



Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran  
<http://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jrpp>  
 Volume 8 Nomor 2, 2025  
 P-2655-710X e-ISSN 2655-6022

Submitted : 29/05/2025  
 Reviewed : 03/06/2025  
 Accepted : 05/06/2025  
 Published : 08/06/2025

Rut Br Ginting<sup>1</sup>  
 M. Arif Sulaiman<sup>2</sup>  
 Andri Kristanto<sup>3</sup>

## RANCANGAN CHANGEOVER OTOMATIS BERBASIS WAKTU PADA TRANSMITTER VHF AIR TO GROUND R&S SU4200

### Abstrak

Radio Very High Frequency Air to Ground (VHF A/G) adalah sistem komunikasi pada frekuensi 117.975 MHz – 137 MHz yang menghubungkan petugas Pemandu Lalu Lintas Udara dengan pilot. Salah satu perangkat yang digunakan adalah Radio Very High Frequency Air to Ground R&S SU4200 yang terdiri dari unit utama dan cadangan. Pergantian dari unit utama ke cadangan saat ini terjadi jika ada gangguan atau secara manual, menyebabkan ketidakseimbangan beban kerja dan potensi overload. Metode penelitian yang digunakan adalah model ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation) untuk memastikan rancangan dapat dikembangkan dan diuji secara bertahap. ESP32 dikonfigurasi sebagai timer internal dan untuk membaca sinyal dari pemancar, mengontrol relay untuk switching, serta berkomunikasi dengan broker MQTT untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian sistem dari jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem changeover otomatis berbasis waktu dapat bekerja dengan baik. Kecepatan switching tetap stabil pada koneksi internet di atas 1 Kbps, sedangkan pada koneksi di bawah 1 Kbps, terjadi penundaan hingga 5 detik. Rancangan juga dilengkapi dengan mekanisme penundaan switching saat PTT aktif, sehingga pergantian pemancar tidak mengganggu komunikasi yang sedang berlangsung. Selain itu, rancangan berhasil mempublikasikan dan menerima perintah melalui MQTT dengan tingkat keterlambatan yang minimal.

**Kata kunci:** VHF air to ground, Changeover, microcontroller ESP32

### ABSTRACT

Very High Frequency Air to Ground (VHF A/G) radio is a communication system operating at a frequency of 117.975 MHz – 137 MHz, connecting Air Traffic Control officers with pilots. One of the commonly used devices is ROHDE & SCHWARZ SU4200, which consists of a main unit and a backup unit. The switch from the main unit to the backup unit currently only occurs in case of failure or manual intervention, leading to an imbalance in workload and potential overload risks. This study develops an automatic changeover system using ESP32 as the main controller and MQTT for remote monitoring. The ADDIE model (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation) is applied to ensure the system is developed and tested in stages. The ESP32 is configured to read transmitter signals, control relay switching, and communicate with an MQTT broker for system monitoring and control. The test results show that the automatic changeover system functions well. Switching speed remains stable on an internet connection above 1 Kbps, while on a connection below 1 Kbps, there is a delay of up to 5 seconds. The system is also equipped with a switching delay mechanism when PTT is active, ensuring that transmitter switching does not disrupt ongoing communication. Additionally, the system successfully publishes and receives commands via MQTT with minimal latency.

**Keywords:** VHF Air To Ground, Changeover, ESP32 Microcontroller

### PENDAHULUAN

Fasilitas telekomunikasi penerbangan adalah fasilitas yang digunakan untuk pelayanan komunikasi penerbangan dan pelayanan radio navigasi penerbangan, fasilitas ini berkaitan langsung antara pilot dan Air Traffic Controller (ATC) dalam melakukan komunikasi di udara, sehingga kinerja peralatan harus selalu optimal [1]. Radio Very High Frequency Air to Ground

<sup>1,2,3)</sup> Politeknik Penerbangan Indonesia Curug

email: ruth\_nagine@ymail.com, arif.sulaiman@ppicurug.ac.id, andrinavigasi@gmail.com

(VHF A/G) merupakan peralatan komunikasi radio yang bekerja pada frekuensi 117.975 MHz – 137.9 MHz dan digunakan sebagai sarana komunikasi petugas Pemandu Lalu Lintas penerbangan disuatu unit pelayanan lalu lintas penerbangan (Air Traffic Service-ATS) dengan pilot di pesawat udara.

Berdasarkan KP. 103 tahun 2015 Radio Very High Frequency Air to Ground (VHF A/G) yang merupakan peralatan yang terdiri dari transmitter (Tx) dan receiver (Rx) yang digunakan untuk komunikasi penerbangan antara pilot dengan ATC (Air Traffic Controller), yang dimana transmitter dan receiver merupakan peralatan yang berfungsi untuk memancarkan dan menerima gelombang elektromagnetik yang terdiri dari pemancar dan penerima utama (main) dan pemancar dan penerima cadangan (standby). Dalam pengoperasiannya pemancar dan penerima utama (main) dan pemancar dan penerima cadangan (standby) dihubungkan dengan pemindah otomatis (Automatic change over switch) yang dapat memindahkannya secara otomatis sesuai dengan keperluan operasional[2]. Saat ini tidak semua peralatan radio VHF A/G memiliki changeover otomatis dalam proses perpindahan dari pemancar utama ke pemancar cadangan, seperti radio VHF A/G merek Rohde & Schwarz type SU4200, dimana perpindahannya terjadi jika terdapat kerusakan di pemancar utama, kemudian berpindah ke pemancar cadangan atau dapat dilakukan perpindahan secara manual. Dengan kondisi tersebut beban kerja pada pemancar utama akan tidak seimbang dengan pemancar cadangan sehingga dapat mengakibatkan kerusakan atau overheat pada Modul Power Amplifier salah satu transmitter. Menanggapi hal tersebut, penulis memiliki gagasan untuk membuat rancangan changeover otomatis berbasis waktu yang dimana waktu perpindahan transmitter dapat disesuaikan atau dikonfigurasi dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai kontrol utama dan dapat dimonitor dan dikontrol dari jarak jauh secara real-time dengan menggunakan Message Queue Telemetry Transport (MQTT). Penelitian serupa pernah dilakukan oleh Farel Ibnu Adama dkk, dengan judul “Rancangan Pengembangan Simulasi Remote Radio switching System Berbasis Arduino Mega” [3]. Pada penelitian tersebut peneliti menentukan changeover terdapat 2 mode yaitu mode otomatis dan mode manual. Herdy Sagustian juga melakukan penelitian yang berjudul “ Rancangan Automatic Changeover System Menggunakan Arduino Uno Pada Peralatan Very High Frequency Air Ground Radio Communication”[4]. Pada penelitian tersebut peneliti membahas rancangan automatic changeover menggunakan arduino uno pada peralatan Transmitter VHF AG Merk R&S dengan 3 (tiga) mode repetisi penekanan PTT (Push To Talk). I Dewa Putu Suyoga Nalaswara dkk juga melakukan penelitian yang berjudul rancangan simulasi automatic switching system menggunakan arduino uno pada transmitter very high frequency PAE T6T di Airnav Surabaya [5]. Pada penelitian tersebut peneliti membahas rancangan yang dilakukan secara otomatis switching transmitter 1 dan transmitter 2 setiap 10 kali, 15 kali dan 20 kali push to talk (PTT) dengan menggunakan Arduino Uno sebagai kontrol utama rancangan parameter tegangan sebagai referensi dan push button sebagai indikator untuk memilih berapa kali PTT dan menggunakan LCD I6x4 sebagai indikator operasi agar informasi yang disampaikan lebih jelas.

