

**PENGARUH LIMA TAHAPAN PENGUJIAN TERHADAP MODUL
FOTOVOLTAIK BERDASARKAN SNI IEC 61215:2016 DI
LABORATORIUM PENGUJIAN FOTOVOLTAIK**

(Skripsi)

Oleh

**NA'IMAH KHOIRIYAH
2167041001**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

**PENGARUH LIMA TAHAPAN PENGUJIAN TERHADAP MODUL
FOTOVOLTAIK BERDASARKAN SNI IEC 61215:2016 DI
LABORATORIUM PENGUJIAN FOTOVOLTAIK**

Oleh
NA'IMAH KHOIRIYAH

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada
Jurusen Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025

ABSTRAK

PENGARUH LIMA TAHPAN PENGUJIAN TERHADAP MODUL FOTOVOLTAIK BERDASARKAN SNI IEC 61215:2016 DI LABORATORIUM PENGUJIAN FOTOVOLTAIK

Oleh

NA'IMAH KHOIRIYAH

Penelitian ini telah dilakukan dengan menggunakan sebanyak sepuluh modul fotovoltaik. Dengan menggunakan sun simulator sebagai alat utama yang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh yang terjadi pada lima tahapan pengujian lingkungan pada degradasi daya maksimum (P_{max}) terhadap modul fotovoltaik berdasarkan SNI IEC 61215:2016. Metode yang dilakukan dalam penelitian ini berupa pengujian modul fotovoltaik, pengumpulan data, analisis dan pengolahan data. Evaluasi dilakukan setelah seluruh tahapan selesai atau pada pengujian akhir, dengan menganalisis nilai daya maksimum (P_{max}) dan membandingkannya terhadap degradasi kinerja sebesar kurang dari 5% yang telah ditentukan standar. Hasil menunjukkan bahwa beberapa modul mengalami penurunan daya, namun masih dalam ambang batas yang ditetapkan SNI IEC 61215:2016. Namun, pada tahapan D yaitu uji siklus termal, ditemukan degradasi sebesar 5,86%, yang melampaui nilai ambang batas dan menunjukkan bahwa modul tersebut gagal memenuhi kriteria kelulusan. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengujian pada tahapan D, memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kinerja modul fotovoltaik, sehingga perlu menjadi perhatian khusus dalam uji kualifikasi untuk memastikan kestabilan modul sebelum dipasang dilapangan.

Kata Kunci : Daya Maksimum (P_{max}), Degradasi, Modul Fotovoltaik, SNI IEC 61215, *Standar Test Condition (STC)*

ABSTRACT

THE EFFECT OF FIVE TESTING SEQUENCES ON PHOTOVOLTAIC MODULES BASED ON SNI IEC 61215:2016 IN PHOTOVOLTAIC TESTING LABORATORIES

By

NA'IMAH KHOIRIYAH

This research has been conducted using ten photovoltaic modules. By using a sun simulator as the main tool that aims to evaluate the effects that occur in the five stages of environmental testing on the maximum power degradation (P_{max}) of photovoltaic modules based on SNI IEC 61215:2016. The methods used in this research are photovoltaic module testing, data collection, analysis and data processing. Evaluation is carried out after all stages are completed or at the final test, by analyzing the maximum power value (P_{max}) and comparing it to the performance degradation of less than 5% that has been determined by the standard. The results show that some modules experienced a decrease in power, but still within the threshold set by SNI IEC 61215:2016. However, in stage D, namely the thermal cycle test, a degradation of 5.86% was found, which exceeds the threshold value and indicates that the module failed to meet the passing criteria. Thus, the results of this study indicate that testing in stage D has a significant influence on the decline in the performance of photovoltaic modules, so it needs to be given special attention in qualification tests to ensure the stability of the module before being installed in the field.

Keyword : Degradation, Maximum Power (P_{max}), Photovoltaic Module, SNI IEC 61215, Standar Test Condition (STC)

Judul Skripsi : PENGARUH LIMA TAHAPAN PENGUJIAN
TERHADAP MODUL FOTOVOLTAIK
BERDASARKAN SNI IEC 61215:2016 DI
LABORATORIUM PENGUJIAN FOTOVOLTAIK

Nama Mahasiswa : *Naimah Khoiriyah*

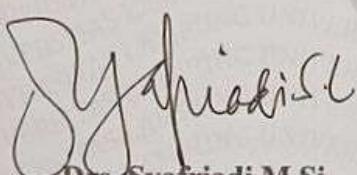
Nomor Pokok Mahasiswa : 2167041001

Program Studi : Fisika

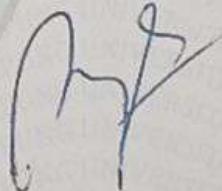
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

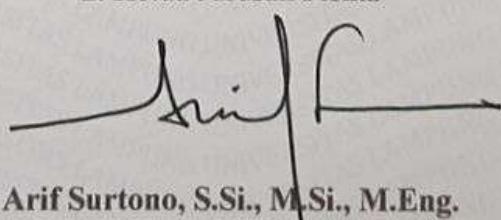


Drs. Syaefriadi M.Si.
NIP. 196108211992031002



Dr. -Ing. Drs. Oo Abdul Rosyid, M.Sc.
NIP. 196506251991031002

2. Ketua Jurusan Fisika

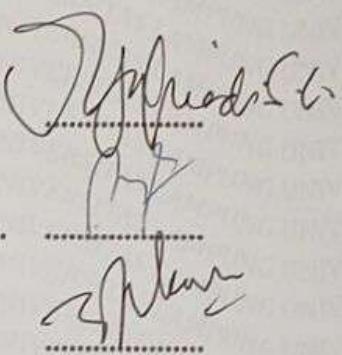


Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

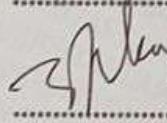
1. Tim Penguji

Ketua : Drs. Syafriadi, M.Si.

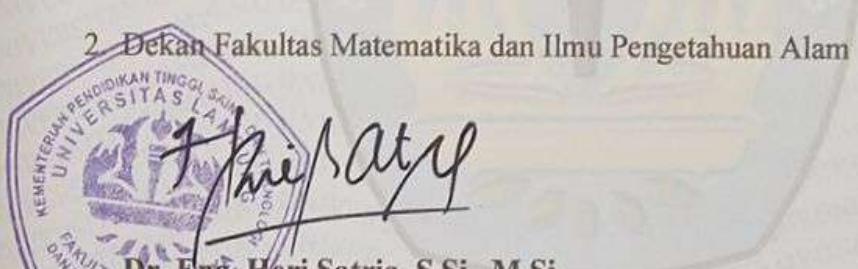


Sekretaris : Dr. -Ing. Drs. Oo Abdul Rosyid, M.Sc.

Anggota : Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 5 Agustus 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Na'imah Khoiriyyah
Nomor Pokok Mahasiswa : 2167041001
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya yang berjudul **“Pengaruh Lima Tahapan Pengujian Terhadap Modul Fotovoltaik Berdasarkan SNI IEC 61215:2016 di Laboratorium Pengujian Fotovoltaik”** adalah benar hasil karya saya sendiri. Semua sumber data dan referensi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini telah disebutkan dengan benar sesuai dengan kaidah akademika. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini belum pernah diajukan sebelumnya untuk memperoleh gelar akademik di universitas atau institusi manapun.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 5 Agustus 2025



Na'imah Khoiriyyah
NPM. 2167041001

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Na'imah Khoiriyah, lahir di Bandar Lampung pada 15 Februari 2003. Penulis merupakan anak ke-tiga dari tiga bersaudara yang merupakan putri dari pasangan Bapak Misran dan Ibu Jumirah. Penulis menyelesaikan pendidikan di SDN 1 Gedong Air (2009 - 2015), SMP TMI Raudlatul Qur'an Metro (2015 - 2018) dan SMAS TMI Raudlatul Qur'an Metro (2018 - 2021).

Pada tahun 2021, penulis diterima di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung melalui Simanila jalur Prestasi Khusus.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif bergabung dalam Organisasi Kemahasiswaan (Ormawa). Pada tahun 2021, penulis tergabung dalam Organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) sebagai anggota magang bidang Komunikasi dan Informasi (Kominfo) dan Organisasi Rohani Islam (Rois) FMIPA sebagai anggota magang bidang kajian dan keumatan. Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai pengurus aktif pada Organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) bidang Komunikasi dan Informasi (Kominfo), Pengurus aktif pada Organisasi Rohani Islam (Rois) bidang Informasi dan Komunikasi (Infokom) dan anggota magang pada Organisasi Keluarga Mahasiswa Nahdlatul Ulama (KMNU) di Badan Semi Otonom (BSO) Seni Islam.

Pada tahun 2023, Penulis diamanahkan sebagai Sekretaris Departemen Informasi dan Komunikasi (Infokom) di Organisasi Keluarga Mahasiswa Nahdlatul Ulama (KMNU), Sekretaris Bidang Media Center Rois (MCR) pada Organisasi Rohani Islam (Rois) dan aktif menjadi pengurus bidang Komunikasi dan Informasi

(Kominfo) pada Organisasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI). Pada Tahun 2024, penulis menjadi Ketua Komisi II bidang Keuangan dalam UKMF Dewan Perwakilan Mahasiswa (DPM) Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam dan juga telah mengikuti Latihan Kepemimpinan manajemen Mahasiswa Tingkat Menengah dalam acara LKMMTM-SI yang diselenggarakan di Universitas Andalas, Padang, Sumatera Barat.

Penulis dikenal aktif, jujur dan bertanggung jawab dalam setiap kegiatan organisasi dan kepanitiaan yang diikuti, serta tetap menunjukkan komitmen tinggi dalam bidang akademik dengan melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Bandung pada awal tahun 2024. Penulis mengikuti program pengabdian masyarakat pada Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Bandar Agung, Kecamatan Bandar Sribhawono, Kabupaten Lampung Timur pada pertengahan 2024. Ditahun yang sama, penulis juga terlibat dalam kegiatan ilmiah sebagai peserta MBKM Penelitian Universitas Lampung.

Kemudian, untuk Tugas Akhir penulis memilih menyelesaikan penelitian di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Serpong dalam kelompok riset Konversi dan Konservasi Energi di Laboratorium Pengujian Fotovoltaik yang akhirnya penulis mengambil penelitian mengenai **“Pengaruh Lima Tahapan Pengujian Terhadap Modul Fotovoltaik Berdasarkan SNI IEC 61215:2016 di Laboratorium Pengujian Fotovoltaik”**.

MOTTO

"*Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya*"

~ QS. Al-Baqarah (2) : 286

"*Jangan takut gagal, tapi takutlah untuk tidak pernah mencoba*"

~ Roy T. Bennett

"*Satu sangkah perjalanan-mu saat ini, menuju kkan satu tujuan dan mimpi-mu kedepannya*"

~ Na'imah Khoiriyyah



PERSEMPAHAN

Segala puji bagi Allah SWT. Atas limpahan rahmat, kasih sayang dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan pendidikan di jenjang perguruan tinggi ini dengan penuh rasa syukur dan cinta. Penulis mempersembahkan karya untuk seseorang yang selalu menjadi sumber kekuatan dan inspirasi penulis.

Kedua Orang Tua tercinta :
Ayahanda Misran, S.Ag., M.M & Ibunda Jumirah

Menjadi alasan bagi penulis untuk terus berusaha & tidak mudah menyerah sehingga penulis dapat menyelesaikan studi sarjana ini dan telah menjadi Cahaya dalam setiap langkah, mencintai tanpa syarat, serta mendoakan tanpa lelah.

Mb dan Aa tersayang :
Mb Nur Afifah Fauziyyah & Aa Muhammad Abdul Hafizh

Yang selalu mendoakan, memberikan dukungan dan semangat yang tiada hentinya serta yang selalu memberikan rasa cinta dan kasih sayangnya.

Almamater Tercinta
UNIVERSITAS LAMPUNG

Tempat penulis menuntut ilmu dan mengembangkan diri.

KATA PENGANTAR

Segala puja dan puji syukur, penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT. Yang telah memberikan nikmat iman, sehat serta taufik dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul "**Pengaruh Lima Tahapan Pengujian Terhadap Modul Fotovoltaik Berdasarkan SNI IEC 61215:2016 di Laboratorium Pengujian Fotovoltaik**". Shalawat serta salam, haturkan kepada Nabi Muhammad SAW., keluarga serta sahabat-sahabatnya yang telah menjadi suri tauladan bagi umatnya hingga akhir zaman. Semoga kita semua mendapatkan syafaat serta pertolongan Beliau di hari akhir kelak. Aamiin.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan maupun penyajian skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak kepada penulis dalam perbaikan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menambah referensi dan rujukan terhadap pengembangan riset mengenai evaluasi pada pengujian modul fotovoltaik dalam berdasarkan SNI IEC 61215:2016 dimasa mendatang.

Bandar Lampung, 5 Agustus 2025
Penulis



Na'imah Khairiyah
NPM. 2167041001

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Lima Tahapan Pengujian Terhadap Modul Fotovoltaik Berdasarkan SNI IEC 61215:2016 di Laboratorium Pengujian Fotovoltaik”**.

Dalam penyusunan skripsi ini, tentunya penulis menyadari terdapat hambatan dan juga tantangan yang penulis hadapi, namun atas izin Allah SWT, berkat usaha, do'a, semangat, bantuan bimbingan serta dukungan yang penulis terima dari berbagai pihak, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Dengan segala kerendahan hati penulis, penulis mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., selaku Dosen Pembimbing I, yang telah memberikan arahan, bimbingan dan dorongan selama proses penyusunan skripsi ini.
2. Bapak Dr. -Ing. Drs. Oo Abdul Rosyid, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan serta arahan selama penelitian dan arahan saat penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan masukan dan sarannya kepada penulis.
4. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., sebagai Dekan FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng., sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak dan Ibu Dosen serta Staff Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah banyak memberikan ilmu, pengalaman selama masa perkuliahan.

7. Penyelia dan peneliti laboratorium pengujian fotovoltaik, yang telah memberikan kesempatan bagi penulis untuk melakukan penelitian serta mengambil ilmu dan senantiasa memberikan arahan selama penelitian di laboratorium fotovoltaik.
8. Bapak Misran dan Ibu Jumirah, selaku kedua orang tua yang telah memberikan kasih sayang nya selama ini serta doa nya yang tiada henti, nasihat, motivasi dan semua dukungannya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
9. Mb Tasya, selaku mb sekaligus teman bagi penulis yang terus memberikan motivasinya dan tempat yang dicari penulis dikala kebingungannya. Sesorang yang menjadi tempat mencerahkan segalanya dan menjadi tempat solusi bagi penulis, yang memberikan semangat dan dukungannya selama penyusunan skripsi ini.
10. Rara, Sayyida, Sherlita dan Sasa, selaku sahabat penulis yang selalu memberikan dukungannya, motivasinya, kebersamaannya dan menjadi tempat bercerita bagi penulis.
11. Khoirun Fatonah, selaku sahabat penulis yang hadir disaat penulis penuh dengan keluh kesah, menjadi tempat cerita penulis, memberikan dukungannya. Seseorang yang siap kemanapun dikala apapun.
12. Sulistiawati, selaku sahabat seperjuangan skripsi penulis, yang senantiasa menemani suka duka proses pelaksanaan skripsi penulis, menjadi tempat cerita hal hal random dan selalu memberikan dukungannya kepada penulis.
13. Teman media seperjuangan, Adriyan Daffa yang telah menjadi tempat bagi penulis dikala penulis butuh bantuan, yang memberikan pengalaman dan ilmunya selama menjadi *partner* media penulis.
14. Teman teman seperjuangan penelitian, Serpong Jaya. Atu Viona, Winda, Mayang, Eli dan Anggis, yang telah membersamai selama masa penelitian penulis di Serpong.
15. Teman teman Keluarga Besar Nahdlatul Ulama (KMNU), yang telah menjadi keluarga baru bagi penulis, membersamai penulis dari awal hingga akhirnya penulis menyelesaikan pendidikan diperguruan tinggi ini. Menjadi wadah berkembang, motivasi dan mencari barokah dari para auliya' dan para guru.

