บทความปริทัศน์

มลพิษทางอากาศในระดับภูมิภาค และการแพร่กระจายในระยะทางไกล: (2) ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ภัคพงศ์ พจนารถ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
pakpong.pochanart@gmail.com

บทคัดย่อ

ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นภูมิภาคที่มีศักยภาพในการพัฒนาอุตสาหกรรมและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ซึ่งส่งผลไปถึงแหล่งกำเนิดมลพิษชนิดต่าง ๆ อันเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง มลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นและสามารถแพร่กระจายไปยังส่วนต่าง ๆ ของภูมิภาคหรือภายนอกภูมิภาคได้ บทความนี้มุ่งศึกษาแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศและการแพร่กระจายในระยะทางไกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้แก่ การไหลเข้าของมลพิษทางอากาศจากภายนอกภูมิภาคซึ่งส่งผลกระทบกับเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยตรง และการไหลออกของมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นภายในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ไปยังภูมิภาคอื่น จากการศึกษาพบว่า ระบบลมมรสุมเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทางตอนบนของภูมิภาคบริเวณคาบสมุทรอินโดจีน ในช่วงฤดูแล้งซึ่งเริ่มจากฤดูหนาวไปจนถึงฤดูร้อน พบมลพิษในระดับสูงเมื่อเทียบกับฤดูฝน โดยเกิดจากการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกมายังเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และการเกิดไฟป่า/การเผาไหม้ชีวมวลในภูมิภาคนี้ส่วนในฤดูฝน การไหลเข้าของมวลอากาศที่สะอาดจากมหาสมุทรอินเดียทำให้ปริมาณมลพิษทางอากาศในภูมิภาคอยู่ในระดับต่ำ สำหรับพื้นที่เกาะต่าง ๆ ทางตอนล่างของภูมิภาคก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันโดยที่ช่วงเวลาของฤดูแล้งและฤดูฝนจะสลับกับทางตอนบนของภูมิภาค

คำสำคัญ: มลพิษทางอากาศ; คาร์บอนมอนอกไซด์; เอเชียตะวันออกเฉียงใต้; ภูมิอากาศวิทยา; การแพร่กระจายในระยะทางไกล

Review

Air Pollution and Long-range Transport in Asia: (2) Southeast Asia

Pakpong Pochanart
Assistant Professor, School of Social and Environmental Development
National Institute of Development Administration
pakpong.pochanart@gmail.com

Abstract

Southeast Asia is a region with a potential for rapid industrialization and economic growth, which has resulted in various anthropogenic pollution sources within the region. Air pollution is one of the problems of concern, as it could be transported to other parts of the region or even further to other regions. This article reviews the air pollution sources and the long-range transport in Southeast Asia, in particular the inflow of air pollution from outside the region and the outflow of Southeast Asian air pollution that affects other regions. It was found that the monsoon regime dominates the air mass transport in Southeast Asia. In the continental parts of the region, high levels of air pollution were found in the dry season as compared to those of the wet season as a result of the long-range transport of air pollution from East Asia and the biomass burning within the region. During the wet season, the monsoon brings clean marine air from the Indian Ocean. In the peninsular parts of the region, the phases of wet and dry seasons are opposite but similar seasonal characteristics were found.

Keywords: Air pollution; Carbon Monoxide; Southeast Asia; Climatology, Long-range Transport

บทนำ

บทความนี้เป็นบทความตอนสุดท้ายของบทความวิชาการเรื่องมลพิษทางอากาศในระดับภูมิภาคและการแพร่กระจายในระยะทางไกลในทวีปเอเชีย ผู้เขียนมุ่งศึกษาทวีปนี้ เนื่องเพราะเอเชียเป็นทวีปที่กำลังเติบโตอย่างรวดเร็ว มีประชากรกว่าครึ่งหนึ่งของโลกอาศัยอยู่ และมีกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การขนส่ง การบริการ ซึ่งสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างกว้างขวาง ในบทความตอนแรก ผู้เขียนได้เสนอมุมมองต่อมลพิษทางอากาศในระดับภูมิภาคและการแพร่กระจายในระยะทางไกลในภูมิภาคเอเชียตะวันออก (Pochanart, 2012) ซึ่งกล่าวถึง มลพิษทางอากาศโดยรวม สถานการณ์มลพิษทางอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออก และการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออก สำหรับบทความตอนสุดท้ายนี้ จะเป็นการนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวกับมลพิษทางอากาศและการแพร่กระจายในระยะทางไกลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และประเทศไทยโดยตรง

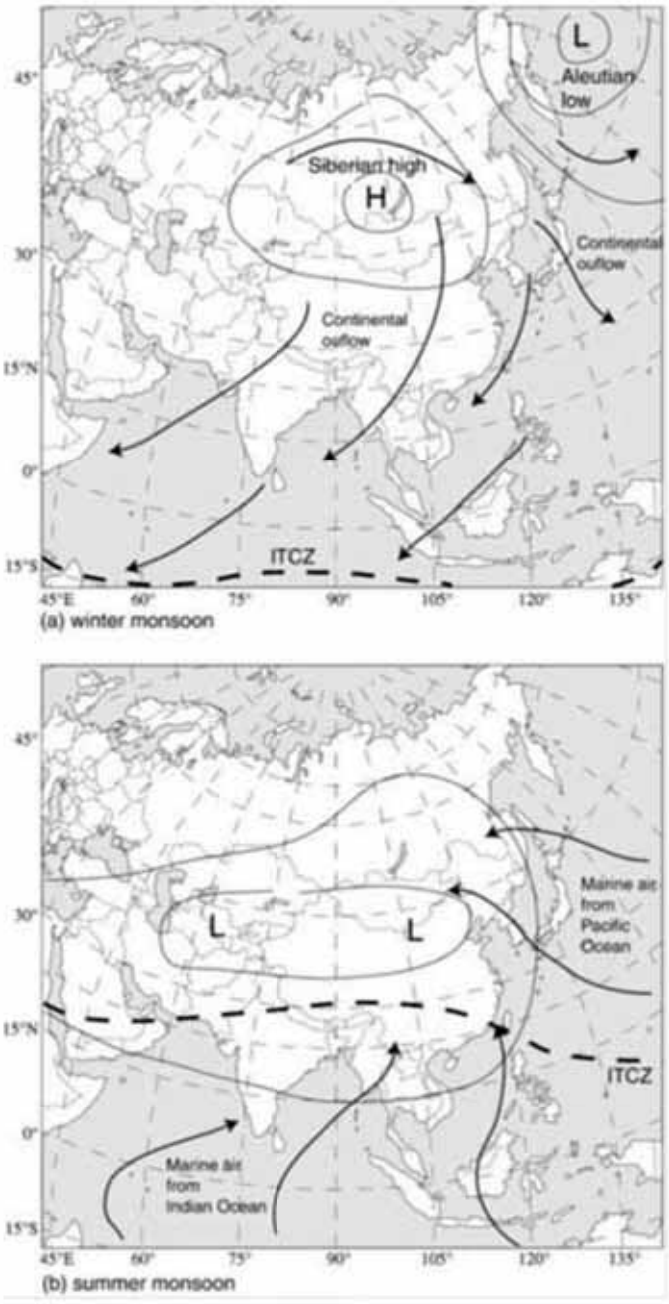
ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีพื้นที่ตั้งอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 20 องศาเหนือถึง 10 องศาใต้ ภูมิภาคนี้ประกอบด้วยพื้นที่ภูมิภาคสองส่วนด้วยกันคือ พื้นที่บริเวณแผ่นดินใหญ่ทางตอนบนของภูมิภาคซึ่งเรียกกันว่าบริเวณคาบสมุทรอินโดจีน และอีกส่วนทางตอนล่างของภูมิภาคจะมีลักษณะเป็นเกาะขนาดใหญ่จำนวนมากที่ทำหน้าที่แบ่งเขตพื้นที่มหาสมุทรแปซิฟิคและมหาสมุทรอินเดียออกจากกัน ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศขนาดใหญ่ซึ่งสามารถแพร่กระจายในระยะทางไกล โดยมีสาเหตุหลักมาจาก (1) การเพิ่มขึ้นของมลพิษทางอากาศที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์จากการพัฒนาและการขยายตัวของอุตสาหกรรมในพื้นที่ (Aardenne, Carmichael, Levy, Streets & Hordijk, 1999; Brasseuret et al., 1998; Streets, Tsai, Akimoto & Oka, 2002) (2) กระบวนการทางชีวภาพในพื้นที่ที่มีองค์ประกอบเป็นป่าดิบชื้นในบริเวณกว้าง (Kirchhoff & Rasmussen, 1990) (3) กระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวล (Christopher, Chou, Welch, Kliche & Connors, 1998; Crutzen & Andreae, 1990; Goldammer, 1999; Roths & Harris, 1996; Siegert, Ruecker, Hinrichs & Hoffmann, 2001; Thompson et al., 2001) และ (4) ความสามารถในการออกซิเดชันของพื้นที่เขตร้อนชื้นเนื่องมาจากการมีปริมาณความเข้มข้นของรังสีอุลต้าไวโอเล็ตและความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงในชั้นบรรยากาศ (Crutzen et al., 1985; Sanhueza, Crutzen & Fernández, 1999)

