

Aplikasi seluler pengukuran dan prakiraan cuaca real-time berbasis IoT dengan integrasi pembelajaran mesin

Jul Jalal Al-Mamur Saylor Md. Moshiur^{a,d}, Nishat Tasnim Shishir^a, Bitta Boibhov Barman^b,
 , Rahman b,c,^{jy} Sumon Ahemed^a

^a Departemen Teknik IoT dan Robotika, Universitas Digital Gazipur, Kaliakair, Gazipur, 1750, Bangladesh

^b Departemen Rekayasa Perangkat Lunak, Universitas Digital Gazipur, Kaliakair, Gazipur, 1750, Bangladesh c

Lab Arsitektur Perangkat Lunak dan Desain Sistem, Universitas Digital Gazipur, Kaliakair, Gazipur, 1750, Bangladesh

^d Departemen Ilmu Komputer dan Teknik, Universitas Internasional Daffodil, Daffodil Smart City, Birulia, Savar, Dhaka 1216, Bangladesh

INFO ARTIKEL

Tautan kumpulan data: <https://github.com/Software-Machine-Intelligence-Lab/Weather-Station>

Kata kunci:

Prakiraan cuaca
Pembelajaran mesin
Internet untuk segala hal (IoT)
Pengumpulan data cuaca
Analisis prediktif
Aplikasi seluler
Berdebar

ABSTRAK

Pentingnya informasi cuaca yang akurat dan tepat waktu tidak dapat dilebih-lebihkan, karena sangat krusial untuk aktivitas sehari-hari, keselamatan, dan pengambilan keputusan di berbagai sektor. Sistem prakiraan cuaca yang ada sering kali kurang presisi untuk kondisi lokal, bergantung pada data dari stasiun cuaca yang jauh dan parameter lingkungan yang terbatas. Makalah ini memperkenalkan aplikasi seluler prakiraan cuaca real-time yang mengintegrasikan pembelajaran mesin dan teknologi IoT untuk mengatasi tantangan ini secara efektif. Sistem ini menggabungkan aplikasi seluler yang dirancang untuk menyediakan pembaruan cuaca real-time kepada pengguna melalui platform yang intuitif dan mudah digunakan. Sistem ini memanfaatkan sensor IoT untuk mengumpulkan data lingkungan yang komprehensif, termasuk suhu, kelembapan, kecepatan angin, tekanan barometrik, dan curah hujan, yang diterapkan secara strategis untuk memastikan pengumpulan data cuaca lokal beresolusi tinggi secara real-time. Selain itu, sistem ini memanfaatkan teknologi LoRa untuk transmisi data jarak jauh yang kuat. Sistem ini menggunakan model Pembelajaran Inkremental yang terus beradaptasi dengan masukan lingkungan baru, sehingga meningkatkan presisi dan efisiensi prakiraan. API (Antarmuka Pemrograman Aplikasi) memungkinkan input dan pengambilan data yang efisien, menjamin koneksi dan integrasi yang lancar antara sensor dan algoritma prakiraan. Selain itu, kami menganalisis prakiraan dari Google dan membandingkannya secara sistematis dengan prediksi lokal kami untuk menyoroti keunggulan penerapan spesifik lokasi dalam mencapai hasil lokal yang unggul. Metode kreatif ini menawarkan solusi yang skalabel dan fleksibel yang dapat diperluas untuk mencakup wilayah geografis yang lebih luas, selain menyediakan prakiraan cuaca yang akurat. Proyek ini mengatasi keterbatasan aplikasi cuaca yang ada dengan memberikan kondisi cuaca lokal yang akurat dan pengalaman pengguna yang intuitif. Implementasi awal di Gazipur, Bangla-

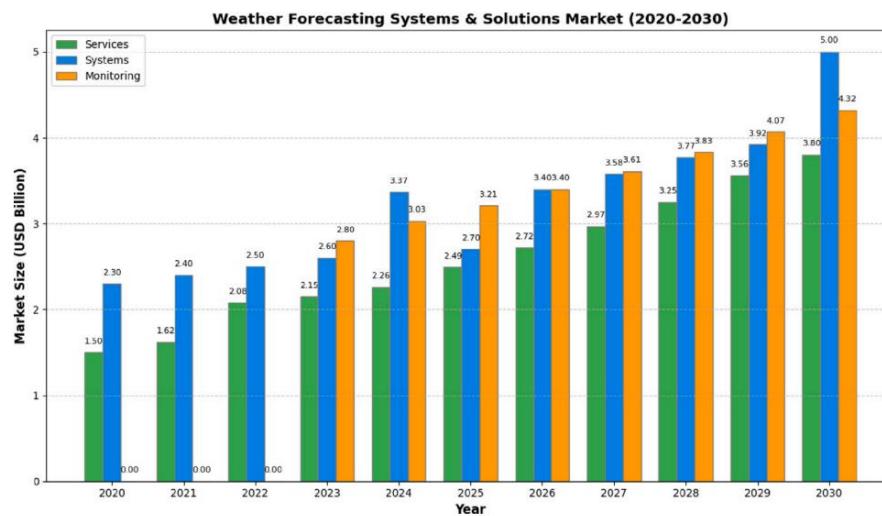
1. Pendahuluan

Perubahan iklim telah meningkatkan ketidakpastian pola cuaca dalam beberapa tahun terakhir, yang memengaruhi berbagai industri, termasuk pertanian, konstruksi, transportasi, dan energi. Prakiraan cuaca yang akurat dan cepat sangat penting untuk pengambilan keputusan penting dan efisiensi operasional dalam bisnis ini [1]. Misalnya, pertanian bergantung pada prediksi cuaca yang dapat diandalkan untuk perencanaan tanaman dan manajemen irigasi [2], sementara transportasi dan logistik memerlukan prakiraan yang tepat untuk meningkatkan keselamatan, meminimalkan keterlambatan, dan mengurangi risiko gangguan terkait cuaca [3,4]. Data cuaca yang akurat sangat penting bagi sektor energi, terutama sumber terbarukan seperti angin, matahari, dan hidro, karena pembangkit listriknya sangat bergantung pada keadaan lingkungan [5]. Peningkatan iklim juga telah meningkatkan

frekuensi dan tingkat keparahan bencana alam seperti badai, tornado, dan kejadian hujan ekstrem. Pemantauan cuaca waktu nyata sangat penting untuk kesiapsiagaan dan respons bencana, meminimalkan hilangnya nyawa dan harta benda [6]. Hal ini menekankan semakin pentingnya data meteorologi lokal yang akurat dalam memungkinkan respons yang terdidik terhadap kejadian cuaca ekstrem. Meskipun ada kemajuan dalam teknologi meteorologi, banyak aplikasi cuaca tradisional masih gagal memberikan prakiraan lokal yang akurat. Masalah ini sebagian besar disebabkan oleh ketergantungan mereka pada stasiun cuaca yang jauh, yang sering gagal mendeteksi variasi atmosfer regional. Meramalkan kondisi iklim mikro secara akurat merupakan tantangan lainnya.

Penggunaan IoT dan otomatisasi meningkat pesat di berbagai bidang

* Penulis terkait di: Departemen Rekayasa Perangkat Lunak, Universitas Digital Gazipur, Kaliakair, Gazipur, 1750, Bangladesh.
 Alamat email: moshiur0001@bdu.ac.bd (MM Rahman).



Gambar 1. Proyeksi Pertumbuhan Pasar untuk Layanan, Sistem, dan Pemantauan Cuaca (2020–2030).

bidang seperti pertanian, perawatan kesehatan [8], restoran [9], dan industri perhotelan, termasuk aplikasi seperti prakiraan cuaca.

Namun, sistem pengukuran dan prakiraan cuaca yang ada seringkali hanya mengukur parameter lingkungan yang terbatas, biasanya suhu dan kelembapan, sementara mengabaikan elemen-elemen penting seperti kecepatan angin, intensitas cahaya, tekanan barometrik, dan curah hujan [10]. Fokus yang terbatas ini dapat mengakibatkan informasi cuaca yang tidak memadai atau menyesatkan, sehingga membatasi keandalan dan kegunaan prakiraan cuaca. Kekurangan ini menyebabkan perlunya pendekatan yang lebih komprehensif yang mengintegrasikan beragam data lingkungan, memanfaatkan pembelajaran mesin (ML) untuk meningkatkan akurasi prediksi, dan menawarkan aplikasi seluler yang ramah pengguna untuk meningkatkan aksesibilitas dan keandalan dalam prakiraan cuaca.

Pasar sistem dan solusi prakiraan cuaca global mengalami lonjakan yang stabil, didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan wawasan iklim yang akurat di seluruh sektor pertanian, penerbangan, energi, dan manajemen bencana. Dari total ukuran pasar sekitar \$3,8 miliar pada tahun 2020, pasar ini telah berkembang menjadi sekitar \$8,4 miliar pada tahun 2025, dengan proyeksi mencapai hampir \$13,1 miliar pada tahun 2030 [11–13]. Pertumbuhan yang kuat ini menggarisbawahi meningkatnya permintaan akan layanan canggih, sistem canggih, dan solusi pemantauan waktu nyata untuk mengatasi variabilitas iklim dan memastikan efisiensi operasional. Gambar 1 mengilustrasikan proyeksi pertumbuhan pasar untuk layanan, sistem, dan pemantauan cuaca dari tahun 2020 hingga

Tahun 2030

Pekerjaan kami menyajikan alternatif yang jauh lebih hemat biaya dibandingkan dengan harga yang diuraikan dalam [14], di mana stasiun cuaca otomatis berbasis IoT berharga ribuan dolar. Kami mengembangkan stasiun cuaca berbasis IoT dengan biaya sekitar 8865 Taka (sekitar 73,88 USD), yang secara substansial mengurangi biaya tanpa mengorbankan fungsi-fungsi penting. Makalah ini memperkenalkan sistem prakiraan cuaca inovatif yang menggabungkan pembelajaran mesin canggih dengan teknologi IoT untuk mengatasi kekurangan metode tradisional. Dengan memanfaatkan pengumpulan data waktu nyata, pembelajaran berkelanjutan, dan komunikasi jarak jauh, sistem ini memberikan pembaruan cuaca yang tepat dan terlokalisasi sambil memastikan skalabilitas dan efektivitas biaya. Pendekatan ini menjamin mitigasi kekurangan sistem yang ada dan juga menjaga solusi tetap dapat diterapkan secara efisien pada perangkat keras kelas bawah, sehingga adaptif dan layak secara ekonomi dalam segala jenis variasi lalu lintas. Selain itu, kontribusi kami sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 13 (Aksi Iklim) dan SDG 11 (Kota dan Komunitas Berkelanjutan), seperti yang disorot dalam publikasi Array baru-baru ini yang menganjurkan sistem ketahanan iklim cerdas melalui integrasi IoT dan ML [15].

Tujuan pekerjaan kami dapat diringkas sebagai berikut:

- Untuk mengumpulkan data cuaca lokal secara real-time menggunakan sensor IoT, memastikan pemantauan lingkungan beresolusi tinggi dan tepat.

- Untuk terus meningkatkan akurasi peramalan dengan mengintegrasikan model Pembelajaran Inkremental yang beradaptasi dengan data lingkungan baru.
- Untuk mencapai komunikasi jarak jauh yang kuat melalui teknologi LoRa, memungkinkan transmisi data yang andal antara sensor dan sistem peramalan.
- Untuk mengintegrasikan komponen sistem secara mulus termasuk sensor IoT, basis data, dan model peramalan melalui API yang efisien untuk operasi lintas platform yang lancar.
- Untuk mengembangkan solusi yang dapat diskalakan dan hemat biaya untuk prediksi cuaca yang tepat peramalan yang dapat disesuaikan dengan berbagai wilayah geografis.

Karya ini bertujuan untuk merevolusi prakiraan cuaca dengan mengintegrasikan pembelajaran mesin canggih dengan teknologi IoT untuk memberikan pembaruan lokal yang akurat dan real-time. Pada akhirnya, pendekatan yang skalabel dan hemat biaya ini beradaptasi dengan beragam wilayah geografis dan beban lalu lintas yang bervariasi, mengatasi keterbatasan metode tradisional.

Sisa makalah ini disusun sebagai berikut: Penelitian terkait terkini dibahas di Bagian 2. Bagian 3 menganalisis metode yang diusulkan secara komprehensif. Detail implementasi sistem dijelaskan di Bagian 4. Bagian 5 mengevaluasi kinerja sistem, termasuk akurasi model, prosedur simulasi, dan analisis hasilnya. Bagian 6 menyajikan kesimpulan dari penelitian ini. Terakhir, Bagian 7 memberikan arahan penelitian kami selanjutnya.

2. Pekerjaan terkait

Tujuan utama pekerjaan kami adalah menyediakan aplikasi seluler yang mudah digunakan yang memberikan prakiraan cuaca akurat, waktu nyata, dan prediktif menggunakan pembelajaran mesin (ML), membantu pengguna menjadwalkan rencana mereka dengan aman dan mengelola tugas yang bergantung pada cuaca secara efisien. Dalam pendekatan kami, kami mengembangkan sistem IoT yang mengambil data secara real-time menggunakan sensor seperti sensor suhu-kelembapan, sensor kecepatan angin, sensor tekanan barometrik, resistor yang bergantung pada cahaya, dan sensor hujan. Di bagian ini, kami mengeksplorasi beberapa teknik pengukuran dan prakiraan cuaca mutakhir.

2.1. Sistem pemantauan cuaca berbasis IoT

Girija dkk. [16] mengusulkan sistem berbasis IoT untuk memantau kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kadar CO menggunakan sensor yang terhubung ke mikrokontroler ESP8266. Data dikirim ke cloud untuk dianalisis dan dapat diakses dari jarak jauh. Sistem ini tidak memiliki integrasi teknik analisis data tingkat lanjut seperti ML untuk meningkatkan akurasi prediksi dan deteksi anomali.

aplikasi seluler membatasi aksesibilitas dan kenyamanan pengguna. Lebih lanjut, diskusi mengenai akurasi sensor dan skalabilitas sistem masih kurang, menunjukkan adanya area yang jelas untuk perbaikan. Menggunakan sensor standar, Kamble dkk. [17] menyajikan sistem pemantauan cuaca berbasis IoT yang melacak suhu, kelembapan, kecepatan angin, arah, dan curah hujan. Data diproses oleh mikrokontroler dan diperbarui ke halaman web melalui GPRS, yang memungkinkan akses jarak jauh. Sistem ini tidak dapat menyediakan pembaruan berkelanjutan secara real-time karena interval penyegaran data halaman web selama 10 menit, yang membatasi kecepatan pemantauan cuaca. Selain itu, sistem ini tidak memiliki aplikasi seluler untuk pemantauan dan kontrol secara real-time, sehingga mengurangi aksesibilitas dan kegunaannya.

