



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ยางธรรมชาติในการบำบัดน้ำปนเปื้อน
ตัวทำละลายอินทรีย์อันตราย

**Utilizing Natural Rubber in Treatment of Water
Contaminated with Organic Solvents**

โดย นายภาณุ ด่านวานิชกุล และคณะ

เมษายน พ.ศ. 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การใช้ยางธรรมชาติในการบำบัดน้ำปนเปื้อน
ตัวทำละลายอินทรีย์อันตราย

Utilizing Natural Rubber in Treatment of Water
Contaminated with Organic Solvents

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|-----------------------------|---|
| 1. นายภาณุ ด่านวนิชกุล | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 2. นางสาวสวลี เจริญการ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 3. นางสาวพอรุณ จำปาทิ | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 4. นางสาวดวงกมล เดโชจรัสศรี | ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

ข้อมูลโครงการ:

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)	การใช้ยางธรรมชาติในการบำบัดน้ำปนเปื้อนตัวทำละลายอินทรีย์อันตราย
ชื่อโครงการ (ภาษาอังกฤษ)	Utilizing Natural Rubber in Treatment of Water Contaminated With Organic Solvents
สัญญาโครงการเลขที่	RDG485008
ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน	นาย ภาณุ ด่านวานิชกุล
โครงการเริ่มเมื่อวันที่	1 ตุลาคม 2547
โครงการสิ้นสุดเมื่อวันที่	30 เมษายน 2548
รวมเวลาที่ทำวิจัยทั้งสิ้น	6 เดือน

บทสรุปของผู้บริหาร (Executive Summary)

ในปัจจุบันมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น โทลูอินและเบนซีน เป็นต้น ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่นน้ำใต้ดิน ซึ่งจะเป็นอันตรายอย่างมากเมื่อนำน้ำนั้นมาบริโภคหรืออุปโภค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีในการบำบัดน้ำปนเปื้อนเหล่านี้ งานวิจัยในปัจจุบันพยายามศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับต่างๆ กัน ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเป็นไปได้ของการนำขึ้นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารตัวเติมต่างชนิดกันคือเซม่าดำ (เอ็น-330) และหินปูนในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ออกจากน้ำ ส่วนผสมของยางที่ใช้ในแต่ละสูตรจะเหมือนกันยกเว้นปริมาณของสารตัวเติม ในสูตร R100 ไม่มีการเติมสารตัวเติม สูตร C30 เติมเซม่าดำปริมาณ 30 phr และ สูตร Ca30 เติมหินปูนปริมาณ 30 phr ยางที่ผ่านการบดผสมจะขึ้นรูปเป็นแผ่นแบนซึ่งมีความหนา 2 มิลลิเมตร และจะนำมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆขนาด 1x1 ซม.² แล้วจึงนำมาทำการทดลอง การทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือส่วนแรกเป็นการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์บริสุทธิ์ได้แก่ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และน้ำ โดยขึ้นยางธรรมชาติ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์อันได้แก่ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอลและ ฟีนอลซึ่งละลายอยู่ในน้ำ และส่วนที่สามเป็นการทดสอบการใช้หอดูดซับที่บรรจุขึ้นยางและกรวดในการดูดซับสารอินทรีย์ในการทดลองที่สองออกจากน้ำที่ไหลผ่านหอดูดซับ

จากผลการวิจัยในส่วนแรกพบว่ายางในแต่ละส่วนผสมจะดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ได้ปริมาณแตกต่างกันเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และน้ำ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า ยางมีศักยภาพในการดูดซับสารเหล่านี้ออกจากน้ำได้ โดยสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและไม่มีขั้วจะถูกดูดซับได้เป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาสารอินทรีย์ชนิดเดียวกัน เมื่อขึ้นยางมีส่วนผสมต่างกันพบว่าความสามารถในการดูดซับเรียงจากมากไปน้อยคือ ยางที่ไม่มีสารตัวเติมดูดได้มากกว่ายางที่เติมหินปูน และยางที่เติมเซม่าดำ ตามลำดับ เนื่องจากสารตัวเติมจะทำให้โครงสร้างของยางขยับตัวได้ยากขึ้น สารเคมีจึงแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อยางได้ยากขึ้น

การวิจัยในส่วนที่สองทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ออกจากน้ำที่ปนเปื้อนที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ ประมาณ 100 200 500 และ 1000 ppm ในระบบปิดที่สัมผัสอากาศ พบว่าขึ้นยางสามารถดูดซับโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนได้ใกล้เคียงกัน และมากกว่าพี-ครีซอล และ ฟีนอล ตามลำดับ เป็นไปตามการทดลองในส่วนแรก จึงยืนยันว่ายางจะดูดซับสารที่ไม่ขั้วได้ดีกว่าสารที่มีขั้วและพบว่าขึ้นยางที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติมให้ผลการดูดซับไม่แตกต่างกันในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา เนื่องจากความเข้มข้นที่ศึกษายังน้อยเกินไปที่จะส่งผลต่อการขยับตัวของโครงสร้างของยาง จึงไม่ส่งผลต่อการดูดซับ

สำหรับงานวิจัยในส่วนที่สามเป็นการทดสอบการดูดซับโดยใช้หอดูดซับขนาดเล็กที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 ซม. และความสูงประมาณ 22.5 ซม. ในหอบรรจุกรดและชั้นยางที่มีส่วนผสมของเขม่าดำและใช้อัตราการไหลของสารละลายประมาณ 1.3 มล. ต่อนาที โดยใช้สารละลายเริ่มต้นเข้มข้นประมาณ 500 ppm ผลการทดสอบพบว่าผลสอดคล้องกับการทดลองในส่วนที่สอง นั่นคือยังสามารถบำบัดน้ำปนเปื้อนโทลูอินและเอ็ม-ไซลีน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางได้ดีกว่าพี-ครีซอลและฟีนอล ซึ่งเป็นสารมีขั้ว ผลจากการศึกษาบ่งชี้ว่า ยางมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดดังกล่าวที่ปนเปื้อนในน้ำได้ จึงน่าจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับได้

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น โทลูอินและเบนซีน เป็นต้น ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่นน้ำใต้ดิน ซึ่งจะเป็นอันตรายอย่างมาก เมื่อนำน้ำนั้นมาบริโภคหรืออุปโภค ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีในการบำบัดน้ำปนเปื้อนเหล่านี้ งานวิจัยในปัจจุบันพยายามศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับต่างๆ กัน ในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาความเป็นไปได้ของการนำชั้นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารตัวเติมต่างชนิดกันคือเขม่าดำ (เอ็น-330) และหินปูนโดยใช้ปริมาณเท่ากันในการดูดซับสารอินทรีย์หลายชนิดออกจากน้ำ โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์บริสุทธิ์ได้แก่ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และน้ำ และพบว่ายางในแต่ละส่วนผสมจะดูดซับตัวทำละลายอินทรีย์ได้ปริมาณแตกต่างกันเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือ โทลูอิน เอ็ม-ไซลีน พี-ครีซอล และน้ำ เมื่อพิจารณาสำหรับสารอินทรีย์ชนิดเดียวกันสำหรับชั้นยางต่างส่วนผสมกันพบว่าความสามารถในการดูดซับเรียงจากมากไปน้อยคือ ยางที่ไม่มีสารตัวเติม ยางที่เติมหินปูน และยางที่เติมเขม่าดำ ตามลำดับ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบการดูดซับสารอินทรีย์ออกจากน้ำที่ปนเปื้อนที่ความเข้มข้นต่างๆ คือ ประมาณ 100 200 500 และ 1000 ppm ในระบบปิดที่สัมผัสอากาศ พบว่าชั้นยางสามารถดูดซับโทลูอินและเอ็ม-ไซลีนได้ใกล้เคียงกัน และมากกว่าพี-ครีซอล และ ฟีนอล ตามลำดับ และพบว่าชั้นยางที่มีสารตัวเติมและไม่มีสารตัวเติมให้ผลการดูดซับไม่แตกต่างกันในช่วงความเข้มข้นที่ศึกษา ในส่วนที่สามเป็นการทดสอบการดูดซับโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.5 ซม. และความสูงประมาณ 22.5 ซม. ในหอบรรจุรวดและชั้นยางที่มีส่วนผสมของเขม่าดำและใช้อัตราการไหลของสารละลายประมาณ 1.3 มล. ต่อนาที โดยใช้สารละลายเริ่มต้นเข้มข้นประมาณ 500 ppm ผลการทดสอบพบว่าผลสอดคล้องกับการทดลองในส่วนที่สอง นั่นคือยางสามารถบำบัดน้ำปนเปื้อนโทลูอินและเอ็ม-ไซลีน ซึ่งเป็นสารที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยางได้ดีกว่าพี-ครีซอลและฟีนอล ซึ่งเป็นสารมีขั้ว ผลจากการศึกษาบ่งชี้ว่า ยางมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ชนิดดังกล่าวที่ปนเปื้อนในน้ำได้ จึงน่าจะนำไปใช้ประโยชน์เป็นตัวดูดซับได้

ABSTRACT

Organic substances such as toluene, xylenes and cresols are usually used as solvents in many industrial applications. Usage of these materials results in contamination in processing water and sometimes leaking out during transportations that seriously threatens the human health so any method for removing these substances from water is essential and necessary. In this work, we aimed to investigate possibility of using natural rubber chips in treatment of contaminated water so the experiments were conducted in 3 parts. In the first part, we studied the sorption of four pure organic solvents, which are toluene, m-xylene, p-cresol and water, by using natural rubber chips whose compositions are different, including one without any filler, one with carbon black (N-330), and one with calcium carbonate. We found that rubber chips could absorb toluene with highest capacity, followed by m-xylene, p-cresol and water, respectively and unfilled chips had highest sorption ability, followed by chips with calcium carbonate and those with carbon black. In the second part, the batch sorption tests were conducted to investigate the ability of those chips to remove organic substances from artificially contaminated water. We found that for each rubber composition, toluene was absorbed with the highest quantity which is close to that of xylene but is much greater than those of p-cresol and phenol. When the composition of rubber was considered, we found that filled and unfilled rubbers were not different in sorption ability in the range of concentrations studied. The results were confirmed by the last part, the sorption column experiment. The mini-column with diameter of about 2.5 cm and height of about 22.5 cm was packed with gravel and rubber chips with carbon black. The solution with concentration of about 500 ppm was pumped through the column with flow rate about 1.3 ml/min for 12 hrs. The efficiency was calculated using the final concentration of effluent collected in the bottle. Again, the chips can treat toluene and m-xylene, which is hydrophobic substances just like itself, better than p-cresol and phenol, which is hydrophilic. Our studies show that rubber chips have potential to be used as sorption media in treatment of water contaminated with these organic substances.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้ทำวิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Two-Roll Mill และ Compression Mould และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาฯ อันประกอบด้วย คุณจิตตรา ดอกบัว, คุณกิตติ เมธาวงศ์, คุณสากล ม่วงเขียว และคุณไพรัตน์ รักพีช ที่อำนวยความสะดวกด้านการใช้ห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์และเครื่องมืออื่นๆ ในงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณเจตจำนงค์ เสือใจ และคุณสมเกียรติ ท้วมแสง จากศูนย์อ้างอิงทางห้องปฏิบัติการและพิษวิทยา สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับตรวจวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Gas Chromatography

และท้ายสุดนี้ งานวิจัยนี้ดำเนินจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็ด้วยทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายอุตสาหกรรมในโครงการ Small Project on Rubber ที่ต้องการสนับสนุนให้เกิดนักวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องกับยางพารา จึงเป็นโอกาสอันดีที่ทำให้ผู้วิจัยได้เรียนรู้มากขึ้นเกี่ยวกับยางพาราอันเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ผู้ทำวิจัยจึงขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ มา ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้ทำวิจัย

สารบัญ

เรื่อง

หน้า

ข้อมูลโครงการ.....	i
บทสรุปของผู้บริหาร.....	ii
บทคัดย่อภาษาไทย.....	iv
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	v
กิตติกรรมประกาศ.....	vi
สารบัญ.....	vii
สารบัญตาราง.....	ix
สารบัญรูป.....	xi
บทที่ 1: บทนำ.....	1
บทที่ 2: วารสารปริทัศน์.....	3
บทที่ 3: อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	6
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	6
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	6
บทที่ 4: ผลการทดลอง.....	16
4.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption), การคายออก (Desorption) ของน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์.....	16
4.1.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption).....	16
4.1.2 การทดสอบการคายออก (Desorption).....	16
4.2 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายของสารอินทรีย์ในน้ำ.....	16
4.3 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายของสารอินทรีย์ โดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก (mini-column).....	16
บทที่ 5: วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
5.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption), การคายออก (Desorption) ของน้ำ และตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์.....	38
5.1.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption).....	38
5.1.1.1 ศึกษากลไกการถ่ายโอนมวล (Transport Mechanism).....	38
5.1.1.2 การศึกษาทางด้านอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics Aspect of Sorption).....	45

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
5.1.2 การทดสอบการคายออก (Desorption).....	50
5.1.2.1 การศึกษากลไกการถ่ายโอนมวล (Transport Mechanism).....	50
5.2 การทดสอบการดูดซับ (sorption) ของสารละลายของตัวทำละลายอินทรีย์.....	55
5.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับส่วนผสมของสารตัวเดิม.....	55
5.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับชนิดของสารละลาย	
ด้วยการวิเคราะห์การดูดซับโดยการประมาณ (Approximate Analysis).....	58
5.2.2.1 การประมาณปริมาณการดูดซับน้อยสุด	
(Minimum Sorption Capacity).....	59
5.2.2.2 การประมาณปริมาณการดูดซับมากที่สุด	
(Maximum Sorption Capacity).....	65
5.3 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายของสารอินทรีย์โดยใช้	
หลอดดูดซับขนาดเล็ก (mini-column).....	70
บทที่ 6: สรุปผลการทดลอง.....	74
บทที่ 7: แนวทางงานวิจัยในอนาคต.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก. สมบัติทางกายภาพของสาร.....	80
ภาคผนวก ข. สรุปผลการดำเนินการวิจัย.....	82
ภาคผนวก ค. บทความในการนำเสนอผลงานที่งานประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 4 จัดโดย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.....	83
ภาคผนวก ง. บทความสำหรับการเผยแพร่.....	89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงชนิดสารตัวเดิมและปริมาณสารเคมีที่ใช้.....	7
2	ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสาร Toluene บริสุทธิ์เข้าไปในเนื้อเยื่อ.....	17
3	ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสาร m-Xylene บริสุทธิ์เข้าไปในเนื้อเยื่อ.....	19
4	ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสาร p-Cresol บริสุทธิ์เข้าไปในเนื้อเยื่อ.....	20
5	ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของน้ำบริสุทธิ์ (H ₂ O) เข้าไปในเนื้อเยื่อ.....	23
6	ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของ Toluene ออกสู่บรรยากาศ.....	24
7	ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของ m-Xylene ออกสู่บรรยากาศ.....	27
8	ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของ p-Cresol ออกสู่บรรยากาศ.....	30
9	ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของน้ำ (H ₂ O) ออกสู่บรรยากาศ.....	31
10	ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย Toluene ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	33
11	ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย m-Xylene ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	34
12	ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย Phenol ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	35
13	ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย p-Cresol ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	36
14	ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย Toluene ในน้ำด้วยหลอดดูดซับขนาดเล็ก.....	37
15	แสดงค่า n และ k สำหรับกระบวนการดูดซับของสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อเยื่อ.....	40
16	แสดงค่าของ Q _∞ , D, S และ P.....	44
17	แสดงค่า ΔH _m , ΔS _m และ ΔG _m ของการผสมกับระหว่างยางและสารอินทรีย์ที่ 303 K.....	47
18	แสดงค่า η _{swell} และค่า M _c	49
19	แสดงค่า n และ k สำหรับกระบวนการคายออกของสารอินทรีย์สู่อากาศ.....	52
20	แสดงค่า Q _∞ และค่า D ของการคายออกจากยาง.....	55
21	แสดงค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณสารที่ระเหย ความเข้มข้นสุดท้าย และปริมาณสารในยาง ของสารละลายชนิดต่าง ๆ.....	60
22	แสดงค่า Partition Coefficient ในกรณีไม่คิดการละลายกลับของสารอินทรีย์.....	61
23	แสดงค่า K _F และ n ของ Freundlich Isotherm ในกรณีไม่คิดการละลายกลับของสารอินทรีย์.....	64

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
24 แสดงค่าความเข้มข้นในเฟสของยาง เฟสของน้ำและเฟสอากาศ ของสารละลายชนิดต่าง ๆ.....	66
25 แสดงค่า partition coefficient ในกรณีที่สารในเฟสอากาศละลายกลับสู่เฟสน้ำ.....	67
26 แสดงค่า K_F และ n	68
27 แสดงค่า K_{ow} ของแต่ละสาร.....	70
28 แสดงร้อยละของการดูดซับของหอดูดซับขนาดเล็ก.....	72
ก.1 สูตรโมเลกุล มวลโมเลกุล จุดเยือกแข็งและจุดเดือดของสาร.....	79
ก.2 ความหนาแน่นสำหรับของเหลว (Density of Liquid).....	79
ก.3 พารามิเตอร์ของการละลาย (Solubility Parameter).....	80
ก.4 ค่า Henry Law's constant	80
ข.1 ตารางสรุปผลการดำเนินการวิจัย.....	81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1 เครื่อง Two-Roll Mill ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.....	8
2 เครื่องบราเบนด์รีรัน Lab station ของภาควิชาวิศวกรรมเคมีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.....	9
3 เครื่อง Compression Mould ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.....	10
4 ชี้นยางในขวดปิดใส่สารอินทรีย์บริสุทธิ์ ในภาพเป็นน้ำซึ่งใช้ปริมาณมากกว่า 15 ml. แต่สารอื่นจะใช้เพียง 15 ml. เท่านั้น.....	11
5 ขวดรูปชมพู่บรรจุสารละลายและชี้นยางบนเครื่องเขย่า.....	12
6 หอดูดจับสารที่ประกอบขึ้นเองพร้อม Peristaltic ปัม สารจะถูกดูดจากภาชนะทางด้านซ้ายมือ เข้าทางด้านล่างของหอ แล้วออกทางด้านบนเข้าสู่ภาชนะเก็บสารละลาย.....	14
7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับ (Q_t) กับเวลา ที่ได้จากการทดลอง.....	39
8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับ (Q_t) กับ $time^{(1/2)}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปของสัญลักษณ์และค่าในทางทฤษฎีซึ่งแสดงในรูปของเส้น.....	41
9 แสดงการแพร่ของสารเข้าไปในเนื้อยาง.....	42
10 แสดงการเปรียบเทียบค่า crosslink density ที่ได้จากสาร Toluene และ m-Xylene ของทั้ง 3 สูตรยาง.....	49
11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการคายออกของสารสู่อากาศ (Q_t) กับเวลาที่ได้จากการทดลอง.....	51
12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการคายออก (Q_t) ของสารสู่อากาศกับ $time^{(1/2)}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองซึ่งแสดงเป็นสัญลักษณ์และค่าทางทฤษฎีซึ่งแสดงเป็นเส้น.....	53
13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย Toluene.....	56

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้น สุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย m-Xylene.....	57
15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้น สุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย Phenol.....	57
16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้น สุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย p-Cresol.....	58
17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลาย กับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย Toluene.....	62
18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลาย กับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย m-Xylene.....	62
19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลาย กับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย Phenol.....	63
20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลาย กับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย p-Cresol.....	63
21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(Q_{ad})$ กับ $\ln(C_{eq})$ ของสารละลาย Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol.....	65
22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลาย กับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย Toluene และ m-Xylene.....	67
23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(Q_{ad})$ กับ $\ln(C_{eq})$ ของสารละลาย Toluene และ m-Xylene	68
24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้น (ppm) กับเวลา ของ สารละลาย Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol.....	71

