



ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ
ในหลอดขนาดเล็กโดยใช้ชิ้นยางธรรมชาติ
**Efficiency Enhancement of Adsorption Mini-Column Packed with Natural
Rubber Chips in Treatment of Water Contaminated with Phenol**

โดย นายภาณุ ด่านวานิชกุล และคณะ

พฤษภาคม พ.ศ. 2549

สัญญาเลขที่ RDG4950019

ร่างรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำ
ในหอดูดซับขนาดเล็กโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ

Efficiency Enhancement of Adsorption Mini-Column Packed with Natural
Rubber Chips in Treatment of Water Contaminated with Phenol

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. นายภาณุ ตำนวนิชกุล | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. นายณรงค์ศักดิ์ แซ่ฮึ้ง | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. นางสาวพรนภัส กิตตินรินทร์กุล | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 4. นางสาวศาลินา มีสัมฤทธิ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำในหลอดดูดขนาดเล็กโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ

(ภาษาอังกฤษ) Efficiency Enhancement of Adsorption Mini-Column Packed with Natural Rubber Chips in Treatment of Water Contaminated with Phenol

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่

ชื่อ-สกุล ผศ. ดร. ภาณุ ด่านวานิชกุล
หน่วยงาน ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120
โทรศัพท์/ โทรสาร 02-5643001-9 ext. 3123 FAX. Ext. 3123
E-mail dpanu@engr.tu.ac.th

นักศึกษา/ผู้ร่วมทำวิจัย

ชื่อ-สกุล นายณรงค์ศักดิ์ แซ่ฮึ้ง
ชื่อ-สกุล นางสาวพรนภัส กิตินันต์กุล
ชื่อ-สกุล นางสาวศาลินา มีสัมฤทธิ์

ระยะเวลาดำเนินการ 6 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ธันวาคม 2548 ถึงวันที่ 31 พฤษภาคม 2549

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการ SPR ก่อนหน้านี้ภายใต้ชื่อ “การใช้ยางธรรมชาติในการบำบัดน้ำปนเปื้อนตัวทำละลายอินทรีย์อันตราย” ผู้วิจัยพบว่าชั้นยางจะจับสารที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าสารที่มีขั้วได้หลายเท่า ในโครงการวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการจะดูผลของปัจจัยอื่นที่จะช่วยปรับสภาพให้ยางสามารถดูดจับสารที่มีขั้วได้ดียิ่งขึ้นอันได้แก่ การปรับสภาพผิวด้วยกรดและความร้อน โดยในที่นี้ผู้วิจัยเลือกที่จะใช้ฟีนอลเป็นสารที่มีขั้วที่ปนเปื้อนในน้ำ และเลือกใช้กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริกในการปรับสภาพผิวของชั้นยาง การศึกษาการดูดซับครอบคลุมการศึกษาจากกลศาสตร์ของการดูดซับทั้งในระบบที่ไม่มีกระแสไหล (batch adsorption) และในระบบที่มีการไหล (dynamic adsorption) ของน้ำปนเปื้อนผ่านคอลัมน์ขนาดเล็ก (mini-column)

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของขนาดของชั้นยางต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในน้ำปนเปื้อน ในระบบที่ไม่มีกระแสไหลจะดูความสามารถในการดูดซับที่สมดุล ในระบบที่มีการไหลจะดูการดูดซับที่เวลาต่างๆ กันด้วย
2. เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพผิวชั้นยางโดยใช้กรดและความร้อนต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในน้ำปนเปื้อนทั้งในระบบที่ไม่มีกระแสไหลและมีการไหล

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบการดูดซับสารปนเปื้อนฟีนอลของชั้นยางในระบบ batch โดยการแกว่งชั้นยางในน้ำปนเปื้อน และส่วนที่สองเป็นการศึกษาการดูดซับโดยใช้หลอดดูด

ขนาดเล็ก การศึกษาแบบ batch adsorption แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนย่อยคือ การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับและการศึกษาสมดุลของการดูดซับ ในการศึกษาจลนศาสตร์นั้นใช้ชิ้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ พบว่าชิ้นยางขนาดเล็กมีอัตราการดูดซับฟีนอลได้เร็วกว่าชิ้นยางขนาดใหญ่ ในการศึกษาส่วนต่อไปคือการศึกษาสมดุลของการดูดซับจึงใช้ชิ้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ โดยตลอด และได้ศึกษาผลของการปรับสภาพผิวยางด้วยกรดและเบสที่อุณหภูมิ 150°C ที่ความดัน 800 mbar พบว่าชิ้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนมีค่าปริมาณการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาคือ ชิ้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกกับความร้อน และชิ้นยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวใดๆ ตามลำดับ สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับในระบบที่มีการไหลของสารละลายฟีนอลโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็กได้ ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารฟีนอลและการเพิ่มจำนวนหลอดดูดซับโดยต่อเพิ่มจากหลอดดูดซับเดิมแบบอนุกรมอีกหนึ่งหลอด ในการทดลองส่วนแรกใช้ชิ้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อน และเปรียบเทียบกับยางที่มีได้ปรับสภาพผิว ส่วนการทดลองส่วนที่สองใช้เพียงยางที่ปรับสภาพผิวแล้วด้วยกรดไนตริก พบว่าชิ้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนมีความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลได้ดีกว่าชิ้นยางที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารละลายต่างกันคือที่ประมาณ 4.5 ml/min และ 10 ml/min พบว่าอัตราการไหลของสารละลายที่มากกว่าสามารถดูดซับสารฟีนอลได้มากกว่า และเมื่อใช้จำนวนหลอดดูดซับเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งหลอดพบว่าไม่ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด การดูดซับของฟีนอลจากการทดลองการไหลผ่านหลอดดูดซับแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบไม่ถาวร มีการหลุดออกและดูดซับใหม่ตลอดเวลา ผลของชิ้นยางในหลอดดูดซับจึงเป็นเพียงการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารฟีนอลให้หลุดออกไปกับกระแส น้ำช้าลง (retardation effect)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จะได้ศึกษาการถูกดูดซับของฟีนอลโดยใช้ชิ้นยางธรรมชาติที่ผ่านการปรับสภาพผิว โดยศึกษาทั้งแบบ batch และแบบใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก ซึ่งจากการศึกษาพบว่าชิ้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนสามารถดูดซับสารฟีนอลได้ดีกว่าชิ้นยางที่ไม่ผ่านการปรับสภาพทั้งในแบบ batch และแบบใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก โดยการปรับสภาพผิวนั้นจะทำให้ชิ้นยางมีความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลในหลอดดูดซับขนาดเล็กเพิ่มขึ้นประมาณ 6.5% และต้องเสียค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพผิวเพิ่มขึ้นประมาณ $1,300$ บาทต่ออย่างหนึ่งกิโลกรัม

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะควรวิจัย และวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

ในงานวิจัยนี้พบว่าการปรับสภาพผิวโดยใช้สารเคมีสามารถทำให้การดูดซับฟีนอลของชิ้นยางดีขึ้นได้ นอกจากนั้น การเพิ่มความชื้นให้กับโมเลกุลของยางธรรมชาติ น่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลซึ่งเป็นสารมีขั้วได้ดียิ่งขึ้น เช่น การทำปฏิกิริยา graft copolymerization กับ maleic anhydride เป็น maleated natural rubber เป็นทางเลือกหนึ่งซึ่งมีผู้ศึกษาไว้เพื่อใช้เป็นสาร compatibilizer ในการผสมยางธรรมชาติกับสารอื่นที่มีขั้วได้แก่ แป้ง (มีอะมิโนส และอะมิโนเพกติน) และกากตะกอนกระดาศ (มีเซลลูโลส) ซึ่งต่างก็มีหมู่ hydroxyl จำนวนมาก ดังนั้นยาง maleated natural rubber น่าจะดูดซับฟีนอลได้ดีกว่ายางที่มีได้ปรับสภาพ และเมื่อเติมแป้งหรือเซลลูโลสลงไปน่าจะช่วยให้ยางมีความสามารถในการดูดซับฟีนอลได้มากขึ้น

การพัฒนาตัวดูดซับสารนั้นมีความสำคัญมาก ไม่เพียงแต่การใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนเท่านั้น หากยังนำไปผลิตเป็นเยื่อเลือกผ่านที่มีคุณสมบัติในการแยกสารที่ต้องการออกจากสารที่ไม่ต้องการได้ด้วย ปัญหาการขาดแคลนน้ำมันและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตของเราอยู่ในทุกวันนี้

หนทางหนึ่งที่จะลดความรุนแรงของปัญหาดังกล่าวได้คือ การใช้วัสดุจากธรรมชาติที่มีอยู่ (renewable sources) แล้วให้เกิดประโยชน์สูงสุด งานวิจัยนี้จะเป็นงานหนึ่งที่สนับสนุนแนวคิดดังกล่าว

การนำชั้นยางมาผสมเป็น Permeable Barrier นั้น ตัวดูดซับจะถูกแพ็คคล้ายๆ กับเป็นไส้กรอง สามารถถอดดึงเข้าออกได้ เมื่อประสิทธิภาพของตัวดูดซับแยลงมาก สามารถถอดออกแล้วนำไป regenerate ได้ โดยการไปปล่อยให้สารระเหยในที่โล่งกว้างไกลที่อยู่อาศัย (ซึ่งเป็นวิธีกำจัดสารทางหนึ่ง เรียกว่า Ventilation) แล้วนำมาใช้ได้ใหม่ ในกรณีของฟีนอลมีรายงานโดยใช้อย่างบดจากยางใช้แล้วประมาณว่าหากทำ barrier หนา 1 เมตรจะสามารถบำบัดฟีนอลในน้ำได้ดินได้กว้าง 5 เมตร (Smith และคณะ, 2001) จากการทดลองในงานวิจัยนี้ ในหลอดดูดพบว่าชั้นยางสามารถดูดซับฟีนอลได้ประมาณ 12% การทดลองดังกล่าวใช้เวลาเพียง 8 ชั่วโมง เนื่องจากกลไกการดูดซับฟีนอลของชั้นยางนั้นช้า หากทำการทดลองนานขึ้นน่าจะได้ปริมาณการดูดซับที่ดีขึ้น และอาจมีการวนสารละลายที่ทางออกเข้าคอลัมน์อีกครั้งจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับดียิ่งขึ้น

ความคิดในการใช้ชั้นยางเป็นตัวดูดซับสารนั้น อาจใช้ประกอบกับการบำบัดด้วยวิธีอื่น ชั้นยางอาจทำหน้าที่เป็น “ตัวเก็บสาร (capacitor)” ซึ่งจะนำไปดูดซับสารในน้ำที่มีความเข้มข้นของสารสูง แล้วอาจนำมาปล่อยในน้ำ จะได้สารละลายความเข้มข้นต่ำแล้วจึงใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการกำจัดแบบถาวรต่อไป

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

บทความวิชาการเรื่อง “Retardation effect in removal of phenol from contaminated water using adsorption column packed with vulcanized rubber chip”

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการดูดซับสารฟีนอลของชั้นยางในระบบ batch โดยใช้การแกว่งชั้นยางในน้ำปนเปื้อน และส่วนที่สองเป็นการศึกษาการดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก การศึกษาแบบ batch adsorption แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนย่อยคือ การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับและการศึกษาสมดุลของการดูดซับ ในการศึกษาจลนศาสตร์นั้นใช้ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ พบว่าชั้นยางขนาดเล็กมีอัตราการดูดซับฟีนอลได้เร็วกว่าชั้นยางขนาดใหญ่ และสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่ง ดังนั้นการศึกษาสมดุลของการดูดซับจึงใช้ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ โดยตลอด และได้ศึกษาผลของการปรับสภาพผิวด้วยกรดและเบสที่อุณหภูมิ 150°C ที่ความดัน 800 mbar พบว่าชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนมีค่าปริมาณการดูดซับสูงที่สุด รองลงมาคือชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อน และชั้นยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวใด ตามลำดับ สำหรับการศึกษากฎการดูดซับในระบบที่มีการไหลของสารละลายฟีนอลโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็กนั้น ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารฟีนอลและการเพิ่มจำนวนหลอดดูดซับโดยต่อเพิ่มจากหลอดดูดซับเดิมแบบอนุกรมอีกหนึ่งหลอด ในการทดลองส่วนแรกใช้ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ปรับสภาพผิวโดยกรดไนตริกและความร้อน และเปรียบเทียบกับยางที่มีได้ปรับสภาพผิว ส่วนการทดลองส่วนที่สองใช้เพียงยางที่ปรับสภาพผิวแล้ว พบว่าชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อนมีความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลได้ดีกว่าชั้นยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารละลายต่างกันคือที่ประมาณ 4.5 ml/min และ 10 ml/min พบว่าอัตราการไหลของสารละลายที่มากกว่าสามารถดูดซับสารฟีนอลได้มากกว่า และเมื่อใช้จำนวนหลอดดูดซับเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งหลอดพบว่าไม่ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด การดูดซับของฟีนอลจากการทดลองการไหลผ่านหลอดดูดซับแสดงให้เห็นว่าการดูดซับเป็นแบบไม่ถาวร มีการหลุดออกและดูดซับใหม่ตลอดเวลา ชั้นยางในหลอดดูดซับช่วยขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารฟีนอลให้หลุดออกไปกับกระแสการไหลช้าลง

ABSTRACT

In this work we improved the efficiency of rubber chips in order to treat phenol-contaminated water. The experiment was divided into two parts using batch system and adsorption columns. Kinetics and equilibrium of adsorption were investigated in batch test. The rubber chips of size $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ and $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ were compared and proved with kinetic models. It was found that the smaller chips had higher rate of adsorption and followed the first order kinetic model so the chips of size $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ were used throughout the rest of the experiment. In order to increase effective surface area of the chips, they were subsequently treated with either nitric acid and heated at 150°C and 800 mbar or treated with sulfuric acid and heated at the same temperature and pressure. It was found that the adsorption capacity was most improved for nitric-treated chips, which is more than sulfuric-treated and untreated chips, respectively. For dynamic adsorption, mini-column packed with gravels and chips were used. The comparison was made for nitric-treated and untreated chips and the flow rate of the phenol solution was varied to be 4.5 ml/min and 10 ml/min. The results showed that treated chips could remove phenol better than the untreated chips and the removal of phenol at higher flow rate was more efficient. When connecting one more column and using the same flow rate of 4.5 ml/min as for the single column, the removal efficiency did not improve. The adsorption of phenol in the column did not follow the typical breakthrough curve but showed the non-permanent attraction between phenol and rubber chips so chips could be used to retard the flow of the phenol.

