

# KAJIAN NUMERIK PERILAKU TERMO-HIDRIK DAN INVESTIGASI ENERGI PADA ATAP TUMBUHAN MENGGUNAKAN SIMULASI DINAMIK TRNSYS

Abdul Rahman<sup>1)</sup>

**Abstrak:** Peningkatan temperatur global akibat pemanasan bumi berdampak secara langsung pada pengaturan temperatur dan konsumsi energi tahunan suatu gedung atau perumahan. Dampak konsumsi energi tahunan pada bangunan yang menggunakan atap tumbuhan dapat diamati melalui penelitian eksperimental ataupun menggunakan simulasi dinamik TRNSYS. Pada berbagai penelitian ditemukan bahwa penggunaan atap tumbuhan dapat mengendalikan fluktuasi temperatur atap dan selanjutnya mengurangi konsumsi energi tahunan suatu bangunan. Jika temperatur atap konvensional yang berwarna hitam bisa mencapai suhu 80 °C maka dengan memakai atap tumbuhan temperatur atap bisa diturunkan hingga 27 °C. Penelitian ini ditujukan untuk mengamati perilaku termo-hidrik dan konsumsi energi tahunan suatu bangunan apartemen terintegrasi. Hasil pengujian menggunakan TRNSYS17 pada bangunan apartemen yang beratap tumbuhan tipe ekstensif menunjukkan bahwa modifikasi nilai LAI (Leaf Area Index) antara 1,0 s/d 4,8 dan ketebalan tanah (Z) antara 0,177 s/d 0,3 m di periode 16-31 Juli 2010, dapat menurunkan temperatur atap hingga 18°C dan menghemat konsumsi energi hingga -13,9 kWh. Dibandingkan atap konvensional yang menghasilkan temperatur atap sebesar 47°C dan konsumsi energi rata-rata sebesar 20 kWh. Dari pengujian ini diperoleh juga bahwa bangunan yang menggunakan atap tumbuhan mengalami penurunan tingkat ketidaknyamanan sebesar 7.2 % dan penghematan energi sebesar 33,7% selama periode tersebut.

**Kata kunci:** Atap tumbuhan, konsumsi energi tahunan, penghematan energi, LAI, Z, TRNSYS17.

## I. PENDAHULUAN

Atap tumbuhan (*green roof*) adalah jenis atap yang terdiri dari 5 (lima) lapisan penyusun utama, yaitu: lapisan tanaman (*vegetation layer*), lapisan tanah (*substrat, growing media*), lapisan penyaring (*filter layer*), lapisan irigasi (*drainage layer*) dan lapisan anti air (*waterproof membrane*) [1]. Berdasarkan fungsi dan jenis tanaman, atap tumbuhan terbagi menjadi 3 (tiga) kelompok yakni: Intensif, semi ekstensif dan ekstensif. Tipe ekstensif yang mempunyai ketebalan lapisan tanah antara 10-30 cm menjadi pilihan yang paling banyak digunakan karena kepraktisan dan kemudahan perawatannya [20].

---

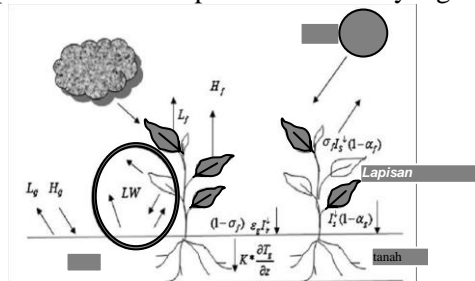
<sup>1</sup> Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Ujung Pandang

Atap tumbuhan menjadi suatu pilihan penting dalam rencana penghematan energi nasional di negara-negara maju seperti: AS dan Eropa. Beberapa keuntungan penggunaan atap tumbuhan meliputi: pengendalian air hujan [2,3], peningkatan kontrol banjir [4], peningkatan kualitas udara suatu pemukiman [5], memperpanjang umur atap bangunan [6]. Keuntungan lainnya, ia dapat mengurangi peningkatan panas pemukiman (*heat island effect*) [7] dan keindahan arsitektur serta keragaman hayati (*biodeversity*)[8]. A. Niachou et al telah melakukan penelitian tentang kontribusi atap tumbuhan dalam pendinginan ruangan selama periode musim panas dan pengurangan pemakaian pemanas ruangan selama musim dingin. Total pemakaian energi tahunan dapat direduksi hingga 44 % dalam kasus bangunan yang tidak terisolasi sempurna [9]. Penelitian lain juga dilakukan di Singapura oleh Wong et al yang mengamati keuntungan penggunaan dinding tumbuhan (*vertical greenery systems*,VGSs). Mereka menemukan bahwa dinding hijau di daerah beriklim tropis saat cuaca cerah dapat menurunkan temperatur ruangan hingga 11,58 °C, hal ini berdampak pada penghematan pemakaian daya pendingin dan penghematan biaya energi pada gedung [10].

Saat ini penelitian mengenai atap tumbuhan telah berkembang sangat pesat dikarenakan banyaknya metode penelitian yang menggunakan metode numerik berbasis software komputer, diantaranya: EnergyPlus dan TRNSYS. Salah satu penelitian menggunakan Energy Plus telah dikembangkan oleh suatu lembaga riset Amerika Serikat, FIBRE yang menyelidiki bahwa temperatur atap konvensional hitam bisa mencapai suhu hingga 80°C dibandingkan jika kita menggunakan atap tumbuhan yang temperaturnya hanya sekitar 27 °C [11]. Penelitian lain juga di lakukan di Yunani oleh Santomouris et al menggunakan TRNSYS yang mengamati ekonomi energi pada suatu bangunan sekolah yang menggunakan atap tumbuhan. Ia menemukan bahwa selama musim panas pemakaian alat pendingin ruangan dapat dikurangi dari 6-49 % [12].

Tujuan utama dari penelitian ini untuk mengetahui besar konsumsi energi tahunan dan harga ketidaknyamanan suatu bangunan yang menggunakan atap tumbuhan dibandingkan yang menggunakan atap konvensional.

Pada berbagai penelitian atap tumbuhan yang menggunakan metode numerik, ditetapkan formula-formula dari fenomena fisik yang timbul. Kestimbangan energi pada tumbuhan dan lapisan tanah merupakan hal utama yang harus diperhitungkan.



Gambar 1. Kestimbangan energi pada atap tumbuhan[1]

Pada gambar 1 ditampilkan setiap fenomena fisik yang ada pada atap tumbuhan. Kestimbangan energi dan perpindahan fluks kalor yang terjadi antara lingkungan, kanopi daun dan lapisan tanah, selanjutnya dijelaskan pada beberapa literatur [1,13,14,17] mengenai:

- Radiasi sinar matahari langsung yang menjangkau permukaan tanah disebut radiasi global, kemudian radiasi gelombang pendek tersebut dipantulkan oleh permukaan atap tumbuhan.
- Radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh atap tumbuhan.
- Radiasi aliran panas yang dipancarkan oleh atap.
- Pertukaran panas sensibel melalui konveksi.
- Fluks kalor laten melalui evapotranspirasi daun dan tanah.
- Fluks kalor sensibel melalui konduksi tanah.

