

# Finite State Machine (FSM) and Real Time Operating System RTOS

[https://github.com/as-budi/Embedded\\_AI.git](https://github.com/as-budi/Embedded_AI.git)

# Finite State Machine (FSM)

- Dalam sistem tertanam (embedded system), **state machine** atau **finite state machine (FSM)** adalah pola pemrograman penting untuk mengelola *control flow* berdasarkan *keadaan (state)* dan *transisi antar state*.
- FSM sangat berguna untuk mengatur logika kompleks yang bersifat deterministik dan dapat diprediksi, seperti dalam pengontrol perangkat keras, sistem UI, atau robotik.

## 1. Apa Itu State Machine?

State Machine adalah model komputasi yang terdiri dari:

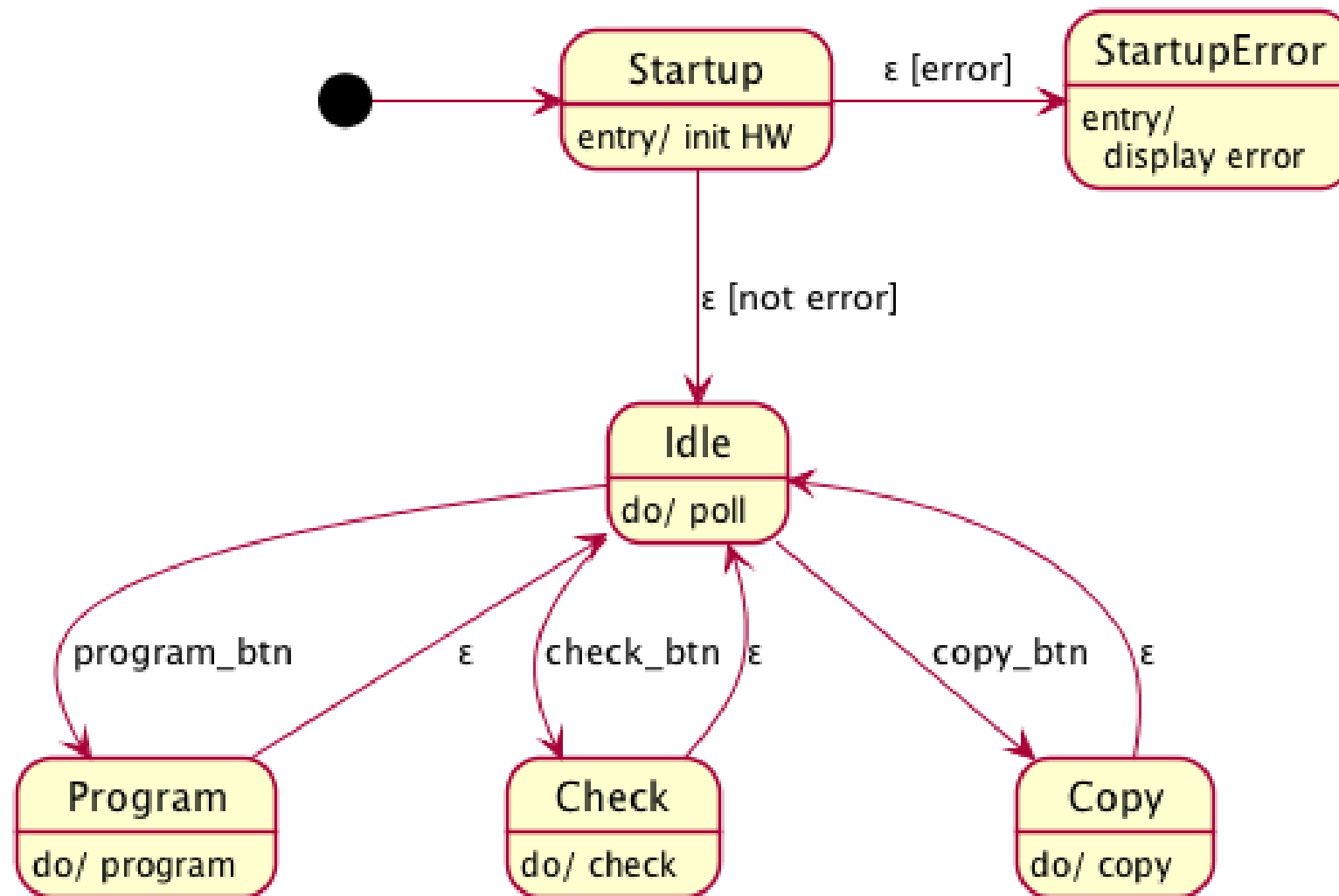
- **State (Keadaan):** Kondisi sistem saat ini.
- **Transition (Transisi):** Perubahan dari satu state ke state lain berdasarkan input/event.
- **Event/Input:** Pemicu transisi state.
- **Action:** Proses atau output yang dilakukan saat masuk atau keluar dari state atau saat transisi terjadi.

