

## DAFTAR ISI

|  |             |
|--|-------------|
| <b>HALAMAN JUDUL .....</b>                             | <b>i</b>    |
| <b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME .....</b>              | <b>ii</b>   |
| <b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>                        | <b>iii</b>  |
| <b>HALAMAN TUGAS .....</b>                             | <b>iv</b>   |
| <b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>                       | <b>v</b>    |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                             | <b>vii</b>  |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                 | <b>ix</b>   |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                              | <b>xiii</b> |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                              | <b>xv</b>   |
| <b>DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN .....</b>              | <b>xvii</b> |
| <b>INTISARI .....</b>                                  | <b>xx</b>   |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                  | <b>xxi</b>  |
| <b>PENDAHULUAN.....</b>                                | <b>1</b>    |
| I.1 Latar Belakang .....                               | 1           |
| I.2 Perumusan Masalah .....                            | 2           |
| I.3 Batasan Masalah .....                              | 2           |
| I.4 Tujuan .....                                       | 3           |
| I.5 Manfaat .....                                      | 3           |
| <b>TINJAUAN PUSTAKA .....</b>                          | <b>4</b>    |
| II.1. Gedung Kantor XYZ, Makasar [3] .....             | 4           |
| II.2. Hotel Novotel Yogyakarta Lantai 1 [4] .....      | 5           |
| II.3. Perpustakaan Pusat UGM gedung Lantai 1 [5] ..... | 5           |
| II.4. Perpustakaan Pusat UGM gedung Lantai 2 [2] ..... | 6           |

|   |    |
|---|----|
| II.5. Perpustakaan Pusat UGM gedung Lantai 4 [6] .....  | 7  |
| II.6. Gedung Magister Manajemen UGM [1].....  | 8  |
| II.7. Optimasi dan Pemodelan Sistem Penkondisian Udara DX ( <i>Direct Expansion</i> ) pada Bangunan Hemat Energi [28] ..... | 9  |
| <b>DASAR TEORI</b> .....  | 10 |
| III.1. Konservasi Energi .....  | 10 |
| III.2. Intensitas Konsumsi Energi .....   | 10 |
| III.3. Bangunan Hijau .....   | 11 |
| III.4. Beban Pendinginan .....  | 12 |
| III.5. Perhitungan Beban Pendinginan Internal .....   | 14 |
| III.5.1. Beban Pendinginan Penghuni ( <i>occupant</i> ) .....   | 14 |
| III.5.2. Beban Pendinginan Sistem Tata Cahaya .....   | 15 |
| III.5.3. Beban Pendinginan Peralatan Listrik .....  | 16 |
| III.6. Sistem Tata Udara (HVAC) .....   | 17 |
| III.6.1. AHU ( <i>Air Handling Unit</i> ) .....   | 18 |
| III.6.2. Koil Pendingin ( <i>Cooling Coil</i> ) .....   | 19 |
| III.6.3. Kipas ( <i>Blower/fan</i> ) .....  | 23 |
| III.6.4. <i>Air Distribution</i> .....  | 24 |
| III.7. Perangkat Lunak Pemodelan .....  | 25 |
| III.7.1. <i>EnergyPlus</i> .....  | 25 |
| III.7.2. <i>DesignBuilder</i> .....   | 26 |
| <b>PELAKSANAAN PENELITIAN</b> .....   | 28 |
| IV.1. Alat dan Bahan Penelitian .....   | 28 |
| IV.2. Tata Pelaksanaan Penelitian .....   | 30 |
| IV.2.1 Studi Literatur .....  | 31 |

