

# การพัฒนาตัวดูดซับโลหะหนักและสีย้อมผ้าแทนถ่านกัมมันต์เชิงการค้า มลลิกา ญาบุตร<sup>a</sup>

## Development of Heavy Metal and Dye Adsorbents to Substitute for the Commercial Activated Carbon

Mallika Thabuot<sup>a</sup>

<sup>a</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

\*Corresponding Author. E-mail address: tmallika@kku.ac.th

Received 21 May 2010; accepted 15 August 2010

### บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการกำจัดโลหะหนักและสีจากน้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งตัวดูดซับที่ใช้ในที่นี้คือ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินแอนทราไซต์ ซึ่งได้มาจากการปรับสภาพและถ่านกัมมันต์เชิงการค้า ในขั้นแรกได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ที่ให้ความเร็วไอโอดีนมากที่สุดด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิของการไพโรไลซิส ตัวกระตุ้น เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้นขั้นตอนต่อมาจึงทำการศึกษารูปร่างของตัวดูดซับโลหะหนักจำพวกทองแดงและนิกเกิล รวมถึงการทดสอบการดูดซับสีชนิด BENEFIX RED 5B จากน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งตัวแปรที่ได้ในการศึกษาได้แก่ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ (140-200 เมช และ 200-270 เมช) ปริมาณของตัวดูดซับ (40 และ 100 กรัมต่อลิตร) ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ ความเข้มข้นของสีย้อมชนิด BENEFIX RED 5B (125 มิลลิกรัมต่อลิตร) จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ คือ การใช้ก๊าซไนโตรเจนเพิ่มสัดส่วนของคาร์บอนใน โครงสร้างที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แลกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีเลขไอโอดีนสูงถึง 716.56 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิว 650 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวดูดซับจากซีเถาซานออยจะมีพื้นที่ผิวและความบริสุทธิ์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับถ่านกัมมันต์ ที่ได้จากถ่านหินแอนทราไซต์และถ่านกัมมันต์เชิงการค้า อย่างไรก็ตามตัวดูดซับจากซีเถาซานออย 200-270 เมช สามารถดูดซับโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียได้ดีที่สุดในขณะที่ดูดซับสีได้ต่ำที่สุด ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินแอนทราไซต์ขนาด 140-200 เมช สามารถดูดซับสีได้ดีที่สุดในขณะที่ดูดซับโลหะหนักได้ต่ำกว

**คำสำคัญ:** โลหะหนัก ถ่านกัมมันต์ ถ่านหินแอนทราไซต์ ซีเถาซานออย วิธีการทำไพโรไลซิส

### Abstract

This study was to compare the potential of heavy metal and hazardous dye removal from synthetic wastewater. Anthracite coal derived-activated carbon (Antracite-AC), bagasse fly ash (BFA) were used as the adsorbents, also the commercial activated carbon (Commercial-AC). The first attempt was about to determine the optimum condition in the production of activated carbon with highest iodine number from anthracite coal by physical activation process. Considered parameters were carbonization temperature, activation agent, activation time and activation temperature. The adsorption experiment was set up to decrease the heavy metal  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$ , also the adsorption of BENEFIX RED 5B dye in the wastewater was carried out. The studied variables were the adsorbent size (140-200 and 20-270 mesh), the adsorbent amount (40 and 100g/l), the initial concentration of heavy metal (40 and 80 mg/l) and the concentration of BENEFIX RED 5B (125 mg/l). Results showed that the optimum condition to obtain the activated carbon was heating the anthracite coal to increase the carbon proportion at 500°C for 1 hr under nitrogen atmosphere followed by using the carbon-dioxide as the activation agent at 750°C for 1.5 hr. The resulted activated carbon has highest iodine number about 716.56 mg/g with surface area of 650 m<sup>2</sup>/g. BFA adsorbent (200-270mesh) has the poorest surface area and pore size characteristics among the group. However, it has the higher adsorption capability of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  than the Commercial-AC and Antracite-AC. In the contrast, it is the worst adsorbent in color adsorption. Antracite-AC (140-200mesh) showed lowest adsorption capability of heavy metal whereas its color adsorption was more superior to the others.

**Keywords:** Heavy metal, Activated carbon, Anthracite coal, Bagasse fly ash, Pyrolysis

### บทนำ

น้ำเสียเป็นมลพิษอย่างหนึ่งที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ โลหะหนักเป็นสารพิษหลักที่ปนเปื้อนอยู่ อันได้แก่ แคดเมียม ปรอท ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง นิกเกิล เป็นต้น อันอาจนำไปสู่ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมต่อไปถ้าไม่มีการกำจัดที่ถูกต้อง อาจมีการรั่วไหลไปสู่ดิน

และเมื่อน้ำล้นคลอง ไปสู่วงจรรอาหารและต่อไปยังคน ก่อให้เกิดอันตรายต่อคนและสัตว์น้ำได้ ดังนั้น กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้ประกาศควบคุมกำหนดค่ามาตรฐานของปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักและสารอันตรายอื่น ๆ ไว้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาตัวดูดซับต่าง ๆ มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ เช่น ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ เรซิน เป็นต้น

ถ่านกัมมันต์ เป็นวัสดุจำพวกคาร์บอน ซึ่งผลิตได้จากการนำวัตถุดิบที่มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบสูงมาผ่านกระบวนการผลิตเพื่อทำให้มีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดีขึ้น กล่าวคือ มีความเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้สามารถดูดซับสารอินทรีย์ และสารประกอบชนิดไม่มีชีวิตที่อยู่ในสถานะของเหลวและก๊าซได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำการบำบัดเพื่อคืนสภาพแล้วนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จำแนกได้เป็น พวกเซลล์ลอสที่ได้จากพืช เช่น กะลามะพร้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ชีเสื่อย เป็นต้น พวกวัตถุดิบที่ได้จากสัตว์ เช่น เลือด กระดุก นอกจากนี้ยังได้มาจากถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท แอนทราไซต์ เป็นต้น ดังนั้น จึงมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย เช่น ในอุตสาหกรรมการทำน้ำให้บริสุทธิ์ อุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล อุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์และอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

เทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มีสองขั้นตอนหลัก ๆ คือ ขั้นตอนการเผาให้โครงสร้างคาร์บอนที่มีสัดส่วนมากขึ้น หรือ เรียกว่า การไพโรไลซิส อุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วง 400-700 องศาเซลเซียส และขั้นตอนการกระตุ้นโครงสร้างให้เกิดการออกซิเดชันของคาร์บอนเพิ่มขึ้นหรือเป็นการทำให้คาร์บอนบนผิวถ่านเกิดพันธะกับออกซิเจน ทำให้เกิดการรวมตัวแบบโครงสร้างตาข่ายนำไปสู่การเกิดของผสมคงตัวมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น และมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น ซึ่งอาจจะกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพโดยการใช้ไอน้ำ อากาศ หรือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส หรืออาจจะกระตุ้นทางเคมีโดยมีการเติมสารเคมีลงในวัตถุดิบก่อนการผลิตหรือเติมสารเคมีลงในถ่านที่ได้จากการไพโรไลซิส (Williams & Reed, 2006; Ahmad et al., 2007; Yagmur et al., 2008) วัตถุดิบจะถูกแช่ในสารเคมีที่ใช้เป็นตัวกระตุ้น เช่น ซิงค์คลอไรด์, กรดฟอสฟอริก, โพแทสเซียมคาร์บอเนต, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น แล้วจึงนำวัตถุดิบที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีไปไพโรไลซิส ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะไปทำหน้าที่เป็นตัวเร่งกระบวนการไพโรไลติกคอนเดนเซชัน ทำให้สูญเสียคาร์บอนจากวัตถุดิบระหว่างกระบวนการผลิตถ่านน้อยลง ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวที่ดีขึ้นมีความเป็นรูพรุนมากขึ้น

จากการเตรียมตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากชีวมวลต่างๆ เช่น ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว แกลบ ไม้ เศษยูคาลิปตัส กากชา ลำต้นยาสูบ เศษต้นฝ้าย ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อคุณลักษณะของผลผลิตที่ได้ (MaKay & Poots, 1980; Low & Lee, 1997; Satya sai & Ahmed, 1997; Hu et al., 1999; Morais et al., 1999; Robinson et al., 2001; Kadirvelu et al., 2003; Malik, 2003; Crini, 2006; Amaya et al., 2007; Yagmur et al., 2008; Li et al., 2008) ดังเช่น ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวได้ถูกเตรียมขึ้นโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Satya sai & Ahmed, 1997) พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาและอุณหภูมิที่ทา

ปฏิกิริยาค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีค่ามากขึ้นด้วย ได้มีการอธิบายไว้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว (Hu et al., 1999) คือ เตรียมโครงสร้างคาร์บอนโดยการเผาที่ 600 องศาเซลเซียส แล้วทำการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างกะลามะพร้าวกับโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.75 ที่ 800 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับ 2,541 ตารางเมตรต่อกรัม และค่าปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 1.21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีการเตรียมเม็ดถ่านกัมมันต์ที่เป็นส่วนผสมระหว่างถ่านชาร์ของแกลบ และไมยูคาลิปตัสโดยผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Amaya et al., 2007) หากใช้สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิสูง อัตราการไหลของไอน้ำที่สูง และระยะเวลาในการกระตุ้นที่นานกว่า จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณสมบัติที่ดีกว่า พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของผลผลิตเทียบเคียงกับถ่านกัมมันต์เชิงการค้า (500-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม) กากชาที่เหลือทิ้งยังได้นำมาใช้เป็นตัวตั้งต้นในการผลิตถ่านกัมมันต์ (Yagmur et al., 2008) โดยการกระตุ้นด้วยการแช่กรดฟอสฟอริกเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนกรดต่อวัตถุดิบ 3/1 โดยน้ำหนัก พบว่า พื้นที่ผิวจำเพาะที่โตเท่ากับ 928.8 ตารางเมตรต่อกรัม จากการใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนตกระตุ้นเศษไม้ยาสูบด้วยอัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1.5/1 (Li et al., 2008) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงเท่ากับ 2,557 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 1.647 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม มีค่าเลขไอโอดีน ได้ 1,834 มิลลิกรัมต่อกรัม และสามารถดูดซับสีเมทิลีนบลูได้ 517.5 มิลลิกรัมต่อกรัม

ได้มีการศึกษาผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านบิทุมินัสโดยอาศัยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ (Teng et al., 1996) ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ผลผลิตที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงต่อมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของการใช้ไอน้ำในการออกซิเดชันที่ 200 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ก่อนการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Teng et al., 1997) ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีปริมาตรรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะสูงขึ้น นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาผลของการเพิ่มออกซิเจนให้แก่ถ่านหินสแปนิชด้วยอากาศ และกรดไนตริกที่อุณหภูมิและช่วงเวลาต่างๆ กัน ก่อนที่จะนำถ่านหินเข้าสู่ขั้นตอนไพโรไลซิสเริ่มแรก (Talavera et al., 1997) โดยได้ศึกษาขั้นตอนการกระตุ้นที่ใช้ตัวกระตุ้นที่ต่างกัน คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยพบว่า สภาวะที่ใช้กรดไนตริกความเข้มข้น 15 โมลาร์ในการเพิ่มออกซิเจนให้แก่ถ่านหิน และใช้ไอน้ำในการกระตุ้น จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,300 ตารางเมตรต่อกรัม ได้มีการศึกษาก่อนหน้านี้โดยใช้สารเคมีเป็นตัวกระตุ้นสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินสแปนิช (Gomez et al., 1996) โดยการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 2,500 ตารางเมตรต่อกรัม นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษา

การผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสโดยการกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์ (Teng & Sheng Yeh., 1998) หลังจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิว 1,300 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรของรูพรุน 0.83 ลูกบาศก์เมตรต่อกรัม กรดฟอสฟอริกถูกนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัส (Teng et al., 1998) โดยนำถ่านหินมาแช่ในกรดก่อนการเผาให้เป็นคาร์บอนที่ 400-600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-3 ชั่วโมง ซึ่งพบว่า พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านที่ได้แปรตามสัดส่วนของกรดต่อถ่าน ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์จากการเผาถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริกที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงสุด จากการศึกษาเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์จากถ่านหินบิทูมินัสด้วยตัวกระตุ้นเคมีที่แตกต่างกัน (Hsu & Teng Y., 2000) พบว่า ถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และกรดฟอสฟอริกจะให้สัดส่วนคาร์บอนมากกว่าถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยด่างโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวต่ำกว่าและการกระตุ้นด้วยด่างจะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีความเป็นรูพรุนมากกว่า และมีพื้นที่ผิวสูงถึง 3,300 ตารางเมตรต่อกรัม

ถึงแม้ว่า การกระตุ้นด้วยสารเคมีจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติความเป็นรูพรุนและพื้นที่ผิวที่ดีกว่าการกระตุ้นทางกายภาพก็ตาม กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางเคมีจะเกิดความสิ้นเปลืองและยุ่งยากมากกว่า เนื่องจากต้องใช้สารเคมีในกระบวนการและต้องทำการล้างสารเคมีออก ทำให้มีการรั่วไหลไปยังสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ

เนื่องจากซีเถาซานอ้อย เป็นกากอุตสาหกรรมจากโรงงานน้ำตาล ซึ่งโดยปกติแล้วจะนำไปทำปุ๋ยและถมที่ แต่ได้การศึกษาการใช้ประโยชน์จากซีเถาซานอ้อยมากำจัดโลหะหนักพวกทองแดงและสังกะสีออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการดูดซับ (Gupta et al., 2000) ซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับ คือ ขนาดอนุภาคของตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลาย ค่าความเป็นกรดของสารละลาย อุณหภูมิของสารละลาย และปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ โดยพบว่าซีเถาซานอ้อยที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีในสภาวะที่เหมาะสม คือ สารละลายมีค่าความเป็นกรดและมีอุณหภูมิสูง ส่วนปริมาณตัวดูดซับที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของโลหะทองแดงและสังกะสีที่อยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาต่อเนื่อง (Gupta et al., 2001) โดยการนำซีเถาซานอ้อยในการกำจัดสารพิษที่เป็นองค์ประกอบในยาปราบศัตรูพืชซึ่งปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ได้แก่ สภาวะที่สารละลายมีค่าความเป็นกรด ซึ่งเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นตามด้วย โดยจะเพิ่มมากในช่วงแรกของการทดลอง ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะให้ประสิทธิภาพในการ

