

# HASIL PENELITIAN PENGEMBANGAN OBSERVASI LINGKUNGAN DAN PREDIKSI IKLIM \*

Agus Nuryanto \*\*

Mezak A. Ratag \*\*\*

## ABSTRAK

Dalam makalah ini dibahas berbagai upaya LAPAN yang menyangkut penelitian dan pengembangan observasi lingkungan serta prediksi iklim. Pembahasan dititikberatkan pada keterkaitan hasil dari upaya-upaya tersebut dengan isu-isu perubahan lingkungan hidup global, kebutuhan nasional dan internasional akan adanya strategi pembangunan yang berkelanjutan, pemantauan pelaksanaan kebijaksanaan lingkungan hidup, dan kebutuhan akan prakiraan cuaca dan iklim serta perilaku atmosfer bumi secara keseluruhan untuk mendukung berbagai upaya pembangunan dalam sektor-sektor pertanian, perhubungan, dan telekomunikasi.

Hasil penelitian dan pengembangan observasi lingkungan yang dikemukakan adalah yang berkaitan dengan fisika, dinamika dan kimia atmosfer, termasuk masalah polusi. Observasi kimia atmosfer difokuskan pada gas rumah kaca dan polutan (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, NO, O<sub>3</sub> permukaan), ozon (troposfer stratosfer), aerosol, dan hujan asam. Dalam kegiatan fisika dan dinamika atmosfer, pengamatan yang dilakukan diarahkan terutama pada aspek radiasi, jenis, dan liputan awan, curah hujan, angin radiasi ultraviolet di permukaan bumi, temperatur daratan dan lautan.

Prediksi iklim berbasis model yang dilakukan LAPAN diarahkan untuk mendukung berbagai upaya pembangunan, terutama dalam sektor pertanian, perhubungan dan telekomunikasi. Dalam makalah ini dibahas tentang kegiatan-kegiatan utama yang meliputi pengembangan model iklim global dan model iklim Indonesia, serta observasi parameter-parameter atmosfer untuk mendukung prediksi dan untuk uji validasi model yang digunakan. Termasuk dalam berbagai kegiatan tersebut adalah upaya memahami dampak kenaikan gas-gas rumah kaca terhadap iklim serta mekanisme fenomena ENSO.

## 1. Pendahuluan

Dalam beberapa dasawarsa terakhir, sejumlah masalah lingkungan hidup telah menjadi pusat perhatian global. Dampaknya yang mengancam kelestarian lingkungan hidup dan kehidupan itu sendiri telah mengangkat masalah-masalah tersebut menjadi salah satu syarat batas terpenting

\* Dipresentasikan pada Seminar Antariksa Nasional 1995, Jakarta, 26 Oktober 1995

\*\* Deputi Ketua Bidang Penelitian Media Dirgantara, LAPAN

\*\*\* Peneliti, Puslitbang Pengetahuan Ionosfer, LAPAN.

dalam perencanaan, pelaksanaan, dan evaluasi pembangunan dalam berbagai sektor. Kenaikan konsentrasi gas-gas rumah kaca di atmosfer, terutama yang bersumber dari aktivitas manusia, berpeluang besar memicu pemanasan global. Selain pemanasan global, masalah-masalah penipisan lapisan ozon, kenaikan jumlah aerosol, dan hujan asam berada di antara isu-isu terpenting. Dinamika atmosfer lainnya yang terkait erat dengan aspek sosio-ekonomi adalah variasi iklim jangka pendek dan jangka panjang yang berpengaruh besar terhadap pertanian, ekonomi, dan berbagai aktivitas manusia lainnya. Dampak ENSO (*El-Niño Southern Oscillation*) berupa episode-episode kekeringan besar-besaran dan atau peningkatan presipitasi dalam skala ruang dan waktu, telah berulang kali menimbulkan kerugian besar bagi banyak negara, termasuk Indonesia.

Baik secara sendiri-sendiri maupun secara bersama-sama, negara-negara di dunia telah melakukan sejumlah besar upaya adaptasi dan mitigasi untuk menghadapi dampak perubahan global. Upaya-upaya tersebut meliputi pengamatan, pemahaman proses-proses serta manajemen informasi yang menyangkut sistem Bumi, prediksi perubahan, analisis konsekuensi-konsekuensi, pengkajian kebijaksanaan dan pilihan-pilihan, serta peningkatan pengetahuan dan kesadaran masyarakat.

Keinginan untuk dapat terus bertumbuh dengan melakukan pembangunan dalam berbagai sektor serta adanya petunjuk telah terjadinya perubahan global atmosfer Bumi yang dapat mengancam kehidupan dan upaya pembangunan itu sendiri, menghendaki suatu strategi kebijaksanaan pembangunan berkelanjutan yang paling tepat untuk Indonesia dengan memperhatikan kekhasan kondisi alam dan letaknya serta sumberdaya manusia dan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Model iklim, yang menggambarkan interaksi-interaksi fisika, kimia dan dinamika atmosfer serta melibatkan berbagai proses dalam sistem Matahari-Bumi secara keseluruhan, merupakan alat utama dalam upaya memahami sistem iklim. Dengan demikian model iklim merupakan alat utama untuk mensimulasikan iklim pada masa lalu dan sekarang serta untuk memprediksi iklim pada masa yang akan datang. Prediksi kualitatif dan kuantitatif, dalam dimensi ruang dan waktu, yang dibuat berlandaskan model iklim sangat dibutuhkan dalam berbagai proses pengambilan keputusan.

Pemodelan iklim sebagai komponen riset perubahan global merupakan sumber informasi utama yang memberikan arahan dan wawasan ilmiah yang mendalam tentang isu-isu terpenting dan pilihan-pilihan kebijaksanaan pembangunan berkelanjutan yang dihadapi suatu negara dan masyarakat dunia secara global. Di samping itu, prakiraan cuaca dan iklim berbasis model sangat dibutuhkan untuk mendukung berbagai upaya pembangunan terutama dalam sektor-sektor pertanian, perhubungan, dan telekomunikasi.

Model iklim tidak hanya merupakan representasi pengintegrasian pengetahuan yang berkaitan dengan perilaku dinamis iklim tetapi juga berperan sebagai alat penganalisa perilaku itu sendiri. Dari perspektif ini, model iklim dapat dipandang sebagai ukuran tingkat pemahaman dan sekaligus juga sebagai sumber ide-ide penelitian dan pengembangan pengetahuan tentang iklim dan sistem Matahari-Bumi secara keseluruhan.

Dalam makalah ini dibahas kegiatan LAPAN yang berkaitan dengan observasi lingkungan dan prediksi iklim, baik yang melibatkan peralatan-peralatan landas-bumi maupun yang berbasis satelit dan wahana antariksa lainnya.

## 2. Observasi Lingkungan dan Program Iklim

Pengertian observasi lingkungan dalam hal ini meliputi pengukuran-pengukuran langsung dan ekstraksi-informasi lanjut dari data yang diperoleh oleh institusi-institusi lain, termasuk data yang bersumber dari sejumlah satelit. Kegiatan observasi lingkungan ini mengemban dua fungsi. Yang pertama adalah dalam rangka *pemantauan kondisi lingkungan hidup* baik untuk maksud adaptasi maupun mitigasi. Termasuk di dalamnya adalah pemantauan polusi, konsentrasi gas-gas rumah kaca, konsentrasi ozon, aerosol, keasaman air hujan, serta analisis-analisis lanjut yang terkait. Fungsi kedua yang diemban adalah *mendukung kegiatan prediksi dan simulasi iklim*. Dalam kegiatan prediksi dan simulasi iklim sangat dibutuhkan pengukuran-pengukuran variabel-variabel iklim (terutama suhu permukaan laut dan daratan, curah hujan, angin, kelembaban, serta keadaan awan), konsentrasi gas rumah kaca, konsentrasi aerosol, dan komponen-komponen radiasi yang mempengaruhi atmosfer Bumi. Hasil-hasil terpenting observasi lingkungan yang dilaksanakan LAPAN dalam kerangka kerja penelitian dan pengembangan pengetahuan atmosfer diberikan secara terinci pada Lampiran A.

