

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas pengolahan data yang diperoleh dari hasil perancangan dan pengujian sistem kontrol PID untuk pengisian baterai *lithium-ion* 18650 pada *Solar Charge Controller*. Pengolahan data mencakup analisis kestabilan sistem terhadap perubahan input, proses perpindahan dari *mode Constant Current* (CC) ke *Constant Voltage* (CV), waktu pengisian baterai, serta pengujian keamanan tegangan. Pada bagian pembahasan dijelaskan hasil yang diperoleh dari sistem yang telah dirancang dan diuji dengan mengacu pada teori serta literatur yang relevan. Data hasil pengujian digunakan untuk menilai kinerja sistem, sedangkan aspek yang tidak dapat diukur secara kuantitatif dijelaskan berdasarkan hasil pengamatan selama proses pengujian.

4.1 Studi Literatur

Berdasarkan hasil studi literatur yang telah dilakukan, metode *Constant Current-Constant Voltage* (CC-CV) merupakan metode pengisian yang sesuai untuk baterai *Lithium-Ion* karena mampu mengatur proses pengisian berdasarkan kondisi arus dan tegangan baterai. Pada tahap awal pengisian, metode *Constant Current* (CC) mempertahankan arus pengisian pada nilai tertentu hingga tegangan baterai mendekati batas yang ditentukan. Selanjutnya, sistem beralih ke metode *Constant Voltage* (CV) untuk mempertahankan tegangan baterai pada nilai tertentu dengan menurunkan arus pengisian secara bertahap. Berdasarkan kajian tersebut, metode CC-CV digunakan sebagai dasar pengaturan proses pengisian baterai *Lithium-Ion* 18650 agar berlangsung secara terkontrol dan mengurangi risiko *overcharging*.

Hasil studi literatur mengenai penerapan kontrol PID menunjukkan bahwa kontrol ini dapat digunakan untuk menjaga keluaran sistem agar tetap mendekati nilai *setpoint*. Penggunaan panel surya sebagai sumber energi menyebabkan tegangan dan arus masukan dapat berubah mengikuti kondisi intensitas cahaya. Oleh karena itu, kontrol PID digunakan untuk mengatur keluaran *Solar Charge*

Controller berdasarkan nilai kesalahan antara hasil pembacaan sensor dan *setpoint*. Dari hasil kajian tersebut, diperoleh parameter utama yang dikendalikan pada sistem, yaitu arus pengisian sebesar 1 A pada mode CC dan tegangan sebesar 4,2 V pada mode CV.

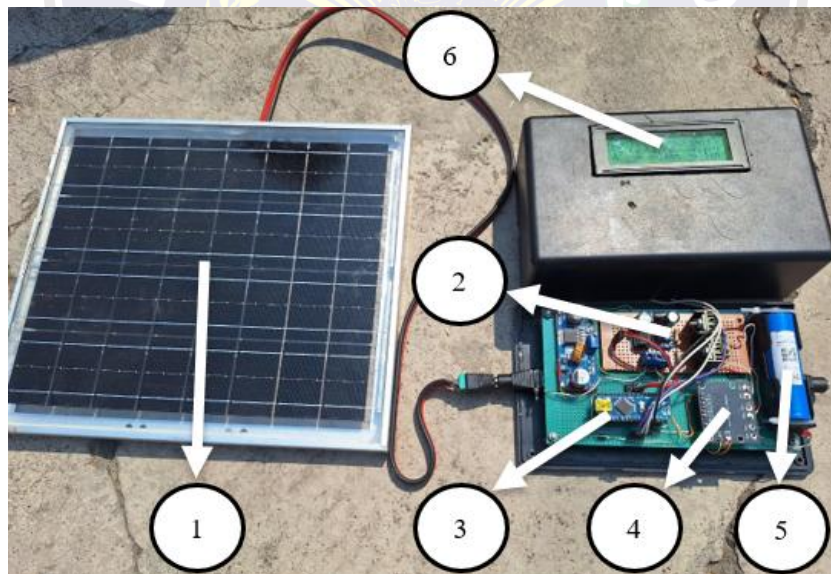
Hasil studi literatur terhadap penggunaan mikrokontroler menunjukkan bahwa Arduino Nano dapat digunakan sebagai unit pengendali pada sistem karena mampu membaca data sensor dan menjalankan algoritma kontrol secara *real-time*. Arduino Nano kemudian digunakan untuk mengolah data tegangan dan arus dari sensor INA3221 serta menghasilkan sinyal PWM untuk mengatur kerja *buck converter*. Dengan demikian, hasil studi literatur menghasilkan rancangan sistem yang mengintegrasikan metode CC-CV, kontrol PID, Arduino Nano, sensor INA3221, dan *buck converter* sebagai bagian utama *Solar Charge Controller* untuk pengisian baterai *Lithium-Ion* 18650.

4.2 Perencanaan dan Perancangan

Pada tahap ini, proses perencanaan dan perancangan sistem dilakukan untuk memastikan seluruh komponen dapat terpasang, terhubung, dan berfungsi sesuai peran masing-masing. Perancangan menggunakan PCB *dot matrix* sebagai media perakitan rangkaian agar setiap komponen tersusun rapi dan memudahkan penghubungan antarbagian sistem. Tahap ini juga bertujuan meminimalkan kesalahan perakitan serta memastikan sistem kontrol yang dirancang dapat beroperasi secara optimal. Tahapan yang dilakukan dalam proses perencanaan dan perancangan sistem adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan PCB *dot matrix* dan *casing hardware* sebagai wadah pemasangan rangkaian elektronik agar komponen tersusun rapi dan terlindungi dari gangguan eksternal.
2. Menyiapkan komponen utama sistem, yaitu Arduino Nano, rangkaian Solar Charge Controller (SCC), sensor INA3221, LCD 20x4, panel surya dan baterai *Lithium-Ion* 18650 yang digunakan sebagai bagian dari sistem kontrol pengisian.

