

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวเข้าไปในยางธรรมชาติ โดยเริ่มจากการเตรียมยางแผ่นที่ใช้ในการดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลว การหาความสัมพันธ์ของปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่ถูกดูดซับโดยยางธรรมชาติกับการขยายตัวของรัศมียางธรรมชาติ รวมถึงอิทธิพลของสมบัติทางกายภาพ คือ ค่าพารามิเตอร์การละลาย กับ การขยายตัวของยาง และการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวชนิดต่าง ๆ เข้าสู่ยางธรรมชาติ

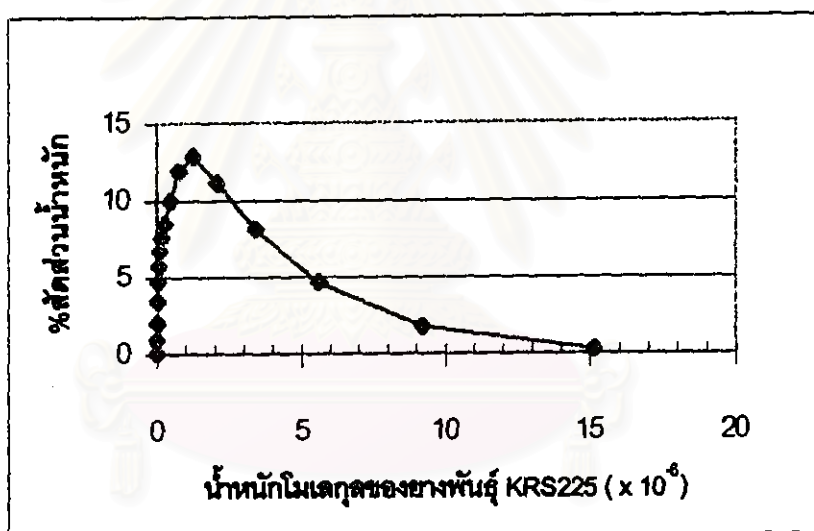
4.1 ผลจากการบดด้วยเครื่องบดผสมยาง

เมื่อนำยางไปบดด้วยเครื่องบดผสมยางเป็นเวลา 15 30 และ 60 นาที แล้วนำแผ่นยางที่ได้ไปวิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุล และค่าความหนืดมูนิ เพื่อเลือกยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลและความหนืดมูนิต่ำใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจากยางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยจะละลายในตัวทำละลายได้ดี ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.1

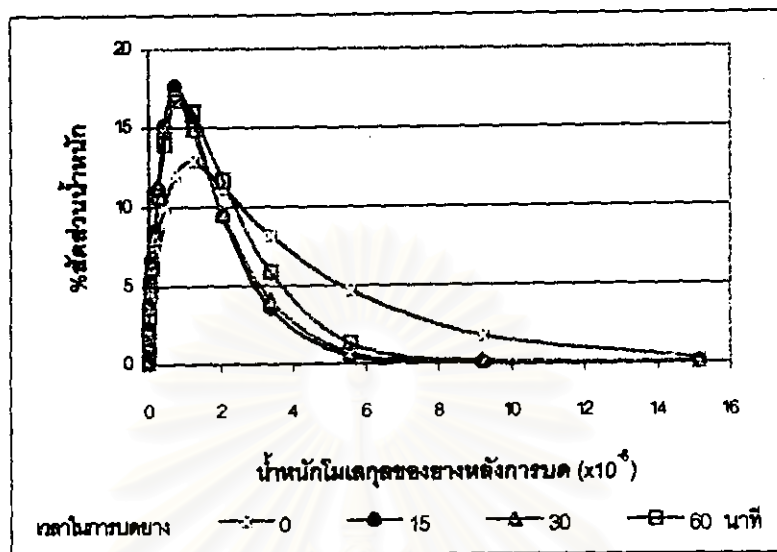
ตาราง 4.1 ตารางแสดงน้ำหนักโมเลกุล และความหนืดมูนิของยางธรรมชาติที่ผ่านและไม่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดผสมยาง

ชนิดของยาง	น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย ($\times 10^{-6}$)	ความหนืดมูนิ 100°C	Mw/Mn
ไม่ผ่านการบด	1.26	80.7 ML 1+4	9.16
ผ่านการบด 15 นาที	0.77	44.9 ML 1+4	4.16
ผ่านการบด 30 นาที	0.81	40.2 ML 1+4	4.19
ผ่านการบด 60 นาที	0.96	49.3 ML 1+4	4.35

จากข้อมูลพบว่า การบดขยำนานด้วยเครื่องบดผสม ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของยางธรรมชาติ ลดลงซึ่งเป็นผลมาจากทั้งวิธีเชิงกล และความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีกันของยางทำให้โมเลกุลของ ยางสั้นลง เห็นได้จากสัดส่วนของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะลดลง ค่าของ Mw/Mn ก็มีค่าลดลงด้วย จากตาราง 4.1 พบว่า ค่าของ Mw/Mn ของยางแผ่นที่บดนาน 15 นาที จะมีค่าเป็นร้อยละ 45.4 ของ ยางที่ไม่ผ่านการบด สำหรับยางที่ผ่านการบดนาน 30 และ 60 นาที มีค่าเป็นร้อยละ 45.7 และร้อยละ 47.5 ของยางที่ไม่ผ่านการบดตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการใช้เครื่องบดผสม บดยางทำให้ยางมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง และการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลลดลง โดยที่มีจำนวน ของยางที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของยางที่ยังไม่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดผสมยาง



รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของซากที่ยังไม่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดผสมยาง เทียบกับหลังการบดที่เวลาต่าง ๆ กัน

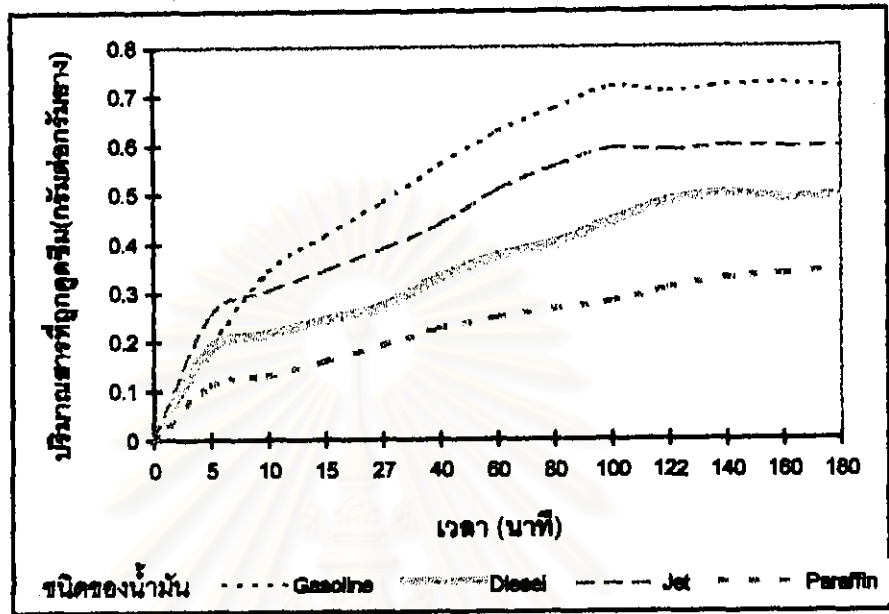
การเลือกใช้ยางธรรมชาติที่ผ่านการบดในการดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลว เลือกยางที่ผ่านการบดนาน 15 นาที เนื่องจากใช้เวลาในการบดน้อยแต่ได้สมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับการบดที่ใช้เวลานานกว่า ทั้งน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยที่ต่ำลง จำนวนของซากที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำมีมากขึ้น และค่าความหนืดมูนินมีค่าน้อยลง ซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลว

4.2 การดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยยางธรรมชาติ

4.2.1 การใช้แผ่นยางธรรมชาติในการดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลวประเภทน้ำมัน

นำยางแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.15 เซนติเมตร ที่ประกบด้วยแผ่นแก้วบาง แซ่ในน้ำมันประเภทต่าง ๆ คือ Gasoline, Jet, Diesel และ Paraffin oil(885) ควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส เมื่อทำการซังน้ำหนักและจับภาพทุก 5 นาที จนกระทั่งครบ 60 นาที แซ่ทิ้งไว้แล้วนำมาซัง

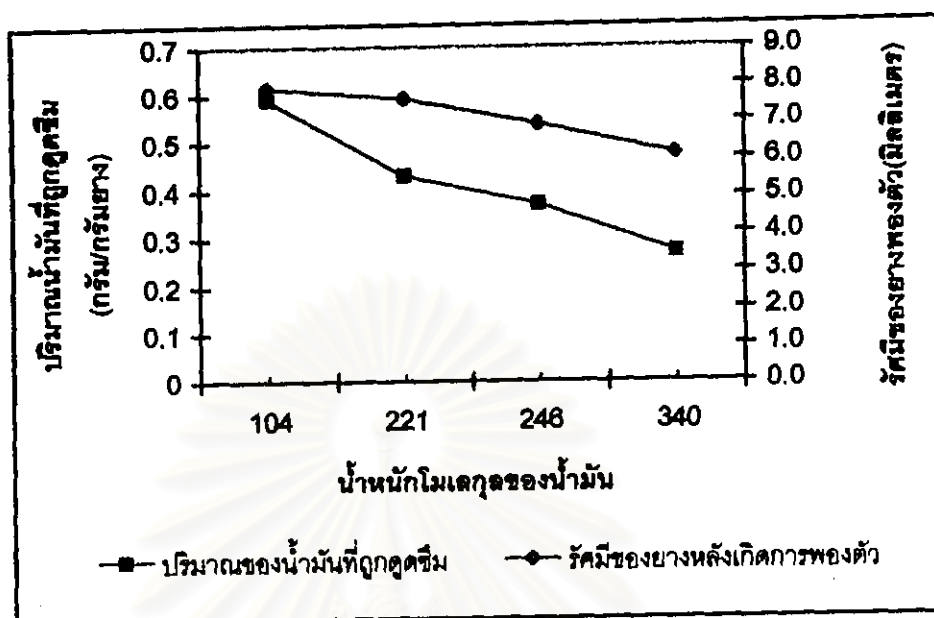
น้ำหนักและจับภาพอีกเมื่อครบ 120 และ 180 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.3, 4.4 และ ตาราง 4.2



