

IDENTIFIKASI PERUBAHAN IKLIM PERKOTAAN (STUDI KASUS KOTA JAKARTA)

Dadang Subarna

Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN Bandung

E-mail: dangsub@yahoo.com

ABSTRAK

Temperatur memainkan peranan penting dalam mendeteksi perubahan iklim yang disebabkan oleh urbanisasi dan industrialisasi. Kebanyakan studi tentang dampak iklim berdasarkan perubahan pada rata-rata variabel meteorologi seperti temperatur dan curah hujan. Makalah ini mengkaji perubahan temporal dan spasial pada rata-rata bulanan temperatur dan curah hujan di Kota Jakarta selama satu abad terakhir dengan periode 1901-2007. Data yang digunakan berasal dari Stasiun Klimatologi Jakarta yang relatif berkualitas bagus, rekaman berlangsung lama dan sedikit data hilang atau kosong dan dari Worldclim. Metode yang dipakai adalah statistik deskriptik termasuk pemilihan tipe model probabilistik untuk menggambarkan rata-rata bulanan deret waktu temperatur dan curah hujan pada musim basah. Perubahan temperatur dan curah hujan jangka panjang telah dievaluasi dengan uji kecenderungan Mann-Kendall dan statistik regresi linear. Hasil uji kecenderungan Mann-Kendall sesuai dengan uji kecenderungan statistik regresi linear untuk data temperatur dan tidak sesuai untuk data curah hujan. Selama 100 tahun terakhir, data pengamatan stasiun menunjukkan telah terjadi kenaikan rata-rata bulanan temperatur udara Kota Jakarta dengan laju 0,152 °C per dekade dan menunjukkan kenaikan yang terus-menerus dalam rata-rata. Curah hujan rata-rata bulanan pada saat musim basah (Desember, Januari, Februari) telah mengalami perubahan pola, rata-rata dan keragamannya. Fungsi kerapatan probabilitas (PDF) curah hujan telah berubah dari bentuk Gamma (2) dengan rata-rata 264 mm dan deviasi standar 79 mm pada periode 30 tahun awal menjadi bentuk Logistik dengan rata-rata 285 mm dan deviasi standar 67 mm pada periode 30 tahun akhir juga terdapat sedikit kenaikan dengan kecenderungan linear. Didasarkan pada model regresi linear, maka temperatur permukaan bulanan Kota Jakarta diperkirakan berada pada nilai 28,5 °C pada 2050 dan 29,23 °C pada 2100 juga didasarkan pada skenario-skenario RCP ditunjukkan perubahan curah hujan spasial bulanan di bulan basah di Jakarta berada pada rentang anomali 2,7 mm sampai 32,3 mm

Kata kunci: Variabilitas, temperatur udara permukaan, curah hujan, Mann-Kendall, perubahan iklim

PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah salah satu isu yang menjadi bahan perdebatan baik di tingkat ilmuwan maupun pada tingkat pemimpin politik. Perubahan iklim tidak dapat diprediksi kapan dan di mana terjadi karena banyak ketidakpastian (*uncertainty*) yang terlibat di dalamnya. Saat ini para ilmuwan bersepakat bahwa pemanasan global telah terjadi meskipun masih ada beberapa perdebatan

menyangkut ketidakpastian sebab-sebabnya (Gurevish *dkk.*, 2011). Telah diketahui pula secara luas bahwa udara di Artik (Kutub Utara) paling cepat mengalami pemanasan dibandingkan dengan di belahan bumi lainnya dan Semenanjung Artik telah mengalami pemanasan paling besar selama 50 tahun terakhir (Hughes *dkk.*, 2006).

Pertanyaan yang muncul adalah apakah perubahan-perubahan variabel iklim global serta-merta pula diikuti oleh perubahannya di tingkat regional atau lokal. Untuk menjawab pertanyaan tersebut, maka perlu dilakukan kajian data variabel iklim secara lokal. Pada makalah ini dilakukan pengujian perubahan variabel iklim seperti temperatur, curah hujan dari pengamatan dan model iklim yang memenuhi kriteria perubahan iklim selama minimal 30 tahun. Dipilih kota Jakarta karena kota ini merupakan salah satu kota yang sangat pesat perkembangannya dan sangat rentan terhadap risiko perubahan iklim terutama untuk kaum miskin di perkotaan (anonim, 2012). Selain berperan sebagai ibukota negara yang merupakan pusat administrasi, juga berperan sebagai pusat bisnis dan perekonomian. Oleh karena menjadi pusat perekonomian dan pembangunan maka urbanisasi dari berbagai penjuru tanah air akan terus meningkat, sehingga akan menurunkan daya dukung dan daya tampung kota. Sebagaimana diperkirakan oleh Bank Dunia (2002) dalam Dhorde *et al*, (2009) bahwa di negara miskin sebanyak 80% pertumbuhan ekonomi akan muncul di kota-kota dan lebih dari 80% dari populasi dunia akan tinggal di kota-kota sampai akhir 2030. Karena faktor perubahan bentang alam dan tata kelola yang tidak tepat maka kota Jakarta kerap mengalami bencana banjir yang kronis setiap tahun bahkan akhir-akhir ini kejadiannya semakin ekstrem.

Tak dapat diragukan lagi bahwa kota-kota akan memainkan peranan penting dalam pembentukan ekonomi negara-negara berkembang. Kota-kota juga sedang dan akan menghadapi setumpuk permasalahan yang terkait dengan daya dukung dan kerusakan lingkungan fisik. Pertumbuhan populasi yang meningkat tiap tahun dan tidak didukung dengan infrastruktur yang memadai maka kerentanan terhadap dampak perubahan iklim akan semakin tinggi.

Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk mempelajari perubahan temperatur permukaan dan curah hujan musim basah rata-rata bulanan di kota Jakarta selama satu abad terakhir sebagaimana yang disyaratkan dalam kriteria perubahan iklim minimal 30 tahun. Analisis dilakukan terhadap variabel iklim lokal maupun regional yang mengalami perubahan sebagaimana perubahan di belahan Bumi lainnya yang merupakan indikator yang paling mudah untuk membuktikan dan mengidentifikasi terjadinya perubahan iklim.