ดูดซับได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทั้งนี้ ซีเถาซานอ้อยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารพิษเหล่านี้สูงถึง 94-95%

ได้มีการศึกษาการดูดซับนิกเกิลและโครเมียมจากสารละลาย ด้วยตัวดูดซับที่เป็นซีเถาซานอ้อยเปรียบเทียบกับซานอ้อยและถ่านกัมมันต์ (Rao et al., 2002) พบว่า ซีเถาซานอ้อยให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ได้ดีรองจากตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีการศึกษานับสนุนว่าซีเถาซานอ้อยสามารถดูดแคดเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียได้สูงถึง 90% ภายในช่วงระยะเวลาการดูดซับ 60-80 นาที (Gupta et al., 2003) และสามารถดูดซับโครเมียมและตะกั่วได้ถึง 96-98% (Gupta & Ali, 2004)

นอกจากนี้แล้วซีเถาซานอ้อยยังมีศักยภาพในการกำจัดสีย้อมผ้าชนิดต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ Malachite green (MG), Congo red (CR), Orange-G (OG) และ Methyl Violet (MV) (Mall et al., 2005a; Mall et al., 2005b; Mall et al., 2006) ซึ่งได้ผลสรุปคล้ายคลึงกันที่ว่าซีเถาซานอ้อยให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีเหล่านี้ได้เทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เชิงการค้า

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีจุดประสงค์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพโดยเปรียบเทียบระหว่างตัวกระตุ้นที่เป็นไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่ได้จากสภาวะนี้ไปทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักและสีชนิด BENEFIX RED 5B เปรียบเทียบกับตัวดูดซับซีเถาซานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพ และถ่านกัมมันต์เชิงการค้า

## วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบและสารเคมี

ถ่านหินแอนทราไซต์ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ไทยแลนด์ แอนทราไซต์ จำกัด กรุงเทพมหานคร ซีเถาซานอ้อยได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานน้ำตาลน้ำพอง จังหวัดขอนแก่นและถ่านกัมมันต์เชิงการค้าได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท ขอนแก่นวอเตอร์ทรีตเมนต์ จังหวัดขอนแก่น

สารเคมีที่ใช้คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) นิกเกิลไนเตรท ( $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) คอปเปอร์ซัลเฟต เพนตะไฮเดรต ( $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ) สีย้อมผ้าชนิด BENEFIX RED 5B กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 30% โซเดียมไทโอซัลเฟต ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) ไอโอดีน ( $I_2$ ) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) โพแทสเซียมไอโอเดต ( $KIO_3$ ) โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $Na_2CO_3$ ) ก๊าซที่ใช้คือ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ

การเตรียมวัตถุดิบ

ซีเถาซานอ้อยและถ่านกัมมันต์ทางการค้า จะถูกบดและร่อนให้ได้ขนาดอนุภาค 2 ขนาด คือ 140-200 เมช (ขนาด 75-106 ไมครอน) และ 200-270 เมช (ขนาด 53-75 ไมครอน สำหรับถ่านหินแอนทราไซต์จะถูกบด

และร้อนให้ได้ขนาดน้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร แล้วนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ อันได้แก่ ความชื้น ปริมาณเถ้า สารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณกำมะถันรวมถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปด้วยเครื่องวิเคราะห์น้ำหนักทางความร้อน (TGA, Thermal Gravimetric Analysis) โดยบรรจุสารตัวอย่างแบบเซลล์แพลตินัม ปรับให้ก๊าซฮีเลียมไหลในระบบด้วยอัตราการไหล 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิที่คงที่ที่ 150, 300, 450, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลาช่วงละ 1 ชั่วโมง และตั้งอุณหภูมิสุดท้ายที่ 750 องศาเซลเซียส

#### การพัฒนาตัวดูดซับจากถ่านหินแอนทราไซต์

ถ่านหินที่ผ่านการร่อนแล้วจะถูกบรรจุลงในท่อเผา ปริมาณ 100 กรัม เมื่อบรรจุท่อเผาลงในเตาเผาแล้ว จะทำการต่อท่อก๊าซไนโตรเจนและปรับอัตราการไหลให้มีค่าคงที่ ประมาณ 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จากนั้นจึงปรับอุณหภูมิของเตาเผาให้มีค่าตามที่ต้องการ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการไล่สารระเหยภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนคือ 400, 500, 600 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งเวลาที่ใช้ในเตาอุณหภูมิ คือ 1 ชั่วโมง ตามด้วยขั้นตอนการกระตุ้นถ่านหินที่ได้อย่างต่อเนื่องโดยปรับอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 750 องศาเซลเซียส ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) หรือไอน้ำเป็นเวลา 1.5 และ 3 ชั่วโมง จึงทิ้งให้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้เย็นตัวลง แล้วร้อนให้ได้ขนาดที่แตกต่างกัน 2 ขนาด คือ 140-200 เมช (75-106 ไมครอน) และ 200-270 เมช (53-75 ไมครอน) แล้วเก็บบรรจุไว้ทำการวิเคราะห์หาค่าเลขไอโอดีน และหาค่าคุณสมบัติของพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนในลำดับต่อไป

#### การพัฒนาตัวดูดซับจากซีเถ้าชานอ้อย

ซีเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการร่อนขนาดแล้ว จะถูกล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสีของน้ำล้างใส จากนั้นจึงทำการปรับสภาพด้วยการแช่ในสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ภายใต้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วล้างซีเถ้าชานอ้อยด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่าความเป็นกรดต่างไม่เปลี่ยนแปลง ซีเถ้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะถูกนำไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส แล้วเก็บไว้ในโถดูดความชื้น ก่อนนำไปวิเคราะห์ต่อไป

#### การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติของพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับ

คุณสมบัติของพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์เชิงการค้า ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากถ่านหินแอนทราไซต์และตัวดูดซับจากซีเถ้าชานอ้อยจะถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบด้วยเครื่องมือ Micrometer ASAP 1010

#### การทดลองการดูดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินแอนทราไซต์ที่ให้ค่า

เลขไอโอดีนสูงสุด จะถูกนำมาศึกษาการดูดโลหะหนักเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักกับถ่านกัมมันต์เชิงการค้า และตัวดูดซับจากซีเถ้าชานอ้อย ซึ่งนำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น  $\text{Cu}^{2+}$  เท่ากับ 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้น  $\text{Ni}^{2+}$  40 มิลลิกรัมต่อลิตร ถูกเตรียมขึ้นโดยใช้คอปเปอร์ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) นิกเกิลไนเตรท ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) โดยความเข้มข้นของโลหะหนักที่คงเหลืออยู่ในสารละลายจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องอะตอมมิกส์แอฟฟอกชั่นสเปกโตรสโคปี (Atomic Absorption Spectroscopy, AAS)

#### การทดลองการดูดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์

ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินแอนทราไซต์ที่ให้ค่าเลขไอโอดีนสูงสุด จะถูกนำมาศึกษาการดูดสีเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีกับถ่านกัมมันต์เชิงการค้า และตัวดูดซับจากซีเถ้าชานอ้อย ซึ่งนำเสียสังเคราะห์ถูกเตรียมโดยใช้สีย้อมผ้าชนิด BENEFIX RED 5B ใหม่ที่มีความเข้มข้นสี 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของสีหลัง การดูดซับจะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิซิเบิลสเปกโตรสโคปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy, UV)

