

## Dampak Perubahan Iklim terhadap Sumberdaya Air: Identifikasi, Simulasi, dan Rencana Aksi

### *Impact of Climate Change on Water Resources: Identification, Simulation, and Action Plan*

Popi Rejekiingrum

Peneliti Badan Litbang Pertanian di Balai Penelitian Agroklimat dan Hidrologi, Jl. Tentara Pelajar No. 1A, Bogor 16114; email: popirejeki@yahoo.com

Diterima 6 Januari 2014; Direview 16 Januari 2014; Disetujui dimuat 4 Maret 2014

**Abstrak.** Perubahan iklim saat ini telah terjadi secara global. Bukti-bukti tentang hal itu telah dilaporkan secara sistematis oleh *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) dan *The United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Perubahan iklim telah dan akan menyebabkan bahaya langsung berupa perubahan pola curah hujan, kenaikan suhu, kenaikan muka air, dan kejadian iklim ekstrim. Berbagai proses yang memicu perubahan iklim global dan perubahan iklim telah diterima banyak pihak sebagai keniscayaan yang dicirikan oleh pemanasan global, dengan dampak langsung terhadap daur hidrologi, sehingga perubahan iklim diyakini memberi dampak secara nyata terhadap sumberdaya air di banyak wilayah di dunia dengan konsekuensi luas pada kehidupan masyarakat dan lingkungan. Makalah ini membahas dampak perubahan iklim terhadap sumberdaya air di Indonesia melalui identifikasi dengan data dan fakta empirik terjadinya tren perubahan curah hujan dan debit aliran sungai-sungai di Indonesia dan berbagai upaya antisipasi melalui adaptasi, serta Undang Undang dan Rencana Aksi yang terkait dengan pengelolaan sumberdaya air dalam menyikapi perubahan iklim global. Upaya-upaya tersebut diharapkan menjadi strategi untuk mengurangi kerentanan dan risiko perubahan iklim sektor sumberdaya air.

*Kata kunci: Sumberdaya Air/ Dampak Perubahan Iklim / Adaptasi Perubahan Iklim / Berkelanjutan*

**Abstract.** Climate change has been occurring globally. Evidence of it has been reported systematically by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Climate change has and will cause immediate impact on changes in precipitation patterns, rising temperatures, sea level rise, and extreme climate events. The processes that lead to global climate change and climate change has been accepted by many as a necessity which is characterized by global warming, with a direct impact on the hydrological cycle, so that climate change is believed to significantly impact on water resources in many regions of the world with broad consequences on people's lives and the environment. This paper discusses the impact of climate change on water resources in Indonesia through identification with the scientific evidence of the empirical facts and data change trend in rainfall and river flow rivers in Indonesia, shows the various efforts to anticipate through adaptation, and Law and Action Plan related to water resources management in facing of global climate change. These efforts are expected to be a strategy to reduce vulnerability and risks of climate change on the water resources sector.

*Keywords: Water Resources / Climate Change Impact / Climate Change Adaptation / Sustainable*

### PENDAHULUAN

Perubahan iklim merupakan salah satu ancaman yang sangat serius terhadap sektor pertanian dan potensial mendatangkan masalah baru bagi keberlanjutan produksi pangan dan sistem produksi pertanian pada umumnya. Perubahan iklim adalah kondisi beberapa unsur iklim yang *magnitude* dan/atau intensitasnya cenderung berubah atau menyimpang dari dinamika dan kondisi rata-rata, menuju ke arah (tren) tertentu (meningkat atau menurun). Penyebab utama perubahan iklim adalah kegiatan manusia (antropogenik) yang berkaitan dengan meningkatnya emisi gas rumah kaca (GRK) seperti CO<sub>2</sub>, metana

(CH<sub>4</sub>), CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan CFCs (*chlorofluoro-carbons*) yang mendorong terjadinya pemanasan global dan telah berlangsung sejak hampir 100 tahun terakhir (Balitbangtan 2011).

Pengaruh perubahan iklim terhadap sektor pertanian bersifat multi-dimensional, mulai dari sumberdaya, infrastruktur pertanian, dan sistem produksi pertanian, hingga aspek ketahanan dan kemandirian pangan, serta kesejahteraan petani dan masyarakat pada umumnya. Pengaruh tersebut dibedakan atas dua indikator, yaitu kerentanan dan dampak. Secara harfiah, kerentanan (*vulnerable*) terhadap perubahan iklim adalah "kondisi yang mengurangi kemampuan (manusia, tanaman, dan

ternak) beradaptasi dan/atau menjalankan fungsi fisiologis/biologis, perkembangan/fenologi, pertumbuhan dan produksi serta reproduksi secara optimal (wajar) akibat cekaman perubahan iklim". Dampak perubahan iklim adalah "gangguan atau kondisi kerugian dan keuntungan, baik secara fisik maupun sosial dan ekonomi yang disebabkan oleh cekaman perubahan iklim" (Balitbangtan 2011).

Dalam kaitan dampak perubahan iklim terhadap sumberdaya air, secara global telah banyak laporan mengenai hal tersebut. Diantaranya adalah Bates *et al.* (2008) yang membuat dokumen resmi IPCC dengan kontribusi dari banyak negara dan penulis, namun dokumen tersebut tidak memuat informasi mengenai sumberdaya air Indonesia. Brekke *et al.* (2009) menunjukkan bagaimana antar lembaga Federal Amerika Serikat menyusun laporan mengenai strategi pengelolaan sumberdaya air sebagai tanggapan atas dampak perubahan iklim. Jose and Cruz (1999) menyajikan penilaian kesiapan sektor air Filipina menghadapi dampak perubahan iklim, khususnya mengidentifikasi kerentanan sistem waduk menghadapi perubahan curah hujan dan suhu di masa mendatang. Kajian dampak perubahan iklim terhadap sumberdaya air di India disajikan oleh Mall *et al.* (2006) yang menyelidiki potensi pembangunan berkelanjutan sumberdaya air menghadapi dampak perubahan iklim, dan menyatakan perlunya upaya adaptasi dan penelitian lanjutan di India. Kebanyakan kajian demikian mengandalkan penggunaan model, mulai dari model sirkulasi udara umum (GCM) untuk mensimulasikan berbagai skenario perubahan, namun Brekke *et al.* (2009) menekankan pentingnya bukti ilmiah atas dasar data pengamatan jangka panjang dari stasiun monitoring hidrologi.

Sektor sumberdaya air Indonesia, khususnya pulau Jawa, telah mengalami banyak perubahan dengan degradasi lingkungan dan penurunan kualitas air, dan sejumlah kajian telah menyatakan status kritis yang serius. Sebagai sistem yang kompleks, perubahan yang terjadi di sektor sumberdaya air dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti tekanan penduduk dengan segala aktivitasnya, perubahan penggunaan lahan, eksploitasi sumberdaya air, termasuk air bumi, serta pembangunan infrastruktur fisik (Mawardi, 2010). Krisis air di Indonesia terjadi akibat kesenjangan antara kebutuhan air yang dipicu oleh jumlah penduduk dan ketersediaan pasokan air dari debit andalan sungai-sungai utama kawasan, dan untuk ini perlu diidentifikasi daerah kritis air seperti yang dibahas Alcamo dan Henrichs (2002)

pada tingkat global. Hatmoko (2009) menyimpulkan bahwa telah terjadi penurunan debit andalan di sebagian besar sungai di pulau Jawa, khususnya yang tercatat di bagian hilir, yang terjadi terutama pada DAS kritis super prioritas, dan tren penurunan ini belum tentu disebabkan akibat dampak perubahan iklim.

Gejala perubahan iklim wilayah Indonesia ditunjukkan dengan telah terjadi dampak terhadap ketersediaan air, misalnya Pawitan (2002) menunjukkan penurunan curah hujan tahunan pulau Jawa bagian selatan periode 1931-1960 dan 1968-1998 yang mencapai 1000 mm. Hasil serupa juga diperoleh di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum Hulu periode 1896-1994 yang mengalami penurunan curah hujan sebesar 10 mm th<sup>-1</sup> dan diikuti penurunan debit limpasan sebesar 3 mm th<sup>-1</sup>. Perubahan ini diyakini karena perubahan penggunaan lahan hutan ke penggunaan lainnya yang telah berlangsung sejak awal abad 20 dan meningkat secara drastis dalam tiga dasawarsa terakhir ini. Dampak perubahan tutupan lahan dalam skala luas ini nampak dari perubahan fungsi hidrologi DAS yang berawal dari penurunan curah hujan wilayah dan diikuti oleh hasil air (*water yield*) DAS.

## **PERUBAHAN IKLIM GLOBAL: IDENTIFIKASI DAN KARAKTERISASI**

### **Perubahan Iklim Global**

Laporan Kelompok Kerja Pertama IPCC tentang fakta ilmiah terjadinya perubahan iklim secara global dikeluarkan pada tanggal 30 September 2013. Menurut IPCC, kenaikan suhu global semenjak tahun 1901 mencapai 0,89° C. Di kawasan Asia Tenggara, tercatat kenaikan suhu pada kisaran 0,4-1° C. Diperkirakan kenaikan suhu di wilayah Asia Tenggara untuk jangka menengah (2046-2065) sebesar 1,5 - 2° C. Pada saat ini, kenaikan suhu yang paling tinggi terkonsentrasi di daerah bagian barat laut yaitu di beberapa negara seperti Thailand, Myanmar, Laos, Kamboja, dan Vietnam. Untuk jangka panjang (2081-2100), kenaikan suhu diperkirakan 2-4° C yang akan menyebar ke seluruh daratan secara merata. Suhu tertinggi di siang hari akan mencapai 3-4° C lebih tinggi dari suhu rata-rata saat ini di seluruh daratan di kawasan Asia Tenggara. Curah hujan diperkirakan akan meningkat di beberapa negara termasuk Indonesia dan Papua Nugini. Sedangkan di negara lain seperti Thailand, Laos, Myanmar, Kamboja, dan Vietnam, curah hujan

diperkirakan akan menurun sebesar 10%-20% pada bulan Maret-Mei. Secara keseluruhan, curah hujan tahunan diperkirakan akan meningkat, kecuali di bagian barat daya Indonesia. Kelembaban tanah akan meningkat hingga 1 mm di bagian barat daya Papua Nugini dan penurunan sekitar 0,6 mm di bagian barat Papua Nugini, yaitu di negara-negara Laos, Vietnam, Kamboja, Thailand, Malaysia, dan sebagian Indonesia dan Myanmar.

