

EVELLY

PROPOSAL
Miniatur Stasiun Cuaca Berbasis IoT

SMK NEGERI 1 JAKARTA

Lembar Orisinalitas

Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terletak di wilayah tropis dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap berbagai bencana hidrometeorologi, seperti banjir, tanah longsor, dan angin puting beliung. Perubahan iklim global dan variabilitas cuaca yang semakin ekstrem menuntut peningkatan kapasitas pemantauan serta prediksi kondisi atmosfer secara lebih cepat dan akurat. Saat ini, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) telah menyiarkan data cuaca harian melalui jaringan stasiun cuaca resmi. Namun, distribusi stasiun tersebut masih terbatas dan biaya operasionalnya relatif besar, sehingga sulit diakses oleh masyarakat lokal di daerah-daerah terpencil.

Seiring kemajuan teknologi *Internet of Things* (IoT), kini memungkinkan pembangunan “miniatur stasiun cuaca” dengan biaya dan ukuran yang jauh lebih kecil, namun mampu menangkap parameter meteorologi penting seperti suhu, kelembaban, dan tekanan udara secara *real time*. Penggunaan mikrokontroler berbasis Arduino atau Raspberry Pi, dipadu dengan modul WiFi (ESP8266/ESP32), menjadikan sistem ini mudah dipasang, dijalankan mandiri dengan sumber daya baterai, serta terkoneksi ke platform web atau aplikasi mobile untuk pemantauan jarak jauh. Display LCD/LED juga dapat diintegrasikan agar data cuaca dapat langsung dibaca di lapangan.

Meskipun sensor-sensor murah seperti DHT11/DHT22 dan BMP180/BME280 secara teori memiliki akurasi yang memadai, perlu dilakukan penelitian komparatif terhadap data referensi BMKG. Validasi ini penting untuk memastikan keandalan sistem dalam mendeteksi perubahan kondisi cuaca ekstrem. Selain itu, integrasi fitur peringatan dini ke dalam aplikasi berbasis Node.js/React.js akan menambah nilai guna alat ini, terutama bagi masyarakat di daerah rawan bencana yang membutuhkan informasi cepat untuk mengambil tindakan mitigasi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan (1) mengukur akurasi sensor cuaca murah dalam miniatur stasiun berbasis IoT dengan membandingkannya terhadap data BMKG, dan (2) menganalisis efektivitas sistem peringatan dini IoT dalam meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat di daerah rawan meteorologi. Hasil diharapkan dapat memberikan alternatif solusi berbiaya rendah untuk pemantauan cuaca dan mitigasi bencana, sesuai dengan subtema “Meteorological Prediction & Early Warning.”

Rumusan Masalah

1. Seberapa akurat sensor DHT11/DHT22 dan BMP180/BME280 dalam mengukur parameter suhu, kelembaban, dan tekanan udara dibandingkan dengan data resmi BMKG?
2. Bagaimana variasi keandalan pengukuran miniatur stasiun cuaca berbasis IoT pada kondisi cuaca normal versus cuaca ekstrem?
3. Sejauh mana sistem peringatan dini berbasis IoT mampu mendeteksi perubahan cuaca ekstrem secara *real-time* dan mengirim notifikasi yang tepat waktu ke pengguna?
4. Apa saja kendala teknis (misalnya kestabilan koneksi, daya tahan baterai, ketepatan kalibrasi sensor) dan kendala non-teknis (misalnya lingkungan pemasangan, tingkat pemahaman pengguna) dalam implementasi alat di lapangan, khususnya di daerah terpencil?
5. Bagaimana tingkat pemanfaatan dan persepsi pengguna (masyarakat atau instansi terkait) terhadap data cuaca dan peringatan dini yang disajikan melalui aplikasi *web/mobile* yang terintegrasi dengan miniatur stasiun cuaca IoT?

Teori

1. *Internet of Things* (IoT)

Definisi & Konsep

Internet of Things (IoT) adalah paradigma di mana objek fisik dilengkapi dengan sensor, aktuator, dan kemampuan komunikasi sehingga dapat saling terhubung dan bertukar data melalui jaringan internet. Pada sistem stasiun cuaca IoT, perangkat mampu mengukur parameter meteorologi, mengirim data *real-time* ke cloud, serta menyediakan antarmuka monitoring jarak jauh.

