



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การบำบัดน้ำปนเปื้อนปรอทโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติบรรจุในหลอดดูดซับ

**Removal of mercury from water by adsorption column packed with
natural rubber chips**

โดย นายภาณุ ด่านวานิชกุล และคณะ

มีนาคม พ.ศ. 2551

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การบำบัดน้ำปนเปื้อนปรอทโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติบรรจุในหลอดซับ
Removal of mercury from water by adsorption column packed with
natural rubber chips

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|----------------------------|---|
| 1. นายภาณุ ดำนวนิชกุล | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. นายณัฏฐ์ มณีขัติยะ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. นายภาณุวัตร มักโกมินทร์ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปรายงานสำหรับผู้บริหาร

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การบำบัดน้ำปนเปื้อนปรอทโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติบรรจุในหลอดดูดซับ
(ภาษาอังกฤษ) Removal of mercury from water by adsorption column packed with natural rubber chips

ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานสังกัด ที่อยู่

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

นักศึกษา/ผู้ร่วมทำวิจัย

ชื่อ-สกุล นาย ณนัท มณีขัติยะ
ชื่อ-สกุล นาย ภาณุวัตร มักโกมินทร์

ระยะเวลาดำเนินการ 9 เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 กรกฎาคม 2550 ถึงวันที่ 31 มีนาคม 2551

ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญ

เนื่องจากปรอทเป็นสารโลหะหนักซึ่งมีพิษเป็นอันตรายทั้งต่อมนุษย์และสัตว์ต่างๆ จากการศึกษาที่ผ่านมา มีการนำยางรถยนต์ใช้แล้วมาทดลองดูดซับปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำ พบว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองศึกษาโดยใช้รูปชั้นยางธรรมชาติเพื่อศึกษาถึงผลของสารเคมีที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูปต่อการดูดซับปรอทในแบบแกว่งขึ้นลงในน้ำ และยืนยันได้ว่ากัมมันต์ที่เชื่อมขวางภายในยางมีผลต่อการดูดซับโดยเข้าร่วมทำปฏิกิริยากับปรอทและกักปรอทไว้ในโครงสร้างนั้น สำหรับการบำบัดน้ำปริมาณมากจำเป็นต้องใช้หลอดดูดซับดังได้ศึกษาในงานวิจัยนี้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการดูดซับในหลอดดูดซับโดยศึกษาผลของอัตราการใช้ยางในหลอดดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
2. ศึกษาการผสมกรวดกับชั้นยางต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
3. ศึกษาการชะออกของสารปรอทในหลอดดูดซับ

ผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ โดยเริ่มศึกษาจากการดูดซับแบบกะ เพื่อพิสูจน์ผลของปริมาณกัมมันต์รวมถึง ความแตกต่างระหว่างกัมมันต์ในแง่ที่ผ่านการทำให้คงรูปและไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูป เพื่อนำสูตรที่ดีที่สุดไปใช้ในการทดลองการบำบัดโดยใช้หลอดดูดซับ

ขับต่อไป การศึกษาการทดลองแบบกะ โดยใช้ยางที่มีปริมาณกำมะถันแตกต่างกันคือ 1.0, 1.3, 1.5 และ 1.7 phr ในเบื้องต้นนั้นพบว่ายางที่บดผสมกำมะถันโดยไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูปสามารถดูดซับปรอทได้บ้าง แต่ไม่เป็นระบบสอดคล้องกับปริมาณกำมะถันที่ใช้ ในขณะที่ยางที่บดผสมกำมะถันแล้วผ่านการทำให้คงรูปมีความสามารถในการดูดซับเป็นแนวโน้มเดียวกัน คือปริมาณการดูดซับดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกำมะถันมากขึ้น นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบปริมาณการเกิดการเชื่อมโยงในชั้นยางเมื่อใช้ปริมาณกำมะถันซึ่งเป็น crosslinking agent ในที่นี้มากขึ้น พบว่าให้แนวโน้มที่เพิ่มตามปริมาณกำมะถัน

ในการทดลองแบบหอดูดซับ ใช้ยางที่มีปริมาณกำมะถันมากที่สุดคือ 1.7 phr เพราะให้ค่าการดูดซับในแบบกะดีที่สุด ได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำปนเปื้อนผ่านหอดูดซับและสัดส่วนของยางต่อกรวดในหอดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ สำหรับน้ำปนเปื้อนความเข้มข้นประมาณ 2.185 ppm ในทุกการทดลองสามารถบำบัดได้ดีเกินกว่า 90% เมื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลในหอดูดซับที่ 5.1, 15.4, และ 20.0 ml/min และใช้สัดส่วนของยางต่อกรวดเท่ากับ 90:10 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพในการดูดซับน้อยลง ซึ่งพิจารณาจากร้อยละของการดูดซับที่น้อยลงและ breakthrough time ที่น้อยลง เพราะความเร็วในการไหลผ่านของสารละลายบนพื้นผิวของชั้นยางเร็วขึ้น ทำให้การถ่ายโอนมวลสารจากเฟสของน้ำปนเปื้อนมายังผิวของชั้นยางน้อยลง และเมื่อเปลี่ยนสัดส่วนของยางต่อกรวดเป็น 70:30 และ 50:50 ทำโดยใช้อัตราการไหลต่ำสุดคือ 5.1 ml/min พบว่าเมื่อสัดส่วนกรวดเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดปรอทดีขึ้นเล็กน้อย น่าจะเป็นเพราะน้ำหนักของกรวดที่มีมากขึ้นช่วยกีดขวางไม่ให้น้ำปนเปื้อนไหลผ่านในหอดูดซับ ทำให้เกิดการสัมผัสที่ดีขึ้น

สำหรับการทดสอบการชะออกของปรอทจากชั้นยางที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยใช้ น้ำสะอาดไหลผ่าน 4 รอบพบว่า ปริมาณของปรอทที่หลุดออกมาน้อยมาก การคายออกที่น้อยเช่นนี้ น่าจะยืนยันว่าการดูดซับของปรอทโดยยางนั้นเกิดจากปฏิกิริยาซึ่งทำให้การดูดซับน่าจะเป็นแบบ chemisorption ซึ่งเป็นการดูดซับที่ผันกลับไม่ได้ ยางธรรมชาติที่ผ่านการทำให้คงรูปจึงน่าจะเป็นตัวดูดซับปรอทที่ดีในการยึดติดปรอทไว้แบบถาวร (immobilization)

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับปรอทโดยใช้ชั้นยางธรรมชาติ ผลของปริมาณกำมะถันได้ทดสอบผ่านการทดลองแบบกะ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันทำการดูดซับเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น และได้ทดสอบผลของอัตราการไหลของน้ำปนเปื้อนในหอดูดซับ พบว่าอัตราการไหลยิ่งช้ายิ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ สัดส่วนของกรวดที่เพิ่มขึ้น มีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้ในระหว่างการทดลองภายใน 24 ชั่วโมง และประสิทธิภาพการบำบัดปรอทอยู่ในช่วงที่มากกว่า 90% ในทุกการทดลอง และปรอทสามารถถูกชะออกมาด้วยน้ำสะอาดได้น้อยกว่า 0.1%

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าควรวิจัยเพิ่มเติมและวิธีการที่ควรพัฒนาต่อยอดสู่ภาคปฏิบัติจริง

1. เนื่องจากความสามารถในการดูดซับขึ้นกับปริมาณกำมะถันในโครงสร้างของการเชื่อมโยงดังนั้น จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดปรอทได้อีกโดยการเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นเรื่องน่าศึกษาต่อไป เพื่อทำให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ
2. อาจพิจารณาใช้ยางเป็นวัสดุในการสร้างบ่อบำบัดน้ำปนเปื้อนปรอท นอกจากปรอทแล้วมีความเป็นไปได้ที่ยางผ่านการทำให้คงรูปน่าจะบำบัดโลหะหนักชนิดอื่นได้ด้วย
3. ในปัจจุบันมียางรถยนต์ใช้แล้วเหลือทิ้งมากมาย การนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดปรอทปนเปื้อนในน้ำจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ซึ่งควรศึกษาผลของการเชื่อมโยงในยางรถยนต์ใช้แล้วเหล่านั้น

เพื่อทำนายความสามารถในการบำบัดได้ อย่างไรก็ตามยางรถยนต์ใช้แล้วที่บดขายจะมาจากหลายแหล่งจึงอาจทำให้ความสามารถในการดูดซับปรอทไม่คงที่แน่นอน ไม่เหมือนการผลิตที่สามารถควบคุมความคงที่ของปริมาณการเชื่อมโยงโดยกำหนด

ผลงานทางวิชาการที่คาดว่าจะเกิดขึ้น

บทความวิชาการเรื่อง “Mercury(II) Removal from Water by Batch Adsorption with Natural Rubber Chips” ได้ถูกนำเสนอในที่ประชุมวิชาการ TU ChEEE 2008 ซึ่งจัดโดยภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในวันที่ 4 มีนาคม 2551 ที่ผ่านมา

กำลังเรียบเรียงเขียนบทความ เรื่อง “Batch and Dynamic Adsorption of Mercury(II) on Vulcanized Natural Rubber Chips” เพื่อเสนอตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติชื่อ Journal of Hazardous Material

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสามารถดูดซับปรอทจากน้ำปนเปื้อนปรอทที่มีความเข้มข้นของปรอทประมาณ 2.2 ppm โดยใช้ชั้นยางบรรจุในหลอดดูดซับ การศึกษาเริ่มจากการตรวจสอบสูตรยางที่จะใช้ด้วยการทดลองการดูดซับแบบกะด้วยการแกว่งชั้นยางในสารละลายปรอทแล้วปล่อยให้อยู่ในสภาวะสมดุล ชั้นยางที่ใช้มีขนาดกว้าง 0.5 ซม ยาว 0.5 ซม และหนา 0.2 ซม ในการทดลอง จากการศึกษาเมื่อเปรียบเทียบระหว่างยางที่ผ่านการคงรูปและไม่ผ่านการทำให้คงรูป พบว่ายางที่ผ่านการคงรูปมีช่วงความสามารถในการดูดซับที่มากกว่ายางที่ไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูป และยังพบอีกด้วยว่ายางที่มีปริมาณกำมะถันมากจะทำให้เกิดปริมาณการเชื่อมโยงมาก ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับปรอทในชั้นยางมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นจึงใช้สูตรยางที่มีกำมะถันมากที่สุดคือ 1.7 phr ในการทดลองในหลอดดูดซับและชั้นยางที่ใช้มีขนาดกว้าง 0.2 ซม ยาว 0.2 ซม และหนา 0.2 ซม เมื่อผ่านน้ำปนเปื้อนปรอทเข้าหลอดดูดซับจะเก็บตัวอย่างที่ทางออกและวัดความเข้มข้นของปรอทที่เวลาต่างๆ การศึกษาในส่วนนี้พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของสารละลายปรอทที่ทางเข้าหลอดดูดซับ จะทำให้ความสามารถในการดูดซับของชั้นยางลดน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากปรอทอาจผ่านชั้นยางเร็วเกินไปทำให้ยางไม่มีโอกาสได้ดูดซับปรอท ส่วนการทดลองอัตราส่วนยางและกรวดพบว่าความสามารถในการดูดซับค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่ค่าการดูดซับเมื่อเพิ่มปริมาณของกรวดที่เวลาต่างๆ ดีขึ้นเล็กน้อยเพราะกรวดช่วยป้องกันไม่ให้อายุเกิดการลอยตัว จึงทำให้เกิดการสัมผัสระหว่างน้ำปนเปื้อนและยางดียิ่งขึ้น สำหรับการทดลองการคายออกของสารละลายปรอทในชั้นยางนั้นพบว่าอยู่ในช่วงที่น้อยมาก

คำสำคัญ ปรอท ยางธรรมชาติ กำมะถัน หลอดดูดซับ การดูดซับ การคายออก

ABSTRACT

In this research, mercury removal by rubber chips in an adsorption column was investigated. Firstly, the study was done in batch adsorption to obtain equilibrium adsorption for testing the rubber formula. Chips with a size of $0.5 \times 0.5 \times 0.2 \text{ cm}^3$ were first used. The results showed that vulcanized rubber chips could adsorb Hg(II) more efficiently than unvulcanized rubber ones. Upon increasing more amount of sulfur used in vulcanization, the crosslink density was found increasing, thereby, enhancing mercury(II) adsorption. The rubber formula later used in the column test was then the one with highest amount of sulfur which is about 1.7 phr. In the column experiment, $0.2 \times 0.2 \times 0.2 \text{ cm}^3$ rubber chips were used. The adsorption column was assembled. The samples were collected at various times and their concentrations were measured. It was found that when the flow rate of mercury(II) solution was increased, the adsorption capacity was decreased because mercury(II) may not have sufficient time to react with the rubber chips. When the ratio of rubber chips and gravel was decreased, the adsorption capacity was increased very little. Increasing more amount of gravel prevented the rubber floatation during the flow of contaminated water, leading to a little higher efficiency. Desorption test by leaching the used rubber with pure water through the column confirmed that the amount of detached mercury was very little. From these results, the chips were very effective in mercury removal from contaminated water.

