

การใช้ประโยชน์วัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร สำหรับกักเก็บคาร์บอนและดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่าย ในชั้นบรรยากาศ

อาจารย์ ดร.สุทธิรัตน์ กิตติพงษ์วิเศษ, ดร.ดวงกมล พิหูสูตร และ พัชชาพันธ์ รัตนพันธ์
สถาบันวิจัยสถานะแวดล้อม และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร. กิตติคุณ จงรักษ์ ผลประเสริฐ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทนำ ►►

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการปนเปื้อนมลสารในชั้นบรรยากาศกำลังเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญในปัจจุบัน และทวีความรุนแรงมากขึ้นในหลายภูมิภาคทั่วโลก โดยมีหลักฐานเชิงประจักษ์ที่แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของปัญหาที่ชัดเจนมากขึ้น อาทิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวน้ำทะเลและชั้นบรรยากาศ การเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของฤดูกาลในคาบเวลาที่ผ่านมาเทียบกับปีปัจจุบัน เป็นต้น ทั้งนี้ กลุ่มนักวิทยาศาสตร์จากองค์การระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) ได้สันนิษฐานว่าสาเหตุสำคัญของปัญหาดังกล่าวว่าจะเกิดจากการสะสมของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศเนื่องจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงน้ำมันและถ่านหิน สำหรับการผลิตในภาคอุตสาหกรรม พาณิชยกรรม และการขนส่ง เป็นต้น รายงานข้อมูลการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศในช่วงค.ศ. 1800 - ค.ศ. 2000 ของ IPCC (2007) พบว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพิ่มขึ้นจาก 280 ส่วนในล้านส่วน (ppm) เป็น 360 ppm เช่นเดียวกับก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเพิ่มสูงขึ้น

กว่าเท่าตัว จาก 750 ส่วนในพันล้านส่วน (ppb) เป็น 1,750 ppb ส่วนก๊าซไนโตรสออกไซด์ (N_2O) มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ตั้งแต่มีการปฏิวัติเกษตรกรรม โดยตรวจพบความเข้มข้นในชั้นบรรยากาศจาก 270 ppm เพิ่มขึ้นเป็น 310 ppm โดยการสะสมของก๊าซเรือนกระจกกลุ่มดังกล่าวในชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลกเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 0.74 ± 0.18 องศาเซลเซียสในรอบศตวรรษ

ถึงแม้ว่าในปัจจุบัน (พ.ศ. 2560) ประเทศไทย ยังไม่มีพันธกรณีในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกภายใต้กลไกของพิธีสารเกียวโต แต่จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมและเศรษฐกิจของประเทศ ส่งผลให้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลบัญชีก๊าซเรือนกระจกในปี พ.ศ. 2543 รายงานว่า การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดของประเทศ มีค่า 229.08 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยภาคพลังงานมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด (ร้อยละ 69.9) รองลงมา คือ ภาคการเกษตร (ร้อยละ 22.6) ภาคอุตสาหกรรม (ร้อยละ 7.2) และภาคของเสีย (ร้อยละ 4.10) ตามลำดับ จากสถานการณ์ดังกล่าว ส่งผลให้ทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องพยายามจัดการกับปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่นเดียวกับปัญหามลพิษทางอากาศซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมหรือภาคเมือง ส่งผลให้ค่ามลสารในอากาศสูงเกินมาตรฐานที่กำหนด อาทิ สาร 1,3 บิวทาไดอิน, 1,2-ไดคลอโรอีเทน เบนซีน และคลอโรฟอร์มซึ่งพบว่ามีค่าความเข้มข้นสูงเกินเกณฑ์มาตรฐานในหลายพื้นที่ทั้งกรุงเทพมหานคร ปทุมธานี ราชบุรี และระยอง (กรมควบคุมมลพิษ, 2559) ด้วยเหตุนี้ การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุดูดซับชีวมวลจากของเหลือใช้ทางการเกษตรนับเป็นทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าทรัพยากรและนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (Waste Recovery) อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งเสริมรูปแบบการจัดการธุรกิจสีเขียวที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Industry) อันจะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงกลุ่มวิสาหกิจชุมชน และสังคมแบบบูรณาการและยั่งยืน