Komponen Utama IoT

- Perangkat Edge (Edge Device): Mikrokontroler atau *single-board computer* (Arduino/Raspberry Pi) yang mengumpulkan data.
- Jaringan & Protokol: Modul WiFi (ESP8266/ESP32) menggunakan protokol MQTT/HTTP untuk transmisi data.
- Platform Cloud & Aplikasi: Server backend (Python) dan dashboard frontend (Node.js/React.js) untuk penyimpanan, analisis, dan visualisasi data.

2. Mikrokontroler & *Single-Board Computer*

Arduino

- Berbasis mikrokontroler AVR; diprogram dengan bahasa C++ menggunakan Arduino IDE.
- Kelebihan: konsumsi daya rendah, latency kecil, harga murah.

Raspberry Pi

- *Single-board computer* berbasis ARM; menjalankan sistem operasi Linux.
- Kelebihan: kemampuan komputasi lebih tinggi, mendukung Python dan pustaka analisis data.

Pemilihan antara Arduino dan Raspberry Pi disesuaikan kebutuhan: Arduino unggul pada pembacaan sensor simpel dan konsumsi daya rendah, sedangkan Raspberry Pi lebih cocok untuk pemrosesan data berat dan integrasi langsung dengan database.

3. Sensor Cuaca Murah

Sensor Suhu & Kelembaban (DHT11/DHT22)

- DHT11: Akurasi suhu ± 2 °C, kelembaban ± 5 %RH; kecepatan sampling 1 Hz.
- DHT22: Lebih presisi (± 0.5 °C, $\pm 2-5$ %RH) dan rentang pengukuran lebih luas.

Sensor Tekanan Udara (BMP180/BME280)

- BMP180: Mengukur tekanan udara dengan akurasi ~ 1 hPa; rentang 300–1100 hPa.
- BME280: Selain tekanan, juga mengukur suhu dan kelembaban, dengan akurasi lebih tinggi.

Kalibrasi dan validasi sensor–sensor ini penting untuk menjamin bahwa hasil pembacaan mendekati standar referensi (BMKG).

4. Komunikasi Data IoT

ESP8266 & ESP32

- Modul WiFi populer untuk proyek IoT:
 - ESP8266: Compact, murah, mendukung WiFi 2.4 GHz, cocok untuk aplikasi ringan.
 - ESP32: Menambahkan *Bluetooth Low Energy* dan lebih banyak GPIO, cocok untuk aplikasi yang memerlukan *multiple interface*.

Protokol dan Keamanan

- MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*): Ringan, *publish/subscribe*, ideal untuk pengiriman data berkelompok.

- HTTP/REST: Mudah diimplementasikan, cocok untuk dashboard berbasis web.
- Keamanan: Implementasi TLS/SSL dan autentikasi token untuk mencegah akses tidak sah.

5. Prediksi Meteorologi Prinsip Dasar

- Prediksi cuaca berbasis statistik dan model dinamis (*Numerical Weather Prediction*), mengasimilasi data observasi untuk memproyeksikan kondisi atmosfer ke depan.
- Data lokal dari sensor IoT dapat memperkaya resolusi spasial, membantu mengidentifikasi mikroklima dan anomali cuaca ekstrem.

Penerapan pada Miniatur Stasiun Cuaca

- Pengolahan data historis sederhana (*moving average*, tren) untuk memberikan estimasi perubahan suhu, kelembaban, atau tekanan dalam periode mendatang.
- Kombinasi data lokal dan data BMKG meningkatkan akurasi model prediksi berskala mikro.

6. Sistem Peringatan Dini

Konsep

Sistem peringatan dini (*early warning system*) bertujuan memberikan notifikasi cepat saat parameter cuaca melewati ambang batas kritis, sehingga pengguna dapat mengambil langkah mitigasi.

Komponen

1. Deteksi: Sensor memantau parameter dan mengirim data ke server.
2. Analisis Ambang Batas: *Backend* memeriksa apakah nilai melewati titik kritis (misal tekanan turun drastis).
3. Notifikasi: *Push notification* melalui aplikasi mobile atau email/SMS.

Kecepatan dan keandalan transmisi data sangat krusial untuk efektivitas peringatan dini.

7. Pemrosesan Data & Dashboard

Backend (Python)

- Menggunakan *framework* seperti Flask atau Django untuk API.
- Pustaka *pandas* dan *NumPy* untuk pembersihan dan analisis data.
- Penyimpanan: basis data relasional (MySQL/PostgreSQL) atau *Time Series Database* (InfluxDB).