Data dan temuan IPCC ini juga menguatkan laporan Bank Dunia dengan judul “*Turn Down the Heat Climate Extremes, Regional Impacts and the Case for Resilience*” yang dirilis pada bulan Juni 2013. Laporan tersebut menyatakan bahwa kawasan pesisir pantai di seluruh Asia Tenggara akan mengalami kenaikan muka air laut 10-15 persen lebih tinggi dibandingkan dengan rata-rata kenaikan muka air laut global. Kenaikan muka air laut di tahun 2050 akan mencapai hingga 50 dan 100 cm di tahun 2090, dimana kota-kota besar di Asia Tenggara seperti Jakarta, Bangkok, Ho Chi Minh, Manila, dan Yangon, akan terkena dampak yang paling besar.

Laporan Kelompok Kerja 1 IPCC ke-5 ini mengutip bencana-bencana yang telah diprediksi dalam laporan Bank Dunia, yaitu meningkatnya kerentanan *aquaculture*, pertanian, dan juga tangkapan ikan dikarenakan kenaikan muka air laut, meningkatnya intensitas angin puting beliung tropis, serta intrusi air laut. IPCC juga mencatat adanya kemungkinan terjadi panas ekstrim dan gelombang panas (*heatwaves*) di Asia. Kawasan Asia juga akan kehilangan keanekaragaman hayati berupa terumbu karang hingga 88% akibat dari pemutihan untuk 30 tahun mendatang. Risiko pemutihan tahunan terumbu karang akan terjadi mulai dari tahun 2030. IPCC mencatat bahwa fenomena perubahan iklim yang sedang terjadi merupakan dampak perbuatan manusia dan bukan bencana alam (IPCC 2013).

### **Kemasaman Tanah**

Kemasaman yang tinggi merupakan penciri utama tanah sulfat masam. Kemasaman menggambarkan kondisi kimiawi, proses kimiawi yang mungkin terjadi, serta akibatnya terhadap keadaan tanah. Reaksi tanah sulfat masam tergolong masam sampai luar biasa masam, yakni berkisar antara pH 4 (Entisol) dan pH < 3,5 (Inceptisol).

Tanah sulfat masam yang tergenang mempunyai kemasaman tanah nisbi tinggi dengan pH > 4,0, tetapi apabila terjadi pengeringan pH akan turun

secara drastis sehingga menjadi sangat masam (Noor 2004). Kemasaman merupakan kendala utama dalam pengembangan pertanian di tanah sulfat masam, karena pada pH < 4,5 terjadi peningkatan konsentrasi  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ , dan  $Mn^{2+}$  sehingga dapat meracuni tanaman. Keracunan unsur-unsur tersebut akan diiringi oleh kekahatan hara P, Ca, Mg, dan K pada tanaman (Notohadiprawiro 2000).

### **Perubahan Iklim Indonesia**

IPCC mencatat bahwa pemanasan global telah meningkatkan suhu 0,7° C sejak 1900, dengan ikutan berupa penyusutan tutupan salju dan es, serta peningkatan aras muka laut dengan laju 2 mm th<sup>-1</sup>. Banyak kajian proyeksi perubahan iklim telah dilakukan menggunakan *Global Climate Model* (GCM) dengan berbagai skenario, termasuk Indonesia, yang tentunya perlu dikalibrasi dan diverifikasi.

Menurut World Bank ada beberapa daerah di Indonesia yang sangat rentan terhadap bahaya perubahan iklim. Meskipun suhu udara di Indonesia kemungkinan hanya akan mengalami sedikit kenaikan, perubahan iklim akan mengakibatkan kenaikan curah hujan dan permukaan laut yang lebih besar. Masyarakat dan ekosistem yang sangat rentan terhadap risiko perubahan iklim berada di Jawa, Bali, beberapa bagian Sumatera dan sebagian besar Papua. Peningkatan suhu di laut juga akan berpengaruh pada keanekaragaman hayati laut dan sangat berbahaya bagi terumbu karang. Adapun dampak ekonomi dari perubahan iklim di Indonesia akan tinggi. Tanpa mempertimbangkan dampak non pasar dan risiko bencana, kerugian Produk Domestik Bruto (PDB) rata-rata diproyeksikan mencapai 2,5% di tahun 2100 (<http://go.worldbank.org/0F7PS203T0>)

Perubahan iklim yang terjadi di Indonesia umumnya ditandai adanya perubahan suhu rerata harian, pola curah hujan, tinggi muka laut, dan variabilitas iklim (misalnya El Niño dan La Niña, Indian Dipole, dan sebagainya). Perubahan ini memberi dampak serius terhadap berbagai sektor di Indonesia, termasuk kesehatan, pertanian, dan perekonomian. Beberapa studi dari beberapa institusi, baik dari dalam maupun luar negeri menunjukkan bahwa iklim di Indonesia mengalami perubahan sejak tahun 1960, meskipun analisis ilmiah maupun data-datanya masih terbatas.

Perubahan suhu rerata harian merupakan indikator paling umum perubahan iklim. Ke depan, *UK Met Office* memproyeksikan peningkatan suhu secara

umum di Indonesia berada pada kisaran 2,0-2,50°C pada tahun 2100 berdasarkan skenario emisi A1B–nya IPCC, yaitu penggunaan energi secara seimbang antara energi non-fosil dan fosil (UK Met Office 2011). Data historis mengonfirmasikan skenario tersebut, misalnya kenaikan suhu linier berkisar 2,6°C per seratus tahun untuk wilayah Malang (Jawa Timur) berdasarkan analisis data 25 tahun terakhir (KLH 2012).

Peningkatan suhu rerata harian tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap pola curah hujan yang umumnya ditentukan sirkulasi monsun Asia dan Australia. Dengan sirkulasi monsun, Indonesia memiliki dua musim utama yang berubah setiap setengah tahun sekali (musim penghujan dan kemarau). Perubahan suhu rerata harian juga dapat mempengaruhi terjadinya perubahan pola curah hujan secara ekstrim.

UK Met Office lebih lanjut mencatat kekeringan maupun banjir parah sepanjang 1997 hingga 2009. Analisis data satelit TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) untuk periode 2003-2008 memperlihatkan peningkatan peluang kejadian curah hujan dengan intensitas ekstrim, terutama di wilayah Indonesia bagian barat (Jawa, Sumatera, dan Kalimantan) serta Papua. Salah satu fenomena yang memperkuat terjadinya peningkatan suhu di Indonesia adalah melelehnya es di Puncak Jayawijaya, Papua (Bappenas 2009).

Di samping mengakibatkan kekeringan atau banjir ekstrim, peningkatan suhu permukaan atmosfer juga menyebabkan terjadinya peningkatan suhu air laut yang berujung pada ekspansi volume air laut dan mencairnya gletser serta es pada kutub. Pada tahap selanjutnya, tinggi muka air laut mengalami kenaikan yang berisiko terhadap penurunan kualitas kehidupan di pesisir pantai.

Kenaikan rerata tinggi muka laut global pada abad ke-20 tercatat sebesar 1,7 mm per tahun, walaupun kenaikan tersebut tidak terjadi secara seragam. Bagi Indonesia yang diapit oleh Samudera Hindia dan Pasifik, kenaikan tinggi muka laut yang tidak seragam dapat berpengaruh pada pola arus laut. Selain perubahan pola arus, juga meningkatkan potensi terjadinya erosi, perubahan garis pantai, mereduksi wetland (lahan basah) di sepanjang pantai, dan meningkatkan laju intrusi air laut terhadap akifer daerah pantai.

Berdasarkan kajian Bappenas (2009) dan Dewan Nasional Perubahan Iklim (DNPI 2012), gelombang badai (*storm surge*), pasang surut, serta variabilitas iklim

ekstrim seperti La Niña yang termodulasi oleh kenaikan tinggi muka laut juga turut berkontribusi dalam memperparah bahaya penggenangan air laut di pesisir.

Analisis awal terhadap data simulasi gelombang menunjukkan bahwa rerata tinggi gelombang maksimum di perairan Indonesia pada periode monsun Asia berkisar antara 1 m hingga 6 m. Untuk Laut Jawa, tinggi gelombang maksimum, terutama Januari dan Februari mencapai 3,5 m. Hal ini menambah risiko banjir di daerah pantai utara Jawa (pantura) karena bertepatan dengan puncak musim penghujan di Indonesia. Selain risiko banjir di pantai, gelombang ekstrim juga berdampak buruk terhadap distribusi barang antar pulau yang banyak menggunakan transportasi laut. Di sisi lain, analisis yang dilakukan terhadap fenomena El Niño dan La Niña (Sofian 2010) menunjukkan bahwa kedua fenomena tersebut akan lebih banyak berpeluang terjadi di masa mendatang dengan periode dua hingga tiga tahun sekali yang diduga disebabkan perubahan iklim.

