

การลดปริมาณแอสฟัลท์หินของยางมะตอยโดยการตกตะกอนและการดูดซับ



นางสาวสาวิณี วุฒิสกุลวงศ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REDUCTION OF ASPHALTENE CONTENT OF BITUMEN
BY PRECIPITATION AND ADSORPTION

Miss Sawinee Wuttisakulwong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดปริมาณแอสฟัลท์หินของยางมะตอยโดยการ
	ตกตะกอนและการดูดซับ
โดย	นางสาวสาวินี วุฒิสกุลวงศ์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกื้อวลี พุกษาทร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ธิญะธีระนันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.วัชชรินทร์ งามพิงพิศ)

สาวินี วุฒิสกุลวงศ์ : การลดปริมาณแอสฟัลทีนของยางมะตอยโดยการตกตะกอนและการดูดซับ (REDUCTION OF ASPHALTENE CONTENT OF BITUMEN BY PRECIPITATION AND ADSORPTION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย, 120 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนของยางมะตอยผ่านกระบวนการแบบสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกตกตะกอนแอสฟัลทีนด้วยนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3279 และ ASTM D2042 จากนั้นแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยถูกกำจัดด้วยการดูดซับโดยใช้เบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เป็นตัวดูดซับ สมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับวิเคราะห์ด้วย CHNS analysis SARA analysis colorimetric spectrophotometry UV-Vis spectrophotometry และ color measurement ยางมะตอยเริ่มต้นมีสีดำนและมีปริมาณแอสฟัลทีน 16.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมในการตกตะกอนแอสฟัลทีน โดยลดปริมาณแอสฟัลทีนได้ 68.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สำหรับขั้นตอนการดูดซับพบว่า ไฮโดรทัลไซต์ซึ่งมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดเป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุด เมื่อใช้ปริมาณของตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น) นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลาย อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และเวลา 4 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ยางมะตอยที่ได้มีปริมาณแอสฟัลทีนเหลือเพียง 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้การดูดซับสามารถลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติก สารประกอบซัลเฟอร์ และวาเนเดียมพอร์ไฟริน สีของยางมะตอยหลังผ่านการดูดซับมีแนวโน้มเป็นสีน้ำตาลและมีความสว่างเพิ่มขึ้น โดยคิดเป็นค่าความแตกต่างของสีตามระบบ CIELAB เท่ากับ 17.0 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอสฟัลทีนบนตัวดูดซับทั้งสามชนิดสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียม ซึ่งแสดงว่าอันตรกิริยาระหว่างแอสฟัลทีนและพื้นผิวของตัวดูดซับเกี่ยวข้องกับกระบวนการเคมี ไอโซเทิร์มของการดูดซับที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายด้วยสมการของแลงเมียร์ โดยความจุการดูดซับขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5572140923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: ADSORPTION / ASPHALTENE / ISOTHERM AND KINETICS MODELING

SAWINEE WUTTISAKULWONG: REDUCTION OF ASPHALTENE CONTENT OF BITUMEN BY PRECIPITATION AND ADSORPTION. ADVISOR: ASST. PROF. CHAWALIT NGAMCHARUSSRIVICHAI, Ph.D., 120 pp.

This work studied reduction of asphaltene content of bitumen by two-step process. In the first step, asphaltene was precipitated in *n*-heptane, toluene and trichloroethylene according to ASTM D3279 and ASTM D2042. The asphaltene remaining in the bitumen was then removed by adsorption using bentonite, bleaching earth and hydrotalcite as adsorbents. The physicochemical properties of bitumen before and after precipitation and adsorption were determined by CHNS analysis, SARA analysis, colorimetric spectrophotometry, UV-Vis spectrophotometry and color measurement. The starting bitumen was black and had the asphaltene content of 16.6 wt.%. *n*-Heptane was the suitable solvent for asphaltene precipitation in which the asphaltene content was reduced by 68.7 wt.%. In the adsorption step, hydrotalcite with the highest specific surface area was the most suitable adsorbent when using the adsorbent amount; 150 wt.% (based on the bitumen weight), solvent type; *n*-heptane, temperature; 30 °C, time; 4 h. The bitumen obtained had the asphaltene content of 0.9 wt.%. Moreover, the adsorption reduced polycyclic aromatic hydrocarbons, sulfur compounds and vanadium porphyrins contents. The color of bitumen after the adsorption was brown and relatively light. The color difference value (CIELAB system) was 17.0. The kinetics of asphaltene adsorption on three adsorbents fitted pseudo-second order equation, suggesting that the interaction between asphaltene and adsorbent surface is associated with a chemical process. The adsorption isotherm could be explained by Langmuir equation. The adsorption capacity was depended on the surface area of adsorbent.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์ได้ ด้วยความกรุณาของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณูชีระนันท์ และ ดร.วัชชรินทร์ งามพึงพิศ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและแก้ไขข้อผิดพลาดจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี ปตท. บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) และบริษัท PKK Bleaching Earth จำกัด ที่ให้คำแนะนำ อนุเคราะห์สารเคมี และช่วยเหลือเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญดา เกตุเมฆ และ ดร. นิปกา สุขภิรมย์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ช่างเทคนิค และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และเป็นกำลังใจอย่างดีจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ยางมะตอย.....	4
2.1.1 สมบัติของยางมะตอย.....	5
2.1.2 ชนิดของยางมะตอย	5
2.1.3 องค์ประกอบของยางมะตอย.....	9
2.1.4 โครงสร้างของแอสฟัลต์หิน	13
2.1.5 ขนาดและรูปร่างของแอสฟัลต์หิน.....	15
2.1.6 การดูดซับของแอสฟัลต์หิน.....	17
2.2 การตกตะกอนของแอสฟัลต์หิน	17
2.3 การดูดซับ	19

2.3.1	ประเภทของการดูดซับ.....	19
2.3.1.1	การดูดซับเชิงกายภาพ.....	20
2.3.1.2	การดูดซับเชิงเคมี.....	21
2.3.2	จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ.....	21
2.3.3	ไอโซเทิร์มของการดูดซับ.....	23
2.3.4	ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ.....	24
2.3.5	ตัวดูดซับที่ใช้ในการวิจัย.....	25
2.3.5.1	เบนโทไนด์.....	25
2.3.5.2	ไฮโดรทัลไซต์.....	28
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	34
3.1.1	วัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา.....	34
3.1.2	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสภาพการละลายของยางมะตอย.....	34
3.1.3	สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ.....	34
3.1.4	สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับ.....	35
3.2	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	35
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	37
3.3.1	ศึกษาสภาพการละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ นอร์มอลเฮปเทน โทลูอีน และไตรคลอโรเอทิลีน.....	37
3.3.2	ศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินพอกสี และไฮโดรทัลไซต์.....	38

3.3.2.1 การสังเคราะห์ไฮโดรทัลไซต์.....	38
3.3.2.2 การดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับ.....	38
3.3.2.3 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์.....	39
3.3.3 ศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับ	40
3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับ.....	40
3.4.1 เครื่อง CHNS analyzer.....	40
3.4.2 เครื่อง TLC-FID analyzer.....	41
3.4.3 เครื่อง Thermogravimetric analyzer.....	44
3.4.4 เครื่อง Color checker.....	44
3.4.5 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer.....	47
3.4.6 เครื่อง Color quest.....	48
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ.....	50
3.5.1 เครื่อง X-ray diffractometer.....	50
3.5.2 เครื่อง Surface area and porosity analyzer.....	50
3.5.3 เครื่อง Scanning electron microscope	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
4.1 ลักษณะและองค์ประกอบของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น.....	52
4.2 สภาพการละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	53
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน	54
4.2.2 การวิเคราะห์สีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน.....	55
4.3 สมบัติของตัวดูดซับ.....	57
4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับชนิดต่างๆ	57

4.3.2 การวิเคราะห์ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	59
4.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	61
4.4 การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ.....	63
4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับ.....	65
4.6 การวิเคราะห์สีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเครื่อง Color checker.....	68
4.7 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติกของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry.....	71
4.8 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเครื่อง Color quest XT.....	73
4.9 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไลต์.....	77
4.9.1 ผลของชนิดตัวทำละลายในการดูดซับ	77
4.9.2 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับ	82
4.9.3 ผลของเวลาในการดูดซับ	86
4.10 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	88
4.11 การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ	93
4.12 การศึกษาลักษณะของตัวดูดซับหลังการใช้งาน	97
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	100
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
5.2 ข้อเสนอแนะ	101
รายการอ้างอิง	102
ภาคผนวก.....	109
ภาคผนวก ก.....	110

ภาคผนวก ข.....	113
ภาคผนวก ค.....	115
ภาคผนวก ง.....	116
ภาคผนวก จ.....	117
ภาคผนวก ฉ.....	118
ภาคผนวก ช.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	120



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี	20
ตารางที่ 2.2 ชื่อและสูตรโครงสร้างของสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซต์	29
ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางมะตอยที่นำมาใช้ในการศึกษา	34
ตารางที่ 3.2 ค่า X_n และ Z_n ที่ลักษณะการมอง 2 และ 10 องศา ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงต่างๆ	46
ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของสีที่สารดูดกลืนและสีที่ปรากฏให้เห็น	48
ตารางที่ 4.1 การละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	54
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น	55
ตารางที่ 4.3 ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น	56
ตารางที่ 4.4 ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดต่างๆ	60
ตารางที่ 4.5 การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับเบนโทไนต์	63
ตารางที่ 4.6 การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับดินพอกสี	64
ตารางที่ 4.7 การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์	64
ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ	67
ตารางที่ 4.9 ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน	70
ตารางที่ 4.10 ค่าสีของสารละลายยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน	76
ตารางที่ 4.11 ผลของชนิดตัวทำละลายต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์	78
ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	78

ตารางที่ 4.13	ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	79
ตารางที่ 4.14	ค่าสีของสารละลายยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ.....	81
ตารางที่ 4.15	ผลของอุณหภูมิต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์.....	82
ตารางที่ 4.16	องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	83
ตารางที่ 4.17	ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	83
ตารางที่ 4.18	ค่าสีของสารละลายยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	85
ตารางที่ 4.19	ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	90
ตารางที่ 4.20	ค่าตัวแปรของไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	95
ตารางที่ ก.1	การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์.....	110
ตารางที่ ก.2	การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับดินพอกสี.....	111
ตารางที่ ก.3	การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์.....	112
ตารางที่ ข.1	ผลของชนิดตัวทำละลายต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์.....	113
ตารางที่ ข.2	ผลของอุณหภูมิต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์.....	114
ตารางที่ จ.1	ข้อมูลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	117
ตารางที่ จ.2	ข้อมูลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน โดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	117

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางมะตอยที่มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ.....	4
รูปที่ 2.2 การทดสอบความหนืด	5
รูปที่ 2.3 การทดสอบความแข็ง	6
รูปที่ 2.4 การทดสอบความอ่อนตัว	6
รูปที่ 2.5 การทดสอบความเหนียว	7
รูปที่ 2.6 การทดสอบจุดวาบไฟ	7
รูปที่ 2.7 หมูฟังก์ชันที่พบในยางมะตอย.....	10
รูปที่ 2.8 หลักการของ SARA analysis ที่ใช้ในการหาค่าประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ใน น้ำมันดิบและยางมะตอย	10
รูปที่ 2.9 โมเดลโครงสร้างของ (ก) ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (ข) แอโรแมติก (ค) เรซิน และ (ง) แอส ฟัลทีน	12
รูปที่ 2.10 โมเดลโครงสร้างแอสฟัลทีนที่ถูกล้อมรอบด้วยเรซิน	12
รูปที่ 2.11 โมเดลโครงสร้างของแอสฟัลทีน (ก) มอนอเมอร์ (ข) ไดเมอร์ (ค) ไตรเมอร์ และ (ง) เตตระเมอร์.....	13
รูปที่ 2.12 โมเดลโลหะพอร์ไฟรินในโครงสร้างของแอสฟัลทีน.....	14
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพอร์ไฟริน (ก) สารประกอบเอมีน (free-base) (ข) สารประกอบ เชิงซ้อนกับโลหะ (metal complex).....	14
รูปที่ 2.14 โมเดลการเกาะกลุ่มรวมกันของแอสฟัลทีน	15
รูปที่ 2.15 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของแอสฟัลทีน (ก) กรดกับเบส (ข) พันธะ ไฮโดรเจน (ค) สารประกอบเชิงซ้อน (ง) อันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และ (จ) อันตร กิริยาระหว่างพันธะ $\pi-\pi$	16
รูปที่ 2.16 การดูดตันของแอสฟัลทีนในท่อ	17

รูปที่ 2.17 โมเดลผลของตัวทำละลายนอร์มอลแอลเคนต่อการละลาย ขององค์ประกอบต่างๆ ใน ยางมะตอย	18
รูปที่ 2.18 สีและลักษณะของแอสฟัลท์หินที่ได้ เมื่อใช้ (ก) นอร์มอลเพนเทน และ (ข) นอร์มอล เฮกเซน เป็นตัวทำละลาย.....	18
รูปที่ 2.19 ผลของอุณหภูมิต่อความจุการดูดซับ	25
รูปที่ 2.20 โครงสร้างสามมิติของเบนโทไนด์	26
รูปที่ 2.21 การปรับปรุงสมบัติของเบนโทไนด์ด้วยกรด	27
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเบนโทไนด์ (ก) ก่อน และ (ข) หลังการปรับปรุงสมบัติด้วยกรด	27
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์	28
รูปที่ 2.24 ปฏิกิริยาการจذبสาร	30
รูปที่ 3.1 กระจกกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร	36
รูปที่ 3.2 ชุดกรองสำหรับกระจกกรอง (ก) ขนาด 47 มิลลิเมตร และ (ข) ขนาด 110 มิลลิเมตร... ..	37
รูปที่ 3.3 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ	37
รูปที่ 3.4 เครื่อง CHNS analyzer ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น 2400 Series II	41
รูปที่ 3.5 เครื่อง TLC-FID analyzer ยี่ห้อ IATROSCAN รุ่น MK-6S.....	42
รูปที่ 3.6 แท่งควอตซ์สำหรับจุดสารละลายตัวอย่าง	42
รูปที่ 3.7 ภาชนะใส่ตัวทำละลายสำหรับแช่แท่งควอตซ์.....	43
รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของเครื่อง TLC-FID analyzer	44
รูปที่ 3.9 เครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น 851e.....	44
รูปที่ 3.10 ระบบสีของ CIE Lab แบบสามมิติ.....	45
รูปที่ 3.11 เครื่อง Color checker ยี่ห้อ NIPPON DENSHOKU รุ่น NR-11A.....	46
รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ซิลิโคน	47
รูปที่ 3.13 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Jenway รุ่น 7315.....	47
รูปที่ 3.14 เซลล์ขนาด 10 มิลลิเมตร	48

รูปที่ 3.15 เครื่อง Color quest ยี่ห้อ HunterLab รุ่น XT	49
รูปที่ 3.16 เซลล์ขนาด 50 มิลลิเมตร	49
รูปที่ 3.17 เครื่อง X-ray diffractometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance.....	50
รูปที่ 3.18 เครื่อง Surface area and porosity analyzer ยี่ห้อ Micromeritics.....	51
รูปที่ 3.19 เครื่อง Scanning electron microscopy ยี่ห้อ JEOL รุ่น 6610LV.....	51
รูปที่ 4.1 โคโรมาโทแกรมของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น	52
รูปที่ 4.2 รูปแบบการสลายตัวทางความร้อนของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น	53
รูปที่ 4.3 สีของ (ก) ยางมะตอยเริ่มต้น และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนใน (ข) นอร์มอลเฮปแทน (ค) โทลูอีน และ (ง) ไตรคลอโรเอทิลีน.....	56
รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของเบนโทไนด์ก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ = มอนต์มอริลโลไนต์, ● = คริสโตบาไลต์, ◆ = เฟลด์สปาร์, ■ = แคลไซต์, ▼ = ควอตซ์)	57
รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของดินฟอกสีก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ = มอนต์มอริลโลไนต์, ● = คริสโตบาไลต์, ◆ = เฟลด์สปาร์, ■ = แคลไซต์, ▼ = ควอตซ์)	58
รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของไฮโดรทัลไซต์ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ = แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิล ไฮดรอกไซด์ ● = แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมออกไซด์ และ ◆ = แมกนีเซียมออกไซด์)	58
รูปที่ 4.7 ไอโซเทิร์มของการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับชนิดต่างๆ	60
รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินฟอกสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์ ที่กำลังขยาย 10,000 และ 20,000 เท่า ตามลำดับ.....	62
รูปที่ 4.9 สีของ (ก) ยางมะตอยเริ่มต้น (ข) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วย (ค) เบนโทไนด์ (ง) ดินฟอกสี และ (จ) ไฮโดรทัลไซต์.....	70
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วย (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินฟอกสี (ค) ไฮโดรทัลไซต์ และ (ง) ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เทียบกับมอลทิน.....	72

รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วย (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินฟอกสี (ค) ไฮโดรทัลไซต์ และ (ง) ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน.....	73
รูปที่ 4.12 โครงสร้างของวาเนเดียมพอร์ไฟริน (ก) VO(OEP) และ (ข) VO(TPP).....	74
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของนิกเกิลพอร์ไฟริน Ni(OEP).....	75
รูปที่ 4.14 สีของสารละลาย (ก) ยางมะตอยเริ่มต้น (ข) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนและการดูดซับด้วย (ค) เบนโทไนด์ (ง) ดินฟอกสี และ (จ) ไฮโดรทัลไซต์.....	76
รูปที่ 4.15 สีของ (ก) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ใน (ข) นอร์มอลเฮปเทน (ค) โทลูอิน และ (ง) ไตรคลอโรเอทิลีน	80
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ	80
รูปที่ 4.17 สีของสารละลาย (ก) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ใน (ข) นอร์มอลเฮปเทน (ค) โทลูอิน และ (ง) ไตรคลอโรเอทิลีน	81
รูปที่ 4.18 สีของ (ก) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วย ไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิ (ข) 30 (ค) 40 และ (ง) 50 องศาเซลเซียส	84
รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิที่ต่างๆ	84
รูปที่ 4.20 สีของสารละลาย (ก) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ ที่อุณหภูมิ (ข) 30 (ค) 40 และ (ง) 50 องศาเซลเซียส.....	85
รูปที่ 4.21 ผลของเวลาต่อการดูดซับแอสฟัลทินในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ.....	87
รูปที่ 4.22 สมการอันดับหนึ่งเทียบและสมการอันดับสองเทียบของการดูดซับแอสฟัลทินในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วย (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินฟอกสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์	89
รูปที่ 4.23 การดูดซับแอสฟัลทินบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว	91
รูปที่ 4.24 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทินในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ (ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).....	93

รูปที่ 4.25 สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์มและสมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนใน
 ยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วย (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินฟอกสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์ 96

รูปที่ 4.26 สีของ (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินฟอกสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์ ก่อนและหลังดูดซับแอส
 ฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน..... 97

รูปที่ 4.27 รูปแบบ XRD ของเบนโทไนต์ก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ.... 98

รูปที่ 4.28 รูปแบบ XRD ของดินฟอกสีก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ..... 98

รูปที่ 4.29 รูปแบบ XRD ของไฮโดรทัลไซต์ก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนที่ปริมาณตัวดูดซับ
 ต่างๆ..... 99

รูปที่ ฉ.1 เส้นโค้งสอเทียบของสารละลายมอลทีน 118



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันยางมะตอยถูกใช้ในการก่อสร้างถนนและปรับปรุงพื้นผิวถนนเนื่องจากยางมะตอยมีสมบัติยึดเกาะ (adhesive property) และเป็นตัวประสาน (binder) ที่ดี ยางมะตอยสามารถพบได้ตามธรรมชาติในรูปของแร่ asphaltite หินแอสฟัลท์ (rock asphalt) และทรายน้ำมัน (tar sand) ต่อมาจึงมีการพัฒนาการผลิตยางมะตอยมาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ โดยทั่วไปองค์ประกอบของยางมะตอยสามารถแบ่งเป็น 4 ส่วน ตามการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SARA analysis (S: Saturates, A: Aromatics, R: Resins, A: Asphaltenes) ซึ่งในยางมะตอยจะพบปริมาณแอสฟัลท์ที่สูงกว่าผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมอื่นๆ โดยแอสฟัลท์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทพอลิไซคลิกแอโรแมติก (polycyclic aromatic hydrocarbons) ที่มีมวลโมเลกุลสูงและมีโลหะหนัก รวมทั้งมีไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ปนอยู่ด้วยทำให้แอสฟัลท์มีสภาพขี้ผึ้ง ซึ่งแอสฟัลท์เป็นตัวการที่สำคัญที่ทำให้เกิดปัญหาและข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งานของยางมะตอย เนื่องจากแอสฟัลท์มีสีดำจึงทำให้สีของยางมะตอยเป็นสีดำ รวมทั้งการผลิตยางมะตอยเกรดต่างๆ จะมีการให้ความร้อนทำให้เกิดไอระเหยจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทพอลิไซคลิกแอโรแมติก เช่น แนฟทาลีน (naphthalene) ฟีนแอนทรีน (phenanthrene) และไครซีน (chrysene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง (carcinogenic) และก่อให้เกิดความผิดปกติของทารกในครรภ์ (teratogenic) นอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของแอสฟัลท์สูง แอสฟัลท์จะสามารถเกาะกลุ่มรวมกันแล้วเกิดการตกตะกอนในระหว่างการกักเก็บและการขนส่ง

การลดปริมาณแอสฟัลท์สามารถทำได้โดยการตกตะกอนแอสฟัลท์ด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีแอสฟัลท์บางส่วนเหลืออยู่ในยางมะตอยซึ่งไม่สามารถกำจัดด้วยการตกตะกอน การดูดซับเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการแยกและการทำให้บริสุทธิ์ (separation and purification) เป็นกระบวนการที่ทำงานในภาวะไม่รุนแรงและมีต้นทุนในการดำเนินงานต่ำ การเลือกใช้ตัวดูดซับที่มีสมบัติเหมาะสมสามารถเพิ่มความจำเพาะในการแยกสารที่มีขี้ผึ้งได้ ดังนั้นจึงมีความสนใจนำเทคนิคการดูดซับมาใช้ลดปริมาณแอสฟัลท์ของยางมะตอย โดยยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับสามารถลดปริมาณแอสฟัลท์และสิ่งปนเปื้อนที่มีอันตราย นอกจากนี้ยางมะตอยที่ได้จะมีสีอ่อนลงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเป็นโอกาสในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ จากยางมะตอยในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนของยางมะตอยโดยการตกตะกอนและการดูดซับ
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยที่ผ่านการลดปริมาณแอสฟัลทีนแล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ลดปริมาณแอสฟัลทีนของยางมะตอยเพื่อลดสีของยางมะตอย โดยเลือกใช้อยางมะตอยที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นเป็นสารตั้งต้นและใช้นอร์มอลเฮปเทน โทลูอีน และไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวทำละลาย ซึ่งจะศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ เช่น ชนิดของตัวทำละลาย ปริมาณตัวดูดซับ อุณหภูมิ และเวลา จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเทคนิควิเคราะห์ต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนของยางมะตอยผ่านการตกตะกอนและการดูดซับ

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการตกตะกอนและการดูดซับแอสฟัลทีนในน้ำมันดิบและยางมะตอย
2. จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัย
3. ศึกษาสภาพการละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ นอร์มอลเฮปเทน (*n*-heptane) โทลูอีน (toluene) และไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene)
4. ศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับเบนโทไนต์ ดินพอกสี และไฮโดรทัลไซต์
5. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน โดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่
 - ปริมาณตัวดูดซับ (100-300 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น)
 - ชนิดของตัวทำละลาย (นอร์มอลเฮปเทน โทลูอีน และไตรคลอโรเอทิลีน)
 - อุณหภูมิในการดูดซับ (30-50 องศาเซลเซียส)
 - เวลาในการดูดซับ (0.25-24 ชั่วโมง)

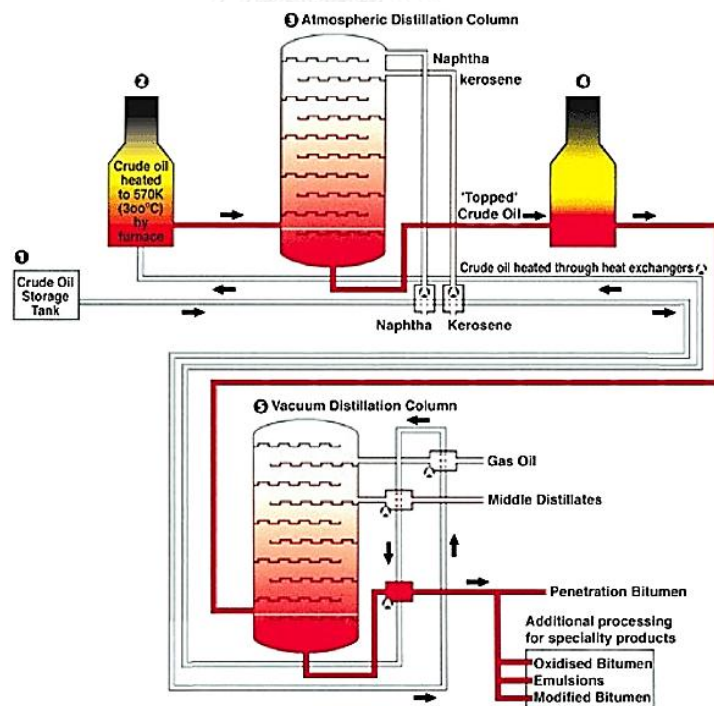
6. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเทคนิควิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่
- ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง CHNS analyzer
 - องค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีนด้วยวิธี SARA analysis
 - วัดสีด้วยเครื่อง Color checker
 - ปริมาณเถ้าด้วยเทคนิค Thermogravimetric/differential thermal analysis (TG/DTA)
 - ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง Color quest XT
 - ปริมาณไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติกด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry
7. วิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่
- โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
 - สมบัติความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเทคนิค N_2 physisorption measurement
 - ศึกษาสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางมะตอย

ยางมะตอยพบได้ตามธรรมชาติในรูปของแร่ asphaltite ซึ่งมีความบริสุทธิ์ของยางมะตอยสูง และในรูปของหินแอสฟัลท์ (rock asphalt) ทราชน้ำมัน (tar sand) ที่เรียกว่า ทะเลสาบแอสฟัลท์ (asphalt lake) ซึ่งเป็นยางมะตอยที่มีแร่นิดอื่นๆ ปะปนอยู่ แต่ยางมะตอยที่นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นยางมะตอยที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปิโตรเลียมประมาณ 25–40 เปอร์เซ็นต์ ยางมะตอยที่นำมาใช้งานอาจเป็นส่วนของกากสุญญากาศ (vacuum residue) ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบโดยตรง ที่เรียกว่า straight-run-bitumen ซึ่งมีจุดเดือดสูงกว่า 500 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ (รูปที่ 2.1) นอกจากนี้ยังได้ยางมะตอยจากการตกตะกอนกากสุญญากาศด้วยโพรเพน (propane precipitated asphalt, PPA) ที่อุณหภูมิ 25-70 องศาเซลเซียส และความดัน 120 กิโลปาสกาล ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ (by-product) ในกระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตยางมะตอยที่มาจากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ [1]

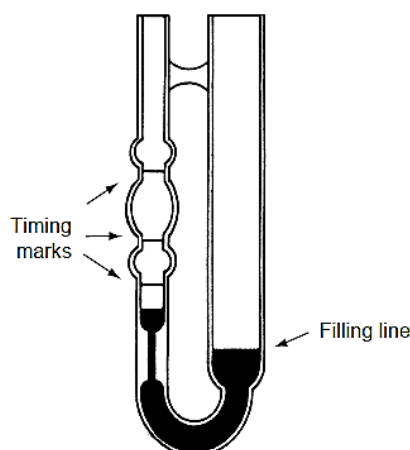
2.1.1 สมบัติของยางมะตอย

สมบัติทางกายภาพของยางมะตอย เช่น มวลโมเลกุลเฉลี่ย ความหนืด ความหนาแน่น และจุดเดือด ขึ้นอยู่กับแหล่งของน้ำมันดิบที่นำมากลั่น โดยยางมะตอยเป็นวัสดุอสัณฐาน (amorphous material) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืดหรือกึ่งของแข็ง (semi-solid) ที่อุณหภูมิห้องและมีสีดำหรือน้ำตาลเข้ม ละลายได้ดีในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ยางมะตอยมีสมบัติยึดเกาะ (adhesive property) ที่แข็งแรงและทนทานจึงใช้เป็นตัวประสาน (binder) วัสดุต่างๆ โดยไม่กระทบต่อสมบัติของวัสดุเหล่านั้น เช่น การประสานวัสดุทำพื้นถนน ยางมะตอยไม่ละลายในน้ำ (water insoluble) จึงเป็นวัสดุกันน้ำ (water-proofing material) ที่ดี มีความทนทานต่อกรด เบส และเกลือ สามารถใช้ยาแนวทางน้ำได้โดยไม่ปนเปื้อนในน้ำ นอกจากนี้ยางมะตอยมีความเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplasticity) อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง จึงประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย

2.1.2 ชนิดของยางมะตอย

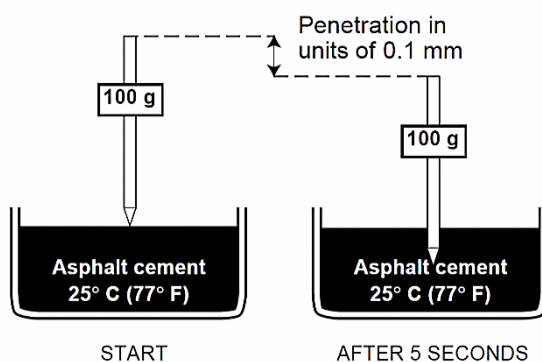
การกำหนดคุณภาพหรือชนิดของยางมะตอยเพื่อให้เหมาะสมกับการนำยางมะตอยไปใช้งานจะอาศัยสมบัติที่ได้จากการทดสอบต่างๆ ดังนี้

1. ความหนืด (viscosity) เป็นการหาความต้านทานต่อการไหลของยางมะตอย เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยจับเวลาที่ทำให้ยางมะตอยเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในหลอดแคปิลลารีด้วยปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) แสดงดังรูปที่ 2.2 ค่าที่ได้แสดงในหน่วย พอยส์ (poise)