METODE

Lokasi penelitian dilakukan di daerah administrasi DKI Jakarta karena daerah tersebut mempunyai data pengamatan yang relatif panjang untuk mengetahui perubahan variabel iklim yang mempunyai siklus minimal 30 tahun. Data pemanasan dan perubahan iklim global diperoleh melalui studi literatur dan kajian data global baik dari pengamatan maupun dari model iklim global (*Global*

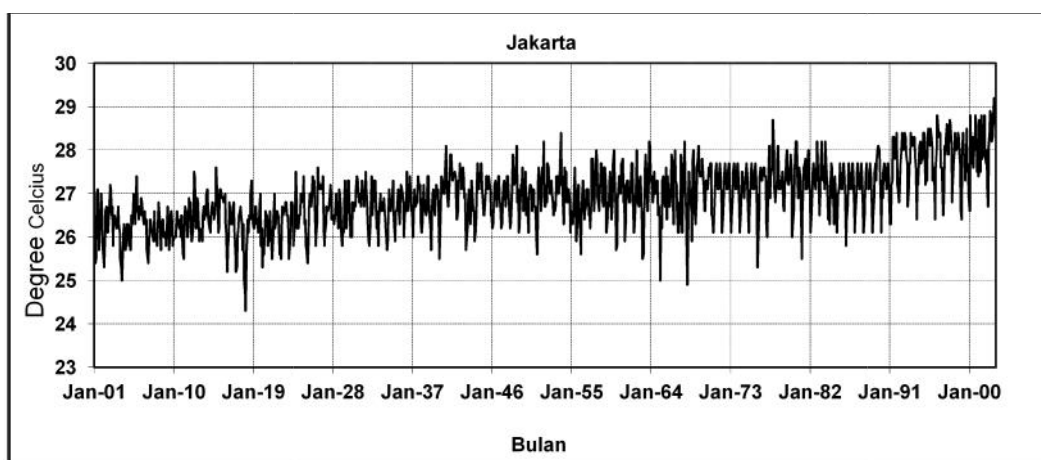
Climate Model). Data variabel klimatologi berupa temperatur udara permukaan dan curah hujan rata-rata bulanan selama periode 1901-2007 kota Jakarta yang diolah pada makalah ini diperoleh dari Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG), ditunjukkan pada Tabel 1, Gambar 1 dan Gambar 2.

Temperatur udara yang diukur dengan termometer merupakan elemen iklim yang sangat penting. Temperatur merupakan salah satu elemen iklim yang sangat mempengaruhi kehidupan biosfer. Pengukuran temperatur udara hanya memperoleh satu nilai yang menyatakan nilai rata-rata temperatur udara permukaan.

Tabel 1. Kode stasiun dan karakteristik stasiun pengamatan klimatologi kota Jakarta

Negara	Stasiun	Kota	Elevasi	Lintang	Bujur	Periode
515	9674500	JAKARTA/OBSERVATORY	-	-6,18	106,83	1901-2007

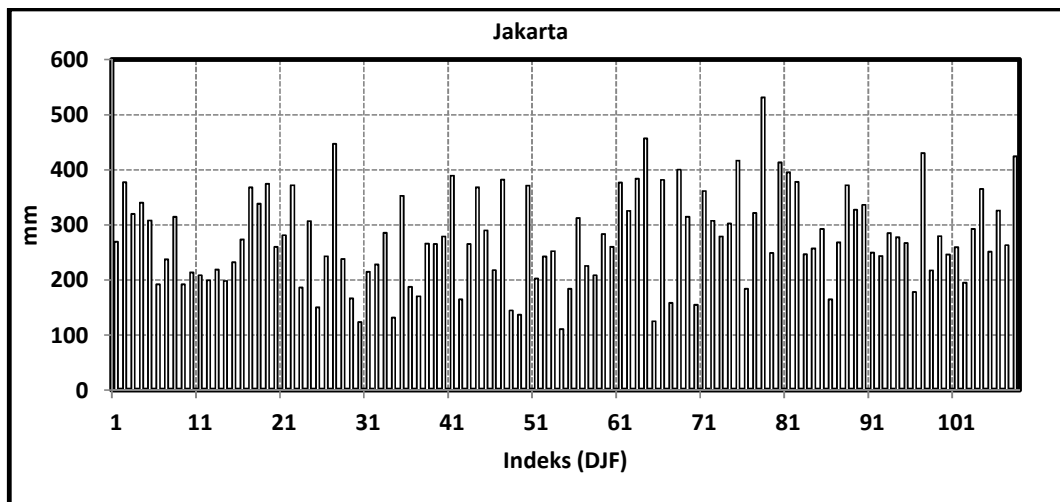
Temperatur juga dapat didefinisikan sebagai tingkat panas suatu benda. Panas bergerak dari suatu benda yang mempunyai temperatur tinggi ke benda yang mempunyai temperatur rendah. Temperatur udara berubah sesuai dengan tempat dan waktu. Pada umumnya temperatur maksimum terjadi sesudah tengah hari, biasanya antara jam 12.00 dan jam 14.00 dan temperatur minimum terjadi pada jam 06.00 atau sekitar Matahari terbit. Temperatur udara harian rata-rata didefinisikan sebagai rata-rata pengamatan selama 24 jam (satu hari) yang dilakukan tiap jam. Temperatur bulanan rata-rata ialah jumlah dari temperatur harian rata-rata dalam 1 bulan dibagi dengan jumlah hari dalam bulan tersebut dan digunakan dalam analisis statistik pada makalah ini.



