

BAB IV

PEMBUATAN ALAT

4.1 Pembuatan Prototype

Dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini, dibutuhkan metode perancangan yang sistematis dan terstruktur guna menghasilkan suatu sistem yang berfungsi secara optimal dan sesuai dengan tujuan. Bab ini akan membahas tahapan pembuatan alat secara menyeluruh, mulai dari proses perencanaan, pemilihan komponen, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, hingga integrasi sistem secara keseluruhan. Setiap tahapan yang dilalui memiliki keterkaitan erat dalam pengembangan sistem alat pembersih panel surya otomatis berbasis ESP32 ini. Secara umum, proses pembuatan alat dibagi menjadi dua tahapan utama, yaitu:

a. **Pembuatan Perangkat Keras (*Hardware*)**

Tahapan ini diawali dengan proses identifikasi kebutuhan komponen fisik yang akan digunakan dalam sistem, seperti mikrokontroler ESP32, sensor debu GP2Y1010AU0F, modul RTC, motor DC, driver motor TA6586, pompa air, dan limit switch. Selanjutnya dilakukan proses perancangan dan perakitan perangkat keras berdasarkan rancangan sistem yang telah disusun. Pembuatan perangkat keras ini menjadi aspek fundamental dalam realisasi alat karena seluruh proses pembersihan panel surya secara otomatis bergantung pada kerja dari masing-masing komponen yang terintegrasi dengan baik.

b. **Pembuatan Perangkat Lunak (*Software*)**

Tahapan ini mencakup seluruh proses pengembangan logika kendali alat yang akan diimplementasikan ke dalam mikrokontroler ESP32. Perangkat lunak dirancang untuk mengatur kerja sensor debu dan RTC sebagai input, serta mengendalikan motor penggerak wiper dan pompa air sebagai output, berdasarkan kondisi debu yang terdeteksi dan waktu pembersihan yang telah dijadwalkan. Selain itu, sistem

juga dilengkapi dengan konektivitas WiFi untuk mengirimkan data parameter debu dan aktivitas pembersihan ke platform cloud ThingSpeak sebagai data logger. Pengembangan program dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan struktur pemrograman yang mendukung efisiensi, modularitas, serta kemudahan dalam pengujian dan pengembangan lebih lanjut.

4.2 Alat dan Bahan

Dalam pelaksanaan proyek Tugas Akhir ini, diperlukan pemenuhan berbagai kebutuhan utama maupun pendukung yang berperan penting dalam keberhasilan pengembangan sistem. Proses identifikasi kebutuhan menjadi tahap awal yang esensial, karena berfungsi untuk menyusun daftar secara sistematis mengenai seluruh komponen dan sumber daya yang dibutuhkan dalam perancangan sistem alat pembersih panel surya otomatis berbasis ESP32. Kegiatan ini dilakukan guna memastikan bahwa seluruh elemen perangkat keras dan perangkat lunak yang dirancang dapat beroperasi sesuai dengan spesifikasi teknis serta tujuan dari penelitian. Hasil identifikasi ini akan menjadi acuan dalam tahap perancangan, pengadaan, serta perakitan komponen sehingga mendukung terciptanya sistem yang terintegrasi, fungsional, dan Penggunal.

Tabel 4. 1 Alat dan bahan Tugas Akhir

No	Nama	Jumlah
1	JST 6 PIN	2
2	JST 2 PIN	2
3	TERMINAL BLOCK 2 PIN	3
4	PIN HEADER MALE 16P	2
5	TA6585	1
6	KAPASITOR 100uF	4
7	KAPASITOR 0,1uF	2

8	RESISTOR 330 OHM	10
9	RESISTOR 10K OHM	3
10	LED 5MM	1
11	IRF540N	1
12	ESP32	1
13	POWER SUPPLY 12 V	1
14	DINAMO DC MOTOR 25GA-370 RS	1
15	POMPA MIYAKO WDP-200	1
16	WIPER KARET 0.6 x 35 CM	1
17	TABUNG MITSUBISHI L300	1
18	PILLOW BLOCK KP000 10MM BORE 10 MM	4
19	PULLEY 4 MM	1
20	SOLAR PANEL 100 WP	1
21	SENSOR GP2Y1010AUOF	1
22	LIMIT SWITCH	1
23	BRACKET SENSOR (BESI)	1
24	PULLEY 10 MM	1
25	MODUL RTC	1
26	BOX CONTROL IP65 200 x 120 x 75 MM	1
27	P CLAMP 10 MM	1
28	RANGKA DUDUKAN (BESI)	1
29	RANGKA WPER (BESI)	1

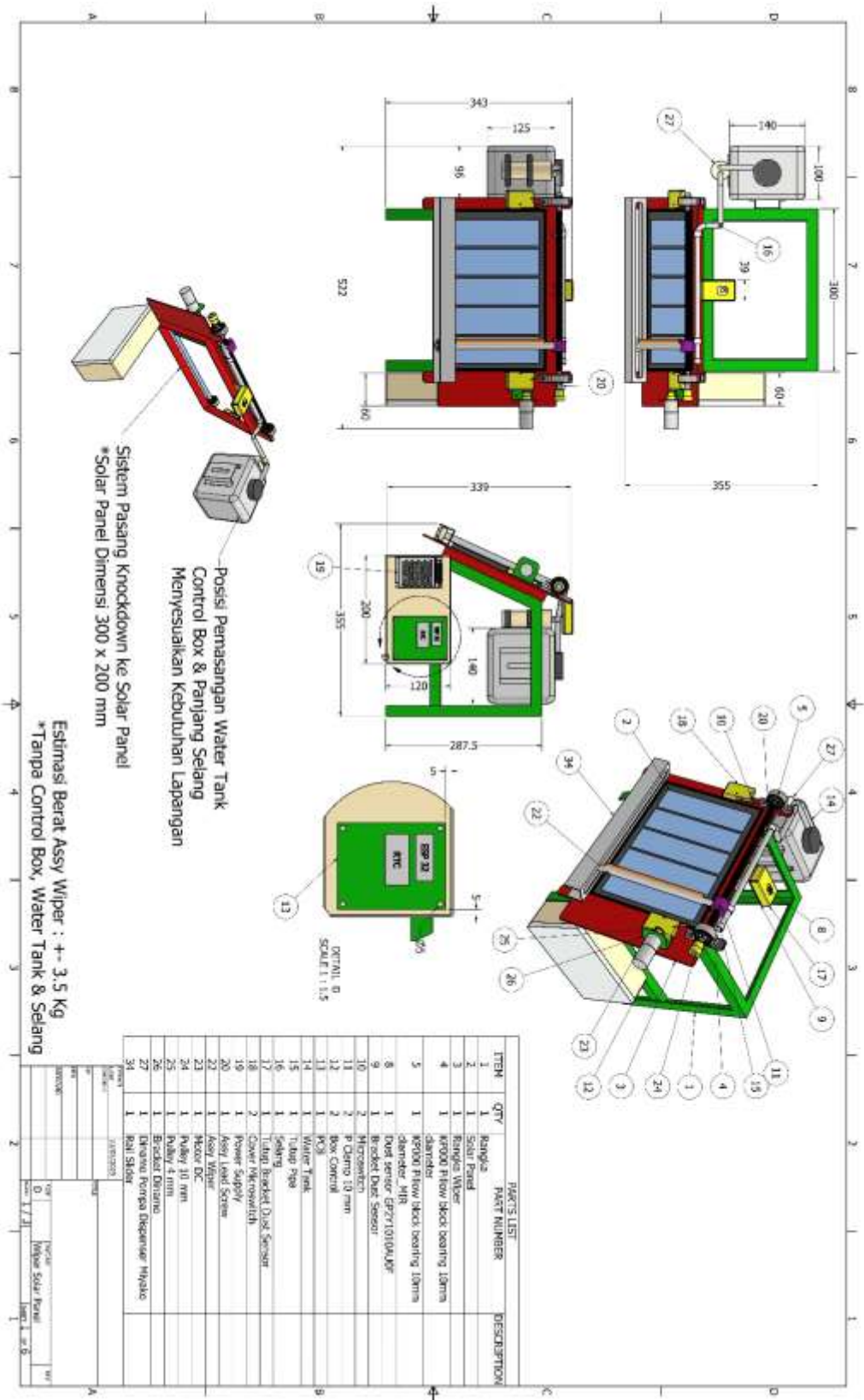
30	PCB	1
31	SELANG	1
32	ASSY LEAD SCREW	1
33	ASSY AS BAWAH	1
34	ASSY WIPER	1
35	BRACKET DINAMO (BESI)	1
36	MULTIMETER DIGITAL	1
37	SOLDER	1