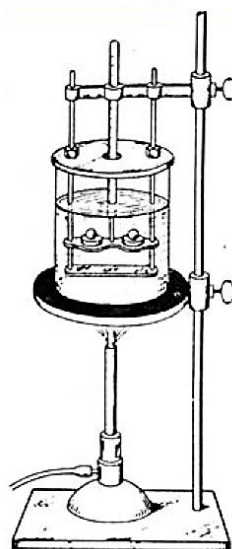
รูปที่ 2.2 การทดสอบความหนืด [2]

2. ความแข็ง (hardness) เป็นการหาความต้านทานของยางมะตอยต่อแรงกระทำภายนอก โดยใช้เข็มแทงลงไปใnyางมะตอยที่ต้องการทดสอบภายใต้สภาวะมาตรฐาน วัดความลึกของเข็มที่จิ้มลงในเนื้อยางมะตอยและแสดงค่าในหน่วย 1/10 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2.3



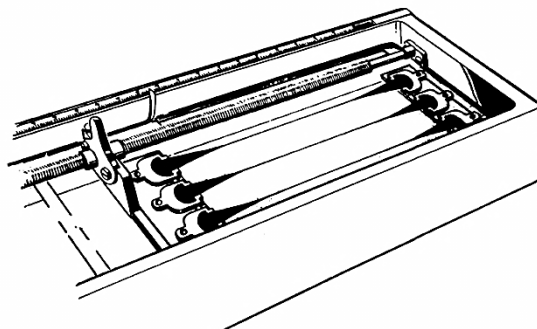
รูปที่ 2.3 การทดสอบความแข็ง [2]

3. ความอ่อนตัว (softening) เป็นการทดสอบความอ่อนตัวของยางมะตอย เมื่อได้รับความร้อน โดยใช้ลูกเหล็กที่มีน้ำหนัก 3.5 กรัม วางบนยางมะตอยที่บรรจุอยู่ในวงแหวนมาตรฐาน จากนั้นจึงให้ความร้อนที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิที่ยางมะตอยไหลออกมาจากวงแหวนจนแตะพื้นด้านล่าง เรียกว่า จุดอ่อนตัว (softening point) แสดงดังรูปที่ 2.4



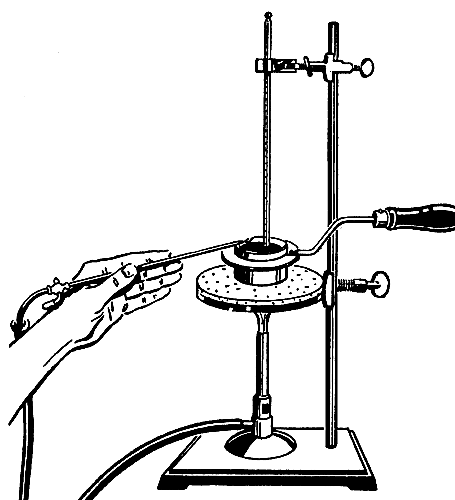
รูปที่ 2.4 การทดสอบความอ่อนตัว [3]

4. ความเหนียว (ductility) เป็นการทดสอบความเหนียวของยางมะตอย โดยการยืดยางมะตอยออกที่อัตราเร็ว 0.25 เซนติเมตรต่อวินาที วัดความยาวของยางมะตอยที่ถูกยืดออกก่อนขาดและแสดงค่าในหน่วย เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การทดสอบความเหนียว [2]

5. การละลาย (solubility) เป็นการทดสอบความบริสุทธิ์ของยางมะตอย โดยการละลายยางมะตอยในตัวทำละลาย เช่น คาร์บอนไดซัลไฟด์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ซึ่งค่าการละลายไม่ควรน้อยกว่า 99 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
6. จุดวาบไฟ (flash point) เป็นการทดสอบเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน โดยการทดสอบอุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้ยางมะตอยเกิดการจุดติดไฟ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การทดสอบจุดวาบไฟ [2]

ในปัจจุบันยางมะตอยที่มีจำหน่ายมีหลายชนิดหรือหลายเกรด โดยแบ่งตามสมบัติ และลักษณะการใช้งานของยางมะตอย ยกตัวอย่างเช่น

1. Paving grade bitumen เป็นยางมะตอยที่เป็นของเหลวหนืดหรือกึ่งของแข็งที่ อุณหภูมิห้อง เหมาะสำหรับทำพื้นถนนลาดยางและใช้ในอุตสาหกรรม มีความทนทานต่อ สภาพอากาศสูง และเป็นเกรดพื้นฐานสำหรับผลิตยางมะตอยเกรดอื่นๆ
2. Cutback bitumen เป็นยางมะตอยเหลวที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง โดย ยางมะตอยจะถูกเจือจางด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนทำให้ยางมะตอยที่ได้มีความ หนืดต่ำกว่าและใช้งานได้ง่ายกว่าแบบแรก ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามอัตราการระเหย ของตัวทำละลาย คือ
 - 1) Rapid-curing (RC) ตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวทำละลายที่ระเหยง่าย เช่น น้ำมัน เบนซิน (gasoline)
 - 2) Medium-curing (MC) ตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวทำละลายที่ระเหยปานกลาง เช่น น้ำมันก๊าด (kerosene)
 - 3) Slow-curing (SC) ตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวทำละลายที่ระเหยยาก เช่น น้ำมันดีเซล (diesel)
3. Bitumen emulsions เป็นยางมะตอยเหลวที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิห้อง โดย ยางมะตอย (30-80%) จะกระจายตัวเป็นคอลลอยด์ขนาด 5-10 ไมครอนในน้ำที่มีสาร ช่วยกระจายตัว (emulsifier agent) เช่น สารชำระล้าง (detergent) ซึ่งสารช่วย กระจายตัวจะเคลือบอนุภาคของยางมะตอยทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวที่เหมือนกันและ เกิดการผลักกัน ยางมะตอยจึงสามารถกระจายตัวในลักษณะคอลลอยด์ได้ โดยสามารถ แบ่งยางมะตอยอิมัลชันออกเป็น 2 ชนิด ตามประจุบนพื้นผิวของคอลลอยด์ คือ
 - 1) Anion emulsion สารช่วยกระจายตัวที่ใช้จะทำให้เกิดประจุลบบนพื้นผิวของ คอลลอยด์
 - 2) Cation emulsion สารช่วยกระจายตัวที่ใช้จะทำให้เกิดประจุบวกบนพื้นผิวของ คอลลอยด์

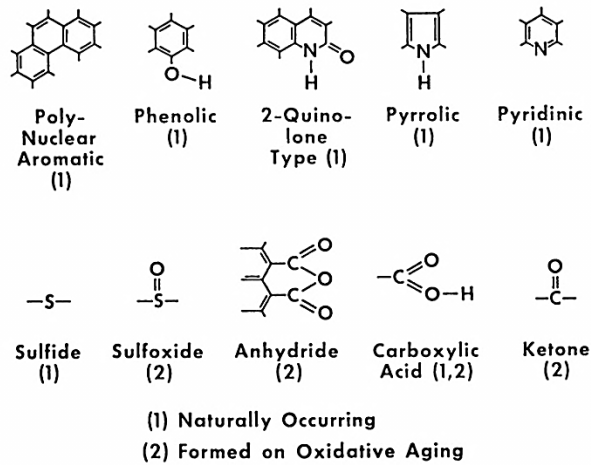
นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งประเภทของยางมะตอยอิมัลชันตามอัตราเร็วในการก่อตัวหรือการระเหยของน้ำ คือ

- 1) Rapid setting (RS) ใช้เวลาในการก่อตัวเป็นยางมะตอยเร็ว
- 2) Medium setting (MS) ใช้เวลาในการก่อตัวเป็นยางมะตอยปานกลาง
- 3) Slow setting (SS) ใช้เวลาในการก่อตัวเป็นยางมะตอยช้า
4. Polymer modified binders หรือ PMB เป็นยางมะตอยที่ผสมกับยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ เช่น ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน (styrene-butadiene-styrene rubber) พอลิบิวทาไดอีน (polybutadiene) เป็นต้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับโหลดของพื้นถนน

ยางมะตอยหลายเกรดจำเป็นต้องปรับสัดส่วนองค์ประกอบเพื่อให้เหมาะสมต่อลักษณะงานที่ใช้ บางเกรดมีการดัดแปรโครงสร้างของยางมะตอย เช่น air-brown bitumen หรือ oxidized bitumen ซึ่งทำโดยการเป่าอากาศเข้าไปใน paving grade bitumen ที่อุณหภูมิ 200-275 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง ยางมะตอยที่ได้จะมีความแข็งมากขึ้นและอ่อนตัวได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกว่าเดิม

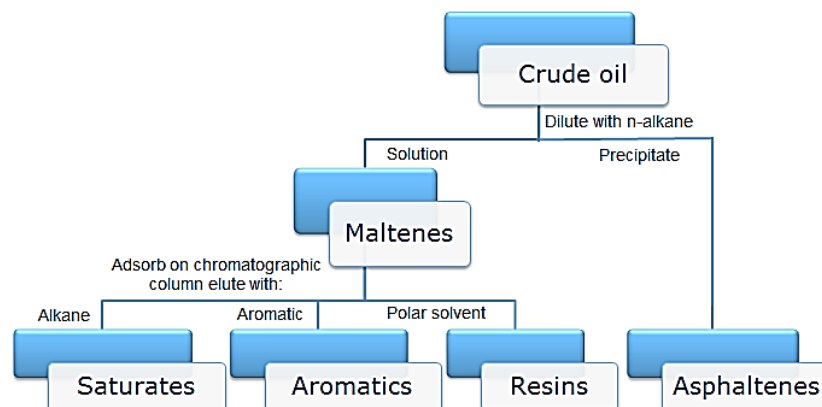
2.1.3 องค์ประกอบของยางมะตอย

ยางมะตอยเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีธาตุคาร์บอน 80-88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจน 8-12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) ประมาณ 1.5 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ระหว่างอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของโครงสร้างที่เป็นแอมโรแมติก (H/C เท่ากับ 1) กับแอลเคน (H/C เท่ากับ 2) นอกจากนี้ยังพบอะตอมของธาตุชนิดอื่นๆ เช่น ซัลเฟอร์ 0-9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไนโตรเจน 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ออกซิเจน 0-2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก วาเนเดียม 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ppm) และนิกเกิล 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยซัลเฟอร์เป็นธาตุที่มีขั้วที่พบมากที่สุดใยางมะตอย ซึ่งพบในรูปของซัลไฟด์ (sulfides) ซัลฟอกไซด์ (sulfoxides) ไทออล (thiols) และไทโอฟิน (thiophenes) ขณะที่ไนโตรเจนจะพบในรูปของไพโรลิก (pyrrolics) ไพริดีน (pyridins) และควิโนลีน (quinolines) รวมทั้งพวกที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (amphoteric species) เช่น 2-ควิโนโลน (2-quinolones) ส่วนออกซิเจนจะพบในรูปของคีโตน (ketones) ฟีนอล (phenols) และกรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acids) แสดงรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 หมู่ฟังก์ชันที่พบในยางมะตอย [1]

องค์ประกอบหลักของยางมะตอยคล้ายคลึงกับองค์ประกอบในน้ำมันดิบ ซึ่งสามารถแบ่งอย่างคร่าวเป็น 4 ส่วน คือ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซินและแอสฟัลทีน ตามโครงสร้างทางเคมี สภาพการละลาย (solubility) และความมีขั้ว (polarity) ที่แตกต่างกันของแต่ละองค์ประกอบในตัวทำละลายอินทรีย์ การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยนิยมใช้วิธี SARA analysis (S: Saturates, A: Aromatics, R: Resins, A: Asphaltenes) แสดงดังรูปที่ 2.8 แอสฟัลทีนเป็นองค์ประกอบที่มีขั้วสูงสุดจึงไม่ละลายในนอร์มอลแอลเคน (*n*-alkane) เช่น นอร์มอลเพนเทน (*n*-pentane) หรือนอร์มอลเฮปเทน (*n*-heptane) แต่ละลายได้ในโทลูอิน เบนซีน และไพริดีน ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ มีสภาพขั้วต่ำกว่าจึงสามารถละลายได้ในตัวทำละลายนอร์มอลแอลเคน เรียกส่วนนี้ว่า มอลทีน (maltenes) เมื่อนำมอลทีนไปผ่านการแยกด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟีโดยใช้ตัวทำละลายที่มีสมบัติต่างกันจะได้องค์ประกอบ 3 ส่วน คือ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก และเรซิน



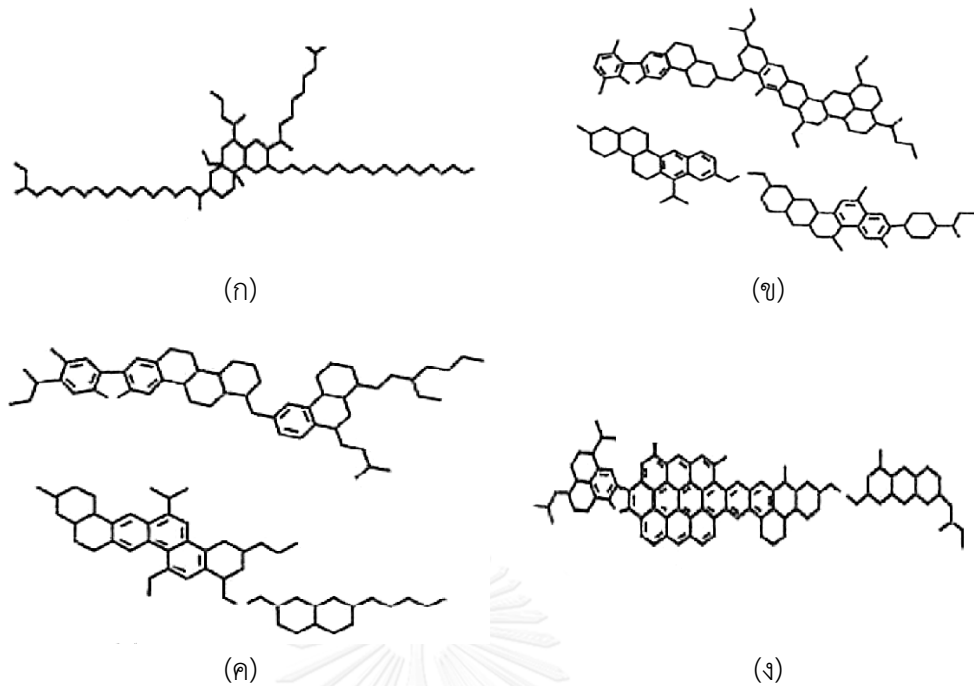
รูปที่ 2.8 หลักการของ SARA analysis ที่ใช้ในการหาองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ในน้ำมันดิบและยางมะตอย [4]

ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturates) เป็นของเหลวที่มีสีอ่อนหรือไม่มีสีที่อุณหภูมิห้อง (20 องศาเซลเซียส) มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากทั้งแบบโซ่ตรงและโซ่กิ่งแต่มีวงแอรอแมติกเพียงเล็กน้อย ทำให้มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเข้าใกล้ 2 นอกจากนี้จะมีปริมาณอะตอมของธาตุอื่น เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจนและซัลเฟอร์ต่ำ (รูปที่ 2.9 (ก)) ซึ่งในยางมะตอยจะมีไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวประมาณ 5-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 600 กรัมต่อโมล นอกจากนี้ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวมีค่าการละลาย (solubility parameter) ประมาณ 15-17 เมกะปาสคาล^{0.5}

แอรอแมติก (aromatics/naphthene aromatics) เป็นของเหลวที่มีสีเหลืองจนถึงแดงที่อุณหภูมิห้อง มีความหนืดมากกว่าไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนและวงแอรอแมติกแบบควบแน่นเล็กน้อย (รูปที่ 2.9 (ข)) ซึ่งแอรอแมติกเป็นองค์ประกอบที่พบมากในยางมะตอยประมาณ 30-45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 800 กรัมต่อโมล นอกจากนี้แอรอแมติกมีค่าการละลายประมาณ 17-18.5 เมกะปาสคาล^{0.5}

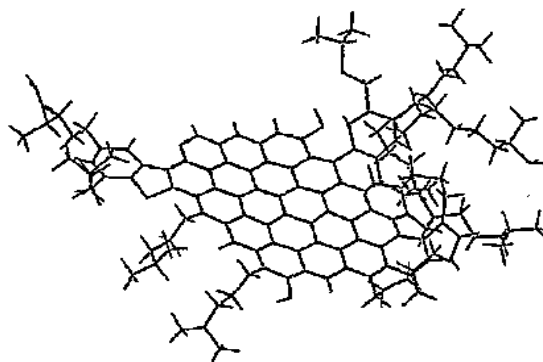
เรซิน (resin/polar aromatics) เป็นของแข็งสีดำหรือสีน้ำตาลเข้มที่อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างคล้ายกับแอสฟัลทีนแต่เรซินจะมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่สูงกว่าแอสฟัลทีนเนื่องจากระดับการควบแน่นของวงแอรอแมติกต่ำประมาณ 2-4 วง และมีสายโซ่หมู่แอลคิลที่ต่อกับวงแอรอแมติกมากกว่าทั้งในเชิงปริมาณและจำนวนอะตอมคาร์บอนต่อสาย ทำให้มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนประมาณ 1.38-1.69 นอกจากนี้เรซินจะมีปริมาณของธาตุอื่นๆ ต่ำกว่าแอสฟัลทีน (รูปที่ 2.9 (ค)) ซึ่งเรซินเป็นองค์ประกอบที่พบมากในยางมะตอยประมาณ 30-45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่นเดียวกับแอรอแมติก และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 1100 กรัมต่อโมล นอกจากนี้เรซินมีค่าการละลายประมาณ 18.5-20 เมกะปาสคาล^{0.5}

แอสฟัลทีน (asphaltene) เป็นผงสีดำที่อุณหภูมิห้อง มีโครงสร้างเป็นวงแอรอแมติกแบบควบแน่นจำนวนมากและมีปริมาณอะตอมของธาตุอื่นๆ สูง (รูปที่ 2.9 (ง)) ซึ่งแอสฟัลทีนมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 800-3500 กรัมต่อโมล และมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนประมาณ 0.98-1.56 นอกจากนี้แอสฟัลทีนมีค่าการละลายประมาณ 17.6-21.7 เมกะปาสคาล^{0.5}



รูปที่ 2.9 โมเดลโครงสร้างของ (ก) ไฮโดรคาร์บอนอิมิตัว (ข) แอโรแมติก (ค) เรซิน และ (ง) แอสฟัลทีน [5]

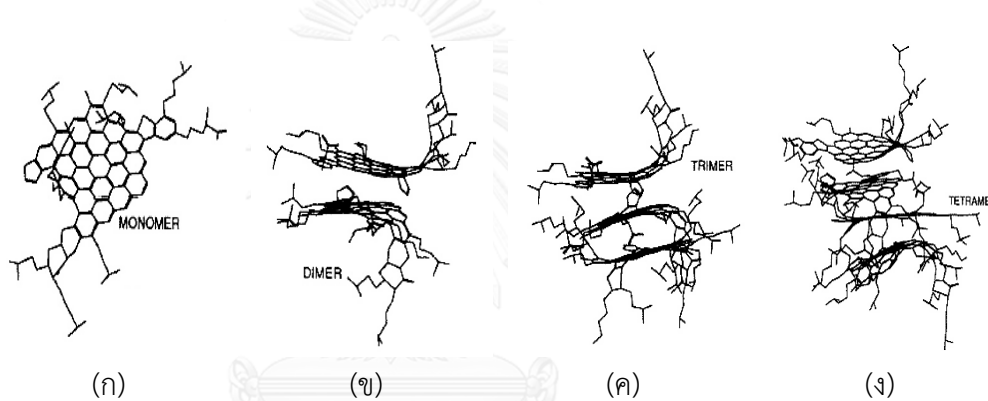
เมื่อพิจารณามวลโมเลกุลและความมีขั้วตามโครงสร้างขององค์ประกอบทั้ง 4 ส่วน พบว่า แอสฟัลทีนจะมีมวลโมเลกุลและความมีขั้วสูงกว่าเรซิน แอโรแมติก และไฮโดรคาร์บอนอิมิตัว ตามลำดับ ดังนั้นเรซินจึงทำหน้าที่สร้างเสถียรภาพ (stabilizer) ให้กับแอสฟัลทีนคอลลอยด์ (colloid) โดยโมเลกุลของเรซินจะล้อมรอบโมเลกุลของแอสฟัลทีนในรูปของไมเซลล์ (micelle) เพื่อเชื่อมระหว่างส่วนที่มีขั้ว คือ แอสฟัลทีน และส่วนที่ไม่มีขั้ว คือ ไฮโดรคาร์บอนอิมิตัว แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โมเดลโครงสร้างแอสฟัลทีนที่ถูกล้อมรอบด้วยเรซิน [6]

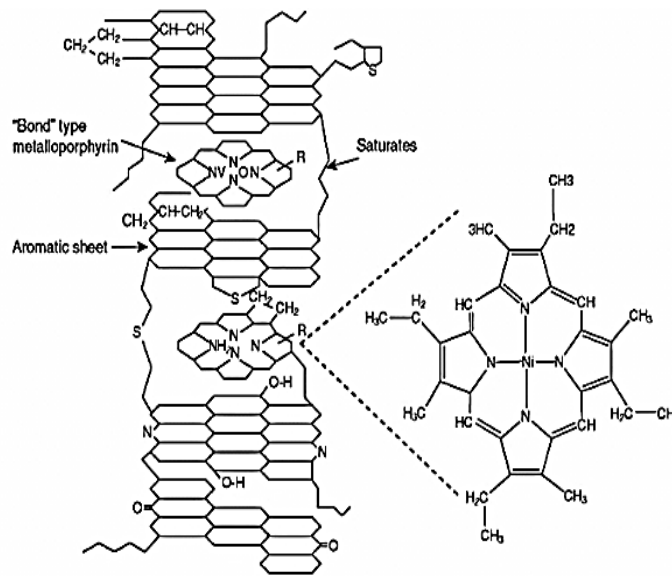
2.1.4 โครงสร้างของแอสฟัลทีน

โมเลกุลของแอสฟัลทีนประกอบด้วยแอสฟัลทีนมอนอเมอร์จำนวนมาก แอสฟัลทีนมอนอเมอร์จะมีวงแโรแมติกแบบควบแน่นจำนวน 6 ถึง 20 วง เป็นแผงขนาดใหญ่ที่เชื่อมต่อกับสายโซ่แอลคิล (alkyl side chain) ที่มีความยาว 4 ถึง 20 อะตอมคาร์บอน โดยแอสฟัลทีนมอนอเมอร์จะเกิดการจัดเรียงตัวตามแนวราบ (planar) ทำให้เกิดการเชื่อมผ่านพันธะ $\pi-\pi$ และพันธะอื่นๆ เช่น พันธะซัลไฟด์ (sulfide) อีเทอร์ (ether) สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนและวงแโรแมติก ทำให้เกิดโครงสร้างไดเมอร์ (dimer) ไตรเมอร์ (trimer) และเตตระเมอร์ (tetramer) หรือที่เรียกว่า Stacks (รูปที่ 2.11) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายแกรไฟต์ (graphite) โดยค่าการละลายของแอสฟัลทีนจะลดลงจาก 14-18 เมกะปาสคาล^{0.5} (มอนอเมอร์) เป็น 13-14 เมกะปาสคาล^{0.5} (ไตรเมอร์)



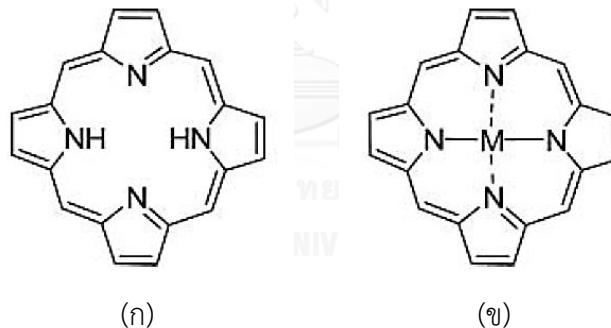
รูปที่ 2.11 โมเดลโครงสร้างของแอสฟัลทีน (ก) มอนอเมอร์ (ข) ไดเมอร์ (ค) ไตรเมอร์ และ (ง) เตตระเมอร์ [1]

ภายในช่องว่างระหว่างแผงแโรแมติกควบแน่นที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างของแอสฟัลทีนจะพบโลหะหนักที่อยู่ในรูปของสารประกอบออร์แกนโนเมทัลลิก (organometallic compounds) ที่มีพอร์ไฟริน (porphyrin) เป็นลิแกนด์ (ligand) แทรกตัวอยู่ แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โมเดลโลหะพอร์ไฟรินในโครงสร้างของแอสฟิลทิน [7]

โครงสร้างของพอร์ไฟรินประกอบด้วยวงไพโรล (pyrrole) 4 วง เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเมทิลีน (methylene) หรือมีโซคาร์บอน (meso carbons) เป็นวงขนาดใหญ่ (macrocycles) ที่มีพันธะเดี่ยวสลับคู่ (conjugate) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของพอร์ไฟริน (ก) สารประกอบเอมีน (free-base)
(ข) สารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะ (metal complex) [8]

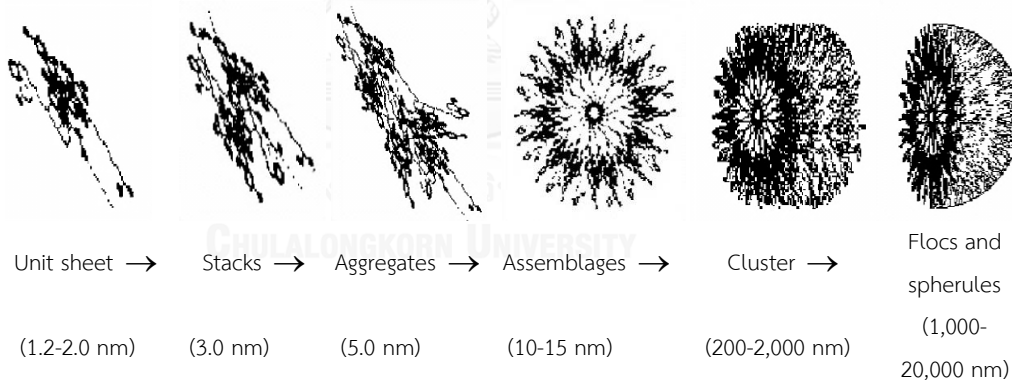
พอร์ไฟรินสามารถแสดงสมบัติทางแสงในรูปของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงยูวีและวิซิเบิล ซึ่งจะมีแถบการดูดกลืนแสงแบ่งเป็น 2 ช่วง คล้ายกับสารประกอบแอรอเมติก เช่น เบนซีน (benzene) ดังนี้

1. แถบการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 390-425 นาโนเมตร จะเรียกว่า B band หรือ Soret band ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูง
2. แถบการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 480-700 นาโนเมตร จะเรียกว่า Q band ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนแสงต่ำประมาณ 2-4 แถบ

ตำแหน่งของความยาวคลื่น จำนวนแถบ และค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงของพอร์ไฟรินขึ้นกับการแทนที่ของโลหะภายในโครงสร้างของพอร์ไฟริน และการแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันที่ตำแหน่งเบต้า-ไพโรล (β-pyrrole) และมีโซคาร์บอน ซึ่งการแทนที่ของโลหะทำให้โครงสร้างของพอร์ไฟรินเกิดสมมาตร (symmetric) โดยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของพอร์ไฟรินที่ตำแหน่ง Q band ลดลงจาก 4 เหลือ 2 แถบ นอกจากนี้การแทนที่ของโลหะยังทำให้ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง Q band (α band และ β band) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเข้มของการดูดกลืนแสงนี้จะสัมพันธ์กับชนิดของโลหะและการเกิดโคออร์ดิเนชันของโลหะ (coordination)

2.1.5 ขนาดและรูปร่างของแอสฟัลทีน

ขนาดและรูปร่างของแอสฟัลทีนขึ้นกับชนิดของตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเข้มข้นของแอสฟัลทีน เมื่อความเข้มข้นของแอสฟัลทีนมากขึ้น แอสฟัลทีนจะสามารถเกาะกลุ่มรวมกัน (aggregate) แสดงดังรูปที่ 2.14 เนื่องจากแอสฟัลทีนมีความเป็นขั้วสูงทำให้ขนาดของแอสฟัลทีนเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลทีนที่มีขนาดประมาณ 1.2-2.0 นาโนเมตร เป็นแอสฟัลทีนที่มีขนาด 1,000-20,000 นาโนเมตร



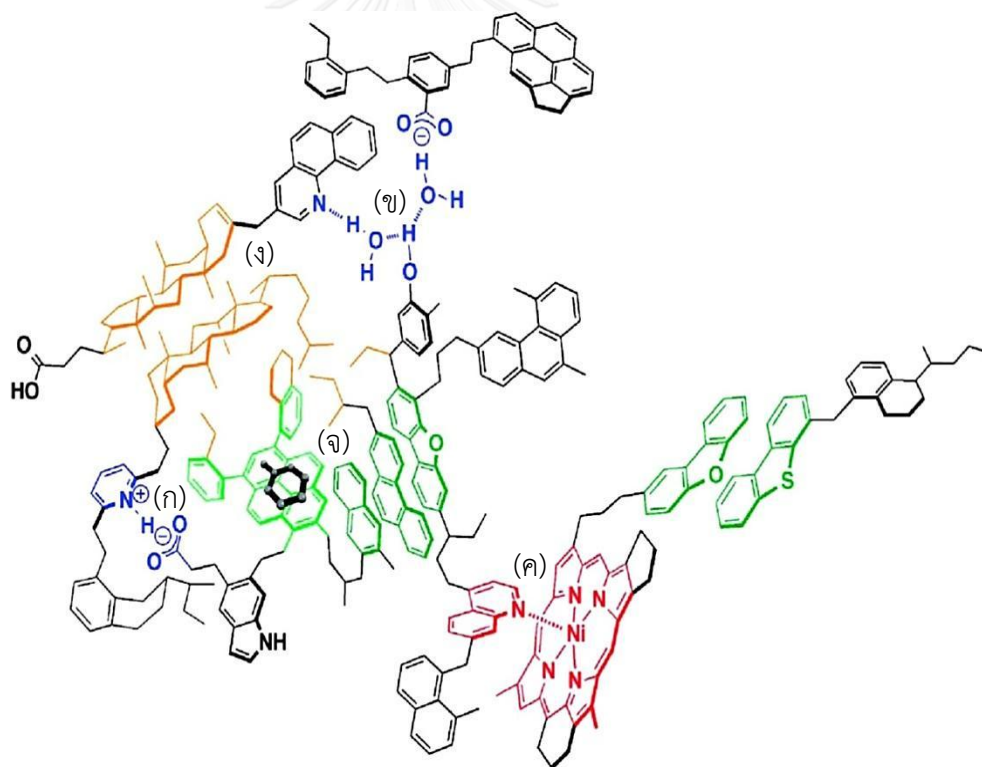
รูปที่ 2.14 โมเดลการเกาะกลุ่มรวมกันของแอสฟัลทีน [9, 10]