Keywords: mercury(II), natural rubber, sulfur, adsorption column, adsorption, desorption

1. ความสำคัญและความเป็นมาของการวิจัย

ยางธรรมชาติหรือยางพารานั้นเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งจึงมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับโพลีเมอร์นั้นคือ เมื่อผ่านปฏิกิริยาการสร้างร่างแห (crosslink) โดยใช้สารที่ทำให้ยางคงรูป เช่น กำมะถัน เป็นต้น โครงสร้างของยางจะแข็งแรงขึ้นไม่ละลายในสารละลายอินทรีย์ประเภทที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งเข้ากันได้ดีกับยางธรรมชาติเพราะเป็น hydrophobic เช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงมีการศึกษานำขึ้นยางไปดูดซับสารอินทรีย์พวกนี้ได้แก่ โทลูอีน ไซลีน เป็นต้น ที่ปนเปื้อนอยู่กับน้ำ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำใต้ดินอันอาจปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้โดยการซึมผ่านจากดินลงสู่ น้ำ วิธีหนึ่งที่ยกมใช้การบำบัดน้ำใต้ดินดังกล่าวคือการ ใช้ permeable reactive barrier ซึ่งเป็นกำแพงที่สร้างจากส่วนผสมของดินหรือกรวดรวมกับวัสดุใดๆ ที่มีประสิทธิภาพในการดักจับหรือทำปฏิกิริยากับสารปนเปื้อนอันตราย (Smith et al., 2001) เทคโนโลยีนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในการดูดซับทั้งสารอินทรีย์และโลหะหนัก เช่น แคดเมียม สารหนูและปรอท

สารปรอทเป็นสารเคมีที่ใช้ในการผลิตเครื่องวัดอุณหภูมิ (เทอร์โมมิเตอร์) เครื่องวัดความดัน (บารอมิเตอร์) หลอดไฟ กระบอกแกว วัสดุอุดฟัน และยังใช้ในการผลิตสารเคมีอื่นๆ และในอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า นอกจากนี้ ในประเทศไทย มีรายงานสถานการณ์การปนเปื้อนปรอทในอ่าวไทยอันเป็นผลมาจากการดำเนินงานของบริษัทชุดเจาะก๊าซธรรมชาติ พบว่าในช่วงปี พ.ศ. 2534 - 2539 มีการปล่อยปรอทลงอ่าวไทยเฉลี่ยปีละ 187 กิโลกรัม (Chongprasith et al., 2001) ปรอทสามารถเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้ทั้งทางการหายใจ การสัมผัส และการกิน ถ้าปรอทสัมผัสกับผิวหนังจะทำให้เกิดอาการแพ้ ผิวหนังอักเสบ และทำให้ผิวหนังเปลี่ยนสีได้เมื่อสัมผัสนานๆ ถ้าไอของปรอทเข้าสู่ดวงตา อาจทำให้เกิดอาการระคายเคืองตา ทำให้เยื่อตาอักเสบได้ และหากเข้าสู่ร่างกายโดยการหายใจ จะส่งผลให้เกิดอาการระคายเคืองต่อเยื่อจมูก ลำคอ ระคายเคืองต่อปอด ทำให้เกิดอาการไอ เจ็บหน้าอก หอบ ปรอทสามารถถูกดูดซับได้อย่างรวดเร็วทางการหายใจและการกินและส่งผลให้เกิดอันตรายเรื้อรังในเวลาต่อมา รายละเอียดความเป็นพิษของปรอทสามารถหาอ่านได้ที่ <http://www.anamai.moph.go.th/chemnet> เป็นที่รู้จักกันดีว่าปรอทเป็นสารมลพิษที่สำคัญ ทุกโครงสร้างของสารประกอบปรอทพบว่ามีอันตรายต่อมนุษย์ทั้งสิ้น เช่น methyl mercury พบว่าเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งและการกลายพันธุ์ (mutation) ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

วิธีการบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำมีด้วยกันหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการสกัด การใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาให้ตกตะกอน หรือการใช้สารดูดซับทางกายภาพ ในปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่พยายามพัฒนาตัวดูดซับให้มีประสิทธิภาพดีโดยใช้วัสดุที่เป็นของเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น การผลิตถ่านกัมมันต์ (activated carbon) จากกากชานอ้อย กะลามะพร้าว และขี้ข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งพบว่าสามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ได้ดี ถึงแม้จะไม่ดีเท่าถ่านกัมมันต์ที่ขายเชิงพาณิชย์ ถ่านกัมมันต์ดังกล่าวมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักบางชนิดได้ เช่น แคดเมียม (Youssef et al., 2004) โครเมียม (Lyubchik et al., 2004) และ สังกะสี (Dabek, 2003) เป็นต้น สำหรับปรอทซึ่งเป็นโลหะหนักที่ใช้ในอุตสาหกรรมทำกระจกและอุปกรณ์ไฟฟ้า อาจเกิดการปนเปื้อนกับน้ำที่ใช้ในกระบวนการ มีวิธีการบำบัดโดยใช้ซีเมนต์ หรือ การทำให้เป็นของแข็งโดยผสมปูนขาว (cement- หรือ lime-based stabilization/solidification (S/S) technologies) (Corner, 1990; Malone and Lundquist, 1994; Dermatas et al., 1996) แต่พบว่าวิธีนี้ไม่สามารถลดปริมาณปรอทที่โดนน้ำชะล้างออกมาได้ อันเป็นผลมาจาก mercury hydroxide มีความสามารถในการละลายน้ำสูงมาก และความสามารถในการที่ปรอทจะไปรวมตัวกับสารอินทรีย์ หรืออินทรีย์ตัวอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถละลายน้ำได้ งานวิจัยหลายชิ้นศึกษาการใช้สารประกอบของกำมะถันในการจับปรอทในดินปนเปื้อนปรอท (Meng et al., 1998) กำมะถันสามารถรวมตัวกับปรอทได้ดี และทำให้เกิดการตกตะกอนของปรอทซัลไฟด์ ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก มีการทดลองใช้ผงยางใช้แล้วซึ่งมีส่วนประกอบของกำมะถันในการบำบัดปรอทและพบว่ามันสามารถดูดซับปรอทได้ดี ซึ่งเป็นการทดลองในระดับ batch scale (Gunasekara et al., 2000) รวมถึงมีงานวิจัยเร็วๆ นี้ที่ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับโดยใช้ชั้นยางในการดูดซับแคดเมียมและตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำ และพบว่าเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับ

การแลกเปลี่ยนไอออน (Rowley et al., 1984) จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่เราจะศึกษาการใช้ชั้นยางในการดูดซับปรอทจากน้ำ

ในงานวิจัยที่ผ่านมาเราได้ทดลองขึ้นรูปยางธรรมชาติโดยใช้กำมะถันและใช้ระบบการคงรูปต่างๆ ได้แก่ Efficient Vulcanization (EV), Semi-Efficient Vulcanization (SEV) และ Conventional Vulcanization (CV) เมื่ออบผสมสารเคมีแล้ว ยางถูกขึ้นรูปเป็นแผ่นบางประมาณ 2 mm แล้วถูกตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ขนาด 5 มม x 5 มม แล้วจึงนำไปทดลองดูดซับสารละลายของ Hg(II) ในน้ำ พบว่าปริมาณการดูดซับปรอทในยางมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) ในโครงสร้างของยาง (Danwanichakul et al., 2007) นอกจากนี้เรายังได้ทดลองการดูดซับปรอทในน้ำโดยใช้ผงยางจากยางล้อรถยนต์ใช้แล้วอีกด้วย และพบว่าสามารถกำจัดปรอทได้เช่นกัน แต่ประสิทธิภาพน้อยกว่ายางที่เราขึ้นรูปเอง ทั้งๆ ที่ผงยางมีขนาดเล็กกว่าชั้นยาง อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาเราได้ทดลองด้วยการดูดซับแบบ batch เท่านั้น ยังมีได้ทดลองการดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับ ซึ่งเหมาะสมกว่าสำหรับการบำบัดน้ำปริมาณมากๆ อันเป็นขอบเขตของงานวิจัยชิ้นนี้

2. วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการดูดซับในหลอดดูดซับโดยศึกษาผลของอัตราการไหลในหลอดดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
2. ศึกษาการผสมกรวดกับชั้นยางต่อประสิทธิภาพการดูดซับ
3. ศึกษาการชะออกของสารปรอทในหลอดดูดซับ

3. ทฤษฎี แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

3.1 ทฤษฎี

3.1.1 สมการพหุคูณไอโซเทอม (Freundlich isotherm)

การอธิบายความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุลในการทดลองแบบกะ (batch experiment) ใช้ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งมีหลายความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการดูดซับปรอทในน้ำนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย Freundlich isotherm ไอโซเทอมนี้อธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของปรอทในเฟสของสารละลาย (C_o) และความเข้มข้นในเฟสของชั้นยางที่สภาวะสมดุล (q_e) แสดงเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่ q_e คือ ปริมาณสารปรอทที่อยู่ในชั้นยางต่อน้ำหนักของชั้นยางที่สภาวะสมดุล [mg สาร/g ตัวดูดซับ], คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล [mg/l], K_F และ n เป็นพารามิเตอร์ใน Freundlich Isotherm เมื่อ q_e คำนวณจากการทำสมดุลมวลสารเมื่อเริ่มต้นและเมื่อสิ้นสุดการดูดซับดังแสดงด้วยสมการที่ (2)

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \quad (2)$$

โดยที่ C_o คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น [mg/l], V คือ ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง [l], และ m คือมวลของตัวดูดซับที่ใช้ในการทดลอง [g]

จากสมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงเพื่อใช้ในการหาค่า Freundlich parameters ดังนี้

$$\ln(q_e) = \frac{1}{n} \ln(C_e) + \ln(K_F) \quad (3)$$

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 เป็นค่าที่บอกถึงความแข็งแรงของการยึดติดของตัวดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ (adsorption affinity) เปรียบเทียบที่สภาวะสมดุลต่างกันว่า หากสภาวะสมดุลหนึ่งตัวดูดซับมีปริมาณการดูดซับมากกว่าอีกสภาวะหนึ่งจะส่งผลให้การยึดติดเปลี่ยนไปมากน้อยเพียงไร หากค่าของ n เท่ากับ 1.0 หมายถึงการยึดติดจะเหมือนเดิมในทุกสภาวะสมดุล ถ้า n น้อยกว่า 1.0 หมายถึงเมื่อตัวดูดซับที่อีกสภาวะหนึ่งมีปริมาณการดูดซับมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างตัวดูดซับกับพื้นผิวในสภาวะนั้นมีมากขึ้น เป็นการดูดซับแบบน่าพอใจ (favorable adsorption) หากค่าของ n มากกว่า 1.0 เมื่อตัวดูดซับที่อีกสภาวะหนึ่งมีปริมาณการดูดซับมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างตัวดูดซับกับพื้นผิวในสภาวะนั้นมีน้อยลง (Benjamin, 2002)

3.1.2 สมการอธิบายการดูดซับในหลอดดูดซับ (Adsorption Column)

$$\varepsilon \frac{\partial c}{\partial t} + \varepsilon u \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{6(1-\varepsilon)k_c(c-c_s)}{D_p} = 0 \quad (4)$$

สมการอนุพันธ์ (4) อธิบายความเข้มข้นของสารปรอท ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความสูง ณ ตำแหน่งต่างๆ ของหลอดดูดซับ และเป็นฟังก์ชันกับเวลาที่ใช้ในการดูดซับ ค่าของ ε แทนสัดส่วนช่องว่าง หากสมมติว่าการเปลี่ยนความเข้มข้นของปรอทตามความสูงของหลอดดูดซับเป็นแบบเส้นตรงดังนั้น $\partial c / \partial x$ อาจประมาณให้เท่ากับ $(c - c_0) / L$ เมื่อ c_0 คือความเข้มข้นของสารละลายปรอทที่ทางเข้าหลอดดูดซับ นอกจากนี้ u ซึ่งเป็นพจน์แสดงการพาสารโดยการไหลนั้น อาจประมาณจากอัตราการไหลดังนี้ $u = Q / A$ เมื่อ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร และ A คือพื้นที่หน้าตัดการไหล k_c ในสมการที่ (4) แสดงถึง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากเฟสของสารละลายมายังผิวของชั้นยาง ส่วน c_s คือความเข้มข้นของสารละลายปรอทที่พื้นผิวของชั้นยาง หากสมมติว่าเมื่ออย่างสัมผัสกับสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างปรอทและกำมะถันในโครงสร้างการเชื่อมโยงทันที จึงทำให้ความเข้มข้นของปรอทที่ผิวเป็นศูนย์ตลอดเวลา ดังนั้น สมการที่ 4 ทำให้อยู่ในรูปที่ง่ายขึ้นเป็น