**A. Pemodelan termis**

1. Kestimbangan energi pada lapisan tanah (*substrat*)

Kestimbangan energi pada permukaan tanah dan properti termal yang dimiliki diekspresikan melalui persamaan [1,14,15]:

$$F_g = [(1 - \sigma_f) I_s^{\downarrow} [(1 - \alpha_g) + \epsilon_g I_{ir}^{\downarrow} - \epsilon_g \sigma T_g^4] - \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + k \frac{\partial T_g}{\partial z}] \quad (1)$$

Dari persamaan di atas diketahui bahwa konduktifitas fluks yang melewati lapisan permukaan tanah dipresentasikan oleh panas sensibel tanah,  $H_g$  ( $W/m^2$ ) dan panas laten tanah,  $L_g$  ( $W/m^2$ ).  $T_g$  dan  $T_f$  merupakan temperatur permukaan tanah dan daun (Kelvin),  $\sigma$  = konstanta Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W/m^2.K$ ). Pertukaran fluks yang terjadi pada lapisan permukaan tanah tergantung pada kecepatan angin yang menimpa tanaman dan perbedaan temperatur udara antara lapisan tanaman dan permukaan tanah. Panas sensibel tanah dirumuskan  $H_g$  oleh [15]:

$$H_g = (e_o + \rho_{ag} C_{p,a} C_{hg} W_{af}) \cdot (T_{af} - T_g) \quad (2)$$

Persamaan tersebut disimbolkan oleh  $\rho_{ag}$  yang merupakan tekanan udara didekat permukaan tanah ( $kg/m^3$ ) dan  $C_{hg}$  adalah koefisien transfer bulk dari panas sensibel.

Untuk mendapatkan panas laten pada tanah,  $L_g$  dirumuskan melalui persamaan Deardoff [15] yakni:

$$L_g = C_{e,g} l_g W_{af} \rho_{ag} (q_{af} - q_g) \quad (3)$$

Dimana,  $q_g$  adalah rasio campuran udara pada permukaan tanah dan  $q_{af}$  adalah rasion campuran udara pada kanopi daun.

2. Kestimbangan energi pada lapisan tanaman (*kanopi*).

Kestimbangan energi pada kanopi daun di rumuskan melalui formula [1,14]:

$$F_f = \sigma_f [ I_s^{\downarrow} [(1 - \alpha_f) + \epsilon_f I_{ir}^{\downarrow} - \epsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \epsilon_g \epsilon_f \sigma}{\epsilon_f + \epsilon_g - \epsilon_{fg}} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f ] \quad (4)$$

Dimana,  $\epsilon_f$  dan  $\epsilon_g$  adalah emisivitas dari kanopi daun dan tanah.  $L_g$  dan  $L_f$  adalah panas laten pada tanah dan daun,  $\sigma_f$  disebut sebagai densitas daun. Panas sensibel daun dapat dijabarkan dngan persamaan [15] :

$$H_f = (e_o + 1.1 LAI \rho_{af} C_{p,a} C_f W_{af}) \cdot (T_{af} - T_f) \quad (5)$$

Dimana  $e_o$  adalah koefisien pergantian kehilangan angin (*windless exchange coefficient*).  $T_{af}$  adalah temperatur udara dalam daun (Kelvin).  $W_{af}$  merupakan ekspresi dari kecepatan angin pada antar muka daun. (m/dtk).  $C_{p,a}$ , panas spesifik pada tekanan udara konstan (J/kg) dan LAI (*leaf area indeks*) merupakan indeks luasan daun.

Pertukaran panas laten antara tanaman dan udara atmosfer dekat permukaan daun diekspresikan ke dalam rumus [15]:

$$L_f = l_f LAI \rho_{af} C_f W_{af} r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (6)$$

Dimana  $l_f$ , panas laten akibat evaporasi (J/kg),  $q_{f,sat}$ , rasio saturasi campuran pada tempertur daun dan  $q_{af}$ , rasio campuran udara pada antar muka daun.

## B. Pemodelan kelembaban

Kesetimbangan air pada atap tumbuhan dipengaruhi oleh intensitas curah hujan, jumlah air di drainase dan jumlah air pada tanaman. Kemudian pemodelan perpindahan panas pada atap tumbuhan dihitung berdasarkan variasi dari properti termal substrat dan jumlah efektif evapotranspirasi air. Persamaan tentang perpindahan panas yang berkaitan dengan kandungan air dijelaskan melalui persamaan berikut:

$$K(\theta) = K_o + \theta K_e \quad (7)$$

$K_e$  adalah konduktivitas termal air,  $\theta$  kandungan air dan  $K_o$  merupakan konduktivitas material.

Jika lapisan tanah (*substrat*) dianggap tidak berdeformasi dan sifat-sifatnya sama sepanjang sumbu horisontal, maka perpindahan massa air dijelaskan melalui persamaan model kestimbangan (*boundary condition*) oleh Richard [16]:

$$D_{i\psi} - D_{m\psi} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \Big|_{x=0} = P_r \quad (8)$$

$$D_{i\psi} - D_{m\psi} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \Big|_{x=e_p} = D \quad (9)$$

$\psi$  dalam hal ini merupakan matriks potensi air dalam tanah (m),  $D_{i\psi}$  dan  $D_{m\psi}$  masing-masing adalah gradien potensial (m/s) dari konduktivitas air dalam keadaan campuran (cair dan uap) dan dalam keadaan cair saja. Sedangkan  $P_r$  dan  $D$  adalah presipitasi dan drainase.  $x=0$  adalah posisi permukaan terluar tanah yang terkena sinar matahari langsung dan  $x=e_p$  diartikan sebagai posisi tanah yang tidak terkena sinar matahari langsung.

Untuk setiap fungsi waktu, jumlah air yang terdapat di dalam tanah dipengaruhi oleh jumlah presipitasi dan jumlah limpahan air drainase yang menimpa atap, juga jumlah evapotranspirasi (*evapotranspiration, ETP*) yang keluar. Kandungan air yang terdapat dalam tanah ditentukan melalui persamaan [16]:

$$\theta_i (T_f, T_g) - \theta_{i-1} (T_f, T_g) + Pr + D = 0 \tag{10}$$

Evapotranspirasi merupakan satu dari banyak fenomena penting kesetimbangan uap air. Evapotranspirasi terdiri dari dua kata, yakni: evaporasi dan transpirasi. Evaporasi adalah proses perubahan spesifik bentuk fisik air menjadi uap dan transpirasi adalah proses perubahan fisiologik bentuk air menjadi uap yang terjadi selamanya pada tumbuhan. Fenomena evapotranspirasi pada atap tumbuhan dikelompokkan menjadi dua bagian penting. Pertama, karakteristik dari kanopi daun (LAI, ketinggian, kerapatan daun,...) dan kedua, faktor-faktor lingkungan seperti: kecepatan angin, temperatur dan tekanan [17].

