

Emisi Pencemaran Udara Dari Biomass *Open Burning* Pada Lahan Gambut Di Indonesia Menggunakan Data Gis Dan Citra Modis

Ayu Utami¹, Chih-Hua Chang²

¹Department of Environmental Engineering, National Pembangunan University "Veteran" Yogyakarta, Jl. SWK 104 Condong Catur, Depok, Sleman, ayuutami@gmail.com

²Department of Environmental Engineering, National Cheng Kung University, No.1 University Road, Tainan City, Taiwan, 701, chihhua@mail.ncku.edu.tw

Email: ¹ayuutami@gmail.com, ²chihhua@mail.ncku.edu.tw

Abstrak

Biomass open burning melepaskan sejumlah besar polutan yang menyebabkan terganggunya komponen kimia di atmosfer. Fenomena ini juga merupakan salah satu penyebab utama dalam perubahan iklim. Asia tenggara merupakan region yang memiliki wilayah agrikultur yang luas sehingga memiliki potensi untuk terbakar secara terbuka dan berkontribusi menyumbang emisi pencemaran udara yang sangat besar. Pencitraan satelit dan remote sensing digunakan dalam penelitian ini untuk menghitung area terbakar dan besarnya emisi yang dihasilkan dalam konteks spasial di wilayah Asia Tenggara. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan seberapa besar pengaruh emisi yang dihasilkan oleh kebakaran lahan gambut di Indonesia terhadap besarnya emisi yang dihasilkan dari terbakarnya biomass secara terbuka di Asia Tenggara. Kebakaran agrikultur pada lahan gambut di Indonesia menghasilkan emisi pencemaran udara dalam jumlah yang besar sehingga kasus ini diambil menjadi topik spesifik pada penelitian ini. Data produk dari MODIS burned area dan land cover digunakan untuk mendeteksi area terbakar dan memperkirakan faktor emisi di Asia Tenggara yang digunakan dalam perhitungan emisi. Pada hasil penelitian ini, tahun 2001-2007, bulan Mei sampai Oktober, Indonesia berkontribusi sekitar 80% dari total keseluruhan total area terbakar di Asia tenggara. Data dan hasil dari penelitian ini bisa digunakan untuk pertimbangan pembuatan kebijakan di wilayah Asia Tenggara.

Kata Kunci : biomass open burning, Indonesia, lahan gambut, MODIS, remote sensing

ABSTRACT

Biomass open burning releases large amount of pollutant that affect atmospheric chemistry component. This phenomenon is one of the major causes the climate change. Southeast Asia region has a vast agriculture area which potentially burned in outdoor area. The burning of agriculture contributes a large amount of air pollution emission. Satellite imagery and remote sensing were used in this research to calculate the burned area and emission which generated in the spatial context of Southeast Asia. The purpose of this research was to obtain the importance of peat soil burning in Indonesia affected the amount of biomass open burning emissions in Southeast Asia. The burning of peat soil in Indonesia also emits large of emissions, therefore this topic has taken as a specific case in this research. MODIS burned area and land cover data products were used to detect the burned areas and estimate the emission factor in Southeast Asia related to emissions calculation. As a result of this research, on 2001-2007, on May to October, Indonesia contributes a significant involvement; approximately 80% of the total burned in Southeast Asia was occurred in Indonesia. Data and results from this research can be applied for regulatory consideration to countries that participate in the Southeast Asia governing body.

Keywords: Biomass open burning, Indonesia, MODIS, peat soil, remote sensing

Dikirim/submitted: 5 Januari 2016

Diterima/accepted: 20 Januari 2016

1. PENDAHULUAN

Terbakarnya hutan secara terbuka menyebabkan sejumlah besar polutan mencemari atmosfer yang memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan iklim dan kondisi kimia atmosfer di daerah tropis (Crutzen & Andreae, 1990; D.G. Streets, 2003). *Biomass open burning* pada umumnya menyebabkan dampak yang cukup besar terhadap ekonomi, kesehatan dan keselamatan manusia, dengan konsekuensi yang cukup signifikan dan berat jika dibandingkan dengan risiko alam yang lainnya (Miettinen, 2007). *Biomass open burning* biasanya terjadi di daerah tropis karena pembakaran lahan vegetasi untuk membersihkan dari limbah sisa panen dan untuk keperluan perubahan lahan (Crutzen & Andreae, 1990).