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{Q}{AL} c_0 - \left(\frac{Q}{AL} + \frac{6(1-\varepsilon)k_c}{\varepsilon D_p} \right) c = 0 \quad (5)$$

หากอินทิเกรตสมการที่ 5 โดยใช้ เงื่อนไขเริ่มต้นคือ $t = 0, c = 0$ หรือปรอทในสารละลายถูกยางดูดซับไปจนหมด ณ เวลาเริ่มต้นออกมาจากหลอดดูดซับ จะได้สมการเป็น

$$\frac{c}{c_0} = \frac{a}{b} (1 - e^{-bt}) \quad (6)$$

$$\text{เมื่อ } a \text{ แทน } \frac{Q}{AL} \text{ และ } b \text{ แทน } \frac{Q}{AL} + \frac{6(1-\varepsilon)k_c}{\varepsilon D_p}$$

3.2 แนวคิดในการวิจัย และผลงานที่เกี่ยวข้อง

การปนเปื้อนโลหะหนักชนิดต่างๆ ในน้ำเกิดขึ้นทั่วไป ต้นเหตุจากโรงงานอุตสาหกรรม การบำบัดน้ำปนเปื้อนจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพราะโลหะหนักดังกล่าวเป็นอันตรายต่อทั้งสิ่งมีชีวิตในน้ำและมนุษย์ที่ใช้น้ำในการบริโภคและอุปโภค มีเทคโนโลยีหลากหลายที่ใช้ในการบำบัดน้ำปนเปื้อนโลหะหนัก เราอาจใช้การเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้เกิดการตกตะกอนของไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต หรือโดยการใช้เยื่อเลือกผ่านในการกรองโลหะหนักดังกล่าวออกจากน้ำ รวมถึงการใช้สารแลกเปลี่ยนไอออน วิธีการเหล่านี้ได้ผลดีหากมีการปนเปื้อนปริมาณมาก แต่จะไม่มีประสิทธิภาพดีหากใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยกว่า 100 ppm (mg/l) ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงและไม่สามารถกำจัดได้จนถึงระดับที่ต้องการตามที่บังคับโดยกฎหมาย (Matheichal et al., 1997) มีรายงานวิจัยที่ใช้สารเคมีทางการค้าในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิดได้แก่ trimercaptotriazine (TMT), Thio-Red potassium/sodium thiocarbonate (STC) และ HMP-2000 sodium dimethyldithiocarbamate (SDTC) เพื่อใช้บำบัดน้ำปนเปื้อนแคดเมียม ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว และปรอทที่มีความเข้มข้น 50 ppm พบว่า ไม่สามารถกำจัดได้ตามที่ EPA ของสหรัฐอเมริกากำหนด อีกทั้งยังพบการละลายกลับ (leaching) ของโลหะหนักออกมาอีกด้วย (Matlock et al., 2002) ดังนั้นสำหรับการปนเปื้อนที่มีความเข้มข้นต่ำๆ เหล่านี้ วิธีการใช้ตัวดูดซับดูดจับโลหะหนักจากน้ำจะเป็นวิธีที่เหมาะสม

ตัวดูดซับที่นิยมใช้กันอย่างมากคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีการผลิตขายเชิงพาณิชย์และสามารถนำมาดูดซับโลหะหนักได้เป็นอย่างดี แต่มีราคาแพง งานวิจัยในสมัยต่อมาจึงมีการนำวัสดุเหลือใช้ต่างๆ มาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ ตัวอย่างงานวิจัยที่นำมาดูดซับปรอท ได้แก่ กะลามะพร้าว และกะลาปาล์ม (ธเรศ ศรีสถิตย์ และสุจริยา คุ้ยเสียม, 2546) สามารถกำจัดปรอทได้ 0.2-10 mg ปรอท/ กรัมตัวดูดซับ (mg/g) ถ่านกัมมันต์จากกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (Zhang et al., 2005) สามารถกำจัดได้ถึง 30-120 mg/g ถ่านกัมมันต์จากเปลือกไม้สน (Vazquez et al., 2002) สามารถกำจัดปรอทได้ 7 mg/g แม้แต่แร่ดินเหนียวของประเทศโมร็อกโก (Benhammou et al., 2005) ก็ถูกนำมาผลิตเป็นถ่านกัมมันต์เช่นกัน สามารถกำจัดปรอทได้ 36-180 mg/g จะเห็นได้ว่าตัวดูดซับมีความสามารถในการบำบัดปรอทได้หลากหลายแตกต่างกัน

จากความรู้ทางเคมีที่ว่า thiol group (-SH) สามารถเกิดสารเชิงซ้อนที่เสถียรกับโลหะหนักบางชนิดที่มีค่าโพลาไรเซชันสูง เช่น ปรอท เงิน และทองคำ จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาเป็นตะกอนของโลหะหนักขึ้นได้ ส่วนแคดเมียมและสังกะสี ก็เกิดได้เช่นกันแต่ไม่ดีเท่าปรอท ดังนั้นการพัฒนาตัวดูดซับให้ดูดจับปรอทได้ดี จึงใช้การเพิ่มหมู่ thiol ในตัวดูดซับ เช่น Merrifield และคณะ (2004) เพิ่มหมู่ thiol เข้าไปในโครงสร้างของสารโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดจับปรอท จาก 200 mg/g เป็น 550 mg/g นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ ที่ต้องใช้สารกระตุ้นให้เกิดรูพรุน เช่น โซดา และสารเคมีอื่นๆ Krishnan และ Anirudhan (2002) ได้เพิ่มการกระตุ้นด้วยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ พบว่าช่วยให้เกิดการดูดจับปรอทได้ดีขึ้นจาก 30 mg/g เป็น 45 mg/g หรือแม้แต่อนุภาคของซิลิกาที่ใช้เป็นตัวดูดซับกันแพร่หลายอีกชนิดหนึ่ง ก็มีการดัดแปรด้วยสาร 2-Mercaptothiazoline ซึ่งทำให้อนุภาคซิลิกาเกิดหมู่ (-SH) จึงเพิ่มประสิทธิภาพการดูดจับปรอท (Perez-Quintanilla และคณะ, 2006)

นอกจากตัวดูดซับที่ผลิตจากวัสดุต่างๆ ดังกล่าวถึงข้างต้นแล้ว เศษยางรถยนต์ก็ถูกนำมาใช้เป็นต้นดูดซับเช่นกัน ยางใช้แล้วได้ถูกนำมาใช้ดูดจับสารลดแรงตึงผิวที่เป็นส่วนผสมในสารชะล้าง (Purakayastha et al., 2005) และนำมาดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ได้แก่ แคดเมียม ปรอท และตะกั่ว (Rowley et al., 1984) และ Knocke และ Hemphill (1980) ได้ทดลองศึกษาจลนศาสตร์และเทอร์โมไดนามิกส์ของการดูดจับปรอทโดยผงยางรถยนต์ โดยมีสมมติฐานว่าผงยางใช้แล้วมีส่วนประกอบของกำมะถัน ซึ่งน่าจะทำให้ยางดูดจับ

ปรอทได้ดี การทดลองดังกล่าวเป็นการทดลองแบบ batch adsorption นอกจากนี้ยังมีการนำยางรถยนต์เหลือใช้มาทำเป็นตัวดูดซับปรอทจากดินปนเปื้อนปรอท และพบว่าทำให้เกิดการชะล้างออกของปรอทน้อยกว่าวิธีการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อ immobilize ปรอท (Meng et al., 1998)

จากแนวคิดของงานวิจัยที่ผ่านมา จึงเห็นได้ว่ายางที่ผ่านการวัลคาไนซ์ด้วยซัลเฟอร์น่าจะเป็นตัวดูดซับปรอทได้ดี เราจึงได้ทดลองบดยางสูตรต่างๆ ที่มีปริมาณ ซัลเฟอร์ ซิงค์ออกไซด์ และผงเขม่าดำต่างๆ กัน โดยทำการทดลองแบบ batch adsorption เพื่อดูผลของสารเคมีดังกล่าวต่อปริมาณการดูดซับ จากผลการทดลองเราพบว่า ปริมาณการดูดซับปรอทเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณการเชื่อมโยง (crosslink density) ในโครงสร้างของยางเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นไปได้ว่ากำมะถันในโครงสร้างการเชื่อมโยงสามารถทำปฏิกิริยากับปรอท และกักปรอทไว้ในนั้นได้เป็นการ immobilize ดังการทดลองของ Meng และคณะ (1998) นอกจากนี้ เรายังทำการทดลองนำผงยางใช้แล้วขนาด 7, 10 และ 30 Mesh มาทดลองดูดซับปรอทโดยศึกษาทั้งแบบ batch adsorption และ dynamic adsorption โดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก ซึ่งยังมีผู้ใดศึกษามาก่อน โดยมีได้ใช้สารอื่นๆ ผสมร่วมด้วย พบว่าผงยางสามารถดูดซับปรอทได้ค่อนข้างดี แต่สำหรับยางขนาดเล็กมีการลอยของผงยางในขณะที่สารละลายปรอทไหลผ่านจึงทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับปรอทไม่ดีนัก เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ผ่านมา หากเราใช้ยางผงจากล้อรถยนต์ใช้แล้วปริมาณเท่ากับยางที่เรอบดเองแล้วตัดเป็นชิ้นขนาด 0.5x0.5cm พบว่ายางที่เรอบดเองสามารถดูดซับปรอทได้ปริมาณมากกว่า ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะกรรมวิธีในการผลิตยางต้องใช้แรงกลบดให้เป็นขนาดเล็ก อาจทำให้พันธะของกำมะถันและคาร์บอนในโครงสร้างยางแตกออกและกำมะถันหลุดออกไปจำนวนมาก ในงานวิจัยนี้เพื่อให้ได้ปริมาณการเชื่อมโยงที่มากกว่า เราจึงจะใช้ยางที่บดขึ้นเอง และสร้างหลอดดูดซับที่ใหญ่ขึ้นเพราะ ที่ผ่านมาหลอดดูดซับที่เราใช้เล็กเกินไป ทำให้ยางอึดตัวเร็วเกินไป โดยเราจะศึกษาผลของอัตราการไหลของสารละลายในหลอดดูดซับ รวมถึงการผสมกรวดหรือทราย เพื่อศึกษาผลของช่องว่างในการบรรจุและทำให้ยางไม่ลอยขึ้นเมื่อสารละลายไหลผ่าน รวมถึงศึกษาการชะออกของปรอทของยางที่ดูดซับปรอทจนอึดตัวแล้ว ซึ่งยังมีผู้ใดศึกษาเช่นนี้มาก่อน

4. วิธีการทดลอง

4.1 การทดลองแบบกะ (Batch Adsorption)

4.1.1 การออกสูตรยางและการบดผสมยาง

ตารางที่ 1: แสดงชนิดส่วนผสมและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการผลิตยาง

สารเคมี	ปริมาณ (phr)	น้ำหนัก (g)
NR (STR 20)	100.00	181.95
Carbon black	30.00	54.58
Stearic acid	1.00	1.82
Zinc oxide	5.00	9.10
CBS	1.25	2.27
TMTD	0.25	0.45
Sulfur	1.00 ^(*)	1.82 ^(*)

หมายเหตุ ^(*) หมายถึง ใช้ปริมาณกำมะถันแตกต่างกันในแต่ละสูตรคือ 1.0, 1.2, 1.5 และ 1.7

ในการออกสูตรยางในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางมีส่วนผสมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงสัดส่วนในหน่วย phr (part per hundred parts of rubber) และน้ำหนักที่แท้จริงในการทดลอง ยางธรรมชาติ

STR 20 นั้นได้รับความอนุเคราะห์จากองค์การสวนยาง สารทำให้ยางคงรูปนั้นใช้กำมะถันเป็นสารคงรูป สารเร่งให้ยางคงรูป (accelerator) นั้นในที่นี้ใช้ Tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) และ N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide (CBS) ส่วนสารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ที่ใช้ในที่นี้ คือ Zinc oxide (ZnO) และ Stearic acid ส่วนสารตัวเติม (filler) ที่ใช้คือผงเขม่าดำ (carbon black) ยางที่ทดลองมีด้วยกัน 4 สูตร แตกต่างกันในปริมาณกำมะถันได้แก่ 1.0 phr (ใช้ชื่อสูตรว่า S10), 1.3 phr (S13), 1.5 phr (S15) และ 1.7 phr (S17) เพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าปริมาณของกำมะถันในยางแต่ละชนิดนั้นมีผลต่อการดูดซับมากน้อยเพียงใด