บทที่ 1

บทนำ

การปนเปื้อนของสารอินทรีย์ซึ่งใช้เป็นตัวทำละลายในกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น โพลีเอทิลีนและเบนซีน เป็นต้น ในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่นน้ำใต้ดิน [1] เกิดขึ้นได้โดยง่ายจากการทรุดของอินทรีย์บนผิวดินในขณะขนถ่ายไปยังที่ต่างๆ หลังกระบวนการผลิตรวมถึงการรั่วไหลออกจากถังเก็บหรือท่อที่ใช้ในการขนส่งเป็นระยะทางไกล ถึงแม้สารเหล่านี้สามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ แต่จะมีบางส่วนที่ยังเหลือปนเปื้อนในดินและในที่สุดก็จะไปสู่แหล่งน้ำ สารปนเปื้อนส่วนหนึ่งจะระเหยกลายเป็นไอในช่องว่างของเม็ดดิน [2] อีกส่วนจะรวมปนอยู่กับน้ำ และจะเคลื่อนที่ไปตามน้ำโดยการพาของน้ำเอง และโดยการแพร่ของตัวมันเองเข้าไปในน้ำ เมื่อคนใช้น้ำที่ปนเปื้อนดังกล่าวในการอุปโภคบริโภคก็จะได้รับอันตรายจากสารอินทรีย์เหล่านี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีการกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำ

วิธีการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินมีอยู่หลายวิธีเช่น Pump and Treat ซึ่งทำได้โดยการเจาะดินลงไปแล้วสูบน้ำใต้ดินบริเวณที่มีการปนเปื้อนขึ้นมาบำบัดด้วยวิธีต่างๆ เช่น การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นต้น อีกวิธีหนึ่งเป็นการใช้ Permeable Reactive Barriers (PRB) คือ สร้างกำแพงลงไปในชั้นน้ำใต้ดินเพื่อขวางการไหลของน้ำใต้ดินที่มีการปนเปื้อน ตัวกำแพงจะบรรจุสารหรือวัสดุที่สามารถบำบัดสารปนเปื้อนในน้ำใต้ดินได้ ที่ผ่านมามีรายงานการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากวัสดุเหลือใช้ในการเกษตรเพื่อบำบัดโลหะหนักโดยการดูดซับ (Adsorption) [3] และการใช้ชั้นยางในการดูดซับปรอทจากดินที่ปนเปื้อนได้ [4] สำหรับสารปนเปื้อนที่เป็นตัวทำละลายอินทรีย์มีงานวิจัยพบว่าเยื่อเลือกผ่านที่ทำจากโพลีเมอร์ [5] สามารถจับสารอินทรีย์เอาไว้ได้ เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่ง ดังนั้นยางจึงมีคุณสมบัติในการบวมตัว (Swelling) ในตัวทำละลายบางชนิดได้ มีงานวิจัยจากประเทศอังกฤษกล่าวถึงความเป็นไปได้ในการใช้ยางเป็นส่วนประกอบของ Permeable Reactive Barrier ที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำใต้ดิน [5] จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำยางมาใช้เป็นวัสดุในการดูดซับสารอินทรีย์ออกจากน้ำ

เนื่องจากในงานวิจัยก่อนๆ จะใช้ยางเหลือใช้ซึ่งไม่ทราบส่วนผสมของสารที่ผสมภายในยางทั้งแบบที่เป็นชิ้นและแบบผงเพื่อบำบัดน้ำปนเปื้อนสารหลายๆ ชนิด งานวิจัยชิ้นนี้จึงจัดทำขึ้นเพื่อศึกษาขั้นพื้นฐาน ให้ทราบพฤติกรรมของชั้นยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารตัวเติม (Filler) ต่างกัน

นั่นคือ เขม่าดำ (Carbon Black) และหินปูน (CaCO_3) ในการดูดจับตัวทำละลายอินทรีย์ โดยจะศึกษาพฤติกรรมที่แย่งแต่ละสูตรดูดสารอินทรีย์บริสุทธิ์หลายๆ ชนิดได้แก่ Toluene, m-Xylene, p-Cresol และน้ำ ไว้ในชั้นยางและพฤติกรรมการคายสารอินทรีย์นั้นสู่บรรยากาศ จากนั้นจึงจะศึกษาต่อไปถึงคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption) ของสารดังกล่าวรวมถึง Phenol ออกจากน้ำที่ปนเปื้อนอยู่ โดยศึกษาเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน และใช้อย่างทั้งสามสูตรตั้งในการทดลองตอนต้น การทดลองส่วนสุดท้ายจะใช้หลอดขนาดเล็กเพื่อดูประสิทธิภาพในการแยกสารปนเปื้อนออกจากน้ำที่มีการไหลของน้ำในอัตราเร็วไม่มากนัก

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

การนำยางธรรมชาติมาใช้ผลิตอุปกรณ์ต่างๆนั้นจำเป็นต้องทำให้ยางมีคุณสมบัติตามต้องการ โดยการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบที่ผสมในระหว่างการบดยาง ส่วนประกอบพื้นฐานที่เป็นส่วนผสมในยางธรรมชาติคือสารทำให้คงรูปซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสร้างร่างแห (Crosslink Network) ในโครงสร้างของยางธรรมชาติ ช่วยทำให้ยางมีความแข็งแรงขึ้น สารทำให้คงรูปที่ใช้กันมากคือกำมะถัน เพราะหาได้ง่ายและมีราคาถูก กำมะถันจะเกิดปฏิกิริยากับพันธะคู่ที่มีอยู่ในยางเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหขึ้น นอกจากนี้ใช้สารทำให้คงรูปแล้วยังมีความจำเป็นต้องเติมสารเร่งให้ยางคงรูปด้วย อันได้แก่ Tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) และ N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide (CBS) และมีสารกระตุ้นสารเร่งอีกคือ Zinc Oxide (ZnO) และ Stearic Acid นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเพื่อช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยา oxidation ของพันธะคู่ของยางกับโอโซน ที่มีอยู่ในอากาศในสภาวะที่ถูกเร่งด้วยแสงแดด สารดังกล่าวคือ 6PPD และอาจมีการใช้สารตัวเติมต่างๆ เพื่อช่วยเสริมแรงให้กับโครงสร้างของยางและยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย สารตัวเติมจะเป็นสารที่มีขนาดอนุภาคเล็กมาก ได้แก่ได้แก่ ผงเขม่าดำ (Carbon Black) และ หินปูน (Calcium Carbonate, CaCO_3) เป็นต้น รายละเอียดของส่วนผสมที่ใช้ทั่วไปในการบดยาง และวิธีการบดยางสามารถหาอ่านได้ในหนังสือความรู้เกี่ยวกับยางทั่วไป [6, 7]

เนื่องจากในปัจจุบันมีการนำยางธรรมชาติมาใช้มากมาย จึงมีขยะที่เป็นยางธรรมชาติอยู่มากเช่นกัน ที่เห็นได้ชัดคือ ล้อรถยนต์ ซึ่งการกำจัดนอกจากจะนำไปเผาทิ้งให้เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังมีนักวิจัยเห็นประโยชน์กับการนำยางเหลือใช้เหล่านี้มาทำเป็น Activated Carbon เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับสาร มีรายงานวิจัยหลายชิ้นที่พูดถึงความสามารถของการดูดซับของยางเหลือใช้เหล่านี้ โดยมีได้ผ่านการทำเป็น Activated Carbon ก่อน แต่อาจมีการแปรสภาพไปเป็นยางบด (Ground Rubber) หรือตัดย่อยๆ เป็นชิ้นยางขนาดเล็ก (Rubber Chip) แล้วนำไปใช้เป็นส่วนผสมในการสร้างกำแพงกั้นน้ำได้ดิน (Permeable Reactive Barrier) เพื่อกั้นการไหลของน้ำได้ดินให้ไหลผ่านกำแพงก่อน สารที่อยู่ในกำแพงจะดูดซับสารที่ปนเปื้อนมากับน้ำได้ดิน มีการทดสอบการดูดซับ Naphthalene, Toluene และ โลหะหนักอย่างปรอทโดยใช้ยางบดโดยวิธี Batch Test [8] พบว่าการดูดซับสารอินทรีย์ใช้เวลาไม่นานนักในขณะที่การดูดปรอทใช้เวลานานกว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุล และยางดูดแพธาลีนได้ดีกว่าโทลูอีน และในอีกงานวิจัยหนึ่งซึ่งทดสอบทั้งแบบ Batch Test และ Column Test ของยางบดในการดูด Benzene กับ o-Xylene [9] พบว่า ยางสามารถดูด o-Xylene ได้ดีกว่า Benzene ถึงแม้

ว่าขนาดโมเลกุลของ Benzene จะเล็กกว่า แต่ o-Xylene มีความไม่ชอบน้ำมากกว่า (hydrophobicity) จึงชอบที่จะเข้าไปอยู่ในยางได้ดีกว่า Benzene การทดลองดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้ระบบที่มีเพียงเฟสน้ำ และเฟสของยางบด โดยให้มีเฟสอากาศน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดผลของการระเหยของสารเข้าไปในเฟสอากาศ ดังนั้นจึงเห็นว่าการแยกสารออกจากน้ำจึงขึ้นกับความไม่ชอบน้ำของสารนั้นๆ ในอีกงานวิจัยหนึ่งซึ่งใช้ยางบดเช่นกันในการดูดสารหลายชนิด [10] พบว่ายางสามารถดูด m-Xylene ได้ดีกว่า Ethylbenzene, Toluene, Trichloroethylene, 1,1,1-Trichloroethane, Chloroform, และ Methylene chloride ตามลำดับ เห็นได้จากงานวิจัยนี้อีกเช่นกันว่า Hydrophobicity ของ Toluene น้อยกว่า m-xylene จึงทำให้ยางดูด m-xylene ได้ดีกว่า

หลักการของการใช้ยางมาดูดจับสารในน้ำนั้น อาศัยทั้งกระบวนการ Adsorption และ Absorption ซึ่งการแยกสาร Partition ออกจากเฟสที่เคยอยู่ไปอยู่ในเฟสของแข็งก็เป็นหลักการเดียวกับการใช้ Activated Carbon ซึ่งนิยมใช้ในการดูดซับสารมากมายหลายชนิด [3] ทั้งสารอินทรีย์ที่ละลายปนเปื้อนในน้ำและโลหะหนักต่าง ๆ ทั้งนี้เพราะ Activated Carbon มีพื้นที่ในการดูดซับมาก แต่เนื่องจาก Activated Carbon มักจะมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนมาก ทำให้การดูดซับแบบเลือกสารคือใช้เป็น Molecular Sieve เป็นไปได้ไม่ดีนัก จึงมีการหาตัวดูดซับอื่นๆ มาใช้แทน ในปัจจุบันพบว่า สาร Zeolite ทั้งที่มีในธรรมชาติและที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับแบบเลือกสารได้ [11] และถูกนำมาใช้ในการดูดสารหลากหลายเช่นเดียวกับ Activated Carbon ถึงแม้ว่าจะมีตัวดูดซับให้เลือกใช้หลายชนิดและล้วนเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพทั้งสิ้น การศึกษาคุณสมบัติของสารอื่นๆ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับก็ยังคงมีต่อไป ทั้งนี้เพื่อช่วยลดต้นทุนในการซื้อตัวดูดซับราคาแพง และเป็นการใช้ของเหลือใช้หรือวัสดุทิ้งตามธรรมชาติให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเป็นการลดขยะ จึงเห็นว่ามีการผลิต Activated Carbon จากวัสดุเหลือใช้ต่างๆ หลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น ชานอ้อย กากและกะลามะพร้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาคุณสมบัติในการดูดซับของยางธรรมชาติ ทั้งนี้เป้าหมายสุดท้ายคือการนำยางใช้แล้วมาบำบัดน้ำเสียหรือน้ำปนเปื้อนสารอันตราย แต่เนื่องจากจุดประสงค์คือต้องการศึกษาว่า สารตัวเดิมมีผลอย่างไรต่อการดูดซับของยาง จึงเริ่มศึกษาโดยการเตรียมยางขึ้นมาเอง เพื่อจะได้ทราบส่วนผสมที่แน่นอน ทั้งนี้ความสามารถในการดูดซับยางนี้ จะอาศัยปรากฏการณ์การบวมตัวซึ่งเกิดจากโครงสร้างร่างแหของยางขยายตัวให้สารเข้าไปอยู่ในปริมาตรของยางได้ จะแตกต่างจากการดูดซับของ Activated Carbon ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ขยายตัว ยางธรรมชาตินั้นเป็นโพลีเมอร์ชนิดหนึ่งซึ่งมีโมโนเมอร์คือ Isoprene ดังนั้นยางจึงสามารถบวมตัวในตัวทำละลายที่เข้ากันได้ (Good Solvent) เช่นเดียวกับโพลีเมอร์อื่นๆ ความสามารถในการบวมตัวขึ้นกับกระบวนการแพร่ของสารเข้า

ไปในเนื้อโพลีเมอร์ ความเข้ากันได้ระหว่างโมเลกุลของโพลีเมอร์กับสารละลายซึ่งเกี่ยวข้องกับควมมีขั้วและไม่มีขั้วของสาร ดังนั้นประโยชน์ของยางที่นำมาใช้ดูดซับสารนี้จึงคล้ายๆ กับการนำโพลีเมอร์ชนิดต่างๆ มาทำเป็นเยื่อเลือกผ่านเพื่อแยกสารออกจากสารละลายหรือของผสม สามารถยกตัวอย่างงานวิจัยได้หลายชนิด ได้แก่ การศึกษาการเคลื่อนที่ของ Aromatic Hydrocarbon ผ่านเยื่อโพลีเมอร์ (polymer membrane) ของสารผสมยางธรรมชาติและโพลีสไตรีน [12] ซึ่งพบว่าการแพร่ผ่านจะยากขึ้นเมื่อมีส่วนผสมของโพลีสไตรีนมากขึ้น เพราะไปทำให้โครงสร้างของยางขยายตัวได้ยากขึ้นนั่นเอง เช่นเดียวกับของผสม Nitrile กับ ยางธรรมชาติก็พบเช่นกันว่า การแพร่ผ่านของ Hydrocarbon ยากขึ้นเมื่อส่วนผสมของ Nitrile เพิ่มมากขึ้น [13]

จากงานวิจัยที่ผู้วิจัยค้นคว้ามาพบเพียงงานวิจัยเดียวเท่านั้นที่ใช้ชั้นยางมาบำบัดน้ำปนเปื้อน Phenol p-Cresol พบว่ายางสามารถดูด P-Cresol ได้ดีกว่า Phenol และ พบว่าชั้นยางขนาด 2-6 mm ดูดซับได้ดีกว่า ชั้นยางขนาด 30 mm และยังศึกษาคุณสมบัติเชิงกลเมื่อนำยางมาผสมกับกรวดในปริมาณต่างๆ กัน [14] สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาครอบคลุมการใช้ชั้นยางมาบำบัดทั้งสาร Hydrophobic และ สาร Hydrophillic ทั้งนี้การทดลองจะใช้สภาวะการทดลองเหมือนกันทั้งหมด นั่นคือเป็นการผสมกันในสามเฟสนั่นคือ เฟสน้ำ เฟสยาง และมีเฟสอากาศด้วย และยังมีการศึกษาโดยใช้หลอดดูดขนาดเล็กด้วย ทั้งนี้เพราะงานวิจัยอื่นๆ จะศึกษาเพียงสองเฟส เท่านั้น ทั้งนี้เพราะสภาพความเป็นจริง น้ำใต้ดินถึงแม้จะมีผิวดินห่อหุ้ม แต่ในดินก็มีช่องว่างของอากาศซึ่งสารสามารถระเหยขึ้นมาได้ อย่างไรก็ดี การศึกษาวิจัยนี้เป็นเพียงขั้นพื้นฐานเท่านั้น การเลียนแบบจำลองสภาวะของน้ำใต้ดินจริงๆ ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ อีกมากเช่น ความดัน และการดูดซับของสารในเนื้อดิน การแพร่ของสารผ่านช่องว่างระหว่างดิน อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปของน้ำใต้ดิน สารผสมต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำใต้ดิน และ ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำใต้ดิน เป็นต้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่อง Brabender รุ่น Lab station สำหรับบดผสมยางตามส่วนผสมที่ต้องการ
2. เครื่อง Two-Roll Mill สำหรับรีดคอมปาวด์ที่ได้จากการบดผสมให้เป็นแผ่น
3. เครื่อง Compression Mould สำหรับขึ้นรูปยางเป็นแผ่นบางมีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร
4. เครื่องเขย่า (Shaker) เพื่อใช้ในการผสมสารให้เข้ากันและเพื่อเร่งให้การดูดซับสารละลายของน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ของขึ้นยางให้ถึงสมดุลเร็วขึ้น
5. ปั๊มชนิด Peristaltic pump
6. Column แก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.6 cm และสูง 22.5 cm

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 การบดผสมและขึ้นรูปยางเป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร

1.1 สูตรยางและสารเคมีที่ใช้

1.1.1 การออกสูตรยาง (Compounding design)

ในการออกสูตรยางในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง มีส่วนผสมของสารต่างๆ ในสูตรยางดังนี้

1. ยางธรรมชาติ STR 20 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทยางไทย ปักซ์ได้ จำกัด

2. สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing Agent or Curing Agent)

ใช้ระบบยางคงรูปโดยกำมะถันประกอบด้วย

- กำมะถัน (Sulphur) เป็นสารคงรูป ซื้อมาจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์
- สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator) ในที่นี้ใช้

Tetramethyl thiuram disulphide (TMTD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท
เจ เจ-เดกัสซา เคมีคอล (ที) จำกัด

N-cyclohexylbenzothiazole-2-sulphenamide (CBS) ได้รับความ
อนุเคราะห์จาก บริษัทชนันท์เวิลด์ (1989) จำกัด

- สารกระตุ้นสารเร่ง (activator) ได้แก่ Zinc oxide (ZnO) และ stearic acid ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทล็อกซเล่ย์ จำกัด (มหาชน)

3. สารป้องกันยางเสื่อม (Antidegradant) ในที่นี้ใช้ N-(1,3-dimethylbutyl)- N'-Phenyl-p-phenylenediamine (6-PPD) ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทชนันท์เวิลด์ (1989) จำกัด

4. สารตัวเติม (Filler) ในที่นี้ใช้

ผงเขม่าดำ (carbon black) ชนิด N-330 ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทล็อกซเล่ย์ จำกัด (มหาชน)

หินปูน (CaCO_3) ซื้อจากร้านศึกษาภัณฑ์พาณิชย์

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาผลของสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติการดูดซับ ดังนั้นจึงออกสูตรยางเป็น 3 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยแบ่งเป็นระบบที่เป็นยางธรรมชาติที่ไม่มีสารตัวเติมและยางธรรมชาติที่มีส่วนผสมของสารตัวเติมต่างชนิดกันคือเขม่าดำ และหินปูน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงชนิดสารตัวเติมและปริมาณสารเคมีที่ใช้

Ingredients/ ชื่อสูตร	Rubber (R100)	Carbon Black (C30)	CaCO_3 (Ca30)
STR 20	100	100	100
Filler	0	30	30
6-PPD	3	3	3
Stearic acid	1	1	1
Zinc oxide	5	5	5
CBS	3.5	3.5	3.5
TMTD	0.5	0.5	0.5
Sulphur	0.4	0.4	0.4