การเผาไหม้อันเนื่องมาจากเชื้อเพลิงชีวมวลในพื้นที่ภูมิภาคนี้ จัดเป็นแหล่งมลพิษทางอากาศที่สำคัญของพื้นที่ (Crutzen & Andreae, 1990; Hurst, Griffith & Cook, 1994; Pochanart, Akimoto, Kajii & Sukasem, 2003; Thompson et al., 2001) กระบวนการดังกล่าวจะแตกต่างจากการเกิดไฟป่าในพื้นที่ป่าเขตเหนือของทวีปเอเชีย (Boreal Forest) ซึ่งได้กล่าวถึงในบทความตอนแรก เพราะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลในพื้นที่ภูมิภาคนี้เกิดจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่การเผารุกไล่พื้นที่ป่า การเผาพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อเตรียมพื้นที่สำหรับการเพาะปลูก ซึ่งปัญหานี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องมาตลอด (Christopher et al., 1998; Crutzen & Andreae, 1990; Jones, 1997; Nguyen,

Mihalopoulos & Putuad, 1994) บทความนี้จะเป็นการสรุปภาพรวมถึงการไหลเข้าและการไหลออกของมลพิษทางอากาศที่มีสาเหตุทั้งที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์และเกิดจากการเผาไหม้ของชีวมวลภายในพื้นที่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่เป็นคาบสมุทรอินโดจีน

ภูมิอากาศวิทยาในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ภูมิอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีสาเหตุหลักมาจากลมมรสุมดังแสดงในภาพที่ 1 (Pochanart et al., 2001; 2003) โดยมีลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาที่คล้ายคลึงกับพื้นที่ภูมิภาคเอเชียใต้ (Lobert & Harris, 2002; Naja & Lal, 1996; Naja, Lal & Chand, 2003) ลักษณะของลมมรสุมและการเคลื่อนตัวของร่องความกดอากาศต่ำ (Intertropical Convergence Zone – ITCZ) ในพื้นที่จะเป็นตัวกำหนดภูมิอากาศและการแพร่กระจายของมวลอากาศในพื้นที่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในระยะทางไกล (Lobert & Harris, 2002; Pochanart et al., 2003) จากการที่ภูมิประเทศส่วนใหญ่ในภูมิภาคตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ร้อนชื้นเป็นหลัก ดังนั้นฤดูกาลจึงไม่แตกต่างอย่างชัดเจนเหมือนกับในภูมิภาคเขตอบอุ่นหรือเขตหนาว อย่างไรก็ตาม เราจะเห็นความแตกต่างระหว่างฤดูแล้งและฤดูฝนในภูมิภาค เมื่อร่องความกดอากาศต่ำเคลื่อนผ่านบริเวณพื้นที่ทางตอนเหนือของภูมิภาคเข้าสู่บริเวณซีกโลกเหนือ ลมมรสุมจะนำพามวลอากาศจากมหาสมุทรอินเดียเข้าสู่พื้นที่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเกิดฤดูฝน ซึ่งจะกินระยะเวลาประมาณ 6 เดือน ตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม หลังจากนั้นเมื่อร่องความกดอากาศต่ำเคลื่อนผ่านลงไปในทางใต้ของภูมิภาค ลมมรสุมฤดูหนาวจะนำมวลอากาศจากใจกลางทวีปเอเชียตอนบนเข้ามายังภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่งผลให้มีลักษณะภูมิอากาศแบบแห้งแล้ง ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน กระบวนการเผาไหม้ชีวมวลจะเกิดขึ้นมากในช่วงภูมิอากาศแบบแห้งแล้งหรือฤดูแล้งนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความแตกต่างของการไหลเวียนของกระแสอากาศในซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ ฤดูฝนและฤดูแล้งในคาบสมุทรอินโดจีน (ทางตอนบน) และบริเวณหมู่เกาะทางตอนล่างของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ จะเกิดสลับกันในแต่ละช่วงเวลาของปี ส่งผลให้การเกิดไฟป่าและการเผาไหม้ของชีวมวลเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สลับกันด้วย ร่องความกดอากาศต่ำซึ่งเคลื่อนที่ขึ้นลงทั้งในซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนกันของมวลอากาศในสองซีกโลก

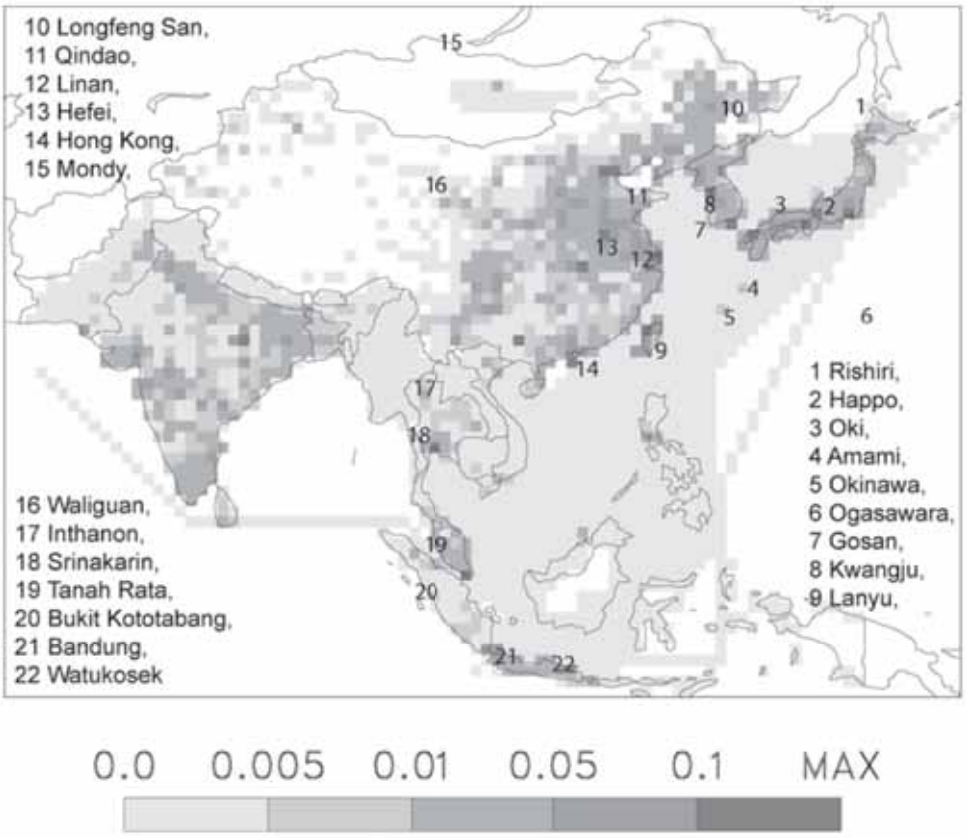


ภาพที่ 1 (a,b) แสดงรูปแบบการกระจายความกดอากาศและลักษณะการพัดพาของแรงลมบริเวณพื้นผิวโลก โดยภาพที่ 1(a) แสดงลักษณะในช่วงมรสุมฤดูหนาวและภาพที่ 1(b) แสดงลักษณะในช่วงมรสุมฤดูร้อน โดยเส้นประแสดงถึงร่องความกดอากาศต่ำ (ITCZ)