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร	i
บทคัดย่อ	iv
Abstract	v
 บทที่	
1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย	1
2. วัตถุประสงค์	1
3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	2
3.1 ทฤษฎี	2
3.2 แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง	2
4. วิธีการทดลอง	3
4.1 ออกสูตรยาง	3
4.2 การเตรียมยางสำหรับการดูดซับ	4
4.3 การเตรียมชั้นยางและการปรับสภาพผิวของชั้นยาง	4
4.4 การทดสอบสมบัติการดูดซับ (Sorption) ของชั้นยาง	5
5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย	7
5.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายฟีนอลในชั้นยาง	
แบบ Batch Adsorption	7
5.2 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายฟีนอลในชั้นยาง	
แบบ Dynamic Adsorption	16
5.3 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของการใช้ชั้นยางในการดูดซับฟีนอล	20
6. สรุปผลการวิจัย	22
7. ปัญหาและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	23
8. เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก	25

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ฟีนอลเป็นสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีอื่นๆ เช่น cresols, xylenols, salicylic acid, aniline และ phenolic resins อีกทั้งยังใช้เป็นยาฆ่าเชื้อโดยใช้เป็นสารละลายเดี่ยวหรือสารละลายผสมกับยาฆ่าเชื้อตัวอื่น (กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ, 2542) ฟีนอลมักปนเปื้อนกับน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ซึ่งเมื่อปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลองจะเกิดการปนเปื้อน และทำให้น้ำเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำรวมทั้งคนที่ใช้น้ำนั้นในการบริโภคและอุปโภคด้วย การปนเปื้อนในน้ำอาจเกิดในกรณีมีสารรั่วไหลสู่พื้นดินและไหลไปรวมกันในแหล่งน้ำใต้ดิน ก่อนที่จะสามารถนำน้ำใต้ดินมาใช้ในการบริโภคอุปโภคได้จำเป็นต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อน วิธีที่ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินมีหลายวิธีเช่น pump and treat คือการสูบน้ำขึ้นมาแล้วจึงบำบัดน้ำโดยใช้สารดูดซับชนิดต่างๆ และวิธีที่กำลังเป็นที่นิยมในขณะนี้คือ reactive permeable barrier โดยการทำเป็นคันดินขวางการไหลของน้ำใต้ดินในคันดินนั้นจะมีส่วนผสมของดิน หิน หรือทรายรวมถึงตัวดูดซับชนิดต่างๆ ที่หาได้ง่ายและราคาไม่แพง ในขณะที่น้ำใต้ดินไหลผ่านคันดินดังกล่าวสารที่ปนเปื้อนจะถูกดูดซับไปด้วย ซึ่ง Smith และคณะ (2001) ทดสอบการใช้ยางรถยนต์ใช้แล้วมาตัดเป็นชิ้นๆ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับในการทำกำแพงกั้นน้ำใต้ดิน โดยศึกษาทั้งคุณสมบัติการดูดซับฟีนอลและสารเคมีชนิดอื่นๆ รวมถึงคุณสมบัติในการรับแรงของชิ้นยาง

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นงานวิจัยต่อเนื่องจากโครงการ SPR เดิมคือ “การใช้ยางธรรมชาติในการบำบัดน้ำปนเปื้อนสารอินทรีย์อันตราย” (สวลี เจริญการ และคณะ, 2547) ผู้วิจัยได้ศึกษาผลของสารตัวเติมที่ใส่ในการผลิตยางอันได้แก่ ผงเขม่าดำ และ หินปูน ที่มีต่อการดูดซับสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำอันได้แก่ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และฟีนอล โดยใช้ชิ้นยางธรรมชาติขนาดประมาณ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ และได้ผลเป็นที่น่าพอใจคือ ยางสามารถดูดสารดังกล่าวได้ โดยพบว่าชิ้นยางจะชอบจับสารที่ไม่มีขั้วคือ โทลูอิน และเอ็ม-ไซลีน ได้ดีกว่า พี-ครีซอลและฟีนอลซึ่งเป็นสารมีขั้วได้หลายเท่าและพบว่าสารตัวเติมมิได้มีผลต่อการดูดจับสารออกจากน้ำ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าความเข้มข้นที่ปนเปื้อนในน้ำไม่มากพอที่จะทำให้เห็นผลของสารตัวเติมต่อประสิทธิภาพในการดูดจับสารของชิ้นยาง

ในโครงการวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการจะดูผลของปัจจัยอื่นๆ ที่จะช่วยปรับให้ยางสามารถดูดจับสารได้ดียิ่งขึ้นโดยในที่นี้ผู้วิจัยเลือกที่จะใช้ฟีนอลเป็นสารตัวอย่างในการศึกษา ทั้งนี้เพราะสารไม่มีขั้วพวกโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนนั้นเป็นสารระเหยง่ายมาก การทำการทดลองจำเป็นต้องระมัดระวังเรื่องความปลอดภัยอย่างมากในขณะที่ฟีนอลมีค่าการระเหยน้ำสูงและระเหยจากน้ำได้ยากกว่าและถ้าหากสามารถปรับให้ยางสามารถดูดจับฟีนอลได้ดีขึ้นกว่าเดิม นั่นก็อาจทำให้ยางสามารถดูดสารอื่นๆ ได้ดีขึ้นด้วยวิธีการเดียวกัน

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาผลของขนาดของชิ้นยางต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในน้ำปนเปื้อนในระบบที่ไม่มี การไหล
2. เพื่อศึกษาผลของการปรับสภาพผิวชิ้นยางโดยใช้กรดและความร้อนต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลในน้ำปนเปื้อนทั้งในระบบที่ไม่มี การไหลและมีการไหล
3. เพื่อศึกษาผลของอัตราเร็วของการไหลของสารละลายผ่านหลอดดูดซับและจำนวนหลอดดูดซับที่มีต่อการดูดจับฟีนอลในน้ำ

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎี

หลักการของการใช้ยางมาดูดซับสารในน้ำนั้น อาศัยทั้งกระบวนการ Adsorption และ Absorption ซึ่งเป็นการแยกสารออกจากเฟสของเหลวที่เคยอยู่ให้ไปอยู่ในเฟสของแข็ง ในขณะที่ชั้นยางดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำ ปริมาณของสารอินทรีย์ในน้ำจะลดลง และปริมาณที่สะสมในชั้นยางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งถ้าทำการทดลองนานเพียงพอ การดูดซับสารของยางจะเข้าสู่สภาวะสมดุล การอธิบายความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลทำได้โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า adsorption isotherm ซึ่งมีหลายความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การดูดซับฟีนอลในน้ำนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย Freundlich isotherm ซึ่งเป็น ไอโซเทอมที่นิยมใช้กันมากในการทดสอบเกี่ยวกับการดูดซับ บางครั้ง Freundlich isotherm ถูกพิจารณาว่าเป็น empirical equation (Suzuki, 1990) แต่ในบางที่ก็พิจารณาว่า Freundlich isotherm สามารถพัฒนามาจากสมมติฐานว่าสมการสมดุลเคมีสามารถใช้ในการอธิบายการดูดซับที่สภาวะสมดุลได้ โดยคิดว่าสารที่ถูกดูดซับและ active site บนพื้นผิวของตัวดูดซับทำปฏิกิริยากัน (กระบวนการดูดซับ) และสามารถผันกลับได้ (กระบวนการคายออก) (Benjamin, 2002)

ไอโซเทอมนี้จะอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นในเฟสของสารละลายและในเฟสของชั้นยางที่สภาวะสมดุล แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (1)$$

โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารที่อยู่ในชั้นยางต่อน้ำหนักของชั้นยางที่สภาวะสมดุล [mg สาร/g ตัวดูดซับ]

C_e คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล [mg/l]

K_F และ n เป็นพารามิเตอร์ใน Freundlich Isotherm

หากมองว่าการดูดซับมีลักษณะเหมือนปฏิกิริยาผันกลับได้ ค่า K_F จะเกี่ยวข้องกับค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา ส่วนค่า n จะเกี่ยวข้องกับส่วนกลับของจำนวนตัวถูกดูดซับนั่นเอง ถ้าค่าของ n เป็น 1.0 Isotherm จะมีชื่อเรียกว่า linear isotherm จากสมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อใช้ในการหาค่า Freundlich parameters ดังนี้

$$\ln(q_e) = \frac{1}{n} \ln(C_e) + \ln(K_F) \quad (2)$$

เมื่อวาดกราฟระหว่าง $\ln(q_e)$ และ $\ln(C_e)$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันคือ $1/n$ และมีจุดตัดแกน y เป็น $\ln(K_F)$ ค่าของ K_F จะบอกถึงความสามารถในการดูดซับสารของยาง (adsorption capacity) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นที่สมดุลเท่ากันคือ 1 หน่วย ส่วนค่า n เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของการยึดติดของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorption affinity) เปรียบเทียบที่สภาวะสมดุลต่างกันว่า หากสภาวะสมดุลหนึ่งตัวดูดซับมีปริมาณการดูดซับมากกว่าอีกสมดุลหนึ่งจะส่งผลให้การยึดติดเปลี่ยนไปมากน้อยเพียงไร หากค่าของ n เท่ากับ 1.0 หมายถึงการยึดติดจะเหมือนเดิมในทุกสภาวะสมดุล ถ้า n น้อยกว่า 1.0 หมายถึงเมื่อตัวดูดซับที่อีกสมดุลหนึ่งมีปริมาณการดูดซับมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างตัวดูดซับกับพื้นผิวในสมดุลนั้นมีมากขึ้น เป็นการดูดซับแบบน่าพอใจ (favorable adsorption)

หากค่าของ n มากกว่า 1.0 เมื่อตัวดูดซับที่อีกสมดุลงหนึ่งมีปริมาณการดูดซับมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างตัวดูดซับกับพื้นผิวในสมดุลงนั้นมีน้อยลง (Benjamin, 2002)

3.2 แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

มีรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ในการดูดซับสารมากมายหลายชนิด เช่นการนำถ่านกัมมันต์ในรูปเส้นใยมาดูดซับสารอินทรีย์ที่ละลายปนเปื้อนในน้ำ (Brasquet และคณะ, 1997) และการเตรียมถ่านกัมมันต์จากชีวมวลเพื่อนำมาดูดซับนิกเกิล(2+) ที่ละลายในน้ำ (Kadirvelu และคณะ, 2002) ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ในการดูดซับมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากถ่านกัมมันต์มักจะมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนหลายขนาด ทำให้การดูดซับแบบเลือกสารคือใช้เป็น molecular sieve เป็นไปได้ไม่ดีนัก จึงมีการหาตัวดูดซับอื่นๆ มาใช้แทน ในปัจจุบันพบว่าสารจำพวก zeolite ทั้งที่มีในธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับแบบเลือกสารได้และถูกนำมาใช้ในการดูดซับสารหลายชนิดเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์

เนื่องจากต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์มีราคาสูง จึงมีรายงานวิจัยหลายชิ้นที่พูดถึงการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้หรือวัสดุอื่นที่มีราคาถูก ยางใช้แล้วก็เป็นหนึ่งในนั้นที่มีการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโดยมิได้นำมาผ่านการทำเป็นถ่านกัมมันต์ก่อน แต่อาจมีการแปรสภาพไปเป็นยางผง (ground rubber) หรือตัดเป็นชิ้นยางขนาดเล็ก (rubber chip) ก่อนแล้วนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการสร้างกำแพงกั้นลงไปใต้ดิน (permeable reactive barrier) เพื่อขวางการไหลของน้ำใต้ดินให้ไหลผ่านกำแพง สารที่อยู่ในกำแพงจะดูดซับสารที่ปนเปื้อนมากับน้ำใต้ดิน และเนื่องจากความสามารถของการดูดซับสารของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนที่ผิวของตัวดูดซับก่อนแล้วอาจแพร่เข้าไปในเนื้อสาร ดังนั้นผิวสัมผัสระหว่างสารกับตัวดูดซับสารจึงเป็นสิ่งสำคัญ การทำให้เกิดรูพรุนขึ้นที่ผิวโดยใช้กรด (chemical treatment) และการใช้ความร้อน (heat treatment) พบว่าเป็นวิธีที่ช่วยปรับปรุงสภาพผิวให้เกิดรูพรุนในระดับกลาง (mesoporous) ถึงใหญ่ (macroporous) มากยิ่งขึ้น รวมถึงการปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิว (Manchon-Vizuet และคณะ, 2003) ซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติในการดูดซับสารดียิ่งขึ้น มีรายงานวิจัยที่ใช้ปฏิกิริยา chlorination ในการปรับปรุงสภาพผิวของแผ่นฟิล์มยางที่ผลิตจากน้ำยาง พบว่าฟิล์มยางมีความชอบน้ำ (hydrophilicity) มากยิ่งขึ้น (Wang และคณะ, 2000) จากแนวคิดดังกล่าว การใช้ chemical treatment จึงน่าจะช่วยให้ชั้นยางหรือเศษยางสามารถดูดซับฟีนอลได้ดียิ่งขึ้น นอกจากปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับชั้นยางแล้ว ปัจจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการดูดซับนั้นคือระยะเวลาสัมผัสของสารกับชั้นยางก็เป็นสิ่งสำคัญ ในการทดลองที่ใช้คอลัมน์ การปรับระยะเวลาสัมผัสก็คือการปรับอัตราการไหล ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับทั้งในระบบที่ไม่มีการไหล (Batch adsorption) และในระบบที่มีการไหล (Dynamic adsorption) โดยการให้สารปนเปื้อนไหลผ่านคอลัมน์ขนาดเล็ก (Mini-column) ในการศึกษาผลของการปรับปรุงสภาพผิวยางจะทำโดยใช้กรดซัลฟิวริกและความร้อน เปรียบเทียบกับผลของการปรับปรุงสภาพผิวโดยใช้กรดไนตริกและความร้อนต่อความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลในน้ำ จากการศึกษาดังกล่าวจะสามารถนำวิธีการปรับปรุงสภาพผิวยางไปประยุกต์ใช้กับยางเหลือใช้เพื่อให้สามารถนำไปดูดซับสารอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4. วิธีการทดลอง

4.1 ออกสูตรยาง

ในการออกสูตรยางในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางมีส่วนผสมของสารต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงชนิดส่วนผสมและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผลิตยางที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	ปริมาณ (phr)
STR 20	100
Stearic acid	1.00
Zinc oxide	5.00
CBS	3.50
TMTD	0.50
Filler (N-330)	30.00
Sulfur	0.40
6-ppd	3.00

