

CHAPTER 8

REFERENCES

- Andreae M.O., 1991. Biomass burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications* (J. S. Levine, Ed.). The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 3-21.
- Andreae, M. O. and Gelencsér A., 2006. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols. *Atmos. Chem. Phys. Discuss* 6, pp. 3419–3463.
- Andreae, M.O. and Merlet, P., 2001. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* 15, pp. 955-966.
- Barnard, G. and Kristoferson, L., 1985. *Agricultural residues as fuel in the third world*, Earthscan - The Beijer Institute, Energy Information Programme, Earthscan.
- Bond, T. C., D. G. Streets, K. F. Yarber, S. M. Nelson, J.-H. Woo, and Z. Klimont, 2004. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J. Geophys. Res.* 109, D14203, pp. 1-43.
- Bucini G., and Lambin, E.F., 2001. Fire impacts on vegetation in Central Africa: a remote-sensing-based statistical analysis. *Applied Geography* 22, pp. 27-48.
- Calle, F.R., Groot, P., Hemstock, S.L., Woods, J., 2007. *The Biomass Assessment Handbook: Bioenergy for a Sustainable Environment*. Earth Scan. 1st Ed., London, UK, 261 pages.
- Cheewaphongphan, P. and Garivait, S., 2010. Greenhouse Gases Emission from Rice Field Residues Open Burning. The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (CTC 2010)” 19-21 August 2010, Bangkok, Thailand.
- Chuvieco, E., Englefield, P., Trishchenko, A.P., Luo, Y., 2007. Generation of long time series of burn are maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. *Remote Sensing of Environment*, 112, pp.2381-2396.
- Conard, S.G., Sukhinin, A.I., Stocks, B.J., Cahoon, D. R., Davidenko, E.P., and Ivanova, G.A., 2002. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climatic Change* 55: 197-211.



- Cuiping, L., Changzhi, W., Yanyongjie, and Haitao, H., 2004. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass and Bioenergy*, 27, pp. 119-130.
- DEDE, 2009. The study and evaluation of biomass resource potential: final report. Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Thailand.
- DEDP, 1992. The study of behavior and patterns of energy use in plantation: summary report. Department of Energy Development and Promotion, Thailand.
- Dhammapala, R., Claiborna, C., Corkill, J., Gulett, B., 2006. Particulate emissions from wheat and Kentucky bluegrass stubble burning in eastern Washington and northern Idaho. *Atmospheric Environment* 40, pp. 1007-1015.
- Dinh, P.V., Serpolay, R. and Lacaux, J.P., 1996. Laboratory Investigations on Aerosols from the Combustion of Savanna Grass and Cereal Straw. Edited by Levine, J.S. 1996. Biomass Burning and Global Change Vol.1. The MIT Press, London, England.
- Energy for Environment Foundation, 2004, Biomass information. [online] Available from www.efe.or.th [2010, June 21].
- Energy for Environment Foundation, 2006. Biomass. Q Print Management Co. Ltd., Bangkok, Thailand.
- Eva H., and Lambin, E.F., 1998. Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions: Sampling Issues and Multisensor Approach. *Remote Sens. Environ.* 64: 292-315.
- Francisco, J.C., Ayala, J.H., Afonso, A.M., and González, V., 2005. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of agricultural and silvicultural debris. *Atmospheric Environment*, 39, pp. 6654-6663.
- Garivait, S., 2006. Emission Inventory Development for Open Burning in the Mekong Sub-Region. Better Air Quality Conference (BAQ 2006) 13-15 December 2006, Yogyakarta, Indonesia.
- Garivait, S., Chaiyo, U., Patumsawad, S., and Deakhuntod, J., 2006. Physical and Chemical Properties of Thai Biomass Fuels from Agricultural Residues. The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)" 1-23 November 2006, Bangkok, Thailand.
- Gelencsér A., 2004. Carbonaceous Aerosol, Springer, Dordrecht, Netherlands, 300 pages.
- Giglio, L., Loboda, T., Roy, D.P., Quayle, B., Justice, C.O., 2009. Remote Sensing of Environment. *Remote Sens. Environ.* 113: 408-420.

- Gulett, B.K. and Touati, A., 2003. PCDD/F emissions from burning wheat and rice field residue. *Atmospheric Environment* 37, pp. 4893-4899.
- Gulett, B.K. and Touati, A., 2003. PCDD/F emissions from forest fire simulations. *Atmospheric Environment* 37, pp. 803-813.
- Hansen, T., 2009. Measurement of Source Emissions, Personal Exposure and Ambient Concentrations. ASEAN-US Next-Generation Cook Stove Workshop, AIT, Bangkok (16-20 November 2009).
- Hao, W. M., and M. Liu, 1994. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning, *Global Biogeochem. Cycles*, 8, pp. 495– 503.
- Hays, M.D., P.M. Fine, C.D. Geron, M.J. Kleeman, B.K. Gullet, 2005. Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment* 39, pp. 6747-6764.
- Hays, M.D., Smith, N.D., Kinsey, J., Dong, Y., and Kariher, P., 2003. Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Size Distributions in Aerosols from Appliances of Residential Wood Combustion as Determined by Direct Thermal Desorption-GC/MS. *Aerosol Science*, 34, pp. 1061-1084.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other land Use.
- Jenkins B.M., Jones, A.D., Turn, S., and Williams, R.B., 1996. Emission Factors for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Biomass Burning. *Environ. Sci. Technol.* 30, pp. 2462-2469.
- Jenkins BM, 1996a. Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations. Final report (3 vols.), CARB Project A932-126. Sacramento, California: California Air Resources Board.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Mile Jr., T.R., Miles, T.R., 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54, pp. 17-46.
- Jenkins, B.M., Kennedy I.M., Turn S.Q., Williams R.B., Hall S.G., Teague S.V., Chang D. P. Y., and Raabe O.G., 1993. Wind tunnel modeling of atmospheric emissions from agricultural burning: influence of operating configuration of flame structure and particle emission factor for a spreading-type fire. *Environ. Sci. Technol.* 27 (9), pp. 1763-1775.

- Jorapur, R., and Rajvanshi, A.K., 1997. Sugarcane Leaf-Bagasse Gasifiers for Industrial Heating Applications. *Biomass and Bioenergy* 13 (3), pp. 141-146.
- Kadam, K.L., Forrest, L.H., and Jacobson, W.A., 2000. Rice Straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects. *Biomass and Bioenergy* 18, pp. 369-389.
- Kato, S. Akimoto, H., Röckmann, T., Bräunlich, M., and Brenninkmeijer, C.A.M., 1999. *Atmospheric Environment*, 33, pp. 4357-4362.
- Kingham S., Durand M., Aberkane T., Harrison J., Gaines J., and Epton M., 2006. Winter comparison of TEOM, MinoVol and DustTrak PM10 monitors in a woodsmoke environment. *Atmospheric Environment*, 40, pp. 338-347.
- Koopmans, A., and J. Koppejan, 1997. Agricultural and forest fires: Generation, utilization and availability, paper presented at Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy, Food and Agric. Org., Kuala Lumpur, Malaysia.
- Li, X., Wang, S., Duan, L., Hao, J., Li, C., Chen, Y., and Yang, L., 2007. Particulate and Trace Gas Emissions from Open Burning of Wheat Straw and Corn Stover in China. *Environ. Sci. Technol.* 41, pp. 6052-6058.
- Lobert, J.M., Scharle, D.H., Hao, W.M., Crutzen, P.J., 1990. Importance of biomass burning in the atmospheric budgets of nitrogen containing gases. *Nature* 346, 552-554.
- Lu, Y. ., 1993. Fueling One Billion: An Insider's Story of Chinese Energy Policy Development, Wash. Inst., Washington, D. C.
- McCarty, J.L., C.O. Justice, et al., 2007. Agricultural burning in the Southeastern United States by MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 108 (2): 151.
- Nguyen, B.C., Putaud, J.P., Mihalopoulos, N., and Bonsang, B., 2004. CH₄ and CO Emissions from Rice Straw Burning in South East Asia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 31, pp. 131-137.
- Novakov, T., 1984. The role of soot and primary oxidants in atmospheric chemistry, *Sci. Tot. Environ.*, 36, pp. 1-10.
- Office of Agricultural Economics, 2008. Agricultural Economic' Statistic Yearbook year 2008. [online] Available from: <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook51> [June 26, 2009].

- Office of the Cane and Sugar Board, 2008. Sugarcane Statistics year 2007/2008. [Online]
Available from:
http://oldweb.ocsb.go.th/uploads/contents/14/attachfiles/F6488_report5051.pdf [June 21, 2010].
- PCD, 2007. The study of follow and evaluate situation of agricultural open burning in Thailand: final report. Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand.
- Penner, J.E., Eddleman H., and Novakov T., 1993. Towards the development of a global inventory for black carbon emissions, *Atmos. Environ.*, 27A (8), pp. 1277-1295.
- Penwadee Cheewapongphan and Savitri Garivait, 2010. Greenhouse Gases Emission from Rice Field Residues Open Burning. Climate Thailand Conference 2010: The 1st National Carbon Neutral Conference. Nonthaburi, Thailand (in Thai).
- Pollution Control Department, 2007. Follow Up and Assess Situation of Agricultural Residues Open Burning in Thailand. Prepare by The Joint Graduate School of Energy and Environment, Bangkok, Thailand.
- Quest Technologies, NA. Indoor Air Quality Monitors. [online] Available from: <http://www.questtechnologies.com/QuestFiles/61/QuestIAQ.pdf> [June 26, 2009].
- Ram K. and Sarin, M.M., 2011. Day-night variability of EC, OC, WSOC and inorganic ions in urban environment of Indo-Gangetic Plain: Implications to secondary aerosol formation. *Atmospheric Environment* 45, pp. 460-468.
- Reid, J.S., Koppmann, R., Eck, R.F., and Eluterio, D.P., 2005. A review of biomass burning emissions part II: intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, pp. 799-825.
- Sahai, S., Sharma, C., Singh, D.P., Dixit, C.K., Singh, N., Sharma, P., Singh, K., Bhatt, S., Ghude, S., Gupta, V., Gupta, R.K., Tiwari, M.K., Garg, S.C., Mitra, A.P., and Gupta, P. K., 2007. A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in india. *Science Direct* 41, pp. 9173-9186.
- Shuichi, H., Shinji, W., and Kiyoshi, T., 2005. Comparison of Particulate Carbon Analysis between the Thermal Method and the Thermal/Optical Method Using the Same

- Ambient Samples. *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment* 40 (5), pp.181-192.
- Streets, D.G., K.F. Yarber, J.-H. Woo and G.R. Carmichael, 2003. Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (4), 20 p.
- Strehler, A., and W. Stutzle, 1987. Biomass residues, in Biomass, edited by D. O. Hall and R. P. Overend, John Wiley, New York, pp. 75– 102.
- Suwanwajokkasikit Field Corps Research Station, 2010. General Information of Suwanwajokkasikit Field Corps Research Station. [online] Available from http://www.iicrd.ku.ac.th/swrc/swrc_001.htm [2010, June 21].
- TSI Incorporated, 2008. NDIR CO₂ Sensing Technology. [online] Available from http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Application_Notes/AF-037%20NDIR%20Technology.pdf [2010, June 21].
- Turn, S.Q., Jenkins, B.M., Chow, J.C., Pitchett, L.C., Campbell, D., Cahill, T., Wahlen, S.A., 1997. Elemental characterization of particulate matter emitted from biomass burning: wind tunnel derived source profiles for herbaceous and wood fuels. *Journal of Geophysical Research* 102 (3), 3683–3699.
- USEPA, 2002. Emissions of Organic Air Toxics from Open Burning. EPA-600/R-02-076. Prepared by National Risk Management Research Laboratory.
- Venkatachari, P., Zhou, L., Hopke, P.K., Schwab, J.J., Demerjian, K.L., Weimer, S., Hogrefe, O., Felton, D., and Rattigan, O., 2006. An Intercomparison of Measurement Methods for Carbonaceous Aerosol in the Ambient Air in New York City. *Aerosol Science and Technology* 40, pp. 788–795.
- Vongmahadlek C., Thao, P.T.B., Satayopas, B., and Thongboonchoo, N., 2009. A Compilation and Development of Spatial and Temporal Profiles of High-Resolution Emissions Inventory over Thailand. *AWMA*, 59, pp. 845-856.
- Ward, D.E., Hao, W.M., Susott, R.A. and Babbitt, R.E., 1996 Effect of fuel composition on combustion efficiency and emission factors for African savanna ecosystems, *J. Geophys. Res.*, 101, D19, pp. 23569-23576.

- Watson, J.G., Chow, J.C., and Chen, L.W.A., 2005. Summary of Organic and Elemental Carbon/Black Carbon Analysis Methods and Intercomparisons. *Aerosol and Air Quality Research*, 5 (1), pp. 65-102.
- Xia, C., Huang, G., and Han, A., 2005. MODIS-Based Estimation of Biomass and Carbon Stock of Forest Ecosystems in Northeast China. *IEEE*, 0-7803-9050-4/05, pp. 3016-3019.
- Yevich, R. and J. A. Logan, 2002. An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world, *Global Biogeochem. Cycles*, 17, 1095, doi:10.1029/2002GB001952.
- Zárate I. O., Ezcurra A., Lacaux, J.P., and Dinh P.V., 2000. Emission factor estimates of cereal waste burning in Spain. *Atmospheric Environment* 34, pp. 3183-3193.
- Zhang J., Smite, K.R., Ma Y., Ye S., Jiang F., Qi W., Liu P., Khalil, M.A.K., Rasmussen, R.A., and Thorneloe, S.A., 2000. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. *Atmospheric Environment*, 34, pp. 4537-4549.

APPENDIX A
BACKGROUND

A.1 Summary of organic and elemental carbon thermal analysis protocols

Protocol	Carrier gas for OC	Carrier gas for EC	Temperature plateaus for OC (°C)	Residence time at each temperature for OC (S)	Temperature plateaus for EC (°C)	Residence time at each temperature for EC (S)	Optical charring correction	Converter and detector
IMPROVE ¹	He	98%He 2%O ₂	120, 250, 450, 550	150-580 ^a	550, 700, 800	150-580 ^a	Reflectance	Methanator; FID/CH ₄
TMO ²	He ^b	98%He 2%O ₂	525	300 ^c	750	180	N/A	Methanator; FID/CH ₄
OGI ³	He ^d	98%He 2%O ₂	600	Varies ^a	400, 500, 600	100, 120, >200	Reflectance	Methanator; FID/CH ₄
NIOSH ⁴ 5040	He	98%He 2%O ₂	250, 500, 650, 850	60, 60, 60, 90	650, 750, 850, 940	30, 30, 30, >120	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
STN ^{5*}	He	98%He 2%O ₂	310, 480, 615, 900	60, 60, 60, 90	600, 675, 750, 825, 920	45, 45, 45, 45, 120	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
KHGL ⁶ (Hong Kong)	He	95%He 5%O ₂	350, 550, 850	70, 70, 110	550, 600, 700, 750, 800, 850	10, 50, 40, 30, 30, 70	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
HKUST-3 ⁷ (Hong Kong)	He	99%He 1%O ₂	310, 450, 650, 850	150, 150, 150, 150	650, 750, 850, 890	150, 150, 150, 150	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
CalTech ⁸ (ACE-Asia)	He	90%He 10%O ₂	310, 450, 575, 870	60, 60, 60, 90	550, 625, 700, 775, 850, 900	45, 45, 45, 45, 45, 120	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
MSC1 ⁹	He	90%He 10%O ₂	250, 450, 550, 900	150, 150, 180, 90	550, 700, 800	240, 210, 150	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
RU/OGI ¹⁰ (Atlanta)	He	90%He 10%O ₂	Stepwise to 700 ^e	N/A	Stepwise to 850	N/A	Transmittance	Methanator; FID/CH ₄
LBL ¹¹	O ₂	O ₂	Continuous (25-825) ^f	10°C per minute	Continuous (25-825)	10°C per minute	Assume 10% OC is charred; EC decomposition rate ~0.22% / min during OC analysis	NDIR/CO ₂

Protocol	Carrier gas for OC	Carrier gas for EC	Temperature plateaus for OC (°C)	Residence time at each temperature for OC (S)	Temperature plateaus for EC (°C)	Residence time at each temperature for EC (S)	Optical charring correction	Converter and detector
CNRS-CEA ¹² (France 2-Step)	O ₂	O ₂	340	7200	1100	~600 ^a	N/A	Coulometric titration/CO ₂
U. Berne ¹³ (Switzerland 2-step)	O ₂	O ₂	650 ^c , 340 ^c	650, 2520	650	1,920	N/A	NDIR/CO ₂
BNL ¹⁴	O ₂	90%He, 10%O ₂	400	300 or 900	700	300 or 900 ^g	N/A	NDIR/CO ₂
GM ¹⁵ Research Laboratory	He ^h	Ambient air	650	~100 ^a	650	~120 ^a	N/A	NDIR/CO ₂
VDI ¹⁶ 2465/1 (Germany)	N/A ⁱ	O ₂	N/A	N/A	200, 650, 200	60, 420, 120	N/A	NDIR/CO ₂
VDI ¹⁷ 2465/2 (Germany)	He	80%He 20%O ₂	80, 350, 620, 400	12, 72, 108, 18	300, 700 ^j	30, 54	N/A	Coulometric titration/CO ₂
RCOP ¹⁸ (Japan)	N ₂	92%He 8%O ₂	450	600 ^k	850	300	N/A	Methanator; FID/CH ₄
R&P 5400 ¹⁹ (cont. analyzer)	Ambient air	Ambient air	340	~600 ^l	750	~600 ^l	N/A	Low-volume IR CO ₂ m
This study	99%He 1%O ₂	99%He 1%O ₂	650	1,200	900	1,200	N/A	TCD

Note

^a Advance from one temperature to the next when a well-defined carbon peak has evolved.

^b Sample is acidified with 30 µl of 0.02N hydrochloric acid (HCl) and preheated at 120 °C in contact with a bed of granulated manganese dioxide (MnO₂) in helium (He) for 180 s to remove volatile OC and carbonate. The sample remains in contact with MnO₂ throughout analysis.

^c Temperature change is accomplished by moving the sample from a lower-temperature oven to a higher-temperature oven.

^d Sample is preheated at 350°C in 98% He/2% oxygen (O₂) environment until all volatile OC is removed.

^e Cool to ~ 350 °C before the introduction of O₂ (Turpin et al., 1990).

^f The third of four carbon dioxide (CO₂) peaks evolving during thermal analysis is assigned to EC; this peak is usually accompanied by an increasing filter transmittance.

- ^g Residence times for loadings $< 50 \mu\text{gC}$ and $> 50 \mu\text{gC per cm}^2$ are 300 s and 900 s each, respectively, for both 400 °C and 700 °C temperature stages.
- ^h Sample is preheated at 350 °C in ambient air for ~ 450 s to remove volatile OC.
- ⁱ OC on half a filter is extracted with 10 ml of a 50:50 volume %–mixture of toluene and 2-propanol for 24 hr, and the half filter is dried in pure nitrogen (N_2) before thermal analysis. OC is estimated from the difference between TC and EC acquired from two separated filter halves.
- ^j The sample is cooled to 80 °C from 700 °C. Carbon evolved during cooling is also counted as EC.
- ^k Temperature changes are accomplished by moving the sample through an increasing temperature gradient in the oven.
- ^l The overall analysis time is adjustable but should not be > 30 min.

Sources

- ¹ Interagency Monitoring of Protected Visual Environments, Chow et al., 1993, 2001, 2004
- ² Thermal Magnesium Dioxide, Fung, 1990; Fung et al., 2002
- ³ Oregon Graduate Institute, Huntzicker et al., 1982
- ⁴ National Institute of Occupational Safety and Health, Birch, 1998; Birch and Cary, 1996a, 1996b; NIOSH 1996, 1999
- ⁵ Speciation Trends Network, Peterson and Richards, 2002
- ⁶ Hong Kong Governmental Laboratory, Sin et al., 2002; Chow et al., 2005b
- ⁷ Hong Kong University of Science and Technology, Yang and Yu, 2002; Yu et al., 2002
- ⁸ California Institute of Technology, Mader et al., 2001
- ⁹ Meteorological Service of Canada, Version I, Sharma et al., 2002
- ¹⁰ Rutgers University/Oregon Graduate Institute, Lim et al., 2003
- ¹¹ Lawrence Berkeley Laboratory, Novakov, 1982; Ellis et al., 1984; Kirchstetter et al., 2001
- ¹² Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Cachier et al., 1989a, 1989b
- ¹³ University of Berne, Switzerland, Lavanchy et al., 1999
- ¹⁴ Brookhaven National Laboratory, Tanner, 1982; Gaffney et al., 1984
- ¹⁵ General Motors Research Laboratory, Cadle et al., 1980, 1983
- ¹⁶ VDI, 1996
- ¹⁷ VDI, 1999
- ¹⁸ Radiation Center of Osaka Prefecture, Mizohata and Ito, 1985
- ¹⁹ Rupprecht and Patashnick, Rupprecht et al., 1995
(Watson et al., 2005)

Table A.2 Global BC and OC emission from fossil and biomass burning

Based Year	Fossil fuel (Tg/y)		Biofuel/ Biomass (Tg/y)		Total (Tg/y)		References
	BC	OC	BC	OC	BC	OC	
-	1.3– 8.3	–	1.3– 14	–	2.6– 22	–	Turco et al., 1983
1980 ^a	6.6	–	6.0	–	13	–	Penner et al., 1993
1984	8	–	6	–	14	–	Cooke and Wilson, 1996
-	6.6 ^b	28	5.6	45	12	73	Lioussé et al., 1996
1984	5.1	10	–	–	–	–	Cooke et al., 1999 (<1 µm)
1984	6.4	7	–	–	–	–	Cooke et al., 1999 (all sizes)
-	–	–	4.8	36	–	–	Andreae and Merlet, 2001
1996	3	2.4	5	31	8	33	Bond et al., 2004

^aOther years appear to be included for some locations and fuels

^bFrom Penner et al. 1993. (Bond et al., 2004)

From Table A.2, most estimation of BC emissions is 5-6 Tg/y, which is quite consistent when compared with OC emission estimation that contained high uncertainties among studies. Possibility of this variation could be determined technique or volatile properties of OC. However, OC is mainly released from biofuel/biomass burning. While BC released from fossil fuel and biofuel/biomass are in the same range.



Table A.3 Residue to product ratio of rice

Crop	Residues	RPR	Country	Sources
Rice	Straw (*) ⁵	1.875	India	Vimal, 1979
	Straw (*) ⁵	2.600-3.960		Webb, 1979
	Straw ⁵	0.420	Thailand	AIT-EEC, 1983
	Straw (*) ⁵	2.858	Bangladesh	BEPP, 1985
	Straw (*) ⁵	1.400-2.900		Barnard et al., 1985
	Straw (top) ²	0.100	Philippines	Department of Energy, 1987
	Straw (*) ⁵	1.400		Strehler, 1987
	Straw (top) ¹	0.447	Thailand	Bhattachaya et al., 1989
	Straw (*) ⁴	1.757	Thailand	Bhattacharya & Ram, 1990
	Straw (top) ⁵	0.452	Thailand	Bhattacharya & Ram, 1990
	Straw (*) ⁵	1.100-3.000		Massaquoi, 1990
	Straw ⁴	0.452-3.000	Thailand	Koopmans&Koppejan, 1998, Bhattacharya & Ram, 1990
	Straw (*) ⁵	1.400		Ishaque, 1991
	Straw (*) ⁵	1.100-2.900		Kristoferson et al., 1991
	Straw (*) ⁵	1.757	Thailand	Koopmans and Koppejan, 1997
	Straw ⁷	0.447	Thailand	DEDE, 1997
	Straw (*) ⁶	1.760	Srilanka	Perera et al., 2005
	Straw ⁸	0.490	Thailand	DEDE, 2006
	Not specific ³	0.623	China	CADS, 2000
	Not specific	0.568	Asia	Streets et al., 2003
	Straw and stubble	0.750	Thailand	PCD, 2007
	straw	1.190	Thailand	DEDE, 2009

Note: (*top*) means the practice of harvesting rice in parts of Thailand and other Southeast Asian countries, where only the top portion of the rice stem along with 3-5 leaves is cut, leaving the remainder in the field.

(*) means the practice of harvesting rice in parts of Indian and Bangladesh, where the rice is cut at about 2 inches above ground

Harvesting practice is a main influence on RPR value. Low RPR value is found in harvesting by cut at top level which can be found in Philippines and some region of Thailand that harvest manually. High RPR value due to harvesting rice about 2 inches above ground is found in India and Bangladesh. From this study, harvesting rice in Thailand is done by machine cut at 15-35 cm above ground.

Table A.4 Residue to product ratio of corn

Crop	Residues	RPR	Country	Sources
Corn	Cob ⁵	0.30		Bhushan, 1977
	Cob ⁵	0.86		Webb, 1979
	Cob ⁵	0.30	India	Vimal, 1979
	Cob ⁵	0.20	Thailand	AIT-EEC, 1983
	Cob ⁵	0.20-0.50		Barnard et al., 1985
	Cob ⁵	0.20-0.50		Massaquoi, 1990
	Cob ⁵	0.70-1.80		Ryan et al., 1991
	Cob ⁵	0.273	Thailand	Bhattacharya et al., 1993
	Cob ¹	0.250	Thailand	Black&Veatch, 1999
	Cob ⁶	0.27	Srilanka	Perera et al., 2005
	Cob	0.20	Thailand	PCD, 2007
	Not specific	0.5	Asia	Streets et al., 2003
	Stalk ⁵	3.20-4.33		Webb, 1979
	Stalk ⁵	2.0	India	Vimal, 1979
	Stalk ⁵	2.3	Thailand	AIT-EEC, 1983
	Stalk ⁵	2.0-2.3		Barnard et al., 1985
	Stalk ⁵	1.00		Strehler, 1987
	Stalk ⁵	2.08		Desai, 1990
	Stalk ⁵	1.0-2.5		Massaquoi, 1990
	Stalk ⁵	1.0-2.5		Ryan et al., 1991
	Stalk ⁶	2.0	Srilanka	Perera et al., 2005
	Leaves and stem	0.89	Thailand	PCD, 2007
	Leaves, stem, and top	0.892	Thailand	DEDE, 2009

Corn cob is not included in agricultural residues open burning in the field because it is sold with product to the animal industry. Traditional burning of corn in the field burns leaves, stem, and envelope that remain in the field after harvesting.

Table A.5 Residue to product ratio of sugarcane

Crop	Residues	RPR	Country	Sources
Sugar cane	Bagasse ²	0.33	Philippines	Department of Energy, 1987
	Bagasse ¹	0.250	Thailand	Bhattachaya et al., 1989
	Bagasse ⁴	0.14-0.33	Thailand	Koopmans & Koppejan, 1998, Bhattacharya & Ram, 1990
	Bagasse ⁷	0.25	Thailand	DEDE 1997
	Bagasse ⁴	0.29	Thailand	FAO, 2000
	Bagasse ⁶	0.29	Srilanka	Perera et al., 2005
	Bagasse ⁸	0.28	Thailand	DEDE, 2006
	Bagasse	0.29	Thailand	PCD, 2007
	Top&leaves ⁴	0.1-0.3	Thailand	Koopmans & Koppejan, 1998, USAID, 1991, TASL, 2000
	Top&trash ¹	0.302	Thailand	DEDP, 1992
	Top&Trashier ⁷	0.302	Thailand	DEDE, 1997
	Top&leaves ⁴	0.265	Thailand	FAO, 2000
	Top ⁶	0.30	Srilanka	Perera et al., 2005
	Top&leaves ⁸	0.17	Thailand	DEDE, 2006
	Not specific ³	0.25	China	CADS, 2000
	Not specific	3.33	Asia	Streets et al., 2003
	Top&leaves	0.23	Thailand	PCD, 2007
	Top&leaves	0.204	Thailand	DEDE, 2009

¹Sajjakulnukit et al., 2005, ²Elauria et al., 2005, ³Junfeng et al., 2005, ⁴FAO, 2000, ⁵Koopmans and Koppejan, 1997, ⁶Perera, 2005 ⁷ Prasertsan and Sajjakulnukit, 2006 ⁸ Energy for Environment Foundation, 2006. CADs=Chinese Agriculture Development Strategy in the

beginning of 21st Century; DEDE=Department of Alternative Energy Development and Efficiency; FAO=Food and Agriculture Organization of the United Nations; USAID=United States Agency for International Development.

Table A.6 Amount of biomass burning in Far East, Middle East, and Near East countries

Region/Major contributors	Residue Available (Tg DM)	Biofuels (%)	Burn in Fields (%)	Total Burned (Tg)	Total Burned (%)
FAR EAST	364	16	43	216	59
Indonesia	88	14	73	76	86
Thailand	57	14	53	38	67
Bangladesh	41	60	11	16	41
Vietnam	29	43	43	25	86
Philippines	30	14	65	23	80
Myanmar	29	13	49	18	62
MIDDLE EAST	117	21	21	49	42
Afghanistan	7	54	16	5	70
Pakistan	51	15	19	16	34
Turkey	43	28	30	25	58
NEAR EAST	11	0	18	2	18
Total	492	17	38	271	55
China	632	47	1	300	47
India	347	25	23	168	48
Total Asia	1,471	32	19	739	50

(Yevich and Logan, 2002)

From Table A.6, Thailand is classified as a country in Far East (Bangladesh, Myanmar, Indonesia, Philippines, Thailand, and Vietnam). Crop residues available in Thailand are 57 Tg dm, which is used for biofuel 14%, burn in the field 53% (16 Tg).

Table A.7 Rice: Harvested area, production and yield of major countries, 2005-2007

Country	Harvested area (1,000 ha)			Production (1,000 ton)			Yield(kg/ha)		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
World Total	154,701	156,394	156,997	631,869	644,490	654,413	4,088	4,119	4,169
China	29,116	29,463	29,230	182,059	184,128	185,490	6,250	6,250	6,344
India	43,660	43,617	44,000	137,690	139,137	141,134	3,156	3,188	3,206
Indonesia	11,839	11,786	12,166	54,151	54,455	57,049	4,575	4,619	4,688
Bangladesh	10,524	11,200	11,200	39,796	43,504	43,504	3,781	3,881	3,881
Viet Nam	7,329	7,324	7,305	35,791	35,827	35,567	4,881	4,894	4,869
Myanmar	7,008	8,140	8,200	25,364	30,600	32,610	3,619	3,756	3,975
Thailand	10,225	10,165	10,669	30,292	29,642	32,099	2,963	2,919	3,006
Philippines	4,070	4,160	4,250	14,603	15,327	16,000	3,588	3,688	3,763
Brazil	3,916	2,971	2,901	13,193	11,527	11,080	3,369	3,881	3,819
Japan	1,706	1,688	1,678	11,342	10,695	10,970	6,650	6,338	6,538
Others	25,307	25,879	25,398	87,588	89,648	88,910	3,463	3,463	3,500

(OAE, 2008)



Table A.8 Corn: Harvested area, production and yield of major countries, 2005-2007

Country	Harvested area (1,000 ha)			Production (1,000 ton)			Yield (kg/ha)		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
World Total	147,759	146,750	157,836	715,814	699,262	784,689	4,844	4,763	4,969
U.S.A.	30,399	28,591	35,022	282,311	267,598	332,092	9,288	9,363	9,481
China	26,379	27,050	28,050	139,498	145,610	151,830	5,288	5,381	5,413
Brazil	11,549	12,613	13,828	35,113	42,662	51,590	3,038	3,381	3,731
Mexico	6,606	7,295	7,800	19,339	21,893	22,500	2,925	3,000	2,888
Argentina	2,783	2,447	2,838	20,483	14,446	21,755	7,356	5,900	7,663
India	7,588	7,856	7,770	14,710	14,979	16,780	1,938	1,906	2,163
France	1,658	1,503	1,481	13,688	12,902	13,107	8,256	8,588	8,850
Indonesia	3,626	3,346	3,451	12,524	11,611	12,382	3,456	3,469	3,588
Canada	1,085	1,061	1,361	9,332	8,990	10,555	8,606	8,475	7,756
Italy	1,113	1,108	1,082	10,428	9,671	9,891	9,369	8,731	9,144
Thailand	1,030	939	928	3,943	3,716	3,661	3,831	3,956	3,950
Others	53,942	52,941	54,226	154,445	145,184	138,546	2,863	2,744	2,556

(OAE, 2008)

Table A.9 Sugarcane: Harvested area, production and yield of major countries, 2005-2007

Country	Harvested area (1,000 ha)			Production (1,000 ton)			Yield (kg/ha)		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
World Total	20,017	20,451	21,966	1,316,747	1,388,675	1,237,032	65,781	67,900	56,313
Brazil	5,805	6,144	6,712	422,957	457,246	514,080	72,856	74,419	76,594
China	1,365	1,215	1,225	87,513	100,435	105,651	64,113	82,638	86,250
Thailand	1,067	965	1,010	49,586	47,658	64,365	46,463	49,369	63,713
Pakistan	966	907	1,029	44,666	44,666	54,752	46,219	49,225	53,213
Mexico	670	680	680	51,646	50,676	50,680	77,113	74,525	74,531
Colombia	426	420	450	39,849	39,000	40,000	93,594	92,856	88,875
Australia	434	415	420	37,822	38,169	36,000	87,163	91,963	85,713
India	3,661	4,201	4,900	237,088	281,172	35,552	64,750	66,925	7,256
U.S.A.	373	368	358	24,137	27,033	27,751	64,688	73,494	77,606
Philippines	369	392	400	31,400	24,345	25,300	85,106	62,056	63,250
Others	4,880	4,743	4,783	290,083	278,275	282,901	59,444	58,675	59,150

(OAE, 2008)

APPENDIX B
BIOMASS QUANTIFICATION

Table B.1 General information of cultivated activity at studied sites

Crop	Date	Province	Water resource	Type	Period (days)	Fertilizer	Harvest	Product (kg/ha)
Rice	25/12/07	Samutsakhon	Irrigation	Kanchan	80	Chemical	Machine	2,381
	30/06/08	Samutsakhon	Irrigation	Number 17	105	Organic	Machine	2,950
	18/11/08	Samutsakhon	Irrigation	Rashinee	80	Chemical	Machine	3,269
	11/12/08	Ratchaburi	Rain	Lueang Chum Pon	180	Organic	Manual	3,750
	14/12/08	Nakhonsawan, Thatako	Rain	Khao-Dok-Mali-105	180	Chemical	Machine	3,125
	26/12/08	Phetchaburi	Irrigation	Lueang-Pa-Tew	140	Organic	Machine	4,019
	15/09/09	Samutsakhon	Irrigation	Pitsanulok	130	Chemical	Machine	4,125
	20/09/09	Nakhonsawan, Muang	Rain	Khao-Dok-Mali-105	180	Chemical	Machine	4,169
	29/12/09	Nakhonsawan, Thatako	Rain	C85	180	Chemical	Machine	3,125
Corn	01/11/08	Nakhonsawan, Takfa	Rain	919 Cargin	120	Chemical	Manual	6,820
	29/11/09	Korat, Raisuwan	Rain	-	-	Chemical	Manual	-
	17/01/10	Korat, Pakchong	Rain	919	120	Chemical	Manual	5,555
Sugarcane	03/02/08	Kanchanaburi	Rain	K88-92	1 year	Chemical	Manual	39,840
	29/02/08	Chonburi, Banbueng	Rain	K95-84	1 year	Chemical	Manual	41,610
	22/01/09	Chonburi, Nhongyai	Rain	K95-84	1 year	Chemical	Manual	35,600
	23/01/09	Chonburi, Banbueng	Rain	K88-92	1 year	Chemical	Manual	27,500

