

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Green building*

A. Definisi dan prinsip dasar *green building*

Green building atau bangunan hijau adalah konsep pembangunan yang dirancang untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan serta mengoptimalkan efisiensi energi, air, dan sumber daya lainnya sepanjang siklus hidup bangunan (Darko et al., 2017). *Green building* tidak hanya berfokus pada pengurangan konsumsi energi tetapi juga mencakup kesehatan penghuni, kualitas udara dalam ruangan, dan penggunaan bahan bangunan yang ramah lingkungan (Doan et al., 2017).

Menurut Marchi et al., (2021), *green building* adalah bangunan yang menerapkan prinsip keberlanjutan dalam desain, konstruksi, operasional, dan perawatannya. Konsep ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan mitigasi perubahan iklim. Beberapa prinsip dasar *green building* yang sering dijadikan pedoman dalam pembangunan berkelanjutan adalah sebagai berikut:

1. Efisiensi energi

Mengurangi konsumsi energi melalui desain pasif, pemanfaatan energi terbarukan, dan teknologi hemat energi.

2. Konservasi air

Menggunakan sistem daur ulang air, perlengkapan hemat air, serta manajemen air hujan.

3. Kesehatan dan kenyamanan penghuni

Memastikan kualitas udara dalam ruangan, pencahayaan alami yang cukup, serta penggunaan material yang tidak berbahaya.

4. Manajemen lingkungan

Mengurangi limbah konstruksi, memilih bahan bangunan yang berkelanjutan, dan mengintegrasikan ruang hijau.

5. Inovasi dalam desain dan teknologi

Mengadopsi teknologi baru yang mendukung keberlanjutan, seperti smart building system dan sensor otomatis untuk efisiensi operasional.

6. Pengelolaan sumber daya dan material

Menggunakan bahan bangunan yang memiliki jejak karbon rendah, dapat didaur ulang, atau berasal dari sumber yang berkelanjutan.

Penerapan prinsip-prinsip tersebut memungkinkan bangunan untuk mengurangi dampak lingkungan, meningkatkan efisiensi operasional, dan menciptakan lingkungan yang lebih sehat bagi penghuninya. Di Indonesia, implementasi *green building* semakin berkembang, dengan adanya berbagai sertifikasi seperti *Greenship* yang diterapkan oleh GBCI sebagai standar penilaian bangunan hijau (GBCI, 2023).

B. Urgensi penerapan *green building*

Penerapan *green building* menjadi semakin mendesak dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, krisis energi, dan degradasi lingkungan akibat pembangunan konvensional yang boros sumber daya. Konsep pembangunan berkelanjutan menekankan keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi, kesejahteraan sosial, dan perlindungan lingkungan, yang sejalan dengan prinsip-prinsip *green building* (Tang et al., 2020).

Menurut Li et al., (2023), bangunan merupakan salah satu sektor dengan dampak lingkungan paling signifikan, berkontribusi sekitar 39% dari total emisi karbon global, di mana 28% berasal dari konsumsi energi operasional bangunan, seperti penggunaan listrik untuk pencahayaan, pendinginan, dan ventilasi, serta 11% berasal dari proses produksi bahan bangunan. Oleh karena itu, penerapan konsep *green building* menjadi strategi kunci dalam menurunkan emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi dalam sektor konstruksi. Menurut GBCI (2023), Beberapa alasan utama yang menjadikan *green building* sebagai kebutuhan mendesak dalam pembangunan berkelanjutan adalah:

1. Pengurangan konsumsi energi dan emisi karbon

Green building dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi energi melalui teknologi hemat energi, pemanfaatan energi terbarukan seperti panel surya, serta sistem pencahayaan dan ventilasi alami (Kibert, 2016). Dengan efisiensi yang lebih tinggi, bangunan hijau dapat mengurangi emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap pemanasan global.

2. Konservasi sumber daya alam dan air

Pembangunan hijau mempromosikan pengelolaan air yang efisien melalui sistem daur ulang air limbah, pemanenan air hujan, dan penggunaan perlengkapan hemat air (USGBC, 2022). Selain itu, pemanfaatan material bangunan yang

berkelanjutan dan dapat didaur ulang membantu mengurangi eksploitasi sumber daya alam (Kibert, 2016).