Perubahan iklim di Indonesia berdampak cukup besar terhadap produksi bahan pangan, seperti jagung dan padi. Produksi bahan pangan dari sektor kelautan (ikan maupun hasil laut lainnya) diperkirakan akan mengalami penurunan yang sangat besar dengan adanya perubahan pola arus, suhu, tinggi muka laut, umbalan, dan sebagainya. Indonesia bahkan berada pada peringkat 9 dari 10 negara paling rentan dari ancaman terhadap keamanan pangan akibat dampak perubahan iklim pada sektor perikanan (Huelsenbeck, 2012). Akibat dampak perubahan iklim dan pengasaman laut (*ocean acidification*) pada ketersediaan makanan hasil laut, Indonesia berada pada peringkat 23 dari 50 negara paling rentan berdasarkan kajian yang sama.

Kajian dampak perubahan iklim terhadap sumberdaya air antara lain meningkatnya kejadian cuaca dan iklim ekstrim yang berpotensi menimbulkan banjir, tanah longsor, dan kekeringan. Kondisi tersebut diperparah oleh semakin menurunnya daya dukung lahan akibat meningkatnya tekanan terhadap lahan. Data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menunjukkan bahwa kejadian bencana di Indonesia dalam periode 1815-2011 didominasi oleh faktor hidrometeorologi dan interaksinya. Data inventarisasi kejadian banjir menunjukkan kejadian antar-musim mengalami peningkatan dari tahun ke tahun dengan pertumbuhan eksponensial. Data kekeringan berdasarkan pemantauan pada tahun 2002

menunjukkan bahwa fluktuasi kejadian kekeringan terjadi antar musim dan mengalami peningkatan walaupun belum terlihat trend yang nyata. Adapun peluang banjir di Indonesia akan meningkat seiring peningkatan tinggi muka laut, intensitas gelombang ekstrim, curah hujan yang sangat tinggi dan kejadian La Niña. Bencana banjir ekstrim terutama terjadi pada daerah pesisir yang merupakan lokasi kota-kota strategis seperti DKI Jakarta. Bencana ini berdampak buruk bagi perekonomian serta mengancam kesehatan masyarakat.

Beberapa kajian di atas menunjukkan bahwa perubahan iklim sudah berlangsung di Indonesia. Perubahan tersebut memberi dampak terhadap multisektor meskipun kajian maupun data yang tersedia masih terbatas. Di samping itu, proyeksi iklim selalu mengandung ketidakpastian. Tantangan terbesar adalah melakukan kuantifikasi terhadap ketidakpastian tersebut untuk meningkatkan kedayagunaannya dalam pengambilan keputusan.

Dalam hal proyeksi iklim berdasarkan GCM, setidaknya terdapat tiga sumber ketidakpastian yang harus diperhitungkan yaitu skenario emisi gas rumah kaca, sensitivitas iklim global terhadap emisi gas rumah kaca (pemilihan model GCM), dan respon sistem iklim regional terhadap pemanasan global (*downscaling model*).

Langkah penyempurnaan perlu terus dilakukan untuk mengatasi segala keterbatasan data maupun metodologi yang digunakan dalam kajian perubahan iklim di Indonesia, guna memenuhi kebutuhan informasi nasional yang lebih akurat. Untuk masa mendatang, perlu program penguatan basis ilmiah (*scientific base*) perubahan iklim secara lebih terkoordinasi. Program ini perlu disusun melalui pemberdayaan berbagai lembaga yang relevan secara optimal, khususnya lembaga penelitian dan pengembangan serta perguruan tinggi. Dengan demikian, roadmap dapat digunakan bukan hanya untuk memberi panduan bagi aksi adaptasi dan mitigasi tiap sektor, tapi juga untuk memperkuat basis ilmiah mengenai perubahan iklim di masa mendatang.

Pada dasarnya, perubahan iklim bukan merupakan penyebab tunggal dari bencana alam yang saat ini semakin sering terjadi. Namun perubahan iklim berkontribusi dalam membuat fenomena atau bencana alam hidro-meteorologi ini menjadi ekstrim atau luar biasa.

Pemerintah Indonesia telah melakukan beberapa kajian tentang perubahan iklim yang meskipun masih

terbatas dan belum akurat – dapat menjadi titik awal dari suatu program yang bermanfaat bagi penguatan basis ilmiah perubahan iklim yang terkoordinasi bagi sektor-sektor yang ada di Indonesia. Pada akhirnya, kapasitas masing-masing sektor dapat meningkat untuk mengatasi berbagai persoalan akibat perubahan iklim di Indonesia.

## ANALISIS PERUBAHAN IKLIM: SIMULASI DAN PROYEKSI

### Pendekatan Simulasi Perubahan Iklim

Identifikasi terjadinya perubahan iklim dapat dilakukan adalah dilakukan lebih intensif dengan pendekatan GCM dan yang lebih penting pada tingkat nasional adalah kajian terhadap perubahan iklim wilayah. Giorgi dan Mearns (1991) membagi pendekatan simulasi perubahan iklim wilayah menjadi tiga yaitu: (i) murni empirik, (ii) semi empirik, dan (iii) modeling. Pendekatan ini paling tidak menyangkut representasi dua skala ruang yang berbeda yaitu global dan wilayah/lokal. Pendekatan empirik menuntut ketersediaan data pengamatan pada skala lokal/wilayah, sedang pendekatan GCM lebih didasarkan pada berlakunya hukum fisika pada skala global maupun wilayah (*nested GCM-limited area model*). Ilustrasi pendekatan empirik dapat dilihat pada Chiew *et al.* (1996) yang mengaitkan ENSO dengan hujan, aliran sungai, dan kekeringan di Australia. Meehl *et al.* (2001) mengkaji faktor-faktor yang menentukan amplitudo El Nino dalam pendekatan modeling.

Selanjutnya Santoso dan Forner (2006) menunjukkan proyeksi perubahan iklim dengan simulasi GCM bahwa iklim Indonesia akan lebih hangat dibanding kondisi saat ini, dengan curah hujan tahunan meningkat, kecuali bagian selatan termasuk Pulau Jawa. Cuaca ekstrim dalam hubungannya dengan variabilitas iklim inter-annual lebih sulit diprediksi, walau dicatat adanya kecenderungan peningkatan intensitas dan frekuensi. Untuk Asia Tenggara, dengan peningkatan GRK saja, pemanasan diproyeksikan meningkat 1,05°C pada 2020, 2,15°C tahun 2050, dan 3,03°C tahun 2080. Apabila GRK digabung dengan aerosol sulfat, peningkatan pemanasan menjadi 0,96°C tahun 2020, 1,72°C tahun 2050, dan 2,49°C tahun 2080. Peningkatan suhu ini akan diikuti dengan peningkatan curah hujan sebesar 1,7-2,4% tahun 2020; 1,0-4,6% tahun 2050; dan 5,1-8,5% tahun 2080.

## Pendekatan Proyeksi Perubahan Iklim

Proyeksi iklim adalah proyeksi tanggapan (perubahan) sistem iklim terhadap pemanasan global (*global warming*) yang diakibatkan oleh emisi gas rumah kaca dan polutan lain, dimana proses proyeksinya dibuat berdasarkan perhitungan dari GCM (Bappenas 2014)

Proyeksi perubahan iklim Indonesia telah dilakukan dengan menggunakan skenario SRES untuk parameter suhu dan curah hujan sampai tahun 2100. Skenario yang digunakan adalah B2 yang mewakili kondisi peningkatan populasi dan pertumbuhan ekonomi yang sedang atau sebagai skenario dasar (*business as usual*) dan skenario A2 yang mewakili kondisi terburuk untuk masa mendatang. Hasil proyeksi menunjukkan bahwa peningkatan suhu terus terjadi di Indonesia dan akan mencapai anomali sebesar 2,9°C pada tahun 2100. Peningkatan suhu akan lebih rendah pada skenario dasar (B2/IPCC), sedangkan perubahan curah hujan akan bernilai negatif (anomali negatif) dengan penurunan curah hujan dari kondisi tahun 1990. Kondisi penurunan curah hujan ini akan semakin besar pada skenario A2/IPC (Susandi, 2012).

Menurut hasil penelitian Hulme and Sheard (1999), suhu udara di Indonesia telah meningkat sebesar 0,3°C sejak tahun 1900 dan terjadi sepanjang musim. Sementara itu terjadi perubahan cuaca dan musim yang ditandai oleh peningkatan curah hujan di suatu wilayah, sedangkan di wilayah lain terjadi pengurangan curah hujan sebesar 2-3%. Selain siklus harian dan musiman keragaman iklim di Indonesia juga ditandai dengan siklus beberapa tahun, seperti siklus fenomena global ENSO (*El Nino Southern Oscillation*). ENSO mempunyai siklus 3-7 tahun, tapi setelah dipengaruhi perubahan iklim diduga siklus ENSO menjadi lebih pendek antara 2-5 tahun (Ratag 2001). Hal ini akan berakibat kekeringan yang lebih sering terjadi di berbagai wilayah Indonesia, seperti di Nusa Tenggara Timur, Nusa Tenggara Barat dan beberapa wilayah di timur Pulau Jawa. Kekeringan yang terjadi akan mempengaruhi banyak sektor kehidupan dan pembangunan, misalnya produksi pertanian, kesulitan dalam penyediaan sumber air. pengurangan debit air untuk bendungan, dan sebagainya.

## DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP SUMBERDAYA AIR GLOBAL

### Isu terkait Perubahan Iklim Global pada Sumberdaya Air

Pawitan (1999), dan Rango (1998), mempertimbangkan peran pemodelan hidrologi dalam kajian perubahan iklim dan kerentanan sistem sumberdaya air wilayah. Hasil penelitian Pawitan (1999) menyatakan bahwa perubahan pola penggunaan lahan berdampak pada penurunan ketersediaan air wilayah akibat meningkatnya fluktuasi musiman dengan gejala banjir dan kekeringan yang semakin ekstrim, dan ukuran DAS serta kapasitas sistem storage DAS, baik di permukaan (tanaman, sawah, rawa, danau/waduk, dan sungai) maupun bawah permukaan (lapisan tanah dan air bumi), akan merupakan faktor dominan yang menentukan kerentanan dan daya dukung sistem sumberdaya air wilayah terhadap perubahan iklim.

Gleick (1989) mengulas *state-of-the-art* kajian dampak perubahan iklim terhadap daur hidrologi dan sumberdaya air wilayah, serta dampak perubahan terhadap perencanaan dan pengelolaan air di masa mendatang. Dua kemungkinan skenario yang perlu dipertimbangkan adalah: (1) skenario limpasan dan kelengasan tanah untuk menentukan peningkatan frekuensi dan lama dari tingkat air rendah, dan (2) skenario suhu dan curah hujan untuk menentukan perubahan distribusi temporal dan amplitudo dari tingkat air musiman. Selanjutnya skenario perubahan iklim yang dihasilkan GCM ini diterjemahkan ke dalam neraca air wilayah dan limpasan pada skala DAS untuk menyatakan tingkat ketersediaan air wilayah melalui model pengelolaan air.

Pawitan *et al.* (2003) yang membahas Aspek Perubahan Iklim terhadap Pengelolaan Banjir dan Kekeringan dalam Peringatan Hari Air Sedunia 2002 menyatakan bahwa untuk menjamin kelestarian sistem produksi pertanian Indonesia dengan mengurangi dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian nasional perlu memperhatikan lima upaya pokok berikut: (i) peningkatan ketegaran sektor pertanian terhadap banjir dan kekeringan, (ii) peningkatan akurasi monitoring dan prakiraan cuaca/iklim dan diseminasinya, (iii) monitoring perubahan tata guna lahan yang berdampak pada penyimpanan iklim, (iv)

sosialisasi semua aspek yang menyangkut penanggulangan bencana banjir dan kekeringan, dan (v) keterpaduan program dalam menghadapi penyimpangan iklim dan bencana banjir dan kekeringan.

Beberapa isu dasar terkait perubahan iklim global yang menjadi sumber ketidakpastian dan memerlukan perhatian dan komitmen bersama adalah: Proyeksi populasi dunia. IPCC (1996) mengadopsi dua skenario proyeksi populasi dunia yaitu skenario A2 dengan proyeksi penduduk dunia 15 milyar pada akhir 2100, dan skenario B1 dengan puncak populasi dunia 8,7 milyar jiwa pada tahun 2055 dan turun menjadi 7,1 milyar jiwa pada tahun 2100. Pada tahun 2000 penduduk dunia telah mencapai 6 milyar jiwa.

### **Keamanan Pangan Global**

Vakkilainen dan Varis (1999) melaporkan hasil kajiannya mengenai air dan pangan global dengan kesimpulan '*cautiously optimistic*', tanpa mengabaikan masalah kelangkaan air, over-population, pendidikan dan kondisi anomali iklim yang mungkin menjadi penyebab ketidak-seimbangan antara air dan pangan suatu wilayah yang serius.

Pertanian, kehutanan dan perubahan penggunaan lahan. Adger and Brown (1994) mencatat laju perubahan penggunaan lahan global (1700-1980) yang dicirikan oleh penurunan luas lahan hutan dari 6215 juta menjadi 5053 juta ha) dan padang rumput dari 6860 juta menjadi 6788 juta ha, serta peningkatan luas lahan pertanian dari 265 juta ha menjadi 1501 juta ha. Perubahan penggunaan lahan ini kemudian dikaitkan dengan laju emisi GRK.

Kejadian ekstrim banjir dan kekeringan. Kejadian banjir dan kekeringan yang telah menjadi bencana alam paling merugikan bagi kesejahteraan umat manusia dan didapatkan makin intensif dan ekstensif, yang sering diikuti oleh bencana ikutan seperti longsor, sedimentasi serta kebakaran hutan dan lahan.

Menurut Pawitan *et al.* (2009), sumberdaya air global dapat dinyatakan dengan besar debit sungai-sungai terbesar yang merepresentasikan jumlah air tersedia di dunia. Sungai Amazon mengalirkan seperenam bagian dari total aliran sungai di dunia, dan 50 sungai terbesar di dunia mengalirkan 57% dari total aliran global sebesar  $17.492.552 \text{ km}^3 \text{ th}^{-1}$  dengan total luas DAS 42,3 juta  $\text{km}^2$ . Cara perhitungan demikian perlu digunakan dalam menyatakan ketersediaan air nasional, yaitu dengan representasi sungai-sungai

utama dan ekstrapolasi untuk seluruh wilayah Indonesia.

### **Indikator Penting Terjadinya Perubahan Iklim pada Sumberdaya Air**

Indikator penting terjadinya perubahan iklim pada sumberdaya air terlihat pada tiga hal, yaitu: (1) tren debit aliran sungai di dunia, (2) pengaruh pemanasan global terhadap regime hidrologi wilayah, dan (3) potensi bahaya perubahan iklim pada sumberdaya air.

#### ***Tren Debit Aliran Sungai di Dunia***

Salah satu indikator penting perubahan iklim global dari tren debit aliran sungai di dunia. Chiew dan McMahon (1996) melakukan pengujian statistik terhadap data historis debit puncak dan volume aliran dari 142 sungai di dunia dengan panjang data 50 sampai 162 tahun dan luas DAS 1000 sampai 8 juta  $\text{km}^2$ . Kesimpulan yang diperoleh bahwa walau terlihat tren dan perubahan nyata pada sejumlah lokasi, namun tidak konsistens untuk seluruh wilayah, sehingga tidak dapat dibuktikan adanya perubahan tren akibat telah terjadinya perubahan iklim global. Dalam sejumlah kasus di mana tren terjadi, diyakini karena telah terjadinya perubahan kondisi biofisik DAS, dan hal ini menunjukkan ketidakpastian ketersediaan air wilayah di masa depan dalam kaitannya dengan perubahan iklim global.

#### ***Pengaruh Pemanasan Global Terhadap Regime Hidrologi Wilayah***

Tentu disadari sepenuhnya keinginan untuk mengetahui pengaruh pemanasan global terhadap respons hidrologi DAS dan sampai saat ini belum dapat dipastikan dampak yang mungkin dialami oleh sistem sumberdaya air di bumi, walau diyakini jika pemanasan global makin terjadi akan memberikan dampak yang drastis. Di beberapa wilayah dunia telah mengalami krisis air. Sebelas dari 20 negara di Timur Tengah dan Afrika Utara telah menggunakan lebih dari 50% sumberdaya air terbaharuinya. Lybia dan negara semenanjung Arab saat ini memanfaatkan lebih dari 100% sumberdaya airnya, dengan tambahan pasokan dari desalinasi dan sumber airbumi fosil. Di sebagian benua Afrika sub-Sahara, bencana kekeringan meningkat dalam dekade terakhir dan di antaranya merupakan negara-negara termiskin yang sangat rawan

terhadap fluktuasi iklim (Zebidi 1998). Adopsi strategi produktivitas air-tanaman dengan konsep water footprint telah mampu mengatasi masalah kelangkaan air bagi negara-negara beriklim arid tersebut, yang juga lebih memenuhi azas keadilan universal pada tingkat global.

Pemanasan global diyakini akan mempengaruhi sumberdaya air di sebagian besar wilayah di lintang tengah dan tinggi, karena daerah sabuk tekanan tinggi sub-tropis akan bergeser ke arah kutub utara, di mana peningkatan suhu akan dua sampai tiga kali lebih tinggi dari daerah tropis. Barnett *et al.* (2005) mencatat bahwa peningkatan suhu di kawasan yang didominasi salju bertanggung-jawab pada perubahan daur hidrologi dengan pergeseran aliran, yang akan berakibat parah bagi seperenam penduduk dunia yang mengandalkan pasokan air dari *glacier* dan salju.

Perubahan iklim global yang dicirikan oleh perubahan suhu udara, curah hujan wilayah, limpasan permukaan, evapotranspirasi, simpanan airbumi, dan sebagainya, secara langsung maupun tidak langsung, berpengaruh terhadap respons hidrologi wilayah. Selanjutnya sangat menentukan ketersediaan air wilayah untuk berbagai kebutuhan dan ikut menentukan nilai ekologi, sosial dan ekonomi sumberdaya air yang ada. Kerentanan daur hidrologi misalnya ditunjukkan oleh fakta bahwa perubahan 10% curah hujan benua hanya memerlukan perubahan 2% dari evaporasi lautan, dan pembentukan gurun memerlukan perubahan jauh lebih kecil (0,2% dari keseluruhan daur air). Isu ini semakin diakui sejak Rio Earth Summit dengan Agenda 21 (UNCED 1992), program IPCC dan Rio+10 (2002) untuk program pembangunan berkelanjutan, dan juga dalam World Water Forum ke-3 yang berlangsung di Kyoto tahun 2003.