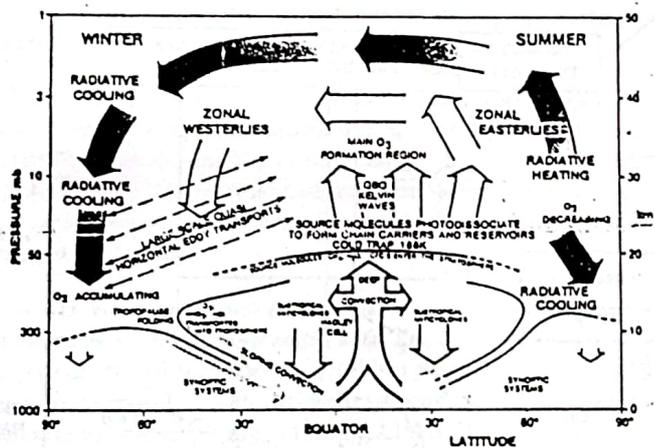
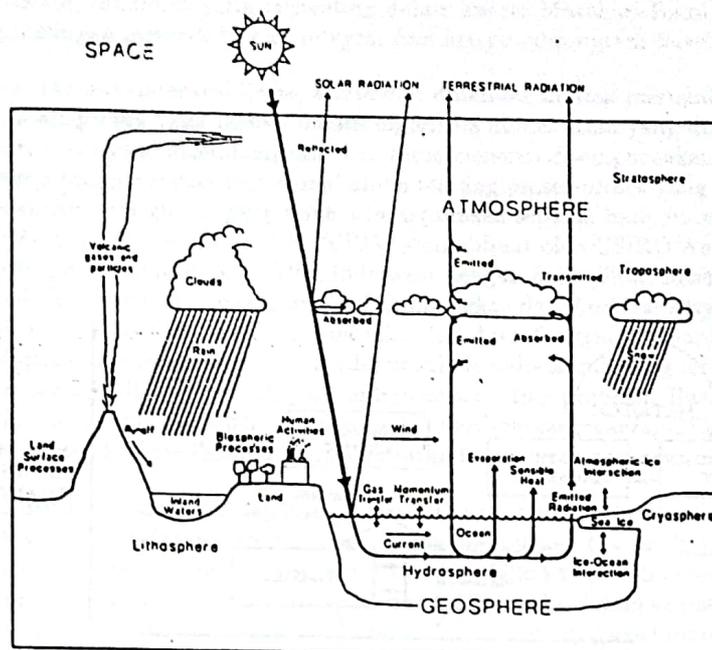
Komponen-komponen utama sistem atmosfer Bumi dan sistem hubungan Matahari-Bumi yang digunakan sebagai acuan bagi Program Iklim LAPAN digambarkan secara skematis, berturut-turut, pada Gambar 1 dan 2. Gambar 1 mempunyai titik berat pada interaksi-interaksi atmosferik di daerah atmosfer bawah, sedangkan Gambar 2 menekankan berbagai aspek hubungan Matahari-Bumi yang mempengaruhi atmosfer Bumi dan sistem iklimnya.

Program iklim LAPAN bertujuan untuk meningkatkan kemampuan dalam pengembangan dan penguasaan pengetahuan tentang proses-proses interaksi fisika, kimia dan dinamika dirgantara yang berperan dalam sistem Matahari-Bumi secara keseluruhan untuk dapat mengantisipasi perilaku sistem atmosfer Bumi. *Sasaran utama* yang ingin dicapai adalah terbentuknya suatu sistem peringatan dini, termasuk *model iklim Indonesia* dan *model iklim global*, yang mempunyai daya prediksi tinggi dan mampu menyediakan informasi yang dapat mendukung pembangunan sektor-sektor pertanian, perhubungan dan telekomunikasi serta upaya-upaya peningkatan mutu dan pelestarian lingkungan hidup. *Sasaran lainnya* adalah diperolehnya kemampuan untuk memprediksi efek-efek aktivitas Matahari terhadap permukaan, atmosfer, serta lingkungan antariksa Bumi, dan terhadap sistem-sistem teknologi yang ditempatkan di ruang angkasa dan di permukaan Bumi.

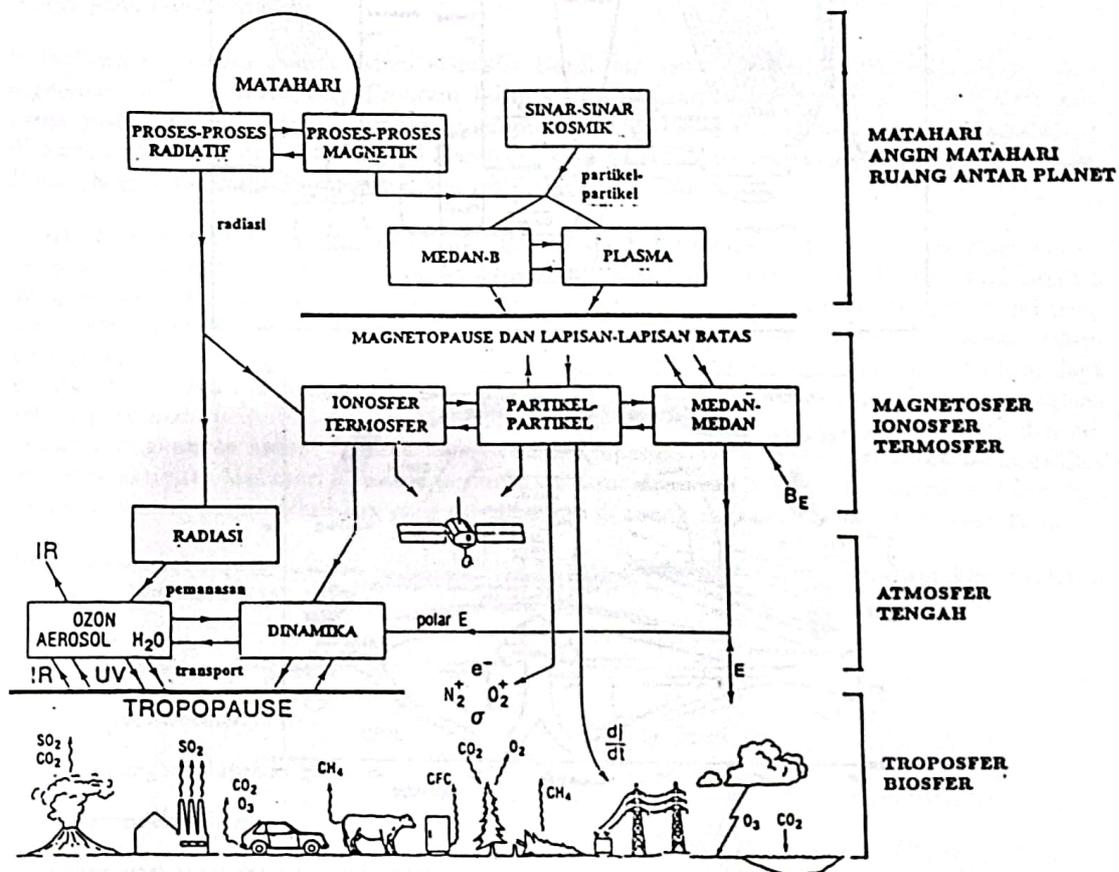
Kegiatan-kegiatan penelitian yang mendukung ke arah pencapaian sasaran program iklim dikelompokkan dalam lima subprogram :

1. Proses-proses atmosferik
2. Polusi atmosfer
3. Hubungan Matahari-Bumi
4. Pemodelan iklim
5. Simulasi perubahan atmosfer global

Topik-topik kegiatan yang diidentifikasi sebagai topik-topik dengan prioritas tertinggi dalam kelima subprogram tersebut dipaparkan dalam Lampiran B. Pada hakekatnya, tidak ada batas-batas yang tegas antara subprogram- subprogram tersebut. Pembagian di atas hanya memperlihatkan titik berat- titik berat himpunan-himpunan kegiatan yang tercakup. Uraian di bawah ini memerikan



Gambar 1 Komponen-komponen terpenting dalam sistem iklim global dengan titik berat pada interaksi-interaksi di daerah permukaan, troposfer, dan stratosfer.



Gambar 2 Interaksi-interaksi mendasar dalam sistem Matahari-Bumi dan pengaruhnya terhadap atmosfer Bumi serta sistem teknologi yang ditempatkan di ruang angkasa dan di permukaan.

garis-garis besar keterkaitan antar subprogram. Gambaran skematisnya diberikan dalam Gambar 3.

Ketiga subprogram yang pertama berisi kegiatan-kegiatan penelitian untuk memahami interaksi-interaksi fisika, kimia dan dinamika yang terpenting dalam sistem Matahari-Bumi secara keseluruhan. Observasi lingkungan menjadi bagian integral dari ketiga subprogram tersebut.

Pemahaman tentang interaksi-interaksi fisika, kimia dan dinamika di atas merupakan dasar bagi berbagai subrutin proses-proses yang terkait dalam algoritma model iklim yang dilakukan dalam subprogram 4. Model iklim yang dikembangkan akan terus menerus disempurnakan dari waktu ke waktu mengikuti tahap-tahap peningkatan pemahaman tentang proses-proses yang bersangkutan. Pada fase awal model atmosfer global yang telah ada digunakan sebagai basis untuk pengembangan lebih lanjut. Dalam hal ini dipilih model CSIRO9 yang dibuat oleh CSIRO Australia. Secara *overall* model ini mampu mensimulasikan iklim Indonesia dengan baik (lihat, misalnya, Suppiah, 1994, 1995). Model iklim Indonesia dan sekitarnya dikembangkan dari *Limited-Area Model* (LAM) CSIRO (McGregor dkk., 1993) yang meliputi Australia dan Asia Tenggara. Selanjutnya, dengan *multiple nesting*<sup>1</sup> dapat dikembangkan model-model untuk daerah-daerah yang lebih kecil, misalnya untuk setiap pulau besar di Indonesia dan kemudian untuk setiap propinsi. Hasil awal simulasi dan skenario iklim Indonesia (Ratag, 1995) yang diperoleh berdasarkan *running* CSIRO9 dan LAM pada SGI Power Challenge L diperlihatkan pada Lampiran C.