3. Peningkatan kualitas udara dan kesehatan penghuni

Salah satu keunggulan *green building* adalah fokusnya pada kualitas *Indoor Air Quality* (IAQ) yang lebih baik. Sistem ventilasi yang baik dan penggunaan material rendah emisi membantu mengurangi polusi udara dalam ruangan, yang dapat berdampak positif terhadap kesehatan dan produktivitas penghuni (GBCI, 2023; ASHRAE, 2021).

4. Efisiensi ekonomi dan pengurangan biaya operasional

Meskipun investasi awal dalam pembangunan *green building* bisa lebih tinggi, penghematan dalam biaya operasional jangka panjang melalui efisiensi energi, pemanfaatan air, dan perawatan bangunan yang lebih rendah dapat memberikan manfaat ekonomi yang signifikan. Menurut laporan *World Green building Council* (WGBC, 2020), *green building* dapat mengurangi konsumsi energi hingga 30-50% dan biaya air sebesar 20-40% dibandingkan dengan bangunan konvensional.

5. Dukungan regulasi dan kebijakan pemerintah

Di Indonesia, penerapan *green building* didorong oleh regulasi seperti Peraturan Gubernur DKI Jakarta No. 38 Tahun 2012 tentang Bangunan Gedung Hijau dan kebijakan dari Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) dalam mendukung pembangunan berkelanjutan (Kementerian PUPR, 2022). Selain itu, sistem sertifikasi *GreenShip* dari GBCI menjadi standar dalam menilai kepatuhan bangunan terhadap prinsip keberlanjutan (GBCI, 2023).

C. Manfaat *green building*

Penerapan konsep *green building* memberikan berbagai manfaat yang mencakup aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial. Dengan prinsip efisiensi energi dan sumber daya, bangunan hijau tidak hanya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan tetapi juga meningkatkan kesejahteraan manusia serta memberikan keuntungan finansial dalam jangka panjang (Li et al., 2023). Berikut adalah beberapa manfaat utama dari *green building*:

1. Manfaat Lingkungan

a. Pengurangan Emisi Karbon dan Efisiensi Energi

Bangunan hijau dirancang untuk mengurangi konsumsi energi dan ketergantungan pada bahan bakar fosil dengan menerapkan sistem hemat

energi seperti pencahayaan LED, panel surya, dan ventilasi alami (Kibert, 2016). Menurut *World Green building Council* (WGBC, 2020), *green building* dapat mengurangi konsumsi energi hingga 50% dibandingkan bangunan konvensional.

b. Konservasi Air dan Pengelolaan Sumber Daya

Penerapan sistem pemanenan air hujan, daur ulang air limbah, dan penggunaan perlengkapan hemat air dapat mengurangi konsumsi air hingga 30-50% (GBCI, 2023).

c. Pengurangan Limbah dan Pemanfaatan Material Ramah Lingkungan

Green building menggunakan material yang dapat didaur ulang dan berkelanjutan, serta menerapkan strategi manajemen limbah konstruksi untuk mengurangi dampak lingkungan (Kibert, 2016).

2. Manfaat Ekonomi

a. Penghematan Biaya Operasional

Efisiensi dalam penggunaan energi dan air berdampak langsung pada penurunan biaya operasional jangka panjang. Penerapan teknologi hijau dapat menghemat 20-40% biaya air dan listrik dibandingkan bangunan biasa.

b. Peningkatan Nilai Properti dan Daya Tarik Investasi

Bangunan bersertifikasi *green building* memiliki nilai jual dan sewa yang lebih tinggi karena menawarkan efisiensi dan keberlanjutan yang diinginkan oleh investor dan penyewa.

c. Dukungan terhadap Ketahanan Ekonomi Jangka Panjang

Pembangunan hijau mengurangi ketergantungan pada energi tak terbarukan, sehingga lebih tahan terhadap fluktuasi harga energi dan krisis lingkungan. (GBCI, 2023)

3. Manfaat Sosial

a. Meningkatkan Kesehatan dan Produktivitas Penghuni

Green building didesain untuk meningkatkan kualitas udara dalam ruangan dengan ventilasi yang baik dan penggunaan material bebas polutan. Hal ini berkontribusi pada peningkatan kesehatan dan produktivitas penghuni (ASHRAE, 2021).

b. Menciptakan Lingkungan yang Lebih Nyaman dan Berkelanjutan

Desain yang mempertimbangkan pencahayaan alami, suhu yang stabil, dan akustik yang baik memberikan kenyamanan lebih bagi penghuni dan pengguna bangunan (Kibert, 2016).

c. Mendorong Kesadaran dan Perubahan Perilaku Masyarakat

Penerapan *green building* membantu meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya keberlanjutan dan mendorong perubahan perilaku ke arah yang lebih ramah lingkungan (GBCI, 2023).

