

TESIS

**ANALISIS POTENSI PENGGUNAAN TURBIN ANGIN
PADA BANGUNAN TINGGI DI KOTA MAKASSAR
(Studi Kasus: DELFT Apartemen)**

*Wind Potential Analysis And Use Of Wind Turbine In High-Rise
Buildings On The West Side Of Makassar City
(Case Study: DELFT Apartemen)*

**ANDI RESKY RAWAL
D042202012**



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU ARSITEKTUR
DEPARTEMEN TEKNIK ARSITEKTUR
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

**ANALISIS POTENSI PENGGUNAAN TURBIN ANGIN
PADA BANGUNAN TINGGI DI KOTA MAKASSAR
(Studi Kasus: DELFT Apartemen)**

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi
Teknik Arsitektur

Disusun dan diajukan oleh

**ANDI RESKY RAWAL
D042202012**

Kepada

**MAGISTER ARSITEKTUR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS
ANALISIS POTENSI PENGGUNAAN TURBIN ANGIN
PADA BANGUNAN TINGGI DI KOTA MAKASSAR
(Studi Kasus: Delft Apartemen)

ANDI RESKY RAWAL
D042202012

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 29 Agustus 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof. Ir. Baharuddin, ST., M. Arch., Ph.D
NIP. 19690308 199512 1001

Pembimbing Pendamping



Dr. Eng. Ir. Kosady Mulyadi, ST., MT
NIP. 19700810 199802 1001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin,



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT
NIP. 19730926 200012 1002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Arsitektur,



Dr. Eng. Ir. Hj. Asniawaty, ST., MT
NIP. 19710925 199903 2001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Andi Resky Rawal
Nomor mahasiswa : D042202012
Program studi : Magister Arsitektur

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisis Potensi Penggunaan Turbin Angin Pada Bangunan Tinggi di Kota Makassar (Studi Kasus: Delft Apartemen)” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. Ir. Baharuddin, ST., M. Arch., Ph.D dan Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal *Teknosains*, Volume 17, Issue 2, 30 Agustus 2023 sebagai artikel dengan judul “Analisis Potensi Angin dan Penggunaan Turbin Angin pada Bangunan Tinggi yang Terletak di Sisi Barat Kota Makassar (Studi kasus: Delft Apartemen)”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 25 Oktober 2023

Yang menyatakan



SEPUULUH RIBU RUPIAH
10000
TEL. 20
METERAL
TEMPEL
7ED4BAKX711397755

Andi Resky Rawal

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakaatuh

Alhamdulillah puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga peneliti dapat menyelesaikan penyusunan tesis yang berjudul: “Analisis Potensi Penggunaan Turbin Angin Pada Bangunan Tinggi di Kota Makassar (Studi Kasus: Delft Apartemen)” dalam program Magister Departemen Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Shalawat dan salam tak lupa pula peneliti kirimkan kepada baginda Rasulullah SAW sebagai suri tauladan untuk kita semua. Tesis ini disusun sebagai langkah penulis untuk menyelesaikan pendidikan Magister Departemen Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar. Pada kesempatan ini, penulis dengan rasa hormat ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Almarhum Ayahanda Andi Tenriajeng dan Ibunda tercinta Hj. Andi Sitti yang telah memberikan kasih sayang, dukungan dan do'a selama perjalanan penulis menempuh pendidikan sampai ditingkat Magister Arsitektur.
2. Istri tercinta Andi Nurul Mutia Rahmayani yang telah mengerti, mendampingi dan mendukung selama penyusunan tesis hingga yudisium,
3. Bapak Dr. Ir. H. Edward Syarif, ST., MT selaku Ketua Departemen Teknik Arsitektur Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Ir. Baharuddin Hamzah, ST., M. Arch, Ph. D selaku Dosen Pembimbing I, dan Bapak Dr. Eng. Ir. Rosady Mulyadi, ST., MT selaku Dosen Pembimbing II atas segala bimbingan, ilmu dan saran kepada penulis dalam proses penyusunan tesis ini.
4. Ibu Dr. Ir. Nurul Jamala., MT, ibu Dr. Eng. Ir. Asniawaty, ST., MT dan Bapak Dr. Ir. Hartawan Madeali., ST., MT selaku Tim penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk tesis ini.
5. Seluruh Dosen dan Staf Departemen Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang memberi masukan dan dukungan selama proses perkuliahan.
6. Manager Proyek PT. Nusa Konstruksi Enjiniring Tbk. selaku pimpinan proyek pembangunan Delft Apartemen atas izin dan dukungannya selama proses penelitian.

7. Adinda Naufal Saranani dan kawan-kawan, mahasiswa arsitektur UIN Alauddin Makassar yang telah membantu dalam proses pengukuran dan pengambilan data di proyek Delft Apartemen.
8. Teman-teman Mahasiswa Magister Arsitektur Universitas Hasanuddin yang menjadi teman seperjuangan dan selalu memberikan semangat kepada penulis selama proses perkuliahan sampai penelitian.
9. Serta seluruh pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tesis ini.

Dengan teriring do'a yang tulus, ungkapan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak. Dan penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan Tesis ini masih terdapat berbagai kekurangan, sehingga penulis tetap mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari berbagai pihak guna untuk perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, semoga tesis ini dapat membawa manfaat terutama dalam bidang keahlian Arsitektur. Aamiin ya rabbal alamin.

Gowa, 25 Oktober 2023



Andi Resky Rawal

ABSTRAK

ANDI RESKY RAWAL. Analisis Potensi Penggunaan Turbin Angin Pada Bangunan Tinggi di Kota Makassar (Studi Kasus: Delft Apartemen). (dibimbing oleh **Baharuddin Hamzah**, dan **Rosady Mulyadi**).

Pembangkit listrik tenaga angin merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja paling baik jika dibandingkan dengan pembangkit listrik energi terbarukan lainnya. Sulawesi Selatan dengan wilayah yang mempunyai kecepatan angin rata-rata di atas 5 m/s, cukup potensial untuk pembangkit listrik tenaga angin. Kota Makassar sebagai ibukota provinsi, memiliki potensi tersendiri dari sejumlah bangunan tinggi yang berdiri dekat laut berhadapan dengan selat Makassar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kecepatan angin, orientasi dan efek turbulensi yang terjadi pada bangunan tinggi yang berdiri di tepi laut sisi barat kota Makassar untuk menjadi dasar pertimbangan penggunaan turbin angin pada sebuah gedung sebagai pembangkit listrik alternatif. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif, yaitu menginterpretasikan data hasil pengukuran kecepatan angin yang dilakukan pada bulan Agustus-September 2022 di gedung Delft Apartemen dengan simulasi CFD dan RETScreen. Hasil penelitian ini menunjukkan kecepatan angin rata-rata tertinggi 4,8 m/s dan terendah 3,04 m/s serta kecepatan maksimum 9,7 m/s. Intensitas kecepatan angin rata-rata tertinggi terjadi saat orientasi angin dari barat daya, yaitu 4,9 m/s dan secara keseluruhan sebesar 65% kecepatan angin berada di atas 3 m/s yang mana menjadi batas minimum operasional rata-rata sebuah turbin angin. Pada simulasi *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), besaran angin yang diberikan sebesar 4 m/s dapat meningkat sampai 9,7 m/s di sisi kiri, kanan dan atas saat mengenai model 3D gedung Delft Apartemen. Analisis yang dilakukan menggunakan software *RETScreen*, menunjukkan bahwa turbin angin *Enercon-33-50m* dengan diameter bilah turbin 33 meter paling sesuai sebab memiliki spesifikasi energi output hingga 2.164 MWh dikecepatan angin maksimum 15 m/s dan energi output sebesar 104 MWh dikecepatan angin minimum 3 m/s.

Kata Kunci: Energi, Bangunan Tinggi, Apartemen, Turbin Angin, Arsitektur

ABSTRACT

ANDI RESKY RAWAL. Analysis of Wind Turbines Potential on High Building in Makassar City (Case Study: Delft Apartments). (supervised by **Baharuddin Hamzah,** and **Rosady Mulyadi**).

Wind power plants are environmentally friendly power plants and have the best work efficiency when compared to other renewable energy power plants. South Sulawesi with an area that has an average wind speed above 5 m/s, is quite potential for wind power plants. As the provincial capital, Makassar City has its own potential from several high buildings that stand close to the sea facing the Makassar Strait. This study aims to analyze wind speed, orientation and effects of turbulence that occur in high buildings that stand on the coast of the west side of Makassar City to become a basis for considering the use of wind turbines in buildings as alternative power generators. This study uses a descriptive quantitative method, interpretation of data from wind speed measurements are carried out in August-September 2022 at the Delft Apartment building with CFD and RETScreen simulations. The results of this study show that the highest average wind speed is 4.8 m/s and the lowest is 3.04 m/s and the maximum speed is 9.7 m/s. The highest average wind speed intensity occurs when the wind orientation is from the southwest, which is 4.9 m/s and overall 65% of wind speeds are above 3 m/s which is the minimum operational limit for an average wind turbine. In the CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, the wind pressure setting of 4 m/s can increase to 9.7 m/s on the left, right and top when it reaches the 3D model of the Delft Apartment. The Analysis was carried out with RETScreen software, shows that the Enercon-33-50m wind turbine with a turbine blade diameter of 33 meters is the most suitable because it has an output energy specification of up to 2.164 MWh at a maximum wind speed of 15 m/s and an output energy of 104 MWh at a minimum wind speed of 3 m/s.

Keywords: Energy, High Buildings, Apartments, Wind Turbine, Architecture

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan dan Lingkup Penelitian	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Tinjauan Energi	7
2.1.1. Pengertian Energi.....	7
2.1.2. Sumber-Sumber Energi.....	7
2.1.3. Energi Angin.....	10
2.1.4. Energi Pada Bangunan.....	21
2.1.5. Software RETScreen (Renewable Energy and Energy Efficiency Technology) Expert	25
2.2. Turbin Angin	28
2.2.1. Pengertian Turbin Angin	28
2.2.2. Kelebihan dan Kekurangan Turbin Angin.....	29
2.2.3. Klasifikasi Turbin Angin	30
2.2.4. Sistem Konversi Energi Turbin Angin	33
2.2.5. Perkembangan Energi Angin /Turbin Angin	37
2.3. Turbin Angin pada Bangunan Gedung.....	44
2.3.1. Bahrain World Trade Center.....	46
2.3.2. Castle House, London.....	47

2.3.3. Pearl River Tower, China	48
2.4. Penelitian Terdahulu.....	49
2.5. Kerangka Pikir.....	55
BAB III	57
METODE PENELITIAN	57
3.1. Rancangan Penelitian	57
3.2. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	58
3.3. Instrumen Penelitian.....	64
3.4. Jenis dan Sumber data	67
3.5. Teknik Pengumpulan Data	68
3.6. Teknik Analisis Data	76
3.7. Variabel Penelitian	77
3.8. Definisi Operasional.....	79
3.9. Alur Penelitian.....	81
BAB IV	82
HASIL DAN PEMBAHASAN	82
4.1. Intensitas Kecepatan Angin di Wilayah Sekitar Pantai Sisi Barat Kota Makassar (Studi Kasus: Delft Apartemen).....	82
4.1.1. Orientasi/Arah Mata Angin	82
4.1.2. Perbandingan Elevasi dan Kecepatan Angin Rata-Rata	86
4.1.3. Perbandingan data hasil pengukuran dengan sumber lain (validasi data)	92
4.2. Analisis Pola Pergerakan Angin pada Sisi Luar Gedung dengan <i>Autodesk CFD</i>	97
4.2.1. Analisis Potongan x	98
4.2.2. Analisis Potongan y	100
4.2.3. Analisis Potongan z	102
4.3. Estimasi Energi Turbin Angin dengan <i>Software RETScreen Expert</i>	105
BAB V	114
PENUTUP	114
5.1. Kesimpulan.....	114
5.2. Saran.....	115
DAFTAR PUSTAKA	116

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Klasifikasi sumber energi berdasarkan asal energi.....	8
Gambar 2 Skema terjadinya (a) angin darat dan (b) angin laut.....	15
Gambar 3 Terjadinya (a) angin gunung dan (b) angin lembah.....	16
Gambar 4 Profil kecepatan angin	16
Gambar 5 Tipe pola aliran udara	17
Gambar 6 Prinsip aliran udara pada bangunan.....	18
Gambar 7 Aliran udara pada konfigurasi bangunan yang berbeda	18
Gambar 8 <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	19
Gambar 9 Pengaruh aliran angin pada bangunan gedung	19
Gambar 10 Arah aliran angin melintas di sekitar gedung	20
Gambar 11 Aliran Angin yang melintas pada atas (rooftop) gedung.....	20
Gambar 12 Komposisi penggunaan energi menurut sektor kegiatan.....	21
Gambar 13 Perbandingan konsumsi energi listrik pertahun.....	22
Gambar 14 Penggunaan Energi Signifikan Gedung Komersil (Balai Besar Teknologi Konversi Energi, 2020)	24
Gambar 15 Tampilan <i>RETScreen</i>	26
Gambar 16 Tampilan pemilihan lokasi pada aplikasi <i>RETScreen</i>	27
Gambar 17 Grafik data iklim.....	27
Gambar 18 PLTB: Turbin angin (Ecoimagination, 2010).....	28
Gambar 19 Bahrain World Trade Center (inhabitat.com, diakses 2022)	29
Gambar 20 Turbin Angin Sumbu Horizontal (Daryanto, 2007)	31
Gambar 21 Proses konversi energi angin	34
Gambar 22 Komponen system kerja turbin angin	37
Gambar 23 Kapasitas global PLTB terpasang 2001-2017 (Global Wind Energy Council, 2018)	38
Gambar 24 Peta kecepatan angin Indonesia (ketinggian 100m) (https://globalwindatlas.info/en/ , diakses 2022)	39
Gambar 25 Technical Potential for Offshore Wind in Indonesia Map (https://energydata.info/dataset , diakses 2023).....	40
Gambar 26 Profil kecepatan angin di Sulawesi Selatan	43

Gambar 27 Contoh pemasangan turbin angin di perkotaan (https://publications.waset.org diakses 2022).....	45
Gambar 28 Bahrain World Trade Center (<i>inhabitat.com</i> diakses 2022).....	46
Gambar 29 Castle House, London (<i>en.wikipedia.org</i> diakses 2022)	47
Gambar 30 Pearl River Tower, China (<i>en.wikipedia.org</i> diakses 2022).....	48
Gambar 31 Wind Tunnel dari Pearl River Tower (https://www.researchgate.net diakses 2022)	49
Gambar 32 3 Tipe Turbin Angin dalam penelitian Yu-Hsuan Juan.....	55
Gambar 33 Kerangka pikir	56
Gambar 34 Foto udara lokasi penelitian (<i>globalwindatlas</i> , diakses 2022).....	59
Gambar 35. Peta Lokasi Delft Apartemen.....	59
Gambar 36. Orientasi gedung Delft Apartemen.....	60
Gambar 37 Gerbang proyek pembangunan Delft Apartemen	60
Gambar 38 Denah site plan Delft Apartement	61
Gambar 39 Tampak depan Delft Apartement.....	61
Gambar 40 Delft Apartement (Proses Konstruksi)	62
Gambar 41 Kecepatan Angin Rata-rata di Makassar (<i>id.weatherspark.com</i> , 2022)	63
Gambar 42 Meteran Roll	64
Gambar 43 Anemometer Digital Benetech GM8902(1) dan UNI-T UT363 (2)..	65
Gambar 44 Tripod Kamera Excell	65
Gambar 45 Windshock/Penunjuk arah angin	66
Gambar 46 Notebook DELL dengan aplikasi <i>RETScreen Expert</i>	66
Gambar 47 Smartphone Android Sony Xperia XZ3	67
Gambar 48 Pembagian elevasi titik pengukuran	69
Gambar 49 Denah lantai 1	70
Gambar 50 Denah lantai 12	70
Gambar 51 Denah lantai 23	71
Gambar 52 Denah <i>top floor</i>	71
Gambar 53 Situasi area dan titik pengukuran angin (Lantai 23).....	72
Gambar 54 Petunjuk arah angin (<i>windshock</i>) yang digunakan	73
Gambar 55 Titik perletakan alat ukur berdasarkan arah angin.....	74

Gambar 56 2 Jenis turbin yang umum digunakan pada bangunan.....	75
Gambar 57 Alur penelitian	81
Gambar 58 Arah mata angin selama pengukuran (Agustus-September 2022) di lokasi Delft Apartemen.....	83
Gambar 59 Dokumentasi pengukuran pagi dan sore hari.....	84
Gambar 60 Grafik waktu dominan arah angin	84
Gambar 61 Grafik perbandingan kecepatan angin dan suhu.....	86
Gambar 62 Grafik perbandingan kecepatan angin rata-rata pada lantai 23 Delft Apartemen, Elev. 66 m (AGL)	87
Gambar 63 Grafik kecepatan angin rata-rata dan maksimum pada pada lantai 23 Delft Apartemen, Elev. 66 m (AGL)	88
Gambar 64 Grafik <i>Windrose</i> selama pengukuran (agustus-september 2022) di lokasi Delft Apartemen.....	89
Gambar 65 Grafik perbandingan kecepatan angin rata-rata pada 3 level elevasi 91	
Gambar 66 Grafik perbandingan kecepatan angin rata-rata lantai 23 dan top floor.....	92
Gambar 67 Perbandingan kecepatan angin tahunan berdasarkan elevasi ((https://globalwindatlas.info/en/ , diakses 2023).....	94
Gambar 68 Grafik perbandingan waktu intensitas angin tertinggi.....	95
Gambar 69 Diagram <i>windrose</i> kota Makassar periode Januari-Juni 2023.....	96
Gambar 70 Gambar proyeksi 3D Delft Apartemen pada <i>Software Autodesk CFD</i>	97
Gambar 71 Tampak 4 arah Delft Apartemen pada <i>Software Autodesk CFD</i>	98
Gambar 72 Potongan <i>x</i> hasil simulasi <i>CFD</i>	98
Gambar 73 Detail potongan (<i>Diagram Velocity Magnitude</i>) <i>x0-x5</i>	99
Gambar 74 Potongan <i>y</i> hasil simulasi <i>CFD</i>	100
Gambar 75 Detail potongan (<i>Diagram Velocity Magnitude</i>) <i>y1-y5</i>	101
Gambar 76 Potongan <i>z</i> hasil simulasi <i>CFD</i>	102
Gambar 77 Detail potongan (<i>Diagram Velocity Magnitude</i>) <i>z1-z5</i>	103
Gambar 78 Penentuan lokasi pada <i>software RETScreen</i>	105
Gambar 79 Data <i>RETScreen</i> berdasarkan penentuan lokasi	105
Gambar 80 Grafik perbandingan daya dan energi output 8 model turbin angin	106