## ⚙️ 2. Kapan Digunakan di Embedded System?

Beberapa contoh penggunaannya:

- Sistem menu UI pada alat ukur digital.
- Pengendali robot berdasarkan sensor.
- Protokol komunikasi (misalnya: UART, SPI, Bluetooth).
- **Mode operasi perangkat:** akuisisi data, inferensi, sleep, idle, active, error, dll.

## Embedded v2

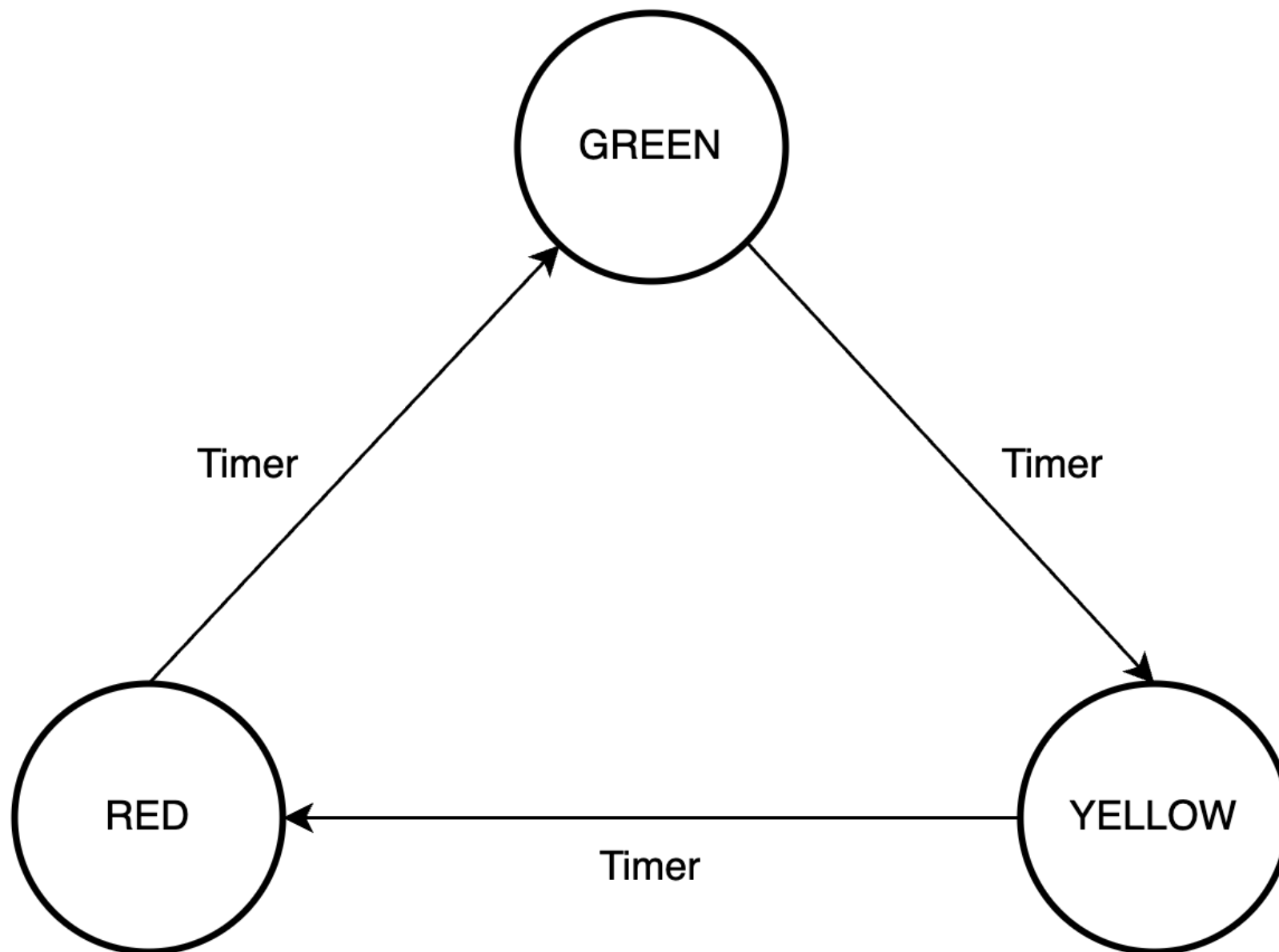


## ❧ 3. Pola Pemrograman State Machine (Programming Pattern)

- **State Table Driven FSM:** Menggunakan tabel (array atau struct) untuk mendefinisikan transisi.
- **Switch-Case FSM (paling umum):** Menggunakan pernyataan `switch` untuk menangani setiap state.
- **State Pattern (Object-Oriented FSM):** Setiap state direpresentasikan sebagai objek dengan metode `on_enter`, `on_event`, `on_exit`.

## 4. Contoh: FSM untuk Lampu Lalu Lintas Sederhana

- **State:** RED, GREEN, YELLOW
- **Input:** timer
- **Output:** lampu ON/OFF





# Implementasi dalam C (Switch-case FSM)

```
typedef enum {RED, GREEN, YELLOW} TrafficState;

TrafficState currentState = RED;
unsigned long timer = 0;

void updateStateMachine() {
    switch(currentState) {
        case RED:
            turnOnRedLight();
            if (millis() - timer > 5000) {
                timer = millis();
                currentState = GREEN;
            }
            break;

        case GREEN:
            turnOnGreenLight();
            if (millis() - timer > 4000) {
                timer = millis();
                currentState = YELLOW;
            }
            break;

        case YELLOW:
            turnOnYellowLight();
