkan akurat dan <i>real-time</i> .	4,82	0,39	Sangat Puas
Q3	Kecepatan	Proses pencarian tempat parkir melalui sistem Parkwell cepat dan efisien.	4,56	0,56	Sangat Puas
Q4	Kemudahan	Fitur-fitur pada Parkwell mudah digunakan oleh pengguna baru.	4,76	0,43	Sangat Puas
Q5	Hemat Waktu	Sistem Parkwell membantu saya menghemat waktu dalam mencari parkir.	4,71	0,46	Sangat Puas
Q6	Notifikasi	Notifikasi dan informasi yang diberikan sistem jelas dan bermanfaat.	4,50	0,51	Sangat Puas
Q7	Integrasi IoT	Integrasi antara sensor IoT dan tampilan <i>dashboard</i> berjalan dengan baik.	4,62	0,49	Sangat Puas
Q8	Kenyamanan	Sistem Parkwell memberikan pengalaman parkir yang lebih nyaman.	4,85	0,36	Sangat Puas
Q9	Kepuasan	Saya merasa puas dengan penggunaan sistem Parkwell.	4,74	0,45	Sangat Puas
Q10	Loyalitas	Saya bersedia menggunakan Parkwell kembali jika tersedia di area lain.	4,71	0,46	Sangat Puas
OVERALL-		Rata-rata seluruh respons seluruh butir	4,71	0,46	Sangat Puas

Kedua, potensi bias demografis pada sampel responden. Dari Tabel 5.11, sebanyak 91,2% responden (31 dari 34) berjenis kelamin laki-laki. Dominasi ini kemungkinan mencerminkan proporsi pengguna kendaraan bermotor riil di lingkungan kampus yang disurvei, namun tidak dapat dipastikan tanpa data populasi pembanding karena teknik *sampling* dan ukuran populasi target tidak didefinisikan secara formal pada tahap perancangan kuesioner (lihat Bab III). Oleh karena itu, hasil kepuasan pengguna pada penelitian ini tidak dapat digeneralisasikan secara representatif untuk seluruh populasi sivitas akademika tanpa mempertimbangkan potensi bias gender pada sampel. Penerapan teknik *stratified sampling* berdasarkan jenis kelamin dan frekuensi penggunaan parkir, disertai definisi populasi dan ukuran sampel yang jelas, direkomendasikan untuk penelitian lanjutan.

5.7 KPI-6: Estimasi Efisiensi Pencarian Parkir (RQ3)

5.7.1 Metodologi dan Hasil Estimasi

KPI-6 mengestimasi pengurangan waktu yang dihabiskan pengguna dalam mencari slot parkir yang tersedia, dengan membandingkan kondisi tanpa sistem (konvensional) terhadap kondisi menggunakan sistem Parkwell. Tabel 5.14 menyajikan rincian parameter, nilai, serta sumber perhitungan efisiensi pencarian parkir.

Perlu ditegaskan secara jujur bahwa nilai “estimasi waktu pencarian dengan Parkwell” sebesar $\pm 2,5$ menit pada Tabel 5.14 adalah **asumsi operasional**, bukan hasil pengukuran langsung terhadap perilaku pencarian pengguna riil di lapangan (misalnya melalui *tracking* waktu tempuh pengguna dari titik masuk kampus hingga parkir). Nilai mean durasi FP (13,66 menit) sendiri berasal dari data empiris yang valid, namun angka pembandingnya ($\pm 2,5$ menit) tidak ditelusuri ke pengukuran lapangan yang setara. Akibatnya, angka reduksi 81,7% tidak dapat diklaim sebagai capaian KPI-6 yang terverifikasi, melainkan sebagai **hipotesis awal** yang masih memerlukan validasi melalui pengumpulan data waktu pencarian riil (misalnya survei waktu tempuh atau observasi langsung) pada penelitian lanjutan.

Tabel 5.14: Estimasi Efisiensi Pencarian Parkir (KPI-6)

Parameter	Nilai	Sumber
Mean durasi FP (waktu terbangun tanpa sistem)	13,66 menit	Dataset (289 FP) — empiris
Estimasi waktu pencarian dengan Parkwell	$\pm 2,5$ menit	<i>Asumsi operasional, belum diukur</i>
Reduksi waktu pencarian absolut	11,16 menit	$13,66 - 2,5$
Reduksi waktu pencarian relatif (%)	81,7%	$(11,16/13,66) \times 100\%$
Target KPI-6	$\geq 40\%$	KPI Framework
Status KPI-6	Hipotesis Awal (Belum Diverifikasi Empiris)	$81,7\% > 40\%$ secara kalkulasi, namun angka pencarian riil belum diukur

5.8 Ringkasan Keterbatasan Metodologis dan Klaim yang Dapat Dipertanggungjawabkan

Sebagai penutup Bab V, Tabel 5.15 merangkum secara eksplisit apa yang telah berhasil dibuktikan secara empiris, apa yang masih berstatus estimasi atau audit, serta keterbatasan validitas

yang melekat pada setiap KPI. Tabel ini dimaksudkan untuk mencegah generalisasi berlebihan (*overclaiming*) terhadap hasil penelitian, sesuai arahan tim penguji pada sidang tesis.

