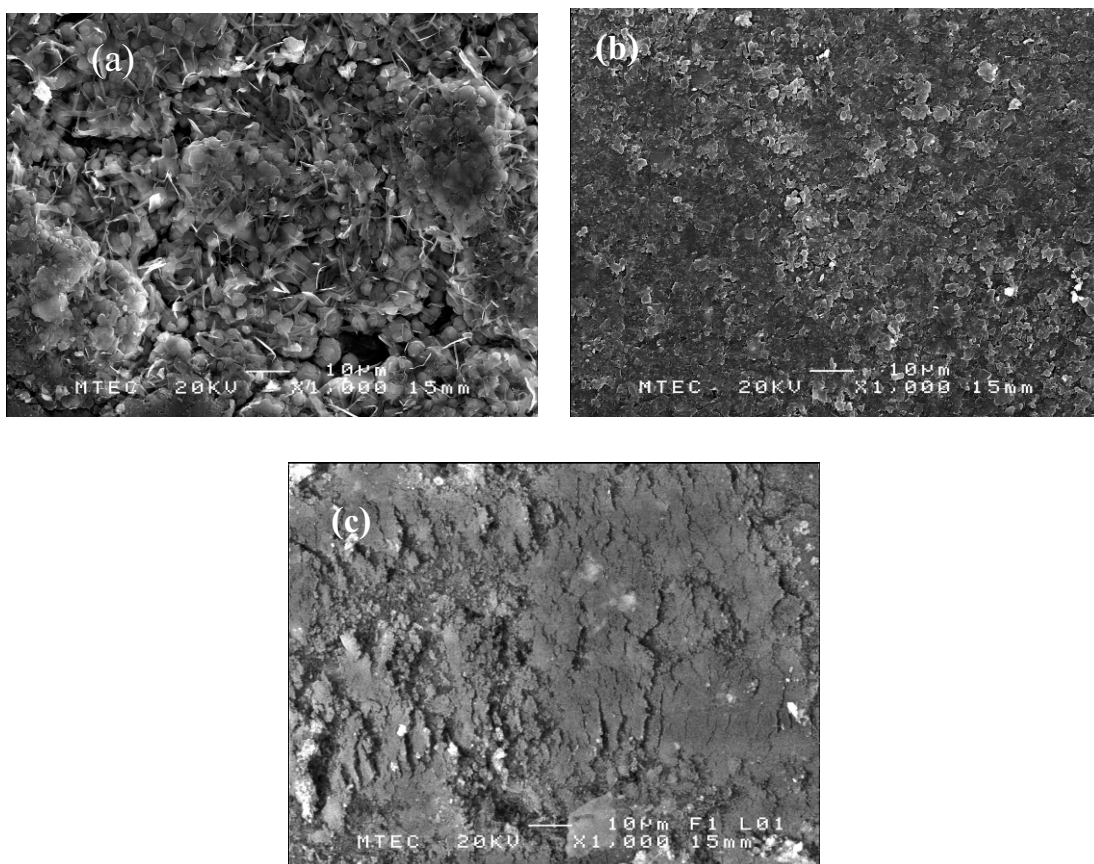


1.0 ซึ่งหมายถึงการดูดซับเป็นที่น่าพอใจ (favorable adsorption) หมายถึงเมื่อตัวดูดซับที่อีกสมดุลงหนึ่งมีปริมาณการดูดซับมากขึ้น ความแข็งแรงของการยึดติดระหว่างตัวดูดซับกับพื้นผิวในสมดุลงนั้นมีมากขึ้น

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 เปรียบเทียบการดูดซับฟีนอลของซินยางกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ จะเห็นว่าค่า K_F และ q_e ของซินยางน้อยกว่าถ่านกัมมันต์และ XAD4 มากแต่ดีกว่ายางรถยนต์ใช้แล้ว ทั้งนี้เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของซินยางกับฟีนอลมีน้อยกว่าถ่านกัมมันต์และ XAD4 ซึ่งมีรูพรุนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเพียงพื้นผิวรอบนอก ไม่นับพื้นที่ผิวของรูพรุน เปรียบเทียบค่าปริมาณการดูดซับต่อพื้นที่ของตัวดูดซับแต่ละชนิด โดยสมมติว่าสารมีความหนาแน่นเท่ากันคือ 1 g/cm^3 และสมมติว่าอนุภาคของถ่านกัมมันต์ XAD4 และยางรถใช้แล้วเป็นทรงกลม ได้ผลดังแสดงในตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าดังกล่าวของซินยางไม่ได้แย่นัก แสดงให้เห็นถึงผลของพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับฟีนอลว่ามีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ