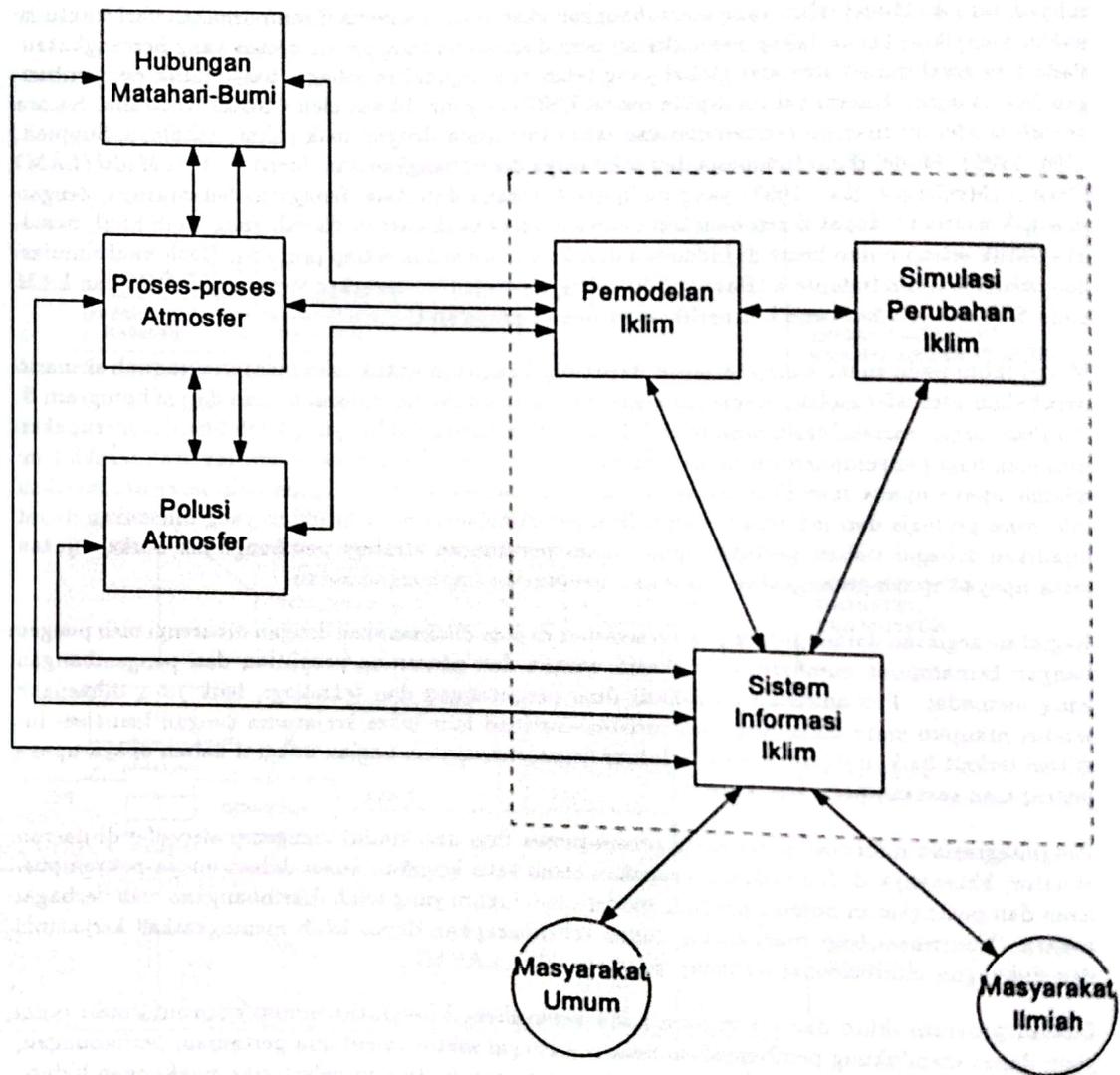
Model iklim pada suatu tahap tertentu dapat dipergunakan untuk mempelajari sejumlah skenario perubahan atmosfer global. Kegiatan-kegiatan semacam ini merupakan bagian dari subprogram 5. Perbandingan variabilitas luaran model dengan data variabel iklim yang telah tersedia merupakan masukan bagi penyempurnaan model dalam subprogram 4. Termasuk dalam kegiatan terakhir ini adalah upaya-upaya mempelajari variasi iklim pada masa lampau (*palaeoclimate*) berdasarkan informasi geologis dan informasi serupa lainnya. Simulasi perubahan iklim yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan dalam perumusan strategi pembangunan berkelanjutan serta upaya-upaya peningkatan mutu dan pelestarian lingkungan hidup.

Kegiatan-kegiatan dalam program iklim tersebut di atas dilaksanakan dengan dibarengi oleh pengembangan kemampuan sumberdaya manusia, sarana dan prasarana penelitian dan pengembangan yang memadai. Pemanfaatan hasil-hasil ilmu pengetahuan dan teknologi, baik yang dihasilkan sendiri maupun yang dihasilkan oleh institusi-institusi lain, serta kerjasama dengan institusi-institusi terkait baik di dalam maupun di luar negeri merupakan bagian integral dalam upaya-upaya pencapaian sasaran program iklim ini.

Pengintegrasian informasi (data serta proses-proses fisis dan kimia) mengenai atmosfer di daerah ekuator, khususnya di Indonesia, merupakan salah satu kegiatan kunci dalam upaya penyempurnaan dan peningkatan potensi prediksi model-model iklim yang telah dikembangkan oleh berbagai negara. Kontribusi bagi masyarakat ilmiah ini diharapkan dapat lebih meningkatkan kerjasama dan dukungan internasional terhadap program iklim LAPAN.

Luaran program iklim diarahkan pula pada kebutuhan masyarakat umum akan informasi iklim yang dapat mendukung pembangunan dalam berbagai sektor (terutama pertanian, perhubungan, dan telekomunikasi) termasuk upaya-upaya peningkatan mutu dan pelestarian lingkungan hidup.

<sup>1</sup> Seperti yang diaplikasikan oleh McGregor & Walsh (1994) untuk mensimulasikan iklim Tasmania.



**Gambar 3** Garis besar kaitan antara subprogram-subprogram dalam Program Iklim serta luarannya bagi masyarakat umum dan masyarakat ilmiah.

### 3. Peran Hubungan Matahari-Bumi dan Atmosfer Equator

Iklim dapat didefinisikan sebagai keadaan rata-rata atmosfer, terutama pada daerah dekat permukaan Bumi, serta statistik variasinya. Variabel-variabel iklim yang sangat besar pengaruhnya terhadap kehidupan adalah temperatur, curah hujan, angin, kelembaban, dan keadaan awan. Sistem iklim meliputi atmosfer, lautan, daratan, kriosfer dan biosfer. Komponen-komponen ini berinteraksi satu sama lain dan membentuk suatu sistem umpan-balik yang kompleks.

Perubahan kesetimbangan energi dan komposisi kimia atmosfer mengakibatkan terjadinya perubahan interaksi pola komponen-komponen iklim serta variabel-variabel iklim. Perubahan kesetimbangan energi dan komposisi kimia atmosfer tersebut dapat bersumber dari *aktivitas manusia* (antropogenik) maupun *aktivitas alami* seperti variabilitas radiasi energi dan partikel Matahari, aktivitas gunung berapi, dan masuknya partikel-partikel meteoroid ke dalam atmosfer.

Kenaikan kandungan gas rumah kaca –seperti karbondioksida, metan, ozon, NO<sub>2</sub> dan CFC– dapat menyebabkan kenaikan temperatur atmosfer Bumi. Meskipun demikian, berapa besar kenaikan temperatur dan lamanya waktu-tunda (delay) serta selang waktu berlangsungnya pemanasan yang diakibatkan masih merupakan perdebatan sengit di antara para pakar.

Hasil mutakhir dalam studi hubungan Matahari-Bumi (Solar-Terrestrial relationships) menunjukkan adanya korelasi yang tinggi dan meyakinkan antara siklus aktivitas matahari dan temperatur permukaan (daratan dan laut). Beberapa peneliti juga memperlihatkan korelasi yang tinggi antara aktivitas matahari dengan konsentrasi ozon, QBO (quasi-biennial oscillation), medan elektromagnet Bumi, serta arah dan kecepatan angin. Tetapi, penelitian lebih lanjut masih dibutuhkan untuk memperoleh mekanisme fisis yang dapat menjelaskan korelasi-korelasi tersebut.