Gambar 81 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Wind Energy Solution</i> (<i>WES100-18m</i>) pada <i>RETScreen</i>	107
Gambar 82 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Northern Power Systems</i> (<i>NW100/21-40m</i>) pada <i>RETScreen</i>	107
Gambar 83 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Wind Energy Solution</i> (<i>WES250-30m</i>) pada <i>RETScreen</i>	108
Gambar 84 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Nordex</i> (<i>NORDEX N29-31,5m</i>) pada <i>RETScreen</i>	108
Gambar 85 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Siemens</i> (<i>AN BONUS 300 kW Mk III-30m</i>) pada <i>RETScreen</i>	109
Gambar 86 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Enercon</i> (<i>Enercon-33-50m</i>) pada <i>RETScreen</i>	109
Gambar 87 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Suzlon</i> (<i>S.33/350 - 50m</i>) pada <i>RETScreen</i>	110
Gambar 88 Grafik daya dan energi turbin angin model <i>Sustainable Energy Technologies</i> (<i>Chinook 2000 - VAWT - 16,59m</i>) pada <i>RETScreen</i>	110
Gambar 89 Ilustrasi penggunaan turbin angin pada gedung Delft Apartemen ..	111

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Kecepatan angin dalam konversi satuan	11
Tabel 2 Kelas-kelas kecepatan angin menurut Beaufort	12
Tabel 3 Standar IKE listrik (ASEAN-USAID, 1992)	22
Tabel 4 Standar IKE (waktu operasi acuan).....	23
Tabel 5 Standar IKE bangunan gedung di Indonesia	23
Tabel 6 Rencana pengembangan PLTB	41
Tabel 7 Rangkuman data angin di Indonesia	42
Tabel 8 Kecepatan Angin Rata-Rata (Badan Pusat Statistik, 2017-2021)	44
Tabel 9 Penelitian Terdahulu	50
Tabel 10 Data cuaca harian Kota Makassar 16 agustus -12 September 2022 (BMKG Stasiun Maritim paotere).....	62
Tabel 11 Data kecepatan angin Kota Makassar tahun 2022, ketinggian 5m (BMKG Stasiun Maritim paotere).....	63
Tabel 12 Pembagian Elevasi titik pengukuran (di atas permukaan tanah).....	69
Tabel 13 8 arah mata angin	72
Tabel 14 Perusahaan dan jenis turbin angin (<i>RETScreen</i> , 2022)	76
Tabel 15 Definisi Operasional.....	79
Tabel 16 Intensitas arah mata angin selama pengukuran (Agus-Sept 2022)	82
Tabel 17 Waktu terjadinya perubahan arah mata angin	84
Tabel 18 Intensitas cuaca selama pengukuran (Agustus-September 2022)	85
Tabel 19 Waktu dan persentase perubahan cuaca (Agustus-September 2022).....	85
Tabel 20 Hasil pengukuran kecepatan angin pada lantai 23, Elev. 66 m (AGL) ..	87
Tabel 21 Klasifikasi kecepatan angin pada lantai 23, Elev. 66 m (AGL).....	88
Tabel 22 Intensitas kecepatan angin rata-rata berdasarkan orientasinya.....	89
Tabel 23 Perbandingan hasil pengukuran dengan data BMKG	93
Tabel 24 Perbandingan arah angin selama pengukuran dengan data BMKG.....	93
Tabel 25 Data perbandingan energi output 8 model turbin angin	106

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Krisis energi dan perubahan iklim yang berdampak pemanasan global (*global warming*) telah menjadi latar belakang perubahan kebijakan maupun orientasi perkembangan pada bidang ilmu pengetahuan, sains, industri dan bisnis di hampir semua negara saat ini. Energi konvensional diproduksi dengan membakar sumber daya alam yang tak bisa diperbarui bukan hanya berefek pada cadangan sumber daya alam secara global, tapi juga berpengaruh ke lingkungan. Proses produksi menghasilkan emisi gas seperti karbon dioksida, metana, dan lainnya. Dampak perubahan iklim ini dirasakan oleh hampir seluruh negara di dunia dan telah memberikan dampak buruk pada kehidupan. Menurut data UNDP (Andari, 2021), emisi gas rumah kaca saat ini lebih dari 50% lebih tinggi dibandingkan tahun 1990. Terkhusus di Indonesia, emisi Gas Rumah Kaca (GRK) telah meningkat sekitar tiga kali lipat pada tahun 1990 dan 2015 (+196 persen), dan diperkirakan terus meningkat sampai tahun 2030. Selain itu, Indonesia mencatat peningkatan emisi CO₂ sebesar 18% pada rentan 2012-2017, yang disebabkan karena meningkatnya emisi dari pembangkit listrik, sektor industri, dan sektor transportasi. Pada konferensi perubahan iklim di Paris, Prancis pada 2015, pemerintah menyatakan komitmennya untuk mengurangi emisi GRK sebanyak 29% dengan upaya sendiri atau 41% dengan dukungan Internasional.

Pemerintah terus mendorong pembangunan proyek pembangkit listrik ramah lingkungan guna mencapai target pengurangan emisi gas rumah kaca atau GRK dari sektor energy, salah satunya pembangkit listrik berbasis energi baru dan terbarukan (EBT) dimana Indonesia menargetkan bauran EBT bisa mencapai 23% pada tahun 2025. Sumber energi konvensional yang terbentuk dari fosil cepat lambat akan habis dan berbahaya bagi lingkungan. Energi baru terbarukan merupakan energi yang dapat diperbarui dalam waktu singkat secara alami, salah satunya pembangkit listrik tenaga angin/bayu (PLTB). Pembangkit listrik tenaga angin merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi kerja paling baik jika dibandingkan dengan pembangkit listrik energi terbarukan lainnya. Energi angin dapat diperoleh secara cuma-cuma yang jumlahnya melimpah dan tersedia

terus-menerus sepanjang tahun. Energi Baru Terbarukan (EBT) menjadi tren utama untuk penggunaan energi dalam konsep pembangunan berkelanjutan.

Penggunaan energi di sebuah kota metropolitan tentu sangat besar. Energi digunakan sebagai pembangkit listrik dalam memenuhi kebutuhan rumah tangga, komersial, industri, dan fasilitas umum dalam kota. Kebutuhan energi listrik yang sangat besar untuk aktivitas siang hari berada pada sektor komersial dan industri, sedangkan untuk aktivitas malam hari berada pada sektor permukiman. Berdasarkan data angin global, Sulawesi Selatan termasuk wilayah yang mempunyai kecepatan angin rata-rata di atas 5 m/s, cukup potensial untuk pembangkit listrik tenaga angin. Kota Makassar sebagai ibukota provinsi, memiliki keuntungan tersendiri dari sejumlah bangunan tinggi yang berdiri dekat laut berhadapan dengan selat Makassar. Faktor desain bentuk dan tinggi bangunan dapat memberi dampak turbulensi yang merubah karakteristik angin sehingga berbeda dengan daerah lain pada umumnya. Hal ini dapat dioptimalkan dengan memanfaatkan intensitas angin lokal (laut dan darat) pada area *top floor* bangunan tinggi untuk memproduksi energi bersih dari teknologi turbin angin.

Bangunan di Kota Makassar sepenuhnya masih mengandalkan persediaan energi yang bergantung pada energi konvensional, hal yang bertentangan dengan konsep pembangunan berkelanjutan. Pembangunan berkelanjutan yang tidak memperhatikan kapasitas sumber daya alam dan lingkungan akan menyebabkan permasalahan pembangunan dikemudian hari, pembangunan harus berlandaskan efisiensi dan pemanfaatan lingkungan secara bertanggungjawab. Mengacu pada PP 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional dan Peraturan Presiden No. 22 tahun 2017 tentang RUEN dimana konservasi energi nasional memiliki target penghematan energi sebanyak 17% pada tahun 2025 dan itu mencakup pada semua sektor, tak terkecuali sektor bangunan. Jika melihat pada penggunaan energi secara global, sektor bangunan sendiri dapat menyerap hingga 45% dari kebutuhan energi secara keseluruhan.

Implementasi penggunaan perangkat turbin angin di wilayah tepi laut bukan tanpa tantangan, faktor orientasi angin yang sering berubah-ubah tergantung kondisi cuaca menjadi kendala. Dalam hal ini jenis turbin angin yang digunakan sangat menentukan, jenis turbin angin sumbu vertikal paling sesuai meskipun

perkembangan teknologi *System Yaw* pada beberapa turbin angin sumbu horizontal saat ini telah mampu mengatasi permasalahan tersebut. Kepedulian terhadap krisis energi global, lingkungan, dan target konservasi energi nasional diwujudkan dalam satu upaya dengan memanfaatkan potensi alam yang tersedia dapat memberi kontribusi positif sekaligus menguntungkan.

Mempertimbangkan segala manfaatnya, penelitian ini bermaksud menganalisis kecepatan angin, orientasi dan efek turbulensi yang terjadi pada bangunan tinggi yang berdiri di tepi laut sisi barat kota Makassar dengan tujuan untuk memberi gambaran dan dasar pertimbangan penggunaan turbin angin pada sebuah gedung sebagai pembangkit listrik alternatif. Delft Apartemen yang masih dalam proses konstruksi dan berdiri tepat di tepi laut sekitar Pantai Losari Makassar menjadi opsi ideal untuk dijadikan objek penelitian. Selain pertimbangan lokasi yang sangat baik, ketinggian bangunan yang mencapai 23 lantai memungkinkan pengambilan data angin secara maksimal hingga 70 meter dari permukaan laut. Walaupun masih dalam proses konstruksi, namun struktur gedung telah terbangun 100% sehingga memungkinkan untuk penelitian, bahkan memudahkan proses pengambilan data. Data kecepatan angin yang didapatkan selama pengukuran akan dianalisis kemudian disimulasi dengan menggunakan *Software Autodesk CFD* dan *RETSceen Expert*.

Mengoptimalkan sumber daya alam yang tidak terbatas pada sebuah bangunan tentu dapat menjadi solusi cerdas ditengah-tengah fenomena krisis energi. Dewasa ini, penggabungan desain bangunan yang hemat energi dengan perangkat pembangkit tenaga listrik ramah lingkungan cukup berhasil menekan kebutuhan energi per kapita dan nasional serta diyakini efektif mengendalikan emisi carbon secara signifikan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dari itu peneliti mengambil perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana intensitas kecepatan angin di sekitar pantai sisi barat kota Makassar (Studi Kasus: Delft Apartemen) terkait peluang penggunaan turbin angin,

2. Bagaimana pola pergerakan angin yang terjadi pada bangunan tinggi serta sisi yang paling potensial untuk penempatan turbin angin,
3. Berapakah jumlah energi yang dapat dihasilkan pada simulasi menggunakan software *Retsceen Expert* dengan kecepatan angin yang ada dan menggunakan turbin angin yang sesuai?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menjawab permasalahan yang disebutkan dalam rumusan masalah, yaitu:

1. Menganalisis kondisi angin di sekitar pantai sisi barat kota Makassar (Studi Kasus: Delft Apartemen), untuk dijadikan dasar pertimbangan utama penggunaan turbin angin pada sebuah gedung,
2. Menganalisis pola pergerakan, kecepatan, dan arah angin serta bentuk turbulensinya pada gedung Delft Apartemen untuk menentukan potensi terbaik sebuah turbin angin dapat bekerja maksimal,
3. Menentukan jumlah energi yang dapat dihasilkan sebuah turbin angin berdasarkan kecepatan angin rata-rata hasil pengukuran pada gedung Delft Apartemen.

1.4. Batasan dan Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan di The Delft Apartemen yang terletak di kawasan Center Point Indonesia (CPI), Kompleks CitraLand City The Waterfront CBD Losari – Makassar. The Delft Apartemen terletak di sisi barat Kota Makassar, berada tepat di pesisir pantai dan mengarah langsung ke arah selat Makassar. Adapun batasan dan lingkup penelitian berfokus di luar gedung, melakukan pengukuran kecepatan angin pada beberapa titik dan elevasi yang berbeda. Penelitian ini membahas tentang potensi kecepatan angin yang ada disekitar bangunan dan berkaitan dengan teknologi turbin angin, hasil pengukuran nantinya akan disimulasikan dengan *software RETScreen Expert*. Pembahasan ditekankan pada segala aspek yang dibutuhkan, atau syarat-syarat apa saja yang diperlukan untuk penggunaan teknologi turbin angin pada sebuah bangunan tinggi, sehingga tidak menimbulkan dampak resiko yang lain terhadap bangunan tersebut.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

Pertama, manfaat teoritis, diharapkan hasil dari penelitian ini dapat menambah wawasan dalam bidang keilmuan arsitektur, menjadi tambahan referensi dan memperkaya ilmu pengetahuan tentang potensi angin pada bangunan tinggi dan teknologi turbin angin, khususnya pada kota yang terletak dipinggir laut seperti kota Makassar untuk menghasilkan cadangan energi bersih.

Kedua, manfaat praktis, diharapkan penelitian ini menjadi masukan bagi praktisi, akademika, masyarakat, serta pihak-pihak yang berkepentingan dalam bidang arsitektur. Menjadi masukan dan bahan evaluasi bagi pemerintah, arsitek, pemilik, pengelola, maupun pelaku bisnis dalam memanfaatkan potensi alam disekitar gedung untuk dikonversi menjadi investasi jangka panjang baik itu secara ekonomi maupun untuk lingkungan yang lebih baik kedepannya.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan terdiri dari tiga bagian, yaitu:

1. Pada bagian awal meliputi halaman judul, halaman pengesahan, halaman pernyataan, kata pengantar, halaman abstrak, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar dan daftar lampiran.
2. Pada bagian isi terdiri dari beberapa bab yang masing-masing menguraikan tentang:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, identifikasi masalah, rumusan masalah, batasan penelitian, tujuan dan manfaat penelitian, sistematika penulisan dan kerangka berpikir.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan tentang kajian teori dan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan dengan penelitian yang akan dilakukan serta kerangka konsep.

BAB III : METODE PENELITIAN

Pada bab ini penulis menjelaskan tentang metodologi penelitian yang digunakan selama penelitian.

BAB IV : HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini memaparkan uraian data hasil penelitian serta pembahasannya.

BAB V : PENUTUP

Pada bab ini merupakan bab terakhir yang berisi kesimpulan dan saran.

3. Pada bagian akhir dalam skripsi ini meliputi daftar pustaka dan lampiran-lampiran yang melengkapi uraian pada bagian isi dan table-tabel yang digunakan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Energi

2.1.1. Pengertian Energi

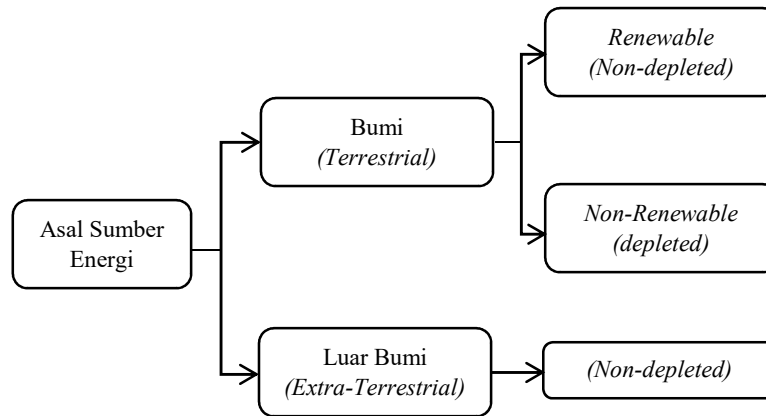
“Energi adalah sesuatu yang dibutuhkan oleh benda agar benda dapat melakukan usaha. Dalam kenyataannya setiap dilakukan usaha selalu ada perubahan. Sehingga usaha juga didefinisikan sebagai kemampuan untuk menyebabkan perubahan (Arif Alfatah & Muji Lestari, 2009)”. Sementara menurut (Alvin Hadiwono, 2007), dikemukakan bahwa energi adalah perihal tentang apapun yang bergerak, berhubungan dengan ruang dan waktu. Lebih lengkap menurut (Pudjanarsa & Nursuhud, 2013), Energi merupakan sesuatu yang bersifat abstrak yang sukar dibuktikan tetapi dapat dirasakan adanya. Energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja (energy is the capability for doing work). Sedangkan energi alam adalah sesuatu yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan dan kebutuhan hidup manusia agar hidup lebih sejahtera, energi alam bisa terdapat dimana saja seperti di dalam tanah, air, permukaan tanah, udara dan lain sebagainya. Secara umum energi dapat dikategorikan menjadi beberapa macam, yaitu:

1. Energi mekanik
2. Energi listrik
3. Energi elektromagnetik
4. Energi kimia
5. Energi nuklir
6. Energi termal (panas)

2.1.2. Sumber-Sumber Energi

Lebih lanjut (Pudjanarsa & Nursuhud, 2013), menjelaskan bahwa, berdasarkan sumbernya energi dapat dibedakan menjadi energi yang berasal dari bumi (terrestrial) dan yang berasal dari luar bumi (extraterrestrial). Sumber energi juga dapat diklasifikasikan berdasarkan sifatnya. Sumber energi dari bumi dikategorikan menjadi jenis renewable atau non-depleted energy dan non-renewable atau depleted energy. Sumber energi yang renewable atau dapat didaur

ulang, seperti energi kayu, biomassa, biogas. Sumber energi dari luar bumi, misalnya energi surya dan resources. Sedangkan energi seperti minyak bumi, batubara dan gas alam adalah sumber energi yang bersifat tidak dapat diperbaharui atau dapat habis.



Gambar 1 Klasifikasi sumber energi berdasarkan asal energi

1. Sumber Energi Tak Terbarukan

Sumber energi tidak terbarukan (non-renewable) didefinisikan sebagai sumber energi yang tidak dapat diisi atau dibuat kembali oleh alam dalam waktu yang singkat. Sumber energi yang tak dapat diperbaharui diantaranya adalah:

a. Minyak Bumi

Minyak bumi adalah zat cair licin dan mudah terbakar yang terjadi sebagian besar karena hidrokarbon. Menurut teori, minyak bumi berasal dari sisa-sisa binatang kecil dan tumbuhan yang hidup di laut jutaan tahun yang lalu yang mengendap dan mendapat tekanan dari lempengan bumi sehingga secara alami larut dan berubah menjadi minyak bumi.

b. Batubara

Batubara adalah batuan sedimen yang berasal dari material organik (organoclastic sedimentary rock), yang memiliki kandungan utama berupa karbon, hidrogen dan oksigen. Batubara ini merupakan hasil akumulasi dan material organik pada suatu lingkungan pengendapan tertentu. Batubara yang kita kenal dibentuk dari sisa-sisa tumbuhan yang terkubur di dasar rawa selama jutaan tahun yang lalu. Pertama, sisa-sisa tumbuhan berubah menjadi bahan yang padat disebut gambut akibat tekanan dan pemanasan dari lapisan bagian atas, sisa-sisa tumbuhan tersebut berubah menjadi batubara.

c. Nuklir

Sumber energi ini merupakan sumber energi hasil tambang yang lain, yang dapat dibudidayakan melalui proses fisi dan fusi. Energi nuklir, meskipun bersih, mengandung risiko bahaya radiasi yang mematikan sehingga pengolahannya harus ekstra hati-hati, di samping memerlukan modal yang besar untuk investasi awalnya.