Tabel 5.15: Ringkasan Bukti Pendukung dan Keterbatasan Validitas Per KPI

KPI	Bukti Pendukung	Keterbatasan / Belum Terverifikasi	Status Final
KPI-1	559 event lapangan riil, 14 hari, 6 slot, <i>ground truth</i> observasi manual	Recall/Accuracy tidak dapat dihitung (FN/TN tidak tercatat); <i>ground truth</i> tanpa validasi silang; tidak ada uji korelasi cuaca–FP formal	Tidak Memenuhi Target
KPI-2	60 pengukuran langsung (stopwatch), 6 sensor	Diukur manual pada fase <i>pre-deployment</i> , bukan otomatis via <i>NTP timestamp</i> ; tidak merepresentasikan 14 hari kondisi lapangan penuh	Memenuhi Target (bersyarat)
KPI-3	Kalkulasi <i>bandwidth</i> teoretis	Tidak ada <i>load testing</i> aktual dengan sensor fisik terhubung secara simultan	Belum Diuji Empiris
KPI-4	Audit kode <code>transaction.atomic + select_for_update</code> , simulasi skenario terkontrol	Tidak ada log transaksi reservasi riil dari pengguna aktif di lapangan	Belum Diuji Empiris
KPI-5	34 responden, kuesioner Likert 10 butir	Survei ditutup sebelum anomali FP 23 Nov; dominasi responden laki-laki (91,2%)	Memenuhi Target (bersyarat)
KPI-6	Kalkulasi berbasis <i>mean</i> durasi FP historis	Nilai $\pm 2,5$ menit adalah asumsi operasional, tidak diukur langsung dari perilaku pencarian pengguna riil	Hipotesis Awal

Dengan kerangka ini, klaim keberhasilan sistem Parkwell dibatasi secara ketat pada apa yang benar-benar dapat ditelusuri ke data primer: KPI-2 dan KPI-5 memiliki bukti pengukuran langsung namun dengan syarat keterbatasan yang telah diuraikan; KPI-1 secara jujur dinyatakan tidak lulus; KPI-3, KPI-4, dan KPI-6 belum dapat diklaim sebagai capaian final karena belum diverifikasi dengan data operasional riil. Rekomendasi tindak lanjut untuk menutup seluruh *gap* validitas ini dibahas pada Bab VI.

Chapter 6

Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini telah merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem parkir cerdas berbasis IoT yang diberi nama Parkwell di lingkungan kampus Politeknik Negeri Batam. Evaluasi dilakukan menggunakan *KPI-driven evaluation framework* yang memetakan tiga pertanyaan penelitian (RQ1–RQ3) ke enam indikator kinerja kunci (KPI-1 hingga KPI-6). Berikut adalah kesimpulan berdasarkan temuan empiris yang dapat ditelusuri ke sumber data primer, dengan status setiap KPI dinyatakan secara eksplisit dan jujur sesuai bukti yang benar-benar mendukungnya (lihat Bab V, Subbab 5.8).

6.1.1 RQ1: Akurasi Deteksi Sensor (KPI-1)

Sensor ultrasonik HC-SR04 yang dioperasikan di lingkungan terbuka kampus selama 14 hari (10–23 November 2025) menghasilkan 270 *True Positive* (TP) dan 289 *False Positive* (FP) dari total 559 *event*, dengan *Precision* 48,30% dan *FP Rate* 51,70%. Nilai ini berada di bawah *threshold* KPI-1 (*Precision* $\geq 50\%$), sehingga **KPI-1 dinyatakan secara eksplisit tidak memenuhi target** berdasarkan seluruh 14 hari data lapangan riil (lihat Bab V, Subbab 5.2.1). Beberapa catatan kontekstual berikut disampaikan tanpa mengubah status akhir KPI-1 tersebut:

- Anomali ekstrem pada 23 November 2025 (*FP Rate* 86,05%, 111 dari 129 *event*) menyumbang porsi signifikan terhadap rata-rata *FP Rate* keseluruhan. Penelitian ini **tidak** menyimpulkan bahwa hujan lebat menjadi penyebab tunggal lonjakan ini, karena tidak tersedia data cuaca terstruktur maupun uji korelasi statistik formal yang mendukung klaim sebab-akibat tersebut (lihat Bab V, Subbab 5.2.6). Yang dapat dilaporkan secara objektif hanyalah *co-occurrence* antara kondisi hujan lebat dan *FP Rate* ekstrem pada tanggal tersebut.
- Sebagai analisis deskriptif tambahan — bukan pengganti status KPI-1 utama apabila 23 November 2025 dikeluarkan dari perhitungan, *precision* pada 13 hari tersisa mencapai 58,60%. Angka ini menggambarkan variasi performa harian, namun tidak mengubah kesimpulan bahwa KPI-1 tidak memenuhi target berdasarkan seluruh data lapangan.
- Analisis distribusi durasi *event* mengonfirmasi separasi temporal yang sangat signifikan antara TP dan FP: median durasi TP 142,73 menit vs median FP 3,75 menit (rasio $\approx 38:1$). Fakta bahwa 74,7% FP berdurasi < 10 menit sementara 97,8% TP berdurasi > 30 menit menjustifikasi secara empiris parameter $T_{\text{debounce}} = 1$ menit sebagai desain

filtering yang efektif untuk objek transien meskipun demikian, *filtering* temporal ini terbukti tidak cukup untuk mengatasi FP yang dipicu oleh kondisi cuaca ekstrem.

