

**PERANAN RUANG TERBUKA HIJAU DALAM MENGENDALIKAN SUHU UDARA DAN
URBAN HEAT ISLAND WILAYAH JABOTABEK**

S. Effendy.¹, A. Bey, .², A.F.M. Zain³, I. Santosa²

**(The Role of Urban Green Space in Harnessing Air Temperature and Urban Heat Island.
Exemplified By Jabotabek Area)**

¹ Mahasiswa Sekolah Pascasarjana IPB Program Studi Agroklimatologi IPB

² Staf pengajar Program Studi Agroklimatologi IPB

³ Staf Pengajar Program Studi Arsitektur Lansekap IPB

ABSTRAK

Penelitian bertujuan mengestimasi hubungan suhu udara dan ruang terbuka hijau (RTH) menggunakan data Landsat; mengkaji kontribusi RTH, kepadatan populasi, luasan urban dan kepadatan kendaraan terhadap *urban heat island* (UHI) dan mengkuantifikasi dampak UHI terhadap perubahan indeks kenyamanan (THI), dan neraca energi permukaan Jakarta, kota dan kabupaten Bogor, Tangerang dan Bekasi (Jabotabek). Tahapan penelitian meliputi: (1) Ekstraksi nilai suhu udara dan NDVI dari data Landsat, berdasar NDVI dibangkitkan nilai RTH, lalu estimasi hubungan RTH dan suhu udara (2) Uji regresi berganda, analisis komponen utama (PCA dan rotasi *varimax* mengungkap kontribusi terbesar peubah prediktor terhadap UHI (3) Kuantifikasi dampak UHI: THI dan neraca energi permukaan. Estimasi hubungan suhu udara dan RTH dengan R^2_{adj} dan simpangan baku model (S) menghasilkan persamaan terpilih *non-linier* kubik untuk Jabotabek. Pengurangan RTH 10-50% menyebabkan suhu udara naik 0,2-1,8 °C. Sebaliknya RTH bertambah 10-50%, suhu turun 0,1-0,5 °C. Kepadatan kendaraan kontibutor dominan UHI di Jakarta, perluasan urban pemicu UHI Bogor dan pengurangan RTH penyebab UHI di Tangerang dan Bekasi. Peningkatan UHI sebesar 1,0 °C menyebabkan THI naik 4,9 °C, fluks G 80,5 Wm⁻² dan fluks H sebesar 73,3 Wm⁻².

Kata kunci: Jabotabek, Ruang terbuka hijau, Suhu udara, *Temperature humidity index*, *Urban heat island*,

ABSTRACT

This study attempts to develop a functional relationship between air temperature and urban green space using Landsat data. It also aims to estimate the contributions of various forcings, namely, urban green space, population density, urban area, and automobile densities on urban heat island. Subsequently, the impact of urban heat island on temperature humidity index will be assessed quantitatively, followed by surface energy budget analysis of Jabotabek area. Air temperature series are derived from Landsat data, including the NDVI which is used as the bases in generating urban green space of the study area. Principal Component Analysis is utilized in order to establish the relative importance of forcing variables on urban heat island; in order to simplify the structure of factor loadings a varimax rotation is carried out. It is found that air temperature and urban green space for the study area is best represented by a nonlinear equation when a maximum coefficient determination (R^2_{adj}) and a minimum standard deviation (S) are to be fulfilled. A 10 to 50% reduction in urban green space would bring air temperature to raise between 0,2 to 1,8 °C. It is

Penyerahan naskah : 3 Maret 2006

Diterima untuk diterbitkan : 9 Mei 2006

interesting to note that this study reveals the same percentage increase in urban green space would only lower the temperature by 0,1 to 0,5 °C. Automobile density is found to be the most important forcing for urban heat island in Jakarta; on the other hand, urban green space is the most dominant forcing in Tangerang and Bekasi. Surface energy budget analysis indicated that the an increase of 1,0 °C in urban heat island would result in additional 80,3 and 69,0 Wm⁻² sensible heat fluxes to submedium (G) and to air, respectively.

Key words: Jabotabek, Air temperature, Urban green space, Urban heat island, temperature humidity index,

PENDAHULUAN

Ruang Terbuka Hijau (RTH) Jabotabek berkurang 23% selama periode 1972-1997. Dalam periode yang sama terjadi peningkatan lahan terbangun (*urban*) sebesar 23% (Zain, 2002). Pengurangan RTH diduga salah satu penyebab peningkatan suhu udara. Diperlukan penelitian untuk membuktikan dugaan tersebut.