2. Sumber Energi Terbarukan

Sumber energi terbarukan (renewable) didefinisikan sebagai sumber energi yang dapat dengan cepat diisi kembali oleh alam. Berikut ini adalah yang termasuk sumber energi terbarukan:

a. Matahari

Energi matahari diperoleh dari cahaya panas yang merupakan komponen dari panas matahari. Selain memanaskan air, energi ini juga bisa diubah menjadi listrik. Secara global, matahari menyediakan 10.000 kali energi bumi yang dapat di manfaatkan siapapun secara gratis dan merupakan salah satu sumber energi alternatif yang potensial untuk dikelola dan dikembangkan lebih lanjut, terutama bagi Negara-negara tropis seperti Indonesia.

b. Angin

Energi angin adalah energi yang dihasilkan oleh udara yang berhembus di permukaan bumi. Energi angin dapat diubah menjadi mekanik untuk menghasilkan usaha. Karena angin tidak menimbulkan polusi, maka banyak negara-negara membangun turbin angin sebagai sumber tenaga listrik tambahan.

c. Panas Bumi

Energi panas bumi adalah energi panas yang berasal dari dalam bumi. Energi panas ini dihasilkan di dalam inti bumi yang ditimbulkan oleh peristiwa peluruhan partikel-partikel radioaktif di dalam batuan. Inti bumi terbentuk dari magma yang mengalir menembus berbagai lapisan batuan di bawah tanah. Saat mencapai reservoir air bawah tanah, terbentuklah air panas bertekanan tinggi yang keluar ke permukaan bumi melalui celah atau retakan di kulit bumi, maka timbul sumber air panas yang biasa disebut uap panas.

d. Biomassa

Biomassa merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui karena tumbuh-tumbuhan dapat kita tanam setiap saat. Dari berbagai macam bahan bakar

biomassa, kayu merupakan kebutuhan yang sangat banyak digunakan, seperti pada rumah tangga dan ketel uap. Membakar biomassa bukan cara satu-satunya untuk menghasilkan energi karena biomassa dapat dikonversi ke bentuk energi lain diantaranya gas metana atau etanol dan biosolar.

2.1.3. Energi Angin

1. Angin

“Angin merupakan udara yang bergerak disebabkan beberapa adanya perbedaan tekanan pada atmosfer bumi (Napitupulu & Mauritz, 2013) Energi angin merupakan sumber energi penting sejak waktu lama di beberapa Negara (Syahrul, 2008: 140)”. Menurut Szokolay dalam (Amri & Syukur, 2017), aliran udara (angin) adalah udara yang bergerak karena adanya perbedaan tekanan di permukaan bumi. Angin cenderung bergerak dari daerah bertekanan udara tinggi ke daerah bertekanan udara rendah. Angin yang berhembus di permukaan bumi ini terjadi akibat adanya perbedaan penerimaan radiasi matahari, sehingga mengakibatkan perbedaan suhu udara. Perbedaan suhu udara inilah yang menyebabkan perbedaan tekanan, yang akhirnya menimbulkan gerakan udara. Udara bergerak mengikuti hukum-hukum alam tertentu, sehingga pergerakan udara ini relatif teratur dan dapat diprediksi, (Amri & Syukur, 2017). Angin adalah aliran udara dalam jumlah yang besar diakibatkan rotasi bumi dan juga karena adanya perbedaan tekanan udara di sekitarnya. Angin bergerak dari tempat bertekanan udara tinggi ke tempat bertekanan udara rendah. Faktor terjadinya angin adalah tekanan angin, kecepatan angin dan waktu terjadinya pergerakan angin (Pernando & Rizki, 2017). Adapun karakteristik dari angin, yaitu angin yang sering berubah-ubah, sering terjadinya turbulensi, kecepatan bertambah terhadap ketinggian (energi sebanding dengan pangkat tiga kelipatan), Potensi aktual ditentukan oleh distribusi kecepatan angin (topografi) lokasi, Sutanto dalam (Aryabathi et al., 2021).

Menurut Kartasapoetra dalam (Miftahuddin, 2016), angin merupakan gerakan atau perpindahan massa udara dari satu tempat ke tempat lain secara horizontal. Massa udara adalah udara dalam ukuran yang sangat besar yang mempunyai sifat fisik (temperatur dan kelembaban) seragam dalam arah yang horizontal. Gerakan angin berasal dari daerah bertekanan tinggi ke daerah

bertekanan rendah. Kecepatan angin dibagi atas kelas atau tingkatan berdasarkan kerusakan yang diakibatkan angin dan kecepatan angin (kelas *Beaufort*). Angin mempunyai arah yaitu arah dari mana angin bertiup biasanya dinyatakan dalam 16 titik kompas (U, UTL, TL, TTL dan sebagainya) untuk angin-angin permukaan, untuk angin di atas dinyatakan derajat atau 1/10 derajat dari utara, searah jarum jam. Kecepatan angin km/jam, mil/jam, m/det, knot, dimana $1\text{km/jam} = 0.621\text{mil/jam} = 0.278\text{ knot}$, $1\text{knot} = 1.852\text{km/jam} = 1.151\text{mil/jam} = 0.514\text{m/det}$.

Tabel 1 Kecepatan angin dalam konversi satuan

Kecepatan Angin			
Kelas	m/d	km/jam	Knot/jam
1	0.3 ~ 1.5	1 ~ 5.4	0.58 ~ 2.92
2	1.6 ~ 3.3	5.5 ~ 11.9	3.11 ~ 6.42
3	3.4 ~ 5.4	12.0 ~ 19.5	6.61 ~ 10.5
4	5.5 ~ 7.9	19.6 ~ 28.5	10.7 ~ 15.4
5	8.0 ~ 10.7	28.6 ~ 38.5	15.6 ~ 20.8
6	10.8 ~ 13.8	38.6 ~ 49.7	21 ~ 26.8
7	13.9 ~ 17.1	49.8 ~ 61.5	27 ~ 33.8
8	17.2 ~ 20.7	61.6 ~ 74.5	33.5 ~ 40.3
9	20.8 ~ 24.4	74.6 ~ 87.9	40.5 ~ 47.5
10	24.5 ~ 28.4	88.0 ~ 102.3	47.7 ~ 55.3
11	28.5 ~ 32.6	102.4 ~ 117.0	55.4 ~ 63.4
12	> 32.6	>118	>63.4

Ada beberapa hal penting yang perlu Anda ketahui tentang angin, yaitu meliputi:

a. Kecepatan angin

Kecepatan angin dapat diukur dengan suatu alat yang disebut Anemometer.

Kecepatan angin dapat ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain:

1) Besar kecilnya gradien barometrik.

Gradien Barometrik, yaitu angka yang menunjukkan perbedaan tekanan udara melalui dua garis isobar pada garis lurus, dihitung untuk tiap-tiap 111 km (jarak 111 km di equator 1 (atau $1/360 \times 40.000\text{ km} = 111\text{ km}$). Menurut hukum Stevenson bahwa kecepatan angin bertiup berbanding lurus dengan

gradien barometriknya. Semakin besar gradien barometriknya, semakin besar pula kecepatannya.

2) Relief permukaan bumi

Angin bertiup kencang pada daerah yang reliefnya rata dan tidak ada rintangan. Sebaliknya bila bertiup pada daerah yang reliefnya besar dan rintangannya banyak, maka angin akan berkurang kecepatannya.

3) Ada tidaknya tumbuh-tumbuhan

Banyaknya pohon-pohonan akan menghambat kecepatan angin dan sebaliknya, bila pohon-pohonannya jarang maka sedikit sekali memberi hambatan pada kecepatan angin.

4) Tinggi dari permukaan tanah

Angin yang bertiup dekat dengan permukaan bumi akan mendapatkan hambatan karena bergesekan dengan muka bumi, sedangkan angin yang bertiup jauh di atas permukaan bumi bebas dari hambatan-hambatan.

b. Kekuatan angin

Kekuatan angin ditentukan oleh kecepatannya, makin cepat angin bertiup maka makin tinggi/besar kekuatannya. Pada tahun 1804 Beaufort seorang Laksamana Inggris telah membuat daftar kekuatan dan kecepatan angin yang digunakannya untuk pelayaran. Daftar tersebut kini masih tetap digunakan secara internasional (Tabel 2).

Tabel 2 Kelas-kelas kecepatan angin menurut Beaufort.

Kelas	Sifat	Akibat	Kecepatan
0	Sunyi	Tenang	0-0,2 m/s
1	Sepoi-sepoi	Angin tenang, asap lurus ke atas	0,3-1,5 m/s
2	Angin sangat lemah	Asap bergerak mengikutia arah angin	1,6-3,3 m/s
3	Angin lemah	Wajah terasa ada angin, daun-daun bergoyang pelan	3,4-5,4 m/s
4	Angin sedang	Debu jalan, kertas berterbangan	5,5-7,9 m/s
5	Angin agak kuat	Ranting pohon bergoyang, bendera berkibar	8-10,7 m/s
6	Angin kuat	Ranting pohon besar bergoyang	10,8-13,8 m/s
7	Angin Kencang	Ujung pohon melengkung, hembusan angin terasa di telinga	13,9-17,1 m/s

Kelas	Sifat	Akibat	Kecepatan
8	Angin sangat kuat	Dapat mematahkan ranting pohon	17,2-20,7 m/s
9	Badai	Dapat mematahkan ranting pohon, jalan berat melawan angin	20,8- 24,4 m/s
10	Badai kuat	Dapat merobohkan pohon, menimbulkan kerusakan	24,5-28,4 m/s
11	Angin ribut	Menimbulkan kerusakan parah	28,5-32,6 m/s
12	Topan dahsyat	Tornado	32,7-36,9 m/s

c. Arah angin

Menurut seorang ahli meteorologi bangsa Belanda yang bernama Buys Ballot mengemukakan hukumnya yang berbunyi: Udara mengalir dari daerah maksimum ke daerah minimum. Pada belahan utara bumi, udara/angin berkelok ke kanan dan di belahan selatan berkelok ke kiri. Pembelokan arah angin terjadi karena adanya rotasi bumi dari barat ke timur dan karena bumi bulat. Dalam mempelajari cuaca, diantaranya perlu mengetahui arah angin. Arah angin dapat diketahui melalui arah baling-baling angin.

d. Macam-macam angin

Angin dapat digolongkan menjadi 3 macam, yaitu:

- 1) Angin tetap, yaitu angin yang arah tiupnya tetap sepanjang tahun, seperti:
 - a) angin passat, yaitu angin yang bertiup terus menerus dari daerah maksimum subtropis utara dan selatan (30° - 40°) menuju ke minimum khatulistiwa.
 - b) angin barat, yaitu angin antipassat (angin yang berhembus di atas angin passat pada ketinggian (30 km dan arahnya berlawanan dengan angin passat).
 - c) angin timur, yaitu angin yang bertiup dari kedua daerah maksimum kutub menuju daerah minimum subpolar (lintang $66 \frac{1}{2}^{\circ}$ LU dan LS $^{\circ}$).
- 2) Angin periodik, dibagi menjadi:
 - a) Angin periodik harian meliputi angin darat dan angin laut; angin gunung dan angin lembah.
 - b) Angin periodik setengah tahunan, disebut juga dengan angin muson (musim).
 - c) Angin lokal, yaitu angin yang bertiup pada daerah tertentu dan waktu tertentu. Misalnya : angin kumbang, angin fohn, angin brubu, angin bahorok, angin gending, dan lain-lain.

2. Pola pergerakan angin di Indonesia

Di daerah tropis akan terjadi angin dari daerah maksimum subtropis ke daerah minimum equator. Angin ini disebut angin passat timur laut di belahan bumi utara dan angin passat tenggara di belahan bumi selatan. Angin passat banyak membawa uap air karena berhembus di laut lepas. Akan tetapi pada beberapa wilayah di permukaan bumi angin passat tersebut mengalami perubahan arah akibat pengaruh lingkungan setempat. Di Indonesia yang secara geografis terletak di antara dua benua (Asia dan Australia) dan dua samudera serta letak matahari yang berubah setiap enam bulan berada di utara dan enam bulan berada di selatan khatulistiwa, maka angin passat tersebut mengalami perubahan menjadi angin muson (angin musim) barat dan angin muson timur.

a. Angin muson barat

Angin muson barat berhembus pada bulan Oktober - April, matahari berada di belahan bumi selatan, mengakibatkan belahan bumi selatan khususnya Australia lebih banyak memperoleh pemanasan matahari daripada benua Asia. Akibatnya di Australia bertemperatur tinggi dan tekanan udara rendah (minimum). Sebaliknya di Asia yang mulai ditinggalkan matahari temperaturnya rendah dan tekanan udaranya tinggi (maksimum). Oleh karena itu terjadilah pergerakan angin dari benua Asia ke benua Australia sebagai angin muson barat. Angin ini melewati Samudera Pasifik dan Samudera Indonesia serta Laut Cina Selatan. Karena melewati lautan tentunya banyak membawa uap air dan setelah sampai di kepulauan Indonesia turunlah hujan. Setiap bulan November, Desember, dan Januari Indonesia bagian barat sedang mengalami musim hujan dengan curah hujan yang cukup tinggi.

b. Angin muson timur

Angin muson timur berhembus setiap bulan April - Oktober, ketika matahari mulai bergeser ke belahan bumi utara. Di belahan bumi utara khususnya benua Asia temperaturnya tinggi dan tekanan udara rendah (minimum). Sebaliknya di benua Australia yang telah ditinggalkan matahari, temperaturnya rendah dan tekanan udara tinggi (maksimum). Terjadilah pergerakan angin dari benua Australia ke benua Asia melalui Indonesia sebagai angin muson timur. Angin ini tidak banyak menurunkan hujan, karena hanya melewati laut kecil dan jalur sempit seperti Laut Timor, Laut Arafuru, dan bagian selatan Irian Jaya, serta Kepulauan Nusa Tenggara. Oleh sebab itu, di Indonesia sering menyebutnya sebagai musim

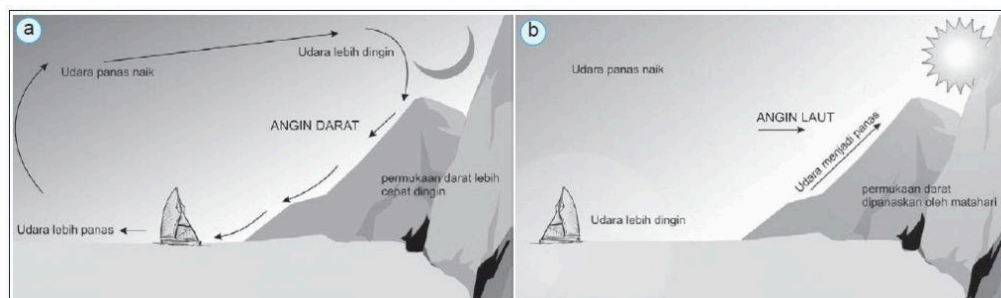
kemarau. Di antara kedua musim, yaitu musim penghujan dan kemarau terdapat musim lain yang disebut Musim Pancaroba (Peralihan). Peralihan dari musim penghujan ke musim kemarau disebut musim kemareng, sedangkan peralihan dari musim kemarau ke musim penghujan disebut musim labuh. Adapun ciri-ciri musim pancaroba (peralihan), yaitu antara lain udara terasa panas, arah angin tidak teratur, sering terjadi hujan secara tiba-tiba dalam waktu yang singkat dan lebat.

c. Angin lokal

Selain angin muson barat dan timur juga terdapat angin lokal. Angin ini bertiup setiap hari, seperti angin darat, angin laut, angin lembah dan angin gunung.

1) Angin darat dan angin laut

Angin ini terjadi di daerah pantai yang diakibatkan adanya perbedaan sifat daratan dan lautan. Pada malam hari daratan lebih dingin daripada lautan sehingga di daratan merupakan daerah maksimum yang menyebabkan terjadinya angin darat. Sebaliknya, pada siang hari terjadi angin laut. Perhatikan gambar 20. Kedua angin ini banyak dimanfaatkan oleh para nelayan tradisional untuk menangkap ikan di laut. Pada malam hari saat bertiupnya angin darat, para nelayan pergi menangkap ikan di laut. Sebaliknya pada siang hari saat bertiupnya angin laut, para nelayan pulang dari penangkapannya.

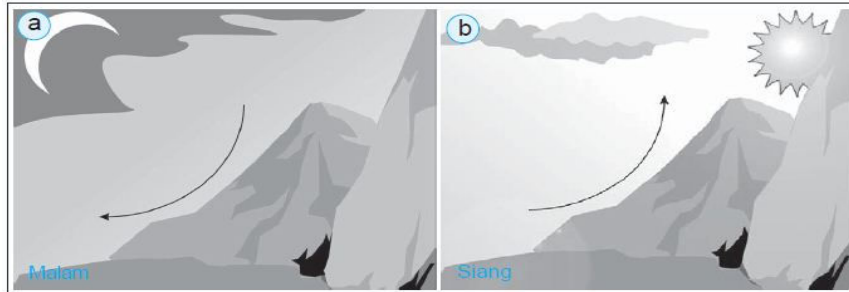


Gambar 2 Skema terjadinya (a) angin darat dan (b) angin laut

2) Angin lembah dan angin gunung

Pada siang hari puncak gunung lebih cepat menerima panas daripada lembah yang dalam keadaan tertutup. Puncak gunung tekanan udaranya minimum dan lembah tekanan udaranya maksimum. Karena keadaan ini maka udara bergerak dari lembah menyusur lereng menuju ke puncak gunung. Angin dari lembah ini disebut angin lembah. Pada malam hari puncak gunung lebih cepat mengeluarkan panas daripada lembah. Akibatnya di puncak gunung bertekanan

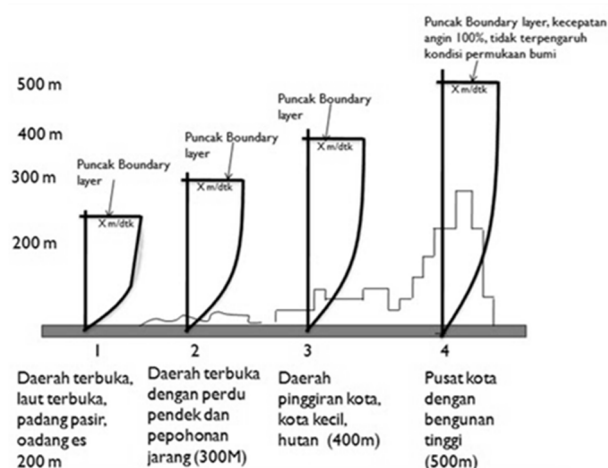
lebih tinggi (maksimum) dibandingkan dengan di lembah (minimum) sehingga angin bertiup dari puncak gunung menuruni lereng menuju ke lembah. Angin dari puncak gunung ini disebut angin gunung.