3. Menyiapkan kabel penghubung atau kabel *jumper* untuk menghubungkan setiap komponen sehingga komunikasi dan aliran daya antar bagian sistem berjalan optimal;
4. Membuat dan mengunggah program pada Arduino Nano menggunakan Arduino IDE. Program ini berfungsi untuk mengatur pembacaan sensor, pengolahan data, serta penerapan metode kontrol PID dalam mengendalikan proses pengisian baterai;
5. Melakukan perakitan dan pemasangan komponen utama pada PCB *dot matrix* sesuai rancangan yang telah dibuat. Proses ini memperhatikan jalur koneksi antar komponen untuk mencegah kesalahan pemasangan yang dapat mengganggu kinerja sistem;
6. Mengintegrasikan rangkaian PCB *dot matrix* beserta seluruh komponen ke dalam *casing hardware* sehingga sistem memiliki bentuk yang lebih rapi, aman, dan mudah digunakan saat proses pengujian maupun pengoperasian.



Gambar 4.1 *Hardware* alat untuk pengisian baterai *lithium-ion* 18650

Gambar 4.1 menunjukkan alat perancangan sistem kontrol PID untuk pengisian baterai *lithium-ion* 18650 pada *solar charge controller*. Berikut penjelasan komponen utama dalam perancangan sistem kontrol PID tersebut:

1. Panel Surya

Panel surya berperan sebagai sumber energi utama yang mengkonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan selanjutnya digunakan sebagai *input* untuk rangkaian SCC pada proses pengisian baterai.

2. Rangkaian *Solar Charge Controller* (SCC)

Rangkaian SCC mengatur proses pengisian baterai dengan mengontrol tegangan dan arus yang masuk ke baterai. Dalam sistem ini, SCC bekerja bersama metode kontrol PID agar pengisian baterai menjadi lebih stabil dan sesuai kebutuhan

3. Arduino Nano

Arduino Nano berfungsi sebagai pusat kendali sistem. Alat ini membaca data dari sensor, menjalankan algoritma kontrol PID, dan mengirim sinyal ke rangkaian SCC untuk mengatur pengisian baterai.

4. Sensor INA3221

Sensor INA3221 berfungsi untuk mengukur tegangan dan arus listrik pada sistem. Data dari sensor ini kemudian digunakan sebagai input dalam perhitungan kontrol PID, sehingga sistem bisa melakukan pengaturan dengan lebih akurat.

5. Baterai *Lithium-Ion* 18650

Baterai *Lithium-Ion* 18650 digunakan untuk menyimpan energi listrik dan berfungsi sebagai beban pengisian. Energi yang diterima baterai ini berasal dari panel surya melalui rangkaian SCC yang diatur oleh sistem PID.

6. LCD 20x4

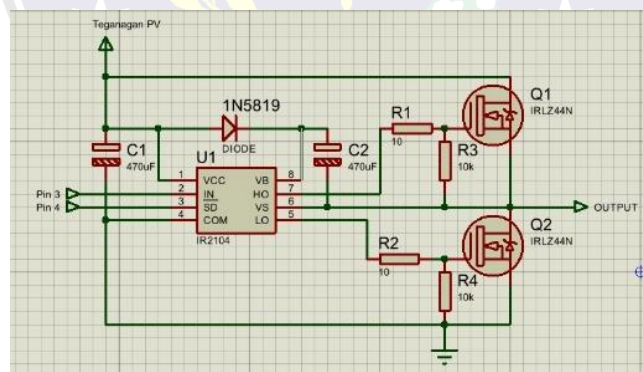
LCD 20x4 digunakan sebagai media tampilan informasi pada sistem. Komponen ini menampilkan data dari sensor, seperti nilai tegangan, arus dan informasi proses pengisian baterai. Dengan begitu, pengguna bisa memantau sistem secara langsung.

4.2.1 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

Perangkat keras alat dirancang dalam tiga bagian utama, yaitu rangkaian daya, sistem kontrol dan instrumentasi, serta antarmuka pengguna. Rangkaian daya pada SCC mengatur aliran energi dari panel surya ke baterai. Sistem kontrol dan instrumentasi membaca serta mengolah data tegangan dan arus untuk proses kendali PID. Antarmuka pengguna menampilkan kondisi pengisian secara real-time. Dengan pembagian ini, sistem dapat beroperasi secara aman, stabil dan mudah dipantau.

4.2.1.1 Rangkaian Daya *Solar Charge Controller* (SCC)

Pengujian rangkaian SCC dilakukan untuk memastikan bahwa bagian pengendali dan sakelar daya dapat mengatur tegangan dari panel surya sebelum digunakan untuk mengisi baterai *lithium-ion* 18650. Berdasarkan rangkaian pada Gambar 4.2, sistem menggunakan IC IR2104 sebagai *gate driver* untuk mengendalikan dua MOSFET IRLZ44N, yaitu Q1 sebagai MOSFET sisi atas dan Q2 sebagai MOSFET sisi bawah. Sinyal PWM dari mikrokontroler diberikan ke bagian masukan IR2104 untuk mengatur kondisi hidup dan mati kedua MOSFET secara bergantian.



Gambar 4.2 Rangkaian Komponen SCC

Komponen D1 1N5819 dan kapasitor C2 membentuk rangkaian umpan balik penumpuk yang menyediakan tegangan penggerak bagi MOSFET sisi atas. Resistor R1 dan R2 membatasi arus yang masuk ke gerbang MOSFET, sedangkan R3 dan R4 berfungsi menjaga gerbang tetap pada kondisi rendah ketika tidak

menerima sinyal kendali. Kapasitor C1 dipasang pada sisi masukan untuk membantu meredam perubahan tegangan dari panel surya. Susunan tersebut membentuk bagian sakelar daya SCC yang mengatur energi menuju keluaran. Selanjutnya, tegangan hasil pensaklaran diratakan oleh bagian filter keluaran sebelum dialirkan ke baterai.

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan panel surya ke terminal masukan rangkaian dan baterai 18650 ke terminal keluaran SCC. Multimeter digital dipasang secara paralel pada terminal baterai sebagai alat ukur pembanding. Setelah sambungan dan polaritas dipastikan benar, sistem diaktifkan, kemudian nilai tegangan panel, tegangan pengisian, tegangan baterai, arus, nilai PWM, serta mode pengisian diamati melalui LCD. Pada saat pengujian, sistem bekerja dalam mode CC.