1.2 การบดผสมยาง

1.2.1 การบดให้ยางนิ่ม (Mastication)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีความหนืดสูงทำให้การผสมเป็นไปได้น้อย เพราะสารเคมีจะเข้าผสมกับยางได้ยาก ดังนั้นก่อนใส่สารเคมีจึงต้องลดความหนืดของยางโดยการบดให้ยางนิ่ม โดยใช้เครื่อง Two-Roll Mill แสดงดังรูปที่ 1 แล้วตัดยางให้เป็นชิ้นเล็กพอที่จะเข้าเครื่องบดผสมยาง ในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 1 เครื่อง Two-Roll Mill ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1.2.1 บดผสมยาง (Mixing)

ยางถูกบดผสมโดยใช้เครื่องบราเบนเดอร์รุ่น Lab station แสดงดังรูปที่ 2 โดยบดผสมที่ความเร็ว 40 รอบ/นาที อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50° C การบดผสมเริ่มจากการบดยาง 3 นาที จากนั้นใส่สารตัวเติมและบดประมาณ 3 นาที จากนั้นเติม Stearic Acid และ ZnO และบดต่ออีก 2 นาที ตามด้วยการเติม 6-PPD และบดอีก 2 นาที สุดท้ายเติม CBS, TMTD และ Sulphur บดต่อเป็นเวลา 2 นาที ยางที่ได้หลังจากหลังจากที่ผสมสารเคมีต่างๆ เรียบร้อยแล้วเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound)

1.2.2 นำคอมปาวด์ที่ได้ไปรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่อง Two-Roll Mill

1.3 การทดสอบคุณสมบัติของยาง

นำยางที่บดแล้วไปทดสอบสมบัติการทำให้ยางคงรูป โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer ยี่ห้อ TECH-PRO รุ่น rheoTECH MD+ ที่ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 เครื่องบราเบนด์รุ่น Lab station ของภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

1.3 การทดสอบคุณสมบัติของยาง

นำยางที่บดแล้วไปทดสอบสมบัติการทำให้ยางคงรูป โดยใช้เครื่อง Moving Die Rheometer ยี่ห้อ TECH-PRO รุ่น rheoTECH MD+ ที่ มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

1.4 การขึ้นรูปยาง (Forming)

1.4.2 ขึ้นรูปยางโดยใช้แม่พิมพ์ (Moulding)

การใช้แม่พิมพ์ขึ้นรูปยางเป็นแผ่นบางมีความหนาประมาณ 2 มิลลิเมตร เป็นการขึ้นรูปยางพร้อมๆ กับการเกิดปฏิกิริยาการคงรูป (Vulcanization) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัด โดยใช้เครื่อง Compression Mould ที่อุณหภูมิ 150°C ใช้เวลาที่ 90% cure time เครื่อง Compression Mould แสดงดังรูปที่ 3 นำแผ่นยางที่ได้มาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ (rubber chip) ขนาด $1\times 1\times 0.2\text{ cm}$ เพื่อนำไปศึกษาการดูดซับสารในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3 เครื่อง Compression Mould ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption) และการทดสอบการคายออก (Desorption) ของของเหลวสารอินทรีย์บริสุทธิ์

ทดสอบคุณสมบัติการถูกดูดซับ (Sorption) การหลุดออก (Desorption) และพฤติกรรมการแพร่เข้าไปในเนื้อยาง (Diffusion) ของตัวทำละลายบริสุทธิ์ โดยทดลองกับ น้ำบริสุทธิ์ (Deionized

water) สารกลุ่มไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) อันได้แก่ Toluene และ m-Xylene สารกลุ่มชอบน้ำ (Hydrophilic) อันได้แก่ p-Cresol เพื่อดูความสามารถในการดูดซับของยางที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 °C) และเปรียบเทียบพฤติกรรมที่ต่างกันสำหรับสารอินทรีย์ต่างชนิด

2.1 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption)

2.1.1 นำตัวทำละลายบริสุทธิ์ Toluene ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วมีฝาแก้วปิด จำนวน 9 ขวด

2.1.2 นำชิ้นยางขนาด 1 cm x 1 cm x 0.2 cm จากยาง 3 สูตรที่เตรียมไว้ สูตรละ 3 ชิ้น แล้วชั่งน้ำหนักยางแต่ละชิ้น จดบันทึกและใส่ลงในขวดที่มีตัวทำละลายอยู่

2.1.3 ตั้งทิ้งไว้รอให้ยางบวมตัวขึ้น บันทึกน้ำหนักที่เวลาต่างๆ จะนำยางออกมาชั่งที่ผิวอย่างระมัดระวัง เพื่อให้สารที่ติดที่ผิวหลุดออกไปก่อนจะชั่งน้ำหนัก

2.1.4 ทำตามข้อ (2.1.3) จนกระทั่งน้ำหนักของยางที่ชั่งคงที่ จึงหยุดการทดลอง

ทำการทดลองกับ m-Xylene, p-Cresol และ น้ำเช่นเดียวกับการทดลองของ Toluene

2.2 การทดสอบการคายออก (Desorption)

2.2.1 นำยางที่ดูดซับ Toluene จนมีน้ำหนักคงที่มาวางทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้สารระเหยออกไปจากเนื้อยางสู่บรรยากาศ บันทึกน้ำหนักที่เวลาต่างๆ จนกระทั่งน้ำหนักของยางไม่เปลี่ยนแปลง

2.2.2 เก็บชิ้นยางที่ใช้แล้วในถุงทิ้งยาง และสารเคมีที่เหลือในขวดทิ้งสารตามประเภทของสารเคมี

ทำการทดลองกับชิ้นยางที่ดูดซับ m-Xylene, p-Cresol และ น้ำจนอิ่มตัวแล้ว เช่นเดียวกับการทดลองของชิ้นยางที่ดูดสาร Toluene จนอิ่มตัว



รูปที่ 4 ชันยางในขวดปิดใส่สารอินทรีย์บริสุทธิ์ ในภาพเป็นน้ำซึ่งใช้ปริมาณมากกว่า 15 ml. แต่สารอื่นจะใช้เพียง 15 ml. เท่านั้น

ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption) ของสารอินทรีย์ในน้ำแบบ Batch

3.1 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption)

3.1.1 เตรียมสารละลายของน้ำและสารอินทรีย์ Toluene ที่ความเข้มข้นประมาณ 1000 ppm โดยใช้ Volumetric flask ขนาด 1000 ml โดยจะใช้ Toluene 1.0 ml. แทนที่จะใช้การชั่งน้ำหนัก เมื่อจะบอกความเข้มข้นเป็น ppm จะคำนวณกลับโดยใช้ความหนาแน่นของสาร เมื่อได้สารละลาย Toluene แล้วจึงเติม Sodium azide ปริมาณ 0.5 g ลงในสารละลายที่เตรียมไว้เพื่อป้องกันไม่ให้สารถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เขย่าสารละลายให้เข้ากัน

3.1.2 ตวงสารละลายที่ความเข้มข้นประมาณ 1000 ppm มา 100 ml โดยใช้ Volumetric flask ขนาด 100 ml แล้วเทลงในขวดรูปชมพู่ (จำนวน 3 ขวด ขวดละ 100 ml) ปิดปากขวดด้วยให้แน่นด้วยจุกยางที่ห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมบาง แล้วจึงติดเทปกาวยึดอีกชั้นหนึ่ง

3.1.3 ชั่งชันยางขนาด 1x1x0.2 cm ของยางทั้ง 3 สูตร สูตรละประมาณ 5 g แล้วนำยางแต่ละสูตรที่ชั่งใส่ลงในสารละลายในขวดรูปชมพู่ที่เตรียมไว้ในขั้นตอนข้อ 3.1.2

3.1.4 สำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้น 500 ppm, 200 ppm และ 100 ppm ทำเช่นเดียวกับขั้นตอนข้อ 3.1.2 และข้อ 3.1.3



รูปที่ 5 ขวดรูปชมพู่บรรจุสารละลายและขึ้นยางบนเครื่องเขย่า

3.1.5 นำขวดรูปชมพู่ทั้ง 12 ขวด เข้าเครื่องเขย่า เพื่อให้การผสมสารเข้ากันและเพื่อเร่งให้การดูดซับสารละลายของน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ของชั้นยางให้ถึงสมดุลเร็วขึ้น โดยตั้งค่าเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาทีและที่อุณหภูมิ 30° C เป็นเวลา 7 วัน แล้วเก็บสารละลายในขวดรูปชมพู่ทั้ง 12 ขวดเพื่อนำไปตรวจวัดความเข้มข้นที่เหลือของสารอินทรีย์ในสารละลายโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography

สำหรับสารอินทรีย์ m-Xylene ก็จะใช้การตวงปริมาตรดังเช่น Toluene แต่สำหรับ p-Cresol และ Phenol จะใช้การชั่งน้ำหนักสารในการเตรียมสารละลาย แล้วจึงทดสอบคุณสมบัติการถูกดูดซับเช่นเดียวกับ Toluene ตามขั้นตอนข้อ 3.1.1- ข้อ 3.1.5

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption) ของสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำโดยใช้หลอดดูดซับขนาดเล็ก (Mini-Column)

4.1 สร้างหอดูดซับสาร โดยใช้ column แก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2.6 cm และสูง 22.5 cm ในหอดูดซับจะบรรจุชั้นยาง ขนาด 1 cm x 1 cm x 0.2 cm ปริมาณ 25 g ผสมกับกรวด บรรจุจนถึงระดับทางออก

4.1.1.1 ก่อนการบรรจุชั้นยางกับกรวด จะเติมน้ำลงในหอดูดซับสารจนถึงระดับทางออกของน้ำแล้วจึงวัดปริมาตรน้ำเพื่อหาปริมาตรทั้งหมดของหอดูดซับ

4.1.1.2 หลังการบรรจุชั้นยางและกรวด เติมน้ำลงในหอดูดซับสารแล้ววัดปริมาตรน้ำที่แทรกในช่องว่าง จึงเป็นการวัดปริมาตรของช่องว่าง (Void Volume)

4.2 เตรียมสารละลายของ Toluene ในน้ำที่ความเข้มข้นประมาณ 500 ppm โดยใช้ Volumetric flask ขนาด 2000 ml

4.2.1 ใช้ปิเปตดูดตัวทำละลายอินทรีย์ toluene มา 1 ml ใส่ลงใน Volumetric flask ขนาด 2000 ml

4.2.2 เติม Ethanol ปริมาณ 100 ml เพื่อช่วยให้ toluene ละลายในน้ำได้ดีขึ้น เขย่าให้เข้ากันก่อน แล้วเติมน้ำจนครบ 2000 ml

4.2.3 ใส่ Sodium Azide ปริมาณ 1 g ลงในสารละลายที่เตรียมไว้ เขย่าให้เข้ากัน เพื่อป้องกันการเกิด Biodegradation

4.2.4 ทุกๆ 1 ชั่วโมง จะเก็บตัวอย่างสารละลาย Toluene ที่ทางออกของหอดูดซับไว้ประมาณ 5 ml เพื่อวัดความเข้มข้นของสารละลาย

4.3 ภาชนะที่บรรจุสารละลายจะต่อกับ Peristaltic Pump โดยใช้ท่อแก้วและสายพลาสติก สายที่ผ่านปั๊มจะต่อเข้ากับทางเข้าหอดูดซับซึ่งอยู่ทางด้านล่าง ส่วนทางด้านบนของหอดูดซับก็จะต่อเข้ากับภาชนะรองรับสารละลายโดยใช้สายพลาสติกและท่อแก้วเช่นกัน

4.4 เดินเครื่องปั๊มที่อัตราประมาณ 1.3 ml/min

4.5 จดเวลาเมื่อสารละลายไหลเข้าสู่ด้านล่างของหอดูดซับสารละลายไหลออกที่ด้านบนของหอดูดซับ

4.6 เริ่มจับเวลาชั่วโมงที่ 0 และเก็บตัวอย่างแรก เมื่อสารละลายไหลออกจากด้านบนของหอดูดซับครั้งแรก

เก็บตัวอย่างที่ 2 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 1

เก็บตัวอย่างที่ 3 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 2

เก็บตัวอย่างที่ 4 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 3
 เก็บตัวอย่างที่ 5 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 4
 เก็บตัวอย่างที่ 6 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 6
 เก็บตัวอย่างที่ 7 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 8
 เก็บตัวอย่างที่ 8 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 10
 เก็บตัวอย่างที่ 9 จากสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอ ในชั่วโมงที่ 12
 เก็บตัวอย่างที่ 9 จากภาชนะเก็บสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนของหอในชั่วโมงที่ 12



รูปที่ 6 หอดูดจับสารที่ประกอบขึ้นเองพร้อม Peristaltic ปัม สารจะถูกดูดจากภาชนะทางด้านซ้ายมือ เข้าทางด้านล่างของหอ แล้วออกทางด้านบนเข้าสู่ภาชนะเก็บสารละลาย

4.7 นตัวอย่างทั้ง 13 ตัวอย่างไปตรวจวัดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในสารละลายโดยใช้เครื่อง Gas Chromatography

ทำการทดลองเช่นเดียวกัน สำหรับสารละลาย m-Xylene, p-Cresol และ Phenol ตามขั้นตอนข้อ 4.1- ข้อ 4.7 สำหรับ Phenol และ p-Cresol ในขั้นตอนที่ 4.2.1 ซึ่งมาประมาณ 1 g โดยใช้น้ำ 2000 ml ซึ่งจะได้ความเข้มข้นประมาณ 500 ppm

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption), การคายออก (Desorption) ของน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์

4.1.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption)

ผลการดูดซับของยางกับตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์ ได้แก่ Toluene, m-Xylene และ p-Cresol รวมทั้งการดูดซับของยางกับน้ำ แสดงดังตารางที่ 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ โดยแสดงในรูปของน้ำหนักยางซึ่งกำลังบวมตัวจากการดูดซับที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.1.2 การทดสอบการคายออก (Desorption)

ผลการคายออกของตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์ ได้แก่ Toluene, m-Xylene และ p-Cresol ที่ออกจากยาง รวมทั้งการคายออกของน้ำที่ออกจากยาง แสดงดังตารางที่ 6, 7, 8 และ 9 ตามลำดับ โดยแสดงในรูปของน้ำหนักยางที่มีการระเหยออกของสารที่ช่วงเวลาต่างๆ

4.2 การทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายของสารอินทรีย์ในน้ำ

ผลการดูดซับของยางกับสารละลายของสารอินทรีย์ ได้แก่ Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol แสดงดังตารางที่ 10, 11, 12 และ 13 ตามลำดับ โดยแสดงในรูปของความเข้มข้นที่เตรียมตอนเริ่มต้น และความเข้มข้นสุดท้ายหลังจากผ่านการทดสอบการดูดซับ

4.3 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสารละลายของสารอินทรีย์โดยใช้หลอดดูดขนาดเล็ก (mini-column)

ผลการดูดซับของยางกับสารละลายของตัวทำละลายอินทรีย์ ได้แก่ Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol แสดงดังตารางที่ 14 โดยแสดงในรูปของความเข้มข้นเริ่มต้น, ความเข้มข้นของสารละลายสุดท้ายทั้งหมดที่เคลื่อนที่ผ่านหลอดดูด และความเข้มข้นของสารละลายที่ออกจากหลอดดูดที่ช่วงเวลาต่างๆ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสาร Toluene ปริมาณที่เข้าไปในเหยือก

No.	Wt (g) (t=0 min)	Wt (g) (t=30 min)	Wt (g) (t=60min)	Wt (g) (t=90min)	Wt (g) (t=120min)	Wt (g) (t=180min)	Wt (g) (t=240min)
R100-A	0.224	0.559	0.725	0.787	0.872	0.936	0.956
R100-B	0.238	0.596	0.763	0.845	0.918	0.984	1.013
R100-C	0.204	0.498	0.665	0.720	0.794	0.853	0.870
C30-A	0.281	0.541	0.688	0.763	0.829	0.877	0.900
C30-B	0.258	0.501	0.636	0.704	0.763	0.809	0.826
C30-C	0.284	0.557	0.701	0.767	0.827	0.893	0.923
Ca30-A	0.244	0.524	0.656	0.732	0.778	0.844	0.860
Ca30-B	0.241	0.507	0.645	0.718	0.776	0.829	0.842
Ca30-C	0.244	0.510	0.649	0.710	0.784	0.843	0.857

ตารางที่ 2 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=300min)	Wt (g) (t=360min)	Wt (g) (t=540min)	Wt (g) (t=720min)	Wt (g) (t=1440min)	Wt (g) (t=2910min)	Wt (g) (t=7230min)
R100-A	0.975	0.977	0.980	0.980	0.980	0.987	0.988
R100-B	1.026	1.033	1.034	1.036	1.037	1.037	1.043
R100-C	0.880	0.894	0.895	0.896	0.897	0.910	0.911
C30-A	0.922	0.925	0.935	0.935	0.936	0.956	0.956
C30-B	0.853	0.853	0.853	0.853	0.855	0.857	0.863
C30-C	0.940	0.943	0.944	0.945	0.948	0.954	0.956
Ca30-A	0.876	0.878	0.885	0.885	0.886	0.903	0.903
Ca30-B	0.879	0.881	0.892	0.893	0.893	0.905	0.905
Ca30-C	0.874	0.880	0.884	0.885	0.890	0.902	0.902

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสาร m-Xylene บริสุทธิ์เข้าไปในเนื้อยาง

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=30min)	Wt (g) (t=60min)	Wt (g) (t=90min)	Wt (g) (t=120min)	Wt (g) (t=180min)	Wt (g) (t=240min)
R100-D	0.209	0.522	0.628	0.689	0.732	0.834	0.856
R100-E	0.222	0.546	0.662	0.744	0.814	0.888	0.921
R100-F	0.217	0.543	0.651	0.724	0.778	0.864	0.885
C30-D	0.254	0.456	0.567	0.621	0.700	0.757	0.785
C30-E	0.247	0.434	0.560	0.621	0.674	0.747	0.765
C30-F	0.274	0.521	0.613	0.678	0.748	0.829	0.855
Ca30-D	0.244	0.484	0.610	0.685	0.742	0.807	0.830
Ca30-E	0.259	0.512	0.631	0.694	0.762	0.831	0.858
Ca30-F	0.241	0.497	0.608	0.674	0.731	0.789	0.817

ตารางที่ 3 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=300min)	Wt (g) (t=360min)	Wt (g) (t=540min)	Wt (g) (t=720min)	Wt (g) (t=1440min)	Wt (g) (t=2910min)	Wt (g) (t=7230min)
R100-D	0.868	0.880	0.882	0.882	0.883	0.885	0.886
R100-E	0.936	0.949	0.949	0.949	0.949	0.954	0.954
R100-F	0.902	0.912	0.912	0.912	0.913	0.928	0.928
C30-D	0.802	0.809	0.810	0.812	0.813	0.820	0.820
C30-E	0.780	0.792	0.793	0.793	0.794	0.800	0.801
C30-F	0.866	0.879	0.880	0.880	0.881	0.881	0.887
Ca30-D	0.851	0.860	0.863	0.864	0.865	0.874	0.874
Ca30-E	0.880	0.886	0.890	0.897	0.898	0.918	0.921
Ca30-F	0.831	0.840	0.843	0.845	0.846	0.863	0.865

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของสาร p-Cresol ปริมาณที่เข้าไปในตัวอย่าง