Table B.2 Summary of Field Experiments for biomass collection

No.	Date	Province	Biomass	Biomass collection	
				Before harvest	After harvest
1	12/12/07	Ratchaburi	Rice	✓	-
2	25/12/07	Samutsakhon	Rice	✓	✓
3	03/02/08	Kanchanaburi	Sugarcane	✓	-
4	29/02/08	Chonburi, Banbueng	Sugarcane	✓	-
5	30/06/08	Samutsakhon	Rice	✓	✓
6	01/11/08	Nakhonsawan, Takfa	Corn	-	✓
7	18/11/08	Samutsakhon	Rice	✓	✓
8	14/12/08	Nakhonsawan, Thatako	Rice	✓	✓
9	26/12/08	Phetchaburi	Rice	✓	-
10	22/01/09	Chonburi, Nhongyai	Sugarcane	✓	-
11	23/01/09	Chonburi, Banbueng	Sugarcane	✓	-
12	15/09/09	Samutsakhon	Rice	✓	✓
13	20/09/09	Nakhonsawan, Muang	Rice	-	✓
14	29/11/09	Korat, Raisuwan	Corn	-	✓
15	29/12/09	Nakhonsawan, Thatako	Rice	-	✓
16	17/01/10	Korat, Pakchong	Corn	✓	✓

Table B.3 Results of field experiment to consider rice residues in paddy field

No.	Date of experiment	BL straw (g/m ²)	Stubble (g/m ²)	Stubble height (cm)	RPR straw
Samutsakhon					
1	25/12/2007	382±184	186±58	28±5	1.61±0.77
2	30/06/2008	296±88	237±33	24±2	1.00±0.30
3	18/11/2008	386±137	177±30	23±3	0.46±0.16
4	15/09/2009	384±115	220±52	31±4	0.35±0.09
	Average	360±140	220±53	27±4	0.85±0.64
Nakhonsawan					
1	14/12/08	410±255	172±82	-	0.43±0.27
2	20/09/09	732±397	546±126	38±13	0.69±0.37
3	29/12/09	437±166	244±63	21±7	0.55±0.21
	Average	507±305	300±176	27±13	0.54±0.30

No.	Date of experiment	BL straw (g/m ²)	Stubble (g/m ²)	Stubble height (cm)	RPR straw
Phetchaburi					
1	26/12/2008	604±28	250±27	26±1	0.59±0.03
Ratchaburi					
1	11/12/08	258±111	-	25 (assume)	0.69±0.30

Table B.4 Results of field experiment to consider corn residues in corn field

No.	Date of experiment	BL corn residues (g/m ²)	Corn height (cm)	RPR corn
Nakhonsawan				
1	01/11/2008	520±66	-	0.76
Pakchong, Nakhonratchasima				
1	17/01/2010	651±211	197±8	1.17
Suwan Farm, Nakhonratchasima				
1	28/11/2009	660±94	175±18	-

Table B.5 Results of field experiment to consider sugarcane residues at sugarcane field

No.	Date of experiment	BL sugar leaves (g/m ²)	Top (g/m ²)	Sugar height (cm)	RPR sugar leaves
Danmakhamtia, Kanchanaburi					
1	03/02/2008	1,240±260	1,220±120	311±9	0.31
Chonburi					
1	29/02/2008	870±150	580±10	-	0.21
2	22/01/2009	1,220±130	650±130	322±40	0.25
3	23/01/2009	690±150	350±50	220±39	0.25
	Average	928±262	524±153	296±59	0.24±0.02

Table B.6 Proximate analysis results (dry basis)

Biomass	%fixed carbon	%volatile matter	%ash
Rice straw Samutsakhon	10.79±1.01	73.39±1.99	15.82±1.61
Rice straw Ratchaburi	11.47±1.0	69.35±2.99	19.18±3.94
Stubble Samutsakhon	11.3±1.16	72.62±1.07	16.08±0.08
sugarcane leaf Kanchanaburi	9.65	66.88	23.46
sugarcane leaf Chonburi	10.64	73.11	16.25
Ash Samutsakhon	11.85±4.07	17.41±0	70.74±4.07
Sugarcane leaves	14.9	77.4	7.7
Sugarcane bagasse ¹	20.1	75.8	4.2

Note ¹Jorapur and Rajvanshi, 1997

Table B.7 Compare proximate analysis result of rice with literature review

Sample	Sources	Moisture, %	Volatile matter, %	Ash, %	Fixed C, %
Rice straw	This study	4.71±0.82	69.90±1.56	15.06±1.58	10.33±0.98
Rice straw	EFE, 2006	10	60.70	18.90	10.39
Rice straw	Gulett and Touati, 2003	8.56	60.95	14.97	15.52
Rice straw	Garivait et al., 2006	6.71	58.64	23.55	11.09
Rice straw	EFE, 2004	2.68	65.64	11.24	20.44
Rice straw	Cuiping et al., 2004	8.11	61.10	15.25	15.54

Table B.8 Ultimate analysis results of aerosols

Parameter	Ultimate results		
	%N	%C	%H
Rice TC	16.13±14.58	72.02±39.29	6.91±4.82
Rice OC	NA	57.90±18.39	5.79±0.89
Corn TC	3.65±4.49	79.32±13.61	3.42±3.17
Sugar TC	4.19±2.18	78.85±28.65	5.69±1.95

Note: NA means the results are minus values

Table B.9 Results of TC, BC, and OC in rice straw, corn residues, and sugarcane leaves

	%TC	%OC	%BC
Rice straw	78.08±19.39	68.62±17.04	9.46±2.07
Corn residues	79.32±13.61	69.71±11.96	9.61±1.45
Sugarcane leaves	78.85±28.65	69.29±25.18	9.56±3.05

Table B.10 Compare proximate analysis result of sugarcane with literature review

Sample	Location	Moisture, %	Volatile matter, %	Ash, %	Fixed C, %	Source
Sugarcane leaves	Kanchanaburi, West of Thailand	4.75	63.7	22.35	9.2	This study
Sugarcane leaves	Chonburi, East of Thailand	3.87	70.28	15.63	10.23	This study
Sugarcane cane leaves	Northeast of Thailand	7.94	71.24	7.69	13.14	Garivait et al., 2006

From Table B.10, results of proximate analysis are in the same magnitude between Kanchanaburi (West region) and Chonburi (East region), and also in the same range as sugarcane cane leaves in northeastern region of Thailand from literature review (Garivait et al., 2006).

Table B.11 Combustion efficiency of rice from open burning in the field

Source of biomass	Experiment	CE Rice (%)	CE straw (%)	CE stubble (%)
Samutsakhon	27/12/2007	76	100	87
Samutsakhon	07/07/2008	67	100	18
Samutsakhon	20/11/2008	84	100	39
Samutsakhon	17/09/2009	70	100	64
Samutsakhon	Irrigated Field	74±7	100	52±26
Nakhonsawan	20/09/2009	49	100	7
Nakhonsawan	29/12/2009	94	100	77
Nakhonsawan	Rainfed Field	72±23	100	42±35

Table B.12 Combustion efficiency of corn from open burning in the field

Source of biomass	Experiment	CE Corn (%)
Nakhonsawan	Rainfed Field	45±11
Nakhonratchasima	Rainfed Field	88

Table B.13 Combustion efficiency of rice and corn from open burning in the field

	CE rice (%)	CE corn (%)
Irrigated area	74±7	-
Rainfed area	72±23	67±22
Total area	73±14	67±22

Table B.14 Carbon balance of agricultural residues open burning (%)

	%C release	%C unburn	%C ash
Rice	94.04±0.75	0.00±0.00	5.96±0.75
Corn	94.39±3.54	2.47±0.81	3.14±1.07
Sugarcane	98.77±0.01	0.00±0.00	1.23±0.01

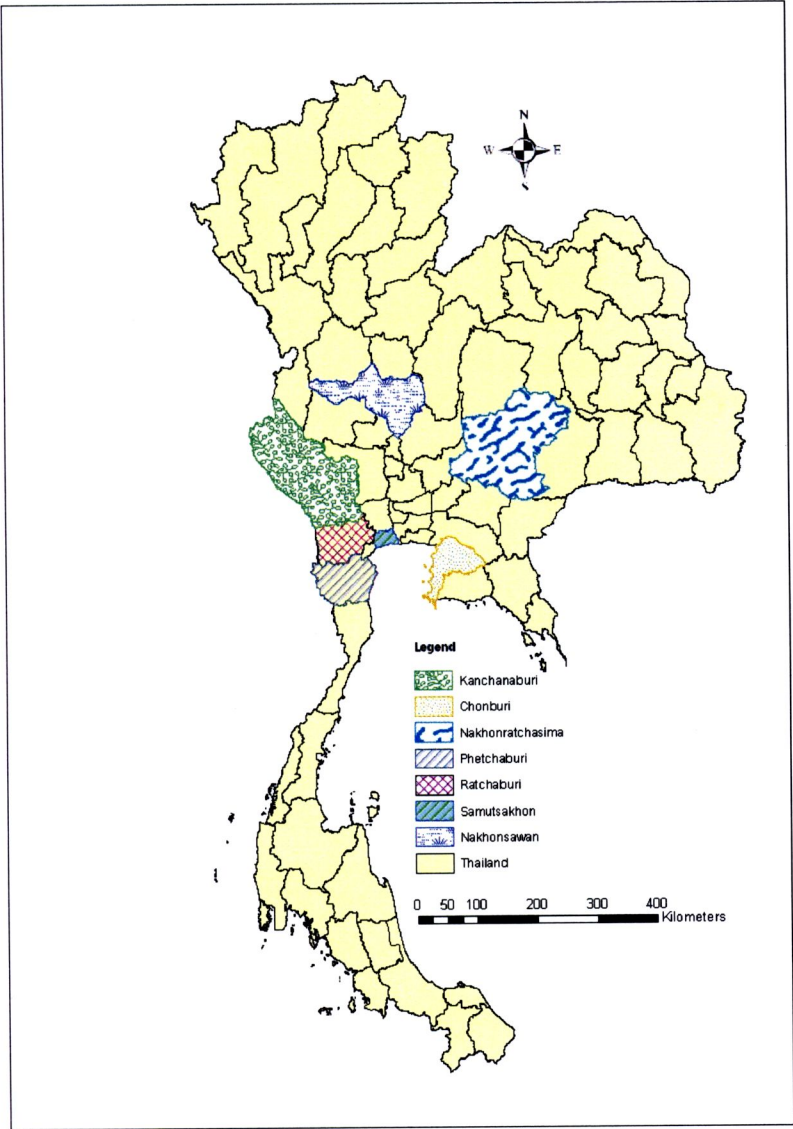


Figure B.1 Location of the studied site on Thailand map.

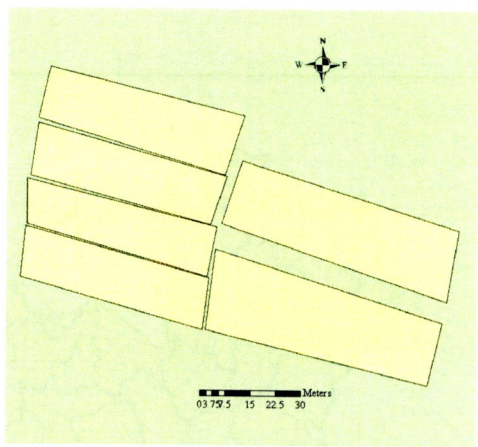


Figure B.2 Crop plot of paddy field in Samutsakhon.

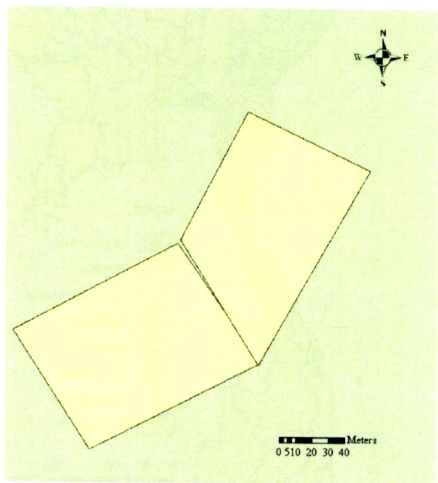


Figure B.3 Crop plot of paddy field in Nakhonsawan (14/12/08).

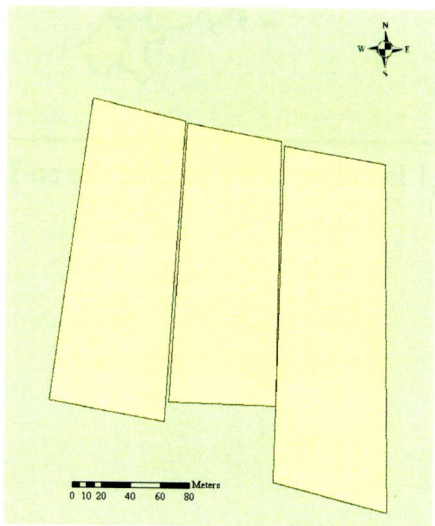


Figure B.4 Crop plot of paddy field in Nakhonsawan (29/12/09).

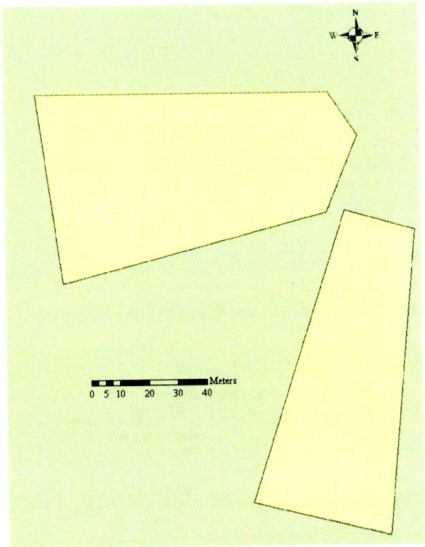


Figure B.5 Crop plot of paddy field in Nakhonsawan (20/09/09).

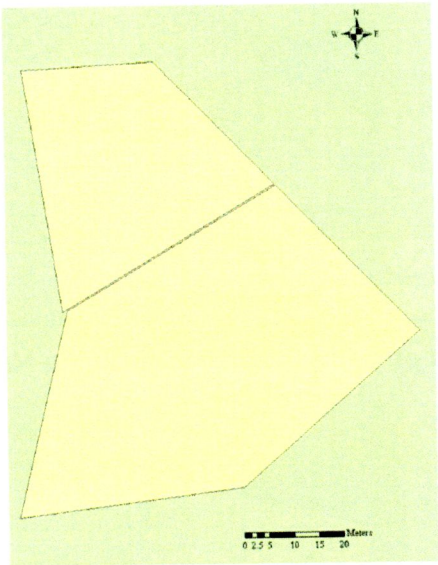


Figure B.6 Crop plot of paddy field in Phetchaburi (26/12/2008).

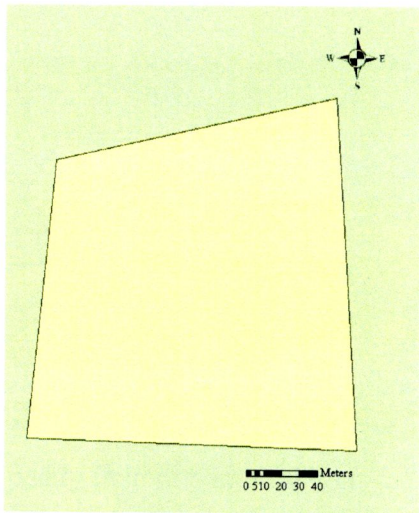


Figure B.7 Crop plot of maize field at Pakchong, Nakhonratchasima (17/01/10).

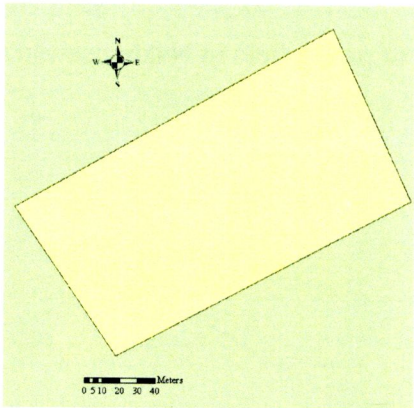


Figure B.8 Crop plot of maize field at Suwan Farm, Nakhonratchasima (28/11/09).

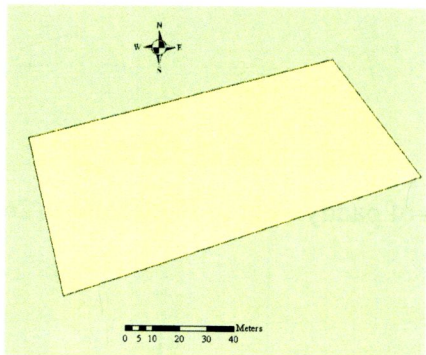


Figure B.9 Crop plot of sugarcane field in Kanchanaburi (03/02/08).

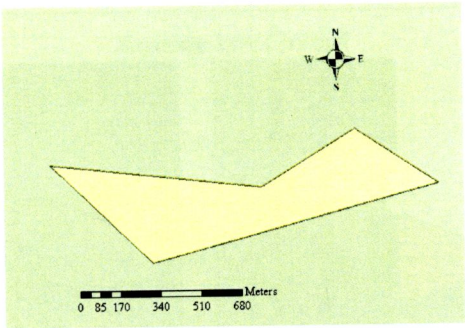


Figure B.10 Crop plot of sugarcane field in Amphoe Banbueng, Chonburi (29/02/08).

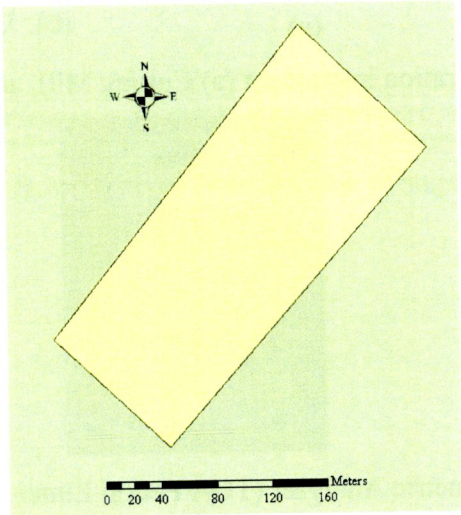


Figure B.11 Crop plot of sugarcane field in Amphoe Nhongyai, Chonburi (22/01/09).

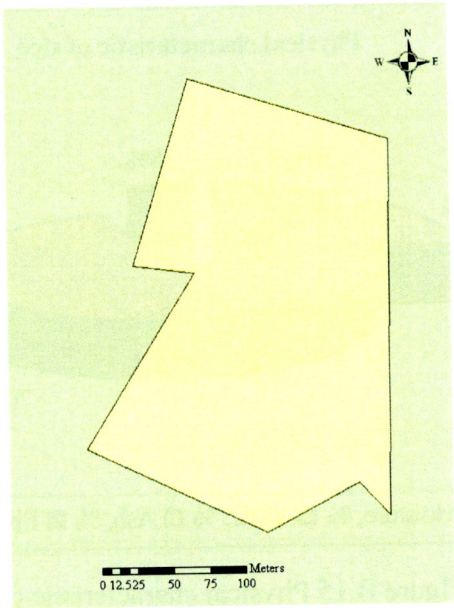


Figure B.12 Crop plot of sugarcane field in Amphoe Banbueng, Chonburi (23/01/09).



(a)



(b)

Figure B.13 Sample preparation instrument (a) Cutting Mill, and (b) Ball Mill.



Figure B.14 Thermogravimetric Analyzer (TGA Perkin Elmer, model Pyris 1, USA).

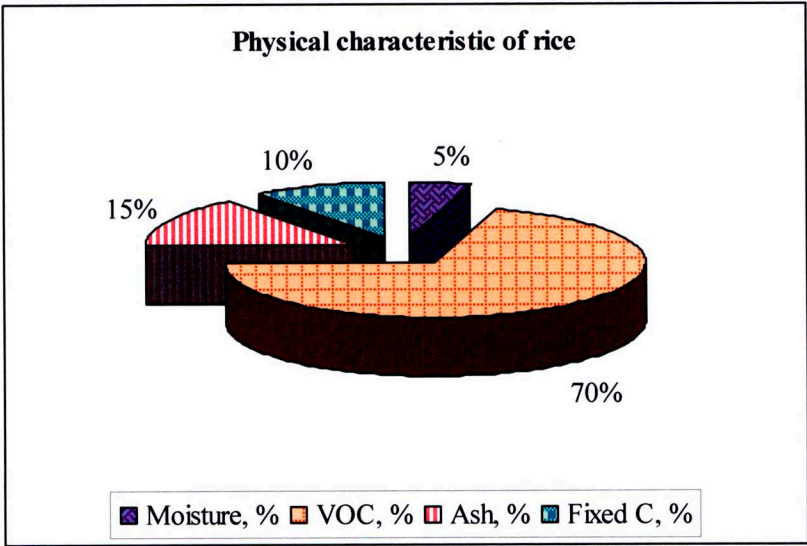


Figure B.15 Physical characteristic of rice.

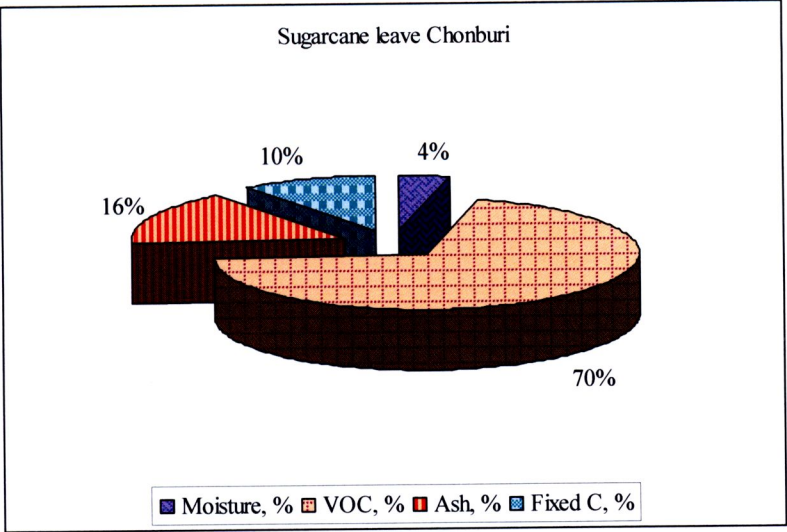


Figure B.16 Physical characteristic of sugarcane.



APPENDIX C
EMISSION FACTOR

Table C.1 Data for estimating emission from agricultural residues open burning

Source categories	Data for burned area (A)
Remote sensing	MODIS Fire hot spot (GIC-AIT, 2005-2009), Land use (LDD, 2007), Political map (LDD, 2002)
Field experiment	Field survey (2007-2010)
Statistical data	Harvested area rice and corn (OAE, 2008), %burn of rice (PCD, 2007; Penwadee, 2010), %burn of corn (PCD, 2007), %burn and cultivated area for sugar factory (OCSB, 2008),
Data for biomass load (BL)	
Field experiment	Field experiment in rice, corn, and sugarcane field (2007-2010)
Laboratory experiment	Moisture analysis
Data for fraction burn (FB)	
Field experiment	Field survey in rice, corn, and sugarcane field (2007-2010)
Data for combustion efficiency (CE)	
Field experiment	Open burning in the field (2007-2010): experiment in 1m×1m area and traditional burn (whole plot)
Chamber experiment	Open burning in the chamber (2009-2010)
Laboratory experiment	Moisture analysis
Data for emission factor (EF)	
Field experiment	Open burning in the field (2007-2010): experiment in 1m×1m area and traditional burn to measure concentration and burned rate
Chamber experiment	Open burning in the chamber (2009-2010) measure concentration and burned rate
Laboratory experiment	Elemental analysis (TC, OC, EC)
Analysis	Calculation of EF from results of experiment

Table C.2 Emission measurement equipments

Parameter	Equipment	Company	Model	Flow rate	Principle
PM _{2.5}	DustTrak	TSI Inc., USA	8520	1.7 L/min	Light scattering
BC	Micro Aethalometer	Magee Scientific Company, USA	AE 51	50 ml/min	Optical absorption
CO ₂ , CO	IAQ monitor	Quest Technologies, USA	AQ5000Pro	0-20 m/s	NDIR, Sensor
Aerosol	Portable pump, quartz filter	A.P. Buck Inc.	VSS-12	10 L/min	Gravimetric

Table C.3 Specifications of Model 8520 DustTrak Aerosol Monitor

Parameter	Value
Sensor Type	90° light scattering
Range	0.001 to 100 mg/m ³ (Calibrated to ISO 12103-1, A1 test dust)
Resolution	±0.1% of reading or ±0.001 mg/m ³ ,
Particle Size Range	0.1 to approximately 10 micrometers
Flow Rate	Adjustable 1.4 to 2.4 L/min (1.7 nominally)

(TSI, 2002)

Table C.4 Specifications of Model AE 51 Micro Aethalometer

Parameter	Value
Optical Source	880 nm wavelength (IR) LED
Range	0-1 mg/m ³ for 15-min @ 50 mL/min
Resolution	0.001 µg/m ³
Filter Media	T60 Teflon-coated borosilicate glass fiber
Flow Rate	50-150 ml/min

(MAGEE Scientific, 2009)

Table C.5 Specifications of Model AQ5000Pro CO, CO₂ sensor

Parameter	Value
Sensor Type	Non-dispersive infrared
Range	0 to 20,000 ppm
Resolution	±3% of reading or ±50 ppm,
Flow Rate	1 ml/hr

(Quest Technology, 2009)

Table C.6 Average experiment conditions for field experiment of agricultural residues open burning

	Rice straw	Corn residues	Sugarcane leave
Moisture (% w.b.)	16±5 ¹ 69±7 ²	6.28±0.96	3.34±1.44
Biomass load (g/m ²)	421±236	610±64	1,007±233
Wind speed (m/s)	1.75±0.63	1.60±0.57	-
Ambient air temp (°C)	32.10±1.65	31.56±0.42	-
Relative Humidity (%)	60.71±9.37	55.28±11.98	-
Pressure (hPa)	1,014±2	997±15	-
Burn rate (g/s, d.b.)	2.79±0.94	2.36±0.26	-

Note ¹moisture content (%) of dried straw naturally in the field, ²moisture content of fresh straw after harvesting

Table C.7 Summary of field open burning experiments

No.	Date	Province	Biomass	Emission measurement			
				TPM	PM _{2.5}	CO, CO ₂	BC
1	27/12/07	Samutsakhon	Rice	✓	-	-	-
2	07/07/08	Samutsakhon	Rice	✓	-	-	-
3	01/11/08	Nakhonsawan, Takfa	Corn	✓	✓	-	-
4	20/11/08	Samutsakhon	Rice	✓	✓	-	-
5	14/12/08	Nakhonsawan, Thatako	Rice	✓	✓	✓	-
6	17/09/09	Samutsakhon	Rice	✓	✓	✓	-
7	20/09/09	Nakhonsawan, Muang	Rice	-	✓	✓	-
8	29/12/09	Nakhonsawan, Thatako	Rice	✓	✓	✓	✓
9	17/01/10	Korat, Pakchong	Corn	✓	✓	✓	✓

Table C.8 Schedule of chamber experiments

No.	Date	Biomass	BL collection		Sampling Position	Parameters			
			from	Date		TPM	PM _{2.5}	CO, CO ₂	BC
1	09/09/09	Rice	Samutsakhon	18/11/08	Stack	✓	✓	✓	-
2	09/09/09	Sugar	Kanchanaburi	03/02/08	Stack	✓	✓	✓	-
3	09/09/09	Sugar	Chonburi	22/1/2009	Stack	✓	✓	✓	-
4	18/09/09	Rice	Samutsakhon	18/11/08	Stack	-	✓	✓	-
5	18/09/09	Sugar	Kanchanaburi	03/02/08	Stack	-	✓	✓	-
6	18/09/09	Sugar	Chonburi	22/1/2009	Stack	-	✓	✓	-
7	2/12/09	Corn	Raisuwan	29/11/09	Ground	✓	✓	✓	✓
8	14/12/09	Corn	Raisuwan	29/11/09	Ground	✓	✓	✓	✓
9	14/12/09	Sugar	Kanchanaburi	03/02/08	Ground	✓	✓	✓	✓
10	14/12/09	Rice	Samutsakhon	18/11/08	Ground	✓	✓	✓	✓
11	11/01/10	Rice	NS, Thatako	29/12/09	Ground	✓	✓	✓	✓
12	11/01/10	Corn	Raisuwan	29/11/09	Ground	✓	✓	✓	✓
13	29/01/10	Corn	Pakchong	17/01/10	Ground	✓	✓	-	✓
14	17/02/10	Corn	Pakchong	17/01/10	Ground	✓	✓	✓	✓
15	06/05/10	Rice	NS, Thatako	29/12/09	Ground	-	✓	✓	✓

Table C.9 Meteorological conditions at KMUTT, Ratchaburi Campus during chamber experiments (September 2009-February 2010)

Place	WS (m/s)	Temp (°C)	Humidity (%)	Pressure (hPa)
KMUTT, Ratchaburi Campus	0.35±0.14	37.71±2.81	425.41±9.86	1,014.40±12.38

Table C.10 Background concentrations of PM_{2.5}, BC, CO and CO₂ (mg/m³) at Ratchaburi

Average	PM _{2.5}	BC	CO	CO ₂
Background concentration	0.10±0.06	0.02±0.02	0.05±0.09	578±461

Table C.11 Experiment conditions for chamber experiment of agricultural residues open burning

	Rice straw	Corn residues	Sugarcane leave	Literature	Source
Moisture (% w.b.)	SS 3	SW 5-22	KB 0	Corn 9	Jenkins, 1996
	NS 8	PC 6	CB 0	Rice 9	
Biomass sample (g w.b.)	SS 100, 200, 500	SW 200, 500, 1,000	KB 120, 200	Corn 890	Jenkins, 1996
	NS 200, 500	PC 400, 500, 700	CB 100, 200	Straw 605 (g dry)	

Note: Sampling site from field experiments: SS = Samutsakhon, NS = Nakhonsawan, SW = Suwan Farm, PC = Pakchong, KB = Kanchanaburi, CB = Chonburi. Biomass load means amount of agricultural residues input in the chamber.

Table C.12 Raw measurement data of BC, CO₂, CO, and PM_{2.5} concentration

Raw data				
	0585 connect BC		S/N 85201978	
	BC	CO ₂	CO	PM _{2.5}
	(ng/m ³)	ppm	ppm	mg/m ³
12:32:55	5200	325	0.15	0.065
12:32:56	6333	325	0.59	0.061
12:32:57	21494	325	0.11	0.067
12:32:58	11914	325	0.15	0.067
12:32:59	23892	325	0.48	0.067

Table C.13 Processed data of BC, CO₂, CO, and PM_{2.5} concentration

Processed data				
	ng/10 ⁶	ppmx44/Vair	ppmx28/Vair	
	BC	CO ₂ - Ambient	CO	PM _{2.5}
	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
12:32:55	0.01	36.82	0.16	0.07
12:32:56	0.01	36.82	0.64	0.06
12:32:57	0.02	36.82	0.12	0.07
12:32:58	0.01	36.82	0.16	0.07
12:32:59	0.02	36.82	0.52	0.07
12:33:00	0.07	36.82	0.40	0.06

Table C.14 Burned rate results

Biomass type	Burned rate (g/s)		
	Rice straw	Corn residues	Sugarcane leaves
Field	2.79±0.94	2.36±0.26	-
Chamber	1.07±0.22	2.18±0.76	1.07±0.12

Table C.15 Emission factor results of agricultural residues open burning in field experiments

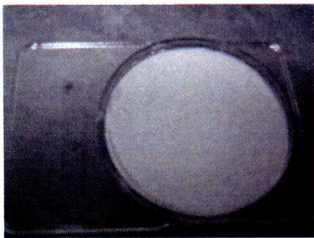
Biomass	BC (g/kg)	CO ₂ (g/kg)	CO (g/kg)	PM _{2.5} (g/kg)
Irrigated rice	-	1,958.37 ±1,290.41	-	14.97 ±9.20
Rain-fed rice	0.06 ±0.02	728.75 ±483.37	61.58 ±50.85	23.44 ±19.40

Table C.16 Emission factor results of agricultural residues open burning in chamber experiments

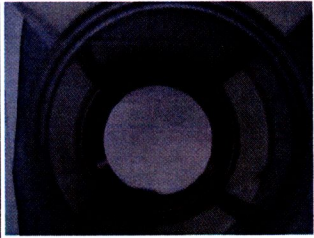
Biomass	BC (g/kg)	CO ₂ (g/kg)	CO (g/kg)	PM _{2.5} (g/kg)
Irrigated rice	0.72 ±0.03	1,379.71 ±157.03	160.52	40.54 ±3.70
Rain-fed rice	0.79 ±0.36	1,029.45 ±240.56	111.35 ±30.19	17.30 ±9.55

Table C.17 Compare carbon content of CO₂ from emission factor with C_{release} from carbon balance

Crop type	C _{CO2}	C _{release}	%C _{CO2} of C _{release}
Rice	323±74	324.31±20.17	99.66
Corn	323±162	334.62±40.85	96.66
Sugarcane	322±68	362.47±30.00	88.83



Filter in petri dish



Filter on micro balance

Figure C.1 Micro balance and quartz filter.

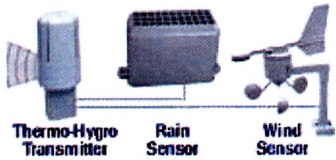
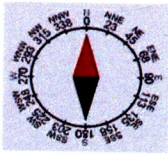


Figure C.2 Weather station (Lacrosse, WS1600).

Date 17/09/09

Place Samutsakhon

Page 1



Time	WD (see pic.)	WS (m/s)	Temp (°C)	Humidity (%)	Pressure (hPa)
15:48	158	2.6	31.2	67	1015
15:49	180	2.3	31.2	68	1015
15:05	180	2.8	31.2	39	1015
15:51	158	2.7	30.8	70	1015
15:52	180	1.7	30.9	70	1015
15:53	158	0.9	30.9	70	1015
15:54	158	0.9	30.8	71	1015
15:55	158	2.7	30.5	71	1015
15:56	158	2.4	30.4	71	1015
15:57	180	1.9	30.5	71	1015
15:58	180	2.5	30.6	71	1015
15:59	180	2.2	30.4	72	1015

Figure C.3 Example of meteorological data result.

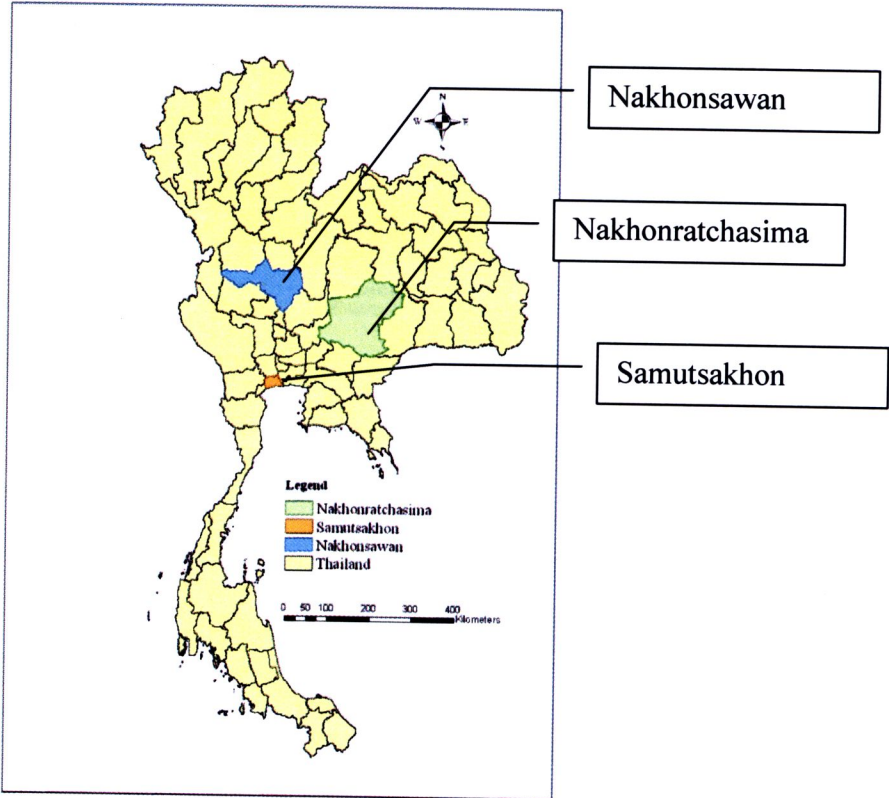


Figure C.4 Location of studied site in Samutsakhon, Nakhonsawan, and Nakhonratchasima on Thailand map.