Gambar 1. Data temperatur udara permukaan rata-rata selama periode 1901-2002 stasiun klimatologi Jakarta

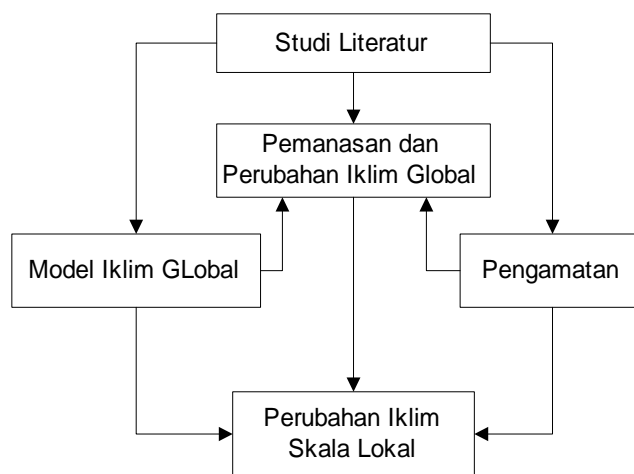
Curah hujan diukur dengan menggunakan penakar curah hujan. Curah hujan bulanan rata-rata ialah jumlah dari curah hujan harian rata-rata dalam 1

bulan dibagi dengan jumlah hari dalam bulan tersebut. Curah hujan pada musim basah (Desember, Januari, Februari) dirata-ratakan untuk mendapatkan rata-rata musiman dan dianalisis untuk mengetahui perubahannya pada pola, rata-rata dan deviasi. Data curah hujan bulan basah (DJF) ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Data curah hujan rata-rata musim basah (DJF) selama periode 1901-2007 stasiun klimatologi Jakarta

Metode yang digunakan dalam penelitian ini diringkas pada diagram alir di Gambar 3. Kualitas dan konsistensi data diperiksa dan dilakukan interpolasi polinomial untuk beberapa data yang hilang atau kosong.



Gambar 3. Skema diagram alir metode yang digunakan dalam penelitian ini.

Untuk menguji adanya kecenderungan (*trend*) kenaikan atau penurunan dari data tersebut digunakan uji statistik non-parametrik Mann-Kendall (Onoz *et al.*, 2003). Uji Mann-Kendall didasarkan pada statistik **S**. Masing-masing pasangan nilai data yang diamati y_i, y_j ($i > j$) dari variabel acak diperiksa untuk menemukan apakah $y_i > y_j$ atau $y_i < y_j$. Bila bilangan dari tipe pasangan sebelumnya berupa **P**

dan bilangan tipe pasangan sesudahnya **M**, maka **S** didefinisikan sebagai **S = P – M**. Untuk $n > 10$ maka distribusi sampel dari **S** adalah:
Z mengikuti distribusi normal standar dimana

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sigma_s, & \text{jika } S > 0 \\ 0, & \text{jika } S = 0 \\ (S+1)/\sigma_s, & \text{jika } S < 0 \end{cases} \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} \quad (1)$$

Hipotesa null ditolak ketika nilai **Z** yang dihitung lebih besar dari $Z_{\alpha/2}$ nilai mutlak. Uji Mann-Kendall sering digunakan untuk tes non-parametrik yang mempunyai kemampuan untuk mendeteksi kemiringan kecenderungan (*trend*), ukuran sample, level signifikan, koefisien variasi dan tipe distribusi peluangnya. Kemampuan ini yang tidak dipunyai oleh uji statistik linear biasa. Beberapa fungsi distribusi diuji kecocokannya dengan data temperatur dan curah hujan. Uji Kolmogorov-Smirnov (K-S) dilakukan untuk mengecek kecocokan fungsi densitas probabilitas data temperatur atau curah hujan dengan fungsi-fungsi densitas probabilitas teoritis. Uji K-S mengukur kedekatan jarak antara $f(x)$ teoritis dengan $f_n(x)$ empiris ketika n diasumsikan sebagai nilai yang sangat besar. Pada pengujian ini didefinisikan fungsi distribusi kumulatifnya atau CDF (cumulative distribution function) adalah sebagai,

$$D = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (2)$$

dimana \sup_x adalah supremum dari sejumlah jarak D (Jarak CDF empirik dan CDF teoritis). Nilai D ini selanjutnya dibandingkan dengan nilai $D^*(\alpha)$ kritis dari sebuah tabel statistik untuk pengujian $\alpha = 0,05$ (level signifikansi) atau level kepercayaan sebesar 95%.

Distribusi probabilitas Normal, Gamma (2) dan Logistik digunakan untuk mendekati pola temperatur dan curah hujan karena merupakan distribusi yang menggambarkan distribusi variabel acak yang sering muncul di alam dan telah dilakukan uji kecocokannya. Variabel acak seperti temperatur dan curah hujan misalnya x , akan mengikuti distribusi Normal, Gamma (2) atau Logistik jika fungsi densitas probabilitasnya memenuhi salah satu dari persamaan-persamaan :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, -\infty < x < \infty \quad (3)$$

dimana μ = rata-rata dan σ = standar deviasi adalah fungsi densitas probabilitas normal.

$$f(x) = \frac{(x)^{r-1}}{s^r \Gamma(r)} e^{-\left(\frac{x}{s}\right)}, x < x < \infty \quad (4)$$

Dimana α = parameter bentuk, β = parameter skala, γ = parameter lokasi, Γ = adalah fungsi densitas probabilitas Gamma (2).

fungsi Gamma

$$f(x) = \frac{e^x}{(1+e)^2}, -\infty < x < \infty \quad (5)$$

adalah fungsi densitas probabilitas Logistik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