ขนาดของแอสฟัลทีนที่ใหญ่ขึ้นจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยา (interaction) ต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของแอสฟัลทีน แสดงดังรูปที่ 2.15 โดยแอสฟัลทีนมีโครงสร้างที่ซับซ้อนจึงทำให้เกิดอันตรกิริยาได้หลากหลาย ดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างกรดและเบส (acid-base interaction) ซึ่งเกิดจากหมู่กรดคาร์บอกซิลิกและหมู่เบส เช่น ไพโรลิก และไพริดีน ที่อยู่ภายในโครงสร้างของแอสฟัลทีน นอกจากนี้หมู่กรดและหมู่เบสยังทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding)

2. อันตรกิริยาของสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination complex) เกิดจากอะตอมของธาตุอื่น เช่น ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ที่สามารถให้อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (lone pair electron) แก่โลหะหนักที่อยู่ในโครงสร้างของพอร์ไฟริน
3. อันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) ซึ่งเกิดจากไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วหรือมีขั้วต่ำเกิดอันตรกิริยากันเอง
4. อันตรกิริยาระหว่างพันธะ $\pi-\pi$ ภายในโครงสร้างของ stacks ($\pi-\pi$ stacking) เกิดจากแผงวงแอรโรแมติกควมแน่นที่มีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ภายในโครงสร้างจึงทำให้เกิดพันธะ $\pi-\pi$ เกิดขึ้น

แม้ว่าอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของแอสฟัลทีนจะค่อนข้างอ่อน แต่การรวมกันของอันตรกิริยาเหล่านี้สามารถทำให้โมเลกุลของแอสฟัลทีนมีขนาดใหญ่ (supramolecule) ได้



รูปที่ 2.15 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของแอสฟัลทีน (ก) กรดกับเบส (ข) พันธะไฮโดรเจน (ค) สารประกอบเชิงซ้อน (ง) อันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และ (จ) อันตรกิริยาระหว่างพันธะ $\pi-\pi$ [11]

2.1.6 การดูดซับของแอสฟัลทีน

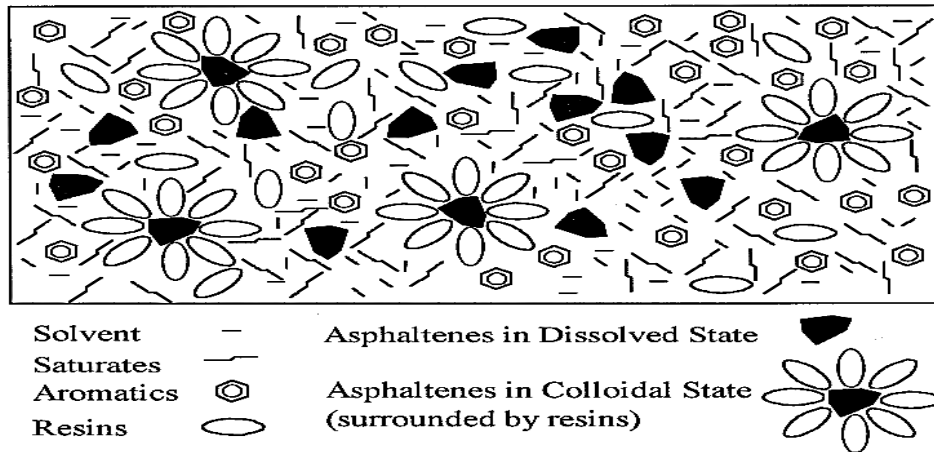
ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบมักพบปัญหาต่างๆ ที่มีสาเหตุมาจากแอสฟัลทีน เช่น การอุดตันในหลุมขุดเจาะ (well bore) และในท่อ (pipeline) แสดงดังรูปที่ 2.16 ซึ่งมีผลต่ออัตราการไหล (flow rate) และกำลังการผลิต (well productivity) ของน้ำมันดิบ โดยอาจรุนแรงจนถึงขั้นหยุดการผลิตชั่วคราว (well shut down) เนื่องจากแอสฟัลทีนมีขนาดโมเลกุลใหญ่และมีขั้วสูงกว่าองค์ประกอบอื่นๆ ในน้ำมันดิบจึงทำให้พื้นผิวของแอสฟัลทีนมีความว่องไวสูง (surface activity) สามารถดูดซับบนพื้นผิวของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบได้ นอกจากนี้ยังพบการดูดซับของแอสฟัลทีนบนพื้นผิวของดิน (clays) หิน (rocks) และแร่ (minerals) ซึ่งกลไกการดูดซับของแอสฟัลทีนขึ้นกับธรรมชาติของแอสฟัลทีน ความเข้มข้นของแอสฟัลทีน สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ และความสามารถในการเปียก (wettability) ของตัวดูดซับ โดยแอสฟัลทีนจะถูกดูดซับในรูพรุนและเกิดการสร้างชั้นฟิล์มเคลือบบนพื้นผิวของตัวดูดซับทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับแปรสภาพเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobization)



รูปที่ 2.16 การอุดตันของแอสฟัลทีนในท่อ [12]

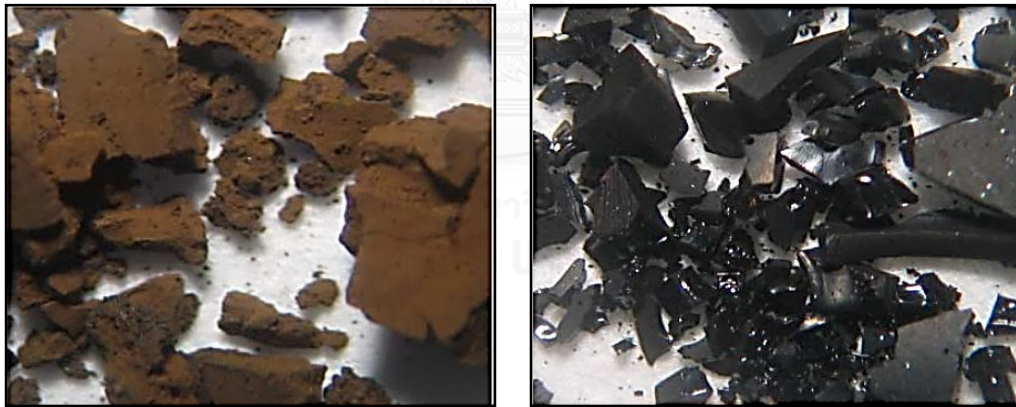
2.2 การตกตะกอนของแอสฟัลทีน

การตกตะกอนแอสฟัลทีนสามารถทำได้โดยการใช้ตัวทำละลายนอร์มอลแอลเคน โดยอาศัยสมบัติการละลายที่แตกต่างกันขององค์ประกอบทั้ง 4 ส่วนในยางมะตอย ตัวทำละลายนอร์มอลแอลเคนสามารถละลายไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก และเรซิน เมื่อเรซินที่อยู่ล้อมรอบแอสฟัลทีนถูกละลาย เสถียรภาพของไมเซลล์จะลดลงและแอสฟัลทีนจึงเกิดการตกตะกอนได้ (รูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 โมเดลผลของตัวทำละลายนอร์มอลแอลเคนต่อการละลาย
ขององค์ประกอบต่างๆ ในยางมะตอย [13]

นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายนอร์มอลแอลเคนที่ต่างชนิดจะให้สีและลักษณะของตะกอนแอสฟัลทีนที่แตกต่างกัน โดยตะกอนแอสฟัลทีนที่ได้จากการใช้นอร์มอลเพนเทนเป็นตัวทำละลายจะมีสีน้ำตาลเข้มและเหนียว (รูปที่ 2.18 (ก)) แต่เมื่อใช้นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายตะกอนแอสฟัลทีนจะมีสีดำและแข็งเปราะ (รูปที่ 2.18 (ข))



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.18 สีและลักษณะของแอสฟัลทีนที่ได้ เมื่อใช้ (ก) นอร์มอลเพนเทน
และ (ข) นอร์มอลเฮปเทน เป็นตัวทำละลาย [4]

สีและลักษณะของตะกอนแอสฟัลทีนขึ้นกับความสามารถของตัวทำละลายในการละลายแอสฟัลทีนและองค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการการละลายของฮิลเดอบราน (Hildebrand) แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\delta = \left(\frac{\Delta H^{\text{vap}} - RT}{v} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

เมื่อ δ	คือ ค่าการละลาย หน่วย เมกะปาสคาล ($\text{MPa}^{0.5}$)
ΔH^{vap}	คือ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ หน่วย จูลต่อโมล (J/mol)
R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส หน่วย ลูกบาศก์เซนติเมตร-บาร์ต่อโมล-เคลวิน ($\text{cm}^3 \text{ bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
T	คือ อุณหภูมิ หน่วย เคลวิน (K)
v	คือ ปริมาตรเชิงโมล

ค่าการละลายของตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทนจะมีค่ามากกว่าตัวทำละลายนอร์มอลเพนเทนที่อุณหภูมิเดียวกัน โดยค่าการละลายของตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทนจะมีค่าใกล้เคียงไฮโครคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก และเรซิน ดังนั้นตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทนจึงสามารถละลายเรซินที่อยู่ล้อมรอบแอสฟัลทีนได้ดีกว่าตัวทำละลายนอร์มอลเพนเทน ซึ่งสอดคล้องกับสีและลักษณะของแอสฟัลทีนที่ได้จากการใช้ตัวทำละลายนอร์มอลเพนเทนที่สามารถตกตะกอนเรซินร่วมกับแอสฟัลทีน

2.3 การดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมโมเลกุลของแก๊สหรือของเหลว เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ไว้บนพื้นผิวของอนุภาคของแข็ง เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) เมื่อมีการสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ซึ่งตัวดูดซับมักเป็นของแข็งที่มีรูพรุนจำนวนมาก พื้นผิวและปริมาตรรูพรุนสูง รูพรุนของตัวดูดซับต้องมีขนาดเหมาะสมกับขนาดโมเลกุลของสารที่ต้องการดูดซับ ตัวอย่างของตัวดูดซับที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อะลูมินากัมมันต์ (activated alumina) ซิลิกาเจล (silica gel) และโมเลคิวลาซีฟ (molecular sieves) เป็นต้น

2.3.1 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การดูดซับเชิงกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) และการดูดซับเชิงเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) ซึ่งความแตกต่างของการดูดซับทั้งสองประเภท แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับเชิงกายภาพและการดูดซับเชิงเคมี [14]

ลักษณะ	การดูดซับเชิงกายภาพ	การดูดซับเชิงเคมี
บนผิวที่ประกอบด้วยสารหลายชนิด	ค่อนข้างขึ้นกับชนิดของสาร	แปรผันตามชนิดของสาร
บนผิวระนาบต่างๆ	แทบไม่ขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของอะตอมบนผิว	แปรผันตามระนาบของผิว
สารดูดซับ	ของแข็งทุกชนิด	ของแข็งบางชนิด
สารถูกดูดซับ	แก๊สทุกชนิด	แก๊สบางชนิด โมเลกุลที่แตกตัวให้อะตอม ไอออน หรือเรดิคัล
สาเหตุการเกิด	แรงแวนเดอร์วาลส์	แรงโคเวเลนต์ แรงดึงดูดระหว่างประจุและการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน
ความร้อนของการดูดซับ ($-\Delta H_{ads}$)	5-40 kJ/mol	40-80 kJ/mol
พลังงานกระตุ้น (E_a)	มีค่าเป็นศูนย์	มีค่าน้อย
อุณหภูมิการเกิดการดูดซับ	ขึ้นกับจุดเดือดของสาร โดยปกติมีค่าต่ำ	ขึ้นกับค่า E โดยทั่วไปมีค่าสูง
ช่วงอุณหภูมิของการดูดซับ	อุณหภูมิต่ำกว่าหรือใกล้กับจุดควบแน่นของแก๊ส (เช่น Xe < 100 K, CO ₂ < 200 K)	แทบไม่จำกัด แต่การดูดซับที่ดีที่สุดเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิแคบๆ
อัตราการดูดซับ	เร็วมาก	ขึ้นกับอุณหภูมิ
ธรรมชาติของการดูดซับ	การดูดซับแบบไม่แตกตัวและผันกลับได้	การดูดซับแบบแตกตัวและอาจไม่ผันกลับ
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ	เกิดขึ้นได้เร็วและเกิดกระบวนการที่ไม่ถูกกระตุ้น	ผันแปรมาก โดยมากเกิดกระบวนการที่ถูกกระตุ้น
จำนวนชั้นของการดูดซับ	เกินหนึ่งชั้นได้	ไม่เกินหนึ่งชั้น
การประยุกต์ใช้งาน	หาพื้นที่ของผิวและขนาดของโพรง	หาความเข้มข้นของแก๊ส ศึกษาจลนพลศาสตร์ หาอัตราการดูดซับและการหลุดตัว

2.3.1.1 การดูดซับเชิงกายภาพ

การดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่เป็นของแข็งด้วยแรงอย่างอ่อนหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals) ทำให้เกิดแรงดึงดูดทางกายภาพบนพื้นผิว โดยมีระยะห่างระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเท่ากับรัศมีแวนเดอร์วาลส์ของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ ซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับเชิงกายภาพ มี 3 ชนิด คือ

1. แรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole moment) แรงดึงดูดระหว่างขั้วบวกและลบของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ เช่น การดูดซับความชื้นด้วยผลึกดูดความชื้น

2. แรงดึงดูดระหว่างประจุ (electrostatic attraction) การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างประจุบวก/ลบของตัวถูกดูดซับกับประจุบวก/ลบของตัวดูดซับ เช่น การดูดซับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ในน้ำกระด้าง
3. แรงดึงดูดของขั้วเหนี่ยวนำ (induced dipole attraction) แรงดึงดูดระหว่างขั้วเหนี่ยวนำของตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ โดยแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับความสามารถในการเกิดขั้ว (polarizability)

2.3.1.2 การดูดซับเชิงเคมี

การดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีความจำเพาะ โดยอาศัยพันธะเคมี คือ พันธะไอออนิก (ionic bonding) และพันธะโคเวเลนต์ (covalent bonding) ที่เกิดขึ้นระหว่างตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับมีอิเล็กตรอนอิสระหรืออาจขาดอิเล็กตรอนทำให้สามารถดูดซับตัวถูกดูดซับได้และเกิดการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (rearrangement) ซึ่งการดูดซับเชิงเคมีจะมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับเชิงกายภาพ

2.3.2 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

การดูดซับบนพื้นผิวของแข็งเป็นกระบวนการที่ประกอบด้วย 2 ระบบ คือ สารละลายตัวอย่างที่เป็นของเหลว และตัวดูดซับที่เป็นของแข็ง โดยสมการที่นิยมใช้ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ (adsorption kinetics) คือ สมการอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order equation) และสมการอันดับสองเทียม (pseudo-second order equation)

- 1 สมการอันดับหนึ่งเทียม เป็นสมการทางจลนพลศาสตร์ทั่วไป โดยอัตราเร็วของการดูดซับขึ้นกับความจุการดูดซับ แสดงดังสมการที่ (2.2)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (2.2)$$

เมื่อ q_t คือ ปริมาณสารตัวอย่างที่ถูกดูดซับไปหรือความจุการดูดซับ (adsorption capacity) ณ เวลาใดๆ หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)

q_e คือ ความจุการดูดซับที่สมดุล หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)

k_1 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (min^{-1})

สมการที่ 2.2 ถูกอินทิเกรต จาก $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ แล้วจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = a + bx$ จะได้ความชัน คือ k_1 และจุดตัดแกน y คือ $\ln q_e$ แสดงดังสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\ln\left(\frac{q_e}{q_e - q_t}\right) = k_1 t \quad (2.3)$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (2.4)$$

2 สมการอันดับสองเทียม เป็นสมการทางจลนพลศาสตร์ทั่วไปอีกสมการหนึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดซับของของแข็งกับของเหลว ซึ่งอธิบายเกี่ยวกับการดูดซับเชิงเคมีที่มีการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกันระหว่างตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ แสดงดังสมการที่ (2.5) และสามารถจัดเรียงสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ (2.6)

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (2.5)$$

$$\frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} = k_2 dt \quad (2.6)$$

เมื่อ k_2 คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ หน่วย กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)

สมการที่ 2.6 ถูกอินทิเกรต จาก $t = 0$ ถึง $t = t$ และ $q_t = 0$ ถึง $q_t = q_t$ แล้วจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = a + bx$ จะได้ความชัน คือ $1/q_e$ และจุดตัดแกน y คือ $1/k_2 q_e^2$ แสดงดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_2 t \quad (2.7)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.8)$$

อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (h) เมื่อ q_t/t เข้าใกล้ศูนย์ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$h = k_2 q_e^2 \quad (2.9)$$

เมื่อ h คือ อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที่ ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$)

2.3.3 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ

ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (adsorption isotherms) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุการดูดซับกับความเข้มข้นที่สมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยมีสมมติฐานว่า “การดูดซับเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ โดยตัวถูกดูดซับไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งในช่วงของการดูดซับหรือการคายซับ” ดังนั้นกลไกการดูดซับจึงสามารถอธิบายด้วยไอโซเทิร์มของการดูดซับได้ โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสมการที่นิยมใช้ คือ สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม (Langmuir adsorption isotherm) และสมการฟรุนด์ลิชไอโซเทิร์ม (Freundlich adsorption isotherm)

1. สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม เป็นไอโซเทิร์มที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะเป็นสมการที่มีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน และเป็นพื้นฐานของไอโซเทิร์มอื่นๆ โดยเป็นการดูดซับที่เกิดจากโมเลกุลหรืออะตอมของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีพื้นผิวสม่ำเสมออย่างสมบูรณ์และตำแหน่งการดูดซับ (adsorption site) สามารถดูดซับสารได้เพียงหนึ่งโมเลกุลหรืออะตอม ซึ่งแต่ละโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะมีโอกาสในการถูกดูดซับเท่าๆ กันและไม่เกิดอันตรกิริยา (interaction) ต่อกัน สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม แสดงดังสมการที่ (2.10)

$$q_e = q_m \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.10)$$

สมการที่ 2.10 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = a + bx$ จะได้ความชันคือ $1/q_m K_L$ และจุดตัดแกน y คือ $1/q_m$ แสดงดังสมการที่ (2.11)

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L C_e} \quad (2.11)$$

เมื่อ q_e คือ ความจุการดูดซับที่สมดุล หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
 C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/L)

K_L	คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ หน่วย ลิตรต่อมิลลิกรัม (L/mg)
q_m	คือ ความจุการดูดซับแบบชั้นเดียว หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)

นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการใช้สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม คือ พลังงานของการดูดซับไม่ขึ้นกับปริมาณการปกคลุมพื้นผิว (surface coverage) แรงที่ใช้ในการดูดซับเป็นแรงดึงดูดอ่อนๆ ทำให้สามารถเกิดการผันกลับได้ (reversible) และการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับจะเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น

2. สมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม เป็นการดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีลักษณะขรุขระ ซึ่งสมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม แสดงดังสมการที่ (2.12)

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2.12)$$

เมื่อ	K_F	คือ ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช หน่วย ลิตรต่อกรัม (L/g)
	$1/n$	คือ ค่าที่แสดงความเข้มของการดูดซับ

สมการที่ 2.12 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง $y = a + bx$ โดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ จะได้ความชัน คือ $1/n$ และจุดตัดแกน y คือ $\log K_F$ แสดงดังสมการที่ (2.13)

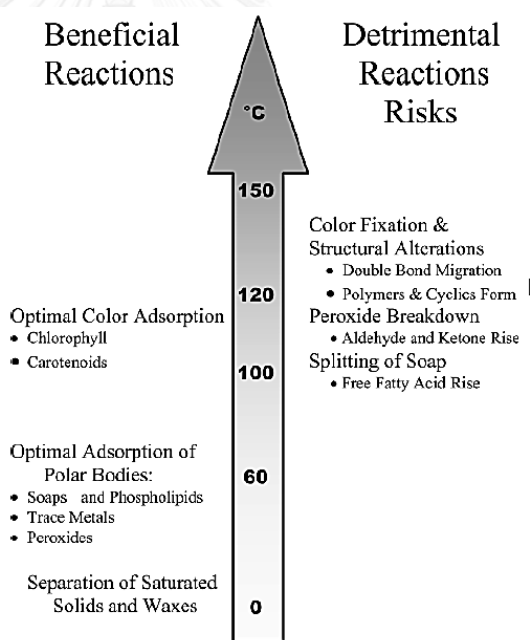
$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.13)$$

ถ้าค่า $1/n$ เท่ากับ 1 แสดงถึงไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง ค่า $1/n$ มากกว่า 1 แสดงถึงพื้นผิวของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับมีปริมาณมาก และ $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงถึงพื้นผิวของตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับมีปริมาณจำกัด ซึ่งทำให้เกิดการผลัดกันของตัวถูกดูดซับในตำแหน่งของการดูดซับที่ใกล้เคียงกัน

2.3.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับ

1. ตัวดูดซับ (adsorbent) ความจุการดูดซับขึ้นกับสมบัติต่างๆ ของตัวดูดซับ เช่น พื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ความหนาแน่น (density) สภาพกรด-เบส (pH) ความชื้น (moisture) และขนาดอนุภาค (particle size)

2. ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ความจุการดูดซับขึ้นสมบัติของตัวถูกดูดซับ เช่น ขนาดโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการละลาย เป็นต้น
3. เวลา (time) เวลาที่ใช้ในการดูดซับส่งผลต่อความจุการดูดซับ แต่ไม่มีความสัมพันธ์โดยตรง เนื่องจากเวลาที่มีผลต่อความจุการดูดซับในช่วงแรกเท่านั้น เมื่อเวลามากขึ้นจนเลยช่วงนี้ไป เวลาจะไม่มีผลต่อความจุการดูดซับ
4. อุณหภูมิ (temperature) อุณหภูมิมีผลโดยตรงกับอัตราเร็วของการดูดซับ โดยที่อุณหภูมิต่ำจะสามารถดูดซับสารได้ดี ขณะที่อุณหภูมิสูงอาจเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reactions) เช่น เปอร์ออกซิเดชัน (peroxidation) และไฮโดรไลซิส (hydrolysis) นอกจากนี้ยังอาจเกิดการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (structural alterations) เช่น การย้ายตำแหน่งของพันธะคู่ (migration of double bonds) การเกิดโมเลกุลขนาดใหญ่ (polymerization) การเกิดวง (cyclization) และการสลายตัว (decomposition) แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลของอุณหภูมิต่อความจุการดูดซับ [15]

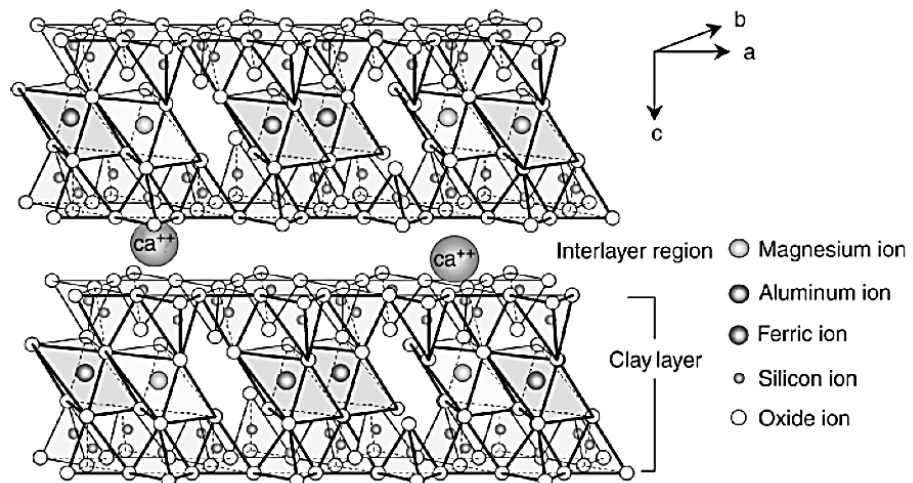
2.3.5 ตัวดูดซับที่ใช้ในการวิจัย

2.3.5.1 เบนโทไนต์

เบนโทไนต์ (bentonite) สามารถพบได้ตามธรรมชาติในทุกทวีป ยกเว้นทวีปแอนตาร์กติกา (antartica) โดยเบนโทไนต์เกิดจากแก้วภูเขาไฟ (volcanic glasses) เมื่อภูเขาไฟเกิดการปะทุขึ้น แก้วภูเขาไฟจะตกลงไปในน้ำทะเลหรือทะเลสาบที่มีความ

เป็นด่าง (alkaline) เล็กน้อย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากแก้วภูเขาไฟไปเป็นแร่มอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) นอกจากนี้ยังพบธาตุแมกนีเซียม (magnesium) ในน้ำที่ใช้ในการสร้างแร่มอนต์มอริลโลไนต์อีกด้วย

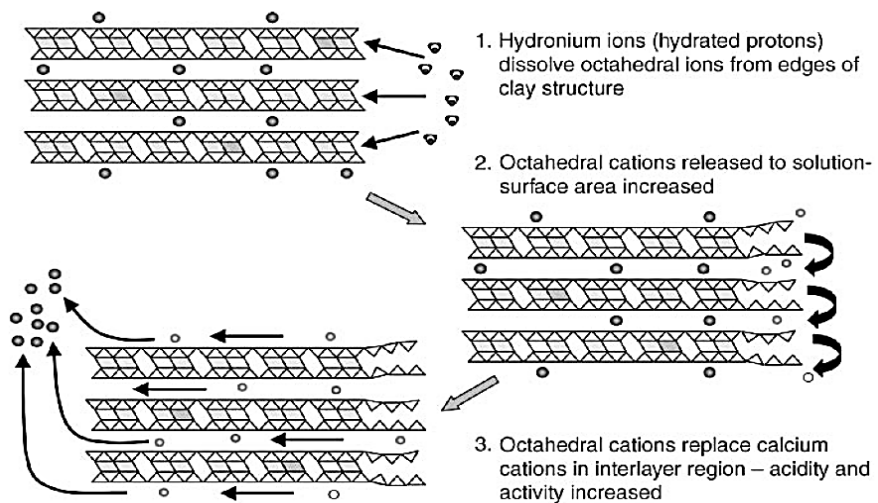
องค์ประกอบหลักของเบนโทไนต์ คือ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ ที่มีโครงสร้างเป็นแผ่นเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น แบบ 2:1 คือ แผ่นทรงแปดหน้าของอะลูมินา (alumina octahedral sheet) อยู่ระหว่างแผ่นทรงสี่หน้าของซิลิกา (silica tetrahedral sheet) โดยเชื่อมผ่านพันธะออกไซด์ (oxide bonds) ซึ่งแผ่นทรงแปดหน้าของอะลูมินาอาจมีธาตุอื่นๆ เช่น แมกนีเซียม เหล็ก (ferric oxide) ปนอยู่ด้วย ทำให้ออกไซด์ไอออนบางส่วนในแผ่นทรงแปดหน้ามีประจุเป็นลบ เนื่องจากแมกนีเซียม ไอออนและเฟอร์รัสไอออน (ferrous ion) มีประจุบวก 2 แต่อะลูมิเนียมไอออนและเฟอร์ริกไอออน (ferric ion) มีประจุบวก 3 ดังนั้นพื้นผิวของแร่มอนต์มอริลโลไนต์จึงเป็นประจุลบ ในกรณีของแคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์ แคลเซียมจะทำหน้าที่เป็นตัวคูลประจุกับประจุลบในระหว่างชั้นของแร่มอนต์มอริลโลไนต์ ทำให้ประจุรวมทั้งหมดของแร่มอนต์มอริลโลไนต์เป็นกลาง แสดงดังรูปที่ 2.20 นอกจากนี้ที่กำลังขยาย 1-2 ไมโครเมตร ภาพตัดขวางของแร่มอนต์มอริลโลไนต์จะมีลักษณะเป็นแผ่น (corn flake) และประกอบด้วยชั้นประมาณ 7-14 ชั้น เรียงซ้อนกัน



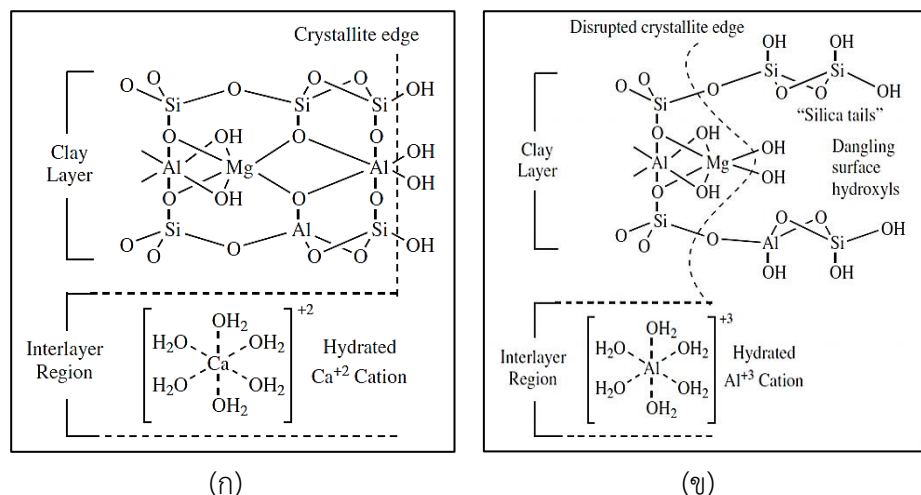
รูปที่ 2.20 โครงสร้างสามมิติของเบนโทไนต์ [15]

เบนโทไนต์ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันอย่างกว้างขวางเพื่อดูดซับสารที่ทำให้เกิดสีน้ำตาลในน้ำมัน การปรับปรุงสมบัติของเบนโทไนต์สามารถทำได้โดยการล้างเบนโทไนต์ด้วยกรดอินทรีย์ เช่น กรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเบนโทไนต์