ยางธรรมชาติ STR 20 นั้นได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทยางไทย ปักซี่ใต้ จำกัด สำหรับสารทำให้ยางคงรูปนั้นใช้ กำมะถัน (sulfur) เป็นสารคงรูป โดยซื้อจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) ในที่นี้คือ Tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) โดยได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท เจ เจ-เดกussa เคมีคอล (ที) จำกัด และ N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide (CBS) โดยได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัทซันนี่เวิลด์ (1989) จำกัด สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ที่ใช้ในที่นี้คือ Zinc oxide (ZnO) และ stearic acid ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทล็อกซเล่ย์ จำกัด (มหาชน) สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradant) ในที่นี้ใช้ N-(1,3-dimethylbutyl) - N- Phenyl-p-phenylenediamine (6-PPD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทซันนี่เวิลด์ (1989) จำกัด สารตัวเติม (filler) ที่ใช้คือผงเขม่าดำ (carbon black) ชนิด N-330 ซื้อจากบริษัทล็อกซเล่ย์ จำกัด (มหาชน)

4.2 การเตรียมยางสำหรับการดูดซับ

บดยางแท่ง STR 20 โดยใช้เครื่องบดยี่ห้อบราเบนด์เลอร์ ที่ความเร็ว 40 rpm อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 °C การบดผสมเริ่มจากการบดทำให้ยางนิ่มก่อน จากนั้นใส่สารตัวเติมและบดให้เข้ากัน แล้วจึงเติม stearic acid และ ZnO และบดต่อ ตามด้วยการเติม 6-PPD และบดอีกประมาณ 2 นาที สุดท้ายเติม CBS, TMTD และ Sulfur และบดต่ออีก 2 นาที จากนั้นนำคอมปาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่อง two-roll mill จากนั้นนำตัวอย่างยางบางส่วนไปทดสอบสมบัติการทำให้ยางคงรูป โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer ยี่ห้อ TECH-PRO รุ่น rheoTECH MD+ ที่ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ที่อุณหภูมิ 150 °C ประมาณเวลา 90% cure time จาก rheograph และใช้เวลาตั้งกล่าวขึ้นรูปยางให้เป็นแผ่นหนา 2 mm ในเครื่อง compression mold

4.3 การเตรียมชิ้นยางและการปรับสภาพผิวของชิ้นยาง

4.3.1 การตัดชิ้นยางเป็นชิ้นเล็กๆ

ตัดแผ่นยางที่ขึ้นรูปในข้อ 4.2 เป็นชิ้นขนาดต่างกัน 2 ขนาด ได้แก่ 0.5 x 0.5 cm² และ 1.0 x 1.0 cm² แบ่งยางขนาด 0.5 x 0.5 cm² ส่วนหนึ่งไปปรับสภาพผิวในขั้นตอน 4.3.2 หรือ 4.3.3 และอีกส่วนหนึ่งไม่ต้องปรับสภาพผิวเพื่อเปรียบเทียบกัน

4.3.2 การปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก

นำยางขนาด 0.5 x 0.5 cm² ในข้อ 4.3.1 มาปรับสภาพผิวโดยใช้ชิ้นยาง 40 g แช่ในสารละลายกรด

ซัลฟิวริกเข้มข้น 96% โดยน้ำหนัก โดยเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 2.87 mol/l ปล่อยให้ชั้นยางทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำยางมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลางแล้วนำมาอบโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ที่ความดัน 800 mbar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.3.3 การปรับสภาพผิวโดยใช้สารละลายกรดไนตริก

นำยางขนาด 0.5 x 0.5 cm² ในข้อ 4.3.1 มาปรับสภาพผิวโดยใช้ชั้นยาง 40 g แขนในสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 65% โดยน้ำหนัก โดยเตรียมสารละลายที่มีความเข้มข้น 2.87 mol/l ปล่อยให้ชั้นยางทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดไนตริกเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำยางมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนมีสภาพเป็นกลางแล้วนำมาอบโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ที่ความดัน 800 mbar เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.4 การทดสอบสมบัติการดูดซับ (Sorption) ของชั้นยาง

ทดสอบสมบัติการดูดซับ (sorption) ของสารฟีนอลในน้ำโดยวิธีการดูดซับทั้งในระบบ batch และในระบบที่มีการไหล (dynamic adsorption) ในระบบแบบ batch นั้นได้ทำการทดสอบกับยางที่ยังไม่ได้ปรับสภาพผิว (untreated chips) และแบบที่แช่ด้วยกรดซัลฟิวริก (sulfuric-acid-treated chips) และกรดไนตริก (nitric-acid-treated chips) ส่วนระบบที่มีการไหลทำโดยการให้สารละลายฟีนอลไหลผ่านหลอดดูดซับขนาดเล็ก (adsorption mini-column) ซึ่งมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของสารละลายฟีนอลที่ไหลเข้าไปในหลอดดูดซับ และมีการเปรียบเทียบการใช้อย่างที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวกับยางที่ปรับสภาพผิวแล้ว อีกทั้งยังทดสอบการดูดซับสารละลายฟีนอลโดยใช้หลอดดูดซับห่อเดียวและหลอดดูดซับสองห่อ

4.4.1 การทดสอบสมบัติการดูดซับ (sorption) ในระบบแบบ batch

เตรียมสารละลายฟีนอลที่มีความเข้มข้น 20 mg/l (ppm) และเติม sodium azide 0.5 g/l เพื่อป้องกันไม่ให้สารฟีนอลถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เมื่อวัดค่า pH โดยเครื่อง pH meter พบว่าสารละลายฟีนอลมีค่า pH เริ่มต้นประมาณ 6.5 การบำบัดสารละลายฟีนอลในน้ำแบบ batch experiment จะแบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน

(1) จลนศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics) เพื่อศึกษาการดูดซับฟีนอลในชั้นยางที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล โดยเตรียมยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวทั้ง 2 ขนาด คือ 0.5 x 0.5 และ 1.0 x 1.0 cm² ปริมาณอย่างละ 10 g ใส่ใน Erlenmeyer flask ขนาด 200 ml จำนวน 9 ขวด ซึ่งจะถูกเก็บที่เวลาต่างๆ แล้วเติมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 20 mg/l ปริมาตร 100 ml หลังจากนั้นปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย แล้วจึงนำไปแกว่งบน orbital shaker ที่ความเร็วรอบ 160 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C ควบคุมโดยระบบควบคุมของเครื่อง shaker จากนั้นเก็บสารตัวอย่างที่เวลาผ่านไป 30, 65, 130, 310, 910, 1510, 2350, 3070 และ 3970 นาที นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ในน้ำโดยใช้เทคนิค Gas Chromatography (GC)

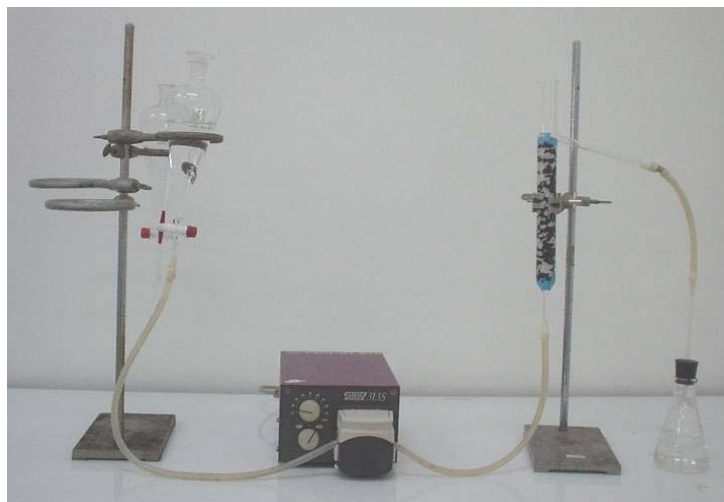


รูปที่ 1 ขวดรูปชมพูปรับจุสารละลายและชั้นยางบนเครื่องเขย่า

(2) สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) เพื่อศึกษาหาปริมาณของสารฟีนอลที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุลโดยใช้ชั้นยางปริมาณต่างๆ คือ 2, 4, 7, 10 และ 14 g ใส่ลงใน Erlenmeyer flask ขนาด 200 ml จำนวน 5 ขวด ศึกษาทั้งยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวและแบบที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก จากนั้นเติมสารละลายฟีนอลความเข้มข้น 20 mg/l ปริมาตร 100 ml ปิดฝาให้สนิทเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย แล้วจึงนำไปแกว่งบน orbital shaker ที่ 160 rpm และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 °C ทิ้งไว้ประมาณ 3 วันเพื่อให้ระบบเข้าสู่สมดุล นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ในน้ำโดยใช้ GC

4.4.2 การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายฟีนอลโดยใช้หลอดดูดซับ (sorption mini-column)

เตรียมหลอดดูดซับสารละลายฟีนอลโดยใช้คอลัมน์แก้วขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.6 cm และสูง 22.5 cm ในหอบรรจุชั้นยาง ศึกษายางชนิดที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกขนาด 0.5 x 0.5 cm² ปริมาตร 25 g ผสมกับกรวดปริมาณ 85 g เพื่อกันมิให้ชั้นยางเกาะติดกันเองจนไม่สัมผัสกับสารละลาย บรรจุทั้งชั้นยางและกรวดจนถึงระดับทางออก โดยภาชนะที่บรรจุสารละลายจะต่อกับ peristaltic pump สายที่ผ่านปั๊มจะต่อเข้ากับทางเข้าหลอดดูดซับซึ่งอยู่ทางด้านล่าง (influent) ส่วนทางด้านบนของหลอดดูดซับต่อเข้ากับภาชนะรองรับสารละลาย (effluent) ดังรูปที่ 2

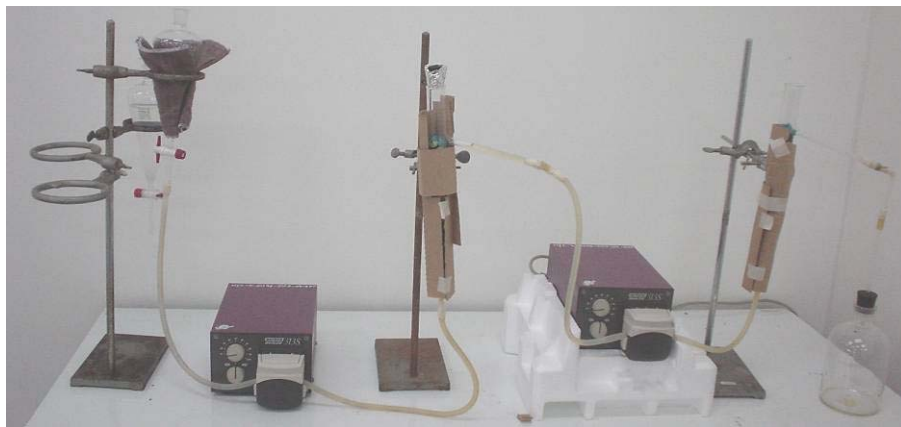


รูปที่ 2 การทดลองการดูดซับฟีนอลโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก

ก่อนเริ่มทำการทดลองการดูดซับ จะหา void fraction ซึ่งเป็นสัดส่วนของช่องว่างที่สารละลายสามารถไหลได้ต่อปริมาตรทั้งหมดของหลอดซึ่งเกิดจากการบรรจุชั้นยางและกรวดจนเต็มหลอด โดยก่อนการบรรจุชั้นยางกับกรวดจะเติมน้ำลงในหลอดดูดซับสารจนถึงระดับทางออกของน้ำแล้วจึงวัดปริมาตรน้ำเพื่อดูปริมาตรทั้งหมดของหลอดดูดซับ และหลังจากบรรจุชั้นยางและกรวดเรียบร้อยแล้ว จะเติมน้ำลงในหลอดดูดซับสารอีกครั้ง แล้ววัดปริมาตรน้ำที่แทรกในช่องว่างจึงเป็นการวัดปริมาตรของช่องว่าง (void volume) จะสามารถหาสัดส่วนช่องว่างได้โดยคำนวณจากสัดส่วนของปริมาตรทั้งสองค่าที่วัดได้

การทดลองการดูดซับจะเริ่มจากการเตรียมสารละลายฟีนอลในน้ำที่มีความเข้มข้นประมาณ 20 mg/l ปริมาตร 5000 ml เทใส่กรวยแยกสารซึ่งใช้เป็นภาชนะบรรจุสารละลายเริ่มต้น สามารถบรรจุสารได้ประมาณ 1000 ml. หมุนเปิดทางออกของกรวยปล่อยให้สารละลายไหลออกพร้อมทั้งเดินเครื่องปั๊มที่อัตราประมาณ

4.45 ml/min บันทึกเวลาเมื่อสารละลายเริ่มไหลเข้าสู่ด้านล่างของหลอดดูดซับจนสารละลายไหลออกที่ด้านบนของหลอดดูดซับ เก็บตัวอย่างสารละลายฟีนอลเพื่อวัดความเข้มข้น โดยเก็บสารละลายปริมาณ 2 ml ที่ทางออกด้านบนของหลอด เมื่อเวลาผ่านไป 0 นาที, 15 นาที, 30 นาที, 1 ชม., 1.5 ชม., 2 ชม., 2.5 ชม., 3 ชม., 4 ชม., 5 ชม., 6 ชม., 7 ชม., 8 ชม., 10 ชม., 12 ชม. นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณฟีนอลที่เหลืออยู่ในน้ำโดยใช้เทคนิค Gas Chromatography จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 10.6 ml/min จากนั้นศึกษาโดยเปลี่ยนชนิดยางเป็นยางที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวโดยใช้อัตราการไหล 4.45 ml/min และสุดท้ายทำการทดลองโดยเพิ่มจำนวนหลอดดูดซับจากหลอดเดียวเป็นสองหลอด นำมาต่อแบบอนุกรมกันเพื่อดูผลการดูดซับสารละลายฟีนอล โดยใช้ยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกที่อัตราการไหล 4.45 ml/min ดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าในรูปมีการป้องกันอุปกรณ์การทดลองมิให้สัมผัสแสงมากเกินไป เพราะธรรมชาติของสารฟีนอลจะสามารถเกิดปฏิกิริยา Photo-oxidation ได้



รูปที่ 3 การทดลองการดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็กสองหลอดต่ออนุกรมกัน

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายฟีนอลในชั้นยางแบบ Batch Adsorption