2.2 Sertifikasi *Green building* di Indonesia

A. Standar dan regulasi terkait *green building* di Indonesia

Penerapan *green building* didukung oleh berbagai regulasi dan standar nasional serta internasional yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi dampak lingkungan, dan menciptakan bangunan yang lebih berkelanjutan (Achmadi & Okita, 2023). Regulasi ini mencakup kebijakan pemerintah, sertifikasi bangunan hijau, serta pedoman teknis yang harus dipatuhi oleh industri konstruksi.

1. Regulasi Pemerintah Terkait *Green building*

Pemerintah Indonesia telah mengeluarkan berbagai kebijakan untuk mendukung pembangunan hijau, di antaranya:

a. Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) No. 02/PRT/M/2015

Peraturan ini mengatur tentang Bangunan Gedung Hijau (BGH) yang mewajibkan penerapan prinsip keberlanjutan dalam perencanaan, pembangunan, pemanfaatan, dan pembongkaran bangunan.

b. Instruksi Gubernur DKI Jakarta No. 38 Tahun 2012 tentang Bangunan Gedung Hijau

DKI Jakarta menjadi salah satu daerah yang lebih dulu menerapkan kebijakan *green building*, mewajibkan gedung tertentu untuk memenuhi standar efisiensi energi dan sumber daya.

c. Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)

Regulasi ini menargetkan pengurangan konsumsi energi di sektor bangunan melalui efisiensi energi dan penerapan teknologi hijau.

d. Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup

UU ini mengamanatkan setiap proyek pembangunan untuk mempertimbangkan aspek lingkungan dan keberlanjutan, termasuk dalam sektor properti dan konstruksi.

2. Sertifikasi *Green building* di Indonesia

Berdasarkan GBCI (2023), Beberapa standar sertifikasi yang digunakan untuk menilai bangunan hijau di Indonesia antara lain:

a. *Greenship* (Green building Council Indonesia - GBCI)

Greenship adalah sistem sertifikasi *green building* yang dikembangkan oleh Green building Council Indonesia (GBCI). Sertifikasi ini memiliki beberapa kategori, seperti:

1) *Greenship* New Building (NB) untuk bangunan baru

2) *Greenship Existing Building* (EB) untuk bangunan yang sudah beroperasi

3) *Greenship* Interior Space (IS) untuk desain interior ramah lingkungan,

Penilaian *Greenship* didasarkan pada enam aspek utama: efisiensi energi, konservasi air, pengelolaan limbah, kesehatan dalam ruangan, material ramah lingkungan, dan manajemen lingkungan.

b. *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED)

LEED adalah sertifikasi *green building* internasional yang dikembangkan oleh U.S. Green building Council (USGBC) dan digunakan di berbagai negara, termasuk Indonesia. Penilaian LEED mencakup efisiensi energi, kualitas udara dalam ruangan, dan manajemen sumber daya (USGBC, 2022).

c. *Excellence in Design for Greater Efficiencies*

EDGE adalah sistem sertifikasi bangunan hijau yang dikembangkan oleh International Finance Corporation untuk membantu bangunan mencapai efisiensi setidaknya 20% dalam konsumsi energi, air, dan material (IFC, 2021).

d. ISO 14001 – Sistem Manajemen Lingkungan

Meskipun bukan sertifikasi *green building* secara khusus, standar ISO 14001 membantu organisasi dalam menerapkan sistem manajemen lingkungan yang mendukung keberlanjutan dalam operasional bangunan.

3. Tantangan dan Implementasi Regulasi *Green building*

Meskipun regulasi dan standar *green building* telah diterapkan, masih terdapat beberapa tantangan dalam implementasinya (USGBC, 2022), seperti:

a. Kurangnya kesadaran dan pemahaman pemangku kepentingan dalam menerapkan standar bangunan hijau.

- b. Biaya investasi awal yang relatif tinggi, meskipun dalam jangka panjang dapat menghemat biaya operasional
- c. Keterbatasan teknologi dan tenaga ahli dalam desain serta implementasi sistem bangunan hijau.