            if (millis() - timer > 2000) {
                timer = millis();
                currentState = RED;
            }
            break;
    }
}
```

## Catatan Desain:

- **Non-blocking:** Gunakan `millis()` atau timer, bukan `delay()`, agar sistem tetap responsif.
- **Deklaratif:** Gunakan enum atau struct agar logika FSM dapat dibaca dan diubah dengan mudah.
- **Testable:** Dengan memisahkan logic FSM dari I/O, pengujian bisa dilakukan tanpa perangkat keras.

## 5. Alternatif Pendekatan: FSM Pattern dalam C++ (OOP)

```
class TrafficLightState {
public:
    virtual void enter() = 0;
    virtual TrafficLightState* next() = 0;
};

class Red : public TrafficLightState {
public:
    void enter() { turnOnRedLight(); delay(5000); }
    TrafficLightState* next() { return new Green(); }
};

class Green : public TrafficLightState {
public:
    void enter() { turnOnGreenLight(); delay(4000); }
    TrafficLightState* next() { return new Yellow(); }
};

// dan seterusnya...
```

- Pendekatan ini lebih modular, cocok untuk proyek embedded system berbasis RTOS atau sistem kompleks seperti UI/UX pada touchscreen.

## ✓ 6. Best Practice FSM di Embedded System

Aspek	Rekomendasi
Struktur kode	Gunakan <code>enum</code> , <code>switch-case</code> , atau object pattern
Efisiensi	Hindari blocking function ( <code>delay</code> )
Skalabilitas	Pisahkan FSM dan I/O (Hardware Abstraction Layer)
Debugging	Tambahkan state logging saat transisi
Kompleksitas tinggi	Pertimbangkan penggunaan FSM framework (misal: QP-nano dari Quantum Leaps)