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah dan batasan masalah yang telah diuraikan diatas, maka penulis membuat rumusan masalah sebagai berikut :

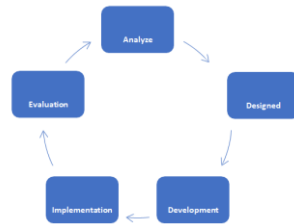
1. Bagaimana merancang sistem changeover otomatis berbasis waktu yang mampu melakukan perpindahan pemancar (transmitter) secara cepat dan tidak mengganggu sistem operasional pemancar?
2. Bagaimana merancang changeover otomatis berbasis waktu dengan menggunakan microcontroller ESP32 ?
3. Bagaimana aplikasi Message Queue Telemetry Transport (MQTT) dapat memonitor dan mengontrol rancangan changeover otomatis dari jarak jauh?

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, batasan masalah dan rumusan masalah yang telah di uraikan diatas, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengembangkan sistem changeover otomatis berbasis waktu yang mampu melakukan perpindahan pemancar dengan cepat tanpa mengganggu sistem operasional.
2. Merancang sistem changeover otomatis berbasis waktu menggunakan microcontroller ESP32 yang dapat bekerja pada peralatan transmitter VHF air to ground R&S SU4200.
3. Merancang bagaimana aplikasi Message Queue Telemetry Transport (MQTT) dapat digunakan untuk memonitor dan mengontrol ESP32 dari jarak jauh

## METODE

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian pengembangan yang mengadopsi model ADDIE. Model ini dirancang secara sistematis dan mudah dipahami dalam proses pengembangannya. Model ADDIE terdiri dari lima tahapan utama, yaitu Analisis (Analysis), Perancangan (Design), Pengembangan (Develop), Implementasi (Implement), dan Evaluasi (Evaluate). Setiap tahapan dalam model ini tersusun secara terstruktur dan memiliki keterkaitan satu sama lain untuk memastikan hasil yang optimal [22]. Model penelitian ADDIE memungkinkan setiap tahap dilakukan lebih dari satu kali. Desainer instruksional sering kali mengulang langkah sebelumnya berdasarkan hasil temuan dan masukan yang diperoleh selama proses perancangan [23]. Tahapan-tahapan tersebut tersusun secara sistematis dan dapat diperhatikan pada gambar di bawah ini:



Gambar III. 1 Tahap model ADDIE

Penggunaan model ADDIE selain prosedurnya yang sederhana dan sistematis, model ini juga memungkinkan untuk melakukan revisi dan evaluasi secara berulang-ulang dalam setiap tahap yang dilalui hingga menghasilkan produk yang valid dan praktis.

### 1. Analisis

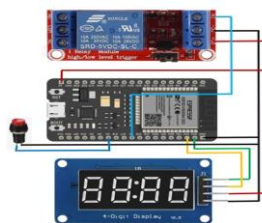
Tahap analisis adalah suatu tahap pengumpulan informasi yang dapat dijadikan sebagai bahan untuk membuat produk, dalam hal ini produk yang dihasilkan adalah rancangan changeover otomatis berbasis waktu. Pengumpulan informasi ini berupa analisis kebutuhan, analisis perangkat keras, dan perangkat lunak yang dibutuhkan untuk membuat produk. Pada

bagian system hardware dilakukan studi literatur dengan mengukur output kontrol pemancar utama pin 4 dan pin 7 pada saat On dan mengukur output kontrol pemancar cadangan pin 4 dan pin 7 pada saat standby.

Pada bagian software device akan dilakukan studi literatur terkait kemampuan microcontroller ESP32 menganalisa ketepatan waktu changeover. Pada bagian monitoring atau pemantauan dilakukan studi literatur terkait penggunaan aplikasi MQTT sebagai pemantauan secara realtime dan dari jarak jauh menggunakan internet.

### 2. Design Produk

Setelah tahap analisis, dilakukan perancangan sistem changeover otomatis berbasis waktu. Tahapan ini mencakup pembuatan desain sistem secara keseluruhan, termasuk perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Logika kontrol untuk changeover berbasis waktu dirancang agar dapat menentukan kapan pemancar utama akan berpindah ke pemancar cadangan atau sebaliknya. Perancangan juga meliputi penyusunan skema rangkaian elektronik dengan koneksi antar komponen yang tepat, serta penentuan pengaturan waktu dalam sistem menggunakan timer internal pada ESP32.



Gambar III. 2 rancangan rangkaian ESP32 dengan relay dan seven segment

Gambar diatas menunjukkan hubungan antara ESP32, modul relay, display seven segmen dan push botton (sebagai input PTT). ESP32 mengontrol relay untuk

mengaktifkan atau menonaktifkan perangkat pemancar, seven segment display untuk menampilkan informasi waktu dan status sistem. Konfigurasi perangkat lunak dilakukan dengan mengunggah kode program ESP32 melalui Arduino IDE, menentukan parameter koneksi Wi-Fi serta alamat broker MQTT, dan menguji koneksi ESP32 dengan broker melalui serial monitor. Pengujian sistem meliputi pengiriman perintah MQTT melalui aplikasi Mobile MQTT untuk mengaktifkan dan mematikan pemancar, serta pemantauan status pemancar secara real-time melalui pesan yang dikirimkan ESP32 ke broker MQTT.

