

T E S I S

**PREDIKSI KELELAHAN (*FATIGUE*) TURBIN ANGIN DENGAN
MENGUNAKAN METODE *RAIN FLOW COUNTING*
ALGORITHM (RFCA)**

Oleh:

NURSAHAR BUANG

D032 181 023



PROGRAM STUDI S2 TEKNIK ELEKTRO

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

**PREDIKSI KELELAHAN (FATIGUE) TURBIN ANGIN
DENGAN MENGGUNAKAN METODE *RAIN FLOW*
COUNTING ALGORITHM (RFCA)**

Tesis

Sebagai salah satu syarat mencapai gelar magister pada Program Studi Magister
Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas
Hasanuddin

Disusun dan diajukan oleh:

**NURSAHAR BUANG
D032 181 023**

kepada

**PROGRAM STUDI S2 TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2022

LEMBARAN PENGESAHAN TESIS

PREDIKSI KELELAHAN (*FATIGUE*) TURBIN ANGIN DENGAN MENGUNAKAN METODE *RAIN FLOW COUNTING ALGORITHM (RFCA)*

Disusun dan diajukan oleh:

NURSAHAR BUANG
D032 181 023

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Magister, Program Magister Teknik Elektro Departemen

Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada tanggal 07 Desember 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Pendamping

Prof. Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU.
Nip. 197405301999031003

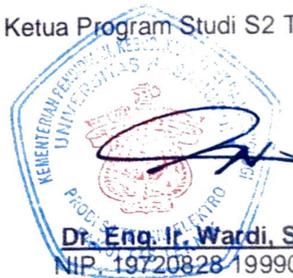
Pembimbing Pendamping

Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT.
NIP. 19731118 199803 2 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Irsan Ramli, ST., MT.
NIP. 19730926 2000 121 002

Ketua Program Studi S2 Teknik Elektro



Dr. Eng. Ir. Wardi, ST., MT.
NIP. 19720828 199903 1 003

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nursahar Buang
N I M : D032181023
Program Studi : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi
Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa kaerya tulis saya yang berjudul

**Prediksi Kelelahan (*Fatigue*) Turbin Angin Dengan Menggunakan Metode
*Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)***

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain. Bahwa Tesis yang saya tulis ini bear benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut

Makassar, 7 Desember 2022

Yang Menyatakan,



Nursahar Buang

ABSTRAK

NURSAHAR BUANG. D032181023. “Prediksi Kelelahan (Fatigue) Turbin Angin Dengan Menggunakan Metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)*”. (Dibimbing oleh Syafaruddin dan Indar Chaerah Gunadin)

Fatigue merupakan suatu fenomena gagalnya material akibat pembebanan yang terjadi secara berulang. Jika material maupun suatu struktur dibebani dengan beban berulang, maka material tersebut akan mengalami kelelahan pada pembebanan rendah dibandingkan dengan pembebanan yang lebih tinggi di berikan pada material dengan beban statis. Tujuan utama dalam tugas akhir ini memprediksi umur kelelahan yang terjadi pada turbin angin dengan pembebanan berulang yang disebabkan oleh beban angin. Beban berulang yang terjadi diakumulasikan dari beban terendah hingga beban tertinggi pada kurun waktu satu tahun. Umur kelelahan turbin angin dengan pembebanan berulang yang disebabkan oleh kondisi angin tertentu dihitung dengan menggunakan metode perhitungan RFCA dengan SN-Curve dan Aturan Miner's. Kontribusi beban angin terhadap umur kelelahan struktur turbin angin pada penelitian ini menunjukkan bahwa yang terbesar adalah 86,16 MPa, beban terkecil adalah 0,80 MPa. Umur kelelahan struktur turbin angin ini diperkirakan akan terjadi pada 337,78 tahun untuk turbin angin di Kabuten Sidrap dan 207,08 tahun untuk perkiraan umur kelelahan turbin angin di Kabupaten Jeneponto.

Kata Kunci – Turbin Angin, Fatigue, Umur Kelelahan, RFCA

ABSTRACT

NURSAHAR BUANG. D032181023 “Fatigue Life Prediction of Wind Turbine Using Rain Flow Counting Algorithm (RFCA) Method.” (Supervised: Syafaruddin dan Indar Chaerah Gunadin)

Fatigue is a phenomenon of material failure due to repeated loading. If a material or a structure is loaded with repeated loads, then the material will experience fatigue at low loads compared to higher loads given to materials with static loads. The main objective of this final project is to predict the fatigue life that occurs in wind turbines with repeated loading caused by wind loads. Recurring expenses that occur are accumulated from the lowest load to the highest load within one year. The fatigue life of a wind turbine under repeated loading caused by certain wind conditions is calculated using the RFCA calculation method with SN-Curve and Miner's Rule. The contribution of wind load to the fatigue life of wind turbine structures in this study shows that the largest is 86.16 MPa, and the smallest load is 0.80 MPa. The fatigue life of the wind turbine structure is estimated to be 337.78 years for wind turbines in the Sidrap Regency and 207.08 years for the estimated fatigue life of wind turbines in Jeneponto Regency.

Keywords – Wind Turbine, Fatigue, Fatigue Life, RFCA

KATA PENGANTAR

Segala puji selalu dipanjatkan hanya kepada Allah SWT Tuhan Yang Maha Kuasa atas segalanya yang telah memberikan rahmat, hidayah dan pertolongan-Nya dalam menyelesaikan tesis ini yang berjudul “PREDIKSI KELELAHAN (FATIGUE) TURBIN ANGIN DENGAN MENGGUNAKAN METODE RAIN FLOW COUNTING ALGORITHM (RFCA)”. Tak lupa pula Shalawat dan Salam kepada Nabi Muhammad Shollahu Alai’hi Wa Sallam yang telah menyinari dunia ini dengan keindahan ilmu dan akhlak yang diajarkan kepada seluruh umatnya.

Penyelesaian tesis ini merupakan upaya penulis dalam memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Magister Teknik di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Peneliti memohon maaf jika dalam tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Dengan demikian, peneliti tetap mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca sekalian serta tetap mengharapkan semoga tulisan ini bisa memberikan manfaat kepada seluruh pihak. Penyusunan tesis ini juga tidak terlepas dari bimbingan dan dorongan semangat dari berbagai pihak. Sehubungan dengan hal tersebut, peneliti sewajarnya menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang tua, saudara-saudara serta seluruh keluarga atas segala doa, bantuan, nasehat, dan motivasinya.
2. Bapak Prof. Dr. Eng. Syafaruddin. ST., M.Eng., IPU. selaku Ketua Program Studi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin sekaligus sebagai pembimbing I dalam penyusunan tesis ini.
3. Terima kasih juga kepada Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST., M.T selaku pembimbing II. Terima kasih telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan, serta ide-ide dalam penyelesaian tesis ini.
4. Terima kasih juga untuk Ibu Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D selaku penasihat akademis penulis sejak awal perkuliahan hingga akhir studi ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar, serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan dan kemudahan yang diberikan selama kami menempuh proses perkuliahan.
6. Kepada rekan-rekan seperjuangan Program Pasca Sarjana Departemen Teknik Elektro angkatan 2018 serta seluruh pihak yang tidak dapat kami

sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung peneliti dalam menyelesaikan tesis ini.