ETP diperoleh melalui pengukuran langsung atau menggunakan pemodelan matematika yang dirumuskan melalui persamaan Penman-Monteilh yang telah dimodifikasi oleh David and Jenifer [18].

$$ETP = \frac{[0,408\Delta(R_n - G) + \frac{\gamma(900)U_2}{T_a + 273} U_2(e_o - e_a)]}{\Delta + \gamma (T_a + 0,34U_2)} \tag{11}$$

$R_n$  adalah radiasi net,  $G$  panas sensibel tanah,  $\gamma$  konstanta psikometrik (0,059 kPa/°C),  $T_a$  tempertur rata-rata dan  $U_2$  adalah kecepatan angin (m/dtk) yang terletak 2m dari ketinggian lapisan tanah.  $\Delta$  merupakan bilangan Clasius-Clapeyron yang dijabarkan dalam formula:

$$\Delta = \frac{e_s^o - e_a^o}{T_s - T_a} \tag{12}$$

Dimana,  $e^o$  tekanan uap jenuh dalam kPa,  $T$  adalah tempertur dan subskrip "s" menandakan permukaan tanaman serta "a" adalah representase udara.

Tabel 1. Berbagai input data dalam pemodelan TRNSYS

LAI	Leaf Area Index (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
$T_f$	Foliage temperature (Kelvin)
$T_g$	Ground surface temperature (Kelvin)
$L_g$	Ground laten heat flux (W/m <sup>2</sup> )
$L_f$	Foliage laten heat flux (W/m <sup>2</sup> )
$H_g$	Ground sensible heat flux (W/m <sup>2</sup> )
$H_f$	Foliage sensible heat flux (W/m <sup>2</sup> )
$I_{ir}$	Long-wave radiation (W/m <sup>2</sup> )
$I_s$	Short-wave radiation (W/m <sup>2</sup> )
$Z$	Soil thickness (m)
$K$	Thermal conductivity of the dry growing media (W/m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$Pa$	Atmospheric pressure (Pa)
$\alpha_f$	Albedo of the canopy
$\alpha_g$	Albedo of the ground surface
$\epsilon_f$	Emmissivity of canopy
$\epsilon_g$	Emmissivity of ground surface
$\sigma_f$	fractional vegetation coverage
$R_v$	gas constant for water vapor (461,53 J/kg K)
$\sigma$	Stefan-Boltzman const. (5,67x10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> .K)

## II. METODE PENELITIAN

### A. TRNSYS

Software TRNSYS (*Transient Simulation of Systems*) dikembangkan oleh *University of Wisconsin-Madison* (Amerika Serikat), *TRANSSOLAR Energytechnic GmbH* (Jerman) dan *CSTB, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment* (Perancis). Dalam software ini terdapat berbagai keunggulan dalam menghitung kebutuhan energi pada suatu bangunan seperti: sistem solar sel dan termal, HVAC, energi terbarukan, *fuel cell* dan sebagainya. TRNSYS17 dipilih dalam melakukan pengujian termohidrik karena program ini telah memiliki kelengkapan-kelengkapan untuk melakukan simulasi objek atap tumbuhan yang tidak dimiliki oleh TRNSYS16. Secara prinsip TRNSYS17 dikembangkan melalui proyek TRNSYS-COMIS (*thermal-air flow*) oleh CSTB, Perancis.

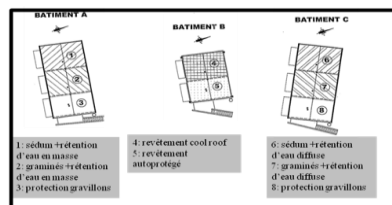
### B. Presentasi bangunan simulasi

Simulasi dinamik dilakukan pada proyek apartemen SIPEA yang terletak di *Fontaine Leconte, Poitou*. Bangunan tersebut terdiri dari 3 blok utama yakni : A, B, C. Bangunan A dan C menggunakan atap konvensional dan atap tumbuhan, sedangkan bangunan B tidak memakai atap tumbuhan.

Dalam penelitian ini pengamatan dipusatkan pada bangunan A yang menggunakan jenis atap tumbuhan tipe ekstensif dan tumbuhan jenis sedum. Gambar 2 memperlihatkan denah dari ke-3 bangunan tersebut.



Gambar 2a. Tampilan proyeksi proyek SIPEA



Gambar 2b. Denah apartemen proyek SIPEA

### C. Simulasi dinamik

Pada penelitian ini dipergunakan berbagai parameter untuk melakukan simulasi dinamik. Parameter-parameter tersebut ditentukan berdasarkan penelitian lapangan yang telah dilakukan melalui proyek *SIPEA*. Tipe atap tumbuhan yang digunakan adalah tipe ekstensif yang menggunakan tanaman jenis sedum. Beberapa

karakteristik tanaman tersebut dan asumsi lain yang digunakan dijelaskan sebagai berikut:

- Albedo daun  $\alpha_f = 0,24$  , refleksitas tanah  $\alpha_g = 0,30$
- Emisifitas daun  $\varepsilon_f = 0,93$ , Emisifitas tanah  $\varepsilon_g = 0,95$
- Densitas udara pada permukaan daun =  $1.2 \text{ kg/m}^3$
- Fluks radiatif sinar matahari melalui gelombang pendek =  $548 \text{ W/m}^2$
- Fluks radiatif sinar matahari melalui gelombang panjang =  $400 \text{ W/m}^2$
- Temperatur (K)
- Kelembaban relatif (%)
- Kecepatan angin (m/s)
- LAI = 1,0 s/d 4,8.
- Tebal lapisan permukaan tanah, Z (m)
- Tahanan stomatik (s/m)
- Konduktivitas tanah (W/m.K)
- Tekanan atmosfer (Pa)

LAI (*vegetative cover*) dan ketebalan tanah (Z) divariasikan berdasarkan pertimbangan bahwa kedua parameter tersebut akan berpengaruh terhadap temperatur ruangan dan penghematan konsumsi energi [1].