#### ผลการศึกษาและอภิปรายผล

##### คุณลักษณะของถ่านหินแอนทราไซต์

ถ่านหินแอนทราไซต์มีคุณสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1 และจากการวิเคราะห์ถ่านหินแอนทราไซต์ด้วยเครื่อง TGA จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบว่า ในช่วงแรกน้ำหนักของถ่านหินแอนทราไซต์ จะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปกับอุณหภูมิ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส น้ำหนักจะมีค่าลดลงอย่างชัดเจน และลดลงอีกเมื่อถึงอุณหภูมิ 600 และ 750 องศาเซลเซียส แสดงว่าองค์ประกอบภายในโครงสร้างของถ่านหินแอนทราไซต์เกิดการระเหยมากที่สุดในช่วงอุณหภูมิ 400 ถึง 750 องศาเซลเซียส ทำให้ทราบว่าช่วงอุณหภูมิที่ควรใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ควรอยู่ในช่วงนี้นั่นเอง

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของถ่านหินแอนทราไซต์ที่มีขนาด 1-3 มิลลิเมตร ในสัดส่วน 99.12 เปอร์เซ็นต์

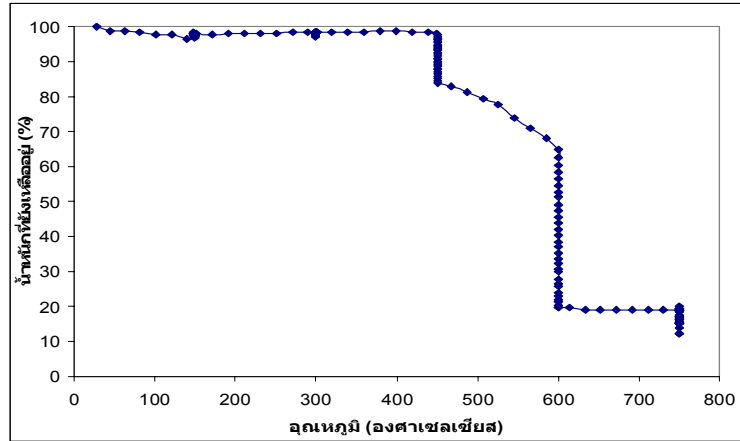
ความชื้น	1.21%
ปริมาณเถ้า	5.46%
สารระเหย	6.49%
ปริมาณคาร์บอนคงตัว	86.84%
ปริมาณกำมะถัน	0.71%

##### ค่าเลขไอโอดีนของตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์

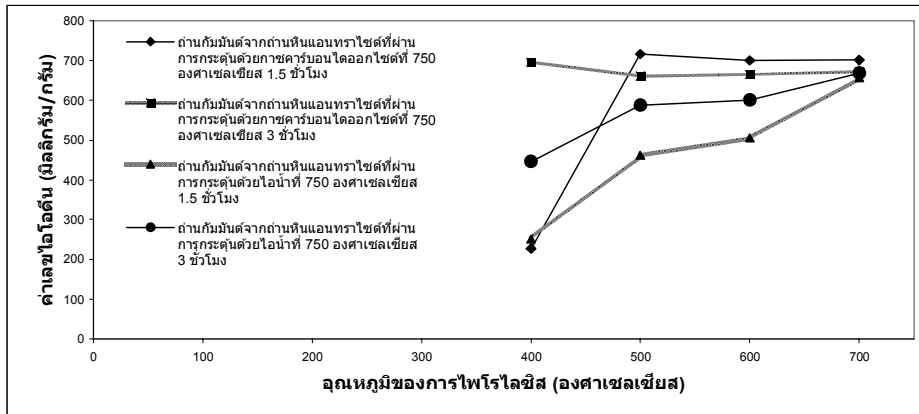
จากค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินแอนทราไซต์ภายใต้สภาวะต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่า ค่าเลขไอโอดีนมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ใน

ไพโรไลซิส เมื่อใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวกระตุ้น จะให้ค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์ที่สูงกว่าการใช้ไอน้ำเป็นตัวกระตุ้น ซึ่งสภาวะที่ให้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าเลขไอโอดีนสูงสุดคือ การไพโรไลซิสที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่

750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ดังนั้น จึงเลือกสภาวะนี้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์เพื่อใช้ศึกษาในขั้นตอนการดูดซับโลหะหนักและสีย้อมผ้าลำดับต่อไป



รูปที่ 1 ค่าน้ำหนักถ่านหินแอนทราไซต์ที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิ



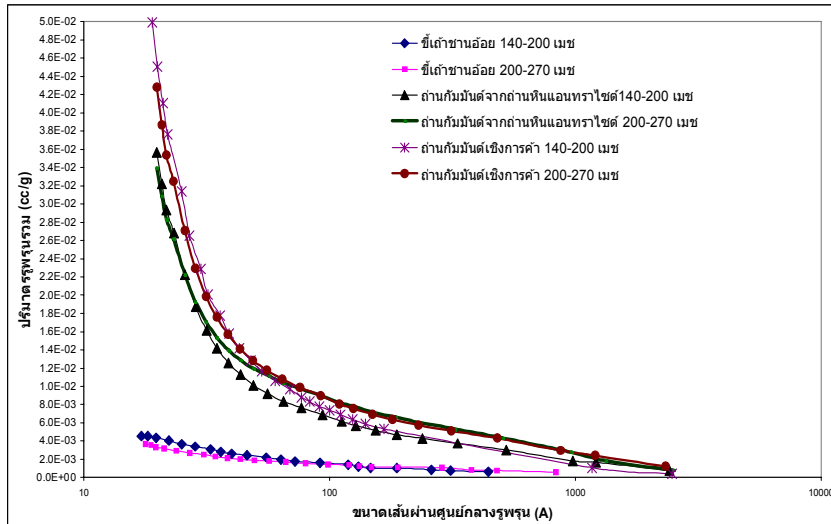
รูปที่ 2 ค่าเลขไอโอดีนของถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ที่ผลิตได้จากสภาวะต่างๆ

คุณสมบัติของพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับ ตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ ถ่านกัมมันต์เชิงการค้า และตัวดูดซับจากซีเถาชันอ้อย จะมีคุณสมบัติพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 และ รูปที่ 4 พบว่า ตัวดูดซับทั้งหมดมีลักษณะสะสมตัวของรูพรุนเชิงปริมาตรและเชิงพื้นที่ที่มีแนวโน้มเดียวกัน ทั้งนี้ถ่านกัมมันต์เชิงการค้าจะให้มีการสะสมตัวของรูพรุนทั้งเชิงปริมาตรและพื้นที่สูงสุดในกลุ่ม ถึงแม้ว่าซีเถาชันอ้อยจะมีการสะสมที่ต่ำกว่าและให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำสุดแต่ก็มีค่าขนาดเฉลี่ยของรูพรุนที่ใหญ่กว่าตัวดูดซับอื่นในที่นี้ ดังแสดงในรูปที่ 5