Figure C.5 Water flooded in the paddy field on burned date (07/07/2008).

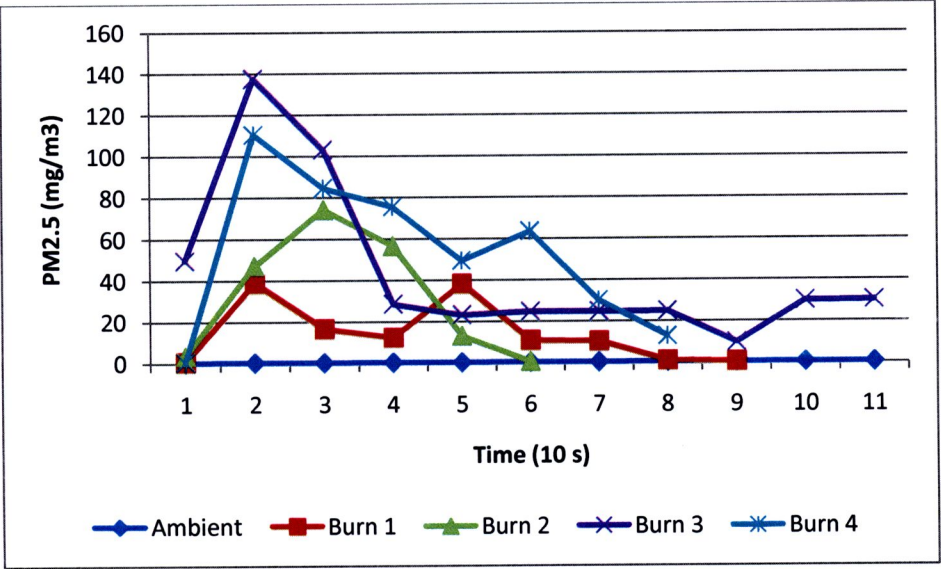


Figure C.6 Results of real time PM_{2.5} in prescribed burn 1 m², Samutsakhon (20/11/08).

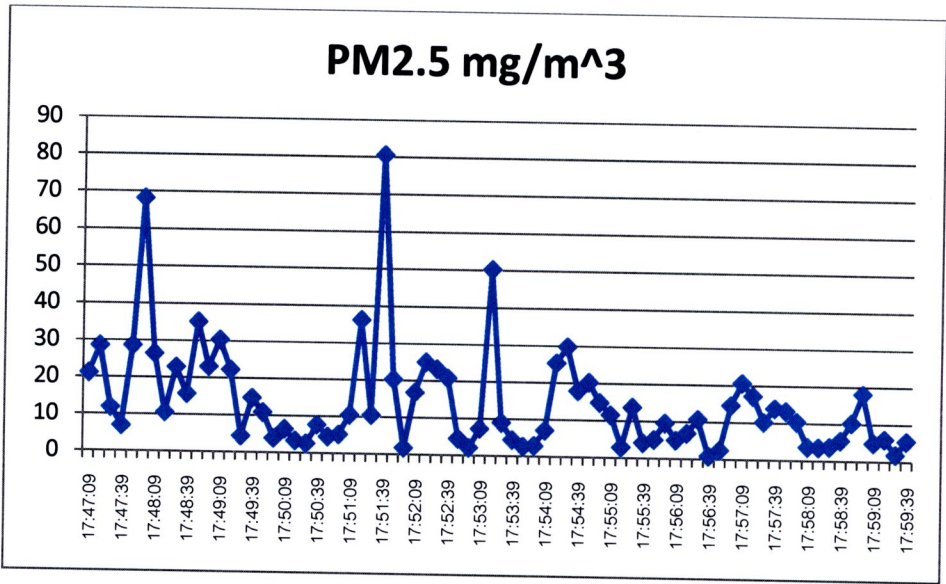


Figure C.7 Results of real time PM_{2.5} in traditional burn plot SS_BL, Samutsakhon (20/11/08).



Figure C.8 Open burning experiment at the rainfed rice field in Nakhon Sawan (14/12/2008).

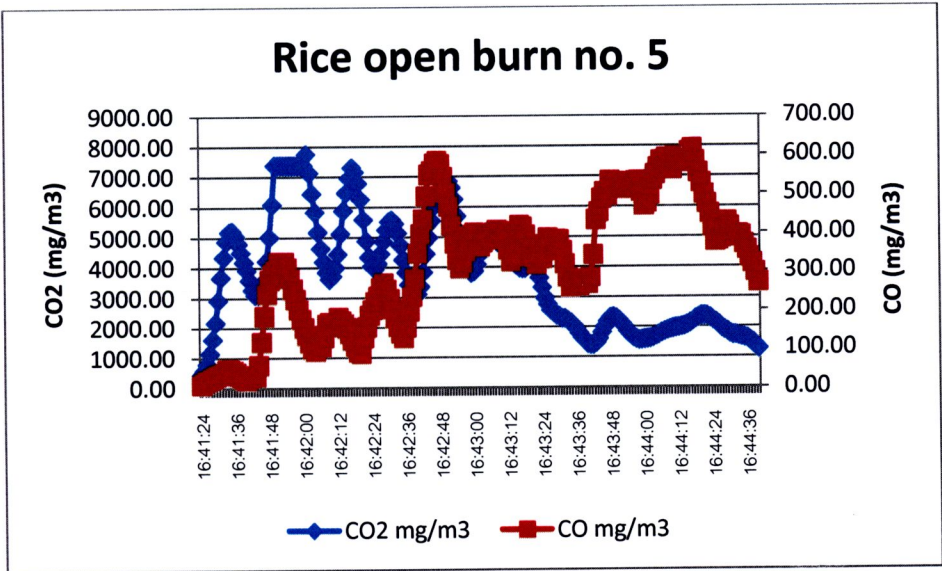


Figure C.9 Results of real time CO, CO₂ in prescribed burn 1 m², Nakhonsawan (14/12/2008).

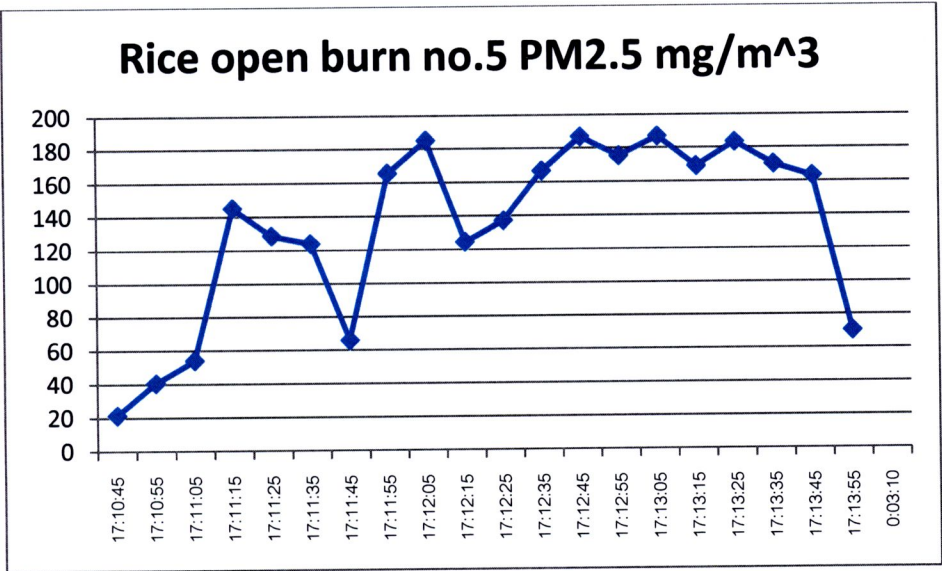


Figure C.10 Results of real time PM_{2.5} in prescribed burn 1 m², Nakhonsawan (14/12/2008).



Figure C.11 Open burning experiment at the rainfed rice field in Nakhon Sawan (20/09/09).

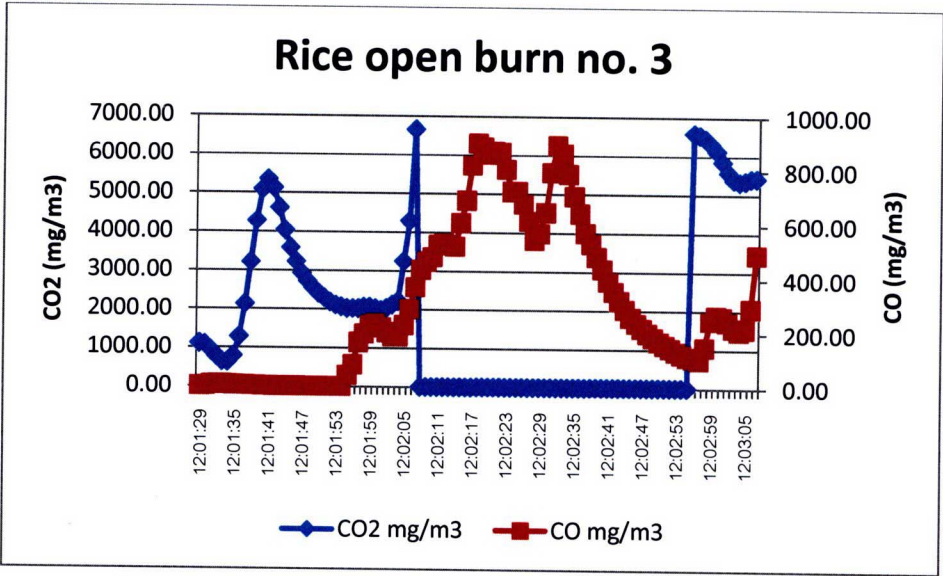


Figure C.12 Results of real time CO and CO₂ in prescribed burn 1 m², Nakhonsawan (20/09/2009).

From Figure C.12, CO₂ sensor was error because of high concentration that over the detection limit at 5,000 ppm (6,488 mg/m³, 33°C).

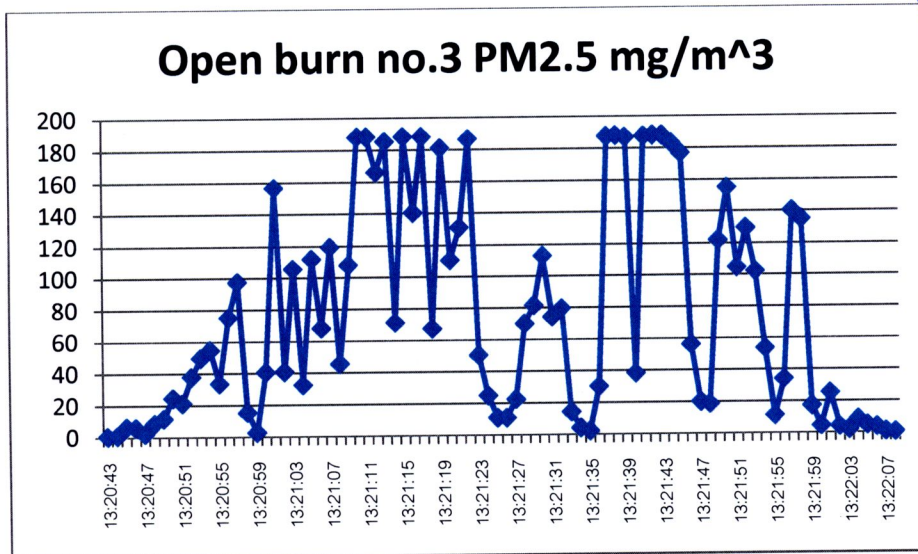


Figure C.13 Result of real time PM_{2.5} in prescribed burn 1 m², Nakhonsawan (20/09/2009).

From Figure C.13, result of real time PM_{2.5} has the same trend as CO concentration in Figure C.14. The graph is dropped during reach maximum concentration because of the equipments is out of plume during fluctuating of wind direction.

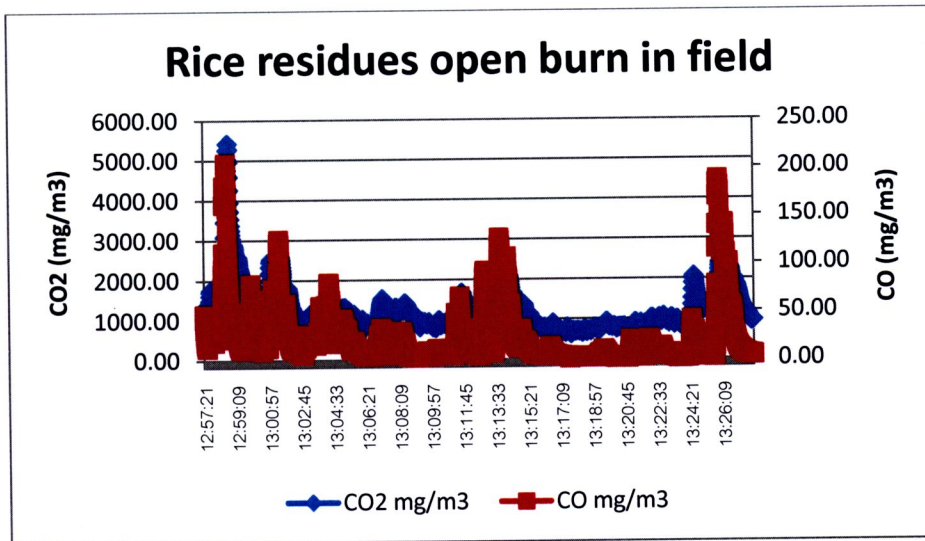


Figure C.14 Results of real time CO, CO₂ in traditional burn, Nakhonsawan (20/09/2009).

From Figure C.14, sampling location of the whole plot burning was at one side of the crop plot, so the equipment could not move to another side immediately if the wind changed direction or during calm wind that the plume raised up into the air. Therefore, the graph is fluctuated.

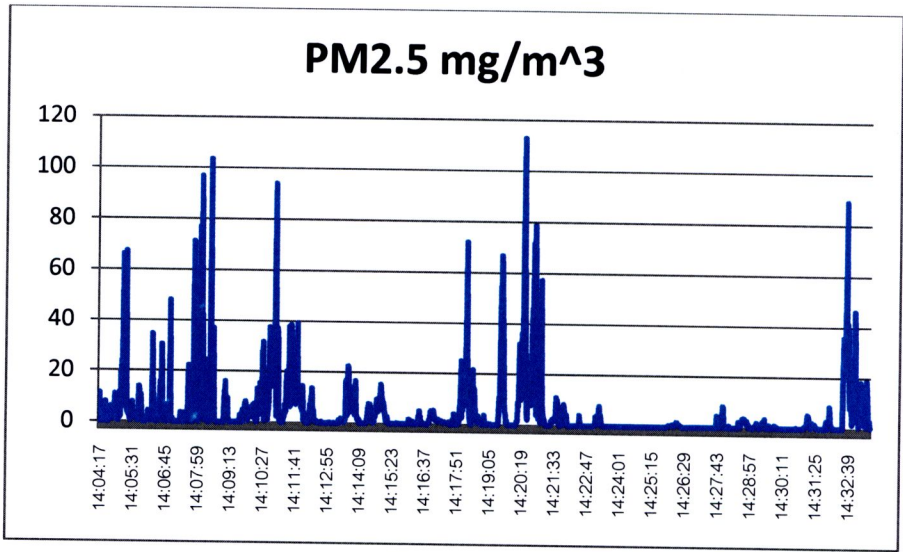


Figure C.15 Results of real time PM_{2.5} in traditional burn, Nakhonsawan (20/09/2009).

From Figure C.14 and 4.15, all pollutant concentrations (CO, CO₂, and PM_{2.5}) are in the same trend that means the equipment gets the same air volume because of being installed on the same stand.



Figure C.16 Open burning experiments at the rainfed rice field in Nakhon Sawan (29/12/2009).

Figure C.16 a), sampling position of the 1st experiment was at the next crop plot because wind direction blew from west and moved the equipments along the crop plot length. Figure C.16 b), sampling position of the 2nd experiment was located on the road because wind direction changed to blow from the south.

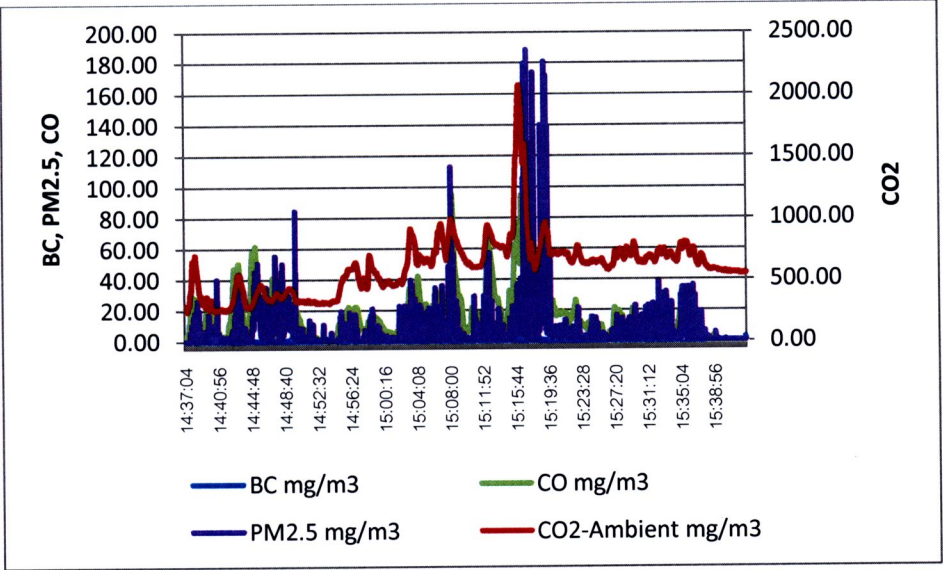


Figure C.17 Results of real time emissions in experiment 1, Nakhonsawan (29/12/2009).

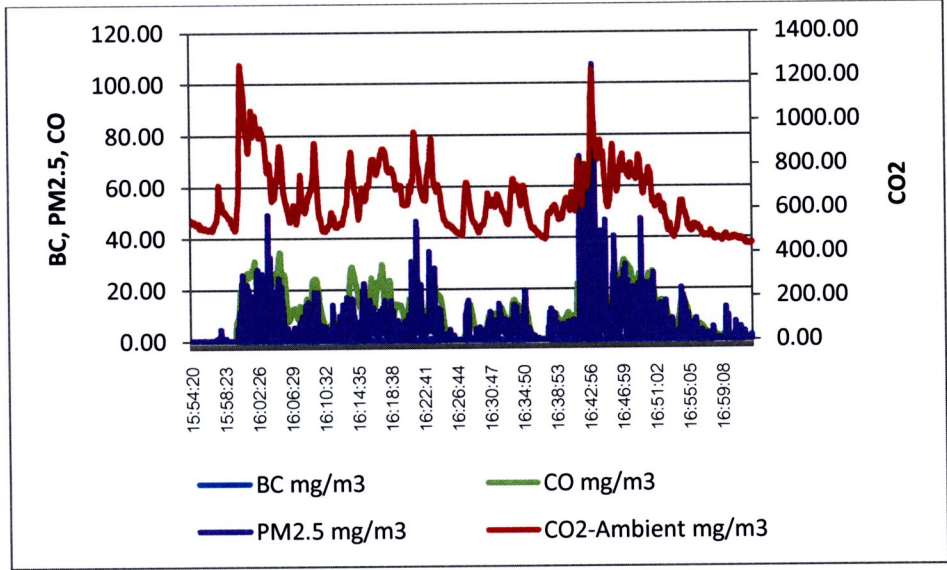


Figure C.18 Results of real time emissions in experiment 2, Nakhonsawan (29/12/2009).

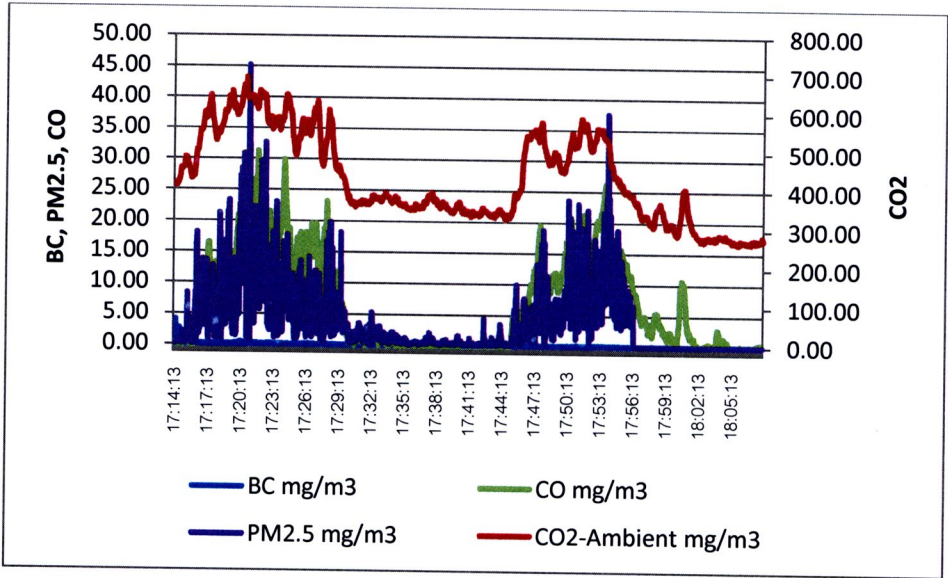


Figure C.19 Results of real time emissions in experiment 3, Nakhonsawan (29/12/2009).



Figure C.20 Open burning experiments at the rainfed corn field in Nakhon Sawan (01/11/2008).

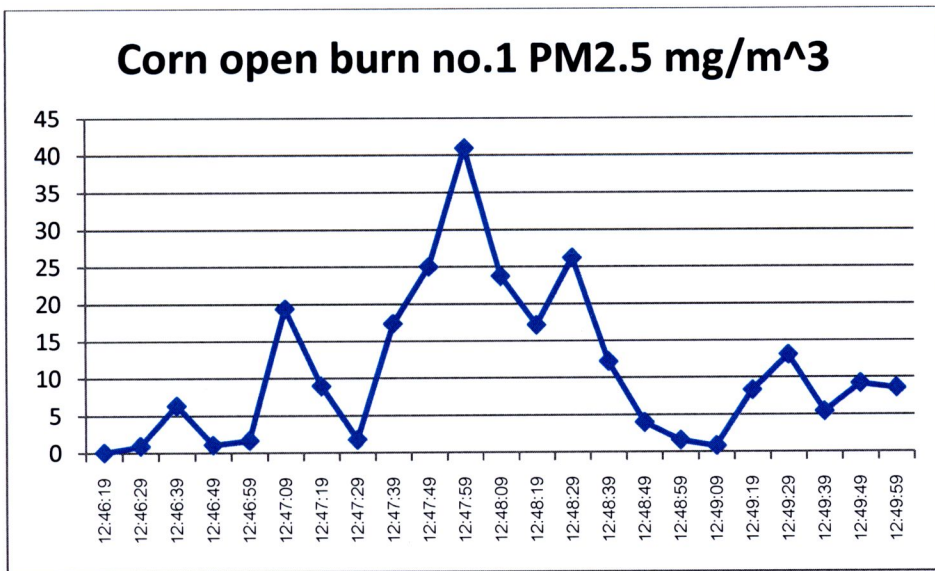


Figure C.21 Results of real time PM_{2.5} in prescribed burn 1 m², corn field Nakhonsawan (01/11/2008).



Figure C.22 Open burning experiments at the rainfed corn field in Nakhonratchasima (17/01/10).

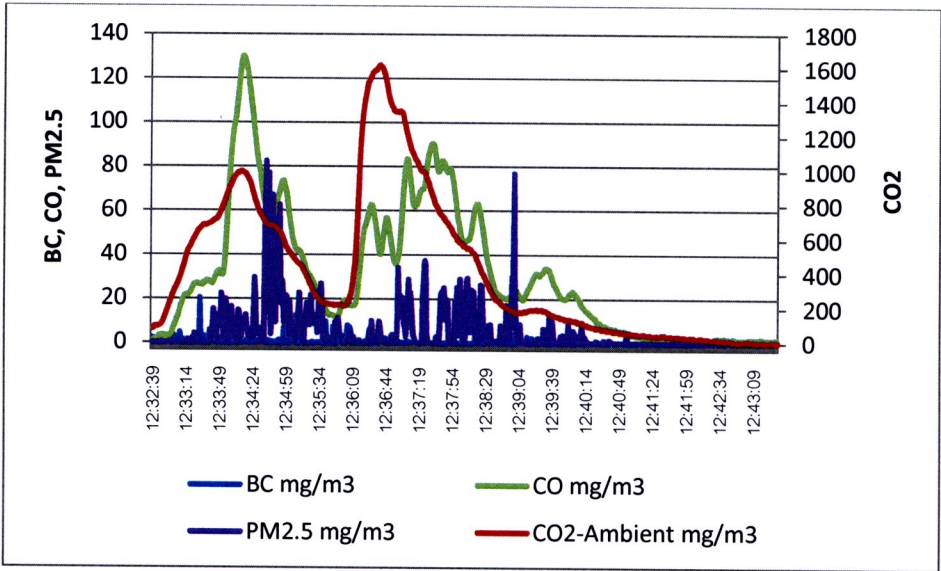


Figure C.23 Results of real time emissions in corn field, Nakhonratchasima (17/01/10).



Figure C.24 Position of emission monitored equipments in front of the chamber.

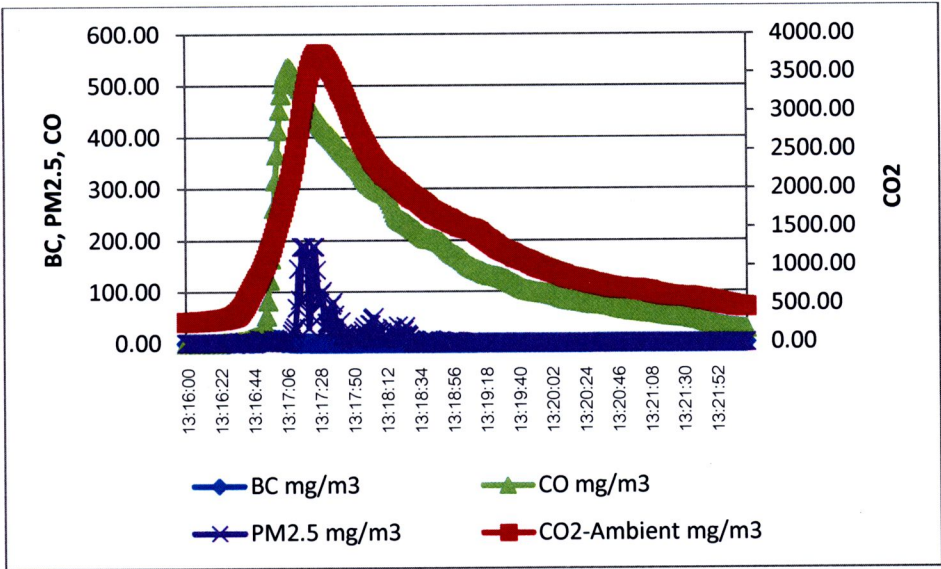


Figure C.25 Open burning of rice straw 459 g_{dm} in the chamber, 8% moisture (Exp3, 11/01/10).

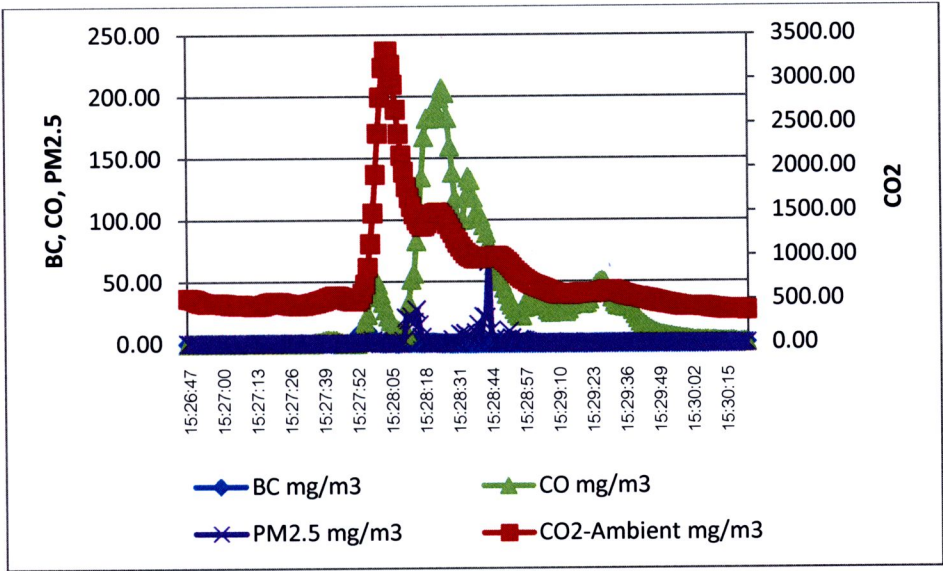


Figure C.26 Open burning of sugarcane leaves 200 g_{dm} in the chamber, 0% moisture (Exp1, 14/12/09).

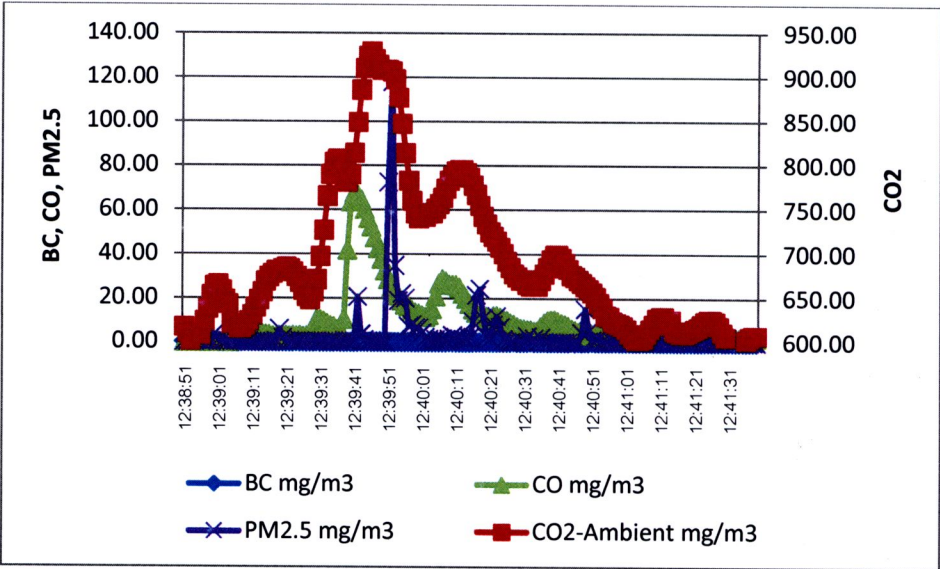


Figure C.27 Open burning of corn residues 156 g_{dm} in the chamber, 22% moisture (Exp1, 02/12/09)

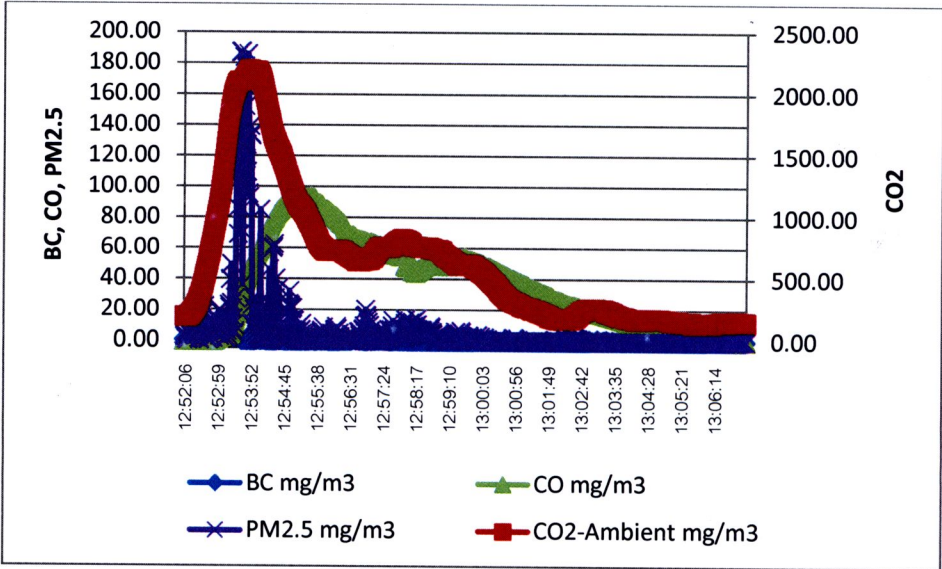


Figure C.28 Open burning of corn residues 450 g_{dm} in the chamber, 10% moisture (Exp2, 14/12/09)

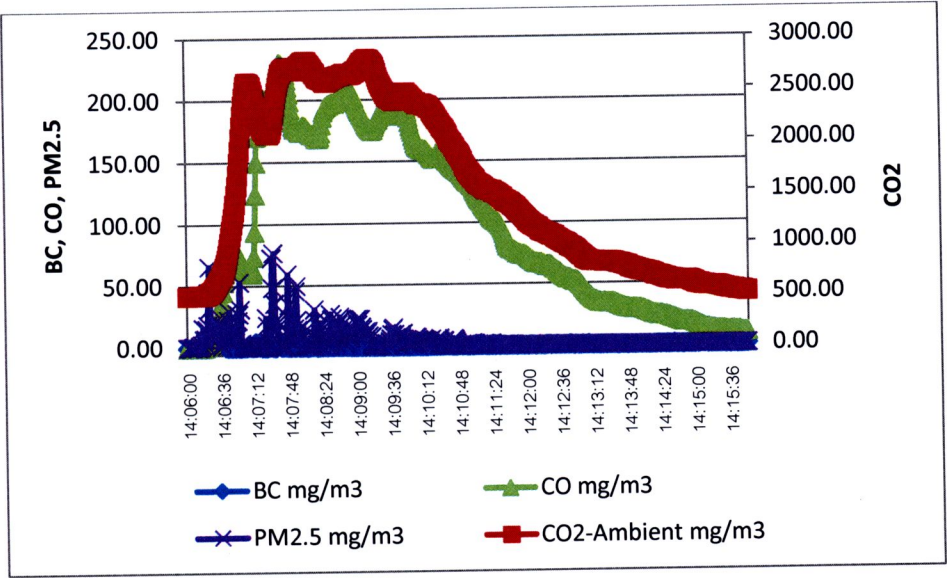


Figure C.29 Open burning of corn residues 908 g_{dm} in the chamber, 5% moisture (Exp1, 11/01/10)

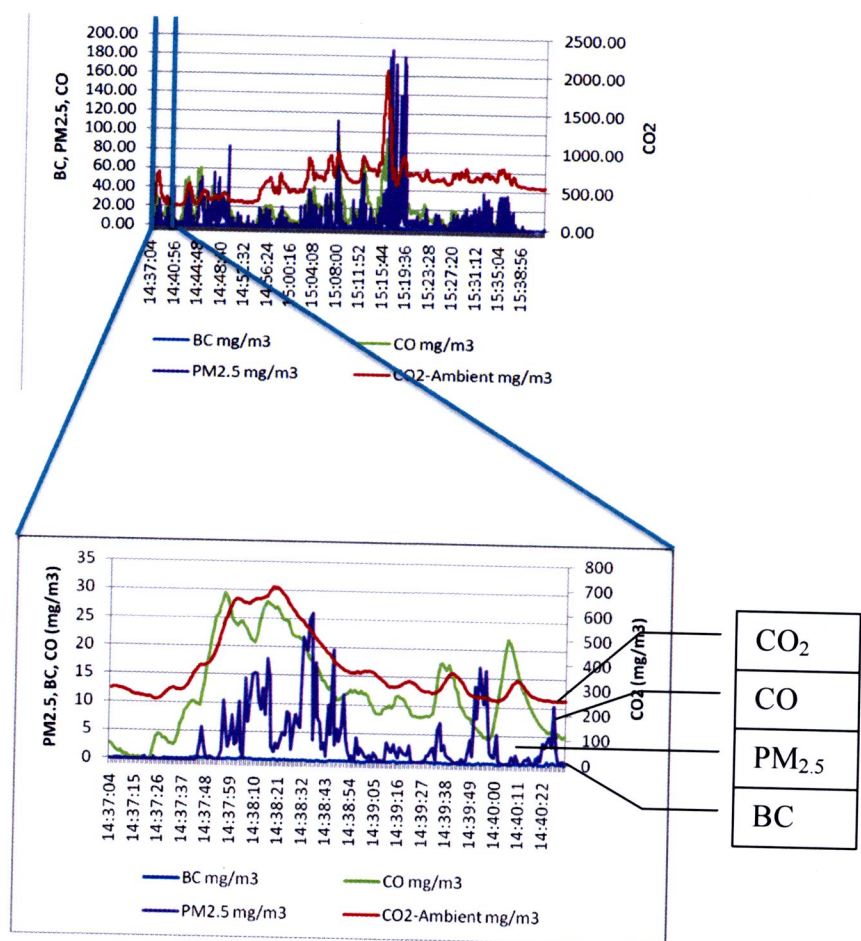


Figure C.30 Example of results from open burning at rice field in Nakhonsawan 29/12/2009.