Peningkatan suhu udara perkotaan merupakan fenomena *Urban Heat Island* (UHI), yakni peningkatan suhu udara perkotaan (*urban*) dibanding wilayah *suburban* dan *rural*. Menggunakan istilah UHI karena secara visual pada peta isotherm, *urban* dengan suhu tertinggi seperti pulau (Voogt, 2002). Kajian UHI dengan pendekatan analisis data stasiun cuaca telah dilakukan Santosa (1998). Suhu udara kota Jakarta lebih tinggi 0,02-1,0 °C dibandingkan wilayah *suburban/rural*. Dalam studi ini analisis dilakukan dengan menggunakan data pengideraan jauh. Kelebihan penginderaan jauh dalam hal penyediaan data spasial rapat dengan akurasi baik telah dibuktikan oleh Streutker (2003). Beberapa peneliti (Quattrochi *et al*, 2000; Voogt, 2002) memperkirakan bahwa pengurangan RTH dan kepadatan populasi, luasan urban serta kepadatan kendaraan dapat menimbulkan UHI. Dampak UHI secara lokal terhadap perubahan kenyamanan dan neraca energi diungkap oleh Voogt (2002) untuk wilayah nontropis. Perlu kajian dampak UHI terhadap *Temperature Humidity Index* (THI) untuk mengetahui perubahan kenyamanan dan kajian neraca energi permukaan perkotaan wilayah tropis.

Identifikasi permasalahan meliputi: (1) Bagaimanakah bentuk hubungan fungsional antara RTH dan suhu udara? (2) Bagaimana kontribusi RTH, peningkatan kepadatan populasi, luasan urban dan kendaraan perkotaan terhadap UHI? (3) Bagaimana dampak fenomena UHI terhadap perubahan THI dan perubahan neraca energi? Penelitian bertujuan untuk : (1) Mengestimasi hubungan suhu udara dan RTH menggunakan data Landsat, (2) Mengkaji kontribusi RTH, kepadatan populasi, luasan urban dan kepadatan kendaraan terhadap fenomena UHI, (3) Mengkuantifikasi dampak UHI terhadap THI dan neraca energi permukaan wilayah Jabotabek.

METODOLOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu

Kajian pustaka serta pengumpulan, pengolahan, analisis, interpretasi, kalibrasi dan verifikasi data dan penulisan laporan di Laboratorium Meteorologi dan Kualitas Udara, Departemen GFM dan di Laboratorium Arsitektur Lansekap-Fakultas Pertanian IPB. Periode penelitian dimulai Desember 2005.

Alat dan Bahan

Alat analisis yang diperlukan adalah seperangkat komputer pengolah angka, kata dan gambar serta untuk mengekstrak data NDVI, RTH, suhu permukaan, neraca energi, suhu udara dan THI. Sedangkan Bahan-bahan yang digunakan antara lain: Citra Landsat path/raw : 122/64-65 (JABOTABEK) akuisisi 1 Juli 1991, 20 Juli 1997 dan 23 Juli 2004. Peta administrasi JABOTABEK skala 1: 25.000. Data jumlah penduduk dan kendaraan Jabotabek (1970-2004). Data suhu udara (1970-2004) Jabotabek sebagai data referensi dan kalibrasi hasil estimasi suhu udara, dan data suhu udara 2005 untuk verifikasi model.

Metodologi Penelitian

Estimasi Hubungan RTH dan Suhu Udara

Tahapan penelitian untuk mencapai tujuan pertama : (1) Pemulihan citra (*image restoration*) meliputi koreksi radiometrik, geometrik dan penajaman citra (*image enhancement*), (2) Pemotongan citra menggunakan peta administrasi Jabotabek, (3) Pada kanal 3 dan 4 dilakukan ekstraksi nilai NDVI dengan rumus: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$, (4) Berdasarkan Persamaan: $RTH(\%) = 382,4 NDVI + 20,793$; Zain (2002), data RTH dibangkitkan, (5) Pada kanal 1, 2 dan 3 diekstrak neraca energi sehingga R_{s-in} , R_{s-out} dan R_{l-in} , R_{l-out} serta R_n diperoleh. Berdasarkan R_n didapatkan G , H dan λE , (6) Pada kanal 6 diekstrak nilai suhu permukaan, berdasar suhu permukaan dan fluks energi H nilai suhu udara (T_a) dihitung. Agar sesuai data observasi stasiun iklim dilakukan kalibrasi (7) Metode estimasi hubungan suhu udara dan RTH adalah mencari persamaan kedua peubah, linier, kuadratik atau kubik berdasar nilai koefisien determinasi terkoreksi (R^2_{adj}) dan standar deviasi model (S). Makin tinggi R^2_{adj} dan makin kecil nilai S model makin baik (Drapper dan Smith, 1992).