ที่มา: Ahrens (1994)

การไหลเข้าของมลพิษทางอากาศจากภายนอกเข้าสู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

จากการศึกษาพบว่าหลักฐานที่ชัดเจนจากการตรวจวัดที่เกี่ยวข้องกับการแพร่กระจายในระยะทางไกลจากภูมิภาคอื่นที่เข้าสู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศยังมีจำนวนน้อย ทั้งนี้ เนื่องจากการศึกษาเรื่องดังกล่าวยังมีไม่มากนัก และการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศในพื้นที่ภูมิภาคนี้ยังมีลักษณะที่แตกต่างจากภูมิภาคอเมริกาและยุโรป ถึงแม้ว่าการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศจะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมเป็นหลักเช่นเดียวกับภูมิภาคเอเชียตะวันออก การศึกษาในเรื่องนี้ทั้งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และเอเชียใต้ ยังน้อยมากเมื่อเทียบกับการศึกษาในภูมิภาคเอเชียตะวันออก



ภาพที่ 2 ตำแหน่งสถานีตรวจวัดมลพิษทางอากาศที่เป็นตัวแทนในระดับภูมิภาคในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แสดงควบคู่ไปกับ จำนวนปริมาณ NO_2 ที่ปล่อยออกมาในปี 1990 (หน่วยเป็น Tg NO_2 ต่อตารางเมตรต่อปี)

ที่มา: ปรับปรุงจากแผนที่การปลดปล่อย NO_2 โดยมหาวิทยาลัยไอโอวา
(http://www.cgrer.uiowa.edu/people/carmichael/Carmichael.html)

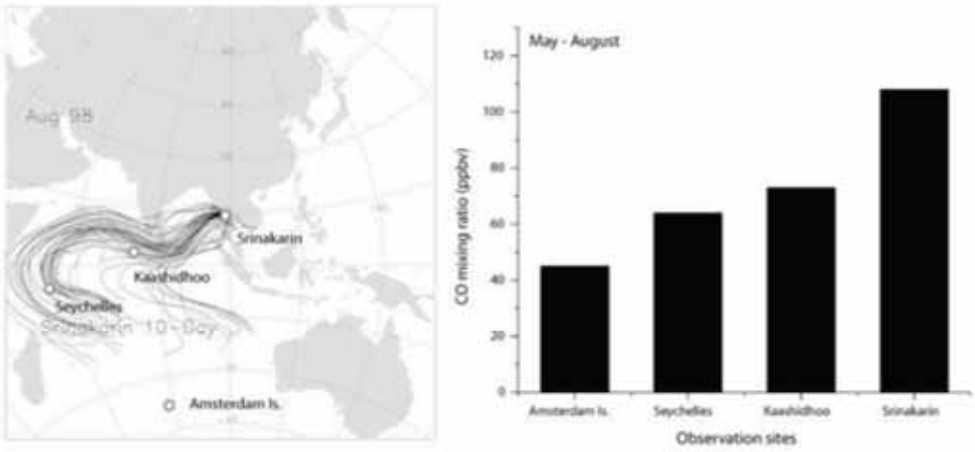
ภาพที่ 2 แสดงจำนวนสถานีตรวจวัดมลพิษทางอากาศในอดีตที่ผ่านมาที่สามารถใช้ศึกษาเรื่องการแพร่กระจายในระยะทางไกลในระดับภูมิภาคของทวีปเอเชีย พบว่าจำนวนสถานีตรวจวัดที่เป็นตัวแทนของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ยังมีจำนวนจำกัดเมื่อเปรียบเทียบกับภูมิภาคเอเชียตะวันออก ในปัจจุบัน มีการตรวจวัดมลพิษทางอากาศอย่างเป็นระบบมากขึ้นในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และจำนวนสถานีตรวจวัดมลพิษทางอากาศก็เพิ่มจำนวนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากสถานีตรวจวัดมลพิษที่ตั้งอยู่ในเมืองโดยส่วนใหญ่ ไม่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์เรื่องการแพร่กระจายในระยะทางไกลได้ เนื่องจากมลพิษที่ตรวจวัดได้จะมีความเข้มข้นสูงเพราะเกิดจากแหล่งกำเนิดในท้องถิ่นไม่ไกลจากสถานีตรวจวัด การใช้ข้อมูลมลพิษทางอากาศเพื่อศึกษาเรื่องการแพร่กระจายในระยะทางไกล จำเป็นต้องใช้ข้อมูลมลพิษทางอากาศจากสถานที่ที่ห่างไกลจากตัวเมือง ได้รับการรบกวนจากแหล่งกำเนิดมลพิษในท้องถิ่นให้น้อยที่สุด และเป็นตัวแทนของลักษณะมลพิษในระดับภูมิภาคได้ ในประเทศไทย นอกจากสถานีตรวจวัดที่ดอยอินทนนท์และเขื่อนศรีนครินทร์แล้ว ยังมีข้อมูลมลพิษทางอากาศที่สถานีพิมาย จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งอาจใช้ศึกษาการแพร่กระจายในระยะทางไกลได้ ถึงแม้ว่าตำแหน่งที่ตั้งของสถานีอาจได้รับอิทธิพลจากเมืองใหญ่ในประเทศไทยในบางฤดู

ดังที่กล่าวถึงในบทความตอนแรก ในการศึกษาการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศในระยะทางไกล ชนิดของมลพิษที่มักใช้กันบ่อยคือ คาร์บอนมอนอกไซด์ซึ่งเป็นสารมลพิษปฐมภูมิที่มีช่วงอายุยาวนานพอที่จะกระจายไปในระดับภาคพื้นทวีปและระดับโลกได้ และอีกชนิดคือ โอโซน ซึ่งเป็นสารมลพิษทุติยภูมิแต่ก็สามารถแพร่กระจายได้ในระยะไกลเช่นกันขึ้นอยู่กับฤดูกาล โดยในฤดูหนาวโอโซนมีช่วงอายุที่ยาวนานกว่าในฤดูร้อน (Pochanart, 2012)