4.3 Pembuatan Perangkat Keras

Setelah seluruh komponen perangkat keras berhasil dirakit dan diuji secara fungsional, langkah selanjutnya adalah merancang dan membuat struktur mekanik dari alat. Struktur ini berfungsi sebagai penopang panel surya, tempat Bergeraknya wiper, serta dudukan bagi seluruh komponen pendukung lainnya seperti motor, pompa, dan sensor. Perancangan rangka mekanik dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi panel surya, stabilitas sistem, serta efisiensi gerakan alat dalam proses pembersihan.

4.3.1 Perancangan Mekanik

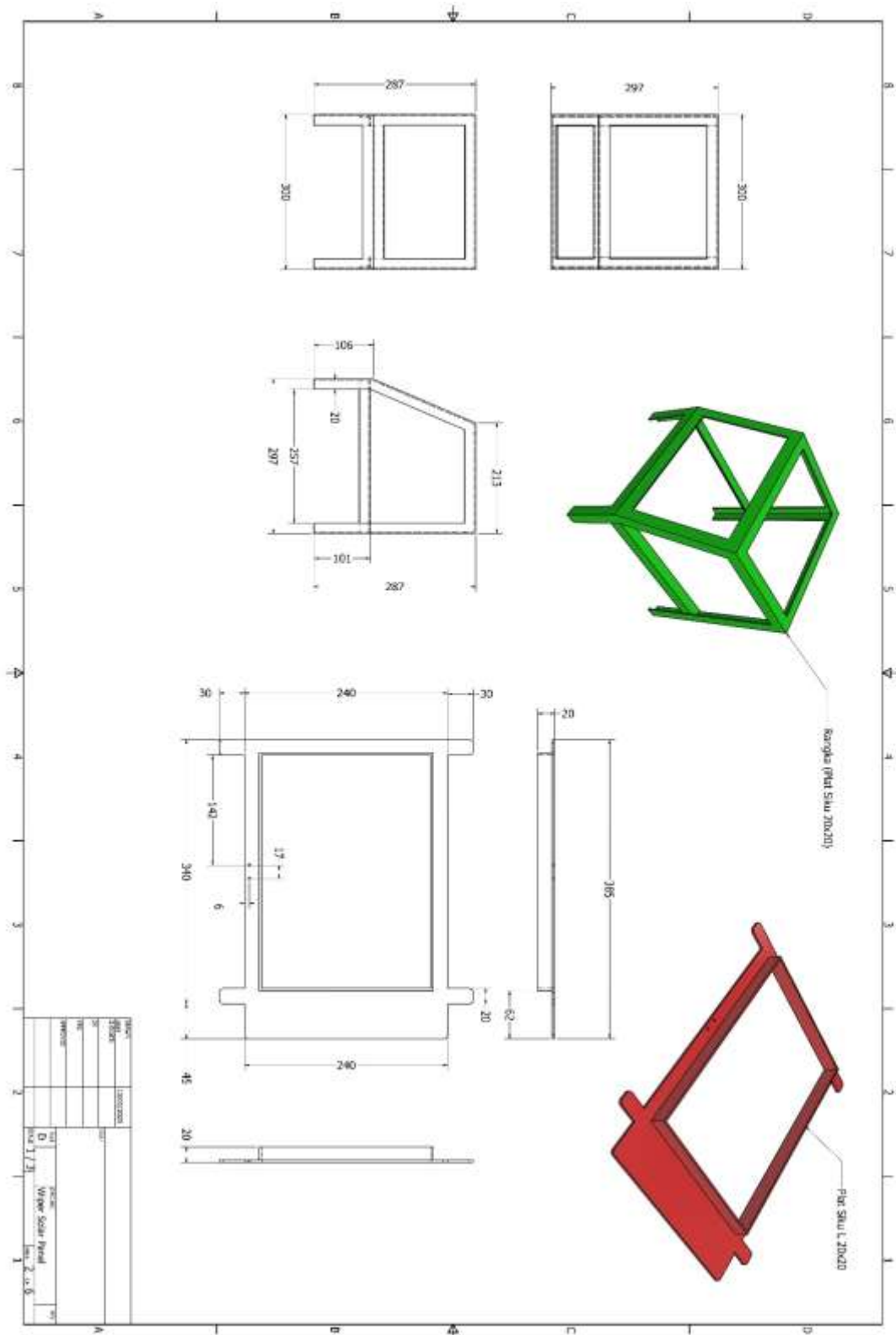
Pada Gambar 4.1 merupakan drawing detail Desain mekanik alat pembersih panel surya otomatis ini dirancang secara presisi dengan mempertimbangkan dimensi panel surya berukuran 300 mm × 200 mm.



Gambar 4. 1 Drawing detail

Rangka utama alat dibuat dari bahan ringan dan tahan terhadap korosi, serta menggunakan sistem knockdown untuk mempermudah proses perakitan maupun pembongkaran di lapangan. Rangka dirancang dengan sudut kemiringan sekitar 20° agar sesuai dengan sudut optimal penyerapan cahaya matahari dan memfasilitasi aliran air selama proses pembersihan.