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำมันชนิดต่าง ๆ ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในยาง อุณหภูมิ 35 °C ความดันบรรยากาศ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของน้ำมันชนิดต่าง ๆ ที่ถูกดูดซึมเข้าไปในยาง และรัศมีของยางที่เวลา 60 นาที

ชนิดของน้ำมัน	น้ำหนักโมเลกุล	ปริมาณของน้ำมันที่ถูกดูดซึม (กรัมต่อกรัมยาง)	รัศมีของยางหลังเกิด การบวมตัว(มิลลิเมตร)
Gasoline	104	0.59	7.9
Jet	221	0.43	7.6
Diesel	246	0.37	6.9
Paraffin	340	0.27	6.1



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำมันที่ถูกดูดซึมและรัศมีของยางหลังการพองตัว กับ น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมัน

จากรูปที่ 4.4 พบว่าปริมาณของน้ำมันที่ถูกดูดซึม หรือแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติจะน้อยลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันมีค่ามากขึ้น ซึ่งน้ำมันที่แทรกซึมเข้าไปในยางจะทำให้รัศมีของยางเพิ่มขึ้น โดยที่รัศมีของยางจะเกิดการขยายตัวมากขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันน้อยลง ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานว่าสารไฮโดรคาร์บอนเหลวใด ๆ เมื่อแทรกซึมเข้าไปในยางธรรมชาติปริมาณของสารที่สามารถแทรกซึมเข้าไปและทำให้ยางเกิดการพองตัวเป็นสัดส่วนกลับกับน้ำหนักโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนเหลว จึงทำการทดลองต่อไปเพื่อพิสูจน์สมมุติฐานนี้

4.2.2 การใช้แผ่นยางธรรมชาติในการดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลวบริสุทธิ์

การทดลองทำเช่นเดียวกับการใช้แผ่นยางธรรมชาติในการดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลวประเภทน้ำมัน แต่เปลี่ยนจากน้ำมันเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเหลวบริสุทธิ์ชนิดต่าง ๆ คือ Pentane, Hexane, Heptane, Octane, Cyclohexane, Benzene, Toluene, Xylene และ Linear alkyl benzene ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5

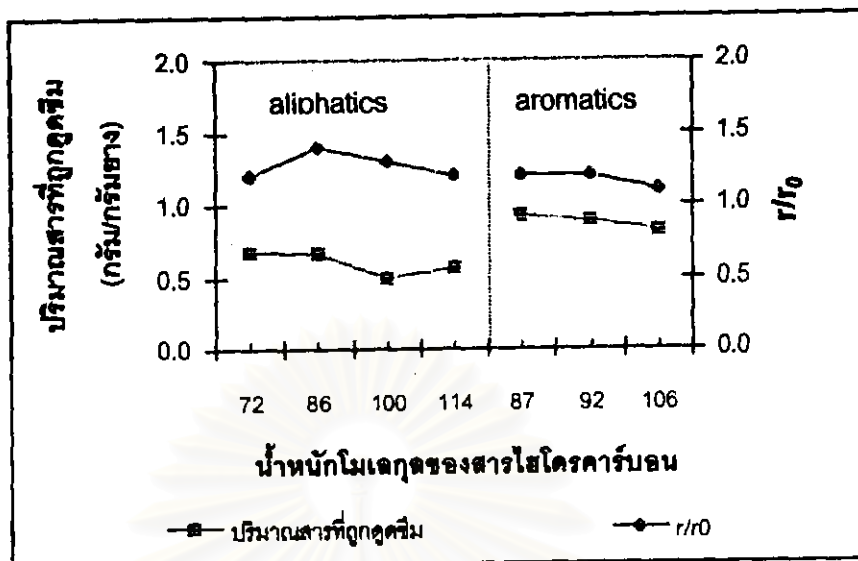
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณสารที่ถูกดูดซึมและรัศมีที่เปลี่ยนไปเทียบกับรัศมีเริ่มต้นของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน

ชนิดของสาร	น้ำหนักโมเลกุล	ปริมาณสารที่ถูกดูดซึม (กรัมต่อกรัมของ)	$\frac{r}{r_0}$
Pentane	72	0.67	1.2
Hexane	86	0.66	1.4
Heptane	100	0.50	1.3
Octane	114	0.57	1.2
Cyclohexane	84	0.74	1.3
Benzene	87	0.92	1.2
Toluene	92	0.89	1.2
Xylene	106	0.81	1.1
Linear alkyl benzene	266	1.06	1.3

r คือ รัศมีของตัวอย่างยางธรรมชาติหลังดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอน

r_0 คือ รัศมีของตัวอย่างยางธรรมชาติก่อนดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.5 ปริมาณสารที่ถูกดูดซึมและรัศมีที่เปลี่ยนไปเทียบกับรัศมีเริ่มต้นกับสารไฮโดรคาร์บอนเหลว ทั้ง aliphatics และ aromatics ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่างกัน

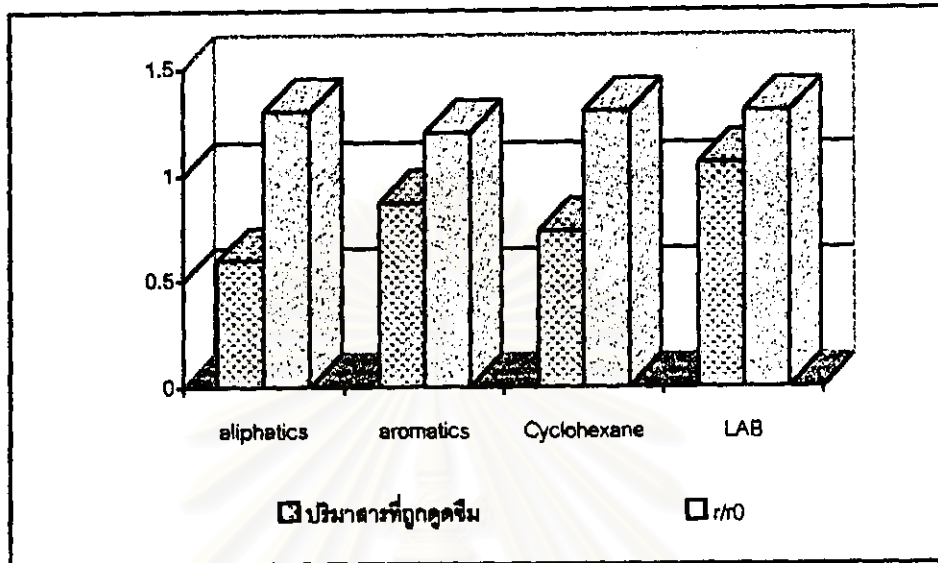
จากรูปที่ 4.5 กราฟมีแนวโน้มลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าเป็นไปตามสมมุติฐานที่ปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวและรัศมีของยางที่พองตัวจะเป็นสัดส่วนกลับกับน้ำหนักโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่แทรกซึมเข้าสู่ยางธรรมชาติ

เมื่อพิจารณาการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายคลึงกันเข้าสู่ยางธรรมชาติ โดยแบ่งโครงสร้างที่ศึกษาเป็นสองจำพวก คือ aliphatics และ aromatics

1. สารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็น aliphatics คือ Pentane, Hexane, Heptane และ Octane
2. โครงสร้างที่มีโครงสร้างทางเคมีเป็น aromatics คือ Benzene, Toluene และ Xylene

พบว่าปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนประเภท aromatics จะถูกดูดซึมได้ดีกว่า แสดงผลไว้ดังรูปที่ 4.5 โครงสร้างของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวแบบ aromatics มีแนวโน้มทำให้ปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวและรัศมีของยางที่พองตัวมีค่าลดลงเมื่อน้ำหนักโมเลกุลของสารเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับโครงสร้างที่เป็น aliphatics

เมื่อนำค่าโดยเฉลี่ยของปริมาณสารที่ถูกดูดซึม และ ค่า r/r_0 ของสารประเภท aliphatics, aromatics, cyclohexane และ LAB มาสร้างกราฟเปรียบเทียบกันได้ ดังรูปที่ 4.6



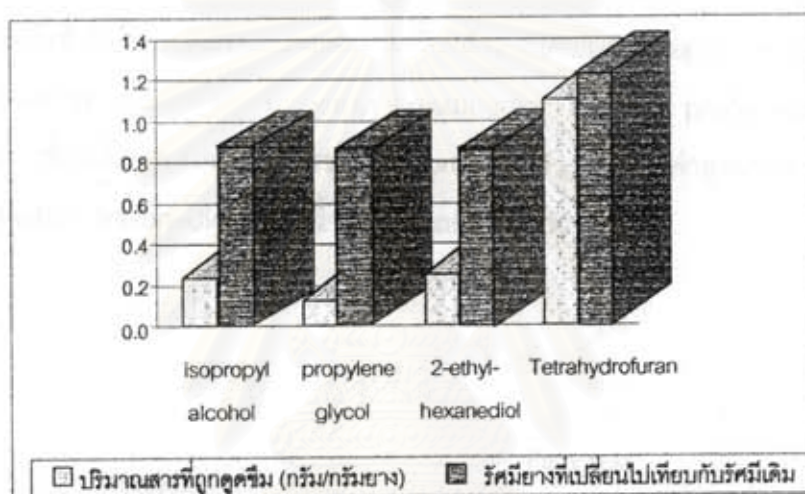
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ที่ถูกดูดซึมด้วยตัวอย่างยางธรรมชาติ และ ค่า r/r_0