Kontribusi RTH, Kepadatan Populasi, Luasan Urban, dan Kepadatan Kendaraan terhadap Fenomena UHI

Tahapan untuk mencapai tujuan dua: (1) Penentuan peubah respon UHI; (2) Penentuan peubah prediktor RTH (X_1); kepadatan populasi (X_2); luasan urban (X_3); dan kepadatan kendaraan (X_4), (3) Uji korelasi antar Y dengan masing-masing X_i dan antar peubah X_i . Bila antar peubah prediktor berkorelasi nyata (multicollinearity) dilakukan metode Principal Components Analysis (PCA) (von Storch and Zwiers, 1999,) meliputi: (a) Penghitungan matriks korelasi R peubah asal, akar ciri dan persentase keragaman peubah asal dan komponen utama, (b) Penentuan komponen utama penting, berdasar nilai akar ciri > 1 atau persentase keragaman kumulatif mencapai $\geq 80\%$, (c) Penghitungan koefisien korelasi (*factor loading*), rotasi koefisien korelasi, koefisien pembobot (*characteristic vector*) serta penentuan skor komponen utama, (d) Penentuan persamaan UHI dan prediktor baru, serta mengkaji kontributor dominan.

Kuantifikasi Dampak UHI terhadap THI dan Neraca Energi Permukaan

Penentuan nilai R_n , fluks G , fluks H dan λE dilakukan saat penghitungan tujuan pertama. Dilanjutkan dengan mencari bentuk hubungan UHI dan THI serta UHI dan neraca energi (fluks G dan H).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentuk hubungan RTH dan suhu udara terpilih

Hasil estimasi bentuk hubungan RTH dan suhu udara didapatkan bentuk terbaik berupa persamaan non-linier kubik, dengan nilai R^2 terkoreksi tertinggi dan standar deviasi model (S) terendah, untuk ke-tujuh wilayah otonomi disajikan pada Tabel 1.

Berdasarkan Tabel 1 interpretasi bentuk hubungan suhu udara dan RTH menunjukkan pengurangan RTH menyebabkan suhu udara naik, sebaliknya penambahan RTH penyebab suhu turun dengan laju non-linier kubik. Secara rinci lihat Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa laju naik dan turunnya suhu udara tertinggi terjadi di kota Tangerang, disusul Jakarta, kab. Tangerang, kota dan kab. Bogor terakhir kota dan kab. Bekasi. Tangerang permukaannya relatif kering dibanding lokasi lain sehingga udaranya cepat panas dan cepat dingin, bandingkan Bogor (banyak RTH) dan Bekasi (banyak badan air/sawah) relatif udaranya lambat panas juga dingin.

Penjelasan secara ilmiah mengenai laju naik atau turunnya suhu udara akibat pengurangan atau penambahan RTH adalah mengikuti hukum pendinginan Newton (Holman and White, 1992) secara matematis sebagai:

$$q = hA(T_o - T_1)$$

Di mana, q merupakan laju pemanasan atau pendinginan udara, h koefisien transfer panas lewat konveksi, A luasan RTH yang dikaji, T_o suhu udara awal, T_1 suhu udara akhir. Bila dikaji nilai perubahan suhu udara rumusan tersebut dapat dituliskan kembali sebagai:

$$dT = \frac{q}{hA}$$

Pada kondisi q konstan sedangkan RTH berkurang nilai perubahan suhu udara menjadi besar, hal ini berarti suhu akhir > suhu awal, sehingga pengurangan RTH menyebabkan peningkatan suhu udara. Sementara pada saat terjadi penambahan RTH nilai A pada rumus di atas menjadi lebih besar dan membawa dampak terhadap makin kecilnya dT atau nilai suhu udara akhir mendekati nilai T awal, dengan kata lain suhu udara mengalami pendinginan akibat penambahan RTH.

Tabel 1. Bentuk persamaan terpilih hubungan RTH dan suhu udara

No	Wilayah	Persamaan	R^2_{adj}	S
1	Jakarta	$T_a = 27,45 - 0,007399RTH + 0,00022RTH^2 - 0,000004RTH^3$	98	0,04
2	Kota Bogor	$T_a = 27,36 - 0,00822RTH + 0,000152RTH^2 - 0,000002RTH^3$	99	0,01
3	Kab. Bogor	$T_a = 27,16 - 0,008422RTH + 0,000145RTH^2 - 0,000002RTH^3$	99	0,01
4	Kota Tangerang	$T_a = 27,43 - 0,0156RTH + 0,000269RTH^2 - 0,000003RTH^3$	99	0,01
5	Kab. Tangerang	$T_a = 27,16 - 0,012RTH + 0,000196RTH^2 - 0,000002RTH^3$	99	0,01
6	Kota Bekasi	$T_a = 27,33 - 0,004782RTH + 0,000028RTH^2 - 0,000001RTH^3$	99	0,02
7	Kab. Bekasi	$T_a = 27,23 - 0,003754RTH + 0,000049RTH^2 - 0,000001RTH^3$	99	0,02