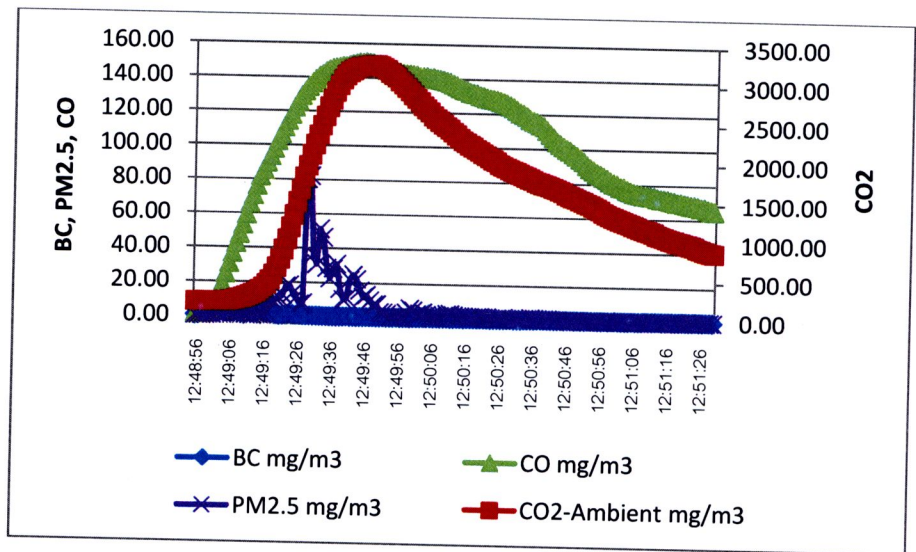


Figure C.31 Example of results from open burning of rice straw in the chamber.

APPENDIX D
BURNED AREA

Table D.1 Characteristics of MODIS

Characteristics	Description
Orbit	705 km, 10:30 AM descending node (AM-1) or 1:30 PM ascending node (PM-1), sun-synchronous, near-polar
Scan Rate	20.3 rpm, cross track
Swath Dimensions	2,330 km (across track) by 10 km (along track at nadir)
Telescope	17.78 cm ϕ off-axis, afocal (collimated), with intermediate field stop
Swath width	1.0 x 1.6 x 1.0 m
Weight	228.7 kg
Data Rate	10.6 Mbps (peak daytime); 6.1 Mbps (orbital average)
Quantization	12 bits
Spatial Resolution	250 m (bands 1-2), 500 m (bands 3-7), 1000 m (bands 8-36)

Source: NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>)

Table D.2 MODIS bands and their principal areas of application

Band	Wavelength (nm)	Resolution (m)	Primary Use
1	620-672	250m	Land/Cloud/Aerosols Boundaries
2	841-890	250m	
3	459-479	500m	
4	545-565	500m	
5	1230-1250	500m	
6	1628-1652	500m	
7	2105-2155	500m	
8	405-420	1000m	Ocean Color/Phytoplankton/Biogeochemistry
9	438-448	1000m	
10	483-493	1000m	
11	526-536	1000m	
12	546-556	1000m	
13	662-672	1000m	
14	673-683	1000m	
15	743-753	1000m	
16	862-877	1000m	
17	890-920	1000m	Atmospheric Water Vapor
18	931-941	1000m	
19	915-965	1000m	



Table D.2 MODIS bands and their principal areas of application (continued)

Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)	Primary Use
20	3.660-3.840	1000m	Surface/Cloud Temperature
21	3.929-3.989	1000m	
22	3.929-3.989	1000m	
23	4.020-4.080	1000m	
24	4.433-4.498	1000m	Atmospheric Temperature
25	4.482-4.549	1000m	
26	1.360-1.390	1000m	Cirrus Clouds Water Vapor
27	6.535-6.895	1000m	
28	7.175-7.475	1000m	
29	8.400-8.700	1000m	Cloud Properties
30	9.580-9.880	1000m	Ozone
31	10.780-11.280	1000m	Surface/Cloud Temperature
32	11.770-12.270	1000m	
33	13.185-13.485	1000m	Cloud Top Altitude
34	13.485-13.785	1000m	
35	13.785-14.085	1000m	
36	14.085-14.385	1000m	

Source: NASA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>)

Table D.3 MODIS channels used for active-fire detection and characterization

Channel	Central wavelength (μm)	Purpose
1	0.65	Sun glint and coastal false alarm rejection: cloud masking
2	0.86	Bright surface, sun glint, and coastal false alarm rejection; cloud masking
7	2.1	Sun glint and coastal false alarm rejection
21	3.96	High-range channel for fire detection and characterization
22	3.96	Low-range channel for fire detection and characterization
31	11.0	Fire detection, cloud masking
32	12.0	Cloud masking

Table D.4 Monthly burned area of rice, corn, and sugarcane field 2008 (remote sensing data)

Burned area (ha)	Rice	Corn	Sugarcane
Jan	352.8	665.71	672
Feb	2,274.72	823.3	460.8
Mar	3,215.52	2,132.21	601.6
Apr	577.92	456.67	70.4
May	73.92	12.86	3.2
Jun	53.76	0	9.6
Jul	30.24	0	3.2
Aug	53.76	9.65	0
Sep	33.6	6.43	0
Oct	30.24	0	0
Nov	110.88	3.22	0
Dec	668.64	48.24	86.4
Total	7,476.00	4,158.29	1,907.20

Table D.5 Agricultural statistic data of major rice, second rice, maize, and industrial sugarcane

Biomass Year	Planted area (1,000 rai)	Harvested area (1,000 rai)	Production (1,000 tons)	Yield per rai (Kg)	Farm price (Baht per ton)	Farm value (Million baht)
Major rice 2007	57,386	53,892	23,308	433	9,188	214,157
Second rice 2007	10,074	10,032	6,802	678	6,427	43,718
Corn 2007	5,961	5,797	3,661	632	6.85	25,080
Sugarcane 2007	6,314	64,365	10,194	683	43,962	6,314

Note: 1 rai = 16,000 m², (OAE, 2008)

Table D.6 Harvested area of major and second rice in irrigated and rain-fed area 2005-2007

Area	Major rice: Harvested area (Rai)			Second rice: Harvested area (Rai)		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007
Whole Kingdom	54,033,611	53,500,163	53,892,143	9,872,431	10,032,054	12,788,512
Irrigation	14048739	13910042	14011957.18	7700496	7,825,002	9,975,039
Unirrigation	39984872	39590121	39880185.82	2171935	2,207,052	2,813,473

(OAE, 2008)

Table D.7 Area burned of irrigated and rainfed rice, 2007

Year 2007 area burned (1,000 ha)	Major rice		Second rice	
	irr	rainfed	irr	rainfed
Whole Kingdom	1,601.55	964.45	1,092.39	242.91
Northern	523.80	378.60	209.38	208.22
Northeastern	495.12	339.58	31.91	16.09
Central Plain	542.34	217.56	838.86	14.34
Southern	40.28	28.72	12.24	4.26

(Penwadee and Savitri, 2010)

Table D.8 Sugarcane Statistics Report Year 2006/2007

Region	Cultivated area (ha)	Product (ton)	Product for seeding (ton)	Cultivated area for factory (ha)	Product to Factory (ton)	Average yield (ton/rai)
Thailand	1,048,985	67,306,537	6,251,961	10,214,465	9.78	40,975,963
Center	352,007	25,571,411	2,104,999	3,884,131	11.26	13,750,256
North	199,831	15,315,013	1,173,932	2,291,346	11.61	7,805,894
East	70,069	3,453,049	410,560	499,937	7.63	2,737,063
North-East	427,078	22,967,064	2,562,470	3,539,051	8.61	16,682,750

(OCSB, 2008)

Table D.9 Results of burned area in paddy field, 2007

Region	Major rice			Second rice		
	Harvested area (OAE, 2008)	PCD, 2007	Major rice burn	Harvested area (OAE, 2008)	PCD, 2007	Second rice burn
	(1,000 ha)	% burn	(1,000 ha)	(1,000 ha)	% burn	(1,000 ha)
Whole Kingdom	8,623	50	4,311	2,046	75	1,535
Northern	1,917	50	958	715	75	536
Northeastern	4,914	50	2,457	202	75	151
Central Plain	1,489	50	745	1,076	75	807
Southern	303	50	152	54	75	40

(PCD, 2007 and OAE, 2008)

Table D.10 Burned area in rain-fed and irrigated paddy field, 2007

Region	area burned (1,000 ha)			
	major rice		second rice	
	irrigated	rainfed	irrigated	rainfed
Whole Kingdom	1,601.55	964.45	1,092.39	242.91
Northern	523.80	378.60	209.38	208.22
Northeastern	495.12	339.58	31.91	16.09
Central Plain	542.34	217.56	838.86	14.34
Southern	40.28	28.72	12.24	4.26

(OAE, 2008 and Penwadee and Savitri, 2010)

Table D.11 Results of burned area in corn field, 2007

Region	Harvested area	PCD area	Corn burn
	(1,000 ha)	% burn	(1,000 ha)
Whole Kingdom	927.50	15	139.13
Northern	559.15	15	83.87
Northeastern	193.89	15	29.08
Central Plain	174.47	15	26.17

(OAE, 2008 and PCD, 2007)

Table D.12 Results of burned area in Sugarcane field, 2007

Region/Province	Harvested area (1,000 ha)	PCD area % burn	Sugar burn (1,000 ha)
Whole Kingdom	1,010.29	50	505.14
Northern	282.54	50	141.27
Northeastern	365.76	50	182.88
Central Plain	361.99	50	180.99

(OAE, 2008 and PCD, 2007)

Table D.13 Results of sugarcane burned area from sugarcane factory, 2007

Region	Cultivated area of sugarcane product to factory (1,000 ha)	% burn product	Burned area (1,000 ha)
Thailand	1,049	58.52	614
Center	352	51.05	180
North	200	73.92	148
East	70	65.43	46
NorthEast	427	52.80	226

(OCSB, 2008)

Table D.14 Result of burned area by remote sensing data, 2007

2007	No. of Fire Hot Spot			Burned area (ha)		
	Rice	Corn	Sugarcane	Rice	Corn	Sugarcane
Jan	1744	329	323	5,859.84	1,059.38	1,033.60
Feb	1380	645	281	4,636.80	2,076.90	899.20
Mar	738	727	156	2,479.68	2,340.94	499.20
Apr	232	79	41	779.52	254.38	131.20
May	24	2	1	80.64	6.44	3.20
Jun	10	2	2	33.60	6.44	6.40
Jul	11	0	0	36.96	0.00	0.00
Aug	2	0	0	6.72	0.00	0.00
Sep	18	0	0	60.48	0.00	0.00
Oct	443	4	6	1,488.48	12.88	19.20
Nov	54	1	5	181.44	3.22	16.00
Dec	317	36	41	1,065.12	115.92	131.20
Total	4,973	1,825	856	16,709	5,877	2,739

Table D.15 Seasonal percentage of fire hot spot, 2007

Month	% of Fire Hot Spot		
	Rice	Corn	Sugarcane
Jan-Apr	82.32	97.53	93.57
May-Oct	10.22	0.44	1.05
Nov-Dec	7.46	2.03	5.37



Table D.16 Summary of Terra and Aqua satellite schedule fly over Thailand in 2005-2010

Hour	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2005																								
2006																								
2007																								
2008																								
2009																								
2010																								

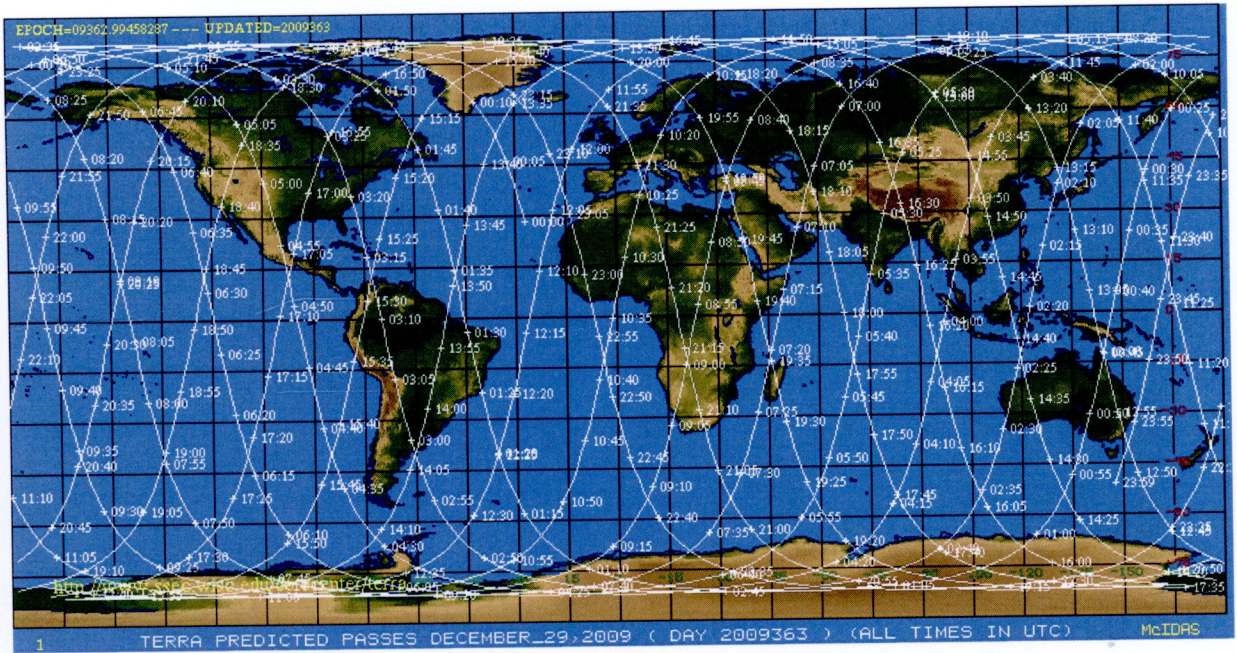
Note: T = Terra and A = Aqua

MODIS has passed Thailand four times per day at local time 3:00 (T), 6:00 (A), 15:00 (T), and 18:00(A) in 2005-2006. The orbit has changed since 2007 to be 1:00-2:00 (A), 10:00-11:00 (T), 13:00-14:00 (A), and 22:00 (T). Uncertainty of the schedule is ± 1 hour.

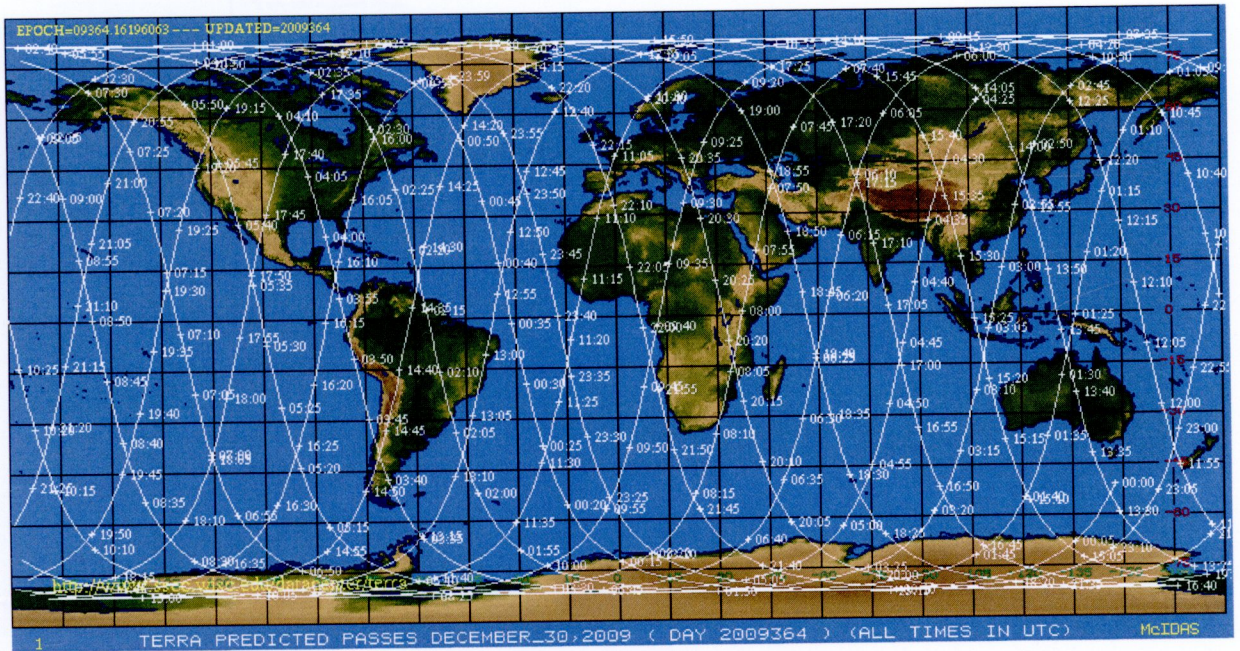
Table D.17 Percentage of production in agricultural year 2006/2007

Product (%)	2006												2007											
	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct									
Major rice	3.28	4.90	9.16	49.16	25.77	4.19	2.08	1.08	0.38															
Second rice							4.38	18.03	29.43	16.83	12.54	13.15	5.03	0.49	0.12									
Corn	10.43	24.73	22.22	18.74	15.48	6.24	1.05	0.51	0.53	0.05	0.02													
Sugarcane					18.10	31.78	27.08	19.48	3.29	0.27														
(OAE 2008)																								

(OAE, 2008)



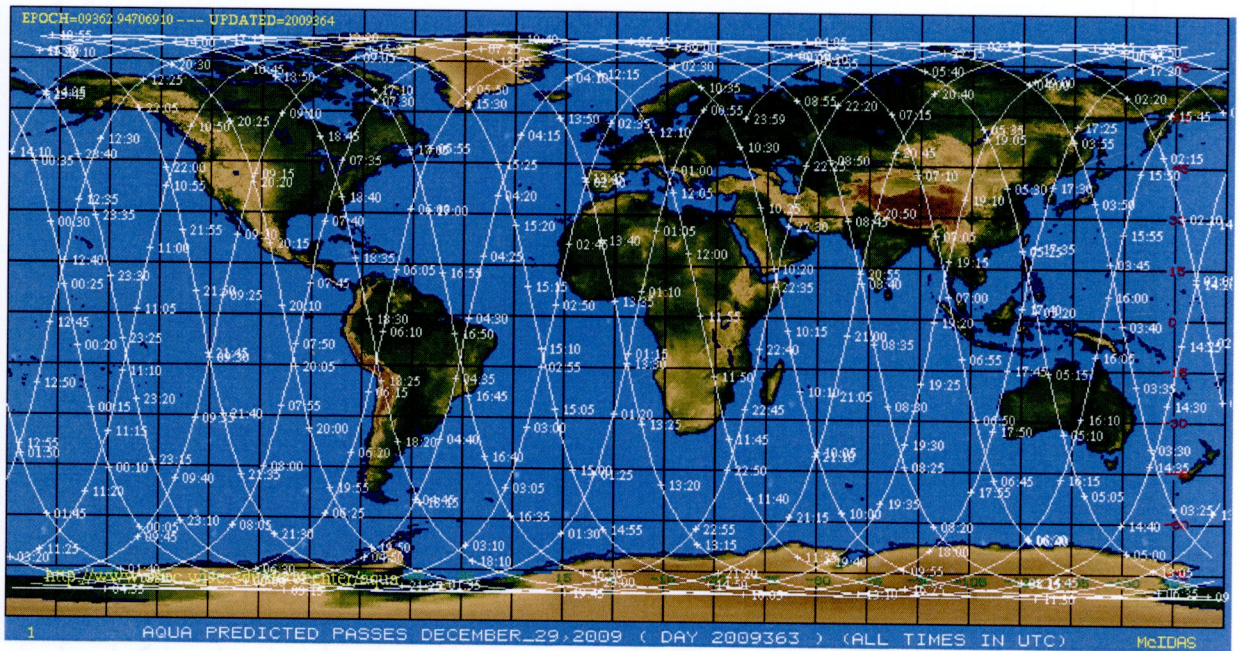
a) Terra orbit on December 29, 2009



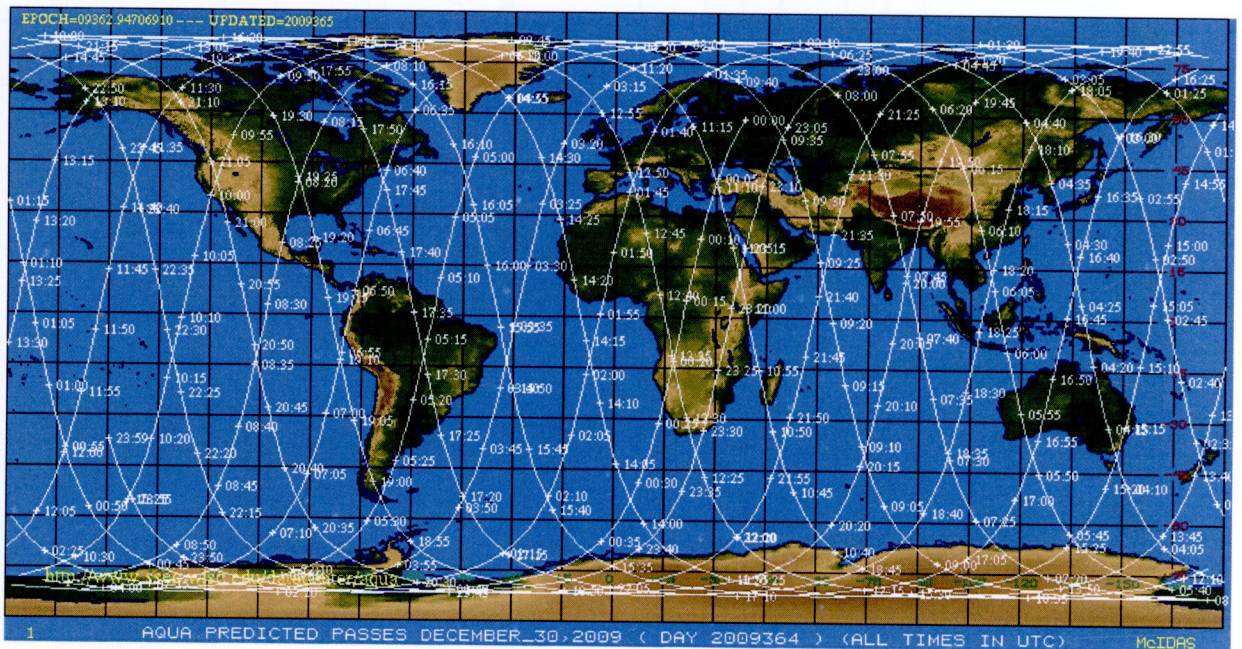
b) Terra orbit on December 30, 2009

Figure D.1 Global orbit of Terra on December 29 and 30, 2009.

Source: Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison
 (<http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/terra/GLOBAL.html>)



a) Aqua orbit on December 29, 2009



b) Aqua orbit on December 30, 2009

Figure D.2 Global orbit of Aqua on December 29 and 30, 2009.

Source: Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison

(<http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/terra/GLOBAL.html>)

The fire hot spot thermal anomalies-fires (MOD 14) are downloaded from Geoinformatics Center, Asian Institute of Technology website. Step of data acquisition is following

- Select country -> Thailand
- Select period of interest ->Date/Month/Year
- Select day and night time data
- Use default value of fire brightness temperature, fire power, fire confidence
- Select Aqua and Terra satellite
- Input data/page
- Submit the selected information

MODIS Fire Product (MOD14) Information System for Southeast Asia [Instructions](#)
 Released on Tue Jul 25 09:56:53 ICT 2006 ~ Update: Sat Jan 2 17:46:19 ICT 2010
 Notes: Data is available since July 27, 2006 until present. The data before this period will be added soon.

Enter your interested values to the following parameters for querying MODIS Fire Information.
 (*) denotes required fields.

01. Select a Single or Group of Countries*	Singapore Sri Lanka Taiwan Thailand Vietnam
02. Period of Query*	Starting Date: 2008 January 01 Ending Date: 2008 December 31
03. Satellite Overhead Time	Starting to Ending: 02 00 to 20 59 GMT
04. Day/Night Passes	☒ Day ☒ Night
05. Fire Reflectance Band2	Minimum to Maximum: -1.0 to 1.0 (Unitless)
06. Fire Brightness Temperature Band 21	Minimum to Maximum: 273 to 400 Kelvin
07. Fire Brightness Temperature Band 31	Minimum to Maximum: 273 to 400 Kelvin
08. Fire Power	Minimum to Maximum: 0 to 400 Watt/m ²
09. Fire Confidence	Minimum to Maximum: 0 to 100 %
10. MODIS Platform	☒ Terra ☒ Aqua
Submit Query Reset 20 Contact System Developer	

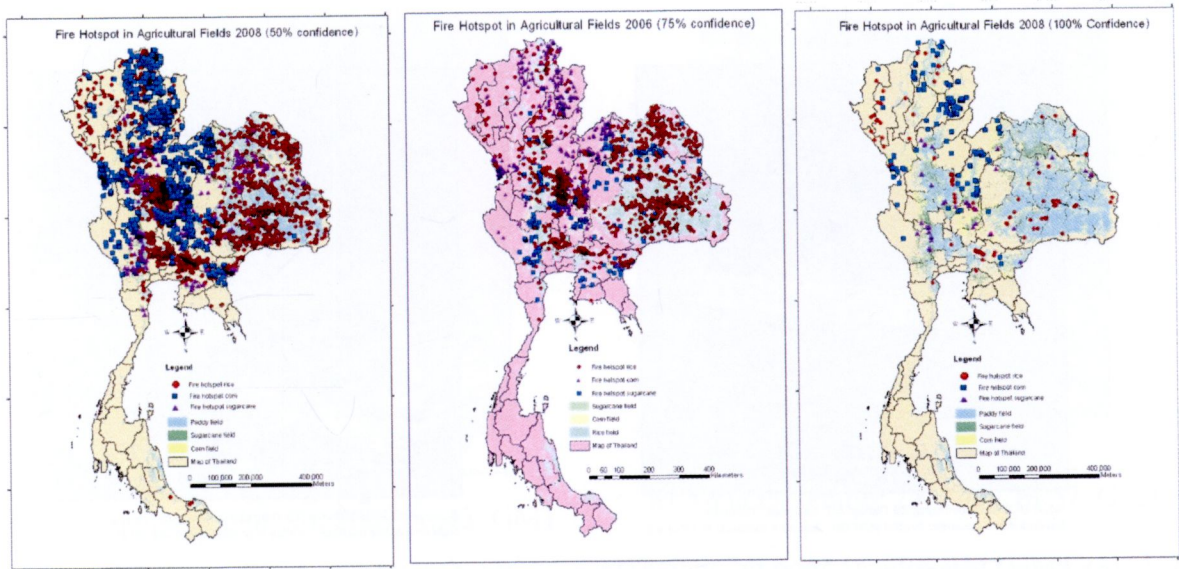
Figure D.3 MOD 14 data acquisition from GIC-AIT.

RESULT PAGE 1 of 21

id	date	time	daynight	satellite	lat	lon	ref2	T21	T31	Fp	Fc	country
435267	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.21	313.63	296.3	8.07	60	Thailand
435275	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.23	315.64	295.3	10.46	71	Thailand
435282	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.2	313.93	296	8.1	52	Thailand
435283	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.24	312.29	295.08	6.24	39	Thailand
435314	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.21	314.34	294.59	9.06	50	Thailand
435315	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.17	324.64	296.19	20.89	86	Thailand
435327	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.23	313.12	296.41	8.78	63	Thailand
435328	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.21	326.98	299.47	23.95	89	Thailand
435329	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.22	313.44	298.51	7.72	64	Thailand
435330	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.26	324.04	289.53	23.8	85	Thailand
435331	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.26	310.87	289.49	7.84	49	Thailand
435332	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.24	321.47	298.11	15.96	82	Thailand
435333	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.24	320.02	297.66	14.09	80	Thailand
435334	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.29	322.95	281.71	24.63	84	Thailand
435335	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.25	350.84	286.49	72.48	100	Thailand
435336	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.29	341.79	285.07	52.23	100	Thailand
435337	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.29	311.26	281.58	11.33	52	Thailand
435338	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.28	314.97	285.87	14.8	64	Thailand
435339	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.22	317.12	301.73	9.56	71	Thailand
435340	2008-01-01	06:09:00	Day	Aqua			0.23	328.54	297.5	25.41	90	Thailand

Figure D.4 Example of MOD 14 data.

Note: Abbreviation shown Figure D.4 is as follows: date = date of data acquisition, time = time of data acquisition, daynight = daytime or nighttime data or both, satellite = the satellite of interest: Terra or Aqua or both, lat = latitude of the found fire pixel, lon = longitude of the found fire pixel, ref2 = band 2 reflectance of fire pixel, T21 = brightness temperature of band 21, T31 = brightness temperature of band 31, Fp = Fire power of fire pixel and country = location of fire occurrence.



a) 50-100%

b) 75-100%

c) 100%

Figure D.5 Spatial distribution of fire hotspot data 2008 with different confidence level.

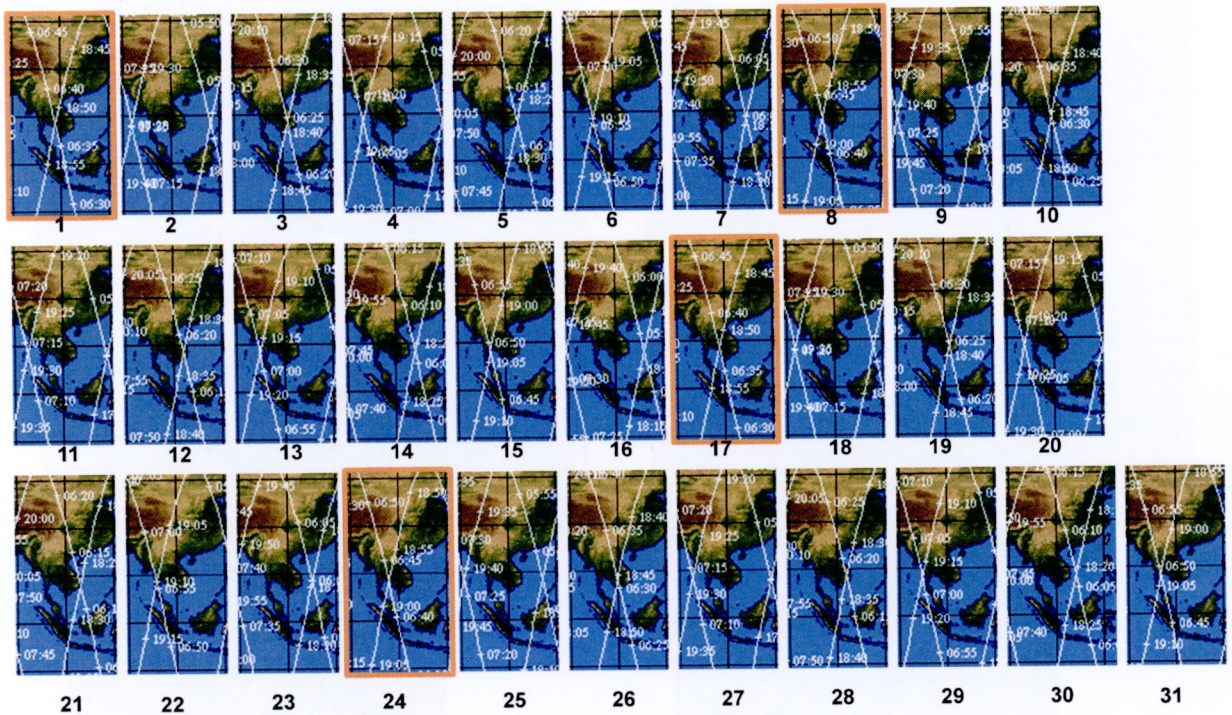
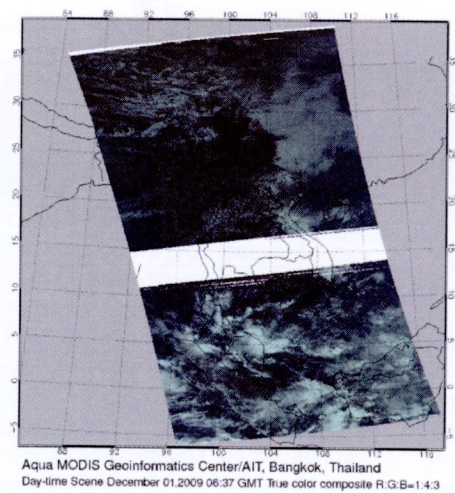


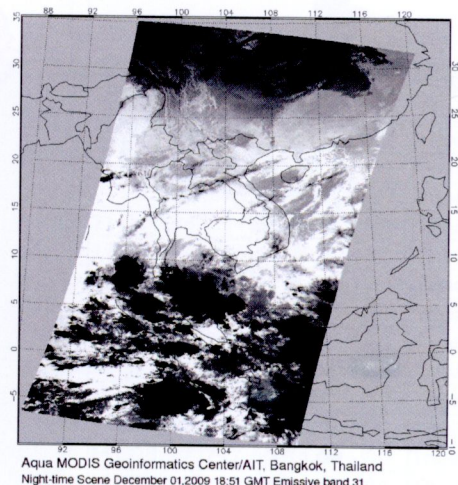
Figure D.6 Orbit of Aqua over Thailand in December, 2009.