5.2 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายฟีนอลในซินยางแบบ Dynamic Adsorption

เนื่องจากซินยางที่ปรับสภาพผิวโดยกรดไนตริกและความร้อนมีประสิทธิภาพในการดูดซับฟีนอลดีที่สุด ในการทดลองนี้จึงใช้ยางชนิดนี้ขนาด $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ เปรียบเทียบกับยางที่ไม่ได้ปรับสภาพผิว ทดลองโดยใช้สารละลายไพล์ผ่านหอดูดซับขนาดเล็ก การศึกษาแบ่งเป็นการดูดซับในหอดูดซับหอดูเดียว และการดูดซับผ่านหอดูดซับ 2 หอดูต่อเนื่องกัน

5.2.1 การดูดซับในหอดูดซับเดียว (Single-Effect Mini-Column)

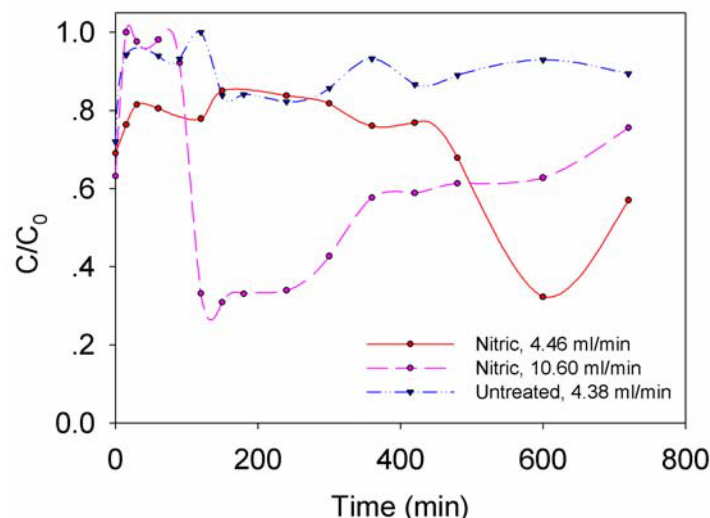
ทำการทดลอง 3 แบบได้แก่

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

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

(3) ทดสอบโดยใช้ซินยางที่ผ่านการปรับสภาพผิวด้วยกรดไนตริกกับความร้อน 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 น่าจะเกิดจากการบรรจุชั้นยางในหอดูดซับนั้นไม่สามารถบรรจุให้กระจายได้เท่าๆ กันทั้งหอดูดซับ กล่าวคือเมื่อพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดใดๆ ของหอดูดซับจะพบยางปริมาณไม่เท่ากัน และการบรรจุชั้นยางมีโอกาสทำให้ผิวยางติดกันไม่เหมือนตัวดูดซับอื่นที่เป็นผงๆ ขนาดเล็กจะสามารถบรรจุในหอดูดซับได้กระจายใกล้เคียงกันหมด และที่สำคัญพบว่าในการทดลองมีฟองอากาศเกิดขึ้นในขณะที่สารละลายไหลผ่านหอดูดซับ ทั้งการที่ชั้นยางติดกันและฟองอากาศที่เกิดขึ้นล้วนส่งผลถึงการลดพื้นที่การถ่ายเทมวลสารจึงทำให้หอดูดซับอิ่มตัวเร็วเกินไป เมื่อเวลาต่อมายางนั้นอาจมีโอกาสดูดซับกับสารละลายก็จะสามารถดูดซับได้อีก ทำให้ความเข้มข้นลดลงอย่างเห็นในรูปที่ 12