Bulipe et al. [18] mengusulkan sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT yang melacak parameter seperti suhu, kelembaban, cahaya, dan tingkat CO menggunakan sensor. Data dikirim ke halaman web dan ditampilkan sebagai statistik grafis, dapat diakses dari mana saja. Sistem ini mengatasi perubahan lingkungan dengan memantau dan mengendalikan kondisi dari jarak jauh, tetapi bergantung pada metode yang sudah ketinggalan zaman seperti Zigbee, tidak memiliki aplikasi seluler yang canggih, dan mungkin menghadapi keterbatasan dalam akurasi dan pemrosesan waktu nyata. Piciullo et al. [19] mengembangkan Sistem Peringatan Dini Longsor Lokal (Lo-LEWS) berbasis IoT operasional untuk lereng curam yang tidak gagal di Eidsvoll, Norwegia. Pendekatan mereka mengintegrasikan pemantauan hidrometeorologi waktu nyata dengan pemodelan berbasis data dan numerik untuk memperkirakan stabilitas lereng. Model hidrogeoteknik berbasis fisik menggunakan SEEP/W dan SLOPE/W (GeoStudio) dikalibrasi dengan pengamatan sensor in-situ, termasuk kadar air volumetrik (VWC) dan tekanan air pori (PWP). Output ini, bersama dengan prakiraan meteorologi dan indeks vegetasi (Indeks Area Daun), digunakan untuk melatih model Random Forest dan Regresi Polinomial untuk prediksi faktor keamanan (FoS). Sementara sistem menunjukkan integrasi pemodelan, prakiraan, peringatan, dan pemantauan yang kuat, sistem ini memiliki keterbatasan dalam efektivitas karena generalisasi model, tuntutan pada informasi sensor dan prakiraan yang akurat, dan tuntutan komputasi yang terkait dengan penggabungan model numerik secara real-time ke dalam cloud. Ben Bouallègue et al. [20] menyajikan penilaian komparatif yang menentukan kinerja model prediksi cuaca berbasis ML relatif terhadap model prediksi cuaca numerik (NWP) tradisional dalam lingkungan seperti operasional. Penelitian ini menggunakan model Pang Weather ML, yang telah dilatih pada data analisis ulang ERA5, dan membandingkan kemampuan prakiraan deterministiknya dengan Sistem Peramalan Terpadu (IFS) ECMWF. Studi ini mengidentifikasi keterbatasan penting dalam prakiraan berbasis ML, termasuk penghalusan yang berlebihan, bias yang meningkat dengan waktu tunggu yang lebih lama, dan kurangnya efektivitas dalam memprediksi intensitas siklon tropis.

2.2. Integrasi pembelajaran mesin dan teknologi cloud

Gotmare et al. [21] menggunakan Arduino UNO dan sensor untuk melacak suhu, kelembapan, tekanan, kecepatan angin, dan kualitas udara, menyediakan notifikasi waktu nyata. Keterbatasannya meliputi akurasi data yang terbatas dan kurangnya aplikasi seluler untuk meningkatkan aksesibilitas. Nallakaruppan et al. [22] memperkenalkan sistem prakiraan cuaca yang mengintegrasikan metode IoT dan ML seperti Decision Tree dan Time Series Analysis. Sistem ini menggunakan sensor yang terhubung ke Raspberry Pi untuk mengumpulkan data cuaca, yang kemudian dianalisis untuk meningkatkan akurasi prakiraan. Namun, sistem ini memiliki keterbatasan, seperti tidak adanya aplikasi seluler, yang dapat memengaruhi aksesibilitas dan pembaruan data waktu nyata. Alam et al. [23] menyajikan stasiun cuaca berbasis IoT berbiaya rendah menggunakan Node MCU, Arduino Uno, dan berbagai sensor untuk memantau data cuaca waktu nyata. Sistem mengirimkan data ke server web ThingSpeak untuk akses jarak jauh. Keterbatasannya mencakup potensi penundaan transmisi data karena latensi jaringan, masalah konsumsi daya dalam kondisi ekstrem, dan kerentanan terhadap gangguan terkait cuaca yang memengaruhi keakuratan sensor dan stabilitas komunikasi.

Verma et al. [24] mengembangkan sistem prediksi cuaca real-time menggunakan perangkat IoT dan sensor untuk memantau kondisi cuaca. Namun,

sistem ini memiliki keterbatasan, termasuk model ML dasar dengan akurasi yang lebih rendah, tidak adanya integrasi parameter cuaca tambahan seperti kecepatan angin, tekanan, dan curah hujan, dan kurangnya aplikasi seluler untuk aksesibilitas yang ramah pengguna. Kapoor et al. [25] mengembangkan stasiun cuaca berbasis cloud menggunakan Raspberry Pi dan sensor untuk memantau suhu, kelembapan, dan tekanan. Sistem ini menggunakan papan Raspberry Pi Zero W untuk mengumpulkan data, yang dikirimkan ke Raspberry Pi 3 pusat dan kemudian ke cloud untuk diproses dan diprediksi.

Namun, masalah potensial meliputi latensi transfer data, konsumsi daya dalam kondisi ekstrem, dan kerentanan terhadap gangguan akibat cuaca buruk.

Bonilla dkk. [27] mengusulkan arsitektur perangkat lunak stasiun cuaca berbasis layanan mikro dan modular untuk memungkinkan akuisisi data waktu nyata, skalabilitas, dan fleksibilitas. Sistem mereka, yang berbasis kontainer Docker dan konfigurasi JSON, dapat mengintegrasikan berbagai sensor dan memungkinkan akses jarak jauh. Sistem ini berbasis pencatat data dengan dukungan API web dan belum divalidasi untuk instalasi skala besar atau frekuensi tinggi.

2.3. Sistem canggih dengan aplikasi seluler dan integrasi ML

Beberapa karya terbaru telah membahas potensi peramalan cuaca kolaboratif secara real-time melalui pembelajaran mesin. Misalnya, Fowdru dan Nazir [28] mengusulkan sistem yang menggabungkan data cuaca dari beberapa lokasi untuk meningkatkan akurasi prediktif menggunakan serangkaian algoritma ML seperti CNN, KNN, dan Regresi Polinomial Berganda. Karya mereka menekankan manfaat kinerja peramalan kolaboratif dibandingkan model titik tunggal tradisional dan menunjukkan sistem lengkap yang menggabungkan antarmuka seluler, desktop, dan web dengan cloud dan penerapan lokal. Pendekatan ini sangat selaras dengan arsitektur data multi-titik sistem kami dan tujuan peramalan yang akurat dan real-time menggunakan pembelajaran mesin yang ringan dan adaptif. Kodali dkk. [29] menjelaskan sistem pemantauan cuaca berbiaya rendah menggunakan papan Wemos D1 dan platform Arduino untuk mengambil data cuaca dari Cloud dan menampilkannya di layar OLED. Namun, sistem ini tidak memiliki integrasi aplikasi seluler dan mungkin memiliki fungsionalitas terbatas di area dengan jangkauan jaringan yang buruk atau akses terbatas ke layanan cloud.

Krishna, A., dkk. [30] menggunakan ANN untuk prakiraan yang akurat, tetapi menghadapi tantangan kalibrasi sensor yang berpotensi menimbulkan ketidakakuratan, dan kurangnya interaktivitas pengguna secara real-time melalui aplikasi seluler. Math dkk. [26] mengusulkan sistem pemantauan cuaca berbasis IoT untuk Pertanian Presisi (PA) di India. Sistem ini menggunakan sensor berbiaya rendah yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Data dikumpulkan, diproses secara lokal, dan disimpan di platform IoT ThingSpeak untuk visualisasi dan analisis guna membantu petani membuat keputusan yang tepat waktu. Namun, sistem ini tidak memiliki integrasi aplikasi seluler, yang berpotensi membatasi aksesibilitas, dan ThingSpeak mungkin membatasi skalabilitas dan analitik tingkat lanjut dibandingkan dengan Perakis T. et al. [31] membahas skalabilitas tetapi berjuang dengan konsumsi daya dan masalah latensi, yang membatasi akurasi data cuaca waktu nyata di wilayah geografis yang lebih luas. Satyanarayan et al. [32] memperkenalkan sistem pemantauan cuaca pintar yang memanfaatkan Raspberry Pi 3 dan berbagai sensor untuk mengukur suhu, kelembapan, kecepatan angin, curah hujan, dan intensitas cahaya. Data yang dikumpulkan kemudian diunggah ke cloud dan dapat diakses secara global melalui aplikasi seluler, yang menjawab tantangan pemantauan cuaca jarak jauh. Namun, sistem ini bergantung pada Raspberry Pi 3 untuk pemrosesan dan komunikasi data, yang mungkin tidak memadai untuk menangani tugas pemantauan cuaca yang lebih rumit atau penerapan skala besar yang membutuhkan daya komputasi dan keandalan yang lebih tinggi. Selain itu, sistem ini tidak memiliki integrasi algoritma prediksi cuaca tingkat lanjut. Singh, S. et al. [33] mengintegrasikan IoT dan pembelajaran mesin untuk prediksi cuaca waktu nyata. Namun, sistem ini memiliki keterbatasan dalam akurasi data selama kondisi cuaca ekstrem dan tidak memiliki fitur aplikasi seluler yang komprehensif untuk aksesibilitas pengguna.

Chatrabhuj et al. [34] memberikan gambaran komprehensif tentang aplikasi AI di bidang pertanian dan konservasi lingkungan, menekankan perlunya sistem cerdas yang mengatasi kelangkaan data, tantangan iklim, dan pengambilan keputusan secara real-time. Berdasarkan hal ini, kami

Tabel 1

Perbandingan dengan beberapa karya seni terkini.

Referensi	Suhu pengukuran	Kelembaban pengukuran	Kecepatan angin pengukuran	Intensitas cahaya pengukuran	Barometrik tekanan pengukuran	Status curah hujan pengukuran	Basis Data integrasi	ML integrasi	Seluler aplikasi pelaksanaan
Rao dkk. [18] Ya Kamble dkk. [17]	Ya TIDAK	Ya Ya	TIDAK Ya	Ya TIDAK	TIDAK TIDAK	TIDAK Ya	Ya TIDAK	TIDAK TIDAK	TIDAK TIDAK
Joseph dkk. [10]	Ya	Ya	TIDAK	TIDAK	TIDAK	TIDAK	TIDAK	TIDAK	TIDAK
Girija dkk. [16] Ya Verma dkk. [24]	Ya TIDAK	Ya Ya	TIDAK TIDAK	TIDAK Ya	TIDAK Ya	TIOAK Ya	TIDAK Ya	TIDAK Ya	TIDAK TIDAK
Gotmare dkk. [21]	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	TIDAK	TIDAK	TIDAK
Nallakaruppan dkk. [22]	Ya	Ya	TIDAK	TIDAK	Ya	Ya	Ya	Ya	TIDAK
Kapoor dkk. [25]	Ya	Ya	Ya	TIDAK	Ya	Ya	Ya	Ya	TIDAK
Alam et al. [23] Ya Math et al. [26] Ya Usulan pekerjaan Ya	Ya	Ya	TIDAK Ya	TIDAK Ya	TIDAK Ya	TIDAK Ya	Ya Ya	TIDAK Ya	Ya TIDAK

pekerjaan memperluas prinsip-prinsip ini menjadi kecerdasan cuaca dengan menggabungkan IoT3.1.1. Pertimbangan etika dan privasi data

penginderaan dengan pembelajaran mesin tambahan untuk peramalan lokal, suatu keharusan dalam menghadapi variabilitas iklim yang cepat. Tabel 1 membandingkan karya-karya terkait dengan pengukuran dan peramalan cuaca yang kami usulkan, metode. Tabel ini menyoroti aspek-aspek penting seperti pengumpulan data parameter dan teknik peramalan.

3. Metodologi dan desain sistem

Sistem yang kami usulkan menggunakan teknologi komunikasi nirkabel LoRa (Jarak Jauh) di sisi pemancar dan penerima untuk memfasilitasi transfer data nirkabel yang aman, berdaya rendah, dan jarak jauh. Tidak seperti sistem komunikasi konvensional berbasis Wi-Fi atau jaringan seluler, LoRa tidak bergantung pada infrastruktur internet. Hal ini membuatnya sangat cocok digunakan di daerah pedesaan, terpencil, dan minim infrastruktur, di mana konektivitas internet yang konsisten mungkin tidak tersedia. Dengan menawarkan komunikasi yang lancar antara node sensor jarak jauh dan prosesor pusat tanpa bergantung pada layanan jaringan eksternal, Sistem ini mendukung pengumpulan dan transmisi data yang lancar. Metodologi yang diusulkan tidak hanya meningkatkan keandalan dan otonomi sistem tetapi juga mengurangi biaya operasional dan penyebaran jaringan kompleksitas di lokasi terpencil secara signifikan.

Inti dari karya ini adalah model pembelajaran mesin (ML) yang didukung metodologi pembelajaran inkremental untuk prakiraan data cuaca. Sebuah perangkat seluler berbasis flutter aplikasi ini dibangun untuk menampilkan data cuaca real-time dari IoT sistem. Proses keseluruhan sistem yang diusulkan diilustrasikan pada Gambar. 2. Pekerjaan dibagi menjadi beberapa langkah:

- i. Pengumpulan data
- ii. Pra-pemrosesan data
- iii. Pelatihan model
- iv. Bagian Belakang
- v. Visualisasi

Penjabaran dari langkah-langkah tersebut di atas adalah sebagai berikut:

3.1. Pengumpulan data

Kami telah mengembangkan sistem yang mampu mengukur secara real-time parameter cuaca seperti suhu, kelembaban, tekanan udara, cahaya intensitas, kecepatan angin, dan kondisi hujan. Selain pemantauan kondisi cuaca, kami juga memperkirakan parameter cuaca ini untuk memanfaatkan wawasan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik. Untuk meningkatkan akurasi prediksi kami, kami melengkapi data waktu nyata dengan tambahan informasi dari situs web terpercaya, memastikan bahwa perkiraan kami lebih akurat. Tepat dan dapat diandalkan. Kami mengumpulkan data dari www.visualcrossing.com dari tahun 2000 hingga April 2024 [35]. Kami telah mengumpulkan satu catatan per hari dari situs web.