Source: Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison

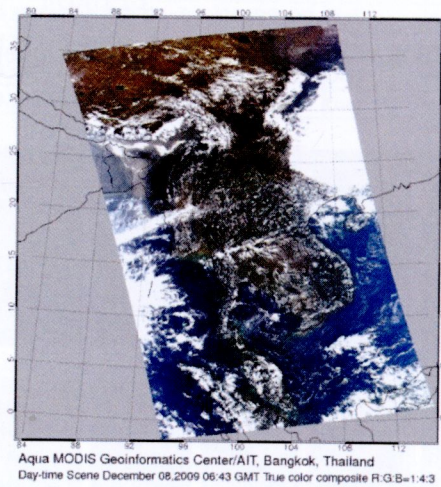
(<http://www.ssec.wisc.edu/datacenter/terra/GLOBAL.html>)



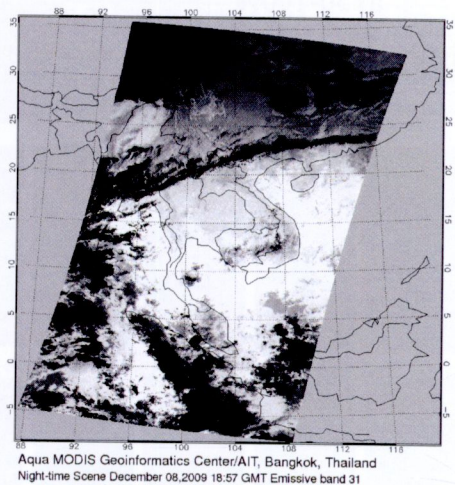
a) Aqua December 1, 2009 06:37 GMT



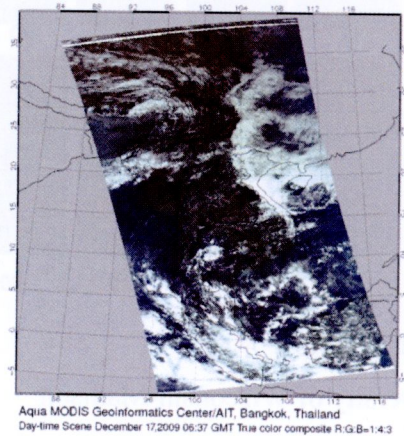
b) Aqua December 1, 2009 18:51 GMT



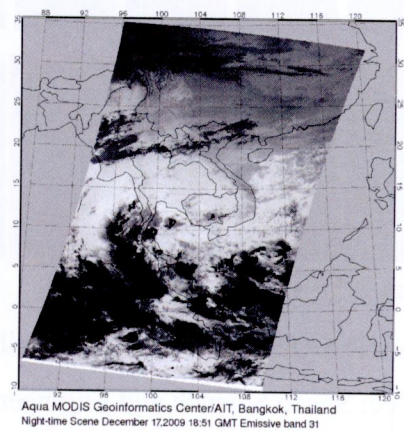
c) Aqua December 8, 2009 06:43 GMT



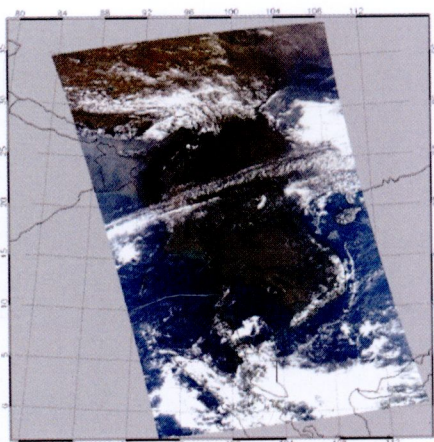
d) Aqua December 8, 2009 18:57 GMT



e) Aqua December 17, 2009 06:37 GMT

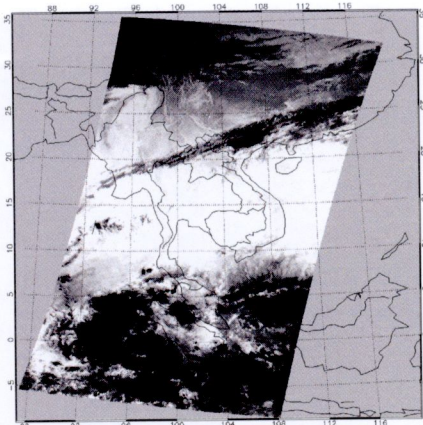


f) Aqua December 17, 2009 18:51 GMT



Aqua MODIS Geoinformatics Center/AIT, Bangkok, Thailand
Day-time Scene December 24, 2009 06:43 GMT True color composite R:G:B=1:4:3

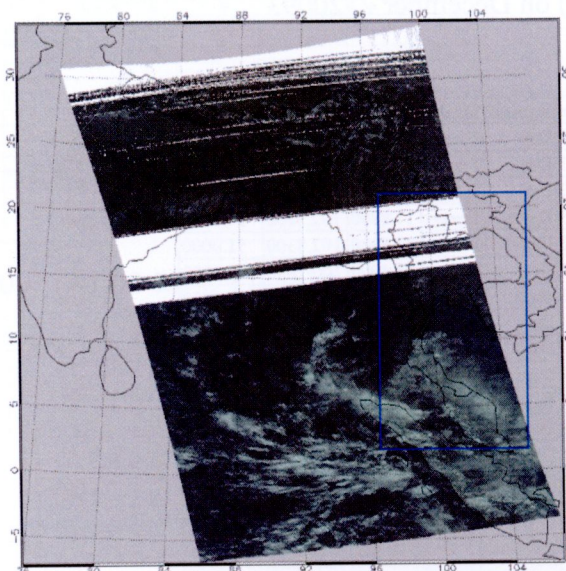
g) Aqua December 24, 2009 06:43 GMT



Aqua MODIS Geoinformatics Center/AIT, Bangkok, Thailand
Night-time Scene December 24, 2009 18:57 GMT Emissive band 31

h) Aqua December 24, 2009 18:57 GMT

Figure D.7 Aqua (1 km resolution) image over Thailand at 6 AM and 6 PM (GMT) on 1, 8, 17, and 24 December 2009. (Source: GIC-AIT, 2009)



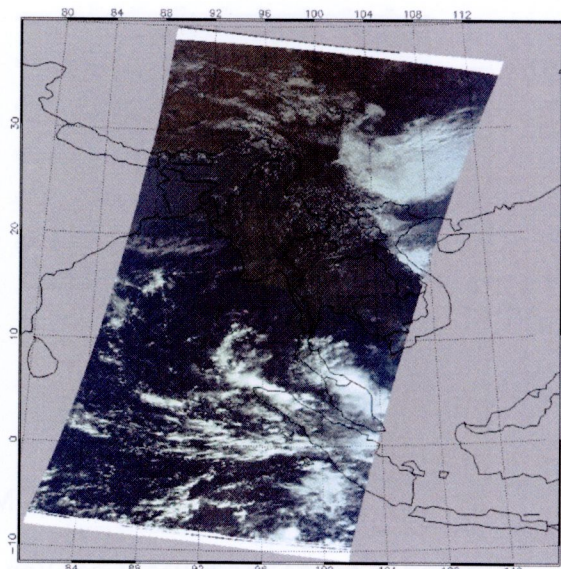
Aqua MODIS Geoinformatics Center/AIT, Bangkok, Thailand
Day-time Scene December 02, 2009 07:19 GMT True color composite R:G:B=1:4:3

a) Aqua



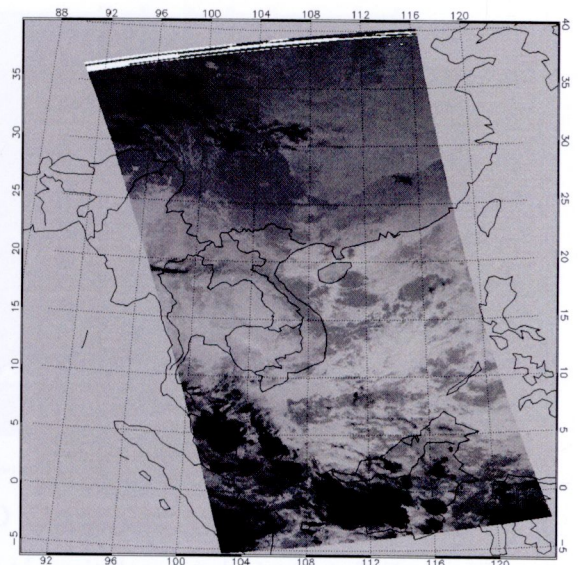
Aqua MODIS Geoinformatics Center/AIT, Bangkok, Thailand
Night-time Scene December 02, 2009 17:56 GMT Emissive band 31

b) Aqua



Terra MODIS Geoinformatics Center/AIT, Bangkok, Thailand
Day-time Scene December 02, 2009 04:13 GMT True color composite R:G:B=1:4:3

c) Terra



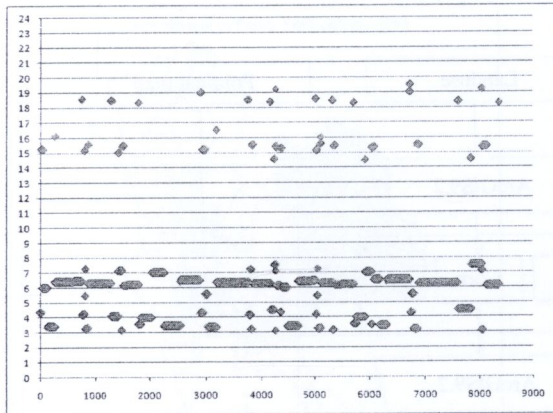
Terra MODIS Geoinformatics Center/AIT, Bangkok, Thailand
Night-time Scene December 02, 2009 15:05 GMT Emissive band 31

d) Terra

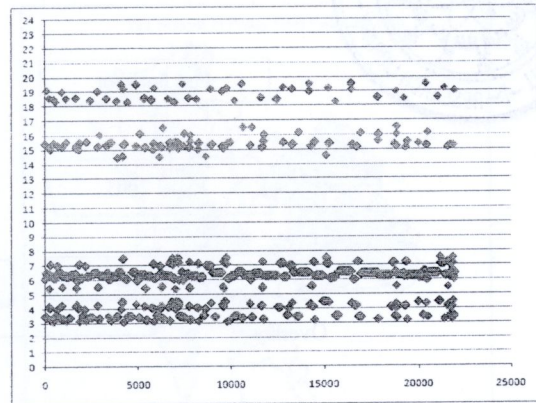
Figure D.8 MODIS Images (Aqua and Terra) on December 2, 2009.

id	DD	MM	YY	HH	hh+7	min	daynight	satellite	lat	lon	Fc
1013278	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	19.4900	100.2600	42.0000
1013279	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	19.4100	99.7900	46.0000
1013280	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	19.1800	99.6200	56.0000
1013282	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	17.8800	102.5500	54.0000
1013283	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	17.8300	102.8300	51.0000
1013286	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	17.4000	100.1800	82.0000
1013287	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	17.3600	100.2500	29.0000
1013288	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	17.2800	100.1300	62.0000
1013289	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.3000	103.4600	82.0000
1013290	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.3000	103.4800	74.0000
1013292	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.6500	99.5100	65.0000
1013294	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.5500	99.5800	62.0000
1013295	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.4300	99.4500	67.0000
1013296	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.0200	101.1500	74.0000
1013297	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	16.0100	101.1600	62.0000
1013300	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	15.9300	100.0600	64.0000
1013301	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	14.8500	102.4800	92.0000
1013302	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	14.8400	102.4700	92.0000
1013304	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	14.2000	99.1900	62.0000
1013305	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	13.3100	102.3100	47.0000
1013306	2	12	2009	4	11	13	Day	Terra	13.3000	102.3300	56.0000
1013337	2	12	2009	15	22	5	Night	Terra	17.0300	102.8800	100.0000

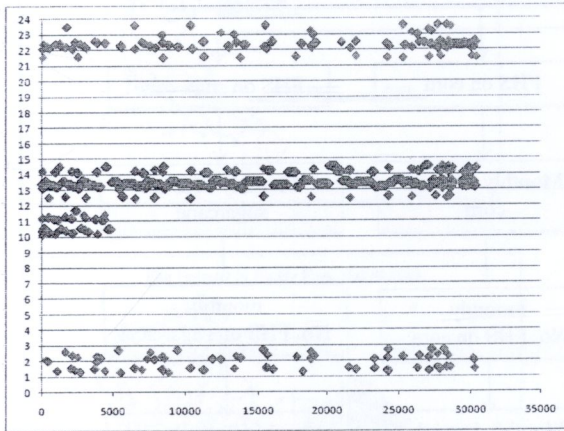
Figure D.9 Available MODIS data on December 2, 2009.



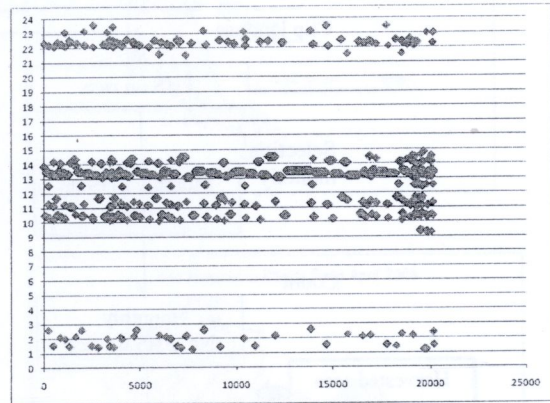
2005 (T3:00, A6:00, T15:00, A18:00)



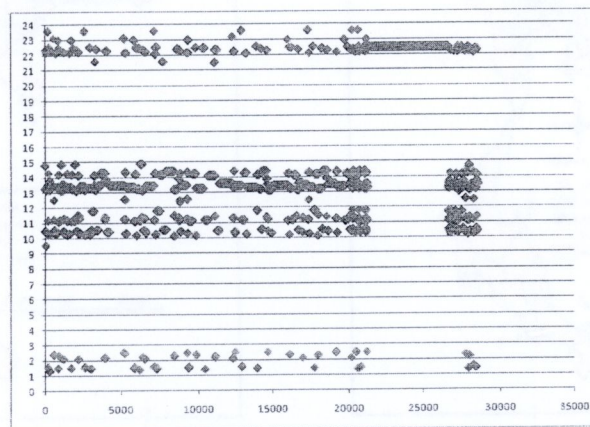
2006 (T3:00, A6:00, T15:00, A18:00)



2007 (A1:00-2:00, T10:00-11:00, A13:00-14:00, T22:00)



2008 (A1:00-2:00, T10:00-11:00, A13:00-14:00, T22:00)



2009 (A1:00-2:00, T10:00-11:00, A13:00-14:00, T22:00)



Figure D.10 Time analysis of Fire hot spot data in Thailand during 2005-2009.

Note: A = Aqua satellite, T = Terra satellite

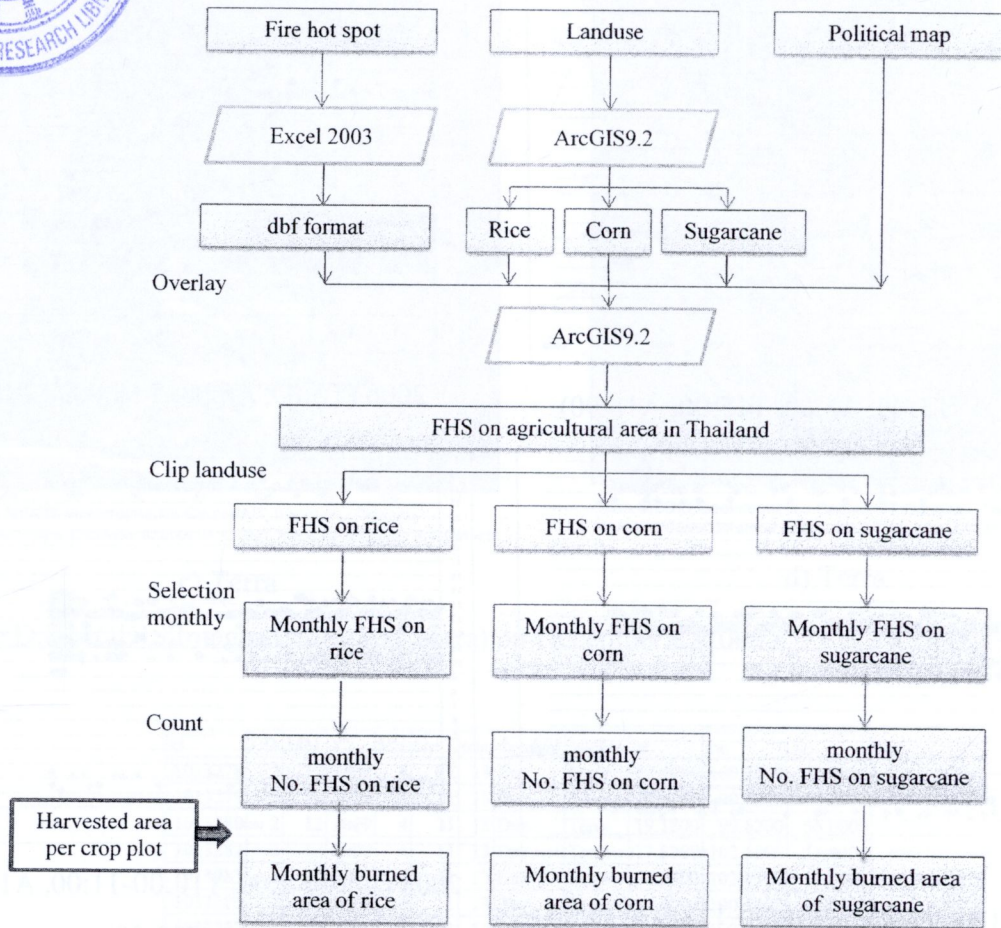


Figure D.11 Summary of methodology for estimating burned area by remote sensing data.



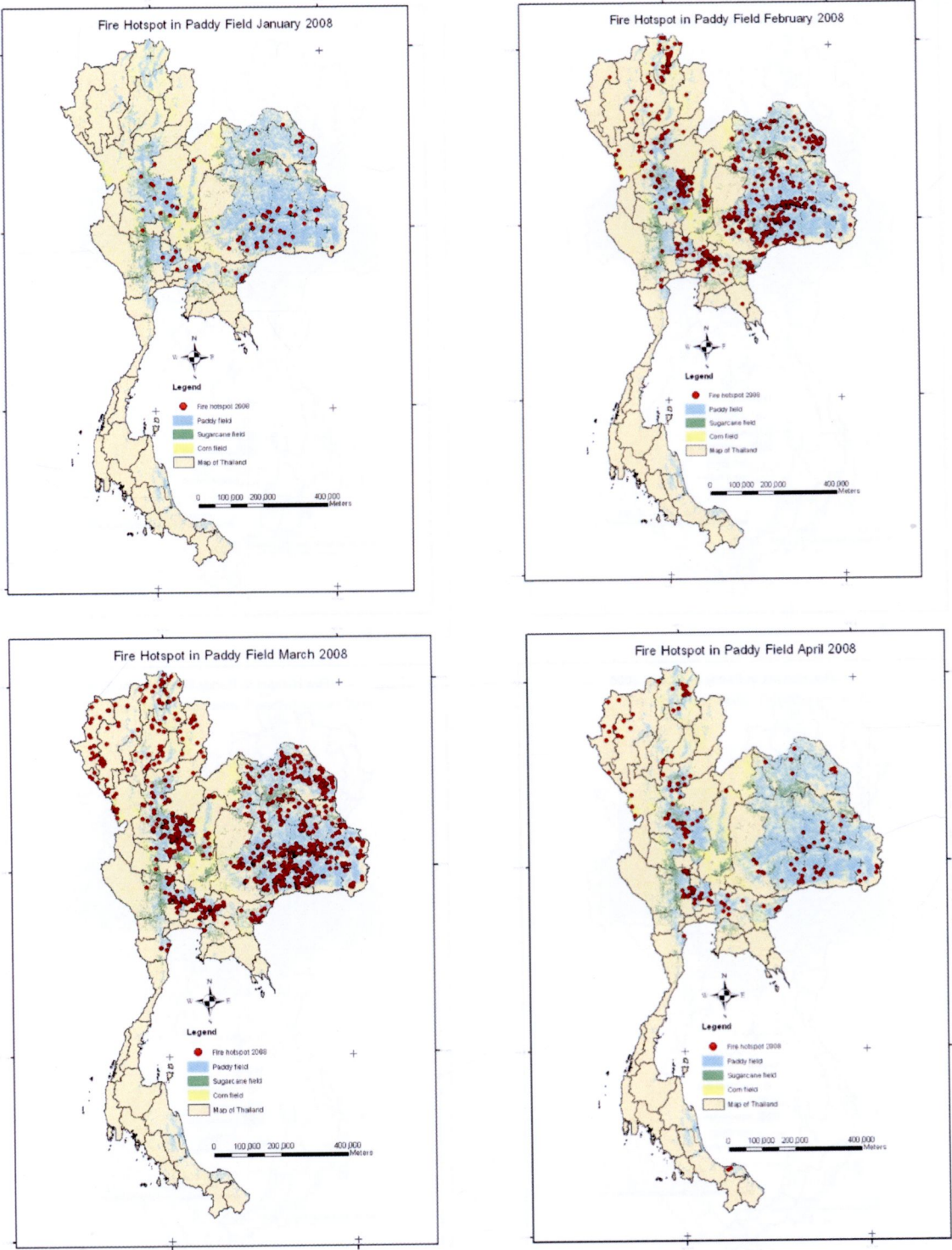


Figure D.12 Spatial distribution of FHS on paddy field in Thailand year 2008.

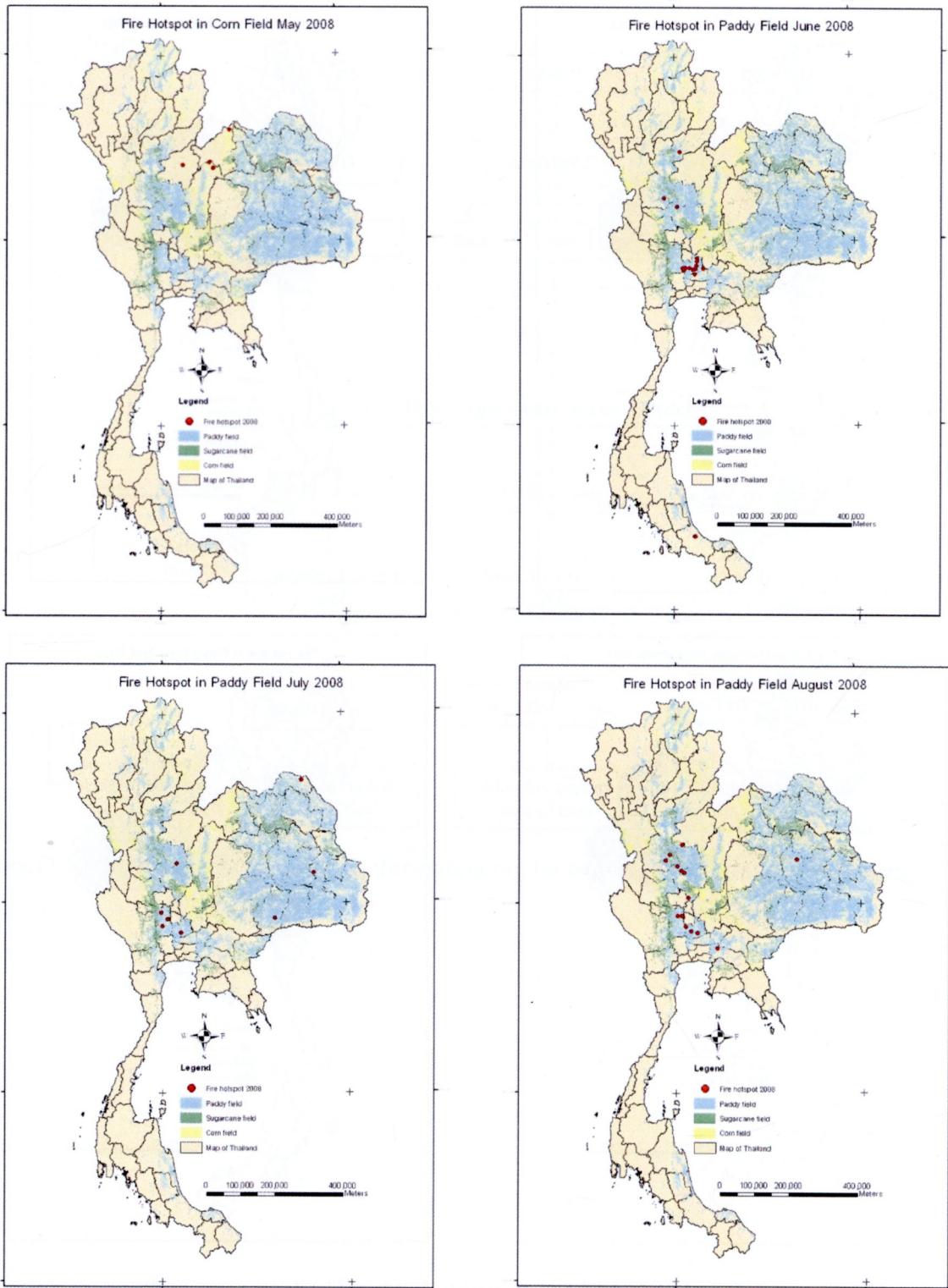


Figure D.12 Spatial distribution of FHS on paddy field in Thailand year 2008 (continued).

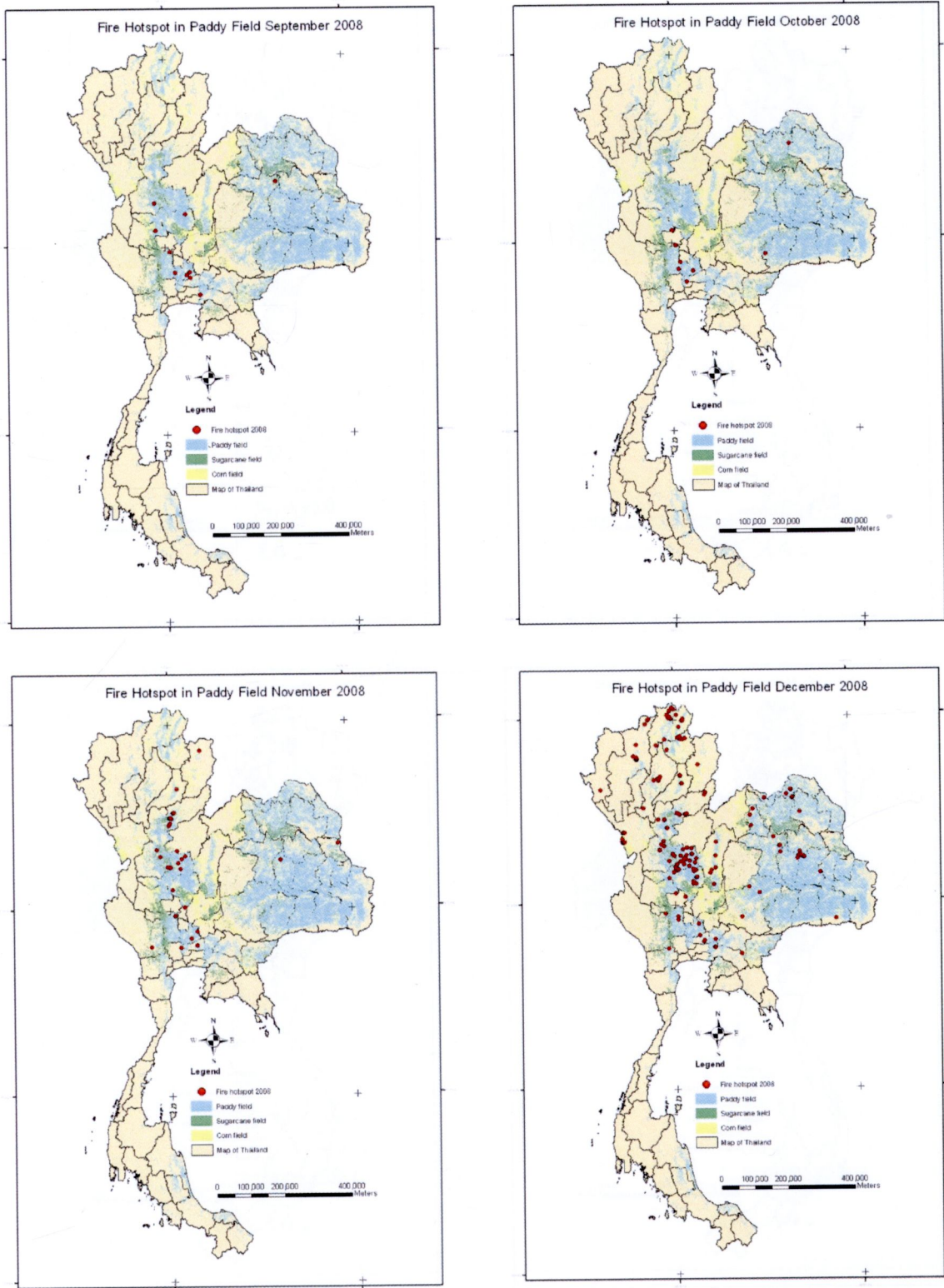


Figure D.12 Spatial distribution of FHS on paddy field in Thailand year 2008 (continued).

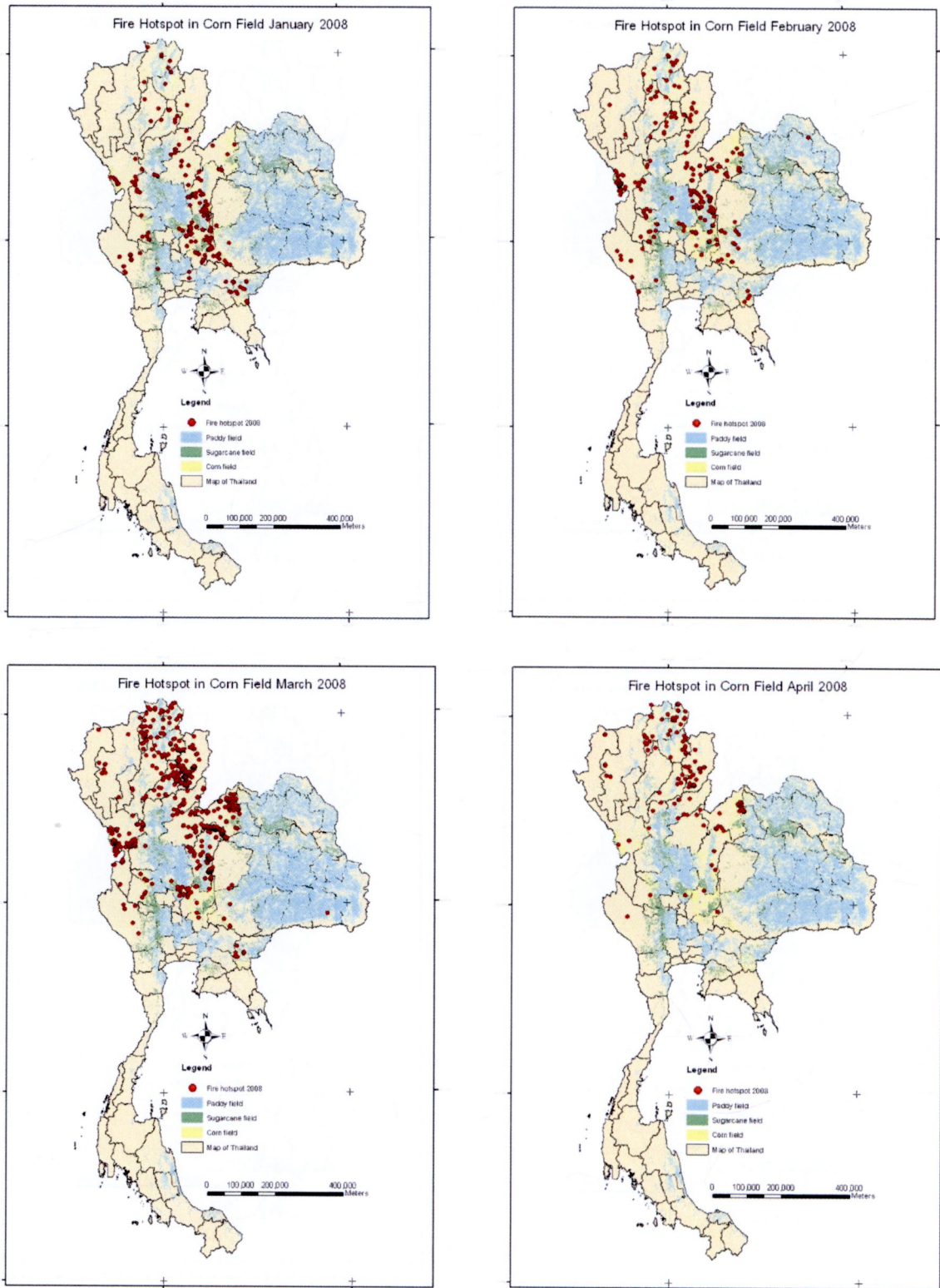


Figure D.13 Spatial distribution of FHS on corn field in Thailand year 2008.

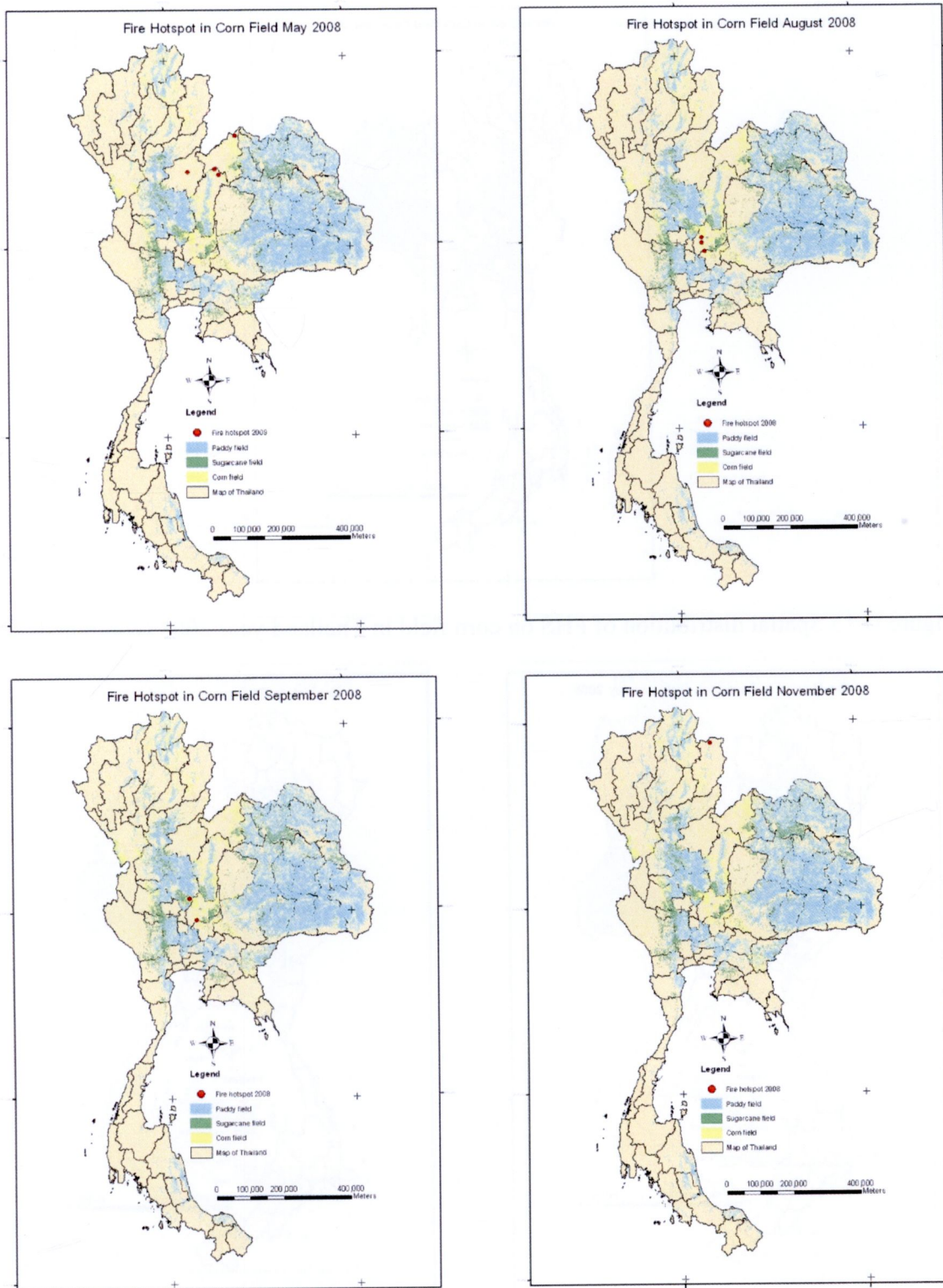


Figure D.13 Spatial distribution of FHS on corn field in Thailand year 2008 (continued).