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณาปริมาณสารที่ถูกดูดซึมของสารไฮโดรคาร์บอนจำพวก aliphatics จะถูกดูดซึมไว้ได้น้อยกว่าสารจำพวก aromatics เมื่อพิจารณาที่สาร cyclohexane ที่มีโครงสร้างเป็นวงต่อกับสายโซ่ตรงของคาร์บอนอะตอม (แสดงในภาคผนวก ก) ตัวอย่างยางสามารถดูดซึมสารประเภทนี้ได้ดีกว่าสารพวก aliphatics แต่น้อยกว่า aromatics แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นวงของ cyclohexane มีผลต่อการถูกดูดซึมด้วยยางธรรมชาติ สำหรับสาร LAB เป็นสารที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ประกอบไปด้วยวงเบนซีนและสายโซ่ตรงของคาร์บอนอะตอม เป็นสารที่ถูกดูดซึมได้ดีที่สุด

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติสามารถดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวง และวงเบนซีน มากกว่าที่มีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง

4.2.3 การใช้แผ่นยางธรรมชาติในการดูดซึมสารอินทรีย์อื่นที่มีขั้ว และที่มี hydroxy group

ขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการทดลองด้วยสารไฮโดรคาร์บอนเหลว (ข้อ 4.2.1 และ 4.2.2) แต่เปลี่ยนสารที่ใช้เป็นสารอินทรีย์ที่มีขั้ว คือ tetrahydro furan (THF) และสารอินทรีย์ที่มี hydroxy group คือ 2-ethyl-hexanediol, propylene glycol (PG), isopropyl alcohol ปริมาณการดูดซึมสารอินทรีย์และขนาดของรัศมีในการพองตัวของยางธรรมชาติหลังการดูดซึมได้แสดงไว้ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 และ ในตารางที่ 4.4

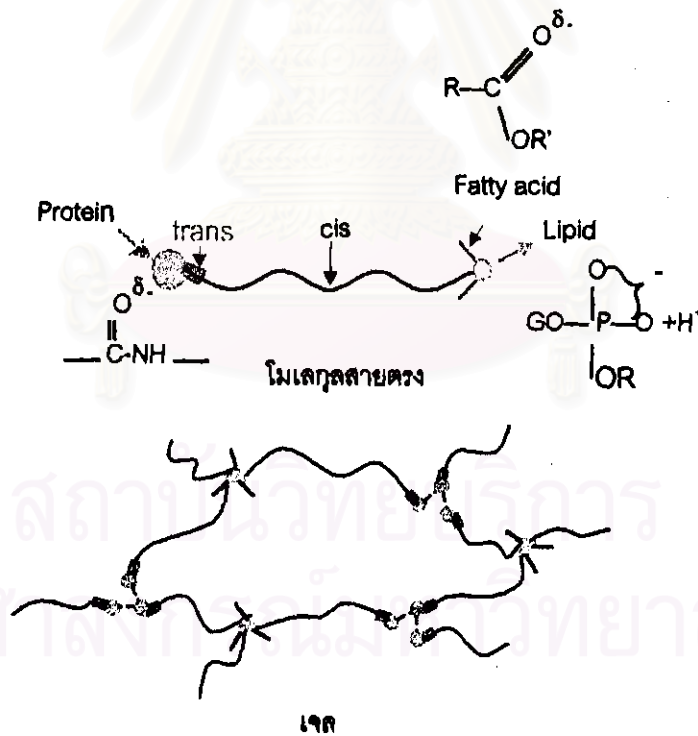


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่ยางดูดซึม และรัศมีที่เปลี่ยนไปของยางจุดสมดุล

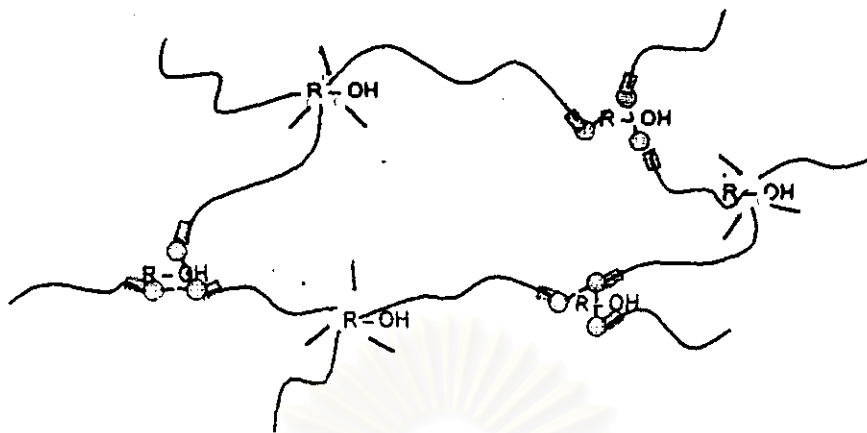
ตารางที่ 4.4 แสดงน้ำหนักโมเลกุล ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ถูกดูดซึม และรัศมีที่เปลี่ยนไปเทียบกับรัศมีเริ่มต้น

ชนิดของสาร	ความหนืด (เซนติพอยซ์)	น้ำหนักโมเลกุล	ปริมาณสารที่ถูกดูดซึม (กรัม/กรัมยาง)	รัศมีที่เปลี่ยนไปเทียบกับรัศมีเริ่มต้น
isopropyl alcohol	1.77	60.0	0.23	1.14
propylene glycol	56.0	76.1	0.13	1.02
2-ethyl-hexanediol	0.93	146.2	0.25	1.02
Tetrahydrofuran	0.55	72.0	1.10	1.35

จากกราฟจะเห็นได้ว่าปริมาณที่ถูกดูดซึมของสารอินทรีย์ที่มี hydroxy group จะมีค่าน้อย รวมถึงขนาดรัศมีถือว่าไม่มีการพองตัวเลยเมื่อเทียบกับรัศมีเริ่มต้น จากแบบจำลองอนุภาคของยาง ดังรูปที่ 4.8 โครงสร้างของยางธรรมชาติประกอบด้วยโมเลกุลของสายไฮโซปรีน ที่เป็นสาย ไฮโดรคาร์บอนยาวและเรียงตัวไม่เป็นระเบียบนอกจากนั้นยังประกอบด้วยสารอื่นที่ไม่ใช่ยางอีก ประมาณ 6% เช่น โปรตีน ฟอสโฟไลปิด กรดไขมัน และสารอื่น ๆ [14] เมื่อสารอินทรีย์ที่มี hydroxy group เข้าไปในยาง เนื่องจากสารอินทรีย์เหล่านี้มีพันธะไฮโดรเจน ($R-O^{\delta-} \cdots H^{\delta+}$) [26] จึงมีแรงดึงดูดระหว่าง วาลเกิดขึ้นระหว่างสารอินทรีย์กับโมเลกุลของยางในส่วนที่มีขั้วได้ เช่น ที่บริเวณที่มีโปรตีน และ กรดไขมัน รวมถึงฟอสโฟไลปิด ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากสารอินทรีย์เหล่านี้ไม่ได้เข้าไปเป็นสาร ละลายในยางธรรมชาติเหมือนกับตัวทำละลาย จึงทำให้ขนาดของยางไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับปริมาณ ของสารอินทรีย์ที่เข้าไปในยางได้มากน้อยต่างกันนั้น สังเกตได้ว่า isopropyl alcohol จะสามารถถูก ดูดซึมด้วยยางได้ปริมาณใกล้เคียงกับ 2-ethyl - hexanediol ในขณะที่ propylene glycol จะถูกดูด ซึมได้น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดของสาร propylene glycol มีค่าสูงมากทำให้สารแพร่เข้าไป ได้ยากกว่า 2-ethyl - hexanediol ทั้งที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า



รูปที่ 4.8 แบบจำลองโครงสร้างอนุภาคของยางธรรมชาติ (branching and gel formation)



รูปที่ 4.9 แบบจำลองโครงสร้างอนุภาคของยางธรรมชาติที่มีโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มี hydroxy group เข้าไปแทรกภายในโมเลกุลในตำแหน่งที่มีขั้วของอนุภาคยาง

ถ้าพิจารณาจากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าความหนืดของ propylene glycol มีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าความหนืดของ 2-ethyl-haxanediol ดังนั้นความหนืดของสารจึงเป็นสมบัติทางกายภาพอีกตัวที่มีผลต่อปริมาณการดูดซึมสารอินทรีย์ของยางธรรมชาติ