ในมุมมองระดับทวีป การไหลเข้าของมลพิษทางอากาศด้วยการแพร่กระจายในระยะทางไกลนั้น จะพบว่าภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้รับอิทธิพลจากการไหลเข้าของมลพิษทางอากาศผ่านการแพร่กระจายในระยะทางไกลจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกและเอเชียใต้ สาเหตุที่สำคัญของมลพิษเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ การแพร่กระจายในระยะทางไกลจากภูมิภาคอื่น ๆ ในทวีปเอเชียมายังภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มักเกิดไม่บ่อยและตรวจพบเป็นครั้งคราวเท่านั้น อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาโดยแบบจำลองพบว่า การแพร่กระจายในระยะทางไกลในระดับข้ามทวีปสามารถเกิดขึ้นได้ในคาบสมุทรอินโดจีน ผลการศึกษาโดยแบบจำลองในระดับโลก ในช่วงโครงการตรวจวัด PEM – West B (The Pacific Exploratory Missions – West B) ในช่วงฤดูใบไม้ผลิปี พ.ศ. 2537 พบว่าปัญหามลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากการเผาไหม้ชีวมวลในเขตทวีปแอฟริกาสามารถส่งผลกระทบต่อบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ตอนบนของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Bey, Jacob, Logan & Yantosca, 2001)

ในช่วงฤดูมรสุมหรือช่วงฤดูฝน เขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะได้รับอิทธิพลจากมวลอากาศที่ไหลเข้ามาจากทางมหาสมุทรอินเดีย การที่มวลอากาศจากมหาสมุทรอินเดียไหลผ่านเข้ามาในช่วงเวลาดังกล่าว ส่งผลให้ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้รับผลกระทบจากมลพิษทางอากาศในปริมาณที่น้อยถึงปานกลาง เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในเขตพื้นที่ประเทศไทยบริเวณสถานีตรวจวัดเขื่อนศรีนครินทร์ กับอีกสามสถานีตรวจวัดในมหาสมุทรอินเดีย ดังในภาพที่ 3 พบว่ามวลอากาศที่เริ่มต้นบริเวณใจกลางมหาสมุทรและเคลื่อนที่ผ่านภูมิภาคเอเชียใต้มายังภูมิภาคเอเชีย

ตะวันออกเฉียงใต้ในฤดูมรสุมนั้น มีปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ภายหลังจากที่มวลอากาศจากมหาสมุทรอินเดียไหลผ่านเข้าสู่ประเทศไทย



ภาพที่ 3 ภาพซ้ายแสดงการเคลื่อนที่ย้อนหลัง 10 วันของมวลอากาศก่อนที่จะเคลื่อนตัวเข้าสถานีตรวจวัดศรีนครินทร์ ในเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2541 ในรูปจะแสดงถึงสถานีตรวจวัดอีก 3 แห่งที่ทำการเก็บข้อมูลที่ตั้งอยู่ในเขตมหาสมุทรอินเดีย ได้แก่ Kaashidhoo Seychelles และ เกาะ Amsterdam ภาพขวาแสดงถึงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ณ บริเวณสถานีตรวจวัดทั้งสี่ในช่วงฤดูมรสุม (เดือนพฤษภาคม – เดือนสิงหาคม)

ที่มา: Gros et al. (1999), Novelli, Masarie & Lang (1998), Holloway, Levy & Kasibhatla (2000), Lobert & Harris (2002), Pochanart et al. (2003)

จากภาพที่ 3 เห็นได้ว่ามวลอากาศที่ไหลเข้าสู่ประเทศไทยนั้นมีต้นกำเนิดมาจากมหาสมุทรอินเดียและบริเวณที่มวลอากาศไหลเข้าสู่ประเทศไทยในฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ การศึกษาจาก backward trajectory นั้น พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในปริมาณต่ำสุดที่สถานีตรวจวัดในเกาะ Amsterdam ซึ่งอยู่ใจกลางมหาสมุทรอินเดียและค่อย ๆ เพิ่มสูงขึ้นที่สถานีตรวจวัดบนเกาะSeychelles เรื่อยมาถึงสถานีตรวจวัดใน Kaashidhoo จนถึงสถานีตรวจวัดเขื่อนศรีนครินทร์ พบความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้การวิเคราะห์วิถีการไหลเข้าของมวลอากาศจากเกาะ Amsterdam มาถึงสถานีตรวจวัดเขื่อนศรีนครินทร์ พบว่าอิทธิพลหลักที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์นั้นเกิดจากแหล่งกำเนิดมลพิษขนาดใหญ่บริเวณทวีปแอฟริกาตะวันออกและบริเวณคาบสมุทรอินเดีย นอกเหนือไปจากแหล่งกำเนิดมลพิษในระดับท้องถิ่นและระดับภูมิภาคย่อยในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้น 20 ส่วนในพันล้านส่วนโดยปริมาตร (ppbv) เมื่อเปรียบเทียบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตรวจวัดได้ที่สถานีตรวจวัดเกาะ Seychelles และสถานีตรวจวัดที่เกาะ Amsterdam นั้น เป็นผลมาจากมวลอากาศไหลผ่านทวีปแอฟริกาและเกาะมาดากัสกา และการเพิ่มขึ้นของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ อีกประมาณ 10 ppbv และ 45 ppbv ที่สถานีตรวจวัด Kaashidhoo และสถานีตรวจวัดเขื่อนศรีนครินทร์ตามลำดับ เกิดเนื่องจากเกิด

การปนเปื้อนสะสมในระหว่างที่มวลอากาศไหลผ่านเขตพื้นที่คาบสมุทรอินเดียตอนล่าง (Gros, Bonsang, Martin, Novelli & Kazan, 1999; Lobert & Harris, 2002; Pochanart et al., 2003) ซึ่งถือเป็นแหล่งมลพิษขนาดใหญ่ (Chand, Lal & Naja, 2003; Lal, Naja & Jayaraman, 1998; Naja & Lal, 1996; Naja & Lal, 2002;) การเพิ่มขึ้นของมลพิษทางอากาศจากการที่มวลอากาศไหลผ่านเข้ามาสู่คาบสมุทรอินเดียนั้นสอดคล้องกับผลการตรวจวัดในโครงการวิจัยของ INDOEX (The Indian Ocean Experiment) โดยเรือตรวจวัดในช่วงที่ผ่านมาเช่นกัน (Chand, Lal & Naja, 2003; Stehr et al., 2002;)

เป็นที่น่าสนใจว่า ในขณะที่มีงานวิจัยที่ตรวจวัดในพื้นที่ห่างไกลของภูมิภาคเอเชียใต้ และพบว่ามลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลในเขตพื้นที่ทวีปแอฟริกาและทวีปออสเตรเลียสามารถส่งผลกระทบต่อพื้นที่บางส่วนของภูมิภาคเอเชียใต้ได้ (Lobert & Harris, 2002) ผลกระทบจากการแพร่กระจายในระยะทางไกลดังกล่าวยังไม่สามารถสังเกตอย่างชัดเจนในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ได้ สาเหตุอาจเกิดจาก (1) ข้อมูลจากการตรวจวัดยังมีจำกัด และ (2) มลพิษทางอากาศในเขตพื้นที่เอเชียใต้และคาบสมุทรอินโดจีนมีความเข้มข้นที่สูงกว่า หลักฐานที่มีอยู่อย่างจำกัดแต่มีนัยสำคัญคือ การพบปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากระดับปกติมากกว่า 60 ppbv ณ สถานีตรวจวัดเขื่อนศรีนครินทร์ในมวลอากาศที่มาจากมหาสมุทรอินเดียแต่ได้รับอิทธิพลจากการเผาไหม้ชีวมวลในเขตพื้นที่ประเทศอินโดนีเซียและประเทศออสเตรเลียตอนบน ในช่วงปรากฏการณ์เอลนีโญ ในปี พ.ศ. 2540 (Pochanart et al., 2003)