เมื่อชิ้นส่วนผสมได้ตั้งต้องการแล้ว จึงบดผสมสารเคมีโดย

1) นำยาง STR20 มาบดในเครื่อง Brabender ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50°C ด้วยความเร็วรอบ 40 rpm เติมเขม่าดำ และสารกระตุ้น (ZnO และ Stearic acid) บดให้เข้ากัน จากนั้นเติมสารตัวเร่ง (TMTD, CBS) และกำมะถันบดให้เข้ากัน ใช้เวลาบดรวมทั้งหมด 13 นาที

2) นำมารีดให้เป็นแผ่นด้วย Two-roll mill แบ่งตัวอย่างบางส่วนไปทดสอบลักษณะการทำให้ยางคงรูป (Cure Characteristics) โดยวิธี MDR ที่ 150°C โดยส่งตรวจที่หน่วยเทคโนโลยียาง มหิดล – เอ็มเทค ม.มหิดล

3) ขึ้นรูปยางให้เป็นแผ่นหนา 2 มิลลิเมตรโดยใช้เครื่อง Compression mould (ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์) ที่ 150°C เป็นเวลา 90% cure time ซึ่งได้จากการทดสอบ MDR ดังตารางที่ 2

4) ตัดยางเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 5 มม x 5 มม เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการดูดซับปรอทในแบบกะ และขนาด 2 มม x 2 มม สำหรับใช้บรรจุในหลอดดูดซับ

ตารางที่ 2: แสดงเวลาที่ใช้ในการทำให้ยางคงรูปที่อุณหภูมิ 150°C

ปริมาณกำมะถันในยาง (phr)	Scorch time (min)	Cure time (min)
1.0	3.86	6.48
1.3	3.49	5.85
1.5	3.39	5.57
1.7	3.03	4.96

4.1.2 การทดสอบการดูดซับในระบบแบบกะ (Batch Adsorption)

1) การเตรียมขวดเพื่อใช้ทดลองความสามารถในการดูดซับ โดยนำขวดพลาสติกไปล้างน้ำให้สะอาด แล้วนำไปตากให้แห้งใส่กรดไนตริกความเข้มข้น 10 M จนมีระดับสูงถึงปากขวด แล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นจึงเทกรดไนตริกออกแล้วทิ้งขวดไว้ให้แห้งจึงสามารถนำมาใช้ได้

2) ชั่งน้ำหนักยางขึ้น โดยให้น้ำหนักประมาณ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 g

3) การทดสอบการดูดซับ โดยนำยางที่เตรียมไว้แต่ละชนิดไปใส่ในขวดที่ล้างน้ำสะอาด (ไม่ได้ทำการใส่กรดไนตริก) แล้วจึงใส่สารปรอทปริมาณ 20 ml ลงในแต่ละขวด แล้วจึงนำไปเข้าเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 160 rpm เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 °C เมื่อครบเวลาแล้วจึงกรองยางออกแล้วนำสารปรอทใส่ในขวดที่เตรียมไว้ในข้อ 1 พร้อมทั้งหยดกรดไนตริก 2-3 หยด เพื่อป้องกันไม่ให้สารปรอทรวมตัวกันแล้วจึงส่งตัวอย่างตรวจหาปริมาณสารปรอทที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ ศูนย์ปฏิบัติการกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาการดูดซับของชิ้นยาง

4.1.3 การทดสอบหาปริมาณการเชื่อมโยงโดยกัมมันต์ (crosslink density)

ทดสอบโดยวิธีบวมตัวในโทลูอีน (swelling) โดยนำยางที่ต้องการหาปริมาณการเชื่อมโยง จำนวน 1 ชิ้นชั่งน้ำหนักพร้อมจตบันทึก จำนวน 3 ตัวอย่าง จากนั้นนำยางที่ชั่งน้ำหนักแล้วใส่ขวดแก้วพร้อมทั้งเติมโทลูอีนปริมาตร 8 ml แช่ชิ้นยางในโทลูอีนเป็นเวลา 3 วันเพื่อให้ยางบวมตัวจนอิ่มตัว จากนั้นจึงนำยางออกมาชั่งน้ำหนัก พร้อมใช้ผ้าบางปิดฝาเอาไว้เพื่อป้องกันมิให้โทลูอีนระเหยออกจากชิ้นยางมากเกินไป แล้วจึงนำเข้าสู่ตู้อบเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำขวดแก้วที่มีชิ้นยางอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 36 ชั่วโมงที่ความดัน 600 mbar สุดท้ายนำยางที่อบแล้วมาชั่งน้ำหนักหลังอบของยางชนิดต่างๆที่เตรียมได้

4.2 การทดลองแบบหอดูดซับ (Dynamic Adsorption)

4.2.1 การเตรียมยางสำหรับการดูดซับ

1) เตรียมยางสูตร S17 ทั้งหมด 14 batch แต่ละ batch มีส่วนผสมและวิธีการผสมเหมือนกันทุกประการ นำยางมาบดในเครื่อง brabender และใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 °C ด้วยความเร็วรอบ 40 rpm เติมเซมาดำ และเติมสารกระตุ้น (ZnO และ Stearic acid) บดให้เข้ากัน ส่วนสารตัวเร่ง TMTD, CBS และกัมมันต์นั้นขอความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องบดที่สถาบันวิจัยยาง

2) นำยางที่ได้อัดให้เป็นแผ่นด้วย two-roll mill แบ่งตัวอย่างบางส่วนไปทดสอบลักษณะการทำให้ยางคงรูป (cure Characteristics) ที่อุณหภูมิ 150 °C แล้วขึ้นรูปยางให้เป็นแผ่นหนา 2 mm โดยใช้เครื่อง compression mould ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 90% cure time ตัดยางที่ได้เป็นชิ้นเล็กๆ ให้ได้ขนาดประมาณ 2 มม x 2 มม เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบการดูดซับปรอทในขั้นตอนต่อไป

4.2.2 การประกอบหอดูดซับ

ออกแบบหอดูดซับ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 6 cm หนา 3 mm และสูงประมาณ 25 cm โดยติดวาล์วเปิดปิดที่บริเวณสูงจากกันหอดูดซับ 20 cm สำหรับให้ของเหลวไหลออก ที่ทางเข้า จะต่อเข้ากับสายยาง PVC แบบนิ่ม ที่มาจากท่อเก็บสารละลาย ที่ทางออกจะต่อเข้ากับสายยาง PVC แบบนิ่ม เพื่อส่งน้ำที่บำบัดแล้วไปเก็บในถังเก็บสารละลาย จำเป็นจะต้องให้ระดับส่วนสูงของสารละลายปรอทในท่อเก็บสารละลายอยู่ต่ำกว่าก้นของหอดูดซับเล็กน้อย เพื่อตัดผลของพลังงานศักย์ อัตราการไหลที่เกิดขึ้นจึงเป็นผลมาจากการสูบของปั้มน้ำเพียงอย่างเดียว เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลได้ง่ายขึ้น

4.2.3 การทดสอบการดูดซับสารปรอท

1) ผสมชิ้นยางเล็กๆ และกรวดขนาดใกล้เคียงกันเพื่อใช้เป็นวัสดุประสาน ผสมให้วัสดุทั้งสองเข้ากันแล้วใส่ลงในหอดูดซับที่เตรียมไว้ โดยใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของยางต่อกรวด เป็น 90:10 พร้อมทั้งอัดด้วยเหล็กกระทุ้ง วัดสัดส่วนของช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการบรรจุ

2) ต่อชุดหอดูดซับให้สารละลายปรอทที่มีอยู่ไหลผ่านออกจากทางด้านล่าง ขึ้นสู่ด้านบน โดยปรับอัตราการไหลได้ประมาณ 5.1 ml/min

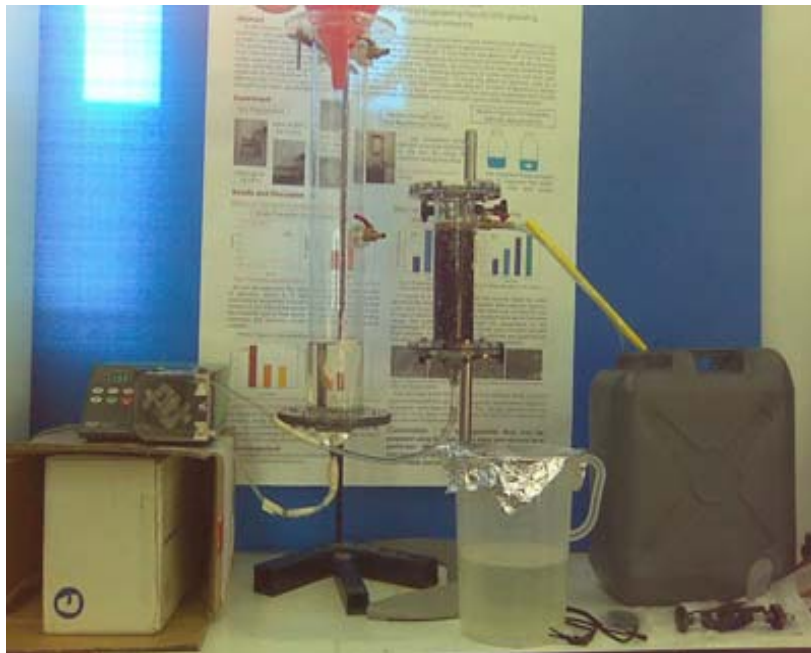
3) จากนั้นเก็บสารตัวอย่างที่ทางออก ณ เวลาต่างๆ โดยนับเวลาเป็น 0 นาทีเมื่อสังเกตเห็นของเหลวหยดแรกไหลออกที่ทางออกของหอดูดซับ

4) เก็บตัวอย่างสุดท้ายจากถังเก็บสารละลายปรอทไหลออกเพื่อตรวจสอบดูว่าปรอทที่นำมาบำบัดนั้นอยู่ในระดับที่สามารถนำไปทิ้งได้หรือไม่

5) การเก็บตัวอย่าง จะใส่ขวดพลาสติกเก็บตัวอย่าง แล้วใส่กรดไนตริก 10% (HNO_3) ลงไปประมาณ 2-3 หยด แล้วจึงนำไปส่งตรวจวัดความเข้มข้นสารปรอทโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS)

6) ทดลองเช่นเดียวกัน แต่ปรับอัตราการไหลเป็น 15 ml/min และ 20 ml/min เพื่อศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของสารละลายผ่านหอดูดซับ

7) ทดลองเช่นเดียวกัน แต่ปรับสัดส่วนของยางต่อกรวดเป็น 70:30 และ 50:50



รูปที่ 1 แสดงการต่อชุดหอดูดซับ

4.2.4 การทดลองการชะออกของปรอทจากซึ้นยาง (leaching)

ใช้วิธีชะออก (leaching) โดย ชะน้ำผ่านยางที่ผ่านการดูดซับซึ่งยังคงบรรจุอยู่ในหอดูดซับหลังจากการทดลองในหอดูดซับเสร็จสิ้น หลังการดูดซับแต่ละครั้งจะชะด้วยน้ำสะอาดออกเป็นจำนวน 4 ครั้ง แต่แต่ละครั้งเก็บตัวอย่างน้ำใส่ขวดพลาสติกพร้อมทั้งหยดไนตริกลงไป 2-3 หยด แล้วจึงนำไปตรวจสอบความเข้มข้นของปรอทที่ถูกชะออกมา

5. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 ผลการทดลองการดูดซับแบบกะ (Batch Adsorption)

5.1.1 การดูดซับของยางที่ผ่านการทำให้คงรูปและไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูป

แม้ว่าซึ้นยางจะไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูป (unvaculnized) แต่ในกระบวนการผสมกัมมะถันกับยางนั้น เกิดการเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นพลังงานความร้อนซึ่งส่งผลทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างกัมมะถันและยางได้บางส่วน จึงพบว่ายางที่ไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูปสามารถดูดซับปรอทได้เช่นกัน แต่ปริมาณการดูดซับไม่สอดคล้องกับฟรอนด์ลิชไอโซเทอม ซึ่งบ่งบอกถึงการดูดซับที่ความเข้มข้นที่สมดุลของปรอทค่าต่างๆ และมีความสามารถในการดูดซับที่ไม่แน่นอน ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโดยใช้ค่า ร้อยละของการดูดซับ (Adsorption percentage) ซึ่งมีนิยามคือ

$$\% \text{ adsorption} = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ C_o และ C_e แทนความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุลและที่เวลาเมื่อเริ่มต้น ตามลำดับ