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=30min)	Wt (g) (t=60min)	Wt (g) (t=120min)	Wt (g) (t=240min)	Wt (g) (t=360min)
R100-G	0.204	0.213	0.208	0.208	0.212	0.220
R100-H	0.205	0.221	0.216	0.216	0.218	0.226
R100-I	0.218	0.229	0.227	0.228	0.230	0.233
C30-G	0.265	0.267	0.274	0.272	0.275	0.283
C30-H	0.278	0.279	0.286	0.284	0.288	0.292
C30-I	0.273	0.280	0.290	0.280	0.284	0.288
Ca30-G	0.264	0.267	0.265	0.266	0.273	0.277
Ca30-H	0.265	0.268	0.267	0.273	0.272	0.274
Ca30-I	0.258	0.267	0.260	0.265	0.274	0.276

ตารางที่ 4 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=540min)	Wt (g) (t=720min)	Wt (g) (t=1440min)	Wt (g) (t=2910min)	Wt (g) (t=7230min)	Wt (g) (t=13020min)
R100-G	0.223	0.223	0.238	0.243	0.329	0.329
R100-H	0.227	0.228	0.242	0.251	0.268	0.268
R100-I	0.234	0.236	0.254	0.256	0.262	0.272
C30-G	0.284	0.286	0.288	0.291	0.293	0.311
C30-H	0.295	0.296	0.312	0.312	0.313	0.325
C30-I	0.291	0.293	0.305	0.309	0.313	0.313
Ca30-G	0.278	0.280	0.292	0.295	0.314	0.314
Ca30-H	0.283	0.285	0.293	0.297	0.338	0.338
Ca30-I	0.276	0.277	0.293	0.298	0.304	0.304

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการดูดซับ (Sorption) ของน้ำบริสุทธิ์ (H_2O) เข้าไปในเนื้อยาง

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=60min)	Wt (g) (t=170min)	Wt (g) (t=290min)	Wt (g) (t=470min)	Wt (g) (t=590min)	Wt (g) (t=1520min)	Wt (g) (t=2930min)
R100-J	0.227	0.228	0.229	0.230	0.231	0.232	0.232	0.232
R100-K	0.213	0.214	0.216	0.216	0.217	0.217	0.217	0.217
R100-L	0.212	0.213	0.216	0.217	0.217	0.217	0.217	0.217
C30-J	0.264	0.268	0.269	0.270	0.272	0.272	0.272	0.272
C30-K	0.279	0.280	0.280	0.280	0.281	0.281	0.283	0.283
C30-L	0.264	0.264	0.265	0.267	0.267	0.269	0.269	0.269
Ca30-J	0.275	0.275	0.279	0.280	0.281	0.281	0.281	0.281
Ca30-K	0.272	0.273	0.275	0.276	0.277	0.277	0.277	0.277
Ca30-L	0.266	0.269	0.270	0.271	0.272	0.272	0.272	0.272

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของ Toluene ออกสู่บรรยากาศ

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=20min)	Wt (g) (t=40min)	Wt (g) (t=60min)	Wt (g) (t=80min)	Wt (g) (t=100min)	Wt (g) (t=120min)
R100-A	0.987	0.857	0.722	0.626	0.500	0.396	0.347
R100-B	1.041	0.930	0.820	0.727	0.591	0.468	0.420
R100-C	0.896	0.789	0.684	0.597	0.473	0.378	0.333
C30-A	0.940	0.729	0.599	0.519	0.437	0.380	0.352
C30-B	0.861	0.679	0.559	0.475	0.405	0.346	0.321
C30-C	0.943	0.758	0.618	0.531	0.439	0.385	0.356
Ca30-A	0.895	0.719	0.581	0.481	0.387	0.330	0.304
Ca30-B	0.895	0.771	0.655	0.575	0.480	0.384	0.352
Ca30-C	0.897	0.779	0.660	0.579	0.470	0.380	0.343

ตารางที่ 6 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=140min)	Wt (g) (t=160min)	Wt (g) (t=180min)	Wt (g) (t=200min)	Wt (g) (t=220min)	Wt (g) (t=250min)
R100-A	0.295	0.280	0.253	0.245	0.235	0.226
R100-B	0.345	0.313	0.283	0.271	0.254	0.250
R100-C	0.277	0.264	0.234	0.230	0.216	0.213
C30-A	0.330	0.316	0.308	0.298	0.295	0.286
C30-B	0.300	0.291	0.283	0.278	0.270	0.264
C30-C	0.332	0.329	0.312	0.308	0.299	0.291
Ca30-A	0.280	0.277	0.259	0.257	0.250	0.246
Ca30-B	0.302	0.293	0.271	0.263	0.256	0.248
Ca30-C	0.304	0.296	0.270	0.263	0.252	0.251

ตารางที่ 6 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=340min)	Wt (g) (t=430min)	Wt (g) (t=1180min)	Wt (g) (t=1660min)	Wt (g) (t=2840min)	Wt (g) (t=5970min)
R100-A	0.220	0.218	0.204	0.203	0.202	0.202
R100-B	0.226	0.220	0.208	0.207	0.207	0.206
R100-C	0.194	0.192	0.182	0.181	0.181	0.181
C30-A	0.277	0.271	0.264	0.260	0.260	0.260
C30-B	0.256	0.252	0.243	0.243	0.243	0.243
C30-C	0.279	0.275	0.266	0.265	0.264	0.264
Ca30-A	0.239	0.236	0.228	0.227	0.227	0.227
Ca30-B	0.238	0.233	0.229	0.225	0.224	0.224
Ca30-C	0.235	0.230	0.221	0.220	0.219	0.219

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของ m-Xylene ออกสู่บรรยากาศ

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=20min)	Wt (g) (t=40min)	Wt (g) (t=60min)	Wt (g) (t=80min)	Wt (g) (t=100min)	Wt (g) (t=120min)
R100-D	0.889	0.850	0.810	0.765	0.683	0.619	0.586
R100-E	0.964	0.914	0.877	0.832	0.749	0.694	0.662
R100-F	0.917	0.852	0.782	0.720	0.622	0.555	0.511
C30-D	0.816	0.774	0.737	0.692	0.627	0.575	0.547
C30-E	0.800	0.753	0.709	0.671	0.605	0.545	0.529
C30-F	0.884	0.832	0.786	0.747	0.673	0.617	0.600
Ca30-D	0.882	0.842	0.801	0.758	0.703	0.632	0.601
Ca30-E	0.923	0.873	0.825	0.781	0.717	0.642	0.612
Ca30-F	0.873	0.807	0.739	0.677	0.604	0.530	0.499

ตารางที่ 7 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=140min)	Wt (g) (t=160min)	Wt (g) (t=180min)	Wt (g) (t=200min)	Wt (g) (t=220min)	Wt (g) (t=250min)
R100-D	0.512	0.485	0.456	0.439	0.415	0.385
R100-E	0.587	0.559	0.526	0.508	0.479	0.457
R100-F	0.456	0.426	0.388	0.368	0.340	0.311
C30-D	0.489	0.447	0.432	0.422	0.393	0.368
C30-E	0.463	0.441	0.402	0.392	0.371	0.351
C30-F	0.522	0.500	0.472	0.461	0.432	0.410
Ca30-D	0.547	0.510	0.474	0.460	0.435	0.411
Ca30-E	0.557	0.525	0.489	0.475	0.448	0.425
Ca30-F	0.437	0.407	0.376	0.358	0.333	0.313

ตารางที่ 7 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=340min)	Wt (g) (t=430min)	Wt (g) (t=1180min)	Wt (g) (t=1660min)	Wt (g) (t=2840min)	Wt (g) (t=5970min)
R100-D	0.328	0.270	0.190	0.186	0.185	0.185
R100-E	0.389	0.310	0.205	0.200	0.200	0.199
R100-F	0.260	0.228	0.194	0.190	0.190	0.190
C30-D	0.322	0.283	0.237	0.232	0.232	0.232
C30-E	0.308	0.274	0.233	0.228	0.228	0.228
C30-F	0.360	0.319	0.256	0.251	0.250	0.248
Ca30-D	0.354	0.299	0.233	0.228	0.227	0.227
Ca30-E	0.363	0.310	0.243	0.238	0.238	0.238
Ca30-F	0.272	0.253	0.230	0.225	0.225	0.224

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของ p-Cresol ออกสู่บรรยากาศ

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=20min)	Wt (g) (t=120min)	Wt (g) (t=210min)	Wt (g) (t=360min)	Wt (g) (t=1230min)	Wt (g) (t=2850min)
R100-G	0.231	0.229	0.227	0.226	0.226	0.221	0.221
R100-H	0.240	0.238	0.235	0.233	0.233	0.216	0.216
R100-I	0.247	0.245	0.245	0.244	0.243	0.233	0.233
C30-G	0.290	0.287	0.283	0.283	0.281	0.272	0.272
C30-H	0.316	0.315	0.314	0.312	0.310	0.306	0.306
C30-I	0.310	0.308	0.306	0.304	0.302	0.292	0.292
Ca30-G	0.273	0.272	0.267	0.265	0.264	0.262	0.262
Ca30-H	0.297	0.296	0.296	0.294	0.292	0.291	0.291
Ca30-I	0.285	0.284	0.284	0.282	0.280	0.272	0.272

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบการคายออก (Desorption) ของน้ำ (H_2O) ออกสู่บรรยากาศ

No.	Wt (g) (t=0min)	Wt (g) (t=25min)	Wt (g) (t=50min)	Wt (g) (t=75min)	Wt (g) (t=100min)
R100-J	0.230	0.228	0.227	0.227	0.227
R100-K	0.216	0.216	0.213	0.212	0.212
R100-L	0.215	0.214	0.212	0.212	0.212
C30-J	0.263	0.260	0.258	0.259	0.258
C30-K	0.283	0.281	0.280	0.280	0.280
C30-L	0.268	0.267	0.267	0.266	0.266
Ca30-J	0.276	0.275	0.275	0.275	0.274
Ca30-K	0.274	0.274	0.273	0.271	0.271
Ca30-L	0.268	0.268	0.266	0.264	0.263

ตารางที่ 9 (ต่อ)

No.	Wt (g) (t=125min)	Wt (g) (t=160min)	Wt (g) (t=220min)	Wt (g) (t=340min)	Wt (g) (t=1540min)
R100-J	0.227	0.223	0.223	0.223	0.223
R100-K	0.211	0.211	0.210	0.210	0.210
R100-L	0.211	0.211	0.211	0.211	0.211
C30-J	0.258	0.258	0.258	0.258	0.258
C30-K	0.279	0.279	0.279	0.278	0.278
C30-L	0.265	0.265	0.265	0.264	0.264
Ca30-J	0.274	0.274	0.274	0.274	0.274
Ca30-K	0.270	0.270	0.269	0.269	0.269
Ca30-L	0.263	0.263	0.263	0.263	0.263

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย Toluene ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สูตรยาง	No.	น้ำหนักยาง (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นสุดท้าย (ppm)
R100	1	4.991	85.671	1.518
	2	5.083	171.344	4.154
	3	4.952	428.377	6.218
	4	5.090	856.814	16.462
C30	1	5.084	85.671	1.359
	2	5.023	171.344	3.573
	3	5.057	428.377	7.743
	4	5.045	856.814	25.207
Ca30	1	5.028	85.671	1.387
	2	5.078	171.344	4.612
	3	5.054	428.377	7.513
	4	5.032	856.814	11.623
เฉลี่ย	1	5.034	85.671	1.421
	2	5.061	171.344	4.113
	3	5.021	428.377	7.158
	4	5.056	856.814	17.764

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย m-Xylene ในน้ำที่ความเข้มข้น
ต่าง ๆ

สูตรยาง	No.	น้ำหนักยาง (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นสุดท้าย (ppm)
R100	1	4.971	84.646	2.450
	2	4.876	169.295	3.513
	3	4.899	423.256	20.205
	4	5.083	846.573	35.020
C30	1	4.945	84.646	1.945
	2	4.896	169.295	3.188
	3	4.918	423.256	14.197
	4	4.994	846.573	31.799
Ca30	1	5.047	84.646	1.280
	2	4.861	169.295	2.835
	3	4.924	423.256	12.796
	4	4.974	846.573	35.571
เฉลี่ย	1	4.988	84.646	1.892
	2	4.878	169.295	3.179
	3	4.913	423.256	15.733
	4	5.017	846.573	33.410

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย Phenol ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สูตรยาง	No.	น้ำหนักยาง (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นสุดท้าย (ppm)
R100	1	5.093	105.981	81.933
	2	4.923	197.181	171.465
	3	5.037	488.847	393.893
	4	4.955	973.539	857.716
C30	1	5.035	105.981	81.933
	2	5.009	197.181	171.465
	3	4.962	488.847	393.893
	4	5.070	973.539	857.716
Ca30	1	4.982	105.981	81.933
	2	5.042	197.181	171.465
	3	4.960	488.847	393.893
	4	5.090	973.539	857.716
เฉลี่ย	1	5.037	105.981	81.933
	2	4.991	197.181	171.465
	3	4.986	488.847	393.893
	4	5.038	973.539	857.716

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย p-Cresol ในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สูตรยาง	No.	น้ำหนักยาง (g)	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ความเข้มข้นสุดท้าย (ppm)
R100	1	4.999	159.819	121.547
	2	5.075	280.861	196.840
	3	5.078	598.094	514.926
	4	5.035	1202.600	884.785
C30	1	4.959	159.819	114.080
	2	5.031	280.861	198.015
	3	4.969	598.094	410.687
	4	4.929	1202.600	998.271
Ca30	1	5.052	159.819	133.730
	2	5.091	280.861	201.058
	3	4.984	598.094	506.800
	4	5.004	1202.600	954.126
เฉลี่ย	1	5.004	159.819	123.119
	2	5.066	280.861	198.638
	3	5.010	598.094	477.471
	4	4.989	1202.600	945.727

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบการดูดซับของสารละลาย Toluene ในน้ำด้วยหอดูดซับขนาดเล็ก

ความเข้มข้น (mg/l)	toluene	m-xylene	phenol	p-cresol
สารละลายเริ่มต้น	428.377	423.256	554.481	316.120
ชั่วโมงที่ 0	3.177	3.527	-	139.170
ชั่วโมงที่ 1	1.197	0.042	484.302	291.049
ชั่วโมงที่ 2	0.711	0.222	500.663	286.865
ชั่วโมงที่ 3	1.582	0.159	458.205	488.403
ชั่วโมงที่ 4	1.129	0.072	489.654	401.022
ชั่วโมงที่ 6	1.574	0.413	507.706	402.975
ชั่วโมงที่ 8	1.498	7.641	511.207	354.836
ชั่วโมงที่ 10	1.915	14.803	518.577	428.271
ชั่วโมงที่ 12	0.425	7.828	520.849	379.427
สารละลายสุดท้าย	1.990	5.126	514.750	87.17927

บทที่ 5

วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption), การคายออก (Desorption) ของน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์

5.1.1 การทดสอบการดูดซับ (Sorption)

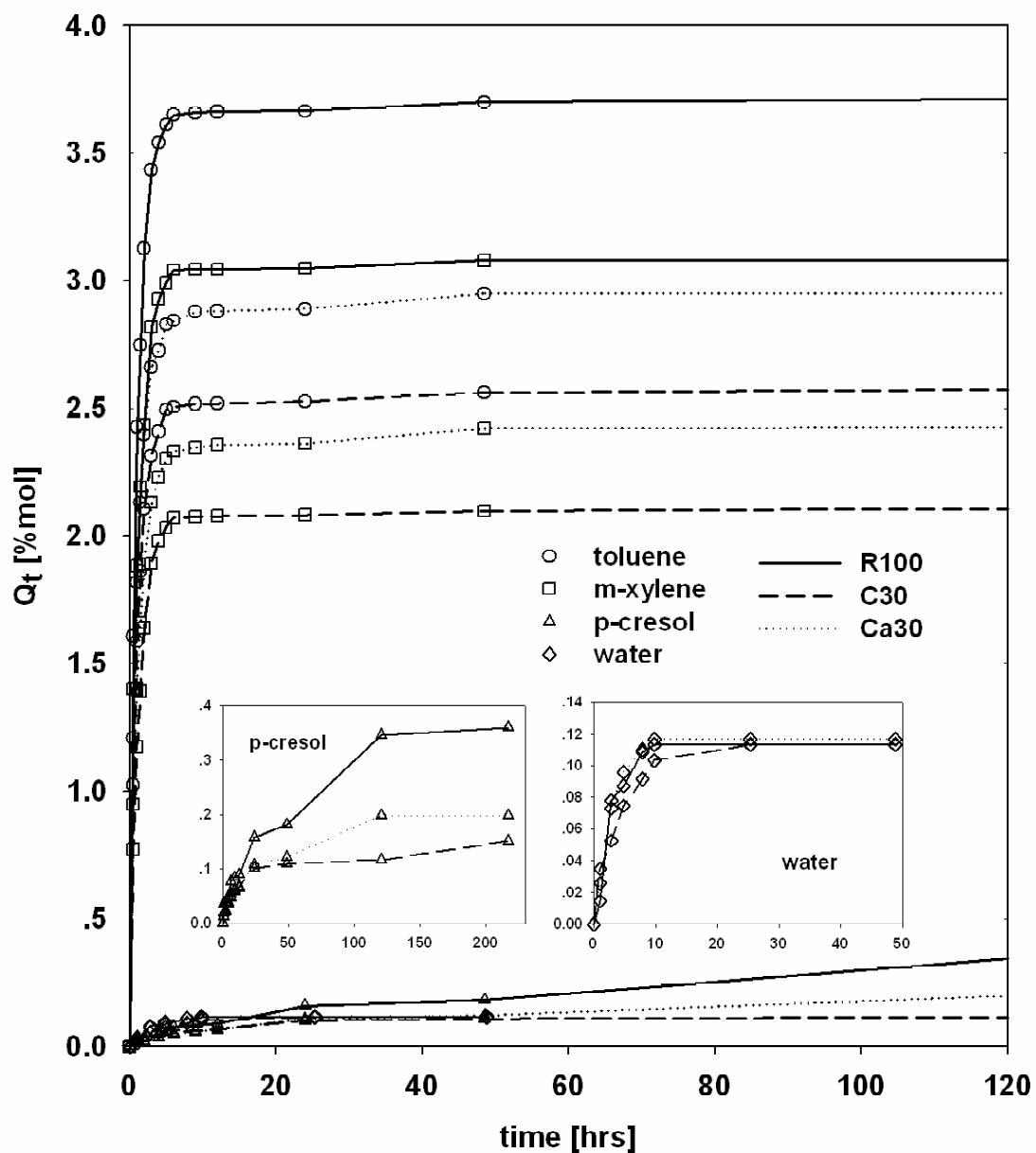
5.1.1.1 ศึกษากลไกการถ่ายโอนมวล (Transport Mechanism)

จากผลการทดลองจะสามารถหาปริมาณการดูดซับ (% mol uptake) โดยแสดงในหน่วยโมลของตัวทำละลายที่ถูกดูดซับเข้าไปในยาง (Q_t) ต่อ 100 กรัมของยาง (% โมล) ที่เวลา t ใดๆ ดังสูตร

$$Q_t = \frac{\text{โมลของสารอินทรีย์}}{\text{มวลของชิ้นยาง (g)}} * 100 (\text{g}) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

โดยที่ มวลของชิ้นยาง คือ มวลตอนเริ่มต้นก่อนทำการทดลอง

เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับ (Q_t) กับเวลา แสดงดังรูปที่ 7 จากกราฟสังเกตเห็นได้ว่า ปริมาณสารที่เข้าไปในยางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่คือถึงสภาวะสมดุลนั่นเอง



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับ (Q_t) กับเวลา ที่ได้จากการทดลอง ผลของ p-cresol และน้ำแสดงให้เห็นให้ชัดขึ้นในกราฟรูปเล็ก