จะถูกปั่นกวกับสารละลายกรด เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยทั่วไปนิยมใช้ความเข้มข้นของกรดมากกว่า 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากนั้นกรอง ล้าง และบดตามขนาดที่ต้องการ เบนโทไนด์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดจะเรียกว่า ดินฟอกสี (bleaching clay/bleaching earth/ fuller's earth) ซึ่งกรดจะทำลายโครงสร้างบางส่วนของแผ่นทรงแปดหน้าของอะลูมินาทำให้ดินฟอกสีมีพื้นที่ผิวมากขึ้น นอกจากนี้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ละลายออกมาจากแผ่นทรงแปดหน้า จะเกิดการแทนที่ไฮดรอกไซด์ประจุบวกของโลหะที่ดุลประจุ เช่น โซเดียม แคลเซียม และโพแทสเซียม ทำให้มีตำแหน่งกรด (acid site) ตำแหน่งใหม่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การปรับปรุงสมบัติของเบนโทไนด์ด้วยกรด [15]



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเบนโทไนด์ (ก) ก่อน และ (ข) หลังการปรับปรุงสมบัติด้วยกรด [15]

การใช้ดินฟอกสีเป็นตัวดูดซับจะช่วยเพิ่มความจุการดูดซับมากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของดินฟอกสีมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ที่อยู่ในรูปของ Si-OH Al-OH Mg-OH และ Fe-OH เพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับก่อนการล้างเบนโทไนต์ด้วยกรด แสดงดังรูปที่ 2.22 (ก) และ (ข) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้เกิดอันตรกิริยากับอะตอมที่มีสภาพขั้วสูงได้ดี เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ผ่านการเกิดพันธะไฮโดรเจน

2.3.5.2 ไฮโดรทัลไซต์

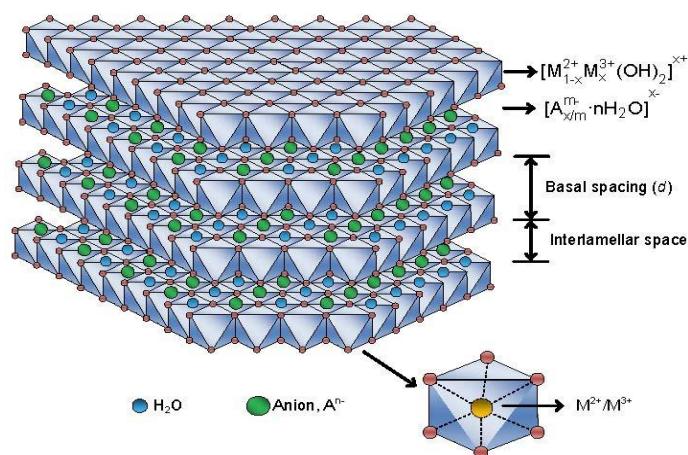
ไฮโดรทัลไซต์ (hydrotaalcite) มีโครงสร้างเป็นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (layered double hydroxide, LDH) แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทั่วไปคือ $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)_2]^{x+} (A^{m-})_{x/m} \cdot nH_2O$ โดย M^{2+} คือ โลหะที่มีประจุบวกสอง เช่น Mg^{2+} Ca^{2+} Sr^{2+} Mn^{2+} Fe^{2+} Co^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Cd^{2+} เป็นต้น

M^{3+} คือ โลหะที่มีประจุบวกสาม เช่น Al^{3+} Cr^{3+} Fe^{3+} Sc^{3+} Ga^{3+} Y^{3+} In^{3+} Ce^{3+} เป็นต้น

A^{m-} คือ ไอออนประจุลบ เช่น F^- Cl^- Br^- I^- $(ClO_4)^-$ $(NO_3)^-$ $(ClO_3)^-$ $(IO_3)^-$ OH^- $(CO_3)^{2-}$ $(SO_4)^{2-}$ $(S_2O_3)^{2-}$ $(WO_4)^{2-}$ $(CrO_4)^{2-}$ $[Fe(CN)_6]^{3-}$ $[Fe(CN)_6]^{4-}$ $[SiO(OH)_3]^-$ เป็นต้น

x คือ อัตราส่วนโดยโมลของ $M^{3+} / (M^{2+} + M^{3+})$

n คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer) ของไฮโดรทัลไซต์



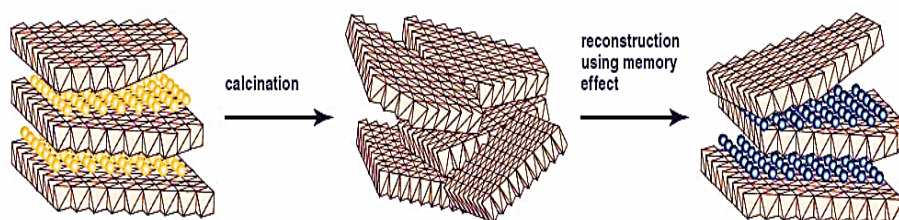
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [16]

ไฮโดรทัลไซต์สามารถพบได้ตามธรรมชาติในรูปของแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Mg-Al layered double hydroxide, Mg-Al LDH) ซึ่งมีสูตรโครงสร้าง คือ $[Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O]$ โดยโครงสร้างของไฮโดรทัลไซต์จะประกอบด้วยแผ่นทรงแปดหน้าของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ซ้อนกันเป็นชั้นๆ ที่เรียกว่า บรูไซต์ (brucite) ซึ่งแมกนีเซียมบางส่วนในชั้นบรูไซต์ถูกแทนที่ด้วยโลหะที่มีประจุบวก 3 เช่น อะลูมิเนียม (aluminium) ส่งผลให้ชั้นบรูไซต์มีสภาพประจุบวก ไอออนประจุลบ เช่น คาร์บอเนต (carbonate) ไนเตรต (nitrate) จะทำหน้าที่เป็นตัวดุลประจุอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของไฮโดรทัลไซต์เพื่อให้ประจุรวมทั้งหมดของไฮโดรทัลไซต์เป็นกลาง ไฮโดรทัลไซต์จึงถูกจัดเป็นดินเหนียวชนิดประจุลบ (anion clay) ซึ่งไอออนประจุลบของไฮโดรทัลไซต์สามารถแลกเปลี่ยนกับสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่มีประจุลบได้ นอกจากนี้ยังสามารถสังเคราะห์สารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซต์ได้ โดยการเปลี่ยนชนิดของโลหะ ชนิดของไอออนประจุลบ และอัตราส่วนโดยโมลของโลหะ ซึ่งไฮโดรทัลไซต์ที่ได้มีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป ดังสรุปในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชื่อและสูตรโครงสร้างของสารประกอบที่มีโครงสร้างคล้ายไฮโดรทัลไซต์ [17]

ชื่อ	สูตรโครงสร้าง
Hydrotalcite	$Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$
Manasseite	$Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$
Pyroaurite	$Mg_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4.5H_2O$
Sjögrenite	$Mg_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4.5H_2O$
Stichtite	$Mg_6Cr_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$
Barbertonite	$Mg_6Cr_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$
Takovite	$Ni_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot OH \cdot 4H_2O$
Reevesite	$Ni_6Fe_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$
Desautelsite	$Mg_6Mn_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$

การเผาไฮโดรทัลไซต์ก่อนการนำไปใช้งานจะทำให้ไฮโดรทัลไซต์เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและสมบัติบางประการ เช่น เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นออกไซด์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และมีขนาดผลึกเล็กมากๆ จึงทำให้ไฮโดรทัลไซต์มีพื้นที่ผิวสูงและมีสมบัติเป็นเบส นอกจากนี้เมื่อไฮโดรทัลไซต์ที่ผ่านการเผาแล้วเกิดการสัมผัสกับน้ำที่มีไอออนชนิดประจุลบจะเกิดปรากฏการณ์การจดจำรูป (memory effect) โดยไฮโดรทัลไซต์จะเกิดการคืนโครงสร้างเดิมจากออกไซด์ผสมเป็นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ แสดงดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ปรากฏการณ์การจดจำรูป [18]

จากสมบัติดังกล่าวข้างต้น จึงสามารถนำไฮโดรทัลไซต์ไปใช้งานได้หลากหลายทั้งทางด้านพอลิเมอร์ ยา และสิ่งแวดล้อม ดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดเบส (heterogeneous basic catalyst) ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) และปฏิกิริยาการเปลี่ยนสภาพ (reforming)
2. ตัวรองรับ (support) ของตัวเร่งปฏิกิริยา Zingler-Natta และ CeO_2
3. ตัวดูดซับคลอไรด์ไอออน (Cl^-) สารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ต่างๆ ในน้ำเสีย

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sanchez-Minero และคณะ [19] ศึกษาองค์ประกอบของน้ำมันดิบที่มีความถ่วงจำเพาะเอพีไอ (API gravity) แตกต่างกัน โดยอาศัยสภาพการละลายและความมีขี้ขององค์ประกอบในน้ำมันดิบที่ต่างกันตามวิธี SARA analysis แอสฟัลทีนถูกตกตะกอนจากน้ำมันดิบตามวิธี ASTM D3279 โดยใช้นอร์มอลเฮปเทน จากนั้นนำมอลทินไปแยกองค์ประกอบตามวิธี ASTM D2007 ด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟีที่มีดินเหนียวและซิลิกาเป็นตัวดูดซับ (clay-gel adsorption chromatography method) ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวถูกชะจากตัวดูดซับด้วยตัวทำละลายนอร์มอลเพนเทน ขณะที่แอโรแมติกและเรซินถูกดูดซับไว้ในชั้นของซิลิกาและดินเหนียวตามลำดับ การแยกแอโรแมติกใช้การชะละลายด้วยโทลูอีน (toluene) ส่วนของเรซินแยกออกได้ด้วยตัวทำละลายผสมของโทลูอีนกับแอซิโตน (acetone) จากการศึกษาพบว่า น้ำมันดิบที่มีความถ่วงจำเพาะเอพีไอต่ำสุด (10.3°) เป็นน้ำมันดิบชนิดหนักที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และ C7 แอสฟัลทีน เท่ากับ 20.01 11.36 36.26 และ 32.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Liu และคณะ [20] ศึกษาการเปลี่ยนด้วยความร้อน (thermal conversion) ของ pentane deoiled asphalts ที่ได้จากกากสุญญากาศของน้ำมันดิบชนิดต่างๆ การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของ deoiled asphalts ก่อนและหลังการทำปฏิกิริยาใช้วิธี modified SARA analysis โดยตกตะกอนแอสฟัลทีนจาก pentane deoiled asphalts ด้วยนอร์มอลเฮปเทน และแยกมอลทินโดยใช้คอลัมน์อะลูมินาที่มีน้ำ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก องค์ประกอบชนิดไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก และเรซิน ถูกชะด้วยตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทน เบนซีน และเบนซีนผสมเอทานอล (50/50 ปริมาตรต่อปริมาตร) ตามลำดับ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบเป็นดังนี้ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เท่ากับ 0.2-38 เปอร์เซ็นต์ แอโรแมติก เท่ากับ 11-50 เปอร์เซ็นต์ เรซิน เท่ากับ 30-81 เปอร์เซ็นต์ และ C7 แอสฟัลทีน เท่ากับ 0-21 เปอร์เซ็นต์

Alvarez และคณะ [21] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการไพโรไลซ์น้ำมันดิบหนัก (heavy crude oil) และกากบรรยากาศ (atmospheric residue) ที่มี API gravity เท่ากับ 12° และ 5.6° ตามลำดับ องค์ประกอบของน้ำมันดิบหนักและกากบรรยากาศวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟีแบบสองขั้นตอน ในขั้นแรกทำการตกตะกอนแยกแอสฟัลทีน ด้วยการเติมนอร์มอลเพนเทน จากนั้นนำสารละลายเพนเทนที่มีมอลทินละลายอยู่ไปแยกต่อด้วยคอลัมน์สองคอลัมน์ต่อเนื่องกันซึ่งภายในบรรจุดินเหนียว และอะลูมินา เรซินจะค้างอยู่ในคอลัมน์ที่บรรจุดินเหนียวซึ่งสามารถชะด้วยโทลูอีนผสมแอซิโตน (50/50 ปริมาตรต่อปริมาตร) ส่วนของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติกแยกได้จากการชะคอลัมน์ที่บรรจุอะลูมินาด้วยเพนเทนและโทลูอีน ตามลำดับ

องค์ประกอบของน้ำมันดิบหนักประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว เท่ากับ 15.8 เปอร์เซ็นต์ แอโรแมติก เท่ากับ 36.7 เปอร์เซ็นต์ เรซิน เท่ากับ 18.6 เปอร์เซ็นต์ และแอสฟัลทีน เท่ากับ 28.8 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกากบรรยากาศประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน เท่ากับ 11.7 23.7 34.3 และ 30.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Calles และคณะ [22] ศึกษาความแตกต่างของแอสฟัลทีนที่ตกตะกอนจากกากบรรยากาศด้วยนอร์มอลแอลเคนชนิดต่างๆ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการตกตะกอนทำให้การตกตะกอนของแอสฟัลทีนลดลง การใช้นอร์มอลเฮปเทนจะได้ปริมาณตะกอนแอสฟัลทีนที่ต่ำกว่าการใช้นอร์มอลเฮกเซนและนอร์มอลเพนเทน ตามลำดับ ตะกอนที่ได้จากการใช้นอร์มอลเฮปเทนมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนต่ำ ซึ่งแสดงถึงความเป็นแอโรแมติกสูง เช่นเดียวกับการเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมันเป็นการเพิ่มความเป็นแอโรแมติกของตะกอน ดังนั้นการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนจะให้ตะกอนแอสฟัลทีนที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่านอร์มอลเฮกเซนและนอร์มอลเพนเทน องค์ประกอบอื่นที่ตกตะกอนร่วมกับแอสฟัลทีนเมื่อนอร์มอลเพนเทน คือ เรซิน

López-Linares และคณะ [23] ศึกษาการดูดซับแอสฟัลทีนจากกากสุญญากาศ (vacuum residue) โดยใช้ตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น ดินเกาลิน (kaolin) ดินโซเดียม/แคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์ (Na/Ca-montmorillonite) และหินทรายแป้ง (siltstone) การวิเคราะห์ปริมาณแอสฟัลทีนที่ถูกดูดซับใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis spectrophotometry) พบว่า ดินเกาลินสามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้ในอัตราที่คงที่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ขณะที่ดินโซเดียม/แคลเซียมมอนต์มอริลโลไนต์และหินทรายแป้งมีอัตราการดูดซับแอสฟัลทีนในช่วงแรกที่สูง แต่เมื่อเวลาผ่านไป 300 นาที ดินเกาลินจะมีความจุการดูดซับแอสฟัลทีนมากที่สุด นอกจากนี้ พบว่า ความจุการดูดซับแอสฟัลทีนขึ้นกับปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของตัวดูดซับ ขณะที่พื้นที่ผิวของตัวดูดซับไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ

Li และคณะ [24] ศึกษาการลดสีของไปโอออยล์ โดยใช้เบนโทไนต์และเบนโทไนต์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) เข้มข้น 25 เปอร์เซ็นต์โดยมวล พบว่า ดินฟอกสีมีประสิทธิภาพในการลดสีของน้ำมันได้ดีกว่าเบนโทไนต์ เนื่องจากดินฟอกสีมีพื้นที่ผิวและสภาพกรดสูงกว่าดินเบนโทไนต์ ซึ่งสามารถดูดซับสารที่มีคาร์บอนิลที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated carbonyl groups) ไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติก (polycyclic aromatic hydrocarbons) ควิโนน (quinones) สารประกอบเฮเทอโรไซคลิกและไนโตรัส (heterocyclic and nitrous

compounds) ที่เกิดจากการออกซิไดซ์ ฟีนอล เครซอล (cresol) แอลคิลฟีนอล (multi-alkylphenol) แอโรแมติกเอมีน (aromatic amine) คีโตน และแอลกอฮอล์ (alcohol)

Koyuncu และคณะ [25] ศึกษาการดูดซับสารประกอบที่ทำให้เกิดสีดำน้ําแอมป์เปิ้ล โดยใช้เบนโทไนด์ที่ผ่านการให้ความร้อนและผ่านการล้างด้วยกรดเปรียบเทียบกับเบนโทไนด์เริ่มต้น พบว่า เบนโทไนด์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดมีประสิทธิภาพในการดูดซับได้ดีกว่าเบนโทไนด์ที่ผ่านการให้ความร้อนและเบนโทไนด์เริ่มต้น ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของตัวดูดซับทั้งสามชนิด พบว่า เบนโทไนด์ที่ผ่านการล้างด้วยกรดจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าเบนโทไนด์ที่ผ่านการให้ความร้อนและเบนโทไนด์เริ่มต้น ตามลำดับ ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับสารประกอบที่ทำให้เกิดสีดำน้ําแอมป์เปิ้ลขึ้นกับพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับที่เพิ่มขึ้น

Orthman และคณะ [26] ศึกษาการลดปริมาณสารอินทรีย์ประเภทสีย้อมในน้ำ โดยใช้ดินสังเคราะห์ชนิดประจุลบที่เตรียมจากแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ หรือเรียกว่า ดินไฮโดรทัลไซต์ มีสูตรทางเคมีคือ $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ พบว่า ดินไฮโดรทัลไซต์ที่มีอัตราส่วนของแมกนีเซียมต่ออะลูมิเนียม (Mg^{2+}/Al^{3+}) สูง เมื่อผ่านการเผาแล้วสามารถดูดซับสีย้อมได้ดี ซึ่งสีย้อมชนิดประจุลบถูกดูดซับได้ดีที่สุด ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ระหว่างไอออนประจุลบของสีย้อมกับไอออนประจุลบในช่องว่างระหว่างชั้น (interlayer spacing) ของดินไฮโดรทัลไซต์ นอกจากนี้ตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับนำกลับมาใช้ซ้ำได้

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัตถุประสงค์ตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษา

1. ยางมะตอยเกรด 60/70 ที่ได้จากระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่น สมบัติต่างๆ ของยางมะตอยแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของยางมะตอยที่นำมาใช้ในการศึกษา

สมบัติ	ยางมะตอยเกรด 60/70
ความแข็ง (0.1 มิลลิเมตร)	63
ความอ่อนตัว (องศาเซลเซียส)	45.4
ความหนืด (เซนติพอยส์)	
ที่อุณหภูมิ 135 องศาเซลเซียส	305.0
ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส	95.0
ความเหนียว (เซนติเมตร)	
ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	>150
การละลาย (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	
ในไตรคลอโรเอทิลีน	99.97

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาสภาพการละลายของยางมะตอย

1. นอร์มอลเฮปเทน (*n*-heptane: C_7H_{16} , HPLC grade 99 %, RCI Labscan)
2. โทลูอีน (toluene: C_7H_8 , AR grade, QRèC)
3. ไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene: C_2HCl_3 , AR grade, RANKEM)

3.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ

1. เบนโทไนต์ (bentonite)
2. ดินฟอกสี (bleaching earth)

3. แมกนีเซียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรต (magnesium nitrate hexahydrate: $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, AR grade, Sigma Aldrich)
4. อะลูมิเนียมไนเตรทโนนไฮเดรต (aluminum nitrate nonahydrate: $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, purum grade 98%, Fluka)
5. โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate: Na_2CO_3 , AR grade, Fisher Scientific)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH, Ajax Finechem)

3.1.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับ

1. คลอโรฟอร์ม (chloroform: $CHCl_3$, AR grade, RCI Labscan)
2. นอร์มอลเฮกเซน (*n*-hexane: C_6H_{14} , AR grade, RCI Labscan)
3. ไดคลอโรมีเทน (dichloroethylene: CH_2Cl_2 , AR grade, RCI Labscan)
4. เมทานอล (methanol: CH_3OH , AR grade, RCI Labscan)

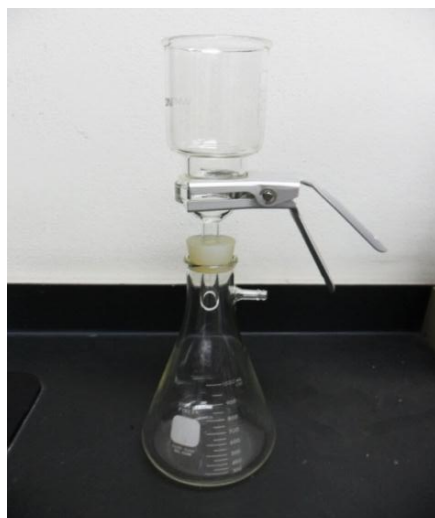
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. แท่งแก้วคนสาร (stirring rod)
2. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
3. กระจกตวง (graduated cylinder)
4. กระจกกรองใยแก้ว (glass microfiber filter) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.1) และกระจกกรอง (paper filter) เบอร์ 42
5. ชุดกรอง 2 ชุด คือ
 - 1) ชุดกรองสำหรับกระจกกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 (รูปที่ 3.1 (ก)) ประกอบด้วยภาชนะใส่สารละลายตัวอย่าง (glass filter holder) ตะแกรงสแตนเลส (stainless steel screen) ปะเก็น (gasket) ทรายกรองแก้ว (filter glass) และที่หนีบ (clamp)
 - 2) ชุดกรองสำหรับกระจกกรองเบอร์ 42 (รูปที่ 3.1 (ข)) ใช้ทรายกรองบุชเนอร์ (buchner funnel)
6. ขวดสุญญากาศ (suction flask)
7. กระจกนาฬิกา (watch glass)
8. ช้อนตักสาร (spatula)

9. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)
10. กรวยแก้ว (glass funnel)
11. ขวดระเหยสาร (evaporating flask)
12. ปีกเกอร์ (beaker)
13. กรวยหยด (dropping funnel/ addition funnel)
14. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
15. ขาตั้ง (metal stand) และที่จับ (clamp)
16. กระดาษวัดพีเอช (pH indicator)
17. หลอดหยด (pasteur pipette/ dropper)
18. หลอดฉีดยา (syringe) และตัวกรอง (syringe filter)
19. ปิเปต (pipette)
20. ชามกระเบื้อง (crucible)
21. เครื่องชั่งสาร (analytical balance)
22. เครื่องเขย่า (shaker) แบบควบคุมอุณหภูมิ (รูปที่ 3.3)
23. เครื่องกวนสารและให้ความร้อน (hot plate & stirrer)
24. ตู้อบไฟฟ้า (oven)
25. ปั๊มสุญญากาศ (aspirator vacuum pump)
26. เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace)
27. เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporator)
28. โถปลอดความชื้น (desiccator)
29. นาฬิกาจับเวลา (stopwatch)



รูปที่ 3.1 กระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.2 ชุดกรองสำหรับกระดาษกรอง (ก) ขนาด 47 มิลลิเมตร
และ (ข) ขนาด 110 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.3.1 ศึกษาสภาพการละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ นอร์มอล เฮปเทน โทลูอีน และไตรคลอโรเอทิลีน

1. ชั่งยางมะตอย 2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ละลายด้วยตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร กวนผสมด้วยเครื่องเขย่า ซึ่งควบคุมอุณหภูมิด้วยอ่างน้ำร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. อบกระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที แล้วเก็บไว้ในโถปลอดความชื้นเป็นเวลา 30 นาที

3. นำขบวนการที่มีสารละลายตัวอย่างออกจากเครื่องเขย่า ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) 10 นาที จากนั้นกรองแยกตะกอนและล้างตะกอนด้วยตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลอง
4. อบแห้งตะกอนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ชั่งน้ำหนักตะกอนแห้งที่ได้ ส่วนของของเหลวนำไประเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporator) สังเกตลักษณะขององค์ประกอบที่เหลืออยู่และชั่งน้ำหนัก

3.3.2 ศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ โดยใช้ตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์

3.3.2.1 การสังเคราะห์ไฮโดรทัลไซต์

1. เตรียมสารละลาย $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (0.75 โมล) และ $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ (0.25 โมล) ละลายรวมกันในน้ำปราศจากประจุ 250 มิลลิลิตร และเตรียมสารละลายเบส $NaOH$ (1.7 โมล) และ Na_2CO_3 (0.5 โมล) ละลายรวมกันในน้ำปราศจากประจุ 500 มิลลิลิตร
2. หยดสารละลายทั้งสองอย่างช้าๆลงในปิกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากประจุ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส และกวนอย่างแรง ตั้งทิ้งไว้ 22 ชั่วโมง
3. กรองตะกอนด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และล้างตะกอนด้วยน้ำปราศจากประจุอุ่น จนค่ากรด-เบสเป็นกลาง
4. อบตะกอนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.2 การดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับ

1. เผาเบนโทไนด์และดินฟอกสีที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ส่วนไฮโดรทัลไซต์เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
2. นำส่วนของสารละลายที่ได้จากการกรองแยกตะกอนแอสฟัลทีนในการทดลองที่ 3.3.1 มากวนผสมกับตัวดูดซับด้วยเครื่องกวนสารที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3. กรองแยกตัวดูดซับออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และล้างของแข็งที่ติดบนกระดาษกรองด้วยตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลอง
4. อบแห้งของแข็งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ชั่งน้ำหนักของแข็งแห้งที่ได้ ส่วนของของเหลวนำไประเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุน สังเกตลักษณะขององค์ประกอบที่เหลืออยู่และชั่งน้ำหนัก

3.3.2.3 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์

1. ปริมาณตัวดูดซับ (100-300 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น)

ศึกษาโดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 100 150 200 250 และ 300 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (การใช้ไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับจะศึกษาเฉพาะที่ปริมาณตัวดูดซับ 100 และ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ในนอร์มอลเฮปเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2. ชนิดของตัวทำละลาย (นอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน)

ศึกษาโดยใช้ตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน (การใช้โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวทำละลาย ในส่วนของสารละลายที่ได้จากการกรองแยกตะกอนแอสฟัลทีนในการทดลองที่ 3.3.1 จะต้องระเหยตัวทำละลายออกก่อน แล้วจึงละลายยางมะตอยที่ได้อีกครั้งด้วยตัวทำละลายที่ต้องการศึกษา 120 มิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3. อุณหภูมิในการดูดซับ (30-50 องศาเซลเซียส)

ศึกษาโดยใช้ตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในนอร์มอลเฮปเทน ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4. เวลาในการดูดซับ (0.25-24 ชั่วโมง) ในเชิงของจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ศึกษาโดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เก็บสารละลายตัวอย่างตามเวลา ดังนี้ 15 (0.25), 30 (0.5), 45 (0.75), 60 (1), 120 (2), 240 (4), 480 (8) และ 1440 (24) นาที (ชั่วโมง) แล้วกรองแยกตัวดูดซับออกด้วยตัวกรอง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร

3.3.3 ศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับ

ศึกษาความเข้มข้นสารละลายที่ได้จากการกรองแยกตะกอนแอสฟัลทีนในการทดลองที่ 3.3.1 ที่ 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 10000 12000 และ 15000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับ 3 ชนิด คือ เบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในนอร์มอลเฮปเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เก็บสารละลายตัวอย่างและกรองแยกตัวดูดซับออกด้วยตัวกรอง จากนั้นนำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร

3.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของยางมะตอยก่อนและหลังการตกตะกอนและการดูดซับ

3.4.1 เครื่อง CHNS analyzer

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ด้วยเครื่อง CHNS analyzer (รูปที่ 3.4) .เป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่มีสถานะของแข็งและของเหลวได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง โดยสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์จะบรรจุอยู่ในภาชนะที่ทำด้วยดีบุก (tin) ที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน แล้วใส่ในช่องป้อนสารตัวอย่างอัตโนมัติ (autosampler) เมื่อสารตัวอย่างถูกป้อนเข้าสู่เครื่อง CHNS analyzer สารตัวอย่างจะถูกเผาไหม้ในบรรยากาศของออกซิเจน และสลายตัวเป็นแก๊ส โดยแก๊สตัวพา (carrier gas) เช่น ไนโตรเจน ฮีเลียม จะทำหน้าที่เป็นพาแก๊สที่เกิดการเผาไหม้เข้าสู่เครื่องตรวจวัด การวิเคราะห์สารตัวอย่างต้องใช้สารมาตรฐานที่รู้เปอร์เซ็นต์

คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ที่แน่นอน โดยสารมาตรฐานที่นิยมใช้ได้แก่ แอเซทานิลได์ (acetanilide) ซีสเทอีน (Cysteine) และกรดเบนโซอิก (benzoic acid)



รูปที่ 3.4 เครื่อง CHNS analyzer ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น 2400 Series II

3.4.2 เครื่อง TLC-FID analyzer

SARA analysis เป็นการวิเคราะห์หองค์ประกอบในน้ำมันดิบและยางมะตอย โดยอาศัยความมีขั้วที่แตกต่างกันของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน การวิเคราะห์หองค์ประกอบในช่วงแรกๆ ทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D2007 ด้วยเทคนิคคอลัมน์โครมาโทกราฟีที่มีดินเหนียวและซิลิกาเป็นตัวดูดซับ และใช้ตัวทำละลายที่มีสภาพขั้วแตกต่างกัน เช่น นอร์มอลเพนเทน โทลูอีน และเอซิโตน ซะองค์ประกอบต่างๆ ออกจากตัวดูดซับทั้งสองชนิดที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์ แต่เทคนิคนี้มีข้อเสีย คือ วิธีการยุ่งยาก ใช้เวลานาน ใช้ปริมาณสารตัวอย่างและตัวทำละลายค่อนข้างมาก ต่อมาจึงมีการพัฒนาวิธีการใหม่ โดยอาศัยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบแผ่นบาง (thin-layer chromatography, TLC) ซึ่งสารตัวอย่างจะถูกจุดอยู่บนแท่งควอตซ์ (quartz) ที่มีไมโครซิลิกาหรืออะลูมินาเคลือบอยู่ จากนั้นตัวทำละลายที่มีสภาพขั้วแตกต่างกันจะเป็นตัวพาองค์ประกอบต่างๆ ขึ้นไปบนแท่งควอตซ์ ข้อดีของเทคนิคนี้ คือ ใช้ปริมาณสารตัวอย่างน้อยมาก แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีจุดเดือดต่ำ เนื่องจากสารตัวอย่างอาจเกิดการระเหยในระหว่างการให้ความร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลายออกไป ดังนั้นเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบแผ่นบางจึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่น (lubricant base oils) กากน้ำมันดิบ (residual) กากหินน้ำมัน (oil-shale bitumen) และกากน้ำมันดิน (coal-tar pitches)



รูปที่ 3.5 เครื่อง TLC-FID analyzer ยี่ห้อ IATROSCAN รุ่น MK-6S

การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบชนิดไฮโดรคาร์บอนในยางมะตอยด้วยเครื่อง TLC-FID analyzer ยี่ห้อ IATROSCAN รุ่น MK-6S (รูปที่ 3.5)