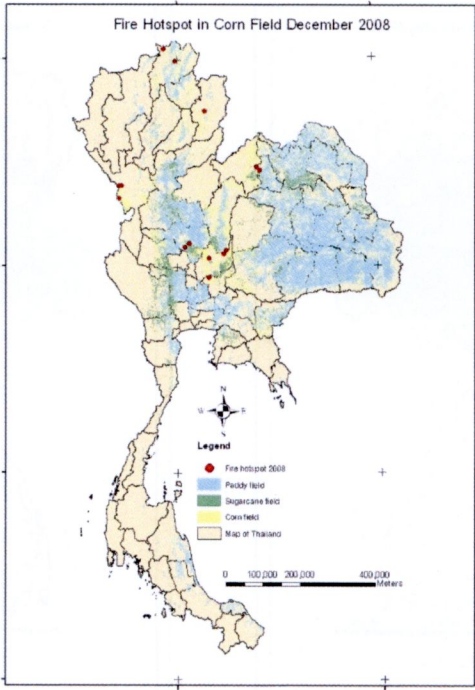


Figure D.13 Spatial distribution of FHS on corn field in Thailand year 2008 (continued).

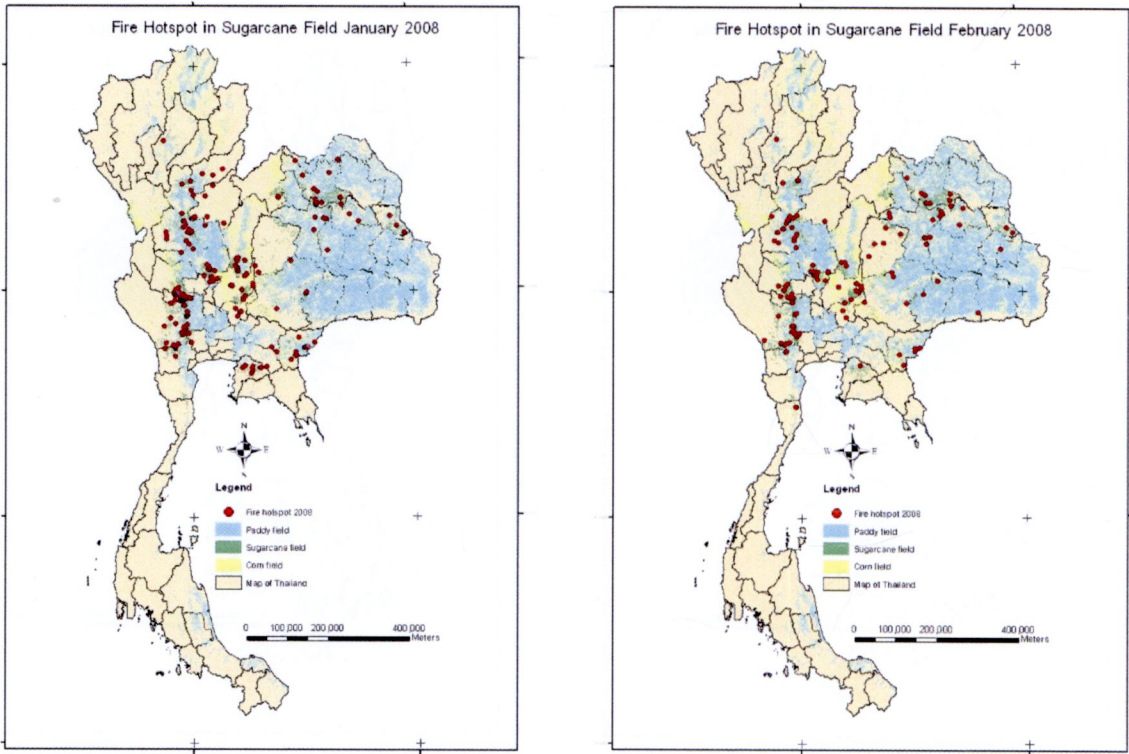


Figure D.14 Spatial distribution of FHS on sugarcane field in Thailand year 2008.

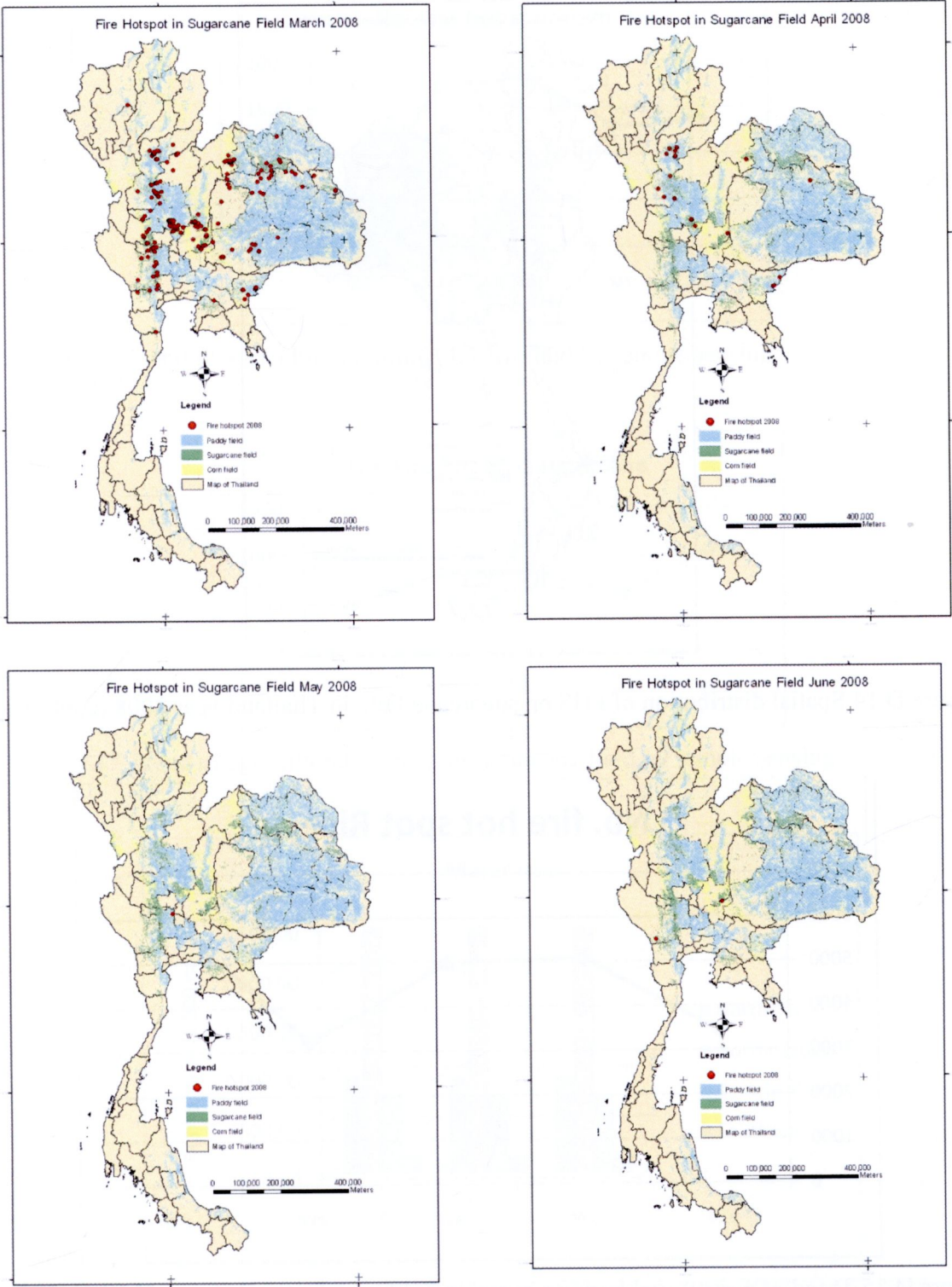


Figure D.14 Spatial distribution of FHS on sugarcane field in Thailand year 2008 (continued).

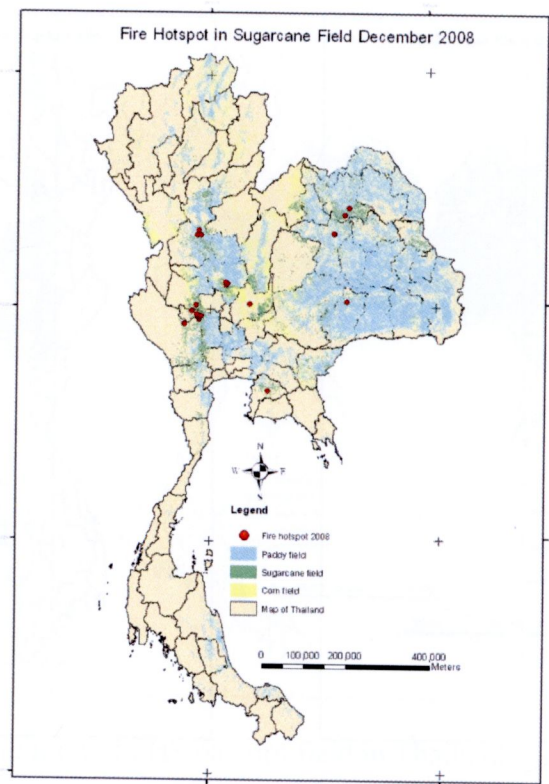


Figure D.14 Spatial distribution of FHS on sugarcane field in Thailand year 2008 (continued).

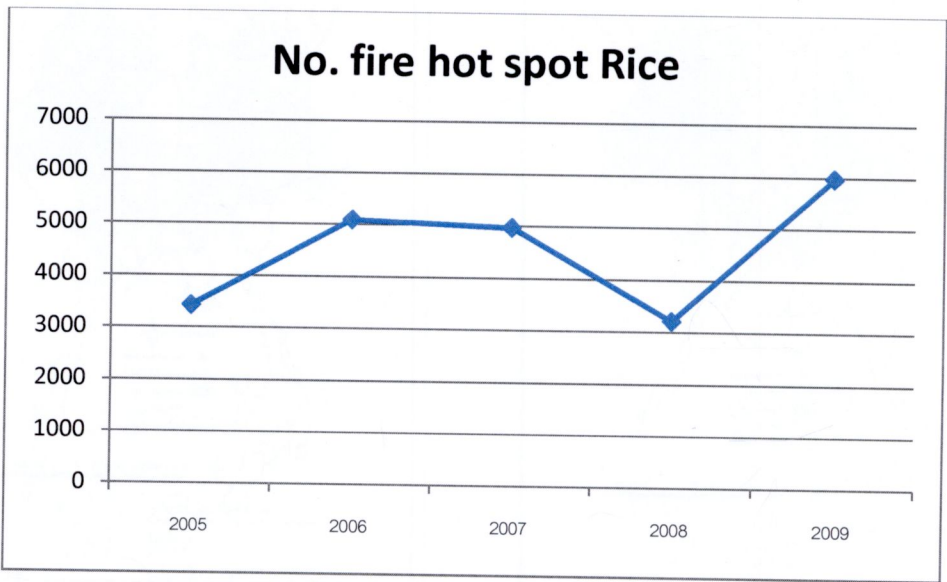


Figure D.15 Trend of agricultural burning in paddy field by remote sensing.

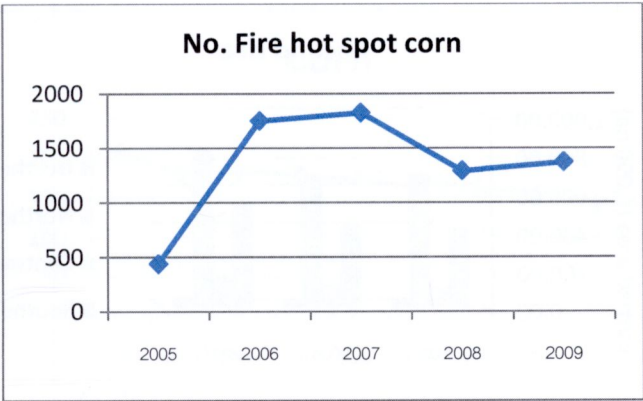


Figure D.16 Trend of agricultural burning in corn field by remote sensing.

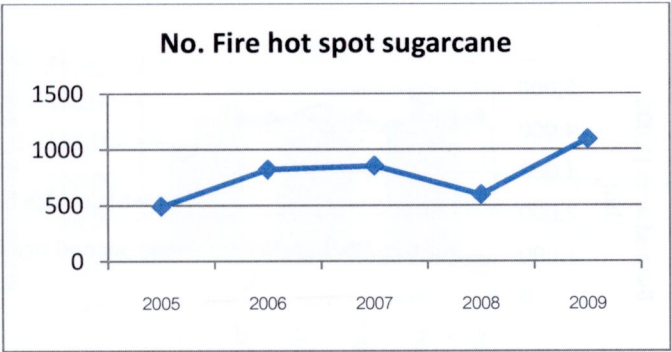


Figure D.17 Trend of agricultural burning in sugarcane field by remote sensing.

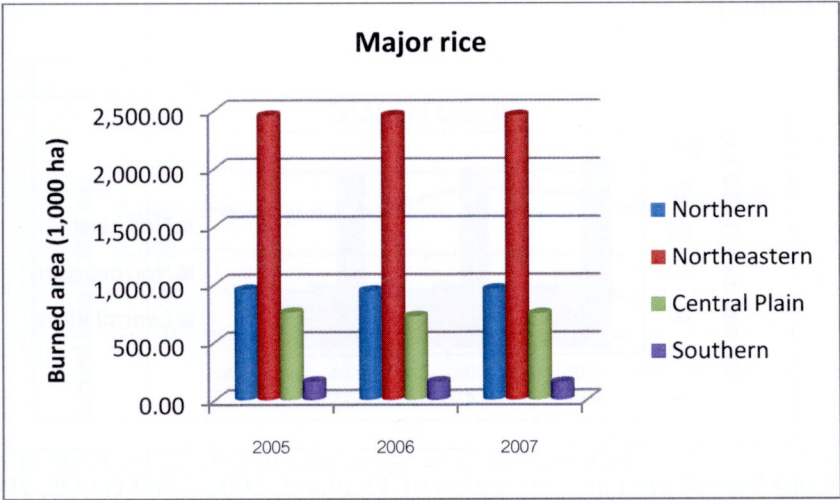


Figure D.18 Major rice burned area in each region of Thailand, 2005-2007 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

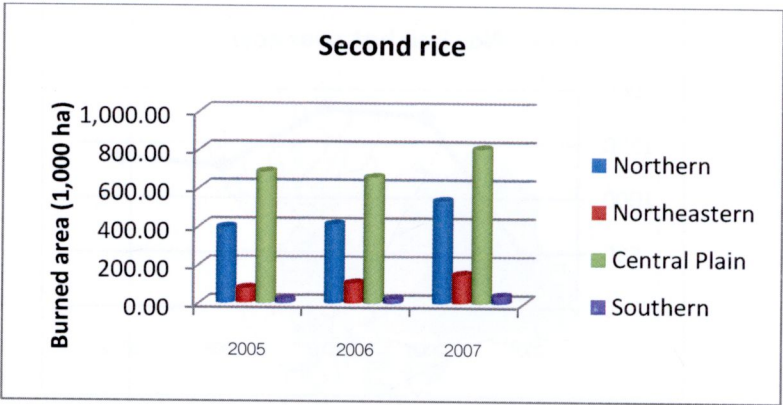


Figure D.19 Second rice burned area in each region of Thailand, 2005-2007 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

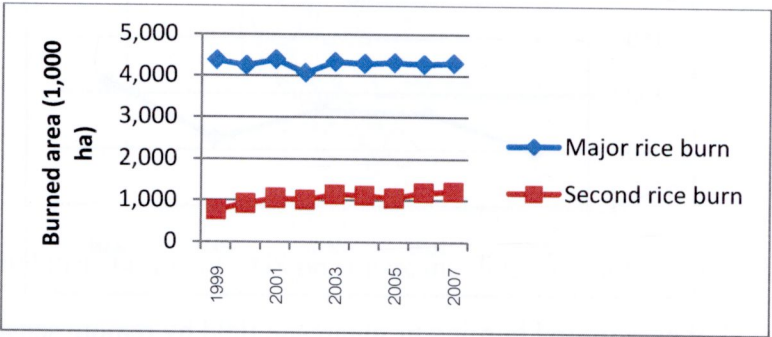


Figure D.20 Statistic burned area of major and second rice field in Thailand, 1999-2007 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

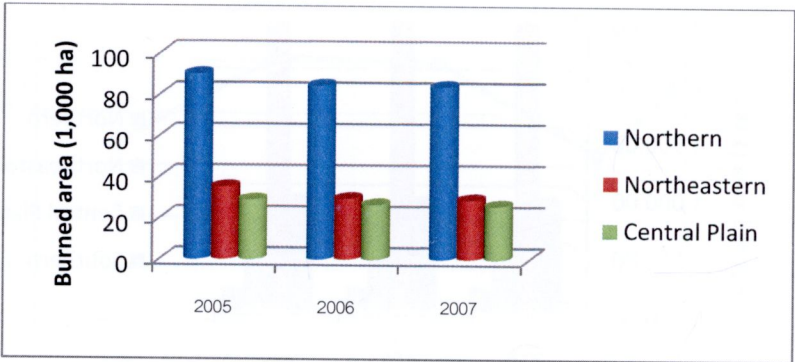


Figure D.21 Corn burned area in each region of Thailand, 2005-2007 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

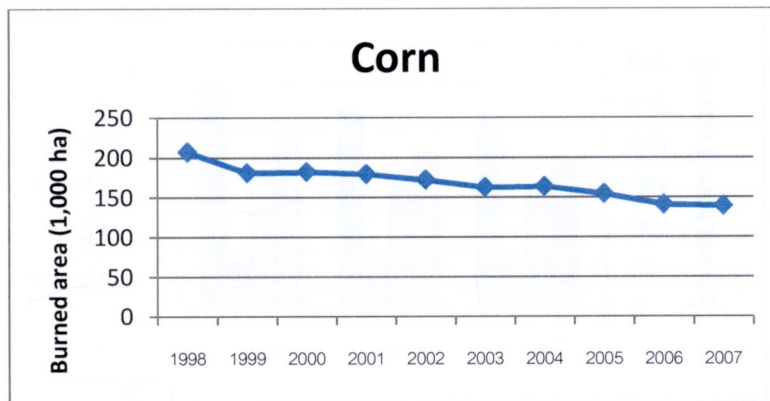


Figure D.22 Statistic burned area of corn field in Thailand, 1998-2007 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

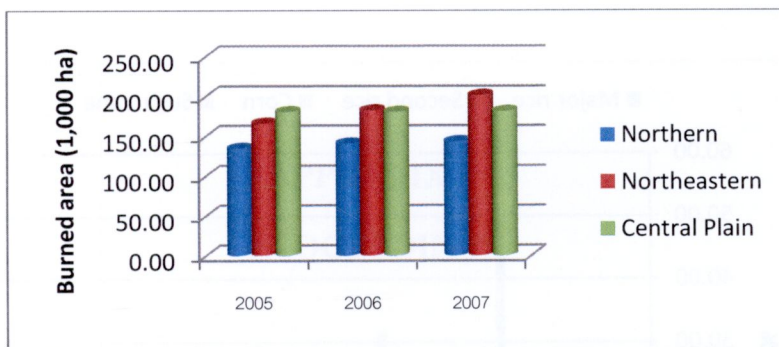


Figure D.23 Sugarcane burned area in each region of Thailand, 2005-2007 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

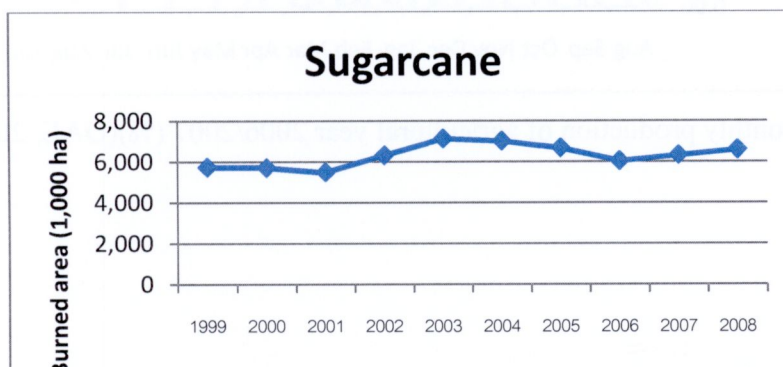


Figure D.24 Statistic burned area of sugarcane field in Thailand, 1999-2008 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

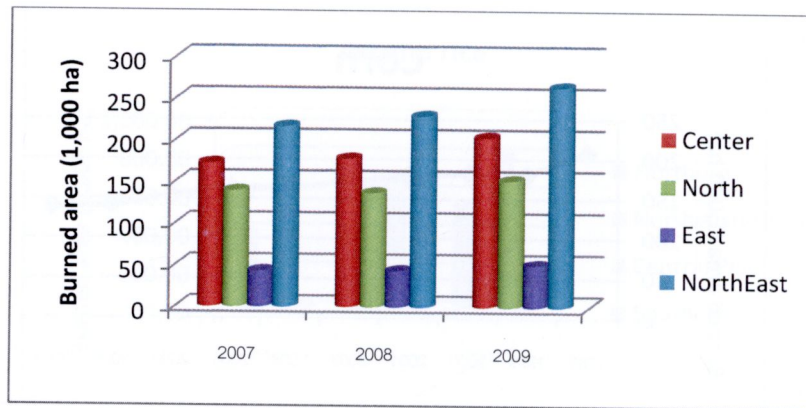


Figure D.25 Sugarcane burned area in each region of Thailand, 2007-2009 (OAE, 2008 and PCD, 2007).

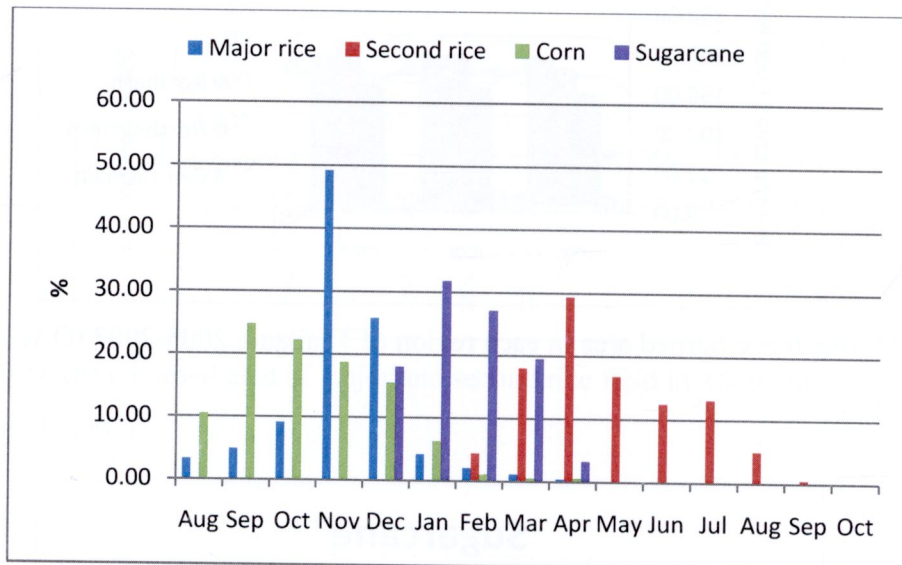


Figure D.26 Monthly production of agricultural year 2006/2007 (%) (OAE, 2008).

APPENDIX E

PROCEEDINGS

การปลดปล่อยฝุ่นละอองจากการเผาเศษวัสดุการเกษตรในที่โล่ง ในพื้นที่นาข้าวของประเทศไทย

Emission Factors of Particulate Matter Emission from Rice Field Residues Open Burning in Thailand

ชนิษฐา กนกกาญจนนา¹ และ สาวิตรี การ์เวทย์¹

¹ บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เลขที่ 126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีพื้นที่นา 64 ล้านไร่ หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 และข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่มีการส่งออกในระดับต้นๆ ของโลก หลังการเก็บเกี่ยว เศษวัสดุที่เกิดขึ้น เช่น ฟางข้าว จะถูกเผาในพื้นที่เพาะปลูกเพราะการเผาเป็นการกำจัดเศษวัสดุที่มีความสะดวก รวดเร็ว และโดยเฉพาะประหยัด ทำให้ชาวนาสามารถเตรียมพื้นที่เพาะปลูกรอบใหม่ได้อย่างทันทั่วทั้งที่ แต่มีข้อเสียสำคัญ คือ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศและสารที่ก่อให้เกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ เช่น ก๊าซเรือนกระจก (CO_2 , CH_4 , N_2O) และฝุ่นละอองขนาดเล็ก เป็นต้น

ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($\text{PM}_{2.5}$) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในควันที่เกิดจากการเผาดอซังฟางข้าวในที่โล่งในพื้นที่นาข้าวของประเทศไทย เพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อย (emission factor, EF $\text{PM}_{2.5}$) ของฝุ่นละอองขนาดเล็ก และตรวจวัดปริมาณดอซังฟางข้าวที่เป็นเชื้อเพลิงในการเผา เพื่อใช้ประกอบกับค่าสัมประสิทธิ์ในการประเมินปริมาณฝุ่นละอองที่ถูกปล่อยจากการเผาเศษวัสดุการเพาะปลูกข้าวในที่โล่งในพื้นที่การเกษตรของประเทศไทย จากผลการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมีค่า $\text{PM}_{2.5}$ 13.64 ± 6.85 g/kg หรือ 5.96 ± 2.99 g/m² เมื่อทราบปริมาณพื้นที่นาที่ถูกเผาหลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉลี่ยในแต่ละปี ซึ่งมีค่าประมาณ 35 ล้านไร่ พบว่าฝุ่นละอองที่ปล่อยจากการเผาดอซังฟางข้าวในที่โล่งในพื้นที่เกษตรมีปริมาณ 328,707 ตันต่อปี ซึ่งมากกว่าการปล่อยฝุ่นละอองจากการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินขนาด 2,400 MW ถึง 171 เท่า

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อย ฝุ่นละอองขนาดเล็ก การเผาชีวมวลในที่โล่ง ดอซัง ฟางข้าว

Abstract

Paddy fields cover an area of 10 million ha or 20% of Thailand, which rice is a major economic crop that has been exported in the initial rank of the world. After harvesting, most rice residues (i.e. rice straw) are burned in paddy field area to prepare the land because burning is convenient, quickly, and especially low cost to remove those residues. However, rice residue open burning releases air pollutants

and substances that cause in climate change i.e. greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , and N_2O) and fine particulate matter.

This study has measured concentration of fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) and gases (CO_2 and CO) in the plume that released from rice straw and rice stubble open burning in paddy field, Thailand to evaluate emission factor (EF $\text{PM}_{2.5}$). Biomass load of rice straw and rice stubble, which is fuel in this open burning, has been measured to be used as a part in evaluation of EF $\text{PM}_{2.5}$ from rice residues open burning in paddy field area in Thailand. Results of this study were found that EF $\text{PM}_{2.5}$ is 13.64 ± 6.85 g/kg or 5.96 ± 2.99 g/m². This EF value can estimate annual emission from area burned. Paddy field area burned from statistical data is 5 million ha/y, which release aerosols from rice straw and rice stubble open burning in the field for 328,707 ton/y. This annual PM emission from rice residues open burning is higher than PM released from 2,400 MW coal-fired power plants for 171 times.

1. ความสำคัญ

ประเทศไทยมีพื้นที่นา 64 ล้านไร่ หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 20 และข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่มีการส่งออกในระดับต้นๆ ของโลก (OAE, 2006) หลังการเก็บเกี่ยวเศษวัสดุที่เกิดขึ้น เช่น ฟางข้าว จะถูกเผาในพื้นที่เพาะปลูกเพราะการเผาเป็นการกำจัดเศษวัสดุที่มีความสะดวก รวดเร็ว และโดยเฉพาะประหยัด ทำให้ชาวนาสามารถเตรียมพื้นที่เพาะปลูกรอบใหม่ได้อย่างทันท่วงที แต่มีข้อเสียสำคัญ คือ การปลดปล่อยมลพิษทางอากาศและสารที่ก่อให้เกิดสภาวะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ เช่น ก๊าซเรือนกระจก (CO_2 , CH_4 , N_2O) และฝุ่นละอองขนาดเล็ก เป็นต้น (Levine, 1991)

จากการเผาเศษวัสดุการเกษตรในที่โล่งในพื้นที่นาข้าวทำให้เกิดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ($\text{PM}_{2.5}$) ประกอบด้วย Black Carbon (BC) ที่เกิดจากการเผาไหม้ขณะที่เกิดเปลวไฟ เป็นส่วนของฝุ่นที่เกิดการดูดกลืนแสงทำให้โลกร้อนขึ้น และเกิดผลกระทบในหลายระดับเช่นเดียวกับก๊าซเรือนกระจก (IPCC, 2001) ในระดับท้องถิ่นควันที่เกิดขึ้นมีผลกระทบต่อทัศนวิสัย ส่วนในระดับภูมิภาคและระดับโลกทำให้เกิดปัญหาหมอกพิษหมอกควันข้ามแดน (PCD, 2005)

2. วัตถุประสงค์

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาเพื่อประเมินค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อย (emission factor, EF $\text{PM}_{2.5}$) ฝุ่นละอองขนาดเล็กจากการเผาเศษวัสดุการเกษตรในที่โล่งในพื้นที่นาข้าวของประเทศไทย และตรวจวัดปริมาณเศษวัสดุการเกษตรในพื้นที่นาข้าวที่เป็นเชื้อเพลิงในการเผา

3. วิธีการศึกษา

ระเบียบวิธีวิจัยที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่บนพื้นฐานการประเมินปริมาณชีวมวลที่ถูกเผา และคุณลักษณะของการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการเผาชีวมวลในนาข้าว ดังสมการ

$$E = M \times EF \quad (1)$$

E = ค่าการปลดปล่อยมลพิษ (g)

M = ปริมาณเศษวัสดุการเกษตรที่เป็นเชื้อเพลิงในการเผา (kg)

EF = ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยมลพิษต่อปริมาณเศษวัสดุทางการเกษตรที่ถูกเผา (g/kg)

โดยในงานวิจัยนี้ตรวจวัดค่า E และ M เพื่อใช้ในการคำนวณ EF ที่สามารถใช้ในพื้นที่ที่มีความคล้ายคลึงกัน ซึ่งค่า EF ไม่สามารถใช้ในพื้นที่ที่มีความแตกต่างกัน เช่น สภาพภูมิอากาศ ภูมิประเทศ พื้นที่ที่มีความแตกต่างกันในพฤติกรรมเฉพาะปลูก การเก็บเกี่ยว และการเผา เป็นต้น

ปริมาณเศษวัสดุการเกษตรที่เป็นเชื้อเพลิงในการเผา (M) สามารถประเมินจากพื้นที่ที่ถูกเผา ดังสมการ

$$M = A \times BL \times CE \quad (2)$$

A = พื้นที่ที่ถูกเผา (m^2)

BL = ปริมาณเศษวัสดุการเกษตรในตนา (g/m^2)

CE = สัดส่วนเศษวัสดุการเกษตรที่ถูกเผา (%)

พื้นที่ที่ถูกเผาสามารถประเมินได้จากข้อมูลดาวเทียม หรือสถิติพื้นที่ที่ถูกเผา ซึ่งในพื้นที่นั้นเป็นพื้นที่นาหลังการเก็บเกี่ยวและมีชีวมวล ได้แก่ ฟางข้าว และตอซัง ที่ถูกทิ้งอยู่ในตนาซึ่งอาจมีปริมาณแตกต่างกัน เช่น ปริมาณฟางข้าวขึ้นอยู่กับความสูงของตอซัง พันธุ์ข้าว ความอุดมสมบูรณ์ และระยะเวลาปลูกก็ทำให้ความสูงของต้นข้าวแตกต่างกัน ซึ่งสัดส่วนชีวมวลที่ถูกเผาในตนาส่วนมากเป็นฟางข้าว และส่วนตอซังมักจะถูกเผาส่วนบน ซึ่งการเผาชีวมวลนี้ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศเพื่อทำการประเมินมลพิษทางอากาศจากการเผาชีวมวลในที่โล่ง และประเมินปริมาณชีวมวลที่ถูกเผาจึงทำการทดลอง ดังต่อไปนี้

3.1 พื้นที่ศึกษา

การเลือกพื้นที่ศึกษาพิจารณาจากบริเวณเป็นนาข้าวที่มีการเผาเศษวัสดุหลังการเก็บเกี่ยวในพื้นที่นาที่สามารถเข้าถึงได้ และพิจารณาจังหวัดที่มีพื้นที่ปลูกข้าวมากเป็นอันดับต้นๆ ของประเทศ เพื่อเป็นตัวแทนพื้นที่ศึกษา โดยทำการทดลองที่จังหวัดนครสวรรค์ซึ่งมีพื้นที่ปลูกข้าวมากเป็นอันดับ 1 ในภาคกลางมีพื้นที่นา 2.25 ล้านไร่ หรือร้อยละ 37.5 ของจังหวัด (OAE, 2006) จังหวัดนครสวรรค์อยู่ในที่ราบลุ่มภาคกลางซึ่งนาข้าวมีทั้งในเขตชลประทาน และนอกเขตชลประทาน พื้นที่ศึกษาอยู่นอกเขตชลประทาน ในอำเภอท่าตะโก ตำแหน่งพิกัดละติจูด E100.53 ลองจิจูด N15.70 ในรอบการทำงานนี้ชาวนาปลูกข้าวพันธุ์ C85 ระยะเวลาปลูก 120 วัน ซึ่งมีการทำนาโดยการหว่าน อาศัยแหล่งน้ำจากน้ำฝนจึงทำนาเพียงหนึ่งครั้งต่อปี มีการใช้ปุ๋ยเคมี ยากำจัดศัตรูพืชและวัชพืช และใช้เครื่องจักรในการเก็บเกี่ยว มีการใช้ประโยชน์เศษวัสดุหลังการเก็บเกี่ยวปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณฟางในบริเวณนี้ โดยการปล่อยวัชพืชเข้าไปกินหญ้าในตนา ซึ่งเศษวัสดุส่วนใหญ่จะถูกเผาเพื่อตัดหญ้าในนา

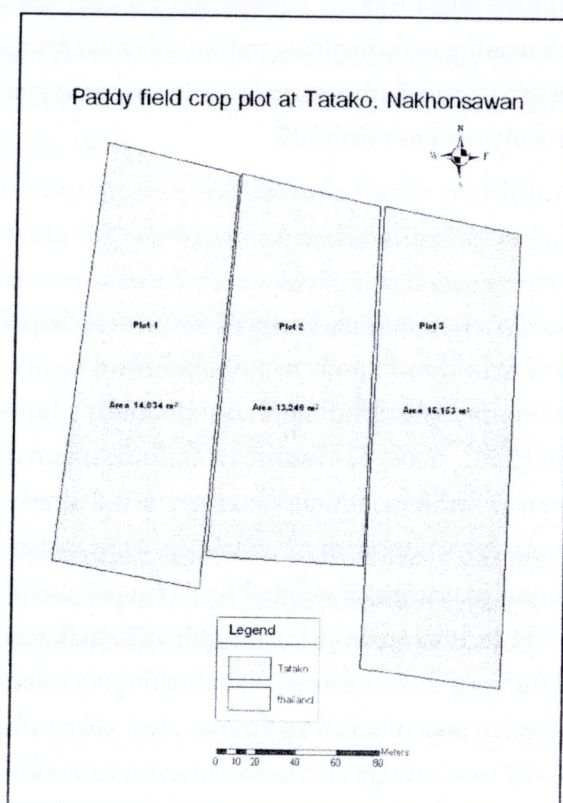
งานวิจัยนี้ทำการทดลองภาคสนามในวันที่ 29 ธันวาคม 2552 หลังการเก็บเกี่ยว 9 วัน เศษวัสดุในนาข้าวมีสภาพแห้งซึ่งสามารถติดไฟได้ โดยส่วนใหญ่ชาวนาในเขตชลประทานจะเผาหลังการทำนาไม่เกินสองสัปดาห์เพื่อทำการเตรียมพื้นที่สำหรับการทำนาครั้งต่อไป จึงทำการทดลองในช่วงเวลาดังกล่าวเพื่อดำเนินการเก็บข้อมูลสำหรับประเมินการปล่อยมลพิษทางอากาศจากการเผาชีวมวลในตนา