B. Perbandingan sistem sertifikasi *green building*

Sertifikasi *green building* berperan penting dalam menilai dan mendorong praktik pembangunan yang berkelanjutan. Berbagai sistem sertifikasi telah dikembangkan di tingkat nasional dan internasional dengan metodologi dan fokus yang berbeda.

1. *Green building Council* Indonesia

Greenship adalah sistem sertifikasi *green building* yang dikembangkan oleh *Green building Council* Indonesia (GBCI). Sistem ini dirancang untuk menyesuaikan dengan kondisi lingkungan dan regulasi di Indonesia. *Greenship* menilai bangunan berdasarkan enam kategori utama (GBCI, 2023):

- a. *Appropriate Site Development* (ASD)
- b. *Energy Efficiency & Conservation* (EEC)
- c. *Water Conservation* (WAC)
- d. *Material Resources & Cycle* (MRC)
- e. *Indoor Health & Comfort* (IHC)
- f. *Building & Environment Management* (BEM)

2. *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED)

LEED dikembangkan oleh U.S. *Green building Council* (USGBC) dan merupakan salah satu sistem sertifikasi *green building* yang paling banyak digunakan secara global. LEED menilai bangunan berdasarkan beberapa kategori utama (USGBC, 2022):

- a. *Sustainable Sites*
- b. *Water Efficiency*
- c. *Energy & Atmosphere*
- d. *Materials & Resources*
- e. *Indoor Environmental Quality*
- f. *Innovation in Design*

3. *Excellence in Design for Greater Efficiencies* (EDGE)

EDGE dikembangkan oleh *International Finance Corporation* (IFC) sebagai sistem sertifikasi bangunan hijau yang lebih sederhana dan berbasis data.

EDGE memiliki pendekatan berbasis efisiensi dengan fokus pada tiga aspek utama (IFC, 2021):

- a. Pengurangan konsumsi energi
- b. Pengurangan konsumsi air
- c. Efisiensi penggunaan material

4. *Building Research Establishment Environmental Assessment Method* (BREEAM)

BREEAM adalah sistem sertifikasi bangunan hijau yang dikembangkan oleh *Building Research Establishment* (BRE) di Inggris. BREEAM menilai bangunan berdasarkan beberapa kategori utama:

- a. Manajemen proyek – tata kelola dan keberlanjutan proyek
- b. Kesehatan & kesejahteraan – kualitas lingkungan dalam ruangan
- c. Energi – efisiensi energi dan pengurangan emisi karbon
- d. Transportasi – aksesibilitas dan dampak mobilitas
- e. Air – efisiensi penggunaan dan pengelolaan air
- f. Material – keberlanjutan material konstruksi
- g. Limbah – pengelolaan limbah dan daur ulang
- h. Penggunaan lahan & ekologi – dampak terhadap lingkungan sekitar
- i. Polusi – mitigasi polusi udara, suara, dan cahaya

Tabel 2.1 Perbandingan Sistem Sertifikasi *Green building*

Sistem Sertifikasi	Asal Negara	Kriteria Utama	Keunggulan	Kekurangan
<i>GreenShip</i>	Indonesia	Efisiensi energi, konservasi air, material, kesehatan dalam ruangan	Sesuai dengan kondisi dan regulasi di Indonesia	Kurang dikenal secara internasional
<i>LEED</i>	Amerika Serikat	Efisiensi energi, kualitas udara, inovasi desain	Diakui secara global, sistem rating fleksibel	Biaya sertifikasi tinggi
<i>EDGE</i>	Global (IFC)	Efisiensi energi, air, dan material	Platform berbasis data, mudah diterapkan	Kriteria lebih terbatas dibanding LEED atau BREEAM

<i>BREEAM</i>	Inggris/Uni Eropa	Manajemen proyek, efisiensi energi, transportasi, ekologi	Sistem penilaian komprehensif	Kompleks dan mahal untuk diterapkan
---------------	----------------------	--	-------------------------------------	---

C. Kriteria dan indikator penilaian dalam *Greenship Existing Building*

Greenship Existing Building adalah sistem sertifikasi *green building* yang dikembangkan oleh *Green building Council Indonesia* (GBCI) khusus untuk bangunan yang telah beroperasi. Sertifikasi ini bertujuan untuk menilai dan meningkatkan kinerja keberlanjutan bangunan yang sudah ada dengan menerapkan berbagai strategi efisiensi sumber daya dan pengelolaan lingkungan (Rizaldy & Yuwono, 2019).