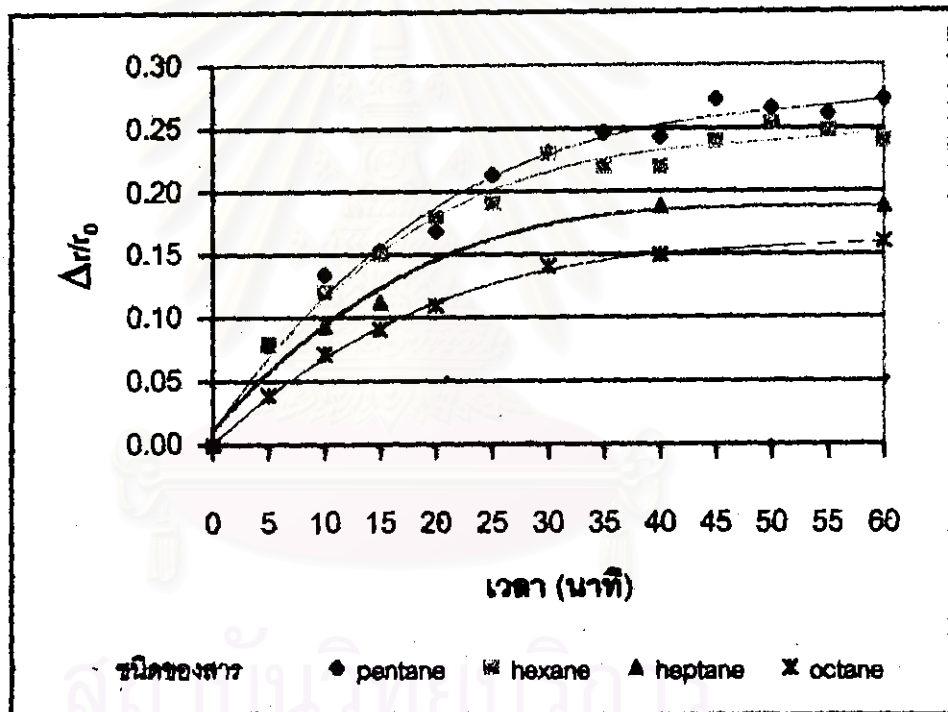
ในการดูดซึม tetrahydrofuran พบว่ายางดูดซึมสารได้มาก และมีการขยายตัวได้มากด้วย ทั้ง ๆ ที่ สารชนิดนี้เป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว แต่เนื่องจาก THF มีโครงสร้างเป็นวงอีเทอร์[26] จากโครงสร้างที่เป็นวงทำให้ THF เข้าไปละลายในยางได้ดี และเป็นสารที่มีขั้วทำให้ละลายในส่วนที่มีขั้วของยางได้อีกด้วยจึงทำให้ THF เป็นตัวทำละลายที่ดีของยางธรรมชาติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

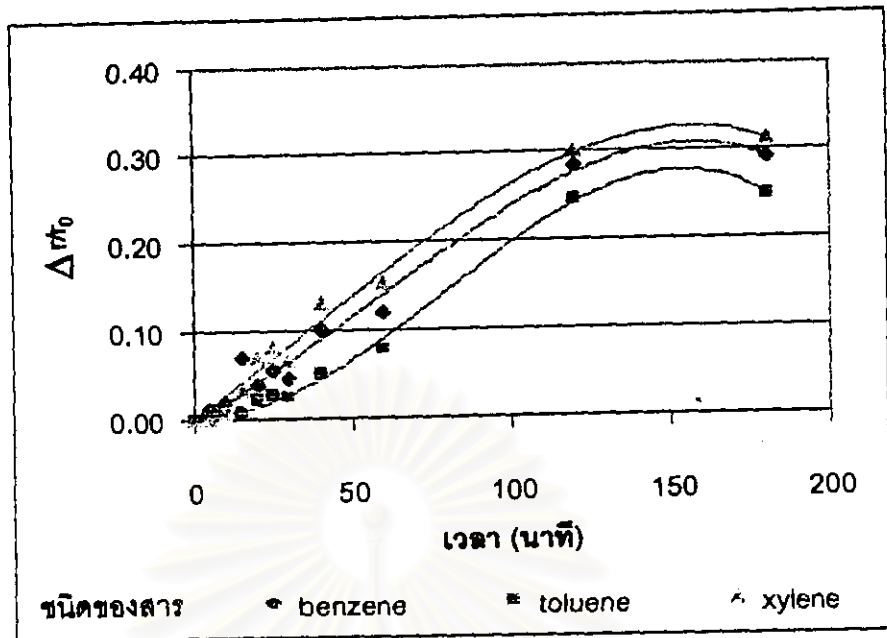
4.3 รัศมีของยางธรรมชาติที่เปลี่ยนไปหลังเกิดการดูดซึมสารไฮโดรคาร์บอนเหลว aliphatics และ aromatics

ในงานวิจัยได้ใช้สารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่มีโครงสร้างทางเคมีต่าง ๆ กันมาทดลอง และถ้าแยกไปตามโครงสร้างทางเคมีแล้วก็จะมี aliphatics กับ aromatics

ในงานวิจัยใช้สาร aliphatics ดังนี้ Pentane, Hexane, Heptane และ Octane ส่วนสารพวก aromatics ที่ใช้ คือ Benzene, Toluene และ Xylene หลังจากทำการทดลองได้ผลการทดลองออกมาว่าการพองตัวของยางธรรมชาติจะเป็นดังรูปที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.10 รัศมีที่เปลี่ยนไปเทียบกับรัศมีเริ่มต้น ($\Delta r/r_0$) ที่เวลาต่าง ๆ ของสาร aliphatics

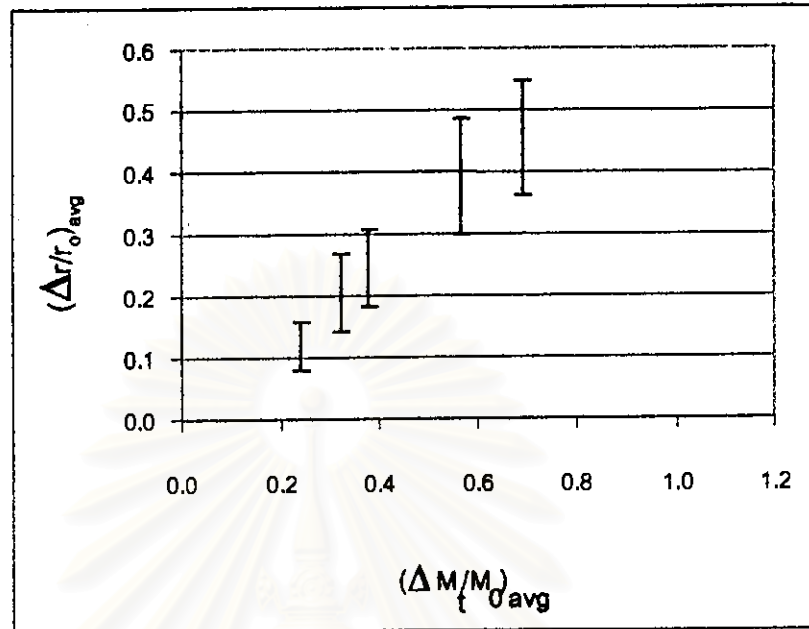


รูปที่ 4.11 รัศมีที่เปลี่ยนไปเทียบกับรัศมีเริ่มต้น ($\Delta r/r_0$) ที่เวลาต่าง ๆ ของสาร aromatics

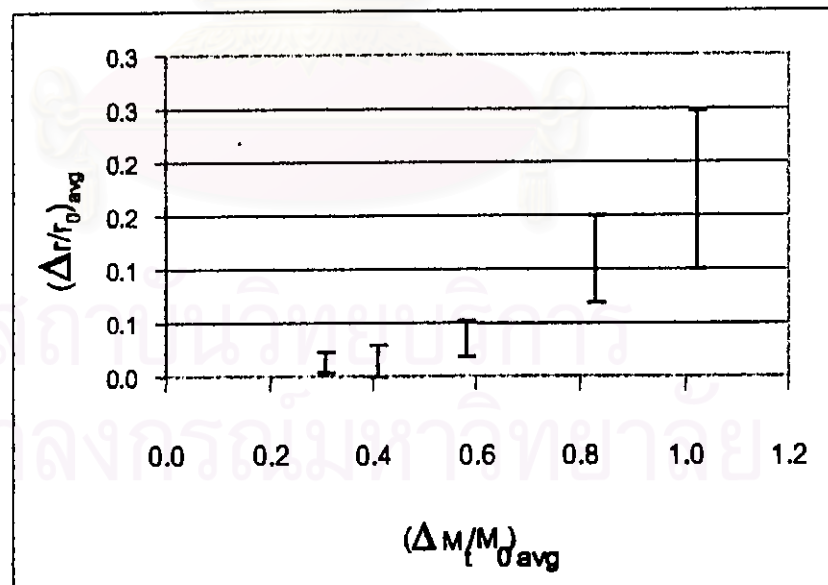
จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่าทั้งสาร aliphatics และ aromatics ซึมเข้าไปในยางธรรมชาติทำให้ยางเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงจุดสมดุลยางจะหยุดการพองตัว

แต่เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของการพองตัวของยางธรรมชาติเนื่องจากการดูดซึมสารอินทรีย์เข้าไปในยางตามเวลาพบว่า พฤติกรรมของการพองตัวของสารพวก aliphatics ที่เวลาต่าง ๆ มีลักษณะสอดคล้องกับสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง ในขณะที่การพองตัวเนื่องจากการดูดซึมสารพวก aromatics มีลักษณะสอดคล้องกับสมการอนุพันธ์อันดับสองหรือสูงกว่าตามกราฟที่ได้ในรูปที่ 4.11 ซึ่งมีลักษณะเป็น S-shape แสดงว่าการพองตัวเนื่องจากสารพวก aromatics จะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าการพองตัวเนื่องจากสารพวก aliphatics