กลไกของการดูดซับสามารถศึกษาจากความสัมพันธ์

$$\log(Q_t / Q_\infty) = \log k + n \log t \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

โดยที่ Q_t คือ ปริมาณการดูดซับในช่วงเวลาต่างๆ (% โมล)

Q_∞ คือ ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล (% โมล)

k คือ พารามิเตอร์ที่บอกถึงแรงกระทำระหว่างยางและสารอินทรีย์

n คือ พารามิเตอร์ที่บอกกลไกการเคลื่อนที่ของสารอินทรีย์ในเนื้อยาง

t คือ เวลา (วินาที)

จากผลการทดลองที่ได้เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\log(Q_t/Q_\infty)$ กับ $\log(\text{time})$ ในช่วงแรกๆ ของการดูดซับ ทำให้ได้ค่า n และ k ดังแสดงในตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาค่า n สำหรับทุกสารอินทรีย์และน้ำในทุกๆ สูตรยาง จะพบว่ามีค่าประมาณ 0.5 ซึ่งแสดงว่าการแพร่ของสารเป็นแบบ Fickian diffusion ซึ่งเป็นการแพร่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ จึงสามารถใช้ Fick's Law ในการอธิบายการถ่ายโอนมวลสารได้

ตารางที่ 15 แสดงค่า n และ k สำหรับกระบวนการดูดซับของสารอินทรีย์เข้าสู่เนื้อยาง

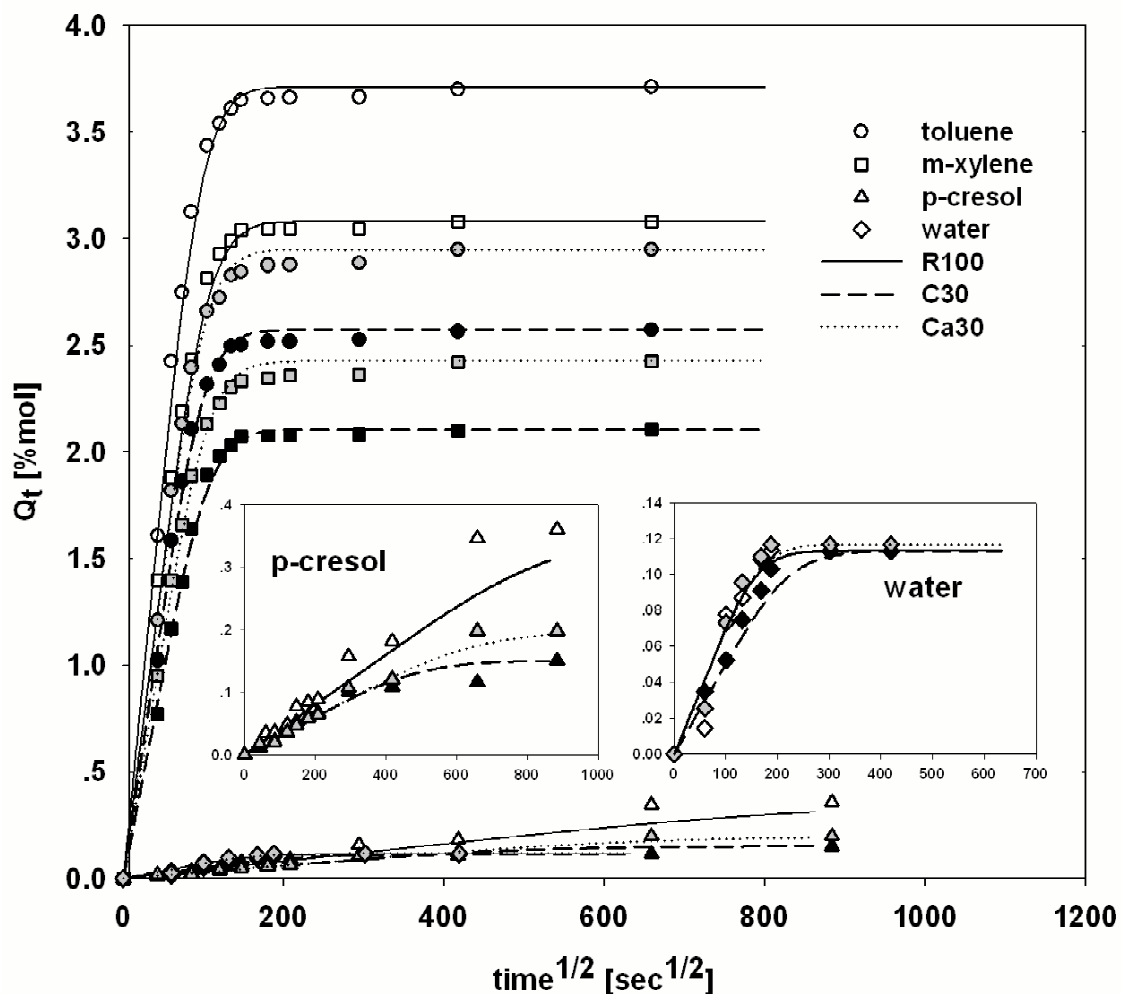
สาร-สูตรยาง	n	k
toluene-R100	0.475	1.259E-02
toluene-C30	0.521	8.236E-03
toluene-Ca30	0.494	1.032E-02
m-xylene-R100	0.400	2.276E-02
m-xylene-C30	0.505	8.600E-03
m-xylene-Ca30	0.496	9.643E-03
p-cresol-R100	0.498	1.364E-03
p-cresol-C30	0.528	1.532E-03
p-cresol-Ca30	0.486	1.874E-03
H2O-R100	0.322	3.459E-02
H2O-C30	0.482	5.804E-03
H2O-Ca30	0.404	1.536E-02

จากนั้นจึงวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D) ของสารในเนื้อยาง โดยวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q_t กับ $\text{time}^{(1/2)}$ แสดงดังรูปที่ 8 (แสดงผลการทดลองในรูปของสัญลักษณ์) จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกของการดูดซับ กราฟมีลักษณะแนวโน้มเป็น

เส้นตรงเนื่องจากการแพร่ของสารเป็นแบบ Fickian diffusion นั้นเอง ทำให้สามารถหาค่า Diffusion coefficient จากสมการช่วงแรกของการดูดซับ ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = 4 \left[\frac{Dt}{\pi h^2} \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

โดยที่ h คือ ความหนาของชั้นยางในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.2 cm ส่วนตัวแปรอื่นๆ เป็นดังที่นิยามไว้แล้วตอนต้น



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการดูดซับ (Q_t) กับ $\text{time}^{(1/2)}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองซึ่งแสดงในรูปของสัญลักษณ์และค่าในทางทฤษฎีซึ่งแสดงในรูปของเส้น สำหรับสีแรเงาในสัญลักษณ์ช่วยในการแยกชุดข้อมูลให้ชัดเจนขึ้น

สมการที่ (5.3) สามารถเขียนในรูปใหม่ได้เป็น

$$D = \pi \left[\frac{h\theta}{4Q_\infty} \right]^2. \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

โดยที่ θ คือ ความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของ Q_t กับ $\text{time}^{(1/2)}$

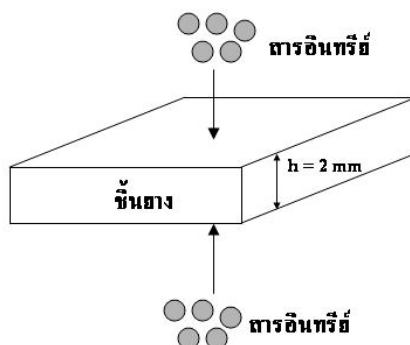
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ D หาได้จากสมการที่ (5.4) จากนั้นจึงใช้ค่า D ที่ประมาณได้ คำนวณหาปริมาณการดูดซับของสารในชั้นยาง (Q_t) ในทางทฤษฎี ซึ่งได้จากการอินทิเกรต ฟังก์ชันการกระจายความเข้มข้นทั่วทั้งปริมาตรของแผ่นฟิล์มบาง (ในที่นี้คือชั้นยาง) สมการแสดง การถ่ายโอนมวลในแผ่นฟิล์มบางสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

เมื่อ C แทนความเข้มข้นของสาร และ x แทนระยะทางการเคลื่อนที่ของสารในแนวความหนาของ ชั้นยาง โดยมีสมการเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) คือ

$$\begin{aligned} C &= 0, & 0 < x < \frac{h}{2}, & t \leq 0 \\ C &= C_0, & x = 0, & t > 0 \\ C &= 0, & x = \frac{h}{2}, & t > 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

จะเห็นว่าเงื่อนไขดังกล่าวจะอยู่ในช่วงครึ่งหนึ่งของความหนาของชั้นยาง เพราะทั้งสองด้านของ ยางสัมผัสกับสารอินทรีย์เช่นเดียวกัน การแพร่จะเกิดขึ้นในทั้งสองพื้นผิว



รูปที่ 9 แสดงการแพร่ของสารเข้าไปในเนื้อยาง

คำตอบของสมการที่ (5.5) เมื่อใช้ชุดเงื่อนไข 6 คือ [15]

$$\frac{Q_t}{Q_\infty} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{h^2} \right] \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

เมื่อได้ค่า Q_t ทางทฤษฎีจากสมการที่ (5.7) แล้ว เมื่อแสดงเป็นกราฟเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 8 (แสดงในรูปของเส้น) จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณการดูดซับในทางทฤษฎีและจากการทดลองมีค่าสอดคล้องกันอย่างมาก แม้ว่าจะให้ค่าความหนา h เป็นค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่าของ h จะมากขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ยางบวมตัวมากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าปริมาณการดูดซับ (Q_∞) ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 16 แสดงให้เห็นว่ายางสามารถดูดซับไม่มีขั้วเช่นเดียวกันกับยางนั้นคือ Toluene และ m-Xylene ได้ดีกว่า p-Cresol และน้ำซึ่งเป็นสารมีขั้ว และเมื่อพิจารณาที่สารใดสารหนึ่งโดยเปรียบเทียบทั้ง 3 สูตร จะพบว่าสูตรยางที่ไม่มีการใส่สารตัวเติม (R100) ดูดซับได้ดีกว่า สูตรยางที่ใส่หินปูน (Ca30) และสูตรยางที่ใส่ผงเขม่าดำ (C30) ตามลำดับ ซึ่งสามารถบอกได้ด้วยค่า k (จากตารางที่ 15) อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเขม่าดำเป็นสารที่ช่วยเสริมความแข็งแรง ทำให้โครงสร้างของยางขยับตัวได้น้อยลง ยางจึงขยายตัวได้น้อยลงเมื่อมีสารแทรกผ่านเข้ามา ทำให้สารเข้ามาในเนื้อยางได้ในปริมาณน้อยกว่านั่นเอง ในขณะที่หินปูนไม่ได้ช่วยในเรื่องการเสริมแรงมากเท่าเขม่าดำ แต่มักใช้เติมเพื่อลดต้นทุน

เมื่อพิจารณาค่า Diffusion Coefficient (D) ที่ได้จากสมการที่ (5.4) ซึ่งได้สรุปไว้ในตารางที่ 16 จะพบว่าสารที่มีค่า D มีเรียงจากมากไปน้อย คือ Toluene, m-Xylene, น้ำ และ p-Cresol ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่า D ของสารกลุ่มไม่มีขั้ว ได้แก่ Toluene และ m-Xylene สามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อยางซึ่งเป็นสารไม่มีขั้วเช่นเดียวกันได้ดีกว่าสารมีขั้ว ได้แก่ น้ำและ p-Cresol และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างคู่ของ Toluene กับ m-Xylene และคู่ของน้ำกับ p-Cresol จะพบว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กกว่าสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อยางได้เร็วกว่าทำให้ค่า D มากกว่า นั่นคือ Toluene แพร่เข้าไปได้เร็วกว่า m-Xylene และน้ำแพร่เข้าไปได้เร็วกว่า p-Cresol นั่นเอง และเมื่อพิจารณาเพียงสารใดสารหนึ่ง โดยเปรียบเทียบทั้ง 3 สูตร จะพบว่าค่า D ในแต่ละสูตรยางไม่แตกต่างกันมากนัก (แต่ก็มีแนวโน้มว่าการแพร่เข้าไปในยางที่มีสารตัวเติมจะช้ากว่ายางที่ไม่มีสารตัวเติม) มีเพียงผลของ p-Cresol ที่แสดงการแพร่เข้าไปในสูตรที่ใส่เขม่าดำได้ดีกว่าอีก 2 สูตร ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเขม่าดำอาจมีคุณสมบัติในการดูดซับแบบถาวรกับมันต์ซึ่งสามารถนำมาใช้ดูดซับประเภท Phenolic ได้ดี

ตารางที่ 16 แสดงค่าของ Q_∞ , D , S และ P

สาร-สูตรยาง	Q_∞ [%mol)	D [cm ² /s]	S	P [cm ² /s]
toluene-R100	3.711	7.937E-07	3.420	2.714E-06
toluene-C30	2.573	7.535E-07	2.371	1.787E-06
toluene-Ca30	2.949	7.440E-07	2.718	2.022E-06
m-xylene-R100	3.081	6.961E-07	3.271	2.277E-06
m-xylene-C30	2.106	6.597E-07	2.236	1.475E-06
m-xylene-Ca30	2.426	6.758E-07	2.576	1.741E-06
p-cresol-R100	0.360	9.703E-09	0.389	3.777E-09
p-cresol-C30	0.151	3.110E-08	0.163	5.072E-09
p-cresol-Ca30	0.198	1.799E-08	0.214	3.857E-09
H ₂ O-R100	0.113	3.000E-07	0.020	6.122E-09
H ₂ O-C30	0.113	1.537E-07	0.020	3.130E-09
H ₂ O-Ca30	0.117	2.825E-07	0.021	5.941E-09

เมื่อวิเคราะห์ต่อไปโดยหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับ (Sorption Coefficient, S) และค่าสัมประสิทธิ์การแทรกผ่าน (Permeation Coefficient, P) โดยอาศัยนิยามดังต่อไปนี้

$$S = \frac{M_\infty}{M_0} \quad \dots\dots\dots$$

(5.8)

โดยที่ M_∞ คือ มวลของสารที่ยางดูดซับเข้าไปเมื่อยางนั้นอยู่ที่สภาวะสมดุลแล้ว (g)
 M_0 คือ มวลของชิ้นยางตอนเริ่มต้น (g)

$$P = D X S$$

.....

(5.9)

ค่าของ S และ P ได้แสดงไว้แล้วในตารางที่ 16 จะเห็นได้ว่าค่าของ Sorption Coefficient เป็นไปในทำนองเดียวกับปริมาณการดูดซับ (Q_∞) ค่า Sorption Coefficient (S) เป็นค่าที่บอกแรงกระทำกันของยางกับสารอินทรีย์ จะเห็นว่าค่า S ของ Toluene และ m-Xylene มีค่าใกล้เคียงกัน นั่นคือ ยางกับสารทั้งสองมีแรงกระทำพอๆ กัน (สามารถดูได้จากค่า Interaction Parameter ระหว่างยางและสารดังจะได้กล่าวในส่วนของอุณหพลศาสตร์) ตามด้วย p-Cresol และน้ำ ตามลำดับ ส่วนค่า Permeation Coefficient (P) จะขึ้นกับทั้งค่าของ Diffusion Coefficient (D) และค่า Sorption Coefficient (S) เมื่อพิจารณาว่าการแพร่หรือการดูดซับมีผลต่อค่า P มากกว่ากันจะได้ว่าค่า P ของสาร Toluene มีค่ามากกว่า m-Xylene เล็กน้อย ตามด้วย น้ำและ p-Cresol ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.1.2 การศึกษาทางด้านอุณหพลศาสตร์ของการดูดซับ (Thermodynamics Aspect of Sorption)

- การหาค่าพลังงานอิสระของการผสม (Free energy of mixing)

ค่าพลังงานอิสระจากการผสมกันระหว่างสารโพลิเมอร์ซึ่งก็คล้ายกับตัวทำละลายอินทรีย์บริสุทธิ์สามารถหาได้จากสมการ

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T\Delta S_m \quad \text{..... (5.10)}$$

โดยที่ ΔG_m คือ พลังงานอิสระของการผสม (free energy of mixing)

ΔH_m คือ ค่าเอนทาลปีของการผสม (enthalpy of mixing)

ΔS_m คือ ค่าเอนโทรปีของการผสม (entropy of mixing)

ค่า ΔH_m (enthalpy of mixing) และค่า ΔS_m (entropy of mixing) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\Delta H_m = RT(\chi_{n_1} \Phi_s) \quad \text{..... (5.11)}$$

และ

$$\Delta S_m = RT(n_1 \ln \Phi_p + n_2 \ln \Phi_s) \quad \dots\dots\dots (5.12)$$

โดยที่ R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ $8.314 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

T คือ อุณหภูมิในที่มีค่าเท่ากับ 303 K

χ คือ พารามิเตอร์ของแรงกระทำ (Interaction Parameter) ระหว่างร่างแหของยาง (Rubber Network) กับสารที่ทำให้ยางบวม (Swelling Agent)

n_1 คือ จำนวนโมลของโพลิเมอร์

n_2 คือ จำนวนโมลของตัวทำละลาย

Φ_p คือ สัดส่วนปริมาตรของยางที่สภาวะสมดุล (volume fraction of polymer)

Φ_s คือ สัดส่วนปริมาตรของตัวทำละลายที่สภาวะสมดุล (volume fraction of solvent)

ค่า χ หรือ Interaction Parameter หรืออีกชื่อหนึ่งว่า Flory-Huggins Parameter ตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์ที่ศึกษาแรงกระทำระหว่างคู่ของยางกับสารใดๆ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\chi = \frac{V_s}{RT} (\delta_s - \delta_p)^2 + \beta \quad \dots\dots\dots$$

(5.13)

โดยที่ δ_s คือ พารามิเตอร์ของการละลาย (Solubility Parameter) ของสารที่ทำให้ยางบวมตัว

δ_p คือ พารามิเตอร์ของการละลาย ของร่างแหของยาง

β คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.34 สำหรับระบบที่มีแรงกระทำระหว่างยางกับตัวทำละลาย

V_s คือ ปริมาตรต่อโมลของสารที่ทำให้ยางบวม (Molar Volume)

ค่า V_s (molar volume) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$V_s = \frac{1}{\text{density of liquid}} \quad \dots\dots\dots (5.14)$$

$$\text{density of liquid} = A B^{-\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^n} \quad \dots\dots\dots (5.15)$$

โดยที่ A , B , n เป็นค่าคงที่เฉพาะสำหรับแต่ละสาร ส่วน T_c คืออุณหภูมิวิกฤตซึ่งก็เป็นค่าคงที่สำหรับสารชนิดหนึ่งๆ เช่นกัน

ค่า Φ (Volume Fraction) สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\Phi_p = \frac{\frac{m_p}{\rho_p}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_s}{\rho_s}}, \quad \text{และ} \quad \Phi_s = \frac{\frac{m_s}{\rho_s}}{\frac{m_p}{\rho_p} + \frac{m_s}{\rho_s}} \quad \dots\dots\dots(5.16)$$

โดยที่ m_p คือ น้ำหนักของซินยางตอนเริ่มต้น (g)

m_s คือ น้ำหนักของตัวทำละลายอินทรีย์ในเนื้อยางที่สภาวะสมดุล (g)

ρ_p คือ ความหนาแน่นของซินยางในที่มีค่าเท่ากับ 0.93 g/cm^3

ρ_s คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลายอินทรีย์

ดังนั้นจะสามารถหาค่า ΔH_m , ΔS_m และ ΔG_m ได้ซึ่งสรุปค่าไว้ในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 แสดงค่า ΔH_m , ΔS_m และ ΔG_m ของการผสมกับระหว่างยางและสารอินทรีย์ที่ 303 K