### 3. Development

Pada tahap ini dilakukan pemrograman microkontroller ESP32 untuk mengontrol sistem changeover otomatis berbasis waktu serta mengirim dan menerima data melalui protocol MQTT. Pemrograman dilakukan dengan menggunakan bahasa C/C++ pada platform Arduino IDE dengan tambahan pustaka (perpustakaan kode) yang mendukung komunikasi MQTT dan pengaturan relay.

## Inisialisasi konfigurasi ESP32

ESP32 dikonfigurasi untuk terhubung ke jaringan wifi dan broker MQTT. Berikut adalah kode inisialisasinya :

[illegible]

Gambar III. 3 Kode Inisialisasi jaringan wifi ke broker MQTT

Gambar diatas menunjukkan bagaimana ESP32 terhubung ke jaringan waifi dan broker MQTT untuk komunikasi data.

[illegible]

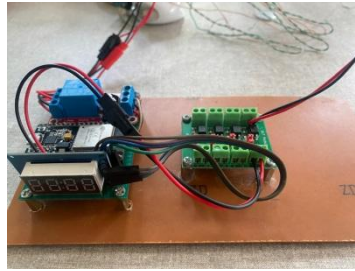
Gambar III. 4 Alur data MQTT

Gambar diatas menggambarkan bagaimana ESP32 menerima perintah dari broker MQTT dan menyalakan relay sesuai dengan status pemancar.

[illegible]

Gambar III. 5 Diagram logika changeover

Gambar diatas menjelaskan bagaimana ESP32 mengelola perubahan pemancar berdasarkan waktu yang ditentukan serta sinyal MQTT.

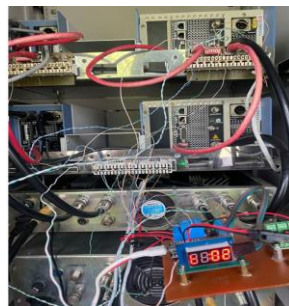


Gambar III. 6 rancangan changeover otomatis berbasis waktu

Gambar diatas merupakan rancangan changeover otomatis berbasis waktu yang dirancang untuk diimplementasikan pada sistem VHF air to ground R&S SU4200. Dalam rancangan ini mikrokontroler ESP32 digunakan sebagai kontrol utama yang mengelola logika changeover berdasarkan waktu yang telah di konfigurasi. ESP32 mengontrol relay yang berfungsi untuk melakukan perpindahan pemancar utama ke pemancar cadangan dan sebaliknya. Selain itu optocoupler digunakan sebagai pemisah logika antara sinyal PTT (push to talk) dan timer, sehingga rancangan ini dapat mendeteksi kondisi komunikasi sebelum melakukan perpindahan pemancar.

#### 4. Implementasi

Pada tahap implementasi dilakukan dengan memasang dan menguji sistem changeover otomatis berbasis waktu menggunakan ESP32 yang terhubung ke MQTT. Implementasi ini mencakup pemasangan perangkat keras, konfigurasi perangkat lunak, serta pengujian komunikasi dan fungsioanalitis sistem. Pemasangan perangkat keras mencakup penghubungan ESP32 dengan modul relay yang terhubung ke pemancar utama dan pemancar cadangan. Selain itu, ESP32 juga dikonfigurasi untuk terhubung dengan sumber daya listrik serta jaringan Wi-Fi. Optocoupler digunakan sebagai pemisah logika input antara ESP32 dan PTT (Push to Talk).



Gambar III. 7 Rancangan changeover otomatis diimplementasikan di transmitter VHF air to ground R&S SU4200

Gambar diatas menunjukkan implementasi rancangan changeover otomatis berbasis waktu pada transmitter VHF air to ground R&S SU4200. Sistem ini dirancang agar pemancar utama dan pemancar Cadangan dapat berpindah secara otomatis dengan waktu yang telah ditentukan. Rancangan ini bekerja dengan 2 (dua) mode operasi, yang pertama adalah mode otomatis, dimana perpindahan pemancar terjadi secara otomatis setelah waktu yang dikonfigurasi telah tercapai. Selanjutnya, adalah mode manual, dimana operator atau pengguna dapat secara langsung memilih pemancar yang ingin diaktifkan melalui antar muka pengguna MQTT.

#### 5. Evaluasi

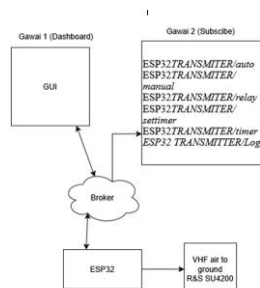
Tahap evaluasi dilakukan untuk mengukur keberhasilan implementasi sistem changeover otomatis berbasis waktu pada transmitter VHF air to ground R&S SU4200. Kemampuan sistem dalam melakukan changeover otomatis serta respons terhadap perintah manual dan otomatis diuji untuk memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Data logger MQTT diperiksa untuk memastikan bahwa perubahan status transmitter dikirim dengan benar. Untuk memastikan sistem bekerja dengan baik, dilakukan serangkaian pengujian terhadap mode operasi manual

dan otomatis, serta respons rancangan terhadap kondisi jaringan internet. Berikut adalah tabel pengujian rancangan:

Tabel III. 1 Variabel dan indikator pengujian rancangan

No	Pengujian	Variabel yang diubah	Indikator
1	Fungsi otomatis / manual	Tombol auto / Manual	Terjadi changeover
2	Respon rancangan	Kecepatan internet	Respon time
3	Data payload	Seluruh fitur antarmuka	Payload dan topic yang tersubscribe

Pengujian fungsi otomatis dan manual dilakukan untuk memastikan bahwa rancangan changeover otomatis berbasis waktu dapat beroperasi dalam dua mode yaitu auto dan manual. Pengujian selanjutnya adalah pengujian rancangan terhadap kecepatan internet bertujuan untuk mengukur sejauh mana kecepatan internet mempengaruhi respons rancangan terhadap perintah changeover. Pengujian dilakukan dengan menggunakan dua broker MQTT, yaitu broker HiveMQ dan Emqx untuk melihat stabilitas komunikasi dalam berbagai kondisi jaringan. Selanjutnya dilakukan pengujian data payload dilakukan untuk memastikan bahwa semua pesan yang dikirim melalui protokol MQTT dapat diterima dan diproses dengan baik oleh sistem, topic yang diuji antara lain, ESP32TRANSMITER/auto, ESP32TRANSMITER/manual, ESP32TRANSMITER/relay, ESP32TRANSMITER/settimer, ESP32TRANSMITER/timer, ESP32TRANSMITER/log menggunakan gawai (handphone) dan ESP32 seperti gambar dibawah ini.