เมื่อหาค่าเฉลี่ยของรัศมีที่เปลี่ยนไป ($\Delta r/r_0$) ของสารทั้งสองชนิด กับ ปริมาณของสารที่ถูกดูดซึมเข้าไปในยางที่เทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างยางเริ่มต้น ($\Delta M/M_0$) ที่เวลาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสารประเภท aliphatics จะทำให้ยางเกิดการพองตัวได้มากกว่า สารพวก aromatics เมื่อมีปริมาณของสารที่แทรกซึมและเวลาเท่ากัน เนื่องจากสาร aliphatics มีโครงสร้างที่เป็นโซ่ตรงจึงมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับ aromatics ที่มีโครงสร้างเป็นวง สาร aliphatics ที่มีขนาดใหญ่กว่าแทรกซึมเข้าไปจึงเข้าไปได้น้อยกว่า aromatics เพราะความกะจะของโครงสร้าง รวมถึงสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสมมุติฐานที่ต้องพิจารณาต่อไป



รูปที่ 4.12 ค่าเฉลี่ยของรัศมีที่เปลี่ยนไป ($\Delta r/r_0$) ของสาร aliphatics กับ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซึมเข้าไปในยางเทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างยางเริ่มต้น ($\Delta M/M_0$)



รูปที่ 4.13 ค่าเฉลี่ยของรัศมีที่เปลี่ยนไป ($\Delta r/r_0$) ของสาร aromatics กับ น้ำหนักของสารที่ถูกดูดซึมเข้าไปในยางเทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างยางเริ่มต้น ($\Delta M/M_0$)

4.4 อัตราการพองตัวของยางธรรมชาติ

ตัวอย่างยางธรรมชาติที่นำมาทดลองดูที่สารไฮโดรคาร์บอนเหลวชนิดต่าง ๆ จะทำให้เกิดอัตราการพองตัวของยางต่างกัน โดยที่อัตราการพองตัวหาได้จากสมการ

$$q_m = \frac{\text{ปริมาตรสุดท้าย}}{\text{ปริมาตรเริ่มต้น}}$$

โดยปริมาตร $V = \pi r^2 l$ จะได้สมการเป็น

$$q_m = \frac{\pi r^2 l}{\pi r_0^2 l}$$

$$q_m = \frac{r^2}{r_0^2} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2$$

r คือ รัศมีของยางหลังการดูที่สาร

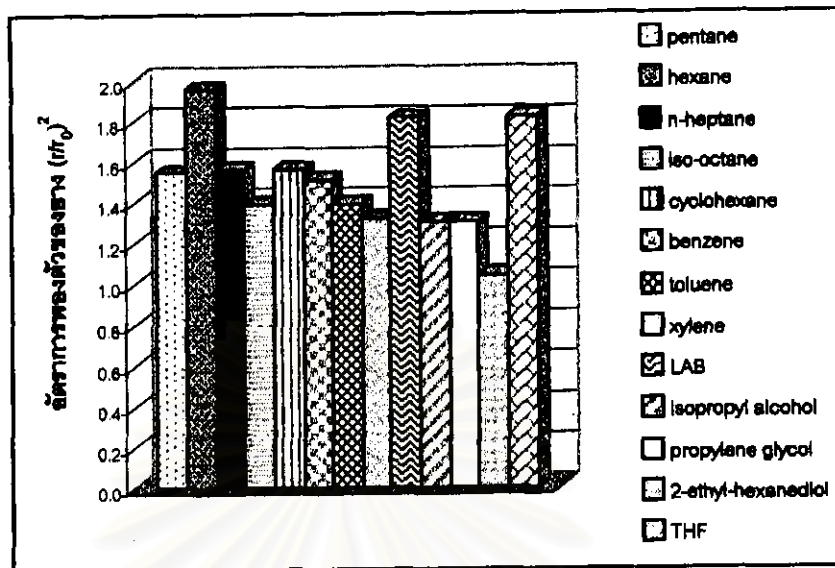
r_0 คือ รัศมีเริ่มต้นของยาง

จากผลการทดลองสามารถแสดงค่าอัตราการพองตัวได้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการพองตัวของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ

ชนิดของสาร	$(r/r_0)^2$
pentane	1.55
hexane	1.96
n-heptane	1.56
toluene	1.39
iso-octane	1.39
cyclohexane	1.56
benzene	1.51

ชนิดของสาร	$(r/r_0)^2$
LAB	1.82
isopropyl alcohol	1.30
propylene glycol	1.30
xylene	1.32
2-ethyl-hexanediol	1.04
THF	1.82



รูปที่ 4.14 อัตราการพองตัวของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ

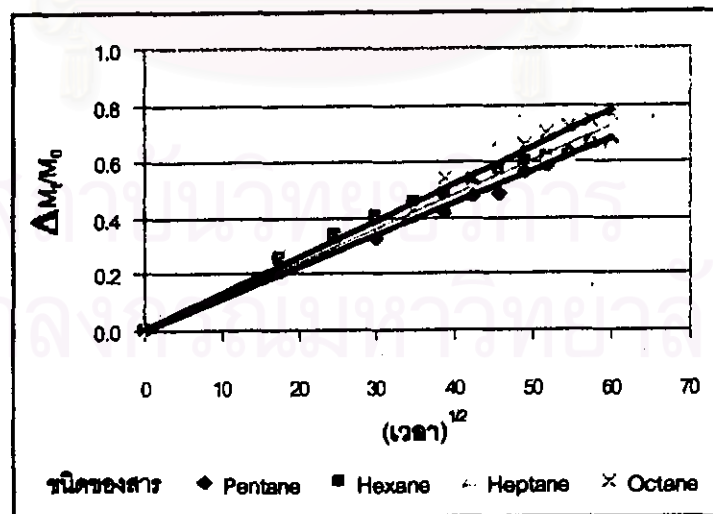
จากกราฟเห็นได้ว่าอัตราการพองตัวของยางจะมีค่ามากเมื่อสารไฮโดรคาร์บอนเป็น hexane, LAB, THF แสดงว่าสารทั้งสามนี้เมื่อเข้าไปในยางธรรมชาติแล้วมีผลทำให้โครงสร้างตาข่ายของยางเกิดการขยายตัวได้มาก สำหรับ hexane มีโครงสร้างทางเคมีเป็นสายโซ่ตรงของคาร์บอนอะตอม และ LAB ก็มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็น benzene ring ต่ออยู่กับสายโซ่ตรงของคาร์บอนอะตอม ในส่วนที่เป็นสายโซ่ตรงของคาร์บอนอะตอมนี้เมื่อเข้าไปในยางธรรมชาติ ทำให้สายของไฮโซปรีนที่พันกันขยายตัวออก เพราะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่แทรกเข้าไป เมื่อพิจารณาที่สาร THF แล้วอัตราการพองตัวของยางมากจะเกิดจากตัวทำละลายนี้เป็นตัวทำละลายที่มีขั้ว เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นวงอีเทอร์จึงทำให้ THF เข้าไปละลายในส่วนที่เป็นช่องว่างในโมเลกุลยางได้ดี อีกทั้งยังเป็นสารที่มีขั้วจึงทำให้โมเลกุลของสารเข้าไปละลายในส่วนที่ใกล้กับบริเวณที่มีขั้วที่มุมของช่องว่าง โมเลกุลของยางจึงกางออกมาก ทำให้อัตราการพองตัวของยางมาก

4.5 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถ่ายโอนมวล

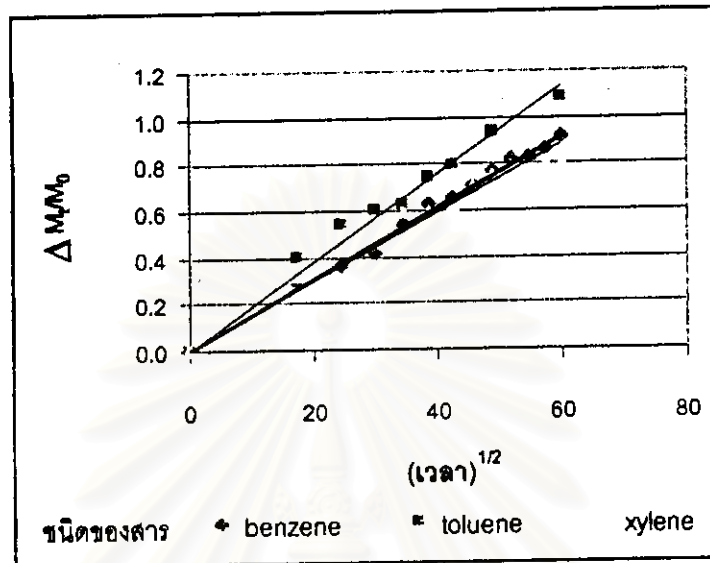
จากสมมติฐานเกี่ยวกับทฤษฎีการแทรกซึม (penetration theory) ที่ใช้ในการทำนายการถ่ายโอนมวลระหว่างเฟสของสารในเครื่องดูดซึม หรือเครื่องสกัด โดยที่ฟลักซ์ของสารจะสัมพันธ์กับค่าเวลา^{1/2} ($t^{1/2}$) ซึ่งโดยทั่วไปการแทรกซึมสารเข้าสู่สารพอลิเมอร์ จะใช้ทฤษฎีนี้ในการทำนายการถ่ายโอนมวลเช่นกัน เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง จึงควรใช้ทฤษฎีนี้ในการทำนายการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเข้าไปในยางธรรมชาติ

เพื่อทดสอบสมมติฐานดังกล่าวในการทดลองจึงสร้างกราฟระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซึมเทียบกับน้ำหนักของตัวอย่างยางก่อนการดูดซึม ($\Delta M/M_0$) หน่วยเป็น กรัมต่อกรัมยาง กับ เวลา^{1/2} หน่วยเป็น วินาที^{1/2} ค่าความชันของกราฟที่ได้เป็น อัตราการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เข้าไปในยางธรรมชาติ