|   |           |
|---|-----------|
| IV.2.2 Pengumpulan Data.....  | 31        |
| IV.2.2.1. Cetak Biru .....  | 32        |
| IV.2.2.2. Wawancara.....  | 32        |
| IV.3. Deskripsi Rancangan Bangunan <i>Smart &amp; Green Learning Center</i> UGM ..... | 32        |
| IV.4. Pemodelan Bangunan <i>Smart &amp; Green Learning Center</i> UGM .....           | 33        |
| <b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>   | <b>34</b> |
| V.1. Pemodelan Geometri Bangunan .....  | 34        |
| V.1.1. Pemodelan Zona Bangunan .....  | 35        |
| V.1.2. Pemodelan Material Penyusun Bangunan .....                                     | 38        |
| V.2. Input Data Pada Pemodelan Geometri Bangunan .....                                | 41        |
| V.2.1. Input Data Kondisi Lingkungan.....   | 42        |
| V.2.2. WWR ( <i>Windows Wall Ratio</i> ).....   | 43        |
| V.2.3. Beban Pendinginan Penghuni .....   | 45        |
| V.2.4. Beban Pendinginan Peralatan Listrik.....                                       | 46        |
| V.2.5. Estimasi Konsumsi Energi Sistem <i>Lift</i> .....                              | 50        |
| V.2.6. Beban Pendinginan Sistem Tata Cahaya .....                                     | 51        |
| V.2.7. Penjadwalan Beban Pendinginan .....  | 52        |
| V.3. Rancangan Sistem Pendinginan Udara VAV dan CAV .....                             | 53        |
| V.3.1. <i>Air Handling Unit</i> (AHU).....  | 55        |
| V.3.2. <i>Cooling Coil</i> .....  | 58        |
| V.3.3. <i>Air Distribution Unit</i> (ADU) .....                                       | 60        |
| V.4. Hasil Simulasi Kapasitas Pendinginan dengan <i>EnergyPlus</i> .....              | 62        |
| V.5. Hasil Simulasi Total Konsumsi Energi dengan <i>EnergyPlus</i> .....              | 64        |
| V.5.1. Konsumsi Energi Sistem Tata Udara .....  | 65        |

|  |           |
|--|-----------|
| V.5.1.1. Konsumsi Total Energi Sistem Tata Udara Dengan Nilai (COP) Sebesar 3,0 .....                  | 65        |
| V.5.1.2. Konsumsi Total Energi Sistem Tata Udara Dengan Nilai (COP) Sebesar 4,5 .....                  | 67        |
| V.5.2. Konsumsi Energi Sistem Tata Cahaya dan Peralatan Listrik .....                                  | 68        |
| V.5.3. Konsumsi Total Energi Bangunan .....  | 69        |
| V.5.3.1. Konsumsi Total Energi Bangunan Dengan Nilai (COP) Sistem Tata Udara Sebesar 3,0 .....         | 69        |
| V.5.3.2. Konsumsi Total Energi Bangunan Dengan Nilai (COP) Sistem Tata Udara Sebesar 4,5 .....         | 72        |
| V.5.4. Intensitas Konsumsi Energi (IKE) Bangunan.....  | 75        |
| V.5.5. Total Biaya Rekening Listrik per bulan Dari Hasil Simulasi .....                                | 76        |
| V.5.5.1. Total Biaya Rekening Listrik per bulan Dengan Nilai (COP) Sistem Tata Udara Sebesar 3,0 ..... | 76        |
| V.5.5.2. Total Biaya Rekening Listrik per bulan Dengan Nilai (COP) Sistem Tata Udara Sebesar 4,5 ..... | 77        |
| V.5.6. Perbandingan Total Biaya Perancangan Sistem CAV dan VAV.....                                    | 78        |
| V.5.7. Analisis Potensi Penghematan Energi Dari Hasil Simulasi.....                                    | 79        |
| <b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>  | <b>80</b> |
| VI.1. Kesimpulan .....   | 80        |
| VI.2. Saran.....   | 81        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>  | <b>82</b> |
| <b>LAMPIRAN A .....</b>  | <b>85</b> |
| <b>LAMPIRAN B .....</b>  | <b>86</b> |