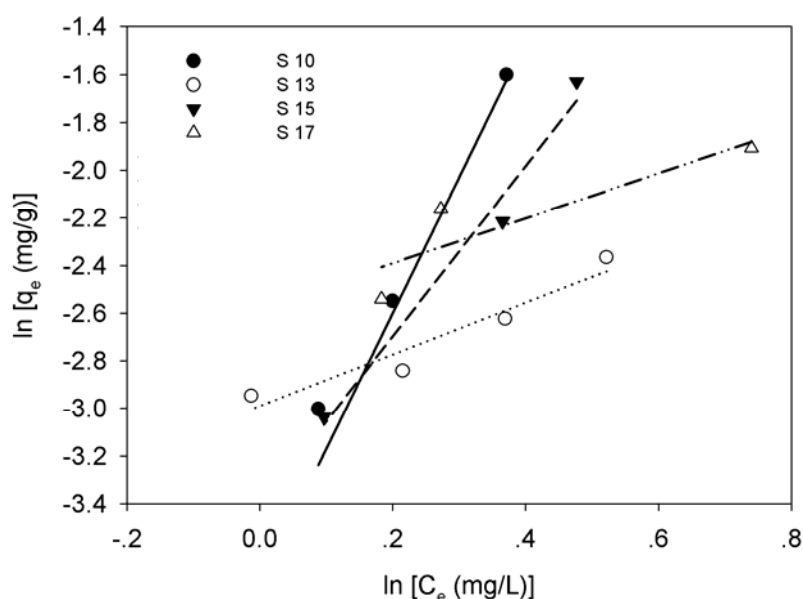
ตารางที่ 3: เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับปรอทของยางที่ผ่านการทำให้คงรูปและไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูป

สูตรยาง	ร้อยละการดูดซับของซินยาง	
	ยางที่ผ่านการทำให้คงรูป	ยางที่ไม่ผ่านการทำให้คงรูป
S10	59.75 – 80.52	17.94 – 46.33
S13	53.69 – 72.58	29.05 – 51.02
S15	52.83 – 69.41	2.69 – 51.11
S17	41.77 – 93.33	0.41 – 72.52

ความเข้มข้นของปรอทในน้ำปนเปื้อนปรอทเมื่อเริ่มต้น ตรวจสอบพบว่ามีค่าประมาณ 3.6 ppm จากตารางที่ 3 พบว่ายางที่ผ่านการทำให้คงรูป สามารถดูดซับปรอทได้ดีกว่ายางที่ไม่ผ่านการทำให้คงรูปเป็นอย่างมาก ซึ่งบอกเป็นนัยว่าการดูดซับปรอท(II) โดยซินยางนั้นเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปรอทและกำมะถันที่ผ่านการทำปฏิกิริยาในโครงสร้างร่างแห ดังที่ได้รายงานโดย Danwanichakul *et al.* (2007) ในงานวิจัยนั้นได้ทดสอบการดูดซับของซินยางที่กำจัดกำมะถันที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาออกไป และพบว่าความสามารถในการดูดซับขึ้นกับปริมาณกำมะถันที่ทำปฏิกิริยา ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบผลของปริมาณกำมะถันในระบบการคงรูปแบบ SEV ดังแสดงในหัวข้อต่อไป

5.1.2 ผลของปริมาณกำมะถันที่ใช้ในการคงรูปยาง

เมื่อนำผลการทดลองการดูดซับโดยใช้ซินยางที่ใช้ปริมาณกำมะถันต่างๆ กันได้แก่ 1.0, 1.3, 1.5 และ 1.7 phr มาทดสอบเปรียบเทียบกันและรายงานผลในรูปของฟรังก์ลิชไอโซเทอมได้ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2: แสดงฟรังก์ชันไอโซเทอมของการดูดซับปรอท(II) โดยใช้ชั้นยางที่มีปริมาณกำมะถันต่างๆ กัน

จากรูปที่ 2 จะได้จุดตัดแกนและความชันของกราฟซึ่งนำมาคำนวณดังสมการที่ 3 จะได้ค่าของพารามิเตอร์ของฟรังก์ชันต่างๆ กันดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4: แสดงค่าของพารามิเตอร์ของฟรังก์ชัน K_F และ n สำหรับการดูดซับที่ใช้ชั้นยางที่มีปริมาณกำมะถันต่างๆ กัน

สูตรยาง	K_F (mg/g)/(mg/L) ^{1/n}	n
S10	0.031	1.08
S13	0.050	1.32
S15	0.033	1.33
S17	0.076	1.43

ดังจะเห็นได้จากตารางที่ 4 ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกำมะถันในสูตรยาง ยางสามารถดูดซับปรอทได้ดียิ่งขึ้น โดยสังเกตจากค่าของ K_F ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่าผลการทดลองของ S15 พบข้อผิดพลาด S15 ควรจะดูดซับปรอทได้ดีกว่า S13 แต่ผลการทดลองกลับพบว่าดูดซับได้น้อยกว่า ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะในการบดผสมยางนั้น อาจเกิดการกระจายของกำมะถันที่ไม่ดีเท่าที่ควร จึงเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงที่ไม่ดี ยังผลให้การดูดซับไม่มีประสิทธิภาพ จากแนวคิดว่าการดูดซับน่าจะเกิดจากกำมะถันที่ทำปฏิกิริยา จึงได้ทดสอบหาปริมาณการเชื่อมโยงและแสดงผลเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ K_F

ค่าปริมาณการเชื่อมโยงสามารถคำนวณโดยใช้สมการ Flory-Rhener Equation

$$-\ln(1-V_r) - V_r - \chi V_r^2 = V_0 n (V_r^{1/3} - \frac{V_r}{2}) \quad (8)$$

เมื่อ V_r คือสัดส่วนปริมาตรของยางในสภาวะที่บวมตัวที่จุดสมดุลหรือจุดอิ่มตัว
 V_0 คือปริมาตรต่อโมลของโพลูอิน
 n คือปริมาณการเชื่อมโยง
 χ คือสัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างยางและโพลูอิน (interaction parameter) ซึ่งคำนวณได้จาก

$$\chi = \frac{0.34 + (\delta_s - \delta_r)^2 V_0}{RT} \quad (9)$$

เมื่อ δ_s, δ_r คือค่าตัวแปรของความสามารถในการถูกละลายของโพลูอินและยางธรรมชาติ ตามลำดับ เมื่อ

$$V_r = \frac{m_0 \phi (1 - \alpha) / \rho_r}{(m_0 \phi (1 - \alpha) / \rho_r) + (m_1 - m_2) / \rho_s} \quad (10)$$

เมื่อ m_0 คือมวลของยางก่อนแซ่โพลูอิน

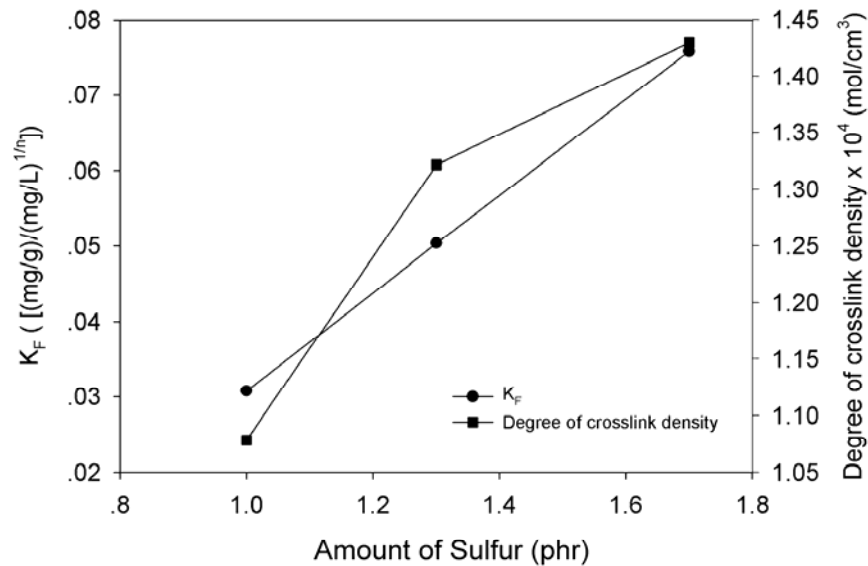
m_1 คือมวลของยางหลังแช่โทลูอีนที่สภาวะอิ่มตัว

m_2 คือมวลของยางหลังเข้าสู่อบ

ρ_s, ρ_r คือ ความหนาแน่นของโทลูอีนและยางธรรมชาติ ตามลำดับ

ϕ คือสัดส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติในยางธรรมชาติที่บดผสมสารเคมีอื่นๆ

ในรูปที่ 3 หรือตารางที่ 5 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า ค่าของปริมาณการเชื่อมโยงและพารามิเตอร์ K_F มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นเงื่อนไขของการดูดซับปรอทโดยใช้ชั้นยางนั้น จึงขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงอันบ่งถึงปริมาณกัมมันต์ที่ทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของยางธรรมชาติ ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ (Danwanichakul *et al*, 2007) ได้เปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของชั้นยางที่ผ่านการทำให้คงรูปโดยระบบการคงรูปต่างกัน และพบว่าความสามารถในการดูดซับปรอทขึ้นกับปริมาณการเชื่อมโยงเช่นเดียวกัน จากตารางที่ 5 พบว่ายางสูตร S15 มีค่าปริมาณการเชื่อมโยงสูงกว่า S13 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เป็นการยืนยันว่าการบดผสมของ S15 เป็นไปอย่างไม่มีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3: แสดงแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นของปริมาณการเชื่อมโยงและพารามิเตอร์ K_F เมื่อเพิ่มปริมาณกัมมันต์ในยาง

ตารางที่ 4: แสดงค่า K_F และปริมาณการเชื่อมโยงของยางชนิดต่างๆที่ผ่านการทำให้คงรูปแล้ว

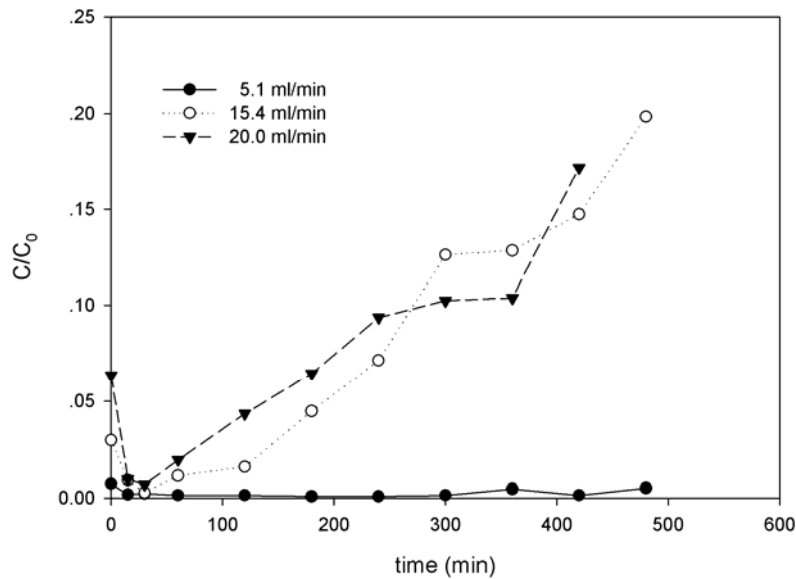
สูตรยาง	K_F (mg/g)/(mg/L) ^{1/n}	ค่าปริมาณการเชื่อมโยง x 10 ⁴ Mol/cm ³
S10	0.031	1.079
S13	0.050	1.322
S15	0.033	1.332
S17	0.076	1.430

จากผลการทดลองที่พบว่าปริมาณการเชื่อมโยงมีแนวโน้มเดียวกันกับความสามารถในการดูดซับปรอทของชั้นยางที่ผ่านการขึ้นรูป ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการออกแบบชั้นยางให้มีความสามารถในการดูดซับปรอทเพิ่มขึ้นได้โดยการปรับค่าปริมาณการเชื่อมโยง สำหรับผลการทดลองแบบกะนี้ สูตรยางที่ให้ค่าการดูดซับมากที่สุดคือ S17 ดังนั้น ในการทดลองการบำบัดสารปรอทจากน้ำปนเปื้อนโดยใช้หูดูดซับในลำดับต่อไปจึง ใช้ยางในสูตร S17 นี้ในการทดลอง

5.2 การทดลองแบบหอดูดซับ (Dynamic Adsorption)