สาร-สูตรยาง	ΔH_m (J)	ΔS_m (J/K)	ΔG_m (J)
toluene-R100	3.892E-03	1.645E-02	-4.982
toluene-C30	4.397E-03	1.939E-02	-5.871
toluene-Ca30	4.039E-03	1.751E-02	-5.301
m-xylene-R100	3.537E-03	1.378E-02	-4.173
m-xylene-C30	3.839E-03	1.566E-02	-4.741
m-xylene-Ca30	3.833E-03	1.535E-02	-4.647
p-cresol-R100	4.933E-03	8.154E-03	-2.466
p-cresol-C30	3.284E-03	7.012E-03	-2.121
p-cresol-Ca30	3.991E-03	7.837E-03	-2.371
H₂O-R100	8.425E-03	8.139E-03	-2.458
H₂O-C30	1.030E-02	9.832E-03	-2.969
H₂O-Ca30	1.082E-02	1.038E-02	-3.135

จากตารางจะพบว่าค่า $\Delta G_m < 0$ สำหรับทุกสารและทุกสูตรยาง แสดงให้เห็นว่าการผสมกันระหว่างยางกับตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำเป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้เอง โดยถ้าค่า ΔG_m น้อยกว่าศูนย์มากเท่าไร ยิ่งแสดงว่ากระบวนการนั้นเกิดขึ้นได้ดี จากตารางค่าของ ΔG_m มีค่าเรียงจากมากไปน้อย คือ Toluene > m-Xylene > H₂O > p-Cresol ซึ่งเห็นได้ว่าเป็นไปในแนวโน้มเดียวกันกับปริมาณการดูดซับ (Q_{∞}) ที่ได้จากการทดลอง

- การหาปริมาณการเชื่อมโยง (Crosslink density)

อาศัยความรู้ด้านสมดุลจะทำให้ทราบว่า ในขณะที่ยางบวมตัวเต็มที่หรืออยู่ในภาวะสมดุลแล้วนั้น จะได้ว่าผลต่างของพลังงานอิสระ (Gibbs Free Energy) ของทั้งระบบจะมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งผลต่างดังกล่าวเกิดจากผลบวกของ $\Delta G_m + \Delta G_{elastic}$ ในขณะที่ ΔG_m คือผลต่างพลังงานอิสระที่เกิดจากการผสมดั่งที่คำนวณในข้างต้น และ $\Delta G_{elastic}$ เป็นพลังงานอิสระที่เกิดจากความยืดหยุ่นของโครงสร้างของโพลีเมอร์ เมื่อใดที่ผลรวมของค่าทั้งสองเป็นศูนย์ เมื่อนั้นระบบจะบวมตัวเต็มที่ ซึ่ง $\Delta G_{elastic}$ นี้ทำให้สามารถหาปริมาณการเชื่อมโยงของพันธะของยางได้ ซึ่งวิธีการทดลองโดยทั่วไปคือการนำชิ้นยางไปแช่ในตัวทำละลายที่ดี (Good Solvents) ซึ่งในที่นี้ก็คือ Toluene และ m-Xylene นั้นเอง การคำนวณจะใช้สมการของ Flory-Rehner ซึ่งเป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการประมาณการเชื่อมโยงของโพลีเมอร์ [16]

$$-\ln(1 - \Phi_p) - \Phi_p - \chi \Phi_p^2 = 2V_s \eta_{swell} \left(\Phi_p^{1/3} - \frac{2\Phi_p}{f} \right) \quad \dots\dots\dots(5.17)$$

โดยที่ η_{swell} คือ ปริมาณการเชื่อมโยงทางกายภาพ (Crosslink Density) ซึ่งหมายความรวมถึงการเชื่อมโยงที่เกิดทั้งทางพันธะเคมี และการเชื่อมโยงโครงสร้างทางกายภาพอันอาจเกิดจากสารตัวเติม

f คือ ค่าฟังก์ชันของการเชื่อมโยงมีค่าเท่ากับ 4 สำหรับระบบที่ใช้กำมะถันเป็นตัวทำให้เกิดการเชื่อมโยง (Sulphur Curing System)

หลังจากที่ได้ค่า η_{swell} (Crosslink Density) แล้วจะสามารถคำนวณหาค่า M_c ซึ่งเป็นค่ามวลโมเลกุลเฉลี่ยระหว่างสายโซ่ที่เกิดการเชื่อมโยง โดยใช้สมการ

$$\eta_{swell} = \frac{1}{2M_c} \quad \dots\dots\dots (5.18)$$

ดังนั้น

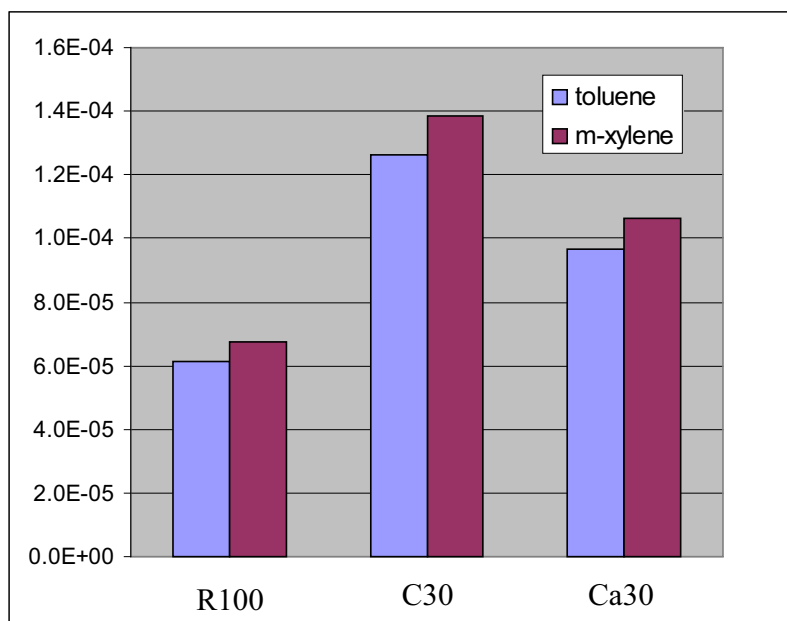
$$M_c = \frac{1}{2\eta_{swell}} \quad \dots\dots\dots (5.19)$$

ค่าของ η_{swell} และ M_c ที่คำนวณได้ แสดงไว้ในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 แสดงค่า η_{swell} และค่า M_c

สาร-สูตรยาง	η_{swell} [mol/cm ³]	M_c [cm ³ /mol]
toluene-R100	6.146E-05	8.139E+03
toluene-C30	1.264E-04	3.957E+03
toluene-Ca30	9.679E-05	5.168E+03
m-xylene-R100	6.766E-05	7.391E+03
m-xylene-C30	1.385E-04	3.611E+03
m-xylene-Ca30	1.063E-04	4.705E+03

เมื่อเปรียบเทียบค่า η_{swell} ที่ได้จากการแช่ชิ้นยางลงในสาร Toluene และ m-Xylene จะพบว่าค่า crosslink density ที่ได้จากทั้ง 2 สารในสูตรยางเดียวกันมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แสดงดังรูปที่ 10 ซึ่งตัวทำละลายที่จะนำมาใช้หา crosslink density นั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่สามารถเข้ากับยางได้ดี นอกจากตัวทำละลาย Toluene ที่นิยมใช้เป็น swelling agent [16,17] แล้วนั้น ยังมีรายงานที่ใช้ทำละลาย n-heptane เป็นตัว swelling agent อีกด้วย [18]



รูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่า crosslink density ที่ได้จากสาร Toluene และ m-Xylene ของทั้ง 3 สูตรยาง

จากรูปที่ 10 ค่าปริมาณการเชื่อมโยงของยางที่มีสารตัวเติมแตกต่างกันพบว่า ค่าปริมาณการเชื่อมโยงมีค่าเรียงจากมากไปน้อยคือ $C30 > Ca30 > R100$ ทั้งนี้อาจเนื่องจากเขม่าดำทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยางส่งผลให้การบวมตัวของยางที่เติมเขม่าดำน้อยลง [19] ส่วนในกรณีของหินปูน ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าหินปูนนั้นไม่ทำปฏิกิริยากับโครงสร้างของยางเพียงแค่เป็นสารตัวเติมที่ช่วยในการลดต้นทุนเท่านั้น [20] ซึ่งในกรณีงานวิจัยนี้พบว่ายางที่เติมหินปูนบวมตัวในตัวทำละลายน้อยกว่ายางที่ไม่ใส่สารตัวเติม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแรงดึงดูดอ่อนๆ ระหว่างโมเลกุลหินปูนและยางทำให้โมเลกุลของยางเคลื่อนตัวยากขึ้นเล็กน้อยจึงบวมตัวไม่มากเมื่อโมเลกุลของตัวทำละลายแพร่เข้าไปในเนื้อยาง

การคำนวณดังกล่าวเป็นการคำนวณปริมาณการเชื่อมโยงซึ่งเป็นผลรวมของผลที่เกิดจากพันธะเคมีในปฏิกิริยา vulcanization และผลจากแรงดึงดูดระหว่างยางและสารตัวเติม (rubber-filler interaction) [21,22] โดยไม่สามารถแยกได้ว่าเกิดการเชื่อมโยงจากพันธะเคมีของกำมะถันกับยางมากน้อยเพียงไร การทดลองจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเปรียบเทียบยางที่ผ่านการคงรูปจนได้ปริมาณการเชื่อมโยงทางพันธะเคมีเท่ากันในทุกสูตรซึ่งต้องใช้วิธีอื่นในการวิเคราะห์หา เช่น การใช้เครื่อง Magnetic Resonance Crosslink Density Spectrometer ซึ่งจะช่วยให้การเปรียบเทียบผลของสารตัวเติมมีความชัดเจนมากขึ้น

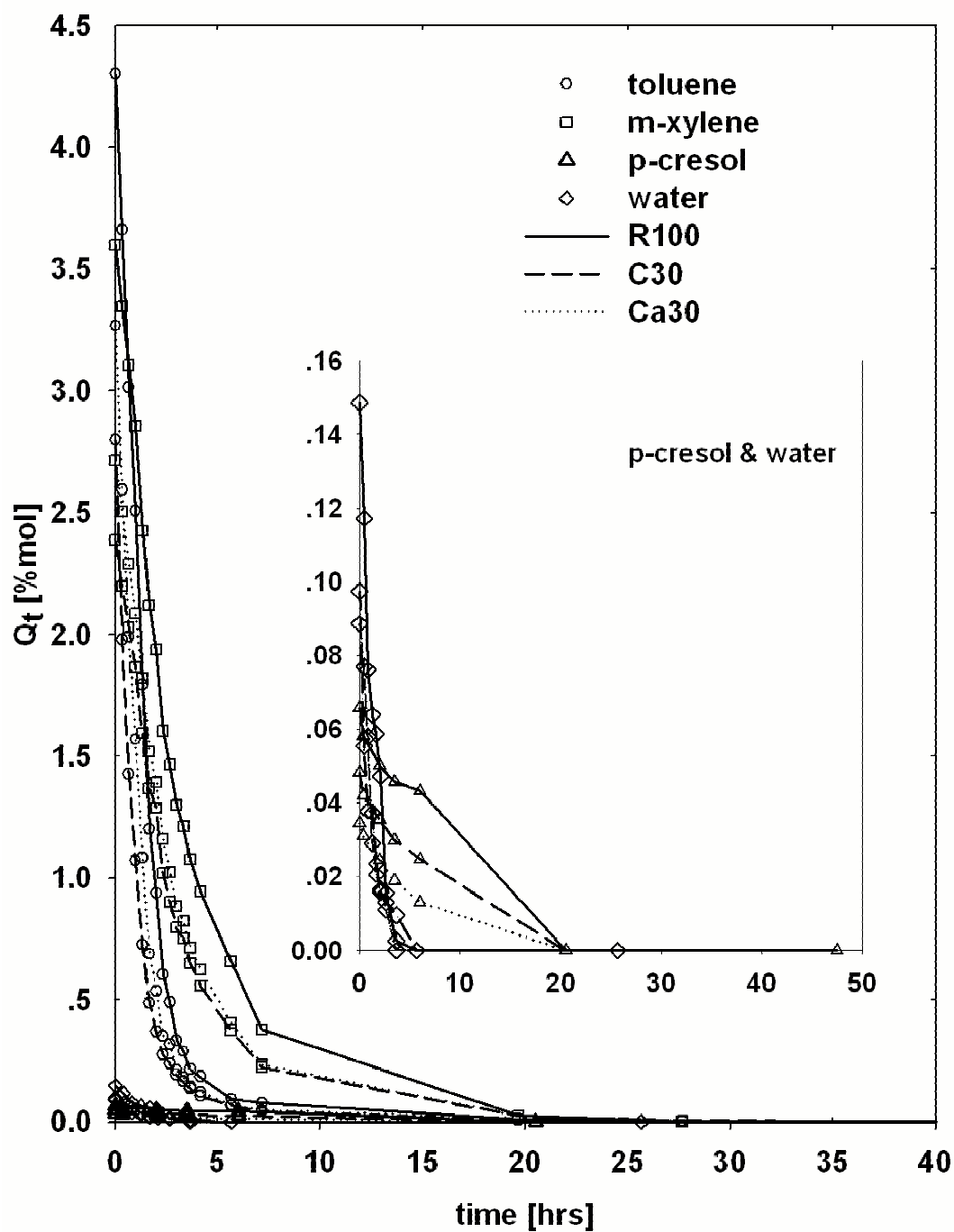
5.1.2 การทดสอบการคายออก (Desorption)

สำหรับการวิเคราะห์ในส่วนของการคายออก (Desorption) จะศึกษาเฉพาะกลไกการถ่ายโอนมวล ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1.2.1 การศึกษากลไกการถ่ายโอนมวล (Transport Mechanism)

ปริมาณการคายออกของสารอินทรีย์และน้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1) เช่นเดียว กันโดยที่ “มวลของชิ้นยาง” คือ มวลสุดท้ายของยางที่มีการระเหยสารออกไปแล้ว และเมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการคายออกของสารสู่อากาศ (Q_t) กับเวลา แสดงดังรูปที่ 11 จากกราฟสังเกตเห็นได้ว่าสารที่ระเหยสู่อากาศเพิ่มขึ้นตามเวลาจนกระทั่งมีค่าคงที่ คือ อยู่ในสภาวะสมดุลนั่นเอง

จากนั้นจึงศึกษากลไกการคายออกของสารจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (5.2) ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้เมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\log (Q_t/Q_\infty)$ กับเวลา ในช่วงแรกของการคายออก ทำให้ได้ค่า n และ k ดังแสดงในตารางที่ 19



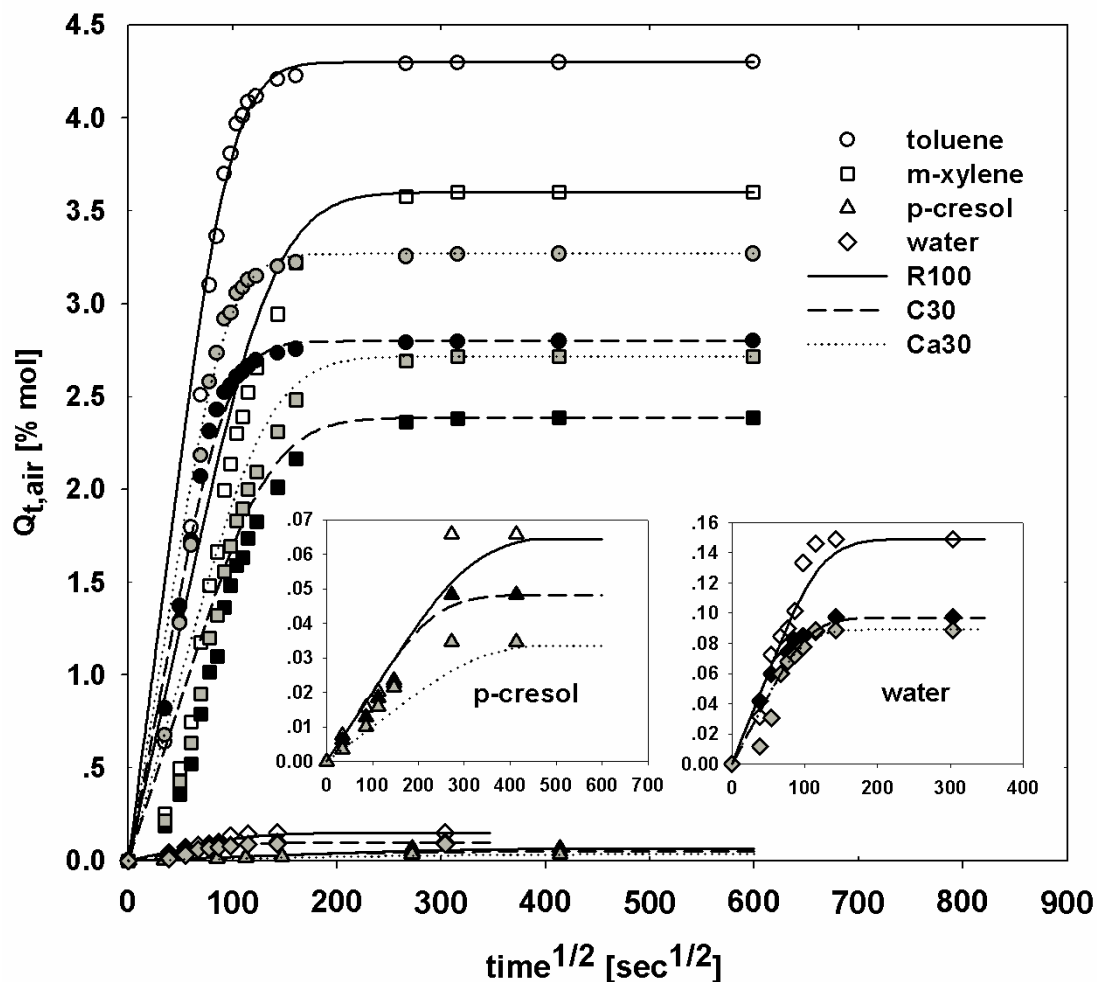
รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของสารที่ยังคงอยู่ในเนื้อยาง (Q_t) กับเวลาที่ได้จากการทดลอง เพื่อความชัดเจนจึงได้แสดงผลของ p-cresol และน้ำในกราฟรูปเล็กด้วย

ตารางที่ 19 แสดงค่า n และ k สำหรับกระบวนการคายออกของสารอินทรีย์สู่อากาศ

สาร-สูตรยาง	n	K
toluene-R100	0.975	1.480E-04
toluene-C30	0.667	2.623E-03
toluene-Ca30	0.828	5.939E-04
m-xylene-R100	1.084	3.129E-05
m-xylene-C30	1.022	5.464E-05
m-xylene-Ca30	1.037	4.987E-05
p-cresol-R100	0.388	7.454E-03
p-cresol-C30	0.465	4.599E-03
p-cresol-Ca30	0.622	1.241E-03
H2O-R100	0.348	3.017E-02
H2O-C30	0.379	2.744E-02
H2O-Ca30	0.342	3.834E-02