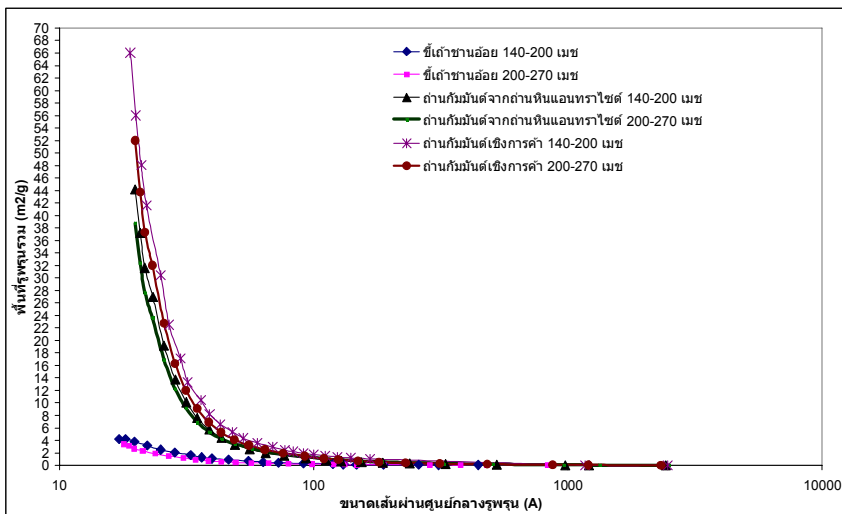
เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินชนิดต่างๆ ที่ผ่านมา (Gomez et al., 1996; Teng et al., 1996; Talavera et al., 1997; Teng et al., 1997; Teng & Sheng Yeh., 1998; Teng et al., 1998; Hsu & Teng Y., 2000) พบว่า ถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ที่ได้จากการศึกษานี้ มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนต่ำกว่า อาจเนื่องจากคุณสมบัติความเป็นพลาสติกทางความร้อนของถ่านหินแอนทราไซต์

ในขั้นตอนการไพโรไลซิส ซึ่งถ่านหินจะละลายและกลายเป็นของไหลทำให้การจัดเรียงโมเลกุลในโครงสร้างไม่ดี และความเป็นรูพรุนเริ่มต้นจะถูกกำจัดไป ดังนั้น ในการศึกษาต่อไปในอนาคตจึงควรมีการเพิ่มกระบวนการออกซิเดชันเพื่อปรับความเป็นรูพรุนของถ่านให้สูงขึ้น อันเป็นผลเกี่ยวเนื่องกับความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ ซึ่งในการเพิ่มออกซิเจนนี้ อาจใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์

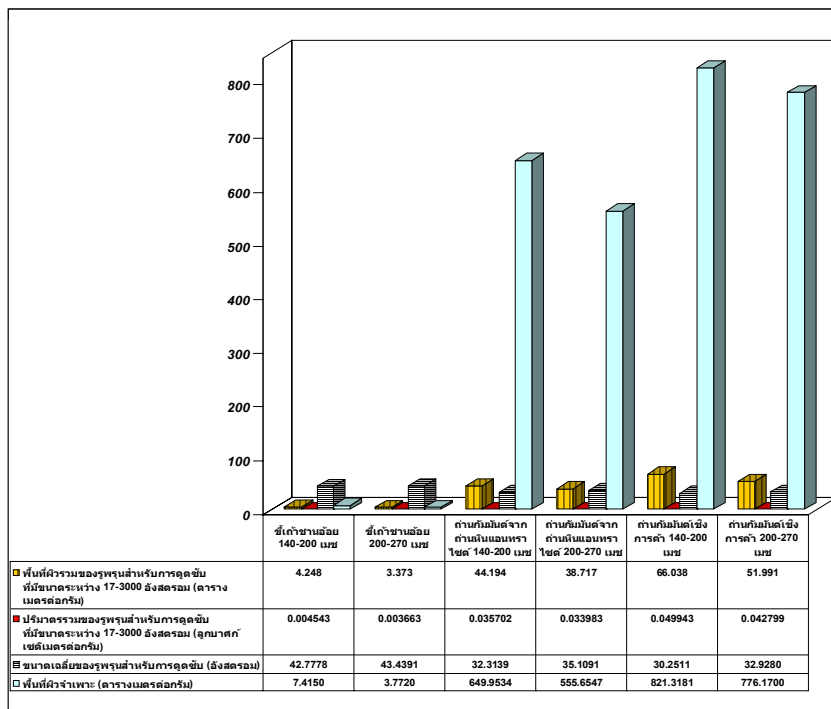
ตัวดูดซับที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ พื้นที่ผิวรวมและปริมาตรรวมของรูพรุนที่มีขนาด 17-3000 อังสตรอม น้อยกว่า ทั้งนี้ ถ่านกัมมันต์เชิงการค้าที่มีขนาด 140-200 เมช จะให้พื้นที่ผิวจำเพาะพื้นที่ผิวรวมและปริมาตรรวมของรูพรุนที่มีขนาด 17-3000 อังสตรอม มากที่สุด และซีเถาชันอ้อยที่มีขนาด 200-270 เมช จะให้พื้นที่ผิวทั้งหมด พื้นที่ผิวรวมและปริมาตรรวมของรูพรุนน้อยที่สุด หากจากการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวรวมและปริมาตรรวมของรูพรุนที่มีขนาด 17-3000 อังสตรอม พบว่า ซีเถาชันอ้อยมีขนาดรูพรุนใหญ่มากที่สุดในกลุ่ม คือ ประมาณ 43.50 อังสตรอม



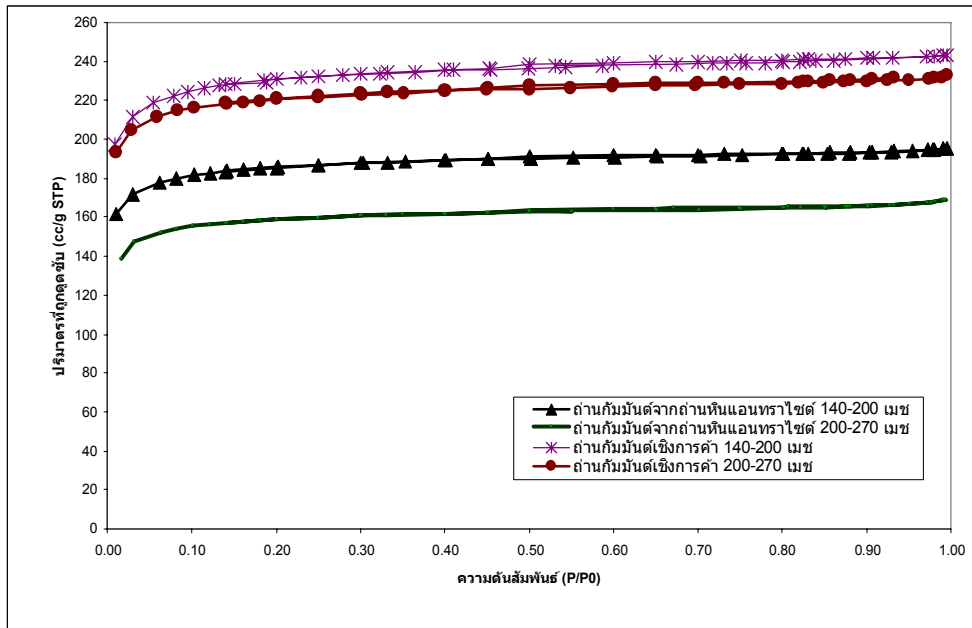
รูปที่ 3 ลักษณะสะสมตัวเชิงปริมาตรของรูพรุนสำหรับตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4 พื้นที่รูพรุนรวมและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ



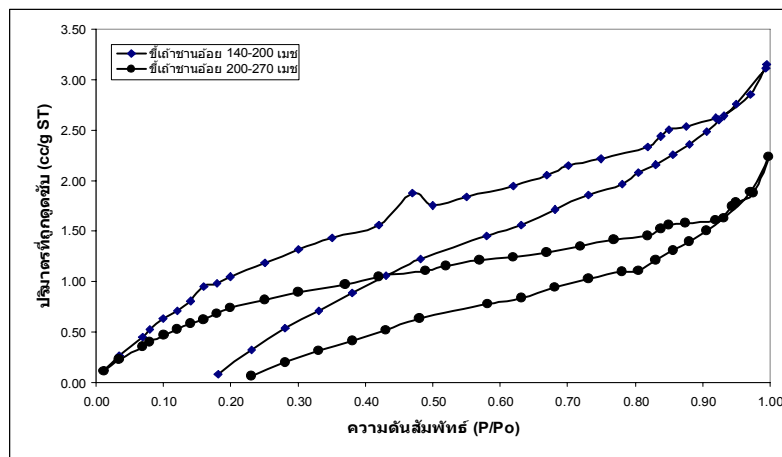
รูปที่ 5 คุณลักษณะพื้นผิวและความเป็นรูพรุนของตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของถ่านกัมมันต์เชิงการค้าและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินแอนทราไซต์

จากไอโซเทอร์มการดูดซับของตัวดูดซับแต่ละชนิดพบว่า ถ่านกัมมันต์เชิงการค้าและถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหินแอนทราไซต์จะให้ลักษณะการดูดซับเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความพรุนของตัวดูดซับนี้อยู่ที่ระดับจุลภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าตัวถูกดูดซับเพียงเล็กน้อย ทำให้การดูดซับอ้อมตัวอย่างรวดเร็วที่ความดัน

ต่ำเท่านั้น แต่ใช้ถ่านอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพจะมีลักษณะไอโซเทอร์ม การดูดซับดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับมีความพรุนที่มีขนาดกลางใหญ่กว่าขนาดจุลภาค มีการดูดซับก๊าซในชั้นที่หนึ่งแล้วอย่างสมบูรณ์ และเมื่อความดันสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นก็จะเกิดการดูดซับก๊าซในชั้นที่สองและชั้นถัดไป



รูปที่ 7 ไอโซเทอร์มการดูดซับของซีเล้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว

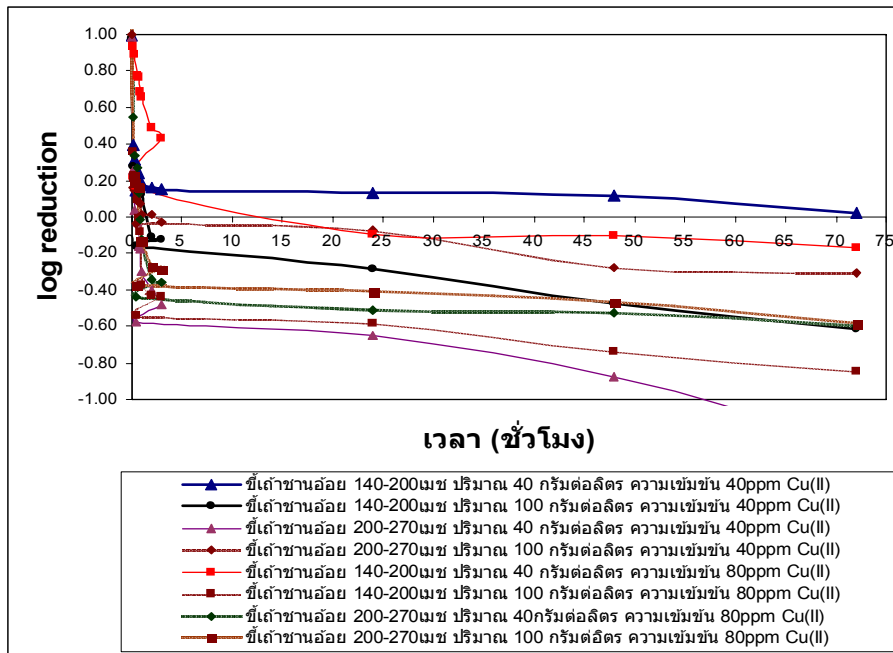
**คุณสมบัติการดูดโลหะหนักจากน้ำเสียสังเคราะห์**

จากการศึกษาการดูดซับคอปเปอร์ (II) จากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน ด้วยซีเล้าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบโดยพล็อตระหว่างค่า Log Reduction กับเวลา ดังรูปที่ 8 ซึ่งค่า Log Reduction คำนวณมาจากอัตราส่วนโดยลอการิทึมของความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ที่เวลาต่างๆ ต่อความเข้มข้นของสารละลายคอปเปอร์ (II) ที่เวลาเริ่มต้น จะเห็นว่าแนวโน้มของเส้นโค้งแต่ละเส้นจะค่อยๆ ลดต่ำลงในลักษณะเดียวกันเมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับผ่านไปเรื่อยๆ

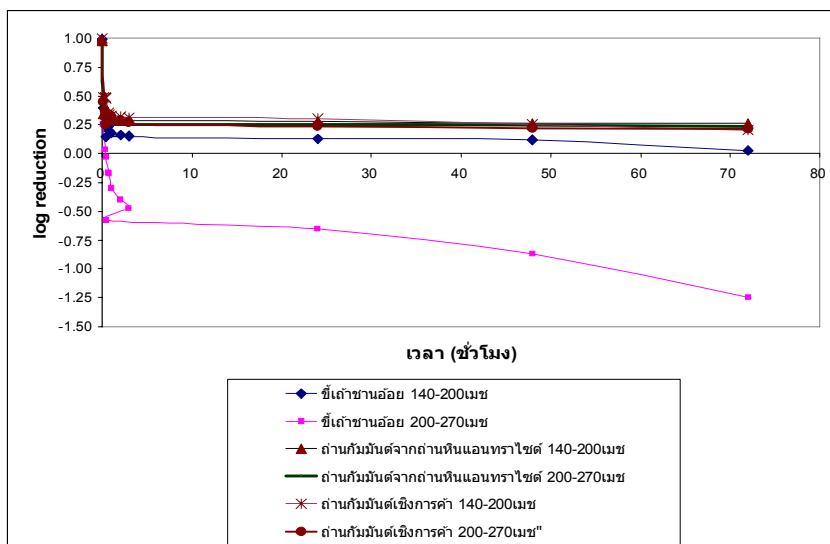
นั่นคือ ยิ่งเส้นโค้งลดต่ำลงมากเท่าใด แสดงว่ายิ่งมีการดูดซับมากขึ้น โดยพบว่า โดยพบว่าในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงแรก อัตราการดูดซับคอปเปอร์ (II) โดยซีเล้าชานอ้อยแต่ละขนาดที่สภาวะต่างๆ เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย และค่อนข้างคงที่ หลังจากการดูดซับผ่านไป 4 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่า ซีเล้าชานอ้อยที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าจะมีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ (II) จากสารละลายได้ดีกว่า เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยของรูพรุนสำหรับการดูดซับที่มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5 และมีโครงสร้างรูพรุนขนาดกลางที่มากกว่า