Peneliti menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam tesis ini. Oleh karena itu saran dan kritik dari semua pihak diharapkan untuk kesempurnaan tesis ini. Peneliti berharap semoga tesis ini dapat diterima sebagai sumbangan pikiran peneliti yang mendatangkan manfaat baik bagi penulis maupun pembacanya.

Makassar, 7 Desember 2022

Nursahar Buang

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL | I |
| LEMBARAN PENGESAHAN (TUGAS AKHIR)..... | II |
| SURAT PERNYATAAN KEASLIAN | III |
| ABSTRAK..... | IV |
| ABSTRACT | V |
| KATA PENGANTAR | VI |
| DAFTAR ISI..... | VIII |
| DAFTAR TABEL | XI |
| DAFTAR GAMBAR | XII |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3. Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4. Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5. Batasan Masalah | 4 |
| 1.6. Sistematika Penulisan..... | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 6 |
| 2.1. Turbin Angin..... | 6 |
| 2.2. Bagian-Bagian Turbin Angin..... | 7 |
| 2.3. Kegagalan Pada Turbin Angin..... | 9 |
| 2.4. Kelelahan dan Penyebab Kelelahan | 10 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5. Batas Daya Tahan | 11 |
| 2.6. Fluktuasi <i>Stress</i> | 13 |
| 2.7. Aturan Miner's | 15 |
| 2.8. Rain Flow Counting..... | 15 |
| 2.9. Penelitian Terkait | 18 |
| 2.10. Kerangka Pikir | 21 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 22 |
| 3.1. Tahapan Penelitian | 22 |
| 3.2. Waktu dan Tempat Penelitian | 25 |
| 3.3. Jenis Penelitian | 25 |
| 3.4. Perencanaan Sistem..... | 26 |
| 3.5. Teknik Pengumpulan Data | 28 |
| 3.6. Parameter Ukur | 28 |
| 3.7. Instrumen Penelitian | 28 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN | 29 |
| 4.1. Beban Angin..... | 30 |
| 4.2. Analisis RFCA Berbagai Kondisi Angin..... | 31 |
| 4.3. Alternating Stress, Mean Strees dan Stress Rasio | 36 |
| 4.4. Batasan S-N Kurva Baru Untuk Konsentrasi <i>Stress</i> Yang Terjadi Berdasarkan Data Angin Normal | 41 |
| 4.5. Batasan S-N Kurva Baru Untuk Kosentrasi Stress Yang terjadi Pada Kondisi Angin Tak Normal | 45 |
| 4.6. Total Indeks Kerusakan dan Umur Kelelahan..... | 49 |
| 4.7. Hubungan Produksi Energi dengan Stress | 53 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... | 55 |
| 5.1. Kesimpulan | 55 |

| | |
|---------------------|----|
| 5.2. Saran..... | 55 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 57 |
| LAMPIRAN..... | 61 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2. 1 State of Art | 18 |
| Tabel 4. 1. Profile kecepatan angin bulanan | 30 |
| Tabel 4. 2 Parameter turbin angin | 30 |
| Tabel 4. 4 Hasil proses RFCA pada berbagai kondisi angin – Sidrap | 32 |
| Tabel 4. 5 Hasil proses RFCA pada berbagai kondisi angin - Jeneponto | 34 |
| Tabel 4. 6 Hasil analisis Alternating Stress, Mean Strees dan Stress Rasio - Sidrap | 36 |
| Tabel 4. 7. Hasil analisis Alternating Stress, Mean Strees dan Stress Rasio - Jeneponto..... | 38 |
| Tabel 4. 8 Hasil analisis kekuatan berbahan JIS SS400 | 40 |
| Tabel 4. 9. Hasil korelasi antara siklus n dengan nilai kejadian N pada kondisi angin normal..... | 43 |
| Tabel 4. 10 Hasil korelasi antara siklus n dengan nilai kejadian N pada kondisi angin tidak normal | 48 |
| Tabel 4. 11. Hasil Indeks kerusakan (D) dengan kondisi angin normal - Sidrap.. | 50 |
| Tabel 4. 12 Hasil Indeks kerusakan (D) dengan kondisi angin tidak normal - Sidrap | 50 |
| Tabel 4. 13 Hasil Indeks kerusakan (D) dengan kondisi angin normal - Jeneponto | 51 |
| Tabel 4. 14 Hasil Indeks kerusakan (D) dengan kondisi angin tidak normal - Jeneponto..... | 51 |
| Tabel 4. 15 Total Indeks kerusakan dan hasil perkiraan umur kelelahan yang terjadi..... | 52 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2. 1. Turbin angin | 6 |
| Gambar 2. 2. Turbin Angin Sumbu Horizontal | 7 |
| Gambar 2. 3. Kegagalan Turbin Angin Tahun 1980-2016 | 9 |
| Gambar 2. 4. Sistem uji kelelahan Moore | 13 |
| Gambar 2. 5. S–N Kurva ideal | 13 |
| Gambar 2. 6. Fluktuasi Stress | 14 |
| Gambar 2. 7. Riwayat pembeanaan (stress) terhadap waktu | 16 |
| Gambar 2. 8. Ilustrasi teknik penghitungan rain flow counting | 16 |
| Gambar 2. 9. Kerangka pikir | 21 |
| | |
| Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian | 24 |
| Gambar 3. 3. Perencanaan Sistem | 27 |
| | |
| Gambar 4. 1. Kecepatan angin rata-rata periode setahun | 29 |
| Gambar 4. 2 Model S-N Kurva | 41 |
| Gambar 4. 3. Hubungan siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) kondisi angin normal - Sidrap | 41 |
| Gambar 4. 4. Hubungan siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) kondisi angin normal - Jeneponto | 42 |
| Gambar 4. 5. Siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) pada JIS SS400 dengan kondisi angin normal - Sidrap | 42 |
| Gambar 4. 6. Siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) pada JIS SS400 dengan kondisi angin normal - Jeneponto | 43 |
| Gambar 4. 7. Hubungan siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) kondisi angin tidak normal - Sidrap | 45 |
| Gambar 4. 8. Hubungan siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) kondisi angin tidak normal - Jeneponto | 46 |
| Gambar 4. 9. Siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) pada JIS SS400 dengan kondisi angin tidak normal - Sidrap | 47 |
| Gambar 4. 10. Siklus stress (n) dengan nilai kejadian (N) pada JIS SS400 dengan kondisi angin tidak normal - Jeneponto | 47 |

- Gambar 4. 11.** Grafik perbandingan indeks kerusakan di setiap ketinggian.
(A) Indeks Kerusakan (D) – Sidrap. (B) Indeks Kerusakan (D) - Jeneponto53
- Gambar 4. 12.** Hubungan antara kecepatan angin dengan daya listrik54
- Gambar 4. 13.** Hubungan antara kecepatan angin dengan stress yang terjadi ..54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tenaga angin merupakan salah satu daya energi terbarukan utama di dunia yang dieksploitasi dalam skala besar untuk pembangkitan energi listrik. Di tahun 1890 sebuah turbin angin pertama kali di gunakan membangkit energi listrik untuk keperluan penerangan perdesaan di Amerika Serikat. Untuk tujuan praktis sebuah *experiment* di tahun 1979 merupakan *experiment* yang pertama kali yang menghubungkan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Banyu ke *grid* dengan turbin angin berkapasitas 2 MW di pegunungan Howard Knob dan turbin angin kapasitas 3 MW di tahun 1988 di Berger Hill-Orkney, Skotlandia [1].