Studi ini memanfaatkan data cuaca lingkungan yang dikumpulkan melalui Sensor IoT dan dari sumber yang dapat diakses publik seperti Visual Cross-ing. Data tersebut terdiri dari parameter yang tidak dapat diidentifikasi secara pribadi, termasuk suhu, kelembaban, kecepatan angin, tekanan udara, dan curah hujan. Semua Prosedur pengumpulan dan penanganan data mematuhi protokol IoT standar dan praktik pengelolaan data lingkungan. Tidak ada batasan khusus pengguna atau data pribadi dikumpulkan, disimpan, atau diproses dalam penelitian ini. data yang dikumpulkan dianonimkan, dikirimkan dengan aman, dan disimpan oleh standar privasi data yang berlaku. Tidak diperlukan persetujuan etis karena bagian dari penelitian ini, mengingat tidak ada subjek manusia atau data pribadi yang terlibat.

3.2. Pra-pemrosesan data

Sebelum menggunakan data dari sumber untuk melatih model kami, kami menerapkan beberapa metode pra-pemrosesan seperti membuang kolom yang tidak digunakan dan data null, mengisi data null, pola pemformatan, dan pengkodean Label untuk membuat dataset kita terformat dengan baik. Metode pra-pemrosesan ini adalah diuraikan sebagai berikut:

3.2.1. Menghapus kolom yang tidak digunakan

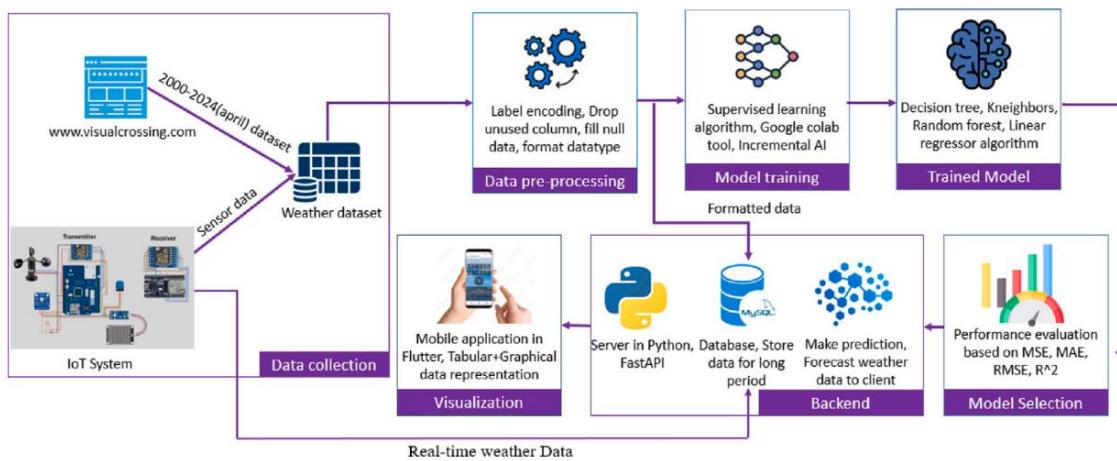
Dataset yang kami kumpulkan dari situs web tersebut memiliki sekitar 33 kolom. Kami memilih tujuh jenis data: tanggal, suhu maksimum, suhu minimum, suhu rata-rata, tekanan udara, cuaca kondisi, kecepatan angin, dan kelembaban. Karena kami memiliki sistem IoT yang menggunakan jumlah sensor terbatas, sejumlah data tertentu telah telah dikumpulkan dari sistem. Berdasarkan tipe data, kami memilih kolom dari kumpulan data yang kami kumpulkan dari situs web.

3.2.2. Menghapus beberapa data null

Dataset kami berisi 8885 catatan, dengan 35 catatan memiliki null nilai. Karena ukuran dataset yang besar, kami menghapus nilai nol ini untuk memastikan integritas data; pengecualian nilai nol ini tidak memengaruhi kinerja keseluruhan.

3.2.3. Mengisi data null

Setelah menghapus nilai nol dari dataset, kami menemukan bahwa kolom tekanan masih berisi banyak catatan nol. Kami telah membahas hal ini masalah dengan menghitung nilai median dari semua catatan tekanan dan mengisi nilai nol.



Gambar 2. Proses keseluruhan sistem yang kami usulkan.

3.2.4. Pola format data Setelah

mengumpulkan data dari situs web dan sistem IoT kami, kami menemukan ketidakkonsistenan dalam format tanggal. Data tersebut mencakup tiga pola yang berbeda: pola ent: "2000-01-05", "1/1/2016", dan "2024-04-22 19:00:27". Untuk menstandardisasi format ini, kami mengekstrak nilai hari, bulan, dan tahun dari setiap string tanggal menggunakan metode Python strftime dan untuk TanggalWaktu.

3.2.5. Pengkodean label

Pengkodean label adalah teknik pembelajaran mesin (ML) dan analisis data yang mengubah variabel kategorikal menjadi format numerik [36]. Kami memiliki kolom dalam kumpulan data yang menggambarkan kondisi cuaca dalam tipe data string, seperti "Apakah hari ini cerah atau berawan?" Karena kami menggunakan algoritma pembelajaran mesin regresi yang hanya bekerja dengan nilai numerik, kami menggunakan teknik pengkodean label untuk merepresentasikan nilai string ini sebagai nilai 0 atau 1. Misalnya, nilai "0" mewakili cerah, dan "1" mewakili berawan, dll.

3.3. Pelatihan model

Untuk sistem prakiraan cuaca kami, kami membuat kumpulan data khusus yang memuat pengamatan cuaca historis, yang dibersihkan dan diproses terlebih dahulu dengan cermat guna memastikan masukan berkualitas untuk pelatihan. Semua pengembangan dan eksperimen model dilakukan di Google Colab, memanfaatkan lingkungan komputasinya yang skalabel dan andal untuk mendukung iterasi model yang efisien. Keluaran target terdiri dari suhu, kelembaban, kecepatan angin, dan tekanan atmosfer. Karena variabel-variabel ini merupakan variabel numerik kontinu, algoritma regresi diidentifikasi sebagai pilihan yang paling tepat. Untuk memilih model prediktif yang optimal, kami melakukan analisis komparatif terhadap beberapa teknik regresi terbimbing, termasuk Regresi Linier, Regresor Pohon Keputusan, Regresor K-Nearest Neighbors, dan Regresor Hutan Acak.

Setiap model dilatih pada 80% data (train split) dan divalidasi pada 20% sisanya (test split) untuk menilai kemampuan generalisasi. Selama pelatihan, kami dengan cermat memilih dan menyetel hiperparameter utama — seperti jumlah estimator di Random Forest (diatur ke 100), kedalaman pohon maksimum, dan sampel minimum per daun — untuk menyeimbangkan bias dan varians serta memitigasi overfitting. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik standar: Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), dan skor R-squared (R²), yang memberikan penilaian komprehensif terhadap akurasi prediktif. Di antara algoritma yang diuji, Random Forest Regressor menunjukkan

performa terbaik, mencapai tingkat kesalahan terendah dan nilai R tertinggi di semua parameter cuaca. Strategi pembelajaran ansamblenya, yang menggabungkan prediksi dari beberapa pohon keputusan yang didekorelasi,

terbukti sangat efektif dalam pemodelan hubungan kompleks dan non-linier yang melekat dalam data cuaca [37].

Kami ingin memastikan ketersediaan data yang konsisten dan pengalaman pelanggan yang lebih baik, terutama melalui aplikasi seluler kami. Mengingat keterbatasan kapasitas pemrosesan dan efisiensi energi perangkat seluler, kami sengaja memilih untuk tidak mengimplementasikan model yang membutuhkan banyak sumber daya seperti Gradient Boosting Machines, XGBoost, atau jaringan saraf tiruan dalam untuk saat ini. Sebagai gantinya, kami memilih model ensemble ringan yang lebih mudah diterapkan pada platform seluler dan memberikan keseimbangan yang seimbang antara akurasi, kecepatan, dan efisiensi. Seiring dengan perluasan dataset dan kemajuan infrastruktur kami, versi-versi mendatang akan menyelidiki model yang lebih rumit menggunakan metode pembelajaran inkremental untuk meningkatkan kinerja prediktif sekaligus mempertahankan kegunaan seluler.

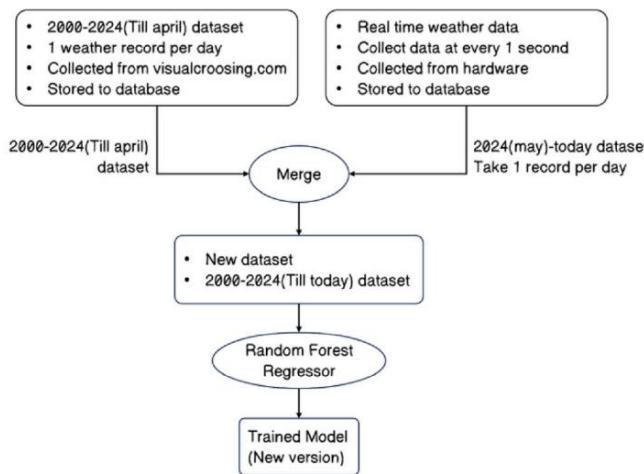
3.4. Pembelajaran Inkremental

Kami telah menggunakan metodologi pelatihan model ML tingkat lanjut yang disebut Pembelajaran Inkremental, di mana model ML mempelajari dan meningkatkan pengetahuannya secara progresif tanpa melupakan informasi yang telah diperoleh sebelumnya [38]. Sistem prediksi cuaca yang kami kembangkan menggunakan model pembelajaran inkremental tingkat lanjut yang terus-menerus melatih ulang dirinya sendiri menggunakan data historis dan waktu nyata. Pendekatan ini memastikan bahwa akurasi prakiraan meningkat seiring waktu dengan menggabungkan data dari penerapan awal hingga periode terkini, seperti April 2024. Dengan pelatihan ulang pada kumpulan data yang diperluas, yang mencakup catatan cuaca masa lalu dan data lingkungan yang baru dikumpulkan, sistem beradaptasi dengan perubahan kondisi, mempertahankan akurasi tinggi, dan memastikan kinerja jangka panjang yang skalabel. Gambar 3 menunjukkan alur konseptual model Pembelajaran Inkremental yang kami usulkan.

Untuk meningkatkan akurasi model pembelajaran mesin kami, kami menerapkan teknik pelatihan ulang di mana model diperbarui dengan set data yang lebih besar. Set data ini dibuat dengan menambahkan data baru yang tersedia ke data pelatihan yang telah digunakan sebelumnya. Hasilnya, kapasitas pembelajaran model meningkat, menghasilkan akurasi prediksi yang lebih tinggi. Aplikasi seluler kami juga menyertakan fungsi yang memungkinkan pelatihan ulang model sesuai permintaan, yang mendorong pembelajaran bertahap dan menjaga model tetap terkini dengan tren data yang berubah.

3.4. Bagian Belakang

Untuk backend kami, kami menggunakan FastAPI, sebuah framework web modern yang dikenal karena performanya yang tinggi dan kemudahan penggunaannya [39]. Dengan menggunakan ini, kami membuat total sembilan API yang menyediakan beberapa layanan seperti membuat pengguna, membaca data cuaca real-time, dan banyak lagi, seperti yang disediakan pada Tabel 2. Kami menggunakan MySQL sebagai database kami, sebuah sistem manajemen database relasional sumber terbuka, untuk menyimpan data sensor real-time dari sistem perangkat keras IoT, data cuaca historis



Gambar 3. Alur konseptual model pembelajaran inkremental yang kami usulkan.

Tabel 2

Daftar API dan penggunaannya dalam sistem yang kami usulkan.

Nama API	Tujuan
Buat pengguna	Daftarkan pengguna baru di aplikasi
Hasilkhan OTP	Hasilkhan OTP selama pendaftaran pengguna atau pembaruan kata sandi
Login	Mengotentikasi pengguna selama login
Lupa kata sandi	Perbarui kata sandi menggunakan email dan OTP yang diberikan
Dapatkan informasi pengguna	Ambil informasi pengguna yang masuk
Masukkan data cuaca	Memasukkan data sensor perangkat keras (suhu, kelembaban, dll.) ke dalam database
Dapatkan informasi cuaca terbaru	Ambil data cuaca terbaru untuk lokasi tertentu
Dapatkan data grafik garis cuaca	Mengambil sepuluh data sensor kecepatan angin terbaru untuk pembuatan grafik
Dapatkan cuaca data prediksi	Memberikan data cuaca yang diprediksi untuk tanggal tertentu

dan server berinteraksi menggunakan model komunikasi permintaan–respons.

Pola ini mengikuti pendekatan komunikasi sinkron, di mana klien (aplikasi seluler) mengirimkan permintaan ke server dan menunggu respons. Melalui server ini, pengguna dapat mengakses data cuaca secara real-time, menerima prediksi cuaca mendatang, membuat akun, masuk, mengatur ulang kata sandi, dan mengakses layanan terkait lainnya.

3.5. Visualisasi

Dalam penelitian kami, kami mengembangkan aplikasi seluler menggunakan Flutter untuk menyediakan data cuaca real-time kepada pengguna seperti suhu, kelembaban, intensitas cahaya, tekanan udara, kecepatan angin, dan status hujan, yang bersumber dari sistem IoT kami. Aplikasi ini menawarkan informasi cuaca real-time dan prediksi, disajikan dalam format tabel, dengan opsi visualisasi grafis. Opsi notifikasi peringatan pada sistem memberikan peringatan kepada pengguna ketika cuaca berubah tiba-tiba sehingga pengguna dapat memperoleh informasi darurat real-time dengan cepat dan mengambil keputusan yang diperlukan sesuai dengan situasi lingkungan saat ini.