1. Kategori dan Kriteria Penilaian dalam *Greenship Existing Building*

Greenship Existing Building menggunakan enam kategori utama dalam proses penilaian sertifikasi, yaitu:

a. *Appropriate Site Development* (ASD)

Kategori ini menilai sejauh mana bangunan yang sudah ada menerapkan konsep keberlanjutan dalam pengelolaan lahan dan lingkungan sekitar.

Indikator utama:

- 1) Pemanfaatan ruang terbuka hijau
- 2) Pengelolaan limbah dan sampah bangunan
- 3) Konektivitas dengan transportasi publik

b. *Energy Efficiency & Conservation* (EEC)

Kategori ini berfokus pada upaya pengurangan konsumsi energi dan efisiensi sistem tata udara serta pencahayaan. Indikator utama:

- 1) Konsumsi energi bangunan dibandingkan standar nasional
- 2) Efisiensi sistem pencahayaan
- 3) Efisiensi sistem tata udara dan penggunaannya dalam mengoptimalkan kenyamanan termal

c. *Water Conservation* (WAC)

Menilai strategi dan teknologi yang digunakan untuk mengurangi konsumsi air.

Indikator utama:

- 1) Penggunaan perangkat sanitasi hemat air
- 2) Pemanfaatan air hujan dan daur ulang air limbah
- 3) Monitoring penggunaan air secara real.

d. *Indoor Health & Comfort (IHC)*

Kategori ini mengukur kualitas udara dalam ruangan dan kenyamanan termal penghuni bangunan. Indikator utama:

- 1) Kualitas udara dalam ruangan (kadar CO₂, VOCs, dan partikulat)
- 2) Penggunaan material bangunan yang minim emisi
- 3) Sistem ventilasi dan sirkulasi udara yang memadai.

e. *Material Resources & Cycle (MRC)*

Kategori ini menilai bagaimana bangunan menggunakan material yang ramah lingkungan dan mengurangi limbah konstruksi. Indikator utama:

- 1) Pemilihan material dengan sertifikasi ramah lingkungan
- 2) Strategi pengurangan dan daur ulang limbah bangunan
- 3) Penggunaan produk daur ulang

f. *Building & Environment Management (BEM)*

Kategori ini menilai pengelolaan gedung dalam meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan. Indikator utama:

- 1) Penerapan *Building Automation System (BAS)* untuk monitoring energi
- 2) Program edukasi keberlanjutan bagi penghuni gedung
- 3) Sistem pemantauan keberlanjutan (audit energi, jejak karbon)

Tabel 2.2 Sistem Penilaian dan Skor *GreenSHIP Existing Building*

Kategori	Bobot (%)	Jumlah Poin Maksimum
ASD (Pengembangan Tapak)	12.60%	16 poin
EEC (Efisiensi Energi)	34.65%	44 poin
WAC (Konservasi Air)	17.32%	22 poin
IHC (Kesehatan dalam Ruangan)	9.45%	12 poin
MRC (Material & Siklus Sumber Daya)	15.75%	20 poin
BEM (Manajemen Bangunan)	10.24%	13 poin
Total	100%	127 poin

Menurut Rosalia et al., (2020), Bangunan dapat memperoleh sertifikasi *GreenSHIP* dalam empat tingkat berdasarkan total skor yang diperoleh:

- *Bronze* min. 41 poin
- *Silver* min. 53 poin

- *Gold* min. 66 poin
- *Platinum* min. 83 poin

2.3 Sistem Tata Udara dalam *Green building*

A. Definisi sistem tata udara

Sistem tata udara adalah sistem yang dirancang untuk mengontrol suhu, kelembaban, dan kualitas udara dalam suatu bangunan guna menciptakan lingkungan yang nyaman dan sehat bagi penghuninya (Indriyati et al., 2021). Sistem ini memainkan peran penting dalam berbagai jenis bangunan, termasuk perkantoran, rumah sakit, pusat perbelanjaan, dan fasilitas industri (Widyakusuma, 2023). Menurut *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE, 2017), Sistem Tata Udara terdiri dari tiga komponen utama:

1. *Heating* (Pemanasan)

Bertujuan untuk meningkatkan suhu ruangan saat kondisi lingkungan eksternal dingin. Biasanya menggunakan boiler, pemanas listrik, atau pemanas berbasis gas.