Gambar 4.3 Rangkaian SCC

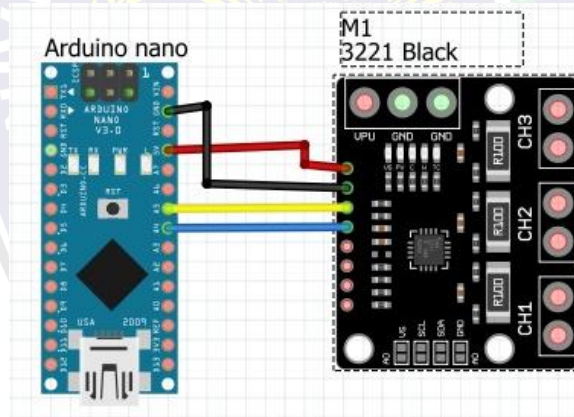
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.3, LCD menunjukkan tegangan panel surya sebesar 18,10 V, tegangan pengisian sekitar 3,88 V, dan tegangan baterai sebesar 3,87 V. Sementara itu, multimeter digital menunjukkan nilai 3,930 V. Selisih pembacaan antara sistem dan multimeter sekitar 0,06 V atau 1,53%. Perbedaan tersebut relatif kecil sehingga pembacaan sensor sudah mendekati hasil alat ukur pembanding, meskipun kalibrasi tetap diperlukan untuk meningkatkan ketelitiannya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian pengendali SCC mampu mengoperasikan MOSFET melalui IC IR2104 dan sinyal

PWM untuk mengatur penyaluran daya dari panel surya ke baterai. Rangkaian ini juga dapat menghasilkan tegangan pengisian yang sesuai dengan kondisi baterai.

4.2.1.2 Sistem Kontrol dan Instrumentasi

Pengujian sistem kontrol dan instrumentasi dilakukan untuk memastikan bahwa data tegangan dan arus baterai dapat dibaca serta diolah dengan baik. Komponen yang digunakan meliputi Arduino Nano sebagai pusat kendali, sensor INA3221 sebagai pembaca tegangan dan arus, LCD digunakan sebagai media penampil informasi, sedangkan baterai *lithium-ion* 18650 menjadi media penyimpanan energi, rangkaian SCC, serta multimeter digital sebagai alat ukur pembanding. Hubungan antara Arduino Nano dan INA3221 diperlihatkan pada Gambar 4.4. Sensor INA3221 terhubung ke Arduino melalui jalur komunikasi I²C, yaitu pin SDA dan SCL, serta dilengkapi sambungan VCC dan GND sebagai sumber daya.



Gambar 4.4 Rangkaian Komponen Sistem Kontrol dan Instrumentasi

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor INA3221 pada jalur baterai, kemudian memasang multimeter secara paralel pada terminal baterai. Setelah sambungan dan polaritas dipastikan benar, sistem diaktifkan dan hasil pembacaan tegangan pada LCD dibandingkan dengan nilai yang ditunjukkan oleh multimeter. Selain tegangan, parameter lain yang diamati meliputi arus pengisian, nilai PWM, mode pengisian, dan status baterai. Data yang diterima dari sensor kemudian diolah oleh Arduino Nano untuk menentukan kondisi kerja sistem.



Gambar 4.5 Rangkaian Sistem Kontrol dan Instrumentasi

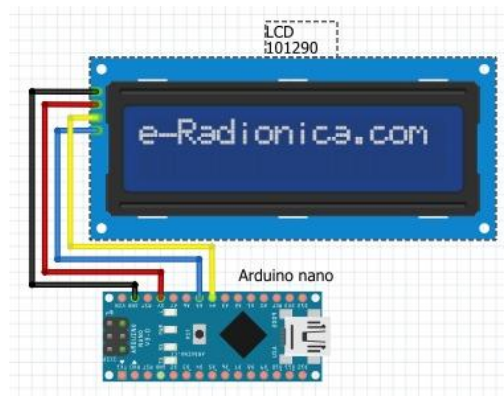
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.5, sistem berada dalam mode CC. Kondisi ini menunjukkan bahwa Arduino Nano masih memberikan sinyal PWM kepada rangkaian daya agar proses pengisian tetap berlangsung. Tegangan baterai yang tampil pada LCD berada di sekitar 3,85 V, sedangkan multimeter menunjukkan nilai 3,867 V. Selisih kedua pembacaan tersebut hanya sekitar 0,017 V, sehingga hasil pengukuran sensor INA3221 cukup mendekati nilai alat ukur pembanding.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem kontrol dan instrumentasi telah menjalankan fungsi dasarnya dengan baik. Arduino Nano mampu menerima dan mengolah data dari INA3221, mengatur sinyal PWM untuk rangkaian SCC, serta menampilkan hasil pengukuran melalui LCD. Meskipun pembacaan sensor sudah mendekati hasil multimeter, kalibrasi tetap diperlukan agar pengukuran tegangan dan arus menjadi lebih presisi, terutama untuk menjaga keamanan proses pengisian baterai *lithium-ion*.

4.2.1.3 Antarmuka Pengguna (*User Interface*)

Pengujian antarmuka pengguna dilakukan untuk memastikan bahwa informasi selama proses pengisian dapat ditampilkan dengan jelas pada LCD. Komponen yang digunakan meliputi LCD sebagai media tampilan, Arduino Nano sebagai pengolah data, sensor INA3221 untuk membaca tegangan dan arus, rangkaian SCC, panel surya, serta baterai *lithium-ion* 18650. Data yang diperoleh dari sensor diproses oleh Arduino Nano, kemudian ditampilkan secara langsung

pada LCD, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Rangkaian Komponen Antarmuka

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan panel surya ke masukan rangkaian SCC dan baterai ke terminal keluaran. Setelah seluruh sambungan dan polaritas dipastikan benar, sistem diaktifkan dan tampilan LCD diamati. Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4.7, LCD menunjukkan nilai PWM, mode pengisian, tegangan dan arus panel surya, tegangan dan arus pengisian, serta tegangan dan arus baterai.



Gambar 4.7 Modul Antarmuka Pengguna (*User Interface*)

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa antarmuka pengguna telah bekerja dengan baik sebagai media untuk memantau proses pengisian baterai. LCD dapat menampilkan berbagai informasi penting secara langsung, meliputi nilai PWM, mode pengisian, tegangan, serta arus pada panel surya, rangkaian pengisian, dan baterai. Susunan informasi pada layar cukup jelas sehingga pengguna dapat memantau kondisi kerja sistem tanpa memerlukan serial monitor.