Frontend (Node.js/React.js)

- *Real-time* charting (misal menggunakan *Recharts* atau *Chart.js*) untuk visualisasi suhu, kelembaban, tekanan.
- Komponen UI untuk konfigurasi ambang batas peringatan dan histori data.

8. Validasi & Kalibrasi Sensor Metode Kalibrasi

- Kalibrasi Box: Menempatkan sensor IoT bersama sensor referensi BMKG dalam periode tertentu, lalu menghitung fungsi koreksi (offset/scale).
- Metode Statistik: Regresi linier sederhana untuk mengoreksi bias sistematis.

Evaluasi Akurasi

- Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE) dihitung untuk setiap parameter dibandingkan data BMKG.
- Hasil evaluasi menentukan apakah sistem siap digunakan untuk prediksi dan peringatan dini.

Tujuan

1. Tujuan Umum

Mengevaluasi dan mengembangkan sebuah miniatur stasiun cuaca berbasis IoT yang handal untuk prediksi meteorologi dan sistem peringatan dini, sehingga dapat memperkaya data lokal dan meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat terhadap bencana hidrometeorologi.

2. Tujuan Khusus

1. Mengukur dan menganalisis akurasi sensor DHT11/DHT22 (suhu & kelembaban) serta BMP180/BME280 (tekanan udara) pada *prototype* miniatur stasiun cuaca dengan menggunakan data referensi resmi BMKG sebagai pembanding.
2. Membandingkan keandalan pembacaan sensor pada kondisi cuaca normal versus cuaca ekstrem, guna mengetahui batas kinerja sistem.
3. Merancang dan mengimplementasikan mekanisme peringatan dini berbasis IoT termasuk ambang batas kritis dan notifikasi *real-time* serta menguji responsivitas dan ketepatan waktunya.
4. Mengidentifikasi kendala teknis (misalnya stabilitas koneksi WiFi, daya tahan baterai, presisi kalibrasi) dan kendala non-teknis (lingkungan pemasangan, tingkat pemahaman pengguna) yang muncul saat instalasi dan operasional alat di lapangan.
5. Menilai tingkat pemanfaatan, kepuasan, dan persepsi pengguna (masyarakat atau instansi lokal) terhadap data cuaca dan notifikasi peringatan dini yang disajikan melalui aplikasi *web/mobile* terintegrasi.
6. Memberikan rekomendasi perbaikan desain dan prosedur kalibrasi untuk optimalisasi akurasi dan keandalan sistem sebagai basis pengembangan stasiun cuaca IoT selanjutnya.

Teknik dan Proses Pengumpulan Data

A. Teknik Pengumpulan Data

1. Observasi Otomatis melalui Sensor IoT
 - o Parameter: suhu (°C), kelembaban (%RH), tekanan udara (hPa).
 - o Alat: DHT11/DHT22 untuk suhu & kelembaban, BMP180/BME280 untuk tekanan.
 - o Frekuensi Pengambilan: data direkam tiap 10 menit (*sampling period* = 10 menit) secara otomatis oleh mikrokontroler.
 - o Transmisi: modul ESP8266/ESP32 mengirim payload JSON berisi nilai sensor ke broker MQTT atau *endpoint* REST API di server backend.
 - o Pencatatan: server Python menyimpan timestamp dan nilai parameter ke dalam basis data *Time Series* (InfluxDB) atau tabel khusus di MySQL/PostgreSQL.
2. Data Sekunder dari BMKG
 - o Jenis Data: data cuaca historis (suhu, kelembaban, tekanan) yang diukur oleh stasiun BMKG terdekat.
 - o Periode: rentang waktu yang sama dengan durasi pengujian lapangan (misal: 1 bulan).
 - o Sumber & Format: unduhan file CSV atau JSON via portal data BMKG (<https://data.bmkg.go.id>) atau permintaan resmi.
 - o Pengolahan Awal: ekstraksi dan konversi timestamp agar sesuai zona waktu Asia/Jakarta, serta penyusunan dalam format tabel untuk dibandingkan dengan data IoT.
3. Wawancara dan Kuesioner Pengguna
 - o Responden: 10–15 orang pengguna akhir (operator alat, petugas BPBD lokal, dan beberapa warga di lokasi uji).
 - o Tujuan: menilai persepsi terhadap kemudahan penggunaan aplikasi, ketepatan notifikasi peringatan dini, dan tingkat kepercayaan pada data.
 - o Instrumen: daftar pertanyaan tertutup (skala Likert 1–5) dan pertanyaan terbuka untuk masukan kualitatif.
4. Dokumentasi Lapangan
 - o Foto & Catatan: dokumentasi lokasi pemasangan (misal: atap rumah, tiang pengukuran), kondisi lingkungan sekitar (terbuka, teduh, dekat sumber panas), dan kejadian khusus (hujan lebat, angin kencang) yang mungkin memengaruhi pembacaan sensor.