Indonesia merupakan contributor emisi gas rumah kaca ketiga terbesar di dunia (IPCC, 2006). Emisi dari terbakarnya lahan gambut di Indonesia sudah dihitung besarnya di dalam penelitian ini. *Biomass open burning* pada lahan gambut, diperkirakan menjadi sumber utama emisi dari *biomass open burning* di Asia Tenggara (Page et al., 2002). Fluktuasi dari kejadian kebakaran, besarnya emisi, dan pola dari kebakaran sangat berhubungan dengan dampak yang terjadi, penyebab kebakaran, dan pengaruh *biomass open burning* di wilayah Asia Tenggara pada tahun 2001-2007.

Dengan menggunakan data satelit sebagai pendekatan untuk pendeteksian *hot spot* merupakan indikator terjadinya kebakaran terbaik yang tersedia untuk banyak area di dunia (Duncan, 2003). Data satelit juga menyediakan data mengenai penyebab kebakaran, terutama untuk daerah seperti Indonesia yang memiliki sedikit data aerial yang sistemik untuk area terbakar. Penggunaan data satelit beresolusi tinggi memang sangat diharapkan, tetapi area spasial yang terdeteksi kecil, periode observasinya sedikit, dan untuk menganalisis datanya membutuhkan sistem komputasi rumit yang cukup mahal. Data dengan sensor satelit beresolusi medium cocok digunakan untuk mengkaji wilayah dengan skala yang lebih besar. Dari karakteristik tersebut, data yang disediakan oleh MODIS sudah banyak digunakan untuk mendeteksi vegetasi dan perubahannya (Huete et al., 2002).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar pengaruh terbakarnya lahan gambut di Indonesia terhadap jumlah emisi dari *biomass open burning* di Asia Tenggara. Perbandingan antara perhitungan dengan dan tanpa mempertimbangkan kebakaran di lahan gambut dapat menjelaskan pengaruh dari kebakaran lahan gambut di Indonesia dan kontribusi emisinya di Asia Tenggara.

2. METODE PENELITIAN

Emisi dari sisa-sisa gas dan aerosol biomass open burning diperkirakan dari area terbakar, beban bahan bakar, faktor pembakaran, dan faktor emisi. Estimasi dari emisi diperhitungkan dengan formula dan metode dari IPCC Report, 2006. Formula untuk menghitung emisi dari biomass open burning akan ditunjukkan di bawah;

$$L_{fire} = A \times Mb \times Cf \times Gef \times 10^{-3} \quad (1)$$

L_{fire} : jumlah emisi gas rumah kaca akibat kebakaran, dalam satuan ton untuk tiap ERK e.g., CH₄, N₂O, etc; A: area terbakar, kilometer²; Mb: massa bahan bakar, ton kilometer⁻²; Cf: faktor pembakaran, tidak bersatuan; Gef: faktor emisi, g kg⁻¹ material kering terbakar (IPCC, 2006).

Area terbakar ditentukan dengan menggunakan data satelit. Faktor emisi dan *faktor pembakaran* yang digunakan dalam perhitungan penelitian ini berdasarkan IPCC Report, 2006. Nilai dari *massa bahan bakar* pada penelitian ini diambil berdasarkan penelitian sebelumnya mengenai *biomass burning* (Levine, 2000).