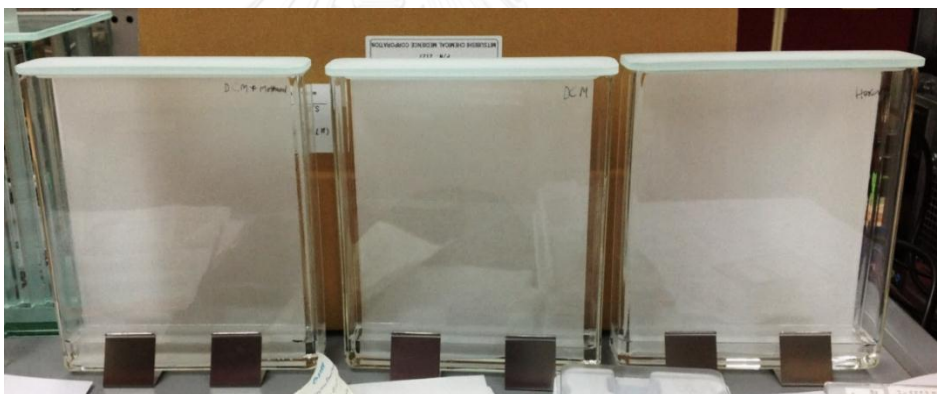
1. เปิดเครื่อง IATROSCAN
2. เปิดวาล์วแก๊สออกซิเจนและไฮโดรเจน แล้วปรับอัตราการไหลของแก๊ส เท่ากับ 2.0 ลิตร ต่อนาที และ 70 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
3. จุดเปลวไฟไฮโดรเจน (hydrogen flame) แล้วปรับอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนเป็น 160 มิลลิลิตรต่อนาที
4. ใส่แท่งควอตซ์ (รูปที่ 3.6) ลงในเครื่อง กด AUX SGN กดเลือกโหมด blank scan แล้ว กด start เพื่อเริ่มการเผาแท่งควอตซ์



รูปที่ 3.6 แท่งควอตซ์สำหรับจุดสารละลายตัวอย่าง

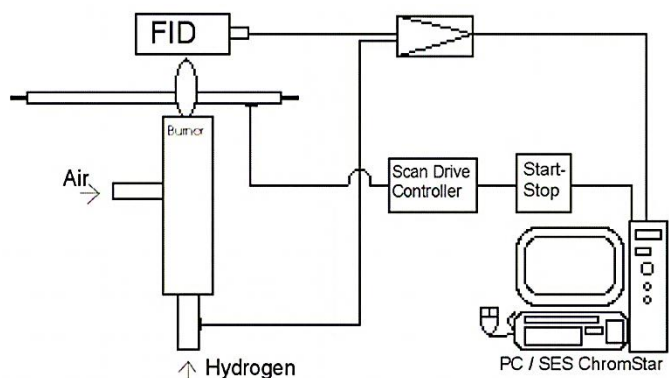
5. นำแท่งควอตซ์ออกจากเครื่อง แล้วไว้ในโถแก้ว
6. ชั่งตัวอย่างยางมะตอย 0.05 กรัม ละลายด้วยคลอโรฟอร์ม 10 มิลลิลิตร
7. กวนผสมสารละลายด้วยเครื่องเขย่าสาร (vortex) ประมาณ 1 นาที

8. ปิเปตสารละลาย 1 ไมโครลิตร ค่อยๆ จุดบนแท่งควอตซ์แท่งที่ 1 ประมาณ 5-6 ครั้ง แล้วจึงล้างปิเปตด้วยคลอโรฟอร์ม
9. ทำซ้ำข้อ 8 และ 9 จนครบ 3 แท่ง
10. แชนแท่งควอตซ์ในภาชนะที่อิมด้วยตัวทำละลาย 70 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.7) จำนวน 4 ครั้ง ดังนี้
 - ครั้งที่ 1 ใช้นอร์มอลเฮกเซนเป็นตัวทำละลาย แชนแท่งควอตซ์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 74 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และไว้ในโถแก้ว 1 นาที
 - ครั้งที่ 2 ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลาย แชนแท่งควอตซ์เป็นเวลา 10 นาที อบ 2 นาที และไว้ในโถแก้ว 1 นาที
 - ครั้งที่ 3 ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลาย แชนแท่งควอตซ์เป็นเวลา 5 นาที อบ 2 นาที และไว้ในโถแก้ว 1 นาที
 - ครั้งที่ 4 ใช้ไดคลอโรมีเทนกับเมทานอล 95:5 โดยปริมาตรเป็นตัวทำละลาย แชนแท่งควอตซ์เป็นเวลา 2 นาที อบ 2 นาที และไว้ในโถแก้ว 1 นาที



รูปที่ 3.7 ภาชนะใส่ตัวทำละลายสำหรับแชนแท่งควอตซ์

11. ใส่แท่งควอตซ์ลงในเครื่อง กดเลือกโหมด normal scan กดเลือกอัตราเร็วในการสแกน 30 วินาทีต่อแท่ง แล้วกด start เพื่อเริ่มการวิเคราะห์ โดยตัวอย่างที่อยู่บนแท่งควอตซ์ถูกเผาด้วยเปลวไฟไฮโดรเจน (รูปที่ 3.8) ทำให้เกิดการระเหยแล้วแตกตัวเป็นไอออน (ionization) ไอออนที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่เครื่องตรวจวัด (flame ionization detector, FID) และแปลผลออกมาในรูปของโครมาโทแกรม ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ (response) กับเวลา โดยสัญญาณที่ได้จะสัมพันธ์กับปริมาณคาร์บอนที่อยู่ในตัวอย่าง



รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของเครื่อง TLC-FID analyzer [27]

3.4.3 เครื่อง Thermogravimetric analyzer

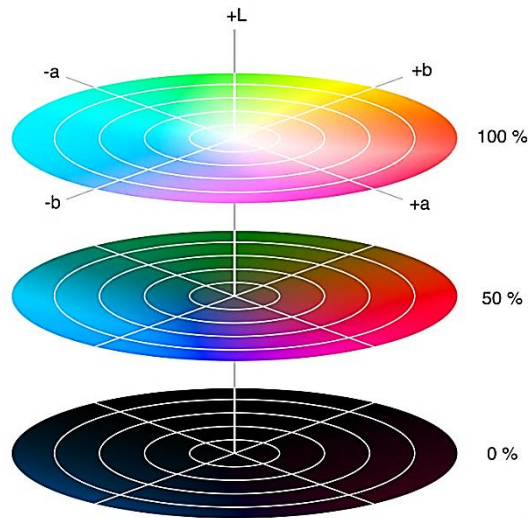
การวิเคราะห์การหาปริมาณเถ้าของยางมะตอยด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น 851e (รูปที่ 3.9) โดยซึ่งยางมะตอยประมาณ 4.0 มิลลิกรัม บนถาดตัวอย่างและทำการวิเคราะห์โดยทำการเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่ออนาที ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่ออนาที



รูปที่ 3.9 เครื่อง Thermogravimetric analyzer ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น 851e

3.4.4 เครื่อง Color checker

การวิเคราะห์สีเป็นการหาสีของตัวอย่างโดยระบุเป็นค่าสี L^* a^* b^* ตามระบบสีแบบสามมิติ ที่กำหนดมาตรฐานโดย Commission International de l'Eclairage (CIE) หรือชื่อภาษาอังกฤษว่า International Commission on Illumination เพื่อลดปัญหาการมองเห็นสีของวัตถุที่แตกต่างกัน โดยกำหนดให้แกน L^* แสดงค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) จนถึง 100 (สีขาว) แกน a^* มีค่าตั้งแต่ $-a^*$ (สีเขียว) จนถึง $+a^*$ (สีแดง) ส่วนแกน b^* มีค่าตั้งแต่ $-b^*$ (สีน้ำเงิน) จนถึง $+b^*$ (สีเหลือง) ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ระบบสีของ CIE Lab แบบสามมิติ [28]

ค่าสี L^* a^* b^* มีพื้นฐานการคำนวณมาจากระบบ X Y Z หรือค่าไตรสติมูลัส (tristimulus) ซึ่งแสดงถึง สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ แสดงดังสมการที่ (3.1) (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ

$$L^* = 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 \quad (3.1)$$

$$a^* = 500(\sqrt[3]{X/X_n} - \sqrt[3]{Y/Y_n}) \quad (3.2)$$

$$b^* = 200(\sqrt[3]{Y/Y_n} - \sqrt[3]{Z/Z_n}) \quad (3.3)$$

เมื่อ X Y และ Z คือ ค่าไตรสติมูลัส X Y Z

X_n Y_n และ Z_n คือ ค่าสีขาวในระบบไตรสติมูลัสภายใต้แหล่งกำเนิดแสงต่างๆ เช่น A หมายถึง แสงส้มจากหลอดทังสแตน C หมายถึง แสงกลางวันเฉลี่ย (average daylight) และ D65 หมายถึง แสงเที่ยงวัน (noon daylight) เป็นต้น โดย Y_n มีค่าเท่ากับ 100 เสมอ ส่วนค่า X_n and Z_n แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่า X_n และ Z_n ที่ลักษณะการมอง 2 และ 10 องศา ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงต่างๆ [29]

CIE 2 Degree Standard Observer			CIE 10 Degree Standard Observer		
Illuminant	X_n	Z_n	Illuminant	X_n	Z_n
A	109.83	35.55	A	111.16	35.19
C	98.04	118.11	C	97.30	116.14
D ₆₅	95.02	108.82	D ₆₅	94.83	107.38
F2	98.09	67.53	F2	102.13	69.37
TL 4	101.40	65.90	TL 4	103.82	66.90
UL 3000	107.99	33.91	UL 3000	111.12	35.21
D ₅₀	96.38	82.45	D ₅₀	96.72	81.45
D ₆₀	95.23	100.86	D ₆₀	95.21	99.60
D ₇₅	94.96	122.53	D ₇₅	94.45	120.70

ความแตกต่างของสีสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ (3.4)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.11 เครื่อง Color checker ยี่ห้อ NIPPON DENSHOKU รุ่น NR-11A

การวิเคราะห์สีของยางมะตอยด้วยเครื่อง Color checker ยี่ห้อ NIPPON DENSHOKU รุ่น NR-11A (รูปที่ 3.11)

1. เปิดเครื่อง Color checker
2. ทำการปรับมาตรฐานสี โดยใช้แผ่นเทียบสีดำและสีขาว
3. อดตัวอย่างยางมะตอยในตู้อบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำให้ยางมะตอยหลอมเหลว
4. เทตัวอย่างยางมะตอยที่หลอมเหลวใส่แม่พิมพ์ซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร (รูปที่ 3.12) จนเต็ม ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที เพื่อให้ยางมะตอยแข็งตัว
5. ทำการวิเคราะห์สีของยางมะตอย



รูปที่ 3.12 แม่พิมพ์ซิลิโคน

3.4.5 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer

เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis spectrophotometry) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 198-900 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนแสงของสารประกอบที่มีพันธะไพ เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติก (polycyclic aromatic hydrocarbons) ซึ่งปรากฏแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร



รูปที่ 3.13 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Jenway รุ่น 7315

การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติกในยางมะตอยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Jenway รุ่น 7315 (รูปที่ 3.13)

1. เปิดเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
2. ทำการปรับมาตรฐาน โดยการนำนอร์มอลเฮปเทนใส่ในเซลล์ (cuvette) ขนาด 10 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.14) แล้วทำการวิเคราะห์
3. ชั่งตัวอย่างยางมะตอย 10 มิลลิกรัม ในนอร์มอลเฮปเทน 20 มิลลิลิตร
4. เทสารละลายตัวอย่างใส่ในเซลล์
5. ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.14 เซลล์ขนาด 10 มิลลิเมตร

3.4.6 เครื่อง Color quest

การวิเคราะห์สีด้วยเครื่อง Color quest เป็นการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงแสงที่ตาสามารถมองเห็นเป็นสีต่างๆ ได้ โดยโครงสร้างที่มีการคอนจูเกต (conjugation) มาก เช่น พอร์ไฟริน (porphyrin) จะมีความยาวคลื่นสูงอยู่ในช่วงวิซิเบิล พอร์ไฟรินที่พบในยางมะตอยจะรูปของโลหะหนักพอร์ไฟริน เช่น วาเนเดียมพอร์ไฟริน นิกเกิลพอร์ไฟริน เป็นต้น โดยมีแถบการดูดกลืนแสงแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ แถบการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 390-425 นาโนเมตร และ 480-700 นาโนเมตร ซึ่งสีที่มองเห็นจะตรงข้ามกับสีที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ถูกดูดกลืน แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของสีที่สารดูดกลืนและสีที่ปรากฏให้เห็น [30]

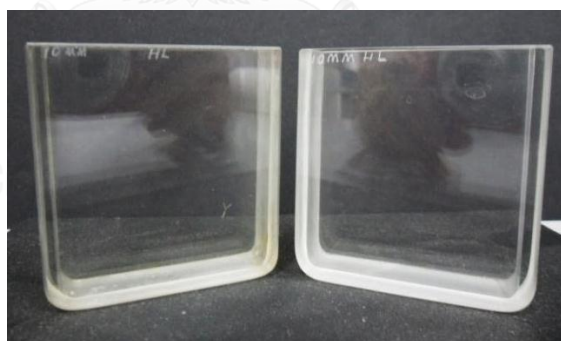
สีที่แสงถูกดูดกลืน	ความยาวคลื่นแสงที่ถูกดูดกลืน	สีที่สังเกตเห็นด้วยตา
ม่วง	400	เหลือง
น้ำเงิน	450	ส้ม
น้ำเงินอมเขียว	500	แดง
เหลืองอมเขียว	530	ม่วงแดง
เหลือง	550	ม่วง
ส้มอมแดง	600	น้ำเงินอมเขียว
แดง	700	เขียว



รูปที่ 3.15 เครื่อง Color quest ยี่ห้อ HunterLab รุ่น XT

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในยางมะตอยด้วยเครื่อง Color quest ยี่ห้อ HunterLab รุ่น XT (รูปที่ 3.15)

1. เปิดเครื่อง Color quest
2. ทำการปรับมาตรฐานสี โดยใช้แผ่นเทียบสีดำและเซลล์ขนาด 50 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.16)
3. ชั่งตัวอย่างยางมะตอย 0.03 กรัม ในโหลอื่น 30 มิลลิลิตร
4. เทสารละลายตัวอย่างใส่ในเซลล์
5. ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.16 เซลล์ขนาด 50 มิลลิเมตร

3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของตัวดูดซับ

3.5.1 เครื่อง X-ray diffractometer

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก (crystal structure) ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance (รูปที่ 3.17) ใช้รังสีเอกซ์จาก $\text{Cu K}\alpha$ radiation ด้วยความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ทำการสแกนด้วยอัตรา 1 ดีกรีต่อวินาที ตั้งแต่ 2θ เท่ากับ 5 ถึง 80 ดีกรี ที่อุณหภูมิห้อง โดยตัวดูดซับจะถูกกดลงบนแผ่นบรรจूसารตัวอย่างและเกลี่ยให้ผิวหน้าของตัวอย่างเรียบเสมอกับขอบของแผ่นบรรจุ จากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ใส่ที่แท่งวางตัวอย่างของเครื่อง



รูปที่ 3.17 เครื่อง X-ray diffractometer ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.5.2 เครื่อง Surface area and porosity analyzer

การวิเคราะห์ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับด้วยเครื่อง Surface area and porosity analyzer ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020 (รูปที่ 3.18) ใช้วัดการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียส การวิเคราะห์ใช้ตัวดูดซับที่ผ่านการเผา 0.1 กรัม โดยตัวดูดซับถูกไล่ความชื้นและสารระเหยอื่นๆ ภายใต้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำการเติมแก๊สไนโตรเจนด้วยอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่ออนาที โดยเครื่องจะวัดปริมาณแก๊สไนโตรเจนและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้คำนวณด้วยวิธีของ (Brunauer-Emmett-Teller), BET



รูปที่ 3.18 เครื่อง Surface area and porosity analyzer ยี่ห้อ Micromeritics รุ่น ASAP 2020

3.5.3 เครื่อง Scanning electron microscope

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับด้วยเครื่อง Scanning electron microscopy ยี่ห้อ JEOL รุ่น 6610LV (รูปที่ 3.19) ใช้ลำอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิด (electron gun) ยิงไปบนตัวดูดซับเพื่อให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิของตัวดูดซับหลุดออกมาและเข้าสู่ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอนเพื่อแปลงสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยตัวดูดซับที่ผ่านการเผาจะถูกโรยให้ติดบนภาชนะก่อนนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ที่มีกำลังขยาย 10,000 และ 20,000 เท่า



รูปที่ 3.19 เครื่อง Scanning electron microscopy ยี่ห้อ JEOL รุ่น 6610LV

บทที่ 4

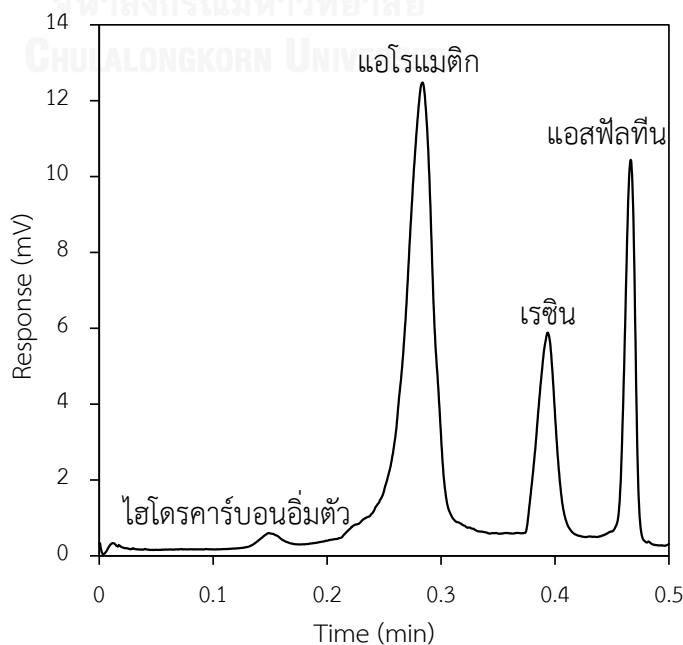
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะและองค์ประกอบของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

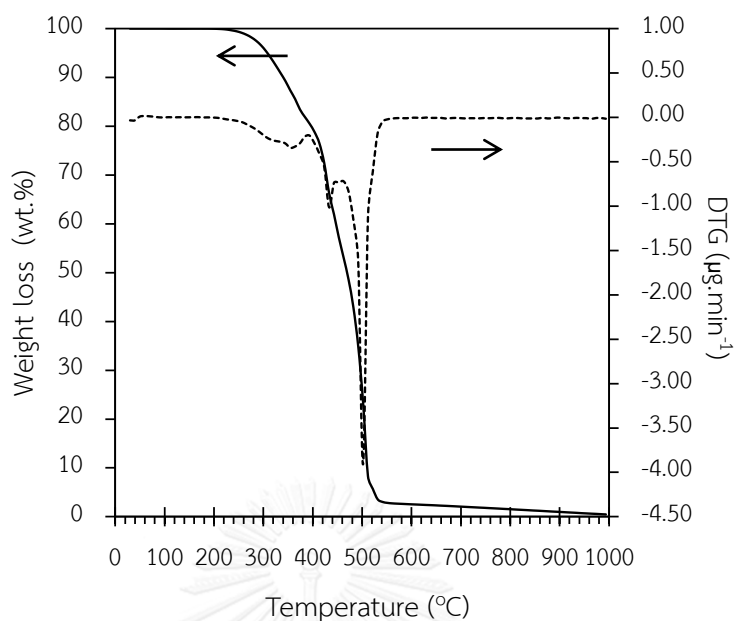
ยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำที่อุณหภูมิห้อง เมื่อวัดสีของยางมะตอยด้วยเครื่อง color checker พบว่า ยางมะตอยมีค่าสี L a* b* เท่ากับ 0.18 0.45 และ 0.31 ตามลำดับ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของยางมะตอยด้วยเครื่อง CHNS analyzer พบว่า ยางมะตอยประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ เท่ากับ 85.23 9.57 0.07 และ 4.98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยตามโครงสร้าง สภาวะการละลาย และความมีขี้ผึ้ง ด้วยวิธี SARA analysis จะได้ลักษณะของโครมาโทแกรมของยางมะตอย แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยปรากฏพีคทั้งหมด 4 พีค ซึ่งแสดงถึงองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอน อิมัตว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน ตามลำดับจากซ้ายไปขวา พบว่า ยางมะตอยมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิมัตว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน เท่ากับ 1.8 62.6 19.0 และ 16.6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 โครมาโทแกรมของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น



รูปที่ 4.2 รูปแบบการสลายตัวทางความร้อนของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

รูปที่ 4.2 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของยางมะตอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นด้วยเทคนิค TG/DTA ภายใต้บรรยากาศออกซิเจน พบว่า ยางมะตอยมีการสลายตัวทางความร้อนแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เกิดในช่วงอุณหภูมิ 280-420 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำหนักประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ช่วงที่ 2 เกิดในช่วงอุณหภูมิ 420-480 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำหนักประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และช่วงที่ 3 เกิดในช่วงอุณหภูมิ 480-520 องศาเซลเซียส สูญเสียน้ำหนักประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยางมะตอยจะมีปริมาณเถ้าเหลือน้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ การสลายตัวทางความร้อนของยางมะตอยในแต่ละช่วงไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสารชนิดใด เนื่องจากยางมะตอยมีองค์ประกอบที่หลากหลายและซับซ้อน ซึ่งอาจจะบอกราวว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ในยางมะตอยเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่

4.2 สภาพการละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลายที่ใช้ในการศึกษาสภาพการละลายของยางมะตอยมี 3 ชนิด คือ นอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การตกตะกอนในตารางที่ 4.1 พบว่า ไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอินสามารถละลายยางมะตอยได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่ายางมะตอยที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นเป็นยางมะตอยที่มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีแร่ชนิดอื่นๆ ปะปนอยู่ โดยไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอินเป็นตัวทำละลายที่มีขั้วและมีค่าไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) เท่ากับ 0.8 [31] และ 0.36 [32] เดอบาย (debye) ตามลำดับ ขณะที่นอร์มอลเฮปเทน

เป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วและมีค่าไดโพลโมเมนต์ เท่ากับ 0 เดอบาย [33] นอร์มอลเฮปเทนจึงสามารถตกตะกอนองค์ประกอบที่มีขั้วในยางมะตอยได้ 8.28 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการละลาย (solubility parameter) ของตัวทำละลายทั้งสามชนิด พบว่า นอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน มีค่าการละลาย เท่ากับ 15.20 [34] 18.3 และ 18.7 [35] เมกะปาสคาล^{0.5} ตามลำดับ ขณะที่แอสฟัลทีนมีค่าการละลายประมาณ 17.6-21.7 เมกะปาสคาล^{0.5} ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอินมากกว่านอร์มอลเฮปเทน ดังนั้นการใช้นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายจึงสามารถตกตะกอนแอสฟัลทีนในยางมะตอยได้ โดยยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนแอสฟัลทีนแล้วจะเรียกว่า มอลทิน

ตารางที่ 4.1 การละลายของยางมะตอยในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตัวทำละลาย	น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น (g)	น้ำหนักตะกอน (g)	น้ำหนักยางมะตอยที่เหลือ (g)	น้ำหนักรวม (g)	เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)
นอร์มอลเฮปเทน	2.020	0.167	1.885	2.053	8.28
โทลูอิน	2.005	0.001	2.179	2.179	0.03
ไตรคลอโรเอทิลีน	2.004	0.000	2.072	2.073	0.01

ภาวะการละลาย: อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน

สารละลายยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนในนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน จะถูกนำไปประเหยตัวทำละลายออกโดยใช้เครื่องระเหยแบบหมุน ก่อนนำยางมะตอยมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่า ไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอินทำให้ยางมะตอยมีปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณซัลเฟอร์ลดลง ซึ่งต่างจากการใช้นอร์มอลเฮปเทนที่สามารถลดปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ได้ นอกจากนี้ยางมะตอยที่ผ่านการละลายในตัวทำละลายทั้งสามชนิดจะมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงความเป็นแอโรเมติก (aromaticity) ที่ลดลง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรเมติก เรซิน และแอสฟัลทีน ในยางมะตอย พบว่า นอร์มอลเฮปเทนสามารถลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยได้ 68.7 เปอร์เซ็นต์ และยังมีปริมาณแอสฟัลทีนเหลืออยู่ในยางมะตอยอีก 5.2 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่การใช้ไตรคลอโรเอทิลีน

และโทลูอินทำให้ยางมะตอยมีปริมาณแอสฟัลทีนเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอนอิมิตัว แอโรแมติก และเรซิน ในยางมะตอย

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น

องค์ประกอบ	ยางมะตอย เริ่มต้น	การตกตะกอน		
		นอร์มอลเฮปเทน	โทลูอิน	ไตรคลอโรเอทิลีน
ชนิดธาตุ				
คาร์บอน (C)	85.23	84.66	83.88	83.42
ไฮโดรเจน (H)	9.57	9.85	9.61	9.52
ไนโตรเจน (N)	0.07	0.04	0.20	0.28
ซัลเฟอร์ (S)	4.98	4.80	4.85	4.84
อัตราส่วน H/C	1.35	1.40	1.37	1.37
ชนิดไฮโดรคาร์บอน				
ไฮโดรคาร์บอนอิมิตัว	1.8	3.5	2.5	2.7
แอโรแมติก	62.6	70.4	53.7	54.9
เรซิน	19.0	20.9	24.9	18.8
แอสฟัลทีน	16.6	5.2	18.9	23.7

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยวิธี SARA analysis: ความเข้มข้น, 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, คลอโรฟอร์ม

ภาวะการตกตะกอน: อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

4.2.2 การวิเคราะห์สีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน

การวิเคราะห์สีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น แสดงดังตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้นอร์มอลเฮปเทนทำให้ยางมะตอยมีค่าสี L^* a^* และ b^* เพิ่มขึ้น โดยค่า L^* แสดงค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) จนถึง 100 (สีขาว) ค่า a^* มีค่าตั้งแต่ $-a^*$ (สีเขียว) จนถึง $+a^*$ (สีแดง) ส่วนค่า b^* มีค่าตั้งแต่ $-b^*$ (สีน้ำเงิน) จนถึง $+b^*$ (สีเหลือง) ดังนั้นสีของยางมะตอยที่ได้มีแนวโน้มไปทางสีขาว สีแดง และสีเหลือง ตามลำดับ ขณะที่การใช้โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนทำให้ยางมะตอยมีค่าสี L^* เพิ่มขึ้น แต่ค่าสี a^* b^* ลดลง ซึ่งค่า L^* a^* และ b^* ที่ได้แสดงแนวโน้มไปทางสีขาว สีเขียว และสีเหลือง ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของยางมะตอยที่ได้เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น พบว่า ยางมะตอยที่

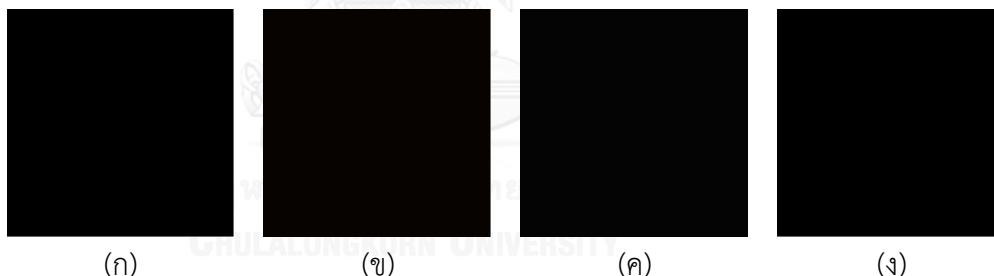
ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนมีค่าความแตกต่างของสีมากกว่าโทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น

ค่าสี	ยางมะตอยเริ่มต้น	การตกตะกอน		
		นอร์มอลเฮปเทน	โทลูอิน	ไตรคลอโรเอทิลีน
L*	0.18	0.72	0.54	0.45
a*	0.45	0.58	0.13	0.11
b*	0.31	0.66	0.21	0.20
ΔE	-	0.66	0.49	0.45

ภาวะการตกตะกอน: อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามเมื่อมองด้วยตาเปล่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวทำละลายทั้งสามชนิดไม่แตกต่างจากสีของยางมะตอยเริ่มต้น เนื่องจากยางมะตอยมีค่าสี L* ต่ำมาก (น้อยกว่า 1) จึงทำให้เห็นสีของยางมะตอยที่ได้เป็นสีดำอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.3



(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

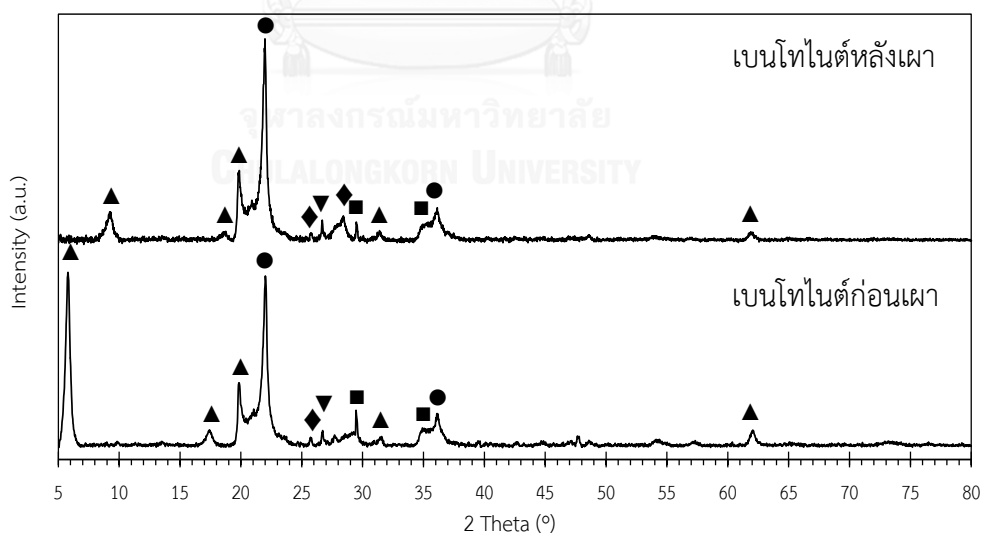
รูปที่ 4.3 สีของ (ก) ยางมะตอยเริ่มต้น และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนใน

(ข) นอร์มอลเฮปเทน (ค) โทลูอิน และ (ง) ไตรคลอโรเอทิลีน

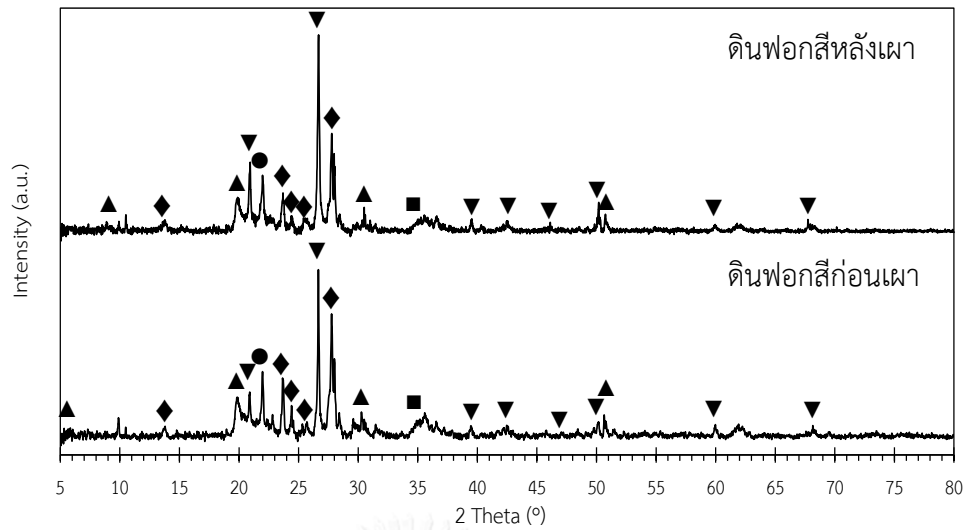
4.3 สมบัติของตัวดูดซับ

4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

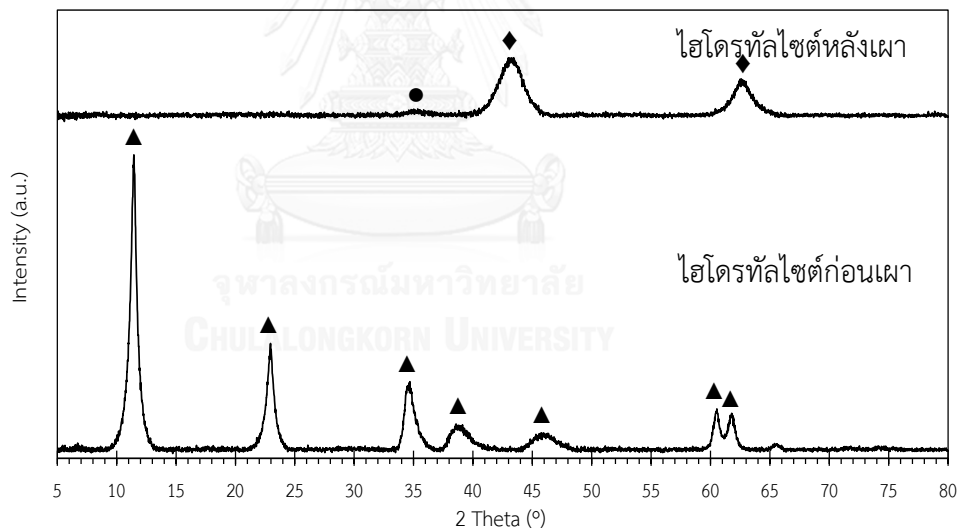
ตัวดูดซับที่ใช้ในการลดสีของยางมะตอยมี 3 ชนิด ได้แก่ เบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวดูดซับทั้งสามชนิดก่อนและหลังการเผา ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) และพบว่า เบนโทไนด์ (รูปที่ 4.4) มีโครงสร้างหลักคือมอนต์มอริลโลไนต์ นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างอื่นๆ ปะปนอยู่ เช่น คริสโตบาไลต์ (cristobalite) เฟลด์สปาร์ (feldspar) แคลไซต์ (calcite) และควอตซ์ (quartz) ดินฟอกสี (รูปที่ 4.5) มีโครงสร้างคล้ายกับเบนโทไนด์ แต่มีสัดส่วนที่แตกต่างกัน เนื่องจากดินฟอกสีเป็นตัวดูดซับที่ผ่านการล้างด้วยกรดอินทรีย์ทำให้โครงสร้างบางส่วนของอะลูมินาทรansแปรหน้าในมอนต์มอริลโลไนต์ถูกทำลาย ดังนั้นเมื่อเผาเบนโทไนด์และดินฟอกสีที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า โครงสร้างผลึกของเบนโทไนด์และดินฟอกสีเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยระนาบผลึก (001) [36] เลื่อนตำแหน่งจาก 2θ ประมาณ 5.9 เป็น 9.2 ดีกรี ซึ่งจากสมการของ Bragg's Law พบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างระนาบผลึก (d spacing, d) ลดลง จะส่งผลให้ θ เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเผาจะกำจัดโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นของโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์



รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของเบนโทไนด์ก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ = มอนต์มอริลโลไนต์, ● = คริสโตบาไลต์, ◆ = เฟลด์สปาร์, ■ = แคลไซต์, ▼ = ควอตซ์)



รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของดินพอกสีก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ = มอนต์มอริลโลไนต์, ● = คริสโตบาไลต์, ◆ = เฟลด์สปาร์, ■ = แคลไซต์, ▼ = ควอตซ์)

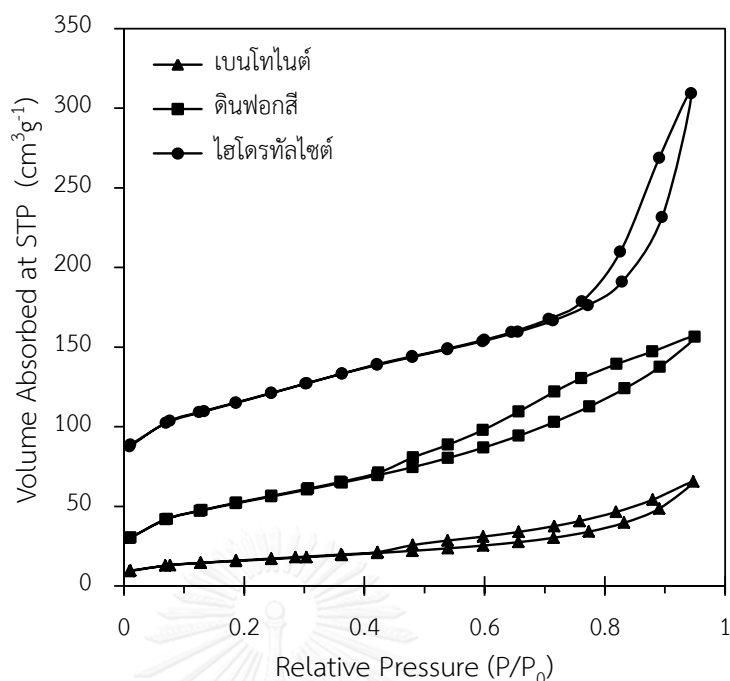


รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของไฮโดรทัลไซต์ก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง (สัญลักษณ์: ▲ = แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ● = แมกนีเซียม-อะลูมิเนียมออกไซด์ และ ◆ = แมกนีเซียมออกไซด์)

รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบ XRD ของไฮโดรทัลไซต์ก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า ไฮโดรทัลไซต์มีโครงสร้างเป็นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 11.5 22.9 34.7 39.1 45.9 60.5 และ 61.8 ดีกรี เมื่อเผาไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่า โครงสร้างผลึกของไฮโดรทัลไซต์มีการเปลี่ยนแปลงจากเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์กลายเป็นแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 35.1 ดีกรี และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) หรือเพอริเคลส (periclase) ปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 43.4 และ 62.6 ดีกรี [18]

4.3.2 การวิเคราะห์ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

การวิเคราะห์ความพรุนของตัวดูดซับเบนโทไนต์ ดินพอกสี และไฮโดรทัลไซต์ ด้วยเทคนิค N_2 physisorption measurement แสดงดังรูปที่ 4.7 จะได้ลักษณะไอโซเทิร์มของการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจน โดยไอโซเทิร์มของตัวดูดซับทั้งสามชนิดเป็นแบบที่ IV [37] ตามการแบ่งของ International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesopore) โดยไอโซเทิร์มของไฮโดรทัลไซต์แสดงปริมาณการดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่สูงกว่าดินพอกสีและเบนโทไนต์ตามลำดับ ในทุกช่วงความดันสัมพัทธ์ (relative pressure, P/P_0) เมื่อพิจารณาลักษณะของวงฮีสเทอรีซิส (hysteresis loop) ที่เกิดขึ้น พบว่า เบนโทไนต์มีความกว้างของวงฮีสเทอรีซิสแคบกว่าไฮโดรทัลไซต์และดินพอกสี ซึ่งแสดงถึงขนาดรูพรุนของเบนโทไนต์ใหญ่กว่าไฮโดรทัลไซต์และดินพอกสี นอกจากนี้ตำแหน่งการเกิดวงฮีสเทอรีซิสของไฮโดรทัลไซต์เกิดในช่วงความดันสัมพัทธ์ที่แคบกว่าเบนโทไนต์และดินพอกสี ไฮโดรทัลไซต์จึงมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนใกล้เคียงกันมากกว่าเบนโทไนต์และดินพอกสี



รูปที่ 4.7 ไอโซเทิร์มของการดูดซับและการคายแก๊สไนโตรเจนของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

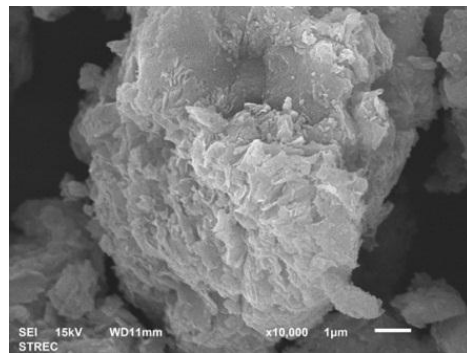
ตัวดูดซับ	พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Å)
เบนโทไนต์	53	0.08	56.9
ดินฟอกสี	178	0.21	47.8
ไฮโดรทลไฮต์	236	0.28	49.6

ตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุนเฉลี่ย และขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวดูดซับทั้งสามชนิด พบว่า เบนโทไนต์และดินฟอกสีมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 53 และ 178 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากโครงสร้างมอนต์มอริลโลไนต์บางส่วนในดินฟอกสีถูกทำลาย ทำให้ดินฟอกสีมีความเข้มพิคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 5.9 ดีกรี ต่ำ (รูปที่ 4.5 (ก่อนเผา)) ดินฟอกสีจึงมีความเป็นผลึกน้อยและมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเบนโทไนต์ ส่งผลให้ดินฟอกสีมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเบนโทไนต์ นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กยังเกิดการซ้อนทับกันทำให้เกิดรูพรุนระหว่างอนุภาค (interparticle void) โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าจะเกิดรูพรุนระหว่างอนุภาคจำนวนมากและมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นดินฟอกสีมีปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยมากกว่า แต่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าเบนโทไนต์ ขณะที่ไฮโดรทลไฮต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนเฉลี่ยสูงกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนต์ ตามลำดับ เนื่องจากไฮโดรทลไฮต์มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเบนโทไนต์และดินฟอกสี เมื่อพิจารณาขนาดรู

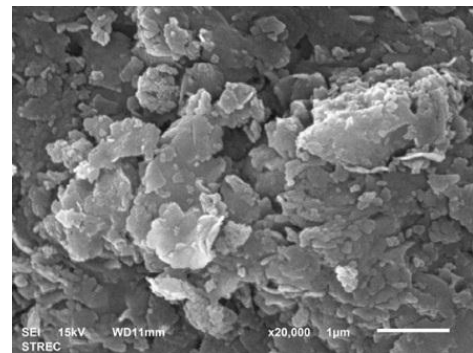
พรมเฉลี่ยของตัวดูดซับ พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีขนาดรูพรุนอยู่ในช่วงรูพรุนขนาดกลาง 20-100 อังสตรอม [37]

4.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับชนิดต่างๆ

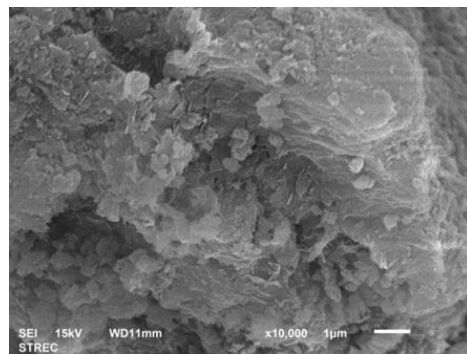
การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับเบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy ที่กำลังขยาย 10,000 x และ 20,000x เท่า พบว่า เบนโทไนต์ (รูปที่ 4.8 (ก)) และดินฟอกสี (รูปที่ 4.8 (ข)) มีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นแผ่น เรียงซ้อนทับกัน แต่ดินฟอกสีจะมีการจัดเรียงตัวเป็นแผ่นที่ไม่เด่นชัด ไม่เป็นระเบียบ และมีลักษณะเป็นปุยๆ (fluffy) [38, 39] เนื่องจากกรดจะทำลายโครงสร้างบางส่วนของ อะลูมินาตรงแปดหน้าในมอนต์มอริลโลไนต์ทำให้เหลือแผ่นซิลิกาอสัณฐานไฮเดรต (hydrated amorphous silica sheet) อยู่ภายในโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์เพียงชั้นเดียว (single-layered silica sheets) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าโครงสร้างของมอนต์มอริลโลไนต์แบบ 2:1 [39] ไฮโดรทัลไซต์ (รูปที่ 4.8 (ค)) จะมีลักษณะการจัดเรียงเป็นเกล็ดขนาดเล็ก (30-50 นาโนเมตร) รวมกลุ่มกัน (nanoparticle aggregate) [40]



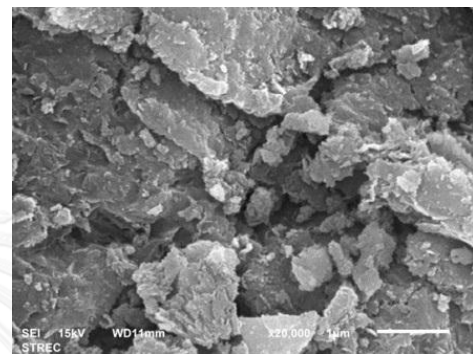
(ก) x10,000



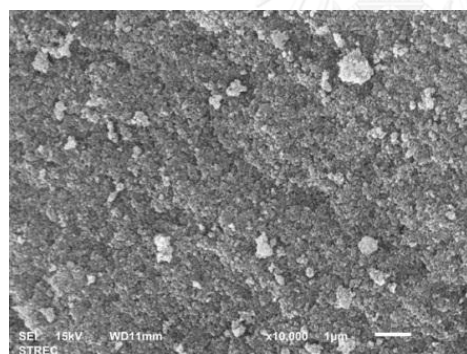
x20,000



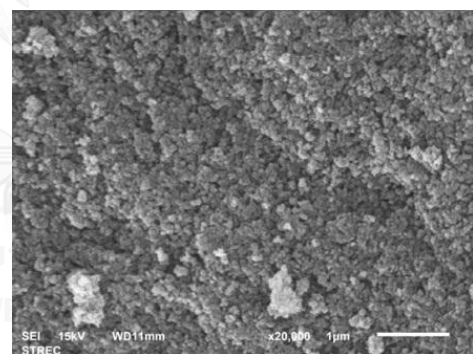
(ข) x10,000



x20,000



(ค) x10,000



x20,000

รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของตัวดูดซับ (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินฟองสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์ ที่กำลังขยาย 10,000 และ 20,000 เท่า ตามลำดับ

4.4 การลดปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ

เทคนิคการตกตะกอนแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยในยางมะตอยด้วยนอร์มอลเฮปเทนสามารถลดปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยได้ อย่างไรก็ตามยังคงมีปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยในยางมะตอยอีก 5.2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้ด้วยเทคนิคการตกตะกอน ดังนั้นจึงนำเทคนิคการดูดซับมาใช้ในการลดปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยในยางมะตอย โดยใช้เบนโทไนต์ ดินพอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เป็นตัวดูดซับ

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซับในตารางที่ 4.5 4.6 และ 4.7 พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถดูดซับองค์ประกอบในยางมะตอยได้ การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นจะทำให้ความจุการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับจึงมีพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิดที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน พบว่า ความจุการดูดซับของไฮโดรทัลไซต์ดีกว่าดินพอกสีและเบนโทไนต์ ตามลำดับ โดยการใช้ไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 34.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะส่งผลต่อปริมาณที่ลดลงโดยรวมของทั้งกระบวนการเพิ่มขึ้นจาก 8.46 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน) เป็น 40.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.5 การลดปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับเบนโทไนต์

การตกตะกอน	การดูดซับ		ปริมาณที่ลดลงโดยรวม (wt.%)
	เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt.%)	
8.36	100	5.83	13.71
8.22	150	8.28	15.82
8.40	200	11.36	18.81
8.36	250	15.57	22.62
8.37	300	22.54	29.02

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.6 การลดปริมาณแอสฟัลท์หินที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับดินฟอกสี

การตกตะกอน		การดูดซับ		ปริมาณที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt.%)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (wt.%)		
8.37	100	16.46		23.46
8.48	150	21.26		27.94
8.43	200	31.15		36.96
8.34	250	38.10		43.26
8.37	300	16.46		23.46

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.7 การลดปริมาณแอสฟัลท์หินที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์

การตกตะกอน		การดูดซับ		ปริมาณที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	ปริมาณตัวดูดซับ (wt.%)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (wt.%)		
8.39	100	24.84		31.14
8.46	150	34.52		40.06

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

4.5 การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับ

การวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ แสดงดังตารางที่ 4.8 พบว่าตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถลดปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ในยางมะตอยได้ โดยการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นทำให้สามารถลดปริมาณไนโตรเจนและซัลเฟอร์ได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ใกล้เคียงกัน แต่การใช้ไฮโดรทัลไซต์จะสามารถลดปริมาณซัลเฟอร์ได้ดีกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนด์ ตามลำดับ นอกจากนี้ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้น โดยการใช้ไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ยางมะตอยมีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูงที่สุด เท่ากับ 1.47

เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนในยางมะตอยที่ได้ พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดสามารถลดปริมาณแอสฟัลทีนได้ โดยการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นทำให้สามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน พบว่า ไฮโดรทัลไซต์สามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้ดีกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนด์ ตามลำดับ โดยปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณเรซินที่เหลือในยางมะตอยหลังการดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน พบว่า การใช้ดินฟอกสีและไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับส่งผลให้ปริมาณเรซินในยางมะตอยลดลงมากกว่าการใช้เบนโทไนด์ แสดงว่าดินฟอกสีและไฮโดรทัลไซต์ดูดซับเรซินเข้าไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยดินฟอกสีที่ปริมาณตัวดูดซับ 200 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณแอสฟัลทีนเท่ากัน คือ 2.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า การใช้ไฮโดรทัลไซต์จะมีปริมาณเรซินในยางมะตอยมากกว่าดินฟอกสี เรซินมีลักษณะเป็นของเหลวที่เหนียวและหนืด [12] ดังนั้นการที่ปริมาณเรซินลดลงมากส่งผลให้ยางมะตอยที่ได้มีความหนืดลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ดินฟอกสีที่ 250 และ 300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณเรซินเหลือ 9.5 และ 10.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ยางมะตอยที่ได้จะเสียสมบัติความเป็นยางมะตอยไป

การจัดลำดับการเลือกดูดซับ (adsorption selectivity) โดยอาศัยองค์ประกอบธาตุและไฮโดรคาร์บอนของยางมะตอยที่ได้ ผลการเลือกดูดซับมีดังนี้

การเลือกดูดซับซัลเฟอร์: ไฮโดรทัลไซต์ > ดินฟอกสี > เบนโทไนต์

การเลือกดูดซับเรซิน: ดินฟอกสี > ไฮโดรทัลไซต์ > เบนโทไนต์

การเลือกดูดซับแอสฟัลทีน: ไฮโดรทัลไซต์ > ดินฟอกสี > เบนโทไนต์



ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

องค์ประกอบ	ยางมะตอย เริ่มต้น	มอดทีน	การดูดซับ											
			เบนโทไนด์ (wt.%)				ดินพอกสี (wt.%)				ไฮโดรทัลไซต์ (wt.%)			
			100	150	200	300	100	150	200	250	300	100	150	200
ชนิดธาตุ														
คาร์บอน (C)	85.23	84.66	85.29	83.94	85.26	85.40	85.20	85.29	84.75	85.05	85.36	85.48	85.52	84.81
ไฮโดรเจน (H)	9.57	9.85	9.98	9.92	10.07	10.11	10.17	10.08	10.29	10.32	10.36	10.38	10.00	10.38
ไนโตรเจน (N)	0.07	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
ซัลเฟอร์ (S)	4.98	4.80	4.57	4.55	4.52	4.46	4.43	4.49	4.46	4.36	4.21	4.11	4.45	4.37
อัตราส่วน H/C	1.35	1.40	1.40	1.42	1.42	1.42	1.43	1.42	1.46	1.46	1.46	1.46	1.40	1.47
ชนิดไฮโดรคาร์บอน														
ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว	1.8	3.5	4.7	4.3	5.5	4.8	4.6	5.2	5.6	5.3	4.2	4.2	4.6	6.9
แอลโรแมติก	62.6	70.4	71.4	73.7	72.5	73.6	74.2	78.3	76.7	82.1	83.9	84.7	77.4	78.2
เรซิน	19.0	20.9	19.1	18.7	19.1	18.7	18.4	13.4	14.9	10.2	9.5	10.4	15.6	14.0
แอสฟัลทีน	16.6	5.2	4.8	3.3	2.9	2.9	2.8	3.1	2.8	2.4	2.4	0.7	2.4	0.9

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยวิธี SARA analysis: ความเข้มข้น, 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, คลอโรฟอร์ม

ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอดทีน): ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

4.6 การวิเคราะห์สีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเครื่อง Color checker

การวิเคราะห์สีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ แสดงดังตารางที่ 4.9 พบว่า ค่าสี L^* a^* และ b^* ของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับส่วนใหญ่มีค่าเพิ่มขึ้น ยางมะตอยที่ได้จึงมีแนวโน้มไปทางสีขาว สีแดง และสีเหลือง ตามลำดับ โดยสีของยางมะตอยเกิดจากองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด คือ ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวมีสีอ่อนหรือไม่มีสี แอโรแมติกมีสีเหลืองจนถึงแดง เรซินมีสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ และแอสฟัลทีนมีสีดำ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนในยางมะตอย (ตารางที่ 4.8) พบว่า ปริมาณเรซินและแอสฟัลทีนที่ลดลงส่งผลให้สัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัวและแอโรแมติกในยางมะตอยเพิ่มขึ้น ยางมะตอยที่ได้จึงมีแนวโน้มไปทางสีแดงและสีเหลืองมากขึ้น แต่การเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากอาจทำให้ค่าสี a^* ลดลง ทำให้สีของยางมะตอยมีแนวโน้มไปทางสีเขียว เมื่อเปรียบเทียบยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กับดินฟอกสีที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณแอสฟัลทีนเท่ากัน คือ 2.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เบนโทไนด์จะมีปริมาณเรซินมากกว่า แต่มีปริมาณแอโรแมติกน้อยกว่าดินฟอกสี ขณะที่เมื่อเปรียบเทียบยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยดินฟอกสีและไฮโดรทัลไซต์ที่มีปริมาณแอสฟัลทีนเท่ากัน คือ 2.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า ดินฟอกสีมีปริมาณเรซินน้อยกว่า แต่มีปริมาณแอโรแมติกมากกว่าไฮโดรทัลไซต์ โดยสีของเรซินเกิดจากการผสมสีระหว่างสีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน [41] ซึ่งสัดส่วนของสีแดงจะมากกว่าหรือเท่ากับสีอื่น ดังนั้นการลดลงของค่าสี a^* (สีแดงลดลง) อาจเกิดจากปริมาณแอโรแมติกหรือเรซินที่ลดลงมากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณตัวดูดซับเท่ากัน พบว่า ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์มีค่าสี L^* a^* และ b^* มากกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนด์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับค่าความแตกต่างของสี (ΔE) ของยางมะตอยที่ได้ โดยการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะได้ยางมะตอยที่มีค่าความแตกต่างของสีมากที่สุด แสดงว่ายางมะตอยที่ได้มีสีต่างจากยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทินมากที่สุด ดังนั้นไฮโดรทัลไซต์จึงเป็นตัวดูดซับที่สามารถลดสีของยางมะตอยได้ดีที่สุด

รูปที่ 4.9 แสดงสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ พบว่า ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีสีอ่อนลง โดยเปลี่ยนจากสีดำเป็นสีน้ำตาลเข้ม สีของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์แตกต่างจากสีของมอลทินเล็กน้อย แต่ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยดินฟอกสีและไฮโดรทัลไซต์จะมีสีอ่อนกว่ามอลทินอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการใช้ไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150

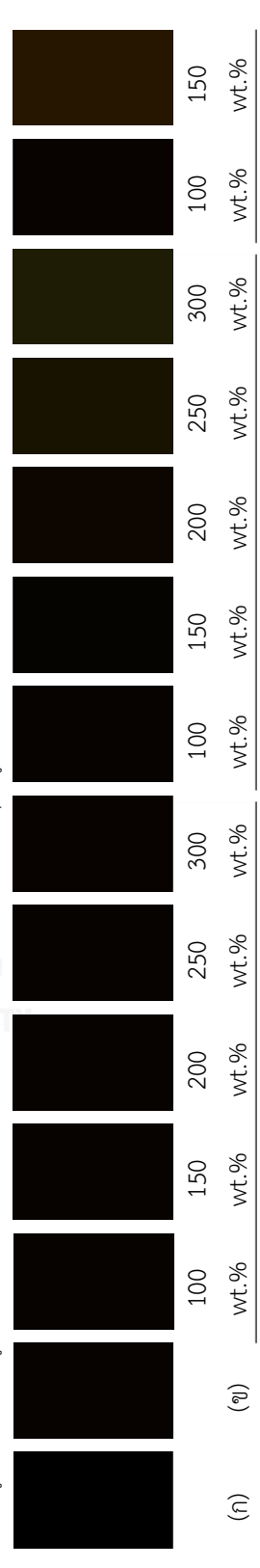
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ได้อย่างมะตอยที่มีสีอ่อนที่สุด เมื่อพิจารณาสีของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับร่วมกับองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรเมติก เรซิน และแอสฟัลทีน (ตารางที่ 4.8) พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดมีความจำเพาะต่อการเลือกดูดซับ โดยการจัดลำดับการเลือกดูดซับเรซิน คือ ดินฟอกสี > ไฮโดรทัลไซต์ > เบนโทไนด์ ขณะที่การเลือกดูดซับแอสฟัลทีน คือ ไฮโดรทัลไซต์ > ดินฟอกสี > เบนโทไนด์ ทำให้ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยดินฟอกสีและไฮโดรทัลไซต์มีสีอ่อนกว่าเบนโทไนด์ ดังนั้นองค์ประกอบที่มีผลต่อการลดสีของยางมะตอย คือ เรซินและแอสฟัลทีน



ตารางที่ 4.9 ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน

ค่าสี	ยางมะตอยเริ่มต้น	การดูดซับ														
		มอลทิน						ดินฟอกสี								
		เบนโทไนต์ (wt.%)			ดินฟอกสี (wt.%)			เบนโทไนต์ (wt.%)			ดินฟอกสี (wt.%)					
		100	150	200	250	300	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300
L*	0.18	0.72	0.90	1.17	1.26	1.72	1.08	1.35	2.35	5.18	9.80	1.45	8.82			
a*	0.45	0.58	0.62	1.10	1.12	0.81	0.67	0.32	1.37	0.13	-2.65	1.16	5.50			
b*	0.31	0.66	1.12	1.01	1.02	1.80	1.43	1.75	3.47	8.57	12.54	1.62	14.05			
ΔE^{h}	-	0.66	1.10	1.38	1.46	2.17	1.45	1.86	3.94	9.66	15.87	1.96	17.00			
ΔE^{c}	-	0.15	0.50	0.77	0.84	1.53	0.85	1.29	3.34	9.09	15.30	1.34	16.40			

^{h, c} ความแตกต่างของสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน ตามลำดับ
 ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทิน): ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร. อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง
 ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.9 สีของ (ก) ยางมะตอยเริ่มต้น (ข) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วย (ค) เบนโทไนต์ (ง) ดินฟอกสี และ (จ) ไฮโดรทัลไลต์

4.7 การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติกของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเทคนิค UV-Vis spectrophotometry

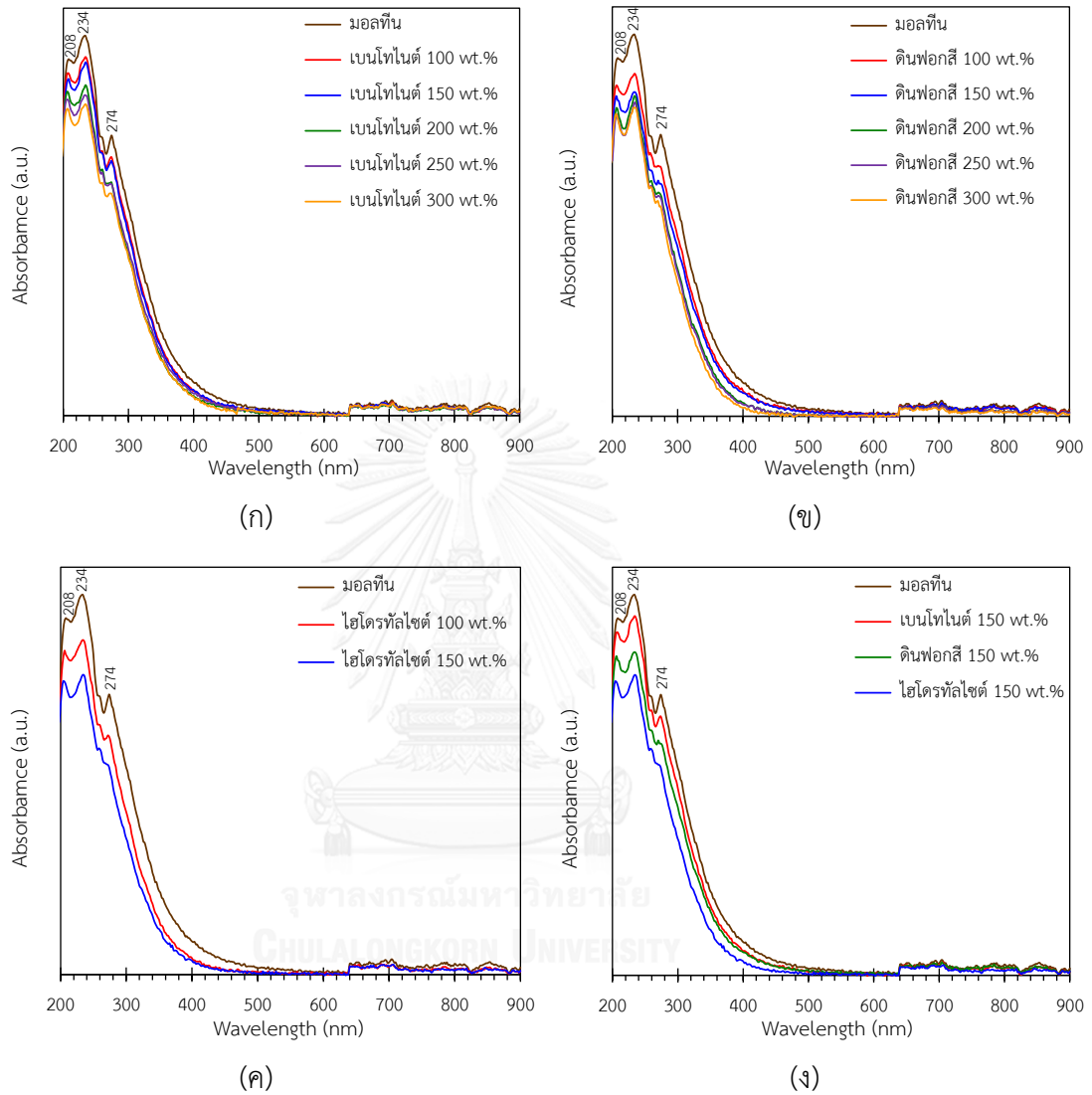
การวิเคราะห์ปริมาณไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติกของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปเทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ แสดงดังรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงออกมาในรูปของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200-900 นาโนเมตร พบว่า สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของมอลทินจะปรากฏแถบที่สำคัญ 3 แถบ ดังนี้

1. แถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 208 นาโนเมตร แสดงถึงอนุพันธ์ของวงเบนซีน เช่น ฟีนอล โทลูอิน [42]
2. แถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร จะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงที่สุด ซึ่งแสดงถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติก [43]
3. แถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 274 นาโนเมตร แสดงถึงวงแอโรแมติกควบแน่นชนิด 2 วง [43]

นอกจากนี้แถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 234 และ 274 นาโนเมตร อาจมีความเกี่ยวข้องกับอนุพันธ์ของแกรฟีน (graphene) [44] โดยแกรฟีนมีโครงสร้างคล้ายกับแอสฟัลทิน ซึ่งประกอบด้วยวงแอโรแมติกควบแน่นจำนวนมาก โดยแกรฟีนจะมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 270 นาโนเมตร [45] ขณะที่แกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) จะมีแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 230 นาโนเมตร [45-47]

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ (รูปที่ 4.10 (ก)) ดินฟอกสี (รูปที่ 4.10 (ข)) และไฮโดรทัลไซต์ (รูปที่ 4.10 (ค)) พบว่า ลักษณะสเปกตรัมของยางมะตอยที่ได้คล้ายกับสเปกตรัมของมอลทิน แต่จะมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงในทุกช่วงความยาวคลื่น ซึ่งการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับทั้งสามชนิดมากขึ้นทำให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงสอดคล้องกับปริมาณที่ลดลงโดยรวมเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.5 4.6 และ 4.7) อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเพิ่มขึ้น และปริมาณแอสฟัลทินลดลง (ตารางที่ 4.8) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.10 (ง)) พบว่ายางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์มีค่าการดูดกลืนแสงต่ำกว่าการใช้ดินฟอกสีและเบนโทไนด์ ตามลำดับ เนื่องจากยางมะตอยที่ได้มีอัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนสูงและมีปริมาณแอสฟัลทินต่ำกว่าการใช้ดินฟอกสีและเบนโทไนด์ ซึ่งโครงสร้างของแอสฟัลทินประกอบด้วยวงแอโรแมติกแบบควบแน่นจำนวนมาก เมื่อปริมาณแอสฟัลทินลดลง ความเป็นแอโรแมติกใน

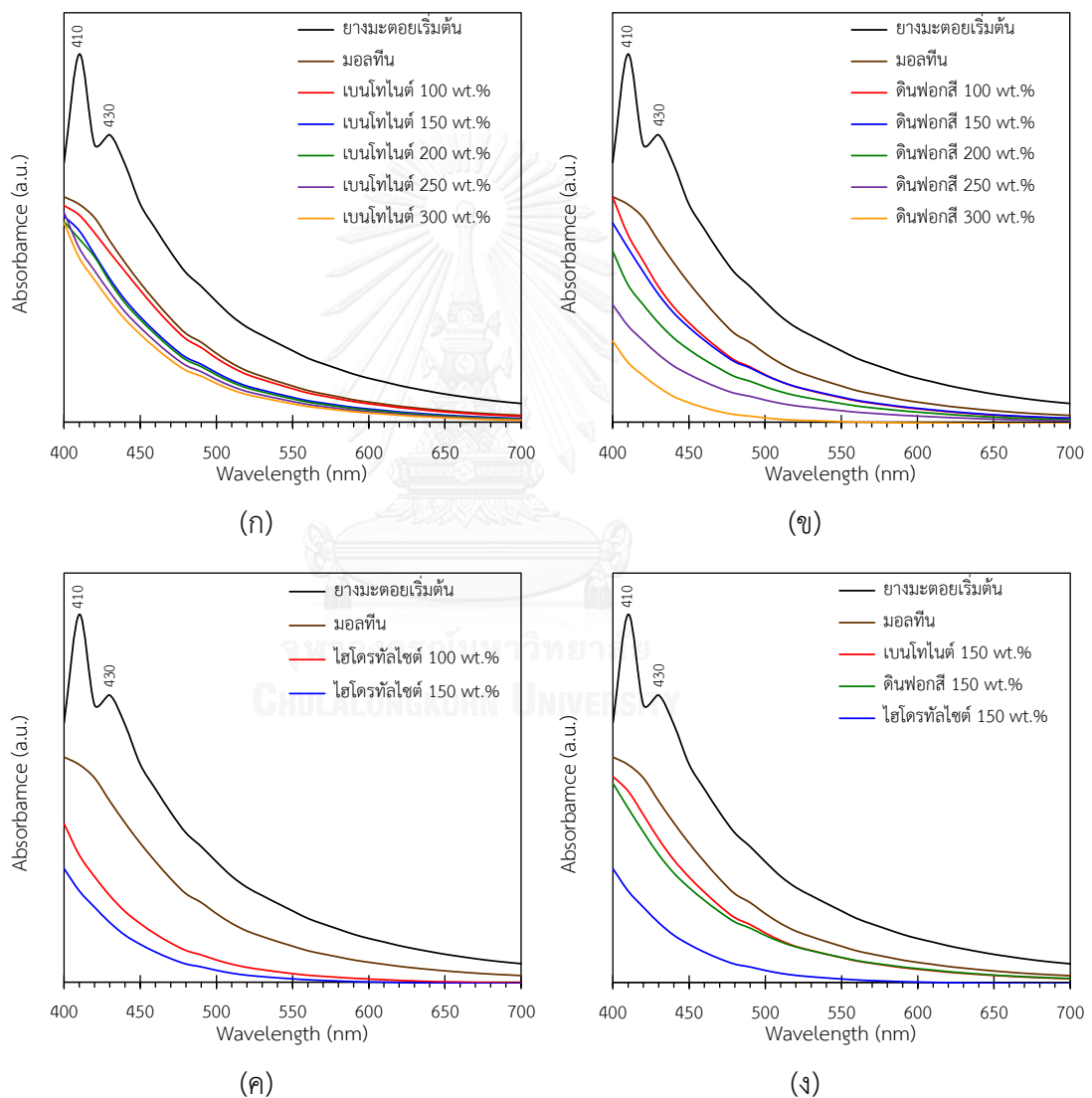
ยางมะตอยจึงลดลง ดังนั้นการใช้ไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับสามารถลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติกในยางมะตอยได้ดีที่สุด



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วย (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินพอกสี (ค) ไฮโดรทัลไซต์ และ (ง) ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เทียบกับมอลทิน

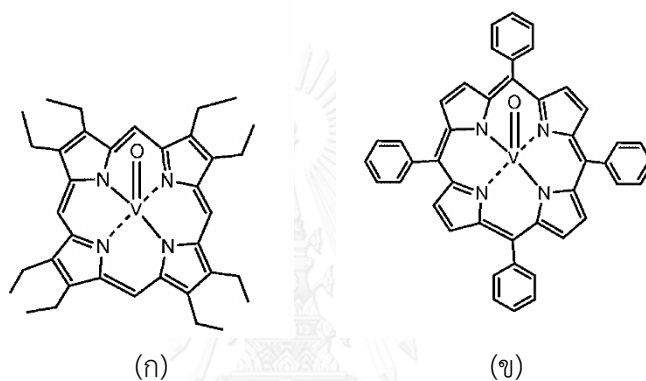
4.8 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยเครื่อง Color quest XT

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับเบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงออกมาในรูปของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร



รูปที่ 4.11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วย (ก) เบนโทไนต์ (ข) ดินฟอกสี (ค) ไฮโดรทัลไซต์ และ (ง) ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน

สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยเริ่มต้นจะปรากฏแถบที่สำคัญ 2 แถบ ในช่วงความยาวคลื่น 400-440 นาโนเมตร ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของพอร์ไฟริน [48] โดยแถบที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร เกิดจาก vanadyl octaethylporphyrin (VO(OEP)) (รูปที่ 4.12 (ก)) ซึ่งจะปรากฏแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 407 (soret band) 533 (β band) และ 572 (α band) นาโนเมตร [49] ขณะที่แถบที่ความยาวคลื่น 430 นาโนเมตร เกิดจาก vanadyl meso-tetraphenylporphyrin (VO(TPP)) (รูปที่ 4.12 (ข)) โดยปรากฏแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 423 (soret band) 547 (β band) และ 583 (α band) [50] ซึ่งวาเนเดียมจะอยู่ในรูปของวาเนเดียมไอออน VO^{2+} [51]

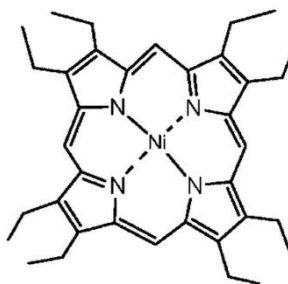


รูปที่ 4.12 โครงสร้างของวาเนเดียมพอร์ไฟริน (ก) VO(OEP) และ (ข) VO(TPP) [52]

เมื่อพิจารณาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของมอลทินเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น พบว่า ค่าการดูดกลืนแสงของมอลทินในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร มีค่าลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงความยาวคลื่น 400-440 นาโนเมตร แสดงว่าการตกตะกอนยางมะตอยด้วยนอร์มอลเฮปแทนสามารถลดปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟรินในยางมะตอยได้ นอกจากนี้ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยเบนโทไนด์ (รูปที่ 4.11 (ก)) ดินฟอกสี (รูปที่ 4.11 (ข)) และไฮโดรทัลไซต์ (รูปที่ 4.11 (ค)) มีค่าการดูดกลืนแสงลดลงในทุกช่วงความยาวคลื่น โดยการเพิ่มปริมาณตัวดูดซับมากขึ้นจะให้ค่าการดูดกลืนแสงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณแอสฟัลทินที่ลดลง (ตารางที่ 4.8) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (รูปที่ 4.11 (ง)) พบว่า ยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์มีค่าการดูดกลืนแสงต่ำกว่าการใช้ดินฟอกสีและเบนโทไนด์ตามลำดับ เนื่องจากยางมะตอยที่ได้มีปริมาณแอสฟัลทินต่ำกว่าการใช้ดินฟอกสีและเบนโทไนด์ ซึ่งโครงสร้างของแอสฟัลทินจะพบโลหะหนักที่มีพอร์ไฟรินเป็นลิแกนด์ เช่น วาเนเดียมพอร์ไฟริน แทรกตัวอยู่ภายในช่องว่างระหว่างแผงแอโรแมติกควบแนน เมื่อปริมาณแอสฟัลทินลดลง ปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟรินในยางมะตอยจึงลดลง ดังนั้นการใช้ไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับสามารถลดปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟรินในยางมะตอยได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอล เฮปเทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เทียบกับยางมะตอย เริ่มต้นและมอลทิน โดยเจือจางด้วยตัวทำละลายโทลูอินที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สีของสารละลายยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับมีแนวโน้มไปทางสีเขามากขึ้น (ค่าสี L^* เพิ่มขึ้น) สีแดงและสีเหลืองน้อยลง (ค่าสี a^* และ b^* ลดลง) เมื่อพิจารณาระบบสี Lab (รูปที่ 3.10) พบว่า ถ้าค่าสี a^* และ b^* เข้าใกล้ 0 (จุดศูนย์กลาง) มากขึ้น ความอิ่มตัวของสี (chroma/saturation) จะลดลง ส่งผลให้ค่าความแตกต่างของสี (ΔE) เพิ่มขึ้น โดยการใช้ดินฟอกสีที่ปริมาณตัวดูดซับ 300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สารละลายยางมะตอยที่ได้จะมีค่าความแตกต่างของสีมากที่สุดและมีปริมาณ วาเนเดียมพอร์ไฟรินน้อยที่สุด (รูปที่ 4.11 (ข)) แสดงว่าค่าความแตกต่างของสีที่เพิ่มขึ้นสอดคล้อง กับปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟรินที่ลดลง อย่างไรก็ตามการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีม่วง (400-450 นาโนเมตร) ของวาเนเดียมพอร์ไฟริน ยังส่งผลให้สีของสารละลายยางมะตอยที่ได้มีสีออกโทนน้ำตาล เหลือง (รูปที่ 4.14) โดยค่าการดูดกลืนแสงในช่วงแสงสีม่วงที่ลดลงทำให้สีของสารละลายยางมะตอย อ่อนลง

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของยางมะตอยโดยอาศัยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วง ความยาวคลื่น 400-700 ไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณนิกเกิลพอร์ไฟริน (nikel porphyrin) ได้ เนื่องจากนิกเกิลพอร์ไฟรินปรากฏ soret band ในช่วงความยาวคลื่น 390-400 นาโนเมตร [51] โดยนิกเกิลพอร์ไฟรินที่พบในยางมะตอย คือ nikel octaethylporphyrin (Ni(OEP)) (รูปที่ 4.13) ซึ่งปรากฏแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 390 (soret band) [52] 515 (β band) [53] และ 550 (α band) [54] นาโนเมตร



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของนิกเกิลพอร์ไฟริน Ni(OEP) [52]

ตารางที่ 4.10 ค่าสีของสารละลายที่ย่างมาตรงต่อที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน

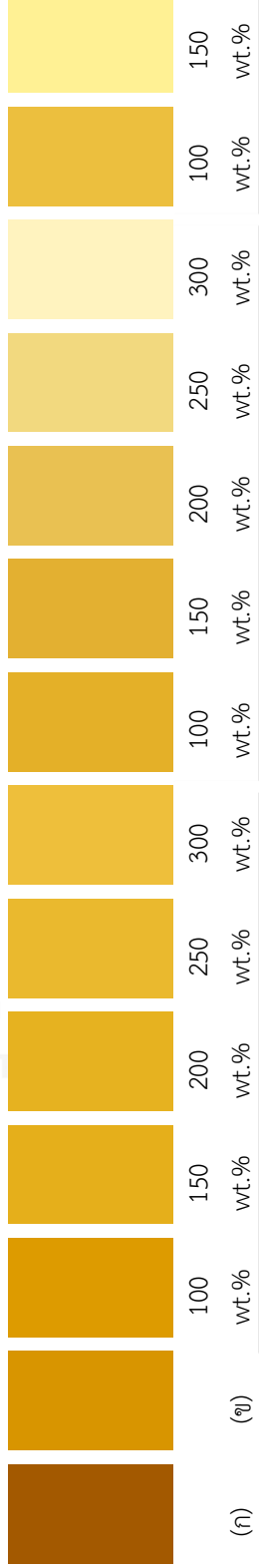
ค่าสี	ยางมะตอยเริ่มต้น	มอลทิน	การดูดซับ																	
			เบนโทไนต์ (wt.%)						ดินพอกี (wt.%)						ไฮโดรทัลไซต์ (wt.%)					
			100	150	200	250	300	100	150	200	250	300	100	150	200	250	300			
L*	46.92	67.12	69.10	75.32	76.52	78.64	80.52	80.52	75.60	75.27	80.58	87.14	98.42	80.33	94.66					
a*	27.99	19.09	17.71	12.45	11.75	9.93	8.20	8.20	11.65	11.55	6.96	1.20	-6.21	7.99	-4.00					
b*	71.43	77.57	77.16	73.10	73.14	71.35	69.52	70.44	67.42	59.70	47.08	30.63	67.00	47.49	47.49					
ΔE^n	-	22.91	25.11	32.42	33.81	36.50	39.04	33.02	33.02	41.39	54.11	74.07	39.19	62.25	62.25					
ΔE^y	-	-	2.45	11.46	12.72	15.98	19.05	13.35	15.04	25.45	40.63	61.83	20.23	46.87	46.87					

^{n,y} ความแตกต่างของสีของสารละลายที่ย่างมาตรงต่อที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน ตามลำดับ

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Color quest XT: ความเข้มข้น, 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, โทลูอีน

ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทิน): ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 สีของสารละลาย (ก) ยางมะตอยเริ่มต้น (ข) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยนอร์มอลเฮปแทนและการดูดซับด้วย

(ค) เบนโทไนต์ (ง) ดินพอกี และ (จ) ไฮโดรทัลไซต์

4.9 การศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์

การศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับ พบว่า ไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับที่เหมาะสม เมื่อใช้ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณที่ลดลงโดยรวม เท่ากับ 34.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และสามารถลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติก ซัลเฟอร์ และวาเนเดียมพอร์ไฟริน นอกจากนี้สีของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ พบว่า สีของยางมะตอยที่ได้จะมีค่าความแตกต่างของสีจากยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทินมากที่สุด ดังนั้นจึงศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.9.1 ผลของชนิดตัวทำละลายในการดูดซับ

ตารางที่ 4.11 แสดงผลของตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน ต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซับ พบว่า การใช้นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายส่งผลให้ไฮโดรทัลไซต์ดูดซับองค์ประกอบในยางมะตอยได้ดีกว่าไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน ตามลำดับ เนื่องจากนอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (0 เดอบาย) [33] จึงทำให้องค์ประกอบที่มีขั้วในยางมะตอย เช่น แอสฟัลทีน สามารถดูดซับบนพื้นผิวของไฮโดรทัลไซต์ได้ดี ขณะที่โทลูอิน (0.36 เดอบาย) [32] และไตรคลอโรเอทิลีน (0.8 เดอบาย) [31] เป็นตัวทำละลายที่มีขั้วจึงเกิดการแข่งขันกับองค์ประกอบที่มีขั้วบนพื้นผิวของไฮโดรทัลไซต์ นอกจากนี้โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับยางมะตอย ซึ่งอาจทำให้องค์ประกอบที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของไฮโดรทัลไซต์ถูกชะออกไปได้ง่ายขณะกวนผสม ดังนั้นการดูดซับบนไฮโดรทัลไซต์ในโทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนจึงลดลง

ตารางที่ 4.11 ผลของชนิดตัวทำละลายต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์

เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	การดูดซับ		ปริมาณที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
	ตัวทำละลาย	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (wt.%)	
8.46	นอร์มอลเฮปเทน	34.52	40.06
8.34	โทลูอิน	23.04	29.46
8.37	ไตรคลอโรเอทิลีน	25.62	31.84

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.12 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

องค์ประกอบ	มอลทีน	การดูดซับในตัวทำละลายชนิดต่างๆ		
		นอร์มอลเฮปเทน	โทลูอิน	ไตรคลอโรเอทิลีน
ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว	3.5	6.9	5.5	5.3
แอโรแมติก	70.4	78.2	80.1	78.1
เรซิน	20.9	14.0	12.9	14.8
แอสฟัลทีน	5.2	0.9	1.5	1.8

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยวิธี SARA analysis : ความเข้มข้น, 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, คลอโรฟอร์ม

ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทีน): ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.12 แสดงองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีน พบว่า การใช้ตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทนทำให้ไฮโดรทัลไซต์สามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้ดีกว่าการใช้โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนตามลำดับ ซึ่งปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยที่ใช้โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนเป็นตัวทำละลายไม่สอดคล้องกับปริมาณที่ลดลงโดยรวม (ตารางที่ 4.11) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างขององค์ประกอบชนิดไฮโดรคาร์บอนในยางมะตอย เช่นเดียวกับการใช้โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีนตกตะกอนยางมะตอย ในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาค่าสียางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายทั้งสามชนิดในตารางที่ 4.13 พบว่า ตัวทำละลายทั้งสามชนิดจะทำให้ยางมะตอยที่ได้มีค่าสี L^* a^* และ b^* เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเรซินและแอสฟัลทีนที่ลดลงทำให้สัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัวและแอโรแมติกในยางมะตอยเพิ่มขึ้น ยางมะตอยที่ได้จึงมีแนวโน้มไปทางสีแดงและสีเหลืองมากขึ้น โดยตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทนทำให้ยางมะตอยที่ได้มีค่าความแตกต่างของสีมากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณแอสฟัลทีนที่ลดลง ดังนั้นการใช้ตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทนจะให้ยางมะตอยที่มีสีอ่อนกว่าการใช้ตัวทำละลายชนิดอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 4.15

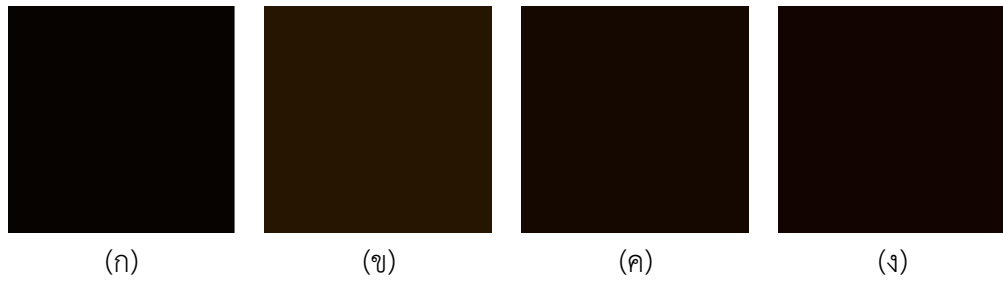
ตารางที่ 4.13 ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ค่าสี	มอลทีน	การดูดซับในตัวทำละลายชนิดต่างๆ		
		นอร์มอลเฮปเทน	โทลูอิน	ไตรคลอโรเอทิลีน
L^*	0.72	8.82	2.71	2.35
a^*	0.58	5.50	3.92	3.84
b^*	0.66	14.05	3.51	3.32
ΔE	-	16.40	4.82	4.51

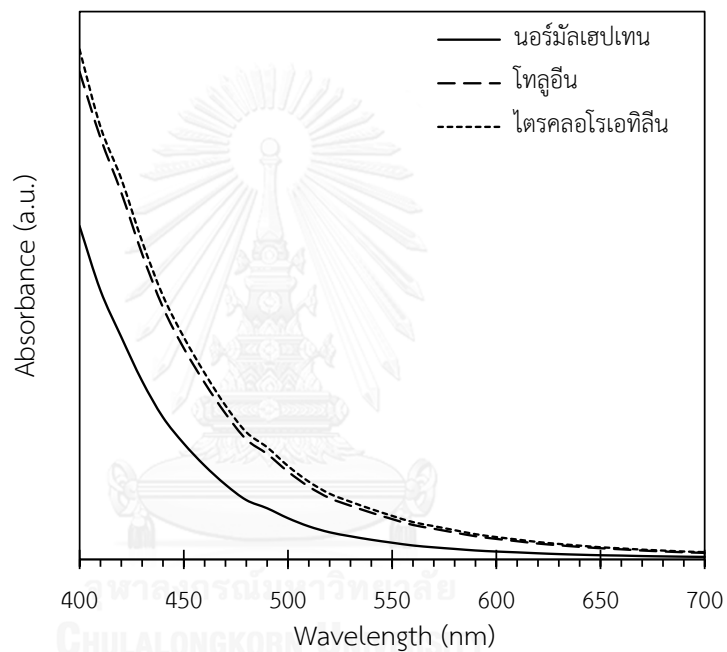
ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทีน): ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50

โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 สีของ (ก) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซเติน (ข) นอร์มอลเฮปเทน (ค) โทลูอิน และ (ง) ไตรคลอโรเอทิลีน



รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซเตินตัวทำละลายชนิดต่างๆ

รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการลดปริมาณแอสฟัลท์ด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซเตินในนอร์มอลเฮปเทน โทลูอิน และไตรคลอโรเอทิลีนพบว่า ยางมะตอยที่ใช้ในนอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายจะมีค่าการดูดกลืนแสงน้อยกว่าการใช้ตัวโทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีน โดยค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงสอดคล้องกับปริมาณแอสฟัลท์ที่ลดลง (ตารางที่ 4.13) ซึ่งแสดงว่าการใช้นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลายไฮโดรทัลไซเตินสามารถลดปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟรินในยางมะตอยได้ดีที่สุด เมื่อพิจารณาค่าสีของสารละลายยางมะตอยที่ได้ในตารางที่ 4.14 พบว่า สารละลายยางมะตอยจะมีค่าสี L^* เพิ่มขึ้น a^* และ b^* ลดลง ทำให้ความอึมตัวของสีลดลง โดยค่าความแตกต่างของสีมีค่ามาก

ที่สุด เมื่อใช้นอร์มอลเฮปเทนเป็นตัวทำละลาย นอกจากนี้สีของสารละลายขมดอยที่ได้ในรูปที่ 4.17 สอดคล้องกับปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟรินที่ลดลง

ตารางที่ 4.14 ค่าสีของสารละลายขมดอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ในตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ค่าสี	มอลทิน	การดูดซับ		
		ชนิดตัวทำละลาย		
		นอร์มอลเฮปเทน	โทลูอิน	ไตรคลอโรเอทิลีน
L*	67.12	94.66	86.32	85.30
a*	19.09	-4.00	3.68	4.64
b*	77.57	47.49	66.05	67.4
ΔE	-	46.87	27.18	25.35

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Color quest XT: ความเข้มข้น, 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, โทลูอิน
ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทิน): ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของขมดอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50
โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง
ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักขมดอยเริ่มต้น;
อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.17 สีของสารละลาย (ก) มอลทิน และขมดอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ใน (ข) นอร์มอลเฮปเทน (ค) โทลูอิน และ (ง) ไตรคลอโรเอทิลีน

4.9.2 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับ

ตารางที่ 4.15 แสดงผลของอุณหภูมิที่ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส ต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การดูดซับพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิในการดูดซับมากขึ้นจะทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับของไฮโดรทัลไซต์ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ยางมะตอยละลายในนอร์มอลเฮปเทนได้ดีขึ้นซึ่งอาจทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถูกชะออกไปจากพื้นผิวของไฮโดรทัลไซต์ [55] ดังนั้นการดูดซับโดยใช้ไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ (30 องศาเซลเซียส) มีปริมาณที่ลดลงโดยรวมสูงสุด คือ 40.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์

การตกตะกอน		การดูดซับ	
เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	อุณหภูมิ (°C)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (wt.%)	ปริมาณที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
8.46	30	34.52	40.06
8.33	40	33.15	38.72
8.42	50	33.01	38.65

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง
ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.16 แสดงองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่า การใช้อุณหภูมิในการดูดซับ 30 และ 40 องศาเซลเซียส องค์ประกอบของยางมะตอยที่ได้ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่ออุณหภูมิในการดูดซับสูงขึ้น (50 องศาเซลเซียส) ไฮโดรทัลไซต์สามารถดูดซับเรซินและแอสฟัลทีนได้น้อยลง ซึ่งส่งผลต่อค่าสีของยางมะตอยในตารางที่ 4.17 คือ การใช้อุณหภูมิในการดูดซับสูง ยางมะตอยที่ได้มีค่าสี $L^* a^*$ และ b^* น้อยกว่าการใช้ภูมิในการดูดซับต่ำ (30 องศาเซลเซียส) ดังนั้นการใช้ภูมิในการดูดซับต่ำทำให้ยางมะตอยที่ได้มีค่าความแตกต่างของสีมากที่สุดและค่าความแตกต่างของสีมากที่สุดและมีสีอ่อนที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.16 องค์ประกอบของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

องค์ประกอบ	มอลทิน	การดูดซับ		
		อุณหภูมิ (°C)		
		30	40	50
ไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว	3.5	6.9	6.1	6.0
แอโรแมติก	70.4	78.2	78.8	77.5
เรซิน	20.9	14.0	14.1	14.9
แอสฟัลทิน	5.2	0.9	1.0	1.6

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยวิธี SARA analysis : ความเข้มข้น, 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, คลอโรฟอร์ม

ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทิน): ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

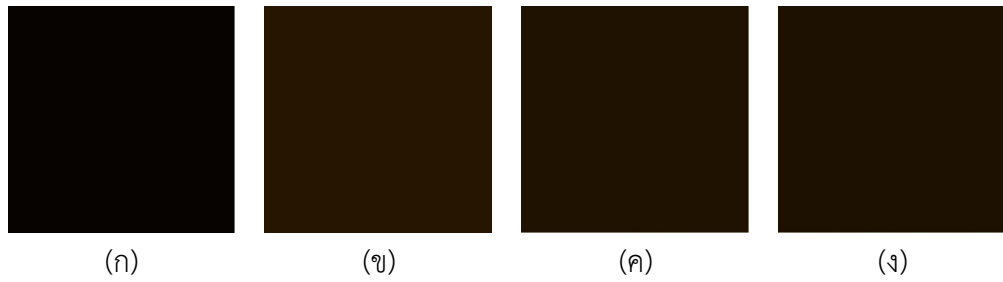
ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.17 ค่าสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