Untuk mendapatkan efisiensi turbin angin yang lebih tinggi, ukuran turbin angin yang dibangun secara komersial saat ini meningkat pesat baik secara dimensi maupun secara kapasitas. Untuk membangkitkan daya listrik sebesar 5 MW, rotor turbine yang diperlukan berdiameter 126,5 m. Efisiensi konversi daya meningkat pesat baik dari segi perluasan turbin angin maupun dengan ketersediaan teknik manufaktur dan konstruksi yang lebih maju. Terlepas dari dimensi turbin angin yang meningkat, membuat struktur pendukungnya menghadapi berbagai tantangan, mulai dari meningkatkan ketahanan tekuk dan kelelahan hingga menerapkan langkah-langkah mitigasi yang dapat diandalkan terhadap berbagai bahaya yang disebabkan oleh beban angin.

Permasalahan utama pada struktur yang tinggi dan selalu ada. Yaitu beban yang menyebabkan struktur tersebut lelah atau gagal. Kerusakan atau kegagalan tersebut bisa saja terjadi pada turbin angin baik itu pada struktur utama maupun pada komponen dan struktur pendukung. Turbin angin cenderung mengalami kelelahan karena beban angin yang bekerja bersifat siklis (berulang) dan secara terus menerus, sehingga kelelahan (*fatigue*) merupakan faktor utama penyebab kerusakan pada turbin angin, di mana struktur turbin angin merespon secara dinamis oleh beban angin. Disamping itu faktor-faktor operasi lain pada tingkat tertentu juga dapat menambah beban siklis ini, sehingga keadaan struktur bertambah kritis. Oleh sebab itu prediksi umur kelelahan pada turbin angin ini, perlu untuk dilakukan.

Berdasarkan laporan dari *Caithness Windfarm Information Forum (CWIF)* mengungkapkan bahwa, dalam empat dekade terakhir dan hingga 31 Desember

2016, terdapat 1999 kecelakaan pembangkit listrik tenaga angin, di antaranya 126 diklasifikasikan sebagai fatal [2]. Dari kerusakan secara keseluruhan yang terjadi, sekitar 17,9% dari keseluruhan kerusakan adalah *blade* yang sering mengalami kerusakan. Sedangkan pada kegagalan struktur, termasuk runtuhnya menara turbin angin, merupakan tipe terbesar keempat dalam daftar kerusakan yang terakumulasi 9,2% dari keseluruhan kerusakan [2]. Penyebab utamanya berdasarkan laporan tersebut dikarenakan kondisi angin ekstrim, termasuk angin topan dan badai menjadi yang memaksakan struktur menara turbin angin gagal. Karena selama beroperasi, turbin angin menerima beban yang ditimbulkan oleh angin yang bersifat dinamis dan fluktuatif menghantam seluruh struktur turbin angin dan *swing* mengikuti arah angin. Selain beban angin, pembebanan yang terjadi pada turbin angin, disebabkan oleh gaya kerja yang terjadi pada *rotor*, efek gaya aerodinamis, gravitasi, dan inersia [3].

Turbin angin yang mendapat serangkaian beban secara terus-menerus dan berulang dalam jangka waktu lama, bisa menyebabkan turbin angin lelah. Kelelahan adalah melemahnya suatu material yang disebabkan oleh pembebanan siklik getaran secara paksa yang sifatnya acak yang menghasilkan kerusakan struktural progresif dan lokal dan pertumbuhan retakan. Struktur yang responsif terhadap dinamika alami, yang menghasilkan beban tegangan dinamis pada titik material [4]. Jika kelelahan terjadi pada skala mikroskopis, memanifestasikan dirinya sebagai kerusakan atau kerusakan pada komponen atau struktur.

Ketika riwayat pembebanan tidak diketahui, yang disebabkan oleh beban acak (turbin yang digerakkan angin), siklus-siklus itu tidak dapat dihitung. Beberapa riwayat beban dapat disimulasikan untuk proses acak yang diberikan, tetapi prosedur tersebut rumit dan mahal secara komputasi [5].

Beberapa metode yang digunakan untuk menentukan prediksi umur kelelahan diantaranya: Metode regangan-hidup (*strain-life method*), pertumbuhan retak (*crack growth method*), metode probabilistic (*probabilistic methods*) [6]. Selain itu, dalam dekade terakhir ini banyak penelitian terkait dengan topik yang serupa yang diangkat untuk keperluan pengembangan pengetahuan terkait turbin angin ini. Di antaranya penggunaan *Fenite Elemens Methotde (FEMs)* [7], *Closed-Loop Model Predictive Control (MPC) Dispatching Algorithms* [8], *Broyden's Method* dan *Miner Rules* [9], *Bend-twist coupling (BTC)/aeroelastic tailoring* [10] dan beberapa yang dikemukakan dalam *state of art*.

Berangkat dari latar belakang itu, perlu dilakukan prediksi umur kelelahan yang terjadi pada turbin angin. Tujuannya untuk mengetahui sejauh mana sebuah turbin angin dapat beroperasi akibat beban angin dengan menerapkan metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)*. Dipilihnya metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)* ini karena merupakan algoritma yang unik, di mana algoritma yang dianalogikan sebagai aliran rintik-rintik aliran hujan yang jatuh pada atap pagoda atau rumah dengan atap bersusun hingga ke ujung atap. Selain itu, algoritma *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)* ini cukup sederhana dan secara komputasi lebih efisien. Dengan demikian, berdasarkan deskripsi tersebut maka pada penelitian yang kami angkat ini diberi judul “Prediksi Umur Kelelahan Pada Turbin Angin Dengan Menggunakan Metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)*”.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas maka didapatkan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana menggunakan *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)* pada struktur turbin angin?
2. Bagaimana memprediksikan umur kelelahan pada struktur turbin angin?
3. Bagaimana beban angin yang terjadi struktur turbin angin?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, dijelaskan sebagai berikut:

1. Menggunakan metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)* untuk perkiraan umur kelelahan pada turbin angin.
2. Memprediksikan umur kelelahan pada struktur turbin angin.
3. Untuk mengetahui beban angin yang terjadi struktur turbin angin

1.4. Manfaat Penelitian

Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat memberikan manfaat, diantaranya sebagai berikut:

1. Memberikan sumbangsih kepada akademisi maupun praktisi mengenai prediksi kelelahan pada turbin angin dengan menggunakan metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)* yang diaplikasikan pada sistem turbin angin.

2. Sebagai bahan referensi bagi para peneliti lain dengan topik serupa.
3. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat diperoleh sebagai gambaran tentang tingkat kelelahan pada struktur turbin angin pada waktu tertentu.

1.5. Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran yang di inginkan maka penelitian dibatasi pada:

1. Penelitian ini dibatasi hanya pada angin yang menimbulkan beban pada turbin angin.
2. Prediksi umur kelelahan pada struktur turbin angin yang ditimbulkan oleh angin menggunakan metode *Rain Flow Counting Algorithm (RFCA)*.
3. Hanya menganalisa pada tower turbine angin
4. Hanya untuk turbin angin *on shore* (daratan)

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika pada penulisan tesis ini, dijelaskan sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Pada bab I ini berisi tentang penjelasan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari tesis ini.