จากผลการทดลองค่า $\Delta M/M_0$ แปรผันโดยตรงกับ เวลา^{1/2} คือได้กราฟ ระหว่าง ($\Delta M/M_0$) กับ เวลา^{1/2} เป็นเส้นตรงและได้ค่าความชันต่างกันตามชนิดของสารที่ถูกดูดซึมเมื่อแบ่งพิจารณาตามชนิดของสารไฮโดรคาร์บอนเป็น aliphatics และ aromatics จะได้กราฟแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 รวมถึงค่าความชันของกราฟในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ($\Delta M/M_0$) กับ เวลา^{1/2} ของสาร aliphatics



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\Delta M/M_0)$ กับ $(\text{เวลา})^{1/2}$ ของสาร aromatics

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าความชันของกราฟระหว่าง $(\Delta M/M_0)$ กับ $(\text{เวลา})^{1/2}$

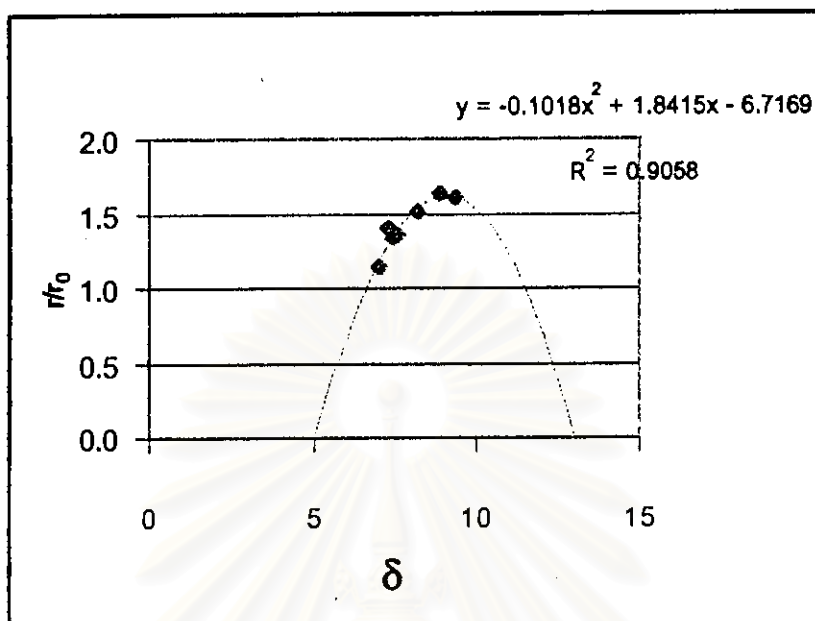
ชนิดของสาร	ความชัน
Pentane	0.011
Hexane	0.012
Heptane	0.012
Octane	0.013
Benzene	0.015
Toluene	0.017
Xylene	0.015

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวเข้าสู่ยางธรรมชาติ กับค่าพารามิเตอร์การละลาย

การถ่ายโอนสารไฮโดรคาร์บอนเหลวเข้าสู่ยางธรรมชาติเกิดจากกระบวนการซึมผ่านหรือแพร่ผ่านของเหลวสู่ของแข็งที่มีรูพรุน เรียก กระบวนการนี้ว่า กระบวนการออสโมซิส (osmosis) กระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดสารละลาย เมื่อของเหลวแพร่เข้าสู่ของแข็งที่มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์แล้วจะเกาะตัวอยู่รอบโมเลกุลพอลิเมอร์ภายในชั้นของแข็งนั้น ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายการละลาย

สมบัติทางกายภาพในที่นี้ จึงพิจารณาค่าพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter) โดยทั่วไปสาร 2 ชนิด ที่สามารถละลายเข้ากันได้จะมีค่าของพารามิเตอร์การละลาย ใกล้เคียงกัน ดังนั้นปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่เข้าไปในยางธรรมชาติได้มากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์การละลายด้วย สำหรับค่าพารามิเตอร์การละลายของสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก ๆ การหาค่าของพารามิเตอร์การละลายสามารถหาได้จากการคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก แต่สำหรับค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยใช้ยางธรรมชาติซึ่งมีขนาดโมเลกุลใหญ่ค่าพารามิเตอร์ จะได้จากการทดลองโดยการหาขนาดการพองตัวของยาง ณ จุดสมดุล ทำโดยจุ่มแผ่นยางลงในสารอินทรีย์ขนาดโมเลกุลเล็กที่มีค่าพารามิเตอร์การละลายต่าง ๆ กัน เพื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดที่พองตัวกับค่าพารามิเตอร์การละลาย จุดสูงสุดของกราฟจะเป็นค่า พารามิเตอร์การละลายเฉลี่ยของยางธรรมชาตินั้น

จากผลการทดลองเมื่อนำมาหาค่าพารามิเตอร์การละลายพบว่า ค่าพารามิเตอร์การละลายของยางธรรมชาติเป็น 9 แคลอรี^{1/2}ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร^{3/2} แสดงไว้ในภาพที่ 4.17 เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิไอโซพรีน ซึ่งมีค่าในช่วง 7.9-10 แคลอรี^{1/2}ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร^{3/2} [21] พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงตามทฤษฎี



รูปที่ 4.17 การหาค่าพารามิเตอร์การละลายของยางธรรมชาติจากข้อมูลการทดลอง

4.7 การจัดอันดับอัตราการถ่ายโอนมวลของสารอินทรีย์เหลว

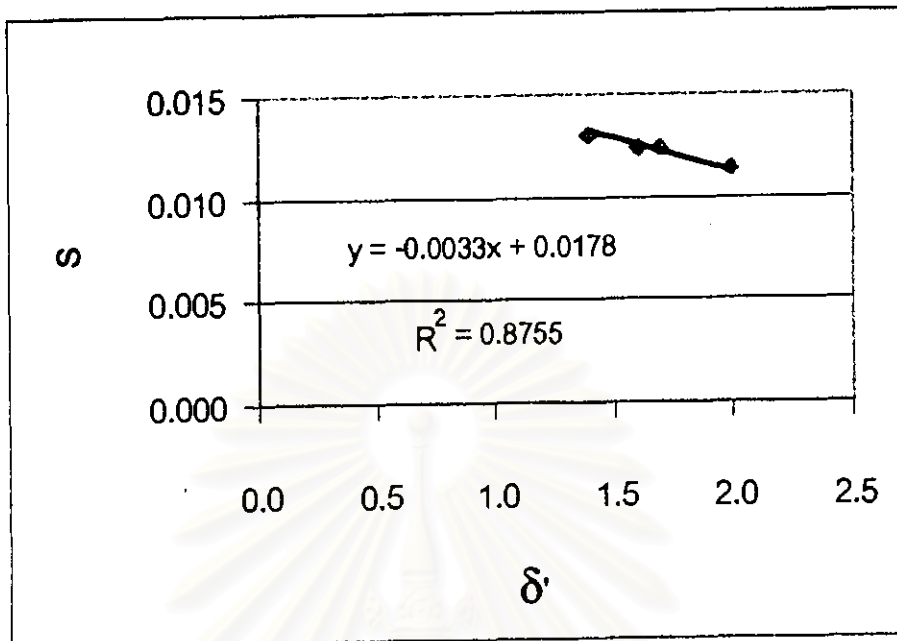
อัตราการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเข้าไปในยางธรรมชาติ คือ ค่าความชันของกราฟระหว่าง $\Delta M_t/M_0$ กับ เวลา^{1/2} พิจารณาค่าความชันของสารประเภท aliphatics และ aromatics กับ δ' โดยพิจารณาเป็นค่าความแตกต่างของ δ ของสารไฮโดรคาร์บอน กับ δ ของยางธรรมชาติ

$$\text{ให้ } \delta' = |\delta_{NR} - \delta_i| \quad ; \delta_{NR} \text{ คือ } \delta \text{ ของยางธรรมชาติ}$$

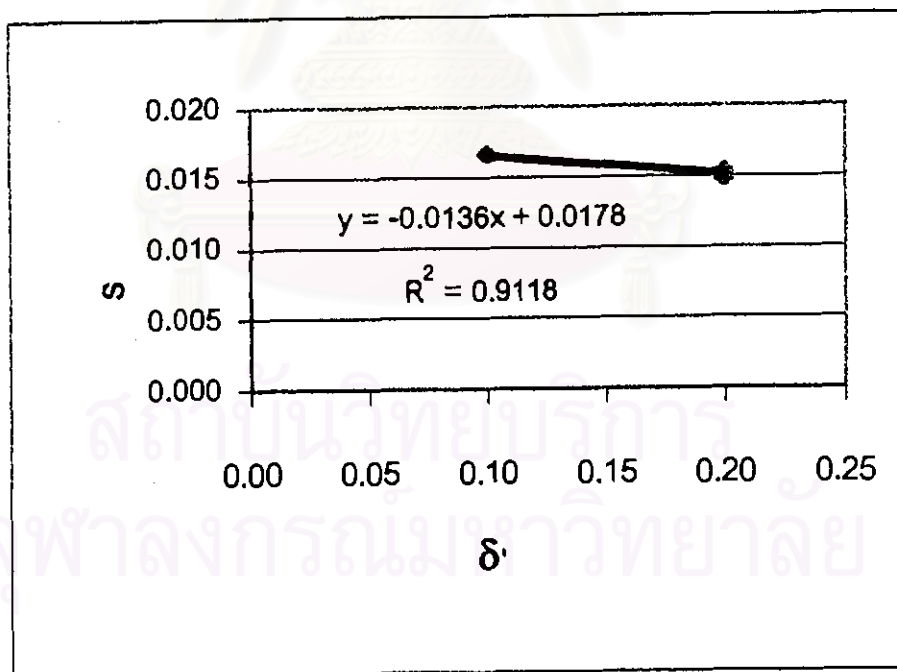
$$; \delta_i \text{ คือ } \delta \text{ ของสารไฮโดรคาร์บอน}$$