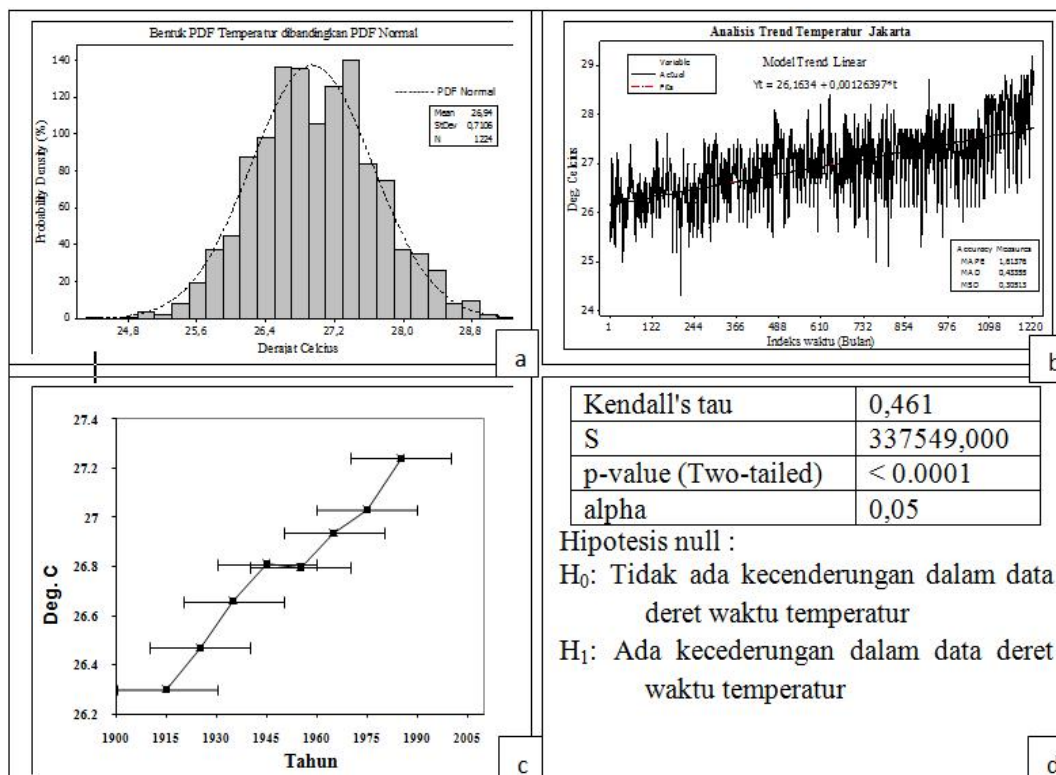
Perubahan iklim adalah perubahan variabel iklim seperti temperatur, curah hujan (presipitasi), kelembaban, tekanan, angin, radiasi dan sebagainya. Secara garis besar perubahan iklim dapat diwakili terutama oleh perubahan temperatur udara permukaan dan perubahan curah hujan yang terjadi secara berangsur-angsur dalam jangka waktu yang panjang antara periode 30 tahunan, sedangkan unsur-unsur lain mengakibatkan atau terpengaruh oleh kedua unsur iklim tersebut. Disamping itu harus dipahami bahwa perubahan tersebut disebabkan oleh kegiatan manusia (*anthropogenic*), khususnya yang berkaitan dengan pemakaian bahan bakar fosil dan alih-guna lahan. Kegiatan manusia yang dimaksud adalah kegiatan yang telah menyebabkan peningkatan konsentrasi GRK (Gas Rumah Kaca) di atmosfer, khususnya dalam bentuk karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan nitrogen oksida (N₂O).

Beberapa aspek dari perubahan iklim Bumi seperti kenaikan level permukaan laut, mencairnya lapisan es non-polar, terjadinya penurunan luasan dan ketebalan es laut Artik (Kutub Utara) selama musim panas merupakan beberapa indikator dampak pemanasan global (*global warming*) (Hansen dkk., 2013). Parameter yang lebih jelas dalam mendefinisikan pemanasan global adalah temperatur permukaan global rata-rata. Didasarkan pada laporan penilaian keempat (AR4) dan ke-lima (AR5) dari Panel antar Pemerintah berkaitan dengan Perubahan Iklim (IPCC) dan beberapa lembaga penelitian menunjukkan bahwa rata-rata tahunan temperatur global telah meningkat 0.74°C sampai 0,8 °C sejak permulaan abad 20 (IPCC, 2007; IPCC, 2008; NAS dan TRS, 2014).

Didasarkan pada banyak bukti-bukti, saat ini menjadi lebih pasti dari sebelumnya bahwa manusia memang sedang mengubah iklim Bumi. Atmosfer dan lautan telah menghangat yang disertai dengan kenaikan permukaan laut, penurunan yang sangat tajam lapisan es di atas laut Kutub Utara dan hal-hal lain yang terkait dengan perubahan iklim. Bukti-bukti hasil observasi telah terkumpul dan menunjukkan perubahan unsur-unsur iklim seperti penurunan yang dramatis dalam luasan es di Kutub Utara, penurunan tutupan salju pada musim Semi di Belahan Bumi Utara, peningkatan kandungan panas di dalam lautan bagian atas (700 m) rata-rata global, peningkatan level permukaan laut (NOAA, 2014).

Perubahan temperatur dan curah hujan skala perkotaan dengan contoh kasus di kota Jakarta selama 100 tahun terakhir telah dianalisis melalui perubahan variabilitas, pola dan ukuran-ukuran statistiknya. Variabilitas temperatur permukaan dan curah hujan di kota Jakarta ditunjukkan dengan koefisien variabilitas masing-masing sebesar 2,6% dan 30%. Nilai koefisien variabilitas ini sangat kecil yang berarti bawah konsistensi temperatur sangat tinggi dan

fluktuasi curah hujan dari musim basah ke musim basah berikut tidak begitu besar. Koefisien variabilitas kedua unsur iklim tersebut menunjukkan bahwa keadaan variasi yang tidak berfluktuasi tajam dan relatif sangat dekat simpangan dari keadaan rata-ratanya yang memungkinkan temperatur udara permukaan maupun curah hujan bulan basah rata-rata bulanan di kota Jakarta relatif stabil.



Gambar 5. Analisis perubahan temperatur di Jakarta (a). Fungsi densitas probabilitas temperatur dan perbandingan dengan fungsi distribusi normal, (b) Analisis kecenderungan linear temperatur amosfer permukaan kota Jakarta (c). Pergerakan rata-rata temperatur setiap periode 30 tahun pergeseran (d) Hasil uji Mann-Kendall pada data deret waktu temperatur.