### **Potensi Bahaya Perubahan Iklim pada Sumberdaya Air**

Potensi bahaya perubahan iklim untuk sektor air adalah perubahan pola curah hujan dan peningkatan suhu. Data potensi bahaya tersebut diperoleh dari hasil kajian sektor iklim. Data perubahan pola curah hujan dan kenaikan suhu yang merupakan potensi bahaya perubahan iklim sektor air dalam hal ini sudah memuat data akibat langsung perubahan iklim berupa peningkatan intensitas dan frekuensi kejadian iklim ekstrim.

Potensi bahaya berupa curah hujan dan peningkatan suhu selanjutnya dianalisis secara kuantitatif untuk memperoleh jenis bahaya yang ditimbulkannya. Metode analisis yang digunakan adalah analisis neraca air (*water balance analysis/WB*) dan analisis statistik *cumulative distribution frequency* (CDF) terhadap data hasil analisis WB tersebut. Dalam hal ini digunakan: 1) analisis CDF terhadap data TRO (*total runoff*) hasil analisis WB atas data curah hujan dan kenaikan suhu pada keadaan iklim normal untuk identifikasi bahaya penurunan ketersediaan air (PKA); 2) analisis CDF terhadap data DRO (*direct runoff*) hasil analisis WB atas data curah hujan dan kenaikan suhu pada keadaan iklim di atas normal untuk analisis bahaya banjir; dan 3) analisis CDF terhadap data TRO (*total runoff*) hasil analisis WB atas data curah hujan dan kenaikan suhu pada keadaan iklim di bawah normal untuk analisis bahaya kekeringan.

Bahaya PKA dianalisis dengan metode *water balance* yaitu dengan melihat penurunan total *runoff* (TRO) kondisi proyeksi (2010 dan 2030) terhadap kondisi baseline (diasumsikan periode 1960-1990). Selanjutnya, bahaya tersebut diberi bobot untuk penentuan derajat bahaya pada masing-masing periode dan skenario. Sebaran daerah bahaya PKA setiap periode menunjukkan bahwa bahaya PKA terjadi di seluruh periode pada wilayah yang tidak tetap dengan intensitas bahaya naik dari periode 2010-2015 ke 2015-2020, turun di periode 2020-2025 dan naik kembali pada periode 2025-2030; sebaran daerah bahaya pada setiap periode. Wilayah Jawa-Bali dan Sumatera merupakan daerah paling terancam, sedangkan wilayah Papua dan Maluku terancam bahaya PKA paling rendah.

Identifikasi bahaya banjir dilakukan berdasarkan pendekatan analisis CDF terhadap data *direct runoff* (DRO) hasil analisis WB. Hal ini dilandasi pemikiran bahwa untuk banjir, komponen limpasan langsung (DRO) itulah yang dapat menyebabkan pengumpulan volume air dalam waktu singkat melebihi batas kemampuan penampungan. Dalam perhitungan WB, DRO adalah limpasan langsung diatas permukaan tanah. Berdasarkan identifikasi bahaya banjir, maka Jawa-Bali dan Sumatera merupakan daerah paling rawan terhadap bahaya banjir, sedangkan Papua dan Maluku merupakan wilayah yang ancaman bahayanya paling rendah.



Analisis kekeringan mirip dengan analisis ketersediaan air, yaitu melibatkan data TRO hasil analisis neraca air. Hal ini dianggap tepat, sejauh data tersedia, sebab TRO mencerminkan ketersediaan air dimana kekeringan sangat berkaitan dengan kondisi ketersediaan air. Bahaya kekeringan terjadi di seluruh periode pada wilayah yang tidak tetap dengan intensitas bahaya cenderung naik dari periode 2010-2015 hingga 2025-2030. Wilayah Jawa-Bali, Sumatera dan Nusa Tenggara merupakan daerah yang memiliki ancaman bahaya kekeringan relatif tinggi, sedangkan Kalimantan, Sulawesi, Papua dan Maluku adalah wilayah dengan ancaman bahaya yang relatif rendah.

### **Pemodelan Dampak Perubahan Iklim pada Sumberdaya Air**

Berdasarkan hasil beberapa penelitian, telah terjadi penurunan produksi air sungai di beberapa DAS utama di Pulau Jawa yang sangat dipengaruhi oleh perubahan karakteristik DAS. Perubahan terbesar terjadi akibat alih fungsi lahan dari hutan menjadi lahan pertanian, dan dari lahan pertanian menjadi lahan non pertanian. Sebagai contoh, terjadinya pendangkalan di bagian hilir Citarum, yang disebabkan oleh erosi dan tidak berfungsinya sempadan sungai, telah memperparah kondisi DAS Citarum. Dalam 16 tahun terakhir, tercatat laju sedimen DAS Citarum telah mencapai 59.438.931 m<sup>3</sup> (Pikiran Rakyat 2002). Penurunan produksi air di berbagai DAS tersebut diperparah oleh ketidak teraturan pola curah hujan terutama yang berkaitan dengan durasi bulan ekstrim kering sebagai akibat dampak pemanasan global. Banyak bukti menunjukkan bahwa iklim termasuk pola hujan Indonesia dan di berbagai belahan dunia lain sudah mengalami perubahan (IPCC 2007). Pemanasan global juga diperkirakan mempengaruhi kejadian iklim ekstrim seperti kemarau panjang, banjir dan kejadian ekstrim lainnya (Salinger 2005; IPCC 2007).

Perubahan pola hujan juga sudah terjadi di beberapa wilayah di Indonesia. Penelitian Aldrian dan Djamil (2006) di DAS Brantas menunjukkan bahwa jumlah bulan dengan curah hujan ekstrim cenderung meningkat dalam 50 tahun terakhir ini, terutama di daerah yang dekat pantai. Pada daerah ini, lama bulan ekstrim kering meningkat menjadi 4 bulan bahkan pada tahun 2002 jumlah bulan kering mencapai 8 bulan, dan merupakan tahun yang memiliki bulan kering terpanjang selama 50 tahun terakhir ini. Kejadian lain

menunjukkan bahwa penurunan debit waduk Jatiluhur yang mendapat pasokan air dari Sungai Citarum disebabkan pula oleh berkurangnya curah hujan. Penurunan curah hujan ini merupakan dampak semakin tingginya frekuensi serta intensitas kejadian kekeringan akibat fenomena El Nino yang merupakan salah satu indikator dari pemanasan global. Sangat dimungkinkan, kasus teladan di DAS Brantas dan DAS Citarum tersebut merupakan cerminan kondisi keragaan produksi dan ketersediaan air sungai di DAS utama di Pulau Jawa dan DAS lain di luar Pulau Jawa.

Tanpa adanya langkah-langkah atau tindakan untuk menghentikan laju emisi, perubahan iklim global terjadi lebih cepat di masa depan. IPCC telah memperkenalkan proyeksi perubahan iklim yang didasarkan pada skenario emisi karbondioksida (Nakicenovic *et al.* 2000) yang mengasumsikan tidak adanya kebijakan iklim secara tegas.

Salah satu sarana untuk mengadopsi proyeksi iklim di masa depan adalah melalui model AOGCM (*Atmosphere-Ocean Global Circulation Models*). Model numerik ini memiliki beberapa keunggulan diantaranya mampu menampilkan sebuah sistem iklim dalam bentuk tiga dimensi, mampu menjelaskan berbagai proses fisis dan dinamis, serta berbagai macam proses interaksi dan timbal-balikinya. Model-model AOGCM juga memiliki kemampuan di dalam memperkirakan kondisi iklim regional dalam merespon terhadap perubahan konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK) dan aerosol.

Kajian yang dilakukan Konsorsium Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim (KP3I) Badan Litbang Pertanian terkait pengaruh perubahan iklim terhadap pola curah hujan pada DAS di Lampung, Pulau Jawa dan Sulawesi bagian selatan menggunakan data GCM NIES menunjukkan bahwa hasil *downscaling* data NIES untuk proyeksi curah hujan pada setiap DAS. NIES (*National Institute for Environmental Studies*) yang didirikan pada tahun 1974 memiliki peran yang penting di dalam melakukan riset yang berkaitan dengan penanganan lingkungan di Jepang. Model skenario iklim yang digunakan merupakan model kopel atmosfer laut yang dikembangkan dengan melakukan kerja sama dengan Universitas Tokyo dan Universitas Kyoto (Abe-Ouchi 1996). Pada model skenario ini, NIES menggunakan ukuran resolusi grid 5,6° bujur x 5,6° lintang yang memanjang mulai dari Samudera Pasifik hingga Benua Maritim Indonesia. Skenario ini

dapat digunakan untuk memprediksi perubahan/*anomaly* suhu dan curah hujan hingga tahun 2100. Khusus untuk wilayah SPAG titik grid terdekat dari model CCSR/NIES berada pada posisi 101,25°BT dan 0° Ekuator. Hasil *downscaling* menunjukkan bahwa sebagian besar DAS akan mengalami kenaikan curah hujan baik pada musim hujan (MH) maupun musim kering (MK). DAS yang diproyeksi mengalami kenaikan curah hujan pada tahun 2025 dan 2050 berdasarkan skenario SRESA2 dan SRESB1 adalah Jeneberang, Saddang, Walanae, Citarum, Ciliwung-Cisadane, dan Cimanuk. DAS yang diproyeksi akan mengalami kenaikan curah hujan pada MH dan penurunan pada MK adalah Bondoyudo, Bedadung, Brantas, Citanduy, Bengawan Solo dan Progo, sedangkan curah hujan DAS Grindulu diproyeksi tetap, pada MH dan pada MK turun (Pawitan *et al.* 2010). DAS yang diproyeksi juga mengalami kenaikan curah hujan pada tahun 2025 dan 2050 adalah Mesuji dan Way Sekampung. DAS yang diproyeksi akan mengalami kenaikan curah hujan pada MH dan penurunan pada MK adalah Ciujung dan Cidanau (Pawitan *et al.* 2011).