Gambar III. 8 Pengujian data payload terhadap perlakuan antarmuka pengguna

### Waktu Pelaksanaan dan Lokasi Perancangan

Perancangan dan penulisan dilaksanakan di Balai Teknik Penerbangan dan Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, berikut ini adalah tabel perancangan:

Tabel III. 2 Jadwal Penelitian

No	Kegiatan	Bulan ke						
		8	9	10	11	12	1	2
1	Identifikasi Masalah							
2	Menentukan judul tugas akhir							
3	Konsultasi judul Tugas Akhir							
4	Penyusunan Proposal Tugas Akhir							
5	seminar proposal tugas akhir							
6	Revisi proposal tugas akhir							
7	Pengumpulan data							
8	Analisa dan Pengelolaan data							
9	Pelaksanaan simulasi							
10	Penulisan Tugas akhir							
11	Bimbingan tugas akhir							
12	Sidang tugas akhir							
13	Revisi Tugas akhir							

### Penentu Alat dan Bahan

Dalam merancang sistem changeover otomatis berbasis waktu pada transmitter VHF air to ground R&S SU 4200 dibutuhkan alat dan bahan sebagai berikut:

Tabel III. 3 Penentu alat dan bahan

No	Alat dan Bahan	Type/ Spesifikasi	Fungsi
1	Modul Transmitter VHF air to ground	RS SU4200	Sebagai perangkat komunikasi
2	Microcontroller	ESP32	sebagai pengontrol utama untuk mengelola timer, logika pergantian transmitter dan komunikasi MQTT
3	Optocoupler	PC817	Sebagai sensor pemisah logika input PTT dan ESP32
4	Relay	DPDT 5V	Mengontrol pergantian transmitter secara otomatis
5	Broker MQTT	Broker.HiveMQ.com	Sebagai perantara komunikasi MQTT
6	Aplikasi MQTT Subscriber	Mobile MQTT App	Pemantauan sistem
7	Koneksi internet	Wifi	Komunikasi MQTT dan ESP32
8	Power supply 5V	5V 2A DC Adapter	Menyediakan daya untuk ESP32 dan komponen lainnya

### Hasil dan pembahasan

Pada bab ini membahas pengujian dan analisis hasil implementasi sistem changeover otomatis berbasis waktu dengan menggunakan ESP32 sebagai kontrol utama pada perangkat transmitter VHF air to ground R&S SU4200, dan MQTT sebagai monitor dan control jarak jauh. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan switching dalam berbagai kondisi, baik secara manual, otomatis maupun melalui simulasi MQTT. Analisis hasil pengujian bertujuan untuk menilai performa sistem dalam hal kecepatan switching, stabilitas sinyal serta latensi komunikasi pada jaringan internet.

#### 1. Implementasi dan Konfigurasi Kode Sistem Changeover Otomatis

Library yang digunakan seperti pada Kode program IV.1 adalah WiFi.h untuk mengkonfigurasi koneksi dengan akses poin, PubSubClient.h untuk keperluan komunikasi MQTT, TM1637Display.h digunakan untuk mengontrol tampilan Seven Segment Display yang menggunakan driver TM1637

##### Kode program IV.1 Library

```
#include <WiFi.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <TM1637Display.h>
```

GPIO yang digunakan untuk TM1637 adalah GPIO 22 dan 23. Input PTT dari pemancar menggunakan GPIO 4, sedangkan output dari ESP32 sebagai pemicu modul relay menggunakan GPIO 5. Konfigurasi GPIO dapat dilihat pada Kode program IV.2.

##### Kode program IV.2 Pendefinisian GPIO

```
#define CLK 22
#define DIO 23
#define PTT_PIN 4
#define RELAY 5
```

Fungsi callback merupakan bagian dari baris kode program untuk menangkap payload dari topic MQTT yang di Subscribe. Baris kode fungsi callback dapat dilihat pada Kode program IV.3.

---

#### Kode program IV.3 Fungsi callback

---

```
void callback(char* topic, byte* payload, unsigned int length) {
  Serial.print("Message arrived [");
  Serial.print(topic);
  Serial.print("] ");
  String messageTemp = "";
  for (int i = 0; i < length; i++) {
    Serial.print((char)payload[i]);
    messageTemp += (char)payload[i];
  }
  Serial.println();
  Serial.println(messageTemp);
}
```

---

Saat ESP32 terhubung dengan WiFi dan internet, ESP32 akan mencoba terhubung dengan broker MQTT. Setelah terhubung dengan broker akan melakukan publish dan subscribe pada topic ESP32TRANSMITER/timer, ESP32TRANSMITER/relay ESP32TRANSMITER/auto. Selain publish, ESP32 juga akan mencoba melakukan subscribe pada topic ESP32TRANSMITER/manual, ESP32TRANSMITER/settimer. Baris kode program untuk konfigurasi awal MQTT dapat dilihat pada Kode program IV.4.

---

#### Kode program IV.4 Konfigurasi awal MQTT

---

```
while (!client.connected()) {
  Serial.print("Attempting MQTT connection...");
  // Create a random client ID
  clientId = mac_address;
  // Attempt to connect
  if (client.connect(clientId.c_str())) {
    Serial.println("connected");
    // Once connected, publish an announcement...
    client.publish("ESP32TRANSMITER/timer", "00:15");
    client.publish("ESP32TRANSMITER/relay", "0");
    client.publish("ESP32TRANSMITER/auto", "0");
    // ... and resubscribe
    client.subscribe("ESP32TRANSMITER/auto");
    client.subscribe("ESP32TRANSMITER/manual");
    client.subscribe("ESP32TRANSMITER/relay");
    client.subscribe("ESP32TRANSMITER/timer");
    client.subscribe("ESP32TRANSMITER/settimer");
  } else {
    Serial.print("failed, rc=");
    Serial.print(client.state());
    Serial.println(" try again in 5 seconds");
    // Wait 5 seconds before retrying
    delay(5000);
  }
}
```

---

Baris Kode program IV.5 adalah baris kode untuk menunda pergantian pemancar aktif jika tombol PTT aktif pada mode AUTO. Pada baris kode tersebut akan dilakukan komparasi tiga kondisi dengan logika AND, yaitu: timer\_menit, timer\_detik, dan ptt\_value. Tidak hanya pada mode AUTO, pemantauan status tombol PTT juga dilakukan pada mode MANUAL yang ditunjukkan oleh baris Kode program IV.6.