4.2.2 Perancangan Perangkat Lunak (*Software*)

Perangkat lunak alat dirancang untuk menjalankan dua fungsi utama, yaitu logika pengisian CC-CV dan algoritma kontrol PID. Logika CC-CV mengatur tahapan pengisian baterai agar sesuai dengan kondisi tegangan baterai. Algoritma PID menghitung selisih antara nilai aktual dan *setpoint*, kemudian mengolahnya menjadi sinyal PWM untuk mengatur rangkaian daya. Dengan sistem perangkat lunak ini, proses pengisian baterai berlangsung lebih aman dan stabil.

4.2.2.1 Logika Pengisian CC-CV

Logika pengisian CC–CV digunakan untuk mengatur proses pengisian baterai *lithium-ion* 18650 secara bertahap. Sistem ini menggunakan Arduino Nano sebagai pengendali utama, sensor INA3221 untuk membaca tegangan dan arus baterai, rangkaian *buck converter* sebagai pengatur daya, serta MOSFET yang dikendalikan melalui sinyal PWM. Dalam program, sinyal PWM dihasilkan melalui pin D3, sedangkan pin D4 berfungsi untuk mengaktifkan atau memutus keluaran daya yang menuju baterai. Perancangan perangkat lunak diawali dengan menetapkan sejumlah parameter pengisian sebagai acuan kerja sistem. Parameter tersebut mencakup arus pengisian sebesar 1 A pada mode CC, tegangan 4,20 V pada mode CV, batas tegangan perpindahan dari mode CC ke CV sebesar 4,15 V, serta batas arus akhir pengisian sebesar 0,05 A. Selain itu, ditentukan batas kembali ke mode CC sebesar 4,13 V, batas tegangan baterai penuh sebesar 4,18 V, dan tegangan pengisian ulang sebesar 4,05 V. Penetapan parameter pengisian dan proteksi tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.8.

```
// ----- Parameter baterai -----
const float VCV = 4.20f;
const float VCC_TO_CV = 4.15f;
const float VCV_TO_CC = 4.13f;
const float VFULL_MIN = 4.18f;
const float VRECHARGE = 4.05f;
const float ICC = 1.00f;
const float IFULL = 0.05f;
const float CURRENT_DIRECTION = 1.0f;
const float TERMINATION_CURRENT_MIN = -0.02f;
const uint32_t FULL_CONFIRM_MS = 1000UL;

// ----- Proteksi -----
const float VBAT_MIN_VALID = 2.50f;
const float VBAT_HARD_MAX = 4.25f;
const float IBAT_HARD_MAX = 1.25f;
const float SENSOR_CURRENT_ABS_MAX = 20.0f;
const uint32_t FAULT_RECOVERY_MS = 1500UL;

// ----- PWM dan kontrol -----
const float PWM_MIN = 0.0f;
const float PWM_MAX = 255.0f;
const float PWM_RISE_PER_SECOND = 60.0f;
const float PWM_FALL_PER_SECOND = 220.0f;
const float KP_CC = 0.8f;
const float KI_CC = 10.0f;
const float KD_CC = 0.0f;
const float KP_CV = 0.3f;
const float KI_CV = 1.5f;
const float KD_CV = 0.0f;
const float INTEGRAL_MIN = -255.0f;
const float INTEGRAL_MAX = 255.0f;
```

Gambar 4.8 Program Parameter Mode CC-CV

Tegangan dan arus baterai dibaca oleh sensor INA3221 setiap 50 ms. Data hasil pembacaan tersebut kemudian diproses oleh Arduino Nano untuk menentukan mode pengisian dan menyesuaikan *duty cycle* PWM pada rangkaian *buck converter*. Selama tegangan baterai masih berada di bawah 4,15 V, sistem beroperasi dalam mode CC dengan mempertahankan arus pengisian agar tetap mendekati *setpoint* 1 A. Ketika tegangan baterai mencapai 4,15 V, sistem secara otomatis beralih ke mode CV untuk menjaga tegangan tetap mendekati 4,20 V. Pada tahap ini, arus pengisian akan menurun secara bertahap seiring dengan meningkatnya kapasitas baterai hingga mendekati kondisi penuh. Selain itu, program dilengkapi dengan histeresis untuk mencegah terjadinya perpindahan berulang antara mode CC dan CV akibat perubahan kecil pada tegangan baterai. Sistem berpindah dari mode CC ke CV ketika tegangan mencapai 4,15 V dan baru kembali ke mode CC apabila tegangan turun hingga 4,13 V. Proses perpindahan mode, penentuan kondisi baterai penuh, dan pengaturan keluaran PWM ditunjukkan pada Gambar 4.9.

```

void initializeChargingMode()
{
    ChargerMode startMode =
        (battery.voltage >= VCC_TO_CV) ? MODE_CV : MODE_CC;
    prepareMode(startMode);
    modeReady = true;
}
void controlCharger(uint32_t now, float dt)
{
    if (mode == MODE_FAULT)
    {
        outputOff();
        if (!recoverFromFault(now)) return;
    }
    FaultReason detected = detectFault();
    if (detected != FAULT_NONE)
    {
        enterFault(detected);
        return;
    }
    if (!modeReady) initializeChargingMode();
    if (mode == MODE_FULL)
    {
        outputOff();
        if (battery.voltage <= VRECHARGE) initializeChargingMode();
        return;
    }
    if (mode == MODE_CC && battery.voltage >= VCC_TO_CV)
        changeMode(MODE_CV);
    else if (mode == MODE_CV && battery.voltage <= VCV_TO_CC)
        changeMode(MODE_CC);
    float current = batteryControlCurrent();
    bool terminationCurrentValid =
        current >= TERMINATION_CURRENT_MIN && current <= IFULL;
    bool fullCondition = mode == MODE_CV &&
        battery.voltage >= VFULL_MIN &&
        terminationCurrentValid;

    if (!fullCondition)
    {
        fullStartMs = 0;
    }
    else if (fullStartMs == 0)
    {
        fullStartMs = now;
    }
    else if ((uint32_t)(now - fullStartMs) >= FULL_CONFIRM_MS)
    {
        changeMode(MODE_FULL);
        return;
    }
    if (mode == MODE_CC)
        pwmCommand = runPID(pidCC, ICC, current, dt);
    else
        pwmCommand = runPID(pidCV, VCV, battery.voltage, dt);
}

```

Gambar 4.9 Program Mode CC–CV

Secara keseluruhan, hasil penerapan logika tersebut menunjukkan bahwa program dapat memilih mode pengisian berdasarkan kondisi tegangan baterai. Baterai dinyatakan penuh ketika sistem berada pada mode CV, tegangan baterai telah mencapai minimal 4,18 V, dan arus pengisian berada pada rentang $-0,02$ A hingga $0,05$ A selama 10 detik. Setelah kondisi tersebut terpenuhi, program

mengatur PWM menjadi nol sehingga aliran daya menuju baterai dihentikan. Proses pengisian akan diaktifkan kembali apabila tegangan baterai turun hingga 4,05 V. Berdasarkan hasil tersebut, logika program telah mampu menjalankan proses pengisian CC–CV, mengatur perpindahan mode secara stabil, serta menghentikan pengisian ketika baterai mendekati kondisi penuh.