Untuk menganalisis area yang terbakar dan kemudian memperkirakan besarnya emisi di daerah tersebut, penelitian ini menggunakan data dari satelit sebagai materialnya. Data satelit diproses untuk mendapatkan besarnya area yang terbakar (besarnya area terbakar dihitung dari banyaknya piksel yang dikonversi menjadi luasan, kilometer persegi). Data produk yang digunakan untuk menghitung besarnya area terbakar pada penelitian ini adalah MODIS *burned area product*, MCD45A1.

MCD45A1 merupakan data produk bulanan dengan kualitas data beresolusi medium (500 m) yang terdiri dari data kebakaran dan informasi kualitas dalam basis per-piksel. Pemetaan area terbakar di wilayah tropis menggunakan pencitraan satelit dengan resolusi medium (250-500m) dengan karakterisasi berdasarkan tutupan awan, beberapa tipe tutupan lahan, area *wetland* yang cukup luas dan berbagai tipe dari pola kebakaran (Miettinen, 2007). Hasil menunjukkan bahwa produk MCD45A1 dapat menangkap 75% area terbakar yang terdeteksi oleh data Landsat (Chang & Song, 2009).

Data berupa tutupan lahan berupa hutan, sawah, dan lainnya dari tahun 2001-2007 didapatkan dari skema klasifikasi tutupan lahan MODIS MCD12Q1. MCD12Q1 termasuk 5 layer yang tutupan lahannya dipetakan menggunakan sistem klasifikasi yang berbeda, antara lain, Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) klasifikasi, 14-kelas sistem yang dikembangkan oleh Universitas Maryland (UMD), dan 6-biome sistem yang digunakan MODIS LAI/FPAR algorithm. Pada penelitian ini, data tutupan lahan yang digunakan mengidentifikasi 17 kelas jenis tutupan lahan

dalam skema IGBP vegetasi global dengan resolusi spasial 250 meter. Penggabungan antara produk area terbakar dan produk tutupan lahan akan menentukan data faktor emisi, faktor *combustion*, dan nilai dari *mass of fuel* untuk perhitungan perkiraan emisi.

Kebakaran pada lahan gambut di Indonesia juga akan di perkirakan dalam perhitungan emisi. Oleh karena itu, peta jenis tanah dari skema klasifikasi tanah FAO digunakan untuk mengetahui perkiraan emisi yang terjadi pada lahan gambut. Berdasarkan klasifikasi tersebut, lahan gambut disebut tipe histosols yang diartikan sebagai tanah yang memiliki kandungan organik pada tanah dengan horizon sekitar 40 sentimeter (Chang & Song, 2009).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. EMISI *BIOMASS OPEN BURNING* DI ASIA TENGGARA

Biomass burning memberikan kontribusi besar dalam mengemisi partikel karbon ke atmosfer (Latif, 2011). Di negara berkembang, bagaimanapun juga, pembakaran secara terbuka (*open burning*) masih menguntungkan dan terus menjadi yang termurah, termudah, paling higienis dalam hal pengurangan volum dan pembuangan material yang mudah terbakar. Aktifitas ini diperkirakan sebagai sumber emisi potensial yang mencemari atmosfer dan menjadi emisi yang terjadi baru-baru ini (Estrellan & Iino, 2010).

Berdasarkan pola area terbakar musiman pada penelitian ini, terdapat 3 jenis pola musiman yang berbeda, tipe 1 adalah Myanmar, Laos, Vietnam, dan Filipina; tipe 2 adalah Thailand, Kamboja, dan Malaysia; tipe 3 adalah Indonesia. Puncak terjadinya kebakaran pada wilayah tipe 1 pada bulan Februari dan Maret. Puncak pada tipe musiman ini terjadi pada saat musim kemarau dan pada saat persiapan musim tanam padi pada daerah tersebut (ADB, 2012; IRRI, 2011). Pada wilayah tipe 2, puncak kebakaran terjadi pada bulan Desember sampai Maret. Di Thailand dan Kamboja musim kemarau terjadi pada bulan November sampai Maret. Indonesia mempunyai pola kebakaran yang berbeda dari daerah lainnya di Asia Tenggara. Indonesia masuk ke dalam wilayah tipe 3. Pada wilayah ini, pola kebakaran mengalami puncak pada bulan Agustus. Pada ketiga tipe ini, tipe 1 wilayah kebakaran didominasi oleh Myanmar, tipe 2 didominasi oleh Thailand. Thailand merupakan salah satu importer beras terbesar, oleh karena itu Thailand berkontribusi emisi biomass open burning terbesar dari pembakaran batang padi atau jerami dari sisa panen. Sedangkan di Myanmar, biomass open burning didominasi oleh kegiatan tebang dan bakar (tradisi sehabis panen