---

#### Kode program IV.5 Penunda change over saat PTT aktif untuk mode AUTO

---

```
if (timer_menit == 0 && timer_detik == 1 && ptt_value == 0) {
  Serial.println("transisi");
  display.clear();
}
```

---

---

display.setSegments(hold);

---



---

**Kode program IV.6 Penunda change over saat PTT aktif untuk mode MANUAL**


---

```

if (String(topic) == "ESP32TRANSMITER/manual") {
  if (AutoSwitch == 0) {
    if ((char)payload[0] == '1' && ptt_value == 1) {
      client.publish("ESP32TRANSMITER/relay", "1");
      // displayed letters: Star
      display.setSegments(tr2);
      delay(1000);
    } else if ((char)payload[0] == '0' && ptt_value == 1) {
      client.publish("ESP32TRANSMITER/relay", "0");
      display.setSegments(tr1);
      delay(1000);
    }
  }
  if(ptt_value == 0){
    String stringData = "PTT Active";
    client.publish("ESP32TRANSMITER/log", (unsigned char*)stringData.c_str(),
stringData.length());
  }
}
}

```

---

Perintah untuk pengubahan relay yang dikirim melalui GPIO 5 berasal dari payload topic ESP32TRANSMITER/relay, dimana jika payload berisi “1” maka akan mengaktifkan relay sedangkan jika payload berisi “0” akan menonaktifkan relay. Baris kode untuk kontrol output relay dapat dilihat pada Kode program IV.7.

**Kode program IV.7 Kontrol output relay**


---

```

if (String(topic) == "ESP32TRANSMITER/relay") {
  String stringData = "";
  Serial.print("AutoSwitch :");
  Serial.println(AutoSwitch);
  if ((char)payload[0] == '1') {
    stringData = "Set Transmitter 2 ON";
    Serial.println("Transmitter 2 ON");
    TR = 1;
    digitalWrite(RELAY, LOW); // Turn the LED on
  } else if ((char)payload[0] == '0') {
    stringData = "Set Transmitter 1 ON";
    Serial.println("Transmitter 1 ON");
    digitalWrite(RELAY, HIGH); // Turn the LED off
  }
  client.publish("ESP32TRANSMITER/log", (unsigned char*)stringData.c_str(),
stringData.length());
}

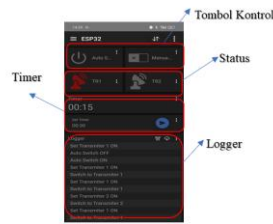
```

---

Dengan adanya implementasi kode ini, sistem changeover otomatis berbasis waktu dapat bekerja dengan baik untuk memonitor dan mengontrol perpindahan pemancar utama dan cadangan secara otomatis maupun secara manual menggunakan MQTT.

## 2. Grafik Antarmuka Pengguna

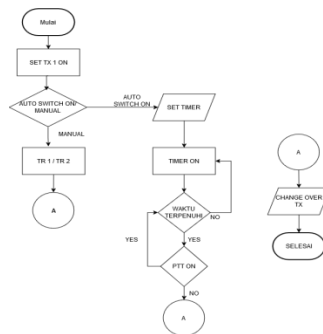
sistem changeover otomatis berbasis waktu ini dilengkapi dengan antarmuka pengguna berbasis MQTT yang memungkinkan pemantauan dan kontrol secara real-time. Antarmuka ini dirancang untuk menampilkan beberapa informasi penggunaan sistem. Dengan adanya antarmuka ini, operator dengan mudah mengubah mode operasi (manual atau otomatis), memantau perubahan pemancar dan melihat riwayat perintah yang sudah dijalankan. Gambar dibawah ini menunjukkan tampilan antarmuka sistem changeover otomatis berbasis waktu.



Gambar IV. 1 Gambar tampilan antarmuka pengguna

Antarmuka pada aplikasi menampilkan beberapa elemen utama sebagai alat pemantauan dan pengendalian yaitu :

1. Tombol kontrol : terdapat tombol untuk mengaktifkan mode otomatis (auto switch) dan manual, digunakan untuk memilih antara mode otomatis atau manual untuk mengatur switching transmitter.
2. Status transmitter : dua pemancar (TR1 dan TR2), dimana TR1 aktif berwarna merah, sementara TR2 dalam keadaan standby berwarna abu-abu.
3. Timer : menunjukkan waktu berjalan (00:15) dan pengaturan waktu (00:30), digunakan untuk menentukan interval switching pemancar.
4. Logger aktivitas : menampilkan histori perintah yang dieksekusi, seperti memindahkan pemancar utama ke pemancar cadangan maupun sebaliknya. Semua aktivitas sistem dicatat untuk mempermudah analisis performa.
- 5.



Gambar IV. 2 Flowchart penggunaan software

Diagram alir ini menunjukkan bagaimana ESP32 mengontrol switching pemancar berdasarkan dua mode operasi. Berikut adalah penjelasan alur kerja flowchart.

1. Mulai : Sistem memulai operasi dan mengaktifkan pemancar utama (TX1) karena normally close (NC) relay terhubung ke pemancar cadangan (Tx2) sehingga Off Tx2 akan bernilai low. Pada kondisi awal pemancar cadangan (Tx2) standby dan pemancar utama (Tx1) aktif. Auto switch on / manual digunakan untuk memilih fungsi automatic atau fungsi manual.
2. Pemilihan mode operasi : sistem menentukan apakah mode auto switch on atau manual. Jika manual, pengguna secara langsung memilih pemancar yang akan digunakan (TR1 / TR2). Jika auto switch on, sistem akan mengatur timer untuk pergantian otomatis.
3. Set timer dan timer on : jika mode otomatis dipilih, sistem mengatur timer sesuai dengan waktu yang diinginkan. Timer mulai berjalan, dan sistem terus mengecek apakah yang ditentukan telah terpenuhi.
4. Cek waktu dan status PTT (Push to talk) : jika waktu belum terpenuhi, sistem tetap dalam status timer berjalan. Jika waktu telah terpenuhi, sistem mengecek apakah PTT ON, jika PTT ON sistem tetap pada status pemancar saat ini, jika PTT OFF, sistem melanjutkan proses changeover pemancar.
5. Pergantian Transmitter : proses changeover TX dilakukan untuk mengganti pemancar utama ke pemancar cadangan. Setelah pergantian selesai, sistem masuk ke kondisi selesai atau ke node A untuk menjalankan siklus berikutnya.