- Slot4 menunjukkan *FP Rate* tertinggi (66,12%) sebagai *outlier* spasial. Kondisi tanah yang kurang stabil di lokasi Slot4 diduga menjadi kontributor utama, ditambah kemungkinan kontribusi dari keterbatasan formula kalibrasi *threshold* tunggal yang belum mengakomodasi variasi tinggi kendaraan (lihat Bab IV, Subbab 4.1.2; Bab V, Subbab 5.2.4). Kontribusi relatif masing-masing faktor ini belum dapat dipisahkan secara statistik dari *dataset* yang ada.

Kesimpulan RQ1: Sensor ultrasonik HC-SR04 menghasilkan *precision* sebesar 48,30% dan *FP Rate* sebesar 51,70%, sehingga KPI-1 dinyatakan tidak memenuhi target yang telah ditetapkan. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa sensor HC-SR04 menghadapi kendala operasional pada kondisi *outdoor* tropis dengan curah hujan yang tinggi. Keterbatasan tersebut berkaitan dengan karakteristik fisik sensor ultrasonik dan bukan merupakan kelemahan pada arsitektur sistem Parkwell. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk merekomendasikan penggunaan sensor *waterproof* pada pengembangan sistem berikutnya.

6.1.2 RQ2: Latensi End-to-End dan Skalabilitas MQTT (KPI-2 & KPI-3)

Sistem Parkwell mencapai latensi *end-to-end* rata-rata 5,205 detik dari 60 pengukuran, dengan rentang pengukuran 4,88–5,55 detik, seluruhnya berada jauh di bawah *threshold* KPI-2 (< 10 detik). *Coefficient of Variation* yang rendah (1,44%–2,11% per sensor) mengonfirmasi konsistensi latensi yang tinggi. **KPI-2 dinyatakan Memenuhi Target**, dengan catatan bersyarat: pengukuran dilakukan secara manual menggunakan *stopwatch* pada fase *pre-deployment testing*, bukan dari log *timestamp* NTP otomatis selama 14 hari operasional penuh, sehingga tidak sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan yang penuh gangguan (lihat Bab V, Subbab 5.3.2).

Estimasi skalabilitas MQTT menunjukkan bahwa pada proyeksi 60 slot ($10\times$ skala *existing*), sistem berpotensi mendukung ekspansi tanpa perubahan infrastruktur signifikan berdasarkan kalkulasi *bandwidth* teoretis. Namun, karena tidak ada *load testing* aktual dengan sensor fisik yang terhubung secara simultan pada skala yang diproyeksikan, **KPI-3 dinyatakan Belum Diuji Empiris** (lihat Bab V, Subbab 5.4). Estimasi ini layak dijadikan dasar perencanaan awal, namun belum dapat diklaim sebagai kapasitas yang terverifikasi.

6.1.3 RQ3: Reservasi, Kepuasan Pengguna, dan Efisiensi (KPI-4, KPI-5, KPI-6)

Sistem reservasi yang diimplementasikan menggunakan kombinasi `transaction.atomic()` dan `select_for_update()` pada *backend* Django menunjukkan hasil *zero double booking* pada seluruh skenario pengujian fungsional terkontrol, termasuk skenario *concurrent booking* yang mensimulasikan *race condition*. Kontrol *buzzer* via *dashboard* dengan respons < 2 detik juga berfungsi sesuai rancangan. Namun, karena data log transaksi reservasi dari pengguna aktif di lapangan tidak tersedia secara memadai akibat rendahnya adopsi fitur ini selama periode pengujian, **KPI-4 dinyatakan Belum Diuji Empiris dengan data operasional riil**; hasil *zero double booking* yang dilaporkan bersumber dari audit arsitektur dan simulasi terkontrol, bukan dari transaksi pengguna sesungguhnya (lihat Bab V, Subbab 5.5.2).

Evaluasi kepuasan pengguna dari 34 responden menghasilkan *overall mean* 4,71/5 ($SD = 0,46$), dengan seluruh 10 butir kuesioner masuk dalam kategori Sangat Puas (rentang 4,21–5,00). Nilai tertinggi diraih Q8-Kenyamanan (4,85) dan Q2-Akurasi (4,82); nilai terendah

pada Q6-Notifikasi (4,50) dan Q3-Kecepatan (4,56) keduanya tetap dalam kategori Sangat Puas. **KPI-5 dinyatakan Memenuhi Target**, dengan dua catatan bersyarat penting: survei ditutup pada 22 November 2025, sehari sebelum anomali FP Rate paling ekstrem (23 November), sehingga skor kepuasan belum mencerminkan pengalaman pengguna pada kondisi sistem terburuk; dan sampel responden didominasi laki-laki (91,2%) tanpa definisi populasi atau teknik *sampling* yang terstruktur, sehingga generalisasi hasil perlu dilakukan dengan hati-hati (lihat Bab V, Subbab 5.6.4).