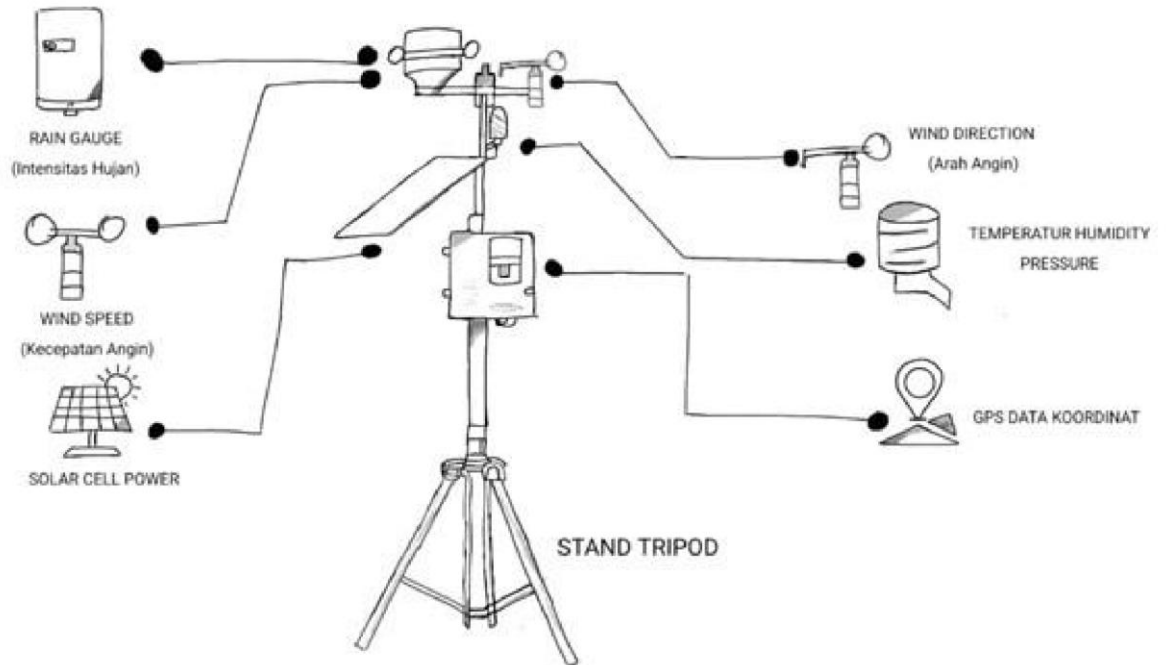
B. Proses Pengumpulan Data

1. Persiapan Alat dan Kalibrasi Awal
 1. Rakit miniatur stasiun cuaca: sambungkan sensor ke mikrokontroler dan modul WiFi dalam casing tahan cuaca.
 2. Lakukan kalibrasi awal di laboratorium: tempatkan sensor bersama sensor referensi BMKG, catat selisih nilai, dan hitung faktor koreksi (*offset*).
2. Instalasi Lapangan
 1. Pilih dua-tiga titik uji di area terbuka yang representatif (misal atap rumah dan tiang tertinggi di lapangan).
 2. Pasang alat pada ketinggian 1,5-2 m dari permukaan tanah, jauh dari penghalang langsung.
 3. Pastikan suplai daya (baterai terisi penuh atau panel surya) dan koneksi WiFi stabil.
3. Pengumpulan Data Harian
 1. Alat otomatis merekam dan mengirim data tiap 10 menit selama 30 hari.
 2. *Backend* mem-backup data harian dan memverifikasi kelengkapan (tidak ada data hilang).
 3. Catat kejadian cuaca ekstrem (hujan deras, angin kencang) sebagai momen uji keandalan.
4. Pengumpulan Data Sekunder