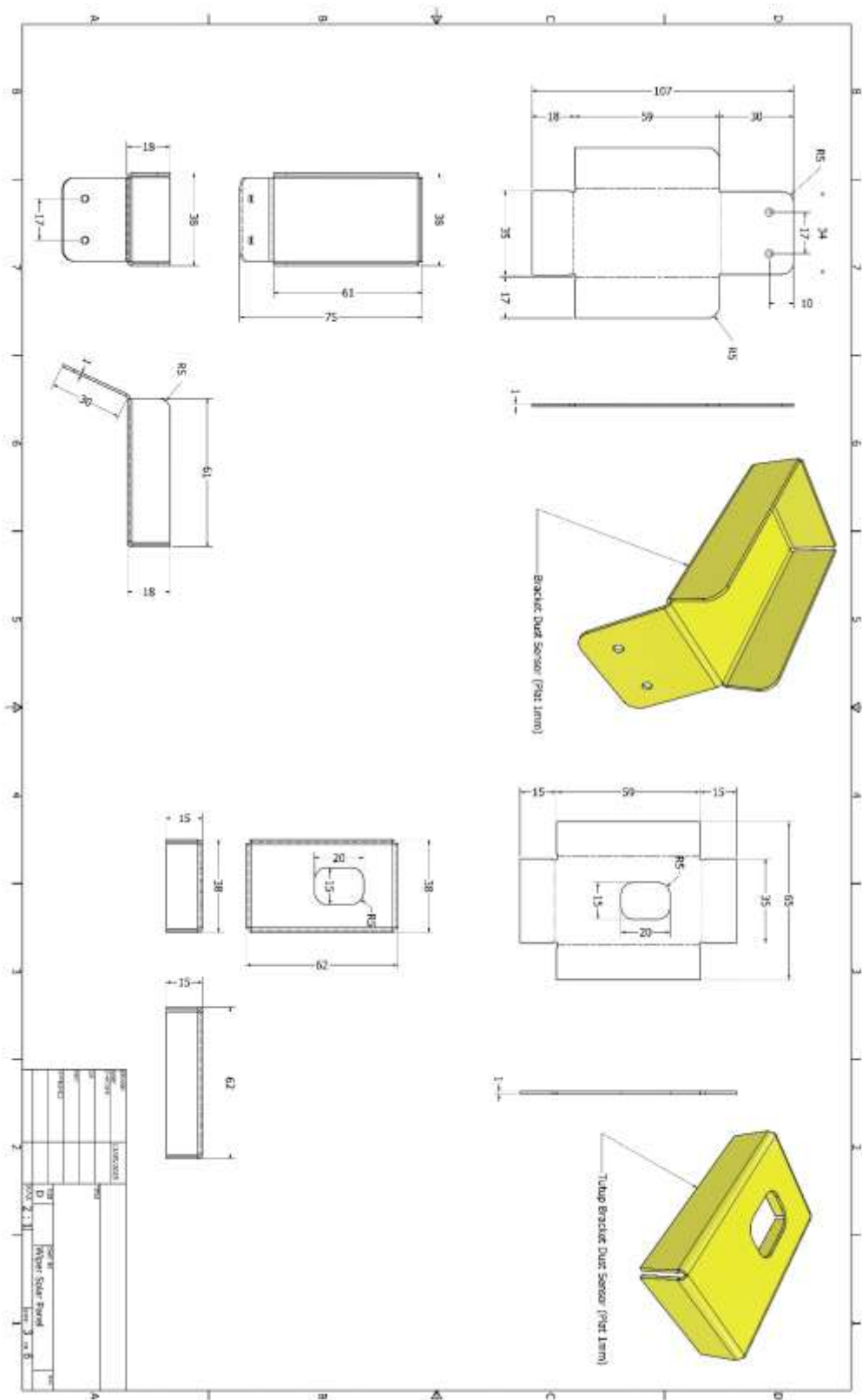
Sistem ini dilengkapi dengan komponen-komponen utama seperti motor DC



Gambar 4.2 di atas menunjukkan rancangan detail dari rangka utama alat pembersih panel surya otomatis. Rangka ini dirancang menggunakan material besi berbentuk siku berukuran 20×20 mm yang memiliki keunggulan dalam hal kekuatan struktur dan ketahanan terhadap beban, namun tetap efisien dari segi biaya dan kemudahan proses fabrikasi. Struktur rangka dirancang agar mampu menopang sistem panel surya beserta seluruh komponen pembersih seperti motor, pompa, tangki air, dan sensor dengan stabil.

Dimensi total dari rangka adalah $300 \text{ mm} \times 297 \text{ mm} \times 267 \text{ mm}$ dengan sudut kemiringan sekitar 20° untuk mengikuti sudut optimal pemasangan panel surya agar pencahayaan matahari maksimal. Rangka terdiri dari bagian vertikal, horizontal, serta bidang miring yang menopang permukaan panel. Di bagian atas terdapat rangka dudukan panel surya dari plat siku L yang juga berukuran 20×20 mm. Plat ini dirancang presisi dengan slot atau coakan di bagian samping yang berfungsi sebagai jalur lintasan dan dudukan komponen mekanik seperti wiper dan rel.

Setiap bagian rangka dibuat knockdown dan bisa dirakit menggunakan sambungan las ataupun sekrup, sehingga memudahkan proses transportasi dan instalasi di lapangan. Rancangan ini juga memperhitungkan ruang untuk pemasangan tangki air dan kotak kontrol elektronik di bagian bawah, yang akan mengakomodasi sistem semprotan kabut dan kontrol otomatis berbasis mikrokontroler. Rangka ini merupakan struktur utama yang memastikan kestabilan kerja sistem secara keseluruhan di lingkungan luar ruangan.