**Extruded Activated
Carbon
(EAC)**



สถานการณ์ปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นแหล่งผลิตและส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก โดยกลุ่มธุรกิจภาคเกษตรกรรมจัดอยู่ในกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมที่มีการเจริญเติบโตสูงในระดับประเทศ (SME High Growth Sectors) หากแต่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรยังไม่ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากนัก อีกทั้งยังมีการจัดการของเสียชีวมวลโดยการเผาในที่โล่ง (open burning) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและมลสารสู่ชั้นบรรยากาศ โดยในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมากถึง 5.95 ล้านตัน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558) โดยแกลบ (ร้อยละ 51) และชานอ้อย (ร้อยละ 31) เป็นวัสดุชีวมวลที่มีสัดส่วนเหลือทิ้งมากที่สุด ดังนั้น การศึกษาและพัฒนาแนวทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าวัสดุชีวมวลเหลือใช้สำหรับการผลิตวัสดุดูดซับที่มีคุณสมบัติในการดูดซับมลสารในสิ่งแวดล้อมนับเป็นวิธีการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นอย่างเกิดประโยชน์สูงสุด

หลักการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และดูดซับมลสารอินทรีย์ ระเหยง่ายในชั้นบรรยากาศ

การดักจับและกักเก็บคาร์บอน (Carbon Capture and Storage: CCS) เป็นเทคโนโลยีที่ประยุกต์ใช้เพื่อลดความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศและสิ่งแวดล้อม (IPCC, 2005) โดยมีหลักการดังนี้

1) การดักจับคาร์บอน (Carbon Capture) เป็นกระบวนการดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ออกจากกระบวนการเผาไหม้ สามารถทำได้ทั้งก่อนการเผาไหม้ (Pre-combustion) หลังการเผาไหม้ (Post-combustion) หรือระหว่างการเผาไหม้ (Oxy-combustion) โดยการใช้สารเคมีดูดซับ ลอดอุณหภูมิ การใช้เทคโนโลยีเยื่อเลือกผ่าน (membrane) หรือการพัฒนาวัสดุดูดซับที่มีพื้นที่ผิวดูดซับสูง

2) การกักเก็บคาร์บอน (Carbon Storage) ได้แก่ การกักเก็บทางตรง (direct storage) โดยอาศัยการกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปของก๊าซใต้ดินหรือของเหลวในมหาสมุทร หรือการกักเก็บทางอ้อม (indirect storage) โดยอาศัยต้นไม้หรือพืชสีเขียวที่นำก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง เป็นต้น ปัจจุบันการเก็บกักหรือแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นำมาซึ่งการสร้างเทคโนโลยีที่หลากหลายอันเนื่องมาจากกระบวนการแยกหรือการกำจัดสามารถนำไปใช้ในหลายรูปแบบ ได้แก่ การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากไอน้ำจากโรงไฟฟ้า บ่อขุดเจาะก๊าซธรรมชาติ และการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซเชื้อเพลิงต่าง ๆ ทั้งนี้ ในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาการสังเคราะห์และพัฒนาวัสดุเพื่อเพิ่มความสามารถในการดักจับและกักเก็บคาร์บอนทั้งในการวิจัยขั้นพื้นฐานและการวิจัยประยุกต์ เพื่อพัฒนาต่อยอดให้วัสดุมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงในอนาคต ซึ่งเกณฑ์สำคัญที่ต้องพิจารณาในการพัฒนาวัสดุดูดซับดังกล่าวประกอบด้วย (1) ความเฉพาะเจาะจงของวัสดุในการเลือกเก็บกักโมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่ออยู่ในสถานะที่มีก๊าซหลายชนิดรวมกัน และ (2) ความสามารถในการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ปริมาณเล็กน้อยในบรรยากาศปกติจนถึงสถานะที่มีความเข้มข้นสูง เป็นต้น สำหรับการพัฒนาวัสดุเพื่อการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปัจจุบัน ผู้วิจัยมักให้ความสนใจการพัฒนาวัสดุที่ง่ายต่อการนำไปใช้งานและมีราคาถูกกว่าเทคโนโลยีอื่น (D'Alessandro et al., 2010)