Skenario selanjutnya adalah menentukan periode musim dan waktu pengamatan untuk mencari nilai efisiensi yang terbesar jika digunakan atap tumbuhan. Banyak penelitian menyatakan bahwa atap tumbuhan sangat efisien digunakan pada musim panas, diantaranya yang dilakukan di Athena [9]. Namun sebagai bahan pembandingan, kita juga perlu mengamati perilaku termo-hidrik yang terjadi selama musim dingin. Adapun periode musim yang diamati dibagi menjadi beberapa periode waktu, seperti dipaparkan di bawah ini:

- Periode musim dingin
  - 20-31 Desember
  - 01-15 Januari
  - 16-28 Februari
- Periode musim panas
  - 30 Juni- 15 Juli
  - 16 Juli – 31 Juli
  - 01 Agustus – 15 Agustus

Periode musim dingin dipilih pada saat dimana temperatur luar bangunan berada pada kondisi suhu terdingin dibandingkan dengan kondisi lainnya di musim yang sama. Hal ini berkaitan dengan jumlah konsumsi energi yang digunakan oleh alat pemanas ruangan. Pemanas ruangan diatur menyala dengan gain sebesar  $489,9 \text{ kJ/h}$ . Sedangkan pemilihan waktu di musim panas seperti halnya pada musim dingin, didasari kondisi-kondisi pada saat temperatur udara luar mendekati angka maksimal. Saat temperatur udara luar maksimal, maka pemakaian energi untuk alat pendingin ruangan dapat diketahui melalui perbedaan temperatur interior dan eksterior bangunan.

Untuk pengendalian beban harian, simulasi dilakukan dengan pengaturan waktu mulai pukul 06.00 pagi hingga pukul 24.00 malam. Dengan penentuan kondisi-kondisi batas tersebut, diharapkan penelitian akan memperoleh hasil yang paling sesuai dengan keadaan yang sebenarnya. Pemilihan-pemilihan tersebut ditentukan berdasarkan data cuaca dan meteorologi setempat dan biasanya telah tersedia di *database* program TRNSYS.

- Temperatur dan fluks kalor yang diamati:
  - Temperatur ambien rata-rata ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Temperatur rata-rata lantai terbawah ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Temperatur rata-rata lantai ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Temperatur rata-rata atap ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Temperatur maksimum atap ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Temperatur maksimum lapisan tanah ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Temperatur maksimum daun ( $^{\circ}\text{C}$ )
  - Fluks rata-rata total (kJ/h)

Pengamatan temperatur dipilih berdasarkan pertimbangan hasil penelitian yang telah dilakukan, diantaranya oleh A. Niachou et al [9]. Namun dalam penelitian kali ini ada penambahan temperatur tanah dan daun yang sesuai dengan perkembangan program TRNSYS17.

Kemudian, kita juga harus menentukan tipe material atau bahan isolasi yang digunakan oleh bangunan. Tujuannya agar kita dapat memperhitungkan nilai  $U_{\text{tot}}$  yang dihasilkan. Pada tabel 2 dan 3 diketahui tebal total material atap konvensional adalah 0,450 m dan atap tumbuhan adalah 0,530 m. Selanjutnya material-material lapisan isolasi yang digunakan pada proyek SIPEA dijelaskan pada tabel 2 dan 3 di bawah ini.

Tabel 2. Lapisan dinding atap konvensional

Material	Ketebalan (m)	$U_{\text{total}}$
Placo-BA13	0,15	0,108 W/m <sup>2</sup> .K
Celah udara	0,35	
Isolasi	0,315	
Kayu	0,027	
Siporex	0,050	
Feutre	0,008	

Tabel 3. Lapisan dinding atap tumbuhan

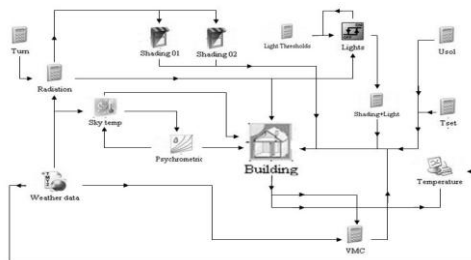
Material	Ketebalan (m)	$U_{\text{total}}$
Placo-BA13	0,15	0,101 W/m <sup>2</sup> .K
Celah udara	0,35	
Isolasi	0,315	
Kayu	0,027	
Siporex	0,050	
Feutre	0,008	
Lapisan tanah	0,080	



Simulasi dinamik dilakukan dengan memasukkan data-data bangunan, yakni: luas lantai  $61,1 \text{ m}^2$ , volume lantai  $135,4 \text{ m}^3$ , orientasi bangunan menghadap selatan, temperatur ruangan yang diharapkan  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , pergantian udara infiltrasi  $0,17/\text{jam}$ , kecepatan udara masuk lantai teratas  $108,4 \text{ kg}/\text{jam}$ . Koefisien konveksi dinding depan dan belakang bangunan adalah  $11 \text{ kJ}/\text{h m}^2.\text{K}$  dan  $64 \text{ kJ}/\text{h m}^2.\text{K}$ . Nilai  $U_{\text{tot}}$  untuk atap konvensional sebesar  $0,108 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$  dan atap tumbuhan sebesar  $0,101 \text{ W}/\text{m}^2.\text{K}$ .

#### D. Diagram alur simulasi

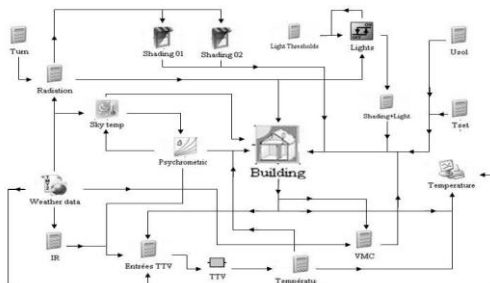
##### 1. Atap konvensional



Gambar 3. Diagram alur simulasi atap konvensional menggunakan TRNSYS16

Pada gambar 3, simulasi dilakukan menggunakan TRNSYS16 untuk membuat skema diagram simulasi atap konvensional. Informasi awal dibuat dengan memasukkan data radiasi matahari, data meteo untuk temperatur harian, kecepatan dan arah angin, tekanan udara atmosfer dan kelembaban relatif. Data awal tersebut misalnya: intensitas sinar matahari langsung ( $I_s$ ) sebesar  $548 \text{ W}/\text{m}^2$ , Intensitas sinar matahari akibat pantulan ( $I_r$ ) sebesar  $400 \text{ W}/\text{m}^2$ , kecepatan angin  $3 \text{ m}/\text{dtk}$ , dan kelembaban relatif awal sebesar  $50 \%$ . Kemudian kita menambahkan kanopi jendela (*shading 01 dan 02*) untuk asumsi bahwa radiasi sinar matahari tidak  $100 \%$  memasuki bangunan. Selanjutnya kita menambahkan beban internal pada gedung berdasarkan gambar perencanaan pada gambar 2.