นั่นเอง ดังเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มการดูดซับในรูปที่ 7 การดูดซับต่ำสุด (เส้นโค้งบนสุดในรูปที่ 8) เกิดขึ้นเมื่อใช้ซีเถ้าชานอ้อยที่มีขนาดอนุภาค 140-200 เมช ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสารละลายคอปเปอร์ (II) ที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และการดูดซับคอปเปอร์ (II) จะเกิดขึ้นได้เป็นอย่างดีเด่นชัด (เส้นโค้งล่างสุดในรูปที่ 8) เมื่อใช้ซีเถ้าชานอ้อยที่มีขนาดอนุภาค 200-270 เมช เพียง 40 กรัมต่อลิตร ในการดูดซับสารละลาย

คอปเปอร์ (II) ที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นสถานะจึงถูกเลือกใช้สำหรับเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ (II) กับตัวดูดซับอื่นๆ ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินแอนทราไซต์ (ด้วยการไพโรไลซิสที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วทำการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง) และถ่านกัมมันต์เชิงการค้า

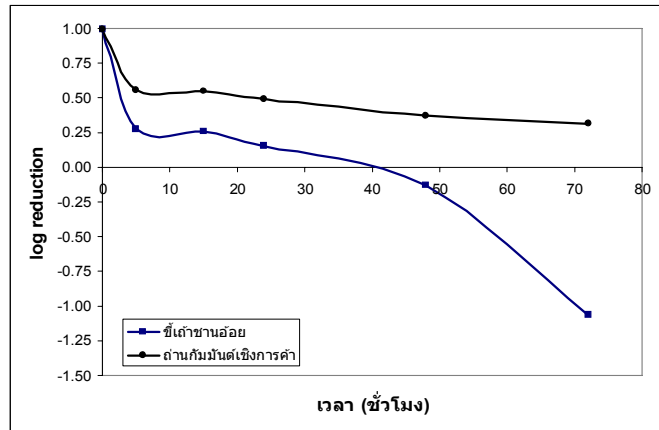


รูปที่ 8 ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ (II) จากสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกันด้วยปริมาณซีเถ้าชานอ้อยขนาดต่างๆ



รูปที่ 9 ความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ (II) จากสารละลายที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยตัวดูดซับต่างๆ ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร

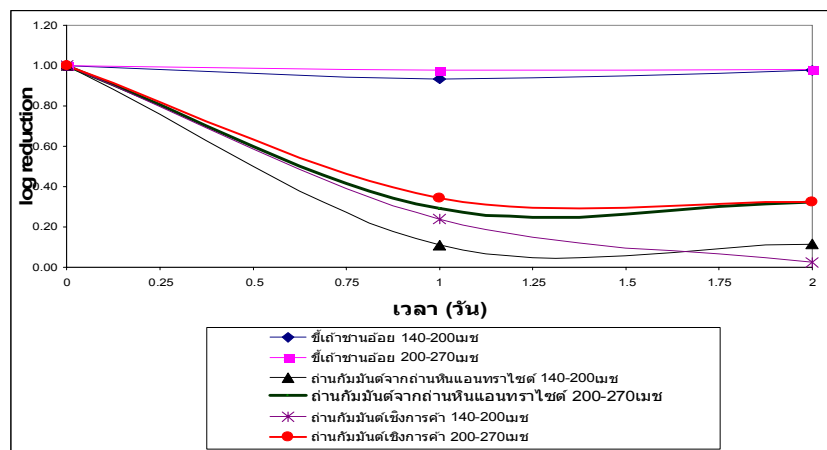




รูปที่ 10 ความสามารถในการดูดซับนิกเกิล (II) จากสารละลายที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยขี้เถาขานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพแล้วกับถ่านกัมมันต์เชิงการค้าที่มีขนาด 200-270 เมช ด้วยปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร

จากเส้นโค้งแสดงการดูดซับดังรูปที่ 9 จะเห็นได้อย่างเด่นชัดว่าขี้เถาขานอ้อยจะมีความสามารถในการดูดซับคอปเปอร์ (II) ได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองประเภท เพื่อสนับสนุนความสามารถในการเป็นตัวดูดซับโลหะหนักที่ดีของขี้เถาขานอ้อย จึงได้ทำการศึกษาการดูดซับนิกเกิล (II) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เชิงการค้า ดังเส้นโค้งแสดงใน

รูปที่ 10 พบว่า ขี้เถาขานอ้อยจะมีความสามารถในการดูดซับนิกเกิล (II) ได้ดีกว่า จึงสรุปได้ว่าขี้เถาขานอ้อยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ได้ดีดังสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา (Rao et al., 2002; Gupta et al., 2003; Gupta & Ali, 2004)



รูปที่ 11 ความสามารถในการดูดซับสี BENNEFIX RED 5B จากสารละลายที่มีความเข้มข้น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยตัวดูดซับต่างๆ ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร

**คุณสมบัติการดูดสีย้อมผ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์**  
เช่นเดียวกัน ได้ทำการศึกษาการดูดซับสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของสีชนิด BENEFIX RED 5B เป็น 125 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสีนี้ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ จะเห็นได้ดังรูปที่ 11 ขี้เถาขานอ้อยจะดูดซับสีได้ดีที่สุด เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยของรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำที่สุดในทางตรงกันข้าม ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กจะสามารถดูดซับสีได้ดีกว่าอย่างชัดเจน ในช่วงเวลาการดูดซับ 1 วัน ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากถ่านหินแอนทราไซต์ที่มีขนาดอนุภาค 140-200 เมช จะให้อัตราการดูดซับสีสูงกว่าตัวดูดซับอื่นๆ

จากผลการทดลองที่ได้นี้ค่อนข้างจะไม่สอดคล้องกับการที่ผ่านมา(Mall et al., 2005a; Mall et al., 2005b;

Mall et al., 2006) ที่สรุปว่าขี้เถาขานอ้อยให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีได้เทียบเท่ากับถ่านกัมมันต์เชิงการค้า ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า คุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดี มิได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพอย่างเดียวเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีด้วย ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต้องการดูดซับ ฉะนั้น ถึงแม้ว่าขี้เถาขานอ้อยจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดเฉลี่ยของรูพรุนต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดในการศึกษานี้ แต่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักคอปเปอร์ (II) และโลหะหนักนิกเกิล (II) ได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ว่าจะดูดซับสีชนิด BENEFIX RED 5B ได้ต่ำที่สุดก็ตาม ทั้งนี้อาจกล่าวได้ว่า ขี้เถาขานอ้อยมีโครงสร้างที่ซับซ้อน และมีความเป็นขรุขระสูงเนื่องจากความปนเปื้อนต่างๆ ที่ติดมา จึงทำให้เกิดพันธะเคมีพร้อมทั้งแรงดึงดูดวันเดอร์วาลส์กับไอออนของโลหะหนักได้

มาก แต่ซีเถาซานอ้อยไม่สามารถดูดซับสีได้ดีเนื่องจากอนุโมลลีไม่มีขี้หรืออาจมีขี้ส่วนน้อยมากนั่นเอง