S คือ ค่าความชันของกราฟระหว่าง $\Delta M_t/M_0$ กับ เวลา^{1/2}

สร้างกราฟระหว่างค่าความชัน (S) และ δ' ของสาร aliphatics และ aromatics ได้ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ พิจารณาจากกราฟพบว่าได้กราฟเป็นเส้นตรงทั้งสองกราฟ เส้นแนว-โน้มที่ได้พิจารณาเป็นสมการ $S = a + (b\delta')$



รูปที่ 4.18 ค่าความขั้ว (σ) และ δ' ของสาร aliphatics



รูปที่ 4.19 ค่าความขั้ว (σ) และ δ' ของสาร aromatics

แสดงค่าของเส้นแนวโน้มได้ดังนี้

$$\text{aromatics} ; S=0.0178+(-0.0033)\delta' \quad (4.1)$$

$$\text{aromatics} ; S=0.0178+(-0.0136)\delta' \quad (4.2)$$

จากสมการที่ได้ พิจารณา S เป็น $(\Delta M/M_0) / (\text{เวลา})^{1/2}$ ดังนั้น $(a+b\delta')$ จึงแทนค่าความชันของกราฟระหว่าง $(\Delta M/M_0)$ กับ $(\text{เวลา})^{1/2}$ เทียบเป็นสมการดังนี้

$$\theta = (a+b\delta')t^{1/2} \quad (4.3)$$

โดย θ คือ $\Delta M/M_0$

เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดจากการทดลองแบ่งเป็นสาร aromatics และ aromatics สร้างกราฟระหว่าง $(\Delta M/M_0)_{\text{experiment}}$ กับ $(\Delta M/M_0)_{\text{calculate}}$ ซึ่งได้จากสมการที่ (4.1) และ (4.2) เพื่อทดสอบว่าสมการใช้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 พบว่าความชันมีค่าใกล้กับ 1

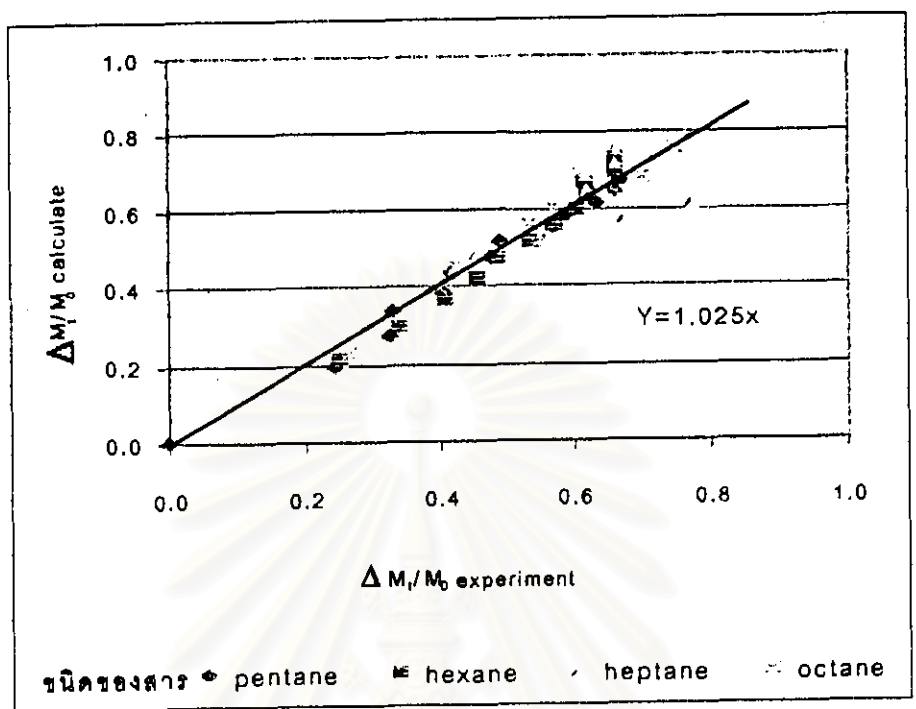
เมื่อนำค่าความชันของ aromatics และ aromatics มาเปรียบเทียบกัน ได้เป็นพารามิเตอร์ใหม่ เรียกว่า γ เป็นดัชนีเปรียบเทียบอัตราการถ่ายโอนมวลของสารนั้นกับสารพวก aromatics โดย

$$\begin{aligned} \gamma &= (a+b\delta')_{\text{aromatics}} / (a+b\delta')_{\text{aromatics}} \quad (4.4) \\ &= 0.74 \end{aligned}$$

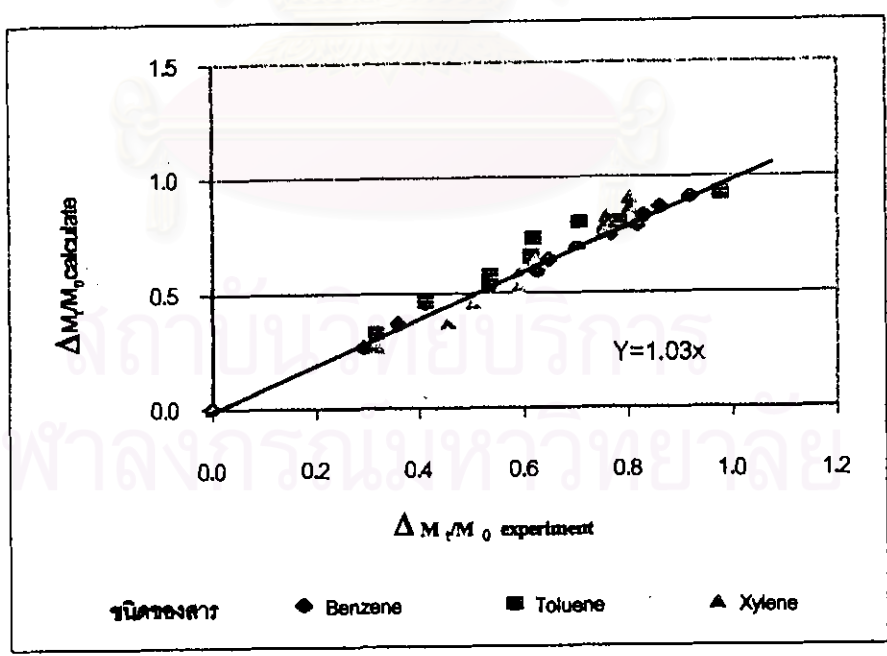
$$\therefore \theta = (a+b\delta')_{\text{aromatics}} t^{1/2} \quad (4.5)$$

$$= ((a+b\delta')_{\text{aromatics}} / \gamma) t^{1/2} \quad (4.6)$$

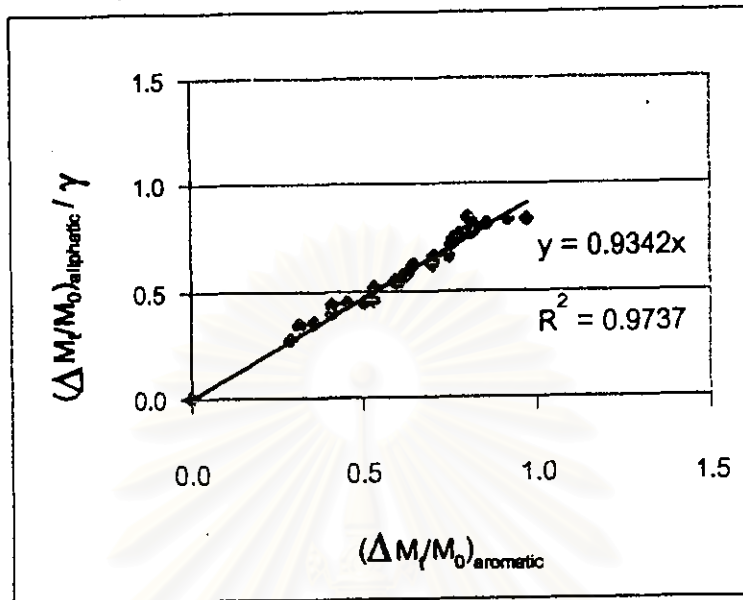
เมื่อนำค่า γ มาหาร $(\Delta M/M_0)_{\text{experiment}}$ ของสารพวก aromatics แล้วนำมาสร้างกราฟจากข้อมูลการทดลองระหว่าง $(\Delta M/M_0)_{\text{aromatics}} / \gamma$ กับ $(\Delta M/M_0)_{\text{aromatics}}$ ดังรูปที่ 4.22 ความชันของกราฟที่ได้มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นว่าค่า γ สามารถใช้เป็นตัวชี้แสดงความสามารถในการถ่ายโอนมวลเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม aromatics ได้



รูปที่ 4.20 $(\Delta M_i/M_i)_{\text{experiment}}$ กับ $(\Delta M_i/M_i)_{\text{calculate}}$ ของสารพวก aromatics