# FSM Template

```
// ===== ENUM STATE =====  
enum State {  
    STATE_INIT,  
    STATE_IDLE,  
    STATE_ACQUIRE,  
    STATE_PROCESS,  
    STATE_COMMUNICATE,  
    STATE_ERROR  
};  
  
State currentState = STATE_INIT;  
  
// ===== TIMER UTILITY =====  
unsigned long stateTimer = 0;  
unsigned long interval = 1000;  
  
// ===== SETUP =====  
void setup() {  
    Serial.begin(115200);  
    delay(1000); // Waktu boot  
  
    // Inisialisasi awal sistem  
    initHardware();  
    currentState = STATE_IDLE;  
}
```

```
// ===== LOOP =====
void loop() {
  switch (currentState) {
    case STATE_IDLE:
      if (millis() - stateTimer > interval) {
        currentState = STATE_ACQUIRE;
        stateTimer = millis();
      }
      break;

    case STATE_ACQUIRE:
      if (acquireSensorData()) {
        currentState = STATE_PROCESS;
      } else {
        currentState = STATE_ERROR;
      }
      break;

    case STATE_PROCESS:
      processData();
      currentState = STATE_COMMUNICATE;
      break;

    case STATE_COMMUNICATE:
      communicateData();
      currentState = STATE_IDLE;
      stateTimer = millis();
      break;

    case STATE_ERROR:
      handleError();
      currentState = STATE_IDLE;
      break;

    default:
      currentState = STATE_ERROR;
      break;
  }
}
```

```
// ===== FUNGSI STATE =====
```

```
void initHardware() {  
    // Inisialisasi sensor, WiFi, atau lainnya  
    Serial.println("Inisialisasi selesai");  
}  
  
bool acquireSensorData() {  
    // Baca sensor  
    Serial.println("Membaca data sensor...");  
    // Return true jika berhasil  
    return true;  
}  
  
void processData() {  
    // Pemrosesan data, filtering, atau inferensi  
    Serial.println("Memproses data...");  
}  
  
void communicateData() {  
    // Kirim data via Serial, WiFi, MQTT, dsb.  
    Serial.println("Mengirim data...");  
}  
  
void handleError() {  
    Serial.println("Terjadi kesalahan!");  
    // Reset atau recovery  
}
```



# Real Time Operating System (RTOS)

- **RTOS (Real-Time Operating System)** adalah sistem operasi ringan yang dirancang untuk menjalankan *task* secara deterministik dalam sistem tertanam (embedded system).
- Berbeda dengan general-purpose OS (seperti Linux), RTOS menjamin bahwa proses tertentu selesai dalam *bounded time* atau waktu yang telah ditentukan—itulah mengapa disebut “real-time.”

## 1. Konsep Dasar RTOS

RTOS mengatur eksekusi berbagai task dengan fitur utama:

- **Task/Thread Scheduling**
- **Multitasking (Preemptive atau Cooperative)**
- **Inter-task Communication (Queue, Semaphore, Mutex)**
- **Time Management (Timers, Delay)**
- **Interrupt Handling**

Contoh RTOS populer:

- **FreeRTOS** (paling banyak digunakan dalam ESP32)
- Zephyr RTOS
- RT-Thread
- CMSIS-RTOS (untuk ARM Cortex-M)

## 2. Penggunaan RTOS dalam Embedded AI

Dalam konteks **Embedded AI**, RTOS memainkan peran penting dalam menjalankan berbagai tugas secara efisien, seperti:

### A. Inferensi AI + Sensor + Komunikasi

Bayangkan ESP32 menjalankan model AI (TFLite Micro), sambil:

- Mengambil data dari sensor
- Menjalankan pre-processing
- Melakukan inferensi AI
- Mengirim hasilnya via Wi-Fi/MQTT

RTOS memungkinkan semua ini berjalan sebagai task yang terpisah, **tanpa blocking** satu sama lain.

Komponen	Task di RTOS
Sensor	TaskSensorRead()
Preprocessing	TaskPreprocess()
AI Inference	TaskAIInference()
Komunikasi MQTT	TaskPublishMQTT()

## ✓ B. Manajemen Memori dan Waktu

AI model inference butuh buffer input/output besar. RTOS:

- Menyediakan alokasi memori statis (heap/task-local)
- Menjamin inferensi tidak terganggu oleh komunikasi atau input
- Mengatur waktu inferensi agar tidak melampaui *deadline*

## ✓ C. Low Power + Wake on Event

RTOS dapat mengatur sistem ke *sleep mode*, lalu bangun hanya saat:

- Interrupt sensor aktif (motion, suara, dll)
- Input data tersedia
- Inferensi perlu dijalankan

Contoh: Kamera dengan ESP32-CAM + AI hanya aktif saat gerakan terdeteksi.