Untuk memahami mekanisme-mekanisme fisis dan kimiawi yang dapat menjelaskan korelasi-korelasi Matahari-Bumi tersebut di atas perlu diteliti secara lebih detail proses-proses transfer massa, energi dan momentum antar lapisan dalam sistem Matahari-Bumi.

Penelitian atmosfer belakangan ini, baik berdasarkan pengamatan langsung maupun berdasarkan simulasi model sirkulasi global, mengindikasikan peran penting atmosfer di daerah equator dalam sistem atmosfer global. Atmosfer di daerah equator memperlihatkan ciri khas dan peran pentingnya karena memiliki (i) input energi matahari terbesar, dan (ii) gaya Coriolis yang kecil. Bila kita meninjau daerah ekuator dalam jangkauan antara lintang 30°S dan 30°N, luas permukaannya adalah sekitar setengah dari permukaan Bumi dan penampang lintangnya terhadap radiasi matahari mendekati duapertiga penampang lintang keseluruhan. Dengan demikian, atmosfer ekuator menerima energi matahari dalam jumlah yang terbesar dan membentuk distribusi temperatur atmosfer dengan maksimum di daerah ekuator dan minimum di daerah kutub. Pola ini merupakan penggerak utama sirkulasi skala-besar atmosfer global.

Energi matahari yang diterima dalam jumlah besar di daerah ekuator juga dideposisikan dalam konveksi kumulonimbus yang selanjutnya dibawa secara vertikal maupun horisontal ke daerah yang jauh dari daerah asal-mulanya. Karena komponen horisontal gaya Coriolis yang bekerja mendisipasikan gelombang-gelombang atmosfer mempunyai minimum di daerah ekuator, gelombang-gelombang dengan rentang frekuensi yang lebar dapat menjalar vertikal dengan membawa energi ke atas.

Gangguan-gangguan atmosfer terbesar terjadi di tiga daerah di ekuator di mana laut dan daratan berinteraksi : Indonesia, Afrika dan Amerika Latin. Daerah Indonesia memiliki ciri khas den-

gan kompleksnya distribusi laut- daratan. Di samping itu banyaknya penguapan air, yang membawa panas laten, terbesar adalah di daerah Pasifik Barat sekitar Indonesia. Pembentukan awan di Indonesia mempunyai fluktuasi yang sangat besar terhadap musim dan tahun, dan seringkali menyebabkan perubahan iklim global yang dikenal sebagai ENSO (El Nino Southern Oscillation). Karena potensi besarnya dalam hal mengganggu kegiatan ekonomi dan pertanian (terutama yang menyangkut kekeringan dan banjir) pengetahuan tentang gejala ENSO ini akan dapat mendukung upaya antisipasi efek merugikannya. Meskipun demikian, model-model sirkulasi global yang ada masih belum mampu memberikan prediksi dengan tingkat akurasi yang sesuai dengan kebutuhan upaya antisipasi tersebut.

Hasil-hasil penelitian mutakhir menunjukkan bahwa daerah ekuator sekitar Indonesia juga merupakan daerah semburan (*fountain*) gas-gas telusur, yakni dalam bentuk awan-awan kumulus panjang yang secara eksklusif dibentuk di daerah ekuator Indonesia dan kadang-kadang mampu menembus sampai ke daerah stratosfer dan membawa komponen-komponen udara troposfer ke atas tropopause.

Para peneliti atmosfer global kini sepakat bahwa atmosfer ekuator Indonesia dapat dipandang sebagai "steam engine" dari sistem sirkulasi atmosfer Bumi dan merupakan kendali utama perubahan global atmosfer.

#### 4. Kerangka Kerja

Upaya-upaya pencapaian sasaran program observasi lingkungan dan prediksi iklim LAPAN dilakukan dengan menerapkan pola kerja yang terkoordinasi, terintegrasi, dan tersinkronisasi. Kegiatan-kegiatan yang ada diklasifikasikan dalam beberapa alur kerja yang terkopel erat satu sama lain:

**Pengamatan Sistem Bumi** yang meliputi upaya-upaya (i) membentuk dan melaksanakan program pengamatan untuk memantau dan memerikan keadaan sistem Bumi dan komponennya secara terpadu, komprehensif, dan berjangka panjang, dan (ii) mengumpulkan dan menganalisis hasil-hasil pengamatan yang menyangkut perubahan-perubahan lingkungan hidup dan sosio-ekonomi dalam sistem Bumi pada masa lampau dan sekarang.

**Pemahaman Proses-Proses** yang meliputi aktivitas mengukur, menganalisa, dan menyelidiki proses-proses fisika, kimia, biologis, dan geologis serta pengaruh-pengaruh sosio-ekonomi yang ikut menentukan perilaku sistem Bumi, termasuk interaksi-interaksi aktivitas manusia dan lingkungan global.

**Manajemen Data dan Informasi** yang meliputi kegiatan-kegiatan mengumpulkan, memproses, menyimpan, dan mendistribusikan data dan informasi yang menyangkut keadaan sistem global, baik keadaan-keadaan sistem alami maupun keadaan sistem-sistem sosio-ekonomi yang mempengaruhi dan yang dipengaruhi oleh perubahan-perubahan lingkungan global.

**Prediksi Perubahan** yang meliputi kegiatan-kegiatan mengembangkan, menguji, dan mengaplikasikan model-model sistem Bumi –termasuk model iklim– yang bersifat konseptual dan prediktif untuk dapat menghasilkan wawasan mendalam dan proyeksi terpercaya tentang gangguan antropogenik, serta untuk dapat memperbaiki sistem prediksi yang bersangkutan berdasarkan perbandingan dengan perilaku sistem Bumi yang teramati.

**Analisa Konsekuensi** yang meliputi kegiatan mengevaluasi dan menginterpretasi konsekuensi-konsekuensi dampak perubahan global terhadap lingkungan dan masyarakat, serta memahami berbagai kemungkinan dan potensi untuk dapat melakukan meminimalan dan/atau adaptasi terhadap dampak perubahan global, baik yang bersifat alami maupun yang berbasis teknologi (maju).

**Pengkajian Kebijakan dan Alternatif** yang meliputi riset tentang interaksi-interaksi sosio-ekonomi, kerangka kerja pengambilan keputusan (khususnya pengambilan keputusan yang terkait dengan ketidakpastian ilmiah yang besar, seperti yang menyangkut pengurangan emisi CO<sub>2</sub>, CFCs, metan, dan polutan-polutan lainnya; deforestasi, tata guna tanah, pola tanam), dan pengembangan piranti-piranti analisis kebijakan dan ekonomi untuk mengkaji kekuatan, kelemahan, peluang, dan risiko dari berbagai alternatif yang dapat dipilih untuk menanggapi perubahan global.

**Interaksi Nasional dan Internasional** yang meliputi upaya-upaya mendorong dan mempromosikan kerjasama dengan instansi-instansi lain, di dalam dan di luar negeri, dalam mengembangkan pemahaman ilmiah dan membentuk jaringan kerja nasional dan internasional yang diperlukan bagi tinjauan multidisiplin dan multiskala mengenai isu-isu perubahan global.

**Peningkatan Sumber Daya**, yang meliputi peningkatan sumber daya perangkat lunak dan perangkat keras, serta sumber daya manusia yang terkait langsung dengan perencanaan dan pelaksanaan kegiatan-kegiatan program iklim.

**Peningkatan Pengetahuan dan Kesadaran Masyarakat** yang meliputi kegiatan-kegiatan penyediaan bahan-bahan dan pengorganisasian aktivitas dalam upaya mempromosikan keprihatinan terhadap masalah perubahan lingkungan global beserta dimensi-dimensi kemanusiannya, sebagai bagian dari proses-proses meningkatkan kesadaran dan mendidik masyarakat serta pemasyarakatan ilmu pengetahuan.