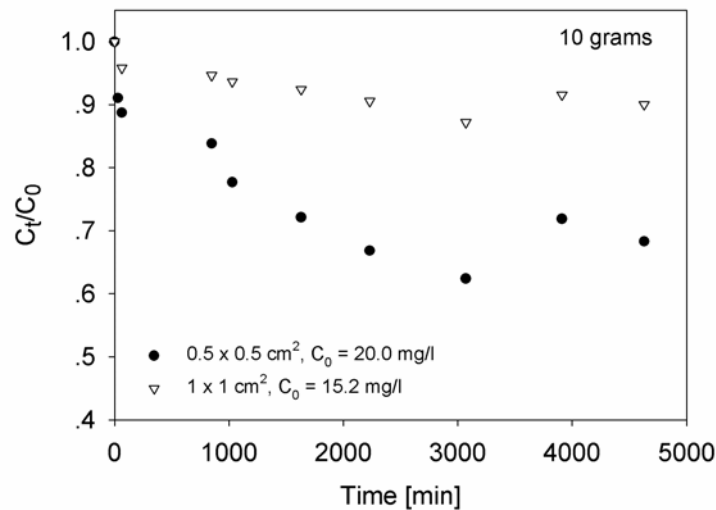
การทดสอบการดูดซับในระบบ Batch Adsorption ซึ่งได้ทดสอบทั้งในส่วนของ Adsorption Kinetics สำหรับชั้นยางต่างขนาด และ Equilibrium Adsorption สำหรับยางที่ปรับสภาพผิว

5.1.1 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption Kinetics)

5.1.1.1. การหาค่าปริมาณการดูดซับในชั้นยาง (sorption capacity หรือ uptake capacity)

จากผลการทดลองซึ่งวัดค่าความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายเมื่อใช้ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ ประมาณ 1 g ดูดซับสารละลายฟีนอลในน้ำที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 20 mg/l เมื่อนำมาวาดกราฟระหว่างสัดส่วนค่าความเข้มข้นที่เวลาใดๆ และความเข้มข้นเมื่อเริ่มต้น จะได้ผลดังกราฟรูปที่ 4 โดยค่าจะเริ่มต้นจาก 1.0 และลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ที่เวลา 3070 นาที กลับมีค่าความเข้มข้นสูงขึ้น และลดลงอีกที่เวลา 3970 นาที แทนที่จะคงที่ที่ค่าคงที่หนึ่ง ซึ่งก็คือความเข้มข้นที่สภาวะสมดุลของการดูดซับ (C_{eq}) นั่นเอง เหตุที่มีการลดลงและเพิ่มขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากแรงดึงดูดระหว่างฟีนอลและผิวยางมีน้อย เป็นเพียงแรง Van der Waals ซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นในระยะสั้น (short-range interaction) ไม่ใช่แรง electrostatic ที่แรงดึงดูดมีมากและเกิดขึ้นได้ในระยะไกลกว่า (long-range interaction) ดังนั้นเมื่อเกิดการดูดซับมากขึ้น มีโอกาสที่การดูดซับจะเกิดหลายชั้น ทำให้แรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับที่ชั้นบนๆ กับพื้นผิวยังมีน้อยลงไปอีก จึง

เกิดการหลุดออกได้ง่าย และกลับมาดูดซับได้อีกครั้งด้วย ในที่นี้จะใช้ค่าความเข้มข้นต่ำสุดเป็นจุดสมดุลของการทดลอง



รูปที่ 4 สัดส่วนค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลขณะใดๆ เทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้น (C_t/C_0) เปรียบเทียบระหว่างชิ้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$

จากค่าของความเข้มข้นที่เหลือในสารละลาย จะสามารถคำนวณหาปริมาณการดูดซับในชิ้นยางที่เวลาต่างๆ กันต่อมวลของชิ้นยาง (q_t) ที่เวลาใดๆ ได้ ค่าของ q_t หาได้จาก

$$q_t = \frac{(C_o - C_t) \times V}{w} \quad (3)$$

เมื่อ q_t คือปริมาณการดูดซับในชิ้นยางที่เวลาใดๆ ต่อมวลของยาง [mg phenol/g rubber]

C_o คือความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เวลาเริ่มต้น [mg/l]

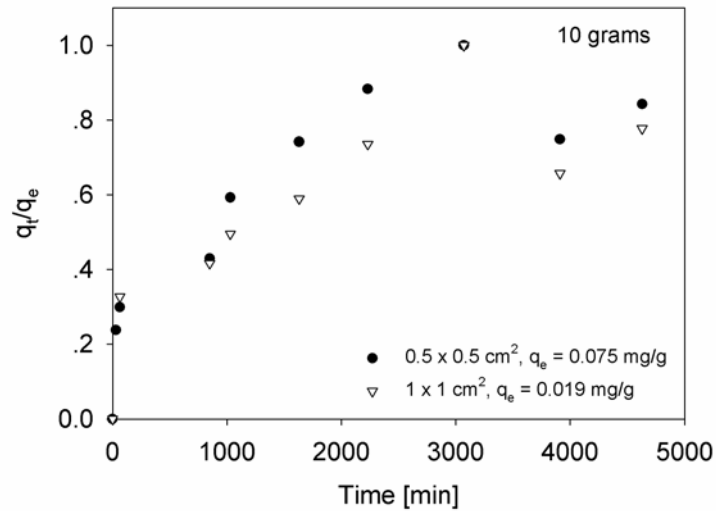
C_t คือความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่เวลาใดๆ [mg/l]

V คือปริมาตรของสารละลายที่ใช้ ในที่นี้คือ 100 ml

w คือมวลของชิ้นยางที่ใช้ในการทดลอง [g rubber]

เมื่อการดูดซับดำเนินมาถึงสภาวะสมดุล คือเมื่ออัตราการดูดซับสารฟีนอลโดยชิ้นยางเท่ากับอัตราการคายออกของสารฟีนอลจากชิ้นยาง จะทำให้ความเข้มข้นของฟีนอลในน้ำมีค่าคงที่ ไม่ลดลงตามเวลาอีกต่อไป หรืออีกนัยหนึ่งปริมาณการดูดซับในชิ้นยางจะคงที่ไม่เพิ่มขึ้นตามเวลาอีก ณ จุดสมดุล ค่า q_t ที่คำนวณได้จะเรียกว่า q_e เมื่อวาดกราฟค่าสัดส่วนของ q_t/q_e ที่เวลาใด จะแสดงได้ดังรูปที่ 5 ค่าสัดส่วนจะเริ่มจากศูนย์นั้นคือเมื่อเริ่มต้นยังไม่มีสารดูดซับเกิดโดยชิ้นยาง เมื่อเวลาผ่านไปค่าของสัดส่วนนี้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและจะคงที่ในที่สุดที่ค่า q_e ในการทดลองนี้จะใช้ค่า q_e คือค่าที่สูงที่สุด

จากรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่าค่าความชันของกราฟที่เริ่มต้น (หรืออัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับสารฟีนอลในชิ้นยางต่อค่าการดูดซับสารฟีนอลในชิ้นยางที่มากที่สุด) ของชิ้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ มีค่าสูงกว่าค่าของชิ้นยาง $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ แสดงให้เห็นว่าชิ้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ มีความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลได้เร็วกว่าชิ้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ เนื่องจากการทดลองที่ใช้ชิ้นยาง $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ กับการทดลองที่ใช้ชิ้นยาง $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ มิได้ทำในคราวเดียวกัน นั่นคือค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอล ในทั้ง

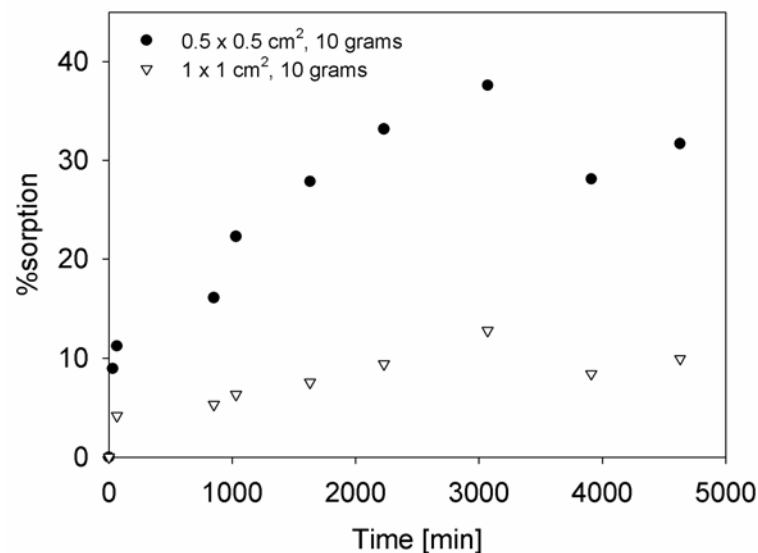


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับสารฟีนอลในชั้นยาง ณ เวลาใดๆ ต่อค่าการดูดซับสารฟีนอลในชั้นยางที่มากที่สุด ของชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$

สองคราวไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถสรุปในเรื่องความสามารถในการดูดซับของชั้นยาง (sorption capacity) ได้อย่างไรก็ตามถ้า พิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซับ ซึ่งมีนิยามดังสมการ

$$\% \text{sorption} = \frac{C_o - C_t}{C_o} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อตัวแปรทุกตัวมีนิยามดังในสมการที่ (3) เมื่อนำเปอร์เซ็นต์การดูดซับมาวาดกราฟที่เวลาต่างๆ กัน จะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 เปอร์เซนต์การดูดซับฟีนอลที่เวลาใดๆ ของชั้นยาง โดยเปรียบเทียบระหว่างชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับของชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ เข้าสู่ภาวะสมดุลเร็วกว่าชั้นยาง $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ สำหรับชั้นยางขนาดใหญ่เปอร์เซ็นต์การดูดซับจะมีค่ามากที่สุดคือ 13% ที่เวลา

ประมาณ 50 ชั่วโมง ในขณะที่ชั้นยางขนาดเล็กเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะมีค่ามากที่สุดคือ 37% ที่เวลาประมาณ 50 ชั่วโมง เป็นการยืนยันแนวโน้มของอัตราการดูดซับดังเช่นที่วิเคราะห์ผ่านมา นอกจากนี้ข้อมูลดังกล่าวยังบอกเป็นนัยว่าความสามารถในการดูดซับของชั้นยางขนาดเล็กดีกว่าชั้นยางขนาดใหญ่กว่า

5.1.1.2 การจำลองแบบจลนศาสตร์ของการดูดซับ (adsorption kinetic modeling)

แบบจำลองจลนศาสตร์มีความสำคัญในการออกแบบกระบวนการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนมวลและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี ในเรื่องของ การดูดซับสารนั้นกลไกเริ่มต้นนั้นเกิดจากแรงผลักดัน (driving force) ซึ่งคือผลต่างของความเข้มข้นที่เฟสของสารละลายและความเข้มข้นของสารเดียวกันที่บริเวณผิวของตัวดูดซับ ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลจากเฟสสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารสูงกว่าผิวของตัวดูดซับที่ไม่มีสารอยู่เลยเมื่อเริ่มต้น การเขียนสมการแสดงจลนศาสตร์ของการดูดซับก็เขียนเลียนแบบปฏิกิริยาเคมี นั่นคือมีเทอมของค่าคงที่อัตราและเทอมที่แสดงความเข้มข้นยกกำลังเลขชี้กำลังซึ่งบอกถึงอันดับ โดยอาจเป็นอันดับหนึ่งหรืออันดับสอง ดังเช่นสมการที่เสนอขึ้นเพื่อใช้ในงานวิจัยอื่นๆ (เช่น Dursun และ Kalayci, 2005) ในที่นี้จะศึกษาทั้งแบบจำลองอันดับหนึ่งและอันดับสอง

แบบจำลองอันดับหนึ่ง (pseudo-first-order model) มีสมการเป็น

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (5)$$

เมื่อ q_t และ q_e มีนิยามเช่นเดิม ค่า k_1 คือค่าคงที่อัตรา (rate constant) ของ first-order sorption [min^{-1}] และ t แทนเวลา [min]

สมการนี้แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับในตัวดูดซับต่อเวลา dq_t / dt ว่าแปรผันตรงกับปริมาณการดูดซับที่ตัวดูดซับยังสามารถทำได้จนกว่าจะถึงค่าสูงสุด ซึ่งก็ขึ้นกับพื้นที่หรือปริมาตรของตัวดูดซับที่ยังเหลืออยู่ สมการ (5) เมื่อนำมาอินทิเกรตจากเวลาเริ่มต้นถึงเวลาใดๆ จะได้เป็น

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t \quad (6)$$

เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t ก็จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็น $-k_1$ และเส้นกราฟจะตัดแกน y ที่ $\ln(q_e)$

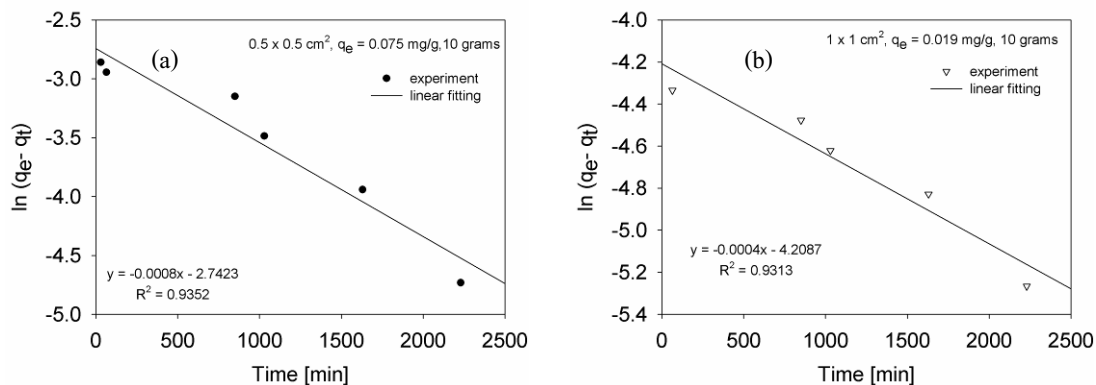
แบบจำลองอันดับสอง (pseudo-second-order model) เขียนได้คล้ายกับแบบจำลองอันดับหนึ่ง เพียงแต่อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณการดูดซับในตัวดูดซับต่อเวลา dq_t / dt แปรผันตรงกับปริมาณการดูดซับที่ตัวดูดซับยังสามารถทำได้จนกว่าจะถึงค่าสูงสุดยกกำลังสอง ดังแสดงด้วยสมการที่ (7)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (7)$$