Semua visual utama dari front-end ditambahkan di bagian implementasi.

4. Implementasi

Sistem ini terstruktur menjadi dua unit utama: penerima (server) dan pemancar (pengirim). Arsitektur keseluruhan sistem yang diusulkan

Sistem dan diagram rangkaian IoT masing-masing diilustrasikan pada Gambar 4 dan 5. Pada sisi pemancar, digunakan mikrokontroler Arduino Uno yang berisi beberapa pin masukan analog yang dapat dengan mudah dihubungkan ke berbagai sensor lingkungan. Sistem ini terdiri dari sensor suhu dan kelembapan DHT21, sensor tekanan barometrik BMP180 untuk membaca tekanan atmosfer, anemometer untuk memantau kecepatan angin, modul sensor hujan untuk membaca intensitas curah hujan, dan fotoresistor (LDR) dengan resistor untuk membaca intensitas cahaya sekitar. Semua sensor ini secara konstan mengumpulkan data cuaca langsung, yang kemudian ditransmisikan secara nirkabel menggunakan modul LoRa RA-02 yang terhubung ke Arduino.

Di sisi lain, sistem ini juga dilengkapi modul LoRa RA-02 lain yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Modul LoRa ini mengumpulkan data yang dikirim dan meneruskannya ke ESP32, yang kemudian memproses dan meneruskan data tersebut ke server lokal (localhost). Dengan kemampuan Wi-Fi bawaan ESP32, visualisasi dan penyimpanan data secara real-time dapat dilakukan tanpa bergantung pada layanan cloud eksternal atau koneksi internet. Desain ini akan menjaga sistem tetap beroperasi penuh di daerah terpencil atau pedesaan dengan infrastruktur terbatas dan menawarkan skalabilitas serta akurasi tinggi dalam pengumpulan dan pemrosesan informasi cuaca lokal.

4.1. Bahan yang digunakan

Dalam proyek kami, kami menggunakan berbagai sensor dan modul untuk memungkinkan pemantauan lingkungan yang tepat dan akurat. Arduino Uno dipilih karena kesederhanaan, fleksibilitas, dan kompatibilitasnya dengan beberapa sensor sebagai mikrokontroler utama dari simpul sensor. Untuk memantau parameter cuaca, kami menggunakan sensor DHT21 untuk pengukuran suhu dan kelembaban yang presisi dan BMP180 untuk pengukuran tekanan barometrik dengan akurasi tinggi. Sensor hujan FC-37 digunakan untuk mendeteksi hujan dengan keluaran analog dan digital untuk integrasi yang mudah. Anemometer digunakan untuk mendeteksi kecepatan angin secara akurat, yang krusial dalam memperoleh data cuaca lengkap. LDR digunakan untuk mendeteksi intensitas cahaya, yang resistansinya bervariasi sesuai dengan cahaya sekitar, sehingga cocok untuk memantau kondisi cahaya. Setiap komponen dipilih karena keandalannya, akurasinya, dan konsumsi dayanya yang rendah, yang mendukung tujuan sistem untuk pemantauan jangka panjang dan waktu nyata di dunia luar.

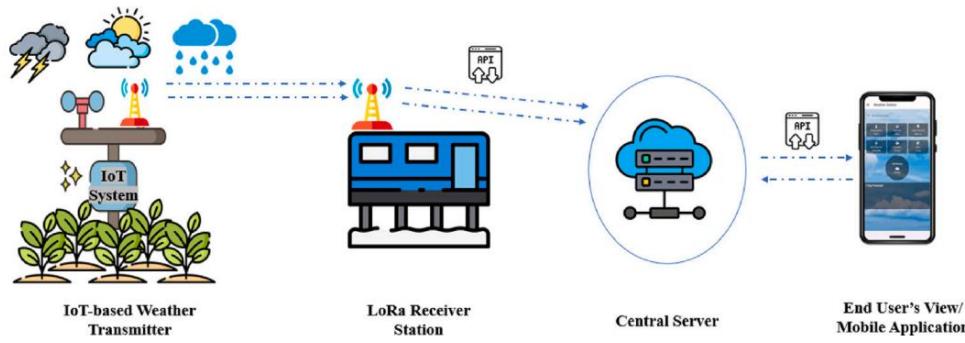
Dalam arsitektur sistem, kami menggunakan Arduino Uno dengan modul RA-02 LoRa di sisi transmisi dan ESP32 dengan modul RA-02 LoRa lainnya di sisi penerima. Arduino dipilih sebagai pemancar karena kemudahan antarmuka sensor dan konsumsi daya rendah dengan kinerja yang konsisten, sehingga paling cocok untuk akuisisi data jarak jauh. LoRa digunakan karena kemampuan komunikasi nirkabel berdaya rendah untuk jarak jauh dan mendukung transmisi data yang konsisten terlepas dari jangkauan seluler atau Wi-Fi, yang sangat penting untuk daerah pedesaan. Di sisi penerima, ESP32 dipilih karena menawarkan daya pemrosesan yang lebih besar dan kemampuan Wi-Fi terintegrasi, memungkinkan penerimaan data yang efisien dari modul LoRa dan komunikasi yang lancar ke server cloud atau antarmuka tampilan lokal. Pemisahan ini memungkinkan pendekatan yang hemat biaya, andal, dan skalabel untuk pemantauan lingkungan jarak jauh.

4.2. Implementasi perangkat keras

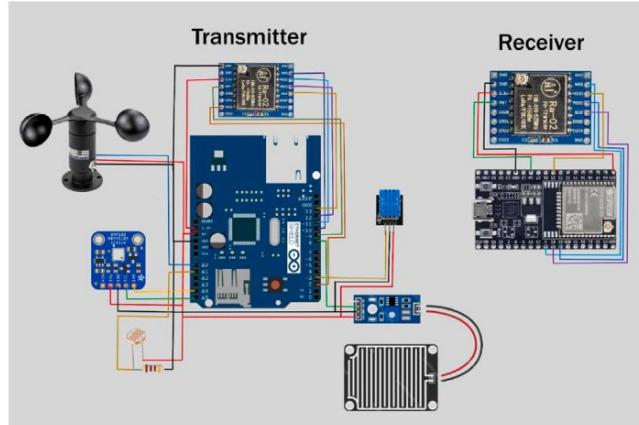
Pada Gambar 6, modul LoRa dan ESP digunakan, sensor dihubungkan ke Arduino, memungkinkan pengumpulan data lingkungan waktu nyata, yang kemudian dikirimkan dan disimpan untuk analisis selanjutnya.

4.3. Biaya perangkat keras

Bagian ini menjelaskan peralatan yang diperlukan dan total biaya satu stasiun. Pada Tabel 3, kami menghitung total biaya dalam BDT untuk perangkat keras dan pemeliharaan menurut sebuah toko bernama "Robotics Bangladesh"[40] dan menambahkan biaya yang setara dalam USD. Total biaya sekitar 8865 Taka dalam BDT dan 73,88 dolar dalam USD.



Gambar 4. Alur kerja operasional sistem pemantauan cuaca berbasis IoT yang diusulkan.



Gambar 5. Diagram rangkaian sistem pemantauan cuaca berbasis IoT yang diusulkan.

Tabel 3

Biaya perangkat keras untuk pengembangan sistem IoT.

Peralatan	Kuantitas	Biaya (BDT)	Biaya (USD)
Arduino Uno	1	1050	9.76
Kabel Pengunggah untuk Arduino	1	150	1.39
LoRa SX1278 (Pengirim)	1	875	8.13
LoRa SX1278 (Penerima)	1	875	8.13
ESP32	1	650	6.04
DHT21	1	550	5.11
Alat pengukur jurusan angin	1	2950	27.42
BMP-180	1	290	2.70
Sensor Hujan	1	145	1.35
LDR	1	30	0.28
Resistor (10k)	1	10	0,09
Perute	–	1000	Jam 9.30
Papan tanda memotong roti	2	90	0,84
Kabel Melompat	60	200	1.86
Total biaya	–	8865	73,88

4.4. Aplikasi seluler

Dalam karya ini, kami mengembangkan aplikasi seluler yang menyediakan informasi cuaca waktu nyata serta prediksi cuaca masa depan. Aplikasi ini dibangun menggunakan framework Flutter untuk front-end pengembangan, sementara back-end diimplementasikan menggunakan FastAPI untuk memastikan penanganan dan pemrosesan data yang efisien. Alur kerja kami dalam aplikasi seluler yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 7.

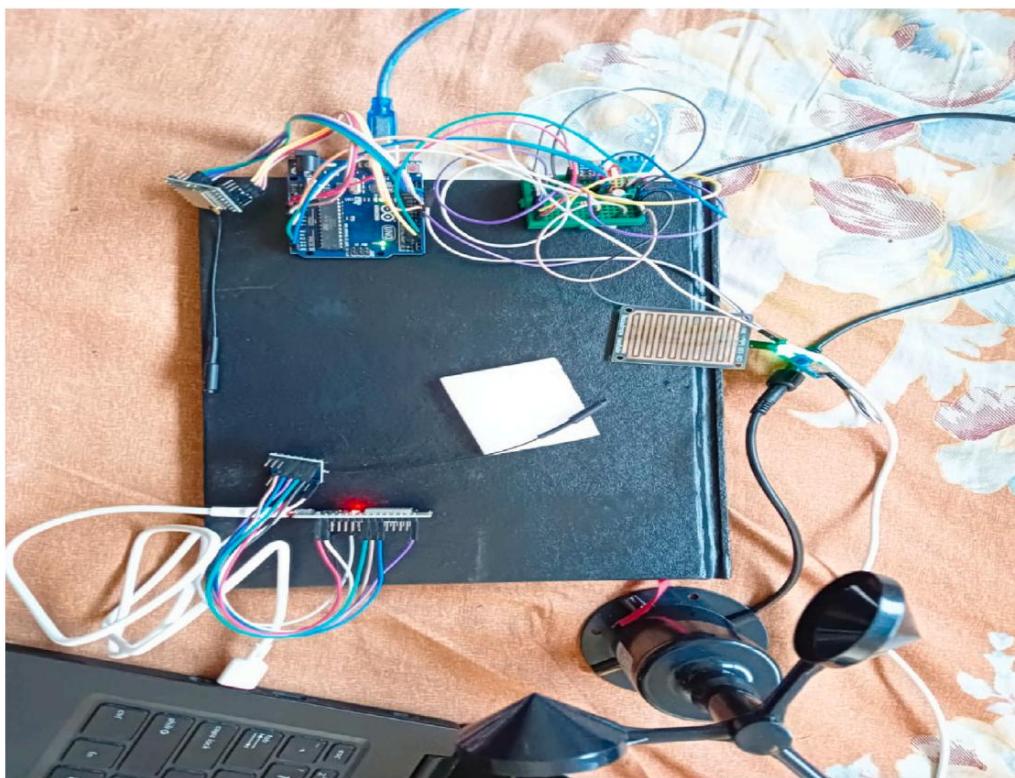
Layar pertama aplikasi seluler berbasis Flutter kami adalah Layar splash yang menampilkan logo. Layar splash membutuhkan waktu sekitar 1 detik; dalam waktu ini, aplikasi seluler mengambil izin GPS untuk ekstraksi lokasi. Setelah layar splash, pengguna diarahkan ke halaman pendaftaran. Misalkan pengguna baru dalam sistem. Dalam hal itu kasus, mereka harus mendaftar dengan memberikan informasi seperti nama, email,

kata sandi, dan peran atau jika pengguna sudah memiliki akun, mereka perlu untuk menekan tombol masuk, yang akan mengarahkan mereka ke halaman masuk. Selain itu, kami telah menggunakan validasi formulir dalam input pendaftaran bidang dan verifikasi email berbasis OTP untuk pendaftaran. Tanpa memenuhi validasi yang tepat, pengguna tidak dapat mendaftar dengan sukses. Setelah mengirimkan halaman pendaftaran, OTP akan dikirim ke email yang diberikan dari pengguna; pengguna harus memasukkan OTP yang tepat di kotak dialog aplikasi seluler. Jika OTP yang diberikan pengguna cocok, mereka dapat melanjutkan ke aktivitas aplikasi selanjutnya.

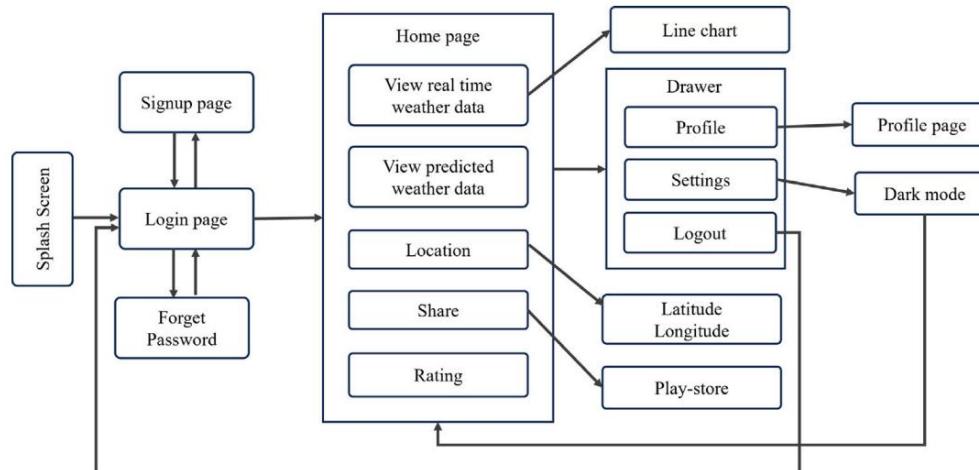
Alur verifikasi OTP ditunjukkan pada Gambar 8. Dari halaman Login, hanya pengguna terdaftar yang dapat masuk ke aplikasi seluler dengan memberikan nama pengguna dan kata sandi terdaftar mereka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Lainnya Fitur penting dari aplikasi seluler kami adalah pengaturan ulang kata sandi. Pengguna dapat mengatur ulang kata sandi mereka jika mereka lupa atau karena masalah keamanan lainnya hanya dengan memberikan email dan kata sandi baru, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Setelah memberikan informasi yang diperlukan, OTP akan dikirim ke email pengguna. Kemudian, pengguna harus memasukkan OTP yang benar di dialog. Jika OTP cocok dengan yang terkirim, kata sandi baru akan direset.