5.2.1 ผลของอัตราการไหลของสารละลายโปรทเข้าสู่หอ

น้ำปนเปื้อนโปรทที่ไหลเข้าหอดูดซับมีความเข้มข้น 2.185 ppm หอดูดซับบรรจุอย่างผสมกับกรวดในอัตราส่วน 90:10 ได้ทดลองเปลี่ยนอัตราการไหลเป็น 5.1, 15.4 และ 20.0 ml/min โดยให้ไหลผ่านหอดูดซับนานประมาณ 8 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นรูป breakthrough curve ของการดูดซับโปรทในหอดูดซับ



รูปที่ 4: แสดงความเข้มข้นของน้ำที่ถูกบำบัดโดยหอดูดซับที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเริ่มต้น เมื่อน้ำปนเปื้อนไหลผ่านหอและเริ่มไหลออกที่ทางออกจะมีความเข้มข้นไม่เท่ากับศูนย์เหมือนดังใน breakthrough curve ทั่วไปที่ใช้ตัวดูดซับมีขนาดเล็กหรือมีรูปพรุนมาก เพราะชั้นยางผสมกรวดนี้มีความไม่ชอบน้ำ ทำให้ต้องใช้เวลาลักพักในการทำให้ผิวของยางเปียกทั่วถึงเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นที่ออกมาเมื่อเริ่มแรกสูงขึ้นด้วย และจึงค่อยตกลงและมีแนวโน้มสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป อย่างไรก็ตามพบว่า ในช่วงเวลา 8 ชั่วโมงของการทำการทดลองความเข้มข้นที่ทางออกยังคงเพิ่มไม่มากนัก ห่างไกลกับความเข้มข้นเมื่อเริ่มต้น ซึ่งแสดงถึงหอดูดซับยังไม่เกิดการอิ่มตัวทั่วทั้งหอ และยังสามารถใช้บำบัดต่อไปได้ อย่างไรก็ตาม ในการทดลองจำเป็นต้องระบุเวลาที่เรียกว่า breakthrough time ซึ่งหมายถึงเวลาที่ใช้ในการบำบัดโดยหอดูดซับก่อนจะเปลี่ยนหอดูดซับ เมื่อความเข้มข้นที่ทางออกสูงเกินกว่าระดับที่ต้องการบำบัด ในที่นี้หากให้ความเข้มข้นสูงสุดที่ทางออกมีค่าเท่ากับ 0.005 ppm อันเป็นความเข้มข้นที่ยอมรับตามพระราชบัญญัติการปล่อยน้ำทิ้ง จะพบว่า C/C_0 ที่ breakthrough time จะมีค่าเท่ากับ $0.005/2.185 = 0.0023$

ความสามารถในการดูดซับเมื่อเปรียบเทียบในแต่ละการทดลองจะใช้ ร้อยละของการดูดซับซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\% \text{ adsorption} = \left(\frac{\int_0^{t_{\text{final}}} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt}{\int_0^{t_{\text{final}}} dt} \right) \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ c = ความเข้มข้นของปรอทที่อยู่ในสารละลายที่เวลาใดๆ (mg/L)

c_0 = ความเข้มข้นของปรอทที่อยู่ในสารละลายก่อนผ่านชั้นยาง (mg/L)

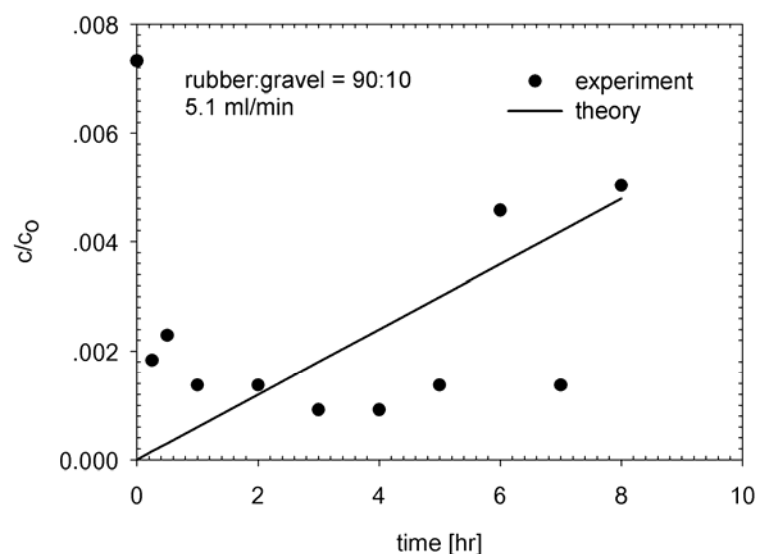
t = เวลาทั้งหมด (min)

เมื่อนำพื้นที่ใต้กราฟของรูปที่ 4 มาคำนวณในสมการที่ (11) จะสามารถหาค่าร้อยละของการดูดซับได้ดังนี้

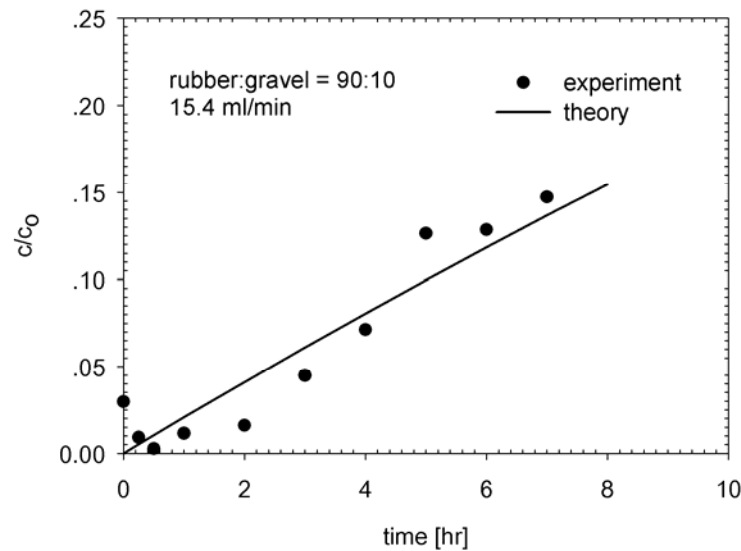
ตารางที่ 5: แสดงค่าความสามารถในการดูดซับของหอดูดซับที่อัตราการไหลต่างๆ

อัตราการไหล (ml/min)	ความหนาแน่น เฉลี่ย (g/ml)	สัดส่วน ช่องว่าง (%)	Break through time (min)	ร้อยละการดูดซับ
5.1	0.69	29.45	317.14	99.84
15.4	0.68	30.36	30	94.20
20.0	0.69	28.72	30	93.48

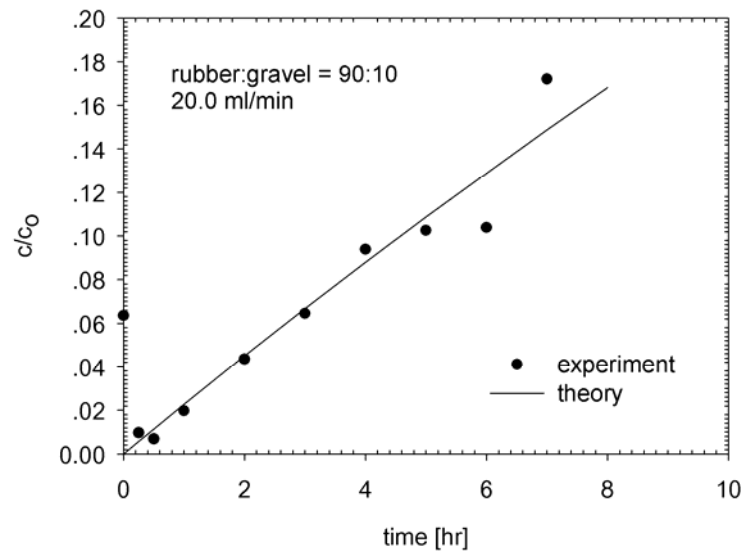
ตารางที่ 5 รวบรวมผลการคำนวณเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของน้ำปนเปื้อนผ่านหอดูดซับในการทดลองทั้งสามครั้งใช้อัตราส่วนของยางต่อกรวดเท่ากับ 90:10 เท่ากัน และได้มีการบรรจุยางและกรวดในลักษณะที่ใกล้เคียงกันเมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนช่องว่างที่เกิดขึ้นและความหนาแน่นเฉลี่ยของวัสดุทั้งหอดูดซับ จากตารางพบว่า ร้อยละของการดูดซับของทุกการทดลองมีค่าสูงมาก เกินกว่า 90% แสดงถึงประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำปนเปื้อนปรอทความเข้มข้น 2.185 ppm ได้ดีเยี่ยม และพบว่าร้อยละของการดูดซับและ breakthrough time ลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้เวลาสัมผัสระหว่างยางและน้ำปนเปื้อนมีน้อยลง จึงเกิดการถ่ายโอนมวลสารจากเฟสของสารละลายปรอทมายังผิวของชั้นยางได้น้อยลง ทำให้เกิดการดูดซับโดยกัมมันต์ในโครงสร้างของยางน้อยลง เนื่องจากประสิทธิภาพของการดูดซับที่อัตราการไหลช้าที่สุดในที่นี้คือ 5.1 ml/min ดีที่สุด จึงสามารถใช้บำบัดได้นานที่สุดคือประมาณ 317 นาที จึงจำบับัดน้ำปนเปื้อนให้ความเข้มข้นเหลือน้อยกว่า 0.005 ppm ในขณะที่เมื่อให้อัตราการไหล 15.4 และ 20 ml/min จะต้องเปลี่ยนหอดูดซับภายในเวลา 30 นาที



รูปที่ 5: เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการดูดซับในหอดูดซับที่อัตราการไหล 5.1 ml/min



รูปที่ 6: เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการดูดซับในหลอดดูดซับที่อัตราการไหล 15.4 ml/min



รูปที่ 7: เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองการดูดซับในหลอดดูดซับที่อัตราการไหล 20.0 ml/min

ได้เปรียบเทียบผลการทดลองการดูดซับกับแบบจำลองการดูดซับที่พัฒนาไว้ในสมการที่ 6 ในรูปที่ 5 ถึง 7 สำหรับอัตราการไหล 5.1, 15.4 และ 20.0 ml/min ตามลำดับ

สมการอธิบายการดูดซับในหลอดดูดซับที่พัฒนาไว้คือ

$$\frac{c}{c_0} = \frac{a}{b} (1 - e^{-bt}) \quad (6)$$

เมื่อ a แทน $\frac{Q}{AL}$ และ b แทน $\frac{Q}{AL} + \frac{6(1-\epsilon)k_c}{\epsilon D_p}$

แต่สมการที่ใช้ fitting ผลการทดลองนั้นคือ

$$\frac{C}{C_0} = (1 - e^{-bt}) \quad (7)$$

นั่นคือ สมมติว่าค่า a และ b มีค่าใกล้เคียงกัน ในรูปที่ 5, 6 และ 7 ได้ใช้การ fitting สมการ (7) กับผลการทดลองเพื่อหาค่า b ในสมการที่ (6) พบว่า ค่า b มีค่าเท่ากับ 0.0006, 0.021 และ 0.023 h^{-1} สำหรับอัตราการไหล 5.1, 15.4 และ 20.0 ตามลำดับ นั่นคือเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น (Q เพิ่มขึ้น) จะทำให้ค่า b เพิ่มขึ้น ดังที่ปรากฏในสมการ อย่างไรก็ตาม พบว่ารูปที่ 6 นั้น ใช้สมการที่ (6) อธิบายปรากฏการณ์การดูดซับในหอดูดซับจริงได้ไม่ดีนัก ทั้งนี้เป็นไปได้ว่า ผลของอัตราการไหลที่พาสารออกมา กับอัตราการถ่ายโอนมวลมีผลที่สำคัญต่อการดูดซับทั้งคู่ ไม่เหมือนกับในกรณีของรูปที่ 6 และ 7 ที่สมการ (7) ใช้อธิบายได้ค่อนข้างดี จึงเป็นไปได้ว่าในกรณีที่อัตราการไหลสูงนั้น ทำให้ผลของการไหล หรือการพาสารมีความสำคัญมากกว่าการแพร่ของสารไปยังผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับยาง และที่อัตราการไหลสูงนั้น ดูเหมือนว่าสมมติฐานของความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปตามความสูงของหอดูดซับว่าเป็นแบบเส้นตรงจะสมเหตุสมผล

ถึงแม้ว่าผลการทดลองกับสมการที่ (7) ในกรณีการไหลที่อัตราการไหลสูงจะสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่สมการที่ (7) ไม่สามารถอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นเมื่อเริ่มต้นที่เวลาเท่ากับ 0 ได้ ดังนั้นความซับซ้อนในเรื่องของจลนพลศาสตร์ของการ wetting ที่ผิวของชั้นยางจำเป็นต้องนำมาพิจารณาร่วมด้วยเพื่อพัฒนาสมการให้ดียิ่งขึ้น