untuk mengganti jenis lahan) dan di Indonesia akibat dari pembakaran batang padi atau jerami dan kebakaran hutan di lahan gambut.

Untuk memperkirakan emisi biomass open burning, bersarkan guideline dari IPCC tahun 2006, setiap tutupan lahan memiliki faktor emisi dan faktor pembakaran yang berbeda-beda. Oleh karena itu, pada penelitian ini, skema tutupan lahan harus di overlay dengan data produk area terbakar untuk menentukan nilai beban bahan bakar. Emisi total dari biomass open burning adalah jumlah dari emisi biomass open burning di setiap tutupan lahan agrikultur.

Perbedaan kontribusi emisi di setiap tutupan lahan tergantung pada faktor emisi, faktor pembakaran, dan massa bahan bakar yang digunakan untuk perhitungan.

Terjadinya kebakaran pada suatu daerah sangat berkaitan erat dengan besarnya nilai estimasi emisi. Selain dari faktor-faktor lain seperti faktor emisi, faktor pembakaran, dan massa bahan bakar, pola dari luasan area terbakar merupakan faktor yang cukup kuat untuk melihat pola besar emisi yang dihasilkan. Table 1 menunjukkan jumlah keseluruhan emisi karbondiosida dari biomass open burning di Asia Tenggara.

Table 1. Jumlah keseluruhan tahunan emisi CO₂ (Tg) 2001-2007

| (Tg/bulan) | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Jan | 5.06121 | 8.14926 | 4.57703 | 46.3737 | 7.46351 | 3.57619 | 27.0639 |
| Feb | 21.6887 | 14.4057 | 4.7503 | 36.8959 | 58.0568 | 15.7015 | 22.4184 |
| Mar | 17.0211 | 10.6138 | 11.724 | 78.254 | 14.8939 | 13.6784 | 57.0321 |
| Apr | 6.22176 | 10.082 | 8.17581 | 1.79516 | 6.05342 | 3.46326 | 12.632 |
| May | 0.00292 | 0.06428 | 0.29352 | 0.84816 | 0.13338 | 0.12435 | 0.53929 |
| Jun | 0.01526 | 0.2653 | 1.01426 | 0.60169 | 0.09548 | 0.32623 | 0.34235 |
| Jul | 0.12878 | 0.46411 | 0.71122 | 5.11978 | 0.39807 | 1.30326 | 0.1394 |
| August | 13.5684 | 1.42223 | 0.89877 | 53.5057 | 0.51514 | 8.49709 | 2.01904 |
| Sep | 0.22887 | 2.54538 | 5.69048 | 3.1717 | 4.90064 | 20.925 | 1.73608 |
| Oct | 0.07249 | 7.97509 | 6.68933 | 13.5587 | 0.0512 | 33.9639 | 0.00625 |
| Nov | 0.05732 | 0.04246 | 0.27419 | 1.73189 | 0.04658 | 1.42275 | 0.17316 |
| Dec | 1.67728 | 0.06431 | 1.27913 | 29.8633 | 0.86803 | 3.89981 | 3.6131 |

3.2. AREA TERBAKAR DI INDONESIA

Perhitungan luasan area terbakar ditentukan dengan menggunakan data satelit MODIS burned area produk, MCD45A1. Produk MODIS burned area menyediakan data bulanan dengan kualitas gambar beresolusi medium. Hasil hasil perhitungan area terbakar didapatkan dari proses integrasi

antara pencitraan MODIS dan data SIG. Asia Tenggara memiliki wilayah agrikultur yang sangat luas. Akan tetapi, untuk mendapatkan data area agrikultur yang terbakar, masih dibutuhkan menghubungkan data area terbakar dengan data tutupan lahan.