Setelah menyelesaikan proses registrasi dan login, pengguna akan diarahkan ke halaman Beranda aplikasi seluler kami, yang terlihat seperti Gambar 11. Pengguna dapat menemukan beberapa fitur di beranda, seperti pencarian stasiun cuaca, data cuaca waktu nyata dan ringkasan, grafik visualisasi data ditunjukkan pada Gambar 12, dan prakiraan cuaca berbasis ML. Selain itu, dari bilah navigasi bawah, pengguna mendapatkan fitur-fitur penting seperti pengambilan lokasi dengan mengklik ikon lokasi. Pengguna bisa mendapatkan grafik visual data cuaca dengan mengklik ikon seperti kecepatan angin, suhu, dll. Dari sistem perangkat keras IoT, kami menampilkan data cuaca yang akurat dan real-time di layar beranda kami, ditunjukkan pada Gambar 11. Enam kotak di halaman beranda menyediakan pembacaan cuaca waktu nyata seperti suhu, kelembaban, kecepatan angin, intensitas cahaya, tekanan udara, dan kondisi hujan. Di bagian ringkasan, pengguna dapat menemukan cuaca gambaran umum, baik cerah maupun hujan. Kami telah menetapkan syarat bahwa jika suhu diatas 30 menunjukkan cuaca cerah, jika hujan menunjukkan cuaca ringkasannya akan hujan. Dari tabel prakiraan cuaca, aplikasi seluler kami akan membantu pengguna untuk mengetahui informasi cuaca masa depan seperti rata-rata suhu, tekanan, dan kelembapan. Pengguna dapat mengatur tanggal, dan aplikasi akan memberikan ramalan cuaca tiga hari.

Fungsionalitas lain yang termasuk dalam sistem adalah real-time peringatan notifikasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13, 14, di dalam aplikasi seluler. Segera setelah parameter apa pun melebihi ambang batas yang ditetapkan, aplikasi akan mengirimkan peringatan notifikasi otomatis kepada pengguna. Fungsionalitas ini meningkatkan kesadaran pengguna dan memungkinkan mereka mengambil tindakan cepat terhadap suhu yang berlebihan, yang berkontribusi pada peningkatan keamanan dan pengambilan keputusan. Pengguna bisa mendapatkan lebih banyak opsi seperti mode gelap, edit profil, pengaturan, dan keluar dengan mengklik ikon laci di pojok kiri atas halaman beranda kami. Kode lengkap untuk proyek kami, termasuk frontend, backend, dan database, tersedia di <https://github.com/Software-Machine-Intelligence-Lab/Weather-Station>.



Gambar 6. Prototipe fungsional dari sistem yang diusulkan.



Gbr. 7. Alur kerja aplikasi seluler yang dikembangkan.

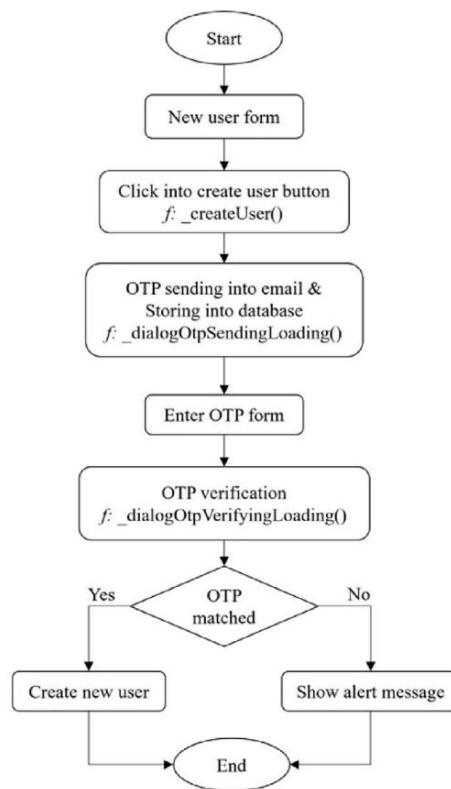
5. Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan evaluasi komprehensif sistem pemantauan dan prakiraan cuaca yang telah dikembangkan, merinci lingkungan implementasi dan hasil kinerjanya. Aplikasi seluler ini dibuat menggunakan Flutter dan Android Studio, didukung oleh pengaturan perangkat keras waktu nyata yang melibatkan Arduino dan berbagai sensor.

Untuk memastikan prakiraan cuaca yang akurat, beberapa model regresi pembelajaran mesin diuji dan dibandingkan menggunakan metrik kinerja standar. Hasilnya, beserta perbandingan visual antara nilai prediksi dan nilai aktual, dibahas secara mendalam untuk menyoroti efektivitas dan keandalan sistem.

5.1. Lingkungan simulasi

Untuk membuat aplikasi seluler untuk proyek penelitian ini, kami menggunakan Android Studio (versi 2024.1.2) dan Flutter Software Development Kit (SDK) 3.22 (versi saat ini: 3.24). Flutter SDK v3.22 memungkinkan aplikasi ini digunakan pada ponsel pintar yang menjalankan Android 5.0 (Lollipop) atau yang lebih baru. Komponen perangkat keras Arduino Uno, dengan penyimpanan 32 KB, digunakan untuk mengumpulkan data dari sensor dan mentransfernya ke API yang diberikan untuk diproses lebih lanjut. Kami membuat pengaturan perangkat keras dengan sensor-sensor penting yang terhubung ke Arduino untuk mengumpulkan data lingkungan secara real-time dan menyimpannya dalam basis data. menggunakan perisai Ethernet. Kami menggunakan API yang sesuai untuk menghubungkan basis data dan aplikasi seluler. Kami ingin memasang stasiun cuaca di seluruh Bangladesh untuk meningkatkan akurasi dan



Gbr. 8. Alur verifikasi OTP pada aplikasi seluler yang kami usulkan.

Lokalisasi. Pengguna cukup mendaftar dan masuk dengan informasi pendaftaran mereka di aplikasi, lalu mencari stasiun cuaca di wilayah mereka untuk mendapatkan informasi cuaca lokal yang akurat dan dapat diandalkan. Pengguna juga dapat melihat prakiraan cuaca berdasarkan data sebelumnya.

5.2. Indeks kinerja

Untuk mengevaluasi dan memilih algoritma pembelajaran terawasi terbaik bagi model prediksi cuaca khusus kami, kami menggunakan tiga metrik penting: Mean Squared Error (MSE), Mean Absolute Error (MAE), dan Root Mean Squared Error. Metrik-metrik ini memberikan evaluasi menyeluruh terhadap kinerja model, sehingga memungkinkan perbandingan efektivitas algoritma yang lebih presisi.

5.2.1. Kesalahan Akar Kuadrat Rata-Rata (RMSE)

RMSE menghitung besarnya rata-rata kesalahan antara nilai yang diharapkan dan nilai aktual. RMSE yang lebih rendah menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik dengan data [41]. Karena kesalahan dikuadratkan sebelum dirata-ratakan, kesalahan yang lebih besar memiliki pengaruh yang sangat tinggi, sehingga RMSE rentan terhadap outlier.

$$\text{Nilai RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (1)$$

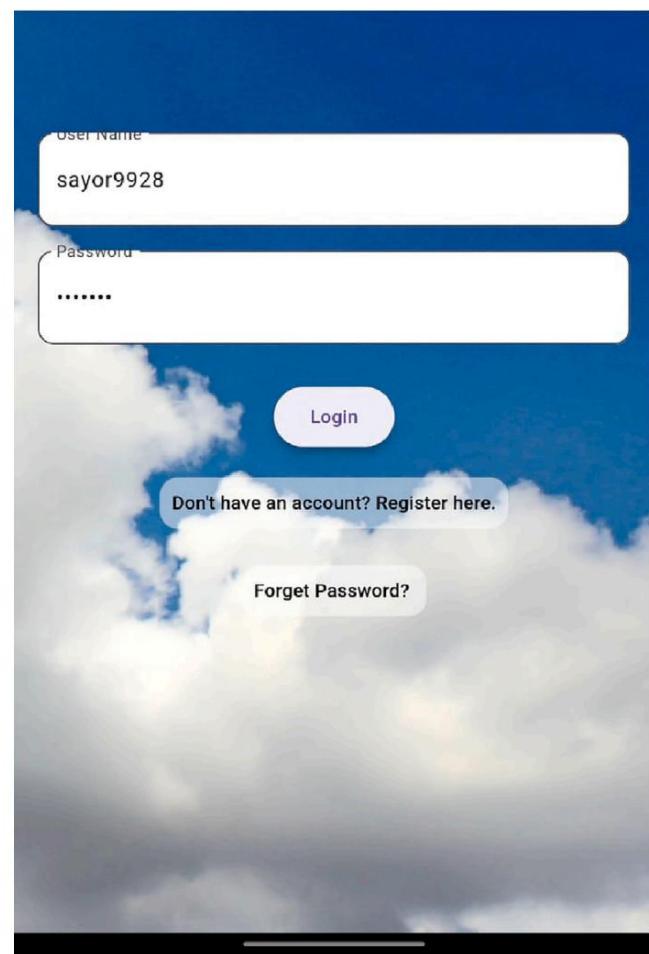
5.2.2. Kesalahan Kuadrat Rata-rata (MSE)

MSE mengukur rata-rata kuadrat kesalahan antara nilai prediksi dan nilai aktual. Seperti RMSE, MSE yang lebih rendah menunjukkan model yang lebih baik.

MSE berguna untuk memahami varians kesalahan prediksi [42].

Mengkuadratkan kesalahan membuat MSE sensitif terhadap kesalahan besar, tetapi tidak seperti RMSE, MSE tidak kembali ke skala data asli.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$



Gbr. 9. Halaman login.

5.2.3. Kesalahan Mutlak Rata-rata (MAE)

MAE mengukur besarnya rata-rata kesalahan secara langsung. MAE kurang sensitif terhadap outlier dibandingkan RMSE dan MSE karena tidak mengkuadratkan kesalahan. MAE memberikan skor linear, yang berarti semua perbedaan individu diberi bobot yang sama secara rata-rata [43].

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| \quad (3)$$

5.2.4. Koefisien determinasi (R^2), juga

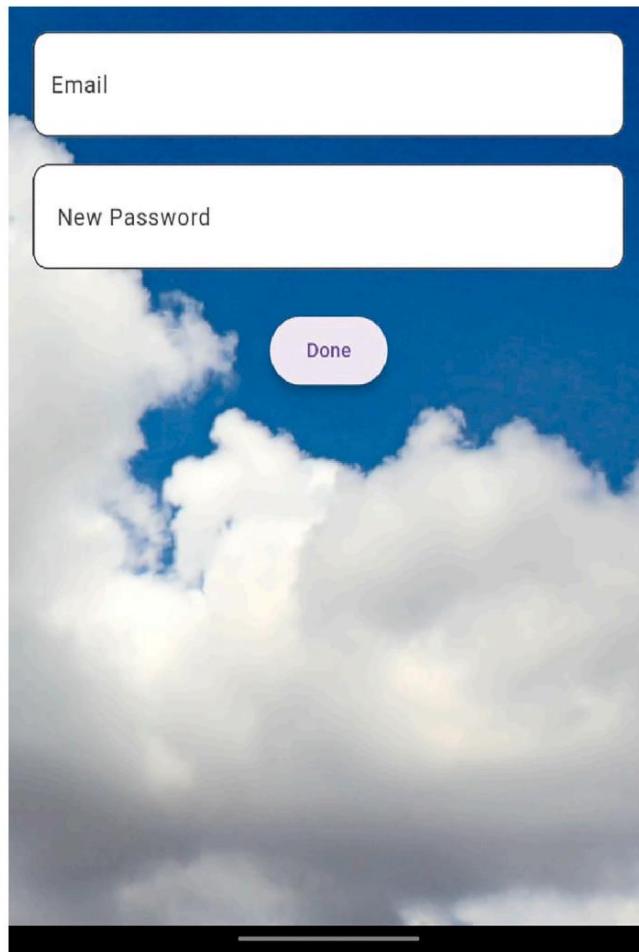
R^2 , dikenal sebagai koefisien determinasi, mengukur proporsi varians dalam variabel dependen yang dapat diprediksi dari variabel independen. Nilai ini menunjukkan kesesuaian model dan berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang mendekati 1 menunjukkan nilai 2 yang mengevaluasi yang lebih baik di masa mendatang. Tidak seberapa baik kesesuaian seperti metrik berbasis kesalahan, sampel R

$$\text{R}^2 = \frac{\text{kemungkinan}^2}{\text{besar dapat diprediksi oleh model}} \quad (4)$$

Di sini, \hat{y} mewakili nilai aktual, y nilai prediksi, dan \hat{y} nilai prediksi rata-rata dari nilai sebenarnya.

5.3. Kinerja model

Kami bertujuan untuk memprediksi nilai-nilai kontinu, seperti suhu, tingkat kelembapan, kecepatan angin, atau parameter cuaca numerik lainnya. Regresi sesuai jika keluarannya berupa kuantitas konstan, bukan kategori atau kelas. Tabel 4 menyajikan perbandingan empat regresi.



Gbr. 10. Halaman lupa kata sandi.