5.2.2 การหลุดออกของปรอทจากหอดูดซับจากการทดลองในหัวข้อ 5.2.1

จากการทดลองการดูดซับได้ผลดังหัวข้อ 5.2.1 แล้ว จึงทดสอบการชะหลุดออกของปรอทโดยเทน้ำสะอาดในหอดูดซับ 4 ครั้ง แล้วนำน้ำไปตรวจสอบหาความเข้มข้นของปรอทที่มีอยู่ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6: แสดงค่าความเข้มข้นของปรอทในการทดลอง leaching (ผลจากการเปลี่ยนอัตราการไหล)

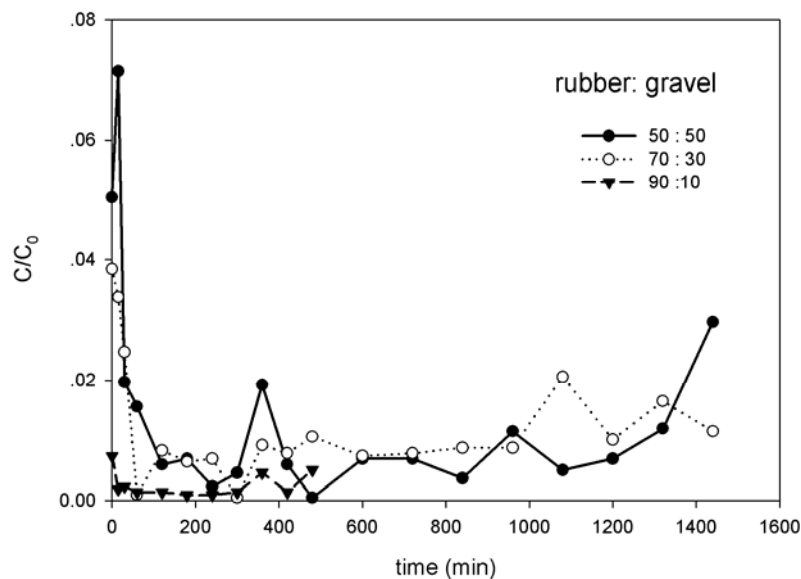
การ leaching ครั้งที่	ความเข้มข้น (ppm) การทดลองดูดซับที่อัตรา การไหล 5.1 ml/min	ความเข้มข้น (ppm) การทดลองดูดซับที่อัตรา การไหล 15.4 ml/min	ความเข้มข้น (ppm) การทดลองดูดซับที่อัตรา การไหล 20.0 ml/min
1	0.021	0.013	0.053
2	0.001	0.003	0.007
3	<0.001	<0.001	0.002
4	<0.001	<0.001	0.001
ความเข้มข้น เฉลี่ย (ppm)	0.0055	0.004	0.016
ร้อยละการ คายออก	0.057	0.013	0.040

จากตารางที่ 6 พบว่าการชะออกโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ ทำให้ปรอทหลุดออกมาปริมาณน้อยมาก การชะในครั้งแรกจะให้ความเข้มข้นของปรอทมากที่สุดเพราะเป็นการชะน้ำที่ค้างอยู่ในช่องว่างในหอดูดซับภายหลังการทดลองการดูดซับในทันที แต่หลังจากนั้นความเข้มข้นที่ถูกชะออกมาจะน้อยลงตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นปริมาณที่หลุดออกมาต่อปริมาณที่ดูดซับไว้ทั้งหมดโดยชั้นยาง เมื่อคิดเป็นร้อยละเรียกว่า ร้อยละการคายออกพบว่า ร้อยละการคายออกมีค่าระหว่าง 0.013-0.057 ซึ่งมีค่าน้อยมาก ผลการทดลองสอดคล้องกับผล

ของ Danwanichakul et al (2007) ซึ่งได้ทดลองการหลุดออกของชิ้นยางในแบบกะ โดยนำชิ้นยางที่ใช้งานแล้วไปแช่ในน้ำสะอาดเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่าเกิดการหลุดออกน้อยกว่า 0.1-0.8%

5.2.3 ผลของอัตราส่วนการผสมของยางและกรวดที่มีต่อการดูดซับ

จากการทดลองในหัวข้อ 5.2.1 พบว่าอัตราการไหลต่ำสุดให้ผลการบำบัดประพจน์ที่ดีที่สุด ดังนั้นในส่วนนี้จึงใช้อัตราการไหลต่ำสุดคือ 5.1 ml/min และปรับเปลี่ยนสัดส่วนของยางต่อกรวดเป็น 70:30 และ 50:50 เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเดิมที่ใช้ 90:10 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8: เปรียบเทียบผลของสัดส่วนยางต่อกรวดในการทดลองการดูดซับในหลอดดูดซับ

ในการทดลองสัดส่วน 90:10 ได้ใช้เวลาในการทดลอง 8 ชั่วโมง แต่เนื่องจากความเข้มข้นที่ทางออกยังไม่เท่ากับความเข้มข้นที่ทางเข้า บอกรเป็นนัยว่ายังสามารถทำการทดลองต่อไปได้ ดังนั้นในการทดลองของ 70:30 และ 50:50 จึงเพิ่มเวลาในการเก็บตัวอย่างนานถึง 24 ชั่วโมง จากรูปที่ 8 เห็นได้ชัดว่ายังสามารถทดลองต่อไปได้อีกนานกว่า 24 ชั่วโมง

รูปที่ 8 ให้ผลเมื่อเริ่มต้นเช่นเดียวกับ รูปที่ 4 นั่นคือ ความเข้มข้นไม่เท่ากับศูนย์ อันเนื่องมาจากยางและกรวดมีความไม่ชอบน้ำ จึงต้องการเวลาสักระยะในการทำให้พื้นผิวของสารทั้งสองเปียกน้ำ แล้วจึงเกิดการดูดซับได้ดียิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบการใช้ปริมาณกรวดที่เพิ่มขึ้นจะพบว่า ความเข้มข้นที่ทางออกเมื่อเริ่มต้นสูงขึ้นด้วย บอกรเป็นนัยว่ากรวดที่ใช้ในการทดลองนี้มีความไม่ชอบน้ำมากกว่ายาง จึงเกิดการเปียกผิวที่ช้ากว่า การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับทำได้โดยการเปรียบเทียบร้อยละการดูดซับดังเช่นการทดลองที่ผ่านมา ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7: แสดงค่าความสามารถในการดูดซับในหลอดดูดซับเมื่อใช้สัดส่วนยางต่อกรวดต่างๆ กัน

อัตราส่วน ยาง : กรวด	ความหนาแน่น เฉลี่ย (g/ml)	สัดส่วน ช่องว่าง (%)	ร้อยละการดูดซับ (ถึง 8 ชั่วโมง)	ร้อยละการดูดซับ (ถึง 24 ชั่วโมง)
50 : 50	1.01	32.36	99.70	99.07
70 : 30	0.85	31.45	99.80	98.96
90 : 10	0.69	29.45	99.84	-

จากตารางพบว่าเมื่อสัดส่วนของกรวดมากขึ้นทำให้สัดส่วนช่องว่างมากขึ้น เนื่องจากเม็ดกรวดมีขนาดใหญ่กว่าชั้นยางที่ติดเล็กน้อย และพบว่าความหนาแน่นโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สัดส่วนกรวดเพิ่มขึ้น เพราะความหนาแน่นของกรวดมากกว่าความหนาแน่นของชั้นยาง เมื่อพิจารณาร้อยละการดูดซับพบว่า มีค่าสูงมากถึง 99% ในทุกการทดลอง และมีค่าไม่แตกต่างกันมาก เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาการทดลองยาวนานถึง 24 ชั่วโมง พบว่าการเติมกรวดมากขึ้นทำให้ร้อยละการดูดซับดีขึ้นเล็กน้อย น่าจะเป็นเพราะการผสมกรวดให้มากขึ้นทำให้น้ำหนักในหลอดดูดซับมากขึ้น ซึ่งช่วยทำให้ยางไม่เกิดการลอยตัวเมื่อสารละลายไหลผ่านดังปรากฏให้เห็นในการทดลองที่ใช้ยางปริมาณมากๆ การลอยตัวของยางทำให้เกิดช่องว่างการไหล (channeling) ขนาดใหญ่ จึงปล่อยให้สารละลายไหลผ่านออกไป โดยไม่เกิดการดูดซับ ประสิทธิภาพการดูดซับจะน้อยลง นอกจากนี้ การใช้กรวดมากขึ้นทำให้ยางกระจายตัวออกจากกันในหลอดดูดซับ ไม่เกาะติดกันเอง ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับที่มากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับได้

5.2.4 การหลุดออกของปรอทจากหลอดดูดซับจากการทดลองในหัวข้อ 5.2.2

ตารางที่ 8: แสดงค่าความเข้มข้นของปรอทในการทดลอง leaching (ผลของสัดส่วนยางต่อกรวด)

การ leaching ครั้งที่	ความเข้มข้นที่ชะออก (ppm) ในการทดลอง ยางต่อกรวด = 50:50	ความเข้มข้นที่ชะออก (ppm) ในการทดลอง ยางต่อกรวด = 70:30	ความเข้มข้นที่ชะออก (ppm) ในการทดลอง ยางต่อกรวด = 90:10
1	0.013	0.055	0.021
2	0.003	0.008	0.001
3	<0.001	0.003	<0.001
4	<0.001	0.002	<0.001
ความเข้มข้น เฉลี่ย (ppm)	0.004	0.017	0.0055
ร้อยละการคาย ออก	0.023	0.131	0.045

จากตารางที่ 8 พบว่าเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา เมื่อชะออกด้วยน้ำสะอาดในครั้งแรกจะทำให้ น้ำที่ติดค้างอยู่ในช่องว่างภายในหลอดดูดซับหลุดออกมาก่อน ซึ่งทำให้ความเข้มข้นสูงที่สุด และพบว่าในการชะครั้งต่อไปจะมีความเข้มข้นลดลงเรื่อยๆ เมื่อคำนวณเป็นร้อยละของการดูดซับทั้งหมด จะอยู่ในช่วง 0.023-0.131% ซึ่งนับว่าน้อยเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดปรอทที่ปนเปื้อนในน้ำโดยใช้ขึ้นยารธรรมชาติ โดยเริ่มศึกษาจากการดูดซับแบบกะ เพื่อพิสูจน์ผลของปริมาณกัมมะถันรวมถึง ความแตกต่างระหว่างกัมมะถันในยาง ที่ผ่านการทำให้คงรูปและไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูป เพื่อนำสูตรยางที่ดีที่สุดไปใช้ในการทดลองการบำบัดโดยใช้หอดูดซับต่อไป การศึกษาการทดลองแบบกะ โดยใช้ยางที่มีปริมาณกัมมะถันแตกต่างกันคือ 1.0, 1.3, 1.5 และ 1.7 phr ในเบื้องต้นนั้นพบว่ายางที่บดผสมกัมมะถันโดยไม่ได้ผ่านการทำให้คงรูปสามารถดูดซับปรอทได้บ้าง แต่ไม่เป็นระบบสอดคล้องกับปริมาณกัมมะถันที่ใช้ ในขณะที่ยางที่บดผสมกัมมะถันแล้วผ่านการทำให้คงรูปให้ความสามารถในการดูดซับเป็นแนวโน้มเดียวกัน คือปริมาณการดูดซับดียิ่งขึ้นเมื่อใช้ปริมาณกัมมะถันมากขึ้น นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบปริมาณการเกิดการเชื่อมโยงในขึ้นยางเมื่อใช้ปริมาณกัมมะถันซึ่งเป็น crosslinking agent ในที่นี้มากขึ้น พบว่าให้แนวโน้มที่เพิ่มตามปริมาณกัมมะถัน จากหลักฐานทั้งสอง น่าจะพอสรุปได้ว่าการดูดซับของปรอทน่าจะเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างปรอทกับกัมมะถันที่อยู่ในโครงสร้างการเชื่อมโยง เมื่อยางสัมผัสกับปรอท เกิดการสลายพันธะระหว่างกัมมะถันและยางธรรมชาติ แล้วจึงทำปฏิกิริยากับปรอท เกิดการดักปรอทไว้ในโครงสร้างของการเชื่อมโยงนั้น

สำหรับการทดสอบการชะออกของปรอทจากชั้นยางที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยใช้น้ำสะอาดไหลผ่าน 4 รอบพบว่า ปริมาณของปรอทที่หลุดออกมาน้อยมาก การคายออกที่น้อยเช่นนี้ น่าจะยืนยันว่าการดูดซับของปรอทโดยยางนั้นเกิดจากปฏิกิริยาซึ่งทำให้การดูดซับน่าจะเป็นการดูดซับทางเคมี (chemisorptions) ซึ่งเป็นการดูดซับที่ผันกลับไม่ได้ อย่างธรรมชาติที่ผ่านการทำให้คงรูปจึงน่าจะเป็นตัวดูดซับปรอทที่ดีในการยึดติดปรอทไว้แบบถาวร (immobilization)