Analisis distribusi merupakan salah satu yang paling penting dan banyak digunakan. Distribusi probabilitas normal temperatur sangat dipengaruhi oleh nilai rata-rata hitung (μ) temperatur yaitu $26,94^{\circ}$ C dan standar deviasinya (σ) yaitu $0,711^{\circ}$ C. Makin besar nilai standar deviasinya maka kurva makin landai dan makin kecil nilai standar deviasinya maka kurva makin runcing. Bila dibandingkan antara nilai rata-rata dengan standar deviasinya yang relatif berbeda jauh maka kurva densitas probabilitas temperatur dikarakterisasi sebagai kurva dengan puncak yang agak meruncing ke atas atau disebut juga leptokurtik. Nilai standar deviasi rendah ini menunjukkan bahwa data temperatur semakin mengelompok pada nilai rata-rata atau nilai tengahnya (Gambar 4(a)). Analisis distribusi untuk data curah hujan berubah-ubah setiap pergeseran periode 30 tahunan selama satu abad pengamatan. Empat periode perubahan mulai dari Gamma (2) (persamaan 4), Weibull(3), Logistik lalu Logistik lagi (persamaan 5), hanya

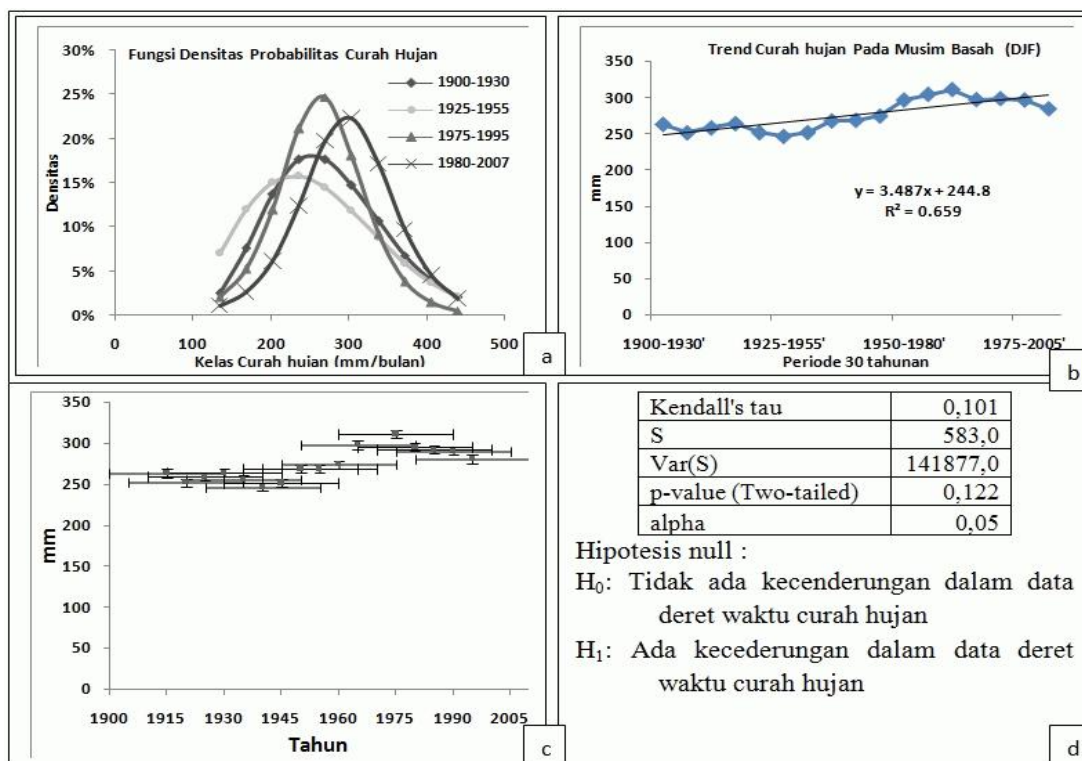
ditampilkan yang mempunyai *p-value* uji Kolmogorov-Smirnov terbesar, seperti ditunjukkan pada Gambar 5(a) dan Tabel 2.

Analisis kecenderungan (*trend*) adalah model kecenderungan linear yang dilakukan pada keseluruhan data deret waktu temperatur dan curah hujan. Model regresi linear ini merupakan model yang sangat sederhana untuk memperkirakan kecenderungan data ke masa yang akan datang. Hasil analisis kecenderungan beserta persamaan linear dan akurasi model tersebut ditunjukkan pada Gambar 4(b). Persamaan regresi linear perubahan temperatur terhadap waktu adalah $Y_t = 26,1634 + 0,00126397 * t$ dengan gradien sebesar $0,00126397^\circ \text{C}$ yang menunjukkan bahwa temperatur udara permukaan rata-rata bulanan kota Jakarta mempunyai kecenderungan yang terus naik sebesar $0,00126397^\circ \text{C}$ per bulan. Bila diasumsikan gradien kenaikan sama untuk setiap bulan maka dalam sepuluh tahun kenaikan temperatur kota Jakarta akan mencapai nilai $0,152^\circ \text{C}$. Hasil ini berada pada kisaran nilai dari hasil analisis yang telah dilakukan oleh BMKG untuk kota-kota di Indonesia yaitu $0,036^\circ \text{C}$ sampai $1,383^\circ \text{C}$ per sepuluh tahun. Persamaan regresi curah hujan musim basah (DJF) adalah $Y_t = 244,8 + 3,487t$ koefisien determinasi 0,66.