4.2.2.2 Algoritma Kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*)

Algoritma kontrol digunakan untuk menjaga arus dan tegangan pengisian baterai agar tetap mendekati nilai *setpoint* yang telah ditentukan. Sistem ini menggunakan Arduino Nano sebagai pengendali utama, sensor INA3221 untuk membaca tegangan dan arus baterai, rangkaian *buck converter* sebagai pengatur daya, serta MOSFET yang dikendalikan melalui sinyal PWM. Pada program, sinyal PWM dikeluarkan melalui pin D3 Arduino Nano untuk mengatur keluaran daya menuju baterai. Proses perancangan perangkat lunak dimulai dengan menentukan nilai konstanta pengendali untuk setiap mode pengisian. Pada mode CC digunakan nilai (K_p) sebesar 0,8, (K_i) sebesar 10, dan (K_d) sebesar 0. Sementara itu, pada mode CV digunakan nilai (K_p) sebesar 0,3, (K_i) sebesar 1,5, dan (K_d) sebesar 0. Nilai konstanta yang berbeda digunakan karena mode CC mengendalikan arus pengisian, sedangkan mode CV mengendalikan tegangan baterai. Penetapan parameter kontrol pada kedua mode tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.10.

```
const float KP_CC = 0.8f;
const float KI_CC = 10.0f;
const float KD_CC = 0.0f;
const float KP_CV = 0.3f;
const float KI_CV = 1.5f;
const float KD_CV = 0.0f;
const float INTEGRAL_MIN = -255.0f;
const float INTEGRAL_MAX = 255.0f;
```

Gambar 4.10 Program Parameter Kontrol PID

Tegangan dan arus baterai dibaca oleh sensor INA3221 setiap 50 ms. Data hasil pembacaan tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai *setpoint* untuk memperoleh nilai error. Pada mode CC, *setpoint* yang digunakan adalah arus pengisian sebesar 1 A, sedangkan pada mode CV *setpoint* yang digunakan adalah

tegangan baterai sebesar 4,20 V. Nilai *error* tersebut diproses oleh komponen *proportional* dan *integral* untuk menentukan nilai PWM yang diberikan kepada rangkaian *buck converter*. Program juga dilengkapi dengan pembatasan nilai *integral* dan keluaran PWM agar tetap berada dalam rentang kerja sistem. Nilai PWM dibatasi antara 0 hingga 255 sesuai dengan kemampuan keluaran Arduino Nano. Perubahan nilai PWM dilakukan secara bertahap untuk mengurangi perubahan keluaran yang terlalu cepat. Proses perhitungan *error*, pembatasan keluaran, serta pemilihan variabel kontrol berdasarkan mode pengisian ditunjukkan pada Gambar 4.11

```
float runPID(PIDController &controller, float target, float actual, float dt)
{
    float error = target - actual;
    float proportional = controller.kp * error;

    float derivative = 0.0f;
    if (controller.derivativeReady && dt > 0.0f)
    {
        derivative = -controller.kd *
            (actual - controller.previousActual) / dt;
    }
    controller.previousActual = actual;
    controller.derivativeReady = true;
    float integralCandidate = controller.integral +
        controller.ki * error * dt;
    integralCandidate = clampValue(integralCandidate,
        INTEGRAL_MIN,
        INTEGRAL_MAX);
    float requestedPWM = clampValue(proportional +
        integralCandidate +
        derivative,
        PWM_MIN,
        PWM_MAX);

    float delta = requestedPWM - pwmCommand;
    float maxRise = PWM_RISE_PER_SECOND * dt;
    float maxFall = PWM_FALL_PER_SECOND * dt;
    if (delta > maxRise) delta = maxRise;
    if (delta < -maxFall) delta = -maxFall;
    float appliedPWM = clampValue(pwmCommand + delta, PWM_MIN, PWM_MAX);
    controller.integral = clampValue(appliedPWM -
        proportional -
        derivative,
        INTEGRAL_MIN,
        INTEGRAL_MAX);

    return appliedPWM;
}
```

Gambar 4.11 Program Algoritma Kontrol PID

Hasil penerapan program menunjukkan bahwa sistem dapat menyesuaikan nilai PWM berdasarkan mode pengisian yang sedang berjalan. Pada mode CC, PWM diatur berdasarkan perubahan arus baterai agar tetap mendekati 1 A.

Sementara itu, pada mode CV, PWM disesuaikan berdasarkan perubahan tegangan baterai agar tetap mendekati 4,20 V.

4.3 Pengujian Sistem

Untuk memastikan alat berfungsi dengan baik, sistem diuji melalui tiga tahap. Pengujian ini dilakukan agar kinerja alat dapat dievaluasi secara langsung, tidak hanya berdasarkan rancangan. Fokus pengujian meliputi kestabilan pengisian terhadap perubahan *input*, perpindahan mode dari CC ke CV, serta keamanan sistem saat tegangan baterai mendekati batas maksimum.