---

#### Daftar Pustaka :

- McGregor, J.L. 1993, Nested Modelling for Regional Climate Studies, dalam "Modelling Change in Environmental Systems", Eds. A.J. Jakeman dkk., John Wiley & Sons, hal.367-386
- Ratag, M.A. 1995, Laporan Pelatihan SN4000 dan Pemodelan Iklim di DAR CSIRO, Mordialloc, Victoria, Australia, 4-14 Juni 1995, *Laporan Teknis Intern LAPAN*.
- Suppiah, R. 1994, The Asian Monsoons: Simulations from Four GCMs and Likely Changes under Enhanced Greenhouse Conditions, dalam "Climate Impact Assessment Methods for Asia and the Pacific", Eds. A.J. Jakeman & A.B. Pittock, AIDAB, Canberra, hal.73-78
- Suppiah, R. 1995, The Australian summer monsoons: CSIRO9 GCM simulations for 1×CO<sub>2</sub> and 2×CO<sub>2</sub> conditions, *Global & Planetary Change* Vol.294, hal.1-15

## Lampiran A

### Rangkuman Hasil Penelitian dan Pengembangan Observasi Atmosfer & Lingkungan Puslitbang Pengetahuan Atmosfer LAPAN<sup>1</sup>

---

#### Dinamika Atmosfer

- Quasi Biennial Oscillation (QBO) di daerah ekuator
- konveksi awan kumululus
- model tiga dimensi isotropik untuk lapisan batas atmosfer (pengembangannya untuk studi transportasi polusi udara)
- interaksi atmosfer dengan air laut
- pengaruh QBO terhadap curah hujan di Indonesia
- parameter turbulensi atmosfer permukaan
- hubungan *water content* dengan kelembaban permukaan
- deteksi gelombang atmosfer dengan Wind Profiling Radar (WPR) di Biak
- hubungan ENSO dengan periodisitas curah hujan di Pulau Jawa

#### Meteorologi Antariksa

- estimasi curah hujan berdasarkan data GMS dan NOAA
- estimasi penyebaran horizontal temperatur permukaan laut dengan data NOAA-11
- hubungan *total precipitable water* (TPW) dengan curah hujan di atas Jakarta
- hubungan antara curah hujan dengan TPW, indeks konveksi ( $I_c$ ), dan indeks kebasahan ( $I_m$ )
- hubungan antara gerak awan dan angin berdasarkan data GMS
- penentuan fluks panas sensibel dan fluks panas laten evaporasi dengan metoda bulk aerodynamic berdasarkan data hasil pelayaran oseanografi KAL Baruna Jaya I

---

<sup>1</sup> oleh Siti Aziati, Timbul Manik, dan Sri Kaloka (Puslitbang Pengetahuan Atmosfer LAPAN, Bandung)

## Ozon

### Ozon Permukaan:

- variasi harian ozon permukaan di Bandung dan Watukosek
- pengamatan simultan ozon permukaan dan precursornya
- perilaku gas-gas telusur ( $O_3$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $NO$  dan  $NO_2$ ) untuk mengamati perubahan konsentrasi terhadap waktu serta perilakunya sebagai gas rumah kaca

### Ozon Vertikal:

- profil ozon vertikal di Watukosek, Ciater, dan Bandung

## Radiasi Matahari

- pemetaan intensitas radiasi matahari untuk wilayah Indonesia
- efek intensitas radiasi matahari terhadap kriteria (pengrusakan pada kulit manusia)
- radiasi gelombang panjang dan radiasi net di Bandung, Watukosek, Padangpanjang, dan Pontianak
- transmisi radiasi matahari di lapisan atmosfer Indonesia
- efek kekeruhan atmosfer terhadap transmisi radiasi matahari
- radiasi ultraviolet yang terkait dengan fungsi tangkal lapisan ozon (uv-A dan uv-B)

## Polusi Udara

- aerosol
  - penyebaran polusi
  - gas-gas pencemar ( $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$ , dan ozon permukaan)
  - hujan asam
-

**Lampiran B. Subprogram-Subprogram dalam Program Iklim LAPAN**

<b>1 Proses-Proses Atmosfer</b>
<b>1.1 Aspek radiasi, jenis dan liputan awan</b>
<b>1.2 Presipitasi, transpirasi, &amp; evaporasi di lapisan troposfer</b>
<b>1.3 Variasi temperatur dan angin terhadap ruang dan waktu</b>
<b>1.4 Fluks energi permukaan, fluks radiasi atmosfer, &amp; fluks energi pada batas atmosfer Bumi</b>
<b>1.5 Siklus hidrologis di daerah terlapis salju, es, tanah lembab, &amp; vegetasi</b>
<b>1.6 Dinamika atmosfer pada skala mikro, meso, &amp; makro</b>
<b>1.7 Atmosfer ekuator dalam hubungannya dengan perubahan iklim global</b>

<b>2 Polusi Atmosfer</b>
<b>2.1 Gas-Gas Rumah Kaca (GRK)</b>
<b>2.2 Dispersi turbulen</b>
<b>2.3 Meteorologi Polusi Udara</b>
<b>2.4 Kualitas Udara dan Hujan Asam</b>
<b>2.5 Siklus Biogeokimia</b>

### 3 Hubungan Matahari-Bumi

- 3.1 Pengaruh variabilitas Matahari pada lingkungan hidup
- 3.2 Matahari sebagai pembangkit tenaga dan sumber gangguan
- 3.3 Respons atmosfer-tengah terhadap *forcing* atas dan bawah
- 3.4 Kopling ionosfer-termosfer & responnya terhadap masukan energi & momentum
- 3.5 Transfer energi & massa di media antar planet dan sistem magnetosfer-ionosfer

### 4 Pemodelan Iklim

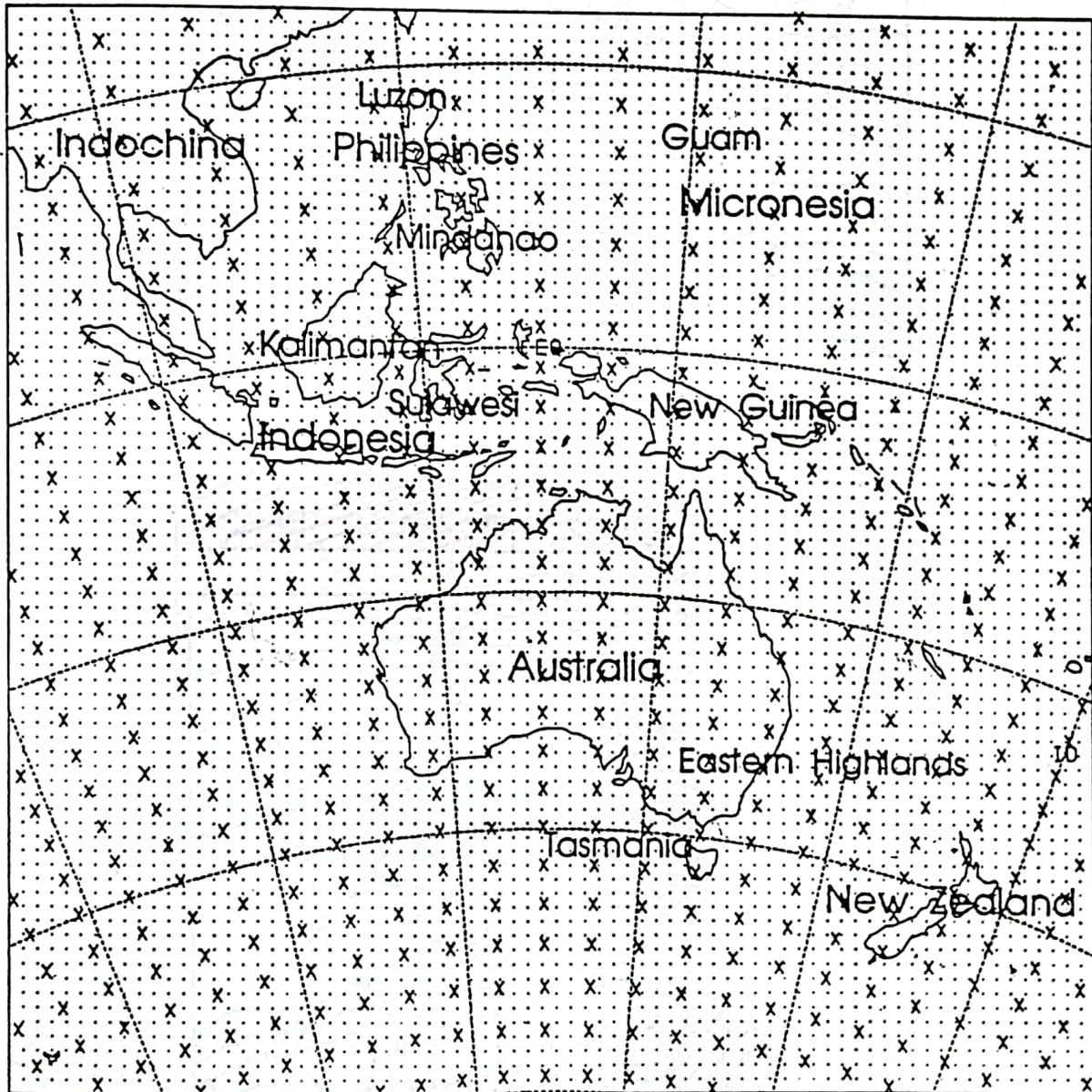
- 4.1 Pemodelan iklim secara statistik multivariabel (ruang & waktu) pada skala: mikro, meso, regional, & global
- 4.2 Pemodelan proses-proses fisis & kimia atmosfer: hujan, kesetimbangan radiasi, albedo, konveksi, divergensi, vortisitas, turbulensi, awan, interaksi laut-atmosfer, siklus-siklus C, N, S, dan P
- 4.3 Pemodelan penyebaran (dispersi) polusi
- 4.4 Pemodelan variabilitas Matahari dan pengaruhnya terhadap atmosfer Bumi
- 4.5 Pemodelan gangguan iklim: ENSO, SAO, QBO, *Gravity Wave*, aktivitas gunung berapi
- 4.6 Pemodelan sistem iklim pada skala lokal, regional, & global
- 4.7 Manajemen sistem informasi: bank data, masyarakat umum, dan masyarakat ilmiah