จากตารางอาจประมาณได้ว่าค่า n ของ p-Cresol และ น้ำมีค่าประมาณ 0.5 (ถึงแม้ว่าจะไม่ใกล้เคียงมากอย่างในกรณีของการดูดซับ) นั้นหมายถึงการแพร่ของสารออกจากยางเป็นไปแบบ Fickian สำหรับ m-Xylene ซึ่งมีค่าของ n อยู่ประมาณ 1.0 จะเกิดการแพร่แบบ Pseudo-Fickian Diffusion [15] และสำหรับ Toluene ค่าของ n อยู่ระหว่าง 0.5 และ 1.0 กลไกการแพร่จะถูกจัดให้เป็นแบบ Non-Fickian Diffusion การแบ่งรูปแบบการแพร่เป็นสามแบบนี้แบ่งโดยการเปรียบเทียบระหว่างอัตราการแพร่ (Rate of Diffusion) และอัตราการคลายตัวของโพลีเมอร์ (Rate of Polymer Relaxation) อัตราการแพร่จะน้อยกว่าอัตราการคลายตัวอย่างมากในกรณีการแพร่แบบ Fickian นั่นคือในขณะที่สารแพร่เข้าไป โครงสร้างของโพลีเมอร์จะปรับสภาพเข้าสู่สภาวะใหม่ได้อย่างรวดเร็ว หากอัตราการแพร่มากกว่าอัตราการคลายตัวอย่างมากจะเป็นแบบ Pseudo-Fickian และถ้าหากอัตราทั้งสองมีค่าไม่แตกต่างกันมาก การแพร่ที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบ Non-Fickian จากผลการทดลอง ทั้ง p-cresol และ น้ำถูกดูดซับในเนื้อยางไม่มากนัก ดังนั้นเมื่อระเหยออกไปจากเนื้อยาง จึงไม่รบกวนโครงสร้างของเนื้อยางมากทำให้ยังคงเป็นการแพร่แบบ Fickian ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ได้ ในขณะที่ทั้ง Toluene และ m-Xylene อาจจะทำให้โครงสร้างของยางเปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการดูดซับ เมื่อเกิดการคายออก โครงสร้างจึงไม่สามารถกลับสู่สภาวะเริ่มต้นได้

เมื่อวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient, D) ของสารออกจากชั้นยางสู่อากาศ โดยใช้ผลจากการทดลอง โดยวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $Q_{t,air}$ ซึ่งเป็นปริมาณที่สารออกไปอยู่ในอากาศกับ $time^{(1/2)}$ แสดงดังรูปที่ 12 ในรูปแบบของสัญลักษณ์ (ไม่ใช่ปริมาณของสารที่ค้างอยู่ในชั้นยางดังในรูปที่ 11)



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณการคายออกของสารสู่อากาศ ($Q_{t,air}$) ของกับ $time^{(1/2)}$ โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าจากการทดลองซึ่งแสดงเป็นสัญลักษณ์และค่าทางทฤษฎีซึ่งแสดงเป็นเส้น

ค่า Diffusion coefficient (D) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.4) และสามารถคำนวณค่าปริมาณการคายออก ($Q_{t,air}$) ในทางทฤษฎีได้จากสมการที่ (5.5) แต่สำหรับกรณีสารถ่ายโอน

ออกจากชั้นยาง สมการเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) จะเปลี่ยนไปเป็น

$$\begin{aligned} C &= C_0, & 0 < x < \frac{h}{2}, & t \leq 0 \\ C &= 0, & x = 0, & t > 0 \\ C &= C_0, & x = \frac{h}{2}, & t > 0 \end{aligned} \quad \dots\dots (5.20)$$

เมื่อเปรียบเทียบค่า $Q_{t,air}$ จากการทดลอง กับค่า $Q_{t,air}$ ทางทฤษฎี ซึ่งแสดงไว้ทั้งคู่ในรูปที่ 12 (ค่าทางทฤษฎีแสดงในรูปของเส้น) จะเห็นว่าความสอดคล้องระหว่างทฤษฎีและผลการทดลองไม่ดีเท่าในการทดลองการดูดซับ ทั้งนี้เพราะค่าทางทฤษฎีได้จากการสมมติว่าการแพร่เป็นแบบ Fickian และอาจเกิดจากการที่สภาพของยางเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ขณะที่สารระเหยออกไป ดังจะสังเกตในระหว่างการทดลองได้ว่า ยางจะบิดเบี้ยวเสียรูปไป ไม่เรียบเป็นแผ่นเหมือนเมื่อเริ่มทำการทดลอง

ค่าของ $Q_{\infty,air}$ และ D แสดงไว้ในตารางที่ 20 จะเห็นได้ว่า $Q_{\infty,air}$ ที่คำนวณในกรณีการคายออกจะแตกต่างจากในกรณีการดูดซับ ซึ่งที่จริงควรมีค่าเท่ากัน เนื่องจากในการทดลองการดูดซับของ Toluene และ m-Xylene จะพบว่ามีการละลายออกมาจากยางเข้าไปในสารอินทรีย์ซึ่งน่าจะเป็นผงคาร์บอนหรือบางส่วนของเนื้อยางที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาการเกิดร่างแห ทำให้มวลของยางลดลงเมื่อระเหยสารออกไปหมดแล้ว ค่า $Q_{\infty,air}$ ในกรณีการคายออกจึงสูงกว่ากรณีการดูดซับ และสำหรับ p-Cresol และน้ำจะได้ค่า $Q_{\infty,air}$ ของการคายออกน้อยกว่า Q_{∞} ของการดูดซับ อาจเป็นเพราะสาร p-Cresol และน้ำระเหยออกจากยางได้ยากที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาที่ทดลองอาจน้อยไป ชั้นยางยังระเหยสารออกไปได้ไม่หมด หรืออาจเป็นเพราะสารตัวเดิมที่มีอยู่ในยางสามารถกักสารเอาไว้ได้ในปริมาณหนึ่งจึงยากที่จะระเหยออกมาได้ทั้งหมด ดังมีงานวิจัยชิ้นหนึ่งพบว่า ความสามารถในการดูดซับของเขม่าดำมีประมาณ 5-15% ของทั้งหมด [10]

เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณการคายออก ($Q_{\infty,air}$) ของสารต่างๆ จะพบว่าทั้ง Toluene และ m-Xylene ระเหยออกไปสู่บรรยากาศได้ดีกว่า p-Cresol และน้ำ เนื่องจากทั้ง Toluene และ m-Xylene เป็นสารที่ระเหยง่าย ส่วนน้ำระเหยได้ต่ำกว่า p-Cresol เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว p-Cresol ระเหยได้ไม่ดีที่อุณหภูมิห้องโดยอาจดูได้จากค่า Diffusion coefficient (D) ซึ่งพบว่าเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน

ตารางที่ 20 แสดงค่า $Q_{\infty,air}$ และค่า D ของการคายออกจากยาง

สาร-สูตรยาง	$Q_{\infty,air}$ [% mol]	D [cm ² /s]
toluene-R100	4.300	7.929E-07
toluene-C30	2.798	8.558E-07
toluene-Ca30	3.268	8.604E-07
m-xylene-R100	3.599	3.882E-07
m-xylene-C30	2.385	4.134E-07
m-xylene-Ca30	2.716	4.176E-07
p-cresol-R100	0.066	7.259E-08
p-cresol-C30	0.048	1.350E-07
p-cresol-Ca30	0.035	6.573E-08
H ₂ O-R100	0.149	5.118E-07
H ₂ O-C30	0.097	6.711E-07
H ₂ O-Ca30	0.089	8.112E-07

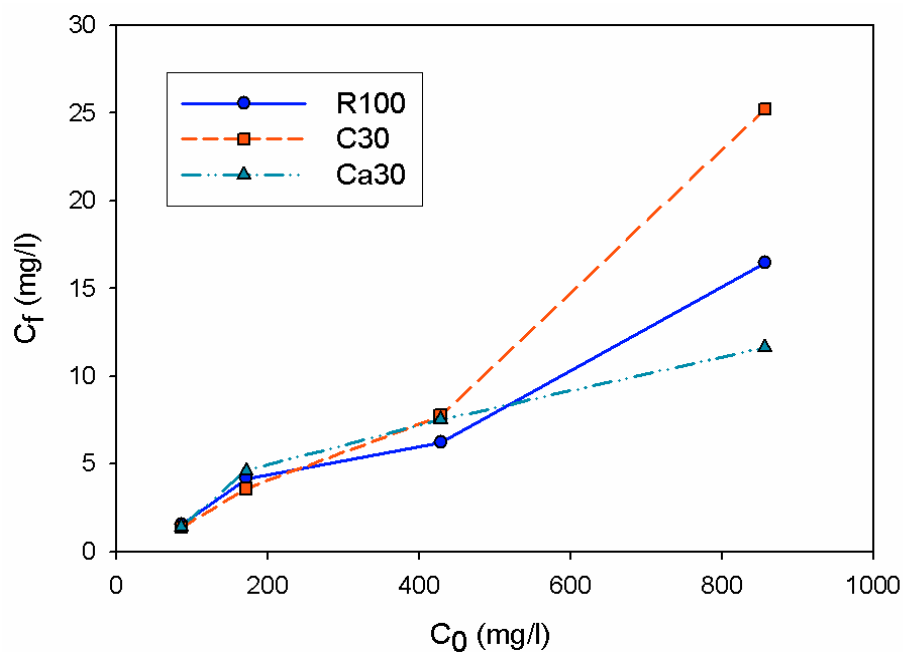
5.2 การทดสอบการดูดซับ (sorption) ของสารละลายของตัวทำละลายอินทรีย์

5.2.1 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับส่วนผสมของสารตัวเติม

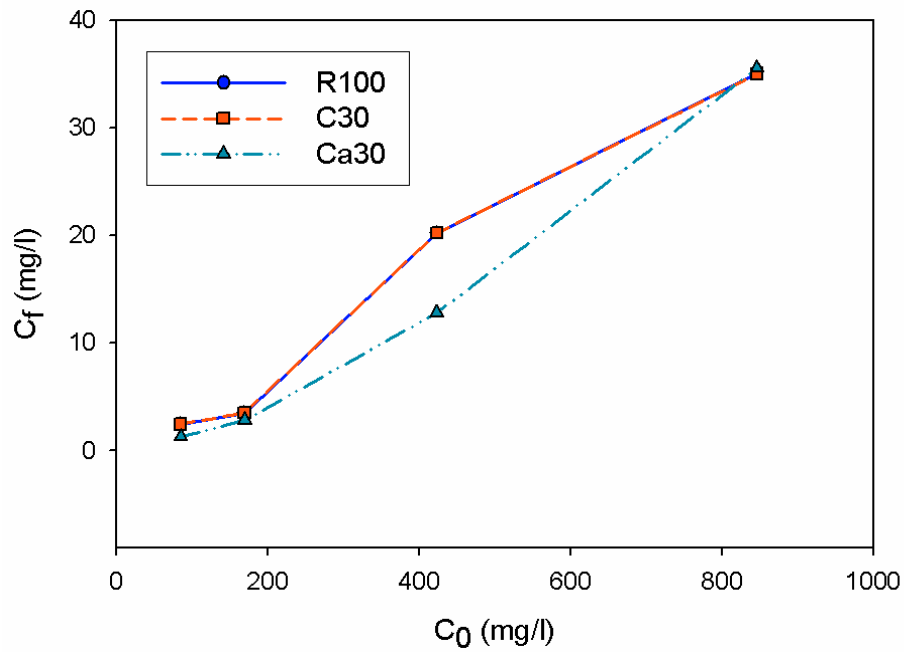
จากผลการทดลองเมื่อวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารทั้ง 4 สาร คือ Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol ซึ่งแสดงดังรูปที่ 13-16 ตามลำดับ

ในรูปที่ 13-16 เป็นกราฟของค่าความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลาย เพื่อพิจารณาว่าสารตัวเติมมีผลต่อการดูดซับหรือไม่ จะพบว่าความสามารถในการดูดซับของยางแต่ละสูตรไม่แตกต่างกัน เนื่องจากในบางกราฟจะเห็นว่าเส้นกราฟของแต่ละสูตรยางมีความใกล้เคียงกันมาก และที่ความเข้มข้นต่างกันผลของสารตัวเติมต่างกัน ซึ่งผลของสารตัวเติมควรจะ

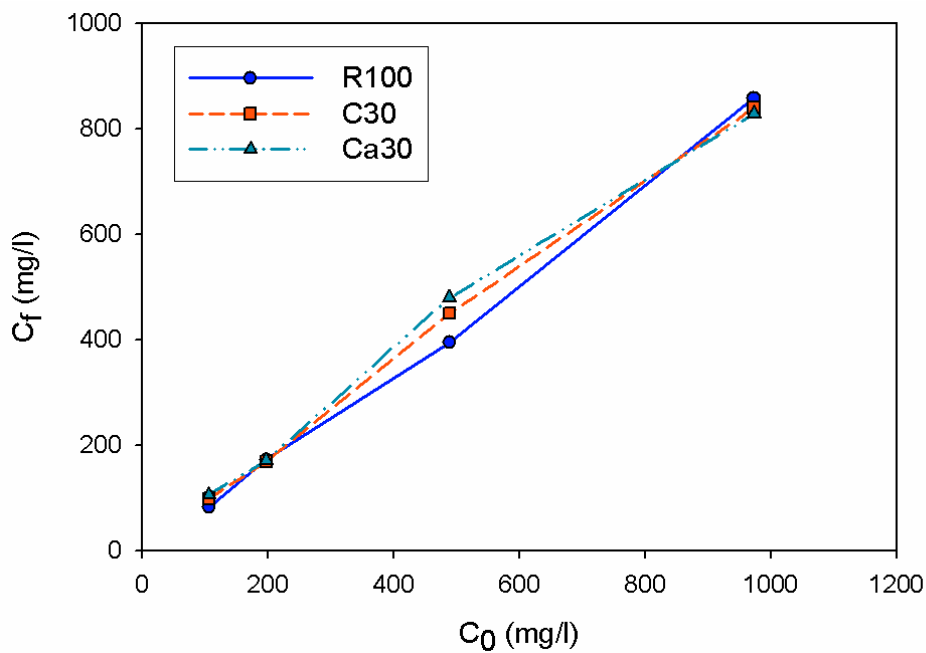
แสดงเหมือนกันในทุกๆ ความเข้มข้น ดังนั้นจึงไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับชนิดของยางนั่นเอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสารละลายอินทรีย์มีความเข้มข้นน้อยมาก (ระดับ ppm แต่ก็อยู่ในระดับที่เป็นอันตรายอย่างมาก) ทำให้ยางเกิดการบวมตัวได้น้อย เพราะฉะนั้นสารตัวเดิมที่แตกต่างกันในเนื้อยางจึงยังไม่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของชั้นยาง ซึ่งแตกต่างกับการทดลองก่อนหน้านี้ที่เห็นความแตกต่างของความสามารถในการดูดซับของยางแต่ละสูตรได้อย่างชัดเจน เนื่องจากสารที่ใช้ทดสอบเป็นสารบริสุทธิ์และมีปริมาณมากนั่นเอง เนื่องจากสูตรยางไม่ได้มีผลต่อการดูดซับดังนั้นในการคำนวณต่อไปจะใช้ค่าที่เฉลี่ยจากผลการทดลองของทั้งสามสูตรยาง



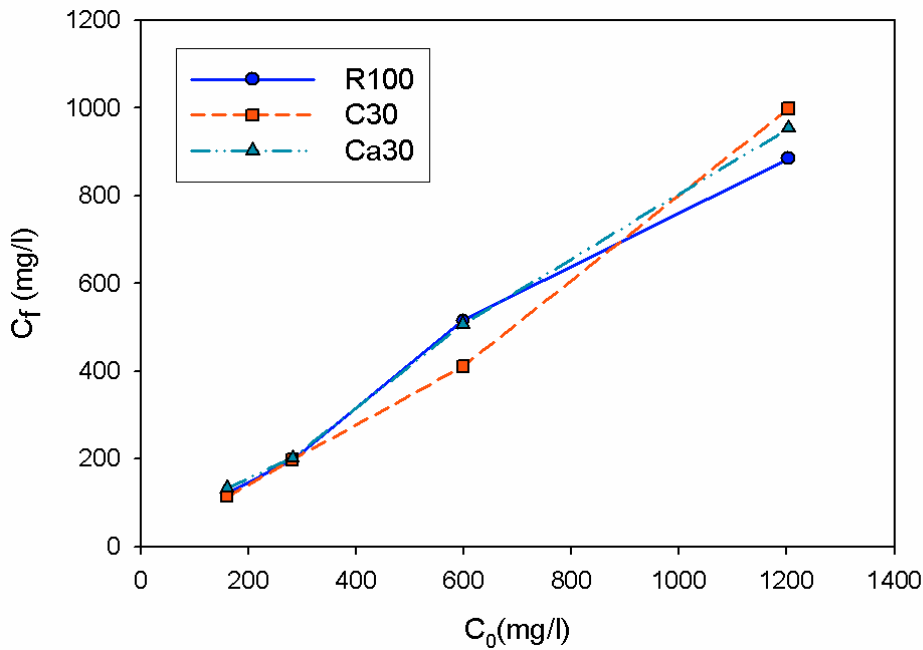
รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย Toluene



รูปที่ 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายหลังจาก
ผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย m-Xylene



รูปที่ 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายหลังจาก
ผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย Phenol



รูปที่ 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นกับความเข้มข้นสุดท้ายหลังจากผ่านการทดลองในแต่ละสูตรยางของสารละลาย p-Cresol

5.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับกับชนิดของสารละลายด้วยการวิเคราะห์การดูดซับโดยการประมาณ (Approximate Analysis)

เนื่องจากการทดลองส่วนนี้ขึ้นอย่างถูกแซ่ในสารละลายที่บรรจุในขวดแก้ว ซึ่งปริมาตรของสารละลายที่ใช้ไม่ได้ปริมาตรของขวดแก้ว แตกต่างจากในงานวิจัยอื่นๆ ที่ทำการทดลองเพียงสองเฟสคือเฟสน้ำ และเฟสยาง [9, 10] ทั้งนี้เพราะในสภาวะแวดล้อมจริง ๆ อาจเกิดการระเหยของสารออกสู่อากาศในขณะเดียวกับการแพร่ของสารของเนื้อยาง เช่นการแพร่ของสารผ่านช่องอากาศในชั้นดินที่กักน้ำใต้ดินไว้ เป็นต้น ดังนั้นการทดลองจึงควรประกอบด้วยสามเฟส คือมีเฟสของอากาศอยู่ร่วมด้วย ด้วยข้อจำกัดเรื่องเวลาและงบประมาณทำให้การทดลองนี้ไม่ได้มีการตรวจวัดความเข้มข้นของสารในอากาศ (ซึ่งต้องทำอย่างพิถีพิถันอย่างมาก) ดังนั้นการวิเคราะห์ในส่วนนี้จึงเป็นการประมาณเท่านั้น ในอนาคตควรต้องมีการตรวจวัดความเข้มข้นในเฟสอากาศด้วยการคำนวณโดยการประมาณสามารถกระทำได้โดยใช้ Henry's Law เพื่อบอกความสัมพันธ์ของเฟสน้ำและเฟสอากาศ

5.2.2.1 การประมาณปริมาณการดูดซับน้อยสุด (Minimum Sorption Capacity)