Gambar 3 Terjadinya (a) angin gunung dan (b) angin lembah

3. Variasi kecepatan angin pada ketinggian

Potensi kecepatan angin di berbagai tempat berbeda-beda, khususnya dipengaruhi oleh ketinggian (topografi) yang berpengaruh langsung terhadap tekanan udara relatif, sehingga kecepatan aliran udara berbeda-beda. Secara umum, kecepatan angin terus bertambah seiring dengan pertambahan ketinggiannya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4. Tingkat pertambahan kecepatan angin ini merupakan faktor dari kekasaran permukaan daratan, yang awalnya diperlambat dari tanah hingga makin cepat sesuai pertambahan ketinggian. Semakin banyak halangan pada keadaan sekeliling, (pohon, gedung, rumah, dsb), ketinggian yang diperlukan angin untuk mencapai kecepatan maksimum (V_{max}) juga semakin besar.

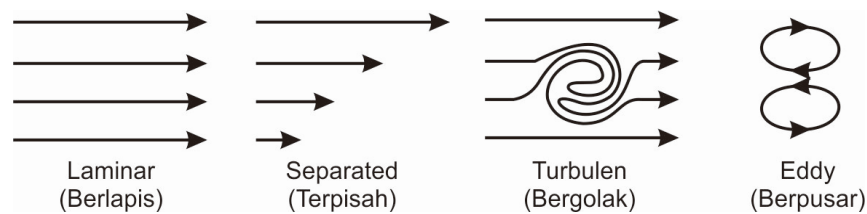


Gambar 4 Profil kecepatan angin

Faktanya tidak semua data kecepatan angin tersedia dan diukur pada setiap ketinggian, karena selain membutuhkan waktu juga memerlukan biaya yang tidak sedikit. Kecepatan angin berubah dengan berubahnya ketinggian, yang secara umum semakin tinggi posisi, kecepatan akan lebih tinggi. Pertambahan atau penurunan kecepatan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yakni *obstacle*, *roughness*, *orografi* di sekitar lokasi.

4. Pola angin pada bangunan gedung

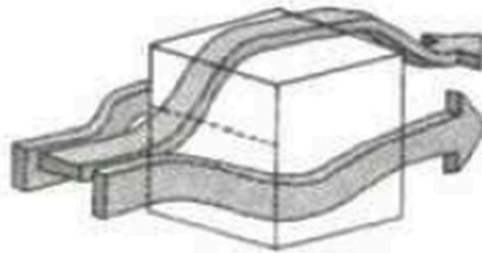
Pada lingkungan perkotaan di Indonesia, terdapat bangunan-bangunan bertingkat seperti kantor, hotel dan apartemen. Bangunan bertingkat adalah bangunan yang mempunyai lebih dari satu lantai secara vertical. Hal ini ikut mempengaruhi aliran udara atau angin yang bersirkulasi disekitar gedung terutama di daerah dengan kecepatan angin yang tinggi, seperti di bukit atau di tepi laut. Menurut Boutet (1987) dalam (Amri & Syukur, 2017) pola aliran udara terbagi atas 3 kategori, yakni pola aliran udara laminar (berlapis) yang cenderung sejajar dan mudah diprediksi, pola aliran udara turbulen (bergolak) yang acak dan susah diprediksi, dan pola aliran udara separated (terpisah) yang kecepatannya berkurang walaupun tetap bergerak sejajar. Selain ketiga pola aliran udara ini, masih dalam (Amri & Syukur, 2017), Lechner (2007) menambahkan pola aliran udara eddy (berpusar)



Gambar 5 Tipe pola aliran udara

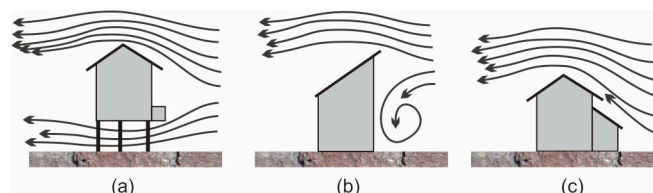
Terdapat 3 hal yang mempengaruhi pola aliran udara dan kecepatan angin pada skala lingkungan, yakni bentuk lahan, vegetasi, dan bangunan. Struktur bangunan membelokkan, menghalangi, dan mengarahkan aliran udara di sekitarnya, serta mengurangi maupun menambah kecepatan aliran udaranya. Saat aliran udara menuju permukaan bangunan, sepertiga aliran udara naik ke atas

bangunan sementara dua per tiga aliran udara membelok ke sisi bangunan, seperti terlihat pada Gambar 6.



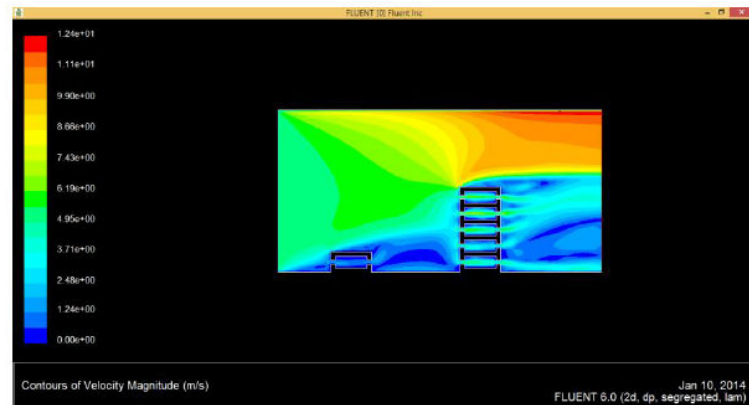
Gambar 6 Prinsip aliran udara pada bangunan

Pembelokan aliran udara dan pengurangan kecepatan angin menciptakan perbedaan tekanan; tekanan positif tercipta sewaktu udara mengumpul di sisi bangunan yang menghadap arah datangnya angin dan tekanan negatif tercipta sewaktu aliran udara membentuk pola baru pada sisi yang membelakangi arah datangnya angin. Lebih lanjut (Amri & Syukur, 2017), aliran udara pada skala bangunan dipengaruhi oleh beberapa hal, antara lain: bangunan itu sendiri, vegetasi di sekitar bangunan, pagar di sekitar bangunan, dan bangunan sekitarnya. Adapun pada bangunan itu sendiri, terdapat beberapa faktor yang berpengaruh terhadap pola aliran udara dan kecepatan angin, seperti konfigurasi, orientasi, tinggi, teritis, bentuk kolong rumah, dan bentuk-bentuk arsitektural lainnya. Konfigurasi dan orientasi bangunan terhadap arah datangnya angin mempengaruhi pola pergerakan aliran udara dan kecepatan angin. Seperti terlihat pada gambar berikut, pada bangunan berbentuk panggung, aliran udara menyebar ke bagian kolong rumah dan atap rumah; pada bangunan beratap rumah jengki, sebagian besar aliran udara terhadang oleh dinding bangunan; dan pada bangunan beratap rumah planar, aliran udara mengikuti bentuk atap rumah.



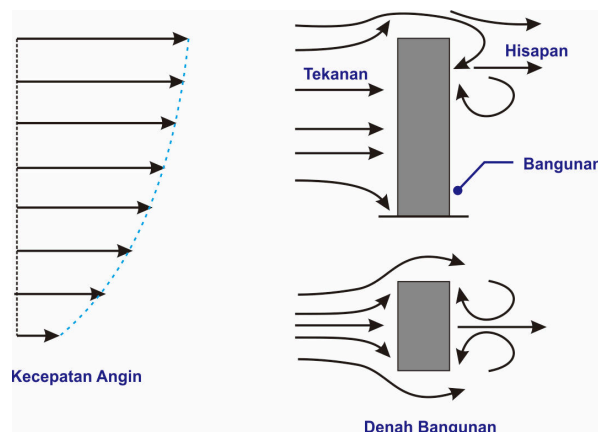
Gambar 7 Aliran udara pada konfigurasi bangunan yang berbeda

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan program simulasi untuk memprediksi aliran udara atau angin. Visualisasi aliran udara dapat kita lihat dengan bantuan simulasi beberapa software, seperti Autodesk Flow design, Autodesk vasari, FLUENT dan lain-lain.



Gambar 8 *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

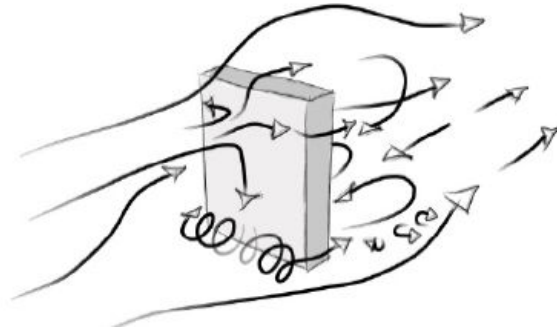
Besarnya beban angin yang bekerja pada struktur bangunan tergantung dari kecepatan angin, rapat massa udara, letak geografis, bentuk dan ketinggian bangunan, serta kekakuan struktur. Bangunan yang berada pada lintasan angin, akan menyebabkan angin berbelok atau dapat berhenti. Sebagai akibatnya, energi kinetik dari angin akan berubah menjadi energi potensial, yang berupa tekanan atau hisapan pada bangunan.



Gambar 9 Pengaruh aliran angin pada bangunan gedung

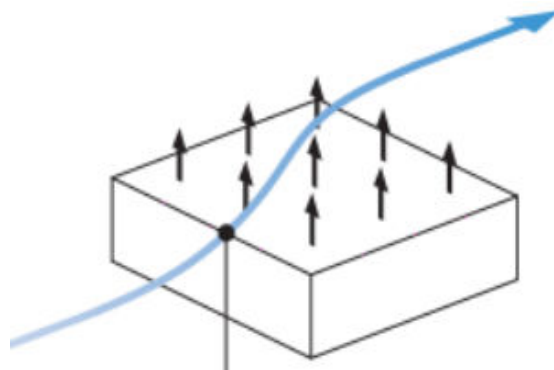
Salah satu faktor penting yang mempengaruhi besarnya tekanan dan isapan pada bangunan pada saat angin bergerak adalah kecepatan angin. Besarnya kecepatan angin berbeda-beda untuk setiap lokasi geografis. Kecepatan angin

rencana biasanya didasarkan untuk periode ulang 50 tahun. Karena kecepatan angin akan semakin tinggi dengan ketinggian di atas tanah, maka tinggi kecepatan rencana juga demikian. Selain itu perlu juga diperhatikan apakah bangunan itu terletak di perkotaan atau di pedesaan. Seandainya kecepatan angin telah diketahui, tekanan angin yang bekerja pada bangunan dapat ditentukan dan dinyatakan dalam gaya statis ekuivalen. Menurut (Stephanie Fleming, 2015) pada saat angin berhembus pada sisi bangunan, angin akan meningkat lebih besar kecepatannya pada periode yang singkat, karena disebabkan oleh tekanan angin yang tidak stabil, yang merupakan hasil dari turbulensi angin atau pemisahan aliran angin dari permukaan bangunan di tepi arah angin bangunan tersebut.



Gambar 10 Arah aliran angin melintas di sekitar gedung

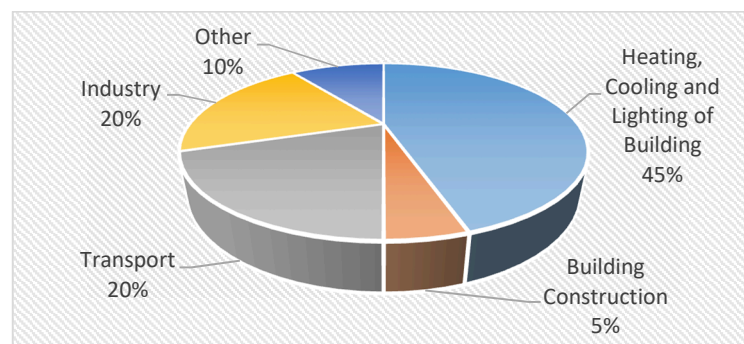
Semakin terbuka sebuah bangunan terhadap angin yang datang, semakin besar tekanan yang angin berikan pada bangunan, menyebabkan kecepatan anginnya bertambah (Aryabathi et al., 2021). Umumnya, fitur (geometri) permukaan di sekitar bangunan melindunginya dari angin dan mengurangi beban angin yang bekerja di atasnya (rooftop) seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Aliran Angin yang melintas pada atas (rooftop) gedung

2.1.4. Energi Pada Bangunan

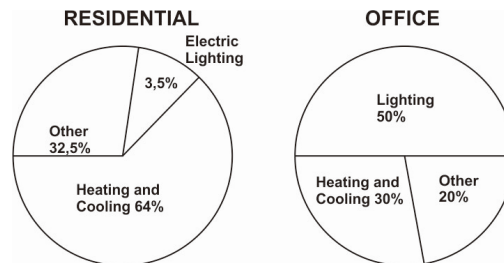
Krisis energi dunia ternyata memacu dikembangkannya konsep arsitektur baru yang lebih sadar energi. Arsitektur hemat energi (energy efficient architecture) adalah arsitektur dengan kebutuhan energi serendah mungkin yang bisa dicapai dengan mengurangi jumlah sumber daya yang masuk akal. Pemakaian energi listrik pada bangunan sebaiknya sudah harus dipikirkan dan disepakati sejak perencanaan awal antara perencana, pemilik dan pelaksana. Perlu adanya tinjauan desain aktif dan desain pasif pada sebuah bangunan gedung. Desain aktif meliputi semua bagian bangunan yang menggunakan energi, Sedangkan desain pasif meliputi struktur bangunan, termasuk selubung bangunan seperti atap, dinding, kaca, jendela dan pintu serta struktur dalam bangunan yang tidak menggunakan energi (Efendi, 2012). Konsep bangunan dengan efisiensi energi sangat penting karena jika melihat pada penggunaan energi secara global, sektor bangunan sendiri menyerap 45 % dari kebutuhan energi keseluruhan. Pemanfaatan energi dalam bangunan ini khususnya untuk pemanasan, pendinginan dan pencahayaan bangunan. Komposisi persentase penggunaan energi menurut sektor kegiatan dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 12.



Gambar 12 Komposisi penggunaan energi menurut sektor kegiatan

Konsumsi energi yang terbesar dalam bangunan baik dalam fungsinya sebagai hunian maupun kantor adalah untuk memenuhi kebutuhan akan listrik yang digunakan untuk pencahayaan buatan, pendinginan dan pemanasan ruang. Komposisi konsumsi energi antara kedua fungsi ini berbeda (lihat Gambar 13) namun secara umum yang terbesar adalah kebutuhan listrik. Konsumsi energi terbesar pada sebuah hunian adalah untuk memenuhi kebutuhan akan listrik

sejumlah 67,5% dari keseluruhan konsumsi energi. Ini menunjukkan bahwa dalam perencanaan bangunan untuk tujuan efisiensi energi yang paling harus diperhatikan adalah pengaruhnya terhadap penghematan penggunaan energi listrik yang termasuk sebagai purchased energy.



Gambar 13 Perbandingan konsumsi energi listrik pertahun

Konsumsi energi adalah merupakan besarnya pemakaian atau penggunaan energi pada suatu gedung atau bangunan pada jangka waktu tertentu. Intensitas Konsumsi Energi (IKE) adalah hasil pembagian antara konsumsi energi dengan satuan luas bangunan dalam periode waktu tertentu (Indonesia Clean Energy Development, 2014). Intensitas Konsumsi energi (IKE) adalah istilah yang digunakan untuk menyatakan besarnya jumlah penggunaan energi tiap meter persegi luas kotor (gross) bangunan dalam suatu kurun waktu tertentu. Penentuan nilai Intensitas Konsumsi Energi listrik telah diterapkan di berbagai Negara (ASEAN, APEC), dan dinyatakan dalam satuan kWh/m² per tahun. Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh ASEAN-USAID pada tahun 1987 yang laporannya baru dikeluarkan pada tahun 1992, target besarnya Intensitas Konsumsi Energi (IKE) listrik untuk Indonesia adalah seperti terlihat pada tabel 3.