## Fungsi `xTaskCreatePinnedToCore()`

- Fungsi ini adalah bagian dari **FreeRTOS** pada ESP32 yang digunakan untuk membuat dan menjalankan **task (thread)**, serta menetapkan task tersebut berjalan di core yang mana (ESP32 memiliki 2 core: core 0 dan core 1).



## Sintaks Umum

```
BaseType_t xTaskCreatePinnedToCore(  
    TaskFunction_t pvTaskCode,  
    const char * const pcName,  
    const uint32_t usStackDepth,  
    void *pvParameters,  
    UBaseType_t uxPriority,  
    TaskHandle_t *pvCreatedTask,  
    const BaseType_t xCoreID  
);
```

## Penjelasan Argumen

```
xTaskCreatePinnedToCore(TaskSensorFSM, "SensorTask", 2048, NULL, 1, NULL, 1);`
```

No	Argumen	Nilai	Fungsi
1	<code>pvTaskCode</code>	<code>TaskSensorFSM</code>	Fungsi yang akan dijalankan sebagai task (harus <code>void function(void* param)</code> dan infinite loop <code>while(1)</code> )
2	<code>pcName</code>	<code>"SensorTask"</code>	Nama task untuk debugging/logging

No	Argumen	Nilai	Fungsi
3	<code>usStackDepth</code>	<code>2048</code>	Ukuran stack task dalam <i>word</i> (1 word = 4 byte pada ESP32), berarti $2048 \times 4 =$ <b>8192 byte stack memory</b>
4	<code>pvParameters</code>	<code>NULL</code>	Parameter yang akan dikirim ke fungsi task. Bisa <code>NULL</code> jika tidak digunakan
5	<code>uxPriority</code>	<code>1</code>	Prioritas task (lebih besar = lebih prioritas)

No	Argumen	Nilai	Fungsi
6	<code>pvCreatedTask</code>	<code>NULL</code>	Alamat variabel untuk menyimpan handle task jika ingin mengontrol (suspend/resume/delete). Jika tidak perlu, isi <code>NULL</code>
7	<code>xCoreID</code>	<code>1</code>	Nomor core tempat task ini dijalankan: <code>0</code> = core 0 (proses utama) <code>1</code> = core 1 (biasanya untuk komunikasi/AI) <code>tskNO_AFFINITY</code> = bisa di mana saja

## ! Catatan Tambahan

- **ESP32 memiliki dua core:**
  - **Core 0:** untuk tugas utama dan Wi-Fi
  - **Core 1:** untuk tugas tambahan (rekomendasi untuk sensor, AI, dsb.)
- **Ukuran stack (2048)** harus cukup besar terutama untuk tugas berat seperti AI.
- **Prioritas (1)** lebih tinggi akan mendahului task lain dengan prioritas lebih rendah.

## Contoh Kasus

Jika Anda ingin:

- **TaskSensorFSM**: berjalan di core 1 untuk membaca sensor secara berkala
- **TaskInferenceFSM**: inferensi AI, diletakkan di core 0

Maka:

```
xTaskCreatePinnedToCore(TaskSensorFSM, "Sensor", 2048, NULL, 1, NULL, 1); // Core 1
xTaskCreatePinnedToCore(TaskInferenceFSM, "AI", 4096, NULL, 2, NULL, 0); // Core 0
```

### 3. Contoh FreeRTOS pada ESP32 + AI

```
void TaskSensorRead(void *pvParameters) {
    for (;;) {
        readSensor();
        vTaskDelay(100 / portTICK_PERIOD_MS);
    }
}

void TaskAIInference(void *pvParameters) {
    for (;;) {
        if (dataAvailable) {
            runInference();
        }
        vTaskDelay(200 / portTICK_PERIOD_MS);
    }
}

void setup() {
    xTaskCreatePinnedToCore(TaskSensorRead, "Sensor", 2048, NULL, 1, NULL, 1);
    xTaskCreatePinnedToCore(TaskAIInference, "Inference", 4096, NULL, 2, NULL, 1);
}
```