## 5 Simulasi Perubahan Iklim

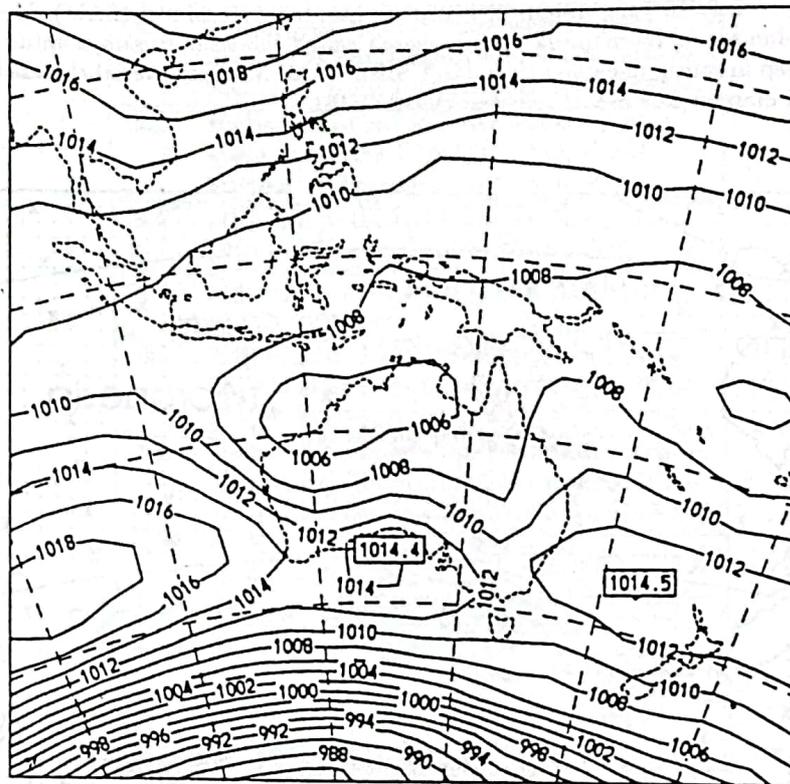
- |      |   |
|------|---|
| 5.1  | Hubungan timbal balik antara perubahan iklim dengan O <sub>3</sub> , GRK, siklus S,C,N,P, suhu permukaan, perawanan |
| 5.2  | Hubungan timbal balik antara gangguan atmosfer (ENSO, SAO, QBO, vulkanik) dengan perubahan iklim                    |
| 5.3  | Hubungan timbal balik antara penipisan ozon dengan perubahan iklim  |
| 5.4  | Dampak perubahan iklim terhadap siklus hidrologis   |
| 5.5  | Hubungan timbal balik antara perubahan albedo dengan perubahan iklim untuk berbagai skala waktu & ruang             |
| 5.6  | Pengaruh perubahan parameter atmosfer dalam berbagai skala waktu & ruang terhadap kondisi lingkungan hidup          |
| 5.7  | Prakiraan iklim untuk berbagai skala waktu dan ruang  |
| 5.8  | Variasi topografi & sirkulasi massa udara secara makro terhadap perubahan iklim                                     |
| 5.9  | Efek variasi luminositas Matahari terhadap iklim global Bumi  |
| 5.10 | Efek variasi radiasi partikel Matahari terhadap perubahan atmosfer global   |
| 5.11 | Efek gejala-gejala di permukaan Matahari terhadap atmosfer Bumi   |
| 5.12 | Efek masuknya gas & debu yang berasal dari komet & meteor terhadap perubahan atmosfer global                        |
| 5.13 | Perubahan atmosfer Bumi pada masa lampau ( <i>palaeoclimate</i> )   |

### Lampiran C. Simulasi dan Skenario Iklim Indonesia

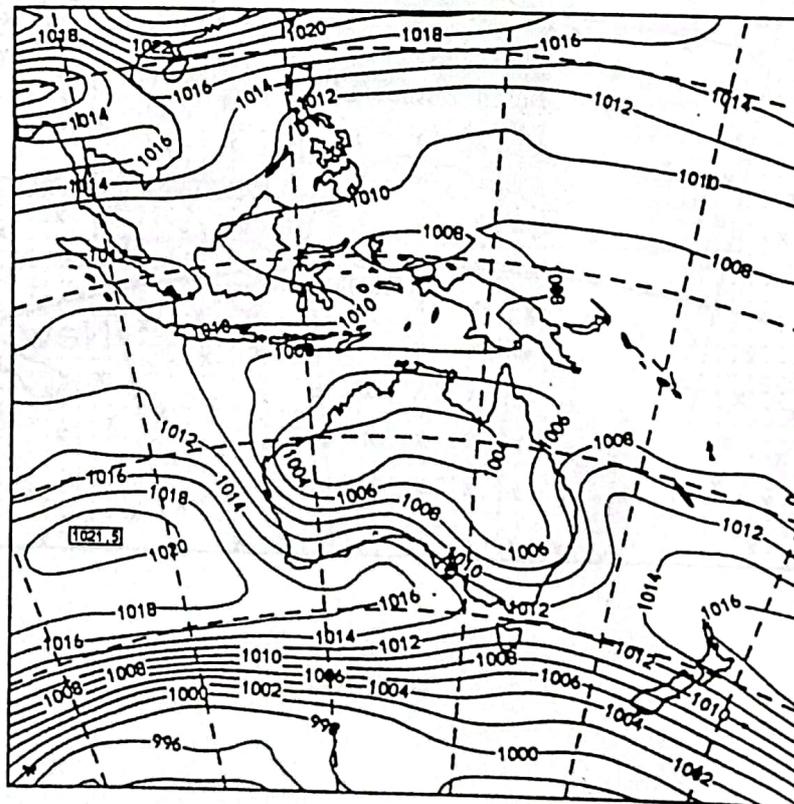
**Gambar C.1** Daerah yang diliput oleh CSIRO Limited-Area Model (LAM). Model iklim Indonesia dan model iklim untuk daerah-daerah yang lebih kecil, misalnya untuk setiap pulau atau setiap propinsi, dikembangkan dari CSIRO LAM. Nilai-nilai variabel pada batas daerah LAM ini diambil dari model sirkulasi global CSIRO9.



**Gambar C.2** Tekanan rata-rata permukaan-laut pada bulan Januari yang diperoleh dari (a) observasi, (b) simulasi model sirkulasi global CSIRO9, dan (c) simulasi CSIRO LAM. Interval kontur adalah 2 hPa.