ซีเถาซานอ้อยที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาลท้องถิ่นจึงเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักและสีข้อมผงจากน้ำเสีย ดังนั้นในการศึกษาลำดับต่อไปในอนาคตจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาไอโซเทอร์มและจลนศาสตร์การดูดซับแบบกะและแบบคอลัมน์ที่ อีกทั้งการปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุนที่สูงขึ้น

### สรุปผลการศึกษา

จากการที่พัฒนาตัวดูดซับโลหะหนักและสีข้อมผงที่สามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตตัวดูดซับถ่านกัมมันต์จากถ่านหินแอนทราไซต์ คือ การเผาคาร์บอนไนเซชันภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง แล้วกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง ให้ผลผลิตที่มีค่าไอโอดีนสูงสุดถึง 716.56 มิลลิกรัมตอกรัม และมีพื้นที่ผิว 650 ตารางเมตรตอกรัม
- (2) ตัวดูดซับจากซีเถาซานอ้อยขนาด 200-270 เมช สามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด แต่ดูดซับสีได้ต่ำสุด
- (3) ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้ถ่านหินแอนทราไซต์ขนาด 140-200 เมช สามารถดูดซับสีได้ดีที่สุดในขณะที่ดูดซับโลหะหนักได้ต่ำกว่า
- (4) ในด้านต้นทุนการผลิตตัวดูดซับวัตถุดิบชีวมวลอื่นๆ ที่ทางภายในท้องถิ่น เช่น ชานอ้อย เศษไมยคาลิปตัส กากกาแฟ ชังข้าวโพด ขี้เลื่อย สามารถถูกนำมาพัฒนาให้เป็นตัวดูดซับได้

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนสถานที่อุปกรณ์ เครื่องมือวิเคราะห์ทั้งหมด

### เอกสารอ้างอิง

Ahmad, A.L., Loh, M.M., & Aziz, J.A. (2007). Preparation and characterization of activated carbon from oil palm wood and its evaluation on Methylene blue adsorption. *Dyes and Pigments*, 75(2): 263-272.

Amaya, A., Medero, N., Tancredi, N., Silva, H., Deiana, C. (2007). Activated carbon briquettes from biomass materials. *Bioresour. Technol.*, 98(8): 1635-1641.

Crini, G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresour. Technol.*, 97: 1061-1085.

Gomez, M.J., Garcia, A., Martinez de Lecea, C., & Solano A. (1996). Activated carbons from spanish coals 2. chemical activation. *Energy&Fuels*, 10: 1108-1114.

Gupta, V.K., & Ali, I. (2000). Utilisation of bagasse fly ash (a sugar industry waste) for the removal of copper and zinc from wastewater. *Separation and Purification Technology*, 18(2): 131-140.

Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Chandra, S., & Agarwal, S. (2002). Removal of lindane and malathion from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Water Research*, 36(10): 2483-2490.

Gupta, V.K., Jain, C.K., Ali, I., Sharma, M., & Saini, V. K. (2003). Removal of cadmium and nickel from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Water Research*, 37(16): 4038-4044.

Gupta, V. K., & Ali, I. (2004). Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste. *Journal of Colloid and Interface Science*, 271(2): 321-328.

Hsu, L.-Y., & Teng, H. (2000). Influence of different chemical reagents on the preparation of activated carbons from bituminous coal. *Fuel Processing Technology*, 64: 155-166.

Hu, Z., & Srinivasan, M.P. (1999). Preparation of high-surface-area activated carbons from coconut shell. *Microporous and Mesoporous Materials*, 27(1): 11-18.

Kadirvelu, K., Kavipriya, M., Karthika, C., Radhika, M., Vennilamani, N., Pattabhi, S. (2003). Utilization of various agricultural wastes for activated carbon preparation and application for the removal of dyes and metal ions from aqueous solution. *Bioresour. Technol.*, 87: 129-132.

Li, W., Zhang, L.B., Peng, J.H., Li, N., Zhu, X.U. (2008). Preparation of high surface area activated carbons from tobacco stems with  $K_2CO_3$  activation

- using microwave radiation. *Industrial Crops and Products*, 27(3): 341–347.
- Low, K.S., Lee, C.K. (1997). Quaternized rice husk as sorbent for reactive dyes. *Bioresour. Technol.*, 61:121–125.
- Malik, P.K. (2003). Use of activated carbons prepared from sawdust and rice-husk for adsorption of acid dyes: a case study of Acid Yellow 36k. *Dyes Pigments*, 56: 239–249.
- Mall, I.D., Srivastava, V.C., Agarwal, N.K., & Mishra, I.M. (2005a). Adsorptive removal of malachite green dye from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon—kinetic study and equilibrium isotherm analyses. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 264(1–3): 17–28.
- Mall, I.D., Srivastava, V.C., Agarwal, N.K., & Mishra, I.M. (2005b). Removal of congo red from aqueous solution by bagasse fly ash and activated carbon: Kinetic study and equilibrium isotherm analyses. *Chemosphere*, 61(4): 492–501.
- Mall, I.D., Srivastava, V.C., & Agarwal, N.K. (2006). Removal of Orange-G and Methyl Violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash—kinetic study and equilibrium isotherm analyses. *Dyes and Pigments*, 69(3): 210–223.
- McKay, G., Poots, J.P. (1980). Kinetics and diffusion processes in colour removal from effluent using wood as an adsorbent. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 30: 279–292.
- Morais, L.C., Freitas, O.M., Goncalves, E.P., Vasconcelos, L.T., Gonzales Beca, C.G. (1999). Reactive dyes removal from wastewaters by adsorption on eucalyptus bark: variables that define the process. *Water Res.*, 33: 979–988.
- Roa, M., Parwate, A.V., & Bhole, A.G. (2002). Removal of Cr<sup>6+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution using bagasse and fly ash. *Waste Management*, 22(7): 821–830.
- Robinson, I.M., McMullan, G., Marchant, R., Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies. *Bioresour. Technol.*, 77: 247–255.
- Satya sai, P.M., & Ahmed, J. (1997). Production of activated carbon from coconut shell char in a fluidized bed reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36(9): 3625–3630.
- Talavera, B.S., Munoz-Guilena, M.J., & Solano, L.A. (1997). Activated carbon from spanish coal 3. preoxidation effect on anthracite activation. *Energy & Fuels*, 11: 785–791.
- Teng, H., Ho, J.-A., & Hsieh, T.-C. (1996). Preparation of activated carbons from bituminous coals with CO<sub>2</sub> activation 1. effects of oxygen content in raw coals. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 35: 4043–4049.
- Teng, H., Ho, J.-A., & Hsu, Y.-F. (1997). Preparation of activated carbons from bituminous coals with CO<sub>2</sub> activation—influence of coal oxidation. *Carbon*, 35(2): 275–283.
- Teng, H., & Sheng Yeh, T. (1998). Preparation of activated carbons from bituminous coals with zinc chloride activation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 37: 58–65.
- Teng, H., Yeh, T.-S., & Hsu, L.-Y. (1998). Preparation of activated carbons from bituminous coals with phosphoric acid activation. *Carbon*, 36(9): 1387–1395.
- Williams, P.T., Reed, A.R. (2006). Development of activated carbon pore structure via physical and chemical activation of biomass fiber waste. *Biomass and Bioenergy*, 30(2): 144–152.
- Yagmur, E., Ozmak, M., & Aktas, Z. (2008). A novel method for production of activated carbon from waste tea by chemical activation with microwave energy. *Fuel*, 87(15–16): 3278–3285.