16. Teman teman Keluarga Himpunan Mahasiswa Fisika (Himafi) dan Rohani Islam (Rois), yang telah menjadi tempat bagi penulis untuk berkembang dan memberikan kesempatan bagi penulis untuk mengambil pengalaman berharganya.
17. Teman teman KBK Fisika Energi dan rekan rekan seperjuangan Fisika 2021, yang telah memberikan motivasi, bantuan dan kebersamaan selama masa studi dan penyusunan skripsi penulis.
18. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, namun selalu bisa membantu dan berkontribusi hingga penulis dapat menyelesaikan studi ini.

Semoga Allah SWT. membalas atas segala kebaikan yang telah diberikan dengan yang lebih baik karena telah membantu dan mempermudah segala urusan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 5 Agustus 2025



Na'imah Khoiriyah

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Energi Surya Fotovoltaik	4
2.2 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).....	5
2.3 Modul Fotovoltaik.....	7
2.4 Karakteristik Sel Fotovoltaik	8
2.5 Prinsip Kerja Modul Fotovoltaik	10
2.5.1 Efek Fotovoltaik	10
2.5.2 Kurva I-V dan P-V sebagai Indikator Kinerja.....	12
2.6 Standar SNI IEC 61215.....	13
2.7 <i>Module Qualification Test (MQT)</i> dalam SNI IEC 61215	14
2.7.1 Inspeksi Visual atau <i>Visual Inspection</i>	14
2.7.2 Penentuan Daya Maksimum (MQT 02)	14
2.7.3 Uji Insulasi (MQT 03)	15
2.7.4 Pengukuran Koefisien Temperatur (MQT 04)	15
2.7.5 Pengukuran NMOT (MQT 05).....	15
2.7.6 Kinerja pada STC dan NMOT (MQT 06)	16
2.7.7 Kinerja pada Iradiasi Rendah (MQT 07).....	16
2.7.8 Uji Paparan Luar Ruangan (MQT 08).....	16
2.7.9 Uji Ketahanan <i>Hot-Spot</i> (MQT 09).....	17
2.7.10 Uji Prakondisi (MQT 10)	18
2.7.11 Uji Siklus Termal (MQT 11)	18
2.7.12 Uji Kelembapan-Beku (MQT 12).....	19

2.7.13 Uji Panas-Lembab (MQT 13).....	19
2.7.14 Uji Ketahanan Terminasi (MQT 14)	19
2.7.15 Uji Kebocoran Arus Basah (MQT 15).....	19
2.7.16 Uji Beban Statis (MQT 16)	19
2.7.17 Uji Tumbukan Bola Es (MQT 17).....	20
2.7.18 Uji Termal Diode <i>Bypass</i> (MQT 18).....	20
2.7.19 Stabilisasi (MQT 19)	20
III. METODE PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat	21
3.2 Alat dan Bahan.....	21
3.3 Prosedur Penelitian.....	22
3.3.1 Studi Literatur.....	24
3.3.2 Persiapan Modul dan Alat Uji	24
3.3.3 Pengujian Awal Modul	26
3.3.4 Pembagian Tahapan Pengujian.....	29
3.3.5 Pengumpulan dan Analisis Data.....	39
3.3.6 Diagram Alir.....	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Perubahan Kinerja Modul Fotovoltaik terhadap Pengujian Lingkungan....	44
4.1.1 Hasil Uji Kinerja Awal (<i>Baseline</i>) Modul Fotovoltaik.....	44
4.1.2 Hasil Uji Kinerja Akhir Modul Fotovoltaik	47
4.2 Evaluasi Perubahan Daya Maksimum (Pmax) pada Modul Fotovoltaik	48
4.3 Pengaruh Lima Tahapan Pengujian Berdasarkan SNI IEC 61215.....	52
4.3.1 Tahapan A – Uji Performa Suhu dan Iradiasi Rendah	52
4.3.2 Tahapan B - Paparan Luar Ruangan, Bypass Diode dan <i>Hot-Spot</i>	53
4.3.3 Tahapan C - Uji Degradasi Karena UV, Siklus Termal, Sambungan	55
4.3.4 Tahapan D - Uji Siklus Termal Ekstrem	56
4.3.5 Tahapan E - Uji Beban Mekanik, Kelembapan Dan Tembakan Es ...	58
V. KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	62
LAMPIRAN.....	65
LAMPIRAN 1 : Perhitungan Verifikasi Pmax pada Gate 01	66
LAMPIRAN 2 : Perhitungan Ambang Batas Minimum.....	70
LAMPIRAN 3 : Gambar 2D Dimensi Modul.....	72
LAMPIRAN 4 : Dokumentasi Penelitian	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Sumber: SUNterra)	5
2. Skema pada Sistem PLTS (Hermawan & Nurpulaela, 2024).....	6
3. Sel Fotovoltaik (Sumber: Teknik Elektronika)	9
4. Sel Galvanis (Sumber: Tanya Mipi)	10
5. Kurva Karakteristik I-V dan P-V (Prakoso <i>et al.</i> , 2021)	12
6. Uji <i>Outdoor Testing</i> (Sumber : Laboatorium Fotovoltaik, BRIN)	17
7. Karakterisasi modul I-V dengan semua sel diberi <i>shading</i> (BSN-b,2018)..	18
8. Prosedur Uji Berdasarkan SNI IEC 61215-1:2016 (BSN-a, 2018)	23
9. Pemberian Kode pada Modul Fotovoltaik	25
10. Pengambilan Gambar Visual Sebelum Dilakukan Pengujian	26
11. Proses Pengujian Arus Bocor (MQT 15) (Sumber Laboatorium Fotovoltaik, BRIN)	29
12. String Terbuka pada Pengujian Outdoor (Sumber : BRIN, 2024)	32
13. <i>Nameplate</i> Modul Fotovoltaik	40
14. Diagram Alir Penelitian	43
15. Grafik Perbandingan Pmax Gate 01 dan Gate 02	51
16. Grafik Perbandingan Pmax Awal dan Akhir – Tahapan A	53
17. Grafik Perbandingan Pmax Awal dan Akhir – Tahapan B	54
18. Grafik Perbandingan Pmax Awal dan Akhir – Tahapan C	55
19. Grafik Perbandingan Pmax Awal dan Akhir – Tahapan D	56
20. Hasil <i>elektroluminesnsi</i> (EL) Pada Modul D1	57
21. Kerusakan Sel pada Modul D1	58
22. Grafik Perbandingan Pmax Awal dan Akhir – Tahapan E	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Alat - alat Penelitian.....	21
2. Bahan - bahan Penelitian.....	22
3. Pengelompokan Tahapan Uji	29
4. Massa Bola dan Kecepatan Uji (BSN-b, 2018)	38
5. Hasil Pengukuran Kinerja Awal Modul Fotovoltaik (BRIN, 2024)	45
6. Hasil Verifikasi Pmax pada Gate 01	45
7. Hasil Pengukuran Tahap Akhir Modul Fotovoltaik (BRIN, 2024)	47
8. Hasil Perbandingan Nilai Ambang Batas Minimum dan Degradasi.....	49

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi terbarukan terus meningkat seiring perkembangan teknologi dan meningkatnya kesadaran akan pentingnya menjaga lingkungan. Diantara berbagai sumber energi terbarukan, energi surya merupakan salah satu yang paling menjanjikan, terutama di Indonesia yang terletak di daerah tropis dengan tingkat radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun (Lubna *et al.*, 2021). Melalui teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), energi dari sinar matahari dapat diubah menjadi energi listrik dengan memanfaatkan sistem fotovoltaik (Suryani *et al.*, 2018).

Sebagai sumber energi yang bersih, berkelanjutan, dan ramah lingkungan (Surindra, 2012), pemanfaatan energi surya sangat bergantung pada kualitas serta kinerja perangkat yang digunakan, khususnya modul fotovoltaik. Untuk menjamin kinerja dan keandalan modul fotovoltaik yang dipasang di lapangan, diperlukan penerapan standar pengujian yang ketat (Rahmanta *et al.*, 2023).

Acuan utama dalam proses pengujian dan kualifikasi modul fotovoltaik adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) IEC 61215 (Firman *et al.*, 2022). Standar ini menetapkan berbagai prosedur pengujian untuk menilai kualitas, keandalan serta ketahanan modul terhadap pengaruh lingkungan (Bildirisi *et al.*, 2018). Dengan mengacu pada standar ini, diharapkan modul fotovoltaik yang dirancang dapat memenuhi persyaratan kinerja modul fotovoltaik (Wohlgemuth & Kurtz, 2014).

Penerapan SNI IEC 61215 bertujuan tidak hanya untuk mengevaluasi kinerja awal, tetapi juga untuk menilai daya tahan jangka panjang melalui pengujian yang berkaitan dengan lingkungan. Proses pengujian dilakukan secara bertahap dengan

serangkaian prosedur yang mencerminkan kondisi di lapangan, seperti suhu ekstrem, kelembapan tinggi, dan siklus termal. Rangkaian pengujian ini bertujuan untuk menentukan karakteristik listrik dan termal dari modul serta menunjukkan sejelas mungkin ketahanan modul dalam batas waktu tertentu (BSN-a, 2018).

Untuk memenuhi kebutuhan analisis kinerja modul fotovoltaik yang sesuai dengan SNI IEC 61215, penelitian ini difokuskan pada evaluasi hasil uji daya modul fotovoltaik sebelum dan setelah melewati lima tahapan pengujian dalam SNI IEC 61215 di laboratorium pengujian fotovoltaik, BRIN. Lima tahapan pengujian ini mencakup simulasi kondisi ekstrem seperti paparan suhu tinggi, kelembapan, siklus termal dan beberapa pengujian lainnya yang dilakukan untuk menilai ketahanan dan keandalan modul dalam jangka panjang sesuai dengan prosedur yang ditetapkan dalam SNI IEC 61215-1:2016. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan daya maksimum (P_{max}) pada modul fotovoltaik yang disebabkan dari pengaruh lima tahapan pengujian yang telah dilakukan modul fotovoltaik dan mengetahui tahapan yang paling berpengaruh dari pengujian yang dilakukan berdasarkan pada SNI IEC 61215-1:2016.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh lima tahapan pengujian berdasarkan SNI IEC 61215:2016 terhadap kinerja modul fotovoltaik?
2. Tahapan mana yang paling berpengaruh dalam menentukan kualitas modul fotovoltaik?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh lima tahapan pengujian berdasarkan SNI IEC 61215:2016 terhadap kinerja modul fotovoltaik.
2. Mengetahui tahapan yang paling berpengaruh dalam menentukan kualitas modul fotovoltaik.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini sebagai berikut.

1. Memberikan informasi mengenai besaran turunan daya maksimum (Pmax) yang terjadi pada modul fotovoltaik setelah melalui lima tahapan pengujian berdasarkan SNI IEC 61215:2016.
2. Memberikan kontribusi dalam pemahaman penerapan SNI IEC 61215:2016 untuk pengujian kualitas modul fotovoltaik di laboratorium.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini dilakukan dalam rentang waktu Januari hingga Maret 2025, bertempat di Laboratorium Pengujian Modul Fotovoltaik, Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi - BRIN, Serpong.
2. Penelitian dibatasi pada 10 sampel modul fotovoltaik dengan tipe yang sama.
3. Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi Laptop, Sun Simulator, Lampu Penerangan 1000 lux dan *Electroluminescence* (EL), *Electrical Safety Testing*, *Outdoor Testing*, Hotspot Dan *Stabilization Test*, Ruang Paparan UV, Ruang Iklim (Klimatik Chamber), Uji Beban Mekanis, Hail Test, Bypass Diode Test, Modul Referensi atau Golden Modul.
4. Metode yang dilakukan adalah *study literature*, pengujian modul fotovoltaik di laboratorium fotovoltaik BRIN, analisis dan pengolahan data.
5. Pengujian dilakukan berdasarkan lima tahapan pengujian sesuai dengan SNI IEC 61215:2016.
6. Fokus utama penelitian adalah pada evaluasi perubahan daya maksimum (Pmax) modul fotovoltaik sebelum dan sesudah pengujian, berdasarkan pengukuran pada kondisi *Standard Test Condition* (STC).
7. Penelitian ini tidak membahas pada aspek analisis umur penggunaan pada modul fotovoltaik.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya Fotovoltaik

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan di Indonesia. Energi ini diperoleh dari radiasi sinar matahari yang dapat dikonversi menjadi energi listrik melalui teknologi fotovoltaik. Proses konversi ini memanfaatkan sifat semikonduktor dalam sel surya, di mana energi cahaya (foton) yang diterima akan menghasilkan aliran listrik (Azzahra *et al.*, 2019).

Sebagai negara tropis yang terletak di sekitar garis khatulistiwa, Indonesia memiliki tingkat radiasi matahari yang relatif tinggi dan merata sepanjang tahun (Hadi, 2023). Kondisi ini menjadikan Indonesia sangat potensial dalam pengembangan pembangkit listrik tenaga surya berbasis teknologi fotovoltaik (Effendi, 2023).

Pemanfaatan energi surya memberikan berbagai keuntungan, baik dari sisi ekonomi maupun lingkungan. Secara ekonomi, penggunaan energi surya dapat menekan biaya energi jangka panjang serta mendorong terciptanya lapangan kerja di sektor energi terbarukan. Dari sisi lingkungan, pemanfaatan energi ini membantu mengurangi emisi karbon dan mendukung upaya pengurangan dampak perubahan iklim (Azzahra *et al.*, 2019).

Selain itu, teknologi fotovoltaik juga berperan penting dalam menyediakan akses energi di wilayah-wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik konvensional (Rahmanta *et al.*, 2023). Dengan karakteristik sistem yang mudah dipasang, sistem fotovoltaik menjadi solusi praktis untuk memperluas akses energi listrik di berbagai daerah. Energi surya yang dikonversi melalui teknologi

fotovoltaik menjadi salah satu pendekatan yang ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan.

2.2 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

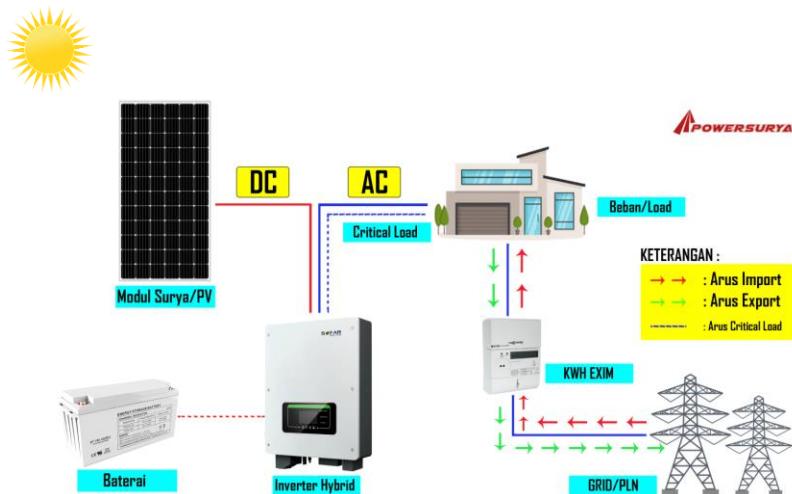
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sebuah solusi dari energi terbarukan yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan sumber energi dari cahaya matahari menjadi listrik yang dapat digunakan sehari-hari oleh masyarakat ataupun industri. PLTS mengubah energi cahaya matahari (radiasi matahari) yang ditangkap melalui panel surya dan mengubahnya menjadi energi listrik arus searah (DC) (Hermawan & Nurpulaela, 2024). Dengan pemanfaatan energi surya yang dihasilkan, Indonesia mempunyai potensi yang cukup besar sebagai negara tropis dengan bersumber energi surya (Harahap *et al.*, 2021).