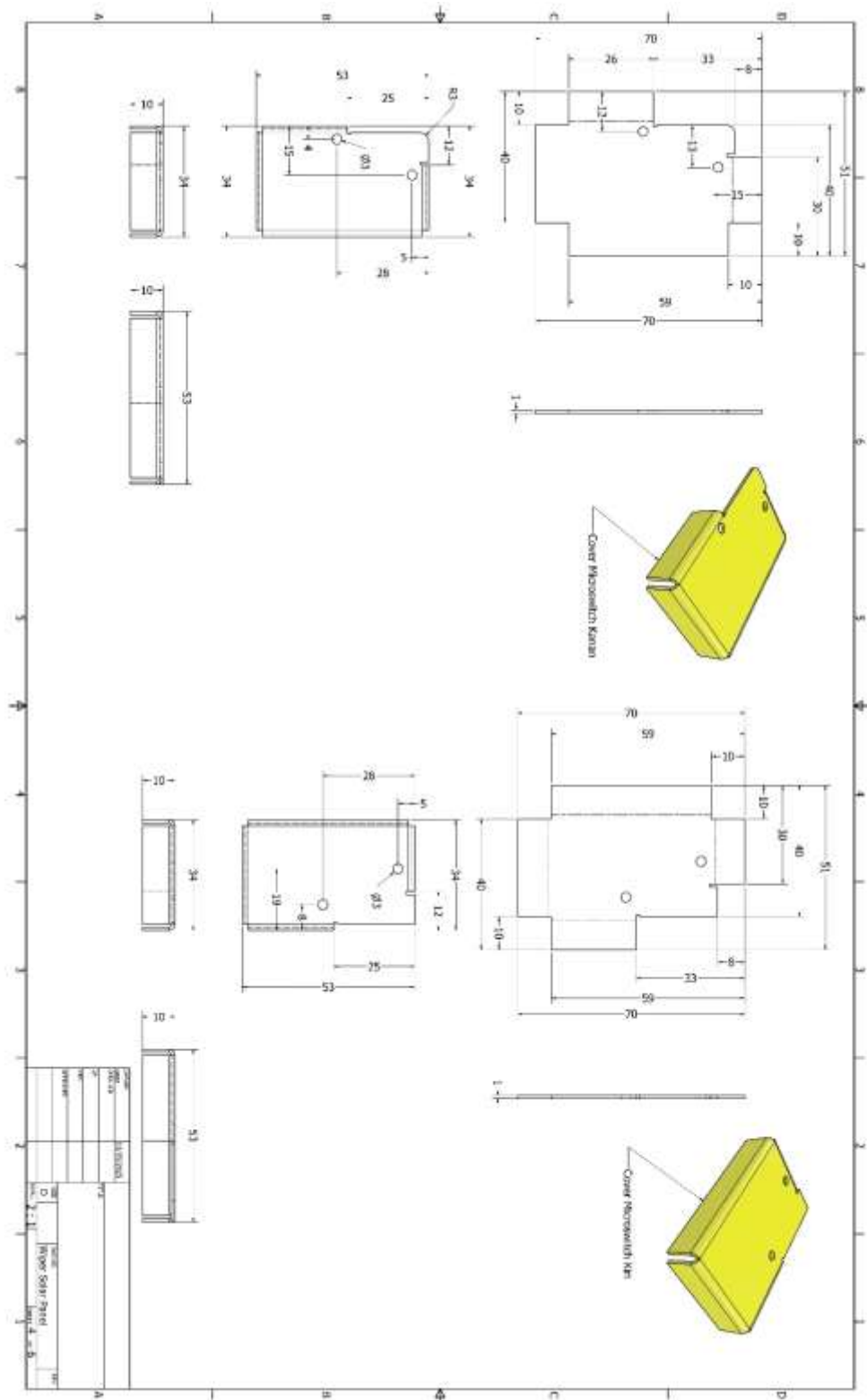
Gambar 4. 3 bracket sensor debu

Gambar 4.3 ini merupakan rancangan detail dari bracket sensor debu yang difungsikan sebagaiudukan pelindung sensor GP2Y1010AU0F pada alat pembersih panel surya otomatis. Bracket ini dibuat menggunakan bahan plat besi tipis dengan ketebalan 1 mm, yang memiliki kekuatan struktural cukup untuk menopang sensor sekaligus melindunginya dari paparan langsung air hujan atau semprotan dari nozzle saat proses pembersihan berlangsung.

Bagian utama dari bracket memiliki panjang 107 mm dan lebar 65 mm dengan beberapa lubang dan lengkungan untuk kebutuhan pemasangan sekrup dan penyelarasan sudut. Lubang berdiameter 15 mm disediakan pada tutup bagian atas untuk mengakomodasi aliran debu yang akan masuk ke sensor. Desain ini dilengkapi pula dengan coakan radius 5 mm di sudut-sudut untuk mencegah sudut tajam yang dapat membahayakan selama proses perakitan.

Gambar juga menampilkan bagian penutup bracket (tutup sensor) yang memiliki bentuk melengkung dan presisi sesuai dimensi sensor. Penutup ini difungsikan untuk menahan debu kasar serta percikan air yang dapat merusak pembacaan sensor. Semua bagian bracket ini diproses melalui pemotongan dan pelipatan plat menggunakan mesin bending, sehingga menghasilkan bentuk yang rapi, presisi, dan kokoh.

Rangkaian desain bracket ini dibuat dengan mempertimbangkan kemudahan pemasangan di rangka utama serta kemudahan penggantian atau perawatan sensor debu di kemudian hari. Dengan struktur sederhana namun efektif ini, sensor debu dapat berfungsi optimal dan terlindungi dalam sistem kerja luar ruangan.

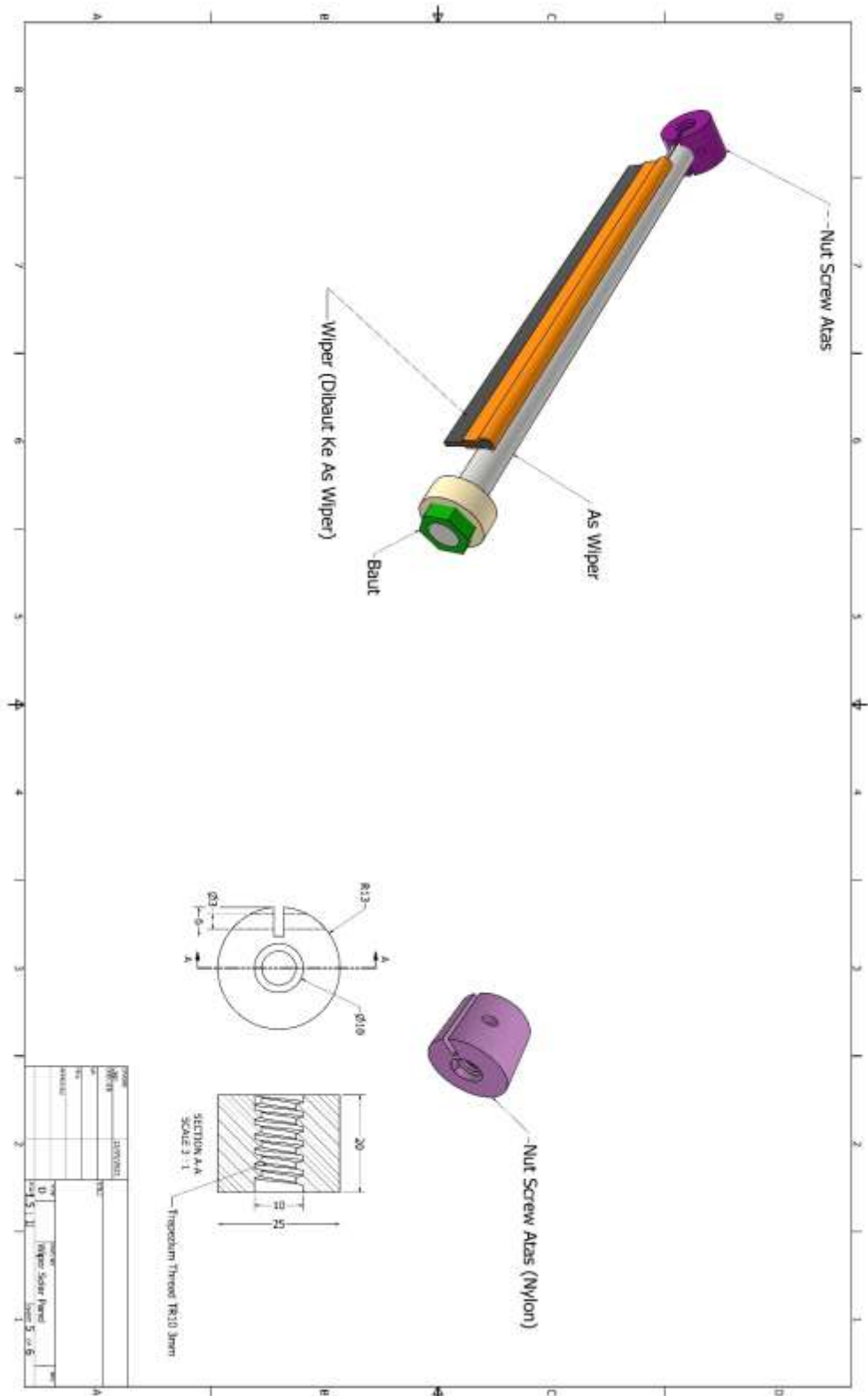


Gambar 4. 4 Cover Microswitch Kanan dan Kiri

Gambar 4.4 di atas merupakan detail rancangan dari komponen "Cover Microswitch Kanan dan Kiri" yang berfungsi sebagai pelindung sekaligus penyangga limit switch (microswitch) pada sistem pembersih panel surya otomatis. Komponen ini dirancang secara simetris untuk masing-masing sisi kiri dan kanan, dengan dimensi utama 70 mm x 51 mm x 15 mm. Terdapat beberapa lubang pemasangan dan slot penguncian yang telah disesuaikan dengan ukuran stPenggunan limit switch serta struktur rangka utama alat.