Keakuratan model kecenderungan linear ditunjukkan dengan nilai MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*), MAD (*Mean Absolute Deviation*) dan MSD (*Mean Squared Deviation*) masing-masing sebesar 1,614, 0,4 dan 0,30 yang merupakan keakuratan nilai deret waktu temperatur yang dicocokkan. Nilai-nilai ini cukup kecil dan menunjukkan keakuratan yang bisa diterima. Namun demikian untuk menghilangkan keraguan, dilakukan lagi uji Mann-Kendall yang mengecek setiap data dengan data sebelum dan sesudahnya seperti ditunjukkan dengan Persamaan 1. Masing-masing pasangan nilai data yang diamati y_i, y_j ($i > j$) dari variabel acak diperiksa untuk menemukan apakah $y_i > y_j$ atau $y_i < y_j$. Hasil uji Mann-Kendall ditunjukkan pada Gambar 4(d) dan Gambar 5(d). Pada Gambar 4(c) dan Gambar 5(c) masing-masing ditunjukkan evolusi temperatur rata-rata udara permukaan dan curah hujan yang digeser setiap selang 30 tahun. Dari Gambar 4(c) dan 5(c) tersebut didapat informasi tentang pergerakan perubahan rata-rata temperatur dan curah hujan di kota Jakarta yang terus naik selama 100 tahun terakhir.

Uji Mann-Kendall dan K-S untuk trend dan kecocokan PDF temperatur dan curah hujan menggunakan hipotesis null dan alternatifnya. Bila *p-value* lebih kecil dari level signifikansi alpha sebesar 0,05 maka tolak hipotesis null H_0 dan terima hipotesis alternatif H_1 . Konsekuensi penolakan hipotesis null H_0 dibenarkan bila lebih rendah dari 0,01%. Pada Gambar 4(d) dan Gambar 5(d) dapat dilihat beberapa parameter uji kecenderungan Mann-Kendall. Terdapat tiga nilai **S** yang penting dalam uji tersebut (Lihat Persamaan 1). Nilai **S** berharga negatif besar berarti kecenderungan turun dan nilai **S** berharga positif besar berarti kecenderungan naik, sedangkan nol berarti tidak ada kecenderungan. Uji kecenderungan Mann-Kendall data temperatur dan curah hujan menghasilkan

nilai S atau $\text{Var}(S)$ sangat besar yang berarti bahwa dengan keyakinan tinggi dalam kedua data tersebut terdapat kecenderungan naik dan penolakan H_0 harus dilakukan karena p -value sebesar 0,0001 lebih kecil dari level signifikansi alpha sebesar 0,05 dan sangat dibenarkan karena lebih rendah dari 0,01%. Nilai p -value untuk curah hujan lebih besar dari level signifikansi alpha sebesar 0,05 yaitu 0,122 (Gambar 5(c)) sehingga tidak bisa menolak hipotesis null, akan tetapi regresi linear menunjukkan ada kecenderungan dan risiko penolakan hipotesis null hanya 12,2% maka curah hujan tetap menunjukkan kenaikan dengan koefisien determinasi 0,66 (Gambar 5(b)).



Gambar 5. Analisis perubahan curah hujan di Jakarta (a). Perubahan fungsi densitas probabilitas curah hujan setiap periode 30 tahun, (b) Analisis kecenderungan linear curah hujan pada bulan basah (DJF) (c). Pergerakan rata-rata curah hujan setiap periode 30 tahun pergeseran (d) Hasil uji Mann-Kendall pada data deret waktu curah hujan

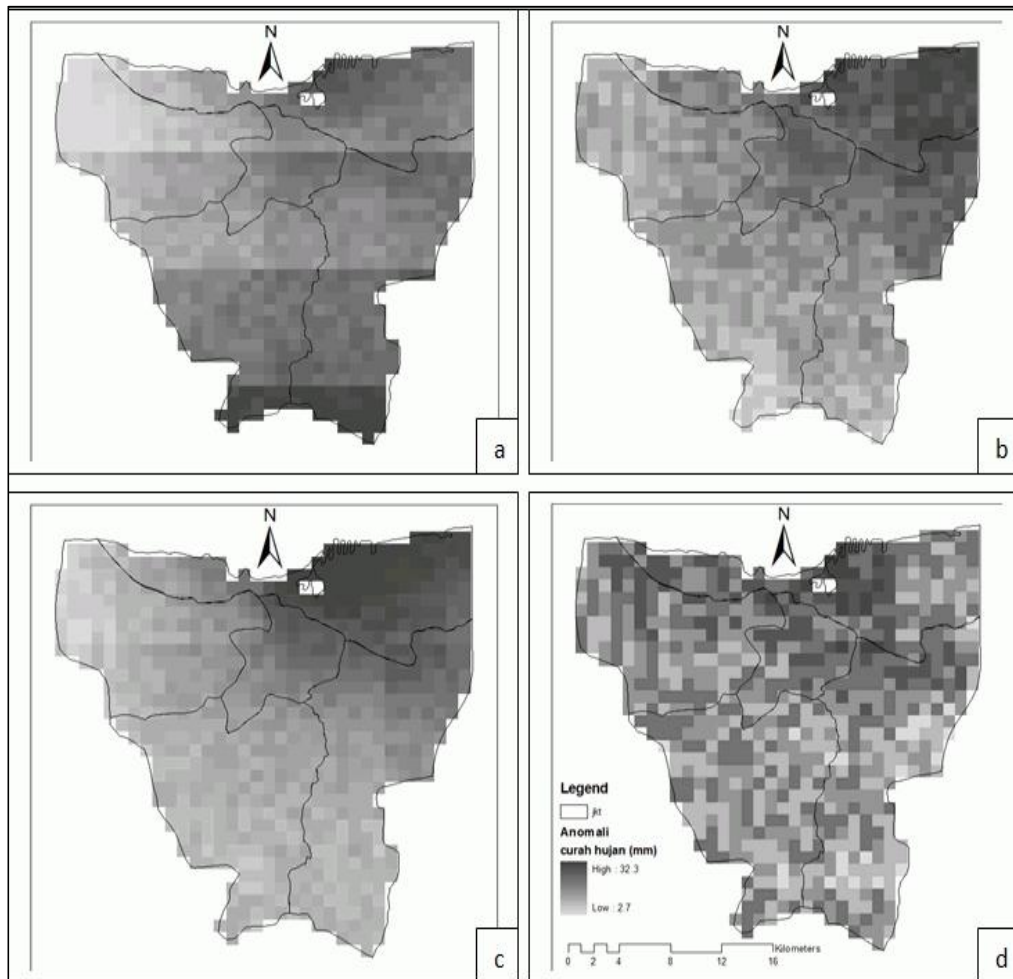
Pada sebagian analisis distribusi hanya ditekankan pada parameter estimasi tetapi jarang diuji kecocokan dari distribusi yang dipilih. Oleh karena itu, agar mendapatkan keyakinan dari distribusi yang dipilih maka pengujian kecocokan dilakukan dengan menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov (K-S). Pengujian dilakukan dengan menggunakan perangkat tambahan di Excell dan didapatkan hasil uji untuk setiap periode 30 tahun curah hujan ditunjukkan pada Tabel 2. P -value dari hasil uji K-S pada distribusi yang cocok ditunjukkan dengan nilai P -value lebih besar dari 0,05 sebagai patokan derajat keyakinan 95% dan yang terbaik di diambil nilai yang terbesar (angka tebal pada Tabel 2)