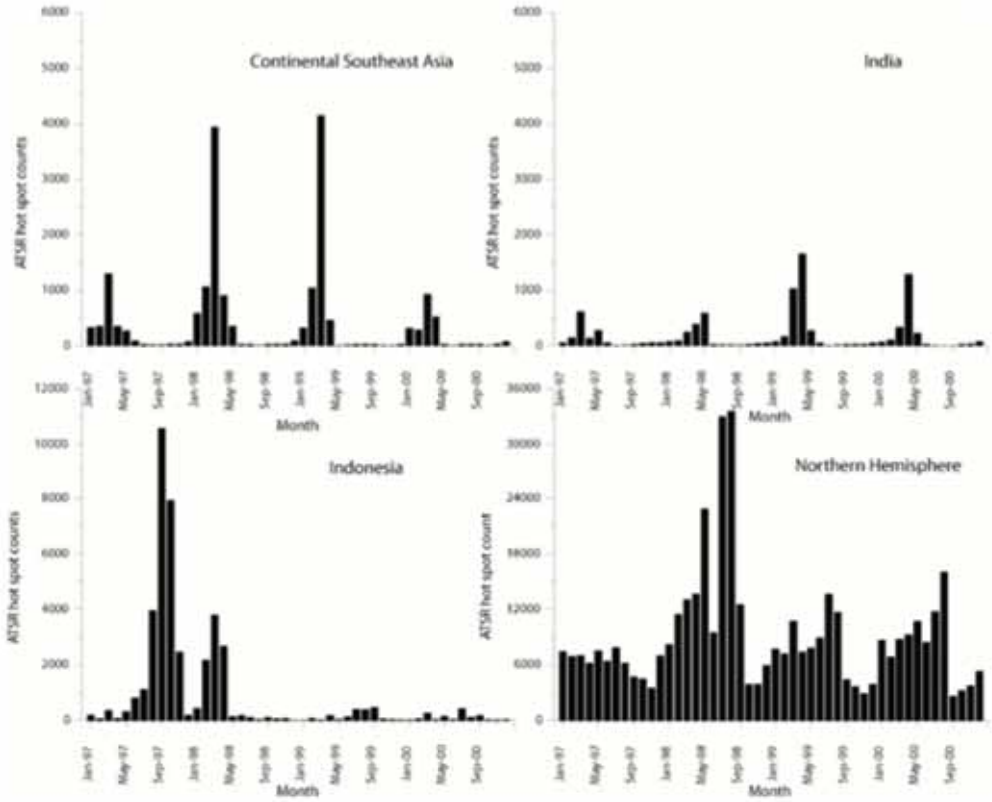
ในกรณีฤดูหนาวหรือฤดูแล้ง ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ทางตอนบนจะได้รับผลกระทบจากการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศที่มาจากภูมิภาคตะวันออกและจากทางตะวันตกของทวีปเอเชีย (Pochanart et al., 2001; Pochanart, et al. 2003; Newell & Evans, 2000) ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ตอนกลางและล่าง ในช่วงเริ่มต้นของมรสุมฤดูหนาว พื้นที่ทางตะวันออกของทวีปเอเชียจะได้รับอิทธิพลจากความกดอากาศสูงจากใจกลางทวีปบริเวณไซบีเรียและลมมรสุมจากภาคพื้นทวีป มวลอากาศจากภาคพื้นทวีปจะเคลื่อนตัวในลักษณะการหมุนตามเข็มนาฬิกา (ดังในภาพที่ 1) จากใจกลางทวีปมายังเอเชียตะวันออก จากนั้นลมมรสุมที่เรียกกันในประเทศไทยว่าลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือนี้จะนำมวลอากาศที่หนาวเย็นและมีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำต่อมายังบริเวณคาบสมุทรอินโดจีน เป็นที่ทราบกันดีว่าภูมิภาคเอเชียตะวันออกเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศที่ใหญ่ที่สุดแหล่งหนึ่งของโลก จัดได้ว่ามีความสำคัญเทียบเท่ามลพิษทางอากาศจากทวีปอเมริกาเหนือและจากทวีปยุโรป มลพิษทางอากาศเหล่านี้เกิดจากการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว และกิจกรรมอื่นๆของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในประเทศจีน ซึ่งการจัดการสิ่งแวดล้อมและมลพิษต่าง ๆ ยังพัฒนาได้ไม่เต็มขีดความสามารถ เมื่อกระแสลมจากใจกลางทวีปพัดผ่านภูมิภาคเอเชียตะวันออก ก็จะนำมลพิษทางอากาศในระดับภูมิภาคที่มีปริมาณสูงไปกับมวลอากาศ ทำให้มวลอากาศมีปริมาณมลพิษทางอากาศเพิ่มสูงขึ้นก่อนที่จะแพร่กระจายต่อไป โดยที่ส่วนหนึ่งแพร่กระจายไปสู่มหาสมุทรแปซิฟิค และอีกส่วนหนึ่งแพร่กระจายมายังภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้พบการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างมีนัยสำคัญในมวลอากาศจากภาคพื้นทวีปที่มากับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยหากเปรียบเทียบกันแล้ว ค่าความเข้มข้น

เฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในมวลอากาศจากภาคพื้นทวีปที่มากับมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะมีมากกว่า 300 ppbv ในขณะที่ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในมวลอากาศจากมหาสมุทรอินเดียที่มากับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้มีเพียงประมาณ 100 ppbv ณ สถานีตรวจวัดเขื่อนศรีนครินทร์ (Pochanart et al., 2003) ในช่วงปลายของฤดูแล้งซึ่งเป็นฤดูร้อนในคาบสมุทรอินโดจีน ยังพบการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศที่มาจากภูมิภาคตะวันออกกลาง เอเชียตะวันตกและทวีปยุโรปอีกด้วย (Pochanart et al., 2001; 2003; Newell & Evans, 2000) อย่างไรก็ตาม ช่วงปลายฤดูแล้งในคาบสมุทรอินโดจีนจะเป็นช่วงเวลาที่เกิดไฟป่าและการเผาไหม้ชีวมวลภายในภูมิภาค ซึ่งมีส่วนทำให้เกิดมลพิษทางอากาศในปริมาณสูงที่สุดของปี มลพิษทางอากาศที่เกิดจากไฟป่าและการเผาไหม้ชีวมวลในคาบสมุทรอินโดจีนนี้ โดยรวมมีความเข้มข้นมากกว่ามลพิษทางอากาศที่แพร่กระจายในระยะทางไกลจากภูมิภาคเอเชียตะวันออก ดังนั้นจึงเป็นการยากในการตรวจสอบและวัดผลกระทบของปริมาณการไหลเข้าของมลพิษทางอากาศในมวลอากาศที่มาจากภูมิภาคอื่นในช่วงฤดูดังกล่าว ซึ่งจะเกิดขึ้นในระดับที่ต่ำกว่ามลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ชีวมวลภายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้เอง แต่สามารถกล่าวได้ว่า ช่วงปลายฤดูหนาวเป็นช่วงเวลาที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ทางตอนบนจะได้รับผลกระทบถึงสองทาง คือมลพิษทางอากาศที่แพร่กระจายมาจากแหล่งกำเนิดมลพิษขนาดใหญ่ในภูมิภาคเอเชียตะวันออก และมลพิษทางอากาศที่มาจากไฟป่าและการเผาไหม้ชีวมวลในภูมิภาคนี้เอง

การไหลออกของมลพิษทางอากาศจากภายในออกสู่ภายนอกภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