Bahan yang digunakan untuk pembuatan komponen ini adalah material hasil pencetakan 3D printing (filament PLA atau ABS), dipilih karena ringan, mudah dibentuk, serta presisi tinggi dalam mencetak bentuk yang kompleks dan kontur lengkung. Proses pembuatan menggunakan desain CAD 3D dan dicetak dalam dua bagian terpisah (kanan dan kiri), kemudian dipasang pada sisi ujung lintasan wiper yang dilengkapi dengan limit switch, untuk mendeteksi batas gerak dari penghapus.

Desain ini juga mempertimbangkan kemudahan perakitan dan pemeliharaan, karena cover dapat dilepas pasang dan tidak memerlukan sambungan tetap (fixed joint). Perlindungan terhadap limit switch dengan cover ini penting agar perangkat tidak terkena semprotan air secara langsung maupun debu berlebih, serta menjaga akurasi deteksi posisi wiper selama pengoperasian alat.



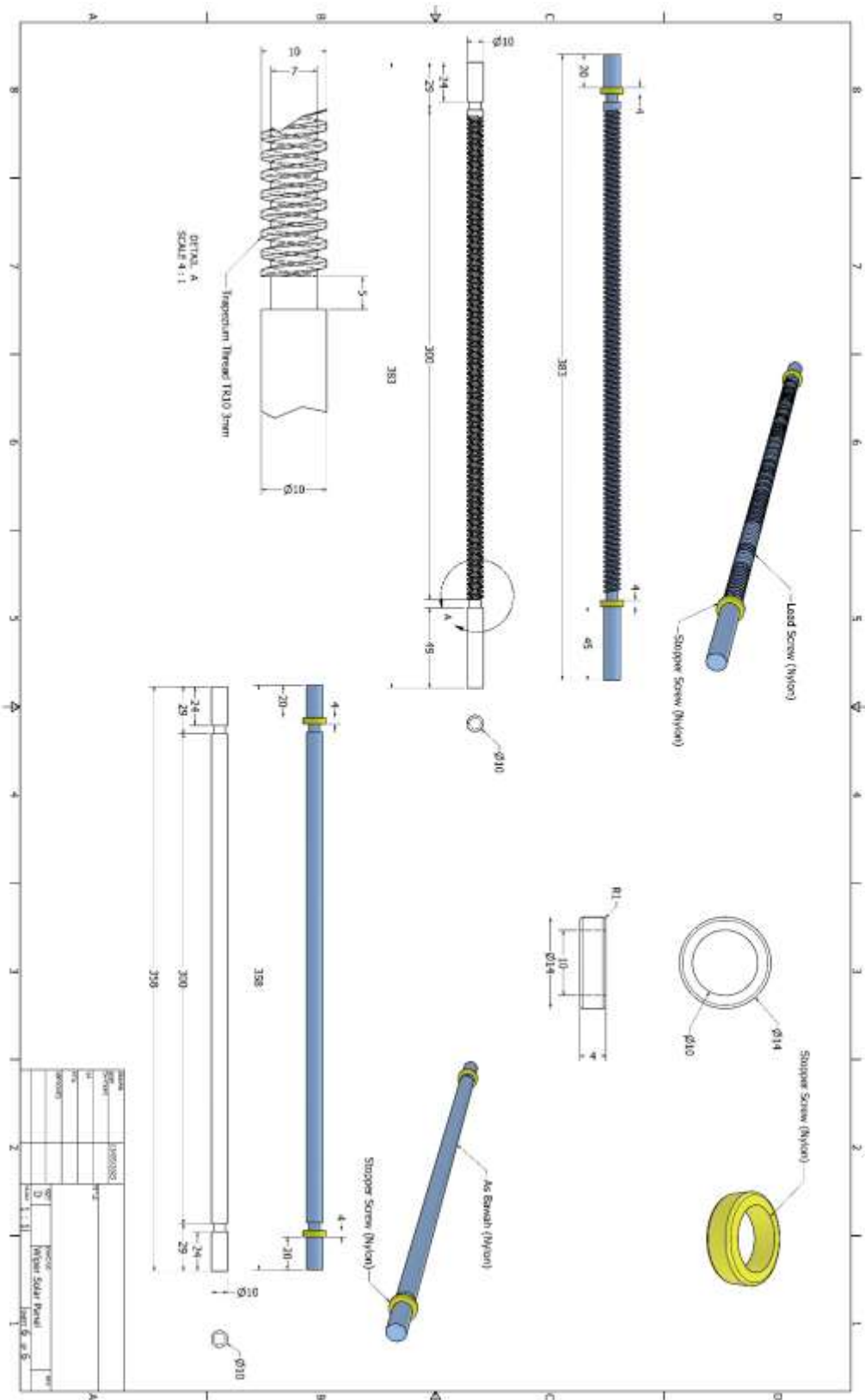
Gambar 4. 5 Dudukan Wiper

Gambar 4.5 di atas menunjukkan detail konstruksi dari Dudukan Wiper dan Komponen Nut Ulir pada sistem pembersih panel surya otomatis. Komponen utama yang ditampilkan adalah *Dudukan Wiper* berbahan plat besi tebal 1 mm, yang berfungsi sebagai tempat pemasangan batang wiper. Dudukan ini memiliki panjang total 222 mm dengan beberapa lubang pemasangan yang telah disesuaikan untuk sistem penggerak dan penyambungan ke poros penggerak (lead screw).

Di kedua ujung dudukan wiper dipasangkan komponen berwarna ungu yaitu Nut Screw Atas dan Bawah, yang berbahan nylon. Komponen ini berperan sebagai rumah ulir (nut) untuk mur trapezium (TR10, pitch 3 mm) yang memungkinkan konversi gerakan putar motor menjadi gerakan translasi linier wiper. Nylon dipilih sebagai bahan karena memiliki sifat ringan, tahan aus, serta mampu mereduksi gesekan dengan efisien.

Gambar ini juga memperlihatkan *cross-section* dan profil ulir trapezium secara teknis, menunjukkan detail ukuran dan bentuk ulir serta sistem penjepit antara dudukan wiper dan mur ulir. Desain ini mendukung kestabilan pergerakan wiper saat membersihkan permukaan panel, dan mudah dirakit karena menggunakan sistem sekrup bawah dan atas.

Kombinasi penggunaan besi untuk struktur utama dan nylon untuk bagian bergerak menciptakan sistem yang kokoh namun tetap presisi dan ringan, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi otomatisasi pembersihan panel surya yang memerlukan gerakan linier halus dan akurat.