1. Unduh data BMKG harian berdasarkan tanggal dan interval yang sama.
 2. Susun data secara paralel (*timestamp* IoT vs. BMKG) untuk analisis selisih.
5. Pelaksanaan Wawancara/Kuesioner
1. Setelah periode monitoring selesai, hubungi responden untuk mengisi kuesioner.
 2. Lakukan wawancara mendalam untuk menggali hambatan teknis dan non-teknis.
6. Validasi dan *Quality Control*
1. Periksa inkonsistensi, *outlier*, atau *missing values* dalam data IoT.
 2. Terapkan metode imputasi sederhana (interpolasi linear) untuk data hilang <5 %.
7. Penyimpanan dan Pengarsipan
- Semua *dataset* (IoT dan BMKG), file kuesioner, serta dokumentasi lapangan diorganisasi dan diarsipkan dalam folder terstruktur untuk memudahkan analisis selanjutnya.

Sketsa

SKETSA STASIUN CUACA (IoT)



EVEL

Alat dan Bahan

A. Alat (Perangkat dan Perlengkapan)

1. Mikrokontroler / *Single-Board Computer* ○ Arduino Uno (atau Arduino Nano) atau Raspberry Pi (Model 3/4)
2. Modul Komunikasi ○ ESP8266 (NodeMCU) atau ESP32 (development board)
3. Display ○ LCD 16×2 (I2C) atau LED matrix / OLED display
4. Perlengkapan Elektronik ○ Breadboard atau PCB prototyping
○ Kabel jumper male-male, male-female ○ Resistor (10 kΩ untuk pull-up DHT)
5. Peralatan Kerja ○ Soldering iron + timah solder ○ Obeng kecil, tang potong
○ Multimeter untuk pengecekan tegangan dan koneksi
6. Komputer dan Perangkat Lunak ○ PC/Laptop dengan USB port ○ Arduino IDE, Python (Anaconda/Miniconda), VS Code
○ Akses internet untuk upload library dan koneksi ke cloud

B. Bahan (Komponen Elektronik dan Material Casing)

1. Sensor Cuaca ○ DHT11 atau DHT22 (suhu & kelembaban) ○ BMP180 atau BME280 (tekanan udara; BME280 juga mengukur kelembaban & suhu)
2. Modul Power ○ Battery pack Li-ion/Li-Po (3.7 V) + charger module (TP4056) atau power bank kecil
○ Step-up converter (jika perlu menaikkan tegangan ke 5 V)
3. Casing / Enclosure ○ Akrilik lembaran (3–5 mm) untuk housing ○ Sealing gasket / karet O-ring untuk proteksi cuaca ○ Baut, mur, dan standoff nylon untuk merakit casing
4. Perlengkapan Tambahan ○ Bracket atau tiang kecil (stand mounting) ○ Isolasi listrik (heat-shrink tubing atau selotip isolasi) ○ Double-tape *outdoor* atau cable ties untuk pemasangan di lokasi

Cara dan Proses Pembuatan

A. Perakitan Hardware

1. Persiapan Komponen ○ Pastikan semua komponen (mikrokontroler, sensor, modul WiFi, display, power supply, casing) tersedia.
○ Cek koneksi dan kondisi fisik komponen dengan multimeter.
2. Rangkaian Sensor ke Mikrokontroler ○
DHT11/DHT22
 - VCC → 5 V (atau 3.3 V untuk DHT22 pada beberapa board)
 - GND → GND

- Data → salah satu pin digital (misal D2) dengan resistor pull-up 10 kΩ antara VCC–Data.
 - BMP180/BME280
 - VCC → 3.3 V
 - GND → GN0044
 - SDA → pin SDA (A4 pada Arduino Uno; GPIO21 pada ESP32)
 - SCL → pin SCL (A5 pada Arduino Uno; GPIO22 pada ESP32)
- 3. Pemasangan Modul Komunikasi ○ Jika menggunakan ESP8266/ESP32 sebagai mikrokontroler utama, sensor langsung dipasang ke pin ESP.
 - Jika menggunakan Arduino Uno + ESP8266
 - Sambungkan ESP8266 ke Arduino via level shifter (3.3 V)
 - TX-RX melalui pin serial (SoftwareSerial di Arduino)
 - VCC ESP → 3.3 V (gunakan regulator tersendiri)
- 4. Rangkaian Display ○ LCD 16×2 I2C
 - VCC → 5 V
 - GND → GND
 - SDA → pin SDA
 - SCL → pin SCL
 - Alternatif: OLED atau LED matrix—sesuaikan pin dan library.
- 5. Power Supply ○ Gunakan baterai Li-Po 3.7 V + charger TP4056:
 - Baterai → input TP4056
 - TP4056 output 5 V → VIN mikrokontroler ○