ในการนี้ได้ทำการทดลอง 3 แปลง เนื่องจากมีปัจจัยที่มีอิทธิพลในภาคสนามทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง จึงทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อศึกษาช่วงความคลาดเคลื่อนการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศจากการเผา แปลงทดลองแต่ละแปลงมีพื้นที่ขนาดประมาณ 10 ไร่ โดยมีถนนดินลูกรังขนาดเล็กเข้าถึง พาหนะที่ผ่านเป็นรถมอเตอร์

ไซด์ รถกระบะ และเครื่องจักรการเกษตร พื้นที่โดยรอบเป็นนาข้าวทั้งหมดห่างจากพื้นที่ชุมชนจึงไม่ค่อยมีพาหนะผ่านไปมามากนัก ทำให้ไม่มีแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่สำคัญแหล่งอื่นในบริเวณนี้ ลักษณะโดยรอบพื้นที่ศึกษาแสดงดังภาพที่ 1 รายละเอียดของแปลงทดลองทั้งสามแปลงจากผลการตรวจวัดโดยเครื่อง GPS (GARMIN รุ่น GPSmap60Csx) แสดงดังภาพที่ 2



รูปที่ 1 บริเวณโดยรอบพื้นที่ศึกษา อำเภอนาทะโก จังหวัดนครสวรรค์



รูปที่ 2 แปลงทดลองนาข้าว อำเภอนาทะโก จังหวัดนครสวรรค์

จากภาพที่ 2 พื้นที่ทดลองประกอบด้วยนาสามแปลงอยู่ติดกันโดยทิศเหนือและตะวันตกติดกับถนนลูกรัง ส่วนทิศใต้และตะวันออกติดกับที่นา แปลงทดลองที่ 1 อยู่ทางทิศตะวันตกมีพื้นที่ขนาด 14,034 m² แปลงทดลองที่ 2 อยู่

ตำแหน่งกลางมีพื้นที่ขนาด $13,240 \text{ m}^2$ และแปลงทดลองที่ 3 อยู่ทางทิศตะวันออกมีพื้นที่ขนาด $15,153 \text{ m}^2$ ซึ่งเริ่มการทดลองด้วยการเก็บตัวอย่างชีวมวลในแปลงทดลองทั้ง 3 แปลง

3.2 การเก็บตัวอย่างชีวมวลในนาข้าว

การเก็บตัวอย่างชีวมวลในนาข้าวทำสองครั้งคือ ก่อนเผา และหลังเผาเศษวัสดุในนาข้าว เพื่อพิจารณาสัดส่วนชีวมวลที่ถูกเผาจริง และใช้ในการประกอบการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษ โดยทำการเก็บตัวอย่างดังนี้

3.2.1 การเก็บตัวอย่างเศษวัสดุก่อนเผา

เศษวัสดุที่เหลืออยู่ในพื้นที่นาหลังการเก็บเกี่ยว ได้แก่ ฟางข้าว และตอซัง โดยฟางจากสองแถวจะถูกพ่นออกจากรถเกี่ยวข้าวและวางเป็นแถวเดี่ยวขนาดกว้างประมาณ $100 \pm 20 \text{ cm}$ ดังภาพที่ 1 การเก็บตัวอย่างเพื่อหาคอร์บคลุมปริมาณฟางทั้งในแถวและระหว่างแถวเพื่อใช้ประเมินปริมาณฟางเฉลี่ยต่อพื้นที่ จึงเก็บตัวอย่างในพื้นที่ขนาด $1 \times 2 \text{ m}^2$ โดยแนวยาว 2 m จะครอบคลุมแถวและระหว่างแถว ตัวอย่างฟางข้าวคือส่วนที่ถูกตัดและวางทิ้งไว้ในนาจะเก็บใส่ถุงตัวอย่างดังภาพที่ 3 ส่วนตัวอย่างตอซังซึ่งเป็นส่วนที่ติดอยู่กับพื้นดินถูกเก็บโดยใช้เคียวตัดเสมอระดับพื้นดินในพื้นที่ขนาด $50 \times 50 \text{ cm}^2$ บรรจุในถุงอีกถุงหนึ่งแยกจากฟางข้าว การเก็บตัวอย่างตอซังในพื้นที่ขนาดเล็กกว่าเนื่องจากชาวนาปลูกข้าวโดยการหว่านความหนาแน่นของตอซังจึงมีความสม่ำเสมอทั้งแปลง จากนั้นทำการวัดความยาวตอซังซึ่งมีผลต่อปริมาณฟางข้าวหรือชีวมวลส่วนใหญ่ที่ถูกเผา และนับจำนวนต้นเพื่อวัดความหนาแน่นของต้นข้าว ทำการเก็บตัวอย่างซ้ำ 2 ครั้ง ในแต่ละแปลงทดลองทั้งสามแปลง ตัวอย่างทั้งหมดถูกชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักเป็ยกก่อนนำกลับไปห้องปฏิบัติการเพื่อทดลองหาความชื้นและคำนวณน้ำหนักแห้ง การหาความชื้นทำโดยการสุ่มตัวอย่างฟางข้าว และตอซังประมาณ 50 g ซึ่งน้ำหนักก่อนอบที่จะนำไปเข้าตู้อบอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 hr จากนั้นชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่งบันทึกน้ำหนักแห้ง และนำตัวอย่างนั้นไปบดเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนโดยการวิเคราะห์ธาตุเคมี (Elemental analysis) ด้วย Flash EA 1112 NC Analyzers (ThermoFisher SCIENTIFIC, UK) ที่ 950°C

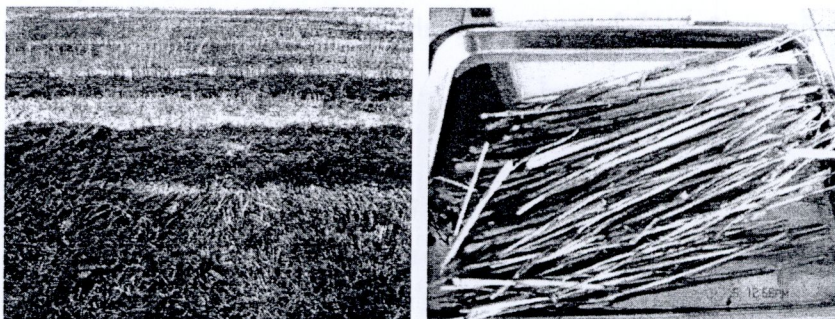


รูปที่ 3 การเก็บตัวอย่างฟางข้าวในที่นา

3.2.2 การเก็บตัวอย่างเศษวัสดุหลังเผา

เศษวัสดุที่เหลือหลังการเผา ได้แก่ ตอซังส่วนที่ไม่ถูกเผา (Unburn) และเถ้า (Ash) ซึ่งมีลักษณะสีดำดังภาพที่ 4 พื้นที่ เก็บตัวอย่างทั้งตอซังส่วนที่ไม่ถูกเผา และเถ้าในมีขนาด $50 \times 50 \text{ cm}^2$ โดยเก็บเฉพาะในบริเวณที่ถูกเผา ตัวอย่างทั้งหมดถูกชั่งน้ำหนักและบันทึกน้ำหนักเป็ยกก่อนนำกลับไปห้องปฏิบัติการเพื่อทดลองหาความชื้น

โดยการสุ่มตัวอย่างต่อช่วงส่วนที่ไม่ถูกเผาประมาณ 70 g และเก็บประมาณ 15 g ซึ่งน้ำหนักก่อนนำเข้าตู้อบอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 24 hr แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อบันทึกน้ำหนักแห้ง จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนในถ้ำโดยการวิเคราะห์ธาตุเคมี (Elemental analysis) ด้วย Flash EA 1112 NC Analyzers (ThermoFisher SCIENTIFIC, UK) ที่ 950°C เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในฟางข้าว และต่อช่วงก่อนเผา



ภาพที่ 4 การเก็บตัวอย่างเศษวัสดุหลังเผาในที่นา

การเก็บตัวอย่างชีวมวลทำให้ทราบปริมาณชีวมวลที่ถูกเผาเพื่อใช้ประกอบในการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การปลดปล่อยมลพิษในอากาศ ซึ่งทำการตรวจวัดดังนี้

3.3 วิธีการตรวจวัดการปลดปล่อยมลพิษในอากาศ

มลพิษที่ทำการตรวจวัดความเข้มข้นอย่างต่อเนื่องขณะเผาได้แก่ $PM_{2.5}$, BC, CO_2 และ CO โดยอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษในอากาศอย่างต่อเนื่องดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

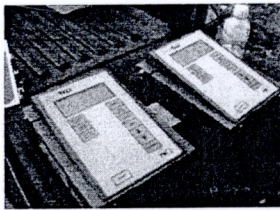
ตารางที่ 1 อุปกรณ์ตรวจวัดมลพิษทางอากาศอย่างต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	อุปกรณ์	บริษัทผู้ผลิต	รุ่น	อัตราการไหล	หลักการ
$PM_{2.5}$	DustTrak	TSI Inc., USA	8520	1.7 L/min	Light scattering
BC	Micro Aethalometer	Magee Scientific Company, USA	AE 51	5 ml/min	Optical absorption
CO_2 , CO	IAQ monitor	Quest Technologies, USA	AQ5000Pro	0-20 m/s	NDIR, Sensor

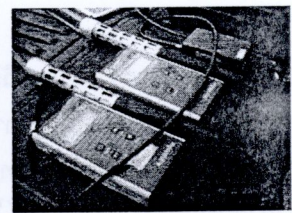
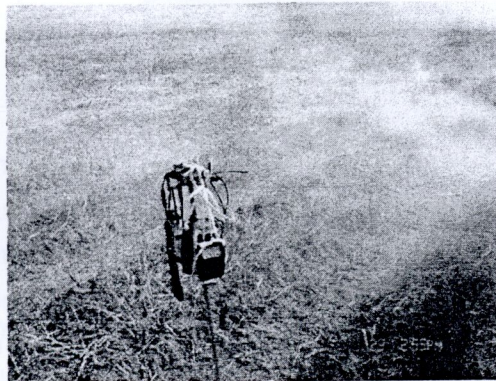
อุปกรณ์ดังกล่าวมีความถี่ในการตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษทุก 1 วินาที เริ่มด้วยการตรวจวัดความเข้มข้นในบรรยากาศทั่วไปก่อนที่จะเผาเพื่อใช้อ้างอิง และทำการตรวจวัดความเข้มข้นในขณะที่เผาโดยใช้เสาติดตั้งอุปกรณ์เพื่อให้ปลายของท่อที่จะนำอากาศเข้าสู่เครื่องมือเป็นตำแหน่งเดียวกัน ทำการตรวจวัดในระดับพื้นดินโดยสูงจากพื้นประมาณ 1 เมตร เพื่อป้องกันการตรวจวัดฝุ่นที่เกิดจากพื้นดิน และติดตั้งในตำแหน่งใต้ลมโดยพยายามให้อยู่ในกลุ่มควัน

นอกจากนี้ ยังทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นบนกระดาดทรงชนิด quartz ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 mm ที่เตรียมโดยการอบ 650°C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดคาร์บอนในกระดาดทรง ซึ่งน้ำหนักด้วย Micro balance และเก็บรักษาในตู้ดูดความชื้น ในระหว่างการเผาเศษวัสดุจากนาข้าวทำการเก็บตัวอย่างฝุ่นโดยใช้ปั๊มที่มีอัตราการไหล 10 L/min นำกระดาดทรงกลับมาซึ่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาปริมาณฝุ่นละออง และวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในฝุ่นละอองบนกระดาดทรง (Total carbon, TC) โดยการวิเคราะห์ธาตุเคมี (Elemental analysis) ด้วย Flash EA 1112 NC Analyzers (Thermo Fisher SCIENTIFIC, UK) ที่ 950°C

ตลอดการทดลองได้ทำการตรวจวัดสภาพอุณหภูมิอากาศ ได้แก่ ความเร็วและทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ ด้วยสถานีตรวจวัดอุณหภูมิจากเครื่อง (La Crosse Technology รุ่น WS1600) โดยบันทึกค่าทุก 1 นาที เนื่องจากสภาพอากาศมีผลต่อการตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษในอากาศ และการเผาไหม้ ซึ่งการเผาฟางในที่นาทำการทดลองโดยเผาทั้งแปลงตามวิธีการเผาจริงของชาวนาโดยไม่มีการควบคุมตัวแปรใดๆ ในที่นา



DustTrak



CO₂ Analyzer,
Micro Aethalometer

ภาพที่ 5 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นมลพิษอย่างต่อเนื่องขณะเผาเศษวัสดุในนาข้าว

3.4 การทดลองเผาเศษวัสดุในนาข้าว

การเผาเศษวัสดุในที่นาส่วนใหญ่ชาวนาจะทำในเวลาสายถึงบ่ายซึ่งฟางข้าวแห้งจากน้ำค้างและสามารถติดไฟได้ การจุดไฟจะเริ่มจากบริเวณไถลมเพื่อป้องกันการลุกลามควันไฟโดยชาวนายืนในทิศเหนือลมให้ไฟลามตามแนวฟางแล้วจุดบริเวณต่อไปเหนือลมไปเรื่อยๆ ซึ่งชาวนาต้องจุดไฟเป็นช่วงๆ เนื่องจากแถวของฟางไม่ต่อเนื่องกัน ในการทดลองเริ่มเผาจากทิศเหนือไปทิศใต้โดยลมส่วนใหญ่พัดจากทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ การเผาเศษวัสดุในการทดลองทั้งสามแปลงแสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การทดลองเผาเศษวัสดุในนาข้าว (จากซ้าย แปลงที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ)

การทดลองที่ 1 เริ่มจากแปลงที่ 2 ความเร็วลมเฉลี่ย 2.79 m/s 36°C 45%RH เริ่มจุดไฟจากทางทิศเหนือ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษอยู่บริเวณแปลงทดลองที่ 3 และเดินตามควันไปตามแนวเหนือลงใต้เนื่องจากทิศทางลมพัดตามแนวขวางของแปลง

การทดลองที่ 2 เผาเศษวัสดุในแปลงที่ 1 ความเร็วลมเฉลี่ย 2.57 m/s 35°C 47%RH เริ่มจุดไฟจากทางทิศเหนือ ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษอยู่บริเวณทิศเหนือบนถนนลูกรัง เนื่องจากทิศทางลมพัดตามแนวยาวของแปลง

การทดลองที่ 3 เผาเศษวัสดุในแปลงที่ 3 ความเร็วลมเฉลี่ย 1.73 m/s 32°C 56%RH เริ่มจุดไฟจากทางทิศเหนือแต่ก่อนไปทางตอนกลางของที่นาเนื่องจากชาวนามีการเผาไปแล้วบางส่วน ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษอยู่บริเวณทิศเหนือบนถนน เนื่องจากลมพัดตามแนวยาวของแปลง แต่ความเร็วลมต่ำควันส่วนใหญ่จึงลอยตัวสูงขึ้นในแนวตั้ง อุปกรณ์จึงไม่อยู่ในกลุ่มควัน

ตัวแทนการตรวจวัดที่ดีที่สุดคือ การทดลองที่ 1 ในแปลงทดลองที่ 2 เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดอยู่ในกลุ่มควันตลอดเวลา จากการทดลองในที่นามีปัจจัยภาคสนามที่ไม่สามารถควบคุมได้ทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง จึงเก็บตัวอย่างชีวมวลเพื่อทดลองเผาในเตาจำลองการเผา ดังนี้

3.5 การทดลองการเผาเศษวัสดุโดยเตาจำลองการเผาในที่โล่ง

เศษวัสดุที่ใช้ในการจำลองการเผา ได้แก่ ฟางข้าว ที่เป็นส่วนใหญ่ที่ถูกเผาในที่นาจากผลการทดลองภาคสนาม งานวิจัยนี้ทำการทดลองในเตาจำลองการเผาในที่โล่งโดยการออกแบบเตาให้มีลักษณะไม่มีการเพิ่มอากาศเพื่อช่วยในการเผาไหม้ ไม่เป็นระบบปิดบริเวณที่เกิดการเผา ทำการเผาในกรอบพื้นที่ $1 \times 1 \text{ m}^2$ ข้อดีของการทดลองในเตาเผาที่แตกต่างจากการทดลองภาคสนาม คือ ทราบปริมาณชีวมวลที่แน่นอน สามารถทำการตรวจวัดในกลุ่มควันได้ มีการควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากลักษณะพื้นที่ และอุณหภูมิวิทยาที่เกี่ยวข้องในระดับหนึ่ง

เตาจำลองการเผาดังกล่าวติดตั้ง ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตราชบุรี ซึ่งมีลักษณะดังนี้ บริเวณที่เผามีขนาด $1 \times 1 \text{ m}^2$ ทำจากเหล็กแผ่นดำสำหรับกันลมสามด้าน อีกด้านเปิดโล่ง มีถาดทำจากเหล็กแผ่นดำสำหรับรองรับชีวมวลในการเผา ด้านบนเป็นปล่องควันสังกะสีสี่เหลี่ยมขนาด $25 \times 25 \text{ cm}^2$ ด้านล่างเป็นทรงกรวยคว่ำสูงขึ้นไป 2 m แสดงดังภาพที่ 7 ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของมลพิษในอากาศบริเวณด้านหน้าของเตาด้านที่เปิดอยู่ ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกันกับการทดลองในภาคสนามที่วัดในระดับพื้นดินสูงจากพื้น 1 m การตรวจวัดความเข้มข้นมลพิษทำเช่นเดียวกับในภาคสนามโดยเริ่มจากการตรวจวัดมลพิษในบรรยากาศทั่วไปก่อนเริ่มทดลองและระหว่างที่ทำการเผาซึ่งได้แก่ $\text{PM}_{2.5}$, BC, CO_2 และ CO ตลอดการทดลองทำการบันทึกข้อมูลสภาพอากาศเช่นเดียวกับการทดลองภาคสนามในนาข้าว ได้แก่ ความเร็วและทิศทางลม อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ ด้วยสถานีตรวจวัดอุณหภูมิเคลื่อนที่ การทดลองในเตาจำลองการเผาลำบากกับการทดลองภาคสนาม โดยมีขั้นตอนการทดลอง ดังนี้

การเตรียมชีวมวลเริ่มจากการชั่งน้ำหนักฟางข้าว และวางบนถาดในเตาจำลองการเผาในที่โล่ง ซึ่งได้ทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง การทดลองที่ 1 และ 2 ใช้น้ำหนักฟางข้าว 200 g_{wet} การทดลองที่ 3 และ 4 ใช้น้ำหนักฟางข้าว 500 g_{wet} ซึ่งเป็นน้ำหนักเปียกของฟางข้าวจากการเก็บตัวอย่างภาคสนามในพื้นที่ 1 m^2 จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นมลพิษในอากาศและกระดาษกรองสำหรับเก็บตัวอย่างฝุ่นละอองบริเวณด้านหน้าของเตาด้านที่เปิดอยู่ เริ่มจุดไฟบริเวณใต้กองฟางด้านหน้าคล้ายกับวิธีที่ชาวนาจุดไฟในที่นา จับเวลาการเผาไหม้เพื่อบันทึกอัตราการเผาของปริมาณชีวมวลต่อเวลา (g/s) โดยน้ำหนักชีวมวลเป็นน้ำหนักแห้งซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ตัวอย่างฟางข้าวเพื่อหาน้ำหนักแห้ง ตัวอย่าง ส่วนที่ไม่ถูกเผา และตัวอย่างเถ้าที่เหลือหลังการเผา ตัวอย่างดังกล่าวถูกนำกลับไปที่ห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบหา ความชื้น และวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนวิธีเดียวกันกับการทดลองภาคสนาม คือ อบที่อุณหภูมิ 70°C 24 hr แล้วชั่ง น้ำหนักเพื่อบันทึกน้ำหนักแห้ง และการวิเคราะห์ธาตุเคมี (Elemental analysis, EA) ด้วย Flash EA 1112 NC Analyzers (ThermoFisher SCIENTIFIC, UK) ที่ 950°C



ภาพที่ 7 เตาจำลองการเผาในที่โล่ง

3.6 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

ปริมาณคาร์บอนที่วิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการและจากการตรวจวัดภาคสนามถูกใช้ในการคำนวณเพื่อ ทำสมดุลคาร์บอน ดังนี้

$$C_{\text{input}} = C_{\text{output}}$$
$$C_{\text{biomass}} = C_{\text{ash}} + C_{\text{released}} \quad (3)$$

C_{biomass} คือ ปริมาณคาร์บอนในชีวมวลที่ถูกเผา

C_{ash} คือ ปริมาณคาร์บอนในเถ้า

C_{released} คือ ปริมาณคาร์บอนที่ปล่อยสู่บรรยากาศอยู่ในรูปของก๊าซและฝุ่นละออง

โดยองค์ประกอบคาร์บอนในฝุ่นละอองประกอบด้วย Black carbon (BC) และ Organic Carbon (OC) ซึ่งมีคุณสมบัติการดูดกลืนและการกระจายแสงที่แตกต่างกัน ดังสมการ

$$TC = BC + OC \quad (4)$$

TC คือ คาร์บอนทั้งหมดในฝุ่นละออง

BC คือ Black carbon ที่เกิดจากการเผาไหม้ที่มีเปลวไฟ มีสีดำเป็นส่วนหนึ่งของฝุ่นที่เกิดการดูดกลืนแสงทำให้โลกร้อน ขึ้น ในงานวิจัยนี้ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของ BC ในอากาศด้วย Micro Aethalometer

OC คือ Organic Carbon เป็นส่วนของฝุ่นที่ทำให้เกิดการกระจายแสง เกิดในการเผาไหม้ที่เป็นกลุ่มควันซึ่งจะมี ลักษณะสีเหลืองน้ำตาล

จากการทดลองดังกล่าวทั้งภาคสนาม และเตาจำลองการเผา รวมทั้งในห้องปฏิบัติการได้ผลการศึกษา ดังต่อไปนี้

4. ผลการศึกษา

4.1 การประเมินปริมาณเศษวัสดุในนาข้าว

ปริมาณเศษวัสดุในนาข้าวใช้ในการประเมินปริมาณชีวมวลที่ถูกเผาซึ่งส่วนที่ถูกเผามากในนาข้าวคือ ฟางข้าว และส่วนบนบางส่วนของตอซัง ผลการวิเคราะห์รายงานในหน่วยกรัมของน้ำหนักแห้ง แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณเศษวัสดุในนาข้าว

พารามิเตอร์	แปลงทดลอง 1	แปลงทดลอง 2	แปลงทดลอง 3	ค่าเฉลี่ย
ฟางข้าว (g dry/m ²)	662±37	345±41	304±46	437±166
ความสูงตอซัง (cm)	12.5±2.5	27.5±2.5	21.5±1.5	21±6
ตอซัง (g dry/m ²)	213±71	260±24	260±71	244±64
RPR ฟางข้าว	2.12±0.12	1.10±0.13	0.97±0.15	1.40 ±0.53
RPR ตอซัง	0.68±0.23	0.83±0.08	0.83±0.23	0.78 ± 0.20

หมายเหตุ น้ำหนักข้าวเปลือก 312.5 g/m² (500 ton/rai)

จากตารางที่ 2 ปริมาณฟางข้าวแปรผกผันกับความสูงของตอซัง ถึงแม้ว่าจะเป็นที่น่าที่อยู่ติดกัน ปริมาณฟางในแปลงแรกแตกต่างกันกับแปลงอื่นถึงสองเท่าเนื่องจากความสูงของตอซังน้อยกว่าสองเท่า ดังนั้น พฤติกรรมการเก็บเกี่ยวจึงมีผลต่อปริมาณฟางข้าวซึ่งเป็นเชื้อเพลิงหลักในการเผาในที่นา

4.2 การประเมินปริมาณเศษวัสดุที่เหลือหลังการเผา

หลังการเผาฟางข้าว และตอซังในพื้นที่ พบว่าสัดส่วนที่ถูกเผามากคือฟางข้าว และตอซังส่วนบน ซึ่ง ส่วนเหลืออยู่ในบริเวณที่ถูกเผาคือ เถ้า และเหลือส่วนที่ไม่ถูกเผา (unburn) คือตอซังที่ไหม้ไฟไปบางส่วน ผลการเก็บตัวอย่างดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปริมาณเศษวัสดุที่เหลือหลังการเผา

พารามิเตอร์	แปลงทดลอง 1	แปลงทดลอง 2	แปลงทดลอง 3	ค่าเฉลี่ย
เถ้า (g dry/m ²)	20	40	24	28 ±9
Unburn (g dry/m ²)	57	76	67	67±8
CE ฟางข้าว (%)	100	100	100	100±0
CE ตอซัง (%)	73	71	74	73±2

จากตารางที่ 3 ปริมาณเถ้า และส่วนที่ไม่ถูกเผาแปรผันตามปริมาณฟางข้าวในตารางที่ 2 แต่ไม่มีผลต่อสัดส่วนการเผาไหม้ (CE) ของฟางข้าว และตอซังเนื่องจากสัดส่วนที่ถูกเผาส่วนมากคือฟางข้าวที่อยู่บนตอซัง

4.3 ผลการตรวจวัดการปลดปล่อยมลพิษในอากาศจากการทดลองเผาเศษวัสดุในนาข้าว

ผลการตรวจวัดความเข้มข้น $PM_{2.5}$, BC, CO และ CO_2 จากการทดลองเผาเศษวัสดุในนาข้าวที่จังหวัดนครสวรรค์ทั้งสามแปลง ค่าเฉลี่ยผลการตรวจวัดไม่รวมความเข้มข้นในบรรยากาศ แสดงในตารางที่ 4

จากตารางที่ 4 พบว่าความเข้มข้นมลพิษที่ตรวจวัดในแปลงทดลองที่ 2 มีค่าความเข้มข้นสูงสุดเนื่องจากติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นในตำแหน่งที่อยู่ในกลุ่มควันตลอดเวลา โดยทิศทางลมส่วนใหญ่พัดในแนวขวางของแปลงนาจึงสามารถเดินตามควันไปตามแนวของแปลงทดลอง 3 และระดับความเร็วลมเฉลี่ย 2.79 m/s ทำให้กลุ่มควันอยู่ในแนวนอนและพัดพากลุ่มควันมาถึงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์

ส่วนการทดลองในแปลงทดลอง 1 และ 3 ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นในตำแหน่งที่อยู่บนถนนเนื่องจากทิศทางลมส่วนใหญ่พัดตามแนวยาวของแปลง ความเร็วลมในแปลงทดลอง 1 เฉลี่ย 2.57 m/s ทำให้กลุ่มควันอยู่ในแนวนอนและพัดพากลุ่มควันมาถึงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์มากกว่าแปลงทดลอง 3 ที่มีความเร็วลมเฉลี่ย 1.73 m/s ซึ่งต่ำกว่าทำให้กลุ่มควันลอยสูงขึ้นไปในแนวดิ่งและอุปกรณ์จึงไม่อยู่ในกลุ่มควัน จึงทำให้ผลการตรวจวัดความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่าการทดลองอื่น ดังนั้นปัจจัยด้านสภาพอากาศจึงมีผลต่อการตรวจวัดความเข้มข้นที่เกิดจากการเผาเศษวัสดุในนาข้าว

ตารางที่ 4 ผลการตรวจวัดการปลดปล่อยมลพิษในอากาศจากการทดลองเผาเศษวัสดุในนาข้าว

พารามิเตอร์	Ambient	แปลงทดลอง 1	แปลงทดลอง 2	แปลงทดลอง 3	ค่าเฉลี่ย
$PM_{2.5}$ (mg/m^3)	0.07	32.18	37.58	15.86	28.54 ± 9.23
BC (mg/m^3)	0.02	0.89	1.70	1.56	1.38 ± 0.35
CO (mg/m^3)	0.00	19.04	35.97	16.96	23.99 ± 8.51
CO_2 (mg/m^3)	414	1,145	1,158	941	$1,081 \pm 99$
$PM_{2.5}/CO_2$	0.0002	0.028	0.032	0.017	0.026 ± 0.007
BC/ CO_2	0.00006	0.0008	0.0015	0.0017	0.0013 ± 0.0004
CO/ CO_2	0.00	0.017	0.031	0.018	0.022 ± 0.007
เวลา (min)	-	68	66	54	63 ± 6

ในการทดลองนี้ ทำในช่วงเวลาและสถานที่เดียวกันดังนั้นปัจจัยอื่น เช่น สภาพของชีวมวล ความชื้นของชีวมวล พันธุ์พืช และสภาพภูมิประเทศ ความชื้นของดิน เป็นต้น ไม่มีผลกระทบที่ทำให้เกิดความแตกต่างกันในการทดลองนี้

4.4 ผลการตรวจวัดการปลดปล่อยมลพิษในอากาศจากการทดลองการเผาเศษวัสดุโดยเตาจำลองการเผา

การทดลองเผาเศษวัสดุในเตาจำลองการเผาใช้ฟางข้าวที่เก็บรวบรวมจากการทดลองภาคสนามในจังหวัดนครสวรรค์ การทดลองเผาในเตาทำให้ทราบปริมาณชีวมวลที่แน่นอน และสามารถติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นในตำแหน่งที่อยู่ในกลุ่มควันตลอดเวลาซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการตรวจวัดที่แตกต่างจากการตรวจวัดในนาข้าว ผลการทดลองตรวจวัดความเข้มข้นที่เกิดจากการทดลองเผาเศษวัสดุในเตาจำลองการเผา แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการตรวจวัดการปลดปล่อยมลพิษในอากาศจากการทดลองการเผาเศษวัสดุโดยเตาจำลองการเผา

พารามิเตอร์	Ambient	การทดลอง 1	การทดลอง 2	การทดลอง 3	การทดลอง 4
PM _{2.5} (mg/m ³)	0.06	19.62	5.43	10.29	5.77
BC (mg/m ³)	0.03	1.09	1.18	0.80	0.13
CO (mg/m ³)	0.27	142.38	103.64	159.11	22.29
CO ₂ (mg/m ³)	523	1,558	2,217	1,837	910
PM _{2.5} /CO ₂	0.0001	0.01	0.002	0.01	0.01
BC/CO ₂	0.0001	0.001	0.0005	0.0004	0.0001
CO/CO ₂	0.0005	0.09	0.05	0.09	0.02
เวลา (min)	-	190	155	373	319
ฟาง (g dry)	-	183	183	459	459

จากตารางที่ 5 เมื่อเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างการเผาฟางปริมาณน้อยกับฟางปริมาณมากมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนโดยการทดลองที่ 1 และ 2 เผาฟางปริมาณ 183 g พบว่ามีค่าความเข้มข้น PM_{2.5} BC CO และ CO₂ โดยเฉลี่ยมากกว่า การทดลองที่ 3 และ 4 ที่ใช้ฟางปริมาณ 459 g คาดว่าเกิดจากรูปแบบการวางชีวมวล ปริมาณที่น้อยทำให้ต้องวางให้มีความหนาแน่นมากเพื่อทำให้จุดไฟติด แต่การวางชีวมวลปริมาณมากจะกระจายตัวมากกว่า ทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ดีและเกิดความเข้มข้นของมลพิษที่น้อยกว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นจากการจำลองเผาเศษวัสดุในเตาจำลองการเผา กับภาคสนามในนาข้าว พบว่าความเข้มข้นฝุ่นละอองทั้ง PM_{2.5} และ BC มีค่าสูงในการเผาเศษวัสดุในนาข้าวซึ่งตรงกันกับผลการตรวจวัดโดยใช้กระดาษกรองในการเก็บตัวอย่างฝุ่นละออง แต่ความเข้มข้นของก๊าซทั้ง CO และ CO₂ มีค่าสูงในการจำลองเผาในเตา การเผาในที่โล่งก๊าซสามารถลอยตัวขึ้นสู่บรรยากาศได้ดีซึ่งอุปกรณ์อยู่ในระดับพื้นดินจึงไม่สามารถตรวจวัดได้ แต่การตรวจวัดภาคสนามสามารถเห็นทิศทางของกลุ่มควันซึ่งสามารถตรวจวัดได้และการเผาฟางในปริมาณที่มากทำให้เกิดกลุ่มควันที่มีความหนาแน่นสูงกว่าการเผาฟางปริมาณน้อยในเตาจำลองเผา

4.5 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในฟางข้าว และเถา รวมทั้งการทำสมดุลคาร์บอนเพื่อประเมินปริมาณคาร์บอนที่ปลดปล่อยจากการเผาเศษวัสดุในนาข้าว แสดงในตารางที่ 6

จากตารางที่ 6 จากการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนในฟางข้าว และเถาพบว่าประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 32.54±0.5 และ 7.44±0.1 โดยน้ำหนัก การเผาเศษวัสดุในนาข้าวทำให้ปลดปล่อยคาร์บอนขึ้นสู่บรรยากาศ 140±52 g C/m² หรือ มากถึงร้อยละ 98.57 และเหลือเฝ้าอยู่เพียงร้อยละ 1.43 จากผลการทดลองภาคสนามในนาข้าว ส่วนการทดลองในเตาเผาพบว่าการเผาฟางข้าวทำให้ปลดปล่อยคาร์บอนขึ้นสู่บรรยากาศ 134±1 g C/m² หรือ ร้อยละ 94.35±0.70 และเหลือส่วนที่เป็นเถ้าร้อยละ 5.65±0.70 ผลการทดลองในภาคสนามมีข้อจำกัดในการเก็บเถ้าซึ่งอาจจะปนในดินทำให้ไม่สามารถเก็บตัวอย่างได้ทั้งหมดทำให้ปริมาณเถ้าน้อยกว่าการเผาในเตาจำลองการเผาซึ่งทราบปริมาณชีวมวลที่แน่นอนและสามารถเก็บตัวอย่างเถ้าได้ทั้งหมด

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

ตัวอย่าง	%C	ภาคสนาม (g C/m ²)	เตาเผา (g C/m ²)	ภาคสนาม (%)	เตาเผา (%)
ฟางข้าว	32.54±0.5	142±52	142	100	100
เถา	7.44±0.1	2.08±0.64	8.04±1.00	1.69±0.83	5.65±0.70
C released (ก๊าซ และฝุ่นละออง)	-	140±52	134±1	98.31±0.83	94.35±0.70

ฝุ่นละอองที่ปลดปล่อยขึ้นสู่บรรยากาศมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 64.03±1.56 โดยน้ำหนัก จากการเผา
ในนาข้าว และร้อยละ 53.60±0.42 โดยน้ำหนัก จากการทดลองเผาในเตา โดยทำการวิเคราะห์ฝุ่นละอองบน
กระดาษกรอง

4.6 ผลการประเมิน Emission Factor

จากผลการตรวจวัดค่าการปลดปล่อยมลพิษที่เกิดขึ้นดังตารางที่ 4 และ 5 นำมาคำนวณหาค่า EF โดย
หารด้วยค่าอัตราการเผาไหม้เศษวัสดุ ผลการวิจัยภาคสนามอัตราการเผาไหม้ชีวมวลเฉลี่ย 2.88 g/s จากการ
ทดลองเผาในพื้นที่ 1 m² ในนาข้าว ส่วนการจำลองเผาในเตาอัตราการเผาไหม้ชีวมวลเฉลี่ย 1.24 g/s อัตราการเผา
ไหม้ชีวมวลในการเผาจริงที่ชวนาเผาในนาข้าวมากกว่าค่าที่ประเมินเนื่องจากชวนาจะเผาเศษวัสดุหลายแถวใน
เวลาเดียวกันเพื่อความรวดเร็ว