Estimasi efisiensi pencarian parkir menunjukkan proyeksi reduksi waktu sebesar 81,7% (dari rata-rata 13,66 menit menjadi $\pm 2,5$ menit), melampaui target KPI-6 sebesar $\geq 40\%$ secara kalkulasi. Namun, nilai pembanding $\pm 2,5$ menit merupakan asumsi operasional yang belum diukur langsung dari perilaku pencarian pengguna riil di lapangan. Oleh karena itu, **KPI-6 dinyatakan sebagai Hipotesis Awal**, bukan capaian yang terverifikasi secara empiris (lihat Bab V, Subbab 5.7.1).

Kesimpulan RQ3: Sistem Parkwell menunjukkan desain mekanisme reservasi yang aman dan andal secara arsitektural, serta memberikan pengalaman pengguna yang sangat memuaskan pada kondisi operasional tipikal selama masa survei. Klaim peningkatan efisiensi pencarian parkir sebesar 81,7% tetap berstatus hipotesis awal yang menjanjikan, namun memerlukan validasi lebih lanjut melalui pengukuran langsung terhadap perilaku pengguna riil di lapangan.

6.2 Kontribusi Penelitian

6.2.1 Kontribusi Akademis

Penelitian ini memberikan beberapa kontribusi kepada komunitas ilmiah bidang IoT dan sistem cerdas:

- **KPI-Driven Evaluation Framework:** Memperkenalkan kerangka evaluasi berbasis enam KPI yang memetakan secara eksplisit *Research Question* → sumber data → formula → hasil → status (Memenuhi Target / Tidak Memenuhi Target / Belum Diuji Empiris / Hipotesis Awal). Kerangka kerja ini dapat diadaptasi untuk evaluasi sistem IoT lainnya di luar konteks parkir.
- **Dataset Empiris 559 Event:** Menyediakan dataset pengujian lapangan nyata selama 14 hari dari 6 sensor HC-SR04 di lingkungan *outdoor* tropis, yang dapat menjadi referensi bagi peneliti lain dalam pengembangan *smart parking* berbasis IoT.
- **Dokumentasi Co-occurrence Cuaca dan Performa Sensor:** Mendokumentasikan secara kuantitatif *co-occurrence* antara kondisi hujan lebat (dicatat secara kualitatif) dan lonjakan FP Rate di lingkungan tropis dari rata-rata 51,70% menjadi 86,05% pada hari dengan hujan ekstrem tanpa mengklaim hubungan sebab-akibat yang teruji secara statistik (lihat Bab V, Subbab 5.2.6).
- **Justifikasi Empiris Parameter Temporal Filtering:** Mendemonstrasikan pendekatan berbasis analisis distribusi durasi *event* untuk memvalidasi parameter *debounce filter*, memberikan metodologi yang dapat direplikasi.

Perlu diakui secara jujur bahwa kontribusi akademis di atas bersifat **empiris dan praktis**, bukan teoretis. *KPI-Driven Evaluation Framework* yang diperkenalkan menyusun ulang metrik-metrik evaluasi yang secara individual sudah dikenal luas (*precision*, latensi, kepuasan pengguna berbasis Likert) ke dalam struktur pemetaan RQ–KPI–data–hasil yang eksplisit dan tertelusur, namun tidak mengklaim kebaruan teoretis dalam bidang IoT atau *smart parking* secara umum. Nilai utama penelitian ini terletak pada *dataset* lapangan riil dan dokumentasi keterbatasan operasional yang jujur, bukan pada kontribusi konseptual baru.

6.2.2 Kontribusi Praktis

- **Blueprint Arsitektur Sistem Parkir Cerdas Kampus:** Arsitektur berlapis (HC-SR04 → Raspberry Pi → MQTT → Django → HTTP Polling → *Dashboard*) dapat diadopsi oleh kampus lain sebagai *blueprint* implementasi dengan penyesuaian minimal.
- **Insight Operasional untuk Pengelola Parkir:** Temuan tentang jam dan slot berisiko tinggi FP memberikan panduan konkret bagi pengelola untuk mengoptimalkan operasional sistem parkir, terlepas dari keterbatasan uji korelasi cuaca yang belum dilakukan.
- **Bukti Empiris Kebutuhan Sensor *Waterproof*:** Penelitian ini menyediakan data kuantitatif yang kuat (*Precision* 48,30% pada kondisi lapangan tropis) untuk justifikasi investasi dalam sensor *waterproof* pada implementasi *outdoor* di iklim tropis.

6.3 Keterbatasan Penelitian

Beberapa keterbatasan penelitian ini perlu diakui secara jujur untuk membantu peneliti lain dalam menginterpretasikan hasil dan merencanakan penelitian lanjutan:

- **Keterbatasan Sensor HC-SR04 di Lingkungan *Outdoor* Tropis:** Sensor ini terbukti sangat sensitif terhadap kondisi hujan dan kelembapan tinggi, sehingga hasil penelitian tidak dapat digeneralisasikan untuk implementasi *outdoor* permanen tanpa modifikasi *hardware*.
- ***False Negative* Tidak Terukur:** Karena log hanya merekam *event* saat sensor aktif mendeteksi objek, FN (kendaraan parkir nyata yang tidak terdeteksi) tidak dapat dihitung langsung. *Recall* dan *Accuracy* sejati tidak dapat diverifikasi (lihat Bab V, Subbab 5.2.1).
- ***Ground Truth* Tanpa Validasi Silang:** Label TP/FP ditentukan oleh peneliti tunggal melalui observasi manual, tanpa *observer* kedua atau rekaman video sebagai pembandingan independen, sehingga berpotensi mengandung bias konfirmasi pada kasus-kasus ambigu (lihat Bab V, Subbab 5.2.6).
- **Ketiadaan Uji Statistik Inferensial:** Seluruh pernyataan mengenai keterkaitan antara cuaca dan FP Rate bersifat deskriptif berbasis *co-occurrence*. Tidak ada data cuaca terstruktur maupun uji korelasi formal (misalnya Chi-Square atau Spearman) yang dilakukan untuk menguji klaim sebab-akibat tersebut (lihat Bab V, Subbab 5.2.6).
- **Metode Pengukuran Latensi Manual dan Tidak Representatif:** Pengukuran KPI-2 dilakukan dengan *stopwatch* manual pada fase *pre-deployment*, bukan dari log *timestamp* NTP otomatis selama periode operasional 14 hari penuh gangguan (lihat Bab V, Subbab 5.3.2).
- **Ketiadaan Data Reservasi Lapangan:** Selama periode pengujian, fitur reservasi tidak digunakan secara aktif oleh pengguna nyata karena kurangnya sosialisasi. Evaluasi KPI-4 hanya dapat dilakukan melalui audit arsitektur dan pengujian fungsional terkontrol, bukan data transaksi riil (lihat Bab V, Subbab 5.5.2).
- **Skala Pengujian Terbatas:** Hanya 6 slot selama 14 hari. Hasil mungkin berbeda pada skala yang lebih besar atau periode pengujian yang mencakup lebih banyak variasi musim.
- **Skalabilitas MQTT Bersifat Estimasi Teoretis:** Analisis KPI-3 adalah estimasi berdasarkan kalkulasi *bandwidth*, bukan uji beban (*load testing*) aktual dengan 60+ sensor terhubung secara bersamaan (lihat Bab V, Subbab 5.4).

- **Estimasi Efisiensi Pencarian Belum Divalidasi Empiris:** Nilai waktu pencarian “dengan Parkwell” ($\pm 2,5$ menit) pada KPI-6 adalah asumsi operasional, bukan hasil pengukuran langsung terhadap perilaku pengguna riil (lihat Bab V, Subbab 5.7.1).
- **Keterbatasan Validitas Temporal Kuesioner:** Survei kepuasan pengguna (KPI-5) ditutup pada 22 November 2025, sehari sebelum anomali FP Rate paling ekstrem (23 November), sehingga skor kepuasan tidak mencerminkan pengalaman pengguna pada kondisi sistem terburuk (lihat Bab V, Subbab 5.6.4).
- **Metode *Sampling* Kuesioner Tidak Terdefinisi dan Potensi Bias Gender:** 34 responden dengan dominasi laki-laki (91,2%) dan usia 18–25 tahun (52,9%) dikumpulkan tanpa definisi populasi target, teknik *sampling*, maupun perhitungan ukuran sampel yang formal, sehingga representativitas terhadap populasi pengguna parkir kampus secara keseluruhan tidak dapat dipastikan (lihat Bab V, Subbab 5.6.4).
- **Formula Kalibrasi *Threshold* Belum Mengakomodasi Variasi Kendaraan:** Nilai *threshold* per slot dihitung dari satu *baseline_occupied* tunggal, tanpa mempertimbangkan variasi tinggi bodi antar kelas kendaraan (sedan, SUV/MPV, motor), yang diduga turut berkontribusi terhadap variasi FP Rate antar slot, khususnya pada Slot4 (lihat Bab IV, Subbab 4.1.2).

6.4 Saran Pengembangan

Berdasarkan temuan penelitian dan keterbatasan yang teridentifikasi, berikut adalah saran pengembangan yang diprioritaskan berdasarkan dampak teknis dan manajerial.

6.4.1 Prioritas Tertinggi: Validasi Empiris dan Perbaikan Metodologi (Tindak Lanjut Sidang)

Enam butir berikut secara khusus disusun untuk menindaklanjuti masukan tim penguji pada sidang tesis, yang mensyaratkan pengumpulan data baru dan karenanya tidak dapat diselesaikan secara retroaktif pada laporan ini:

- **Uji Korelasi Statistik Cuaca–FP Rate:** Mengumpulkan data cuaca kuantitatif terstruktur (curah hujan per jam, kelembapan) secara paralel dengan log sensor, kemudian melakukan uji korelasi formal (misalnya Chi-Square atau Spearman) untuk menguji bukan sekadar menduga hubungan antara kondisi cuaca dan lonjakan FP Rate.
- **Pengukuran Latensi Otomatis Berbasis *Timestamp* NTP:** Mengganti metode pengukuran latensi manual (*stopwatch*) dengan pencatatan otomatis dari log *timestamp* NTP yang berjalan sepanjang periode operasional penuh, bukan hanya pada fase *pre-deployment*, guna memperoleh estimasi KPI-2 yang representatif terhadap kondisi lapangan riil.
- **Validasi *Ground Truth* Ganda:** Melibatkan *observer* kedua atau rekaman video sinkron sebagai pembanding independen terhadap label TP/FP, guna mengurangi risiko bias konfirmasi peneliti tunggal dan meningkatkan *inter-rater reliability* data *ground truth*.
- **Perancangan Kuesioner dengan Populasi dan *Sampling* Terstruktur:** Mendefinisikan populasi target secara eksplisit, menghitung ukuran sampel minimum, menerapkan teknik *stratified sampling* berdasarkan jenis kelamin dan frekuensi penggunaan parkir, serta memperpanjang periode survei hingga mencakup rentang kondisi sistem yang lebih luas (termasuk hari-hari dengan performa buruk).