##### 2. Atap tumbuhan



Gambar 4. Diagram alur simulasi atap tumbuhan menggunakan TRNSYS17

Untuk simulasi atap tumbuhan ditentukan digunakan TRNSYS17 dengan penambahan fitur khusus yakni fitur atap tumbuhan. Dalam fitur ini kita dapat

menambahkan jumlah LAI, ketebalan tanah, kelembaban relatif tanah dan sebagainya. Hingga saat ini fitur atap tumbuhan pada TRNSYS17 masih mengalami proses pengembangan dan juga penambahan fungsi-fungsi numerik.

Pada prinsipnya semua parameter yang kita gunakan pada atap konvensional dan atap tumbuhan harus sama. Parameter yang ditentukan seperti: orientasi bangunan, penggunaan kanopi jendela, penggunaan ventilasi mekanik (VMC), beban lampu, beban pemanas dan beban penghuni serta pengaruh temperatur tanah pada temperatur termik bangunan. Hal yang paling penting adalah penentuan temperatur yang cocok (*temperature of confort*) bagi penghuni gedung yang ditentukan sebesar 20 °C. Temperatur yang nyaman bagi penghuni agar diperoleh kebutuhan energi tahunan yang sesuai dengan karakteristik bangunan.

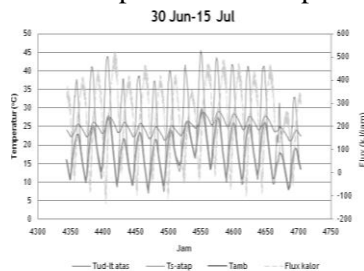
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini kami tertarik untuk mengamati hasil simulasi dinamik yang terjadi selama musim panas dan musim dingin, tetapi fokus utama ditujukan untuk pengamatan musim panas. Kemudian hasil simulasi yang diperoleh dari atap konvensional dan atap tumbuhan kemudian dibandingkan berdasarkan fenomena-fenomena yang terjadi.

#### A. Atap konvensional

##### 1. Periode musim panas

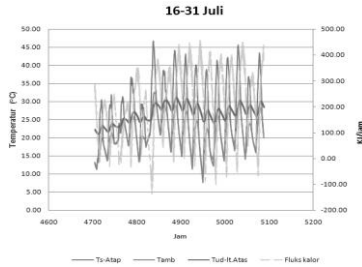
Seperti yang telah dipaparkan di atas, simulasi yang dilakukan pada atap konvensional menggunakan TRNSYS16. Hasil simulasi dinamik dirancang menyesuaikan kondisi bangunan yang terstandarisasi dengan baik, menggunakan isolasi dinding dan atap yang paling moderen serta orientasi arah bangunan yang paling realistis terhadap sudut matahari. Analisa dilakukan dengan mempertimbangkan dua periode musim yang terjadi pada objek pengamatan. Berikut hasil simulasi yang diperoleh selama periode musim panas: durasi 30 juni s/d 15 Juli.



Gambar 5. Simulasi periode 30 juni-15 juli

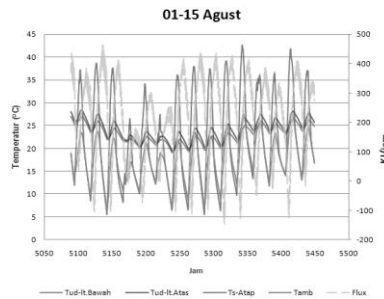
Pada gambar 5 diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa temperatur rata-rata lantai atas mencapai 25 °C, sementara suhu udara luar rata-rata berada pada suhu 18 °C. Kondisi ini menunjukkan pula bahwa temperatur atap mengalami fluktuasi.

Gambar 6 menjelaskan pula bahwa periode tanggal 30 juni sampai 15 juli temperature atap bangunan bisa mendekati angka 45 °C dan fluks rata-rata yang dihasilkan adalah 231 kJ/h.



Gambar 6. Simulasi periode 16-31 Juli

Berdasarkan hasil simulasi itu pula diketahui bahwa temperatur atap pada periode 16-31 juli adalah maksimal dengan angka 47 °C, sementara temperatur rata-rata lantai bawah dan atas sebesar 26 dan 27 °C. Adapun fluks yang dihasilkan selama periode tersebut berada pada angka 200 kJ/h.



Gambar 7. Simulasi periode 1-15 Agustus

Pada gambar 7 diketahui bahwa temperatur atap yang dihasilkan pada periode ini sebesar 43 °C, temperatur tersebut lebih rendah dibandingkn temperatur hasil dari dua periode sebelumnya. Dari hasil ini diperoleh juga fluks kalor sebesar 205 kJ/h. Temperatur rata-rata lantai bawah dan atas sebesar 23 dan 24 °C. Ringkasan hasil dari ketiga periode waktu di musim panas pada atap konvensional dijelaskan melalui tabel 4 di bawah ini:

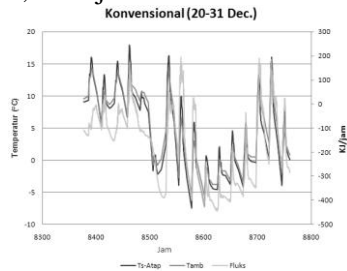
Tabel 4. Temperatur dan fluks kalor pada periode musim panas

	30 Juni- 15 Juli	16-31 Juli	1-15 Agust
Temp. Amb rata-rata (°c)	18	21	17
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	24	26	23
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	25	27	24

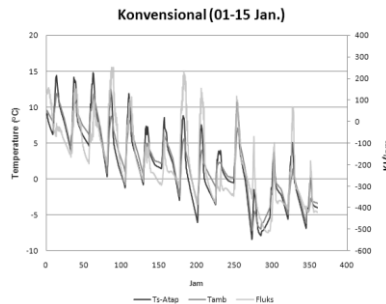
	30 Juni- 15 Juli	16-31 Juli	1-15 Agust
Temp. Rata-rata Atap (°c)	24	26	22
Temp. Maks. Atap (°c)	45	47	43
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	231 (23,1)	200 (20)	205 (20,5)

## 2. Periode musim dingin

Pada periode ini, hasil simulasi diambil berdasarkan tiga periode waktu dimusim dingin yakni: 20-31 desember, 1-15 januari dan 16-28 Pebruari.



Gambar 8. Simulasi periode 20-31 Desember



Gambar 9. Simulasi periode 1-15 Januari

Pada gambar 8 dan tabel 4, periode 20-31desember diperoleh bahwa temperatur maksimum atap dan lantai terbawah sebesar 18 dan 19 °C, sedangkan temperatur lingkungan mendekati suhu 4 °C. Dibandingkan dengan keadaan pada periode tanggal 1 sampai dengan 15 januari yang menghasilkan temperatur maksimum atap sebesar 15 °C dan temperatur lantai atas rata-rata sebesar 19 °C. Selain itu, simulasi dinamik juga mendapatkan nilai fluks sebesar 190 kJ/h, seperti ditunjukkan pada gambar 9 dan tabel 4.