2. *Ventilation* (Ventilasi)

Bertanggung jawab atas pertukaran udara dalam ruangan dengan udara luar untuk memastikan sirkulasi udara segar dan mengurangi polutan.

3. *Air Conditioning* (Pendinginan Udara)

Digunakan untuk menurunkan suhu dan mengontrol kelembaban udara dengan bantuan sistem pendingin seperti chiller atau air conditioner.

B. Komponen utama sistem tata udara

Sistem tata udara atau *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja secara terpadu untuk mengatur suhu, kelembaban, sirkulasi udara, dan kualitas udara dalam suatu bangunan (McQuiston et al., 2023). Setiap komponen memiliki peran spesifik dalam memastikan Sistem Tata Udara berfungsi secara efisien dan memenuhi standar kenyamanan termal serta keberlanjutan energi (Saran et al., 2020).

1. Sistem Pemanasan (*Heating System*)

Sistem pemanasan dalam Sistem Tata Udara berfungsi untuk meningkatkan suhu ruangan dalam kondisi lingkungan yang dingin. Beberapa jenis sistem pemanas yang umum digunakan antara lain:

a. *Boiler*

Menghasilkan panas melalui pembakaran bahan bakar seperti gas alam atau listrik dan mendistribusikannya melalui air panas atau uap.

b. Furnace

Menggunakan bahan bakar atau listrik untuk memanaskan udara yang kemudian diedarkan melalui saluran udara.

c. Heat Pump

Teknologi yang dapat digunakan untuk pemanasan dan pendinginan dengan cara mengekstraksi panas dari udara atau tanah.

2. Sistem Ventilasi (*Ventilation System*)

Ventilasi bertanggung jawab atas pertukaran udara antara dalam dan luar ruangan, yang bertujuan untuk menghilangkan polutan, meningkatkan kadar oksigen, serta menjaga kelembaban udara (Asim *et al.*, 2022). Ventilasi dapat dibagi menjadi dua jenis utama:

a. Ventilasi Alami

Mengandalkan pergerakan udara melalui bukaan seperti jendela dan ventilasi atap untuk memastikan sirkulasi udara tanpa bantuan mesin.

b. Ventilasi Mekanis

Menggunakan kipas atau sistem ducting untuk mengontrol sirkulasi udara dalam ruangan. Contohnya adalah Air Handling Unit (AHU) yang bertanggung jawab dalam mendistribusikan udara segar ke berbagai bagian gedung.

3. Sistem Pendinginan (*Air Conditioning System*)

Sistem pendinginan bertujuan untuk mengurangi suhu udara dan menjaga kelembaban dalam ruangan (Alam *et al.*, 2023). Beberapa jenis sistem pendingin yang sering digunakan meliputi:

a. Chiller

Menggunakan cairan pendingin untuk menyerap panas dari udara dan mendistribusikannya ke seluruh Sistem Tata Udara.

b. Air Conditioner (AC)

Menggunakan refrigeran untuk mengekstraksi panas dari udara dan mendinginkannya sebelum didistribusikan ke ruangan.

c. Cooling Tower

Berfungsi membuang panas dari sistem pendingin ke lingkungan eksternal melalui proses evaporasi.

4. Sistem Pengendalian dan Manajemen (*Control and Monitoring System*)

Agar Sistem Tata Udara berfungsi dengan efisien, diperlukan sistem pengendalian yang memastikan pengoperasian sesuai dengan kebutuhan bangunan dan mengoptimalkan penggunaan energi. Beberapa teknologi yang digunakan meliputi:

a. *Building Automation System (BAS)*

Sistem otomatisasi berbasis sensor yang mengontrol suhu, kelembaban, dan ventilasi secara real-time.

b. *Thermostat*

Mengatur suhu ruangan secara otomatis sesuai dengan preferensi penghuni.

c. *Variable Air Volume (VAV) System*

Menyesuaikan volume udara yang disirkulasikan berdasarkan kebutuhan aktual, sehingga meningkatkan efisiensi energi.

5. Sistem Penyaringan dan Pemurnian Udara (*Air Filtration and Purification*)

Kualitas udara dalam ruangan sangat bergantung pada efektivitas sistem penyaringan dan pemurnian udara (Taheri et al., 2022). Komponen penting dalam sistem ini meliputi:

a. *HEPA Filter (High Efficiency Particulate Air)*

Dapat menyaring partikel kecil seperti debu, alergen, dan bakteri hingga 99,97%.

b. *Activated Carbon Filter*

Menyerap gas beracun dan bau yang tidak diinginkan dalam ruangan.

c. *UV-C Light Purifier*

Menggunakan sinar ultraviolet untuk membunuh mikroorganisme patogen dalam Sistem Tata Udara.