Bab II Tinjauan Pustaka

Pada bab II ini berisi penjelasan tentang landasan yang berkaitan dengan penelitian serta kerangka pemikiran. Diuraikan pula tentang penelitian terkait yang berisi penjelasan tentang hasil-hasil penelitian dan menjadi acuan dengan penelitian yang dilakukan. Landasan teori seperti buku, artikel, berita, jurnal, prosiding, dan tulisan asli lainnya untuk mengetahui perkembangan penelitian yang relevan dengan judul atau tema penelitian yang dilakukan dan juga sebagai arahan dalam memecahkan masalah yang diteliti. Kerangka pikir juga diuraikan dalam bab ini yang berisi penjelasan untuk memecahkan masalah yang sedang diteliti, termasuk menguraikann objek penelitian.

Bab III Metode Penelitian

Pada bab III ini berisi penjelasan tentang lokasi dan waktu penelitian, bagaimana metode pengerjaan tesis ini dilakukan serta langkah-langkah pengerjaan yang dilakukan.

Bab IV Hasil dan Pembahasan

Pada bab VI ini berisikan hasil dan pembahasan dari penelitian tentang prediksi umur kelelahan yang terjadi pada turbine angin menggunakan metode *Rain Flow Counting Algorithm* (RFCA).

Bab V Penutup

Pada bab V ini berisi penjelasan ringkasan temuan, rangkuman, kesimpulan dan saran. Kesimpulan merupakan pernyataan secara general atau spesifik yang berisi hal-hal penting dan menjadi temua penelitian yang bersumber pada hasil dan pembahasan. Saran merupakan pernyataan atau rekomendasi peneliti yang berisi hal-hal penting yang perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya.

Daftar Pustaka

Lampiran

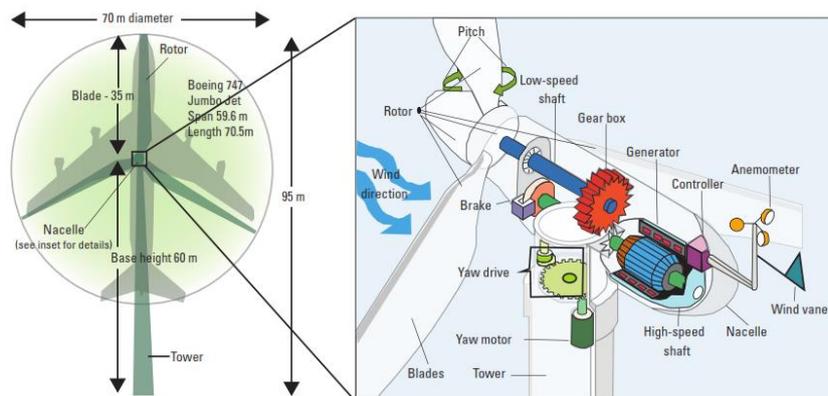
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Turbin Angin

Turbin angin atau secara alternatif disebut dengan konverter energi angin, yaitu sebuah perangkat mekanis untuk mengubah energi kinetik menjadi energi listrik dengan bantuan generator. Secara umum, turbin angin diproduksi dalam bentuk sumbu vertikal dan sumbu horizontal. Susunan turbin angin dalam skala besar yang dikenal sebagai *wind farm*, menjadi pembangkit sumber energi terbarukan yang semakin penting dan digunakan oleh negara-negara di dunia sebagai pemasok energi listrik pada sistem yang sudah ada dan juga sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang berlebihan.

Turbin angin terdiri dari empat komponen utama, *nacelle*, *rotor*, *tower* dan *blade* (Gambar 2.1). Kompartemen *nacelle* terhubung ke *hub* rotor oleh poros dan berisi generator, roda gigi, dan mekanisme kontrol yang memaksimalkan pengumpulan dan konversi energi. Rotor, biasanya terdiri dari tiga bilah berbentuk bilah yang terhubung ke hub pusat, mengubah energi kinetik angin menjadi energi rotasi. Menara, termasuk fondasi pendukung, menyediakan ketinggian yang diperlukan untuk mengakses sumber daya angin dan saluran yang diperlukan untuk mentransfer listrik yang dihasilkan turbin ke sistem pengumpulan pembangkit tenaga angin di mana listrik dari semua turbin angin diumpankan ke jaringan listrik.



Gambar 2. 1. Turbin angin:

(A) Dimensi turbin angin (B) Bagian-bagian turbin angin [11]



Gambar 2. 2. Turbin Angin Sumbu Horizontal [12]

2.2. Bagian-Bagian Turbin Angin

Bagian-bagian turbin angin beserta dengan sub-komponen, jumlahnya bisa mencapai 8.000 sub komponen yang dibutuhkan untuk membangun satu turbin angin lengkap dengan melibatkan banyak proses pabrikasi. Dari sekian banyak komponen, yang menjadi bagian-bagian utama sangat penting adalah sebagai berikut:

2.2.1. Blade

Blade merupakan bagian dari turbin angin yang berinteraksi langsung dengan angin untuk menghasilkan pergerakan poros rotor. Profil sudu dirancang untuk mendapatkan nilai angkat aerodinamis yang baik sehubungan dengan hambatan aerodinamis dan, pada saat yang sama, untuk melawan kekakuan yang tepat terhadap beban mekanis variabel yang diterapkan yang menentukan efek keausan sepanjang waktu. waktu. Bahan konstruksi harus ringan, seperti bahan plastik yang diperkuat dengan kaca, aluminium atau karbon, tergantung ukuran bilahnya.

2.2.2. Hub

Hub merupakan pembatas bilah ke poros rotor untuk mentransmisikan tenaga angin yang diekstraksi. Pada *hub* terdapat *aktuator pitch* yang mengatur *blade* pada orientasi tertentu terhadap arah utama angin untuk tujuan kontrol.

2.2.3. Gear Box

Gear box merupakan bagian dari turbin angin digunakan untuk menyesuaikan daya mekanis yang terjadi pada poros rotor ke poros generator dengan meningkatkan kecepatan putaran dan dengan menurunkan torsi untuk memungkinkan konversi energi yang efisien. Seringkali rasio kotak roda gigi bisa lebih besar dari 1: 100.

2.2.4. Brake Sistem

Brake sistem atau rem merupakan bagian dari turbin angin yang difungsikan sebagai rem parkir untuk menghindari pergerakan rotor saat turbin harus dijaga dalam kondisi tidak beroperasi.

2.2.5. Generator

Generator adalah sebuah mesin yang dapat mengubah energi gerak (mekanik) dari poros rotor yang terhubung menjadi energi listrik. Generator yang digunakan bisa berupa mesin asinkron atau sinkron, yang pertama terdiri dari motor tiga fase induksi yang bekerja sebagai generator yang menyediakan energi ke jaringan, karena kecepatannya lebih tinggi dari kecepatan sinkron dan torsi yang diterapkan adalah motif. Daya keluaran turbin modern bisa mencapai lima megawatt.

2.2.6. Nacelle

Nacelle merupakan bagian dari turbin angin yang berfungsi sebagai tempat letaknya poros rotor, rem, gear box, generator, dan peralatan kendali. Dan *Nacelle* ini terletak di bagian atas menara.