Tabel 2. Perubahan suhu udara akibat perubahan RTH

No	Δ RTH (%)	Δ Ta($^{\circ}$ C) JKT	Δ Ta($^{\circ}$ C) KoBGR	Δ Ta($^{\circ}$ C) KaBGR	Δ Ta($^{\circ}$ C) KoTGR	Δ Ta($^{\circ}$ C) KaTGR	Δ Ta ($^{\circ}$ C) KoBKS	Δ Ta ($^{\circ}$ C) KaBKS
1	-50	1,4	1,0	1,0	1,8	1,3	0,5	0,4
2	-40	0,9	0,7	0,7	1,3	0,9	0,3	0,3
3	-30	0,5	0,4	0,4	0,8	0,6	0,2	0,2
4	-20	0,3	0,2	0,2	0,4	0,3	0,1	0,1
5	-10	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0
6	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	+10	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,0
8	+20	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1
9	+30	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2	-0,1
10	+40	-0,2	-0,2	-0,2	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
11	+50	-0,3	-0,3	-0,3	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2

Sedangkan penyebab laju naiknya suhu akibat pengurangan RTH mempunyai laju lebih besar dibanding laju turunnya akibat penambahan RTH, karena pada saat RTH bertambah proses penutupan lahan urban dengan revegetasi tidak serta merta setara dengan penutupan RTH yang ada, vegetasi baru dalam proses pertumbuhan memerlukan waktu tahunan untuk mencapai dewasa atau menaungi permukaan. Sehingga laju pendinginan berjalan lebih lambat, terindikasi pada nilai suhu akhir berkurang sedikit, yaitu penambahan RTH 50% suhu berkurang 0,32 $^{\circ}$ C(Jakarta). Namun pada saat pengurangan RTH maka serta merta permukaan lahan urban terbuka dalam waktu singkat berakibat pada laju transfer panas ke udara lewat konveksi menjadi lebih cepat. Akibatnya nilai perubahan suhu (dT) menjadi besar berdampak pada suhu udara akhir naik lebih tinggi, setiap pengurangan RTH 50% suhu naik 1,42 $^{\circ}$ C(Jakarta).

Simulasi dan Verifikasi Persamaan RTH dan suhu udara

Simulasi dan verifikasi model hubungan RTH dan suhu udara hanya pada empat kota berdasar ketersediaan data dan fokus kajian berikutnya. Simulasi dilakukan untuk tahun 2005, 2015 dan 2025 dengan asumsi laju perubahan RTH berdasarkan data 1970-2004, Tabel 3. Tabel 3 memuat hasil verifikasi persamaan dengan membandingkan nilai simulasi dan observasi 2005. Nilai simulasi ke-empat kota berada pada kisaran \pm 98% observasi.

Tabel 3. Simulasi suhu udara (T_a) di empat kota

KOTA	SIM ¹ T_a ($^{\circ}$ C) 2005	OBS ² T_a ($^{\circ}$ C) 2005	SIM T_a ($^{\circ}$ C) 2015	SIM T_a ($^{\circ}$ C) 2025
Jakarta	27,3	27,2-27,3	27,3	27,4
Bogor	27,0	26,9-27,1	27,1	27,2
Tangerang	27,0	26,9-27,1	27,1	27,2
Bekasi	27,0	26,9-27,1	27,1	27,2

¹ nilai didapatkan dari penggunaan model persamaan kota Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi

² nilai suhu udara rata-rata hasil pengukuran selama bulan JULI 2005 di empat kota (Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi)

Kontribusi RTH, peningkatan populasi, urban dan kendaraan terhadap UHI

Hasil analisis komponen utama yang dilanjutkan dengan rotasi varimax berhasil mengidentifikasi kontribusi setiap peubah terhadap UHI Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi (Tabel 4). Berdasarkan Tabel 4, terlihat untuk Jakarta, peningkatan UHI seiring dengan meningkatnya kepadatan kendaraan, UHI di Bogor dipicu makin luasnya lahan urban, beralih menjadi pemukiman, perdagangan dan jasa serta atribut perkotaan lainnya. Fenomena UHI Tangerang kontribusi terbesar akibat pengurangan RTH menjadi kawasan industri, pemukiman, perdagangan dan jasa. Sementara UHI Bekasi dipicu pengurangan RTH menjadi menjadi pemukiman, jasa dan perdagangan. Hasil tersebut konsisten dengan yang didapatkan dari kajian alih fungsi lahan Jabotabek oleh Carolita et al. (2002) dan Sitorus *et al.* (2005).