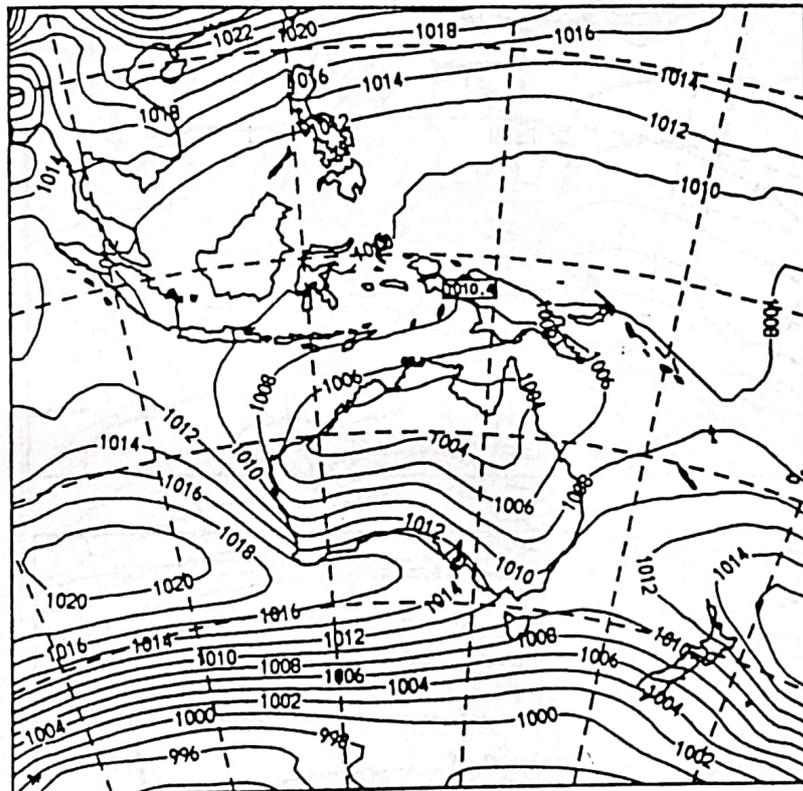


a



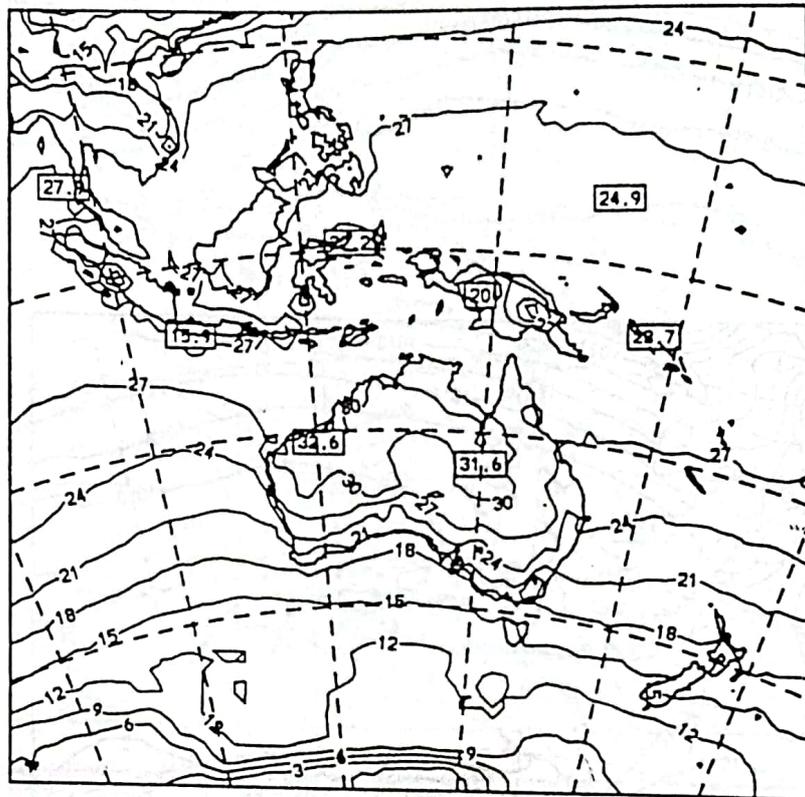
b

Handwritten text at the top of the page, possibly a title or header, which is mostly illegible due to blurring and orientation. Some words like "Kontur" and "Garis" are faintly visible.

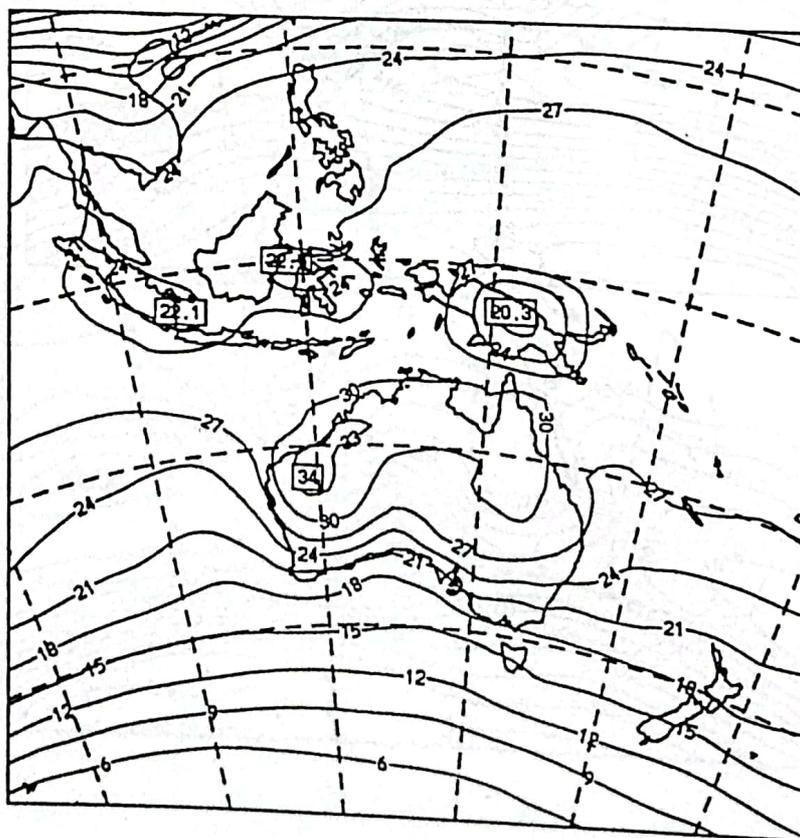


C

**Gambar C.3** Temperatur *screen* (dalam °C pada bulan Januari yang diperoleh dari (a) observasi, (b) simulasi model sirkulasi global CSIRO9, dan (c) simulasi CSIRO LAM. Interval kontur adalah 3°.

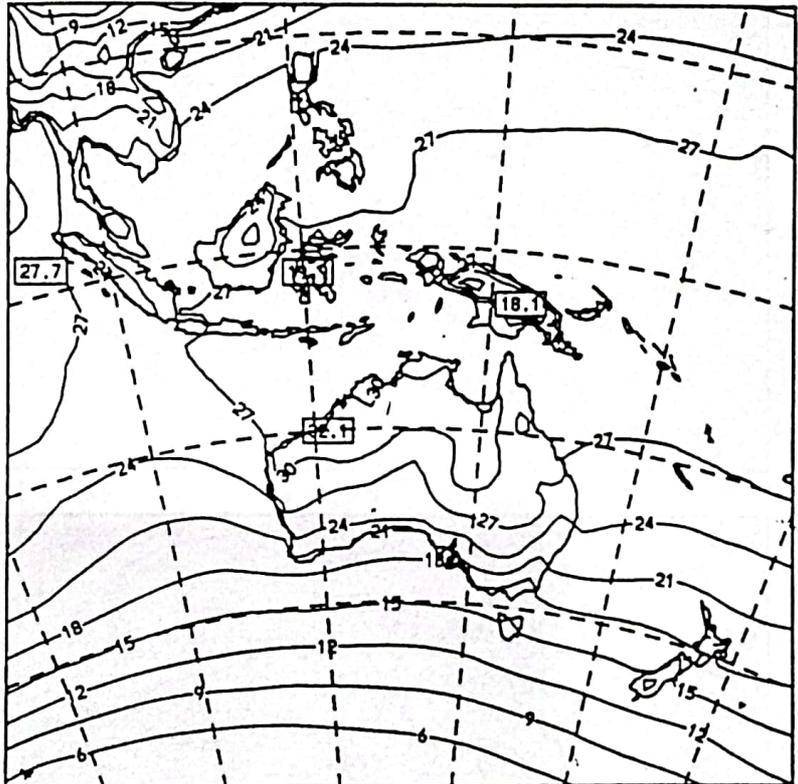


a



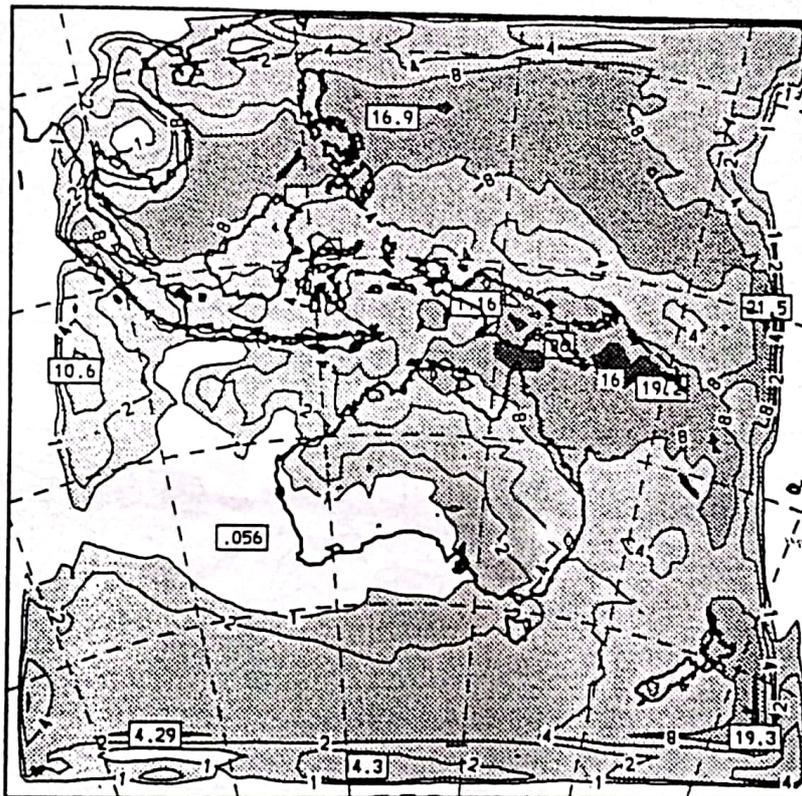
b

Geography 101: Introduction to Physical Geography (Lecture 10: Climate and Weather)  
Exercise 1: Analyzing a climate map of Southeast Asia and Australia. The map shows isotherms and isohyets for a specific month. The temperature scale is in degrees Celsius, and the precipitation scale is in millimeters.