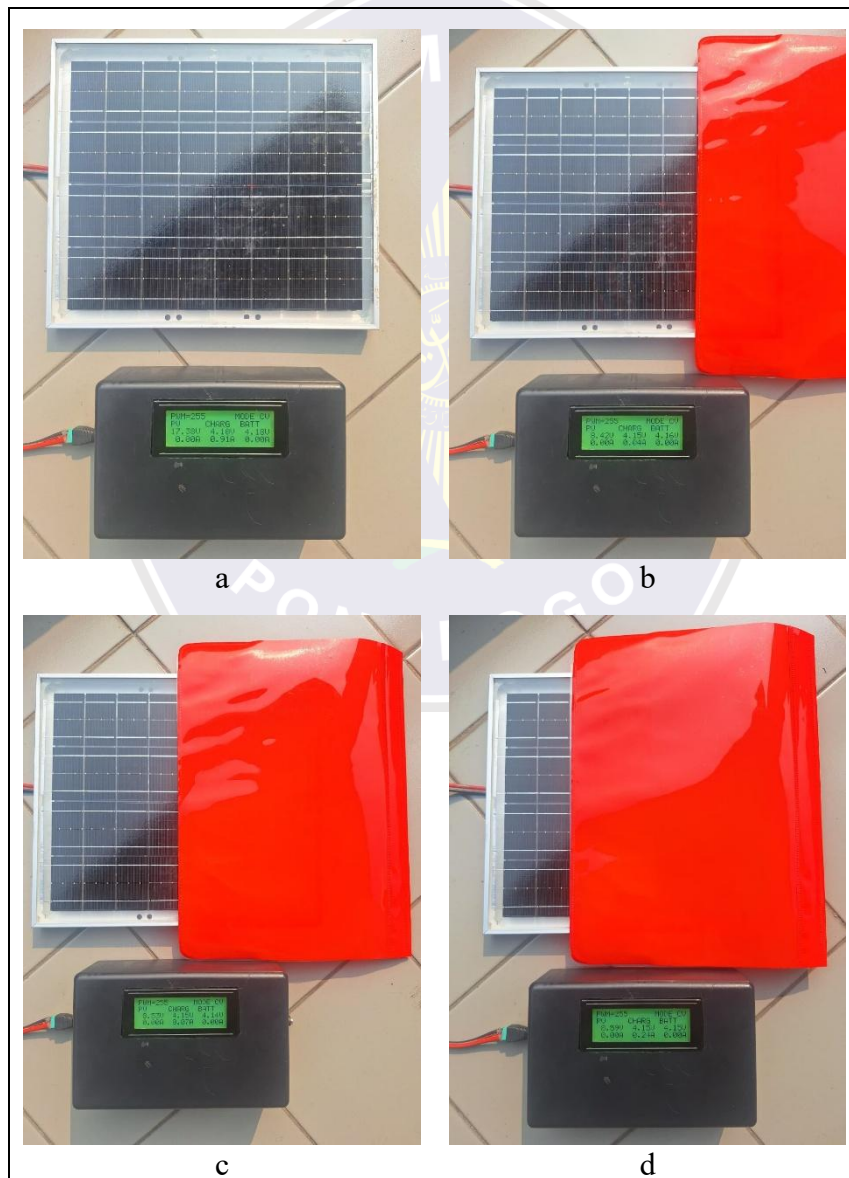
4.3.1 Pengujian Kestabilan Pengisian terhadap Perubahan *Input*

Pengujian dilakukan pada lokasi, hari, dan waktu yang sama dengan menghubungkan panel surya ke terminal masukan sistem serta baterai *lithium-ion* 18650 ke terminal keluaran. Seluruh sambungan dan polaritas diperiksa sebelum sistem diaktifkan untuk memastikan keamanan rangkaian. *Setpoint* tegangan dan arus ditetapkan masing-masing sebesar 4,20 V dan 1,00 A. Variasi intensitas cahaya disimulasikan dengan panel terbuka sebesar 100%, 75%, 50%, dan 25% dengan menutupnya sebagian beberapa saat. Pada setiap kondisi, sistem dioperasikan hingga nilai pengukuran mencapai kestabilan. Parameter yang diamati meliputi tegangan dan arus baterai. Hasil pengujian dicatat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Pengujian Kestabilan Pengisian

No	Kondisi Panel	$V_{Setpoint}$ (V)	$I_{Setpoint}$ (A)	$V_{Baterai}$ (V)	$I_{Baterai}$ (A)	ΔV (V)	ΔI (A)
1	Terbuka 100%	4,20	1,00	4,18	0,00	0,02	1,00
2	Terbuka 75%	4,20	1,00	4,16	0,00	0,04	1,00
3	Terbuka 50%	4,20	1,00	4,14	0,00	0,06	1,00
4	Terbuka 25%	4,20	1,00	4,14	0,00	0,06	1,00

Pengujian dilakukan pada empat variasi keterbukaan panel surya, yaitu 100%, 75%, 50%, dan 25%, seperti yang terlihat pada Gambar 4.12(a) hingga 4.12(d) dan Tabel 4.1. Selama pengujian, *setpoint* tegangan ditetapkan pada 4,20 V dan *setpoint* arus pada 1,00 A. Pada panel terbuka 100% (Gambar 4.12(a)), tegangan baterai tercatat 4,18 V, hanya 0,02 V di bawah *setpoint*. Saat keterbukaan panel dikurangi menjadi 75% (Gambar 4.12(b)), tegangan turun menjadi 4,16 V, selisih 0,04 V dari *setpoint*. Penurunan ini menunjukkan bahwa pengurangan permukaan panel mulai memengaruhi tegangan baterai, meskipun pengaruhnya masih kecil.



Gambar 4.12 Pengujian Kondisi Panel Surya

Pada panel terbuka 50% (Gambar 4.12(c)), tegangan baterai tercatat 4,14 V. Nilai yang sama juga didapat saat panel terbuka 25% (Gambar 4.12(d)). Pada kedua kondisi ini, selisih tegangan terhadap *setpoint* adalah 0,06 V. Walaupun intensitas cahaya menurun, tegangan baterai tetap berada di kisaran 4,14–4,18 V. Pada semua variasi pengujian, arus baterai tercatat 0,00 A. Hal ini terjadi karena tidak ada beban yang terhubung ke baterai, sehingga tidak ada arus keluar. Oleh sebab itu, analisis difokuskan pada kestabilan tegangan baterai saat luas permukaan panel yang menerima cahaya berubah.

Secara keseluruhan, perubahan tingkat keterbukaan panel surya hanya menurunkan tegangan baterai sebesar 0,04 V, dari 4,18 V pada kondisi terbuka 100% menjadi 4,14 V pada 25%. Hasil ini menunjukkan sistem tetap menjaga tegangan baterai mendekati *setpoint* meskipun cahaya yang diterima panel berkurang. Pembacaan arus 0,00 A pada setiap kondisi terjadi karena tidak ada beban yang dipasang pada baterai.