Tabel 5. Temperatur dan fluks kalor pada periode musim dingin

Kondisi Bangunan	20-31 Des	01-15 Jan	16- 28 Peb
Temp. Amb rata-rata (°c)	4	2	7

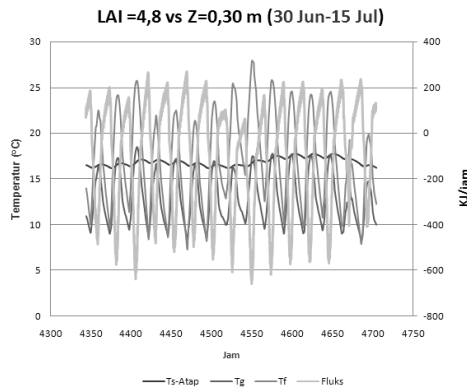
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	19	19	19
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	19	19	19
Temp. Rata-rata Atap (°c)	4	2	8
Temp. Maks. Atap (°c)	18	15	21
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-174 (-17,4)	-190 (-19,0)	-65 (-6,5)

Dari pengamatan di dua musim yang berbeda diketahui bahwa temperatur atap pada atap konvensional cenderung mengalami fluktuasi. Besar kecilnya fluktuasi tergantung pada perbedaan temperatur di dalam dan di luar ruangan. Hal ini telah dijelaskan pula oleh H.F.Castelon et al [20].

**B. Atap tumbuhan**

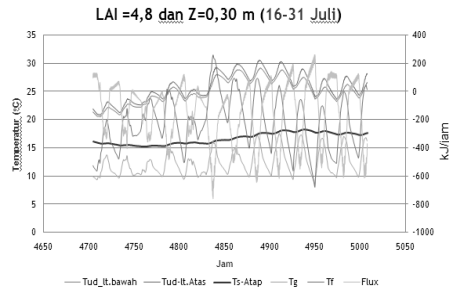
Seperti halnya atap konvensional, pada atap tumbuhan kita menentukan periode simulasi dinamik berdasarkan pada beberapa waktu periode di musim dingin dan panas. Hasil penelitian yang dipaparkan di bawah ini adalah pengamatan yang pada umumnya difokuskan pada ketebalan tanah 30 cm dan LAI 4,8.

1. Periode musim panas

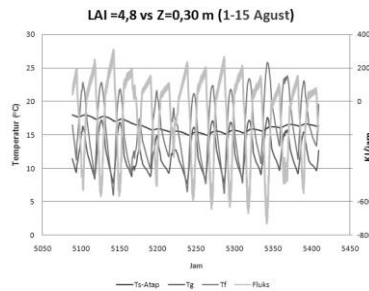


Gambar 11. Simulasi LAI 4,8 dan Z 0,3 m pada periode 30 juni-15 juli

Gambar 11 menunjukkan bahwa temperatur tumbuhan dan tanah terus mengalami fluktuasi terhadap kondisi lingkungan. Begitu pula peristiwa fluktuasi yang terjadi pada fluks. Besarnya fluks yang meninggalkan dan memasuki gedung dikarenakan perbedaan temperatur interior dan eksterior. Sebaliknya temperatur atap tidak mengalami fluktuasi yang berarti atau relatif stabil dibandingkan dua fenomena sebelumnya. Stabilitas temperatur atap bangunan dengan menambahkan atap tumbuhan telah diteliti misalnya oleh S.-E. Ouldboukhitine et al [17].



Gambar 12. Simulasi LAI 4,8 dan Z 0,3 m pada periode 16-31 juli



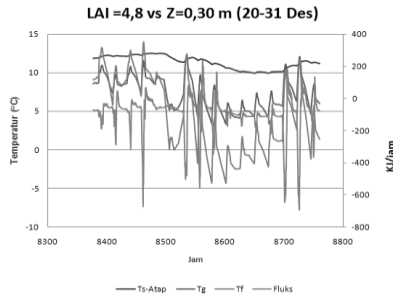
Gambar 13. Simulasi LAI 4,8 dan Z 0,3 m pada periode 1-15 agustus

Tabel 6. Temperatur dan fluks kalor pada periode musim panas

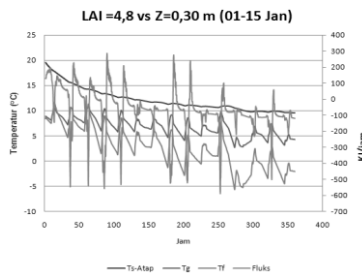
Kondisi Bangunan	30 jun- 15 jul.	16-31 Juli	1-15 Agust
	Z=0,30	Z=0,30	Z=0,30
Temp. Amb rata-rata (°c)	18	21	17
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	24	25	23
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	25	26	23
Temp. Rata-rata Atap (°c)	17	17	16
Temp. Maks. Atap (°c)	18	18	18
Temp. Rata-rata tanah (°c)	13	12	12
Temp. Rata-rata daun (°c)	17	20	16
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-89 (-8,9)	-139 (-13,9)	-64 (-6,4)

Tabel 6 menjelaskan pengaruh ketebalan tanah terhadap teperatur atap dan perpindahan energi yang terjadi selama periode musim dingin. Dengan mengambil sampel ketebalan tanah 30 cm dan LAI 4,8 diperoleh temperatur rata-rata atap adalah 18 °C, sementara perpindahan fluks yang terbesar terjadi pada tanggal 16-31 jul. Pada periode ini fluks yang berpindah dari gedung sebesar -139 kJ/h.

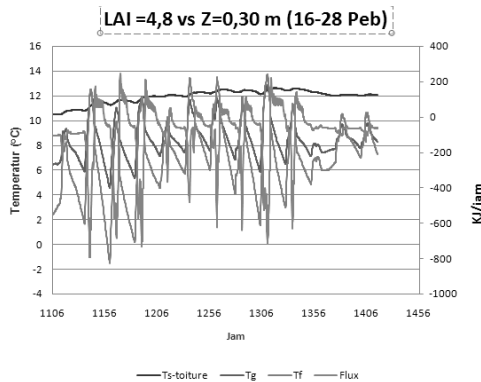
2. Periode musim dingin



Gambar 14. Simulasi LAI 4,8 dan Z 0,3 m pada periode 20-31 desember



Gambar 15. Simulasi LAI 4,8 dan Z 0,3 m pada periode 1-15 januari



Gambar 16. Simulasi LAI 4,8 dan Z 0,3 m pada periode 16-28 Pebruari

Pada gambar 14,15 dan 16 mendeskripsikan perilaku temperatur dan fluks yang terjadi selama periode musim dingin. Pada saat temperatur lingkungan mendekati nol, temperatur rata-rata atap berada sekitar 11- 12°C. Selanjutnya kita dapat melihat bahwa tempertur rata-rata ruangan lantai atas sebesar 19°C. Tempertur ini hanya berbeda 1°C dengan temperatur *comfort* yang telah ditentukan.