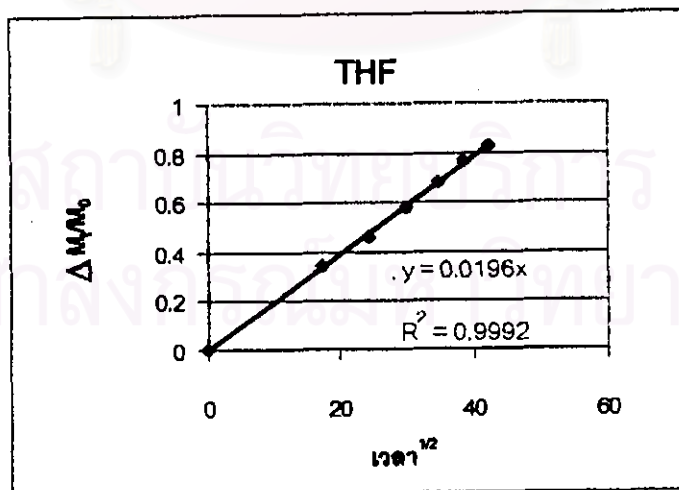


รูปที่ 4.21 $(\Delta M_i/M_i)_{\text{experiment}}$ กับ $(\Delta M_i/M_i)_{\text{calculate}}$ ของสารพวก aromatics

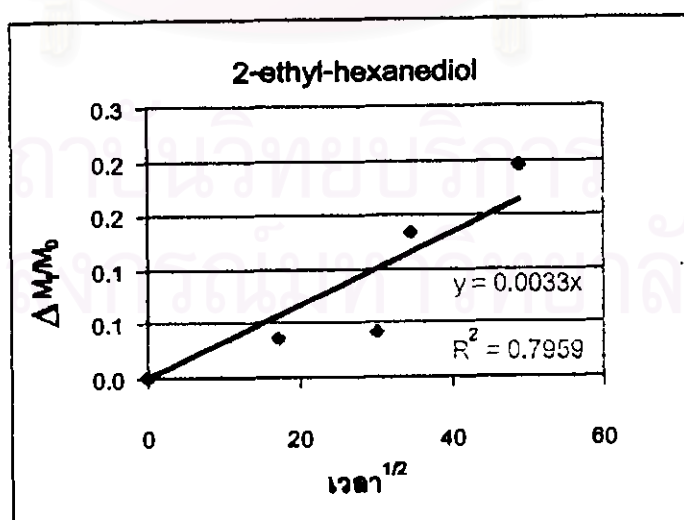
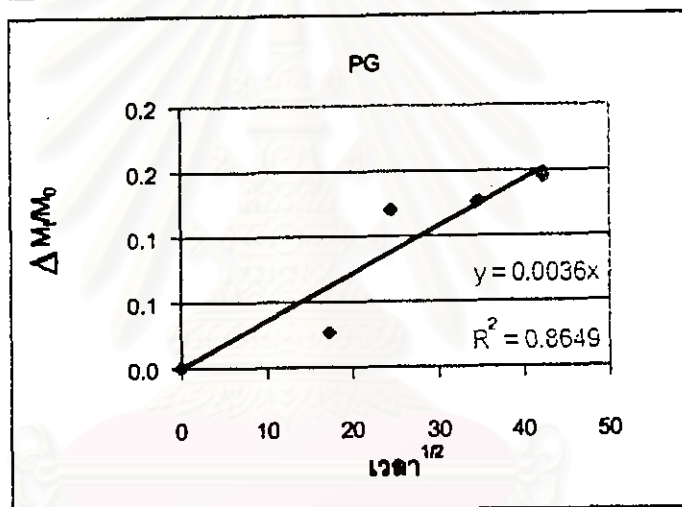
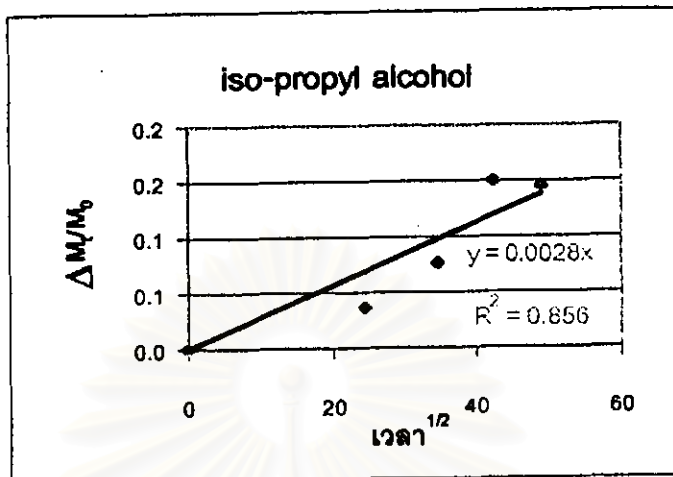


รูปที่ 4.22 กราฟจากข้อมูลการทดลองระหว่าง $(\Delta M/M_0)_{aromatics}/\gamma$ กับ $(\Delta M/M_0)_{aromatics}$

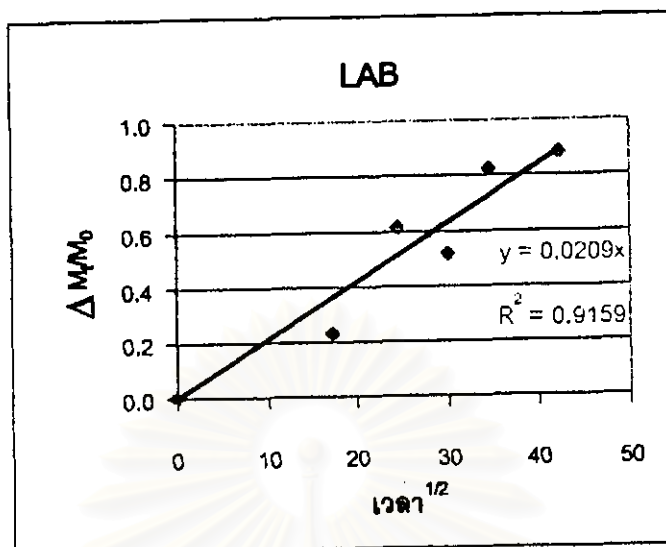
จากสมการ (4.3) ค่า $(a+b\delta)$ คือ ค่าความชันของกราฟระหว่าง $(\Delta M/M_0)$ กับ $(เวลา)^{1/2}$ หรือ อัตราการถ่ายโอนมวลของสารไฮโดรคาร์บอนเข้าสู่ยางธรรมชาติ จากข้อมูลการทดลองหาค่าความชันของสารต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.25



รูปที่ 4.23 $(\Delta M/M_0)$ กับ $(เวลา)^{1/2}$ ของสารประเภทอีเทอร์ (tetrahydrofuran)



รูปที่ 4.24 ($\Delta M/M_0$) กับ (เวลา^{1/2}) ของสารที่มี hydroxy group



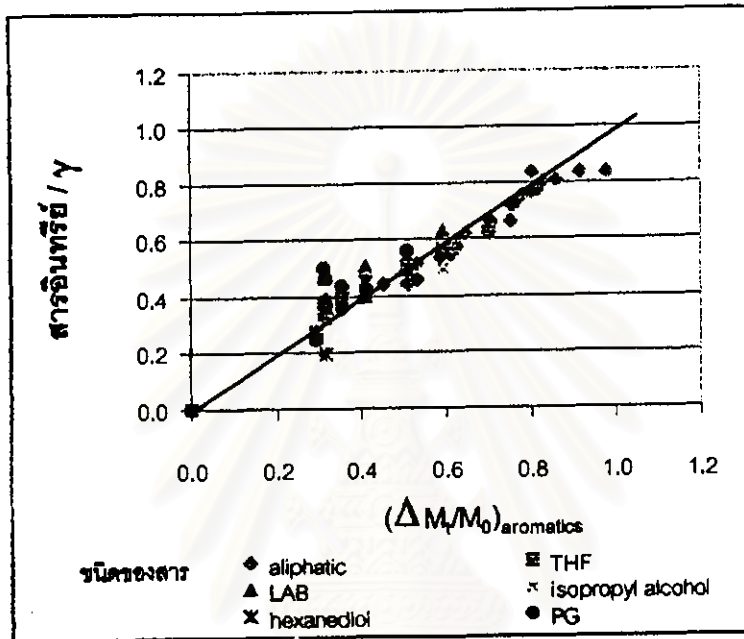
รูปที่ 4.25 กราฟระหว่าง ($\Delta M/M_0$) กับ (เวลา^{1/2}) ของสาร LAB (Linear alkyl benzene)

จากกราฟทำให้ทราบค่าความชื้น หรือ อัตราการถ่ายโอนมวลของสารชนิดต่าง ๆ เมื่อนำค่าอัตราการถ่ายโอนมวลของสารมาเปรียบเทียบกับสารกลุ่ม aromatics จะได้ค่า γ ของสาร ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงการจัดอันดับของสารอินทรีย์เหลว โดยใช้อัตราการถ่ายโอนมวลเข้าสู่ยางธรรมชาติ (γ)

	$\Delta M/M_0$	γ
<i>aliphatics</i>	0.012	0.74
<i>aromatics</i>	0.016	1.00
<i>THF</i>	0.020	1.24
<i>LAB</i>	0.021	1.32
<i>Isopropyl alcohol</i>	0.003	0.18
<i>2-ethyl-hexanediol</i>	0.003	0.21
<i>PG</i>	0.004	0.23

เมื่อนำค่า $(\Delta M/M_0)_{\text{สารอินทรีย์}}/\gamma$ กับ $(\Delta M/M_0)_{\text{aromatics}}$ มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.26 เพื่อพิสูจน์ว่าสมการที่ได้สามารถใช้ได้จริงตามข้อมูลจากการทดลอง พบว่ากราฟที่ได้มีข้อมูลกระจายตัวอยู่ใกล้กับเส้นตรงของแนวโน้มที่สร้างขึ้น แสดงว่าสมการที่ได้ใช้ได้จริงกับผลการทดลอง



รูปที่ 4.26 กราฟระหว่าง $(\Delta M/M_0)_{\text{สารอินทรีย์}}/\gamma$ กับ $(\Delta M/M_0)_{\text{aromatics}}$