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Sumber: SUNterra)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tidak memiliki daya keluaran konstan (*non-capacity value generation system*) karena kapasitas outputnya bergantung pada tingkat radiasi matahari yang selalu berubah sepanjang waktu. PLTS diukur berdasarkan jumlah energi yang dapat dihasilkan, bukan berdasarkan pada ukuran atau volume data yang dihasilkan oleh perangkat monitor atau sistem, kecuali pada sistem yang dilengkapi dengan sistem penyimpanan. Kapasitas komponen utama pada PLTS ditentukan berdasarkan tipe dan desain sistem yang akan dibangun.

Sistem Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terdapat dua jenis yaitu Sistem *On Grid* (PLTS yang terkoneksi dengan jaringan listrik PLN) dan sistem *Off Grid* (Sistem PLTS berdiri sendiri tanpa terkoneksi dengan jaringan listrik PLN) (Hermawan & Nurpulaela, 2024). Sistem PLTS baik *On Grid* maupun sistem *Off Grid* terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu modul surya, inverter/power condition unit (PCU), *solar charge controller* (SCC)/*battery charge controller* (BCC), dan *storage system* (Battery) (Rahmanta *et al.*, 2023). Adapun skema sistem PLTS dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Skema pada Sistem PLTS (Hermawan & Nurpulaela, 2024)

Berdasarkan prinsip sistem PLTS, energi diperoleh dengan memanfaatkan cahaya matahari (radiasi matahari) yang mengenai modul surya, kemudian modul surya menangkap energi tersebut dan mengubahnya menjadi arus listrik searah (DC). Arus listrik DC kemudian dialirkkan melalui inverter, yang mengubahnya menjadi arus listrik bolak-balik (AC) untuk digunakan pada peralatan rumah tangga, seperti lampu dan perangkat elektronik lainnya. Jika energi listrik yang dihasilkan PLTS melebihi kebutuhan, kelebihan energi tersebut disimpan di dalam baterai. Energi yang tersimpan ini dapat digunakan saat modul surya tidak beroperasi, misalnya saat cuaca mendung, hujan, atau di malam hari (Hermawan & Nurpulaela, 2024).

2.3 Modul Fotovoltaik

Modul fotovoltaik adalah perangkat elektronik yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Modul ini terdiri dari sejumlah sel surya yang dirangkai secara seri dan paralel, umumnya terdiri dari 32 hingga 40 sel per panel. Saat cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton akan menyebabkan elektron di dalam material semikonduktor bergerak bebas, sehingga menghasilkan arus listrik.

Setiap sel fotovoltaik biasanya terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon, yang mampu menyerap energi cahaya. Ketika foton dari cahaya matahari berinteraksi dengan permukaan sel, proses ini mendorong pelepasan elektron, yang kemudian menghasilkan arus listrik. Listrik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, mulai dari kebutuhan rumah tangga hingga sistem pembangkit listrik skala besar (Dwisari *et al.*, 2023).

Modul Fotovoltaik berperan sebagai komponen utama dalam sistem fotovoltaik, yang bertugas mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Kapasitas daya yang dihasilkan panel diukur dalam satuan Watt-peak (Wp) , yaitu besaran daya maksimum yang dapat dihasilkan panel dalam kondisi optimal, yaitu pada intensitas cahaya 1000 W/m^2 dan suhu lingkungan 25°C (Rifaldi *et al.*, 2023).

Menurut Sugiarta (2014), kinerja panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, yaitu:

1. Material penyusun panel surya

Jenis material semikonduktor yang digunakan menentukan panel efisiensi. Umumnya digunakan bahan silikon kristalin yang terbagi menjadi monokristalin (*single crystal*) dan polikristalin (*multi-crystalline*). Selain itu, ada juga silikon amorf yang berbentuk lapisan tipis (*thin film*). Sel monokristalin umumnya memiliki efisiensi lebih tinggi dibandingkan polikristalin.

2. Resistansi beban atau tegangan baterai

Tegangan baterai mempengaruhi kinerja panel, karena panel harus beroperasi pada tegangan yang lebih tinggi dari tegangan baterai untuk dapat mengisi daya

secara optimal. Kinerja terbaik dicapai saat panel beroperasi di sekitar titik daya maksimum (Maximum Power Point, MPP). Bila tegangan baterai berada jauh di atas atau di bawah titik ini, panel efisiensi akan menurun.

3. Intensitas pada cahaya matahari

Arus listrik yang dihasilkan panel sebanding dengan intensitas cahaya yang diterima. Semakin tinggi intensitas cahaya matahari, semakin besar pula arus dan daya yang dihasilkan.

4. Suhu atau temperatur panel surya

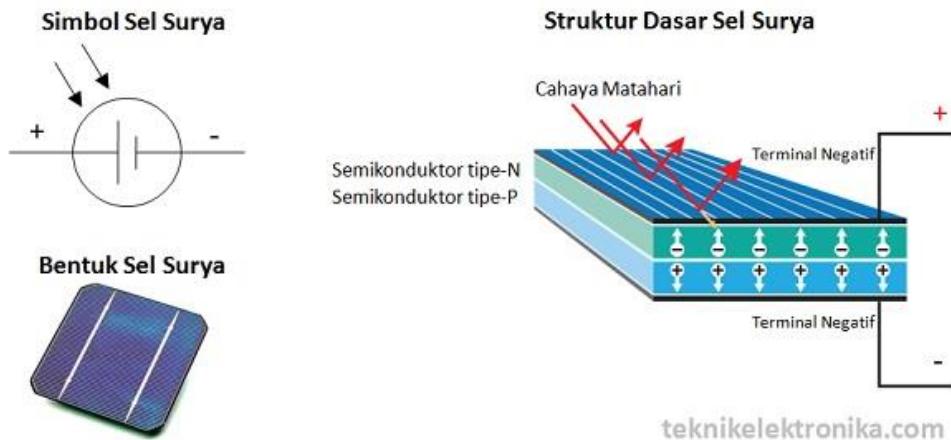
Peningkatan suhu panel di atas suhu standar 25°C dapat menyebabkan penurunan efisiensi dan tegangan kerja panel, karena panas menambah resistansi internal panel. Oleh karena itu, sirkulasi udara di sekitar panel menjadi penting untuk membantu mendinginkan panel.

5. *Shading* atau bayangan

Adanya bayangan yang menutupi sebagian atau seluruh panel sel akan mengurangi daya output. Beberapa jenis panel lebih sensitif terhadap efek shading dibandingkan jenis lainnya.

2.4 Karakteristik Sel Fotovoltaik

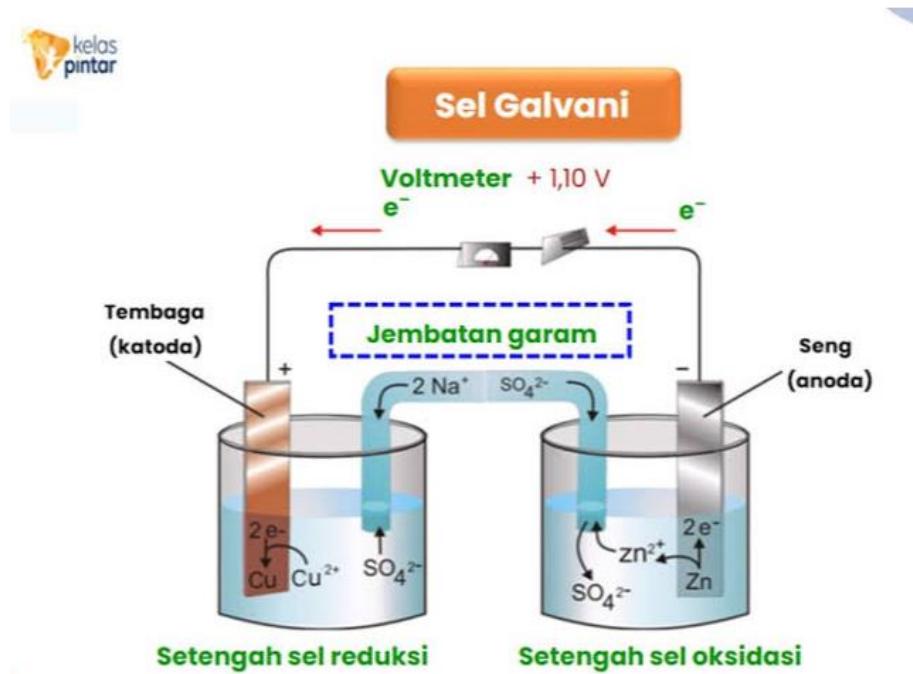
Karakteristik sel fotovoltaik sangat penting untuk memahami efisiensi dan kinerja dalam konversi energi matahari menjadi energi listrik. Karakteristik mendasar sel fotovoltaik ditentukan oleh struktur pita energi (struktur pita) material semikonduktor yang digunakan. Pita energi dalam sel fotovoltaik, sebagaimana dilihat pada **Gambar 2.3**, berkaitan erat dengan struktur dasar sel surya. Sel fotovoltaik tersusun dari lapisan semikonduktor tipe-P dan tipe-N yang membentuk p-n junction. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel, foton akan memberikan energi pada elektron di pita valensi sehingga tereksitasi ke pita konduksi. Elektron yang berpindah ini kemudian bergerak bebas menuju terminal, sedangkan hole mengalir ke arah sebaliknya, sehingga tercipta arus listrik. Lebar pita energi (*band gap*) menjadi faktor penting karena menentukan seberapa mudah elektron dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Semakin sesuai lebar pita energi dengan spektrum cahaya matahari, semakin tinggi efisiensi konversi energi yang dapat dicapai (Green et al., 2018).



Gambar 2.3 Sel Fotovoltaik (Sumber: Teknik Elektronika)

Sel fotovoltaik memiliki efisiensi konversi yang tinggi. Efisiensi konversi sel fotovoltaik merupakan salah satu indikator penting untuk mengevaluasi kinerjanya. Efisiensi konversi mengacu pada kemampuan sel fotovoltaik untuk mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. Efisiensi konversi sel surya umum yang saat ini beredar di pasaran umumnya berkisar antara 15% hingga 25%, di antaranya sel fotovoltaik silikon polikristalin memiliki efisiensi konversi yang lebih tinggi. Efisiensi konversi yang tinggi berarti sel fotovoltaik dapat menggunakan energi sinar matahari secara lebih efisien dan menghasilkan lebih banyak listrik (Raggio, 2024).

Selain itu, dikenal juga sel galvanis seperti pada **Gambar 2.4**, yaitu sel elektrokimia yang menghasilkan listrik dari reaksi redoks spontan antar elektroda. Meskipun berbeda dari segi sumber energi dan mekanisme, sel fotovoltaik dan sel galvanis sama-sama menghasilkan listrik karena adanya perbedaan potensial.



Gambar 2.4 Sel Galvanis (Sumber: Tanya Mipi)

Pada sel galvanis, perbedaan potensi timbul akibat reaksi kimia yang berlangsung di dalamnya, sedangkan pada sel fotovoltaik, tegangan listrik terbentuk melalui efek fotovoltaik pada persambungan semikonduktor ketika menerima paparan cahaya. Keduanya sama-sama memanfaatkan aliran elektron dari potensi tinggi menuju potensi rendah, namun yang membedakan adalah sumber energi yang digunakan, yaitu energi kimia pada sel galvanis dan energi cahaya (foton) pada sel fotovoltaik.

2.5 Prinsip Kerja Modul Fotovoltaik

2.5.1 Efek Fotovoltaik

Efek fotovoltaik adalah proses di mana energi cahaya matahari (foton) yang jatuh pada bahan semikonduktor menyebabkan terjadinya pergerakan elektron, sehingga menghasilkan arus listrik (Asyari *et al.*, 2022). Prinsip dasar inilah yang mendasari cara kerja modul fotovoltaik dalam mengubah energi cahaya menjadi energi listrik.

Modul fotovoltaik tersusun atas banyak sel surya yang dihubungkan secara seri maupun paralel dalam satu bingkai. Setiap sel fotovoltaik dapat menghasilkan tegangan sekitar 0,5 Volt. Dengan mengatur jumlah dan konfigurasi sambungan antar sel, diperoleh modul fotovoltaik yang memiliki tegangan dan arus listrik sesuai kebutuhan sistem (Kharisma, 2018).

Arus listrik yang dihasilkan oleh modul surya berupa arus searah (DC), yang kemudian dapat digunakan langsung oleh perangkat tertentu atau diubah menjadi arus bolak-balik (AC) dengan menggunakan inverter. Hal ini memungkinkan listrik yang dihasilkan digunakan untuk kebutuhan rumah tangga maupun industri (Rahmanta *et al.*, 2023).

Istilah fotovoltaik sendiri berasal dari kata photo (bahasa Yunani) yang berarti cahaya, dan volt yang merupakan satuan tegangan listrik (Azmi, 2022). Istilah ini pertama kali diperkenalkan oleh fisikawan Prancis, Alexandre Edmond Becquerel pada tahun 1839 (Jusran *et al.*, 2020). Sistem fotovoltaik secara umum dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu:

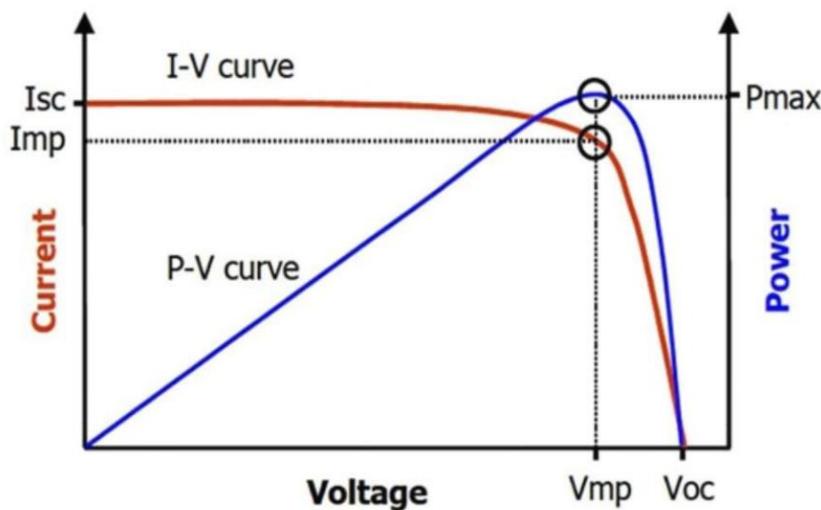
1. Sistem fotovoltaik *off-grid*, yaitu sistem yang berdiri sendiri dan dilengkapi dengan unit penyimpan energi (baterai), digunakan untuk wilayah yang tidak terhubung ke jaringan listrik nasional.
2. Sistem fotovoltaik *on-grid*, yaitu sistem yang terhubung langsung ke jaringan listrik umum, sehingga energi yang dihasilkan dapat disalurkan ke jaringan atau digunakan langsung (Rauf *et al.*, 2023).