การไหลออกของมลพิษทางอากาศจากคาบสมุทรอินโดจีนจะมีนัยสำคัญที่สุดในช่วงฤดูเผาไหม้ปลายฤดูแล้ง เมื่อพ้นช่วงนี้ไปแล้วในฤดูอื่น ๆ การไหลออกของมลพิษทางอากาศจากคาบสมุทรอินโดจีนมักไม่เกิดผลกระทบต่อภายนอกภูมิภาค เนื่องจากมลพิษทางอากาศมีปริมาณค่อนข้างต่ำ ในช่วงฤดูฝน มวลอากาศจากมหาสมุทรอินเดียซึ่งได้รับมลพิษทางอากาศจากกิจกรรมของมนุษย์ในภูมิภาคเอเชียใต้และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จะแพร่กระจายต่อไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ การศึกษามลพิษทางอากาศและสภาพอากาศที่ภูเขาไฟฟูจิในตอนกลางของประเทศญี่ปุ่น พบว่ามีการไหลเข้าของมวลอากาศจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โดยการแพร่กระจายในระยะทางไกล อย่างไรก็ตาม ไม่ได้มีการตรวจพบความเข้มข้นที่สูงขึ้นของมลพิษทางอากาศ เช่น ก๊าซโอโซน หรือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มากับมวลอากาศนั้น (Tsusumi & Matsueda, 2000) ในทางกลับกัน ในช่วงฤดูหนาวของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้นจะมีการไหลออกของมวลอากาศไปสู่พื้นที่มหาสมุทรอินเดีย ซึ่งเมื่อทำการตรวจวัดถึงเส้นทางการแพร่กระจายของมวลอากาศ ณ สถานีตรวจวัดใน Kaashidhoo พบว่า ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นสูงสุด คือ มากกว่า 140 ppbv จะมากับมวลอากาศที่เดินทางผ่านภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ก่อนที่จะไหลเข้าสู่มหาสมุทรอินเดีย (Lobert & Harris, 2002)



ภาพที่ 4 จำนวนจุดร้อนจาก ATSR ณ บริเวณในพื้นที่ทวีปเขตภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตอนบนหรือคาบสมุทรอินโดจีน (5–25°N, 90–110°E) และบนพื้นที่คาบสมุทรอินเดีย (5–30°N, 70–90°E) หมู่เกาะประเทศอินโดนีเซีย (10°S–5°N, 95–130°E) และจากพื้นที่ซีกโลกเหนือโดยรวม
ที่มา; ESA (1999), การนำเสนอข้อมูล ATSR ในครั้งนี้ได้รับอนุญาตตามลิขสิทธิ์ของ ESA 1999, ESA/ESRIN, ATSR World Fire Atlas Project /the IGBP-DIS Office

ในช่วงตอนปลายของฤดูแล้งหรือระหว่างเดือนมกราคมถึงเดือนเมษายนของทุกปี แหล่งกำเนิดใหญ่ของมลพิษทางอากาศในเขตพื้นที่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตอนบนจะเกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในปริมาณมาก ปริมาณการเผาไหม้นั้นสามารถศึกษาได้จากข้อมูลจำนวนจุดร้อน (Hot Spot) ซึ่งตรวจวัดโดยเซนเซอร์จากดาวเทียม เช่น Along Track Scanning Radiometer (ATSR) (Buongiorno, Arino, Zehner, Colagrande & Goryl, 1997; Goloub & Arino, 2000) เมื่อนำข้อมูลจุดร้อนในแต่ละรอบการโคจรของดาวเทียมมาสรุปเป็นรอบเดือน ดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่ามีจำนวนจุดร้อนซึ่งจะแสดงการเกิดไฟป่าหรือการเผาไหม้ ในคาบสมุทรอินโดจีนมากกว่าในประเทศอินเดียหรืออินโดนีเซีย ยกเว้นในช่วงเหตุการณ์ไฟป่าอย่างรุนแรงในประเทศอินโดนีเซียเมื่อปีพ.ศ.2540 เมื่อพิจารณาในช่วงฤดูใบไม้ผลิปี พ.ศ. 2541 และ พ.ศ. 2542 พบจำนวนจุดร้อนในเขตพื้นที่คาบสมุทรอินโดจีน ถึงร้อยละ 30 –35 ของจำนวนจุดร้อนที่เกิดทั้งหมดในซีกโลกเหนือ การศึกษาการกระจายตัวของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทั่วโลก ภายใต้โครงการ PEM tropic B ในช่วงระหว่างเดือนมีนาคมถึงเดือนเมษายน

พ.ศ.2542 พบการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากการเผาไหม้ชีวมวลในทวีปเอเชีย (เอเชียใต้ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เป็นหลัก) เป็นปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ทั่วโลกและสูงเกือบสี่เท่าของปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จากเชื้อเพลิงฟอสซิลในช่วงเวลาเดียวกันของพื้นที่ทั้งทวีปเอเชีย (รวมกัน) (Staudt et al., 2001) สำหรับประเทศไทย มีงานวิจัยที่ระบุถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่าง จำนวนจุดร้อน กับ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซโอโซน และ ตัวชี้วัดแอโรโซลโพลเดอร์ (POLDER Aerosol Index) (Goloub & Arino, 2000; Pochanart et al., 2003) ในช่วงฤมภาพันธ์ถึงมีนาคมซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีการเผาไหม้ชีวมวลและไฟป่ามากที่สุดนั้น ก๊าซโอโซนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ตรวจพบในพื้นที่ชนบทของประเทศไทย มีค่าความเข้มข้นสูงถึง 4-6 เท่าของปริมาณที่ตรวจพบในฤดูฝน ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายคลึงกับที่พบจากการศึกษาในเอเชียใต้ (Lobert & Harris, 2002; Naja & Lal, 2002; Naja, Lal & Chand, 2003) ค่าเฉลี่ยสูงสุดรายเดือนของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ตรวจวัดที่ สถานีSeychelles สถานี Kaashidhoo และสถานีเขื่อนศรีนครินทร์ นั้นมีความเข้มข้นเป็น 150 240 และ 450 ppbv ตามลำดับ (Lobert & Harris, 2002; Pochanart et al., 2003)

การยกตัวขึ้นของมวลอากาศที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลและการรวมเข้าสู่บรรยากาศในตอนกลางและตอนบนของชั้นโทรโพสเฟียร์ อาจนำมลพิษทางอากาศเข้าสู่กระแสลมตะวันตกในบริเวณแนวเส้นละติจูดเขตกึ่งโซนร้อนและแพร่กระจายไปในทิศตะวันออก การไหลออกของมลพิษทางอากาศจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นี้ สามารถถูกตรวจพบทั้งในการวิจัยจากการตรวจวัดและจากแบบจำลอง (Bey et al., 2001; Blake et al., 2001; Staudt et al., 2001) การวิเคราะห์ข้อมูลบอลลูนตรวจวัดโอโซนและบรรยากาศ (Ozone Sounding) เหนือพื้นที่เขตปกครองพิเศษฮ่องกง ซึ่งตั้งอยู่ทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศจีนพบอิทธิพลจากการเผาไหม้ชีวมวลจากคาบสมุทรอินโดจีนในชั้นบรรยากาศของจีนภาคตะวันออกเฉียงใต้ (Chan et al., 2000; 2001; 2003a; 2003b; Liu, Chang, Oltmans, Chan & Harris, 1999; Liu et al., 2002) จากการตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูล ตั้งแต่ปี พ.ศ.2536 – พ.ศ.2542 เป็นเวลา 6 ปี พบว่าร้อยละ 90 ของเหตุการณ์ที่เกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซโอโซนจะเป็นช่วงเวลาเดียวกับฤดูเผาไหม้ในคาบสมุทรอินโดจีน และพบว่าร้อยละ 70 ของชั้นบรรยากาศที่มีโอโซนเพิ่มขึ้นนี้จะอยู่ที่ระดับความสูง 2 ถึง 6 กิโลเมตร (Chan et al., 2003b) ก๊าซโอโซนที่เพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศเหล่านี้สามารถนับได้ถึงร้อยละ 12 ของปริมาณโอโซนในชั้นบรรยากาศโดยรวม (Ozone Column) การเพิ่มขึ้นของโอโซนจากอิทธิพลของการเผาไหม้ชีวมวลนี้ พบได้ไกลถึงสถานี Hilo ที่ทำการตรวจวัดเหนือมหาสมุทรแปซิฟิคตะวันออก ภายใต้โครงการ PEM-Tropics ในช่วงฤดูใบไม้ผลิ ปี พ.ศ. 2542 ยังพบเหตุการณ์ที่เกิดการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์อิสระเหนือพื้นที่เขตร้อนทางตอนเหนือของมหาสมุทรแปซิฟิค พบว่าร้อยละ 20 ของปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ดังกล่าวเกิดจากการแพร่กระจายในระยะทางไกลของมลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากการไหลออกของมวลอากาศจากภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ข้ามมหาสมุทรแปซิฟิค (Staudt et al., 2001)