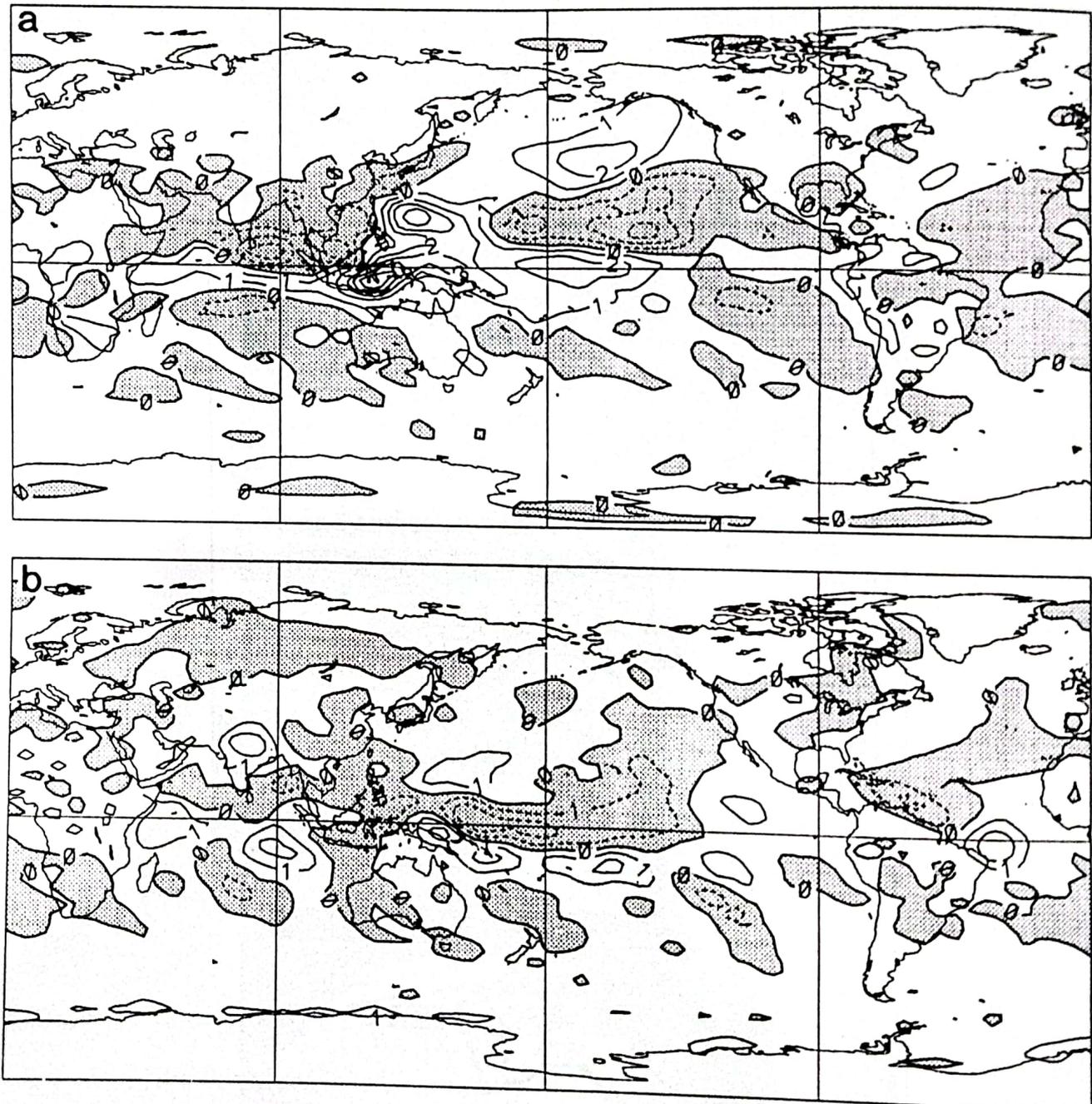
C



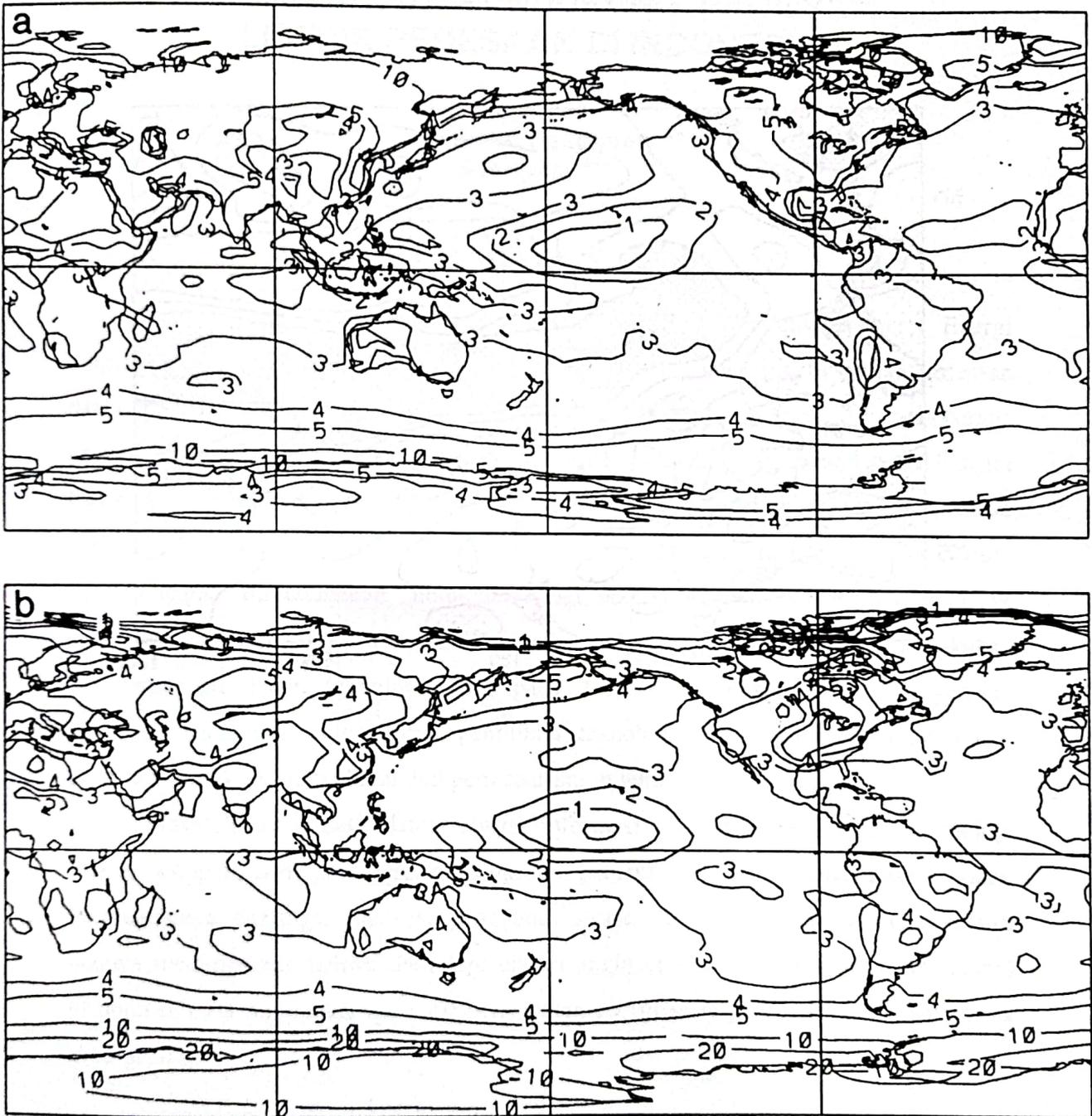


C

**Gambar C.5** Perubahan presipitasi total pada skenario  $2\times\text{CO}_2$  berdasarkan model CSIRO9 untuk (a) bulan Desember-Januari-Februari, dan (b) bulan Juni-Juli-Agustus. Interval kontur adalah 1 mm/hari. Daerah-daerah yang mengalami penurunan ditandai lebih gelap.



**Gambar C.6** Perubahan suhu permukaan pada skenario  $2\times\text{CO}_2$  berdasarkan model CSIRO9 untuk (a) bulan Desember-Januari-Februari, dan (b) bulan Juni-Juli-Agustus. Interval kontur adalah 1, 2, 3, 4, 5, 10, dan  $20^\circ\text{C}$ .



**Gambar C.7** Selisih prosentase curah hujan tahunan hasil simulasi CSIRO9 untuk peristiwa El-nino tahun 1987. Daerah dengan titik-titik rapat adalah yang mengalami kenaikan lebih dari 15%. Daerah dengan titik-titik renggang mengalami penurunan lebih dari 15%.