2.2.7. Anemometer

Anemometer adalah sensor yang memberikan kecepatan angin saat ini. Pengukurannya dieksploitasi dalam sistem kontrol.

2.2.8. Mekanisme Yaw

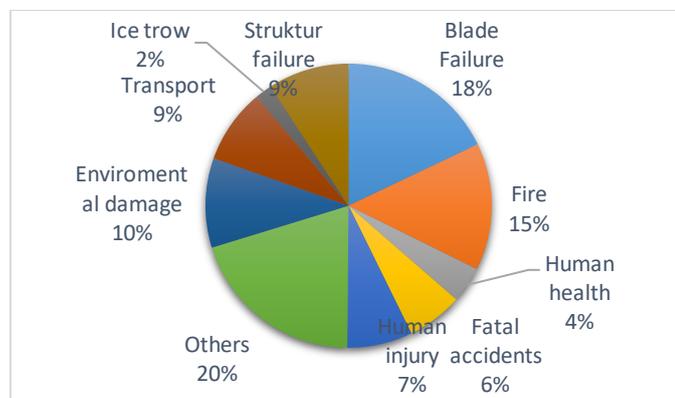
Mekanisme Yaw merupakan bagian dari turbin angin yang terdiri beberapa motor listrik dengan orientasi heading turbin sejajar dengan arah angin utama.

2.2.9. Tower

Tower atau menara turbin angin untuk mendukung nacelle, hub, dan blade. Karena kecepatan angin meningkat dengan ketinggian, *tower* yang lebih tinggi memungkinkan turbin menangkap lebih banyak energi dan menghasilkan lebih banyak listrik. *Tower* biasanya dilapisi dengan lapisan berbasis seng dan lapisan epoksi dan uretan untuk memberikan ketahanan ultraviolet. Berat rata-rata biasanya melebihi 40 ton, dan menara seringkali dapat mencapai lebih dari 10% dari total biaya turbin angin.

2.3. Kegagalan Pada Turbin Angin

Kerusakan struktur pada turbin angin dapat terjadi pada komponen struktural apa pun, namun kerusakan yang paling umum terjadi yaitu kerusakan yang terjadi pada rotor atau *blade*. Menurut laporan aporan dari *Caithness Wind farm Information Forum* (CWIF) mengungkapkan bahwa hingga 31 Desember 2016 dalam periode empat dekade terakhir telah terjadi 1999 kecelakaan pembangkit listrik tenaga angin. 126 kerusakan di antaranya diklasifikasikan sebagai kecelakaan fatal dengan keseluruhan kerusakan yang terjadi ada pada *blade* turbin angin, atau sekitar 17,9% dari keseluruhan. Sedangkan kegagalan struktural, runtuhnya menara dan kerusakan turbin, merupakan jenis kecelakaan terbesar terbesar keempat dari daftar kerusakan atau sekitar 9,2% dari keseluruhan kecelakaan turbin angin [2].



Gambar 2. 3. Kegagalan Turbin Angin Tahun 1980-2016 [2]

Dari laporan tersebut penyebab utama kecelakaan turbin angin, 54.9% disebabkan oleh kondisi angin ekstrim, termasuk angin topan dan badai.

2.4. Kelelahan dan Penyebab Kelelahan

Material *fatigue* atau kelelahan pada material adalah suatu fenomena melemahnya material yang disebabkan oleh beban siklik yang menghasilkan kerusakan struktural progresif dan lokal dan pertumbuhan retakan. Setelah retakan dimulai, setiap siklus pembebanan akan menumbuhkan retakan dalam jumlah kecil, biasanya menghasilkan lekukan pada beberapa bagian permukaan fraktur. Rusaknya logam karena beban berulang tersebut bisa dikatakan sebagai patah lelah. Secara umum perpatahan patah lelah terjadi setelah pemakaian dengan periode yang cukup lama.

Menurut ASM Tahun 1975, di definisikan sebagai suatu proses perubahan struktur permanen *progressively localized* dengan kondisi yang menghasilkan fluktuasi regangan dan fluktuasi tegangan dibawah kekuatan tariknya pada satu titik maupun lebih yang bisa memuncak menjadi *crack* atau *fracture* secara menyeluruh setelah terjadi pada fluktuasi tertentu [13].

Progressive adalah proses kelelahan yang terjadi pada suatu material dengan durasi waktu tertentu (selama pemakaian), semenjak komponen material atau struktur digunakan. *Localized* merupakan proses kelelahan beroperasi pada luasan tertentu dan memiliki tegangan maupun regangan yang tinggi, yang disebabkan oleh pengaruh dari beban luar, tidak kesempurnaan material, tegangan sisa, perubahan geometri, dan juga perbedaan temperatur.

Kegagalan kelelahan dapat berlangsung ketika terjadi retak awal (*initiation crack*) yang kemudian retak tersebut merambat (*crack propagation*) karena adanya pembebanan secara berulang sehingga bahan atau material tidak mampu menahan tegangan dan regangan yang ada, sehingga terjadi patahan menjadi dua bagian atau lebih (*fracture failure*).

Permukaan material yang tidak teratur dan kasar memiliki sifat kelelahan yang rendah dibandingkan dengan material yang memiliki permukaan lebih halus dan teratur [14]. Pada beberapa coating (chromizing) menyebabkan kekuatan fatik menjadi lebih rendah dibandingkan tanpa coating. Logam secara alami berbentuk kristal, artinya atom tersusun secara berurutan. Sebagian besar struktur logam adalah poli-kristal dalam bentuk sejumlah besar kristal individu. Setiap butir memiliki sifat mekanis yang unik, arah susunan, dan susunan setiap arah, di mana

sebagian butir diorientasikan sebagai bidang yang mudah tergelincir atau bergeser ke arah tegangan geser maksimum. Slip terjadi pada logam lempung dengan gerakan dislokasi sepanjang bidang kristalografi. Slip terjadi karena beban siklik monotonik. Sedangkan perlakuan permukaan yang menghasilkan tegangan sisa tarik mengurangi ketahanan lelahnya [15,16]. Hal ini terjadi karena pada permukaan terdapat tegangan tekan atau tegangan tarik tertinggi. Pada kondisi permukaan menerima tegangan tarik maka tegangan tekan sisa pada permukaan akan menghasilkan tegangan tekan yang lebih besar. Tegangan tekan akan menghambat laju kembali atau perambatan awal. Masalah ketahanan lelah meningkat, dan akan ada tegangan sisa di permukaan. Kejadian kegagalan diawali dengan adanya retakan yang terjadi pada permukaan benda uji. Hal ini membuktikan bahwa sifat fatik sangat sensitif terhadap kondisi permukaan, dan juga faktor lain seperti kekasaran permukaan, perubahan kondisi permukaan, dan tegangan sisa [17].

Kelelahan bisa terjadi bila suatu bahan yang mengalami proses *loading-unloading* secara berkali-kali. Jika beban-beban tersebut berada di atas ambang batas tertentu, celah-celah mikroskopis akan mulai terbentuk pada titik-titik konsentrasi *stress* seperti permukaan, *gigih slip band*, permukaan dari sautu dalam kasus bahan komposit, dan permukaan biji-bijian dalam kasus logam. Akhirnya sebuah retakan akan mencapai suatu ukuran yang kritis kritis, retakan tersebut akan menyebar tiba-tiba, dan struktur bahan tersebut akan patah [18].