สรุป

บทความนี้เป็นการทบทวนผลการศึกษาที่มีอยู่ทั้งจากงานวิจัยโดยการตรวจวัดปริมาณมลพิษทางอากาศในอดีตและจากแบบจำลองการศึกษาการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศ นำเสนอปัญหาการแพร่กระจายทั้งการไหลเข้าและการไหลออกของมลพิษทางอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยมุ่งประเด็นไปที่ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซโอโซนเป็นสำคัญ ผู้เขียนได้รวบรวมสาเหตุและกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่กระจายทั้งการไหลเข้าและไหลออกของมลพิษทางอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งถือเป็นหนึ่งภูมิภาคที่ประสบปัญหามลพิษทางอากาศที่สำคัญ โดยสาเหตุสำคัญของปัญหามลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ คือการเผาไหม้ชีวมวล นอกจากนี้การพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็วในภูมิภาคนี้ยังเพิ่มศักยภาพในการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศในภูมิภาคอีกด้วย สามารถสรุปกล่าวแยกตามการแพร่กระจายเข้าออกของมลพิษทางอากาศในภูมิภาค ได้ดังนี้

การไหลเข้าของมลพิษทางอากาศจากภายนอกภูมิภาคเข้ามาสู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นั้นอยู่ในเกณฑ์น้อย โดยในช่วงฤดูฝน ลมมรสุมเขตร้อนและมวลอากาศเหนือน่านน้ำมหาสมุทรอินเดียจะพัดผ่านเข้ามาในภูมิภาค ในบางช่วงเวลาภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตอนบนยังได้รับอิทธิพลของมลพิษทางอากาศในปริมาณน้อยจากแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศในพื้นที่คาบสมุทรอินเดียด้วย ในช่วงฤดูแล้งเมื่อลมมรสุมฤดูหนาวพัดพาเอามวลอากาศที่ได้รับอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดมลพิษในภูมิภาคเอเชียตะวันออกก่อนจะแพร่กระจายในระยะทางไกลและไหลเข้ามาสู่ภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศในภูมิภาคที่เพิ่มมากขึ้นกว่าในช่วงฤดูฝน ประกอบกับเป็นช่วงฤดูการเผาไหม้ชีวมวล ทำให้โดยรวมปริมาณมลพิษทางอากาศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ตอนบนมีมากเพิ่มขึ้นไปอีก

ส่วนการไหลออกของมลพิษทางอากาศจากภายในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ออกสู่ภายนอกนั้น มีสาเหตุหลักมาจากการเผาไหม้ชีวมวลซึ่งพบได้มากในช่วงปลายฤดูหนาวและต้นฤดูร้อน โดยมวลอากาศที่มีมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ชีวมวลส่วนหนึ่งจะแพร่กระจายไปโดยลมมรสุมฤดูหนาวสู่บริเวณมหาสมุทรอินเดีย และอีกส่วนหนึ่งจะยกตัวสูงขึ้นในระดับชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ตอนกลางหรือตอนบน หลังจากนั้น กระแสลมตะวันตกจะพัดพาเอามวลอากาศกลุ่มดังกล่าวออกสู่เขตพื้นที่มหาสมุทรแปซิฟิค กล่าวได้ว่าการแพร่กระจายในระยะทางไกลข้ามมหาสมุทรแปซิฟิคของมลพิษทางอากาศจากการเผาไหม้ชีวมวลในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้นับเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซโอโซนเพิ่มขึ้นในพื้นที่เขตร้อนทางตอนเหนือของมหาสมุทรแปซิฟิคในช่วงฤดูใบไม้ผลิ

เอกสารอ้างอิง

Aardenne van, J. A., Carmichael, G. R., Levy, H. II., Streets, D. & Hordijk, L. (1999). Anthropogenic NOx emissions in Asia in the period 1990-2020. *Atmospheric Environment*, 33, 633-646.

Ahrens, C. (1994). *Meteorological Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment, 5th ed.* Minneapolis; St. Paul: West Publishing Company.

Bey, I., Jacob, D. J., Logan, J. A. & Yantosca, R. M. (2001). Asian chemical outflow to the Pacific in spring: Origins, pathways, and budgets. *Journal of Geophysical Research,106*(D19), 23097-23113.

Blake, N. J., Blake, D. R., Simpson, I. J., Lopez, J. P., Johnston, N. J. C., Swanson, A. L., Katzenstein, A. S., Meinardi, S., Sive, B. C., Colman, J. J., Atlas, E., Flocke, F., Vay, S. A., Avery, M. A. & Rowland, F. S. (2001). Large-scale latitudinal and vertical distributions of NMHCs and selected halocarbons in the troposphere over the Pacific Ocean during the March-April 1999 Pacific Exploratory Mission (PEM-Tropics B). *Journal of Geophysical Research, 106*(D23), 32627-32644.

Brasseur, G. P., Kiehl, J. T., Müller, J.-F., Schneider, T., Granier, C., Tie, X. & Hauglustaine, D. (1998). Past and future changes in global tropospheric ozone: impact on radiative forcing. *Geophysical Research Letter, 25*, 3807-3810.

Buongiorno, A., Arino, O., Zehner, C., Colagrande, P. & Goryl, P. (1997). ERS-2 monitors exceptional fire event in. South-East Asia. *Earth Observation Quaterly, 56*, 1-5.

Chan, L. Y., Chan, C. Y., Liu, H., Christopher, S., Oltsman, S. J. & Harris, J. M. (2000). A case study on the biomass burning in Southeast Asia and enhancement of tropospheric ozone over Hong Kong. *Geophysical Research Letter*, 27(10), 1479-1482.

Chan, C. Y., Chan, L. Y., Zheng, Y. G., Harris, J. M., Oltsman, S. J. & Christopher, S. (2001). Effects of 1997 Indonesian forest fires on tropospheric ozone enhancement, radiative forcing, and temperature change over the Hong Kong region. *Journal of Geophysical Research, 106,* 14875-14886.

Chan, C. Y., Chan, L. Y., Harris, J. M., Oltmans, S. J., Blake, D. R., Qin, Y., Zheng, Y. G. & Zheng, X. D. (2003a). Characteristics of biomass burning emission sources, transport, andchemical speciation in enhanced springtime tropospheric ozone profile over Hong Kong. *Journal of Geophysical Research, 108*(D01), 4015, doi:10.1029/2001JD001555.

Chan, C. Y., Chan, L. Y., Chang, W. L., Zheng, Y. G., Cui, H., Zheng, X. D., Qin, Y. & Li, Y. S. (2003b). Characteristics of a tropospheric ozone profile and implications

for the origin of ozone over subtropical China in the spring of 2001. *Journal of Geophysical Research*, *108*(D20), 8800, doi:10.1029/2003JD003427.

Chand, D., Lal, S. & Naja, M. (2003). Variations of ozone in the marine boundary layer over the Arabian Sea and the Indian Ocean during the 1998 and 1999 INDOEX campaigns. *Journal of Geophysical Research*, *108*(D6), 4190, doi:10.1029/2001JD001589.