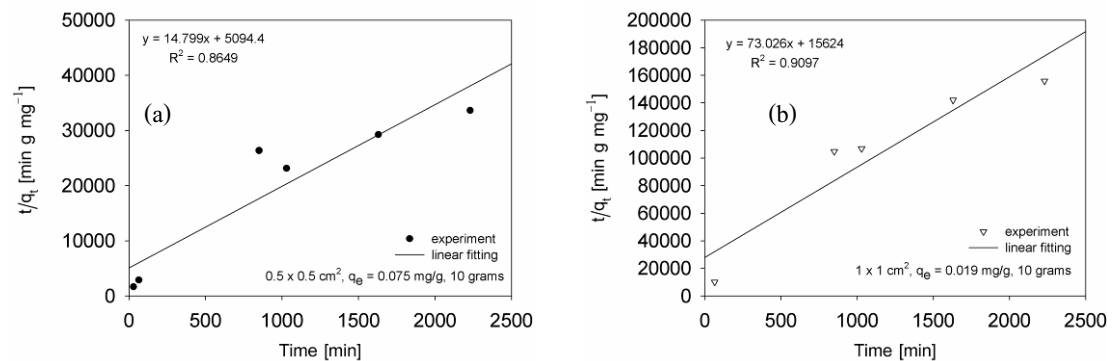
เมื่อ k_2 คือค่าคงที่อัตราของ pseudo-second-order sorption ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) และเมื่ออินทิเกรตสมการ (7) ตั้งแต่เวลาเริ่มต้นถึงเวลาใดๆ จะได้สมการคือ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (8)$$

ถ้าหากการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองอันดับสอง เมื่อวาดกราฟระหว่าง t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเป็น $1/q_e$ และเส้นกราฟจะตัดแกน y ที่ $1/k_2 q_e^2$ เมื่อนำผลการทดลองมาวาดกราฟตามสมการที่ (6) และ (8) จะได้กราฟดังรูปที่ 7 สำหรับชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และรูปที่ 8 สำหรับชั้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ ตามลำดับ จากกราฟจะสังเกตเห็นว่า kinetic modeling ของทั้งชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ ชั้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ น่าจะมีพฤติกรรมสอดคล้องกับแบบ pseudo-second-order เพราะมีค่า R^2 มากกว่าแบบ pseudo-first-order และสามารถหาค่า rate constant ของ pseudo-first-order sorption (k_1) และ rate constant ของ pseudo-second-order sorption (k_2) ดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ของค่า $\ln(q_e - q_t)$ กับ เวลา ของ pseudo-first-order ในการดูดซับสารฟีนอลในน้ำปนเปื้อน (a) ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ (b) ชั้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$



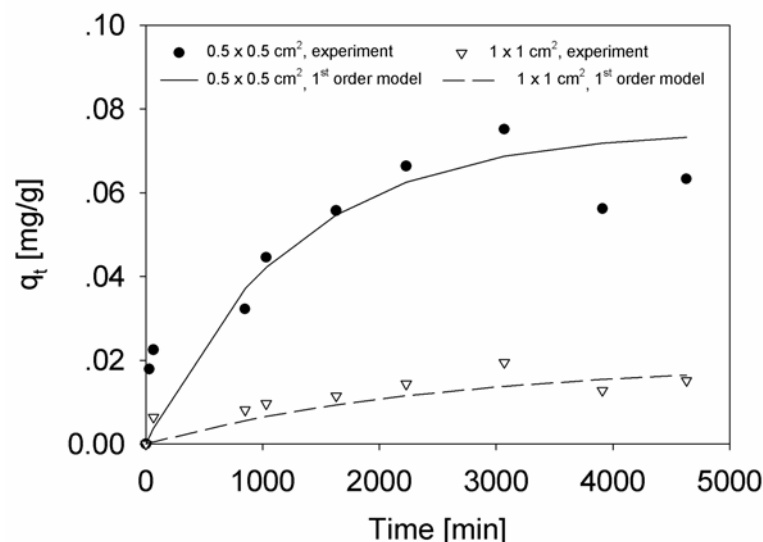
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ของค่า t/q_t กับ เวลา ของ pseudo-second-order ในการดูดซับสารฟีนอลในน้ำปนเปื้อน (a) ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ (b) ชั้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$

ตารางที่ 2 แสดงค่า rate constant ของการดูดซับอันดับหนึ่ง (k_1) และการดูดซับอันดับสอง (k_2)

ขนาดชั้นยาง	C_o [mg/l]	q_e [mg/g]	แบบจำลองอันดับหนึ่ง		แบบจำลองอันดับสอง	
			k_1 [min^{-1}]	R^2	k_2 [$\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$]	R^2
$0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$	20.0	0.075	0.0008	0.94	0.0430	0.87
$1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$	15.2	0.019	0.0004	0.93	0.3413	0.90

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าค่า R^2 ของแบบจำลองอันดับหนึ่งสำหรับยางทั้งสองขนาดมีค่ามากกว่าค่า R^2 ของแบบจำลองอันดับสอง ดังนั้นแบบจำลองอันดับหนึ่งจึงน่าจะอธิบายการทดลองนี้ได้ถูกต้องมากกว่า มีผู้อธิบายเกี่ยวกับความเหมาะสมของแบบจำลองไว้ว่า หากการทดลองอธิบายได้ด้วยแบบจำลองอันดับหนึ่ง อาจจะเป็นเพราะ active site หรือพื้นที่ของตัวดูดซับมีอยู่น้อยเกินไปเมื่อพิจารณาความเข้มข้นที่ทดลอง (Azizian, 2004) เมื่อพิจารณาที่ค่าของ k_1 จากแบบจำลองอันดับหนึ่งพบว่า ชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ มีค่า rate constant สูงกว่าค่าของชี้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ ค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ดูดซับฟีนอลที่ละลายอยู่ในน้ำได้เร็วกว่าชี้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ เมื่อใช้ปริมาณยางเท่ากัน เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่สัมผัสกับสารละลายมีค่ามากกว่าซึ่งเมื่อคำนวณตามขนาดของชี้นยาง ($0.5 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm} \times 0.2 \text{ cm}$) แล้วจะมีค่าเป็น 1.28 เท่าของพื้นที่ทั้งหมดของชี้นยางขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ แต่สัดส่วนของค่าคงที่อัตราในแบบจำลองอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สองมีค่าประมาณ 2.0

เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับสารฟีนอลในชี้นยาง ณ เวลาใดๆ ของชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ ที่คำนวณจากแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับหนึ่งมาวาดกราฟเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณจากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าผลจากการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองที่ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับสารฟีนอลในชี้นยาง ณ เวลาใดๆ ของชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ เปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองและจากสมการแบบจำลอง

5.1.2 การศึกษาการดูดซับแบบสมดุล (Equilibrium Adsorption) ที่ 30°C

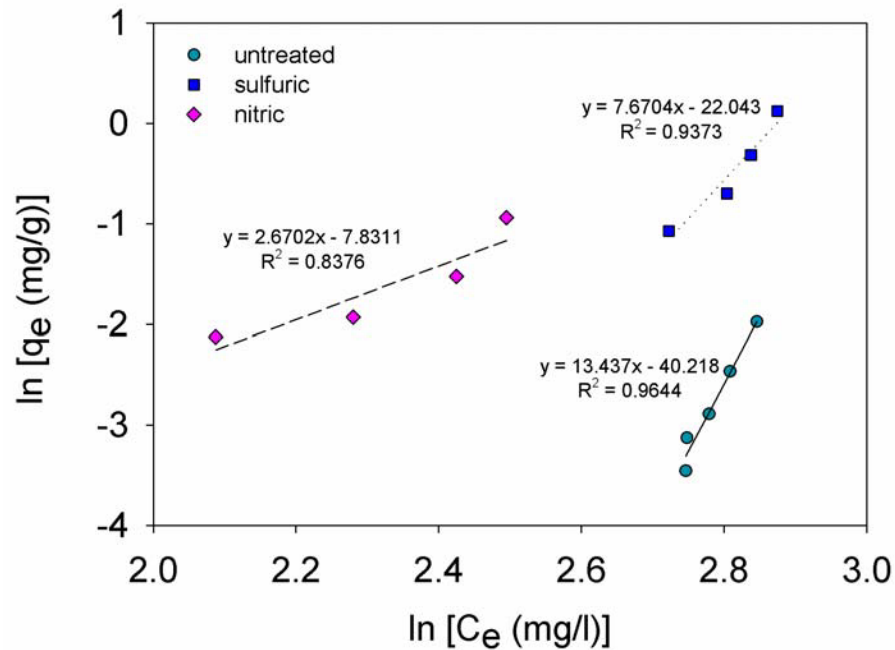
เนื่องจากผลการทดลองส่วน 5.1.1 ทำให้ทราบว่าชี้นยางขนาดเล็กกว่ามีประสิทธิภาพในการดูดซับเร็วกว่า ในส่วนนี้จึงศึกษาผลของการปรับสภาพผิวชี้นยางที่มีต่อปริมาณการดูดซับฟีนอลที่ละลายในน้ำโดยทดสอบกับชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ เท่านั้น โดยเปรียบเทียบผลของยางชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้

- (1) ชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ไม่ได้ผ่านการ treat ด้วยกรดและความร้อน
- (2) ชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ผ่านการ treat ด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อน
- (3) ชี้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ผ่านการ treat ด้วยกรดไนตริกและความร้อน

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การดูดซับของสารฟีนอลในชี้นยางนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย

Freundlich isotherm ดังสมการที่ (1) และ (2) ในหัวข้อ 3.1

เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e)$ และ $\ln(C_e)$ จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชันคือ $1/n$ และมีจุดตัดแกน y เป็น $\ln(K_F)$ ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(q_e)$ กับ $\ln(C_e)$ ของชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดกับความร้อน ชั้นยางที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกกับความร้อน และชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อน

จากรูปที่ 10 จะสามารถคำนวณหา Freundlich Parameter คือค่า K_F และ n ของยางแต่ละชนิดซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 3

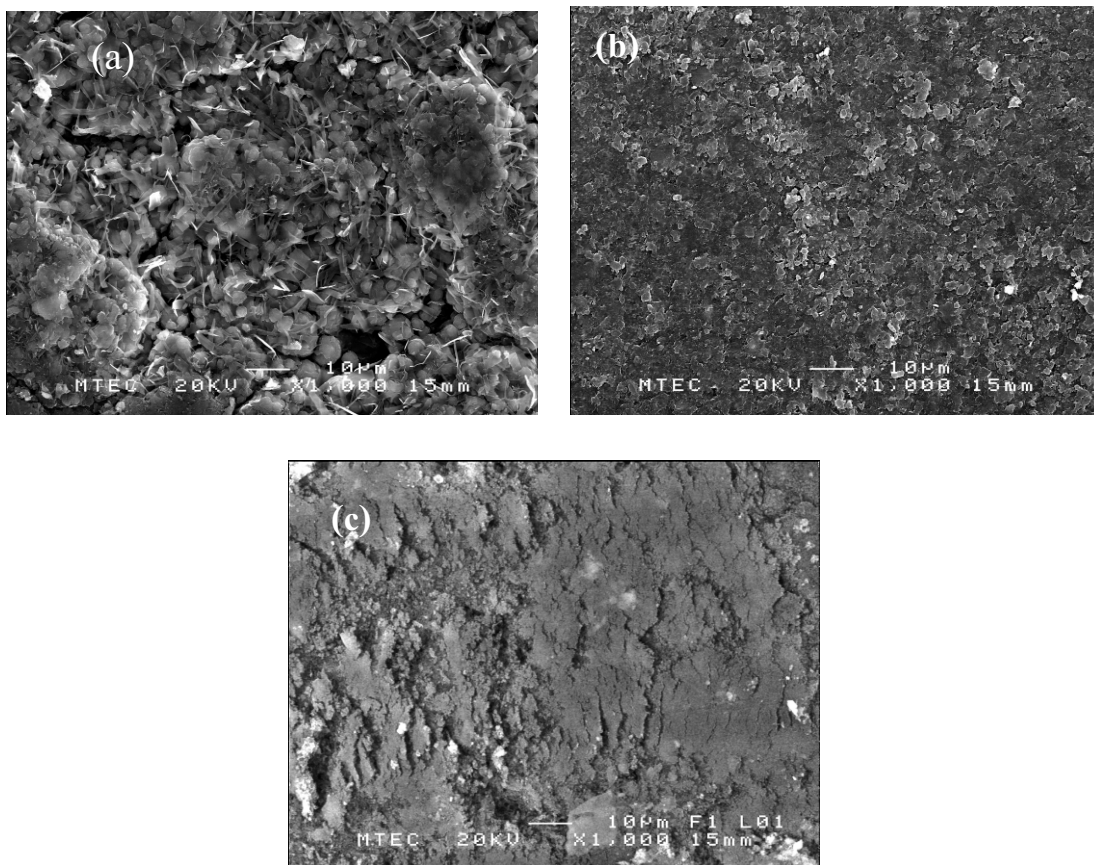
ตารางที่ 3 แสดงค่า Freundlich parameters K_F กับค่า n ของยางแต่ละชนิด

ชนิดของชั้นยาง	K_F [(mg phenol / g rubber)(mg/l) ^{1/n}]	n	R^2
ยางไม่ได้ปรับสภาพผิว	3.42E-18	0.074	0.96
ยางปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อน	2.67E-10	0.130	0.94
ยางปรับสภาพด้วยกรดไนตริกและความร้อน	3.97E-04	0.375	0.84

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่า n ที่ได้นั้นมีค่าไม่เข้าใกล้ 1 นั้นแสดงว่าการทดสอบการดูดซับนี้ไม่สามารถอธิบายได้ด้วย linear isotherm ดังที่เคยรายงานในงานวิจัยของสวลี เจริญการและคณะ (2547) ซึ่งเป็นเพราะทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเมื่อเริ่มต้นแตกต่างกัน ในงานวิจัยนั้นใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นในช่วง 100-1000 mg/l ในขณะที่ในงานวิจัยนี้ใช้เพียง 20 mg/l ค่า n ทั้งสามระบบต่างน้อยกว่า

1.0 ซึ่งหมายถึงการดูดซับเป็นที่น่าพอใจ (favorable adsorption) หมายถึงเมื่อตัวดูดซับที่อีกสมดุลงหนึ่งมีปริมาณการดูดซับมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างตัวดูดซับกับพื้นผิวในสมดุลงนั้นมีมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่า K_F ของการดูดซับในแต่ละชนิดชั้นยาง พบว่าค่า K_F ของชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อนและชั้นยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวใดๆ เลยตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนทำให้ชั้นยางสามารถดูดซับสารฟีนอลได้ดีที่สุด และชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อนสามารถดูดซับฟีนอลได้ดีกว่าชั้นยางที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว เพื่อพิจารณาผลของการใช้กรดและความร้อนต่อผิวของยางที่เปลี่ยนไปจึงนำชั้นยางไปถ่ายภาพขยายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงภาพขยายของผิวชั้นยางจากเครื่อง SEM (a) ไม่ได้ปรับสภาพผิว (b) ปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อน (c) ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อน