Tabel 4. Kontribusi peubah prediktor dalam persen terhadap UHI

No.	Peubah	Jakarta	Bogor	Tangerang	Bekasi
1	RTH	20	14	19	23
2.	Populasi	17	13	16	19
3.	Urban	19	15	18	22
4.	Kendaraan	22	14	16	17
5	Total korelasi	78	56	69	81

Pongracz et al (2005) menemukan besaran UHI antara 1,2-2,1 °C di 10 kota Hungaria, Budapest. Disimpulkan UHI terjadi disebabkan oleh makin meningkatnya jumlah penduduk kota. UHI tertinggi 2,1 °C disumbang kota terpadat, sedang UHI terendah 1,2 °C tercatat di kota dengan kepadatan populasi terendah. Hasil ini konsisten dengan wilayah JABOTABEK. Untuk Jakarta populasi terpadat nilai UHI 1,2 °C, disusul Tangerang terpadat kedua sebesar 1,1°C, kota Bekasi sebesar 1,1°C, sedangkan Bogor dengan populasi terendah UHI adalah 0,8 °C.

Simulasi dan Verifikasi Model Fenomena UHI

Untuk mendapatkan gambaran tentang kelayakan model persamaan UHI dan empat peubah prediktor RTH, kepadatan populasi, luasan lahan urban dan kepadatan kendaraan, dilakukan simulasi. Hasil simulasi UHI di JABOTABEK disajikan pada Tabel 5. Simulasi untuk melihat kecenderungan di masa datang (2015 dan 2025) serta verifikasi model (simulasi 2005) dibandingkan hasil observasi 2005. Dari Tabel 5 didapatkan hasil verifikasi model, UHI simulasi ke-empat kota berada pada kisaran ± 98% UHI observasi.

Tabel 5. Hasil simulasi UHI di empat kota

Kota	SIM ¹ -UHI(°C)	OBS ² -UHI(°C)	SIM-UHI(°C)	SIM-UHI(°C)
	2005	2005	2015	2025
Jakarta	1,2	1,2-1,3	1,5	1,8
Bogor	0,8	0,8-0,9	1,0	1,2
Tangerang	1,1	1,1-1,2	1,4	1,7
Bekasi	1,1	1,1-1,2	1,3	1,7

¹ nilai didapatkan dari penggunaan model persamaan kota Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi

² nilai UHI rata-rata hasil penghitungan data stasiun bulan JULI 2005 di empat kota (Jakarta, Bogor, Tangerang, dan Bekasi).

Hasil simulasi 2015-2025 didapat besaran UHI tertinggi di Jakarta, disusul Tangerang, Bekasi dan Bogor, dengan asumsi laju pengurangan RTH, peningkatan populasi, perluasan urban dan kepadatan kendaraan pertahun tertinggi terjadi di Jakarta.

Dampak UHI terhadap THI

Secara kuantitatif kenyamanan dinyatakan sebagai *Temperature Humidity Index* (THI), suatu indeks untuk menetapkan efek kondisi panas pada kenyamanan manusia, yang secara empiris dirumuskan Nieuwolt oleh (1975):

$$THI = 0,8T_a + \frac{(RH \times T_a)}{500}$$

Dengan THI, indeks kenyamanan ($^{\circ}\text{C}$); T_a , suhu udara ($^{\circ}\text{C}$) dan RH, kelembaban nisbi udara (*relatif humidity*) dalam %. Emmanuel (2005), secara empiris menghubungkan nilai THI dan kenyamanan populasi:

- Nilai THI 21-24 : nyaman
- Nilai THI 25-27 : cukup nyaman
- Nilai THI > 27 : tidak nyaman

Untuk menilai kecenderungan di masa datang, sekaligus verifikasi terhadap model persamaan antara THI dan UHI di empat kota dilakukan simulasi (Tabel 6).

Berdasarkan Tabel 6 hasil verifikasi model didapatkan nilai simulasi 2005 berada pada kisaran $\pm 98\%$ THI observasi (hasil perhitungan di tahun yang sama). Semua hasil simulasi, baik tahun 2005 maupun prediksi tahun 2015 dan 2025 di empat kota Jakarta, Bogor, Tangerang, dan Bekasi dikaitkan dengan rasa nyaman manusia: THI 25-27 berada pada tingkat cukup nyaman.