4.3.2 Pengujian Pengisian Mode Arus Konstan (CC) ke Tegangan Konstan (CV)

Pengujian dilakukan pada lokasi, hari, dan waktu yang sama agar kondisi lingkungan tetap seragam selama pengambilan data. Pada awalnya, panel surya dihubungkan ke terminal masukan sistem, dan baterai dipasang pada terminal keluaran. Setelah semua sambungan dan polaritas diperiksa dan dipastikan benar, sistem dihidupkan untuk memulai pengisian sampai baterai penuh. Selama proses ini, beberapa parameter diamati, yaitu tegangan dan arus pengisian, tegangan dan arus baterai, serta mode pengisian yang sedang berlangsung. Data dicatat setiap 15 menit agar perubahan kondisi pengisian dapat dipantau secara bertahap. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pengujian Pengisian Mode CC ke CV

No	Waktu (Menit)	V_{SCC} (V)	I_{SCC} (A)	$V_{Baterai}$ (V)	$I_{Baterai}$ (A)	Mode
1	0	2,98	0,74	2,99	0,00	CC
2	15	3,58	0,97	3,57	0,00	CC
3	30	3,80	0,99	3,79	0,00	CC
4	45	3,86	1,00	3,85	0,00	CC
5	60	3,87	1,01	3,86	0,00	CC
6	75	3,90	1,00	3,90	0,00	CC
7	90	3,94	1,02	3,94	0,00	CC
8	105	3,98	1,01	3,98	0,00	CC
9	120	4,01	1,04	4,00	0,00	CC
10	135	4,03	1,00	4,02	0,00	CC
11	150	4,05	1,02	4,04	0,00	CC
12	165	4,06	1,02	4,05	0,00	CC
13	180	4,06	1,00	4,05	0,00	CC
14	195	4,06	1,03	4,06	0,00	CC
15	210	4,07	1,04	4,06	0,00	CC
16	225	4,10	1,01	4,09	0,00	CC
17	240	4,11	0,97	4,11	0,00	CC
18	255	4,14	1,01	4,13	0,00	CC
19	270	4,18	0,94	4,18	0,00	CV
20	285	4,14	0,00	4,14	0,00	FULL

Berdasarkan Tabel 4.2, sistem mulai mengisi daya dengan mode CC. Pada tahap ini, arus pengisian stabil di sekitar 1 A, sementara tegangan baterai naik perlahan dari 3,57 V hingga mendekati batas maksimum. Kondisi pengisian mode CC terlihat pada Gambar 4.13. Data menunjukkan sistem dapat mengalirkan energi ke baterai dengan arus konstan selama tegangan baterai masih di bawah batas yang ditentukan. Selama pengujian, arus baterai selalu terbaca 0,00 A. Ini karena baterai tidak terhubung ke beban, sehingga tidak ada arus yang keluar. Nilai ini berbeda

dengan arus pengisian , yaitu arus dari rangkaian pengisi ke baterai. Jadi, meskipun arus baterai menunjukkan 0,00 A, proses pengisian tetap berlangsung. Hal ini terlihat dari nilai arus pengisian yang tetap sekitar 1 A selama mode CC.



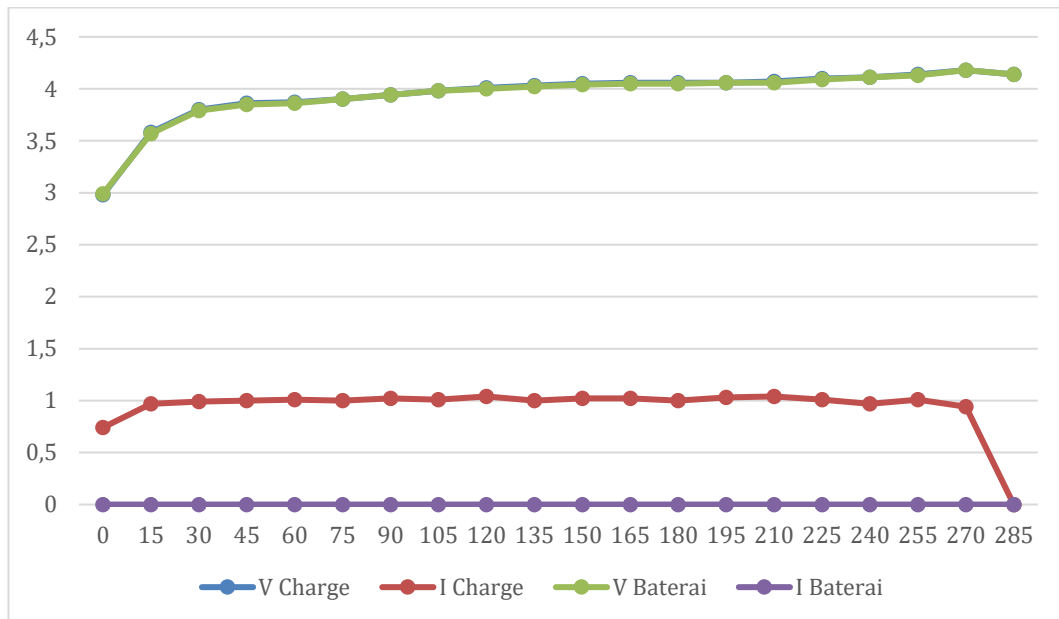
Gambar 4.13 Pengisian Mode CC

Pada menit ke-270, sistem beralih dari mode CC ke mode CV, seperti terlihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.14. Saat masuk mode CV, tegangan baterai mencapai 4,18 V dan arus pengisian tercatat 0,94 A. Peralihan ini menandakan sistem mulai menjaga tegangan baterai agar tidak melebihi batas maksimum. Pada saat yang sama, arus pengisian mulai dikurangi untuk menjaga keamanan baterai dan mencegah pengisian berlebih. Pada menit ke-285, sistem menunjukkan baterai sudah penuh dan status pengisian berubah menjadi *FULL*. Pada kondisi ini, arus pengisian turun menjadi 0,00 A dan tegangan baterai terbaca 4,14 V. Penurunan tegangan dari 4,18 V ke 4,14 V terjadi setelah arus pengisian dihentikan dan tegangan baterai kembali stabil



Gambar 4.14 Pengisian Mode CV

Perubahan tegangan dan arus selama proses pengisian terlihat lebih jelas pada Gambar 4.15. Grafik ini menunjukkan bahwa tegangan pengisian dan tegangan baterai naik secara bertahap seiring waktu pengisian. Saat mode CC, arus pengisian stabil di sekitar 1 A, sementara tegangan baterai terus naik hingga mencapai 4,18 V pada menit ke-270. Setelah masuk ke mode CV, arus pengisian mulai turun dan akhirnya mencapai 0,00 A pada menit ke-285, saat status baterai berubah menjadi *FULL*. Selama pengujian, arus baterai tetap 0,00 A karena tidak ada beban yang terhubung ke baterai. Grafik ini dengan jelas menunjukkan perubahan proses pengisian dari mode CC ke mode CV sampai baterai penuh.