### Hasil Pengujian

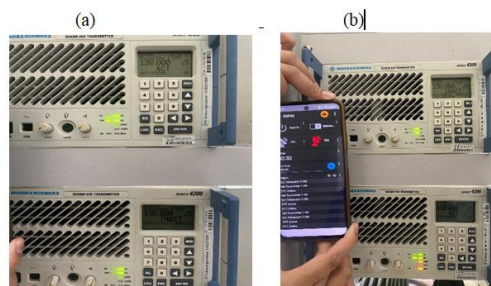
Pengujian alat dilakukan dengan 3 tahapan yaitu pengujian pertama mengukur keakuratan switching dengan simulasi data payload MQTT, pengujian kedua mengukur keakuratan switching dengan implementasi langsung pada peralatan transmitter VHF transmitter Air to Ground R&S SU4200 dan pengujian ketiga mengukur kecepatan internet terhadap respon alat. Pengujian alat ini diimplementasikan di implementasi langsung pada peralatan transmitter VHF air to ground R&S SU4200.

1. Pengujian keakuratan switching fungsi auto/manual implementasi pada pemancar VHF air to ground R&S SU4200

Pengujian keakuratan switching bertujuan untuk memastikan bahwa sistem dapat melakukan changeover pemancar sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Pengujian dilakukan dengan dua scenario utama yaitu pengujian mode manual (memastikan pengguna dapat mengganti pemancar secara manual tanpa adanya delay atau kesalahan) dan Pengujian mode auto switch (mengukur ketepatan waktu changeover sesuai timer yang telah ditetapkan).

Tabel IV. 1 Pengujian keakuratan switching auto dan manual implementasi pada pemancar VHF air to ground R&S SU4200

No	Mode	Posisi Relay	
		Awal	Akhir
1	Auto	TR1	TR2
2	Manual	TR1	TR2



Gambar IV. 3 (a) perpindahan TR1 ke TR2 mode auto, (b) perpindahan TR1 ke TR2 mode manual

Pada mode otomatis hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat berpindah dari pemancar utama (TR1) ke pemancar cadangan (TR2) berdasarkan waktu yang telah dikonfigurasi. Selanjutnya hasil pengujian pada mode manual menunjukkan sistem dapat berpindah dari pemancar utama (TR1) ke pemancar cadangan (TR2) sesuai dengan perintah pengguna melalui MQTT.

2. Pengujian kecepatan internet terhadap respon rancangan yang diimplementasikan pada transmitter VHF air to ground R&S SU4200.

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur waktu switching pada berbagai kondisi kecepatan internet untuk mengetahui dampaknya terhadap performa sistem. Pengujian ini dilakukan melalui broker HiveMQ dan broker Emqx.io untuk mengukur kecepatan internet terhadap delay switching secara lebih rinci. Beberapa aspek yang perlu diuji terkait pengaruh kecepatan internet terhadap changeover pemancar adalah latency (waktu tunda perintah ke ESP32) seberapa cepat perintah switching dijalankan setelah dikirim dari aplikasi (MQTT) dan bandwidth (kecepatan upload) apakah ada switching menjadi lebih lambat saat bandwidth rendah.

Tabel IV. 2 Pengujian kecepatan internet terhadap respon rancangan

No	Kecepatan (Kbps)	Referensi broker	
		Havemq	Emqx
1	50 Kbps	Realtime	Realtime
2	40 Kbps	Realtime	Realtime
3	30 Kbps	Realtime	Realtime

4	20 Kbps	Realtime	Realtime
5	10 Kbps	Realtime	Realtime
6	5 Kbps	Realtime	Realtime
7	3 Kbps	Realtime	Realtime
8	1 Kbps	Realtime	Realtime
9	900 Bps	Tidak realtime	Tidak realtime

Hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa rancangan ini bisa bekerja normal jika kecepatan internet diatas 1 Kbps. Pada kecepatan internet 900 bps, delay switching mencapai 5 detik dan terjadi kegagalan dalam menerima perintah switching.

3. Pengujian keakuratan switching menggunakan data payload MQTT dilakukan sebelum diimplementasikan ke peralatan transmitter VHF air to ground R&S SU4200.

Tahapan pengujian dimulai dengan menjalankan broker MQTT sebagai pusat komunikasi antar perangkat, broker yang digunakan adalah broker.emqx.io, setelah broker berjalan, tahap selanjutnya adalah menghubungkan MQTT client sebagai subscriber pada topik (ESP32TRANSMITER/auto, ESP32TRANSMITER/manual, ESP32TRANSMITER/relay, ESP32TRANSMITER/settimer, ESP32TRANSMITER/timer, ESP32 TRANSMITER/log). Tahap terakhir adalah menyiapkan MQTT client untuk mengirimkan data atau melakukan publish ke broker MQTT. Dengan konfigurasi ini, pengujian dapat dilakukan dengan memantau respons sistem terhadap data yang dikirimkan serta memastikan bahwa komunikasi berjalan dengan baik.

Tabel IV. 3 Pengujian keakuratan switching dengan simulasi payload MQTT

No	Aksi	Topic (Subscribe)	Payload
1	Auto switch on	ESP32TRANSMITER/auto ESP32TRANSMITER/log ESP32TRANSMITER/relay	1 Auto Switch on 0 1
2	Auto switch off	ESP32TRANSMITER/auto ESP32TRANSMITER/log ESP32TRANSMITER/relay	0 Auto Switch off 0
3	Manual	ESP32TRANSMITER/manual ESP32TRANSMITER/relay ESP32TRANSMITER/log	0 0 Set Transmitter 1 ON
4	Set Timer 00:30	ESP32TRANSMITER/settimer ESP32TRANSMITER/log ESP32TRANSMITER/timer	00:30 Set timer to : 00:30 00:30