Indonesia, negara archipelago terbesar di dunia, terletak di antara Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Bagian terbesar dari area daratan adalah berupa daerah pesisir; beberapa pulau yang lebih besar memiliki pegunungan. Negara ini memiliki potensi sumber daya yang cukup besar termasuk hutan dan lautan, tanah yang subur, dan sumber daya mineral yang cukup banyak. Agrikultur merupakan sumber komoditi ekspor utama yang menjadi penghasilan sebagian besar masyarakat Indonesia (FAO, 2008).

Data yang ditandai pada Tabel 2 menunjukkan area terbakar paling luas pada 1 tahun. Bulan Agustus merupakan puncak musim kebakaran lahan vegetasi di Indonesia. Musim kebakaran tersebut terjadi pada musim kemarau bulan Juni sampai September. Berdasarkan Tabel 2, musim hujan di Indonesia terjadi pada bulan Februari sampai Juni.

Table 2. Luas Area yang Terbakar di Indonesia (km²)

| Month | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
|-------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| 1 | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 2 | 0 | 0,25 |
| 2 | 0 | 1,25 | 0,25 | 0 | 3,5 | 0,25 | 1,5 |
| 3 | 0 | 0,75 | 7,25 | 1,5 | 4,25 | 1 | 0,75 |
| 4 | 1,5 | 1,25 | 25,75 | 5,5 | 9,5 | 0,5 | 8,5 |
| 5 | 14 | 64,75 | 77 | 51 | 125,25 | 15 | 55,5 |
| 6 | 0 | 320,25 | 249 | 177,25 | 175,75 | 98 | 150 |
| 7 | 64 | 400,25 | 363,75 | 365,5 | 228,75 | 601 | 159,75 |
| 8 | 544,25 | 1246 | 307 | 1110 | 281,75 | 1206 | 367,25 |
| 9 | 238,25 | 1343,75 | 205,75 | 416 | 236,25 | 1026,75 | 890,25 |
| 10 | 35 | 1614,75 | 89,75 | 401 | 44,25 | 775,5 | 137,5 |
| 11 | 0 | 10,75 | 5,75 | 32,5 | 0,75 | 175,75 | 3 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 5,25 | 0,25 |
| Total | 897 | 5004 | 1331,5 | 2567,5 | 1112 | 3905 | 1774,5 |

3.3. BIOMASS OPEN BURNING PADA LAHAN GAMBUT DI INDONESIA

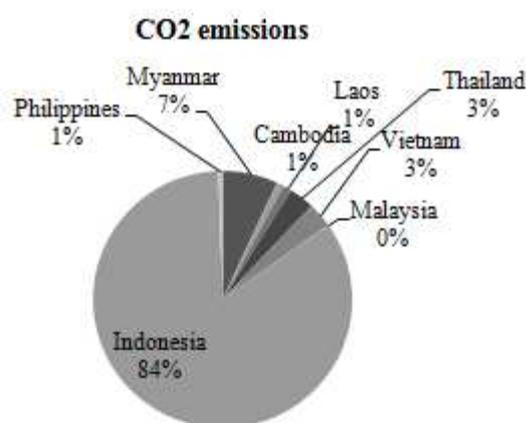
3.3.1. Pengetahuan

Kebakaran pada lahan gambut di Indonesia merupakan sumber utama dari emisi biomass open burning. Penelitian ini menganalisis seberapa besar pengaruh dari kebakaran pada lahan gambut di Indonesia terhadap emisi biomass open burning di Asia Tenggara. Kebakaran hutan di Indonesia