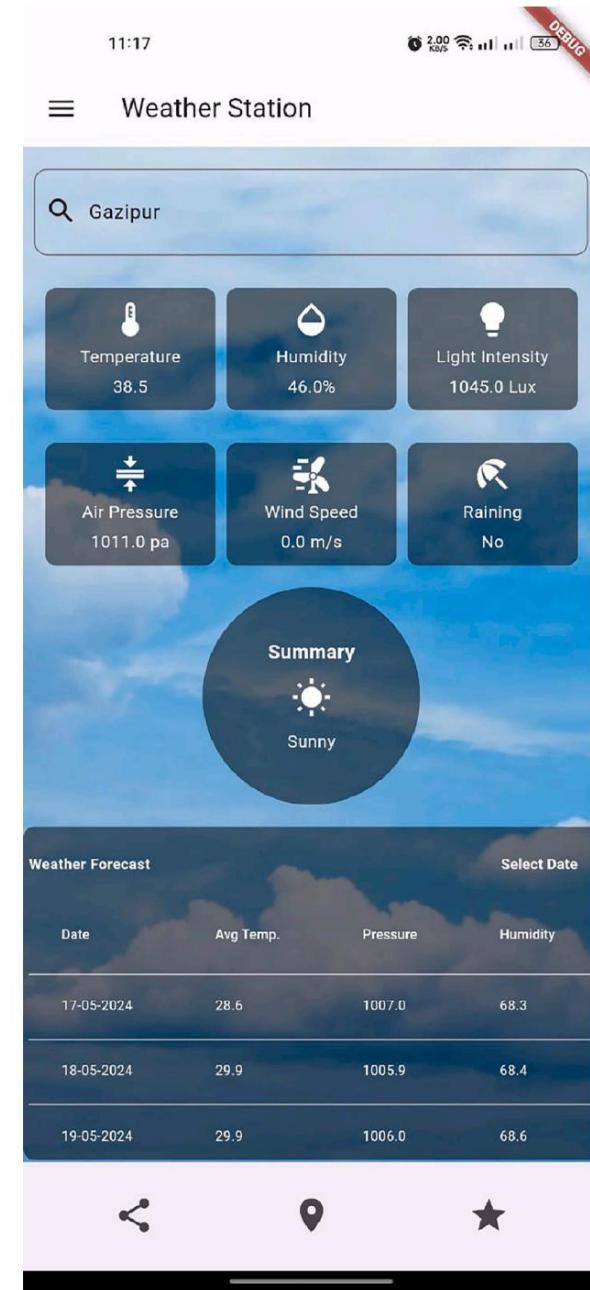
Tabel 4

Metrik kinerja untuk berbagai model regresi.

Model	MSE	MAE RMSE	R ² (Ketepatan)
Regresor Pohon Keputusan	33.63	jam 2.30	5.80 0,8655 (86,6%)
Regresor Tetangga	45,85	3.77	6.77 0,8166 (81,7%)
RandomForestRegressor	23.09	1.97	4.81 0,9076 (90,8%)
Regresi Linier	197.26	8.78	14.04 0,2109 (21,1%)

model berdasarkan metrik evaluasi kami. Regresor Hutan Acak muncul sebagai pemain terbaik, menunjukkan kesalahan terendah dengan RMSE sebesar 23.0911, MSE sebesar 1.9711, dan MAE sebesar 4.8053. Oleh karena itu, kami memilih Random Forest Regressor untuk sistem kami untuk memprediksi informasi cuaca.

Grafik yang ditunjukkan pada Gambar 15, 16, 17, 18 menggambarkan perbandingan antara nilai aktual dan prediksi dari beberapa parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, kecepatan angin, dan tekanan selama periode tertentu. periode yang dipilih yaitu Januari 2020. Garis biru mewakili aktual nilai yang tercatat, sedangkan garis putus-putus merah menunjukkan nilai yang diprediksinya oleh model yang kami latih secara khusus. Dengan mengamati garis-garisnya, Prediksinya mengikuti tren nilai aktual secara dekat, menunjukkan kemampuannya untuk menangkap pola dan fluktuasi secara keseluruhan. Meskipun terdapat beberapa perbedaan, nilai prediksi tetap relatif mendekati pengukuran sebenarnya. Grafik ini menunjukkan bahwa model berkinerja baik dalam memprediksi beberapa nilai parameter lingkungan. Namun, penyempurnaan model dapat meningkatkan akurasi, mengurangi perbedaan yang diamati dalam kasus tertentu.

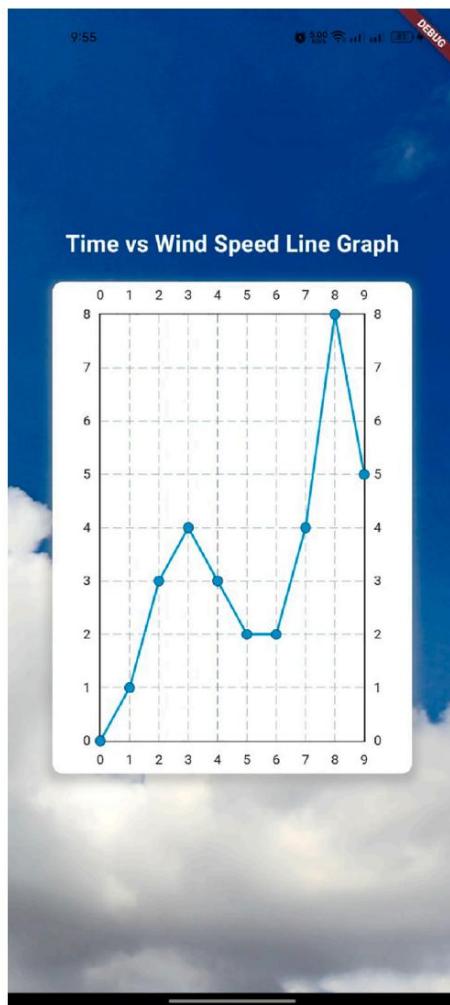


Gbr. 11. Beranda.

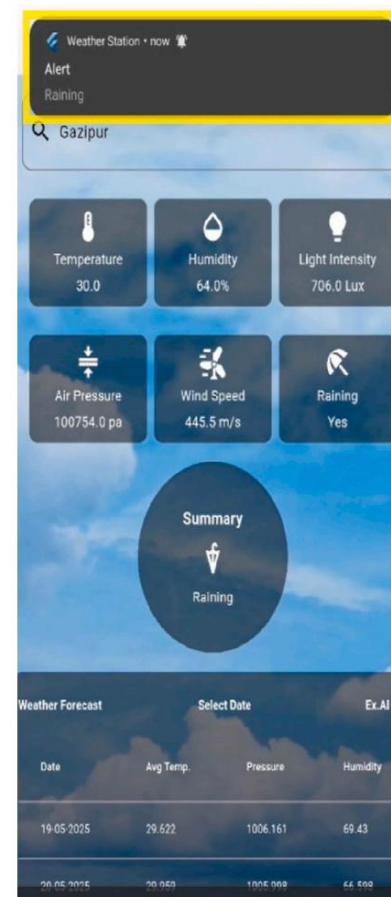
5.4. Analisis hasil parameter individu

Dalam proyek ini, kami mengembangkan aplikasi seluler berbasis Flutter dirancang untuk memantau dan memperkirakan data cuaca, yang bertujuan untuk meminimalkan tantangan yang bergantung pada cuaca. Aplikasi ini telah berhasil diuji beberapa kali, menunjukkan kemampuannya untuk secara efisien mengambil data real-time dari database cloud, yang bersumber dari perangkat keras khusus kami dihasilkan oleh model yang kami latih secara khusus. Pengaturan ini, yang secara akurat mengukur berbagai lingkungan parameter, hemat biaya dengan total biaya perangkat keras 8865 BDT, membuatnya praktis dan cocok untuk aplikasi dunia nyata.

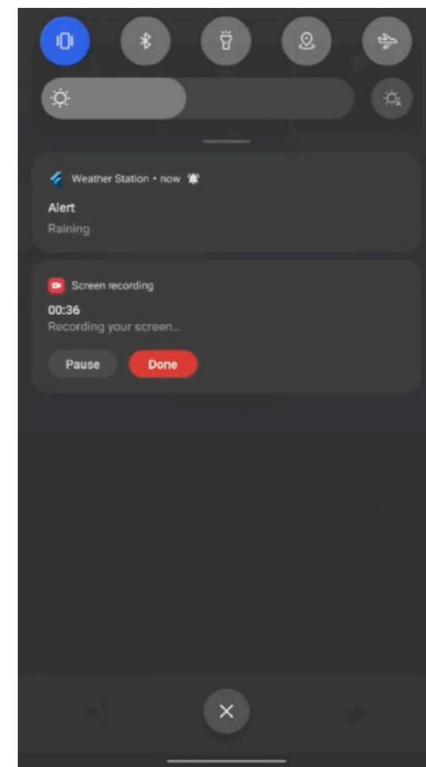
Aplikasi ini mengintegrasikan model pembelajaran mesin untuk memperkirakan parameter cuaca. Empat model regresi, yaitu Random Forest Regression, Decision Tree Regression, K-nearest neighbor Regression, dan regresi linier, dievaluasi. Regresi Hutan Acak mengungguli yang lain, mencapai Kesalahan Kuadrat Rata-rata (MSE) terendah:



Gbr. 12. Visualisasi data cuaca waktu nyata dalam aplikasi seluler.



Gbr. 13. Pemberitahuan peringatan.



Gbr. 14. Peringatan di bilah notifikasi.

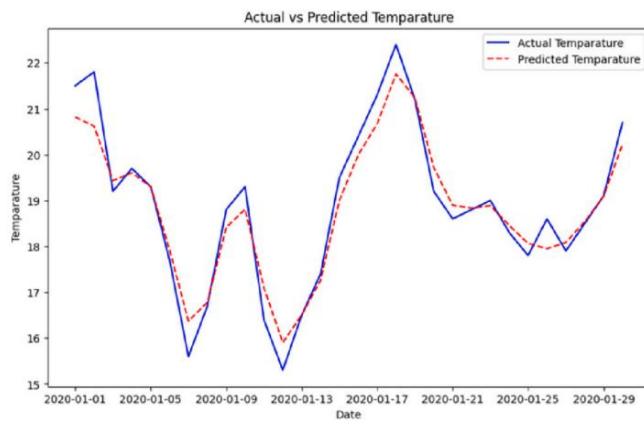
Tabel 5
Evaluasi kinerja prediksi parameter cuaca.

Parameter	MAE	RMSE	R ² skor
Suhu (°C)	0,56	0,74	0,91
Kelembaban (%)	1,24	1,60	0,88
Kecepatan angin (m/s)	0,72	0,95	0,87
Tekanan (HPa)	0,81	1,02	0,89

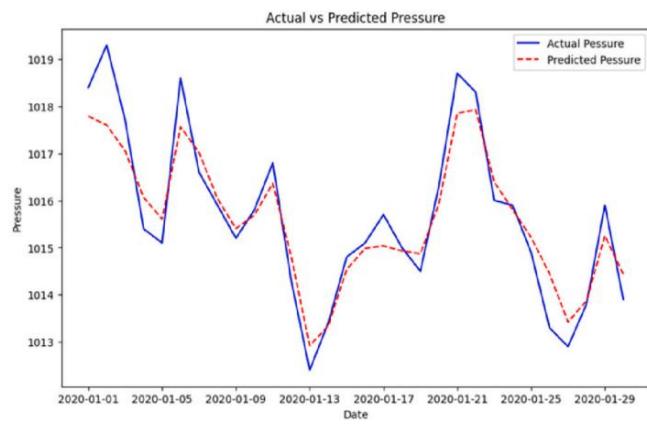
23.09), Kesalahan Mutlak Rata-rata (MAE: 1.97), dan Kesalahan Kuadrat Rata-rata (RMSE: 4,80), secara signifikan mengungguli model lain yang diuji. mengevaluasi akurasi prediksi untuk parameter cuaca individu, kami menilai model akhir menggunakan MAE, RMSE, dan R² skor. Sebagai disajikan pada Tabel 5, prediksi suhu mencapai nilai tertinggi akurasi dengan R² sebesar 0,91 dan MAE terendah sebesar 0,56 °C. Kelembaban, kecepatan angin, dan tekanan juga menunjukkan kinerja yang kuat dengan R² skor masing-masing sebesar 0,88, 0,87, dan 0,89. RMSE yang sesuai Nilai-nilai tersebut adalah 0,74 °C (suhu), 1,60% (kelembapan), 0,95 m/s (angin kecepatan), dan 1,02 HPa (tekanan), menunjukkan keandalan dan konsistensi prediksi di semua parameter. Hasil ini memvalidasi ketahanan dan efektivitas sistem peramalan terpadu.

5.5. Evaluasi kinerja prakiraan lokal

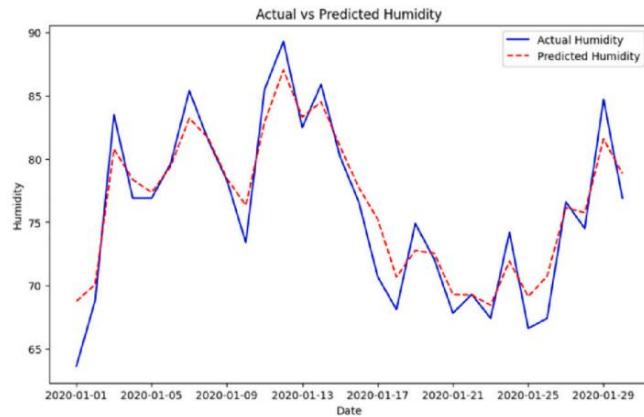
Gambar 19 menunjukkan perbandingan 24 jam pada tanggal 10 Juni 2025, yang menangkap variasi suhu per jam. Gambar ini menunjukkan kemampuan sistem kami untuk memantau kondisi lokal secara real-time



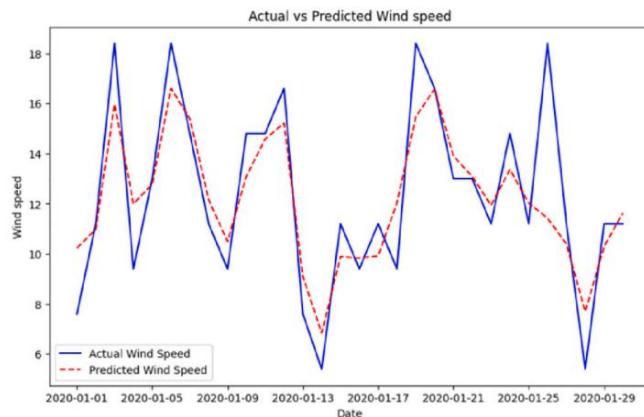
Gbr. 15. Suhu aktual vs. suhu yang diprediksi.



Gbr. 18. Tekanan aktual vs. Tekanan yang diprediksi.



Gbr. 16. Kelembaban Aktual vs. Kelembaban Prediksi.