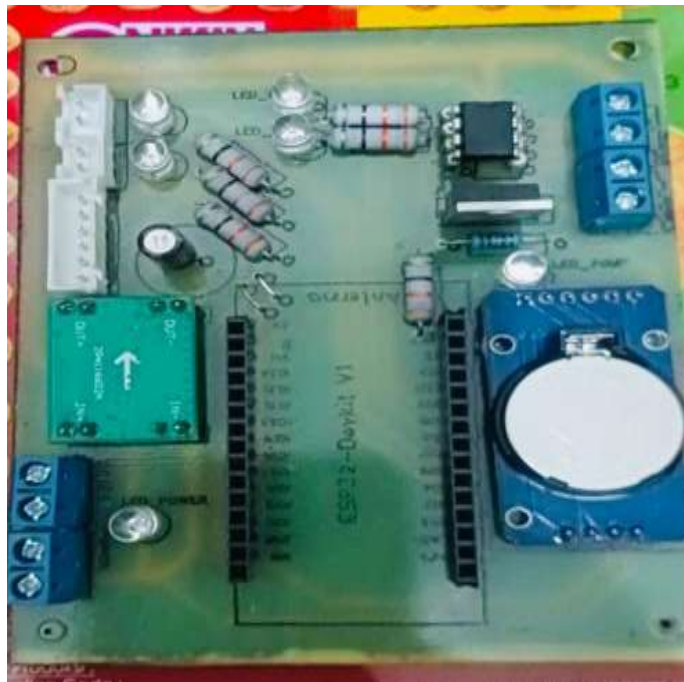
Gambar 4. 6 komponen penggerak linier

sistem pembersih panel surya otomatis

Gambar 4.6 menampilkan detail komponen penggerak linier pada sistem pembersih panel surya otomatis yang seluruhnya menggunakan bahan dasar nylon. Komponen utama terdiri dari lead screw dan as bawah berdiameter 10 mm dengan panjang total 383 mm, di mana lead screw menggunakan ulir trapezium TR10 dengan pitch 3 mm untuk mentransmisikan gerakan putar dari motor menjadi gerakan linier pada sistem wiper. Di kedua ujung lead screw dan as bawah, terpasang stopper screw berbahan nylon dengan diameter luar 14 mm dan diameter dalam 10 mm yang berfungsi sebagai pembatas gerak dan penahan axial agar posisi lead screw tetap stabil saat beroperasi. Detail A pada gambar menunjukkan penampang ulir trapezium yang dirancang presisi untuk berpadu dengan mur trapezium padaudukan wiper. Kombinasi bentuk ulir presisi dan material nylon memberikan keunggulan dalam hal bobot ringan, minim gesekan, dan keausan rendah. Keunggulan lain dari bahan nylon yang digunakan adalah tahan terhadap korosi, mudah diproses, tidak memerlukan pelumasan rutin, serta menghasilkan pergerakan yang halus dan senyap, menjadikannya ideal untuk aplikasi luar ruangan seperti sistem pembersih panel surya yang membutuhkan kestabilan dan presisi tinggi dalam pergerakan linier.

4.3.2 Perancangan Elektrik

Perancangan elektrikal pada alat pembersih panel surya otomatis ini dilakukan dengan menggunakan sebuah papan PCB (*Printed Circuit Board*) yang dirancang secara khusus untuk menampung dan mengintegrasikan seluruh komponen elektronik utama ke dalam satu rangkaian yang rapi dan efisien.



Gambar 4. 7 penempatan komponen

Pada gambar 4.7 Penempatan komponen disusun dengan memperhatikan kemudahan perakitan, efisiensi ruang, serta kePenggunaan dalam proses operasional jangka panjang.

Komponen utama yang digunakan dalam sistem ini antara lain adalah mikrokontroler ESP32 Devkit V1 yang diletakkan di bagian tengah bawah PCB dengan menggunakan soket female header. Penggunaan header ini bertujuan agar modul ESP32 dapat dilepas pasang dengan mudah tanpa perlu disolder ulang. Di sisi kanan bawah PCB, terpasang modul RTC DS3231 yang berfungsi sebagai penentu waktu agar alat dapat bekerja secara otomatis pada jam-jam tertentu sesuai pemrograman. Modul ini terintegrasi melalui jalur I2C yang sudah tersedia di papan.

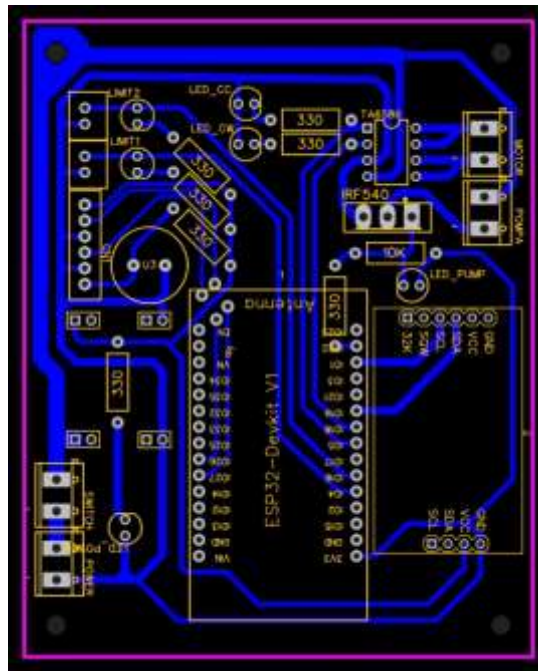
Pada bagian kiri bawah PCB terdapat modul relay yang digunakan untuk mengatur ON/OFF pompa air melalui sinyal logika dari mikrokontroler. Relay ini terhubung dengan terminal screw block yang diletakkan di sisi kiri PCB untuk koneksi ke motor DC penggerak pompa air. Terminal block juga digunakan untuk sambungan ke sumber daya

eksternal dan output-output lainnya. Di beberapa bagian papan juga dipasang LED indikator sebagai penPengguna status power serta aktivitas dari sistem, seperti ketika relay aktif atau sistem mendapatkan tegangan. Selain itu, sejumlah resistor, kapasitor, dan komponen pasif lainnya dipasang di sekitar jalur logika dan IC untuk menunjang kestabilan sinyal dan sistem secara keseluruhan.

Proses perakitan dimulai dengan pemasangan komponen pasif seperti resistor dan kapasitor, dilanjutkan dengan pemasangan soket, terminal, dan modul. Setelah seluruh komponen terpasang, dilakukan pengujian awal dengan program sederhana untuk memastikan semua jalur dan fungsi bekerja dengan baik.

4.4 Perancangan PCB

Untuk menunjang kerapian dan efisiensi dalam pemasangan komponen elektronik, sistem pembersih panel surya otomatis ini dirancang menggunakan Printed Circuit Board (PCB) khusus.



Gambar 4. 8 Desain PCB

Gambar 4.8 merupakan desain PCB dari alat sistem pembersih panel surya otomatis berbasis esp32 dengan deteksi partikulat debu pm2.5 sesuai baku mutu pp no. 22 tahun 2021 dan penjadwalan rutin, PCB tersebut berfungsi sebagai wadah integrasi dari seluruh komponen utama sistem yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 Devkit V1.