Selain pembebanan, Kondisi material (ukuran butir, kekuatan, penguatan dengan larutan padat, penguatan dengan fasa ke-dua, penguatan regangan, struktur mikro, kondisi permukaan (*surface finish*), ukuran komponen), Proses pengerjaan (proses pengecoran, proses pembentukan, proses pengelasan, proses pemesinan, proses perlakuan panas), temperatur operasi dan kondisi lingkungan merupakan faktor-faktor yang cukup berpengaruh dalam proses kelelahan

2.5. Batas Daya Tahan

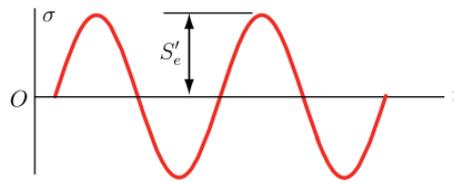
Kekuatan kelelahan atau kekuatan daya tahan, adalah tegangan balik maksimal yang dapat ditahan oleh material tanpa adanya kegagalan pada sejumlah siklus tertentu. Daya tahan dalam istilah ilmu material mengacu pada umur komponen yang dihitung (*calculated service life of a component*). Masa pakai menjelaskan kemampuan material dan komponen untuk menahan beban statis, kuasi-statis,

dan beban dinamis (berulang atau benturan) tanpa terjadi kerusakan selama masa pakai yang dihitung dan dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan masing-masing.

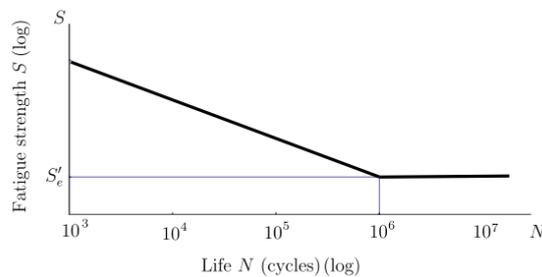
Terdapat dua acara dalam penentuan batas daya tahan dapat berupa metode perhitungan atau hasil pengujian. Karena penentuan batas daya tahan bahan merupakan permasalahan statistik dan bukan permasalahan deterministik, maka permasalahan penentuan umur kelelahan (*fatigue*) tidak akan dapat hitung secara tepat bahwa berapa banyak siklus yang diperlukan agar suatu material gagal atau kelelahan (*fatigue*). Akan tetapi kelelahan (*fatigue*) dapat diprediksikan keandalan material (bahan) tertentu pada jumlah siklus tertentu melalui model hubungan *strain-stress* yang di gunakan dalam analisis pengujian umur yang di percepat.

Stress dinamis hampir selalu menjadi penyebab kegagalan komponen. Patahan sering terjadi pada beban yang secara signifikan lebih rendah dari pada beban patahan yang diamati pada uji tarik statis. Umur kelelahan sebagai bagian dari umur layan menunjukkan perilaku deformasi dan kegagalan material di bawah pembebanan siklik. Jumlah siklus komponen dapat bertahan di bawah beban operasi sebelum gagal dapat diprediksi dengan akurasi statistik menggunakan model hubungan *strain-stress* atau dikenal dengan diagram *S - N* (diagram *Wholer*).

Untuk setiap pengujian kekuatan ketahanan kelelahan (*fatigue*) direpresentasikan sebagai fungsi dari jumlah putaran yang cocok. Grafik yang diperoleh dikenal sebagai diagram *Wohler* mewakili dasar dari metode kekuatan-hidup dan menggambarkan amplitudo tegangan nominal *S* versus jumlah siklus *N* atau disebut dengan Diagram *S - N* yang data-datanya disajikan pada skala log-log. Kelelahan atau batas daya tahan (S'_e) (Gambar. 2.5) untuk bahan-bahan metal adalah nilai ekstrem tegangan bolak-balik yang dapat bertahan tanpa akhir tanpa terjadi kegagalan. Batas kelelahan spesimen uji ini di wakili dengan garis horizontal pada diagram *S - N*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.5.



Gambar 2. 4. Sistem uji kelelahan Moore [19]



Gambar 2. 5. S–N Kurva ideal [19]

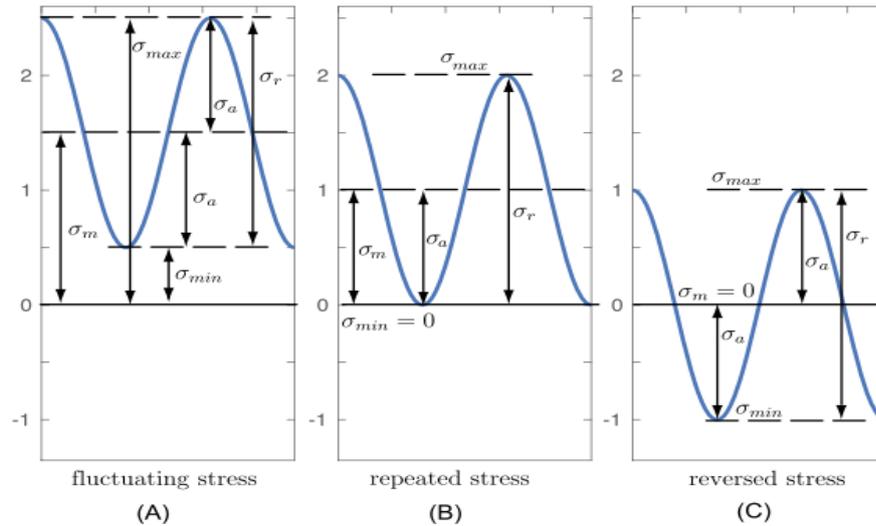
Di dalam buku *Kinematic Chains and Machine Components Design* [20] di jelaskan bahwa bubungan antara *endurance limit* and *ultimate strength* suatu benda uji di defenisikan secara matematis sebagai berikut:

$$S'_e = 0,5S_u \quad (2.1)$$

Secara keseluruhan, batas kelelahan material (S_e), berbeda dari salah satu faktor uji (sampel) S_e . Batas kelelahan komponen material (S_e), dapat dipengaruhi oleh serangkaian elemen bernama faktor pemodifikasi. Faktor-faktor penting yang mempengaruhi batas kelelahan di antaranya yaitu faktor permukaan (k_S), faktor beban (k_L), faktor gradien (k_G), faktor suhu (k_T), dan faktor keandalan (k_R).

2.6. Fluktuasi Stress

Fluktuasi *stress* adalah perubahan *stress* yang terjadi dengan besarnya berubah-ubah terhadap waktu. Secara umum yang *stress* yang berfluktuasi diklasifikasikan sebagai tegangan bolak-balik, tegangan balik dan tegangan berulang. Dalam kasus *stress* terbalik, sifat *stress* pada dasarnya berubah dalam satu siklus lengkap dan besarnya *stress* adalah sama. *Stress* ini bervariasi antara *stress minimum* (σ_{min}) dengan nilai *stress maximum* (σ_{max}) dan berfluktuasi terhadap waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6. Fluktuasi Stress [21].