Tabel 2. Hasil uji K-S untuk kecocokan fungsi pada periode-periode PDF pada Gambar 5(a).

Distribusi	<i>p-value</i> (1900-1930)	<i>p-value</i> (1925-1955)	<i>p-value</i> (1975-1995)	<i>p-value</i> (1980-2007)
Beta4	0,845	0,803	0,319	0,317
Chi-square	0,000	0,001	0,001	0,028
Erlang	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Exponential	< 0,0001	0,001	< 0,0001	< 0,0001
Fisher-Tippett (1)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fisher-Tippett (2)	0,605	0,874	0,587	0,240
Gamma (1)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,001
Gamma (2)	0,914	0,988	0,629	0,650
GEV	0,883	0,975	0,670	0,686
Gumbel	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Log-normal	0,866	0,988	0,657	0,592
Logistic	0,755	0,926	0,744	0,775
Normal	0,612	0,979	0,429	0,479
Normal (Standard)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Student	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Weibull (1)	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Weibull (2)	0,615	0,986	0,432	0,358
Weibull (3)	0,818	0,989	0,616	0,473

Hasil proyeksi model iklim global (GCM) resolusi 1 km dengan skenario paling besar RCP8,5 (*Representative Concentration Pathways 8.5 W/m²*) dan paling rendah RCP2,6 (Gambar 7) dikaji untuk mengetahui anomali curah hujan masa depan terhadap garis dasar (*baseline*) rata-rata tahun 1950-2000. RCP adalah trayektori konsentrasi gas rumah kaca (bukan emisi) yang diadopsi oleh IPCC dalam laporan penilaian kelima (*fifth Assessment Report (AR5)*). RCP digunakan dalam pemodelan iklim dan penelitian yang menggambarkan kemungkinan iklim masa depan. Semua kemungkinan telah diperhitungkan yang bergantung pada berapa banyak gas rumah kaca yang diemisikan pada tahun-tahun mendatang. Empat skenario RCP yang digunakan IPCC yaitu RCP2,6, RCP4,5, RCP6, and RCP8,5 dengan nilai *radiative forcing* pada tahun 2100 relatif terhadap nilai sebelum masa revolusi industri masing-masing (2,6, 4,5, 6,0, dan 8,5 W/m²).

Proyeksi model iklim dari kedua skenario (RCP2.6 dan RCP8.5) pada bulan basah (DJF) menunjukkan anomali curah hujan positif dengan besar berkisar pada nilai 2,7 mm/bulan sampai 32,3 mm/bulan. Curah hujan masa depan (rata-rata 2061-2080) di kota Jakarta akan mengalami peningkatan yang signifikan pada musim basah terutama di Jakarta Selatan, Jakarta Utara (RCP 8,5) dan di Jakarta Timur (RCP 2,6), ditunjukkan pada Gambar 6(a) dan 6(b). Rata-rata peningkatan curah hujan tahun 2041-2060 signifikan terjadi di Jakarta Utara, Jakarta Timur (RCP 8,5), terlihat pada Gambar 6(c) dan terdistribusi berupa spot-spot hujan (RCP 2,6) pada Gambar 6(d).



Gambar 6. Proyeksi anomali curah hujan terhadap garis dasar rata-rata 1950-2000 (a) Anomali curah hujan rata-rata 2041-2060 dengan skenario RCP 8,5 (b) Anomali curah hujan rata-rata 2041-2060 dengan skenario RCP 2,6 (c) Anomali curah hujan rata-rata 2061-2080 dengan skenario RCP 8,5 (d) Anomali curah hujan rata-rata 2061-2080 dengan skenario RCP 2,6.

Bagaimanapun, karena sifat alami ilmu pengetahuan, tidak setiap seluk beluk permasalahan dapat diselesaikan dengan sempurna dan jelas. Tidak pula setiap pertanyaan penelitian dapat dijawab dengan pasti. Kejelasan bukti ilmiah terus berlanjut untuk dikumpulkan dari seluruh penjuru dunia. Dugaan-dugaan serta penemuan-penemuan yang berkaitan dengan perubahan iklim secara terus menerus diteliti, dianalisis dan diuji. Beberapa ranah perdebatan dan riset-riset masih berlangsung termasuk di dalamnya mata rantai antara kandungan panas di lautan dan laju pemanasan, perkiraan seberapa besar pemanasan di masa mendatang dan hubungan antara perubahan iklim dan kejadian-kejadian cuaca ekstrem.

Perubahan yang disebabkan oleh faktor-faktor alami, seperti tambahan aerosol dari letusan gunung berapi, tidak diperhitungkan dalam pengertian perubahan iklim. Dengan demikian fenomena alam yang menimbulkan kondisi iklim ekstrem seperti siklon yang dapat terjadi di dalam interval tahunan (*inter annual*) dan *El-Nino* serta *La-Nina* yang dapat terjadi di dalam sepuluh tahunan (*interdecadal*) tidak dapat digolongkan ke dalam perubahan iklim global. Namun demikian apabila fenomena-fenomena tersebut terjadi lebih intensif baik durasi dan frekuensinya maka hal itu sebagai akibat dari perubahan iklim. Menurut IPCC tahun 2008 bahwa nilai dan waktu perubahan iklim disebabkan oleh semua bentuk aktivitas baik manusia dan alam bergantung pada konsentrasi akhir GRK, aerosol dan laju pertumbuhan serta respon sistem iklim secara terinci. GRK khususnya CO₂ telah meningkat konsentrasinya di atmosfer setelah revolusi industri. Dampak utama meningkatnya GRK terhadap lingkungan adalah dapat menimbulkan pemanasan global yaitu secara fisis berpengaruh dalam penyerapan radiasi gelombang pendek dari Matahari dan menahan radiasi gelombang panjang dari Bumi.