ทั้งนี้ การนำเอาวัสดุดูดซับไปใช้จริงมักเป็นการนำไปใช้ทั้งก่อนการเผาไหม้และหลังการเผาไหม้ตามความเหมาะสมของงาน (Figueroa et al., 2008) เนื่องจากเทคโนโลยีที่ใช้เพื่อการเก็บกักก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารอินทรีย์ระเหยง่ายที่พบในชั้นบรรยากาศ ส่วนใหญ่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีการดูดซับ (adsorption) ทั้งสิ้น (Yu et al., 2012) กล่าวคือ การดูดซับสามารถเกิดได้ทั้งในสภาวะที่สารเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ โดยอาศัยหลักการที่คล้ายคลึงกัน คือ การดูดซับโมเลกุลบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับ ซึ่งเริ่มต้นจากการที่สารตั้งต้นมีการแพร่ไปยังส่วนที่เป็นตำแหน่งที่ว่องไวบนพื้นผิว (active surface) จากนั้นจะเกิดการดูดซับของสารตั้งต้นบนพื้นผิว โดยจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างพื้นผิวและสารตั้งต้นบนพื้นผิว (surface reaction) และเกิดการปล่อย/คายผลิตภัณฑ์ออกจากพื้นผิวและท้ายที่สุดโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะคายตัวออกจากพื้นผิว (desorption) ทั้งนี้ มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับ ได้แก่ ตัวดูดซับ (substrate หรือ adsorbent) ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) กระบวนการดูดซับ (adsorption) การปกคลุม (coverage) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ รวมถึง การสัมผัส (exposure) หรือการตรวจวัดก๊าซบนพื้นผิวที่สังเกตได้ เป็นต้น

การพัฒนาวัสดุดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมลสารอินทรีย์ ระเหยง่ายในชั้นบรรยากาศ

ปัจจุบันมีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุชีวมวลให้เป็นวัสดุดูดซับ เช่น ไม้ไผ่ ไม้ยางพารา เศษไม้ทิ้ง รวมทั้งวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ชี้อเลื่อย กะลามะพร้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น โดยหลักการทั่วไปของการดัดแปรวัสดุชีวมวลเป็นวัสดุดูดซับ คือ การเปลี่ยนองค์ประกอบคาร์บอนในวัสดุซึ่งทำได้ 2 วิธี ได้แก่ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (physical activation) ซึ่งเป็นการกระตุ้นโดยอาศัยไอน้ำ ประกอบกับการใช้อุณหภูมิสูงในการเผากระตุ้น โดยไอน้ำจะต้องอยู่ในรูปไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (superheated steam) เพื่อให้สารอินทรีย์ต่าง ๆ สลายไป วิธีการนี้นิยมใช้ในการพัฒนาวัสดุคาร์บอน (carbonization) ซึ่งการให้ความร้อนลักษณะนี้เรียกว่า pyrolysis ซึ่งเป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุอินทรีย์โดยการจำกัดปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิของการเผาอยู่ในช่วง 200-500°C ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุเป็นสำคัญ อีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเปลี่ยนองค์ประกอบคาร์บอนในวัสดุคือวิธีการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารเคมีชนิดต่าง ๆ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ สังกะสีคลอไรด์ กรดฟอสฟอริก เป็นต้น โดยสารเคมีจะแทรกซึมเข้าสู่โครงสร้างของชีวมวลส่งผลให้องค์ประกอบที่ไม่บริสุทธิ์ถูกกำจัดได้เร็วขึ้น จากนั้นจึงนำไปเผาแบบไม่จำกัดออกซิเจนโดยใช้อุณหภูมิเผาประมาณ 600-700 °C ทั้งนี้ ยังสามารถใช้การกระตุ้นทั้งสองวิธีร่วมกันได้ โดยการกระตุ้นโดยใช้สารเคมีก่อนแล้วจึงนำไปกระตุ้นทางกายภาพเพื่อเพิ่มจำนวนรูพรุนของถ่านให้มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการดูดซับมากยิ่งขึ้น

การพัฒนาวัสดุดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศ

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ในต่างประเทศเป็นการพัฒนาวัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศจำพวกซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงประเภทวัตถุดิบที่ใช้จะเห็นได้ว่า ส่วนใหญ่มักใช้ประโยชน์จากวัสดุชีวมวลที่พบในแต่ละพื้นที่ เช่น Almond shell, African palm, Peat, Pistachio nut shell เป็นต้น ทั้งนี้ วัสดุชีวมวลแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพดูดซับมลสารที่แตกต่างกันไป อาทิ เปลือกถั่วพิทาชิโอ มีค่าการดูดซับมลสาร