Pada Gambar 2.6. bagian (A) merupakan kurva yang menunjukkan *stress* yang berfluktuasi tidak perlu melewati nol. Bagian (B) merupakan fluktuasi *stress* berulang dengan nilai rata-rata nol dan bagian (C) merupakan pembalikan fluktuasi *stress* yang mana, nilai pembalikan *stress* melewati titik nol. Umumnya *stress* yang berfluktuasi di klasifikasikan sebagai *stress* bolak-balik, *stress* balik dan *stress* berulang.

Antara Nilai *stress minimum* (σ_{min}) dengan nilai *stress maximum* (σ_{max}), ada *alternating stress* (σ_a), *stress ratio* (σ_r), dan nilai tengah atau *mean stress* (σ_m) yang di definisikan sebagai berikut:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \quad (2.18)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (2.19)$$

Dengan kata lain tegangan berfluktuasi adalah rentang tegangan, rasio tegangan, dan rasio amplitudo tegangan yang didefinisikan sebagai berikut:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad \text{dan} \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}. \quad (2.20)$$

2.7. Aturan Miner's

Suatu komponen yang dihadapkan dengan beban σ_i yang bervariasi untuk siklus n_i , di mana $i = 1, 2, \dots$. Aturan *Miners-Palmgren* merupakan suatu prosedur yang paling umum dan paling banyak digunakan dan diterapkan untuk menentukan umur kelelahan suatu elemen material pada *Fundamentals of Machine Component Design* [21, 22].

Secara matematis aturan *Miners-Palmgren* ini dinyatakan sebagai berikut

$$\sum_{j=1}^k \frac{n_j}{N_i} = D \text{ atau } \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = 1 \quad (2.21)$$

Di mana $n_i, i = 1, \dots, k$ mewakili jumlah siklus untuk jumlah *stress* yang menjadi pertimbangan $\sigma_i, i = 1, \dots, k$, dan $N_i, i = 1, \dots, k$ menggambarkan umur kelelahan (dalam siklus) tetap pada pebebenan berulang pada pengaplikasian dalam *S - N* Kurva. Ketika nilai indeks $D = 1$, material akan menjadi terjadi atau dinyatakan gagal. Berdasarkan experiment, nilai indeks D ini berkisar antara $0.7 < D < 2.2$.

2.8. Rain Flow Counting

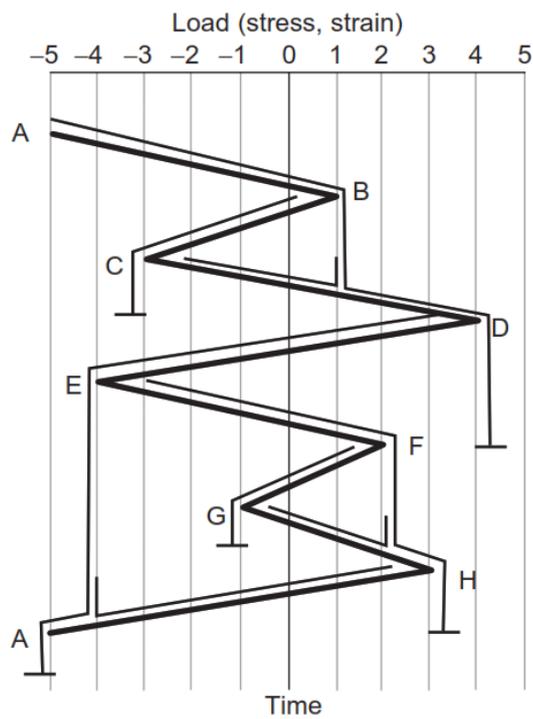
Rain Flow Countin adalah proses untuk mendapatkan siklus amplitudo konstan yang setara serta mengurangi spektrum dari berbagai *stress* ke dalam set setara dengan pembalikan *stress* sederhana. Namanya berasal dari deskripsi asli dari peneliti Jepang Matsuiski dan Endo di mana mereka mengnalogikan "hujan" berasal dari perbandingan metode ini dengan aliran hujan yang jatuh di pagoda dan mengalir di ujung atap. Algoritma ini secara komputasi lebih efisien [23].

2.8.1. Prinsip Dasar Rain Flow Counting

Teknik *Rain Flow Countin* pertamakali diperkenalkan oleh Matsuishi dan Endo dengan dari *Rain Flow Counting* dapat diilustrasikan oleh riwayat amplitudo yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7 dan jalur tegangan-regangan yang sesuai.



Gambar 2. 7. Riwayat pembeanan (*stress*) terhadap waktu [23]



Gambar 2. 8. Ilustrasi teknik penghitungan *rain flow counting* [23]

Identifikasi pembalikan dan siklus pemuatan: (a) riwayat waktu muat layanan dan (b) Ilustrasi teknik penghitungan *rain flow counting* pada saat menghitung riwayat pembebanan.

2.8.2. Aturan untuk Rain Flow Counting

Rain Flow Counting atau "Aliran hujan" dinamai berdasarkan aliran hujan yang jatuh di pagoda dan mengalir di ujung atap. Algoritma dari *Rain Flow Counting* diringkas sebagai berikut:

1. Putar riwayat pembebanan 90° sedemikian rupa sehingga sumbu waktu vertical ke bawah dan riwayat waktu pembebanan menyerupai atap pagoda.
2. Bayangkan aliran hujan mulai dari setiap titik ekstrim berturut-turut.
3. Tentukan nilai pembalikan (setengah siklus) dengan membiarkan setiap aliran hujan berlanjut untuk meneteskan atap ini sampai:
 - a. Aliran hujan jatuh berlawanan dengan titik maksimum (atau minimum lebih kecil) yang lebih besar.
 - b. Aliran hujan memenuhi aliran sebelumnya jatuh dari atas.
 - c. Aliran hujan jatuh di bawah atap.
4. Identifikasi setiap histeresis loop (siklus) dengan memasang pembalikan terhitung yang sama.

Ketika riwayat pembebanan bersifat berkala, riwayat pemuatan perlu diatur ulang mulai dari titik ekstrem terbesar dan titik ekstrem ini diulangi di akhirnya, pada dasarnya menutup loop histeresis terbesar. Semua pembalikan dalam, oleh karena itu, berpasangan hingga membentuk suatu siklus. Sebaliknya, untuk kasus pembebanan nonperiodic, tempat riwayat pembebanan tidak dimulai dan diakhiri dengan titik ekstrem terbesar, teknik aliran hujan akan mengidentifikasi pembalikan yang tidak berpasangan, atau setengah siklus, selain siklus penuh.

2.9. Penelitian Terkait

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan yang berada pada tabel 2.1. *State of Art* Penelitian.