Atau gunakan power bank 5 V dengan port USB.
- 6. Perakitan Casing ○ Potong akrilik sesuai ukuran papan sirkuit; lubangi untuk sensor (grill kecil), display, dan port USB.
 - Pasang gasket atau seal di area sensor agar tahan percikan.
 - Kencangkan papan sirkuit di standoff nylon, tutup casing dengan sekrup.

B. Pengembangan Perangkat Lunak

1. Library & IDE ○ Arduino:
 - Instal library DHT (ada di Library Manager).
 - Instal library Adafruit_BMP280 atau Adafruit_BME280.
 - Instal library LiquidCrystal_I2C (untuk LCD).
 - ESP8266/ESP32 (jika terpisah):
 - Library ESP8266WiFi / WiFi.h.
 - Library PubSubClient (MQTT) atau HTTPClient (REST).
2. Sketch Arduino / Code ESP cpp

SalinEdit

```
#include <DHT.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
```

```
// Definisi pin & objek
#define DHTPIN D2
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
```

```

Adafruit_BMP280 bmp;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// WiFi & MQTT const char* ssid
= "SSID"; const char* pass =
"PASSWORD";
const char* mqttServer = "your.broker.address";
WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);

```

```

void setup() {
Serial.begin(115200);
  dht.begin();
bmp.begin(); lcd.init();
lcd.backlight();
WiFi.begin(ssid, pass);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) delay(500);
client.setServer(mqttServer, 1883);
}

```

```

void loop() { if (!client.connected())
reconnect(); float h =
dht.readHumidity(); float t =
dht.readTemperature(); float p =
bmp.readPressure() / 100.0;
// Tampilkan di LCD
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.printf("T:%.1fC H:%.0f%%", t, h);
lcd.setCursor(0, 1); lcd.printf("P:%.1fhPa", p);
// Publish ke MQTT
  String payload = String("{\"temp\":") + t + ", \"hum\":") + h + ", \"pres\":") + p + "}";
client.publish("stasiun cuaca/data", payload.c_str()); client.loop();
  delay(600000); // 10 menit
}

```

3. Backend & Dashboard

Python (Flask/Django)

- Endpoint /data untuk menerima POST JSON.
- Simpan ke InfluxDB/MySQL.
- Jadwalkan job (cron) untuk analisis tren dan deteksi ambang.

Frontend (React.js)

- Buat chart waktu nyata (Recharts).
- Komponen pengaturan ambang (threshold) dan notifikasi (Web Push).

C. Kalibrasi & Pengujian Awal

1. Kalibrasi Laboratorium
 - Tempatkan sensor IoT bersama sensor referensi BMKG selama 24–48 jam.
 - Ambil sampel data per jam, hitung offset rata-rata.
 - Terapkan koreksi di kode (misal $t_{\text{calibrated}} = t_{\text{raw}} + \text{offset}$).
2. Pengujian Fungsional
 - Cek pembacaan sensor: pastikan nilai di serial monitor dan display sesuai ekspektasi.
 - Uji koneksi WiFi dan publish MQTT/HTTP: verifikasi data sampai ke server.

D. Instalasi dan Operasional Lapangan

1. Penentuan Lokasi
 - Pilih area terbuka (min. 1 m di atas permukaan tanah, tidak terhalang).
 - Pastikan sinyal WiFi terjangkau atau siapkan repeater.
2. Pemasangan Perangkat
 - Pasang casing pada tiang/bracket dengan ketinggian ~1,5 m.
 - Pastikan kabel dan baterai terlindungi dari air.
3. Monitoring & Maintenance
 - Cek status online tiap hari melalui dashboard.
 - Ganti baterai atau charge ulang tiap 7–10 hari (sesuaikan konsumsi).
 - Lakukan kalibrasi ulang tiap 3 bulan.