Tabel 3 Standar IKE listrik (ASEAN-USAID, 1992)

No	Jenis Gedung	IKE (kWh/m ² tahun)
1	Perkantoran	240
2	Pertokoan/mall	330
3	Hotel	300
4	Rumah Sakit	380

Tabel 4 Standar IKE (waktu operasi acuan)

Tipe Bangunan	Rentan IKE (kWh/m ² /tahun)			Waktu Operasi Acuan (<i>Benchmark Operational Hours</i>)
	Batas Bawah	Acuan	Batas Atas	
Perkantoran	210	250	285	10 jam/hari, 5 hari/minggu, 52 minggu/th =2600 jam/th
Hotel	290	350	400	24 jam/hari, 7 hari/minggu, 52 minggu/th =8736 jam/th
Apartemen	300	350	400	24 jam/hari, 7 hari/minggu, 52 minggu/th =8736 jam/th
Sekolah	195	235	265	8 jam/hari, 5 hari/minggu, 52 minggu/th =2080 jam/th
Rumah Sakit	320	400	450	24 jam/hari, 7 hari/minggu, 52 minggu/th =8736 jam/th
Pertokoan	350	450	500	12 jam/hari, 7 hari/minggu, 52 minggu/th =4368 jam/th

Nilai IKE tersebut tidak menutup kemungkinan untuk mengalami perubahan sesuai dengan tingkat kesadaran masyarakat terhadap penggunaan energi. Seperti Singapura misalnya telah menetapkan IKE Listrik untuk perkantoran hanya sebesar 210 kWh/m² per tahun. Sebagai pedoman, telah ditetapkan nilai standart IKE untuk bangunan di Indonesia yang telah ditetapkan oleh Departemen Pendidikan Nasional Republik Indonesia tahun 2004 (tabel 5)

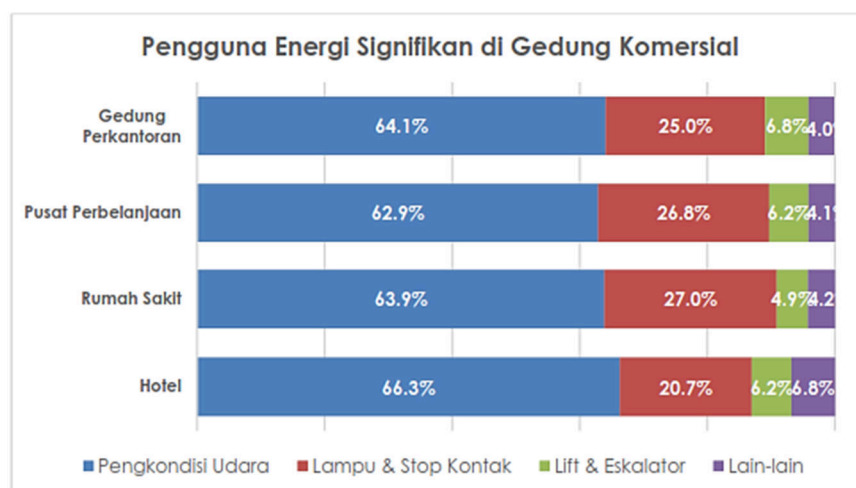
Tabel 5 Standar IKE bangunan gedung di Indonesia

No.	Kriteria	Ruang ber-AC (kWh/m ² /bln)	Ruang Tanpa AC (kWh/m ² /bln)
1	Sangat Efisien	4,71 s/d 7,92	0,84 s/d 1,67
2	Efisien	7,92 s/d 12,08	1,67 s/d 2,50
3	Cukup Efisien	12,08 s/d 14,58	-
4	Agak Boros	14,58 s/d 19,71	-
5	Boros	19,17 s/d 23,75	2,50 s/d 3,34
6	Sangat Boros	23,75 s/d 37,75	3,34 s/d 4,17

Langkah yang diambil oleh Indonesia sebagai salah satu negara yang ikut berkontribusi untuk melakukan efisiensi terhadap penggunaan energi pada bangunan yaitu dengan menerapkan konsep green building, dimana mulai dari proses perencanaan, konstruksi, pengoperasian, dan pemeliharaan menggunakan sumber daya yang seminimal mungkin, memanfaatkan lahan dengan bijak, mengurangi dampak lingkungan, serta menciptakan kualitas udara didalam ruangan

yang sehat dan nyaman (Green Building Council Indonesia. 2016). Berdasarkan PP 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional dan Peraturan Presiden No. 22 tahun 2017 tentang RUEN bahwa Konservasi energi nasional mempunyai target penghematan energi sebesar 17% pada tahun 2025. Penghematan energi tersebut berasal dari semua sektor yang ada termasuk sub sektor bangunan. Potensi penghematan energi di bangunan menurut hasil dari beberapa survei dan studi adalah sebesar 10-30% dari konsumsi energinya. Sedangkan dari data Statistik bahwa sektor bangunan mengkonsumsi energi sebesar 43,15 juta BOE atau setara dengan 4,82% dari konsumsi energi final nasional 2018.

Berdasarkan Benchmarking Specific Energy Consumption di Bangunan Komersial di 204 gedung didapatkan distribusi pemakaian energi total di Gedung terlihat bahwa ada 35 objek Gedung yang mengkonsumsi energi lebih dari 500 TOE atau sekitar 17,2%, didominasi oleh hotel dan pusat perbelanjaan. Sementara Gedung yang mengkonsumsi energi dibawah 250 TOE sekitar 139 objek atau sekitar 68,1%. Secara total, dari 204 gedung yang disurvei, total luasan Gedung (Gross Floor Area - GFA) adalah 3.782.547,50 m² dan total konsumsi energi tahunan sebesar 67.507,08.



Gambar 14 Penggunaan Energi Signifikan Gedung Komersil (Balai Besar Teknologi Konversi Energi, 2020)

Dari hasil survey, diketahui peralatan pengguna energi paling signifikan dari setiap gedung komersial adalah peralatan pengkondisi udara, dengan rata-rata penggunaan energi diatas 62%, kemudian diikuti oleh lampu dan stop kontak, Lift

dan eskalator dan peralatan listrik lainnya. Nilai rata-rata IKE Gedung komersial di 7 wilayah sebesar 202,72 kWh/m²/thn. Untuk masing-masing kategori jenis gedung, batasan indek konsumsi energi untuk gedung efisien berdasarkan hasil survei diusulkan sebagai berikut:

Gedung Pekantoran	: 180,95 kWh/m ² /tahun
Hotel	: 208,15 kWh/m ² /tahun
Rumah Sakit	: 180,81 kWh/m ² /tahun
Pusat Perbelanjaan	: 286,54 kWh/m ² /tahun

2.1.5. Software RETScreen (Renewable Energy and Energy Efficiency Technology) Expert

RETScreen (Renewable Energy and Energy Efficiency Technology) adalah sistem Perangkat Lunak Manajemen Energi Bersih untuk efisiensi energi, energi terbarukan, dan analisis proyek yang tepat untuk kogenerasi serta analisis kinerja energi berkelanjutan. *RETScreen* merupakan *software* yang digunakan di seluruh dunia untuk dapat mengevaluasi produk energi, biaya siklus hidup dan pengurangan emisi gas rumah kaca untuk berbagai jenis hemat energi dan teknologi energi terbarukan. *RETScreen* fungsinya juga dapat membantu dalam pembuatan kebijakan energi yang akan diinginkan. Software ini secara signifikan dapat mengurangi biaya finansial dan waktu yang terkait dengan identifikasi dan penilaian potensi proyek energi dan efisiensi energi terbarukan.

Simulasi menggunakan *RETScreen* secara umum berarti mengurangi biaya (baik secara keuangan maupun waktu) yang berhubungan dengan pengidentifikasian dan penaksiran proyek-proyek energi yang berpotensi. Biaya-biaya ini, yang timbul pada tingkat pra-kelayakan, kelayakan, pengembangan, dan teknis, dapat menjadi rintangan yang berarti bagi pelaksanaan teknologi energi terbarukan dan efisien energi. Dengan membantu meruntuhkan rintangan-rintangan ini, *RETScreen* dapat mengurangi biaya untuk memulai sebuah proyek dan melakukan bisnis dalam bidang energi bersih.

RETScreen memodelkan berbagai sumber energi bersih tradisional maupun non-tradisional serta sumber energi dan teknologi konvensional, termasuk efisiensi energi (dari fasilitas industri besar hingga perumahan), pemanasan dan pendinginan

(misalnya biomassa, pompa panas, pemanas udara) daya (energi matahari, angin, gelombang, hidro, panas bumi, dll, tetapi juga energi konvensional seperti turbin gas, uap, dan mesin reciprocating) terintegrasi kedalam lembar kerja analitis yaitu database produk, proyek, hidrologi, dan iklim, serta tautan ke peta sumber daya energi di seluruh dunia (Afrilius, 2014).



Gambar 15 Tampilan *RETScreen*

Data yang ada pada *RETScreen (Renewable Energy and Energy Efficiency Technology)* adalah basis data benchmark, biaya, produk, hidrologi dan iklim. Data yang sudah ada ini terdapat 6.700 lokasi tanah dan Satelit NASA yang mencakup keseluruhan permukaan bumi saat ini. Data ini membantu pengguna untuk memulai analisis dengan cepat.

1. Data iklim

Database iklim *RETScreen (Renewable Energy and Energy Efficiency Technology)* mencakup data meteorologi yang dibutuhkan dalam model. Saat menjalankan perangkat lunak, pengguna dapat memperoleh data iklim dari stasiun pemantauan darat dan / atau data satelit / analisis global NASA. Jika data iklim tidak tersedia dari stasiun pemantauan tanah tertentu, data kemudian disediakan dari data satelit / analisis NASA. Sumber data (yaitu "Ground" atau "NASA") ditunjukkan di samping data di kotak dialog database iklim.

2. Data Turbin Angin

Model proyek *Wind Turbin RETScreen (Renewable Energy and Energy Efficiency Technology)* dapat digunakan untuk lokasi manapun di dunia. Untuk proyek di Indonesia, pengguna dapat menggunakan data angin Indonesia yang termasuk dalam database kecepatan angin *RETScreen*. Untuk lokasi proyek lain di

seluruh dunia, data kecepatan angin dari sumber lain bisa langsung masuk di lembar kerja.

RETScreen - Lokasi Pelanggan: Penampil

Kondisi daerah acuan
 Lokasi data iklim: Indonesia - Hasanuddin/Ujung Ab Lokasi fasilitas: Indonesia

Legenda

- Lokasi fasilitas
- Lokasi data iklim

	Unit	Lokasi data iklim	Lokasi fasilitas	Sumber
Garis lintang		-5,1	-5,2	
Garis bujur		119,6	119,4	
Zona iklim		OA - Luar biasa panas - Lembap		
Ketinggian	m	14	0	Tanah+NASA
Suhu rancangan pemanasan	°C	21,1		Tanah - Peta
Suhu rancang pendinginan	°C	33,3		Tanah
Suhu bumi amplitudo	°C	3,3		NASA

Bulan	Suhu udara	Kelembaban relatif	Curah hujan	Radiasi matahari harian - horizontal	Tekanan atmosfer	Laju angin	Suhu bumi	Derajat pemanasan - hari	Suhu pendinginan-hari
	°C	%	mm	kWh/m ² /d	kPa	km/Jam	°C	18 °C	10 °C
Januari	26,2	87,2%	403,93	4,57	98,3	7,6	26,4	0	502
Februari	26,3	87,2%	331,24	4,85	98,3	7,6	26,4	0	456
Maret	26,5	85,7%	252,34	5,75	98,3	7,2	26,9	0	512
April	26,8	84,1%	174,60	5,91	98,3	6,5	27,2	0	504
Mei	27,2	81,0%	109,74	5,97	98,3	6,1	27,0	0	533
Juni	26,9	78,6%	80,10	5,67	98,4	6,1	26,5	0	507
Juli	26,6	74,0%	50,84	5,95	98,4	6,8	26,3	0	515
Agustus	27,0	66,8%	16,43	6,70	98,5	7,6	27,1	0	527
September	27,8	61,8%	29,40	7,22	98,4	8,6	28,4	0	534
Oktober	27,7	72,1%	64,17	7,05	98,4	7,6	29,4	0	549
November	27,0	82,1%	179,10	6,09	98,3	7,2	29,2	0	510
Desember	26,3	86,3%	380,06	4,75	98,2	7,6	27,4	0	505
Tahunan	26,9	78,9%	2.071,95	5,88	98,3	7,2	27,4	0	6.154
Sumber	Tanah	Tanah	NASA	NASA	NASA	Tanah	NASA	Tanah	Tanah

Diukur pada: m 10 0

Gambar 16 Tampilan pemilihan lokasi pada aplikasi RETScreen



Gambar 17 Grafik data iklim

2.2. Turbin Angin

2.2.1. Pengertian Turbin Angin

Turbin Angin menurut (Arsad dkk, 2009:93) merupakan alat yang mengkonversikan energi angin menjadi energi listrik. Selanjutnya (Reksoatmodjo, 2005:65) mengemukakan bahwa turbin angin juga dikenal dengan sebutan kincir angin yang merupakan sarana pengubah energi kinetic angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator listrik. Singkatnya turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan Windmill.



Gambar 18 PLTB: Turbin angin (Ecoimagination, 2010)

Turbin angin adalah kincir angin yang digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik. Turbin angin ini pada awalnya dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan para petani dalam melakukan penggilingan padi, keperluan irigasi, dll. Turbin angin terdahulu banyak dibangun di Denmark, Belanda, dan negara-negara Eropa lainnya dan lebih dikenal dengan Windmill. Kini turbin angin lebih banyak digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan listrik masyarakat, dengan menggunakan prinsip konversi energi dan menggunakan sumber daya alam yang dapat diperbaharui yaitu angina, walaupun sampai saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional.



Gambar 19 Bahrain World Trade Center (inhabitat.com, diakses 2022)

2.2.2. Kelebihan dan Kekurangan Turbin Angin

Energi angin saat ini adalah sumber energi terbarukan yang paling populer di dunia dan berikut ini adalah beberapa keunggulan dan kelemahan penggunaan energi angin. Energi angin merupakan salah satu sumber energi tertua, dan konversi energi angin menjadi bentuk energi yang berguna telah dilakukan selama lebih dari 5000 tahun untuk tujuan seperti mendorong perahu dan kapal layar. Dewasa ini energi angin banyak digunakan untuk menghasilkan listrik, dan merupakan salah satu sektor energi terbarukan paling maju dengan potensi di tahun-tahun mendatang memiliki rasio yang jauh lebih besar sebagai pemasok kebutuhan energi dunia dibandingkan di saat ini. Ketika kita berbicara tentang keunggulan dan kelemahan energi angin, hal yang pertama kali digambarkan dari energi angin adalah bahwa sumber energi ini secara ekologis dapat diterima, yang berarti bahwa energi angin tidak seperti bahan bakar fosil yang memiliki kontribusi lebih besar terhadap dampak perubahan iklim. Energi angin tidak akan melanjutkan pencemaran terhadap planet kita seperti bahan bakar fosil selama ini. Misalnya, turbin angin tunggal 1-MW dapat menghemat sekitar 2.000 ton karbon dioksida dalam satu tahun.

Energi angin juga merupakan sumber energi terbarukan yang berarti tidak dapat habis seperti bahan bakar fosil. Energi angin yang tersedia di atmosfer lima kali lebih besar daripada konsumsi energi dunia saat ini. Potensi energi angin di darat dan dekat pantai sekitar 72 TW (tera watt) yang melebihi lima kali lebih banyak dari penggunaan energi dunia saat ini dalam segala bentuk. Keuntungan lain

dari tenaga angin adalah fakta bahwa setiap orang bisa membangun atau membeli turbin angin untuk memanfaatkan energi angin dan memenuhi kebutuhan energi di rumah sendiri. Turbin angin tidak perlu banyak perawatan dan seseorang tidak perlu menjadi jenius untuk meng-handlenya. Tentu saja memiliki turbin angin sendiri juga berarti menghindari terjadinya pemadaman listrik bila terjadi kerusakan jaring PLN. Juga, listrik tenaga angin akan menjadi lebih hemat biaya seiring dengan adanya banyak penelitian yang dilakukan untuk memotong biaya instalasi, meningkatkan efisiensi dan untuk memastikan agar energi angin menjadi lebih dapat diandalkan.

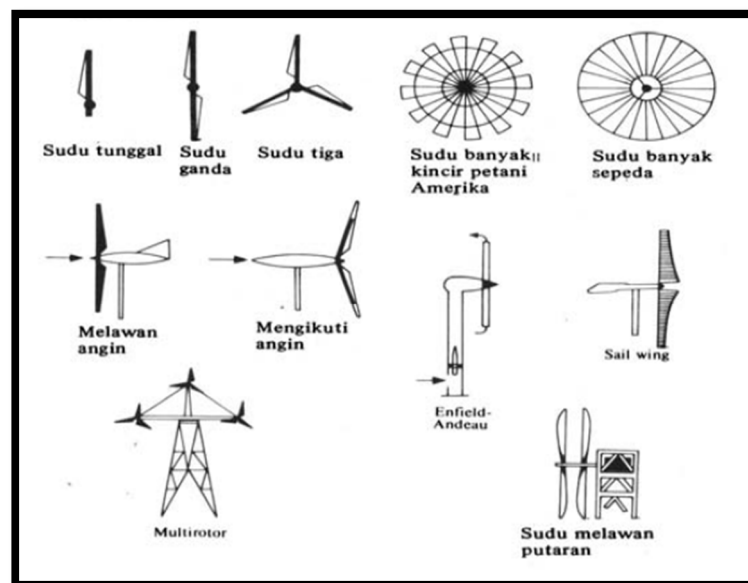
Di beberapa tempat angin kencang sering ditemui yang membuat pemanfaatan energi angin menjadi sangat mudah, sementara di beberapa tempat angin tidak cukup kuat untuk menciptakan listrik yang memadai. Biaya instalasi tenaga angin yang masih relatif tinggi merupakan kelemahan lain dari energi angin. Secara kasar, dibutuhkan sekitar 10 tahun untuk mengembalikan biaya instalasi energi angin. Memang, ini bukan waktu yang sangat panjang, namun biaya instalasinya yang besar masih menjadi penghalang bagi banyak orang untuk memanfaatkan energi angin. Kelemahan lainnya dari tenaga angin adalah bangunan pembangkit listrik tenaga angin dapat mempengaruhi estetika lanskap. Fasilitas listrik tenaga angin juga perlu direncanakan dengan hati-hati, lokasi dan pengoperasiannya harus meminimalkan dampak negatif pada populasi burung dan satwa liar.

2.2.3. Klasifikasi Turbin Angin

Saat ini pembangunan turbin angin masih belum dapat menyaingi pembangkit listrik konvensional (Contoh: PLTD, PLTU, dll), namun turbin masih lebih dikembangkan oleh para ilmuwan karena dalam waktu dekat manusia akan dihadapkan dengan masalah kekurangan sumber daya alam tak dapat diperbaharui (Contoh: batubara, minyak bumi) sebagai bahan dasar untuk membangkitkan listrik. (Daryanto, 2007). Turbin yang dapat menghasilkan energi dari angin secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama yaitu turbin angin sumbu horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine*) dan turbin angin sumbu vertikal (*Vertical Axis Wind Turbine*) (De Coste, 2005).

1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)

Turbin angin sumbu horizontal atau turbin angin propeler ialah jenis turbin angin yang paling banyak digunakan. Turbin ini terdiri dari sebuah menara yang di puncaknya terdapat sebuah baling-baling yang berfungsi sebagai rotor dan menghadap atau membelakangi arah angin. Kebanyakan turbin angin jenis ini mempunyai dua atau tiga bilah baling-baling walaupun ada juga turbin bilah baling-balingnya kurang atau lebih daripada yang disebut diatas. Turbin angin propeler adalah jenis turbin angin dengan poros horizontal seperti baling- baling pesawat terbang pada umumnya. Turbin angin ini harus diarahkan sesuai dengan arah angin yang paling tinggi kecepatannya. Turbin angin sumbu horizontal dibedakan menjadi *upwind* dan *downwind* berdasarkan arah penerimaan angin. Pada mesin *upwind*, rotor berhadapan dengan angin. Rotor didesain tidak fleksibel, dan diperlukan mekanisme yaw untuk menjaga rotor agar tetap berhadapan dengan angin. sedangkan pada mesin *downwind*, rotor ditempatkan dibelakang tower. Rotor dapat dibuat lebih fleksibel dan lebih ringan dari pada mesin *upwind*. Contoh turbin angin sumbu horizontal ditunjukkan pada Gambar berikut:



Gambar 20 Turbin Angin Sumbu Horizontal (Daryanto, 2007)

a. Kelebihan TASH

Dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di

sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%.

b. Kelemahan TASH

- 1) Menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit diangkut. Diperkirakan besar biaya transportasi bisa mencapai 20% dari seluruh biaya peralatan turbin angin.
- 2) TASH sangat sulit dipasang, membutuhkan Derek yang sangat tinggi dan mahal serta para operator yang terampil.
- 3) TASH yang tinggi bias mempengaruhi radar airport.
- 4) Ukurannya yang tinggi merintangai jangkaun pandangan dan mengganggu penampilan lansekap.
- 5) Berbagai varian downwind menderita kerusakan struktur yang disebabkan oleh turbulensi.
- 6) TASH membutuhkan mekanisme control yaw tambahan untuk membelokkan kincir kearah angin.