Tabel 2.1. State of Art

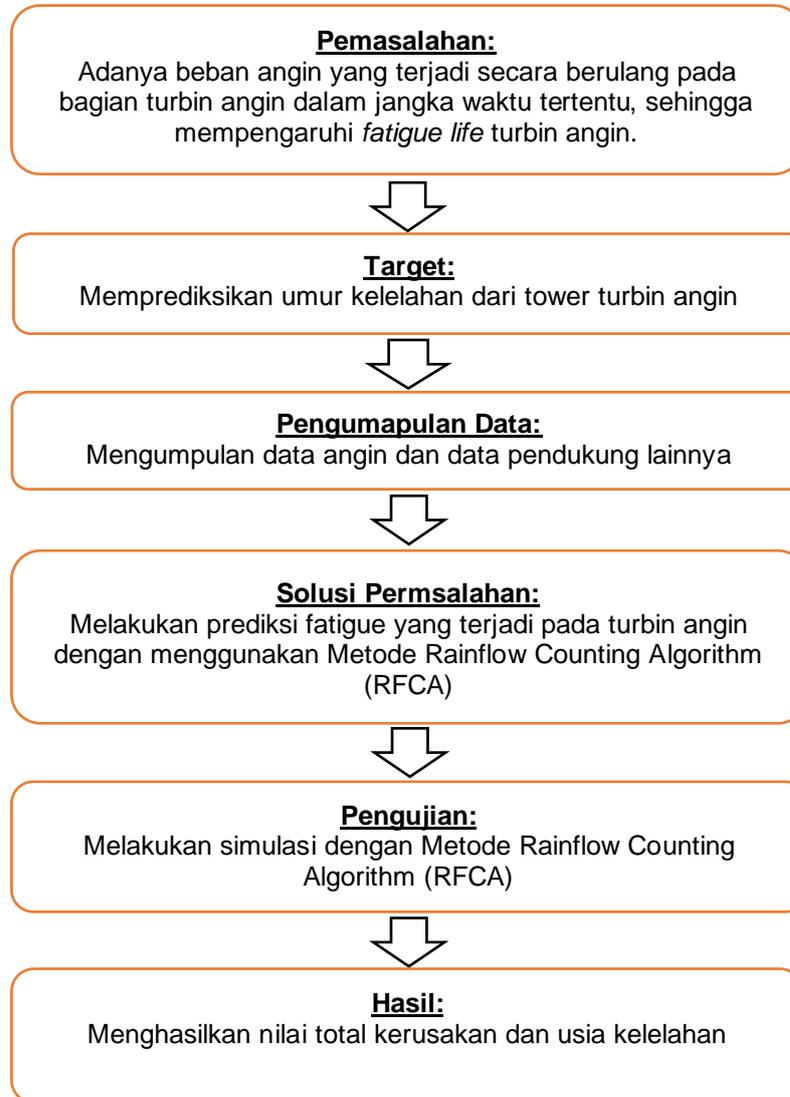
| NO | Judul | Penulis | Tahun | Metode | Penyebab Fatigue | Tujuan |
|----|---|---|-------|---|------------------|--|
| 1 | Tower Vibration Control of Active Stall Wind Turbines [24] | Christopher J. Spruce and Judith K. Turner | 2013 | | Angin | Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan algoritma kontrol pitch, yang akan meminimalkan kemungkinan getaran menara naik ke tingkat shutdown. |
| 2 | Fatigue Life of Wind Turbine Tower Bases throughout Colorado[7] | Trung Q. Do, Hussam Mahmoud and John W. van de Lindt | 2014 | Finite-element methods (FEMs) | Angin | Pendekatan performance-based design (PBD) untuk menyelidiki sensitivitas umur kelelahan untuk menara turbin angin 5-MW khas di lokasi di seluruh negara bagian Colorado. |
| 3 | Survey of wind farm control—power and fatigue optimization[25] | Torben Knudsen, Thomas Bak and Mikael Svenstrup | 2015 | | Angin | Menetapkan kondisi terkini dari pengendalian ladang angin. Area kontrol yang akan difokuskan adalah bagian mekanik / aerodinamis, yang meliputi turbin angin, produksi tenaga, kelelahan, dan bangun yang memengaruhi turbin angin |
| 4 | Model Predictive Controllers for Reduction of | Stefano Riverso, Simone Mancini, Fabio Sarzo, and Giancarlo Ferrari | 2016 | Closed-loop model predictive control (MPC) dispatching algorithms | Angin | Mereduksi Fatigue Mekanik tanpa perubahan (mengganti) perangkat keras wind turbin tetapi hanya perubahan |

| | | | | | | |
|---|---|--|------|---|---------------------|--|
| | Mechanical Fatigue in Wind Farms[8] | | | | | perangkat lunak dalam sistem pengawasan dan akuisisi data (SCADA) atau integrasi dengan sistem middleware WF. |
| 5 | Stress-cycle fatigue design with Kriging applied to offshore wind turbines[26] | James Nichols and Antoine Dumas | 2019 | Metodologi baru berdasarkan meta-pemodelan kelelahan menggunakan pengganti-siklus kerusakan (SN) | Angin | Pengembangan metodologi baru untuk menilai desain kelelahan siklus stres menggunakan pemodelan logam pada turbin angin lepas pantai. |
| 6 | On-Line Fatigue Alleviation For Wind Turbines By A Robust Control Approach[27] | A. Cetrini, F. Cianetti, M.L. Corradini, G. Ippoliti, and G. Orlando | 2019 | Pengukuran kecepatan angin berdasarkan deteksi pencitraan laser dan rentang (LIDAR) dengan mengoptimalkan operasi kontrol skema kontrol prediktif model (MPC) | Angin | Mengusulkan teknik kontrol berbasis sliding mode yang ditujukan untuk pengurangan kelelahan pada Wind Energy Conversion Sistem (WECS). |
| 7 | Fatigue damage mitigation of offshore wind turbines under real wind and wave conditions[28] | Chao Sun and Vahid Jahangiri | 2019 | 3d-PTMD dibuat menggunakan persamaan Euler-Lagrangian. | Angin dan Gelombang | Untuk memprediksi kondisi Turbin angin lepas pantai (OWTs) yang mengalami pembebanan angin dan gelombang gabungan mengalami getaran yang berlebihan yang akan menambah beban kelelahan pada struktur dan mengurangi umur kelelahan. Serta untuk memprediksi kondisi metocean jangka panjang, analisis statistik untuk sifat yang berbeda dari angin dan beban gelombang seperti misalignment gelombang |

| | | | | | | |
|---|--|--|------|--|---------------------|--|
| | | | | | | angin, tinggi gelombang yang signifikan, dan kecepatan angin. |
| 8 | Fatigue design of offshore wind turbine jacket-type structures using a 3 parallel scheme [9] | Shen-Haw Ju, Feng-Chien Su, Yi-Pei Ke and Min-Hsuan Xie | 2019 | Broyden's Method dan Aturan Miner | Angin dan Gelombang | Analisis kelelahan dan proses desain untuk struktur pendukung turbin angin lepas pantai (OWT) dengan teknologi komputasi paralel scheme |
| 9 | Study on fatigue life of bend-twist coupling wind turbine blade based on anisotropic beam model and stress-based fatigue analysis method[10] | Hang Meng, Fue-Sang Lien, Gregory Glinka and Paul Geiger | 2019 | Bend-twist coupling (BTC)/ aeroelastic tailoring | Angin | Penggunaan metode <i>Bend-twist coupling (BTC)/ aeroelastic tailoring</i> berbasis <i>stress</i> yang digunakan untuk menyelidiki beban kelelahan karena efek BTC dalam kondisi bangunan yang berbeda. |

2.10. Kerangka Pikir

Berikut tahapan penelitian yang akan dilakukan peneliti yang dimulai dari proses awal penelitian hingga proses akhir dari penelitian yang diusulkan.



Gambar 2. 9. Kerangka pikir