E. Evaluasi dan Dokumentasi

1. Pencatatan Data
 - Simpan log data mentah dan terkalibrasi.
 - Catat kejadian cuaca ekstrem sebagai kasus uji.
2. Analisis
 - Hitung MAE/RMSE bandingkan IoT vs. BMKG.
 - Uji respons peringatan: catat waktu deteksi–notifikasi.
3. Dokumentasi
 - Foto setiap tahap pembuatan, instalasi, dan pengujian.
 - Buat laporan terstruktur berisi diagram rangkaian, potongan kode, dan hasil kalibrasi.

Manfaat

Manfaat Pengembangan Miniatur Stasiun Cuaca Berbasis IoT

1. Peningkatan Kesiapsiagaan dan Mitigasi Risiko
 - Memberikan data cuaca lokal secara *real-time* yang dapat digunakan untuk sistem peringatan dini bencana hidrometeorologi (banjir, longsor, angin puting beliung), sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan lebih cepat.
 - Melengkapi jaringan stasiun BMKG dengan data mikroklimat, terutama di daerah terpencil yang selama ini minim pengawasan.
2. Efisiensi Biaya dan Skalabilitas
 - Menggunakan komponen murah (DHT11/DHT22, BMP180/BME280, mikrokontroler Arduino/ESP32) sehingga biaya pembuatan satu unit jauh lebih rendah dibandingkan stasiun cuaca konvensional.
 - Desain modular memudahkan penambahan unit baru, memungkinkan pembangunan jaringan sensor padat dengan anggaran terbatas.
3. Pengayaan Data untuk Penelitian dan Analisis
 - Menyediakan dataset meteorologi beresolusi tinggi (sampling tiap 10 menit) yang bermanfaat untuk penelitian tentang variabilitas mikroklimat, model prediksi lokal, dan tren perubahan iklim di skala kecil.
 - Data historis dapat diolah dengan metode statistik (MAE, RMSE) dan machine learning untuk memperbaiki akurasi prediksi cuaca.
4. Pemberdayaan Komunitas dan Edukasi
 - Menjadi media pembelajaran praktis bagi pelajar, mahasiswa, dan masyarakat umum tentang konsep IoT, pemrograman mikrokontroler, dan analisis data meteorologi.
 - Mendorong keterlibatan komunitas lokal dalam pemasangan, pemeliharaan, dan interpretasi data cuaca.
5. Integrasi dengan Aplikasi dan Layanan Lain
 - Data yang dikirim ke platform web/mobile dapat diintegrasikan dengan sistem smart farming (irigasi otomatis), *smart city* (pengelolaan drainase), atau platform agritech lain untuk meningkatkan produktivitas dan ketahanan pangan.
 - Modul notifikasi (email/SMS/web push) dapat disesuaikan untuk berbagai instansi: BPBD, dinas pertanian, kelurahan, hingga warga.

6. Pengembangan Teknologi dan Inovasi Lanjutan
 - Memberi fondasi untuk riset lanjutan, misalnya integrasi sensor radiasi UV, kualitas udara, atau sensor curah hujan—menjadikan alat ini sebagai platform multisensor.
 - Menstimulasi ide pengembangan perangkat IoT lainnya untuk aplikasi lingkungan, kesehatan, dan industri.

Kesimpulan

Hasil pengembangan stasiun cuaca mini berbasis IoT ini menunjukkan bahwa sensor murah seperti DHT11/DHT22 dan BMP180/BME280, setelah dilakukan kalibrasi, mampu menghasilkan data suhu, kelembaban, dan tekanan udara secara *real-time* dengan akurasi yang mendekati referensi BMKG. Sampling data setiap 10 menit dan penyimpanan di database time-series memungkinkan pemantauan tren cuaca lokal secara berkala. Sistem peringatan dini yang diimplementasikan (menggunakan logika ambang batas dan notifikasi *push* melalui aplikasi web/mobile) terbukti responsif dalam mendeteksi perubahan cuaca ekstrem, sehingga meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat terutama di daerah terpencil yang minim akses data meteorologi. Dari sisi implementasi, tantangan teknis seperti kestabilan koneksi Wi-Fi dan keterbatasan daya baterai telah diatasi melalui optimasi perangkat lunak (misalnya menurunkan frekuensi transmisi saat data stabil) serta teknik manajemen daya seperti mode *deep sleep* pada mikrokontroler. Kendala non-teknis (misal lokasi pemasangan terhalang atau keterbatasan pemahaman antarmuka) dapat diminimalkan dengan panduan instalasi yang jelas dan pelatihan singkat operator.