Berdasarkan tabel IV.3 diatas , pada saat tombol auto switch on ditekan, akan tampil beberapa topic MQTT diantaranya ESP32TRANSMITER/auto dengan payload 1, ESP32TRANSMITER/ log dengan payload auto switch on, dan ESP32TRANSMITER/relay dengan payload 0. Selanjutnya, pada saat tombol auto switch off ditekan, akan tampil beberapa topic MQTT diantaranya ESP32TRANSMITER/auto dengan payload 0, ESP32TRANSMITER/log dengan payload auto switch off, dan ESP32TRANSMITER/ relay dengan payload 0. Lalu, pada saat tombol manual ditekan, akan tampil beberapa topic MQTT diantaranya ESP32TRANSMITER/ manual dengan payload 0, ESP32TRANSMITER/relay dengan payload 0, dan ESP32TRANSMITER/ log dengan payload Set Transmitter 1 On. Yang terakhir, pada saat tombol set timer 00:30 ditekan, akan tampil beberapa topic MQTT diantaranya ESP32TRANSMITER/ settimer dengan payload 00:30, ESP32TRANSMITER/log dengan payload settimer to :00:30, dan ESP32TRANSMITER/ timer dengan payload 00:30

### Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian terhadap rancangan changeover otomatis berbasis waktu yang menggunakan ESP32 sebagai kontrol utama pada perangkat transmitter transmitter VHF air to ground R&S SU4200 dan MQTT sebagai protokol komunikasi, dilakukan analisis hasil

untuk menilai keakuratan switching, pengaruh kecepatan internet terhadap kinerja rancangan changeover otomatis dan pengujian data payload MQTT .

1. Evaluasi keakuratan sistem changeover otomatis

Pengujian keakuratan switching dilakukan dengan dua skenario, yaitu mode manual dan mode otomatis. Pada mode manual, operator dapat secara langsung memilih pemancar yang ingin diaktifkan tanpa adanya keterlambatan yang signifikan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat berpindah dari pemancar utama (TR1) ke pemancar cadangan (TR2) dengan akurasi tinggi sesuai perintah pengguna. Sementara itu, pada mode otomatis, perpindahan pemancar terjadi berdasarkan waktu yang telah dikonfigurasi. Pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan changeover sesuai dengan interval waktu yang telah ditentukan tanpa adanya kesalahan atau keterlambatan yang berarti. Dengan demikian, sistem dapat berjalan secara andal dalam kedua mode operasional tersebut.

2. Evaluasi pengaruh kecepatan internet terhadap performa sistem

Berdasarkan pengujian yang dilakukan dengan berbagai kecepatan internet menggunakan broker MQTT (HiveMQ dan Emqx.io), rancangan changeover ini menunjukkan performa yang stabil pada kecepatan internet diatas 1 Kbps. Namun pada kecepatan 900 bps, terjadi delay switching hingga 5 detik, dan beberapa kali perintah switching gagal diterima oleh ESP32. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa rancangan changeover otomatis memerlukan kecepatan internet minimal 1 Kbps untuk dapat beroperasi dengan lancar dan tanpa hambatan. Kecepatan internet yang lebih rendah dari 1 Kbps berpotensi menyebabkan keterlambatan dalam perintah switching dan kegagalan komunikasi antara MQTT broker dan ESP32.

3. Evaluasi Pengujian data payload MQTT

Hasil pengujian data payload MQTT menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi secara real-time dalam mengirim dan menerima perintah switching. Evaluasi ini dilakukan dengan mengamati setiap payload yang diterima dan dikirim oleh ESP32 ke broker MQTT serta memastikan bahwa pesan-pesan tersebut diproses dengan benar tanpa keterlambatan atau kehilangan data. Dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa payload yang dikirim dan diterima oleh ESP32 sesuai dengan perintah yang diberikan melalui antarmuka pengguna MQTT. Tidak ada pesan yang hilang atau gagal diproses selama koneksi internet dalam kondisi stabil. Selain itu, dengan menggunakan logger aktivitas, setiap perubahan status sistem dapat dicatat dan dianalisis untuk memastikan bahwa sistem beroperasi sesuai dengan spesifikasi yang telah dirancang. Dengan demikian, pengujian ini membuktikan bahwa sistem mampu memproses perintah switching dengan akurat melalui komunikasi MQTT, baik dalam mode otomatis maupun manual. Hasil ini menegaskan bahwa sistem dapat dikendalikan dengan baik dari jarak jauh.

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem changeover otomatis berbasis waktu berhasil diimplementasikan dengan baik. Sistem ini mampu melakukan changeover dengan tingkat akurasi yang tinggi, baik dalam mode manual maupun otomatis. Selain itu, sistem dapat dipantau dan dikendalikan secara real-time melalui antarmuka MQTT. Meskipun demikian, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi performa sistem, salah satunya adalah kecepatan internet. Dengan kecepatan internet yang memadai, sistem dapat beroperasi secara optimal, sedangkan pada kondisi jaringan yang lebih lambat, terjadi peningkatan latensi yang dapat mempengaruhi efektivitas sistem. Oleh karena itu, implementasi sistem ini dalam lingkungan operasional yang sesungguhnya perlu mempertimbangkan ketersediaan koneksi internet yang stabil untuk memastikan kinerja yang optimal.

## SIMPULAN

1. Rancangan changeover otomatis berbasis waktu mampu melakukan perpindahan pemancar dalam waktu yang singkat tanpa mengalami keterlambatan yang signifikan. Dalam mode otomatis, sistem dapat mengganti pemancar sesuai dengan interval waktu yang telah ditentukan.

2. Pengujian dalam jangka waktu tertentu menunjukkan bahwa rancangan changeover otomatis tetap bekerja dengan stabil tanpa mengalami gangguan operasional. Logger aktivitas yang diterapkan juga membantu dalam pemantauan dan analisis sistem.
3. Sistem changeover otomatis bekerja dengan baik pada kecepatan internet minimal 1 Kbps. Namun, pada kecepatan internet dibawah 1 Kbps terjadi delay switching hingga 5 detik dan beberapa kali perintah switching gagal diterima oleh ESP32.
4. Aplikasi antarmuka pengguna MQTT memungkinkan memonitor dan mengontrol changeover secara real-time dari jarak jauh. Hal ini memberikan kemudahan bagi teknisi dalam mengelola perpindahan pemancar tanpa perlu intervensi langsung, sehingga meningkatkan kinerja serta kemudaha pengoperasian sistem pada transmitter VHF air to ground R&S SU4200. Selain itu, rancangan chaneover otomatis berbasis waktu telah bekerja dengan baik dalam menjaga keseimbangan penggunaan antara pemancar utama dan pemancar cadangan, sehingga dapat mengurangi resiko beban kerja yang berlebih pada salah satu pemancar.