Penelitian pengaruh pemanasan global terhadap kondisi hujan di Jawa dan Bali telah dilakukan oleh Naylor *et al.* (2007) dengan menggunakan beberapa model GCMs dan model-model statistik *downscaling* pada dua skenario emisi yaitu SRESB1 dan SRESA2. Hasil analisis menunjukkan kedua skenario emisi, total curah hujan April-Juni (musim transisi) diperkirakan akan meningkat 10% dari rata-rata curah hujan musim saat ini, tetapi untuk curah hujan musiman Juli-September (puncak musim kemarau) akan menurun antara 10-25%. Untuk beberapa wilayah penurunan tinggi hujan musim kemarau (JAS) bisa mencapai 50% di Jawa Barat dan Jawa Tengah serta 75% di Jawa Timur dan Bali.

Kajian lainnya dilakukan Neelin *et al.* (2006) di wilayah tropis Indonesia dengan menggunakan ensemble multimodel dari simulasi pemanasan global. Hasil kajian menunjukkan bahwa, di wilayah bagian selatan garis ekuator yakni di Sumatera Selatan, Jawa dan seluruh wilayah timur Indonesia, adanya penurunan tren curah hujan pada periode JJA. Sebaliknya di wilayah utara garis ekuator, termasuk Sumatera bagian utara, barat dan tengah, serta sebelah utara Kalimantan, hasil analisis menunjukkan tren kenaikan curah hujan.

## **UNDANG UNDANG DAN RENCANA AKSI YANG TERKAIT DENGAN PENGELOLAAN SUMBERDAYA AIR MENYIKAPI PERUBAHAN IKLIM GLOBAL**

### **Peraturan Perundang-Undangan**

Undang Undang dan Rencana Aksi yang terkait dengan pengelolaan sumberdaya air dalam menyikapi perubahan iklim global yang dapat diacu sebagai landasan yuridis adalah sebagai berikut:

#### **UU No. 23 Tahun 1997**

UU No. 23 Tahun 1997 tentang Lingkungan Hidup memberikan pedoman dan arahan peraturan tentang pemeliharaan Lingkungan Hidup terutama yang diakibatkan oleh berbagai kegiatan pengelolaan sumberdaya alam, industri, pengembangan wilayah, dan kegiatan lainnya yang berhubungan dengan perubahan lingkungan sekitarnya. UU ini juga mencantumkan peran lembaga-lembaga yang kompeten dalam kajian lingkungan hidup, baik dalam pengelolaan ataupun pengendalian lingkungan hidup. Pada prinsipnya isi UU ini memberikan arahan tentang berbagai sektor Pembangunan Nasional namun tetap berwawasan lingkungan. UU ini terkait erat dengan pengelolaan sumberdaya air secara berkelanjutan dengan tetap mengendalikan lingkungan hidup.

#### **UU No. 7 Tahun 2004**

Undang Undang No. 7 Tahun 2004 tentang sumberdaya air merupakan upaya dalam menghadapi ketidakseimbangan antara ketersediaan air yang cenderung menurun dan kebutuhan air yang semakin meningkat, sehingga sumberdaya air wajib dikelola dengan memperhatikan fungsi sosial, lingkungan hidup, dan ekonomi secara selaras. Pengelolaan sumberdaya air perlu diarahkan untuk mewujudkan sinergi dan keterpaduan yang harmonis antar wilayah, antar sektor, dan antar generasi. Sejalan dengan semangat demokratisasi, desentralisasi, dan keterbukaan dalam tatanan kehidupan bermasyarakat, berbangsa, dan bernegara, masyarakat perlu diberi peran dalam pengelolaan sumberdaya air.

#### **UU No. 24 Tahun 2007**

UU No. 24 Tahun 2007 tentang penanggulangan bencana ditetapkan karena Negara Kesatuan Republik

Indonesia (NKRI) bertanggung jawab melindungi segenap bangsa Indonesia dan seluruh tumpah darah Indonesia dengan tujuan untuk memberikan perlindungan terhadap kehidupan dan penghidupan termasuk perlindungan atas bencana. Selain itu, undang-undang ini diberlakukan mengingat wilayah NKRI memiliki kondisi geografis, geologis, hidrologis, dan demografis yang memungkinkan terjadinya bencana, baik yang disebabkan oleh faktor alam, faktor non alam maupun faktor manusia yang menyebabkan timbulnya korban jiwa manusia, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis yang dalam keadaan tertentu dapat menghambat pembangunan nasional.

### **Rencana Aksi Nasional dalam Menghadapi Perubahan Iklim terkait Sumberdaya Air**

Perbaikan pola pembangunan yang selama ini dilakukan sudah saatnya diperbarui. Paradigma lingkungan harus diinternalisasikan ke dalam berbagai sektor pembangunan, seperti sektor energi, pengelolaan hutan dan sumberdaya alam, pertanian, perkebunan, tata ruang, dan infrastruktur. Berbagai instansi yang terkait dengan upaya penanggulangan perubahan iklim dan dampaknya perlu melakukan koordinasi yang rapi dan sistematis. Pola-pola pembangunan lama harus ditinggalkan dan digantikan dengan pola pembangunan yang berkelanjutan. Dokumen Rencana Aksi Nasional merupakan sebuah instrumen kebijakan yang bersifat dinamis sehingga perlu dievaluasi, diperbarui, dan diperbaiki secara berkala disesuaikan dengan dinamika perubahan iklim itu sendiri. Rencana aksi ini diharapkan bisa diimplementasikan dan dijadikan sebagai panduan untuk seluruh instansi terkait, baik di pusat maupun daerah, dalam melaksanakan pembangunan di masa sekarang ataupun yang akan datang. Oleh karena itu, Rencana Aksi Nasional ini sudah dimasukkan dalam Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2005-2025 maupun Rencana Pembangunan Jangka Menengah (RPJM).

Selanjutnya Rencana Aksi Nasional dalam menghadapi perubahan iklim pada sektor sumberdaya air, mempunyai tujuan yang tertuang dalam agenda adaptasi terhadap perubahan iklim adalah mendukung pencapaian visi air Indonesia yakni “Menuju Terwujudnya Kemanfaatan Air yang Mantap, Berdayaguna, Berhasilguna dan Berkelanjutan bagi Kesejahteraan Seluruh Rakyat.”

Saat ini permintaan air bersih terutama di Pulau Jawa, Bali, Nusa Tenggara Timur telah melebihi suplai

air bersih. Hal ini diakibatkan oleh tingginya pertumbuhan populasi, industrialisasi, urbanisasi serta rendahnya suplai air bersih. Mengingat semakin kritisnya sumberdaya air di Indonesia, pada Hari Air Sedunia XII tahun 2004, dicanangkan komitmen pemerintah dalam pengelolaan sumberdaya air dengan ditandatanganinya “Deklarasi Nasional Pengelolaan Air yang Efektif dalam Penanggulangan Bencana” oleh 11 Menteri dalam koordinasi Kementerian Koordinator Bidang Kesejahteraan Rakyat. Deklarasi ini kemudian ditindaklanjuti dengan pencanangan Gerakan Nasional Kemitraan Penyelamatan Air (GN-KPA) oleh Presiden pada 28 April 2005 yang pada intinya memuat 6 komponen strategis, yakni (1) Penataan Ruang, pembangunan fisik, pertanahan dan kependudukan, (2) Rehabilitasi hutan dan lahan serta Konservasi sumberdaya air, (3) Pengendalian daya rusak air, (4) Pengelolaan kualitas dan pengendalian pencemaran air; (5) Penghematan penggunaan dan pengelolaan permintaan air, dan (6) Pendayagunaan sumberdaya air secara adil, efisien dan berkelanjutan.

Dengan berubahnya iklim, kejadian kekeringan bertambah parah, air tanah semakin berkurang serta kenaikan air laut memicu intrusi air laut ke daratan sehingga mencemari kualitas sumber-sumber air untuk keperluan air bersih dan irigasi. Aksi strategis yang disebutkan di atas telah secara langsung maupun tidak langsung berkaitan dengan adaptasi perubahan iklim. Untuk memperkuat program dan inisiatif yang telah ada sehingga menjadi tahan terhadap perubahan iklim, rencana aksi yang perlu diimplementasikan antara lain:

- Mengadakan inventarisasi tempat pengambilan air baku untuk air minum di sungai (intake) dan daerah irigasi yang terkena dampak kenaikan muka air laut dan mengidentifikasi upaya-upaya penanganannya.
- Memperbaiki jaringan hidrologi di tiap wilayah sungai sebagai pendeteksi perubahan ketersediaan air maupun sebagai perangkat pengelolaan air dan sumber air.
- Menginventarisasi DAS yang mengalami pencemaran namun tingkat penggunaan airnya sangat tinggi untuk ditentukan prioritas penanganannya.
- Melaksanakan program pembangunan situ, embung dan waduk di wilayah Pulau Jawa, Sumatera, Sulawesi, Maluku, Bali, NTB, dan NTT seperti yang telah diprogramkan dalam Rencana Kerja Pemerintah (RKP) 2008. Tempat-tempat penampungan air tersebut dapat dipergunakan sebagai

sarana penyimpan air di musim hujan sehingga bisa dimanfaatkan di musim kemarau.