Tabel 6. Simulasi THI di empat kota

KOTA	SIM ¹ -THI($^{\circ}\text{C}$)	OBS ² -THI($^{\circ}\text{C}$)	SIM-THI($^{\circ}\text{C}$)	SIM-THI($^{\circ}\text{C}$)
	2005	2005	2015	2025
Jakarta	26,0	26,0-26,1	26,3	26,6
Bogor	25,2	25,2-25,3	25,6	25,8
Tangerang	25,3	25,3-25,4	25,8	26,0
Bekasi	25,2	25,2-25,3	25,7	26,0

¹ nilai didapatkan dari penggunaan model persamaan kota Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi

² nilai THI hasil penghitungan data stasiun selama bulan JULI 2005 di empat kota(Jakarta, Bogor, Tangerang, dan Bekasi)

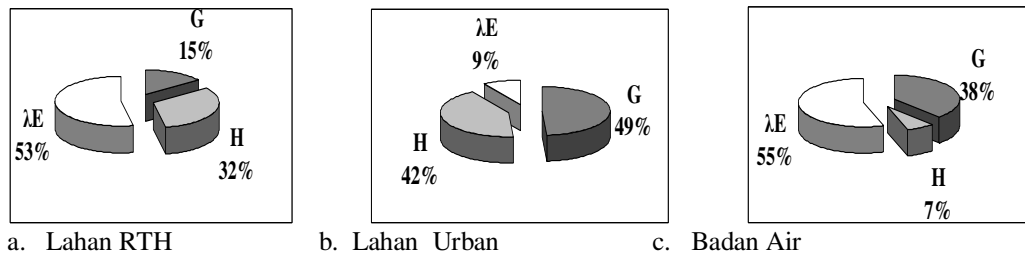
Dampak UHI terhadap Neraca Energi Permukaan

Gambaran penggunaan radiasi netto di JABOTABEK pada tiga tipe lahan: lahan bervegetasi (RTH), lahan urban dan lahan berair disajikan pada Gambar 1.

Dalam Gambar 1a, pada lahan bervegetasi (RTH) radiasi netto permukaan siang hari rata-rata sebesar $290,3 \text{ Wm}^{-2}$. Untuk memanaskan permukaan (fluks G) sebesar $36,9 \text{ Wm}^{-2}$ (15%), menguapkan air (fluks λE) sebesar $184,9 \text{ Wm}^{-2}$ (53%), serta memanaskan udara (fluks H) $68,5 \text{ Wm}^{-2}$ (32%). Jadi pada lahan RTH hanya 15% untuk memanaskan permukaan, lebih dari setengah energi neto (53%) dipakai untuk menguapkan air, ini merupakan indikasi RTH cenderung lebih

basah. Penggunaan energi netto berikutnya untuk memanaskan udara sebesar 32%, sehingga dapat menjelaskan mengapa suhu udara di lahan RTH cenderung lebih sejuk dibandingkan lahan urban.

Dalam Gambar 1b, pada lahan urban radiasi netto permukaan pada siang hari rata-rata sebesar $172,3 \text{ Wm}^{-2}$. Untuk memanaskan permukaan (fluks G) sebesar $81,9 \text{ Wm}^{-2}$ (49%), untuk memanaskan udara (fluks H) sebesar $69,8 \text{ Wm}^{-2}$ (42%), dan untuk menguapkan air (fluks λE) sebesar $18,0 \text{ Wm}^{-2}$ (9%). Kebalikan dari lahan RTH, lahan urban yang kering permukaannya, prioritas penggunaan energi netto untuk memanaskan permukaan dan udara, sisanya untuk menguapkan air, hal ini menjawab mengapa suhu udara di urban cenderung lebih hangat.



Gambar 1. Penggunaan neraca energi di tiga tipe lahan

Dalam Gambar 1c, pada lahan berair radiasi netto permukaan siang hari rata-rata sebesar $194,3 \text{ Wm}^{-2}$. Untuk memanaskan permukaan (fluks G) sebesar $73,1 \text{ Wm}^{-2}$ (38%), untuk memanaskan udara (fluks H) $13,6 \text{ Wm}^{-2}$ (7%), serta sebagian besar untuk menguapkan air (fluks λE) $107,5 \text{ Wm}^{-2}$ (56%). Kebalikan dari lahan urban, pada lahan berair energi netto digunakan untuk menguapkan air melimpah lebih dari setengah, sehingga udara di atas air pada siang hari lebih sejuk dibandingkan udara di atas urban.

Berdasar kajian neraca energi permukaan JABOTABEK didapatkan bahwa selain penambahan RTH, penambahan luas lahan berair seperti situ, danau buatan, kolam, embung akan menurunkan suhu udara dan THI sehingga kota lebih nyaman, saat hujan menampung air berlebih, saat kemarau menyimpan air lebih jauh dapat dikembangkan menjadi taman wisata air.