## SARAN

1. Disarankan menggunakan koneksi internet cadangan supaya rancangan tetap bekerja.
2. Disarankan menggunakan kata sandi untuk aplikasi agar lebih aman.

## DAFTAR PUSTAKA

- Kementrian Perhubungan, "Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 43 Tahun 2020 Tentang Peraturan Keselamatan Penerbangan Sipil Bagian 172 Tentang Penyelenggara Pelayanan Lalu Lintas Penerbangan," pp. 1–31, 2020.
- Direktorat Jendral Perhubungan Udara, "KP 103 Tahun 2015 Standar Teknis dan Operasi (Manual Of Standard CASR 171 - 02) tentang Spesifikasi Teknik Fasilitas Telekomunikasi Penerbangan," vol. 175, p. 26, 2015.
- F. I. Adama, T. Toni, Y. Suprianto, A. Zulkarnain, and M. A. Sulaiman, "Rancangan Pengembangan Simulasi Remote Radio Switching System Berbasis Arduino Mega," J. Tek. Ind. Terintegrasi, vol. 6, no. 1, pp. 1–13, 2023, doi: 10.31004/jutin.v6i1.13735.
- H. SAGUSTIAN, "RANCANGAN AUTOMATIC CHANGEOVER SYSTEM MENGGUNAKAN ARDUINO UNO PADA PERALATAN VERY HIGH FREQUENCY AIR GROUND RADIO COMMUNICATION," 2023, Universitas Mercu Buana Jakarta.
- I. D. Putu, S. Nalaswara, and R. Ali, "RANCANGAN SIMULASI AUTOMATIC SWITCHING SYSTEM MENGGUNAKAN ARDUINO UNO PADA TRANSMITTER VERY HIGH FREQUENCY PAE T6T DI AIRNAV SURABAYA," vol. X, no. X, pp. 1–11, 2015.
- N. ' Man, A. Ra'yi Qaiz, T. M. Simanjuntak, and M. Wildan, "Analisa Kinerja Peralatan VHF Air To Ground ADC Merk Jotron TX.TA-7450 dan RX.RA-7202 di Perum LPPNPI Cabang Kupang," vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2019.
- G. Sindu, "Ropagasi elombang adio," pp. 86–119, 2015, [Online]. Available: [https://repository.unikom.ac.id/32993/1/ANTENA\\_PROPAGASI.pdf](https://repository.unikom.ac.id/32993/1/ANTENA_PROPAGASI.pdf)
- A. H. Asri and L. Lidyawati, "Analisis Kinerja VHF-A/G TOWER/ADC dengan VHF-A/G APP di Bandar Udara Husein Sastranegara Bandung," TELKA - Telekomun. Elektron. Komputasi dan Kontrol, vol. 4, no. 1, pp. 75–84, 2018, doi: 10.15575/telka.v4n1.75-84.
- [9] ICAO, "International Standards and Recommended Practices: Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation," Aeronaut. Telecommun., vol. IV, no. July, p. 268, 2020, [Online]. Available: <https://unitingaviation.com/news/safety/the-importance-of-english-in-aviation/>
- E. Mardianto, "Panduan belajar mikrokontroller arduino," p. 120, 2022.
- M. N. Nizam, Haris Yuana, and Zunita Wulansari, "Mikrokontroler Esp 32 Sebagai Alat Monitoring Pintu Berbasis Web," JATI (Jurnal Mhs. Tek. Inform., vol. 6, no. 2, pp. 767–772, 2022, doi: 10.36040/jati.v6i2.5713.
- Espressif Systems, "ESP32 Series," Esp32, pp. 1–65, 2021, [Online]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s2_datasheet_en.pdf)
- Tresna Umar Syamsuri, Rahma Nur Amalia, Mudjiono, and Aly Imron, "Rancang Bangun Alat Monitoring Daya Listrik di Asrama Berbasis Web Menggunakan ESP32," Elposys J. Sist. Kelistrikan, vol. 9, no. 3, pp. 139–145, 2023, doi: 10.33795/elposys.v9i3.648.

- V. B. Kitovski, "Electronic devices and circuit theory, 6th edition, R. Boylestad and L. Nashelsky, Prentice Hall International Inc., 1996, 950 pp. A4 (paperback)," *Microelectronics J.*, vol. 29, no. 8, p. 574, 1998, doi: 10.1016/s0026-2692(98)90008-8.
- D. Alat et al., "Akhfi Zamri," 2017.
- T. Darmana and W. Sya'ban, "Rancang Bangun Alat Ukur Kecepatan Putaran Motor Dan Pendeteksi Kestabilan Putaran Pada Porosnya," *Ranc. Bangun Alat Ukur Kecepatan Putaran Mot. Dan Pendeteksi Kestabilan Putaran Pada Porosnya*, vol. 7, no. 1, pp. 71–76, 2019.
- A. Surahmat and T. D. Fu'ady, "Simulasi Rangkaian Seven Segment Menggunakan Multisim Pada Pembelajaran Rangkaian Elektronika Analog Dan Digital Di Smks Informatika Sukma Mandiri," *J. Innov. Futur. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 15–28, 2020, doi: 10.47080/ifttech.v2i1.806.
- Rohde & Schwarz, "M3AR Software Defined Radios VHF / UHF transceiver family for airborne communications," p. 24, 2009.
- B. M. Susanto, E. S. J. Atmadji, and W. L. Brenkman, "Implementasi Mqtt Protocol Pada Smart Home Security Berbasis Web," *J. Inform. Polinema*, vol. 4, no. 3, pp. 201–205, 2018, doi: 10.33795/jip.v4i3.207.
- J. Beno, A. . Silen, and M. Yanti, "SISTEM MONITORING PENGGUNAAN LISTRIK MENGGUNAKAN SENSOR PZEM – 004T BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT)," *Braz Dent J.*, vol. 33, no. 1, pp. 1–12, 2022.
- S. Mulyono, S. Farisa, and C. Haviana, "Implementasi MQTT untuk Pemantauan Suhu dan Kelembaban pada Laboratorium," *J. Transistor Elektro dan Inform. (TRANSISTOR EI)*, vol. 3, no. 3, pp. 140–144, 2018.
- R. Branch, *Instructional design: The ADDIE approach*. 2010. doi: 10.1007/978-0-387-09506-6.
- Bernardez, "Should we have a Universal Model for HPT," *Perform. Improv.*, vol. 46, no. 9, pp. 9–16, 2007, doi: 10.1002/pfi.