จำพวก SO₂ ได้ดีกว่าอะกลามะพร้าว ส่วนอะกลามะพร้าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซ H₂S ได้ดีกว่าวัสดุดูดซับชีวมวลที่สังเคราะห์ได้จากอะกลาปาล์ม เป็นต้น นอกจากนี้ งานวิจัยในต่างประเทศได้ทดลองศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการสังเคราะห์วัสดุดูดซับชีวมวลหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันไป เช่น วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้จากปาล์มแอฟริกันมีประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 160 มิลลิกรัมต่อกรัมวัสดุดูดซับ เป็นต้น (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 การพัฒนาวัสดุดูดซับชีวมวลและการนำไปใช้ประโยชน์ในการดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศ

วัสดุชีวมวล	รูปแบบการใช้ประโยชน์	ประสิทธิภาพการดูดซับ	อ้างอิง
Coconut shell	วัสดุดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศจำพวก SO ₂ , NO _x , H ₂ S และ Aromatic VOCs	- 40 mg/g SO ₂ - 22 mg/g NO _x - 215.4 mg/g H ₂ S - 305.7 mg/g Aromatics	Lee et al., 2003
Palm shell	วัสดุดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศจำพวก SO ₂ , NO และ H ₂ S	- 73.7 mg/g SO ₂ - 3.7 mg/g NO - 53 mg/g H ₂ S	Sumathi et al., 2009; Guo et al., 2007
Wood	วัสดุดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศจำพวก NO ₂	143-283 mg/g NO ₂	Kante et al., 2009
Pistachio nut shell	วัสดุดูดซับมลสารในชั้นบรรยากาศจำพวก SO ₂	89.6 mg/g SO ₂	Lua et al., 2009
Peat	วัสดุดูดซับ CO ₂	0.77-3.98 mol/kg CO ₂	Garcia et al., 2011
Wood และ Almond shell	วัสดุดูดซับ CO ₂	7.3 mol/kg CO ₂ ; 11.7, 9.6 wt% CO ₂	Plaza et al., 2010
African palm	วัสดุดูดซับ CO ₂	160 mg/g CO ₂	Vargas et al., 2011

บทสรุป

การใช้ประโยชน์ชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตรสำหรับกักเก็บคาร์บอนและดูดซับสารอินทรีย์ระเหยง่ายในชั้นบรรยากาศ นับเป็นทางเลือกหนึ่งในการจัดการของเสียทางการเกษตรให้เกิดประโยชน์สูงสุด อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการดักจับและกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังอยู่ระหว่างขั้นตอนการพัฒนาซึ่งมีการวิจัยแพร่หลายในต่างประเทศ แต่การวิจัยในประเทศไทยยังมีอยู่ไม่มากนัก โดยมากจะเป็นการวิจัยในการเตรียมวัสดุดูดซับโดยการควบคุมสภาพที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิ สารเคมี ระยะเวลาที่ใช้ สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์เป้าหมาย ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้จากซังข้าวโพด ลูกหว้า กากถั่วเขียว ชีลีส้อย อะกลาตาลโตเนด เปลือกเมล็ดยางพารา กากกาแฟ เมล็ดลำไย เปลือกเมล็ดทานตะวัน เป็นต้น โดยเน้นการใช้ประโยชน์จากวัสดุดูดซับดังกล่าวในการบำบัดหรือกำจัดมลสาร กลุ่มโลหะหนัก สารฟอกย้อม หรือสารปนเปื้อนอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อม หรือเป็นการศึกษาถึงรูปแบบและความเป็นไปได้ในการแปรรูปวัสดุชีวมวลเหลือใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า และพลังไอน้ำใช้สำหรับกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม และได้ผลตอบแทนด้านการลดปริมาณก๊าซเรือนกระจกในรูปของคาร์บอนเครดิตจากโครงการแปรรูปชีวมวลดังกล่าวเป็นพลังงาน (waste-to-energy cogeneration) เป็นต้น (Kittipongvises and Polprasert, 2016) ด้วยเหตุนี้ การศึกษาความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุชีวมวลพื้นถิ่นมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับ เพื่อกักเก็บคาร์บอนเพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและมลพิษอากาศ เป็นประเด็นที่น่าสนใจที่ควรพัฒนาต่อยอดและพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ตลอดจนวิเคราะห์ความต้องการทางการตลาดของกลุ่มเป้าหมายควบคู่ไปพร้อมกัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเหลือใช้จากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนการเกษตรมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับเพื่อกักเก็บคาร์บอนและบำบัดมลสารทางอากาศประเภทสารอินทรีย์ระเหยง่าย: กรณีศึกษาประเภทแกลบและชานอ้อย รวมถึง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกและสนับสนุนในการศึกษาและองค์ความรู้อันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยดังกล่าว