2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

Turbin angin sumbu vertikal atau yang lebih dikenal dengan istilah *Vertical Axis Wind Turbine* (VAWT) memiliki ciri utama yaitu keberadaan tegak lurus terhadap arah aliran angin atau tegak terhadap permukaan tanah. TASV terdiri dari beberapa tipe yang paling umum dijumpai yaitu: Savonius, Rotor, Darrieus Rotor, Giromill, dan H-Rotor.

a. Kelebihan TASV

- 1) Tidak membutuhkan struktur menara yang besar
- 2) Karena bilah – bilah rotornya vertical, tidak dibutuhkan mekanisme yaw
- 3) Sebuah TASV bias diletakkan lebih dekat dengan tanah, membuat pemeliharaan bagian – bagiannya yang bergerak jadi lebih mudah.
- 4) TASV memiliki sudut airfoil (bentuk bilah sebuah baling – baling yang terlihat secara melintang) yang lebih tinggi, memberikan keaerodinamisan yang tinggi sembari mengurangi drag pada tekanan yang rendah dan tinggi.
- 5) Desain TASV berbilah lurus dengan potongan melintang berbentuk kotak atau empat persegi panjang memiliki wilayah tiupan lebih besar untuk diameter tertentu daripadawilayah tiupan berbentuk lingkaran TASH.

- 6) TASV memiliki kecepatan awal angin yang lebih rendah daripada TASH. Biasanya TASV mulai menghasilkan listrik pada 10km/jam (6 m.p.h).
- 7) TASV biasanya memiliki tip speed ratio (perbandingan antara kecepatan putaran dari ujung sebuah bilah dengan laju sebenarnya angin) yang lebih rendah sehingga lebih kecil kemungkinannya rusak di saat angin berhembus sangat kencang.
- 8) TASV bisa didirikan pada lokasi-lokasi dimana struktur yang lebih tinggi dilarang dibangun.
- 9) TASV yang ditempatkan di dekat tanah bisa mengambil keuntungan dari berbagai lokasi yang menyalurkan angin serta meningkatkan laju angin (seperti gunung atau bukit yang puncaknya datar dan puncak bukit),
- 10) TASV tidak harus diubah posisinya jika arah angin berubah.
- 11) Kincir pada TASV mudah dilihat dan dihindari burung.

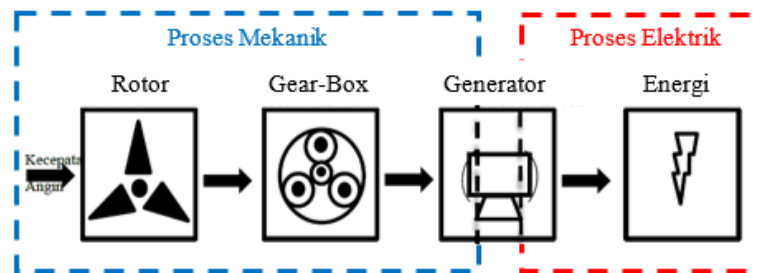
b. Kekurangan TASV

- 1) Kebanyakan TASV memproduksi energi hanya 50% dari efisiensi TASH karena drag tambahan yang dimilikinya saat kincir berputar.
- 2) TASV tidak mengambil keuntungan dari angin yang melaju lebih kencang di elevasi yang lebih tinggi.
- 3) Kebanyakan TASV mempunyai torsi awal yang rendah, dan membutuhkan energi untuk mulai berputar.
- 4) Sebuah TASV yang menggunakan kabel untuk menyanggahnya memberi tekanan pada bantalan dasar karena semua berat rotor dibebankan pada bantalan. Kabel yang dikaitkan ke puncak bantalan meningkatkan daya dorong ke bawah saat angin bertiup.

2.2.4. Sistem Konversi Energi Turbin Angin

Prinsip kerja turbin angin yaitu mengubah energi kinetik pada angin menjadi energi mekanik yang berupa putaran poros, kemudian dari putaran poros tersebut dikonversi menjadi energi listrik oleh generator pada turbin (Hansen, 2015). Sistem pembangkitan listrik menggunakan angin sebagai sumber energi merupakan sistem alternatif yang sangat berkembang pesat, mengingat angin merupakan salah satu energi yang tidak terbatas di alam. Secara umum proses kerja pembangkit listrik

tenaga angin dibagi kedalam 2, yaitu proses mekanik dan proses elektrik. Untuk lebih jelas mengenai prinsip kerja turbin angin dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21 Proses konversi energi angin

Sebenarnya prosesnya tidak semudah itu, karena terdapat berbagai macam sub-sistem yang dapat meningkatkan safety dan efisiensi dari turbin angin, yaitu :

1. Rotor/Blade

Sudu (blade) sebagai baling-baling berfungsi mengubah hembusan angin menjadi energi kinetik, sementara rotor berfungsi mengubah energi kinetik angin menjadi energi gerak berupa putaran poros untuk memutar generator listrik. Putaran rotor sangat bergantung pada jumlah dan bentuk aerodinamik sudu/baling-baling, semakin panjang baling-baling maka akan semakin banyak menerima terpaan angin sehingga akan semakin besar energi putaran mekanik yang dihasilkan untuk memutar generator. Adakalanya sebelum poros baling-baling disambung ke generator listrik.

2. Gear Box

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Ini menyebabkan putaran mesin meningkat beberapa kali lipat dari bilah turbin. Biasanya Gearbox yang digunakan sekitar 1:60.

3. Brake System

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah gearbox agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar digunaan akan menyebabkan putaran yang cukup

cepat pada poros generator, sehingga jika tidak di atasi maka putaran ini dapat merusak generator, dampak dari kerusakan akibat putaran berlebih.

4. Mekanisme *yaw/yaw System*

Sistem kontrol sumbu *yaw* merupakan sistem orientasi yang diperlukan oleh turbin angin untuk menjaga agar poros rotor dapat menghadap ke arah angin datang. Sistem kontrol *yaw* pada umumnya dikontrol dengan menggunakan sistem otomatis dan bergerak sesuai arah angin datang. Pada turbin angin yang relatif besar, umumnya sudah menggunakan sistem geleng aktif (*active yawing system*), yang digerakkan oleh motor servo. Kontrol yawing disini berfungsi menerima *input* dari sensor anemometer (mendeteksi kecepatan angin) dan *wind direction* (mendeteksi perubahan arah angin), dan memberikan komando kepada motor servo untuk membelokkan arah *shaft* turbin angin dan juga memberikan *input* kepada kontrol *pitch*. Kegunaan dari sistem kontrol arah *yaw* adalah untuk memastikan rotor turbin berada dalam posisi tegak lurus terhadap arah angin, karena arah angin yang datang tidak selalu dari satu sisi melainkan dari segala sisi dan sulit ditebak (Kim and Dalhoff, 2014).

Sistem mekanisme *yaw* pada turbin angin sumbu horisontal pada umumnya dibagi menjadi dua, yaitu mekanisme *yaw* aktif dan mekanisme *yaw* pasif. Mekanisme *yaw* aktif digunakan pada turbin angin skala besar. Sistem *yaw* aktif dilengkapi dengan beberapa perangkat penghasil torsi yang dapat memutar nacelle turbin angin terhadap menara stasioner berdasarkan sinyal otomatis dari sensor arah angin. Sedangkan mekanisme *yaw* pasif sering diaplikasikan pada turbin angin skala kecil/mikro. Sistem *yaw* pasif memanfaatkan kekuatan angin untuk menyesuaikan orientasi rotor turbin angin ke arah datangnya angin.

Mengingat bahwa energi angin sangat fluktuatif, maka turbin angin harus mampu menyesuaikan dengan keadaan. Turbin angin harus selalu menghadap arah datangnya angin untuk dapat menyerap daya angin yang optimal. Selain itu, sistem orientasi juga dirancang sebagai pengaman terhadap putaran yang terlalu tinggi (*overspeed*). Dengan demikian daya yang dihasilkan turbin angin dapat lebih dimaksimalkan. Menurut riset yang dilakukan oleh peneliti di negara Cina, diketahui bahwa kemiringan turbin angin terhadap arah angin hingga 30 derajat dapat menyebabkan loss pada kecepatan rotor sebesar 12.92% hingga 13.30%, hal

ini membuktikan bahwa sistem kontrol sumbu yaw perlu diimplementasikan agar rugi-rugi kecepatan rotor dapat diminimalisir dan meningkatkan efisiensi dari turbin angin (Wan et.al, 2015).

5. Generator

Generator adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC(alternating current) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal. Generator terletak didalam komponen mesin turbin angin tapi bekerja sebagai penghubung antara proses mekanik dan elektrik.

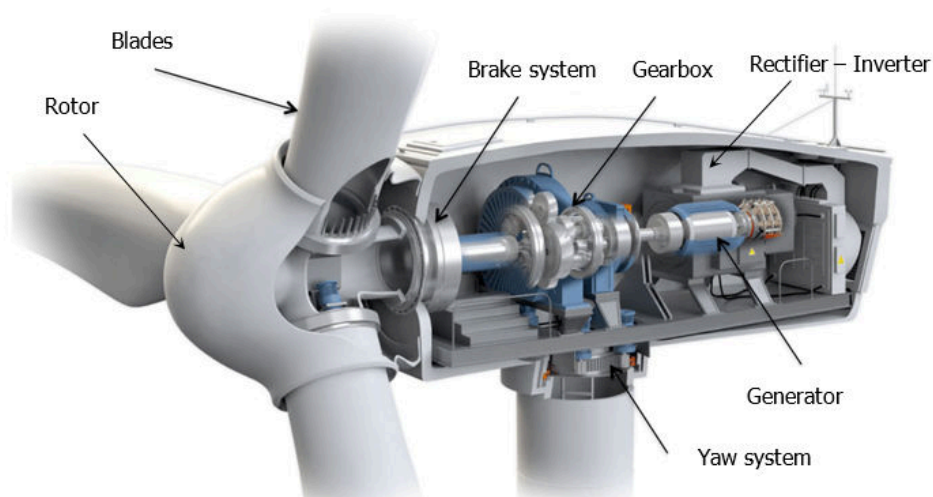
6. Rectifier – Inverter

Rectifier berarti penyearah. Rectifier dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. Inverter berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpanan energi(aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC , maka diperlukan inverter untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.

7. Penyimpanan Energi

Keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) menyebabkan ketersediaan listrik tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpanan energi yang berfungsi sebagai back-up energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik

tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun. Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil. Aki mobil memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar. Aki 12 volt, 65 Ah dapat dipakai untuk mencatu rumah tangga (kurang lebih) selama 0.5 jam pada daya 780 watt. Kendala dalam menggunakan alat ini adalah alat ini memerlukan catu daya DC (Direct Current) untuk meng-charge/mengisi energi, sedangkan dari generator dihasilkan catu daya AC (Alternating Current). Oleh karena itu diperlukan rectifier-inverter untuk mengakomodasi keperluan ini. Rectifier-inverter akan dijelaskan berikut.



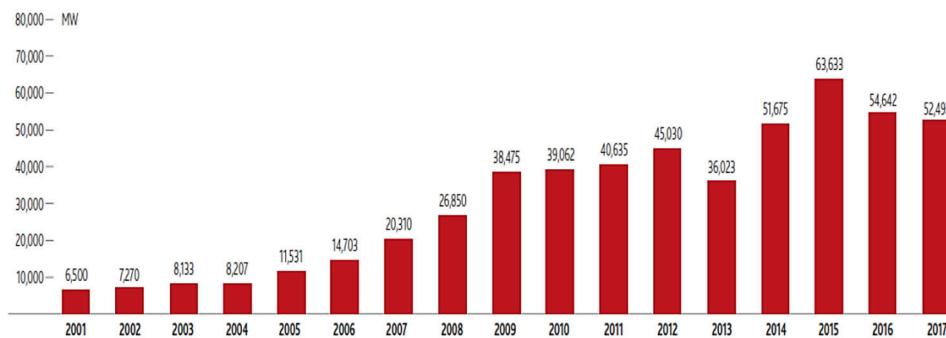
Gambar 22 Komponen system kerja turbin angin

2.2.5. Perkembangan Energi Angin /Turbin Angin

1. Energi Angin di Dunia

Perkembangan daya angin yang terpasang di dunia dari tahun 2001 sampai dengan 2017 mengalami pertumbuhan yang cukup signifikan. Empat tahun berturut-turut dari 2014-2017 dengan total yang sudah diinstal tiap tahunnya pembangkit listrik tenaga bayu di atas 50 GW seperti yang ditunjukkan pada grafik (Global Wind Energy Council, 2018). Pasar pembangkit tenaga angin tahunan faktanya turun 3,8% pada tahun 2016 menjadi 54,642 MW dan pada tahun 2017

juga turun sebesar 52,492 MW. Pertumbuhan total pembangkit tenaga angin pada tahun 2017 sebanyak 539,123 MW. Pertumbuhan rata-rata masih baik, meskipun pertumbuhan pada tahun 2016 dan 2017 cenderung menurun sedikit dibandingkan tahun 2015



Gambar 23 Kapasitas global PLTB terpasang 2001-2017 (Global Wind Energy Council, 2018)

2. Energi Angin di Asia Tenggara

Negara-negara Asia Tenggara seperti Filipina, Thailand dan Vietnam mendorong pengembangan turbin angin, tetapi regulasi dan ketidakpastian ekonomi serta sedikitnya jaringan transmisi menghambat kemajuan di Filipina, yang hanya memiliki satu ladang angin dengan kapasitas 33 MW yang dibangun pada tahun 2009. Thailand mempunyai kapasitas total terpasang untuk pembangkit tenaga angin sebesar 7 MW dan penambahan 2 MW terjadi pada tahun lalu. Kapasitas total terpasang 7 MW ini akan segera didorong dengan rencana pengembangan empat ladang angin dengan total 242 MW. Pengembangan ladang angin 2 x 90 MW pada tahun 2013 menggunakan turbin angin siemen, yang disebut dengan Huay Bong II dan III, sedangkan konstruksi 90 MW di Thep Sathit Fars telah ditunda berkenaan dengan ketidaksetujuan pemerintah pada lokasi. Thailand mempunyai lokasi dengan potensi angin yang terbaik untuk ditempatkan merupakan area konservasi, yang membuat ijin tanah menjadi lebih kompleks. Perencanaan pengembangan proyek energi angin di Thailand meskipun mengalami kendala menargetkan totalnya 645 MW (Ver-Bruggen,2013).

Vietnam menargetkan aplikasi pembangkit daya angin mencapai 1 GW pada tahun 2020 dan 6,2 GW pada tahun 2030. Master plan power Vietnam ke VII telah ditetapkan pada tahun lalu dan obligasi EVN (Electricity of Vietnam Group), untuk

membeli semua listrik yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga angin on-grid. Studi-studi estimasi menyebutkan bahwa Vietnam memiliki potensi energi angin yang bagus. Studi yang dilakukan oleh Bank Dunia menunjukkan bahwa potensi energi angin Vietnam sebesar 521 GW. Studi yang dilakukan oleh EVN juga menyebutkan bahwa Vietnam memiliki potensi energi angin sebesar 1.785 GW (Ver-Bruggen,2013). GIZ proyek energi angin menyebutkan sekitar 42 proyek pembangkit angin berkisar antara 6 MW sampai 150 MW pada tempat yang berbeda pengembangan di Vietnam untuk kapasitas total 3,9 GW. Perusahaan gabungan energi terbarukan Vietnam pada tahun lalu menyelesaikan tahap pertama ladang angin 120 MW di provinsi Binh Thuan, dengan 201,5 MW turbin yang dikoneksi ke grid yang cukup jauh (Ver-Bruggen,2013).

3. Energi Angin di Indonesia

Potensi energi angin di Indonesia secara keseluruhan rata-rata tidaklah besar, tetapi berdasarkan survei dan pengukuran data angin yang telah dilakukan sejak 1979, banyak daerah yang prospektif karena memiliki kecepatan angin rata-rata tahunan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 24. Data memperlihatkan daerah timur Indonesia memiliki potensi energi angin yang cukup besar.



Gambar 24 Peta kecepatan angin Indonesia (ketinggian 100m)

(<https://globalwindatlas.info/en/>, diakses 2022)

Data yang sama juga diperlihatkan pada *Technical Potential for Offshore Wind in Indonesia Map*. Wilayah dengan kecepatan angin potensial di Indonesia terletak di ujung selatan pulau Sulawesi dan Selatan Marauke. Indonesia memiliki potensi energi total 277 GW, sementara yang baru terpasang 198 GW.

Tabel 6 Rencana pengembangan PLTB

<i>Tahun</i>	<i>Unit</i>	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2020	2025
<i>Kapasitas</i>	MW	4	11	18	26	33	40	128	256
<i>Produksi</i>	GWh	11	29	48	67	86	105	336	673
<i>Investasi</i>	Juta (\$)	20	56	92	128	164	200	512	768
<i>Biaya produksi</i>	Juta (\$)	5	15	24	34	43	53	135	202
<i>Pengurangan emisi</i>	Ton CO ₂	3.148	8.814	14.481	20.147	25.814	31.480	100.736	201.472
<i>Rumah terlistriki</i>	Buah	20.000	55.000	90.000	130.000	165.000	200.000	640.000	1.280.000

Evaluasi energi angin di suatu daerah/lokasi meliputi; pola dan besarnya kecepatan angin, arah angin, rapat daya serta potensi energi tersedia dan dilakukan setidaknya selama satu tahun (Freris, 1990). Data angin di Indonesia diperoleh dari berbagai pengukuran angin seperti dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan pengukuran di tempat yang dilakukan oleh Lembaga Penerbangan dan Aerodinamika Nasional (LAPAN), Winrock International USA, Wind Guard Germany bekerjasama dengan pemerintah lokal, Soluziona kerjasama dengan Kementerian ESDM, NipSA Spanyol dan institusi lainnya yang relevan pada beberapa area di Indonesia (Martosaputro and Murti, 2014).