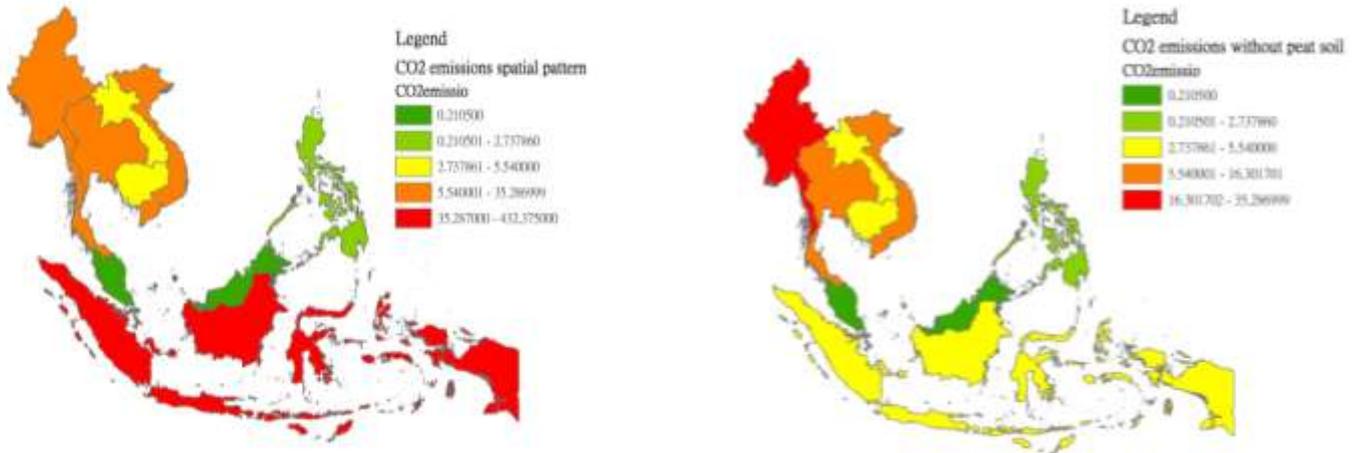
sudah menjadi perhatian masyarakat luas, aktivis, dan peneliti. Overlay antara peta klasifikasi jenis tanah dengan peta area terbakar digunakan untuk menghasilkan peta area open burning pada lahan gambut. Peta ini menunjukkan bahwa beberapa kejadian open burning di Indonesia terjadi di lahan gambut. Setelah perhitungan emisi, jumlah keseluruhan emisi biomass open burning di Indonesia meningkat secara signifikan.

Gambar 1 dan Gambar 2 menjelaskan bahwa kontribusi terbakarnya lahan gambut di Indonesia berpengaruh sangat signifikan, Indonesia menghasilkan emisi biomass open burning terbesar dibandingkan Negara-negara lain di Asia Tenggara. Oleh karena itu, Indonesia merupakan Negara ketiga terbesar penyumbang emisi gas rumah kaca di Indonesia.

Besarnya pengaruh emisi terbakarnya lahan gambut dapat dilihat dari pola besarnya emisi secara spasial pada Gambar 2. Gambar tersebut menggambarkan bahwa terbakarnya lahan gambut pada besarnya emisi biomass open burning memberikan dampak yang signifikan menyumbangkan emisi pencemaran udara ke atmosfer. Tanpa memperhitungkan terbakarnya lahan gambut, Indonesia menyumbang emisi biomass open burning ke empat terbesar se Asia Tenggara. Akan tetapi, dengan memperhitungkan emisi yang terjadi pada terbakarnya lahan gambut, Indonesia menyumbang sekitar 84% emisi karbondioksida. Hasil ini menunjukkan bahwa emisi yang dihasilkan dari terbakarnya lahan gambut berdampak sangat signifikan dalam menyumbang pencemaran udara ke atmosfer.