จากรูปที่ 11 จะเห็นว่าผิวของชั้นยางที่มีได้ปรับสภาพใดๆ มีลักษณะเหมือนเส้นใยหรือแผ่นยางเล็กๆ มากมาย ฟีนอลไม่สามารถดูดซับบนพื้นผิวอย่างไ้ได้ง่ายนัก หากฟีนอลเกาะติดที่เส้นใยหรือแผ่นยางเล็กๆ เหล่านี้ก็มีโอกาสหลุดออก (desorption) ไปได้ง่าย แต่เมื่อนำไปปรับสภาพผิวโดยใช้กรดซัลฟิวริกและความร้อนที่อุณหภูมิอากาศและ 150°C พบว่าเศษเส้นใยถูกกรดกัดหลุดออกไป และกัดทะลุผิวชั้นยางเกิดเป็นรูพรุนขึ้น ความเป็นรูพรุนยังมีมากขึ้นเมื่อใช้กรดไนตริกและความร้อน ดังที่ทราบกันว่ากรดไนตริกเป็น oxidizing agent ที่ดีมากจึงมีประสิทธิภาพในการกัดผิวอย่างไ้ดีที่สุด พื้นผิวสัมผัสระหว่างยางกับสารละลายจะยิ่งมากขึ้นเมื่อ

ความเป็นรูปพรุนมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลดียิ่งขึ้น มีรายงานวิจัยที่ใช้กรดไนตริกในการออกซิไดซ์ผิวของถ่านกัมมันต์พบว่า ช่วยเพิ่มปริมาณการดูดซับมากกว่าชนิดที่ไม่ได้ถูกออกซิไดซ์ เนื่องจากผิวของถ่านกัมมันต์เกิดหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนร่วมด้วย เช่น คาร์บอกซิลิก และคาร์บอนิล ซึ่งเป็นหมู่ที่ให้อิเล็กตรอน (electron-donating group) ในขณะที่ phenol ring จะเป็นส่วนที่ดึงอิเล็กตรอนมา (electron-withdrawing) ดังนั้นจึงเกิดแรงดึงดูดของฟีนอลบนพื้นผิวมากขึ้น (Villacanas และคณะ, 2006)

นอกจากพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นของชั้นยางที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดแล้ว ความมีขั้วของผิวดูดซับเมื่อสัมผัสกับสารละลายฟีนอลก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรคำนึงถึง การศึกษาความมีขั้วของผิวดูดซับทำโดยพิจารณาค่า pH ที่ PZC (point of zero charge) ซึ่งทำการทดลองตามวิธีของ Villacanas และคณะ (2006) เราพบว่า pH ที่ PZC ของยางที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ยางที่ปรับสภาพผิวโดยกรดซัลฟิวริกและความร้อน และยางที่ปรับสภาพผิวโดยกรดไนตริกและความร้อน มีค่าเท่ากับ 7, 6.9 และ 4.7 ตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ค่า pH ของสารละลายฟีนอล 20 mg/l มีค่าเท่ากับ 6.5 ซึ่งน้อยกว่าค่า Pka ของฟีนอลที่มีค่าเท่ากับ 9.95 ดังนั้นฟีนอลจะอยู่ในรูปของโมเลกุล ไม่แตกตัวเป็นไอออน ส่วนค่า pH ที่ PZC ของยางที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวและยางที่ปรับสภาพผิวโดยกรดซัลฟิวริกมีค่าใกล้เคียง pH ของสารละลายดังนั้นผิวของชั้นยางจะไม่มีประจุ ในขณะที่ pH ที่ PZC ของยางที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกมีค่าต่ำกว่า pH ของสารละลายดังนั้นผิวของชั้นยางนี้เมื่ออยู่ในสารละลายจะเกิดประจุลบขึ้น แต่เนื่องจากโมเลกุลของฟีนอลไม่แตกเป็นประจุ ดังนั้นแรงจากไฟฟ้าสถิตจึงไม่เกี่ยวข้อง การดูดซับจึงเกิดจากแรง van der Waals (dispersive force) การดูดซับของฟีนอลบนผิวที่ออกซิไดซ์โดยไนตริกจึงอาจเกิดจากเหตุผลดังที่ Villacanas และคณะ (2006) อธิบายไว้ในกรณีของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการดูดซับฟีนอลของชั้นยางกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ

ตัวดูดซับ	ชั้นยาง	ถ่านกัมมันต์	XAD4	ยางรถใช้แล้ว
วัสดุ	ยางธรรมชาติ วัลคาไนซ์ ปรับสภาพผิวโดย กรดไนตริกและความร้อน	ถ่านกัมมันต์เชิง พาณิชย์	โพลีสไตรีน ไม่มีขั้ว	ยางธรรมชาติและ ยาง SBR วัลคา ไนซ์
Reference	รายงานนี้	Villacanas และคณะ (2006)	Ming และคณะ (2006)	Smith และคณะ (2001)
ขนาด [m]	0.5E-2 x 0.5E-2 x 0.2E-2	5.00E-05	5.00E-04	2.00E-03
q_e [mg/g]	0.38	4.7	5.37	0.0448
C_e [mg/l]	12	23	11.8	18
K_F	3.97E-04	1.42	1.19	-
ปริมาตรต่ออนุภาค [m ³ /อนุภาค]	5.00E-08	6.55E-14	6.55E-11	4.19E-09
พื้นที่ผิวต่ออนุภาค [m ² /อนุภาค]	9.00E-05	7.86E-09	7.86E-07	1.26E-05
พื้นที่ผิวต่อมวล [m ² /g]	1.80E-03	1.20E-01	1.20E-02	3.00E-03
ปริมาณดูดซับต่อ พื้นที่ผิว [mg/m ²]	211.11	39.17	447.50	14.93

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบการดูดซับฟีนอลของซันยางกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ จะเห็นว่าค่า K_F และ q_e ของซันยางน้อยกว่าถ่านกัมมันต์และ XAD4 มากแต่ดีกว่ายางรถยนต์ใช้แล้ว ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของยางกับฟีนอลมีน้อยกว่าถ่านกัมมันต์และ XAD4 ซึ่งมีรูพรุนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเพียงพื้นผิวรอบนอก ไม่นับพื้นที่ผิวของรูพรุน เปรียบเทียบค่าปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ของตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยสมมติว่าสารมีความหนาแน่นเท่ากันคือ 1 g/cm^3 และสมมติว่าอนุภาคของถ่านกัมมันต์ XAD4 และยางรถใช้แล้วเป็นทรงกลม ได้ผลดังแสดงในตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าดังกล่าวของซันยางไม่ได้แย่นัก แสดงให้เห็นถึงผลของพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับฟีนอลว่ามีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ

5.2 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายฟีนอลในซันยางแบบ Dynamic Adsorption

เนื่องจากซันยางที่ปรับสภาพผิวโดยกรดไนตริกและความร้อนมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลดีที่สุด ในการทดลองนี้จึงใช้ยางชนิดนี้ขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ เปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ทดลองโดยใช้สารละลายไพลผ่านหอดูดซับขนาดเล็ก การศึกษาแบ่งเป็นการดูดซับในหอดูดซับหอดูเดียว และการดูดซับผ่านหอดูดซับ 2 หอดูต่อเนื่องกัน

5.2.1 การดูดซับในหอดูดซับเดียว (Single-Effect Mini-Column)

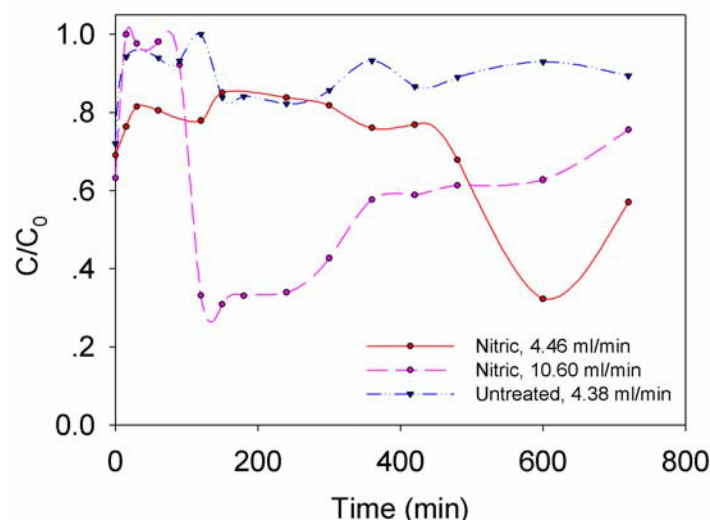
ทำการทดลอง 3 แบบได้แก่

(1) ทดสอบโดยใช้ซันยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว โดยปรับอัตราการไหลของสารละลายประมาณ 4.38 ml/min สารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 10 นาที 20 วินาที และมีอัตราส่วนของช่องว่าง (void fraction) ประมาณ 42%

(2) ทดสอบโดยใช้ซันยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อน โดยปรับอัตราการไหลของสารละลายประมาณ 4.46 ml/min สารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 10 นาที 47 วินาที และมีอัตราส่วนของช่องว่างประมาณ 41%

(3) ทดสอบโดยใช้ซันยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อน โดยปรับอัตราการไหลของสารละลายประมาณ 10.60 ml/min สารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 5 นาที 10 วินาที และมีอัตราส่วนของช่องว่างประมาณ 40%

ผลการทดลอง (C/C_0) ที่เวลาต่างๆ กัน เมื่อใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 20 ppm แสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่ออกจากหอดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล ณ เวลาต่าง ๆ ในระบบหอดูดซับหอดูเดียว

ในรูปที่ 12 พบว่าความเข้มข้นของสารฟีนอลที่ออกจากหอดูดซับไม่เป็นไปตามการทดลองการดูดซับโดยใช้หอดูดซับทั่วไปที่บรรจุด้วยตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจนแน่น (packed column) กล่าวคือ ความเข้มข้นที่ออกจากหอดูดซับจะเริ่มต้นที่ศูนย์ที่เวลาเริ่มต้นเพราะตัวดูดซับควรจะดูดซับสารได้ทั้งหมด และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นที่ทางออกจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามระดับความสูงของหอดูดซับทั้งความเข้มข้นที่ทางออกมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นเมื่อตัวดูดซับทั้งหอดูดซับไปด้วยสารทั้งหมดแล้ว แต่ในการทดลองนี้พบว่า ที่เวลาเริ่มต้นขึ้นยางดูดซับสารได้ปริมาณจำกัดอาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของฟีนอลกับยางนั้นนานมาก (ในการทดลองการดูดซับแบบ batch ใช้เวลาถึง 3 วันเมื่อใช้การแกว่งที่ 160 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นการช่วยให้ถึงสมดุลเร็วขึ้นด้วย) เมื่อเวลาผ่านไป ขึ้นยางดูดซับได้น้อยลงความเข้มข้นเริ่มสูงขึ้น และเข้าใกล้ความเข้มข้นเริ่มต้นอย่างรวดเร็วภายในหนึ่งชั่วโมงแรก และพบว่าทุกการทดลองความเข้มข้นมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นอีกเมื่อเวลาเปลี่ยนไป ทั้งนี้ น่าจะเกิดจากการบรรจุขึ้นยางในหอดูดซับนั้นไม่สามารถบรรจุให้กระจายได้เท่าๆ กันทั้งหอดูดซับ กล่าวคือเมื่อพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดใดๆ ของหอดูดซับจะพบยางปริมาณไม่เท่ากัน และการบรรจุขึ้นยางมีโอกาสทำให้ผิวยางติดกันไม่เหมือนตัวดูดซับอื่นที่เป็นผงๆ ขนาดเล็กจะสามารถบรรจุในหอดูดซับได้กระจายใกล้เคียงกันหมด และที่สำคัญพบว่าในการทดลองมีฟองอากาศเกิดขึ้นในขณะที่สารละลายไหลผ่านหอดูดซับ ทั้งการที่ขึ้นยางติดกันและฟองอากาศที่เกิดขึ้นล้วนส่งผลถึงการลดพื้นที่การถ่ายเทมวลสารจึงทำให้หอดูดซับอิ่มตัวเร็วเกินไป เมื่อเวลาต่อมายางนั้นอาจมีโอกาสดูดซับกับสารละลายก็จะสามารถดูดซับได้อีก ทำให้ความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นในรูปที่ 12

กราฟของขึ้นยางที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวมีแนวโน้มที่เข้าใกล้การอิ่มตัวทั่วทั้งหอดูดซับเร็วกว่ายางที่ปรับสภาพผิว และเมื่อเปรียบเทียบยางที่ปรับสภาพผิวเมื่อใช้อัตราเร็วของสารละลายต่างกัน จะพบว่าภายในหนึ่งชั่วโมงแรกที่อัตราเร็วของสารละลายสูงกว่าจะทำให้ยางจะอิ่มตัวเร็วกว่าเป็นไปตามการทดลองการดูดซับทั่วไป แต่ภายหลังจากนั้นความเร็วที่สูงกว่าน่าจะทำให้สารละลายเกิดการกระจายตัวไปสัมผัสกับขึ้นยางและไล่ฟอง อากาศได้ดีกว่าที่อัตราเร็วต่ำกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นลดลงอย่างมากและค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ผิดกับที่อัตราที่ช้ากว่าเกิดการขึ้นลงของความเข้มข้นในระยะเวลา 400 นาทีแรกอย่างมาก จนลดลงอีกที่เวลา 600 นาทีและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง อย่างไรก็ตามเวลาที่ทำการทดลองทั้ง 720 นาทีน่าจะน้อยเกินไปที่จะทำให้หอดูดซับอิ่มตัวทั้งหอดูดซับ แต่ก็พอสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของแต่ละการทดลองได้

ในการทดลองนี้ หากสมมติว่าอัตราการไหลคงที่ตลอดการทดลองคือที่อัตราการไหลเฉลี่ยดังประมาณไว้แล้ว จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับ (% sorption) ได้จากสัดส่วนของปริมาณของสารที่ถูกดูดซับโดยขึ้นยางสะสมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองคือ 12 ชั่วโมง (720 นาที) ต่อปริมาณของสารทั้งหมด ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$\% \text{sorption} = \left(\frac{\int_0^{t_{\text{final}}} \left(1 - \frac{C_t}{C_o} \right) dt}{\int_0^{t_{\text{final}}} dt} \right) \times 100 \quad (9)$$

ค่าอินทิกรัลสามารถหาได้จากการอินทิเกรตเชิงตัวเลข (numerical integration) ซึ่งทำโดยการหาพื้นที่ใต้กราฟในรูปที่ 12 จึงสามารถเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับของการทดลองทั้งสามได้ดังสรุปในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับในการทดลองหอดูดซับห่อเดียว