Data angin yang dikumpulkan sebanyak 166 lokasi di Indonesia telah diukur potensi energi anginnya (Ver-Bruggen, 2013). Hasilnya menunjukkan bahwa 35 lokasi mempunyai potensi energi angin yang bagus dengan kecepatan energi angin tahunan rata-rata di atas 6 m/s. Hasilnya menunjukkan sebanyak 34 lokasi mempunyai energi angin yang cukup baik untuk dikembangkan, kecepatan energi tahunan rata-ratanya antara 4 – 5 m/s (Martosaputro and Murti, 2014). Pengukuran energi angin di Indonesia telah dilakukan lebih dari 15 tahun yang lalu, kebanyakan dilakukan oleh LAPAN seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7 (Martosaputro, 2013)

Tabel 7 Rangkuman data angin di Indonesia

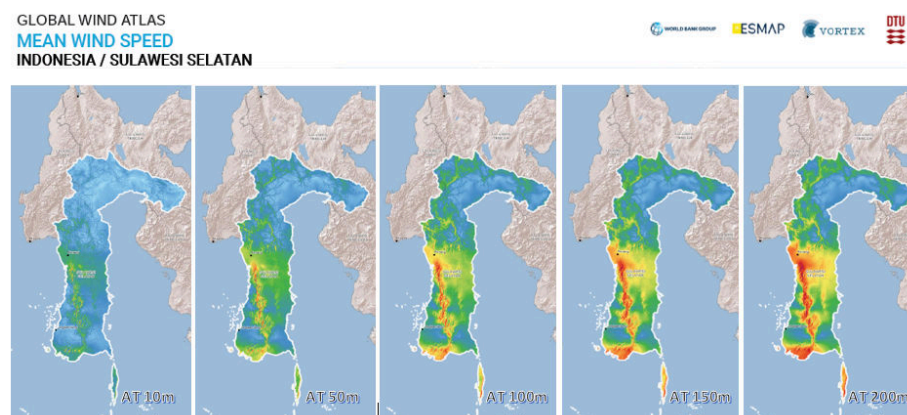
Potensi angin	Kecepatan angin pada 50 m (m/s)	Rapat Daya Angin pada 50 m (W/m^2)	Jumlah Lokasi	Provinsi
Jelek	3,0 – 4,0	< 75	84	Maluku, Papua, Sumba, Mentawai, Bengkulu, Jambi, Nusa Tenggara Timur dan Barat, Sulawesi Utara dan Selatan, Sumatera Utara, Jawa Tengah, DIY, Lampung, Kalimantan
Sedang	4,0 – 5,0	75 – 150	34	Jawa Timur dan Tengah, DIY, Bali, Bengkulu, Nusa Tenggara Timur dan Barat, Sulawesi Utara dan Selatan
Bagus	> 5,0	> 150	35	Banten, DKI, Jawa Tengah dan Barat, DIY, Nusa Tenggara Timur dan barat, Sulawesi Utara dan Selatan, Maluku

Implementasi sistem energi angin terbatas di area terpencil dan di pulau-pulau, itupun dipasang dengan frekuensi sebagai bagian dari pengembangan atau proyek penelitian. Area sepanjang pantai utara dan selatan bagian dari pulau Jawa, bagian timur pulau Madura, bagian utara dan selatan pulau Sulawesi, dan beberapa bagian pulau Nusa Tenggara telah diaplikasikan turbin angin untuk pembangkit listrik. Implementasi turbin angin kebanyakan menggunakan sistem tunggal dan sistem hibrid tetapi jumlah dan kualitas masih membutuhkan perbaikan untuk pengembangan (Martosaputro and Murti, 2014).

Kapasitas yang paling besar pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Indonesia saat ini terdapat di Sulawesi Selatan yaitu PLTB Sidrap di Kabupaten Sidenreng Rappang. PLTB ini memiliki 30 turbin angin dengan tinggi tower mencapai 80 meter dan diameter rotor sebesar 57 meter. Masing-masing menggerakkan turbin berkapasitas 2,5 MW, sehingga total kapasitas yang

dihasilkan oleh 30 turbin adalah 75 MW. PLTB Sidrap merupakan PLTB komersial pertama yang dibangun PT UPC Sidrap Bayu, dan mampu mengaliri listrik sebanyak 150.000 untuk rumah tangga dengan keperluan daya 450 KVA. Yang kedua adalah PLTB Tolo di Kabupaten Jeneponto. PLTB ini memiliki 20 turbin dengan kapasitas 72 MW.

Hal ini tidak lepas dari potensi wilayah Sidrap dan Jeneponto yang mana dapat kita amati pada Peta *Global Wind Atlas* Sulawesi Selatan yang pada dasarnya merupakan salah satu wilayah dengan kecepatan angin tertinggi di Indonesia.



Gambar 26 Profil kecepatan angin di Sulawesi Selatan

(<https://globalwindatlas.info/en/>, diakses 2022)

Untuk wilayah Kota Makassar sendiri, kecepatan angin tidak sebesar 2 wilayah PLTB yang disebutkan sebelumnya, namun kondisi wilayah sekitar laut cenderung tetap memiliki kecepatan angin yang relatif tinggi. Menurut data BMKG Kota Makassar, kecepatan angin rata-rata tahunan berada diatas 3 m/s dengan ketinggian pengukuran 10m , yang mana menjadi standar minimum rata-rata sebuah turbin angin. Berikut pada tabel kecepatan angin rata-rata 5 tahun terakhir menurut BMKG Kota Makassar:

Tabel 8 Kecepatan Angin Rata-Rata (Badan Pusat Statistik, 2017-2021)

<i>Bulan</i>	<i>Kecepatan Angin Rata-Rata (m/s) Menurut Data BMKG Kota Makassar</i>				
	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>2019</i>	<i>2020</i>	<i>2021</i>
<i>Januari</i>	5	5	4	5	4
<i>Februari</i>	5	7	3	4	4
<i>Maret</i>	4	4	4	4	4
<i>April</i>	4	4	3	3	3
<i>Mei</i>	4	3	3	3	3
<i>Juni</i>	4	3	3	3	4
<i>Juli</i>	4	3	3	4	3
<i>Agustus</i>	4	4	3	4	4
<i>September</i>	4	4	4	4	4
<i>Oktober</i>	4	4	4	4	4
<i>November</i>	4	4	3	4	4
<i>Desember</i>	7	4	4	4	4
<i>Rata-rata</i>	<i>4,4</i>	<i>4,1</i>	<i>3,4</i>	<i>3,8</i>	<i>3,8</i>

2.3. Turbin Angin pada Bangunan Gedung

Pemasangan turbin angin di lingkungan bangunan menghadirkan masalah kompleks yang jarang ditemui di lingkungan terbuka. Banyak pertimbangan desain yang harus dipelajari seperti kecepatan angin pemukiman, suara bising yang dihasilkan, dimensi turbin, kekuatan struktur, dll. Kecepatan angin di pemukiman lebih kecil dari yang bertiup di pedesaan/terbuka, karena adanya hambatan. Penempatan turbin angin di atap bangunan menjadi solusi yang paling jelas. Instalasi semacam itu juga memungkinkan untuk memanfaatkan kecepatan angin yang tidak terganggu, yang sering disebut “efek bukit” (hingga 20% dari kecepatan angin tidak terganggu, tergantung pada kedua angin yang masuk arah dan orientasi bangunan). Turbulensi yang dihasilkan dari bangunan menyajikan beberapa tantangan karena arah angin yang berubah-ubah dengan cepat, menghasilkan tekanan ekstra pada bilah turbin dan menurunkan produksi energi dunia. Tiga jenis desain yang ada di dunia:

1. Pinggiran jalanan umum.
2. Terpasang pada bangunan.

3. Integrasi penuh, Bangunan didesain sedemikian rupa sehingga turbin angin menjadi bagian dari arsitektur bangunan. Biasanya bentuk rotornya memiliki desain unik.



Gambar 27 Contoh pemasangan turbin angin di perkotaan
(<https://publications.waset.org> diakses 2022)

Turbin angin untuk perkotaan harus relatif kecil untuk memanen energi angin dari sering berubahnya arah angin dan mendapat keuntungan dari wilayah kecil di puncak bangunan yang ditandai dengan aliran yang dipercepat. HAWT akan dipakai jika bentuk bangunan memiliki arah angin yang hampir konstan pada titik pemasangan turbin. VAWT adalah pilihan yang paling sering digunakan di perkotaan secara umum, karena cocok pada aliran angin miring di atas pada bangunan berujung tajam. Desain turbin angin di perkotaan dapat dianalisis menggunakan metode komputasi. Metode komputasi yang sering digunakan adalah simulasi struktur *Finite Element Analysis* (FEA) dan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). FEA (*Finite Element Analysis*) adalah metode yang memanfaatkan komputer untuk menyelesaikan persamaan struktur yang sudah didiskritisasi dari yang tadinya sebuah object kontinyu menjadi object dengan jumlah elemen dengan jumlah terhingga (finite element) sehingga persamaan tersebut dapat diselesaikan secara numerik. *Computational Fluid Dynamics* (CFD) adalah seni untuk menggantikan persamaan-persamaan integral dan diferensial parsial menjadi persamaan aljabar diskrit, yang mana untuk kemudian dapat diselesaikan untuk memperoleh solusi berupa angka-angka nilai aliran pada titik-titik diskrit ruang dan waktu. Beberapa keuntungan penggunaan turbin angin pada bangunan gedung yaitu:

1. Dapat menghasilkan energi listrik sendiri (energi terbarukan) sehingga berdampak baik pada lingkungan dan sebagai investasi jangka panjang,
2. Bentuk dan tinggi bangunan efektif meningkatkan kecepatan angin,
3. Lebih ekonomis ketimbang pembangunan turbin angin konvensional karena mobilisasi dan persiapan lahan minim,
4. Tidak menggunakan tower yang tinggi untuk mendapatkan kecepatan angin ideal.

Beberapa contoh bangunan di dunia yang menggunakan turbin angin pada fasad bangunan antara lain:

2.3.1. Bahrain World Trade Center



Gambar 28 Bahrain World Trade Center (*inhabitat.com* diakses 2022)

Bahrain World Trade Center (juga disebut Bahrain WTC atau BWTC) yaitu menara kembar dengan ketinggian 240 m (787 kaki) terletak di Manama, Bahrain. Menara dibangun pada tahun 2008 oleh multi-nasional perusahaan Atkins arsitektur. Ini adalah gedung pencakar langit pertama di dunia untuk mengintegrasikan turbin angin ke dalam desain. Struktur bangunan 50 lantai dan dibangun di dekat Raja Faisal Highway, dekat landmark populer seperti menara-menara BFH, NBB, Abraj Al Lulu dan Pearl Bundaran indah. Saat ini peringkat sebagai bangunan tertinggi kedua di Bahrain, setelah menara kembar Keuangan Harbour Bahrain. Kedua menara dihubungkan melalui tiga skybridges, masing-masing memegang sebuah turbin angin 225kW, jumlahnya sebesar 675kW produksi tenaga angin. Masing-masing ukuran diameter turbin 29 m (95 kaki), dan menghadap ke utara, yang merupakan arah dari mana udara Teluk Persia berhembus.

bangunan di kedua sisinya dirancang untuk menyalurkan angin melewati celah untuk memberikan angin dipercepat melewati turbin. Hal ini dikonfirmasi oleh pengujian terowongan angin, yang menunjukkan bahwa bangunan menciptakan arus berbentuk S, memastikan bahwa angin pun datang dalam sudut 45° untuk kedua sisi poros tengah akan membuat aliran angin yang tetap tegak lurus terhadap turbin. Ini secara signifikan meningkatkan potensi turbin untuk menghasilkan listrik. Ketiga turbin ini mampu menghasilkan 1100 hingga 1300 MWh, atau 10-15% kebutuhan listrik gedung tersebut. Jika digunakan untuk rumah, energi yang dihasilkan mampu melistriki 300 rumah selama setahun.

2.3.2. Castle House, London



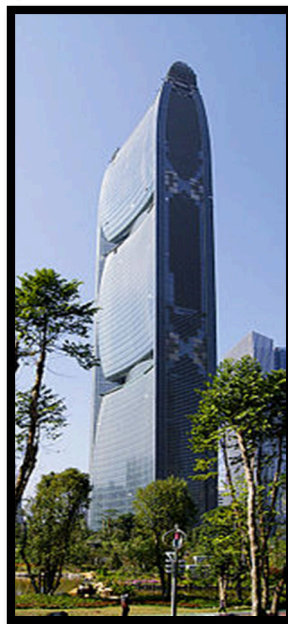
Gambar 29 Castle House, London (*en.wikipedia.org* diakses 2022)

Strata SE1 dikenal dalam pembangunan sebagai Castle House atau juga The Razor, dan kadang-kadang secara lokal dijuluki "Isengard" adalah bangunan dengan tinggi 148 meter, 43 lantai, bangunan pencakar langit di London, Inggris. Dirancang oleh BFLS (sebelumnya Hamiltons), bangunan ini merupakan salah satu bangunan tempat tinggal tertinggi di London dan akan menjadi rumah bagi lebih dari 1.000 warga. Menara ini pertama kali diusulkan pada tahun 2005, konstruksi dimulai pada 2007 dan selesai pada bulan Juni 2009 namun turbin baru selesai dipasang pada Mei 2010. Strata SE1 atau Castle House adalah salah satu bangunan pertama di dunia yang menggabungkan turbin angin beserta strukturnya. Tiga

turbin angin sembilan meter di atas bangunan bernilai sebesar 19 kW masing-masing dan disiapkan untuk menghasilkan 50MWh listrik per tahun. Mereka diharapkan untuk menghasilkan energi yang cukup untuk memberikan energi untuk area umum bangunan (8% dari kebutuhan energi bangunan), meskipun pertanyaan tentang efisiensi riil akan tetap tidak terjawab sampai selesainya dua tahun komprehensif analisis data angin. Green Tower yang bermunculan di mana-mana, dan turbin angin tampaknya menjadi pilihan energi cerdas untuk setiap menara lebih dari 20 lantai.

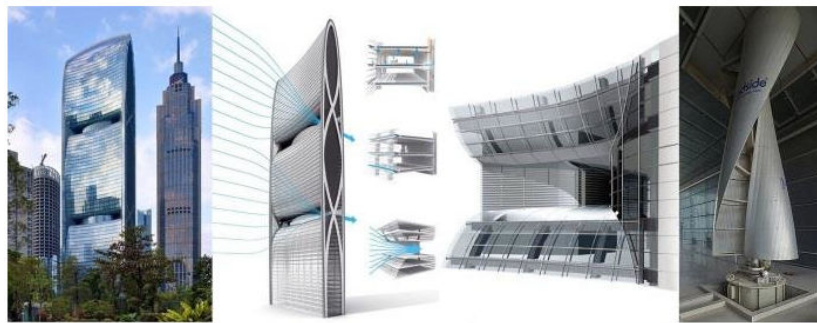
2.3.3. Pearl River Tower, China

Pearl Tower adalah gedung pencakar langit teknologi bersih di persimpangan Jinsui Jalan / Zhujiang Avenue West, Tianhe District, Guangzhou, Cina. Arsitektur menara dan rekayasa dilakukan oleh Skidmore, Owings, and Merrill dengan Adrian D. Smith dan Gordon Gill. Pembangunan dimulai pada tanggal 8 September 2006 dan konstruksi selesai pada Maret 2011. Bangunan ini dimaksudkan untuk penggunaan kantor dan sebagian akan ditempati oleh China National Tobacco Corporation.



Gambar 30 Pearl River Tower, China (*en.wikipedia.org* diakses 2022)

Bangunan ini dirancang dengan konservasi energi dalamnya, termasuk turbin angin dan kolektor surya, sel surya, mengangkat ventilasi lantai, dan pemanasan bercahaya dan langit-langit pendinginan. Bangunan ini akan disebut salah satu bangunan paling ramah lingkungan di dunia. Dikenal sebagai Pearl River Tower, bangunan 71-lantai itu akan mengandalkan hanya angin dan sinar matahari untuk catu dayanya. Ini merupakan langkah menggembirakan di negara dimana beberapa perusahaan telah menunjukkan minat dalam bangunan ramah lingkungan.



Gambar 31 Wind Tunnel dari Pearl River Tower
(<https://www.researchgate.net> diakses 2022)

2.4. Penelitian Terdahulu

Penelitian penggunaan Turbin Angin pada bangunan gedung berlantai banyak semakin sering dikembangkan, tercatat beberapa jurnal internasional telah dipublikasikan pada rentan waktu 2018-2022. Sebagian besar penelitian berfokus pada layout gedung/bangunan, jenis turbin angin yang digunakan, dan pola aliran angin yang dianalisa dengan perangkat lunak *CFD*. Untuk di Indonesia sendiri, penelitian serupa masih cukup terbatas, hal ini menjadi salah satu motivasi utama untuk melakukan penelitian potensi energi angin pada bangunan tinggi di pinggir laut Kota Makassar dengan pengukuran angin secara langsung lalu kemudian melakukan simulasi menggunakan *Software RETSceen Expert* untuk memperoleh gambaran energi secara sederhana serta simulasi dengan *Autodesk CFD* untuk melihat pola *air flow* yang terjadi di sekitar gedung. Berikut adalah beberapa penelitian terdahulu yang secara garis besar berkaitan dengan judul (Tabel 9)

Tabel 9 Penelitian Terdahulu

No	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Kesimpulan
1	Bentuk Menara Phinisi Unm Makassar Terhadap Gerakan Angin Dan Aliran Udara Pada Lingkungan Sekitarnya Dengan Metode Simulasi Komputer	• Usman Faharuddin (2016)	Simulasi dilakukan dengan membandingkan bentuk-bentuk bangunan menara untuk mengamati efektifitas bentuk menara phinisi terhadap gerakan kecepatan angin dan pola aliran di lingkungan sekitarnya.	• Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk menara phinisi sangat efektif dalam menekan gerakan kecepatan angin dengan hasil simulasi 0,98 - 2,95 m/s pada lingkungan sekitarnya sehingga memenuhi standar kenyamanan dalam skala Beaufort 1,6 – 3,3 m/s dengan efek pada manusia. (Faharuddin, 2016)
2	Potensi Energi Angin Di Atas Bangunan Bertingkat Di Pangkalan Kerinci, Kabupaten Pelalawan, Provinsi Riau	• Tengku Azirudin (2019)	Pengukuran dilakukan di atas bangunan setinggi 8 meter dengan ketinggian titik ukur 2 meter di atas tingkat tertinggi gedung. Total ketinggian titik ukur adalah 10 meter di atas permukaan tanah, dengan pertimbangan ketinggian bangunan di sekitar tidak melebihi dari 8 meter. Data hasil pengukuran diolah untuk mengestimasi kecepatan angin pada ketinggian tertentu. Selanjutnya kecepatan angin tersebut dianalisa untuk mendapatkan besaran energi listrik yang dihasilkan.	• Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Angin tidak cocok di Pangkalan Kerinci, karena rata-rata kecepatan angin rendah. Pada waktu tertentu kecepatan angin pada ketinggian 30 meter mencapai 4,50 m/s, sedangkan di waktu yang lain kecepatan angin hanya 1,19 m/s. Energi listrik rata-rata yang dihasilkan cukup kecil yaitu 248 Watt, sehingga tidak mencukupi kebutuhan listrik untuk rumah tangga kecil sebesar 450 – 2200 VA. (Azirudin, 2019)
3	Potensi Energi Angin pada Sisi Siku Atap Gedung Tinggi	• Wildane Aryabathi • Erwin Erwin • Slamet Wiyono (2021)	Membandingkan potensi kecepatan angin pada sisi siku atap gedung dengan kecepatan pada atas gedung (rooftop) sebagai pijakan awal pengembangan rekayasa energi baru terbarukan khususnya pada energy angin.	• Kecepatan angin pada jarak 15 cm dari sisi terluar gedung memiliki karakteristik angin yang paling baik dibandingkan pada karakteristik angin jarak 30 cm dan 45 cm. • Potensi Energi Angin di sisi gedung memiliki nilai lebih baik dibandingkan pada atap gedung. • Setelah dilakukan perbandingan data angin antara di sisi siku dan atas gedung pada variabel kecepatan rata-rata, kecepatan maksimum, potensi energi angin, hingga potensi energi angin hariannya, penelitian ini dipandang perlu untuk dilakukan pengembangan lebih lanjut terhadap implementasi Turbin Angin pada sisi siku gedung tinggi. (Aryabathi et al., 2021)