การวิเคราะห์สมมุติว่ามีการระเหยของสารจากเฟสของสารละลายไปสู่เฟสของอากาศ โดยที่สารนั้นจะ*ไม่*ละลายกลับมาในเฟสของสารละลายอีก อันดับแรกต้องคำนวณหาปริมาณการระเหยของสารจากเฟสสารละลายสู่เฟสอากาศโดยใช้ สมการของ Henry's law

$$P_i = H C_i \quad \text{..... (5.21)}$$

โดยที่ P_i คือ ความดันย่อยของสารที่อยู่ในอากาศ

H คือ ค่าคงที่ของ Henry ซึ่งมีค่าเฉพาะของแต่ละสาร

C_i คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เตรียมขึ้นตอนเริ่มต้น

หลังจากที่หาปริมาณสารที่ระเหยไปสู่เฟสของอากาศแล้ว จึงสามารถหาความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในสารละลายได้ ซึ่งหลังจากที่ผ่านการทดลองแล้วปริมาณสารส่วนหนึ่งจะเข้าไปอยู่ในยาง ส่วนที่เหลือสุดท้ายก็ยังคงอยู่ในสารละลายซึ่งก็คือ ความเข้มข้นที่ได้จากการตรวจด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) นั้นเอง ซึ่งแสดงให้เห็นเข้าใจชัดเจนขึ้นในรูปของสมการ

$$[\text{ปริมาณสารในน้ำเมื่อเริ่มต้น}] - [\text{ปริมาณสารที่ระเหย}] = [\text{ปริมาณสารที่เหลืออยู่}] \quad \text{..... (5.22)}$$

$$[\text{ปริมาณสารในยาง}] = [\text{ปริมาณสารที่เหลืออยู่}] - [\text{ปริมาณสารในน้ำเมื่อสิ้นสุด}] \quad \text{..... (5.23)}$$

ค่าต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นได้สรุปรวมไว้ในตารางที่ 21 โดยค่าเหล่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นของทั้ง 3 สูตรยาง

ตารางที่ 21 แสดงค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาณสารที่ระเหย ความเข้มข้นสุดท้ายและ ปริมาณสารในยาง ของสารละลายชนิดต่าง ๆ

ชนิดสาร ละลาย	ความเข้มข้น เริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณสาร ที่ระเหย (mg)	ความเข้มข้น ที่เหลือ (mg/l)	ความเข้มข้น สุดท้าย (mg/l)	ปริมาณสาร ในยาง (mg/kg)
toluene	85.671	4.595	39.716	1.421	760.684
	171.344	9.191	79.434	4.113	1488.165
	428.377	22.978	198.593	7.158	3812.843
	856.814	45.960	397.214	17.764	7505.243
m-xylene	84.646	4.845	36.201	1.892	687.865
	169.295	9.689	72.403	3.179	1419.220
	423.256	24.224	181.014	15.733	3363.872
	846.573	48.452	362.055	34.130	6536.533
phenol	105.981	6.798E-04	105.974	94.909	219.697
	197.181	1.265E-03	197.168	170.391	536.467
	488.847	3.136E-03	488.815	440.948	960.008
	973.539	6.245E-03	973.477	841.810	2613.285
p-cresol	159.819	6.105E-04	159.813	123.119	733.355
	280.861	1.073E-03	280.850	198.638	1622.940
	598.094	2.285E-03	598.071	477.471	2407.009
	1202.600	4.594E-03	1202.554	945.727	5147.730

เมื่อพิจารณาปริมาณสารที่ระเหยของสาร Phenol และ p-Cresol แล้วพบว่ามีความน้อยมาก จึงไม่มีความแตกต่างกันในการคำนวณหาปริมาณการดูดซับน้อยสุดและมากที่สุด จึงใช้ค่านี้แสดงผลการทดลอง ส่วนของการหาปริมาณการดูดซับมากที่สุดจะคำนวณแต่เพียงของ Toluene และ m-Xylene จากค่าในตารางสามารถสร้าง isotherm โดยในที่นี้จะพิจารณาทั้ง Linear isotherm และ Freundlich isotherm โดยจะแยกพิจารณาดังนี้

- **Linear Isotherm**

Linear isotherm แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารทั้งในเฟสของสารละลายและในเฟสของยางดังสมการ

$$C_s = K_d C_w \quad \dots\dots\dots (5.24)$$

โดยที่ C_s คือ ปริมาณสารที่อยู่ในยางต่อน้ำหนักของซินยางที่สภาวะสมดุล (mg/kg)

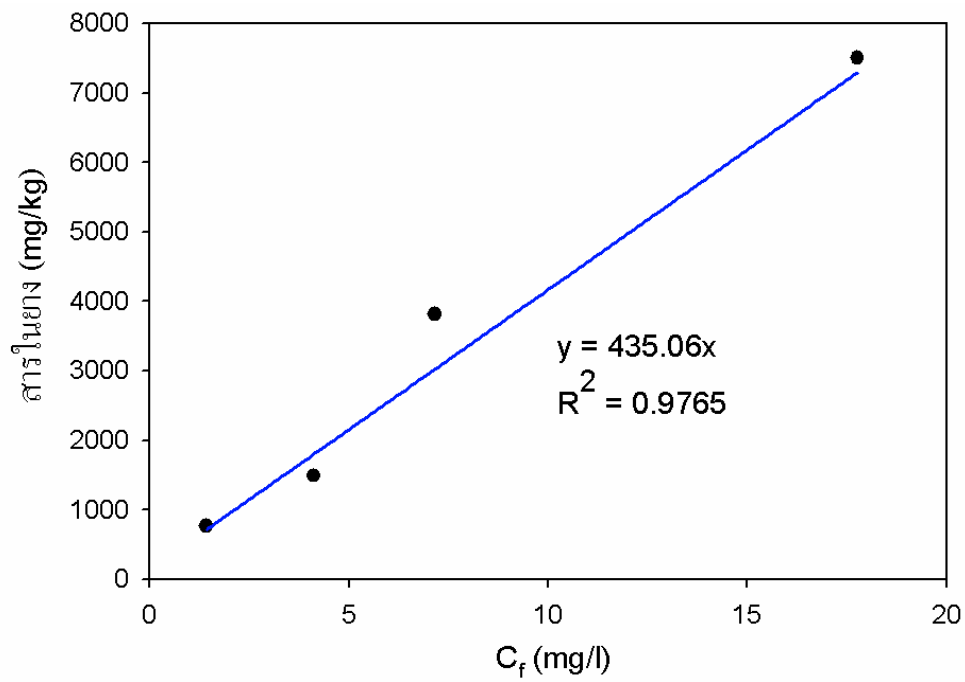
C_w คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

K_d คือ ค่า partition coefficient

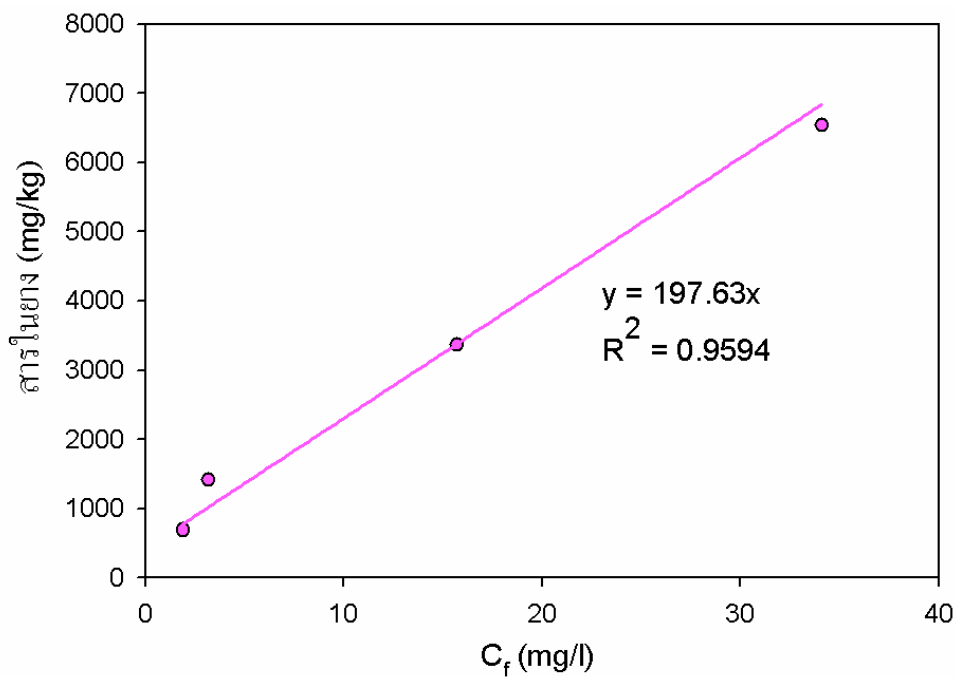
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายกับปริมาณสารที่อยู่ในยางของทั้ง 4 สาร คือ Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol แสดงดังรูปที่ 17-20 ตามลำดับ จากกราฟทำให้ได้ค่า partition coefficient (K_d) ซึ่งก็คือ ความชันของกราฟ โดยได้สรุปค่าไว้ในตารางที่ 22

ตารางที่ 22 แสดงค่า Partition Coefficient ในกรณีไม่คิดการละลายกลับของสารอินทรีย์

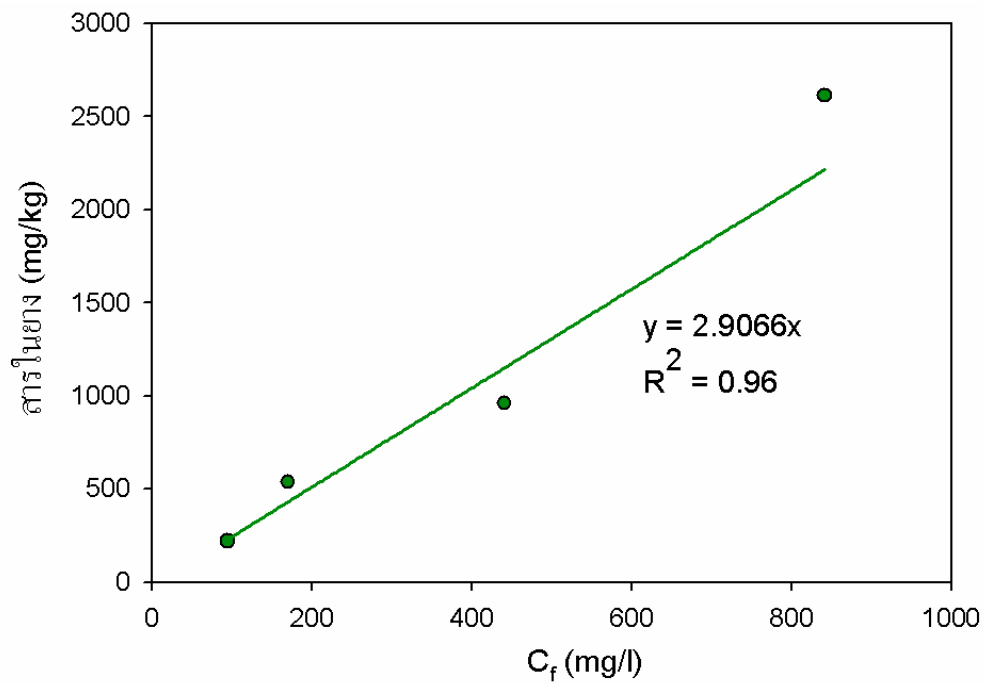
ชนิดสารละลาย	ค่า partition coefficient
toluene	435.060
m-xylene	197.630
phenol	2.907
p-cresol	5.463



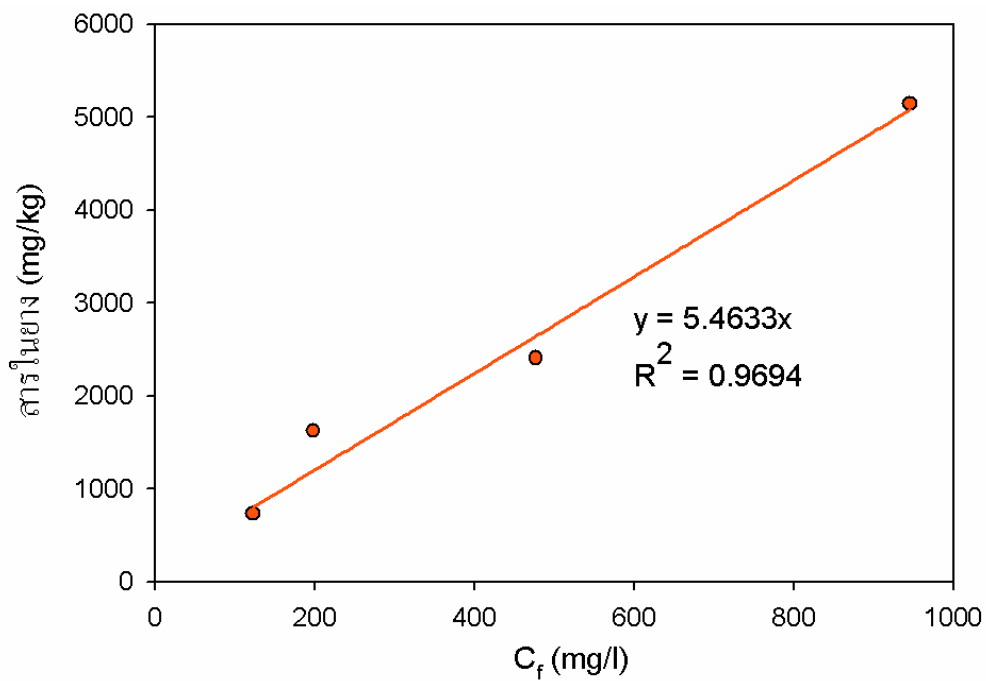
รูปที่ 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลายกับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย Toluene



รูปที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลายกับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย m-Xylene



รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลายกับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย Phenol



รูปที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสุดท้ายในสารละลายกับปริมาณสารที่อยู่ในยางของสารละลาย p-Cresol

- **Freundlich Isotherm**

Isotherm ที่นิยมใช้กันมากในการทดสอบเกี่ยวกับการดูดซับ (adsorption) คือ Freundlich isotherm ซึ่งเป็น Empirical Equation โดยตรงโดยไม่ได้มาจากทฤษฎีใด Isotherm นี้จะอธิบายความเข้มข้นทั้งในเฟสของสารละลายและในเฟสของชั้นยางที่สภาวะสมดุล ดังนี้

$$Q_{ad} = K_F C_{eq}^{1/n} \quad \dots\dots\dots$$

(5.25)

โดยที่ Q_{ad} คือ ปริมาณสารที่เข้าไปในชั้นยางต่อน้ำหนักของชั้นยางที่สภาวะสมดุล (mg/kg)
 C_{eq} คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)
 K_F, n คือ เป็นพารามิเตอร์ใน Freundlich Isotherm

จากสมการที่ (5.25) สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังนี้

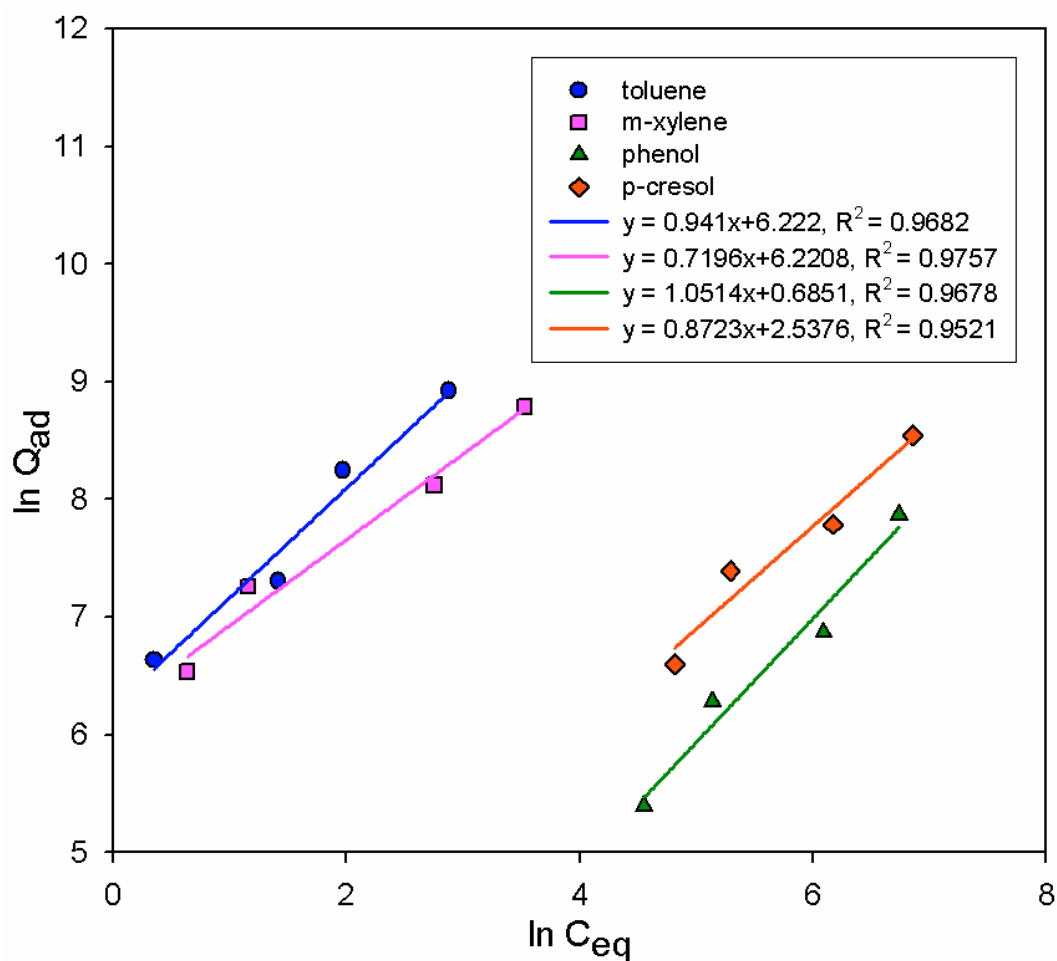
$$\ln(Q_{ad}) = \frac{1}{n} \ln(C_{eq}) + \ln K_F \quad \dots\dots\dots$$

(5.26)

เมื่ออธิบายผลการทดลองโดยวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(Q_{ad})$ กับ $\ln(C_{eq})$ แสดงดังรูปที่ 21 ซึ่งจากกราฟนี้จะทำให้ได้ Freundlich Parameter คือค่า K_F และ n ของแต่ละสารซึ่งสรุปไว้ในตารางที่ 23

ตารางที่ 23 แสดงค่า K_F และ n ของ Freundlich Isotherm ในกรณีไม่คิดการละลายกลับของสารอินทรีย์

ชนิดสารละลาย	K_F	n
toluene	503.710	1.063
m-xylene	503.106	1.390
phenol	1.984	0.951
p-cresol	12.649	1.146



รูปที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(Q_{ad})$ กับ $\ln(C_{eq})$ ของสารละลาย Toluene, m-Xylene, Phenol และ p-Cresol ผลจากการทดลองแสดงโดยสัญลักษณ์ส่วนกราฟเส้นตรงสร้างจากความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยมีสมการดังแสดงในกราฟเรียงตามลำดับตามชนิดของสารจากบนลงล่าง

5.2.2.2 การประมาณปริมาณการดูดซับมากที่สุด (Maximum Sorption Capacity)

ในกรณีนี้สมมุติว่ามีการระเหยของสารจากเฟสของสารละลายไปสู่เฟสของอากาศ และเมื่อเวลาผ่านไป สารนั้นจะละลายกลับมาสู่เฟสของสารละลายอีก จนกระทั่งทั้ง 3 เฟส คือ เฟสของเฟสอากาศ และเฟสน้ำ อยู่ในสภาวะสมดุลซึ่งกันและกัน

ก่อนอื่นต้องทราบปริมาณของสารในทั้ง 3 เฟส โดยในตอนแรกหาปริมาณความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายจากการตรวจด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี ทำให้สามารถหาปริมาณสารที่ระเหยไปสู่เฟสของอากาศได้เนื่องจากทั้ง 2 เฟสอยู่ในสภาวะสมดุลกัน โดยใช้ Henry's law ดังสม