Secara ilmiah interpretasi Gambar 1a hingga 1c dapat dijelaskan dengan hukum Fourier (Holman and White, 1992) diperkenalkan oleh Joseph Fourier, seorang pakar Matematika Fisik Perancis, membuat formulasi transfer panas lewat konduksi per-unit luasan lahan sebagai:

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

di mana q/A fluks panas permukaan lewat konduksi persatuan luas (Wm^{-2}), dT/dx gradien suhu (Km^{-1}) dan k konduktivitas panas ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), tanda minus menunjukkan arah perpindahan panas dari tempat bersuhu tinggi ke tempat bersuhu rendah. Nilai k untuk tiga tipe lahan adalah: urban, air dan RTH masing-masing 0,76, 0,56 dan 0,12 (Holman and White, 1992).

Pada gradien suhu sama untuk ketiga permukaan maka q/A hanya ditentukan oleh besarnya k (konduktivitas panas) sehingga nilai fluks panas persatuan luas untuk ketiga tipe lahan urban, air dan RTH sama dengan nilai k . Gambaran fluks panas ini merupakan fluks G (*soil heat flux*) atau

panas untuk permukaan secara konduksi. Pada hasil kajian nilai G untuk masing-masing tipe lahan urban, badan air dan RTH berturut-turut sebesar 49%, 38% dan 15%. Hasil ini konsisten dengan uraian di atas, sehingga radiasi netto untuk fluks G dapat dijelaskan hukum Fourier. Sedangkan fluks H dan λE sangat tergantung kondisi permukaan, pada permukaan kering seperti urban, maka fluks λE lebih sedikit, sehingga dominasi penggunaan radiasi netto untuk fluks H, merupakan indikator suhu udara urban lebih tinggi pada siang hari. Untuk permukaan RTH dan air, sebagian besar fluks energi digunakan untuk penguapan, sehingga fluks H menjadi lebih kecil, hal ini penyebab suhu udara di atas permukaan RTH dan badan air pada siang hari menjadi lebih rendah.

Dampak UHI terhadap neraca energi permukaan khususnya di lahan urban (terbangun) untuk fluks G digunakan bagi pemanasan permukaan secara konduksi dan fluks H dipakai untuk memanaskan udara secara konveksi. Hasil yang diungkap penelitian di wilayah JABOTABEK ini konsisten dengan hasil Khomarudin (2005) yang melakukan kajian Kota Surabaya menemukan ciri neraca energi kota pada besarnya komponen radiasi neto dipakai untuk memanaskan permukaan dan udara. Adapun hasil secara lengkap untuk empat kota ditampilkan Tabel 7:

Tabel 7. Dampak UHI terhadap fluks G dan H di empat kota

Peubah Prediktor	Peubah Respon Jakarta		Peubah Respon Bogor		Peubah Respon Tangerang		Peubah Respon Bekasi	
	ΔG (Wm^{-2})	ΔH (Wm^{-2})	ΔG (Wm^{-2})	ΔH (Wm^{-2})	ΔG (Wm^{-2})	ΔH (Wm^{-2})	ΔG (Wm^{-2})	ΔH (Wm^{-2})
1.0	80,1	67,5	80,3	73,3	80,5	67,6	80,3	67,6

Berdasarkan Tabel 7, peningkatan fenomena UHI di Jakarta 1,0 °C meningkatkan energi neto untuk memanaskan permukaan (fluks G) sebesar 80,1 Wm^{-2} lebih tinggi dibandingkan fluks H 67,5 Wm^{-2} , hal ini indikasi peningkatan UHI menyebabkan peningkatan penggunaan energi bagi pemanasan permukaan, selanjutnya untuk memanaskan udara di atasnya. Hal serupa terjadi di Bogor, Tangerang dan Bekasi peningkatan UHI sebesar 1,0 °C menyebabkan peningkatan nilai fluks G > fluks H, merupakan indikator bahwa radiasi matahari secara langsung memanaskan permukaan, sehingga penggunaan radiasi netto prioritas untuk fluks G. Setelah fluks G terpenuhi selanjutnya untuk fluks H dengan catatan permukaan kering yang merupakan ciri permukaan perkotaan, sehingga penggunaan untuk menguapkan air (fluks λE) merupakan radiasi netto yang tersisa.