Gbr. 17. Kecepatan angin aktual vs. prediksi.

hari dan menekankan keuntungan mengintegrasikan data IoT lokal dengan pembelajaran mesin untuk prakiraan. Analisis ini menggarisbawahi nilai penerapan jaringan sensor lokal yang dipadukan dengan model pembelajaran mesin yang disesuaikan untuk meningkatkan akurasi prakiraan secara signifikan, terutama di wilayah-wilayah di mana variasi iklim mikro dapat sangat berbeda dari prakiraan regional yang lebih luas.

Gambar 20 menampilkan perbandingan prakiraan suhu 7 hari dari 11–17 Juni 2025, untuk BDU Boys Hall, Kaliakoir, Gazipur. Gambar ini menunjukkan tiga seri data: "Prakiraan Model Kami" (garis biru putus-putus), "Data Sensor" (garis hijau), dan "Prakiraan Google" (garis oranye). Meskipun Google Prakiraan memberikan prakiraan umum untuk Kaliakoir, Gazipur

Di wilayah tanpa deviasi signifikan, "Data Sensor" mewakili pengukuran dari sensor lokal yang ditempatkan khusus di BDU Boys Hall, Kaliakoir, yang menawarkan pembacaan suhu lokal yang lebih presisi. "Prakiraan Model Kami" tampaknya melacak data sensor secara cermat, menunjukkan upaya untuk memberikan prediksi lokal.

5.6. Dampak model inkremental terhadap kinerja model

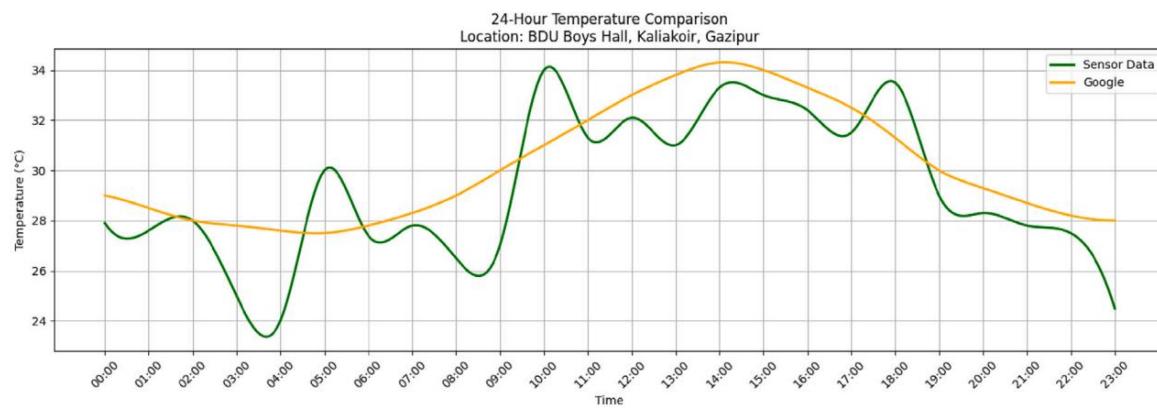
Karena kumpulan data cuaca seringkali berbayar, kami mengambil data cuaca historis kami dari platform Visual Crossing yang dapat diakses secara gratis. Untuk menjaga konsistensi dan kelayakan, kami mengumpulkan satu entri data per hari dari tahun 2000 hingga 2024, yang menghasilkan kumpulan data yang terus bertambah. Untuk mengevaluasi bagaimana volume data memengaruhi kinerja model, kami melatih dan menguji model pembelajaran mesin kami pada subset yang semakin besar dari kumpulan data ini. Hasilnya menunjukkan bahwa seiring bertambahnya jumlah data pelatihan, akurasi prediksi model meningkat. Secara spesifik, metrik seperti MSE, MAE, dan RMSE secara konsisten menurun dengan penambahan lebih banyak data historis, menunjukkan peningkatan kemampuan model untuk mengenali tren dasar dan pola musiman.

Gambar 21 menunjukkan bahwa seiring bertambahnya data pelatihan, performa model meningkat secara signifikan. Karena alasan inilah kami mengembangkan model prediksi cuaca dengan pendekatan pembelajaran inkremental. Desain ini memungkinkan model untuk beradaptasi dan terus berkembang seiring bertambahnya data yang tersedia, memastikan prediksinya semakin akurat dan andal. Strategi ini tidak hanya mengoptimalkan performa tetapi juga mendukung skalabilitas dan penerapan jangka panjang untuk penerapan di dunia nyata.

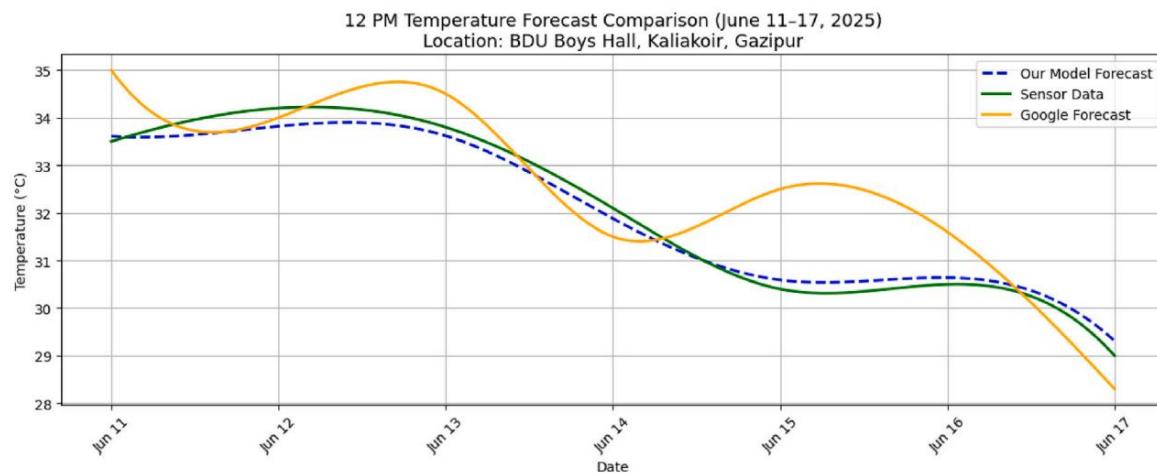
Beberapa studi sebelumnya telah mengeksplorasi peramalan cuaca menggunakan sistem terintegrasi IoT. Misalnya, dalam karya berjudul "Metode Peramalan Cuaca dari Data yang Ditransmisikan Sensor untuk Kota Cerdas Menggunakan IoT", Sreenivasulu Bolla et al. [44] melaporkan akurasi sekitar 85% berdasarkan kumpulan data yang berisi 7000 contoh. Demikian pula, Abhishek et al. [45] dalam studi mereka "Peramalan Cuaca menggunakan Algoritma Pembelajaran Mesin" mencapai akurasi sekitar 87% menggunakan pohon keputusan dan model regresi linier pada data yang dihasilkan sensor. Sebaliknya, sistem yang kami usulkan mencapai akurasi yang ditingkatkan lebih dari 90%, memanfaatkan kerangka kerja pembelajaran inkremental yang dikombinasikan dengan aliran data IoT waktu nyata dan kumpulan data yang terus berkembang. Peningkatan ini menunjukkan peningkatan kemampuan beradaptasi, skalabilitas, dan presisi sistem kami dalam kondisi lingkungan yang dinamis dan terus berkembang.

5.7. Evaluasi kemudahan penggunaan dan kemampuan pengambilan keputusan

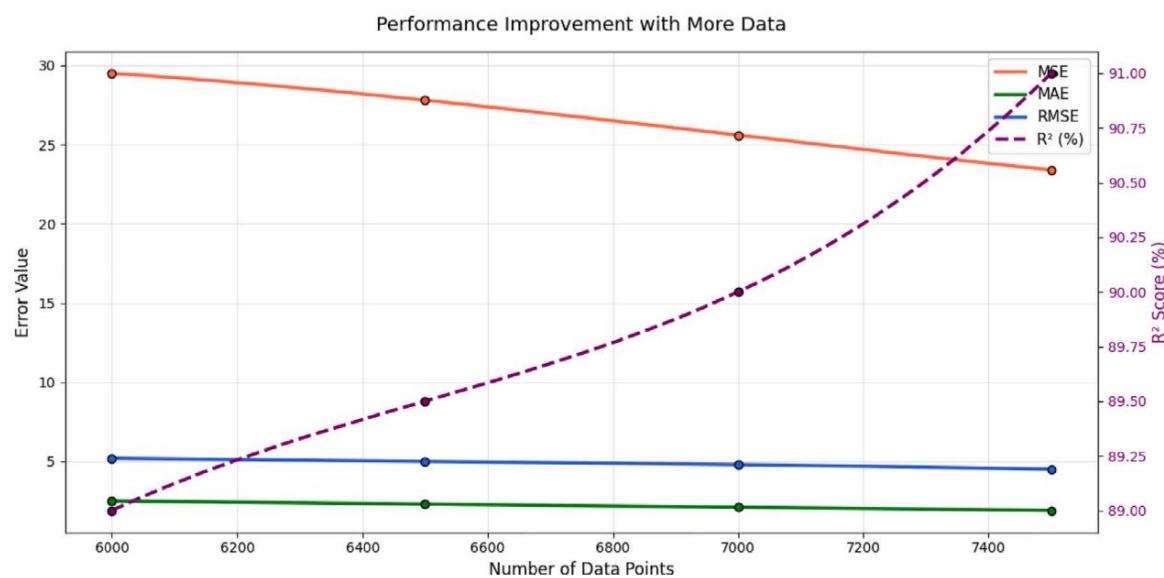
Sistem yang dikembangkan ini dirancang dengan fokus pada kemudahan penggunaan dan dukungan pengambilan keputusan yang praktis. Aplikasi seluler berbasis Flutter ini menawarkan pembaruan cuaca secara real-time dan spesifik lokasi melalui



Gbr. 19. Pelacakan cuaca per jam secara real-time pada 10 Juni 2025: Sensor Lokal vs. Google.



Gambar 20. Validasi prakiraan cuaca 7 hari menggunakan sensor lokal dan data prakiraan eksternal. (Untuk interpretasi referensi warna pada legenda gambar ini, pembaca dapat merujuk ke versi web artikel ini.)



Gbr. 21. Dampak data tambahan pada kinerja model.

antarmuka yang intuitif dan mudah diakses, mendukung fitur-fitur seperti mode gelap untuk meningkatkan kegunaan dan kenyamanan di berbagai kelompok pengguna. Notifikasi tepat waktu memperingatkan pengguna akan perubahan cuaca yang tiba-tiba, sehingga memungkinkan mereka untuk membuat keputusan yang cepat dan tepat — seperti merencanakan aktivitas luar ruangan atau menerapkan langkah-langkah keselamatan — berdasarkan data yang akurat prakiraan lokal.

Representasi grafis dan tabular tren cuaca semakin meningkatkan pemahaman, memungkinkan pengguna untuk dengan cepat menginterpretasikan data kompleks dan membuat keputusan dengan percaya diri. Sistem ini memiliki latensi yang sangat rendah, karena sepenuhnya dikembangkan sendiri, sehingga meminimalkan penundaan pemrosesan eksternal. Selain itu, dengan menggunakan komunikasi LoRa untuk transmisi data sensor, sistem ini memastikan latensi yang sangat rendah dan kinerja yang tangguh bahkan dalam jarak jauh tanpa bergantung pada infrastruktur internet konvensional. Hal ini menjadikan data real-time pengambilan keputusan yang sangat responsif, penting untuk pengambilan keputusan yang cepat dan sensitif terhadap lokasi.

Selain itu, aplikasi ini melayani sektor-sektor penting seperti pertanian dan manajemen bencana dengan menyediakan intelijen cuaca yang terukur, akurat, dan spesifik konteks, sehingga meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional. Model pembelajaran mesin yang terus belajar mempertahankan dan meningkatkan keandalan prediksi dari waktu ke waktu. Secara keseluruhan, sistem ini mengintegrasikan kegunaan, wawasan real-time dengan latensi rendah, dan intelijen yang dapat ditindaklanjuti secara mulus—memberdayakan individu maupun industri untuk membuat keputusan yang tepat waktu dan berdasarkan informasi yang memadai terkait cuaca.

6. Kesimpulan

Karya ini menyajikan pengembangan aplikasi seluler prakiraan cuaca waktu nyata yang secara efektif mengintegrasikan sensor IoT dan model pembelajaran mesin untuk menghasilkan prediksi cuaca yang akurat dan mudah diakses, dengan fokus awal pada Gazipur. Dengan menggabungkan komunikasi berbasis LoRa, sistem ini mengatasi salah satu keterbatasan utama jaringan IoT, yaitu ketergantungan internet, sekaligus memungkinkan transmisi data jarak jauh yang hemat energi.

Prototipe ini menunjukkan potensi penggabungan infrastruktur IoT dan kecerdasan berbasis data untuk memenuhi kebutuhan pemantauan cuaca lokal. Meskipun saat ini terbatas pada wilayah tertentu, sistem ini membangun fondasi yang skalabel dan adaptif yang dapat diperluas ke seluruh negeri. Dengan rencana untuk menyebarkan stasiun cuaca tambahan, meningkatkan data pelatihan ML, dan menggabungkan penyempurnaan yang berpusat pada pengguna, proyek kami diposisikan dengan baik untuk menjadi solusi yang andal, hemat biaya, dan diadopsi secara luas untuk prakiraan cuaca waktu nyata. Pada akhirnya, inovasi ini berkontribusi pada pengambilan keputusan berbasis data di berbagai sektor seperti pertanian, kesiapsiagaan bencana, dan kesadaran publik. Dengan menyempurnakan sistem dan memperluas kemampuannya, kami bertujuan untuk memastikan keberhasilan jangka panjang dan adopsi skala luas, yang pada akhirnya berkontribusi pada pengambilan keputusan berbasis data yang lebih baik dalam prakiraan cuaca.

7. Tantangan dan ruang lingkup masa depan

Meskipun sistem kami menunjukkan hasil yang signifikan, masih terdapat beberapa keterbatasan. Saat ini, penerapannya terbatas di Gazipur, yang membatasi keragaman geografis data pelatihan dan dapat memengaruhi generalisasi model di berbagai wilayah iklim. Selain itu, meskipun integrasi LoRa menggunakan modul Arduino dan ESP32 memungkinkan transmisi data jarak jauh berdaya rendah tanpa bergantung pada konektivitas internet berkelanjutan, menjadikannya ideal untuk daerah pedesaan atau daerah dengan infrastruktur terbatas, perluasan jaringan ke wilayah yang lebih luas menghadirkan tantangan logistik dan pemeliharaan.