- **Pengukuran Waktu Pencarian Parkir Riil:** Melakukan pengukuran langsung terhadap waktu pencarian slot parkir pengguna (misalnya melalui observasi lapangan atau *self-report* terstruktur) untuk memvalidasi atau merevisi estimasi reduksi waktu pencarian pada KPI-6, yang saat ini masih berstatus hipotesis awal.
- **Load Testing Riil dan Data Transaksi Riil:** Melakukan uji beban aktual dengan sensor fisik pada skala yang lebih besar untuk memverifikasi estimasi KPI-3, serta melakukan sosialisasi fitur reservasi secara masif agar data transaksi riil dapat dikumpulkan untuk memvalidasi KPI-4 pada kondisi operasional sesungguhnya.

6.4.2 Prioritas Tinggi: *Hardware* dan Sensor

- **Penggantian HC-SR04 dengan Sensor *Waterproof*:** Untuk implementasi *outdoor* permanen, sensor HC-SR04 standar harus digantikan dengan varian *waterproof* seperti JSN-SR04T (sensor ultrasonik *waterproof* IP67) atau sensor induktif *loop* yang lebih tahan cuaca. Ini adalah saran paling kritical berdasarkan temuan empiris penelitian ini. JSN-SR04T merupakan *drop-in replacement* yang kompatibel dengan *firmware* Python yang ada.
- **Relokasi atau Modifikasi *Mounting*:** Kondisi tanah yang kurang stabil menyebabkan sensor dan tiang penyangga bergeser, sehingga pembacaan sensor menjadi kurang akurat. Gangguan fisik ini harus diatasi dengan merelokasi sensor ke posisi yang lebih stabil dan kokoh.
- **Kalibrasi *Threshold* Adaptif Berbasis Kelas Kendaraan:** Menindaklanjuti keterbatasan formula kalibrasi tunggal (lihat Bab IV, Subbab 4.1.2), diperlukan pencatatan kelas kendaraan pada setiap *event* serta pengembangan rentang *threshold* per kelas kendaraan (sedan, SUV/MPV, motor), bukan nilai tunggal.
- **Pertimbangan Kamera atau Sensor LiDAR sebagai Pengganti:** Untuk akurasi yang lebih tinggi, sensor berbasis kamera (*computer vision* untuk deteksi kendaraan) atau sensor LiDAR dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang lebih *robust* terhadap kondisi lingkungan, meskipun dengan biaya yang lebih tinggi.

6.4.3 Prioritas Tinggi: *Software* dan Algoritma

- **Implementasi *Adaptive Debounce Filtering*:** Mengubah T_{debounce} dari nilai statis (1 menit) menjadi parameter adaptif yang berubah sesuai jam dan kondisi cuaca. Misalnya: $T_{\text{debounce}} = 3$ menit pada jam 15:00–17:59 (jam pulang) dan $T_{\text{debounce}} = 8$ menit saat sensor mendeteksi kondisi hujan (berdasarkan sensor hujan tambahan atau API cuaca) dengan catatan bahwa efektivitas penyesuaian ini perlu diuji ulang, bukan diasumsikan.
- **Integrasi Data Cuaca *Real-Time*:** Menambahkan modul yang mengambil data cuaca dari API (OpenWeatherMap atau BMKG) untuk menyesuaikan parameter *filtering* secara dinamis sekaligus menyediakan data cuaca terstruktur yang dapat digunakan untuk uji korelasi statistik pada penelitian lanjutan (lihat Subbab 6.4.1). Saat hujan terdeteksi, sistem dapat menampilkan notifikasi “Akurasi sensor tereduksi dalam mode estimasi” di *dashboard*.
- ***Machine Learning* untuk Prediksi Pola Parkir:** Menggunakan dataset yang telah dikumpulkan sebagai data latih untuk model prediksi ketersediaan slot (misalnya Random Forest atau LSTM) yang dapat memberikan rekomendasi proaktif kepada pengguna sebelum mereka menuju area parkir.

- **Peningkatan Notifikasi:** Menambahkan *push notification mobile* (via PWA atau integrasi WhatsApp/Telegram) yang secara proaktif menginformasikan pengguna saat slot yang dipesan mereka terancam dilepas, atau saat ada slot yang baru kosong sesuai preferensi mereka.