ผลการประเมินค่า EF แสดงในตารางที่ 7 และ 8 ซึ่งพบว่าผลการวิจัยภาคสนามจะมีค่าน้อยมาก
เนื่องจากความไม่แน่นอนของปริมาณชีวมวลที่ถูกเผา ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงเป็นการตรวจวัดในเตาจำลองการ
เผา

ตารางที่ 7 ผลการประเมิน Emission Factor (g/kg)

พารามิเตอร์	ผลการวิจัยภาคสนาม	ผลการวิจัยการจำลองเผา ในเตาเผา	IPCC, 2006 (Andreae & Merlet, 2001)	Hays et al., 2005
PM _{2.5} (g/kg)	2.16±0.30	13.64±6.85	3.9	12.95±0.30
BC (g/kg)	0.05±0.02	0.64±0.25	0.69 ± 0.13	0.17±0.4
CO (g/kg)	4.87±1.07	108.62±33.20	92 ± 84	-
CO ₂ (g/kg)	194.23±32.19	1,116±187	1515 ± 177	-

จากตารางที่ 7 เมื่อเปรียบเทียบผลการวิจัยการจำลองเผาในเตาเผา กับงานวิจัย IPCC, 2006
(Andreae & Merlet, 2001) ซึ่งเป็นงานวิจัยที่เผาเศษวัสดุการเกษตรในที่โล่งแต่ไม่เจาะจงเฉพาะเศษวัสดุจากนา
ข้าว และ Hays et al., 2005 ทำการวิจัยโดยจำลองการเผาฟางข้าวในเตาเผา พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน มี
ความแตกต่างกันเล็กน้อยโดยค่า EF ของ BC และ CO สูงกว่า ในขณะที่ CO₂ ต่ำกว่า แสดงว่าเกิดการเผาไหม้ไม่

สมบูรณ์ เนื่องจากไม่มีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศเพื่อจำลองการเผาเช่นเดียวกับการเผาในพื้นที่เปิดโล่งในที่นา แต่ในงานวิจัยของ Hays et al. (2003) มีการติดตั้งพัดลมดูดอากาศด้านบนปล่องสูงจากบริเวณที่เผาชีวมวล 3 m และติดตั้งอุปกรณ์วัดมลพิษที่ปล่องสูงจากบริเวณที่เผา 2 m แต่งานวิจัยนี้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ระดับพื้นดินหน้าเตาเผาสูงจากพื้นเพียง 1 m

ตารางที่ 8 แสดงผลการประเมิน EF ในหน่วยต่อพื้นที่เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณการปล่อยมลพิษในกรณีที่ทราบพื้นที่เผา

ตารางที่ 8 ผลการประเมิน Emission Factor (g/m^2)

พารามิเตอร์	ผลการวิจัยภาคสนาม	ผลการวิจัยการทดลองเผาในเตาเผา
$\text{PM}_{2.5} (\text{g/m}^2)$	0.94 ± 0.13	5.96 ± 2.99
$\text{BC} (\text{g/m}^2)$	0.02 ± 0.01	0.28 ± 0.11
$\text{CO} (\text{g/m}^2)$	2.13 ± 0.47	47.47 ± 14.51
$\text{CO}_2 (\text{g/m}^2)$	84.88 ± 14.07	487.70 ± 81.60

จากข้อมูลสถิติการเก็บแบบสอบถามปริมาณพื้นที่นาที่ถูกเผาหลังการเก็บเกี่ยวโดยเฉลี่ยในแต่ละปีนาปีมีการเผาร้อยละ 50 ส่วนนาปรังเผาร้อยละ 75 (กรมควบคุมมลพิษ, 2550) พื้นที่เก็บเกี่ยวนาปี 54 ล้านไร่ และนาปรัง 10 ล้านไร่ (OAE, 2007) รวมพื้นที่นาที่ถูกเผา 35 ล้านไร่ เมื่อนำไปคำนวณค่าการปล่อยมลพิษโดยใช้ EF (g/m^2) จากการทดลองในเตาเผาพบว่าฝุ่นละอองที่ปล่อยจากการเผาดอซังฟางข้าวในที่โล่งในพื้นที่เกษตรมีปริมาณ 328,707 ตันต่อปี ซึ่งมากกว่าการปล่อยฝุ่นละอองจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินขนาด 2,400 MW ที่ปลดปล่อยฝุ่นละอองโดยเฉลี่ย $1,926 \pm 626$ ตันต่อปี (Krittayakasem, 2007) ถึง 171 เท่า

5. สรุปผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อประเมินค่า Emission factor ของมลพิษที่เกิดจากการเผาเศษวัสดุการเกษตรในที่โล่งในพื้นที่นาข้าวหลังการเก็บเกี่ยว โดยการทดลองภาคสนามในนาข้าว และจำลองการเผาด้อย่างฟางข้าวในเตาจำลองการเผาในที่โล่ง ชีวมวลหลักที่ถูกเผาในที่นาได้แก่ฟางข้าว ปริมาณฟางข้าว $437 \pm 166 \text{ g/m}^2$ มีความไม่แน่นอนสูงถึงแม้ว่าอยู่ในพื้นที่เดียวกันเนื่องจากการเก็บเกี่ยวที่มีความแตกต่างของความสูงตอซัง $21 \pm 6 \text{ cm}$ ในการตรวจวัดการปลดปล่อยมลพิษในอากาศใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง โดยทำการตรวจวัดความเข้มข้นของ $\text{PM}_{2.5}$ BC CO และ CO_2 พบว่าผลการตรวจวัดความเข้มข้นฝุ่นละออง ($\text{PM}_{2.5}$ และ BC) ในภาคสนามมีค่าสูงกว่าการจำลองการเผาในเตาเผา แต่ในทางตรงกันข้ามผลการตรวจวัดความเข้มข้นก๊าซในภาคสนาม (CO และ CO_2) มีค่าน้อยกว่าการจำลองการเผาในเตาเผา ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทดลองในภาคสนามคือ สภาพอุตุนิยมวิทยา โดยเฉพาะทิศทางและความเร็วลม การเผาเศษวัสดุเหลือทิ้งในนาข้าวทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนขึ้นสู่บรรยากาศ $140 \pm 52 \text{ gC/m}^2$ หรือร้อยละ 98.31 ± 0.83 ของปริมาณคาร์บอนในชีวมวล เหลือเถ้าร้อยละ 1.69 ± 0.83 จากการทดลองภาคสนาม ในการทดลองการจำลองการเผาในเตาเผาพบว่า การเผาเฉพาะฟางข้าวทำให้เกิดการปลดปล่อยคาร์บอนขึ้นสู่บรรยากาศ $134 \pm 1 \text{ gC/m}^2$ หรือร้อยละ 94.35 ± 0.70 และเหลือเถ้าร้อยละ 5.65 ± 0.70 ผลการประเมิน EF $\text{PM}_{2.5}$ มีค่า $13.64 \pm 6.85 \text{ g/kg}$ หรือ $5.96 \pm 2.99 \text{ g/m}^2$ สำหรับนาข้าวในภาคกลางของประเทศไทย ปริมาณพื้นที่นาที่ถูกเผาหลังการเก็บเกี่ยวต่อปี มีค่าประมาณ 35 ล้านไร่ พบว่าฝุ่นละอองที่ปล่อยจากการเผาดอซัง

ฟางข้าวในที่โล่งในพื้นที่เกษตรมีปริมาณ 328,707 ตันต่อปี ซึ่งมากกว่าการปล่อยฝุ่นละอองจากการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินขนาด 2,400 MW ถึง 171 เท่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. สิรินทรเทพ เต๋อประยูร ดร. นริศรา ทองบุญชู และ Assoc. Prof. Dr. Nitin Kumar Tripathi โครงการพัฒนาเสริมสร้างความรู้และงานวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ระบบโลก (ESS) และกลุ่มงานวิจัยด้าน Aerosol from Biomass Burning to the Atmosphere (ABBA)

7. เอกสารอ้างอิง

- Andreae, M.O., Merlet, P. (2001), Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), pp. 955-966.
- Hays, M.D., Fine, P.M., Geron, C.D., Kleeman, M.J., Gullett, B.K. (2005), Open burning of agricultural biomass: physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment*, 39, pp. 6747-6764.
- Hays, M.D., Smith, N.D., Kinsey, J., Dong, Y. and Kariher, P. (2003), Polycyclic aromatic hydrocarbon size distributions in aerosols from appliances of residential wood combustion as determined by direct thermal desorption-GC/MS. *Aerosol Science*, 34, pp. 1061-1084.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001), Third Assessment Report, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, edited by J. T. Houghton et al., Cambridge Univ. Press, New York
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4: Agriculture, Forestry and Other land Use.
- Krittayakasem P. (2007), *An Inventory of Atmospheric Emissions from Power Generation in Thailand*. MSc thesis, The Joint Graduate School of Energy and Environment, Bangkok, Thailand.
- Levine, J.S. (1991), *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Office of Agricultural Economics (2006), *Agricultural Economic' Statistic Yearbook 2006*, Available online: <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook49/> [Access December 26, 2007]
- Office of Agricultural Economics (2007), *Agricultural Economic' Statistic Yearbook 2007*, Available online: <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook50/> [Access November 30, 2008]
- Pollution Control Department (2005), National Master Plan for Open Burning Control. Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment, Thailand, pp. 1-26.
- กรมควบคุมมลพิษ และ บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม. โครงการติดตามและประเมินสถานการณ์การเผาในที่โล่งในพื้นที่เกษตรของประเทศไทย, หน้า 5.20, 2550.

Carbonaceous Aerosol Emission from Rice Field Open Burning in Thailand

Kanittha Kanokkanjana¹, Ubonwan Chaiyo¹, Agapol Junpen¹, Penwadee Cheewapongphan¹, and Savitri Garivait^{1,*}

¹The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, Tel: (662) 4708309-10, Fax: (662) 8729805

*Corresponding author: savitri_g@jgsee.kmutt.ac.th

Abstract:

This study aims to investigate the carbonaceous aerosols emitted from rice field open burning in Thailand by integrating experimental data with satellite information. Field experiments were conducted in irrigated and rainfed paddy field in Samutsakhon and Nakhonsawan province, respectively, to obtain biomass load, fraction burn, and emission. Area burn was quantified by Fire Hot Spot, landuse, field survey, and statistical data. Aerosols and gases emissions were determined by emission factor. Biomass load of rice straw is 480 ± 393 g/m² in Samutsakhon, and 572 ± 121 g/m² in Nakhonsawan. Major part of residue that open burned in the field was rice straw. In Samutsakhon, more than 80% of straw and $31 \pm 15\%$ of stubble was burned. Less FB was found in rainy season, stubble was burned for 22%. The FB of the rice straw in Nakhonsawan was nearly 100% and stubble was 82%. Carbon component of rice straw in Samutsakhon is $38.97 \pm 1.54\%$ and in Nakhonsawan is $32.35 \pm 0.02\%$, which is in the same range with other studies in Thailand and China. Carbon contents of the ash from rice residue combustion in Samutsakhon and Nakhonsawan are the same, $7.54 \pm 0.03\%$ and $6.98 \pm 0.35\%$, respectively. However, %C in PM is different between $20.52 \pm 19.08\%$ in Samutsakhon and $86 \pm 23.24\%$ in Nakhonsawan. Most carbon was release into the atmosphere in form of gas (>90%). Field experiment results were converted to emission as following: by emission factor of Andreae and Merlet (2001) PM_{2.5} 1.50, TPM 4.99, TC, 1.54, OC 1.27, BC 0.26, CO₂ 581.73, CO 35.33, and CH₄ 1.04 g/m² in Samutsakhon; Hays et al. (2005) PM_{2.5} 4.97, TC 3.50, OC 3.43, and BC 0.07 g/m² in Samutsakhon; Andreae and Merlet (2001) PM_{2.5} 2.23, TPM 7.44, TC 2.29, OC 1.89, BC 0.39, CO₂ 866.5, CO 52.62, and CH₄ 1.54 g/m² in Nakhonsawan; and Hays et al. (2005) PM_{2.5} 7.41, TC 5.21, OC 5.11, BC 0.10 g/m² in Nakhonsawan, respectively. Emission that estimated from Hays et al. (2005) is specific to rice, which was higher than emission from the global agricultural residue EF by Andreae and Merlet (2001). However, EF specific to rice residue in Thailand is still scarce. To improve emission estimation, specific EF is required. Real time measurement of PM_{2.5}, CO, and CO₂ from 1 m² rice residue combustion was conducted in the field. Combustion duration period was 1-3 minutes, which flaming was dominant in the initial with low CO/CO₂. Maximum concentration of PM_{2.5} was 110 mg/m³ in Samutsakhon, and 170 mg/m³ in Nakhonsawan, respectively.

Keywords: carbonaceous aerosol, climate change, PM_{2.5}, rice field, open burning

1. INTRODUCTION

Atmospheric carbonaceous aerosol consists of organic carbon (OC), elemental carbon (EC or black carbon (BC or soot), a non volatile/light-absorbing carbon), and a small amount of carbonate carbon. EC is emitted directly from primary sources; in contrast, OC is emitted both directly as particulates and also condensed in the atmosphere. Major sources of carbonaceous aerosol are fossil fuel and biomass combustion [1, 2]. EC is mainly emitted from biomass open burning.

Biomass open burning includes forest fire and agricultural burning. Impact of carbonaceous aerosol is significant on human health, environment climate change, global warming/cooling. The effect of carbonaceous aerosol is usually determined radiative forcing, which is an important contributor to climate change [2]. Organic aerosols scatter the light so it is negative effect that results in cooling [3]. On the contrary, EC absorb light and increase global temperature. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has estimated annual radiative forcing of aerosol in a range of -0.3 and -1.8 W/m² [2]. Data on

carbonaceous aerosol is still scarce when compare with greenhouse gases.

Emission factor between forest fire and agricultural burning in terms of EC and OC has been estimated. Andreae and Merlet (2001) have presented OC 3.3, BC 0.69 ± 0.13 , and Total Carbon (TC) 4.0 g/kg of global agricultural residue [4]. The EFs of Hays et al. (2005) that simulated open fires of rice straw in chamber are OC 8.94 ± 0.42 , EC 0.17 ± 0.04 , and PM_{2.5} 12.95 ± 0.30 g/kg rice straw in USA. Nguyen et al. (1991) have estimated CH₄ and CO emission of rice straw burning in dry and wet season in Vietnam; however, the carbonaceous aerosol was not considered [5].

Thailand is an agricultural based economy. Rice exporter number one of the world. In 2008, quantity of rice production was 32,099,401 ton, and 10,216,043 ton was exported. Planted area of rice was 112,299.44 km², which was harvested for 106,689.05 km² [6]. In order to increase production to assure exportation, farmers cultivated 2-3 crops per year. To remove rice residue out of the field as soon as possible in order to prepare land for the next cultivation, open burning is selected

because it is convenient and low cost. That is one reason of biomass open burning in Thailand. Purpose of this study is to investigate the carbonaceous aerosols emitted from rice field open burning in Thailand by integrating experimental data with satellite information.

2. METHODOLOGY

2.1 Estimation of Emission

Estimation of emissions from rice residue open burning is assessed by

$$E_i = M \times EF_i \quad (1)$$

where E_i is the emission of pollutant i , M is the amount of biomass burned (kg) and EF is the emission factor of pollutant i (EF_i) ($\text{g pollutant/kg dry mass of biomass}$). M is the rice residue burned (kg dry matter) obtained by

$$M = A \times \alpha D \times FB \quad (2)$$

A is area burned (m^2), D represents biomass load ($\text{kg}_{\text{dm}} \text{ biomass/m}^2$), α is burned fraction of biomass load, and FB = fraction burned. M is obtained mainly from the field experiment and EF is available from the literature.

2.2 Estimation of Area burn using satellite data

Area burned was analyzed by fire hot spot and landuse data. The fire hot spot was obtained from MODIS Fire Product (MOD14) Information System for Southeast Asia (Geoinformatics Center AIT). The products were used to quantify area burned in rice field during year 2008 in Samutsakhon (SS) and Nakhonsawan (NS) province. The product is a 1-km gridded composite of fire pixels detected in each grid cell two times a day (in the morning and the afternoon). Active fires and other thermal anomalies are detected by MODIS Terra and Aqua satellite [7]. The landuse data from Land Development Department of Thailand in 2002 was used to identify paddy field area. Therefore, paddy field burned area was quantified.

2.3 Field experiment

Field experiments were conducted to determine biomass load, fraction burn, area burn, and emission. Experiments were carried out for three batches in Samutsakhon and one batch in Nakhonsawan province during year 2007 and 2008. Samutsakhon province is located in central part of Thailand at the mouth of the Tha Chin River, 30 km from Bangkok. Nakhonsawan province is in upper part of central region of Thailand. Rice was cultivated by broadcast and harvested by machine. Rice field in Nakhonsawan is rainfed that harvest one time per year, and Samutsakhon is irrigated area that harvest 2-3 times per year.

Biomass was collected in 1 m^2 by collecting straw in one bag and cut above ground stubble then keep in

another bag. Wet weight of straw and stubble were recorded at the field. The biomass was brought back to analyze for dry weight at the laboratory by place in the oven at 70°C for 1-2 days. Then grinding and sieving through $106 \mu\text{m}$ size to analyze for physical and chemical properties by proximate and ultimate analysis. Proximate analysis was done by Thermogravimetric Analyzer (TGA Perkin Elmer, model Pyris 1) and Ultimate analysis was carried out by CHN analyzer (Elemental Analyzer, FLASH 1112 SERIES).

Rice residue combustion was conducted at the field by burning in $1 \times 1 \text{ m}^2$ and traditional way. Farmers burn rice residue in rows (Fig. 1) because straw was spread out from the harvested machine in rows. Emissions were sampling at ground level near the fire, which tried to keep position in the plume. Aerosols were collected through quartz filter by personal pump at 10 LPM. The aerosol on the filters was weighed by microbalance and analyzed for TC by CHN analyzer (Elemental Analyzer, FLASH 1112 SERIES). Sampling $\text{PM}_{2.5}$ was conducted every 10 seconds by real time equipment (Dust Trak model 8520). During combustion experiment, meteorological data (include wind speed, wind direction, temperature, humidity, and pressure) was recorded every minute.



Fig. 1 Burned paddy field in rows.

After combustion, unburn was collected by cut above ground biomass in $1 \times 1 \text{ m}^2$ keep in one bag and ash was stored in another bag. Moisture content and dry weight were conducted at the laboratory. Carbon content in ash sample was analyzed by Elemental Analyzer.

Carbon was determined by The Flash EA 1112 Analyzer, which operated according to the dynamic flash combustion (modified Dumas method) of samples. Biomass, ash, and PM samples were analyzed at 900°C . When heating, a small volume of pure Oxygen was added to the system and helped to burn the samples, converting the samples into elemental (simple) gases [8].

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Area burn from Fire Hot Spot

Area burn has been determined by using MOD14 product from MODIS Aqua and Terra. Each fire hot

spot detected by MODIS Terra and Aqua was interpreted into area burn by one hotspot covered 1 km². In Samutsakhon province year 2008, few hotspots were found in other landuse, but cannot be found in paddy field area because farmers burned paddy field in a small area that satellite cannot detect, and sometimes satellite did not fly over when rice residue was burning. However, rice residue was traditional way to remove rice straw in this area, which can be observed by field experiment. After harvesting, the straw was burned within one week, and pump water into the field to prepare for the next batch. Small fraction of rice straw was collected for mulching, but the utilized amount was not significant when compare with total quantity of rice straw.

In 2008, number of hotspot was 322 points (Fig.2), so total area burned was estimated 322 km² in Nakhonsawan province. From field observation, paddy field area belongs to one farmer in Nakhonsawan is the same size as in Samutsakhon, but combustion behavior is different. Paddy field in Nakhonsawan cultivates one time a year because water resource rely on raining. Paddy fields are connected in a large area that separates each owner by soil mound. After harvesting, the straw cannot burn immediately because the fire may damage other fields that have not been harvested. Purpose of rice residue combustion is for catching mice by local people (not farmer). The field was burned in a large area so it can be detected by satellite. Utilization of rice straw in this area is animal fodder.

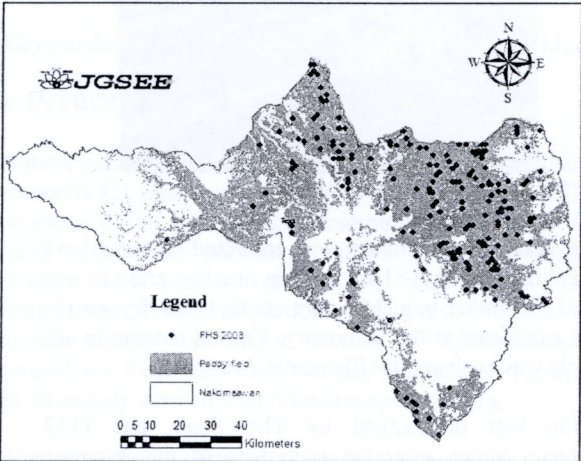


Fig. 2 Spatial distribution of FHS on paddy field in Nakhonsawan province year 2008.

The area burned cannot be estimated only by satellite data. Therefore, field experiment and statistical data should also be considered. Harvested area in Samutsakhon and Nakhonsawan were 46.77 and 4,779.88 km², respectively [6]. From questionnaire data, 72% of major rice and 100% of second rice in Samutsakhon were burned, and 50% of major rice and 75% of second rice in Nakhonsawan were burned (PCD

report, 2007). Therefore, burned area was 39 km² in Samutsakhon and 2,691 km² in Nakhonsawan, respectively. The area burned result from remote sensing data was less than questionnaire data for 8 times.

3.2 Biomass

Field experiment results of biomass sampling are presented in Table 1.

Table 1 Results of biomass sampling field experiment

	SS	SS	SS	NS
Experiment	25/12/07	30/6/08	18/11/08	14/12/08
Season	dry	wet	dry	flood
Rice type	No.17	Kanchan	Rashinee	105
Studied area (m ²)	33,600	33,600	33,600	32,000
Product (g/m ²)	238	295	327	313
Product (g/m ²) ¹	403	443	403	348
Rice straw (g _{dry wt} /m ²)	440±372	259±135	847±417	572±121
Rice stubble (g _{dry wt} /m ²)	161±45	239±30	186±40	172±92
RPR	1.85	0.88	2.59	1.83

Note: SS is Samutsakhon, and NS is Nakhonsawan, ¹[OAE, 2009]

In Samutsakhon, the samples were collected in the same location at 638430 UTMx, 1507153 UTM_y but rice types in each batch were different. Height of rice in 3 batches was 83±13, 81±9, and 87±7 cm, which was not much different in one area. However, they were different when compare with other province i.e. Nakhonsawan 176±17 cm. Biomass load of rice straw is 480±393 g/m² in Samutsakhon, and 572±121g/m² in Nakhonsawan.

All products were lower than statistic data [6]. The residue to product ratio was obtained from amount of rice straw and grain product in 1 m². The RPR is 1.77±0.86 in Samutsakhon, and 1.83 in Nakhonsawan. These RPR value is higher than other studies: 0.49 (DEDE, 2006) [9], and 0.45 (Bhattachaya et al., 1989) [10].

The rice stubble weight depends mainly on harvesting method. Rice was harvested by machine. After harvesting, stubble height was on the above ground for 25±5 cm in Samutsakhon, and 40±13 cm in Nakhonsawan. Stubble weight was 204±52 g/m² in Samutsakhon and 136±43 g/m² in Nakhonsawan, respectively.

3.3 Fraction burn

Major part that was burned is rice straw and some part of stubble was also burned in the field. The fraction burn was presented in percentage by dry weight. From field experiment, more than 80% of rice straw was burned in the field. Fraction burn of stubble is $31 \pm 15\%$ in Samutsakhon. Less FB was found in rainy season, 22% of stubble was burned. The FB of the rice straw in Nakhonsawan was nearly 100% and stubble was $72 \pm 10\%$.

3.4 Carbon component

The results of carbon component in biomass, ash, and aerosol that collected in the field and analyzed by the EA analyzer are presented in Table 2.

Table 2 Results of carbon analysis experiment

Sample	%Carbon	
	Samutsakhon	Nakhonsawan
Rice straw	38.97 ± 1.54	32.35 ± 0.02
ash	7.54 ± 0.03	6.98 ± 0.35
PM	20.52 ± 19.08	86 ± 23.24

Carbon content in rice straw that was collected in Samutsakhon and Nakhonsawan province are in the same range, $38.97 \pm 1.54\%$ and $32.35 \pm 0.02\%$, respectively. These results go along with other studies in Thailand (44.4 %C by Garivait et al., 2006) and China (38.52 %C by Cuiping et al., 2004) [11]. The carbon contents that contained in the ash sample are also similar among results, $7.54 \pm 0.03\%$ in Samutsakhon and $6.98 \pm 0.35\%$ in Nakhonsawan. However, carbon quantities in the PM samples from both locations are different.

Carbon balance was determined by carbon in biomass before burning equals C in the ash combined with C release into the air after burning.

$$C_{\text{biomass}} = C_{\text{ash}} + C_{\text{release}}$$

where C_{biomass} , C_{ash} , and C_{release} are carbon content in biomass, ash, and release into the air, respectively. Carbon content of each phase is presented in Table 3, including carbon in rice straw, ash, PM, and release to the atmosphere in form of gases i.e. CO, CO₂, CH₄, NMVOC, and others.

Table 3 Carbon content

Sample	Samutsakhon (g/m ²)	Nakhonsawan (g/m ²)
C Rice straw	187	185
C Ash	7	6
C PM	0.0003	0.0015
C Release	180	179

Note: C release = C rice straw – C ash

Most carbon from rice residue combustion was release into the air in form of gases for more than 90%. Small amount of carbon contain in ash that left on the ground after combustion.

3.5 Carbonaceous aerosols

The carbonaceous aerosols were determined by information of biomass load, fraction burn from field experiment and emission factors from literature review. Total carbon was considered in PM_{2.5}, which contains EC and OC. Emission factor of PM_{2.5}, TC, OC, and BC are [EF1] 3.9, 4, 3.3, and 0.69 (Andreae and Merlet, 2001); and [EF2] 12.95, 9.11, 8.94, and 0.17 (Hays et al., 2005) [4, 12]. Results of the carbonaceous aerosols determination are presented in Table 4.

Table 4 Carbonaceous aerosols

	Samutsakhon (g/m ²)		Nakhonsawan (g/m ²)	
	EF1	EF2	EF1	EF2
PM _{2.5}	1.50	4.97	2.23	7.41
TC	1.54	3.50	2.29	5.21
OC	1.27	3.43	1.89	5.11
BC	0.26	0.07	0.39	0.10

Note: EF1 (Andreae and Merlet, 2001) and EF2 (Hays et al., 2005)

The emission of carbonaceous from rice residue combustion estimated by emission factor of Hays et al. (2005), which specific to rice straw residue (USA), is higher than Andreae and Merlet (2001) that used for global agricultural residue.

3.6 Emissions

Emissions of TPM, CO₂, CO, and CH₄ are determined by emission factor of global agricultural residue (Andreae and Merlet, 2001). The results are presented in Table 5.

Table 5 Emissions from rice residue open burn

Pollutants	Samutsakhon (g/m ²)	Nakhonsawan (g/m ²)
TPM	4.99	7.44
CO ₂	581.73	866.58
CO	35.33	52.62
CH ₄	1.04	1.54

Major carbon in form of CO₂ was release into the air, which was a significant greenhouse gas that caused global warming. Other greenhouse gases, i.e. CO and CH₄, were also released and increasing global temperature.

Real time measurements of PM_{2.5} from rice residue open burning in 1 m² results conducted at the field in

Samutsakhon and Nakhonsawan are presented in Fig. 3 and 4.

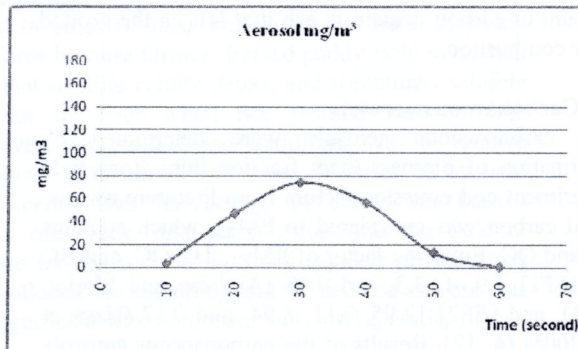


Fig. 3 Results of real time PM_{2.5} in Samutsakhon.

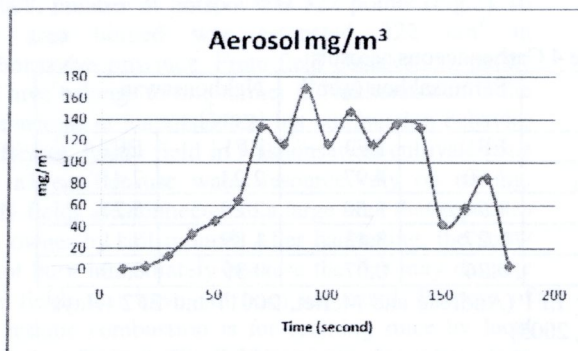


Fig. 4 Results of real time PM_{2.5} in Nakhonsawan.

From Fig. 3 and 4, combustion of rice residue in 1 m² took short period for 1-3 minutes. PM_{2.5} was increased in the initial, reached maximum in around 1 minute, and deceased to the ambient concentration. Maximum aerosol concentration was 110 mg/m³ in Samutsakhon and 170 mg/m³ in Nakhonsawan.

At the same period of combustion, CO and CO₂ were measured at the same position. The result of CO and CO₂ real time measurement is presented in Fig. 5. Lower CO/CO₂ was presented at the initial because flaming or complete combustion was dominant. Increasing of CO/CO₂ can be noticed, when smoldering phase was dominant.

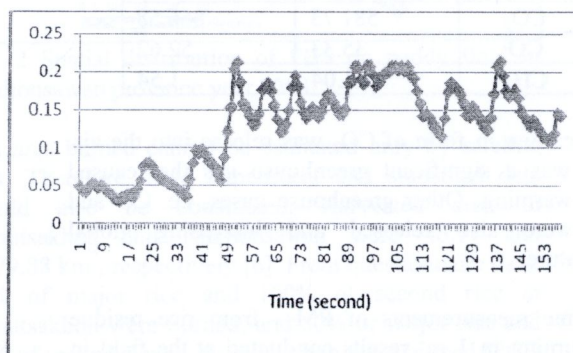


Fig. 5 Results of real time CO/CO₂ in Nakhonsawan.

4. CONCLUSION

This study investigated the carbonaceous aerosols emitted from rice field open burning in Thailand. Field experiments were conducted in irrigated and rainfed paddy field in Samutsakhon and Nakhonsawan province. Aerosols and gases emissions were determined by emission factor. Biomass load of rice straw is 480±393 g/m² in Samutsakhon, and 572±121 g/m² in Nakhonsawan. Major part of residue that has been burned in the field is rice straw for more than 80%. Carbon component of rice straw in Samutsakhon is 38.97±1.54% and in Nakhonsawan is 32.35±0.02%, which is in the same range with other studies in Thailand and China. Carbon contents of the ash from rice residue combustion in Samutsakhon and Nakhonsawan are 7.54±0.03% and 6.98±0.35%, respectively. However, %C in PM is 20.52±19.08% in Samutsakhon and 86±23.24% in Nakhonsawan.

Most carbon was release into the atmosphere in form of gas. Emissions from rice residue open burning are following: EF of Andreae and Merlet (2001) PM_{2.5} 1.50, TPM 4.99, TC, 1.54, OC 1.27, BC 0.26, CO₂ 581.73, CO 35.33, and CH₄ 1.04 g/m² in Samutsakhon; Hays et al. (2005) PM_{2.5} 4.97, TC 3.50, OC 3.43, and BC 0.07 g/m² in Samutsakhon; Andreae and Merlet (2001) PM_{2.5} 2.23, TPM 7.44, TC2.29, OC1.89, BC0.39, CO2866.58, CO 52.62, and CH₄ 1.54 g/m² in Nakhonsawan; and Hays et al. (2005) PM_{2.5} 7.41, TC 5.21, OC 5.11, BC 0.10 g/m² in Nakhonsawan, respectively. The EF of Hays et al. (2005) is specific to rice, which was higher than the global agricultural residue EF by Andreae and Merlet (2001).

The EF specific to rice residue open burning in Thailand is still scarce. To improve emission estimation, specific EF is required.

Real time measurement of PM_{2.5}, CO, and CO₂ from 1 m² rice residue combustion was conducted in the field. Combustion duration period was quite short for 1-3 minutes, which flaming was dominant in the initial with low CO/CO₂. Maximum concentration of PM_{2.5} was 110 mg/m³ in Samutsakhon, and 170 mg/m³ in Nakhonsawan, respectively.

5. ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the contribution of Dr. Savitri Garivait, Dr. Sirintornthep Towprayoon, Dr. Narisara Thongboonchoo, Dr. Nitin Kumar Tripathi, the Joint Graduate School of Energy and Environment, KMUTT-Earth Systems Science Research and Development Center, and the research and field experiment team.

6. REFERENCES

- [1] Chow, J.C., Watson, J.G., Chen, L.-W.A., Miranda, G.P., Chang, M.-C.O., Trimble, D., Fung, K.K., Zhang, H., and Yu, J.Z., 2005. Refining temperature measures in thermal/optical carbon analysis. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, pp. 2961-2972.
- [2] Pierce, J.R., Chen, K., and Adams, P.J., 2007. Contribution of primary carbonaceous aerosol to cloud condensation nuclei: process and uncertainties evaluated with a global aerosol microphysics model. *Atmos. Chem. Phys.* **7**, pp. 5447-5466.
- [3] IPCC, 2001. Climate Change 2001. [online] Available from http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/CLIMATE/IPCC_TAR/WG1/254.htm [accessed 14 March 2009].
- [4] Andreae, M. O. and Merlet, P. (2001) Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, **15**, (4), pp. 955-966.
- [5] Nguyen, B.C., Putaud, J.P., and Bonsang, M.B., 1994. CH₄ and CO Emissions from Rice Straw Burning in South East Asia. *Environmental Monitoring and Assessment* **31**, pp. 131-137.
- [6] Office of Agricultural Economics, 2009. *Agricultural Economic' Statistic Yearbook year 2008*. [online] Available from <http://www.oae.go.th/statistic/yearbook51/> [accessed January 26, 2009].
- [7] Geoinformatics Center AIT, 2008. MODIS Fire Product (MOD14) Information System for Southeast Asia. [online] available at http://www.geoinfo.ait.ac.th/mod14/mod14_db/search_db_mod14b.php (accessed on January 14, 2009).
- [8] Thermo Fisher Scientific Inc., 2007. *Elemental Analysis Manual*.
- [9] Energy for Environment Foundation, 2006. *Biomass. Q Print Management Co. Ltd., Bangkok, Thailand*.
- [10] Sajjakulnukit, B., Yingyuad, R., Maneeekhao, V., Pongnarintasut, V., Bhattacharya, S.C., and Salam, P.A. (2005) Assessment of sustainable energy potential of non-plantaton biomass resources in Thailand. *Biomass and Bioenergy* **29**, pp. 214-224.
- [11] Garivait, S., Chaiyo, U., Patumsawad, S., and Deakhuntod, J., 2006. Physical and Chemical Properties of Thai Biomass Fuels from Agricultural Residues. The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)", 1-23 November 2006, Bangkok, Thailand.
- [12] Hays, M. D., P. M. Fine, et al. (2005). Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment* **39**(36), pp. 6747-764.