Gambar 1. Kontribusi emisi dari terbakarnya lahan gambut di Indonesia



Gambar 2. Perbandingan antara emisi CO₂ dengan dan tanpa memperhitungkan emisi dari terbakarnya lahan gambut

4. KESIMPULAN

1. Area yang terbakar:
 - a. Terdapat titik puncak dari besarnya emisi biomass open burning di Indonesia hasil perhitungan pada penelitian ini. Titik puncak tersebut terjadi pada bulan Agustus sampai Oktober
2. Kontribusi emisi dari terbakarnya lahan gambut:
 - a. Lahan gambut di negara-negara Asia Tenggara sebagian besar terdapat di Indonesia. Terbakarnya lahan gambut di Indonesia memberikan pengaruh sangat besar terhadap besarnya emisi biomass open burning di Asia Tenggara.
 - b. Emisi karbondioksida dari terbakarnya lahan gambut di Indonesia di perkirakan menyumbang sekitar 84% dari keseluruhan emisi biomass open burning di Asia Tenggara.
3. Data dari produk area terbakar yang didapatkan dari pencitraan satelit masih memiliki factor-factor ketidak tentuan karena kebakaran pada lahan agrikultur dengan ukuran yang kecil susah untuk ditangkap sensor satelit.
4. Emisi dari terbakarnya lahan gambut juga memiliki factor ketidak tentuan dan error pada factor emisi, factor pembakaran, dan massa beban bahan bakar karena data yang didapatkan peneliti belum diperbaharui.

DAFTAR PUSTAKA

- ADB. (2012). myanmar-in-transition.
- Chang, D., & Song, Y. (2009). *Estimates of biomass burning emissions in tropical Asia based on satellite-derived data*. Atmospheric Chemistry and Physics (ACP), 9.
- Crutzen, Paul J., & Andreae, Meinrat O. (1990). *Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles*. Science, 250.
- D.G. Streets, K.F. Yarber, J.-H. Woo, and G.R. Carmichael. (2003). *Biomass burning in Asia: annual and seasonal estimates and atmospheric emissions*.
- Duncan, Bryan N. (2003). *Interannual and seasonal variability of biomass burning emissions constrained by satellite observations*. Journal of Geophysical Research, 108(D2). doi: 10.1029/2002jd002378
- Estrellan, C. R., & Iino, F. (2010). *Toxic emissions from open burning*. Chemosphere, 80(3), 193-207. doi: 10.1016/j.chemosphere.2010.03.057
- FAO. (2008). *Selected Indicators of Food and Agricultural Development in the Asia-Pacific 1998-2008 Part I*.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). *Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices*. Remote Sensing of Environment, 83(1-2), 195-213. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- IPCC. (2006). IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. 4.
- IRRI. (2011). Annual report IRRI.
- Latif, Mohd Talib. (2011). *Composition of Levoglucosan and Surfactants in Atmospheric Aerosols from Biomass Burning*. Aerosol and Air Quality Research. doi: 10.4209/aaqr.2010.12.0103
- Levine, Joel S. (2000). *Global Biomass Burning: A Case Study of the Gaseous and Particulate Emissions Released to the Atmosphere During the 1997 Fires in Kalimantan and Sumatra, Indonesia*. In J. Innes, M. Beniston & M. Verstraete (Eds.), Biomass Burning and its Inter-Relationships with the Climate System (Vol. 3, pp. 15-31): Springer Netherlands.
- Miettinen, J. (2007). *Variability of fire-induced changes in MODIS surface reflectance by land-cover type in Borneo*. Int. J. Remote Sens., 28(22), 4967-4984. doi: 10.1080/01431160701268962
- Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D., Jaya, A., & Limin, S. (2002). *The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997*. Nature, 420(6911), 61-65. doi: 10.1038/nature01131