Kinerja modul fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh efisiensi konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Efisiensi ini bergantung pada sel material, intensitas cahaya, suhu operasi, serta kondisi pemasangan (Kharisma, 2018). Untuk mengetahui karakteristik dan kinerja modul fotovoltaik, biasanya digunakan kurva arus-tegangan (IV) dan kurva daya-tegangan (PV) sebagai indikator kinerja.

2.5.2 Kurva I-V dan P-V sebagai Indikator Kinerja

Untuk memancarkan kinerja suatu modul fotovoltaik, digunakan kurva arus-tegangan (I–V) dan kurva daya-tegangan (P–V) sebagai indikator utama. Kurva kedua ini memberikan informasi penting mengenai bagaimana modul fotovoltaik beroperasi di bawah berbagai kondisi pencahayaan dan suhu. Melalui pengukuran kurva I–V, dapat diketahui parameter-parameter kunci, seperti daya maksimum (P_{max}), arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), dan faktor pengisian (Fill Factor atau FF).

Kinerja optimal suatu modul fotovoltaik dicapai ketika arus dan tegangan berada pada titik daya maksimum (Maximum Power Point, MPP). Nilai P_{max} merupakan hasil perkalian antara tegangan pada titik maksimum (V_{mp}) dan arus pada titik maksimum (I_{mp}) (Prakoso *et al.*, 2021). Seiring perubahan tingkat iradiasi, bentuk kurva I–V akan mengalami perubahan. Semakin tinggi intensitas cahaya yang diterima modul, maka arus yang dihasilkan juga akan meningkat, sehingga daya yang dihasilkan menjadi lebih besar. Sebaliknya, penurunan iradiasi akan menurunkan daya keluaran (Sidopekso *et al.*, 2011). **Gambar 2.5** berikut ini menunjukkan contoh karakteristik kurva I–V dan P–V dari suatu modul fotovoltaik.



Gambar 2.5 Kurva Karakteristik I-V dan P-V (Prakoso *et al.*, 2021)

Berdasarkan **Gambar 2.5** tersebut, dapat dilihat bahwa titik puncak kurva P–V merupakan titik Maximum Power Point (MPP) . Pada titik inilah modul fotovoltaik

bekerja dengan efisiensi tertinggi. Untuk memastikan sistem selalu beroperasi pada titik MPP, biasanya diterapkan teknik Maximum Power Point Tracking (MPPT) yang berfungsi menyesuaikan beban agar sesuai dengan kondisi optimal (Prakoso *et al.*, 2021).

2.6 Standar SNI IEC 61215

Standar Nasional Indonesia (SNI) IEC 61215 adalah standar nasional yang diadopsi dari standar Internasional IEC 61215 yang digunakan untuk menguji dan mengkualifikasi modul fotovoltaik, dengan tujuan untuk memastikan kualitas, kinerja, dan ketahanan modul terhadap berbagai kondisi lingkungan. Standar ini memiliki peran penting dalam pengembangan industri energi terbarukan di Indonesia, karena penerapannya dapat meningkatkan kualitas produk dalam negeri melalui standar persyaratan teknis yang ketat dan diakui secara global.

SNI IEC 61215, yang diterbitkan oleh Badan Standardisasi Nasional (*BSN*), berfungsi sebagai acuan dalam penilaian kinerja dan akurasi modul fotovoltaik. Pengujian dilakukan melalui serangkaian metode yang menguji kualitas desain modul serta ketahanannya dalam menghadapi berbagai tegangan lingkungan. Standar ini mendefinisikan berbagai metode pengujian yang digunakan di seluruh dunia dalam sistem industri energi fotovoltaik (Zhu & Xiao, 2020).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Repins *et al.*, (2020), Seri SNI IEC 61215 bertujuan untuk memastikan bahwa modul fotovoltaik telah memenuhi kualifikasi desain dan identifikasi potensi kegagalan modul berdasarkan pengujian empiris. Melalui standar ini, modul diuji dengan berbagai pengujian stres yang dipercepat, seperti uji panas lembab, beban mekanis, dan siklus termal. Pengujian tersebut dirancang untuk membedakan antara modul yang rentan gagal atau mengalami degradasi dan modul yang masih memiliki kinerja sesuai spesifikasi.

2.7 *Module Qualification Test (MQT)* dalam SNI IEC 61215

Berdasarkan SNI IEC 61215:2016 menetapkan 19 tahapan pengujian atau yang dikenal sebagai *Module Qualification Test (MQT)*, yang bertujuan untuk mengevaluasi keandalan, kinerja, dan ketahanan modul fotovoltaik. Prosedur ini dirancang untuk memastikan bahwa modul fotovoltaik dapat beroperasi secara optimal dalam berbagai kondisi lingkungan yang mungkin dihadapi selama masa pakainya. Adapun 19 tahapan dalam pengujian modul fotovoltaik dalam SNI IEC 61215, sebagai berikut.

2.7.1 Inspeksi Visual atau *Visual Inspection*

Untuk memastikan kualitas modul fotovoltaik, sering kali kita menghadapi tantangan dalam mengidentifikasi cacat-cacat kecil seperti retakan, pecahan, dan korsleting. Dalam konteks ini, identifikasi berbagai jenis cacat pada modul fotovoltaik telah menjadi fokus penting dalam bidang inspeksi. Salah satu teknologi yang digunakan untuk itu adalah *electroluminescence* (EL), yang bekerja berdasarkan prinsip injeksi pembawa berlebih ke dalam sel surya berbasis silikon kristal. Dengan metode ini, senyawa pembawa langsung akan memancarkan cahaya inframerah, yang kemudian diterima oleh detektor untuk membentuk gambar (Li *et al.*, 2023).

Inspeksi visual bertujuan untuk mengidentifikasi cacat fisik pada modul yang berpotensi mengurangi tingkat kinerjanya. Pemeriksaan visual pada modul surya dilakukan dengan sangat hati-hati dibawah iluminasi tidak kurang dari 1000 lux untuk mengamati kondisi visual dari modul surya dan memastikan modul surya tersebut tidak terdapat cacat berat visual yang dapat mengakibatkan risiko hilangnya kualitas, termasuk daya output pada modul (Alimuddin *et al.*, 2023).

2.7.2 Penentuan Daya Maksimum (MQT 02)

Pengujian daya maksimum (MQT 02) adalah bagian penting dari standar SNI IEC 61215 untuk mengevaluasi kinerja modul fotovoltaik. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur daya maksimum modul fotovoltaik pada kondisi pengujian standar

(STC), yaitu irradiasi 1000 W/m^2 , suhu 25°C , dan spektrum AM1.5. Prosedur melibatkan pengukuran karakteristik arus-tegangan (I-V) menggunakan simulator surya untuk menentukan daya maksimum (P_{max}), arus hubung singkat (I_{sc}), dan tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}) (BSN-b, 2018).

2.7.3 Uji Insulasi (MQT 03)

Uji insulasi dilakukan untuk memastikan bahwa modul memiliki isolasi listrik yang memadai guna mencegah terjadinya kebocoran arus atau kegagalan sistem akibat adanya kontak listrik yang tidak diinginkan. Pengujian ini bersifat penting karena bertujuan untuk menjamin keamanan terhadap potensi arus bocor yang berbahaya. Uji ini dilaksanakan pada seluruh sampel modul, baik sebelum maupun setelah rangkaian pengujian berdasarkan IEC 61215 (BSN-b, 2018).

2.7.4 Pengukuran Koefisien Temperatur (MQT 04)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan koefisien suhu arus (α), tegangan (β), dan daya (δ) modul fotovoltaik. Nilai koefisien yang ditentukan dari suhu modul 80°C hingga suhu NMOT modul yang dihasilkan. Hasilnya digunakan untuk memahami bagaimana performa modul berubah seiring perubahan suhu (BSN-b, 2018).

2.7.5 Pengukuran NMOT (MQT 05)

Nominal Module Operating Temperature (NMOT) didefinisikan sebagai temperatur rata-rata sambungan sel surya dalam keadaan seimbang pada modul yang dipasang di rak penyangga, yang beroperasi pada kondisi daya puncak. Daya modul surya bergantung pada temperatur sel yang dipengaruhi oleh temperatur lingkungan, radiasi matahari dan kecepatan angin.

NMOT dapat dijadikan acuan bagi perancang sistem untuk menentukan nilai temperatur di mana modul akan beroperasi di lapangan. Namun, temperatur operasional yang sebenarnya pada waktu tertentu dipengaruhi oleh berbagai

elemen, seperti struktur penyangga, jarak dari permukaan tanah, radiasi matahari, kecepatan angin serta temperatur lingkungan dan langit. Oleh karena itu, untuk memprediksi kinerja dengan akurat, semua faktor ini perlu diperhitungkan. Metode ini didasarkan pada pengumpulan temperatur modul aktual yang diukur berdasarkan berbagai kondisi lingkungan (BSN-b, 2018).

2.7.6 Kinerja pada STC dan NMOT (MQT 06)

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi performa modul pada dua kondisi standar, yaitu STC (*Standar Test Conditions*) dan NMOT (*Nominal Module Operating Temperature*). Tujuannya adalah untuk mengetahui bagaimana kinerja listrik modul berubah terhadap variasi beban pada temperatur sel. Pada kondisi STC, pengujian dilakukan pada suhu 25 °C dengan intensitas cahaya 1000 W/m² dan distribusi spektral *Amplitude Modulation* (AM) 1,5 G, sedangkan pada kondisi NMOT, pengujian dilakukan pada suhu sekitar 20 °C dan intensitas cahaya 800 W/m² (BSN-b, 2018).

2.7.7 Kinerja pada Iradiasi Rendah (MQT 07)

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan bagaimana kinerja modul yang dihasilkan dengan beban suhu 20 °C dan radiasi berada pada 200 W/m² yang diukur dengan menggunakan *mark* iradiasi. Prosedur melibatkan pengukuran karakteristik I-V pada 200 W/m², suhu 25°C, dan spektrum AM1.5, lalu membandingkan efisiensi dengan hasil STC. Pengujian ini penting untuk aplikasi di daerah dengan cahaya matahari rendah (BSN-b, 2018).

2.7.8 Uji Paparan Luar Ruangan (MQT 08)

Untuk menguji kinerja modul terhadap tahanan paparan sinar matahari secara langsung serta untuk memperlihatkan efek degradasi sinergi yang mungkin tidak terdeteksi dalam pengujian di laboratorium dengan hasil pengujian akhir tidak ada bukti cacat visual maupun arus kebocoran basah yang terjadi pada modul.

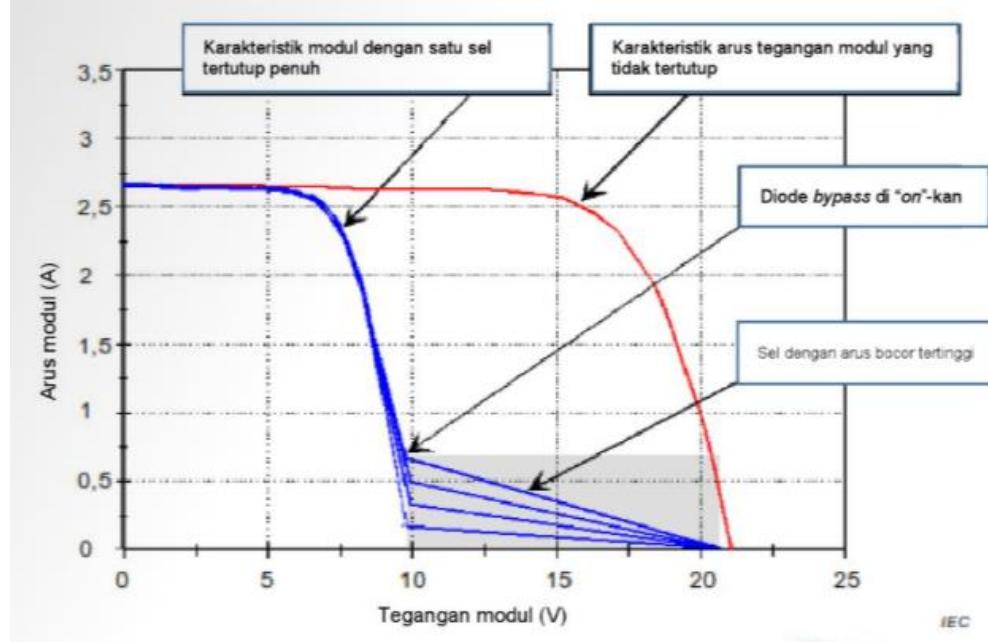


Gambar 2.6 Uji *Outdoor Testing* (Sumber: Laboratorium Fotovoltaik, BRIN)

Prosedur melibatkan paparan modul pada total irradiasi surya 60 kWh/m^2 di luar ruangan, diikuti dengan inspeksi visual dan pengukuran daya. Pengujian ini memastikan modul tahan terhadap degradasi awal (BSN-b, 2018).

2.7.9 Uji Ketahanan *Hot-Spot* (MQT 09)

Uji *hot-spot* terjadi dalam modul apabila arus operasinya mencapai arus hubung singkat (I_{sc}) yang berkurang akibat bayangan atau kerusakan sel atau group sel karena gelap atau rusak. Prosedur ini melibatkan pemberian bayangan pada sel untuk mengetahui kemampuan modul dalam menahan efek pemanasan *hot-spot*. Seperti pada **Gambar 2.7** yang menunjukkan serangkaian hasil kurva I-V untuk sampel modul, dimana kurva dengan arus bocor tertinggi pada titik dimana diode bekerja saat sel dengan tahanan shunt terendah dibayangi dan kurva dengan arus bocor paling rendah pada titik dimana diode bekerja diambil dengan tahanan shunt tertinggi diberi bayangan (BSN-b, 2018).



Gambar 2.7 Karakterisasi modul I-V dengan semua sel diberi *shading* (BSN-b, 2018)

2.7.10 Uji Prakondisi (MQT 10)

Pengujian ini bertujuan untuk mengkondisikan modul dengan radiasi *Ultra Violet* (UV) sebelum dilakukan uji pembekuan siklus atau kelembapan termal untuk mengidentifikasi bahan-bahan dan ikatan adhesi yang rentan terhadap degradasi UV. Prosedur melibatkan paparan modul pada 15 kWh/m^2 radiasi UV (280–400 nm) pada suhu 60°C , diikuti dengan inspeksi degradasi dan pengukuran daya (BSN-b, 2018).

2.7.11 Uji Siklus Termal (MQT 11)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan modul untuk menahan ketidaksesuaian termal, kelelahan dan tekanan lainnya yang disebabkan oleh perubahan temperatur berulang. Uji siklus termal menilai ketahanan modul terhadap perubahan suhu berulang. Prosedur melibatkan 200 siklus termal antara -40°C dan $+85^\circ\text{C}$. Pengujian ini memastikan modul tahan terhadap stres termal (BSN-b, 2018).

2.7.12 Uji Kelembapan-Beku (MQT 12)

Pengujian ini dilakukan untuk menahan efek temperature dan kelembappan tinggi yang diikuti dengan temperature dibawah nol. Uji kelembapan-beku mengevaluasi performa modul pada kondisi kelembapan tinggi dan suhu rendah. Prosedur melibatkan 10 siklus pada 85°C/85% kelembapan relatif diikuti -40°C (BSN-b, 2018).