2.4 Perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE)

IKE adalah suatu parameter yang menunjukkan tingkat konsumsi energi spesifik dari suatu gedung per satuan luas gedung dalam waktu tertentu.

$$\text{IKE (kWh/m}^2\text{. tahun)} = \frac{\text{Konsumsi energi listrik tahunan (kWh/tahun)}}{\text{Luas area gedung ter-kondisikan (m}^2\text{)}} \quad (2.1)$$

Hasil perhitungan IKE akan di bandingkan dengan beberapa referensi, di antaranya:

- a. Nilai IKE acuan untuk sertifikasi Bangunan Gedung Hijau, skema *GreenShip* dari *Green Building Council Indonesia* (GBCI, 2016). Nilai IKE acuan tersebut adalah 250 kWh/m² .tahun.
- b. Peraturan Menteri ESDM No. 13 Tahun 2012 tentang penghematan pemakaian tenaga listrik (ESDM, 2012). Peraturan tersebut telah di cabut melalui Peraturan Menteri ESDM No. 09 Tahun 2018 dengan tujuan untuk menyederhanakan peraturan konservasi energi (ESDM, 2018). Peraturan tersebut di gunakan dalam laporan ini hanya sebagai pembanding.
- c. Laporan *benchmarking* konsumsi energi spesifik bangunan komersial yang diselenggarakan oleh Kementerian ESDM, BPPT dan UNDP pada tahun 2020 (BPPT, 2020). Pada laporan tersebut, tercatat bahwa rata-rata indeks konsumsi energi tahunan untuk bangunan perkantoran di Indonesia adalah sebesar 180.95 kWh/m² .tahun dengan rentang 153.60 – 213.27kWh/m² .tahun.
- d. Panduan nilai IKE untuk ASEAN *Energy Awards* 2022, dengan nilai 150 kWh/m² .tahun. Sebagai catatan, nilai tersebut dihasilkan dengan menggunakan GFA, bukan dengan luasan lantai area terkondisi.

2.5. Emisi Karbon

Emisi CO₂ tidak langsung dihasilkan dari penggunaan listrik yang berasal dari jaringan PLN, yang mayoritas berasal dari sumber tidak terbarukan (batu bara & gas). Nilai faktor emisi yang digunakan adalah 0.8 ton CO₂/MWh untuk jaringan listrik Jamali (ESDM, 2019). Nilai yang digunakan adalah nilai OM (operating margin) karena PAMA 1 adalah bangunan *existing* yang sudah lama beroperasi.

2.6. COP (*Coefficient of Performance*)

Coefficient of performance (COP) merupakan perbandingan antara kapasitas pendingin (*cooling duty*) per satuan energi yang dibutuhkan (*Smith, 2005*). Pengukuran yang dilaksanakan di bagi menjadi 2 bagian:

- a. Pengukuran elektrik, untuk mengetahui daya masukkan dari sistem *chiller*, terutama daya yang masuk ke kompresor.
- b. Pengukuran termal, untuk mengetahui panas yang dilepaskan oleh sistem ke udara bebas.

Daya masukan (P) sistem *chiller* di dapatkan dengan mengukur arus (V) & tegangan (I) (3 fasa), dan menghitungnya dengan persamaan (2.7) dengan asumsi nilai pf 0.85. COP dihitung sebagai rasio dari panas yang dilepaskan oleh *chiller* (Q_{reject}) terhadap daya masukan (P_{in}) dikurangi 1. Panas yang dilepaskan tersebut dihitung dengan menggunakan parameter laju massa udara yang keluar fan ($\dot{m}_{air}$), kapasitas panas udara ($C_{p,air} = 1.005 \text{ kJ/kg.K}$) (Cengel, 2008), serta beda temperatur udara keluar fan ($T_{air,out}$) dengan ambient ($T_{air,amb}$). Laju massa udara dapat dihitung dengan dari luasan bukaan *fan* tempat udara keluar ($A_{air,out}$), kecepatan rata-rata udara keluar tersebut ($v_{air,out}$), serta densitas udara (ρ_{air}).