Tabel 7. Temperatur dan fluks kalor pada periode musim dingin

Kondisi Bangunan	20-31 Des.	01-15 Jan.	16-28 Peb
	Z=0,30	Z=0,30	Z=0,30
Temp. Amb rata-rata (°c)	4	2	7
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	19	19	19
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	19	19	19
Temp. Rata-rata Atap (°c)	11	12	12
Temp. Maks. Atap (°c)	13	19	13
Temp. Rata-rata tanah (°c)	7	7	8
Temp. Rata-rata daun (°c)	4	3	7
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-90 (-9,0)	-63 (-6,3)	-86 (-8,6)

Berdasarkan hasil simulasi yang dipaparkan pada tabel 6 dan 7 diperoleh bahwa penghematan energi yang paling besar terjadi pada periode musim panas. Hasil ini sesuai dengan berbagai penelitian yang telah dilakukan terhadap atap tumbuhan [1, 9, 11, 12].

### 3. Variasi ketebalan tanah(Z) terhadap LAI

Ketebalan tanah atau substrat diketahui memiliki pengaruh yang besar terhadap proses evapotranspirasi dan perpindahan kalor konduksi yang terjadi dari lingkungan menuju gedung ataupun sebaliknya. Sedangkan LAI memiliki sifat yang baik dalam mengatur konveksi dan radiasi sinar matahari melalui gelombang pendek.

Tabel 8. Fungsi LAI dan Z pada kondisi temperatur maksimum atap (periode 16-31 Juli)

LAI	Z=0,177	Z=0,20	Z= 0,25	Z= 0,30
1,0	23	22	21	21
1,4	23	22	20	19
1,8	23	22	22	19
2,0	23	22	20	20
2,4	22	21	21	20
2,8	22	22	21	20
3,0	22	21	21	19
3,2	22	21	20	19
3,4	22	21	20	19
3,8	22	21	21	18
4,0	22	22	20	18
4,2	22	21	21	18
4,4	22	21	19	18
4,8	22	21	19	18



Tabel 8 menunjukkan pengaruh ketebalan tanah dan LAI terhadap temperatur atap. Berdasarkan hasil ini diketahui bahwa peningkatan jumlah LAI dan penambahan ketebalan tanah semakin menurunkan temperatur atap.

Tabel 9. Hasil simulasi variasi ketebalan tanah (Z) dan LAI 4,8 pada periode 30 juni-15 juli

Kondisi bangunan	Z=0,177	Z=0,20	Z=0,25	Z=0,30
Temp. Amb rata-rata (°c)	18	18	18	18
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	24	24	24	24
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	25	25	25	25
Temp. Rata-rata Atap (°c)	21	20	18	17
Temp. Maks. Atap (°c)	22	20	19	18
Temp. Rata-rata tanah (°c)	19	17	15	13
Temp. Rata-rata daun (°c)	18	18	17	17
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-3 (-0,3)	-27 (-2,7)	-64 (-6,4)	-89 (-8,9)

Tabel 10. Hasil simulasi variasi ketebalan tanah (Z) dan LAI 4,8 pada periode 16-31 juli

Kondisi bangunan	Z=0,177	Z=0,20	Z=0,25	Z=0,30
Temp. Amb rata-rata (°c)	21	21	21	21
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	25	25	25	25
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	26	26	26	26
Temp. Rata-rata Atap (°c)	20	19	18	17
Temp. Maks. Atap (°c)	22	21	19	18
Temp. Rata-rata tanah (°c)	18	16	14	12
Temp. Rata-rata daun (°c)	20	20	20	20
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-54 (-5,4)	-78 (-7,8)	-114 (-11,4)	-139 (-13,9)

Tabel 11. Hasil simulasi variasi ketebalan tanah (Z) dan LAI 4,8 pada periode 1-15 agustus

Kondisi bangunan	Z=0,177	Z=0,20	Z=0,25	Z=0,30
Temp. Amb rata-rata (°c)	17	17	17	17
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	23	23	23	23
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	24	24	23	23
Temp. Rata-rata Atap (°c)	20	19	17	16
Temp. Maks. Atap (°c)	22	21	19	18
Temp. Rata-rata tanah (°c)	18	16	14	12

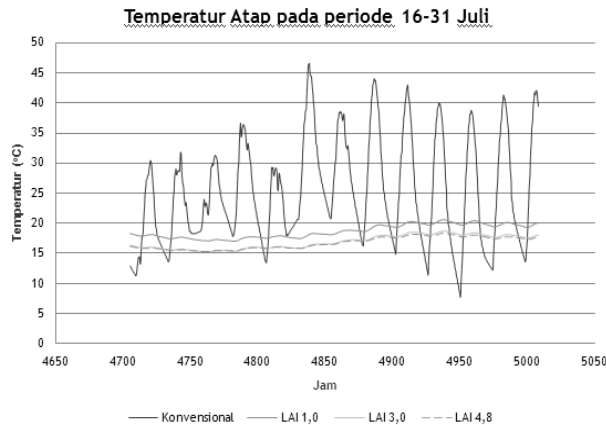
Temp. Rata-rata daun (°c)	17	16	16	16
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	19 (1,9)	-4 (-0,4)	-40 (-4,0)	-64 (-6,4)

Tabel 9,10 dan11 memaparkan hasil pengujian dari tiga skenario di musim panas. Fluks yang dihasilkan oleh setiap periode berbeda-beda tergantung pada variasi ketebalan tanah.

Fluks yang terendah dihasilkan pada periode tanggal 30 juni-15 juli dan yang tertinggi pada periode 16-31 juli. Sementara temperatur rata-rata lantai atas yang terbesar terjadi pada periode yang sama (16-31 juli) yaitu 26 °C.

### C. Perbandingan atap konvensional dan atap tumbuhan serta harga ketidaknyamanan

Karakteristik dan hasil yang diperoleh dari atap tumbuhan dan atap konvensional adalah berbeda dan bergantung pada kondisi bangunan dan periode musim. Pada perbandingan kali ini, kita akan mengamati hasil simulasi saat musim panas. Temperatur mengalami puncaknya disaat periode tanggal 16-31 juli.



Gambar 17. Perbandingan temperatur atap pada atap konvensional dan fungsi LAI atap tumbuhan

Pada gambar 17 diperlihatkan bahwa fluktuasi temperatur yang terjadi pada model atap tradisional dan atap tumbuhan berbeda secara ekstrim. Grafik warna merah menunjukkan fluktuasi temperatur atap pada model atap konvensional. Temperatur minimum bisa mendekati 6°C dan temperatur maksimum dapat melebihi 45°C. Sementara untuk model atap tumbuhan, temperatur atap cenderung konstan dan besar kecilnya dipengaruhi oleh nilai LAI [1,17].