Perbandingan Persentase fluks G, H dan λE

Tidak tersedianya data pengukuran neraca energi, verifikasi model dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian dengan penelitian serupa di kota Mexico dan Nagoya (Tabel 8)

Tabel 8. Penggunaan radiasi neto (Rn) dibandingkan Mexico dan Nagoya

Lokasi	Fluks G(%)	Fluks H(%)	Fluks λE (%)
Jakarta	50	44	8
Bogor	47	40	10
Tangerang	49	43	9
Bekasi	50	42	10
Mexico ¹	58	38	4
Nagoya ²	52	46	2

Keterangan: ¹ Oke et al (1999); ² Kato dan Yamaguchi (2005)

Berdasarkan Tabel 8 penggunaan radiasi netto di urban wilayah tropis; Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi antara nilai fluks G dan H hampir berimbang sementara untuk menguapkan air cukup besar 8% untuk Jakarta, disusul Tangerang 9%, 10% di Bogor (luasan RTH relatif besar) dan Bekasi (luasan lahan berair relatif besar). Untuk negara non tropis Mexico dan Nagoya, lebih dari 90% radiasi neto untuk fluks G dan H, sedangkan fluks λE untuk menguapkan air kurang dari 5%.

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Estimasi hubungan suhu udara dan RTH menghasilkan persamaan terpilih nonlinier (kubik) untuk Jakarta, kota dan kabupaten Bogor, Tangerang serta Bekasi. Pola hubungan terbalik di mana setiap laju pengurangan RTH menyebabkan peningkatan suhu udara dan sebaliknya.

Fenomena UHI telah terjadi di empat kota baik Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi. Peubah yang memberikan kontribusi terhadap UHI didominasi oleh pengurangan RTH untuk Tangerang dan Bekasi, padatnya kendaraan untuk Jakarta dan perluasan urban pemicu UHI di Bogor.

Dampak UHI terhadap THI berupa persamaan non-linier kubik, dengan pola berbanding lurus, setiap kenaikan UHI menyebabkan naiknya THI. Sedangkan dampak UHI terhadap neraca energi permukaan berupa persamaan linier, dengan pola berbanding lurus. Setiap peningkatan UHI menyebabkan peningkatan penggunaan radiasi netto untuk fluks G (soil heat flux) dan H (sensible heat flux).

SARAN

Untuk meredam peningkatan suhu udara, UHI dan THI selain peningkatan RTH juga meningkatkan luas badan air berupa: kolam, danau buatan dan embung/situ. Multi efek badan air: menurunkan suhu udara, UHI, THI dan sebagai penampung kelebihan air di musim hujan, cadangan air saat kemarau serta potensial sebagai taman wisata air.

DAFTAR PUSTAKA

- Carolita, I, Zain, AM, Rustiadi, E dan Trisasonko, B.H. 2002. The Land use pattern changes of JABOTABEK region. IRSA Interna. Conf. 4th. Bali 20-21 Juli 2002.
- Draper, N.R. and Smith, H. 1992. Applied regression analysis (2nd edition). Alih bahasa. Sumantri, B. PT Gramedia. Jakarta.
- Emmanuel, R. 2005. Thermal confort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. Building and Environment (40): 1591-1601. Elsevier, Ltd.
- Holman, J.P and White, P.R.S. 1992. Heat Trensfer. (7th edition in SI unit). McGraw-Hill Inc. UK. 713pp.

- Sitorus, J, Rustiadi, E dan Ardiansyah, M. 2005. Analisis pola spasial perubahan penggunaan lahan dan suburbanisasi di kawasan JABOTABEK periode 1992-2000. *Jurnal LAPAN* 2005. 6-20 pp.
- Kato, S and Yamaguchi, Y. 2005. Analysis of urban heat island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* 99: 44-54.
- Khomarudin, M.R. 2005. Pendugaan evapotranspirasi skala regional menggunakan data Satelit penginderaan jauh [Thesis]. Sekolah Pasca Sarjana. IPB. Bogor.
- Oke, T.R. et al. 1999. The energy balance of central Mexico Xyti during the dry season. *Atmospheric Environment*. 33: 3919-3930.
- Pongracz, R et al. 2005. Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*. Article in press. Elsevier Ltd.
- Quattrochi, *et al.* 2000. A Decision support information system for urban landscape management using thermal infrared data. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*. 66(10):1195-1207.
- Santosa, I. 1998. Pulau panas (*heat island*) Wilayah JABOTABEK. Jurusan Geofisika dan Meterologi-FMIPA-IPB. Bogor.
- Streutker, D.R. 2003. Satellite-measured growth of urban heat island of Houston, Texas. Elsevier Science 18pp.
- Voogt, J.A. 2002. Urban heat island: causes and consequences of global environmental change. John Wiley and Sons, Ltd. Chichester. 660-666pp.
- von Storch, H and Zwiers, F.W. 1999. Statistical analysis in climate research. Cambridge University Press. Cambridge.
- Zain, A.F.M. 2002. Distribution, structure and function of urban green space in Southeast Asian Mage-cities with special reference to Jakarta Metropolitan Region (JABOTABEK). [Doctoral Degree Program]. Departement of Agricultural and Environmental Biology. The University of Tokyo.