Ke depannya, kami berencana untuk menggabungkan model pembelajaran mesin yang lebih canggih ke dalam kerangka pembelajaran inkremental kami guna meningkatkan akurasi dan ketahanan prediksi. Kami juga berencana untuk menyebarkan stasiun cuaca tambahan di berbagai lokasi di Bangladesh, yang memungkinkan pengumpulan dataset lokal yang lebih kaya. Hal ini akan memungkinkan model kami beradaptasi lebih presisi terhadap variasi iklim mikro, sehingga meningkatkan keandalan prakiraan. Lebih lanjut, dengan terus mengumpulkan data cuaca waktu nyata,

Dengan data ini, kami akan membangun kumpulan data yang semakin besar, yang akan memperkuat kemampuan prediktif sistem kami seiring waktu. Berdasarkan masukan pengguna, kami juga bermaksud untuk memperkenalkan fitur-fitur baru dalam aplikasi seluler guna meningkatkan pengalaman pengguna dan menyederhanakan akses ke ~~data~~ cuaca lokal.

Pernyataan kontribusi kepenulisan CRediT

Jul Jalal Al-Mamur Sayor: Penulisan – draf asli, Validasi, Perangkat Lunak, Sumber Daya, Administrasi Proyek, Metodologi, Investigasi, Analisis Formal. **Nishat Tasnim Shishir:** Penulisan – draf asli, Perangkat Lunak, Metodologi, Investigasi, Analisis Formal. **Bitta Boibhov Barmon:** Perangkat Lunak, Metodologi, Investigasi. **Sumon Ahmed:** Validasi, Kuras Data. **Md. Moshiur Rahman:** Penulisan – tinjauan & penyuntingan, Supervisi, Perangkat Lunak, Administrasi Proyek, Konseptualisasi

Deklarasi kepentingan yang bersaing

Para penulis menyatakan bahwa mereka tidak memiliki kepentingan finansial atau hubungan pribadi yang bersaing yang diketahui yang dapat memengaruhi pekerjaan yang dilaporkan dalam makalah ini.

Ketersediaan data

Kode lengkap untuk proyek kami, termasuk frontend, backend, dan database, tersedia di <https://github.com/Software-Machine-Intelligence-Lab/Weather-Station>.

Referensi

- [1] Agyekum Thomas Peprah, Antwi-Agyei Philip, Dougill Andrew J. Kontribusi informasi prakiraan cuaca terhadap sektor pertanian, air, dan energi di Afrika Timur dan Barat: Tinjauan sistematis. *Front Environ Sci* 2022;10:935696.
- [2] Doblas-Reyes F, Garcia Anice, Hansen James, Mariani Luigi, Nain Ajeeft, Ramesh Kumarakaran, Venkataraman R. Prakiraan cuaca dan iklim untuk pertanian. *Guid Agric Meteorol* Pr 2003;57.
- [3] Gayialis Sotiris P, Kechagias Evripidis P, Konstantopoulos Grigoris D. Sistem logistik kota untuk transportasi barang: Mengintegrasikan teknologi informasi dan penelitian operasional. *Oper Res* 2022;22(5):5953–82.
- [4] Steiner Sebastian, Hoberg Kai, Thonemann Ulrich W. Nilai informasi cuaca untuk operasi e-commerce. *Prod Oper Manage* 2017;26(10):1854–74.
- [5] Buluttan. Bagaimana cuaca memengaruhi produksi energi terbarukan. 2023, URL: <https://www.buluttan.com/blog/climate-change/how-weather-influences-renewable-energy-production>.
- [6] Naveen L, Mohan HS. Prediksi cuaca atmosfer menggunakan berbagai teknik pembelajaran mesin: Sebuah survei. Dalam: Konferensi internasional ke-3 tahun 2019 tentang metodologi dan komunikasi komputasi. ICCMC, IEEE; 2019, hlm. 422–8.
- [7] Guanche. Mengapa aplikasi cuaca gagal memprediksi ramalan cuaca secara akurat dan apa yang dapat dilakukan untuk mengatasinya. 2024.
- [8] Zhang Guodao, Navimipour Nima Jafari. Tinjauan komprehensif dan sistematis sistem manajemen medis berbasis IoT: Aplikasi, teknik, tren , dan isu terbuka. *Sustain Cities Soc* 2022;82:103914.
- [9] Sayor Jul Jalal Al-Mamur, Shishir Nishat Tasnim, Barmon Bitta Boibhov, Ahemed Sumon, Nurjahan, Whaiduzzaman Md. RoboServe: Desain dan implementasi agen robotik untuk menyajikan makanan di restoran. Dalam: Prosiding konferensi internasional ke-3 tentang kemajuan komputasi. 2024, hlm. 588–97.
- [10] Joseph Ferdinand Joe John. Sistem pemantauan cuaca berbasis IoT untuk analitik yang efektif. *Int J Eng Adv Technol* 2019;8(4):311–5.
- [11] Pasar sistem pemantauan cuaca. 2024, <https://dataintelo.com/report/weather-monitoring-system-market>. [Diakses 10 Juli 2025].
- [12] Laporan analisis ukuran pasar layanan prakiraan cuaca global, pangsa, dan tren – tinjauan industri dan prakiraan hingga 2032. 2025, <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-weather-forecasting-services-market>. [Diakses 10 Juli 2025].
- [13] Laporan analisis ukuran pasar, pangsa, dan tren layanan prakiraan cuaca global – tinjauan industri dan prakiraan hingga 2032. 2025, <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/weather-forecasting-services-global-market-report>. [Diakses 10 Juli 2025].
- [14] Niubol. Berapa biaya stasiun cuaca otomatis? 2022, Waktu: 16-07-2022 10:39:19, Popularitas: 2331. URL: <https://www.niubol.com/Product-knowledge/weather-station-cost.html>.

- [15] Yin Hui, Aryani Amir, Lambert Gavin, Wu Zhuochen, Nambiar Nakul, White Marcus, Salvador-Carulla Luis, Sadiq Shazia, Sojli Elvira, Boddy Jennifer, dkk . Memanfaatkan teknologi kecerdasan buatan untuk memetakan publikasi menuju tujuan pembangunan berkelanjutan. *Himpunan* 2025;100419.
- [16] Girija C, Grace Shires Andreanna, Harshalatha H, Pushpalatha HP. Sistem pemantauan cuaca berbasis internet of things (IoT). *Int J Eng Res Technol (IJERT)* 2018.
- [17] Kamble SB, Rao P Ramana P, Pingalkar Anurag S, Chayal Ganesh S. Sistem pemantauan cuaca berbasis IoT . *Int J Adv Res Innov Ideas Educ* 2017;3(2):2886–991.
- [18] Rao Bulipe Srinivas, Rao K Srinivasa, Ome N. Sistem pemantauan cuaca berbasis internet of things (IoT). *Int J Adv Res Comput Commun Eng* 2016;5(9):312–9.
- [19] Piciullo Luca, Abraham Minu Treesa, Drøsda Ida Norderhaug, Paulsen Erling Singstad. Perkiraan operasional stabilitas lereng berbasis IoT menggunakan kembaran digital. *Perangkat Lunak Model Lingkungan* 2025;183:106228.
- [20] Ben Bouallègue Zied, Clare Mariana CA, Magnusson Linus, Gascón Estibaliz, Maier-Gerber Michael, Janoušek Martin, Rodwell Mark, Pinault Florian, Drmansch Jesper S, Lang Simon TK, dkk. Meningkatnya prakiraan cuaca berbasis data: Penilaian statistik pertama prakiraan cuaca berbasis pembelajaran mesin dalam konteks operasional. *Bull Am Meteorol Soc* 2024;105(6):E864–83.
- [21] Gotmare Vaishnavi, Kolte Rajesh, Thengodkar Rutwik. Sistem pemantauan cuaca menggunakan Arduino UNO-1. *Int Eng J Res Dev (IEJRD)* 2021.
- [22] Nallakaruppan MK, Kumaran U Senthil. Teknik pembelajaran mesin berbasis IoT untuk analisis prediktif iklim. *Int J Recent Technol Eng (IJRTE)* 2019;5:171–5.
- [23] Alam Md Jahirul, Rafi Shoyeb Ahammad, Badhan Ali Adnan, Islam Md Najmul, Shuvo Saiful Islam, Saleque Ahmed Mortuza. Stasiun cuaca berbasis IoT berbiaya rendah untuk pemantauan waktu nyata. Dalam: Konferensi internasional ke-2 IEEE 2020 tentang sirkuit dan sistem. *ICCS, IEEE*; 2020, hlm. 127–33.
- [24] Verma Gaurav, Mittal Pranjul, Farheen Shaista. Sistem prediksi cuaca waktu nyata menggunakan IoT dan pembelajaran mesin. Dalam: Konferensi internasional ke-6 tentang pemrosesan sinyal dan komunikasi tahun 2020. *ICSC, IEEE*; 2020, hlm. 322–4.
- [25] Kapoor Palak, Barbhuuya Ferdous Ahmed. Stasiun cuaca berbasis awan menggunakan perangkat IoT. Dalam: Konferensi IEEE wilayah 10 TENCON 2019-2019. *TENCON, IEEE*; 2019, hlm. 2357–62.
- [26] Math Rajinder Kumar M, Dharwadkar Nagaraj V. Stasiun cuaca berbiaya rendah berbasis IoT dan sistem pemantauan untuk pertanian presisi di India. Dalam: Konferensi internasional ke-2 tahun 2018 tentang I-SMAC (IoT di bidang sosial, seluler, analitik, dan cloud) (I-SMAC) I-SMAC (IoT di bidang sosial, seluler, analitik, dan cloud) (I-SMAC), konferensi internasional ke-2 tahun 2018 tentang. *IEEE*; 2018, hlm. 81–6.
- [27] Bonilla J, Carballo JA, Abad-Alcaraz V, Castilla M, Álvarez JD, Fernández- Reche J. Arsitektur perangkat lunak stasiun cuaca real-time dan modular berdasarkan layanan mikro. *Perangkat Lunak Model Lingkungan* 2025;106337.
- [28] Fowdur Tulsi Pawan, Ibn Rosun Mohammad Nassir-Ud-Diin, dkk. Sistem prakiraan cuaca kolaboratif berbasis pembelajaran mesin waktu nyata dengan beberapa lokasi prediktor. *Array* 2022;14:100153.
- [29] Kodali Ravi Kishore, Sahu Archana. Prototipe informasi cuaca berbasis IoT menggunakan WeMos. Dalam: Konferensi internasional ke-2 tentang komputasi dan informatika kontemporer tahun 2016. *IC3I, IEEE*; 2016, hlm. 612–6.
- [30] Krishna A, dkk. Sistem pemantauan cuaca berbasis IoT dan ANN. *J IoT Syst* 2023;7(2):145–52.
- [31] Perakis T, dkk. Kemajuan dalam sistem pemantauan cuaca skala besar menggunakan algoritma IoT dan ML. *IEEE Trans IoT* 2024;9(1):35–45.
- [32] Satyanarayana KNV, Reddy SRN, Varma KNV Suresh, Raju P Kanaka. Stasiun cuaca pintar berbasis aplikasi seluler & IoT. *Int J Electron Commun Instrum Eng Res Dev (IJECIERD)* 2017;7(4):1–8.
- [33] Singh S, dkk. Peramalan cuaca menggunakan IoT dan teknik pembelajaran mesin. *Jurnal Adv Komputer Int* 2022;11(3):120–9.
- [34] Meshram Kundan, Mishra Umank, Rathnayake Upaka, dkk. Penerapan kecerdasan buatan dalam teknologi pertanian, konservasi lingkungan dan keanekaragaman hayati. *Susunan* 2025;100412.
- [35] Visual Crossing. Data Cuaca & API: Prakiraan Global & Data Sejarah. URL: <https://www.visualcrossing.com/>.
- [36] Bolikulov Furkat, Nasimov Rashid, Rashidov Akbar, Akhmedov Farkhad, Young- Im Cho. Metode pengkodean data kategorikal yang efektif untuk algoritma kecerdasan buatan. *Matematika* 2024;12(16):2553.
- [37] Barjatya Pratik. Memanfaatkan kekuatan hutan acak: Mengapa ia mengungguli pohon keputusan dan aturan pakar. Medium 2024. URL: <https://pratikbarjatya.medium.com/>.
- [38] DataCamp. Apa itu pembelajaran inkremental? Blog DataCamp 2023. URL: <https://www.datacamp.com/blog/what-is-incremental-learning> .
- [39] Trikhatri Silash. Laporan proyek tentang pembuatan back-end untuk situs bisnis online menggunakan fastAPI (tesis Ph.D.), UNIVERSITAS SRM; 2022.
- [40] RoboticsBD Bangladesh. Toko RoboticsBD. 2024, URL: <https://store.roboticsbd.com/>.
- [41] Jim Frost. Root Mean Square Error (RMSE). Statistik Oleh Jim. URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/root-mean-square-error-rmse/>.
- [42] Gupta Hoshin V, Kling Harald, Yilmaz Koray K, Martinez Guillermo F. Dekomposisi kesalahan kuadrat rata-rata dan kriteria kinerja NSE: Implikasi untuk meningkatkan pemodelan hidrologi. *J Hydrol* 2009;377(1–2):80–91.
- [43] EUMeTrain. Verifikasi Variabel Kontinu. URL: https://resources.eumetrain.org/data/4/451/english/msg/ver_cont_var/uos3/uos3_ko1.htm .
- [44] Bolla Sreenivasulu, Anandan R, Thanappan Subash. Metode peramalan cuaca dari data transmisi sensor untuk kota pintar menggunakan IoT. *Comput Intell Neurosci* 2022;2022:1–11. <http://dx.doi.org/10.1155/2022/5952801>.
- [45] Abhishek R, Soni A, Mishra R. Peramalan cuaca menggunakan algoritma pembelajaran mesin. *Int J Eng Res Technol (IJERT)* 2021;10(5):1–5, URL: <https://www.ijert.org/weather-forecasting-using-machine-learning-algorithms> .