2.7.13 Uji Panas-Lembab (MQT 13)

Pengujian ini dilakukan Uji panas-lembap menilai ketahanan modul terhadap paparan panas dan kelembapan jangka panjang. Prosedur melibatkan paparan modul pada 1000 jam di 85°C dan 85% kelembapan relatif (BSN-b, 2018).

2.7.14 Uji Ketahanan Terminasi (MQT 14)

Uji ketahanan terminasi memverifikasi daya tahan sambungan listrik seperti kotak sambungan dan konektor. Prosedur melibatkan penerapan stres mekanis yang meliputi uji tarik, uji torsi atau putar (BSN-b, 2018).

2.7.15 Uji Kebocoran Arus Basah (MQT 15)

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi isolasi pada modul dibawah kondisi operasi basah dan memastikan kelembapan dari hujan, kabut, embun atau salju yang cair tidak akan masuk ke bagian aktif sirkuit modul yang akan menyebabkan korosi dan kegagalan atau bahaya keamanan. Prosedur melibatkan perendaman atau penyemprotan modul dengan air, lalu menerapkan tegangan (misalnya, 500 V DC) dan mengukur arus kebocoran, yang harus di bawah batas tertentu (BSN-b, 2018).

2.7.16 Uji Beban Statis (MQT 16)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan modul dalam menahan beban statis. Dalam prosesnya, pengujian juga mencakup verifikasi terhadap beban uji minimum yang disyaratkan, serta mempertimbangkan kemungkinan adanya

persyaratan tambahan yang relevan. Penentuan beban desain minimum tidak dilakukan melalui uji coba-gagal konstruksi, karena hal tersebut tidak termasuk dalam cakupan standar. Nilai beban desain minimum dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis konstruksi, standar yang digunakan, serta kondisi lokasi atau iklim setempat. Selain itu, diperlukan tingkat pengambilan sampel yang lebih tinggi dan penerapan faktor keselamatan tertentu, dengan nilai faktor keselamatan Y_m minimal sebesar 1,5. Berdasarkan ketentuan standar, beban desain minimum ditetapkan sebesar 1.600 Pa, yang berarti beban uji minimum yang harus diterapkan adalah 2.400 Pa. (BSN-b, 2018).

2.7.17 Uji Tumbukan Bola Es (MQT 17)

Pengujian ini dilakukan untuk memastikan bahwa modul ini mampu menahan dampak dari tembakan bola es. Prosedur melibatkan penembakan bola es (misalnya, diameter 25 mm, berat 7,53 g) dengan kecepatan tertentu pada titik kritis modul, diikuti dengan inspeksi kerusakan dan pengukuran daya (BSN-b, 2018).

2.7.18 Uji Termal Diode Bypass (MQT 18)

Pengujian ini dirancang untuk menentukan karakteristik temperatur diode dan temperatur maksimum diode. Prosedur melibatkan simulasi kondisi gangguan dengan mengalirkan arus melalui dioda pada suhu tinggi, lalu memeriksa fungsi dioda dan integritas modul (BSN-b, 2018).

2.7.19 Stabilisasi (MQT 19)

Semua modul fotovoltaik harus stabil secara elektrik. Uji stabilisasi memastikan performa modul stabil setelah degradasi awal akibat paparan cahaya. Prosedur melibatkan paparan modul pada cahaya (misalnya, pada irradiasi 1000 W/m²) hingga daya keluaran stabil. Prosedur dan pengukuran daya keluaran ini harus diulang sampai modul dinilai mencapai tingkat output daya yang stabil (BSN-b, 2018).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari 2025 hingga Maret 2025 di Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Laboratorium Pengujian Modul Fotovoltaik - BRIN berlokasi di Gedung 625 KST BJ Habibie Kawasan PUSPITEK, Serpong.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam pengujian modul fotovoltaik ini dapat dilihat pada **Tabel 3.1** dan **Tabel 3.2**.

Tabel 3.1 Alat - alat Penelitian

No	Nama	Fungsi
1.	Laptop	Untuk mengolah dan menganalisis data.
2.	<i>Sun Simulator</i>	Mengukur performa listrik (Pmax, Isc, Voc, FF) dan efisiensi modul di bawah simulasi cahaya matahari standar (STC).
3.	Lampu Penerangan 1000 lux dan <i>Electroluminescence</i> (EL)	Mendeteksi cacat visual dan tersembunyi (mikro-retak, sambungan buruk) pada permukaan modul.
4.	<i>Electrical Safety Testing</i>	Memastikan insulasi listrik aman, mencegah kebocoran arus di berbagai kondisi.
5.	<i>Outdoor Testing</i>	Menilai performa modul di kondisi lingkungan nyata (sinar matahari, suhu, kelembapan).
6.	Hotspot Dan <i>Stabilization Test</i>	Mengidentifikasi hotspot dan menstabilkan output daya modul sebelum pengujian lain.

Lanjutan Tabel 3.1

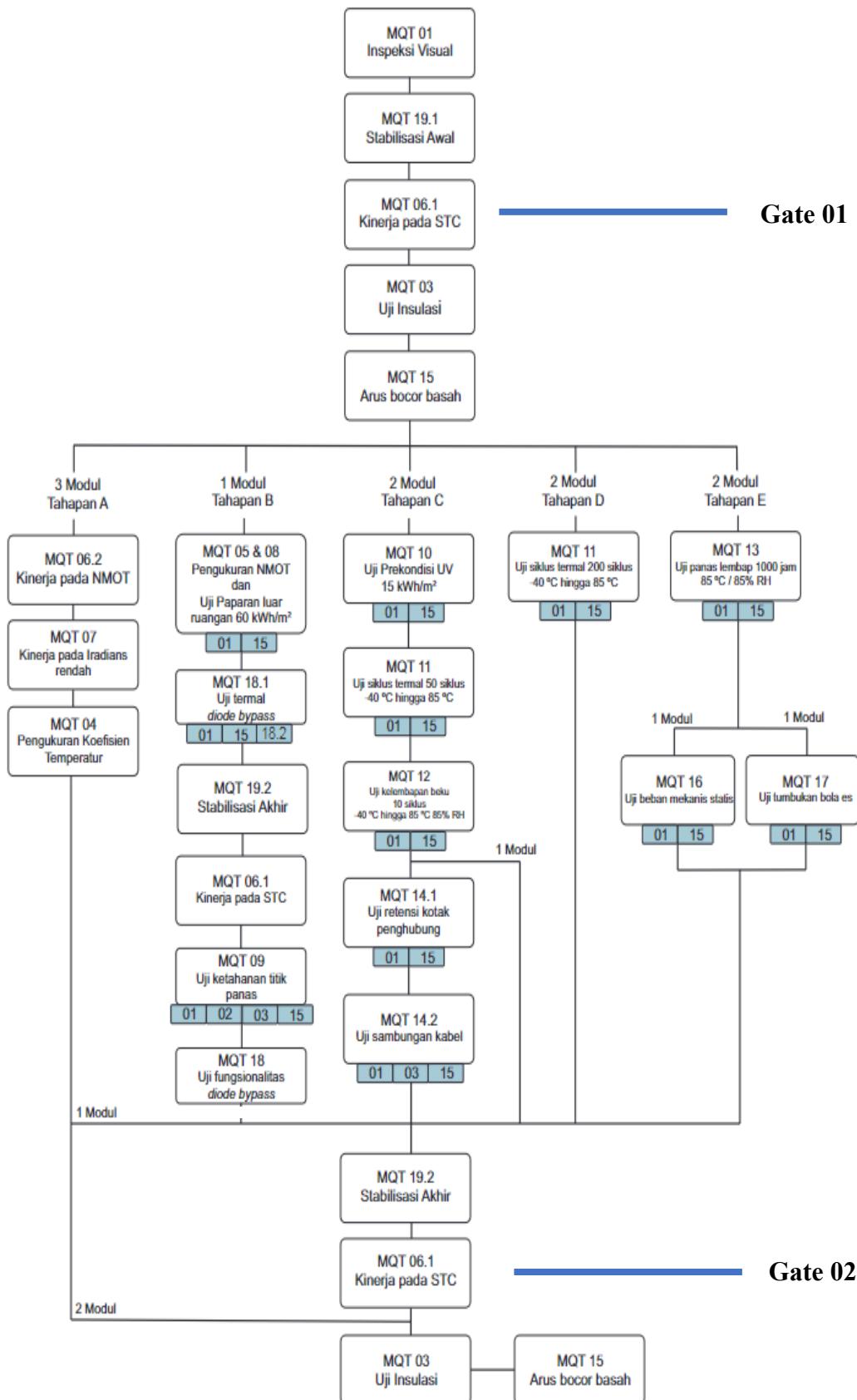
No	Nama	Fungsi
7.	Ruang Paparan UV	Menguji ketahanan material modul terhadap paparan sinar ultraviolet.
8.	Ruang Iklim (<i>Klimatik Chamber</i>)	Mensimulasikan uji siklus termal, pembekuan kelembapan dan panas lembab
9.	Uji Beban Mekanis (<i>Mechanical Load Tester</i>)	Menguji ketahanan modul terhadap tekanan mekanis seperti angin atau beban salju.
10.	<i>Hail Test</i>	Menguji ketahanan terhadap tembakan bola es.
11.	<i>Bypass Diode Test</i>	Memastikan dioda bypass mencegah kerusakan akibat arus balik atau bayangan parsial.
12.	Modul Referensi atau Golden Modul	Sebagai standar kalibrasi untuk memastikan akurasi pengukuran <i>sun simulator</i> .

Tabel 3.2 Bahan - bahan Penelitian

No	Nama	Fungsi
1.	10 Modul Fotovoltaik Type 360 Wp	Sebagai objek untuk pengukuran kinerja modul.

3.3 Prosedur Penelitian

Berdasarkan pada SNI IEC 61215-1:2016, rangkaian pengujian ini dilakukan seperti pada **Gambar 3.1**, yang menunjukkan urutan tahapan mulai dari pengujian tahap awal atau gate 01, kemudian pembagian modul untuk pelaksanaan tahapan pengujian berdasarkan kelompok tahapan pengujian, hingga pada pengujian tahap akhir.



Gambar 3.1 Prosedur Uji Berdasarkan SNI IEC 61215-1:2016 (BSN-a, 2018)

Berdasarkan **Gambar 3.1** memperlihatkan urutan tahapan pengujian yang diterapkan pada modul fotovoltaik sesuai dengan standar SNI IEC 61215-1:2016. Di luar tahapan pengujian tersebut, penelitian ini juga mencakup serangkaian tahapan penelitian lainnya, dimulai dari studi literatur sebagai dasar teori hingga analisis terhadap hasil akhir pengujian, yang akan dijelaskan pada bagian berikut.

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kinerja modul fotovoltaik akibat pengaruh lingkungan melalui serangkaian uji berdasarkan SNI IEC 61215:2016. Sebanyak sepuluh unit modul fotovoltaik digunakan dalam penelitian ini, yang kemudian dibagi menjadi lima kelompok berdasarkan tahapan pengujian. Setiap tahapan mewakili beberapa pengujian seperti paparan terhadap suhu ekstrem, kelembapan tinggi, beban mekanis, serta ketahanan terhadap beban tembakan bola es. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk membandingkan daya keluaran maksimum (P_{max}) sebelum dan sesudah setiap tahapan pengujian, guna mengetahui tingkat penurunan kinerja yang terjadi.

3.3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan informasi yang berkaitan dengan penelitian ini. Adapun referensi utama yang digunakan berasal dari buku, jurnal, artikel ilmiah serta mencari sumber informasi lainnya sebagai dasar teori. Studi literatur juga dilakukan dengan cara melakukan penelusuran jurnal ke portal *google scholar*, *science direct* dan portal *scopus* untuk mencari referensi dalam penyusunan laporan penelitian ini.

3.3.2 Persiapan Modul dan Alat Uji

Persiapan modul dan alat uji dengan mengidentifikasi modul fotovoltaik yang akan diuji, pemeriksaan awal terhadap kondisi fisik dan kelistrikan modul fotovoltaik, serta penyediaan dan kalibrasi peralatan yang digunakan selama proses pengujian sesuai dengan prosedur dalam SNI IEC 61215:2016.

Dalam pengujian modul fotovoltaik digunakan modul dengan type 360 Wp, dimana ukuran modul dengan panjang modul sekitar 1,96 meter, lebar modul sekitar 0,99 meter dan ketebalan modul sekitar 0,04 meter seperti pada **Lampiran 3**.

3.3.2.1 Identifikasi Modul

Penelitian ini menggunakan 10 modul fotovoltaik dengan spesifikasi tipe yang seragam. Masing-masing modul diberikan kode identifikasi yang disesuaikan dengan urutan pengujian, seperti A1, A2, A3, B1, C1, C2, D1, D2, E1 dan E2 seperti pada **Gambar 3.2**. Pemberian kode ini bertujuan sebagai penanda untuk memudahkan pelacakan hasil setiap pengujian serta memungkinkan dilakukan perbandingan antar modul setelah pengujian selesai dilakukan.



Gambar 3.2 Pemberian Kode pada Modul Fotovoltaik

3.3.2.2 Pemeriksaan Awal Modul

Sebelum dilakukan pengujian sesuai dengan urutan pengujian IEC 61215, modul terlebih dahulu melewati tahapan pemeriksaan awal yaitu pengecekan visual secara langsung seperti pada **Gambar 3.3**. Hal ini bertujuan untuk mendeteksi cacat fisik awal (seperti, retakan permukaan sel, delaminasi, korosi, kerusakan konektor dan kabel) sebelum modul melewati pengujian secara langsung.



Gambar 3.3 Pengambilan Gambar Visual Sebelum Dilakukan Pengujian

3.3.3 Pengujian Awal Modul

Pengujian awal atau gate 01 merupakan tahapan penting sebelum modul fotovoltaik menjalani urutan pengujian sesuai SNI IEC 61215:2016. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik kinerja modul awal, yang akan dijadikan acuan dalam membandingkan hasil setelah modul melewati berbagai tahap pengujian. Data yang diperoleh dari pengujian awal ini berfungsi sebagai nilai pembanding untuk menilai tingkat degradasi atau perubahan kinerja modul setelah melalui setiap urutan pengujian yang diterapkan.

Berdasarkan dengan **Gambar 3.1**, Pengujian awal atau gate 01 mencangkup lima jenis uji sesuai dengan *Module Quality Test* (MQT) dalam standar sebagai berikut.

3.3.3.1 Inspeksi Visual (MQT 01 - *Visual Inspection*)

Inspeksi visual bertujuan untuk mengidentifikasi adanya cacat fisik atau kerusakan pada modul fotovoltaik. Beberapa aspek yang diperiksa dalam tahap ini meliputi retakan pada sel surya (*cell cracks*), delaminasi atau lepasnya lapisan laminasi, kondisi *frame*, *backsheets*, frame aluminium, keterbacaan label identifikasi, serta kondisi kabel dan konektor MC4. Proses pemeriksaan dilakukan secara menyeluruh, dengan hasil yang didokumentasikan melalui foto digital dan dicatat

secara tertulis. Jika ditemukan kerusakan signifikan, modul tersebut dapat dikeluarkan dari tahapan pengujian selanjutnya.