Gambar 4.15 Grafik Pengujian Pengisian Mode CC ke CV

Secara keseluruhan, sistem dapat menjalankan metode pengisian CC–CV sesuai rancangan. Pada mode CC, arus pengisian dijaga sekitar 1 A sambil tegangan baterai naik bertahap. Setelah tegangan mendekati batas maksimum, sistem beralih ke mode CV dan mulai membatasi arus pengisian. Ketika baterai penuh, proses pengisian dihentikan. Nilai arus baterai tetap 0,00 A karena selama pengujian tidak ada beban yang terhubung ke baterai.

4.3.3 Pengujian Keamanan Tegangan

Pengujian dilakukan pada lokasi, hari, dan waktu yang sama agar kondisi lingkungan saat pengambilan data tetap seragam. Pertama, panel surya dihubungkan ke masukan sistem pengisian, dan baterai dipasang pada terminal keluaran. Panel diletakkan di area yang terkena sinar matahari langsung supaya bisa menghasilkan tegangan yang cukup selama proses pengisian. Setelah semua sambungan dan polaritas diperiksa dan dipastikan benar, sistem dinyalakan untuk memulai pengujian. Parameter yang diamati meliputi tegangan baterai, arus baterai, dan mode kerja sistem. Pengujian dilakukan bertahap pada beberapa kondisi tegangan baterai, kemudian seluruh hasil pengamatan ditampilkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengujian Keamanan Tegangan

No	V_{Baterai} (V)	I_{Baterai} (A)	Mode
1	4,20	0,00	Proteksi
2	4,15	0,00	CV
3	4,10	0,00	CC
4	4,05	0,00	CC
5	4,00	0,00	CC

Berdasarkan Tabel 4.3, pengujian keamanan tegangan dilakukan untuk melihat bagaimana sistem merespon kenaikan tegangan baterai dari 4,00 V sampai 4,20 V. Pada tegangan 4,00–4,10 V, sistem tetap mengizinkan pengisian karena tegangan baterai masih di bawah batas maksimum. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem dapat mengisi baterai secara normal selama tegangan masih dalam batas aman. Saat tegangan baterai mencapai 4,15 V, sistem mulai membatasi pengisian agar tegangan tidak melewati batas aman. Pada tahap ini, sistem belum menghentikan pengisian sepenuhnya, tetapi sudah mengatur tegangan sebagai langkah awal perlindungan baterai. Respon ini menunjukkan bahwa sistem dapat mendeteksi saat baterai mendekati batas maksimum pengisian. Kondisi alat pada tahap pembatasan tegangan dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Pengisian pada Tegangan 4,15 V

Ketika tegangan baterai mencapai 4,20 V, sistem mengaktifkan fitur proteksi. Hal ini menandakan bahwa tegangan baterai sudah mencapai batas maksimum, sehingga proses pengisian dihentikan untuk mencegah pengisian berlebih. Dengan begitu, baterai tidak menerima energi lagi setelah mencapai batas aman. Kondisi alat saat fitur proteksi aktif dapat dilihat pada Gambar 4.17. Selama pengujian, arus baterai selalu tercatat 0,00 A karena tidak ada beban yang terhubung ke keluaran baterai. Nilai ini menunjukkan tidak ada arus yang mengalir dari baterai ke beban, tetapi proses pengisian tetap berlangsung. Oleh sebab itu, penilaian keamanan tegangan pada pengujian ini lebih difokuskan pada perubahan respon sistem terhadap kenaikan tegangan baterai.



Gambar 4.17 Pengisian pada Tegangan Penuh

Secara keseluruhan, sistem telah bekerja sesuai dengan rancangan. Setelah tegangan dan arus memenuhi syarat penghentian, sistem secara otomatis menghentikan proses pengisian. Sementara itu, arus baterai pada jalur keluaran tetap terbaca sebesar 0,00 A karena selama pengujian tidak ada beban yang terhubung. Hasil ini menunjukkan bahwa fitur keamanan tegangan telah bekerja dengan baik dalam mengurangi risiko pengisian berlebih pada baterai.

4.4 Evaluasi dan Pembahasan Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian, sistem *Solar Charge Controller* (SCC) dapat mengisi baterai *lithium-ion* 18650 dengan kontrol PID menggunakan metode *Constant Current–Constant Voltage* (CC-CV). Pada pengujian dengan variasi intensitas cahaya, tegangan baterai tercatat stabil pada kisaran 4,14 V hingga 4,18 V, dengan deviasi maksimum 0,06 V dari *setpoint* 4,20 V. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga tegangan baterai tetap mendekati nilai yang diharapkan. Penurunan intensitas cahaya menyebabkan arus pengisian menurun, sejalan dengan berkurangnya daya keluaran panel surya.

Pada tahap *Constant Current* (CC), arus pengisian dijaga pada sekitar 1 A sampai tegangan baterai mencapai 4,18 V pada menit ke-270. Setelah itu, sistem

secara otomatis berpindah ke tahap *Constant Voltage* (CV) dengan mempertahankan tegangan dan menurunkan arus secara bertahap. Pada menit ke-285, baterai dinyatakan penuh, indikator FULL muncul pada LCD, dan PWM diatur ke 0 sehingga pengisian berhenti. Dengan demikian, waktu pengisian penuh tercapai dalam waktu sekitar 4 jam 45 menit.

Pembacaan arus baterai menunjukkan 0,00 A karena sensor hanya mengukur arus dari baterai ke beban, sementara selama pengujian tidak ada beban tambahan yang digunakan. Berdasarkan evaluasi, sistem dapat menjaga kestabilan tegangan, melakukan perpindahan otomatis dari mode CC ke CV, dan mencegah *overcharging*. Namun, arus pengisian tetap dipengaruhi oleh intensitas cahaya, sehingga pemasangan sensor perlu diperhatikan agar pembacaan arus pengisian dan arus beban dapat dibedakan dengan akurat.