18

1. ราคาที่ใช้ในการบดผสมบางในแต่ละสูตร

ตารางที่ 9: ตารางแสดงค่าใช้จ่ายส่วนผสมในการบดยางแต่ละสูตรทั้งในการทดลองแบบกะและหอดูดซับ

ส่วนประกอบ	ราคาของ ส่วนประกอบ (บาท/kg)	S10 (บาท/kg)	S13 (บาท/kg)	S14 (บาท/kg)	S17 (บาท/kg)
STR 20	83.1	60	59.87	59.78	59.70
Stearic acid	45	9.75	9.73	9.71	9.70
Zinc oxide	130	0.94	1.22	1.40	1.59
CBS	130	4.69	4.68	4.68	4.67
TMTD	160	1.44	1.44	1.44	1.44
N-330	60	0.11	0.11	0.11	0.11
Sulfur	150	1.01	1.08	1.08	1.08
รวม		78.01	78.13	78.20	78.28

2. รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดต่อกิโลกรัมของยางแต่ละสูตร

ตารางที่ 10: แสดงค่าไฟฟ้าต่อกิโลกรัมยาง

ปริมาณกำมะถัน (phr)	ราคาสารเคมี (บาท/kg)	ค่าไฟ (บาท/kg)		รวม ค่าใช้จ่าย (บาท/kg)
		การบด (บาท/kg)	การทำให้คงรูป (บาท/kg)	
1.0	78.01	43.65	64.8	186.46
1.3	78.13	43.65	58.5	180.28
1.5	78.2	43.65	55.7	177.55
1.7	78.28	43.65	49.6	171.53

ค่าไฟฟ้าคำนวณได้จากการคำนวณหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งได้จากผลคูณของกำลังไฟฟ้า (kW) กับจำนวนชั่วโมงที่ใช้ (h) แล้วคูณด้วยค่าไฟฟ้า 4 บาทต่อหนึ่งหน่วยไฟฟ้า ตารางที่ 10 แสดงค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าจากกิจกรรมที่ต้องใช้ไฟฟ้าต่างๆ และราคาของสารเคมีต่างๆ ในแต่ละสูตร เมื่อนำค่าใช้จ่ายทั้งหมดมารวมกันพบว่ายางแต่ละสูตรนั้นเสียค่าใช้จ่าย (บาทต่อ kg) ไม่แตกต่างกันมากโดยยางที่มีปริมาณกำมะถันมากจะมีราคาค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าเนื่องจากใช้เวลาในการทำให้คงรูปน้อยกว่า

3. ราคาที่ใช้ในการทดลองแบกะสำหรับยางแต่ละสูตร

ตารางที่ 11: เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของยางในการทดลองแบบกะ

ปริมาณ กำมะถัน (phr)	น้ำหนักยาง ที่ใช้ (kg)	ปริมาณการดูดซับ (mg โปรท/kg ยาง)	ราคาต่อปริมาณโปรท ในชั้นยาง (บาท/mg โปรท)
1.0	0.003	768	0.24
1.3	0.003	645	0.28
1.5	0.003	811	0.22
1.7	0.003	1024	0.17

พบว่ายางที่ใช้กำมะถัน 1.7 phr เสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

4. ราคาที่ใช้ในการทดลองแบบหอดูดซับในการทดลองหาอัตราส่วนยางต่อกรวด

ตารางที่ 12: ตารางเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายยางในการทดลองหอดูดซับที่อัตราส่วนยางต่อกรวดต่างๆ

อัตราส่วนยาง : กรวด	น้ำหนักยางที่ใช้ (kg)	ราคา (บาท)	ราคาต่อปริมาณโปรทในชั้น ยาง (บาท/mgโปรท)
90:10	0.30	57.23	10.72
70:30	0.23	17.82	1.43
50:50	0.17	11.68	0.80

จากตารางพบว่าที่อัตราส่วนยางต่อกรวด 50:50 นั้นราคาต่ำกว่าราคาของยางอัตราส่วน 90:10 ก่อนข้างมาก เพราะใช้ยางปริมาณน้อย แต่จากการทดลองพบว่าความสามารถในการดูดซับก่อนข้างใกล้เคียงกันทุกอัตราส่วน ดังนั้นจึงควรใช้อัตราส่วน 50:50 มากกว่าเนื่องจากสามารถทนแรงดันจากการไหลที่สูงขึ้นได้ดี และหากใช้ในปริมาณที่มากจะประหยัดต้นทุนได้ถูกกว่าแบบอัตราส่วน 90:10 ถึงกว่าครึ่ง อีกทั้งราคาของกรวดก่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับยาง (ราคาของกรวด 1 kg = 10 บาท)

หากเปรียบเทียบต้นทุนในการบำบัดเมื่อใช้ยางที่ผลิตได้กับถ่านกัมมันต์ที่ขายเชิงพาณิชย์โดยมีราคาประมาณ 100 บาทต่อหนึ่งกิโลกรัม Vazquez และคณะ (2002) พบว่าเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกต้นสนมาบำบัดโปรทในระบบแบบกะ ที่ความเข้มข้นของโปรทประมาณ 3 ppm ถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพดูดซับโปรทได้ 2 mg/กรัมถ่านกัมมันต์ ดังนั้น เมื่อคิดเป็นค่าใช้จ่ายจะได้ 0.05 บาทต่อมิลลิกรัมโปรท ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายต่ำสุดในที่นี้คือ 0.17 บาทต่อมิลลิกรัม อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้ในการพัฒนาทางที่ผ่านการคงรูปให้เป็นตัวดูดซับโปรทที่ดีขึ้นได้หากเพิ่มปริมาณการเชื่อมขวางด้วยกำมะถันให้มากขึ้นได้ จากแนวโน้มในตารางที่ 11 ราคาในการบำบัดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อใช้กำมะถันเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาจจำเป็นต้องพิจารณาระบบในการทำให้อย่างคงรูปที่ให้ค่าใช้จ่ายที่ถูกและปริมาณการเชื่อมโยงที่มากอีกด้วย

7. ปัญหาและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ปัญหาที่พบ

ดังที่ได้พบในการทดลองเมื่อใช้ยางปริมาณมากๆ จะเกิดการลอยตัวอยู่บ้างในขณะที่ให้น้ำปนเปื้อนไหลผ่าน เพราะความหนาแน่นของยางนั้นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้น ในการนำไปใช้งานจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงการลอยตัวนี้ด้วย การผสมกรวดน่าจะเป็นวิธีที่ดีในการช่วยยับยั้งการลอยตัวและไม่ทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับน้อยลงไป การผสมกรวดรวมด้วยจะทำให้มีความสามารถในการทนแรงดันหรือแรงเชิงกลอื่นๆ ได้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปใช้บำบัดน้ำใต้ดินโดยทำเป็นคั่นกันน้ำซึ่งต้องทนต่อแรงดันน้ำได้ดี

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. เนื่องจากความสามารถในการดูดซับขึ้นกับปริมาณกำมะถันในโครงสร้างของการเชื่อมโยง ดังนั้น จึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดปรอทได้อีกโดยการเพิ่มปริมาณการเชื่อมโยง ซึ่งเป็นเรื่องน่าศึกษาต่อไป เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ
2. อาจพิจารณาใช้ยางเป็นวัสดุในการสร้างบ่อบำบัดน้ำปนเปื้อนปรอท นอกจากปรอทแล้วมีความเป็นไปได้ที่ยางผ่านการขึ้นรูปน่าจะบำบัดโลหะหนักชนิดอื่นได้ด้วย
3. ในปัจจุบันมียางรถยนต์ใช้แล้วเหลือทิ้งมากมาย การนำมาใช้ประโยชน์ในการบำบัดปรอทปนเปื้อนในน้ำจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง ซึ่งควรศึกษาผลของการเชื่อมโยงในยางรถยนต์ใช้แล้วเหล่านั้นเพื่อทำนายความสามารถในการบำบัดได้ และออกแบบหอดูดซับให้สามารถบำบัดปรอทจนได้น้ำทิ้งที่มีความเข้มข้นของปรอทในระดับที่กฎหมายบังคับได้

8. เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

ธเรศ ศรีสถิตย์ และสุชนีย์ ค่อยเสียม “การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและกะลาปาล์ม” วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม ปีที่ 25 เล่มที่ 1 หน้า 57-67 (2546)

วรารณณ์ ขจรไชยกูล, “คู่มือเทคโนโลยียาง”, สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2545

ภาษาอังกฤษ

Benhammou, A., A. Yaacoubi, L. Nibou, B. Tanouti, “Study of the removal of mercury(II) and chromium(VI) from aqueous solutions by Moroccan stevensite”, J. Hazardous Materials, B177, 243-249 (2005)

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

Chongprasith, P., W. Utoomprukporn, E. Praekulvanich, P. Sangwichit, “Mercury assessment in Thailand”, Pollution Control Department, Ministry of Science and Technology and Environment, Thailand (2001)

Conner, J. R., Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes, Van Nostrand-Reinhold, New York, 140-148 (1990)

Dabek, L., "Sorption of zinc ions from aqueous solutions on regenerated activated carbons", Journal of Hazardous Materials, 101, 191-201 (2003)

Panu Danwanichakul, Duangkamol Dechojarasri, Salina Meesumrit and Suporn Swangwareesakul "Influence of Sulfur-Crosslinking in Vulcanized Rubber Chips on Mercury Removal from Contaminated Water" submitted to Journal of Hazardous Material (online)

Dermatas, D., X. G. Meng, T. M. Gilliam, C. C. Wiles (Eds.), Stabilization and solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes, ASTM STP 1240, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 499-513 (1996)

Gunasekara, A., J. Donovan and B. Xing, "Ground discarded tires remove naphthalene, toluene, and mercury from water", Chemosphere, 41, 1155-1160 (2000)

Knocke, W. R., and L. H. Hemphill, "Mercury(II) sorption by waste rubber", Water Research, 15, 275-282 (1981)

Krishnan, K. A., and T. S. Anirudhan, "Removal of mercury(II) from aqueous solutions and chlor-alkali industry effluent by steam activated and sulphurised activated carbons prepared from bagasse pith: kinetics and equilibrium studies", J. Hazardous Materials B92, 161-183 (2002)

Lyubchik, S. I., Andrei I. Lyubchik, Olga L. Galushko, Lilia P. Tikhonova, Joaquim Vita, Isabel M. Fonseca and Svetlana B. Lyubchik, "Kinetics and thermodynamics of the Cr(III) adsorption on the activated carbon from co-mingled wastes", Colloids and Surfaces A, 242, 151-158 (2004)

Malone, G. A., D. E. Lundquist, Waste Manage, 14, 67-73 (1994)

Matlock, M. M., K. R. Henke, D. A. Atwood, "Effectiveness of commercial reagents for heavy metal removal from water with new insights for future chelate designs", J. Hazardous Materials B92, 129-142 (2002)

Meng, X., Z. Hua, D. Dermatas, W. Wang, and H. Y. Kuo, "Immobilization of mercury (II) in contaminated soil with used tire rubber", J. Hazardous Materials, 57, 231-241 (1998)

Merrifield, J. D., W. G. Davids, J. D. MacRae, A. Amirbahman, "Uptake of Mercury by thiol-grafted chitosan gel beads", Water Research, 38, 3132-3138 (2004)

Perez-Quintanilla, D., I. del Hierro, M. Fajardo, I. Sierra, "2-Mercaptothiazoline modified mesoporous silica for mercury removal from aqueous media", J. Hazardous Materials B134, 245-256 (2006)

Rowley, A. G., F. M. Husband and A. B. Cunningham, "Mechanisms of metal adsorption from aqueous solutions by waste tyre rubber", Water Research, 18, 981-984 (1984)

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

Vazquez, G., J. Gonzalez-Alvarez, S. Freire, M. Lopez-Lorenzo, G. Antorrena, "Removal of cadmium and mercury ions from aqueous solutions by sorption on treated *Pinus pinaster* bark: kinetics and isotherms", Bioresource Technology, 82, 247-251 (2002)

Youssef, A. M., Th. El-Nabarawy and S. E. Samra, "Sorption properties of chemically-activated carbons 1. sorption of cadmium(II) ions", Colloids and Surfaces A, 235, 253-263 (2004)

Zhang, F.S., J. O. Nriagu, H. Itoh, "Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge", Water Research, 39, 389-395 (2005)