กราฟของชั้นยางที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวมีแนวโน้มที่เข้าใกล้การอิ่มตัวทั่วทั้งหอดูดซับเร็วกว่ายางที่ปรับสภาพผิว และเมื่อเปรียบเทียบยางที่ปรับสภาพผิวเมื่อใช้อัตราเร็วของสารละลายต่างกัน จะพบว่าภายในหนึ่งชั่วโมงแรกที่อัตราเร็วของสารละลายสูงกว่าจะทำให้ยางจะอิ่มตัวเร็วกว่าเป็นไปตามการทดลองการดูดซับทั่วไป แต่ภายหลังจากนั้นความเร็วที่สูงกว่าน่าจะทำให้สารละลายเกิดการกระจายตัวไปสัมผัสกับชั้นยางและไล่ฟอง อากาศได้ดีกว่าที่อัตราเร็วต่ำกว่า จึงทำให้ความเข้มข้นลดลงอย่างมากและค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ผิดกับที่อัตราที่ช้ากว่าเกิดการขึ้นลงของความเข้มข้นในระยะเวลา 400 นาทีแรกอย่างมาก จนลดลงอีกที่เวลา 600 นาทีและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้ง อย่างไรก็ตามเวลาที่ทำการทดลองทั้ง 720 นาทีน่าจะน้อยเกินไปที่จะทำให้หอดูดซับอิ่มตัวทั้งหอดูดซับ แต่ก็พอสามารถเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของแต่ละการทดลองได้

ในการทดลองนี้ หากสมมติว่าอัตราการไหลคงที่ตลอดการทดลองคือที่อัตราการไหลเฉลี่ยดังประมาณไว้แล้ว จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับ (% sorption) ได้จากสัดส่วนของปริมาณของสารที่ถูกดูดซับโดยชั้นยางสะสมตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองคือ 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

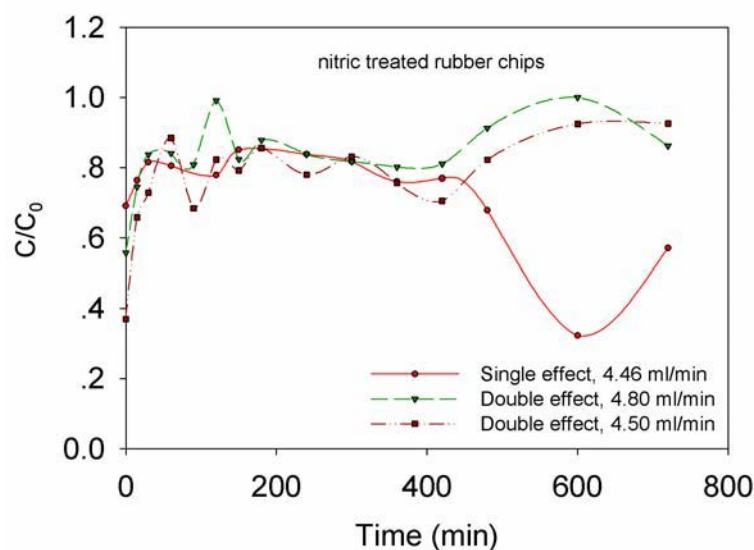
การทดลอง		เปอร์เซ็นต์
ชนิดชั้นยาง	อัตราการไหล (ml/min)	การดูดซับ
ไม่ปรับสภาพผิว	4.38	12.58
ปรับสภาพโดยไนตริกและความร้อน	4.46	19.16
ปรับสภาพโดยไนตริกและความร้อน	10.60	39.50

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 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับเมื่อใช้หอดูดซับสองหอเปรียบเทียบกับหอดูดซับหอดูเดียว

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

จากตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์การดูดซับมิได้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้จำนวนหอเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งหอ 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 ซึ่งเป็นค่าแสดงความสามารถในการบำบัดฟีนอลในน้ำโดยใช้ชั้นยางโดยใช้ข้อมูลที่สภาวะสมดุลโดยบอกถึงปริมาณการดูดซับฟีนอล (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 ที่คาดว่าจะลดความต้านทานทางไฟฟ้าได้ 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)

Villacañás, 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