## DAFTAR TABEL

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabel 3.1.  | Standar IKE menurut <i>Green Building Council</i> Indonesia. ....                           | 11 |
| Tabel 3.2.  | Nilai fraksi kalor sensibel berdasarkan aktivitas okupansi [14]. ....                       | 15 |
| Tabel 4.1.  | Alat perangkat keras yang digunakan dalam penelitian.....                                   | 28 |
| Tabel 4.2.  | Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian dan penulisan...                            | 29 |
| Tabel 4.3.  | Bahan yang digunakan dalam penelitian dan penulisan skripsi.....                            | 29 |
| Tabel 4.4.  | Pengelompokan Variabel Data.....  | 33 |
| Tabel 5.1.  | Pembagian tema lantai Gedung SGLC UGM.....  | 35 |
| Tabel 5.2.  | Pembagian zona dan ruangan Lantai 2 dan 3.....  | 36 |
| Tabel 5.3.  | Pembagian zona dan ruangan Lantai 3. ....   | 37 |
| Tabel 5.4.  | Temperatur maksimum dan jumlah hari per bulan dengan temperatur lebih besar dari 32 °C..... | 42 |
| Tabel 5.5.  | Rata-rata <i>drybulb temperature</i> (°C) per satu jam pada setiap bulan.                   | 42 |
| Tabel 5.6.  | Nilai WWR lantai 2 dan 3 gedung SGLC.....   | 44 |
| Tabel 5.7.  | Nilai WWR lantai 4 sampai 11 gedung SGLC. ....  | 44 |
| Tabel 5.8.  | Nilai okupansi lantai 2 dan 3 gedung SGLC. ....   | 45 |
| Tabel 5.9.  | Nilai okupansi lantai 4 sampai 11 gedung SGLC.....  | 46 |
| Tabel 5.10. | Spesifikasi peralatan listrik tiap zona pada lantai 2 dan 3. ....                           | 47 |
| Tabel 5.11. | Spesifikasi peralatan listrik tiap zona pada lantai 4 sampai 11.....                        | 48 |
| Tabel 5.12. | Densitas beban listrik tiap ruangan lantai 2 dan 3. ....                                    | 49 |
| Tabel 5.13. | Densitas beban listrik tiap ruangan lantai 4 sampai 11.....                                 | 49 |
| Tabel 5.14. | Jadwal jam operasional dan intensitas penggunaan <i>lift</i> . ....                         | 50 |
| Tabel 5.15. | Nilai daya dan jumlah lampu lantai 2 dan 3 gedung SGLC.....                                 | 51 |
| Tabel 5.16. | Nilai daya dan jumlah lampu lantai 4 sampai 11 gedung SGLC. ....                            | 52 |
| Tabel 5.17. | Jadwal jam operasional dan presentase masing-masing beban.....                              | 53 |
| Tabel 5.18. | Jadwal pengaturan <i>damper</i> .....   | 61 |
| Tabel 5.19. | Kapasitas koil pendinginan sistem CAV dengan COP 3,0. ....                                  | 62 |
| Tabel 5.20. | Kapasitas koil pendinginan sistem VAV dengan COP 3,0.....                                   | 62 |
| Tabel 5.21. | Kapasitas koil pendinginan sistem CAV dengan COP 4,5. ....                                  | 63 |

|  |    |
|--|----|
| Tabel 5.22. Kapasitas koil pendinginan sistem VAV dengan COP 4,5.....  | 63 |
| Tabel 5.23. Kapasitas pendinginan sistem CAV dan VAV. ....   | 63 |
| Tabel 5.24. Jumlah hari kerja untuk masing-masing bulan. ....  | 65 |
| Tabel 5.25. Nilai IKE rancangan gedung SGLC dengan nilai COP sistem tata udara sebesar 3,0.....                      | 75 |
| Tabel 5.26. Nilai IKE rancangan gedung SGLC dengan nilai COP sistem tata udara sebesar 3,0.....                      | 75 |
| Tabel 5.27. Total biaya rekening listrik per bulan dengan nilai (COP) sistem tata udara CAV dan VAV sebesar 3,0..... | 76 |
| Tabel 5.28. Total biaya rekening listrik per bulan dengan nilai (COP) sistem tata udara CAV dan VAV sebesar 4,5..... | 77 |
| Tabel 5.29. Harga per komponen sistem tata udara.....  | 78 |
| Tabel 5.30. Besar potensi penghematan konsumsi total energi dari hasil simulasi. ....                                | 79 |