Tabel 12. Perbandingan antara atap konvensional dan atap tumbuhan selama periode musim dingin

Kondisi bangunan	20-31 des.		01-15 Jan.		16-28 Feb	
	AT	non AT	AT	non AT	AT	non AT
Temp. Amb rata-rata (°c)	4	4	2	2	7	7
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	19	19	19	19	19	19
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	19	19	19	19	19	19
Temp. Rata-rata Atap (°c)	11	4	12	2	12	8
Temp. Maks. Atap (°c)	13	18	19	15	13	21
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-90 (-9,0)	-174 (-17,4)	-63 (-6,3)	-190 (-19)	-86 (-8,6)	-65 (-6,5)

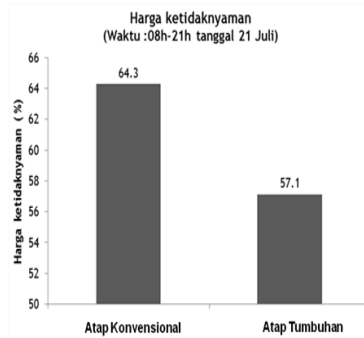
Keterangan: AT = atap tumbuhan, non AT = atap konvensional

Pada tabel 12 diperlihatkan bahwa penghematan energi terbesar justru terjadi pada model atap konvensional. Sebaliknya, pada malam hari temperatur lingkungan di sekitar permukaan daun justru memberikan efek pendinginan pada gedung [19] yang berdampak pada penambahan daya pemanas ruangan.

Tabel 13. Perbandingan antara atap konvensional dan atap tumbuhan selama periode musim panas

Kondisi bangunan	30 Juni 15 Juli		16-31 Juli		1-5 Agust	
	AT	non AT	AT	non AT	non AT	AT
Temp. Amb rata-rata (°c)	18	18	21	21	17	17
Temp. Rata-rata lantai bawah (°c)	24	24	25	26	23	23
Temp. Rata-rata lantai atas (°c)	25	25	26	27	23,5	24
Temp. Rata-rata Atap (°c)	17	24	17	26	16	22
Temp. Maks. Atap (°c)	18	45	18	47	18	43
Fluks total rata-rata (kJ/h) atau kWh	-89 (-8,9)	231 (23,1)	-139 (-13,9)	200 (20)	-64 (-6,4)	205 (20,5)

Tabel 13 melukiskan bahwa atap tumbuhan dapat menjaga stabilitas temperatur internal gedung dan dapat menyediakan potensi energi. Seperti yang dijelaskan oleh FIBRE [11]



Gambar 18. Penurunan harga ketidaknyaman akibat penggunaan atap tumbuhan

Gambar 18 menunjukkan bahwa penggunaan atap tumbuhan pada puncak musim panas dapat menurunkan harga ketidaknyaman penghuni bangunan. Jika kita menggunakan model atap konvensional maka tingkat ketidaknyamanan diperoleh sebesar 64,3 %. Sedangkan jika kita menggunakan atap tumbuhan maka nilai ketidaknyamanan dapat direduksi menjadi 57,1 %. Hasil ini ditentukan melalui pemilihan temperatur maksimum dan nyaman bagi anggota tubuh manusia. Temperatur maksimum ditentukan berdasarkan standar kenyamanan termal bagi orang Eropa yakni 28°C.

Selama periode puncak di musim panas, efisiensi energi yang diperoleh dengan menambahkan atap tumbuhan pada gedung adalah 33,7 %.

#### IV. KESIMPULAN

- Atap tumbuhan memiliki temperatur permukaan atap yang lebih kecil dibandingkan dengan temperatur permukaan atap konvensional.
- LAI dan ketebalan lapisan tanah dapat mengurangi konsumsi energi tahunan pada suatu gedung.
- Atap tumbuhan dapat meredam sinar radiasi matahari pada permukaan atap, kemudian meningkatkan faktor nyaman bagi tempat hunian

#### V. DAFTAR PUSTAKA

D.J.Sailor. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*. 40, 1466-1478. Portland,OR,USA, 2008.

- J. Mentens, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning* 77 (2006) 217–226.
- V. Stovin, N. Dunnett, A. Hallam, Green Roofs—getting sustainable drainage off the ground, in: *6th International Conference of Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Mangement (Novatech 2007)*, Lyon, France, 2007, pp. 11–18.
- J.C. Berndtsson, L. Bengtsson, K. Jinno, Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs, *Ecological Engineering* 35 (3) (2009) 369–380.
- J. Yang, Q. Yu, P. Gong, Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago, *Atmospheric environment* 42 (31) (2008) 7266–7273.
- A. Teemusk, U. Mander, Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia, *Building and Environment* 44 (3) (2009) 643–650.
- D. Banting et al., Report on the environmental benefits and costs of green rooftechnology for the City of Toronto, 2005.
- M. Koehler, Plant survival research and biodiversity: lessons from Europe, in: *Greening Rooftops for Sustainable Communities*, Chicago, 2003, pp. 313–322.
- A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy Performance. Athens, Greece, 2001.
- Wong et al, Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Building and Environmental* 45(2010) 663-672. Singapura, 2010.
- FIBRE-Findings in Built and Rural Environments, Can Greenery Make Commercial Buildings More Green. Cambridge University, 2007
- M. Santamouris, et al., Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece, *Energy* 32 (2007) 1781–1788.
- Del Barrio EP. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings* 1998;27(2):179e93.

161 *Abdul Rahman, Kajian Numerik Perilaku Termo-HIDRIK dan Investigasi Energi pada Atap Tumbuhan menggunakan Simulasi Dinamik TRNSYS*

S.Frankenstein, G.Koenig, FASST vegetation models, U.S Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory (ERDC/CRREL), Technical Report TR-04-25,2004.

Deardoff JW. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture,with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research* 1978;83(C4):1889e903

Varado N, Braud I, Ross PJ, Haverkamp R. Assessment of an efficient numerical solution of the 1D Richard's equation on bare soil. *Journal of Hydrology* 2006;323:244e57.

S.-E. Ouldboukhitine et al. Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer Model.*Building and Environment* 46 (2011) 2624e2631

David MS, Jennifer MJ. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 2005;308:81e104.

N.H. Wong, et al., The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore, *Energy and Buildings* 35 (4) (2003) 353–364.

H.F.Castelon, V.Stovin, S.B.M.Beck, J.B Davison. Green roofs : building energy savings and the potential retrofit. *Energy and Buildings*. 42, 1582-1591. Sheffield,UK, 2010.