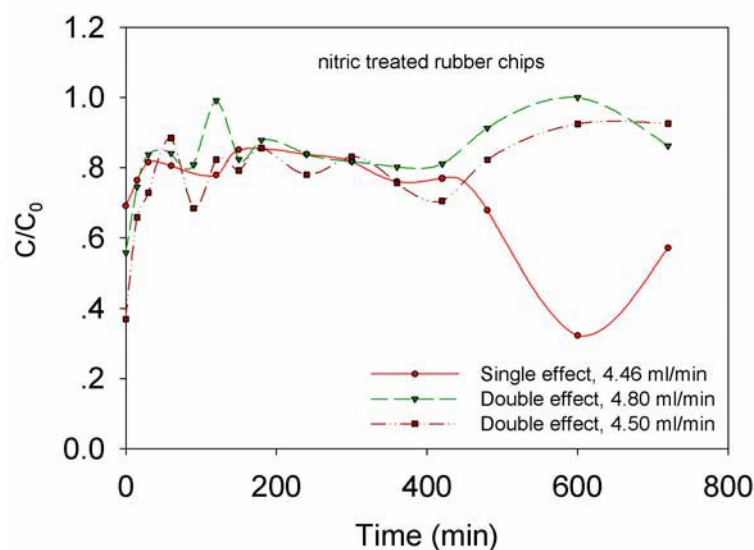
การทดลอง		เปอร์เซ็นต์
ชนิดชั้นยาง	อัตราการไหล (ml/min)	การดูดซับ
ไม่ปรับสภาพผิว	4.38	12.58
ปรับสภาพโดยไนตริกและความร้อน	4.46	19.16
ปรับสภาพโดยไนตริกและความร้อน	10.60	39.50

จากตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการไหลใกล้เคียงกันของยางที่ปรับสภาพผิวและมิได้ปรับสภาพผิวโดยใช้กรดไนตริกและความร้อน พบว่ายางที่ปรับสภาพผิวแล้วให้ เปอร์เซ็นต์การดูดซับเป็นสองเท่าของยางที่มิได้ปรับสภาพผิว และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ยางที่ปรับสภาพผิวแล้วที่อัตราการไหลของสารละลายฟีนอลต่างกันพบว่า สำหรับการทดลอง 12 ชั่วโมงนั้น ที่อัตราเร็วสูงกว่าทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับดีกว่าที่อัตราเร็วต่ำกว่า ทั้งนี้จะเป็นเพราะอัตราเร็วที่สูงกว่า ทำให้การไหลปั่นป่วนขึ้นเกิดการแทรกผ่านของสารละลายไปสัมผัสพื้นผิวดูดซับของชั้นยางต่าง ๆ ได้ทั่วถึงขึ้น และทำให้ไล่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นให้ออกไปจากระบบเร็วขึ้นอีกด้วย เมื่อสังเกตจากกราฟมีความเป็นไปได้ว่า หากทำการทดลองนานขึ้นกว่า 12 ชั่วโมงการดูดซับที่ใช้อัตราการไหลสูงกว่าอาจจะได้ค่าการดูดซับต่ำกว่าที่อัตราการไหลน้อยกว่า ในการทดลองนี้พบว่าประสิทธิภาพของ peristaltic pump แยกไม่สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ตามต้องการเมื่อทำงานเป็นเวลานาน ซึ่งมีผลต่อการควบคุมอัตราการไหล จึงกำหนดการทดลองไว้เพียง 12 ชั่วโมง

โดยทั่วไปการเพิ่มอัตราเร็วของสารละลายจะทำให้กราฟแสดงการอิ่มตัวของสารเย็บไปทางซ้ายมือมากขึ้น นั่นคือเวลาที่หอดูดซับใช้ในการดูดซับสารได้ทั้งหมดน้อยลงก่อนที่จะตรวจพบความเข้มข้นของสารที่สายการไหลออกจากหอ ดังนั้นเมื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะพบว่า ที่อัตราการไหลเร็วกว่าจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้อยกว่า (Kumar และ Bandyopadhyay, 2006) ตามทฤษฎีแล้วควรจะใช้เวลาสารละลายสัมผัสกับตัวดูดซับมากๆ โดยการลดอัตราการไหล ซึ่งทำให้ได้เปอร์เซ็นต์การดูดซับดีขึ้นดังได้อธิบายแล้ว

5.2.2 การดูดซับผ่านหอดูดซับสองห่อต่ออนุกรมกัน (Double-Effect Mini-Column)

การทดลองนี้ใช้ชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อน ได้ทำการทดลอง 2 ครั้ง ในครั้งแรกใช้อัตราเร็วในการไหลของสารละลาย 4.50 ml/min สำหรับหอดูดซับแรกสารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 9 นาที 45 วินาที ส่วนหอดูดซับที่สองสารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 9 นาที 40 วินาที มีอัตราส่วนของช่องว่างในหอดูดซับแรกประมาณ 34% และในหอดูดซับที่สองประมาณ 33% การทดลองในครั้งที่สองทดสอบโดยใช้ชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนและใช้อัตราเร็วในการไหลของสารละลายในการทดสอบ 4.8 ml/min สำหรับหอดูดซับแรกสารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 8 นาที 54 วินาที ส่วนหอดูดซับที่สองสารละลายใช้เวลาในการไหลจากทางเข้าหอดูดซับจนถึงทางออกเป็นเวลา 9 นาที มีอัตราส่วนของช่องว่างประมาณ 39% ในหอดูดซับทั้งสองห่อ เมื่อวาดกราฟระหว่างค่าความเข้มข้นของสารฟีนอลในสารละลายต่อความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลเมื่อเริ่มต้นพบว่าได้ผลดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนอลที่ออกจากหอดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายฟีนอล ณ เวลาใดๆ ในระบบหอดูดซับสองหอเปรียบเทียบกับหอดูดซับเดียว

โดยทั่วไปแล้ว การเพิ่มหอดูดซับน่าจะให้ผลเหมือนกับการเพิ่มความสูงของการบรรจุตัวดูดซับในหอดูดซับ ซึ่งจะทำให้กราฟอิมิตัวขยับไปทางขวามือเมื่อความสูงของหอเพิ่มขึ้น หอดูดซับทั้งหอดูจะอิมิตัวข้างเมื่อวิเคราะห์ดูปริมาณการดูดซับจะพบว่า เมื่อความสูงของหอเพิ่มขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้น แต่จากการทดลองนี้ไม่ได้ผลตามแนวโน้มเช่นนั้น ดังคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมื่อใช้หอดูดซับสองหอเปรียบเทียบกับหอดูดซับหอดูดซับเดียว

การทดลอง		เปอร์เซ็นต์
จำนวนหอดูดซับ	อัตราการไหล (ml/min)	การดูดซับ
หอดูดซับหอดูดซับเดียว	4.46	19.16
หอดูดซับสองหอ	4.50	12.84
หอดูดซับสองหอ	4.80	18.37

จากตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับไม่ได้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้จำนวนหอเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งหอ แต่กลับมีค่าน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจเป็นความผิดพลาดจากการตรวจวัดหรือการควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ เนื่องจากจลนศาสตร์ของการดูดซับฟีนอลในชั้นยางนั้นช้ามาก การเพิ่มหอดูดซับอีกหนึ่งหอ (ซึ่งเหมือนกับการเพิ่มเวลาที่ไหลในหออีกประมาณ 30 นาที) ยังไม่เพียงพอที่จะมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับ

อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลจากน้ำ โดยการดูดซับแบบ batch adsorption และใช้คอลัมน์ขนาดเล็ก พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของฟีนอลประมาณ 20 mg/l และใช้ยางที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนนั้น การดูดซับแบบ batch adsorption ใช้สารละลายปริมาณ 100 ml ใช้เวลาในการแกว่งตัวดูดซับบน orbital shaker ที่ความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 3 วันเพื่อรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลอันเป็นสภาวะที่ชั้นยางดูดซับได้สูงสุด พบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับมีค่าประมาณ 40% ในขณะที่

การทดลองโดยใช้หลอดดูดซับที่อัตราการไหล 10 ml/min สามารถดูดซับฟีนอลได้ประมาณ 39.5% ซึ่งใกล้เคียงกัน แต่ใช้เวลาทำการทดลองเพียง 12 ชั่วโมงเท่านั้น และปริมาณของสารละลายฟีนอลที่ได้ถูกบำบัดประมาณ 7200 ml. หรือ 7.2 ลิตร การดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับจึงจะเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำปนเปื้อนปริมาณมากๆ แต่อาจต้องพิจารณาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ใช้ในการบำบัดด้วย

5.3 การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของการใช้ชั้นยางในการดูดซับฟีนอล

ในการปรับสภาพผิวยางนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากค่าสารเคมี ซึ่งในที่นี้ใช้กรดซัลฟิวริกและกรดไนตริก ส่วนที่สองคือค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้ความร้อน โดยในที่นี้ใช้ตู้อบที่ใช้กำลังไฟฟ้า 1600 W

5.3.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการปรับสภาพผิวโดยใช้สารเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้กรดสองชนิดซึ่งได้แก่ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้กรดไนตริกเข้มข้น 65 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการเตรียมสารละลายกรดให้มีความเข้มข้น 2.87 mol/l ราคาของกรดทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงราคากรดที่นำมาปรับสภาพผิวต่อกิโลกรัมยาง

ชนิดของกรด	ราคาขาย (บาทต่อ ml)	ปริมาณที่ใช้ (ml/kg ยาง)	ค่าใช้จ่าย (บาท/ kg ยาง)
กรดซัลฟิวริก 96% by wt	0.156	4000	624
กรดไนตริก 65% by wt	0.260	5000	1300

5.3.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพผิวยางโดยใช้ความร้อน

ค่าไฟฟ้าคำนวณได้จากการคำนวณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งได้จากผลคูณของกำลังไฟฟ้า (kW) กับจำนวนชั่วโมงที่ใช้ (h) แล้วคูณด้วยค่าไฟฟ้า 4 บาทต่อหนึ่งหน่วยไฟฟ้า ตารางที่ 8 รวบรวมค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าจากกิจกรรมที่ต้องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

ตารางที่ 8 แสดงค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าต่อกิโลกรัมยาง

กิจกรรม	กำลังไฟฟ้า [kW]	เวลาที่ใช้ [h]	ค่าใช้จ่าย (บาท/kg ยาง)
การบดยาง	11	0.250	11.0
การขึ้นรูป	12	0.083	4.00
การอบยางที่ 150 °C	1.6	2.000	12.8
รวมค่าไฟฟ้า			27.8

5.3.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดสำหรับการใช้ยางบำบัดน้ำปนเปื้อนฟีนอล

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งสองส่วน สามารถสรุปค่าใช้จ่ายในผลิตชั้นยางเพื่อใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9 สำหรับยางและสารเคมีที่ใช้ในการบดยางจะพิจารณาเป็นราคาเฉลี่ยในที่นี้ว่าประมาณ 70 บาท/kg ยางบด (คิดราคายางประมาณ 75 บาท/kg)

ตารางที่ 9 สรุปค่าใช้จ่ายในการผลิตชั้นยาง

ค่าใช้จ่าย (บาท/ kg ยางบด)	ยางปรับสภาพผิวด้วย กรดซัลฟิวริก	ยางปรับสภาพผิวด้วย กรดไนตริก	ยางไม่ปรับ สภาพผิว
ราคายางและสารเคมี	70	70	70
ค่าใช้จ่ายในการใช้กรด	624	1300	-
ค่าไฟฟ้าโดยรวม	27.8	27.8	27.8
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด	721.8	1397.8	97.8

สำหรับการคำนวณค่าใช้จ่ายในการใช้ชั้นยางบำบัดน้ำปนเปื้อนฟีนอล จะเอาข้อมูลการทดลองที่ใช้ปริมาณยางมากที่สุดคือ 14 g โดยดูดซับฟีนอลที่มีความเข้มข้นประมาณ 20 mg/l ค่าของ q_e ได้แสดงไว้ในตารางที่ 10 ซึ่งเป็นค่าแสดงความสามารถในการบำบัดฟีนอลในน้ำโดยใช้ชั้นยางโดยใช้ข้อมูลที่สภาวะสมดุล โดยบอกถึงปริมาณการดูดซับฟีนอล (mg) เมื่อใช้ยาง 1 kg

ตารางที่ 10 แสดงค่าใช้จ่ายในการบำบัดฟีนอลโดยใช้ชั้นยางเมื่อใช้ batch equilibrium

ชนิดของชั้นยาง	q_e (mg ฟีนอล/kg ยาง)	ค่าใช้จ่าย (บาท/ kg ยาง)	ค่าใช้จ่าย (บาท/mg ฟีนอล)
ยางไม่ปรับสภาพผิว	31.5	97.8	3.11
ยางปรับสภาพผิวโดยใช้ กรดซัลฟิวริกและความร้อน	34.1	721.8	21.17
ยางปรับสภาพผิวโดยใช้ กรดไนตริกและความร้อน	52.4	1397.8	26.68

ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 10 เมื่อคิดค่าใช้จ่ายในการบำบัดต่อมิลลิกรัมของฟีนอลในน้ำโดยใช้การแกว่งชั้นยาง พบว่ายางที่ปรับสภาพด้วยกรดไนตริกมีค่าใช้จ่ายมากที่สุดรองลงมาคือการใช้กรดซัลฟิวริกและไม่ปรับสภาพใดๆ ตามลำดับ การปรับสภาพผิวทำให้มีค่าใช้จ่ายเกือบ 10 เท่าของค่าใช้จ่ายเดิมเพราะค่าใช้จ่ายที่มีมากนั้นมาจากราคาของกรดที่ใช้ซึ่งมีราคาแพง อย่างไรก็ตามหากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับจะพบว่า เมื่อใช้กรดซัลฟิวริกปรับสภาพผิว จะต้องเสียค่าใช้จ่าย $(706.8-70)/(34.1-31.5) = 245$ บาทต่อการดูดซับฟีนอลได้เพิ่มขึ้น 1 mg และเมื่อใช้กรดไนตริกปรับสภาพผิว จะต้องเสียค่าใช้จ่าย $(1382.8-70)/(52.4-31.5) = 62.81$ บาทต่อการดูดซับฟีนอลได้เพิ่มขึ้น 1 mg เมื่อพิจารณาเช่นนี้ จะเห็นได้ว่าการใช้กรดไนตริกเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับฟีนอลของชั้นยาง