3.3.3.2 Stabilisasi (MQT 19.1 - *Stabilization Procedure*)

Proses stabilisasi dilakukan untuk memastikan kinerja modul berada dalam kondisi normal dan bebas dari pengaruh sementara akibat penyimpanan atau perpindahan sebelum pengujian kinerja dilakukan. Stabilisasi dilakukan dengan mengoperasikan modul di bawah sinar matahari alami hingga modul mencapai kestabilan output daya, yaitu kondisi operasi yang konsisten dan terkendali untuk tegangan, arus, dan daya. Modul dianggap stabil ketika variasi output dayanya berada di bawah ambang batas 1%, sesuai dengan persamaan (3.1) sebagai berikut.

$$\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{rata-rata}} < x \quad (3.1)$$

Dimana,

P_{max} = Daya maksimum

P_{min} = Daya minimum

$P_{rata-rata}$ = Rata-rata daya output selama proses stabilisasi

x = Ambang batas stabil modul (1%).

Prosedur ini memastikan hasil pengujian mencerminkan kinerja sebenarnya modul sesuai spesifikasi teknologinya.

3.3.3.3 Pengujian Performa pada STC (MQT 06.1 - *Performance at STC*)

Setelah modul melewati tahap stabilisasi, dilakukan pengujian kinerja di bawah kondisi standar atau *Standard Test Conditions* (STC), yang mencakup intensitas radiasi sebesar 1000 W/m^2 , suhu sel sebesar 25°C dan spektrum cahaya AM sebesar 1.5 Global.

Pada tahap ini, sejumlah parameter kinerja diukur, antara lain tegangan rangkaian terbuka (Voc), arus hubung singkat (Isc), tegangan dan arus pada titik daya

maksimum (Vmp dan Imp), daya maksimum (Pmax) serta faktor pengisian (Fill Factor/FF). Hasil dari pengujian ini akan dijadikan sebagai data acuan awal (*baseline*) untuk menilai sejauh mana penurunan kinerja modul terjadi setelah melalui setiap tahapan pengujian lingkungan.

3.3.3.4 Uji Isolasi (MQT 03 - *Insulation Test*)

Pengujian isolasi bertujuan untuk memastikan bahwa isolasi antara komponen listrik dan bagian konduktif seperti *frame* aluminium berada dalam kondisi yang aman. Prosedur pengujian dilakukan dengan cara mengaplikasikan tegangan DC tidak lebih dari 500 V/s sampai maksimum sama dengan 1000 V atau dua kali Voc (dipilih yang lebih besar) antara terminal dan *frame* modul. Setelah tegangan diaplikasikan, resistansi isolasi terukur dikalikan dengan luas modul dan hasilnya tidak boleh kurang dari 40 megaohm ($M\Omega$) jika ukuran modul dengan area yang lebih besar dari $0,1 \text{ m}^2$ dan tidak kurang dari $400 M\Omega$ jika ukuran modul dengan luas kurang dari $0,1 \text{ m}^2$, atau sesuai batas yang ditentukan oleh standar yang berlaku. Pemenuhan persyaratan ini menunjukkan bahwa sistem isolasi modul telah memenuhi standar keamanan.

3.3.3.5 Uji Arus Bocor (MQT 15 - *Wet Leakage Current Test*)

Pengujian arus bocor bertujuan untuk menguji seberapa baik modul fotovoltaik dapat menjaga keamanan listrik saat berada dalam kondisi basah, misalnya saat terkena hujan, kabut, embun atau berada di lingkungan dengan kelembapan tinggi. Prosedur pengujian dilakukan dengan merendam modul ke dalam tangki larutan seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.4**, hingga seluruh permukaan modul terendam, kecuali bagian kotak sambungan yang memang tidak dirancang untuk dicelupkan. Jika bagian kabel tidak ikut direndam, maka harus disemprot secara menyeluruh menggunakan larutan, termasuk dengan konektor MC4 nya. Dengan begitu, pengujian ini dapat memastikan bahwa modul aman terhadap potensi kebocoran arus dalam kondisi lingkungan yang lembap.



Gambar 3.4 Proses Pengujian Arus Bocor (MQT 15) (Sumber : Laboratorium Fotovoltaik, BRIN)

Hasil dari pengujian awal ini menjadi dasar pembanding terhadap hasil pengujian akhir setelah modul melalui sequence lingkungan dan mekanik.

3.3.4 Pembagian Tahapan Pengujian

Pengujian terhadap modul fotovoltaik dalam penelitian ini dibagi ke dalam lima tahapan pengujian berdasarkan standar SNI IEC 61215:2016. Setiap tahapan terdiri dari beberapa metode uji (Module Quality Test/MQT) yang telah ditentukan seperti pada **Tabel 3.3**.

Tabel 3.3 Pengelompokan Tahapan Uji

Tahapan	Kode Modul	Jenis Pengujian	Tujuan Pengujian
A	A1, A2, A3	MQT 06.2, MQT 07,	Uji performa suhu dan
		MQT 04	iradiasi rendah
		MQT 05 & 08, MQT	
B	B1	18.1, MQT 19.2,	Paparan luar ruangan dan
		MQT 06.1,	bypass diode
		MQT 09, MQT 18	
C	C1, C2	MQT 10, MQT 11 (50 siklus), MQT 12,	Uji degradasi karena UV, siklus termal, sambungan
		MQT 14.1, MQT 14.2	

Lanjutan Tabel 3.3

Tahapan	Kode Modul	Jenis Pengujian	Tujuan Pengujian
D	D1, D2	MQT 11 (200 siklus)	Uji siklus termal ekstrem
E	E1, E2	MQT 13, MQT 16, MQT 17	Uji beban mekanik, kelembapan dan tembakan bola es

Pengelompokan tahapan pengujian ini meliputi Tahapan A, B, C, D, dan E, dengan penjelasan rinci sebagai berikut.

3.3.4.1 Tahapan A – Pengujian Awal Kinerja Termal dan Koefisien Suhu

Pada tahap ini, tiga modul (A1, A2, dan A3) digunakan untuk mengukur kinerja terhadap variasi suhu dan tingkat intensitas cahaya yang berbeda. Uji dilakukan dalam urutan sebagai berikut.

1. Kinerja pada NMOT (MQT 06.2 - *Performance at NMOT*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi daya keluaran modul pada kondisi suhu operasi nominal (NMOT). Prosedur pengujian dilakukan dengan memanaskan modul sampai mencapai suhu stabil kira-kira ± 2 °C dari NMOT yang ditentukan. Setelah suhu modul stabil di NMOT, ukur kurva arus-tegangan (I-V curve) dan daya maksimum (Pmax) pada suhu tersebut dan pada intensitas cahaya 800 ± 80 W/m². Hasilnya digunakan untuk memahami kinerja di lapangan.

2. Kinerja pada Irradiasi Rendah (MQT 07 - *Performance at Low Irradiance*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kinerja daya maksimum (Pmax) modul fotovoltaik ketika terkena radiasi rendah pada 200 W/m² dan suhu 25 °C. Prosedur pengujian dilakukan dengan suhu modul dijaga pada 25°C ± 2°C, kemudian modul diberikan filter pencahayaan manual 200 W/m² dari sun simulator. Setelah kondisi stabil, ukur I-V curve dan catat nilai Pmax, Vmp dan Imp pada modul. Hasilnya, modul yang baik akan menunjukkan penurunan efisiensi yang tidak besar saat intensitas cahaya yang rendah. Tujuannya adalah

untuk melihat respon modul terhadap kondisi langit saat mendung atau pagi/sore hari.

3. Pegukuran Koefisien Temperatur (MQT 04 - *Measurement of Temperature Coefficients*)

Pengujian ini mengukur koefisien suhu dari arus, tegangan, dan daya pada modul. Prosedur dilakukan dengan memanaskan modul hingga modul mencapai pada suhu 75°C , kemudian modul diuji pada beberapa suhu hingga penurunan suhu stabil yang biasanya berada pada suhu 25°C . Setelah suhu stabil, ukur I-V *curve* dan catat nilai P_{max} , V_{mp} dan I_{mp} pada setiap suhu. Koefisien suhu penting untuk memperkirakan performa modul pada suhu tinggi yang mungkin terjadi di lapangan.

3.3.4.2 Tahapan B - Paparan Lingkungan dan Uji Diode Bypass

Tahapan ini dilakukan pada satu modul (B1) dengan tujuan untuk mengetahui dampak radiasi dan tekanan termal terhadap kinerja modul. Adapun urutan pengujinya adalah sebagai berikut.

1. Pengukuran NMOT dan Uji Paparan Luar Ruangan (MQT 05 & MQT 08)

Pengujian ini dilakukan di luar ruangan untuk mengevaluasi ketahanan serta kestabilan kinerja modul saat terkena sinar matahari secara langsung. Pada MQT 05, pengujian ini bertujuan untuk menentukan suhu kerja nominal modul atau *Nominal Module Operating Temperature* (NMOT). Modul dipasang pada rak terbuka seperti pada **Gambar 3.5** dengan sudut kemiringan $(37 \pm 5)^{\circ}$, kemudian di uji saat intensitas cahaya mencapai 800 W/m^2 , suhu lingkungan berada pada $(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, dan kecepatan angin 1 m/s.



Gambar 3.5 String Terbuka pada Pengujian *Outdoor* (Sumber : BRIN, 2024)

Setelah suhu modul mencapai kondisi stabil, nilai rata-rata suhu tersebut dicatat sebagai nilai NMOT. Selanjutnya dilakukan MQT 08 untuk menyalakan kestabilan awal kinerja modul setelah terpapar sinar matahari dan kondisi luar ruangan, serta untuk mengidentifikasi potensi degradasi yang tidak terdeteksi saat pengujian di laboratorium. Modul tetap dibiarkan di luar dalam kondisi rangkaian terbuka hingga menerima radiasi matahari alami minimal sebesar 60 kWh/m.

2. Uji Termal Diode Bypass (MQT 18.1 - *Thermal Test of Bypass Diodes*)

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan dioda bypass dalam melindungi sel atau bagian tertentu dari modul fotovoltaik terhadap risiko titik panas (*hot spot*). Dioda bypass berfungsi untuk membatasi dampak kerusakan akibat pemanasan lokal.

Pengujian dilakukan dengan menentukan arus hubung singkat (*short-circuit current* atau I_{sc}) modul pada kondisi STC. Modul beserta kotak terminalnya dipanaskan hingga suhu $(30 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Selanjutnya, arus pulsa sebesar I_{sc} dengan durasi ≤ 1 milidetik dialirkan melalui dioda bypass, dan diukur tegangan yang timbul di ujung-ujung dioda saat dialiri arus dalam arah maju (bias maju), yang dikenal sebagai Voltage Drop (VD). Langkah ini diulang pada tiga suhu berbeda, yaitu 50°C , 70°C , dan 90°C , untuk memperoleh data VD pada tiap suhu

tersebut. Selama pengujian, kabel uji dipasang sesuai konfigurasi standar agar tidak menimbulkan panas tambahan. Hasil pengukuran VD kemudian dianalisis terhadap perubahan suhu menggunakan metode *least-squares-fit* untuk memperoleh karakteristik termal dari dioda.

3. Stabilisasi Akhir (MQT 19.2 - *Final Stabilization*)

Setelah modul melalui pengujian yang melibatkan paparan panas dan kelembapan, diperlukan proses stabilisasi guna memastikan bahwa performa yang diukur mencerminkan kondisi sesungguhnya. Proses ini dilakukan dengan mengekspos modul pada sinar matahari alami atau menggunakan simulator cahaya hingga daya keluarannya mencapai kondisi stabil, dengan tingkat deviasi maksimum tidak lebih dari 1%, sesuai dengan persamaan 3.1.

4. Pengujian Performa pada STC (MQT 06.1 - *Performance at STC*)

Setelah proses stabilisasi selesai, modul diuji ulang di bawah kondisi STC untuk mengevaluasi sejauh mana perlakuan lingkungan sebelumnya memengaruhi kinerja kelistrikannya. Penurunan daya yang mencolok dibandingkan dengan nilai awal mengindikasikan adanya degradasi awal pada material atau sel surya modul.

5. Uji Ketahanan Titik Panas (MQT 09 – *Hot-Spot Endurance Test*)

Pengujian ini dilakukan untuk menilai sejauh mana modul mampu bertahan terhadap efek titik panas (*hot-spot*), yang dapat menyebabkan kerusakan lokal pada sel atau lapisan laminasi. Selama pengujian, modul disinari dengan intensitas cahaya sebesar 1000 W/m^2 dan arus hubung singkat (Isc) dicatat. Suhu modul dijaga pada kisaran $(50 \pm 10)^\circ\text{C}$. Setiap sel yang dipilih diberi paparan simulasi cahaya matahari selama 1 jam. Jika setelah periode tersebut suhu sel yang terbayangi mengalami peningkatan, pengujian dilanjutkan hingga total waktu paparan mencapai 5 jam. Melalui uji ini, dapat dievaluasi apakah modul memiliki ketahanan yang memadai terhadap pembentukan titik panas yang berpotensi menurunkan umur modul dan perolehannya dalam jangka panjang.

6. Uji Fungsionalitas Diode Bypass (MQT 18 – *Bypass Diode Functionality Test*)

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa dioda bypass masih bekerja dengan baik. Proses pengujian dilakukan dengan membalik arah arus pada modul dan mengamati apakah arus dapat mengalir melalui dioda tanpa menimbulkan kerusakan. Dalam hal ini, dioda bypass tetap mampu menjalankan fungsinya dalam melindungi modul dari kerusakan kondisi akibat operasi tidak normal seperti pemblokiran arus oleh sel yang ternaungi.

3.3.4.3 Tahapan C – Uji Degradasi Karena UV, Siklus Termal dan Kelembapan

Tahap ini melibatkan dua modul (C1 dan C2) dan bertujuan untuk menguji ketahanan termal serta modul mekanik terhadap suhu ringan, serta menilai dampaknya terhadap kinerja dan permintaan sambungan kabel. Adapun urutan pengujianya adalah sebagai berikut.

1. Uji Prekondisi UV (MQT 10 – *UV Preconditioning Test*)

Uji ini bertujuan untuk mengondisikan modul dengan paparan ultraviolet (UV) sebelum dilakukan pengujian pembekuan siklus atau kelembapan termal, guna mendeteksi material dan ikatan adhesi yang rentan mengalami degradasi akibat paparan UV. Langkah ini dimulai dengan menggunakan radiometer yang telah dikalibrasi untuk mengukur intensitas radiasi pada permukaan modul uji. Pastikan bahwa intensitas radiasi pada jarak panjang gelombang 280–400 nm tidak melebihi 250 W/m^2 (sekitar lima kali intensitas sinar matahari alami), dan menyebarkan radiasinya secara merata dengan toleransi $\pm 15\%$ di seluruh permukaan uji. Kemudian, modul suhu harus dijaga pada $(60 \pm 10)^\circ\text{C}$ menggunakan sensor suhu.

Bagian depan modul kemudian harus menerima total dosis radiasi UV sekurang-kurangnya 15 kWh/m^2 dalam rentang panjang gelombang 280–400 nm, dengan kandungan radiasi pada rentang 280–320 nm tidak kurang dari 3% dan tidak lebih dari 10%. Selama proses ini, modul suhu harus dipertahankan sesuai jarak yang telah ditentukan.