No	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Kesimpulan
4	<i>CFD Assessment of Wind Energy Potential for Generic High-Rise Buildings in Close Proximity: Impact of Building Arrangement and Height</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Yu-Hsuan Juan • Abdolrahim Rezaeiha • Hamid Montazeri • Bert Blocken • Chih-Yung Wen • An-Shik Yang (2022) 	Melakukan Analisis komprehensif terhadap potensi energi angin untuk daerah perkotaan khususnya bangunan tinggi yang saling berdekatan, salah satu percobaan eksperimen pada terowongan angin dilakukan pada modul bangunan bertingkat tinggi 2 x 2 dalam terowongan angin di Universitas Teknologi Eindhoven, kemudian dilanjutkan dengan simulasi CFD untuk mengetahui dampak penataan bangunan dan ketinggian terhadap potensi energi angin. Analisis selanjutnya yaitu penggunaan jenis turbin angin tipe: HAWT, VAWT dan VAWT Darrieus yang dipasang secara horizontal.	Simulasi CFD dengan ketelitian tinggi dilakukan untuk menyelidiki pengaruh susunan bangunan dan ketinggian untuk susunan 2 × 2 bangunan bertingkat tinggi yang berdekatan, hasilnya: -Lebar lintasan yang lebih lebar dari lintasan hulu (w lebih tinggi) menyebabkan penurunan kecepatan angin di lintasan ini. Pengurangan maksimum PD/ Pdref sebesar 60% diamati di bagian hulu pada z/H = 0,97 Kepadatan daya yang dihitung untuk VAWT yang dipasang secara horizontal lebih tinggi daripada HAWT dan VAWT tipikal sekitar 11% – 37% pada z/Hd = 0,97 untuk arah angin normal 0°. Ini mengusulkan kontribusi yang signifikan dari komponen kecepatan vertikal, menyimpulkan bahwa VAWT yang dipasang secara horizontal adalah pilihan terbaik untuk pemanenan energi angin di lorong antara bangunan dan di sepanjang atap. (Juan et al., 2022)
5	<i>Impacts of Urban Morphology on Improving Urban Wind Energy Potential for Generic High-Rise Building Arrays</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Yu-Hsuan Juan • Chih-Yung Wen • Zhengtong Li • An-Shik Yang (2021) 	Memaparkan pengaruh morfologi perkotaan di daerah perkotaan bertingkat tinggi yang padat dalam meningkatkan panen energi angin untuk pembangunan perkotaan yang berkelanjutan. Studi parametrik yang komprehensif dilakukan dengan menggunakan alat komputasi dinamika fluida untuk menganalisis dampak morfologi perkotaan pada potensi energi angin untuk susunan 6 × 6 bangunan bertingkat tinggi, termasuk (kepadatan perkotaan yang diubah dari tata letak perkotaan yang padat menjadi jarang, bentuk sudut bangunan berupa sudut lancip dan membulat, tata ruang perkotaan dengan pola in-line dan staggered, dan sudut arah datang angin.	Studi ini telah mengungkapkan efektivitas modifikasi morfologi perkotaan yang tepat untuk secara signifikan meningkatkan kepadatan tenaga angin dengan intensitas turbulensi yang berkurang untuk susunan bangunan bertingkat tinggi. Temuan dapat diringkas sebagai berikut: Mengurangi kepadatan area tata kota dapat mengurangi tingkat turbulensi. Kepadatan perkotaan yang paling menguntungkan ditemukan untuk mempercepat kecepatan angin lokal dan kepadatan tenaga angin. Untuk dampak modifikasi sudut bangunan, sudut bundar menghasilkan kepadatan tenaga angin yang tinggi dan intensitas turbulensi yang rendah di atas bangunan hilir, dibandingkan dengan sudut tajam. Untuk tata ruang kota yang paling sederhana ($\gamma_p = 0,09$), sudut bundar menghasilkan hasil kepadatan daya tertinggi hingga 201% dan 150%

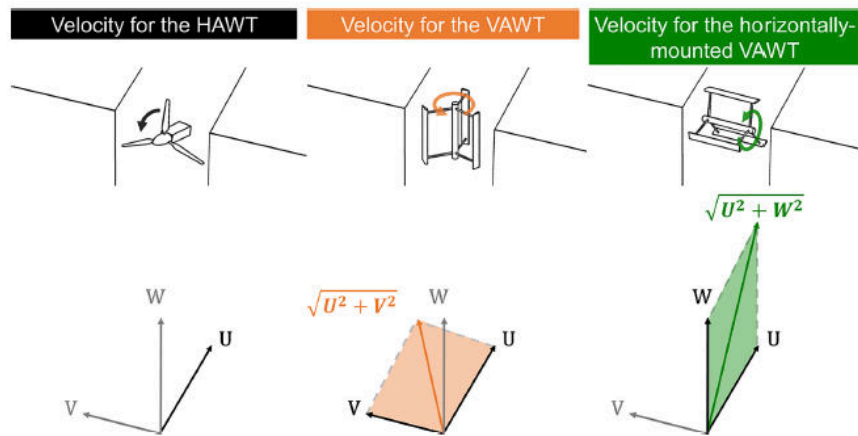
No	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Kesimpulan
				dibandingkan sudut tajam untuk area yang dipilih di samping gedung dan di atap, masing-masing. sudut-sudut bundar menghadirkan besaran kecepatan dan kepadatan daya yang lebih tinggi daripada sudut-sudut tajam masing-masing hingga 15% dan 42% di samping bangunan. (Juan, Wen, Li, et al., 2021)
6	<i>Numerical assessments of wind power potential and installation arrangements in realistic highly urbanized areas</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Y.-H. Juan • C.-Y. Wen • W.-Y. Chen • A.-S. Yang (2021)	Studi ini melaporkan distribusi potensi tenaga angin, yang dipengaruhi oleh sumber daya angin dan konfigurasi perkotaan yang ada, di daerah perkotaan yang realistis, seperti Central, Hong Kong. Untuk menemukan sumber daya angin tertinggi yang tersedia dengan menghindari peningkatan intensitas turbulensi, kami melakukan simulasi CFD dan pengukuran di lokasi dengan mempertimbangkan detail kondisi batas dan topografi perkotaan dari lingkungan mikro untuk memperkirakan WPD di lokasi yang disarankan untuk pemasangan turbin.	Sebagai angin yang berlaku di empat bangunan bertingkat tunggal yang dipilih dengan variasi bentuk bangunan (misalnya, bentuk kubus dengan tepi tajam atau tepi fillet, berbentuk bintang segi delapan, bentuk segitiga), kita dapat mengamati nilai WPD yang relatif rendah pada sisi bawah angin. Dinding samping atap di sekitar sudut bangunan memiliki WPD tinggi dengan rentang TI yang sesuai, sebagai lokasi pemasangan turbin angin yang disarankan. Selain itu, geometri bangunan dengan tepi fillet atau sudut halus sangat penting untuk mencapai WPD tinggi dan TI rendah. angin di tepi depan atap cenderung terus berakselerasi untuk menghasilkan WPD tinggi (lebih dari 400 W/m ²) dengan TI rendah. Mendampingi pemisahan aliran udara mengembangkan lapisan geser tipis yang kuat di permukaan atap yang menghadap angin, menyarankan lokasi yang tepat untuk pemasangan turbin. Karena banyak peneliti menarik kesimpulan serupa, tepi atap yang melengkung menunjukkan hasil terbaik dari WPD tinggi dan TI rendah. (Juan, Wen, Chen, et al., 2021)
7	<i>Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ernesto Arteaga-Lopez • Cesar Angeles-Camacho • Francisco Banuelos-Ruedas (2019)	Sebuah studi kasus di lingkungan perkotaan disajikan untuk menunjukkan efektivitasnya. Kasus yang disarankan adalah proyek angin di gedung akademik. Proyek yang diteliti terletak di timur laut negara bagian Meksiko, di pinggiran Mexico City, tepatnya di Gedung Q Tecnologico de Estudios Superiores	Hasil penelitian menunjukkan bahwa tempat terbaik untuk pembangkitan angin adalah atap bangunan, sesuai dengan kondisi angin; lebih lanjut, turbin Excel 10 kW adalah pilihan terbaik, dan dimungkinkan untuk memasang hanya lima turbin angin. Pengaturan ini, bagaimanapun, cukup untuk memasok

No	Judul	Peneliti	Tujuan Penelitian	Kesimpulan
			de Ecatepec (TESE). Bangunan ini terletak pada ketinggian 2232 m dpl. Dalam metodologi yang diusulkan untuk studi kelayakan turbin angin kecil dalam proyek BUWT, serangkaian simulasi CFD dilakukan untuk memprediksi pola aliran angin. Termasuk penilaian bagaimana turbin angin kecil di atap gedung yang diminati akan bekerja.	kebutuhan listrik gedung. (Arteaga-López et al., 2019)
8	<i>Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Maryam Zabarjad Shiraz, • Aierken Dilimulati, • Marius Paraschivoiu (2020) 	Perkiraan produksi energi angin untuk turbin ditempatkan pada dua bangunan sebenarnya di sekitar Montreal, Kanada disediakan. Pekerjaan ini dimulai dengan mensimulasikan angin di sekitar gedung yang diminati dengan semua gedung di sekitarnya. Pada bagian kedua, kinerja turbin Darrieus diselidiki untuk memastikan bahwa kurva daya yang sesuai digunakan untuk menilai potensi energi. Setelah itu, data meteorologi digabungkan dengan hasil CFD untuk menghitung perkiraan keluaran energi turbin angin.	Penempatan turbin angin Darrieus di salah satu dari 4 sudut bangunan di dua wilayah Montreal, Kanada dianalisis. Studi ini menggambarkan bahwa ada pengaruh yang signifikan terhadap produksi energi. Kepadatan Bangunan Tinggi menghasilkan produksi energi yang rendah bahkan jika turbin ditempatkan pada ketinggian yang jauh lebih tinggi. (Zabarjad Shiraz et al., 2020)

Usman Faharuddin (2016) melakukan penelitian “*Bentuk Menara Phinisi Unm Makassar Terhadap Gerakan Angin Dan Aliran Udara Pada Lingkungan Sekitarnya Dengan Metode Simulasi Komputer*” bertujuan untuk mengetahui kecepatan dan pola gerakan angin disekitar bangunan Menara Phinisi UNM Makassar terkait kenyamanan penggunaannya, tidak sampai dengan pada simulasi penggunaan turbin angin seperti pada penelitian kali ini. Sementara Tengku Azirudin (2019) dengan penelitian “*Potensi Energi Angin Di Atas Bangunan Bertingkat Di Pangkalan Kerinci, Kabupaten Pelalawan, Provinsi Riau*” melakukan pengukuran kecepatan angin pada lantai tertinggi bangunan bertingkat dengan ketinggian 10 m sebagaimana rata-rata ketinggian rumah di pangkalan kerinci kepulauan Riau, guna mengetahui nilai energi yang dihasilkan apabila menambahkan teknologi turbin angin sebagai pembangkit tenaga listrik. Hal yang

membedakan dengan penelitian kali ini selain lokasi bangunannya yang berada di tepi pantai, ketinggian titik pengukuran angin jauh berbeda dikarenakan jenis dan ketinggian bangunan yang berbeda. Sedangkan penelitian Aryabathi dkk., (2021) yaitu “*Potensi Energi Angin pada Sisi Siku Atap Gedung Tinggi*” belum sampai pada simulasi penggunaan turbin angin, melainkan hanya simulasi, mengamati, dan membandingkan sisi rooftop (atap) dan siku (samping) gedung terhadap aliran/kecepatan angin yang lebih optimal untuk posisi turbin angin.

Ketiga penelitian terdahulu tersebut tidak ada yang sepenuhnya menyerupai penelitian yang akan dilakukan nantinya, namun ketiganya memiliki keterkaitan metode antara satu sama lain, sehingga penelitian penggunaan turbin angin pada bangunan tinggi memberikan hasil yang maksimal nantinya. Tak hanya di dalam negeri, beberapa peneliti Internasional pun cukup terinspirasi dengan potensi angin di negaranya. Yu-Hsuan Juan dkk., menulis beberapa seri jurnal terkait Potensi Angin pada gedung tinggi dan perkotaan di Hongkong. *Impacts of Urban Morphology on Improving Urban Wind Energy Potential for Generic High-Rise Building Arrays (2021)*, *Numerical assessments of wind power potential and installation arrangements in realistic highly urbanized areas (2021)* dan *CFD Assessment of Wind Energy Potential for Generic High-Rise Buildings in Close Proximity: Impact of Building Arrangement and Height (2022)*, penelitian yang dilakukan meliputi pengukuran kecepatan angin, simulasi penataan gedung serta pengaruh bentuk sudut bangunan dengan *CFD* dan penggunaan 3 buah jenis turbin angin, yaitu, HAWT, VAWT dan VAWT yang terpasang secara Horizontal.



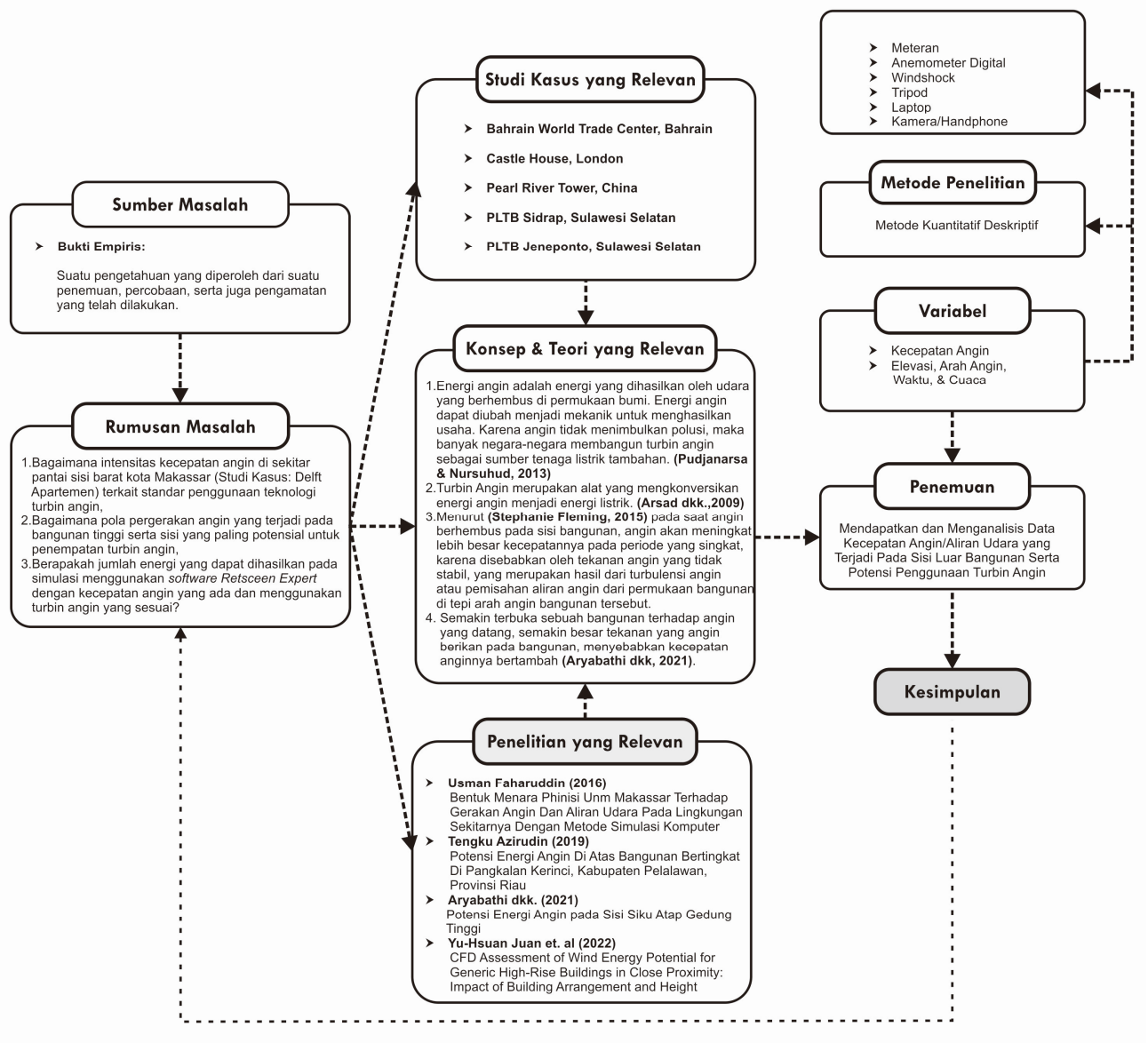
Gambar 32 3 Tipe Turbin Angin dalam penelitian Yu-Hsuan Juan

Wind power potential assessment of roof mounted wind turbines in cities (2020) oleh Maryam Zabarjad Shiraz, melakukan perbandingan terhadap 2 bangunan yang terpasang turbin angin di 2 wilayah di Kanada. Data meteorology digabungkan dengan simulasi *CFD* untuk mengetahui perkiraan energi *output* dari kedua bangunan tersebut.

Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis (2019) oleh Ernesto Arteaga-Lopez. Penelitian terhadap penggunaan turbin angin di atap-atap rumah penduduk yang berada di ketinggian 2232 m dpl wilayah Meksiko, simulasi *CFD* serta menentukan jenis turbin yang paling tepat untuk memenuhi kebutuhan energi listrik setiap rumah.

2.5. Kerangka Pikir

Kerangka pemikiran merupakan sintesa tentang hubungan antar variabel yang disusun dari berbagai teori yang telah dideskripsikan, kemudian dianalisis secara kritis dan sistematis, sehingga menghasilkan sintesa tentang hubungan variabel tersebut yang selanjutnya digunakan untuk merumuskan hipotesis (Sugiyono, 2009). Dalam penelitian ini menggunakan kerangka berpikir sebagai berikut:



Gambar 33 Kerangka pikir