$$P_{in}(kW) = \frac{\sqrt{3} \times V(V) \times I(A) \times pf}{1000} \quad (2.2)$$

$$\dot{Q}_{reject}(kW) = \dot{m}_{air}(kg/s) \times C_{p,air}(kJ/kg.K) \times (T_{air,out} - T_{air,amb})(K) \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_{air} = A_{air,out}(m^2) \times v_{air,out}(m/s) \times \rho_{air}(kg/m^3) \quad (2.4)$$

$$COP = \left(\frac{\dot{Q}_{reject}}{P_{in}} \right) - 1 \quad (2.5)$$

$$\frac{kW}{TR} = \frac{12}{COP \times 3.412} \quad (2.6)$$

2.7 Pengaruh Sistem Tata Udara terhadap Penilaian Sertifikasi GreenSHIP

Korelasi antara Kinerja Sistem Tata Udara dan Poin EEC serta IHC

Sistem tata udara merupakan komponen penting dalam operasional gedung, terutama dalam menciptakan kenyamanan termal serta kualitas udara dalam ruangan. Dalam konteks sertifikasi green building, khususnya *GreenSHIP Existing Building* yang dikembangkan oleh *Green Building Council Indonesia* (GBCI), kinerja sistem TATA UDARA sangat berpengaruh terhadap dua aspek utama penilaian, yaitu *Energy Efficiency and Conservation* (EEC) dan *Indoor Health and Comfort* (IHC).

Pada kategori EEC, Sistem Tata Udara memiliki kontribusi yang sangat besar terhadap konsumsi energi bangunan. Berdasarkan studi dari Zhang et al. (2020), sistem

Sistem Tata Udara dapat menyumbang antara 40% hingga 60% dari total penggunaan energi pada bangunan komersial. Oleh karena itu, efisiensi Sistem Tata Udara menjadi parameter utama dalam penilaian penghematan energi pada gedung. Sistem Tata Udara yang efisien akan menurunkan konsumsi energi listrik, meningkatkan *energy performance index* (EPI), serta mengurangi emisi karbon dari operasional gedung. Dalam skema *GreenShip*, efisiensi energi Sistem Tata Udara dinilai melalui indikator seperti penggunaan *chiller plant* yang hemat energi, pengendalian suhu dan kelembapan otomatis, serta adanya audit dan pemantauan energi secara berkala (GBCI, 2021).

Sementara itu, dalam kategori IHC, kinerja Sistem Tata Udara berkaitan langsung dengan pencapaian kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*), kenyamanan termal, serta pengendalian kebisingan. Sistem Tata Udara yang baik akan mampu menjaga kadar karbon dioksida (CO₂), kelembaban, dan suhu udara pada tingkat yang optimal sesuai standar ASHRAE 62.1 atau Permenkes RI No. 48 Tahun 2016. Kualitas udara yang baik berkontribusi terhadap kesehatan dan produktivitas penghuni bangunan (Wargocki et al., 2002). Dalam *GreenShip*, gedung dapat memperoleh poin tambahan bila mampu menunjukkan kinerja Sistem Tata Udara dalam menjaga kualitas udara dengan parameter seperti sistem filtrasi udara (HEPA filter), pemantauan CO₂, serta sistem ventilasi alami dan mekanik yang memadai (GBCI, 2021).

Korelasi antara kinerja Sistem Tata Udara dan dua kategori tersebut juga terbukti dalam berbagai studi terdahulu. Misalnya, penelitian oleh Gao et al. (2019) menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi Sistem Tata Udara dapat meningkatkan skor penilaian green building hingga 25%, terutama pada kategori efisiensi energi dan kenyamanan pengguna. Selain itu, pemanfaatan teknologi kontrol otomatis (*Building Automation System*/BAS) pada Sistem Tata Udara juga terbukti dapat menurunkan konsumsi energi sebesar 15–30% dan sekaligus meningkatkan kualitas udara dalam ruangan (Al Horr et al., 2016). Sistem Tata Udara tidak hanya penting untuk efisiensi energi, tetapi juga menjadi tulang punggung pencapaian kualitas lingkungan dalam ruangan. Kinerja Sistem Tata Udara yang optimal akan memberikan dampak langsung terhadap keberhasilan bangunan dalam meraih sertifikasi green building melalui kontribusinya terhadap perolehan skor pada kategori EEC dan IHC.