2. Uji Siklus Termal 50 Siklus (MQT 11 – *Thermal Cycling Test (Ringan)*)

Setelah prekondisi ultraviolet, modul diuji melalui 50 siklus termal ringan dalam ruang uji lingkungan dengan pengaturan suhu presisi. Sensor suhu dipasang pada permukaan belakang modul di titik tengah dan dihubungkan ke perangkat pemantau. Modul disambungkan ke sumber arus yang sesuai, dengan arus kontinu dialirkan selama pemanasan pada rentang suhu -40 °C hingga 80 °C. Pada fase pendinginan, arus di suhu -40 °C dan di atas 80 °C dibatasi hingga 1,0% dari arus puncak STC. Jika suhu naik terlalu cepat, arus ditunda hingga suhu mencapai -20 °C. Siklus termal dilakukan antara (40 ± 2) °C dan $(+85 \pm 2)$ °C, dengan laju perubahan suhu maksimum 100 °C/jam dan stabilisasi suhu minimal 10 menit pada setiap ekstrem. Durasi siklus maksimum 6 jam, kecuali untuk modul berkapasitas panas tinggi. Prosedur ini mensimulasikan kondisi ekstrem siang-malam di lapangan.

3. Uji Kelembapan Beku (MQT 12 – *Damp Heat Test*)

Uji ini mengevaluasi ketahanan modul terhadap suhu tinggi, kelembapan, dan suhu di bawah titik beku. Sensor suhu dipasang pada bagian tengah permukaan modul fotovoltaik, lalu modul ditempatkan pada suhu kamar di ruang iklim. Modul dihubungkan ke sistem pemantauan suhu dan arus, dengan arus maksimum hingga 0,5% daya puncak STC. Setelah ruang iklim tertutup, suhu diatur antara -40 °C hingga +85 °C (± 2 °C), dengan kelembapan relatif pada suhu maksimum dijaga dalam $\pm 5\%$ dari nilai standar. Sirkulasi udara merata, dan parameter suhu, arus, serta tegangan dicatat secara berkala. Uji ini menguji ketahanan modul terhadap kondisi lembap dan beku yang dapat menyebabkan kerusakan atau penurunan kinerja.

Setelah menyelesaikan pengujian MQT 12, prosedur pengujian bercabang menjadi dua jalur untuk mengevaluasi efek pengujian mekanis secara spesifik. Pada jalur pertama, satu modul langsung menuju tahap pengujian akhir tanpa pengujian tambahan, bertujuan untuk mengukur dampak kumulatif dari pengujian ultraviolet, siklus termal, dan kelembapan panas. Pada jalur kedua, modul lainnya dilanjutkan ke pengujian mekanis MQT 14 sebelum memasuki tahap akhir. Pemisahan ini

dimaksudkan untuk menilai pengaruh pengujian lingkungan (seperti MQT 12) terhadap kekuatan fisik sambungan, serta keandalan kabel dan kotak sambungan.

4. Uji Retensi Kotak Penghubung (MQT 14.1 – *Junction Box Integrity Test*)

Pengujian ini dilakukan 2 hingga 4 jam pasca uji kelembapan beku (MQT 12) untuk memverifikasi kekuatan dan stabilitas pemasangan kotak penghubung terhadap beban mekanis. Prosedur melibatkan penerapan gaya 40 N secara bertahap selama (10 ± 1) detik, sejajar dengan permukaan pemasangan dan tepi modul, pada empat arah utama dengan selisih sudut 90° . Selanjutnya, gaya 40 N diterapkan kembali dengan durasi serupa, namun tegak lurus terhadap permukaan pemasangan, tanpa hentakan. Sepanjang pengujian, kotak penghubung harus tetap terpasang dengan aman, tanpa kerusakan, pergeseran, atau pelepasan dari dudukannya.

5. Uji Sambungan Kabel (MQT 14.2 – *Cable Connection Test*)

Uji sambungan kabel mencakup dua prosedur, yaitu uji tarik dan uji torsi. Pada uji tarik, kabel yang dilepas ditandai untuk memudahkan deteksi pergeseran relatif terhadap kelenjar. Kabel ditarik sebanyak 50 kali selama 1 detik tanpa hentakan, mengikuti sumbu dengan gaya yang sesuai. Setelah itu, gaya dari uji mandrel dilepaskan, dan pergeseran kabel pada stop kontak dari kotak penghubung diukur. Untuk uji torsi, spesimen dipasang pada alat uji, dengan kabel yang dilepas ditandai untuk mendeteksi putaran relatif terhadap kelenjar. Torsi diterapkan selama 1 menit, dengan putaran pada kelenjar atau jangkar kabel tidak boleh melebihi 45° . Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan sambungan kabel terhadap tekanan mekanis akibat pemasangan atau getaran.

3.3.4.4 Tahapan D – Uji Siklus Termal Ekstrem

Tahap ini melibatkan dua modul (D1 dan D2) untuk mengkaji ketahanan termomekanik jangka panjang modul fotovoltaik melalui uji siklus termal 200 siklus (MQT 11), guna mengevaluasi degradasi akibat siklus suhu ekstrem yang lebih lama dibandingkan Tahap C.

Modul diuji dalam ruang lingkungan dengan pengaturan suhu presisi. Sensor suhu dipasang di tengah permukaan belakang modul, terhubung ke sistem pemantauan, dan modul disambungkan ke sumber arus. Arus kontinu dialirkan saat pemanasan pada rentang -40°C hingga 85°C , dengan arus pada fase pendinginan (-40°C dan $>85^{\circ}\text{C}$) dibatasi hingga 1,0% arus puncak STC. Jika suhu naik terlalu cepat, arus ditunda hingga -20°C . Siklus termal dilakukan pada $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ hingga $(+85 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, dengan laju perubahan suhu maksimum $100^{\circ}\text{C}/\text{jam}$ dan stabilisasi minimal 10 menit per ekstrem. Durasi siklus hingga 6 jam, kecuali untuk modul berkapasitas panas tinggi. Prosedur ini mensimulasikan kondisi ekstrem siang-malam di lapangan.

3.3.4.5 Tahapan E – Uji Ketahanan Lembap dan Beban Mekanik

Tahapan ini melibatkan dua modul (E1 dan E2) untuk mengevaluasi dampak kelembapan dan tekanan mekanis terhadap struktur serta kinerja modul. Pengujian ini mensimulasikan kondisi akhir masa pakai, di mana modul menghadapi gaya mekanis dinamis dan risiko arus bocor akibat kelembapan tinggi atau hujan deras. Urutan pengujian pada tahap ini dijelaskan sebagai berikut.

1. Uji Panas Lembab 1000 Jam (MQT 13 – *Damp Heat Test*)

Uji ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan produk terhadap dampak jangka panjang akibat paparan kelembapan. Langkah ini dimulai dengan penempatan modul didalam ruang pengujian dengan suhu $85 \pm 2^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan relatif dipertahankan pada $85 \pm 5\%$ selama 1000 jam tanpa gangguan. Setelah mencapai 1000 jam, modul dibiarkan menjalani proses pemulihan selama 2 hingga 4 jam pada suhu $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ dengan kelembapan relatif tidak melebihi 75%, guna meminimalkan risiko kerusakan akibat perubahan suhu mendadak.

Setelah kedua modul menyelesaikan pengujian MQT 13, masing-masing modul kemudian diarahkan ke dua jenis pengujian yang berbeda, di mana setiap pengujian dilakukan pada satu modul secara terpisah.

1. Uji Beban Mekanis Statis (MQT 16 – *Mechanical Load Test*)

Modul pertama diarahkan untuk menjalani pengujian terhadap beban mekanik statis. Pengujian ini bertujuan untuk menilai daya tahan modul fotovoltaik terhadap tekanan dan tarikan yang dapat timbul akibat angin atau salju selama masa operasionalnya. Selain itu, uji ini juga bertujuan mendeteksi kemungkinan kerusakan fisik seperti retakan pada sel, serta kerusakan pada rangka (frame) atau permukaan kaca modul. Proses pengujian diawali dengan pemasangan modul secara horizontal pada alat uji yang dirancang untuk mensimulasikan sistem penyangga (mounting) sesuai dengan spesifikasi pabrikan. Selanjutnya, beban statis diberikan dalam dua tahapan, yaitu tahap tekanan dan tahap tarikan, masing-masing dengan nilai beban sebesar 2.400 Pa, sesuai standar untuk modul fotovoltaik.

2. Uji Tembakkan Bola Es (MQT 17 – *Hail Test*)

Modul kedua diarahkan untuk menjalani pengujian ketahanan terhadap tembakkan bola es. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi sejauh mana modul fotovoltaik mampu menahan benturan benda keras yang mensimulasikan hujan es alami. Proses pengujian diawali dengan pembuatan bola es menggunakan cetakan dan freezer, mengikuti ukuran yang ditetapkan dalam standar. Bola es yang digunakan harus bebas dari retakan yang terlihat secara visual, serta memiliki diameter dan massa dengan toleransi $\pm 5\%$ dari nilai nominal yang tercantum dalam **Tabel 3.4**. Setelah terbentuk, bola es disimpan pada suhu ruang setidaknya selama satu jam sebelum digunakan.

Tabel 3.4 Massa Bola dan Kecepatan Uji (BSN-b, 2018)

Diameter (mm)	Massa (g)	Kecepatan Uji (m/s)
25	7,53	23,0
35	20,7	27,2
35	43,9	30,7
55	80,2	33,9
65	132,0	36,7
75	203,0	39,5

Selanjutnya, modul fotovoltaik diposisikan secara tegak menghadap arah tembakan. Komponen peluncur bola es disiapkan dan disesuaikan suhunya agar setara dengan suhu ruang, khususnya pada bagian yang bersentuhan langsung dengan bola es. Bola es kemudian ditembakkan ke beberapa titik yang telah ditentukan seperti sudut-sudut modul, area rangkaian sel, dan bagian permukaan kaca (jendela) modul. Waktu antara pengambilan bola es dari penyimpanan hingga penembakan tidak boleh melebihi 60 detik, untuk mencegah pencairan atau perubahan bentuk bola es sebelum pengujian dilakukan.

3.3.5 Pengumpulan dan Analisis Data

3.3.5.1 Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dilakukan secara bertahap selama seluruh rangkaian pengujian, yang mencakup sebelum, selama, dan setelah pelaksanaan urutan pengujian. Data dikumpulkan ke dalam tiga kelompok utama sebagai berikut.

1. Data Awal (Tahap Awal)

Pada tahap ini, dilakukan inspeksi visual awal terhadap modul untuk mengidentifikasi kemungkinan adanya cacat fisik sebelum pengujian dimulai. Selain itu, dilakukan pengukuran parameter kinerja modul listrik pada kondisi standar (*Standard Test Conditions/STC*), yang meliputi: tegangan (Voc), arus hubung singkat (Isc), tegangan dan arus pada titik daya maksimum (Vmp dan Imp), daya maksimum (Pmax), serta faktor pengisian (Fill Factor/FF). Selain itu juga, dilakukan uji isolasi dan pengukuran arus bocor sebagai bagian dari penilaian awal terhadap kondisi kelistrikan modul.

Setelah dilakukan pengujian yang sesuai dengan *Standard Test Conditions (STC)*, semua modul harus berada dalam nilai Pmax (NP atau *Nameplate*) yang telah ditentukan. *Nameplate* modul merupakan label informasi yang ditetapkan oleh pabrikan modul fotovoltaik yang digunakan untuk verifikasi bahwa apakah modul masih sesuai dengan spesifikasi atau tidak. *Nameplate* modul fotovoltaik ini dapat dilihat pada **Gambar 3.6**.

Max. Power	(Wp)	: 360 W
Tolerance		: ± 3%
Max. Operating Voltage	(Vm)	: 38.27 V
Max. Operating Current	(Im)	: 9.229 A
Open Circuit Voltage	(Voc)	: 43.47 V
Tolerance		: 3%
Short Circuit Current	(Isc)	: 9.235 A
Tolerance		: 3%
Nominal Operating Cell Temp.	(NOCT)	: 45°C
All Technical Data Sheet at STC		
AM = 1.5 E = 1000W/m ²		TC = 25 °C

Gambar 3.6 Nameplate modul fotovoltaik

2. Data Akhir (Tahap Akhir)

Setelah seluruh tahapan pengujian selesai (Tahapan A hingga E), dilakukan pengumpulan data akhir. Langkah ini mencakup:

- Pemeriksaan ulang parameter kinerja modul listrik pada kondisi STC.
- Inspeksi visual untuk mendeteksi kerusakan fisik yang mungkin timbul selama pengujian.
- Pengujian ulang isolasi dan pengukuran arus bocor.

Data akhir ini digunakan untuk menilai penurunan kinerja dan tingkat kerusakan yang terjadi sebagai akibat dari seluruh rangkaian pengujian.

3.3.5.2 Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara kuantitatif untuk menilai perubahan kinerja modul fotovoltaik setelah menjalani urutan pengujian berdasarkan standar SNI IEC 61215-1:2016. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui tingkat degradasi daya dan menentukan apakah modul masih memenuhi batas kinerja yang sesuai dengan SNI IEC 61215:2016.

Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian modul dengan *Nameplate* modul yang telah ditentukan. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi apakah modul tetap berada dalam spesifikasi yang sesuai dengan Nameplate atau tidak. Oleh sebab itu, digunakan persamaan (3.2) untuk menilai apakah hasil

pengujian tersebut memenuhi syarat sesuai dengan kriteria yang tercantum dalam SNI IEC 61215:2016.

$$Pmax (Lab) \cdot \left[1 + \frac{[m_1][\%]}{100} \right] \geq Pmax (NP) \cdot \left[1 - \frac{[t_1][\%]}{100} \right] \quad (3.2)$$

Dimana,

- $Pmax (Lab)$ = Nilai daya maksimum (Pmax) dari uji STC
- $Pmax (NP)$ = Nilai daya maksimum (Pmax) yang ada pada *nameplate*
- m_1 = Ketidakpastian pengukuran lab untuk Pmax (2%) dengan ketidakpastian gabungan yang diperluas ($k=2$).
- t_1 = Toleransi daya maksimum (Pmax) pada *nameplate*

Selanjutnya, analisis dilakukan terhadap hasil dari uji terakhir dengan membandingkan parameter listrik pada modul sebelum dan setelah pengujian, terutama dengan memperhatikan nilai batas minimum yang memenuhi kriteria, menggunakan persamaan (3. 3) berikut.

$$Pmax (Lab_{Gate 02}) \geq 0.95 \times Pmax(Lab_{Gate 01}) \times \left(1 - \frac{r[\%]}{100} \right) \quad (3.3)$$

Dimana,

- $Pmax (Lab_{Gate 02})$ = Nilai daya maksimum (Pmax) Gate 02
- $Pmax(Lab_{Gate 01})$ = Nilai daya maksimum (Pmax) Gate 01
- 0.95 = Batas toleransi degradasi maksimum sebesar 5%
- r = Nilai reproduktifitas alat (%)
- $\left(1 - \frac{r[\%]}{100} \right)$ = Toleransi nilai pengukuran, memperhitungkan reproduktifitas dari pengujian laboratorium

Berdasarkan persamaan (3.3), untuk menghitung nilai ambang batas minimum daya maksimum (Pmax) setelah modul menjalani tahap pengujian. Batas ini mempertimbangkan penurunan maksimum sebesar 5 % yang di perbolehkan oleh SNI IEC 61215:2016, serta toleransi pengukuran alat (reproduktivitas) sebesar

$\pm 1\%$. Selanjutnya, dilakukan perhitungan terhadap besaran perubahan daya maksimum, sehingga degradasi yang terjadi dapat dianalisis dengan jelas. Untuk itu, persamaan (34) digunakan untuk menghitung perubahan Pmax dalam bentuk persentase yang akan dibandingkan dengan nilai awal.

$$\text{Degradiasi Pmax (\%)} = \left(\frac{P_{\text{max,awal}} - P_{\text{max,akhir}}}{P_{\text{max,awal}}} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

Keterangan:

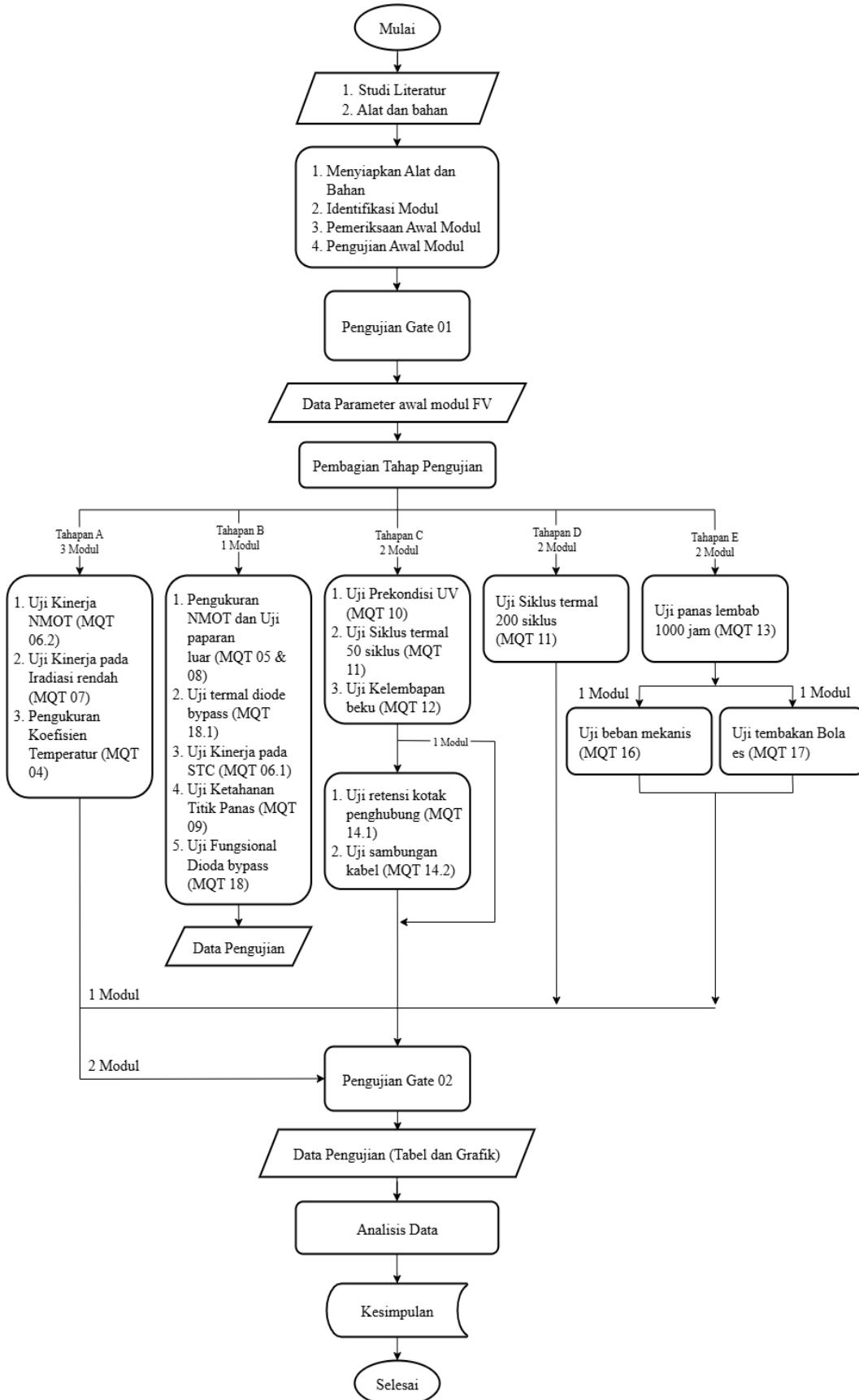
$P_{\text{max,awal}}$ = Daya maksimum pada kondisi awal (tahap awal)

$P_{\text{max,akhir}}$ = Daya maksimum setelah seluruh urutan pengujian selesai (tahap akhir).

Hasil dari perhitungan perubahan daya maksimum ini memberikan pemahaman tentang seberapa besar penurunan daya yang dialami oleh kinerja setiap modul setelah melalui proses tahap pengujian lingkungan. Nilai yang dihasilkan menjadi acuan untuk menilai seberapa jauh modul mengalami penurunan kinerja dari kondisi awalnya.

3.3.6 Diagram Alir

Berdasarkan **Gambar 3.7** menyajikan diagram alir yang menggambarkan keseluruhan tahapan penelitian secara terstruktur, mulai dari awal hingga tahap akhir. Alur tersebut meliputi kegiatan perencanaan awal penelitian, pelaksanaan pengujian sesuai urutan tahapan yang telah dirancang IEC 61215, serta proses pengumpulan dan analisis data sebagai dasar dalam pengambilan kesimpulan. Diagram ini disusun untuk memberikan gambaran yang jelas dan tersuktur. Diagram alir yang menggambarkan tahap-tahap penyelesaian penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3.7**.



Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh lima tahapan pengujian berdasarkan SNI IEC 61215:2016, ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut.

1. Pengaruh dari lima tahapan pengujian terhadap modul fotovoltaik sebagai berikut, yaitu pada Tahapan A, tidak mempengaruhi penurunan yang signifikan terhadap kinerja daya maksimum (P_{max}) modul fotovoltaik dengan penurunan daya maksimum rentang -0,24% hingga 0,31%. Pada Tahapan B, modul B1 mengalami penurunan daya sebesar 0,79% yang dipengaruhi dari uji paparan luar ruangan. Sedangkan untuk Tahapan C, modul mengalami penurunan daya maksimum sebesar 1,59% hingga 3,12% yang dipengaruhi dari uji prekondisi UV dan siklus termal serta kelembapan yang dialami. Pada Tahapan selanjutnya menunjukkan pengaruh penurunan performa yang diakibatkan oleh perubahan suhu ekstrem yang berulang yang terjadi pada Tahapan D. Pada Tahapan D, modul mengalami penurunan daya maksimum rentang 3,68% hingga 5,86%. Sedangkan pada Tahapan E, modul mengalami penurunan daya maksimum dalam kisaran 2,99% hingga 3,61% yang dipengaruhi dari uji panas lembab yang kemudian dipengaruhi oleh uji mekanis pada modul E1 dan Uji Tembakan bola es pada modul E2.
2. Tahapan yang paling berpengaruh dalam pengujian modul fotovoltaik untuk melihat kinerja dan kualitas modul terletak pada Tahapan D, dimana modul yang melewati tahapan ini mengalami penurunan daya maksimum (P_{max}) yang paling signifikan sebesar 5,86% yang diakibatkan oleh perubahan suhu ekstrem selama 200 siklus yang terjadi secara berulang. Namun, dampak penurunan daya mulai terlihat dari tahap C hingga E, yang menunjukkan bahwa pengujian pada

tahapan ini memiliki pengaruh terhadap penurunan kinerja modul dengan penurunan rata rata berada pada 3%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, berikut adalah beberapa saran yang dapat diberikan, sebagai berikut.

1. Pada tahap D (uji siklus termal) menunjukkan pengaruh yang paling besar terhadap pengurangan daya. Oleh karena itu, perlu lebih diperhatikan dalam proses pembuatan modul fotovoltaik, mulai dari perancangan desain modul fotovoltaik, material yang digunakan, hingga pengaturan dan kualitas sambungan antar sel pada modul fotovoltaik.
2. Metode penilaian kelulusan seperti yang tercantum dalam persamaan (3.2) sebaiknya tetap digunakan sebagai pedoman karena terbukti efektif menyaring modul yang tidak tahan terhadap uji lingkungan, sekaligus mempertimbangkan toleransi pengukuran alat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimuddin, Alfanz, A. M. Q. R., Santoso, M. I., & Arafiyah, R. (2023). Analisa Pengujian Produk Solar Cell Berbasis Standar Nasional Indonesia (SNI). *Ilmiah Setrum*, 12(1), 43–52. <https://doi.org/10.36055/setrum.v11i2.20600>
- Asyari, H., Rohmah, R. N., & Arratri, M. (2022). Desain photovoltaic sistem on grid pada gedung berkapasitas daya listrik 345 kva. ... *Aplikasi Perancangan Dan ...*, 2(1), 18–23. <https://proceedings.ums.ac.id/index.php/rapi/article/view/2596>
- Azmi, M. N. (2022). *Fotovoltaik*. <https://books.google.co.id/books?id=MvugEAAAQBAJ&lpg=PP1&vq=city&hl=id&pg=PP1#v=onepage&q=&f=false>
- Azzahra, S., Pujotomo, I., & Qosim, M. N. (2019). Solar Power Plant Grid Interactive and Building Integration Photovoltaic. *E3S Web of Conferences*, 125(2019), 7–10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912514007>
- Bildirisi, K., Er, Z., Rouabah, Z., Kizilkan, G., & Orken, A. T. (2018). Standards and Testing Experiments for a Photovoltaic Module. *European Journal of Science and Technology Special Issue*, 13b, 12–15. www.ejosat.com
- BSN-a. (2018). *SNI IEC 61215-1:2016 – Modul fotovoltaik (FV) terrestrial – Kualifikasi desain dan pengesahan jenis – Bagian 1: Persyaratan uji*. <https://akses-sni.bsn.go.id/viewsni/baca/7919>
- BSN-b. (2018). *SNI IEC 61215-2:2016 – Modul fotovoltaik (FV) terrestrial - Kualifikasi desain dan pengesahan jenis - Bagian 2: Prosedur uji*. <https://akses-sni.bsn.go.id/viewsni/baca/7920>
- Dwisari, V., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2023). Pemanfaatan Energi Matahari: Masa Depan Energi Terbarukan. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(2), 376–384. <https://doi.org/10.37478/optika.v7i2.3322>
- Effendi, R. (2023). Analisis Penggunaan Energi Surya Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif. *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 6(4), 1298–1302. <https://doi.org/10.31004/jutin.v6i4.20634>
- Firman, A., Cáceres, M., González Mayans, A. R., & Vera, L. H. (2022). Photovoltaic Qualification and Approval Tests. *Standards*, 2(2), 136–156. <https://doi.org/10.3390/standards2020011>

- Green, M. A., Hishikawa, Y., Dunlop, E. D., Levi, D. H., Hohl-Ebinger, J., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2018). Solar cell efficiency tables (version 52). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(7), 427–436. <https://doi.org/10.1002/pip.3040>
- Hadi, T. A. A. (2023). *Perancangan dan simulasi pembangkit listrik tenaga surya hybrid (plts) di pondok modern assalam putri skripsi*. Universitas Nusa Putra.
- Harahap, P., Adam, M., & Balisranislam, B. (2021). Implementasi Trainer Kit Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Pengembangan Media Pembelajaran Instalasi Listrik. *ABDI SABHA (Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat)*, 2(2), 198–205. <https://doi.org/10.53695/jas.v2i2.263>
- Hermawan, S., & Nurpulaela, L. (2024). Penilaian Produktivitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terhadap Variabilitas Cuaca : Simulasi PVsyst. *Jurnal Mekanova : Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 10(1), 61–74. <http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/9232>
- Jusran, A. J., G. Irianto, C., & Candra, H. (2020). Pemodelan Persamaan Modul Photovoltaic Yang Memiliki Dioda Bypass Pada Saat Gangguan Shading. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, 22(1), 69. <https://doi.org/10.24912/tesla.v22i1.7114>
- Kharisma. (2018). *Analisa Karakteristik Modul Fotovoltaik Menggunakan Data Hasil Pengukuran Arus – Tegangan Dengan Sun – Simulator*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Li, T., Hua, M., & Li, Q. (2023). Intelligent Inspection Method for Photovoltaic Modules Based on Image Processing and Deep Learning. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 373, 48–56. <https://doi.org/10.3233/FAIA230791>
- Lubna, L., Sudarti, S., & Yushardi, Y. (2021). Potensi Energi Surya Fotovoltaik Sebagai Sumber Energi Alternatif. *Pelita : Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah*, 21(1), 76–79. <https://doi.org/10.33592/pelita.v21i1.1269>
- Prakoso, D. N., Windarko, N. A., & Sumantri, B. (2021). Estimasi Nilai Parameter Photovoltaic dengan Algoritma Numerik Menggunakan Software Psim. *Briliant: Jurnal Riset Dan Konseptual*, 6(2), 429. <https://doi.org/10.28926/briliant.v6i2.623>
- Raggie. (2024). *Karakteristik Sel Surya*. RAGGIE Energy. <https://www.raggieenergy.com/id/news/what-are-the-characteristics-of-solar-cells/>
- Rahmanta, M. A., Syamsuddin, A., Tanbar, F., & ... (2023). Analisis Perkembangan Teknologi Modul Photovoltaic (PV) Untuk Meningkatkan Penetrasi Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Di Indonesia. *Jurnal Offshore: Oil ...*, 7(1), 22–

33. https://ejournal.up45.ac.id/index.php/Jurnal_OFFSHORE/article/view/1509
https://ejournal.up45.ac.id/index.php/Jurnal_OFFSHORE/article/download/1509/891
- Rauf, R., Rachim, F., Dahri, A. T., Andre, H., Napitupulu, R. A. M., & ... (2023). Matahari sebagai Energi Masa Depan| Panduan Lengkap Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). In *Repository.Uhn.Ac.Id* (Vol. 1). <https://repositoryuhn.ac.id/handle/123456789/9285>
- Repins, I. L., Kersten, F., Hallam, B., VanSant, K., & Koentopp, M. B. (2020). Stabilization of light-induced effects in Si modules for IEC 61215 design qualification. *Solar Energy*, 208, 894–904. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.08.025>
- Rifaldi, M., Alham, N. R., Izzah, N., Ihsan, M. N., & Sugianto, M. (2023). Analisis Efisiensi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan. *Jurnal Rekayasa Tropis, Teknologi, Dan Inovasi (RETROTEKIN)*, 1(1), 16–24. <https://doi.org/10.30872/retrotekin.v1i1.919>
- Sidopekso, S., Nasbey, H., & Wibowo, A. (2011). Pengukuran I-V dengan Menggunakan Sun Simulator Sederhana. *Jurnal Ilmiah Elite Elektro*, 2(2), 79–82.
- Sugiarta, I. N. (2014). Pengujian Open Circuit Voltage (Voc) Dan Short Circuit Current (Isc) Listrik Pada Rangkaian Seri Paralel Solar Cells Panel Di Politeknik Negeri Bali I Nyoman Sugiarta The Testing of Open Circuit Voltage (Voc) And Short Circuit Current(Isc) Electrical Circ. *Jurnal Logic*, 14(3), 184.
- Surindra, M. D. (2012). Analisis Karakteristik Electrical Modul Photovoltaic Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Surya Skala Laboratorium. *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, 1(1), 74–78. https://publikasiilmiah.unwahas.ac.id/index.php/PROSIDING_SNST_FT/article/view/38/0
- Suryani, A., Fadhillah, A. P., Saichu, P., & Mubarok, M. H. (2018). *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya : Dos & Donts* (B. Ramadhani (ed.)). Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Energising Development (EnDev) Indonesia.
- Wohlgemuth, J., & Kurtz, S. (2014). Photovoltaic Module Qualification Plus Testing. *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014, December*, 3589–3594. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6924883>
- Zhu, Y., & Xiao, W. (2020). A comprehensive review of topologies for photovoltaic I–V curve tracer. *Solar Energy*, 196(December 2019), 346–357. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.020>