## 4. Manfaat RTOS untuk Embedded AI

Manfaat	Penjelasan
<b>Responsiveness</b>	Task inferensi AI tidak mengganggu task I/O
<b>Determinism</b>	Setiap task berjalan sesuai prioritas
<b>Resource Sharing</b>	RTOS membantu sinkronisasi antar task via queue/semaphore
<b>Multicore Support</b>	ESP32 + FreeRTOS: bisa assign task ke core tertentu
<b>Scalability</b>	Menambahkan lebih fitur tanpa membuat sistem menjadi blocking



## 5. Tantangan

- **Manajemen Memori** (AI + RTOS membutuhkan stack besar)
- **Prioritas Task yang salah** bisa menyebabkan jitter
- **Debugging multithreaded** lebih kompleks daripada single loop
- **Real-time guarantees** sulit dicapai dengan AI model yang besar

## Penggabungan FSM dan RTOS

RTOS	FSM
Menangani <i>task-level concurrency</i>	Menangani <i>internal logic per task</i>
Efisien untuk multitasking	Efisien untuk mengontrol alur status
Cocok untuk komunikasi antar modul	Cocok untuk manajemen alur di dalam 1 modul

➡ **Gabungan RTOS + FSM = multitasking sistem cerdas dengan kendali status yang rapi**



## Struktur Desain: FSM di dalam Task RTOS

```
TaskSensor()      → FSM: {INIT → ACQUIRE → IDLE}  
TaskInference()   → FSM: {WAIT_DATA → RUN_AI → REPORT}  
TaskCommunication()-> FSM: {CONNECT → PUBLISH → WAIT_ACK}
```

Setiap task FreeRTOS dapat memiliki FSM-nya sendiri, menggunakan `enum` dan `switch-case`.

# Contoh Implementasi FSM + RTOS pada ESP32

```

enum SensorState { SENSOR_INIT, SENSOR_READ, SENSOR_IDLE };
enum InferenceState { INFER_WAIT, INFER_RUN };

SensorState sensorState = SENSOR_INIT;
InferenceState inferenceState = INFER_WAIT;

void setup() {
    xTaskCreatePinnedToCore(TaskSensorFSM, "SensorTask", 2048, NULL, 1, NULL, 1);
    xTaskCreatePinnedToCore(TaskInferenceFSM, "InferenceTask", 4096, NULL, 2, NULL, 1);
}

void loop() {}

void TaskSensorFSM(void* pvParameters) {
    while (1) {
        switch (sensorState) {
            case SENSOR_INIT:
                Serial.println("Init sensor");
                sensorState = SENSOR_READ;
                break;

            case SENSOR_READ:
                temperature = dht.readTemperature();
                if (!isnan(temperature)) {
                    dataReady = true;
                    sensorState = SENSOR_IDLE;
                } else {
                    Serial.println("Read error");
                }
                break;

            case SENSOR_IDLE:
                vTaskDelay(5000 / portTICK_PERIOD_MS);
                sensorState = SENSOR_READ;
                break;
        }
        vTaskDelay(50 / portTICK_PERIOD_MS);
    }
}

void TaskInferenceFSM(void* pvParameters) {
    while (1) {
        switch (inferenceState) {
            case INFER_WAIT:
                if (dataReady) {
                    inferenceState = INFER_RUN;
                }
                break;

            case INFER_RUN:
                input->data.f[0] = temperature / 45.0;
                if (interpreter->Invoke() == kTfLiteOk) {
                    float result = output->data.f[0];
                    if (result < 0.3) Serial.println("NORMAL");
                    else if (result < 0.7) Serial.println("DEMAM RINGAN");
                    else Serial.println("DEMAM BERAT");
                }
                dataReady = false;
                inferenceState = INFER_WAIT;
                break;
        }
        vTaskDelay(100 / portTICK_PERIOD_MS);
    }
}
    
```