- Melanjutkan gerakan hemat air untuk segala keperluan, seperti air minum, domestik, pertanian, industri, pembangkit listrik, dan sebagainya.
- Meningkatkan daya dukung DAS dengan mencegah kerusakan dan memperbaiki daerah tangkapan air sebagai daerah resapan air melalui upaya konservasi lahan, baik dengan metode mekanis (misal: pembuatan terasering dan sumur resapan) maupun vegetatif.
- Mengembangkan teknologi dam parit yang dibangun pada alur sungai untuk menambah kapasitas tampung sungai, memperlambat laju aliran dan meresapkan air ke dalam tanah (*recharging*). Teknologi ini dianggap efektif karena secara teknis dapat menampung volume air dalam jumlah relatif besar dan mengairi areal yang relatif luas karena dapat dibangun berseri (*cascade series*). Mengingat pada musim hujan terjadi banjir dan pada musim kemarau terjadi kekeringan, serta kualitas air yang sudah tercemar, maka perlu dilakukan upaya pemulihan secara bertahap daerah aliran sungai dengan memperhatikan kualitas air sungai secara terpadu antar kabupaten, propinsi, dan instansi terkait. Hal ini juga perlu dikaitkan dengan pengembangan wilayah pesisir pantai, sebagai contoh DAS Ciliwung sampai Teluk Jakarta. Dalam hal ini sudah disiapkan konsep Peraturan Presiden tentang Pemulihan Kualitas Lingkungan DAS Ciliwung sampai Teluk Jakarta.
- Melembagakan pemanfaatan informasi prakiraan cuaca dan iklim secara efektif dalam melaksanakan operasi dan pengelolaan air waduk/dam sehingga dapat menekan risiko kekeringan dan banjir lebih efektif.
- Mengadakan perubahan pola operasi dan pemeliharaan waduk dan bangunan pelengkap/penunjangnya untuk menyesuaikan dengan adanya peningkatan intensitas hujan dan berkurangnya curah hujan sebagai dampak adanya perubahan iklim.
- Melakukan penelitian geohidrologi untuk mengetahui cekungan-cekungan air tanah, sehingga dapat dibangun dan dipertahankan situ-situ, danau-danau, dan pembangunan resapan air serta penam-

pungan air, baik di gedung-gedung maupun di dalam tanah. Perlu dilakukan pengawasan terhadap kewajiban pemilik gedung untuk membuat resapan air dan penampungan air.

- Perlu dikembangkan teknologi yang dapat memanfaatkan air laut menjadi air yang dapat diminum. Upaya daur ulang air juga perlu dilaksanakan.
- Perlu perencanaan dan pelaksanaan strategi nasional pengelolaan lahan gambut secara berkelanjutan.
- Menginventarisasi daerah lahan gambut sesuai dengan karakteristiknya dan perlu dibuat penataan ruang lahan gambut sesuai karakteristik tersebut.
- Melakukan rehabilitasi pengelolaan air di daerah lahan gambut pada kanal-kanal terbuka dengan membangun sistem buka tutup pada kanal tersebut untuk menjaga kestabilan muka air tanah (KLH, 2007).
- Upaya adaptasi sektor sumberdaya air tercantum dalam Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim Indonesia (RAN-API) yang dikeluarkan DNPI, Bappenas, dan KLH (2012). RAN-API untuk sektor sumberdaya air adalah sebagai berikut:

**1. Meningkatkan manajemen prasarana sumberdaya air dalam rangka mendukung penyediaan air dan ketahanan pangan**

- a. Pembangunan pengelolaan dan rehabilitasi bendung, embung dan bendungan serta meningkatkan kualitas pengelolaannya.
- b. Pengendalian penggunaan air pada sumber air.
- c. Pemantauan pengelolaan kualitas air pada sumber air.
- d. Pembangunan, pemeliharaan dan rehabilitasi prasarana penyediaan air baku, untuk pemenuhan kebutuhan pokok sehari-hari, perkotaan, dan industri.
- e. Pembangunan, pengelolaan dan rehabilitasi sistem jaringan irigasi (termasuk subak) untuk menjaga ketahanan pangan nasional.
- f. Pengembangan dan penerapan teknologi irigasi hemat air dalam rangka intensifikasi pertanian.
- g. Penyusunan dan pemutakhiran Norma, Standar, Prosedur, dan Kriteria (NSPK) untuk pengelolaan sumberdaya air.

**2. Mengembangkan disaster risk management banjir (sungai, rob, lahar hujan), tanah longsor dan kekeringan**

- a. Pembangunan dan/atau pemeliharaan bangunan pantai untuk mengatasi banjir/rob pada kota-kota besar di daerah pesisir dan strategis lainnya.
- b. Pelaksanaan penataan, penertiban sempadan sungai untuk lokasi-lokasi yang mengalami banjir/penyebab banjir.
- c. Pembangunan, operasi dan pemeliharaan prasarana dan sarana pengendalian banjir dan kekeringan untuk kota dan kabupaten yang rentan terhadap bencana.
- d. Peningkatan kapasitas (*capacity building*) dalam *disaster risk management*.
- e. Pembangunan prasarana *early warning system* untuk antisipasi bencana (bencana dan kekeringan).
- f. Penyusunan dan pemutakhiran NSPK untuk *disaster risk management* sumberdaya air.
- g. Penyusunan rencana tata tanam yang reliable dan pelaksanaan sosialisasinya dalam rangka antisipasi kekeringan.
- h. Penyelenggaraan perbaikan sistem pengelolaan irigasi dengan mengintegrasikan pengelolaan risiko perubahan iklim.
- i. Pelaksanaan reevaluasi pengaturan operasi dan pemeliharaan irigasi untuk mengakomodasi dampak perubahan iklim dalam hal bertambah atau berkurangnya intensitas curah hujan.

**3. Meningkatkan manajemen dan mengembangkan prasarana sumberdaya air untuk pengendalian daya rusak air**

- a. Pengembangan teknologi, pembangunan, dan pemeliharaan prasarana dan sarana untuk pengendalian pencemaran air pada sumber air (sungai, danau, dan waduk).
- b. Pengembangan teknologi, pembangunan, dan pemeliharaan prasarana dan sarana untuk pengendalian sedimentasi sungai, danau, dan waduk.
- c. Pengembangan teknologi, pembangunan, dan pemeliharaan prasarana dan sarana untuk pengendalian erosi dan sedimentasi pada pantai.

**4. Meningkatkan kesadaran dan peran serta masyarakat tentang penyelamatan air**

- a. Pelaksanaan kampanye hemat air/Gerakan Nasional Penyelamatan Air (GNPA).
- b. Meningkatkan peran serta masyarakat dalam gerakan hemat air dan penyelamatan air.

**5. Meningkatkan penyediaan dan akses terhadap data dan informasi terkait dampak perubahan iklim**

- a. Penyusunan dan pemutakhiran *database* mengenai neraca air (potensi dan kebutuhannya) wilayah sungai untuk ketersediaan air di masa depan dengan memperhitungkan perubahan iklim.
- b. Penyusunan kajian dan *database* kerawanan kawasan/daerah yang rentan terhadap bencana dampak perubahan iklim.
- c. Pelaksanaan rasionalisasi jaringan pos hidrologi dan penerapan teknologi telemetri dalam *forecasting* untuk memantau dampak perubahan iklim.

**PENUTUP**

Identifikasi terjadinya perubahan iklim dilakukan dengan melihat fakta-fakta ilmiah secara global yang dilaporkan oleh IPCC, DNPI dan Pokja Perubahan Iklim. Terjadinya perubahan iklim diidentifikasi dari kenaikan suhu global, kenaikan muka air laut di kawasan pesisir pantai, perubahan pola curah hujan dan kejadian iklim ekstrim.

Analisis perubahan iklim dilakukan dengan melakukan kajian lebih intensif dengan pendekatan simulasi empirik, semi empirik, dan modeling iklim global (GCM), dan yang lebih penting pada tingkat nasional adalah kajian terhadap perubahan iklim wilayah.

Dampak perubahan iklim pada sumberdaya air teridentifikasi dari indikator penting perubahan iklim yaitu trend debit aliran sungai, kondisi biofisik DAS, respon hidrologi DAS (menentukan ketersediaan air wilayah untuk berbagai kebutuhan dan ikut menentukan nilai ekologi, sosial dan ekonomi sumberdaya air yang ada), peningkatan intensitas dan frekuensi kejadian iklim ekstrim (banjir dan kekeringan).