Pada papan PCB, terdapat dudukan khusus untuk ESP32 yang terhubung ke berbagai input seperti sensor debu GP2Y1010AU0F, modul RTC DS3231, serta limit switch sebagai deteksi batas gerakan wiper. Jalur-jalur PCB telah dirancang agar sinyal dari masing-masing sensor dapat langsung masuk ke pin digital atau analog ESP32 sesuai dengan kebutuhan pembacaan.

Untuk aktuator, PCB ini juga mengatur jalur kendali ke motor DC melalui modul driver TA6586, dan ke pompa air melalui MOSFET IRF540 yang dikontrol dengan sinyal digital dari ESP32. Masing-masing perangkat dilengkapi dengan resistor pull-down dan indikator LED untuk memudahkan proses troubleshooting dan pengecekan status sistem secara visual.

Selain itu, terdapat koneksi I2C (SDA dan SCL) di bagian bawah PCB untuk mendukung komunikasi dengan modul RTC, serta terminal output untuk koneksi ke motor, pompa, dan power supply eksternal. Keseluruhan desain PCB dibuat agar mempermudah proses perakitan dan memperkecil risiko kesalahan dalam instalasi kabel.

Dengan penggunaan PCB ini, sistem menjadi lebih ringkas, rapi, dan memiliki tingkat kePenggunaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan rangkaian konvensional menggunakan kabel jumper.

4.5 Pembuatan Perangkat Lunak

Setelah perangkat keras sistem dirakit, tahap berikutnya adalah pembuatan perangkat lunak yang menjadi inti pengendalian sistem secara otomatis. Pemrograman mikrokontroler dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan board ESP32 Dev Module, yang dipilih karena kompatibilitasnya dengan ESP32 serta kemudahan dalam menulis dan mengunggah program melalui antarmuka yang sederhana. Program dikembangkan dengan logika utama yang memanfaatkan beberapa library penting seperti `RTClib.h` untuk pengelolaan waktu, `WiFi.h` untuk konektivitas jaringan, dan `ThingSpeak.h` untuk pengiriman serta pemantauan data secara daring, sehingga seluruh proses pengolahan data sensor hingga pengaktifan aktuator dapat berjalan secara efisien dan terintegrasi sesuai skenario yang dirancang.

4.5.1 Inisialisasi Sistem

Agar sistem dapat bekerja secara optimal dan sesuai dengan fungsi yang diharapkan, diperlukan proses awal yang disebut dengan inisialisasi. Proses ini bertujuan untuk menyiapkan setiap komponen agar berada dalam kondisi siap operasi, baik dari sisi perangkat lunak seperti konfigurasi pin, pengaturan komunikasi data, maupun dari sisi perangkat keras seperti penyaluran daya dan pengecekan status awal sensor dan aktuator.



Gambar 4. 9 Inisialisasi Sistem

Pada Gambar 4.9 fungsi `setup()`, dilakukan inisialisasi pin input dan output untuk berbagai komponen seperti sensor debu (pin analog), motor penggerak (melalui driver), pompa air (via pin digital), serta LED indikator WiFi. Selain itu, sistem melakukan koneksi awal ke WiFi dan inisialisasi komunikasi dengan RTC dan ThingSpeak.

4.5.2 Konfigurasi RTC

Salah satu komponen penting dalam sistem pembersih panel surya otomatis berbasis mikrokontroler adalah modul Real-Time Clock (RTC), dalam hal ini menggunakan RTC DS3231. Modul ini berfungsi sebagai penentu waktu yang akurat, sehingga proses pembersihan dapat dilakukan secara terjadwal tanpa perlu intervensi manual. Agar RTC dapat berfungsi sebagaimana mestinya, diperlukan proses inisialisasi perangkat lunak pada saat sistem pertama kali dijalankan. Inisialisasi ini meliputi konfigurasi komunikasi I2C, pembacaan waktu, serta pengaturan waktu awal apabila diperlukan. Langkah inisialisasi RTC menjadi krusial untuk menjamin ketepatan waktu operasional sistem dan sinkronisasi dengan proses lainnya.

Penjelasan lebih rinci mengenai inisialisasi perangkat lunak RTC DS3231 disampaikan pada bagian berikut.



Gambar 4. 10 Konfigurasi RTC

Pada Gambar 4.10 Modul RTC DS3231 digunakan sebagai sumber waktu utama dalam sistem untuk mendukung penjadwalan otomatis pembersihan panel surya pada pukul 04.00 dan 19.00 WIB. Pada saat inisialisasi sistem, RTC terlebih dahulu dicek statusnya melalui fungsi `rtc.begin()`, dan apabila ditemukan kehilangan daya, sistem akan memberikan peringatan untuk melakukan sinkronisasi ulang waktu. Sinkronisasi waktu dilakukan secara otomatis dengan mengambil waktu dari server NTP (*Network Time Protocol*) melalui koneksi internet, kemudian disesuaikan ke dalam RTC menggunakan fungsi `rtc.adjust()`. Setelah tersinkron, RTC memberikan waktu aktual kepada ESP32 yang dibaca secara berkala menggunakan `rtc.now()`, dan dibandingkan dengan logika waktu dalam program untuk menentukan kapan sistem harus memicu proses pembersihan.

4.5.3 Konfigurasi Sensor Debu GP2Y1010AU0F

Sensor debu GP2Y1010AU0F digunakan untuk memantau tingkat kekotoran di sekitar panel surya melalui pembacaan partikel debu di debu. Inisialisasi perangkat lunak dilakukan dengan mengatur pin ADC ESP32 untuk membaca output analog sensor serta mengatur pin kontrol LED internal sebagai pemicu pembacaan data. Nilai tegangan analog dikonversi menjadi konsentrasi debu menggunakan rumus kalibrasi, kemudian

disimpan dalam variabel dan dibandingkan dengan ambang batas untuk menentukan kebutuhan pembersihan otomatis.



```

// Sensor debu
digitalWrite (ledPower, LOW);
delayMicroseconds (samplingTime);
voltage = analogRead (analogIn);
delayMicroseconds (deltaTime);
digitalWrite (ledPower, HIGH);
delayMicroseconds (sleepTime);

calcVoltage = vMeasured * (3.3 / 4095.0);
dustDensity = 170 * calcVoltage - 0.1;
if (dustDensity < 0) dustDensity = 0;

Serial.println ("Debu: ");
Serial.print (dustDensity);
Serial.println (" ug/m3");

//static bool dustThreshold1 = false;
//static bool dustThreshold2 = false;

if (digitalRead (14) == LOW) {
  dustThreshold1 = true;
}
if (digitalRead (17) == LOW) {
  dustThreshold2 = true;
}

```

Gambar 4. 11 Konfigurasi Sensor Debu

Pada Gambar 4.11 Sensor debu GP2Y1010AU0F dikontrol dengan mengaktifkan LED internal sensor selama waktu sampling (280 mikrodetik), lalu membaca nilai tegangan analog dan mengkonversikannya menjadi konsentrasi partikel PM2.5 menggunakan rumus:

$$\text{calcVoltage} = \text{voMeasured} * (3.3 / 4095.0);$$

$$\text{dustDensity} = 170 * \text{calcVoltage} - 0.1;$$

Hasil pembacaan ini akan dibandingkan dengan ambang batas DUST_INTENSITY 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk menentukan apakah panel perlu dibersihkan.