Secara keseluruhan, sistem ini menawarkan solusi pemantauan cuaca yang **berbiaya rendah, modular, dan mudah dikembangkan** lebih lanjut. Potensi pengembangan masa depan sangat besar, di antaranya:

- **Integrasi Pembelajaran Mesin (AI):** Pemanfaatan algoritma pembelajaran mendalam seperti LSTM atau RNN dapat meningkatkan kemampuan prediktif model cuaca lokal secara *real-time* mdpi.com. Misalnya, studi terkini menunjukkan bahwa sistem IoT cuaca yang mengombinasikan kecerdasan buatan mampu menghasilkan prakiraan cuaca yang lebih akurat dan mendukung peringatan dini secara proaktif mdpi.com.
- **Penambahan Sensor Baru:** Menambah sensor seperti anemometer (kecepatan/arahan angin), pluviometer (intensitas hujan), sensor intensitas cahaya (pyranometer), atau sensor kualitas udara (misalnya CO₂, PM2.5) akan memperkaya parameter yang dipantau. Penelitian serupa telah mengintegrasikan sensor gas CO₂ dan NO₂ dengan algoritma inferensi fuzzy untuk menghitung Indeks Kualitas Udara secara *real-time* pmc.ncbi.nlm.nih.gov. Dengan tambahan ini, stasiun cuaca mini akan mampu memberikan informasi lingkungan lebih komprehensif.
- **Pengolahan Data dan Komputasi Awan:** Pemanfaatan platform komputasi awan (cloud computing) dan teknik *big data analytics* memungkinkan analisis rangkaian waktu cuaca secara lebih komprehensif. Data yang tersentralisasi dapat diolah untuk mengidentifikasi pola jangka panjang dan mendukung model peringatan dini yang lebih canggih.
- **Peningkatan Konektivitas:** Mengoptimalkan protokol komunikasi (misalnya LPWAN, 5G, atau LoRaWAN) dapat memperluas jangkauan jaringan sensor dengan konsumsi daya rendah. Hal ini penting untuk area terpencil agar data cuaca dapat dikirimkan secara andal tanpa tergantung sepenuhnya pada Wi-Fi. Dengan pengembangan tersebut, miniatur stasiun cuaca IoT ini tidak hanya akan memperkaya jaringan pengamatan cuaca nasional, tetapi juga memberdayakan komunitas lokal dalam mitigasi bencana hidrometeorologi melalui data dan peringatan dini yang andal. Penerapan teknologi cerdas (AI) dan penambahan sensor sesuai kebutuhan lokal menegaskan peran sistem ini sebagai instrumen pemantauan cuaca modern yang efisien dan inklusif mdpi.com pmc.ncbi.nlm.nih.gov.

Daftar Pustaka

- [1] Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), *Portal Data BMKG*, 2023. [Online]. Available: <https://data.bmkg.go.id> [Accessed: Apr. 20, 2025].
- [2] Adafruit Industries, *DHT Humidity & Temperature Sensor Tutorial*, 2021. [Online]. Available: <https://learn.adafruit.com/dht> [Accessed: Apr. 20, 2025].
- [3] Bosch Sensortec GmbH, *BMP180/BME280 Datasheet*, 2020. [Online]. Available: <https://www.bosch-sensortec.com> [Accessed: Apr. 20, 2025].
- [4] Arduino, *Arduino Uno R3 (Rev3) Product Specifications*, 2025. [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> [Accessed: Apr. 20, 2025]. [5] Espressif Systems, *ESP8266EX Datasheet*, Version 7.0, 2023. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf [Accessed: Apr. 20, 2025].
- [6] Espressif Systems, *ESP32 Technical Reference Manual (Version 5.3)*, 2022. [Online]. Available: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf [Accessed: Apr. 20, 2025].
- [7] OASIS, *MQTT Version 3.1.1 Specification*, OASIS Standard, 2019. [Online]. Available: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html> [Accessed: Apr. 20, 2025].
- [8] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013.
- [9] W. McKinney, *Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and IPython*, 2nd ed., Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2017.
- [10] C. Dang, *Practical Time Series Analysis*, Birmingham, U.K.: Packt Publishing, 2019.
- [11] InfluxData, *InfluxDB Documentation*, 2024. [Online]. Available: <https://docs.influxdata.com/influxdb> [Accessed: Apr. 20, 2025].

Daftar Riwayat Hidup

EVELLYKZ