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมควบคุมมลพิษ. 2559. **สรุปสถานการณ์สารอินทรีย์ระเหยง่ายในบรรยากาศ (VOCs) ปี 2558** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/> [10 กุมภาพันธ์ 2559]
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2558. **ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/ewt_w3c/ewt_news.php?nid=486 [16 เมษายน 2558]

ภาษาอังกฤษ

- D'Alessandro, D. M., Smit B., Long J. R. 2010. Carbon dioxide capture: Prospects for new materials. **Angewandte Chemie International Edition** 49: 6058-6082.
- Figueroa, J. D., Fout, T., Plasynski, S., Mcllvried, H., Srivastava, R. D. 2008. Advances in CO₂ capture technology–The U.S. Department of Energy’s Carbon Sequestration Program. **International Journal of Greenhouse Gas Control** 2: 9-20.
- García, S., Gil, M. V., Martín, C. F., Pis, J. J., Rubiera, F., Pevida, C. 2011. Breakthrough adsorption study of a commercial activated carbon for pre-combustion CO₂ capture. **Chemical Engineering Journal** 171: 549–556.
- Guo, J., Luo, Y., Lua, A. C., Chi, R., Chen, Y., Bao, X., Xiang, S. 2007. Adsorption of hydrogensulphide (H₂S) by activated carbons derived from oil-palm shell. **Carbon** 45: 330–336.
- IPCC. 2005. **IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage**. United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers** [Online]. Available from: <http://www.ipcc.ch/> [17 March 2015]
- Kante, K., Deliyanni, E., Bandosz, T. J. 2009. Interactions of NO₂ with activated carbons modified with cerium, lanthanum and sodium chlorides. **Journal of Hazardous Materials** 165: 704–713.

- Kittipongvises, S. and Polprasert, C. 2016. GHGs Emissions and Sustainable Solid Waste Management. In O.P. Karthikeyan, K. Heimann, and S. S. Muthu (eds.), **Recycling of Solid Waste for Biofuels and Biochemicals**, pp. 55-85. Singapore: Springer. DOI 10.1007/978-981-10-0150-5
- Lee, Y. W., Kim, H. J., Park, J. W., Choi, B. U, and Choi, D. K. 2003. Adsorption and reaction behavior for the simultaneous adsorption of NO-NO₂ and SO₂ on activated carbon impregnated with KOH. **Carbon** 41: 1881-1888.
- Lua, A. C., Yang, T. 2009. Theoretical and experimental SO₂ adsorption onto pistachio-nut-shell activated carbon for a fixed-bed column. **Chemical Engineering Journal** 155: 175-183.
- Plaza, M. G., Garcí a, S., Rubiera, F., Pis, J. J., and Pevida, C. 2010. Post-combustion CO₂ capture with a commercial activated carbon: comparison of different regeneration strategies. **Chemical Engineering Journal** 163: 41-47.
- Sumathi, S., Bhatia, S., Lee, K. T., and Mohamed, A. R. 2009. Optimization of microporous palm shell activated carbon production for flue gas desulphurization: experimental and statistical studies. **Bioresource Technology** 100: 1614-1621.
- Vargas, D. P., Giraldo, L., Silvestre-Albero, J., and Moreno-Piraja' n, J. C. 2011. CO₂ adsorption on binderless activated carbon monoliths, **Adsorption** 17: 497-504.
- Yu, C.H., Huang, C. H., and Tan, C. S. 2012. A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. **Aerosol and Air Quality Research** 12: 745-769.