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการกำจัดฟีนอลที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดสอบการดูดซับสารปนเปื้อนฟีนอลของชั้นยางในระบบ batch adsorption และการศึกษาการดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับ (Dynamic adsorption)

การศึกษาแบบ batch adsorption แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนย่อยคือ การศึกษาจลนศาสตร์ของการดูดซับและการศึกษาสมดุลของการดูดซับ ในการศึกษาจลนศาสตร์นั้น ได้ศึกษาการถ่ายโอนมวลของฟีนอลจากเฟสสารละลายสู่เฟสยางที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลโดยใช้ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และ $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$ พบว่าชั้นยางขนาดเล็กมีอัตราการดูดซับฟีนอลเร็วกว่าชั้นยางขนาดใหญ่ และเมื่อใช้แบบจำลองจลนศาสตร์ในการวิเคราะห์ห้อัตราการดูดซับฟีนอล พบว่าระบบการดูดซับนี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองจลนศาสตร์อันดับสองและสามารถคำนวณหาค่าคงที่อัตราของการดูดซับของยางชั้นเล็กได้ ซึ่งมีค่ามากกว่าของยางชั้นใหญ่กว่า ในการศึกษาส่วนต่อไปคือสมดุลของการดูดซับจึงใช้ชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ และใช้ในทุกการทดลองต่อจากนี้ ต่อมาได้ศึกษาการปรับสภาพผิวยางด้วยกรดและใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150°C ที่ความดัน 800 mbar โดยใช้ Freundlich Isotherm ซึ่งเป็นไอโซเทอมที่นิยมใช้กันมากในการทดสอบเกี่ยวกับการดูดซับ โดยมีค่า Freundlich Parameter, K_F เป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการดูดซับของยาง หากมีค่ามากจะแสดงว่าชั้นยางสามารถดูดซับฟีนอลได้ดี การศึกษาพบว่าค่า K_F ของชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อน และชั้นยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิวใดๆ เลย มีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนสามารถทำให้ชั้นยางสามารถดูดซับสารฟีนอลได้ดีที่สุด และชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดซัลฟิวริกและความร้อนสามารถดูดซับฟีนอลได้ดีกว่าชั้นยางที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิวใดๆ เลย การปรับสภาพผิวดังกล่าวทำให้เกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุนบนผิวของยางจึงเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางและสารละลายฟีนอล โครงสร้างดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากภาพถ่าย Micrograph ของเครื่อง Scanning Electron Microscope ซึ่งเห็นได้ชัดว่า เมื่อใช้กรดไนตริกและความร้อนจะให้ผิวที่มีความเป็นรูพรุนมากที่สุด

การศึกษาพฤติกรรมของการดูดซับในระบบที่มีการไหลของสารละลายฟีนอลโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก (adsorption mini-column) แบ่งหัวข้อการศึกษาเป็น การศึกษาผลของอัตราการไหลของสารฟีนอล และการศึกษาการเพิ่มจำนวนหลอดดูดซับโดยต่อเพิ่มจากหลอดดูดซับเดิมแบบอนุกรมอีกหนึ่งหลอด ส่วนแรกใช้ชั้นยางขนาดเล็กที่ปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อน และเปรียบเทียบกับยางที่มีได้ปรับสภาพผิวใดๆ เลย ส่วนการทดลองส่วนที่สองใช้เพียงยางที่ปรับสภาพผิวแล้ว ในการทดลองส่วนแรกเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกและความร้อนและชั้นยางที่ไม่ได้ผ่านการปรับสภาพผิว โดยใช้อัตราการไหลของสารละลายประมาณ 4.5 ml/min พบว่าชั้นยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อนมีความสามารถในการดูดซับสารฟีนอลได้ดีกว่าชั้นยางที่ไม่ผ่านการปรับสภาพผิว ทั้งนี้เพราะพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากกว่าดังอธิบายไว้แล้วในการทดลองของ Batch adsorption และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารละลายต่างกันคือที่ประมาณ 4.5 ml/min และ 10 ml/min พบว่า การใช้อัตราการไหลของสารละลายที่สูงกว่าจะสามารถดูดซับสารฟีนอลได้ดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากที่อัตราการไหลที่สูงขึ้นนั้นสามารถทำให้เกิดการปั่นป่วนมากขึ้น มากเพียงพอที่จะทำให้เกิดการสัมผัสกันของพื้นผิวของชั้นยางและสารละลายฟีนอลได้ทั่วถึงกว่ารวมถึงช่วยไล่ฟองอากาศที่เกิดขึ้นให้ออกไปจากระบบได้เร็วกว่า สำหรับในส่วนที่สองนั้นเมื่อใช้หลอดดูดซับเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งหลอด ไม่พบว่าทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด ทั้งนี้น่าจะเป็น

เพราะกลไกของการดูดซับฟีนอลในสารละลายน้ำโดยชั้นยางนั้นช้ามาก ถึงแม้จะเพิ่มจำนวนหลอดดูดซับ เพื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสก็ยังมีสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้

จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าค่าใช้จ่ายในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของฟีนอลโดยชั้นยางโดยใช้กรดไนตริกน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการเพิ่มประสิทธิภาพโดยใช้กรดซัลฟิวริก อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการสูงมาก สูงถึง 10 เท่าของค่าใช้จ่ายที่มีได้ใช้กรด จึงดูเหมือนว่าการวิจัยนี้ไม่น่าจะคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ แต่หากพิจารณาให้ละเอียดขึ้นจะพบว่าความไม่คุ้มค่าอาจเนื่องมาจากปริมาณของกรดที่ใช้แน่นอนอาจใช้มากเกินไปจนเกิดความจำเป็น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของกรดที่จะใช้โดยมิได้ทำให้ประสิทธิภาพของชั้นยางที่ปรับสภาพแล้วลดลงไปจากเดิม อีกทั้งขนาดของชั้นยางที่ใช้ก็ส่งผลเป็นอย่างมากต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ หากทำให้ชั้นยางมีขนาดเล็กลงไปกว่าเดิมมากๆ การทำปฏิกิริยากับกรดจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวได้มากขึ้นไปอีกและจะทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มขึ้นอีกเป็นอย่างมาก ซึ่งน่าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้นไปอีก อย่างไรก็ตามการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการดูดซับโดยการปรับสภาพผิวโดยใช้กรดและความร้อน

7. ปัญหาและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยพื้นฐานที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำยางธรรมชาติมาใช้เพื่อบำบัดน้ำปนเปื้อนสารพิษในรูปแบบต่าง ๆ และพบว่าวิธีการใดๆ ก็ตามที่ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้นยางและสารปนเปื้อนมีมากขึ้นจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารจากที่ปนเปื้อนในน้ำได้ การศึกษาต่อไปในอนาคตสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพนั้น น่าจะทำได้ด้วยแนวทางต่อไปนี้

7.1 การใช้ชั้นยางขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร

เนื่องจากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่า ขนาดของชั้นยางยิ่งเล็กลงยิ่งให้อัตราการดูดซับเร็ว ยิ่งขึ้นและน่าจะทำให้ปริมาณการดูดซับสูงขึ้นด้วย แต่ชั้นยางขนาดเล็กที่ใช้ในการทดลองนั้นเมื่อนำมาทดสอบโดยใช้หลอดดูดซับ ปรากฏว่าเกิดปัญหาซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับหลายอย่างดังที่ได้อธิบายในการวิเคราะห์ผลการทดลอง กล่าวคือชั้นยางขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ ที่ใช้มีการเกาะติดกัน มีการกระจายตัวที่ไม่เท่ากันของชั้นยางหรืออาจเป็นผลจากการที่มีฟองอากาศอยู่ใน หลอดดูดซับซึ่งใช้ยางขนาดเล็กมากๆ น่าจะลดปัญหาดังกล่าวได้

7.2 การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของชั้นยางธรรมชาติในการดูดซับสารพิษโดยการลดความต้านทานไฟฟ้าในตัวดูดซับ (การเพิ่มความเป็นขั้วของชั้นยาง)

ยางธรรมชาติจะมีสมบัติความต้านทานทางไฟฟ้าสูง (High resistivity) ซึ่งจะทำให้ผิวหน้าเกิดการสะสมไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic charge) ได้ดี ทำให้ฝุ่นเกาะผิวหน้าได้ง่ายและทำให้ผิวหน้าของชั้นยางติดกันเองซึ่งจะเป็นการลดประสิทธิภาพของตัวดูดซับ งานวิจัยในอนาคตน่าจะทดลองออกสูตรใช้สารบางชนิดเพื่อลดความต้านทานทางไฟฟ้าของยางธรรมชาติ โดยทดลองผสมสารต่างๆ ที่คาดว่าจะลดความต้านทานไฟฟ้าได้ เช่น high conductive carbon black ชนิด XC-72 และ calcium hypochlorite และจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าชั้นยางสามารถดูดซับสารที่ไม่มีขั้วได้ดี ดังนั้นการลดความต้านทานทางไฟฟ้าก็เปรียบเสมือนกับการเพิ่มความเป็นขั้วของชั้นยาง หากงานวิจัยในอนาคตประสบผลสำเร็จได้ นั่นก็หมายความว่าทำให้ชั้นยางดูดซับสารที่มีขั้วได้ดีขึ้นด้วย การปรับปรุงโครงสร้างของยางให้มีความมีขั้วมากยิ่งขึ้นโดยเติมสารที่มีขั้ว เช่น maleic acid หรือการเติม filler ที่มีขั้วเช่น แป้ง เป็นต้น ซึ่งควรมีการศึกษากันไป นอกจากนี้อาจจะ

การทดลองการวัดค่า K_{oc} และ f_{oc} ของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ เพื่อให้สามารถระบุระดับความเป็นขั้วได้แน่ชัดขึ้น

8. เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

“ฟีนอล”, กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย กรมควบคุมมลพิษ, 2542

วราภรณ์ ขจรไชยกูล, “คู่มือเทคโนโลยียาง”, สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2545

ภาษาอังกฤษ

Smith, C.C., W.F. Anderson, R.J. Freewood, “Evaluation of shredded tyre chips as sorption media for passive treatment walls”, *Engineering Geology*, 60, 253-261 (2001)

Benjamin, M. M., “Water Chemistry”, McGraw Hill, Singapore (2002)

Suzuki, M., “Adsorption Technology”, Elsevier, Tokyo (1990)

Azizian, S., “Kinetic Models of Sorption: a Theoretical Analysis”, *J. Colloid Interf. Sci.*, 276, 47-52 (2004)

Kumar, U. , M. Bandyopadhyay, “Fixed bed column study for Cd(II) removal from wastewater using treated rice husk”, *Journal of Hazardous Materials*, 129, 253-259 (2006)

Wang, P., K. L. Tan, C. C. Ho, M. C. Khew, E. T. Kang, “Surface modification of natural rubber latex films by graft copolymerization”, *European Polymer Journal*, 36, 1323-1331 (2000)

Dursun, A. Y., Ç. S. Kalayci, “Equilibrium, kinetic and the thermodynamic studies on the adsorption of phenol onto chitin”, *Journal of Hazardous Materials*, 123, 151-157 (2005)

Manchón-Vizuet, E., A. Macías-García, A. N. Gisbert, C. Fernández-González, V. Gómez-Serrano, “Preparation of mesoporous and macroporous materials from rubber of tyre wastes”, *Microporous and Mesoporous Materials*, 67, 35-41(2004)

Brasquet, C., E. Subrenat, P. Le Cloirec, “Selective adsorption on fibrous activated carbon of organics from aqueous solution: correlation between adsorption and molecular structure” *Water Science and Technology*, 35, 251-259 (1997)

Kadirvelu, K., K. Thamaraiselvi and C. Namasivayam, “Adsorption of nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith”, *Separation and Purification Technology*, 24, 497-505 (2001)

Ming, Z. W., Chen J. Long, Pan B. Cai, Zhang Q. Xing, B. Zhang, “Synergistic adsorption of phenol from aqueous solution onto polymeric”, *Journal of Hazardous Materials*, 128, 123-129 (2006)

Villacañas, F., M. F. R. Pereira, José J.M. Órfão, José L. Figueiredo, “Adsorption of simple aromatic compounds on activated carbons”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 293, 128-136 (2006)

ภาคผนวก

คำชี้แจงของนักวิจัยต่อข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิ

ผู้วิจัยเลือกใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกในการปรับสภาพผิวเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา oxidation บนผิวยาง เพราะกรดทั้งสองชนิดได้ถูกใช้ในการกระตุ้นในกระบวนการก่อกัมมันต์ของการผลิตถ่านกัมมันต์ เพื่อช่วยให้เกิดรูพรุนและเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของพื้นผิววัตถุดิบที่จะนำมาผลิตถ่านกัมมันต์ และในงานวิจัยของ Manchón-Vizueté และคณะ (2004) ได้นำมาปรับสภาพผิวอนุภาคยางผงเพื่อแล้วนำไปใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนปรอทพบว่าได้ผลดีขึ้นกว่าที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ผู้วิจัยจึงคิดว่าน่าจะลองนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพขึ้นภายในการดูดซับฟีนอลออกจากน้ำปนเปื้อน

ข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิในเรื่องการตรวจสอบค่า PZC นับว่าเป็นประโยชน์อย่างมาก ผู้วิจัยได้ทดลองและนำเสนอเพิ่มเติมในรายงาน การทดสอบดังกล่าวทำให้ทราบว่าผิวของยางที่ปรับสภาพโดยใช้กรดไนตริกทำให้เกิดประจุลบเมื่ออยู่ในสารละลายฟีนอล ในขณะที่ยางที่ไม่ได้ปรับสภาพและยางที่ปรับสภาพผิวโดยกรดซัลฟิวริกจะไม่มีประจุเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากในสภาวะที่ทำการทดลอง ฟีนอลไม่ได้แตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นการดูดซับที่เกิดขึ้นจึงไม่ได้เป็นผลมาจากแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ น่าจะเกิดขึ้นจากแรง van der Waals มากกว่า

ผู้วิจัยได้ตรวจสอบการใช้สมการ Langmuir isotherm ตามข้อเสนอแนะของผู้ทรงคุณวุฒิแล้วพบว่าให้แนวโน้มเดียวกับการใช้ Freundlich isotherm ส่วนการตรวจสอบสภาพพื้นผิวโดยใช้ BET นั้น ผู้วิจัยได้ลองทำแล้ว แต่ไม่เป็นผลสำเร็จ เนื่องจากในขั้นตอนการ degas ยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวเกิดการ degrade ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองต่อไปอีกได้

ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณสำหรับข้อเสนอแนะที่มีคุณประโยชน์เหล่านี้ มา ณ ที่นี้ด้วย