## DAFTAR GAMBAR

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gambar 3.1.  | Komponen transfer panas di dalam ruangan dengan sistem tata udara HVAC [9]. | 13 |
| Gambar 3.2.  | Alur Proses sistem pendinginan udara [12].                                  | 18 |
| Gambar 3.3.  | Komponen penyusun AHU.  | 19 |
| Gambar 3.4.  | Koil pendinginan tipe <i>Direct Expansion</i> (DX) [15].                    | 19 |
| Gambar 3.5.  | Alur proses pendinginan udara <i>Direct Expansion</i> [15].                 | 20 |
| Gambar 3.6.  | Proses <i>sensible cooling</i> [17].  | 21 |
| Gambar 3.7.  | Psychrometric proses <i>sensible cooling</i> [17].                          | 22 |
| Gambar 3.8.  | Jenis kipas berdasarkan peletakanya.  | 24 |
| Gambar 3.9.  | VAV <i>terminal unit</i> [20].  | 24 |
| Gambar 3.10. | Volume <i>damper</i> .  | 25 |
| Gambar 3.11. | <i>EnergyPlus</i> [22].   | 26 |
| Gambar 4.1.  | Diagram alir penelitian.  | 30 |
| Gambar 5.1.  | Pemodelan Gedung <i>Smart &amp; Green Learning Center</i> UGM.              | 34 |
| Gambar 5.2.  | Pemodelan zona lantai 2 dan 3.  | 36 |
| Gambar 5.5.  | Material penyusun bangunan tembok.  | 39 |
| Gambar 5.6.  | Pemodelan material penyusun bangunan lantai.                                | 39 |
| Gambar 5.7.  | Material penyusun bangunan lantai.  | 40 |
| Gambar 5.8.  | Pemodelan material penyusun bangunan pintu.                                 | 40 |
| Gambar 5.9.  | Material penyusun bangunan pintu.   | 41 |
| Gambar 5.10. | Denah orientasi arah lantai 2 dan 3 gedung SGLC.                            | 43 |
| Gambar 5.11. | Denah orientasi arah Lantai 4 sampai 11 gedung SGLC.                        | 44 |
| Gambar 5.12. | Pemodelan sistem pendinginan udara  | 54 |
| Gambar 5.13. | Parameter pemodelan AHU sistem CAV.   | 55 |
| Gambar 5.14. | Parameter pemodelan AHU sistem VAV.   | 55 |
| Gambar 5.15. | Parameter pemodelan kipas tipe CAV.   | 56 |
| Gambar 5.16. | Parameter pemodelan kipas tipe VAV.   | 57 |
| Gambar 5.17. | Parameter pemodelan tipe pendinginan DX.                                    | 58 |
| Gambar 5.18. | <i>Direct Air ADU</i> .   | 60 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gambar 5.19. | Parameter pemodelan ADU sistem CAV.....   | 60 |
| Gambar 5.20. | VAV <i>no Reheat</i> ADU. ....  | 61 |
| Gambar 5.21. | Parameter pemodelan ADU sistem VAV.....   | 61 |
| Gambar 5.24. | Rata-rata Temperatur <i>Dry Bulb</i> ( $^{\circ}\text{C}$ ) per bulan. ....             | 64 |
| Gambar 5.25. | Konsumsi total energi sistem tata udara dengan nilai COP 3,0. .                         | 66 |
| Gambar 5.26. | Konsumsi energi <i>cooling</i> dan kipas dengan variarsi COP 3,0. ....                  | 66 |
| Gambar 5.27. | Konsumsi total energi sistem tata udara dengan nilai COP 4,5. .                         | 67 |
| Gambar 5.28. | Konsumsi energi <i>cooling</i> dan kipas dengan variarsi COP 4,5. ....                  | 68 |
| Gambar 5.29. | Konsumsi energi sistem cahaya dan peralatan listrik lainnya.....                        | 68 |
| Gambar 5.30. | Konsumsi total energi bangunan untuk sistem CAV dengan nilai<br>COP 3,0.....            | 69 |
| Gambar 5.31. | Konsumsi total energi bangunan per bulan untuk sistem CAV<br>dengan nilai COP 3,0. .... | 70 |
| Gambar 5.32. | Konsumsi total energi bangunan untuk sistem VAV dengan nilai<br>COP 3,0.....            | 71 |
| Gambar 5.33. | Konsumsi total energi bangunan per bulan untuk sistem VAV<br>dengan nilai COP 3,0. .... | 71 |
| Gambar 5.34. | Konsumsi total energi bangunan untuk sistem CAV dengan nilai<br>COP 4,5.....            | 72 |
| Gambar 5.35. | Konsumsi total energi bangunan per bulan untuk sistem CAV<br>dengan nilai COP 4,5. .... | 73 |
| Gambar 5.36. | Konsumsi total energi bangunan untuk sistem VAV dengan nilai<br>COP 4,5.....            | 74 |
| Gambar 5.37. | Konsumsi total energi bangunan per bulan untuk sistem VAV<br>dengan nilai COP 4,5. .... | 74 |



## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### Lambang Romawi

| Lambang        | Kuantitas   | Satuan               |
|----------------|---|----------------------|
| $q$            | <i>Sensible Cooling</i>                           | kJ/min               |
| $m_a$          | Laju aliran massa udara                           | kg/min               |
| $h_1$          | Entalpi pada saat temperatur <i>dry bulb</i> 1    | kJ/kg                |
| $h_2$          | Entalpi pada saat temperatur <i>dry bulb</i> 2    | kJ/kg                |
| $t_{d1}$       | Temperatur <i>dry bulb</i> 1                      | °C                   |
| $t_{d2}$       | Temperatur <i>dry bulb</i> 2                      | °C                   |
| $Q_{occup}$    | Total kalor sensible penghuni                     | W                    |
| $f_{conv}$     | Fraksi panas yang didistribusikan secara konveksi |                      |
| $f_{cv}$       | Fraksi panas yang didistribusikan secara konveksi |                      |
| $f_{ret}$      | Fraksi panas yang diserap oleh udara balik        |                      |
| $f_{lw}$       | Fraksi radiasi gelombang panjang                  |                      |
| $f_{sw}$       | Fraksi radiasi gelombang pendek                   |                      |
| $f_l$          | Fraksi panas laten                                |                      |
| $f_r$          | Fraksi panas radiasi                              |                      |
| $f_w$          | Fraksi energi yang berubah menjadi kerja          |                      |
| $CFM$          | Kebutuhan udara ruangan                           | ft <sup>3</sup> /min |
| $ACH$          | Rasio pertukaran udara dengan volume ruangan      |                      |
| $F_{frac}$     | Rasio laju aliran udara                           |                      |
| $m$            | Laju aliran massa                                 | kg/s                 |
| $m_{max}$      | Laju aliran massa maksimal                        | kg/s                 |
| $CCap_{rated}$ | Rata-rata total kapasitas pendinginan             | W                    |
| $CCap_{peak}$  | Kapasitas puncak pendinginan                      | W                    |
| $CapModCurve$  | Kurva karakteristik kapasitas pendinginan         |                      |
| $\rho_{air}$   | Massa jenis udara                                 | kg/m <sup>3</sup>    |
| $V_{air}$      | Debit aliran udara                                | m <sup>3</sup> /s    |

|               |                                       |       |
|---------------|---------------------------------------|-------|
| $h_{mix}$     | Entalpi udara kering dan basah        | kJ/kg |
| $h_{sup}$     | Entalpi udara suplai                  | kJ/kg |
| $SHR_{rated}$ | Rasio rata-rata kalor <i>sensible</i> |       |
| $q_s$         | Kapasitas <i>sensible cooling</i>     | kW    |
| $q_t$         | Kapasitas total pendinginan           | kW    |

### Singkatan

|       |  |
|-------|--|
| SGLC  | <i>Smart &amp; Green Learning Center</i>                 |
| UGM   | Universitas Gadjah Mada                                  |
| KPFT  | Kantor Pusat Fakultas Teknik                             |
| GBCI  | <i>Green Building Council Indonesia</i>                  |
| PUPR  | Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia   |
| HVAC  | <i>Heating, Ventilating, and Air Conditioning</i>        |
| CAV   | <i>Constant Air Volume</i>                               |
| VAV   | <i>Variable Air Volume</i>                               |
| IKE   | Intensitas Konsumsi Energi                               |
| SNI   | Standar Nasional Indonesia                               |
| AHU   | <i>Air Handling Unit</i>                                 |
| DX    | <i>Direct Expansion</i>                                  |
| COP   | <i>Coefficient of Performance</i>                        |
| ADU   | <i>Air Handling Unit</i>                                 |
| BLAST | <i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i> |

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| WWR | <i>Windows to Wall Ratio</i> |
| TR  | <i>Ton Refrigeration</i>     |
| CFM | <i>Cubic Feet Minutes</i>    |
| ACH | <i>Air Change Hour</i>       |
| SHR | <i>Sensible Heat Ratio</i>   |