6.4.4 Prioritas Menengah: Infrastruktur dan Skala

- **Perluasan ke Seluruh Area Parkir Kampus:** Berdasarkan estimasi skalabilitas KPI-3 (masih berstatus Belum Diuji Empiris), arsitektur yang ada berpotensi mendukung ekspansi hingga 60+ slot tanpa perubahan infrastruktur signifikan, namun perlu diverifikasi melalui *load testing* riil (lihat Subbab 6.4.1) sebelum perluasan dilakukan. Perluasan ke area parkir sepeda motor harus diprioritaskan karena memiliki dampak terbesar bagi mayoritas pengguna.
- **Load Testing Kapasitas HTTP Polling:** Sebelum ekspansi ke 60+ slot, perlu dilakukan uji beban aktual untuk mengidentifikasi *bottleneck* di sisi *backend*, terutama kapasitas server dalam menangani *request* HTTP polling secara bersamaan dari banyak klien dan *throughput database*. Migrasi ke mekanisme *push* berbasis WebSocket (Django Channels) dapat dipertimbangkan sebagai optimasi lanjutan untuk mengurangi *overhead request* pada skala yang lebih besar.
- **Redundansi dan High Availability:** Untuk sistem produksi, Raspberry Pi sebagai *single point of failure* harus diganti dengan arsitektur yang lebih redundan misalnya dengan menambahkan *gateway* sekunder atau memigrasikan sebagian komputasi *edge* ke klaster Raspberry Pi.

6.4.5 Prioritas Menengah: Pengalaman Pengguna

- **Pengembangan Aplikasi Mobile Native:** Meskipun *dashboard web* responsif dapat diakses dari *smartphone*, pengembangan aplikasi *mobile native* (Android/iOS) dengan fitur *push notification*, navigasi ke slot, dan integrasi peta kampus akan meningkatkan kemudahan akses secara signifikan.
- **Kampanye Sosialisasi Sistem secara Masif:** Rendahnya penggunaan reservasi selama pengujian lapangan menunjukkan kebutuhan kampanye sosialisasi yang terencana meliputi poster di area parkir, integrasi dengan portal mahasiswa, demo di orientasi mahasiswa baru, dan pengumuman resmi dari pihak kampus sekaligus menjadi prasyarat untuk mengumpulkan data transaksi riil guna memvalidasi KPI-4 (lihat Subbab 6.4.1).
- **Penambahan Fitur Analitik Dashboard untuk Pengelola:** Menambahkan fitur laporan periodik (harian, mingguan, bulanan) tentang pola penggunaan parkir, hari-hari sibuk, slot dengan utilisasi tertinggi/terendah, dan tren *FP rate* sebagai alat bantu pengambilan keputusan manajerial.

6.4.6 Penelitian Lanjutan yang Disarankan

- **Studi Perbandingan Multi-Sensor:** Membandingkan performa HC-SR04 (ultrasonik), sensor inframerah aktif, sensor magnetik, dan kamera (*computer vision*) dalam kondisi lingkungan yang sama untuk menghasilkan rekomendasi pemilihan sensor berbasis data untuk implementasi *outdoor* tropis.
- **Pengembangan dan Validasi Model Prediktif:** Menggunakan 559 *event* yang telah dikumpulkan sebagai *seed dataset*, mengumpulkan data selama 6–12 bulan pada semua

musim, dan mengembangkan model *machine learning* untuk prediksi ketersediaan slot dengan evaluasi yang ketat (*cross-validation*, *confusion matrix*, dll.).

- **Studi *User Adoption* dan *Behavior Change*:** Melakukan penelitian longitudinal tentang bagaimana penggunaan sistem Parkwell mengubah perilaku parkir sivitas akademika setelah sosialisasi yang memadai, mengukur perubahan waktu pencarian parkir secara nyata (bukan estimasi) sebagai kelanjutan dari validasi KPI-6 pada Subbab 6.4.1.
- **Integrasi dengan Sistem *Smart Campus* yang Lebih Luas:** Menginvestigasi peluang integrasi Parkwell dengan sistem presensi mahasiswa (untuk prediksi kebutuhan parkir), sistem penjadwalan kelas (untuk estimasi jam sibuk parkir), dan sistem keamanan kampus (CCTV).

6.5 Penutup

Penelitian ini telah merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi sistem parkir cerdas berbasis IoT bernama Parkwell di lingkungan kampus Politeknik Negeri Batam, dengan pendekatan evaluasi yang secara sengaja membedakan klaim yang benar-benar terverifikasi secara empiris dari klaim yang masih berstatus estimasi atau hipotesis awal (lihat Bab V, Subbab 5.8). Sistem Parkwell terbukti mampu menyediakan pembaruan status parkir dengan latensi *end-to-end* rata-rata 5,205 detik jauh di bawah batas persepsi pengguna untuk sistem *real-time* dan diterima dengan sangat baik oleh pengguna pada kondisi operasional tipikal (*overall mean* kepuasan 4,71/5).

Di sisi lain, hasil evaluasi KPI-1 menunjukkan bahwa sensor ultrasonik HC-SR04 menghadapi kendala operasional pada lingkungan *outdoor* tropis dengan curah hujan yang tinggi, yang tercermin dari nilai *precision* sebesar 48,30%. Keterbatasan tersebut berasal dari karakteristik fisik sensor dan bukan dari arsitektur sistem Parkwell. Oleh karena itu, penggunaan sensor *waterproof* direkomendasikan sebagai pengembangan utama pada implementasi berikutnya.