4.5.4 Logika Trigger Pembersihan

Logika trigger pembersihan mengatur kapan sistem melakukan pembersihan otomatis berdasarkan dua kondisi: waktu terjadwal dan tingkat debu. Jika waktu dari RTC menunjukkan jadwal tertentu pukul 07.00 atau dengan konsentrasi debu dari sensor melebihi ambang batas, maka sistem mengaktifkan aktuator pembersih. Evaluasi dilakukan secara berkala dalam loop program untuk memastikan panel tetap bersih secara efisien.

```

PROGRAM LOGIC_FINAL_NEW

// Reset trigger otomatis hanya pada awal jam
static int jendBelumnya = -1;
if (now.hour() != jendBelumnya) {
    sudahBersihIni = false;
    jendBelumnya = now.hour();
}

DOF_INTERRUPT = 0;

// Trigger otomatis jam 0 dan jam 19
if ((now.hour() == 0 || now.hour() == 19) && (sudahBersihIni == false)) { dofInterrupt = DOF_INTERRUPT; }
TRIGGER = HIGH;
if (now.hour() == 0 || now.hour() == 19) sudahBersihIni = true;
} else {
    TRIGGER = LOW;
}

```

Gambar 4. 12 Logika Trigger Pembersih

Pada Gambar 4.12 Logika pemicu pembersihan otomatis pada sistem ini berdasarkan dua kondisi utama, yaitu nilai konsentrasi debu PM2.5 dan waktu terjadwal. Pembersihan akan aktif secara otomatis apabila sensor mendeteksi nilai PM2.5 melebihi ambang batas $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atau saat waktu menunjukkan pukul 04.00 atau 19.00 WIB sesuai jadwal yang ditetapkan. Untuk mencegah aktivasi berulang dalam satu jam yang sama, sistem menggunakan logika pengecekan jam sebelumnya dengan variabel penanda. Saat salah satu kondisi tersebut terpenuhi, sistem akan mengaktifkan aktuator untuk memulai proses pembersihan panel surya.

4.5.5 Kontrol Gerakan Wiper

Kontrol gerakan wiper dilakukan menggunakan motor DC 25GA yang digerakkan melalui sinyal PWM dan dikontrol arah putarannya menggunakan driver motor.

```

switch (arahwiper) {
    case MAJU:
        digitalWrite(18, HIGH); digitalWrite(19, LOW); digitalWrite(23, HIGH); break;
    case MUNDUR:
        digitalWrite(18, LOW); digitalWrite(19, HIGH); digitalWrite(23, HIGH); break;
    case DITAM:
        digitalWrite(18, LOW); digitalWrite(19, LOW); digitalWrite(23, LOW); break;
}

```

Gambar 4. 13 Kontrol Gerakan Wiper

Pada Gambar 4.13 Kontrol gerak wiper pada sistem ini diatur berdasarkan logika arah gerak dan umpan balik dari dua buah limit switch. Ketika sistem menerima sinyal pemicu (trigger), wiper akan bergerak maju hingga menyentuh limit switch pertama, yang kemudian akan mengubah arah gerak menjadi mundur secara otomatis. Setelah mencapai limit switch kedua, wiper akan berhenti sepenuhnya. Selama proses gerak maju dan

mundur berlangsung, pompa air turut diaktifkan untuk menyemprotkan air ke permukaan panel. Pengaturan arah gerak motor dilakukan menggunakan perintah logika digital melalui dua pin kontrol arah dan satu pin untuk menghidupkan pompa. Dengan mekanisme ini, sistem pembersihan berjalan satu siklus penuh setiap kali kondisi pembersihan terpenuhi, baik dari nilai PM2.5 maupun penjadwalan waktu.

4.5.6 Pengendalian Pompa Air

Pompa air dikendalikan oleh mikrokontroler melalui sinyal digital. Saat proses pembersihan dimulai, mikrokontroler mengaktifkan pompa untuk menyemprotkan air ke permukaan panel surya dalam durasi tertentu.

```

        digitalWrite(18, HIGH);
        digitalWrite(19, LOW);
        digitalWrite(23, HIGH);
        break;
    case MUNDUR:
        digitalWrite(19, HIGH);
        digitalWrite(18, LOW);
        digitalWrite(23, HIGH);
        break;
    case DIAM:
        digitalWrite(18, LOW);
        digitalWrite(19, LOW);
        digitalWrite(23, LOW);
        break;
}

```

Gambar 4. 14 Pengendalian Pompa Air

Pada Gambar 4.14 Pompa air diaktifkan secara bersamaan dengan pergerakan wiper selama proses pembersihan berlangsung. Sinkronisasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa permukaan panel surya dalam keadaan basah saat wiper bergerak, sehingga kotoran lebih mudah terangkat dan hasil pembersihan menjadi lebih optimal. Mikrokontroler mengatur aktivasi pompa dan motor penggerak wiper

secara paralel dalam durasi tertentu, kemudian keduanya dimatikan secara bersamaan setelah proses pembersihan selesai.

4.5.7 Pengiriman Data ke ThingSpeak

Pengiriman data ke ThingSpeak dilakukan melalui koneksi WiFi yang terhubung ke ESP32. Data yang dikirim meliputi waktu, nilai konsentrasi debu, serta status pembersihan. Mikrokontroler mengemas data dalam format HTTP GET request dan mengirimkannya secara berkala ke server ThingSpeak menggunakan API key yang telah ditentukan. Proses ini memungkinkan pemantauan kondisi panel surya secara real-time melalui platform IoT berbasis web.

```

PROGRAM LOGIC_FINAL_SDIANO
// Realtime Kirim semua field tiap 15 detik
if (millis() - lastRealtimeUpdate >= realtimeInterval) {
    lastRealtimeUpdate = millis();

    String statusWiper = (arahwiper == DIAM) ? "0" : "1";

    ThingSpeak.setField(2, dustDensity);
    ThingSpeak.setField(3, statusWiper);

    if (kirimBuffer) {
        ThingSpeak.setField(1, bufferJam);
        ThingSpeak.setField(4, bufferCounter);
        kirimBuffer = false;
        Serial.println("✓ Buffer Field 1 & 4 dikirim");
    }

    int status = ThingSpeak.writeFields(CHANNEL_ID, CHANNEL_API_KEY);
    if (status == 200) {
        Serial.println("✓ Semua field terkirim");
    } else {
        Serial.print("✗ Gagal Kirim. Code: ");
        Serial.println(status);
    }
}

delay(1000);
}

```

Gambar 4. 15 Pengiriman Data ke ThingSpeak

Pada Gambar 4.15 Sistem mengirimkan data ke platform ThingSpeak secara otomatis setiap kali proses pembersihan dimulai dan diakhiri. Saat wiper mulai bergerak, sistem mencatat waktu aktivasi, nilai PM2.5, dan status alat dalam kondisi aktif. Sebaliknya, ketika wiper berhenti, status alat diperbarui menjadi tidak aktif, dan jumlah total siklus pembersihan dicatat. Pengiriman data dilakukan menggunakan metode `setField()` untuk masing-masing parameter, kemudian dikirim ke

ThingSpeak melalui `writeFields()`. Dengan metode ini, data aktivitas sistem dapat dipantau secara real-time melalui platform cloud, sekaligus mendukung dokumentasi historis alat tanpa perlu penyimpanan lokal tambahan.