Christopher, S. A., Chou, J., Welch, R. M., Kliche, D. V. & Connors, V. S. (1998). Satellite investigations of fire, smoke, and carbon monoxide during April 1994 MAPS mission: Case studies over tropical Asia. *Journal of Geophysical Research*, *103*(D15), 19327-19336.

Crutzen, P. J., Delany, A. C., Greenberg, J., Haagenson, P., Heidt, L., Lueb, R., Pollock, W., Seiler, W., Wartburg, A. & Zimmerman, P. (1985). Tropospheric chemical composition measurements in Brazil during the dry season. *Journal of Atmospheric Chemistry*, *2*(3), 233-256.

Crutzen, P. J. & Andreae, M. O. (1990). Biomass Burning in the Tropics: Impact on Atmospheric Chemistry and Biogeochemical Cycles. *Science*, *250*(4988), 1669-1678.

ESA (1999). ESA/ESRIN, ATSR World Fire Atlas Project /the IGBP-DIS Office (data available on request in 2003)

Goldammer, J. G. (1999). Forests on fire. *Science*, *284*, 1782-1783.

Goloub, P. & Arino, O. (2000). Verification of the consistency of POLDER Aerosol Index over land with ATSR-2/ERS-2 fire product. *Geophysical Research Letter*, *27*, 899-902.

Gros, V., Bonsang, B., Martin, D., Novelli, P. C. & Kazan, V. (1999). Carbon monoxide short term measurements at Amsterdam Island: estimations of biomass burning emission rates. *Chemosphere Global Science Change*, *1*(1), 163-172.

Holloway, T., Levy, H. II. & Kasibhatla, P. (2000). Global distribution of carbon monoxide. *Journal of Geophysical Research*, *105*(D10), 12123-12147.

Hurst, D. F., Griffith, D.W.T. & Cook, G. D. (1994). Trace gas emissions from biomass burning in tropical Australian savannas. *Journal of Geophysical Research*, 99(D8), 16441-16456.

Jones, S. H. (1997). The distribution of vegetation fire in mainland Southeast Asia: Spatio-temporal analysis of AVHRR 1 km data for the 1992/93 dry season.

European Commission, Joint Research Center, Space Applications Institute, EUR 17282 EN, 48 p.

Kirchhoff, V. W.J.H. & Rasmussen, R. A. (1990). Time variations of CO and O_3 concentrations in a region subject to biomass burning. *Journal of Geophysical Research, 95*(D6), 7521-7532.

Lal, S., Naja, M. & Jayaraman, A. (1998). Ozone in the marine boundary layer over the tropical Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research, 103*(D15), 18907-18917.

Liu, H., Chang, W. L., Oltmans, S. J., Chan, L. Y. & Harris, J. M. (1999). On springtime high ozone events in the lower troposphere from Southeast Asian biomass burning, *Atmospheric Environment, 33*(15), 2403-2410.

Liu, H., Jacob, D. J., Chan, L. Y., Oltmans, S. J., Bey, I., Yantosca, R. M., Harris, J. M., Duncan, B. N. & Martin, R. V., (2002). Sources of tropospheric ozone along the Asian Pacific Rim: An analysis of ozonesonde observations, *Journal of Geophysical Research, 107*(D21), 4573, doi: 10.1029/2001JD002005.

Lobert, J. M. & Harris, J. M. (2002). Trace gases and air mass origin at Kaashidhoo, Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research, 107*(D19), 8013, doi:10.1029/2001JD000731.

Naja, M. & Lal, S. (1996). Changes in surface ozone amount and its diurnal and seasonal patterns, from 1954–55 to 1991–93, measured at Ahmedabad (23 N), India. *Geophysical Research Letter, 23*(1), 81-84.

Naja, M. & Lal, S. (2002). Surface ozone and precursor gases at Gadanki (13.5oN, 79.2oE), a tropical rural site in India. *Journal of Geophysical Research,* 107(D14), 4197, doi:10.1029/2001JD000357.

Naja, M., Lal, S. & Chand, D. (2003). Diurnal and seasonal variabilities in surface ozone at a high altitude site Mt Abu (24.6 N, 72.7 E, 1680m asl) in India. *Atmospheric Environment, 37*(30), 4205-4215.

Newell, R. E. & Evans, M. J. (2000). Seasonal changes in pollutant transport to the North Pacific: the relative important of Asian and European sources. *Geophysical Research Letter*, 27, 2509-2512.

Nguyen, B. C., Mihalopoulos, N. & Putuad, J. P. (1994). Rice straw burning in Southeast Asia as a source of CO and COS to the atmosphere. *Journal of Geophysical Research, 99*(D8), 16435-16439.

Novelli, P. C., Masarie, K.A. & Lang, P. M. (1998). Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. *Journal of Geophysical Research, 103*(D15), 19015-19033.

Pochanart, P., Kreasuwun, J., Sukasem, P., Geeratithadaniyom, W., Tabulanon, M. S., Hirokawa, J., Kajii, Y. & Akimoto, H. (2001). Tropical tropospheric ozone observed in Thailand. *Atmospheric Environment, 35*(15), 2657-2668.

Pochanart, P., Akimoto, H., Kajii, Y., Sukasem, P. (2003). Carbon monoxide, regional-scale transport, and biomass burning in tropical continental Southeast Asia: Observations in rural Thailand. *Journal of Geophysical Research*, *108*(D17), 4552, doi: 10.1029/2002JD003360.

Pochanart, P. (2012). Air Pollution and Long-range Transport in Asia: (1) East Asia. [In Thai: มลพิษทางอากาศในระดับภูมิภาคและการแพร่กระจายในระยะทางไกล: (1) ภูมิภาคเอเชียตะวันออก]. *Environmental Management, 8*(1), 57-77.

Roths, J. & Harris, G. W. (1996). The tropospheric distribution of carbon monoxide as observed during the Tropoz II experiment. *Journal of Atmospheric Chemistry, 24*(2), 157-188.

Sanhueza, E., Crutzen, P. J. & Fernández, E. (1999). Production of boundary layer ozone from tropical American savannah biomass burning emissions. *Atmospheric Environvironment*, *33*(30), 4969-4975.

Siegert, F., Ruecker, G., Hinrichs, A. & Hoffmann, A. A. (2001). Increased damage from fires in logged forests during droughts caused by El Niño, *Nature, 414*, 437-440.

Staudt, A. C., Jacob, D. J., Logan, J. A., Bachiochi, D., Krishnamutri, T. N. & Sachse, G. W. (2001). Continental sources, transoceanic transport, and interhemispheric exchange of carbon monoxide over the Pacific. *Journal of Geophysical Research,106*(D23), 32571-32589.

Stehr, J. W., Ball, W.P., Dickerson, R. R., Doddridge, B. G., Piety, C. A. & Johnson, J. E. (2002). Latitudinal Gradients in O_3 and CO During INDOEX 1999. *Journal of Geophysical Research, 107*(D19), 8015, doi:10.1029/2001JD000446.

Streets, D. G., Tsai, N.Y., Akimoto, H. & Oka, K. (2002). Trends in Emissions of Acidifying Species in Asia, 1985–1997. *Water, Air, Soil and Pollution, 130*(1-4), 187-192.

Thompson, A. M., Witte, J.C., Hudson, R.D., Guo, H., Herman, J.R. & Fujiwara, M. (2001). Tropical tropospheric ozone and biomass burning. *Science, 291*(5511), 2128-2132.

Tsutsumi, Y. & Matsueda, H. (2000). Relationship of ozone and CO at the summit of Mt. Fuji in summer 1997. *Atmospheric Environment, 34*, 551-559.