Undang Undang dan Rencana Aksi yang terkait dengan pengelolaan sumberdaya air dalam menghadapi perubahan iklim global yang dapat diacu sebagai landasan yuridis adalah Undang Undang No. 7 Tahun 2004 tentang sumberdaya air, UU No. 24 Tahun 2007 tentang penanggulangan bencana, UU No. 23 Tahun 1997 tentang lingkungan hidup. Rencana Aksi Nasional merupakan instrumen kebijakan yang bersifat dinamis sehingga perlu dievaluasi, diperbarui, dan diperbaiki secara berkala disesuaikan dengan dinamika perubahan iklim itu sendiri. RAN-API untuk sektor sumberdaya air adalah sebagai berikut: (1) Meningkatkan manajemen prasarana sumberdaya air dalam rangka mendukung penyediaan air dan ketahanan pangan, (2) Mengembangkan *disaster risk* management banjir (sungai, rob, lahar hujan), longsor, dan kekeringan, (3) Meningkatkan manajemen dan mengembangkan prasarana sumberdaya air untuk pengendalian daya rusak air, (4) Meningkatkan kesadaran dan peran serta masyarakat tentang penyelamatan air, dan (5) Meningkatkan penyediaan dan akses terhadap data dan informasi terkait dampak perubahan iklim.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alcamo, J. dan T. Henrichs. 2002. Critical regions: a model based estimation of world water resources sensitive to global change. *Aquat Sci*, 64:352-362.
- Abe-Ouchi, A. 1996. Outline of coupled atmosphere and ocean model and experiment. Internal report, Centre for Climate System Research, University of Tokyo, Japan.
- Adger, W.N. and K. Brown. 1994. *Land Use and The Cause of Global Warming*. John Wiley & Sons, Chichester. 261pp.
- Aldrian, E. dan Y.S. Jamil. 2006. Longterm rainfall trend of Brantas Catchment Area. East Java. *Indoensian J. Of Geography* 38(1) 26-40.
- BALITBANGTAN. 2011. *Pedoman Umum Adaptasi Perubahan Iklim Sektor Pertanian*. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian. 67 p.
- BAPPENAS. 2009. *Indonesia Climate Change Sectoral Roadmap*. Minister of National Development Planning.
- BAPPENAS. 2014. *Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim (RAN-API)*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. 176 hal.
- Barnett, T.P., J.C. Adam, and D.P. Lettenmaier. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Reviews. Nature* 04141, Vol. 438:303-307.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu, and J.P. Palutikof. 2008. *Climate Change and Water*. IPCC Technical Paper. 200p.
- Brekke, L.D., J.E. Kiang, J.R. Olsen, R.S. Pulwarty, D.A. Raff, D.P. Turnipseed, R.S. Webb, and K.D. White. 2009. *Climate Change and Water Resources Management: A Federal Perspective*. USGS Circular 1331. 65p.
- Chiew, F.H.S. dan T.A. Mc. Mahon. 1996. Trends in historical streamflow records. In: Jones *et al.* *Regional Hydrol. Response to Climate Change*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht. P.63-68.
- DNPI, BAPPENAS, dan KLH. 2012. *Rencana Aksi Nasional Adaptasi Perubahan Iklim Indonesia*.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns. 1991. Calculation of Average, Uncertainty Range, and Reliability of Regional Climate Changes from AOGCM Simulations via the "Reliability Ensemble Averaging" (REA) Method. *American Meteorological Society/AMS Journals Online*. <http://journals.ametsoc.org>.
- Gleick, P.H. 1989. Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics*. Volume 27, Issue 3, pages 329-344, August 1989. American Geophysical Union.
- Hatmoko, W. 2009. *Tren perubahan debit andalan sungai di Jawa*. Makalah Lokakarya Tren Perubahan Curah Hujan dan Debit Sungai-sungai di Indonesia, Program Penguatan IPTEK Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim - KNRT, 21 April 2009.
- Huelsenbeck, M. 2012. *Ocean-Based Food Security Threatened in a High CO<sub>2</sub> World. A Ranking of Nations' Vulnerability to Climate Change and Ocean Acidification*. [www.oceana.org](http://www.oceana.org).
- Hulme, M. and N. Sheard. 1999. *Climate Change Scenarios for Indonesia*. Climatic Research Unit, Norwich, UK. 6pp.
- IPCC. 1996. *Synthesis of Scientific-Technical Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UN Framework Convention on Climate Change, and the Summaries for Policymakers from the three Working Group Reports*.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 976 pp.
- IPCC. 2013. *Laporan IPCC ke 5 Kelompok Kerja I/Working Group I Contribution to the 5 th Assessment Report of the IPCC*.
- Jose, A.M. and N.A. Cruz. 1999. *Climate change impacts and responses in the Philippines: water resources*. *Climate Research*, published August 27, 2009. Vol. 12: 77-84, 1999. P. 77-84.
- KLH. 2007. *Kajian Risiko dan Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim Pulau Lombok Provinsi Nusa Tenggara Barat*. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta.

- KLH. 2012. Climate Change Risk and Adaptation Assessment Greater Malang, Kementerian Lingkungan Hidup Jakarta, June 2012.
- Mall, R.K., G. Akhilesh, S. Ranjeet, Singh, Rathore. 2006. Water Resources and Climate Change: An Indian Perspective. Review Article of Current Science. Current Science Association.
- Mawardi, I. 2010. Kerusakan Daerah Aliran Sungai dan Penurunan Daya Dukung Sumber Daya Air di Pulau Jawa serta Upaya Penanganannya. *J. Hidrosfir Indonesia* 5(2):1-11.
- Meehl, G.A., P. Gent, J. M. Arblaster, B. Otto-Bliesner, E. Brady, and A. Craig. 2001. Factors that affect amplitude of El Nino in global coupled climate models. *Climate Dyn.*, 17, 515–526.
- Nakicenovic, N.J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. Le Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor dan Z. Dadi. 2000. Emissions Scenarios : A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge and New York, pp.115-166.
- Naylor, R.L., D.S. Battisti, D.J. Vimont, W.P. Falcon, and M.B. Burke. 2007. Assessing risks of climate variability and climate change for Indonesian rice agriculture. *Proceeding of the National Academic of Science* 114:7752-7757.
- Neelin, J.D., M. Munnich, H. Su, J.E. Meyerson, and C.E. Holloway. 2006. Tropical Drying Trends in Global Warming Models and Observations, *PNAS* volume 103, pp. 6110-6115.
- Pawitan, H. 1998 Keseimbangan hidrologi jangka panjang DAS Citarum. Makalah Seminar Hasil Penelitian IPB – Lembaga Penelitian IPB, Bogor, Agustus 1998.
- \_\_\_\_\_. 1999 Penilaian kerentanan dan daya adaptasi sumber daya air terhadap perubahan iklim. Makalah Lokakarya Nasional-Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup, Jakarta, Februari 1999.
- \_\_\_\_\_. 2002. Hidrologi DAS Ciliwung dan Andilnya Terhadap Banjir di Jakarta. Lokakarya Pendekatan DAS dalam Menanggulangi Banjir Jakarta. Lembaga Penelitian IPB-Andersen Consult. Jakarta, 8 Mei 2002.
- Pawitan, H., R. Boer, Y. Kusmaryono, dan J.S. Baharsjah. 2003. Perubahan Iklim Global Dan Dampaknya Terhadap Masa Depan Sumber Daya Air Dan Ketersediaan Air Indonesia. Makalah disajikan dalam Seminar Nasional “Air untuk Masa Depan” dalam rangka Peringatan Hari Air Sedunia 2003, Jakarta, 20 Maret 2003.
- Pawitan, H. 2009. Uncertainties in Indonesia water resources Availability. Paper presented at Int'l Conf. "Uncertainties in Water Resources Management: Causes, technologies and consequences"(WRM-Mon 2008) in conjunction with the 16th Regional Steering Committee (RSC) Meeting for UNESCO IHP for Southeast Asia and the Pacific, Ulaanbaatar City, Mongolia.
- Pawitan, H., B. Kertiwa, I. Amien, H. Sosiawan, E. Surmaini, dan A. Hamdani. 2010. Analisis Dampak Perubahan Iklim Terhadap Dinamika Potensi Sumberdaya Air untuk Pertanian: Konsorsium Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim untuk Mengurangi Akibat dan Resiko Iklim pada Sektor Pertanian (KP3I). Laporan Penelitian Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian.
- Pawitan, H., P. Redjeningrum, B. Kertiwa, H. Sosiawan, dan B. Rahayu. 2011. Analisis Dampak Perubahan Iklim Terhadap Dinamika Potensi Sumberdaya Air untuk Pertanian: Konsorsium Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim untuk Mengurangi Akibat dan Resiko Iklim pada Sektor Pertanian (KP3I). Laporan Penelitian Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Litbang Pertanian.
- Rango, A. (1998) Developing techniques for assessment of changing water resources in the 21st century. In: H.Zebidi (Ed.) *Water: a looming crisis? IHP-V, Technical Documents in Hydrology*, No.18, p.167-172.
- Ratag, M.A. 2001. Model Iklim Global dan Area Terbatas serta Aplikasinya di Indonesia. Paper disampaikan pada Seminar Sehari Peningkatan Kesiapan Indonesia dalam Implementasi Kebijakan Perubahan Iklim. Bogor, 1 November 2001.
- Salinger, M.J. 2005. Increasing climate variability and change: reducing the vulnerability. *Climate Change* 70:1-3.
- Santoso, H. and C. Forner. 2006. Climate change projections for Indonesia. TroFCCA. 8p. UN Pop Prospects (2008) *World Population Prospects: The 2008 Revision*, <http://esa.un.org/unpp>, Sunday, June 14, 2006.
- Sofian, I. 2010. Memahami dan Mengantisipasi Dampak Perubahan Iklim pada Pesisir dan Laut di Indonesia Bagian Timur. Dokumen 819 vol. 12 no. 1 Mei 2011. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Susandi, S. 2012. Bencana Perubahan Iklim Global dan Proyeksi Perubahan Iklim Indonesia.
- UK Met Office. 2011. Climate: observations, projections and impacts in Indonesia. Met Office FitzRoy Road, Exeter Devon, EX1 3PB United Kingdom.
- UNCED. 1992. THE RIO EARTH SUMMIT. The United Nations Conference on Environment and Development (UNCED) took place in 1992 in Rio de Janeiro, Brazil.
- Vakkilainen and Varis. 1999. Will Water be Enough, Will Food be Enough? IHP-V, Tech.Doc in Hydrology, No.24, pp.38.
- Zebidi, H. 1998. *Water: a looming crisis? IHP-V, Technical Documents in Hydrology*, No.18.