Pendekatan pelaporan yang transparan ini mengakui secara eksplisit apa yang telah terbukti, apa yang masih berupa estimasi, dan apa yang memerlukan penelitian lanjutan dipandang sebagai kontribusi metodologis yang sama pentingnya dengan hasil teknis itu sendiri. Dengan perbaikan *hardware*, validasi empiris lanjutan sebagaimana diuraikan pada Subbab 6.4.1, dan sosialisasi yang memadai, sistem Parkwell memiliki potensi untuk berkembang menjadi solusi parkir cerdas yang efektif dan berkelanjutan di lingkungan kampus Politeknik Negeri Batam.

References

- [1] J. Ma, X. Yang, X. Li, H. Zhang, and Z. Yang, "A review of smart parking system: Architectures, technologies, and applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 96717–96759, 2019.
- [2] M. A. Torad, B. Bouallegue, M. M. Khattab, and A. M. Ahmed, "Smart garage utilizing internet of things (iot)," *Journal of Sensors*, vol. 2022, p. 1654153, 2022.
- [3] G. Rocco, C. Pipino, and C. Pagano, "An overview of urban mobility: Revolutionizing with innovative smart parking systems," *Sustainability*, vol. 15, no. 17, p. 13174, 2023.
- [4] M. K. Mufida, A. Snoun, A. Ait El Cadi, T. Delot, M. Trepanier, Nelmiawati, A. Triwinarko, N. C. Kushardianto, W. Anurogo, Z. Lubis, and A. Riyadi, "Context aware parking occupancy forecasting in urban environment for sustainable smart parking system," in *Proceedings of the 7th International Conference on Applied Engineering (ICAE 2024)*, vol. 251 of *Advances in Engineering Research*, Atlantis Press, 2024.
- [5] S. S. Channamallu, S. Kermanshachi, J. M. Rosenberger, and A. Pamidimukkala, "Smart parking systems: A comprehensive review of digitalization of parking services," *Green Energy and Intelligent Transportation*, vol. 4, no. 1, p. 100140, 2025.
- [6] T. Lin, H. Rivano, and F. Le Mouel, "A survey of smart parking solutions," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 12, pp. 3229–3253, 2017.
- [7] S. Aswath, N. Kishore, S. K. Thinakaran, M. Vishwaa, A. Hariharan, C. S. Vasavi, and B. Karthikeyan, "Smart car parking system with online reservation," *Procedia Computer Science*, vol. 258, pp. 2777–2786, 2025.
- [8] A. Al Mamun, A. Hasib, A. S. M. Mussa, R. Hossen, and A. Rahman, "Iot-enabled smart car parking system through integrated sensors and mobile application," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 15, no. 2, 2024.
- [9] V. Sobeslav and J. Horalek, "A smart parking system based on mini pc platform and mobile application for parking space detection," *Mobile Information Systems*, vol. 2020, p. 8835970, 2020.
- [10] F. Lubis, B. V. Sundawa, and A. Cholish, "Design of smart parking system using ultrasonic sensor to optimize parking lots on campus," *Journal of Computer Networks, Architecture and High Performance Computing*, vol. 7, no. 2, pp. 590–603, 2025.
- [11] R. Kumar, A. Sharma, and V. Singh, "Performance evaluation and error analysis of iot-based ultrasonic smart parking systems," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 12, pp. 13120–13131, 2023.

- [12] A. Tamrazian, Z. Qian, and R. Rajagopal, "Where is my parking spot? online and offline prediction of time-varying parking occupancy," *Transportation Research Record*, vol. 2489, no. 1, pp. 77–85, 2015.
- [13] M. K. Mufida, A. Ait El Cadi, T. Delot, M. Trépanier, and D. Zekri, "Spatiotemporal clustering of parking lots at the city level for efficiently sharing occupancy forecasting models," *Sensors*, vol. 23, no. 11, p. 5248, 2023.
- [14] Y. V. Nadeak, P. Ho, and Masriah, "Real-time monitoring system and iot smart parking booking (case study: One hotel in tangerang)," *Circuit: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, vol. 8, no. 2, pp. 178–191, 2024.
- [15] P. Das, G. Roy, D. Upadhaya, S. Mondal, S. Koley, and S. Mukharjee, "Design and implementation of an iot-enabled smart parking system for real-time slot monitoring and access control," in *Proceedings of ICEMSSD 2024*, pp. 142–155, 2024.
- [16] Y. Agarwal, P. Ratnani, U. Shah, and P. Jain, "lot based smart parking system," in *Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, pp. 464–470, 2021.
- [17] M. R. M. Veeramanickam, B. Venkatesh, L. A. Bewoor, Y. W. Bhowte, K. Moholkar, and J. L. Bangare, "lot based smart parking model using arduino uno with fcfs priority scheduling," *Measurement: Sensors*, vol. 24, p. 100524, 2022.
- [18] T. Yokotani and Y. Sasaki, "Comparison with http and mqtt on required network resources for iot," in *Proc. 2016 Int. Conf. Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC)*, (Bandung, Indonesia), pp. 1–6, Sep. 2016.
- [19] Z. Chen, Y. Yin, F. He, and J. L. Lin, "Parking reservation for managing downtown curbside parking," *Transportation Research Record*, vol. 2498, no. 1, pp. 12–18, 2015.
- [20] M. M. Badr, "Smart parking with privacy preservation and reputation management using blockchain," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45010–45023, 2020.
- [21] J. W. Creswell and J. D. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 5th ed., 2018.