Sebagai hasil dari pertumbuhan industrialisasi dan deforestasi maka tingkat emisi gas rumah kaca (GRK) telah meningkat di udara sehingga merubah komposisi udara Bumi. Perubahan komposisi tersebut akan mengganggu kesetimbangan radiasi gelombang pendek yang masuk dan gelombang panjang yang keluar. Selama periode 100 tahun terakhir, emisi gas rumah kaca yang dibuat manusia seperti karbondioksida, metan, dan oksida nitrogen telah meningkat, tiga gas utama yang paling besar sebagai hasil dari pembakaran bahan bakar fosil untuk keperluan energi dan transportasi serta perubahan pemanfaatan lahan untuk keperluan sumber makanan dan keperluan lainnya. Dalam 20 tahun terakhir, berkenaan telah munculnya dua fenomena tersebut, setidaknya satu sama lain saling terkait. Dengan kata lain bahwa, penyebab dari meningkatnya temperatur rata-rata global yang teramati kemungkinan dapat dipandang sebagai sebab dari meningkatnya emisi gas rumah kaca dan terjadi berbarengan dengan meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca di udara.

KESIMPULAN

Data rata-rata bulanan temperatur udara permukaan dan curah hujan diperoleh dari stasiun klimatologi Jakarta selama 100 tahun dari 1901 sampai 2007 telah diolah dan dianalisis dengan menggunakan metode statistik. Bentuk fungsi distribusi probabilitas data temperatur udara permukaan adalah PDF Normal dan tidak berubah tetapi rata-rata bulanan menunjukkan perubahan dengan laju 0,152°C per dekade. Bentuk fungsi distribusi probabilitas data curah hujan berubah (periode 30 tahun awal berbentuk PDF Gamma(2) dengan rata-rata 264 mm/bulan dan deviasi standar 79 mm/bulan menjadi PDF Logistik dengan rata-rata 285 mm/bulan dan deviasi standar 67 mm/bulan pada periode 30 tahun akhir) sepanjang seabad data pengamatan. Uji kecenderungan (*trend*) linear sesuai dengan uji Mann-kendall untuk temperatur dan curah hujan pada musim basah terhadap perubahan waktu sehingga didapat persamaan regresi linear

masing-masing $Y_t=26,1634+0,00126397*t$ (t bulan) dan $Y_t=244,8+3,487t$ (t indek bulan DJF). Berdasarkan data pengamatan dan proyeksi model iklim global maka pada dekade mendatang akan terjadi kenaikan temperatur (0.152°C per dekade) dan curah hujan pada musim basah (2,7 mm sampai 32,3 mm per musim basah) di Jakarta.

SARAN

Perluantisipasi sedini mungkin terhadap peningkatan temperatur dan curah hujan yang menunjukkan kecenderungan naik pada dekade mendatang dengan memperbanyak taman kota, pengurangan emisi GRK, infrastruktur kota ramah lingkungan, lubang resapan biofori kota dan lain-lain.

PENGHARGAAN (*acknowledgement*)

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer atas dukungan dana dalam penelitian ini dan Badan Meteorologi, Geofisika dan Klimatologi atas data di lapangan.

REFERENSI

- Dhorde, A., A. Dhorde¹, and A. S. Gadgil. (2009) Long-term Temperature Trends at Four Largest Cities of India during the Twentieth Century. *J. Ind. Geophys. Union* Vol.13, No.2, pp.85-97.
- Gurevish, G., Y. Hadad. A. Ofir and B. Ohayon. (2011) Statistical Analysis of Temperatur Change In Israel: An Application of Change Point Detection and Estimation Techniques. *Global NEST Journal*, Vol 13, No 3, pp 215-228.
- Hansen, J., P. Kharecha, M.Sato,V.M. Delmotte, F.Ackerman, D.J Beerling, P.J. Hearty, O.V. Gulberg, S.L.Hsu, C.Parmesan, J.Rockstrom, E.J.Rohling, J.Sachs, P.Smith, K. Steffen, L.V. Susteren, K.V.Schuckmann, and J.C.Zachos. (2013) *Assessing "Dangerous Climate Change": Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature*. PloS ONE 8(12): e81648. doi:10.1371/journal.pone.0081648
- Hughes, G. L., S.S. Rao and T.S. Rao. (2006) Statistical analysis and time-series models for minimum/maximum temperatures in the Antarctic Peninsula. *Proc. R. Soc. A*.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change]. (2007) *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, Cambridge University Press.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change] .(2008) Working Group II IPCC Fourth Assessment Report, Working Group II Report, Impacts, Adaptation and Vulnerability, Chapter 3, *Freshwater Resources and their Management*, tersedia pada <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg2.htm>. Diakses pada 28 Desember 2012
- NOAA [National Oceanic and Atmospheric Administration]. (2014) www.noaa.gov Diakses 2 April 2014

- NAS and TRS [The National Academy of Sciences and The Royal Society]. (2014) *Climate Change: Evidence and Choices (PDF Booklet)*. National Academy of Sciences. United State.
- Onoz, B., and M. Bayazit. (2003) *The Power of Statistical Tests for Trend Detection*, *J. Eng. Env. Sci.* Vol.27, 247-251, TUBITAK Turkish
- The World Bank. (2012). *Climate Change, Disaster Risk, and The Urban Poor: Cities Building Resilience for a Changing World*, Judy L. Baker [Editor]. The World Bank, Washington, D.C.
- Worldclim. www.worldclim.org, diakses 30 Pebruari 2014