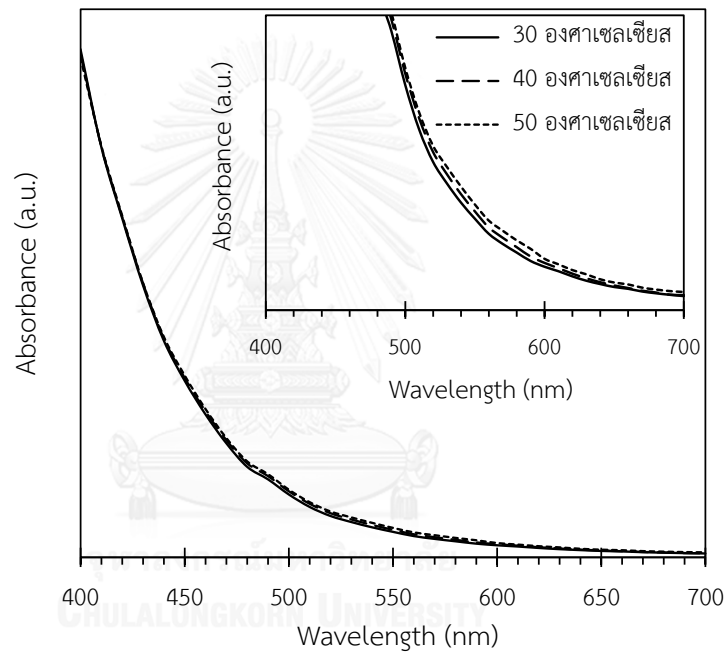
ค่าสี	มอลทิน	การดูดซับ		
		อุณหภูมิ (°C)		
		30	40	50
L*	0.72	8.82	6.68	6.32
a*	0.58	5.50	4.04	3.54
b*	0.66	14.05	10.79	8.86
ΔE	-	16.40	12.25	10.36

ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทิน): ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; เวลา, 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.18 สีของ (ก) มอลทิน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไลต์ที่อุณหภูมิ (ข) 30 (ค) 40 และ (ง) 50 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.19 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไลต์ที่อุณหภูมิที่ต่างๆ

รูปที่ 4.19 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของยางมะตอยที่ผ่านการลดปริมาณแอสฟัลทีนด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส พบว่ายางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีค่าการดูดกลืนแสงไม่แตกต่างกัน ส่งผลให้ค่าสีของสารละลายยางมะตอยและค่าความแตกต่างของสีในตารางที่ 4.18 มีค่าใกล้เคียงกัน สีของสารละลายยางมะตอย (รูปที่ 4.20) จึงไม่แตกต่างกัน ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการดูดซับไม่มีผลต่อการลดปริมาณวาเนเดียมพอร์ไฟริน

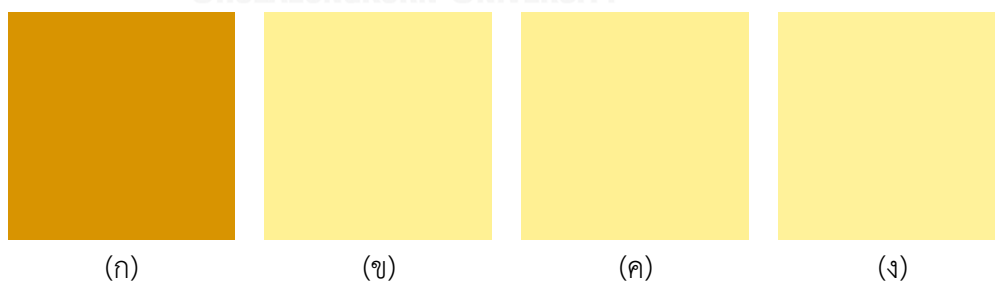
ตารางที่ 4.18 ค่าสีของสารละลายยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ที่อุณหภูมิต่างๆ

ค่าสี	มอลทีน	การดูดซับ		
		อุณหภูมิ (°C)		
		30	40	50
L*	0.72	94.66	94.21	94.16
a*	0.58	-4.00	-3.52	-3.43
b*	0.66	47.58	47.55	47.49
ΔE	-	46.81	46.33	46.29

ภาวะการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Color quest XT: ความเข้มข้น, 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร; ตัวทำละลาย, โทลูอีน

ภาวะการตกตะกอน (การเตรียมมอลทีน): ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; เวลา, 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.20 สีของสารละลาย (ก) มอลทีน และยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์ ที่อุณหภูมิ (ข) 30 (ค) 40 และ (ง) 50 องศาเซลเซียส

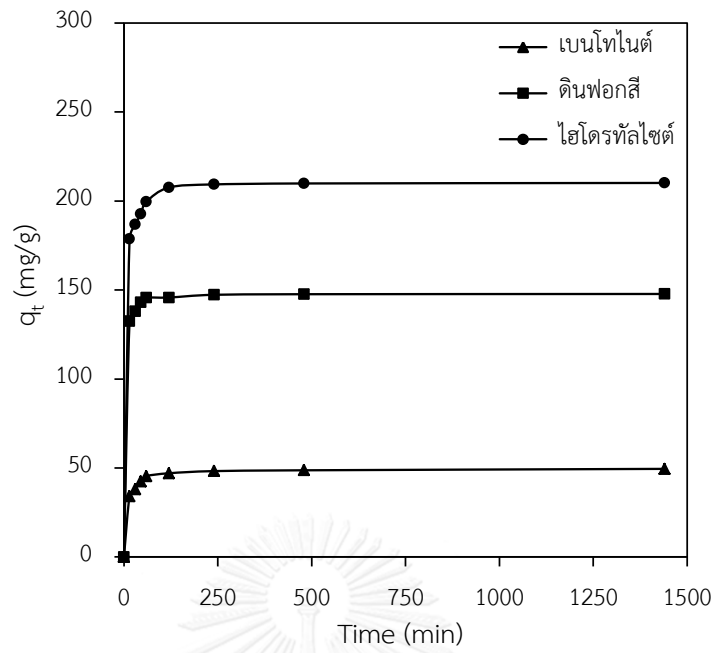
4.9.3 ผลของเวลาในการดูดซับ

การศึกษาผลของเวลาในการดูดซับจะใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตริกที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร เพื่อหาความจุการดูดซับ (q_t) ณ เวลาใดๆ แสดงดังสมการที่ (4.1)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (4.1)$$

เมื่อ	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
	C_t	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
	V	คือ ปริมาตรของสารละลาย หน่วย ลิตร (L)
	m	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

รูปที่ 4.21 แสดงผลของเวลาในการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า การดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวและ/หรือตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับยังมีปริมาณมากจึงสามารถดูดซับได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะทำให้ความจุการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิดมากขึ้น โดยการดูดซับจะเริ่มคงที่และเข้าสู่ภาวะสมดุล เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมจึงทำให้ตัวดูดซับมีบริเวณที่สามารถดูดซับลดลง โดยการดูดซับด้วยดินฟอกสีและเบนโทไนด์จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที ซึ่งเร็วกว่าไฮโดรทัลไซต์ที่เริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที เมื่อพิจารณาความจุการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิดที่เวลาเดียวกัน พบว่า ไฮโดรทัลไซต์สามารถดูดซับได้ดีกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนด์ เนื่องจากไฮโดรทัลไซต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางที่ 4.4) เท่ากับ 236 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนด์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 178 และ 53 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ไฮโดรทัลไซต์จึงมีพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับได้มาก ดังนั้นความจุการดูดซับขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ



รูปที่ 4.21 ผลของเวลาต่อการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน
ด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

4.10 การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

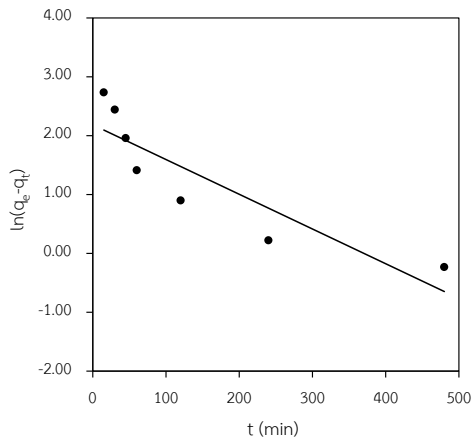
การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ จะศึกษาข้อมูลจากผลของเวลาในการดูดซับ (หัวข้อที่ 4.9.3) โดยใช้แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ คือ สมการอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first order equation) และสมการอันดับสองเทียม (pseudo-second order equation) แสดงดังสมการที่ (4.2) และ (4.3) ตามลำดับ

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (4.2)$$

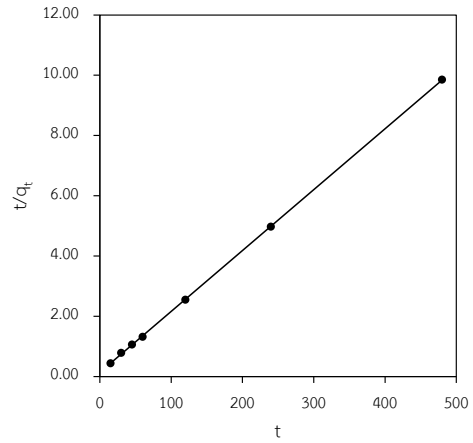
$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4.3)$$

เมื่อ	q_e	คือ ความจุการดูดซับที่สมดุล หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
	k_1	คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (min^{-1})
	k_2	คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับ หน่วย กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)

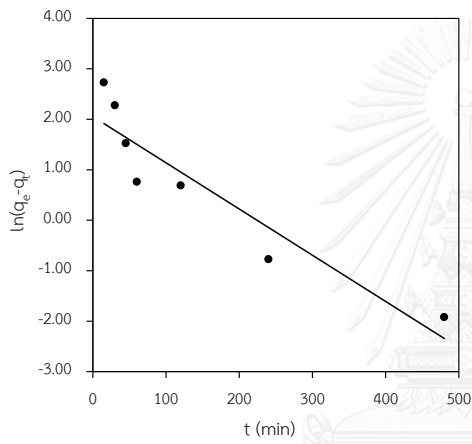
จากสมการที่ (4.2) และ (4.3) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(q_e - q_t)$ กับ t และ t/q_t กับ t จะได้กราฟเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากกราฟ แสดงในตารางที่ 4.19 พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสมการอันดับสองเทียม ใกล้เคียง 1 ซึ่งแสดงว่าการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิดสอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียมมากกว่า แสดงว่าการดูดซับเป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการใช้อิเล็กทรอนิกส์ร่วมกันหรือมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ นอกจากนี้อาจหมายถึงการดูดซับองค์ประกอบที่มีชั้นบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีขั้ว เช่น หมู่ฟังก์ชันชนิดกรดและเบส เป็นต้น เมื่อพิจารณาความจุการดูดซับที่สมดุล (q_e) ของตัวดูดซับทั้งสามชนิดที่ได้จากสมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมเทียบกับจุการดูดซับที่ได้จากการทดลอง พบว่า สมการอันดับสองเทียมจะให้ค่าความจุการดูดซับใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากกว่าสมการอันดับหนึ่งเทียม นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (h) ของตัวดูดซับทั้งสามชนิดจากสมการอันดับสองเทียม พบว่า ดินฟอกสีมีอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นสูงกว่าไฮโดรทัลไซต์และเบนโทไนด์ ตามลำดับ



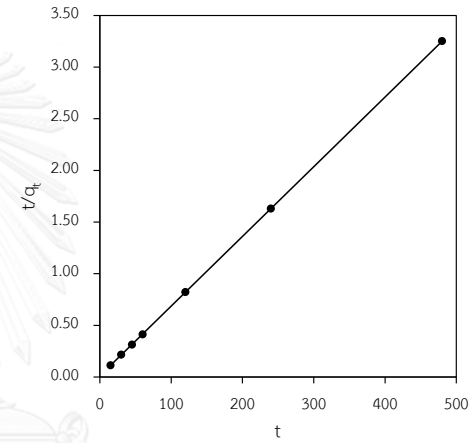
(ก) สมการอันดับหนึ่งเทียม



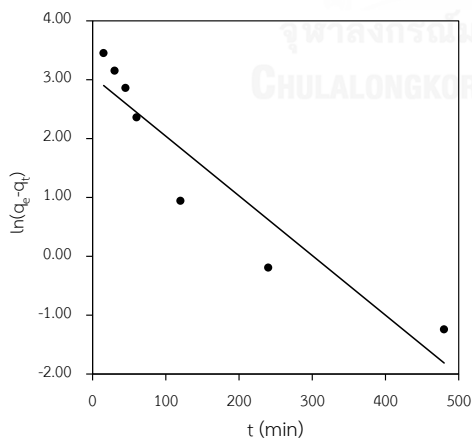
สมการอันดับสองเทียม



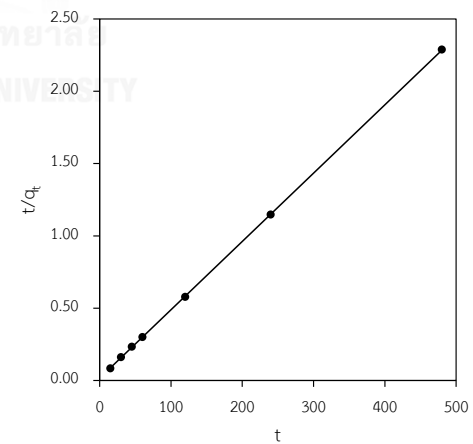
(ข) สมการอันดับหนึ่งเทียม



สมการอันดับสองเทียม



(ค) สมการอันดับหนึ่งเทียม



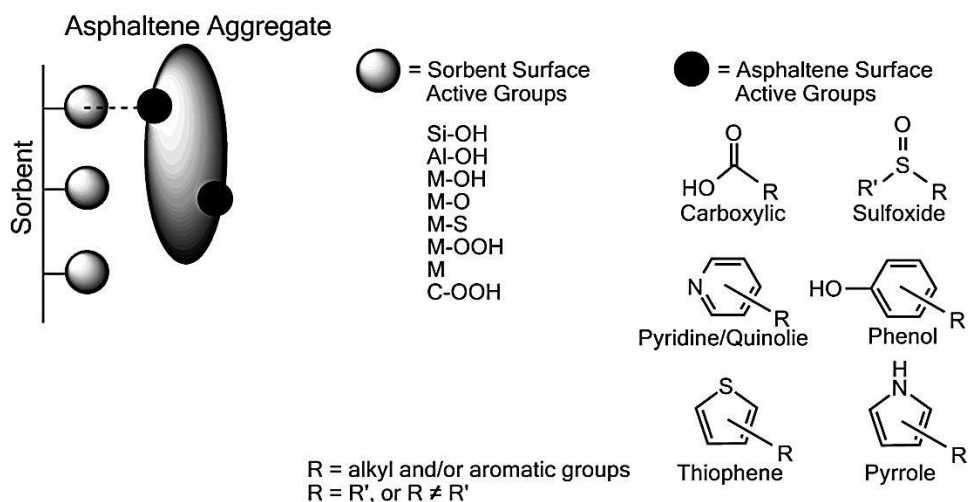
สมการอันดับสองเทียม

รูปที่ 4.22 สมการอันดับหนึ่งเทียมและสมการอันดับสองเทียมของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วย (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินฟอกสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์

ตารางที่ 4.19 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับชนิดต่าง ๆ

ตัวดูดซับ	q_e (exp) (mg/g)	สมการอันดับหนึ่งเทียม			สมการอันดับสองเทียม			
		q_e (cal) (mg/g)	k_1 (min ⁻¹)	R^2	q_e (cal) (mg/g)	k_2 (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	R^2	h (mg g ⁻¹ min ⁻¹)
เบนโทไนด์	49.50	8.87	0.0059	0.7886	49.50	0.0029	0.9999	7.13
ดินพอกสี	147.77	7.78	0.0092	0.8701	149.25	0.0039	1.0000	87.72
ไฮโดรทัลไซต์	210.14	21.17	0.0101	0.8819	212.77	0.0014	1.0000	63.29

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักก่อนปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง
 ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปรี่เซ็นติโดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; อุณหภูมิ; 30 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 การดูดซับแอสฟัลทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว [11]

รูปที่ 4.23 แสดงแผนภาพการดูดซับแอสฟัลทีนบนพื้นผิวของตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว พบว่า แอสฟัลทีนเป็นองค์ประกอบที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส [1] ที่มีหมู่ฟังก์ชัน เช่น ไพริดีน ฟีนอล กรดคาร์บอกซิลิก ไทโอเฟน และซัลฟอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ส่งผลให้แอสฟัลทีนมีพื้นผิวที่ว่องไว (surface activity) ขณะที่เบนโทไนด์และดินฟอกสีเป็นตัวดูดซับที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น Si-OH (hydroxyl silanol) Al-OH (aluminol) Mg-OH และ Fe-OH ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลสามารถเกิดแรงดึงดูดกับอะตอมที่มีความขั้วสูง เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ได้ดี โดยการเกิดผ่านพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) [15] ดังนั้นเบนโทไนด์และดินฟอกสีจึงสามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้

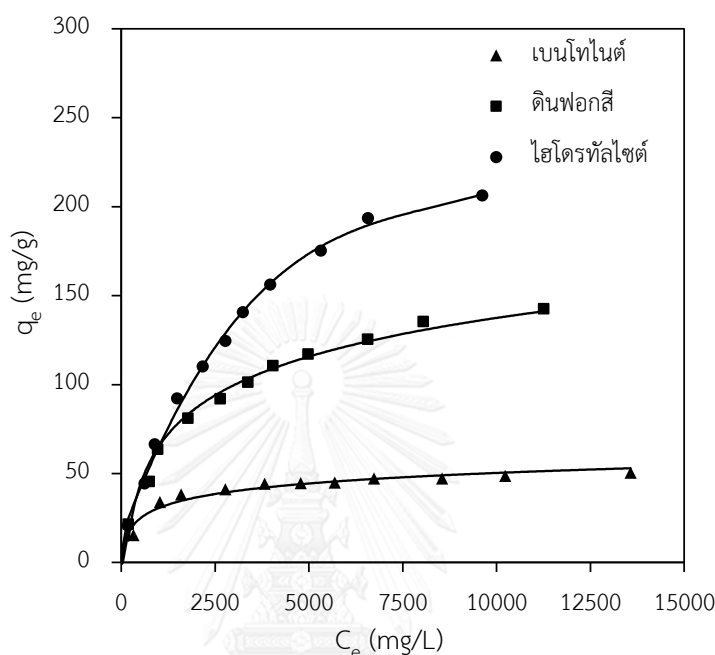
Adams [11] ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแอสฟัลทีน พบว่า การดูดซับแอสฟัลทีนของมอนต์มอริลโลไนต์จะอาศัยแรงดึงดูดระหว่างประจุลบของมอนต์มอริลโลไนต์กับประจุบวกของหมู่เอมีน (amine) ในแอสฟัลทีน ซึ่งประจุลบของมอนต์มอริลโลไนต์เกิดจากการแทนที่ธาตุที่มีประจุบวกน้อยกว่า เช่น แมกนีเซียม ในแผ่นทรงแปดหน้าของอะลูมินา (alumina octahedral sheet) จึงทำให้พื้นผิวของมอนต์มอริลโลไนต์เป็นประจุลบ มอนต์มอริลโลไนต์จึงสามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับแอสฟัลทีนในนอร์มอลเฮปแทน ซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว แรงดึงดูดระหว่างประจุดังกล่าวจะเกิดขึ้นน้อยมาก โดยแรงที่มีบทบาทสำคัญ คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ อันตรกิริยาระหว่างกรดและเบส (acid-base interaction) อันตรกิริยาของสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination complex) อันตรกิริยาระหว่างพันธะ $\pi-\pi$ ($\pi-\pi$ stacking) และพันธะไฮโดรเจน

ดินฟอกสีจะมีจำนวนของหมู่ไฮดรอกซิลมากกว่าเบนโทไนด์ เนื่องจากดินฟอกสีผ่านการล้างด้วยกรด โดยกรดจะทำลายโครงสร้างบางส่วนของแผ่นทรงแปดหน้าของอะลูมินาทำให้ดินฟอกสีมีหมู่ไฮดรอกซิลเพิ่มมากขึ้น ดินฟอกสีจึงสามารถดูดซับแอสฟัลทีนได้ดีกว่าเบนโทไนด์ ส่วนไฮโดรทลไซต์มีโครงสร้างเป็นแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ที่มีสมบัติเป็นเบสแบบลิวอิส (Lewis base) [56] ทำให้พื้นผิวของไฮโดรทลไซต์แสดงความเป็นลบ ซึ่งสามารถดูดซับโมเลกุลของแอสฟัลทีนที่มีประจุโดยรวมเป็นบวก 1 ในตัวทำละลายที่มีขั้วต่ำได้ [57] โดยแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นเป็นแรงดึงดูดเริ่มต้นที่นำไปสู่การดูดซับแอสฟัลทีนแบบชั้นเดียว (monolayer) ซึ่งแอสฟัลทีนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับจะสร้างชั้นฟิล์มเคลือบพื้นผิวของตัวดูดซับไว้ทำให้พื้นผิวของตัวดูดซับแปรสภาพเป็นแบบไม่ชอบน้ำ (hydrophobization) [11, 58] ดังนั้นแอสฟัลทีนจะเกิดการเกาะกลุ่มรวมกัน (asphaltene aggregate) เพื่อเกิดการดูดซับแอสฟัลทีนแบบหลายชั้น (multilayer) โดยการดูดซับแอสฟัลทีนในชั้นที่สองจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่มีขั้ว เช่น อันตรกิริยาระหว่างส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic interaction) และอันตรกิริยาระหว่างพันธะ $\pi-\pi$ ภายในโครงสร้างของ stacks พื้นผิวของแอสฟัลทีนในชั้นที่สองจะแปรสภาพเป็นแบบชอบน้ำ (hydrophilization) ซึ่งการดูดซับในชั้นที่สามจะเกี่ยวข้องกับอันตรกิริยาระหว่างส่วนที่มีขั้ว เช่น อันตรกิริยาระหว่างกรดและเบส อันตรกิริยาของสารประกอบโคออร์ดิเนชัน และพันธะไฮโดรเจน การดูดซับแอสฟัลทีนในชั้นถัดไปจะเกิดสลับแบบนี้ไปเรื่อยๆ

เมื่อพิจารณาชนิดของอันตรกิริยาที่ใช้ในการดูดซับกับอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น (ตารางที่ 4.19) พบว่า ชนิดของอันตรกิริยามีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้น โดยเบนโทไนด์และดินฟอกสีใช้พันธะไฮโดรเจนในการดูดซับแอสฟัลทีนเหมือนกัน แต่เบนโทไนด์มีอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นต่ำกว่า เนื่องจากเบนโทไนด์มีหมู่ไฮดรอกซิลที่ใช้ในการดูดซับแอสฟัลทีนน้อยกว่าดินฟอกสี ขณะที่ไฮโดรทลไซต์ใช้แรงดึงดูดระหว่างประจุในการดูดซับแอสฟัลทีนและมีอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นน้อยกว่าดินฟอกสี ดังนั้นอัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นขึ้นกับชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

4.11 การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับจะใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร เหมือนกับการศึกษาผลของเวลาในการดูดซับ (หัวข้อที่ 4.9.3)



รูปที่ 4.24 ไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟลทินในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ (ปริมาณตัวดูดซับ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

รูปที่ 4.24 แสดงไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟลทินในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับเบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทลไซต์ ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้ความจุการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิดเพิ่มขึ้น โดยความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก หลังจากนั้นความจุการดูดซับจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลของตัวถูกดูดซับมากขึ้น ตัวดูดซับจึงสามารถดูดซับได้น้อยลง เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นที่สมดุลเดียวกัน พบว่า ไฮโดรทลไซต์มีความจุการดูดซับมากกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนต์ เนื่องจากไฮโดรทลไซต์มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 4.4)

การพิจารณาไอโซเทิร์มของการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสามชนิด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์มและสมการฟรันทซ์ลิชไอโซเทิร์ม แสดงดังสมการที่ (4.4) และ (4.5) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L C_e} \quad (4.4)$$

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4.5)$$

เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล หน่วย มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (mg/L)
	K_L	คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ หน่วย ลิตรต่อมิลลิกรัม (L/mg)
	q_m	คือ ความจุการดูดซับแบบชั้นเดียว หน่วย มิลลิกรัมต่อกรัม (mg/g)
	K_F	คือ ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิช หน่วย ลิตรต่อกรัม (L/g)
	$1/n$	คือ ค่าที่แสดงความเข้มข้นของการดูดซับ

จากสมการที่ (4.4) และ (4.5) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/q_e$ กับ $1/C_e$ และ $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.25 โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) และค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากรูป แสดงในตารางที่ 4.20 พบว่า ตัวดูดซับทั้งสามชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของสมการแลงเมียร์ไอโซเทอรัม ใกล้เคียง 1 ซึ่งแสดงว่าการลดปริมาณแอสฟัลท์ในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีความจุการดูดซับแบบชั้นเดียว (q_m) ของเบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เท่ากับ 53.76 129.87 และ 196.08 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับแต่ละชนิด (ตารางที่ 4.4)

Adams [11] ศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแอสฟัลท์ พบว่า ไอโซเทอรัมของการดูดซับแอสฟัลท์สามารถเป็นได้ทั้งแบบแลงเมียร์ไอโซเทอรัมและฟรุนด์ลิชไอโซเทอรัม ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของแอสฟัลท์ โดยที่ความเข้มข้นต่ำเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอรัม ขณะที่ความเข้มข้นสูง (3,000-5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) เป็นการดูดซับแบบฟรุนด์ลิชไอโซเทอรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาไอโซเทอรัมของการดูดซับแอสฟัลท์ในงานวิจัยนี้ที่เป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอรัม โดยความเข้มข้นของแอสฟัลท์ที่ใช้ศึกษามีความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากสารละลายมอลทินที่ได้จากการตกตะกอนแอสฟัลท์บางส่วนออกไปจะมีปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลืออยู่น้อยและการใช้ปริมาณตัวดูดซับมากจึงทำให้ความเข้มข้นของแอสฟัลท์ต่ำ ดังนั้น ไอโซเทอรัมของการดูดซับแอสฟัลท์ในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์ไอโซเทอรัม

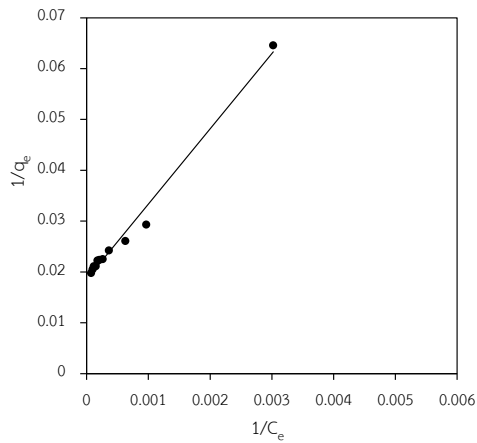
ตารางที่ 4.20 ค่าตัวแปรของไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ตัวดูดซับ	สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม			สมการฟรุนด์ลิชไอโซเทิร์ม		
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	K_F (L/g)	$1/n$	R^2
เบนโทไนต์	53.76	0.0013	0.988	4.2697	0.2732	0.819
ดินฟอกสี	129.87	0.0011	0.981	2.2772	0.4608	0.965
ไฮโดรทัลไซต์	196.08	0.0006	0.984	1.0257	0.5999	0.980

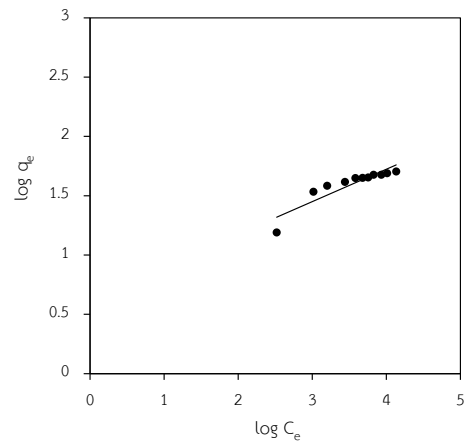
ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส, เวลา; 4 ชั่วโมง

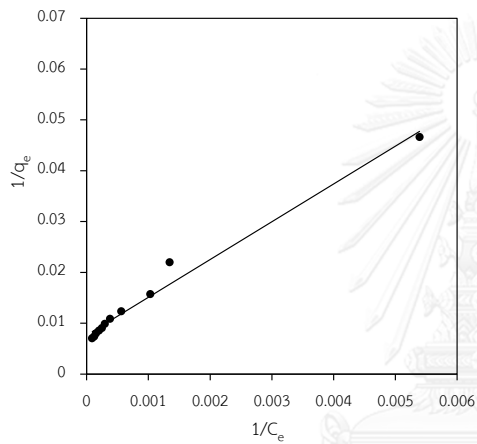




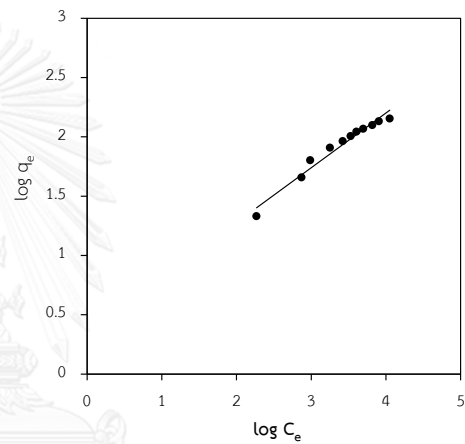
(ก) สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม



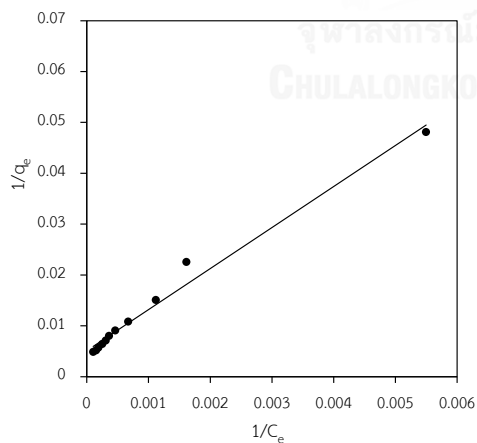
สมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม



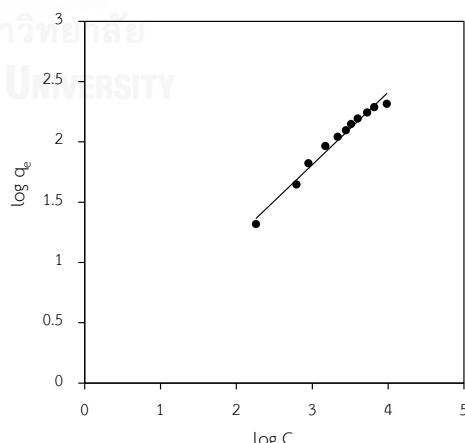
(ข) สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม



สมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม



(ค) สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม

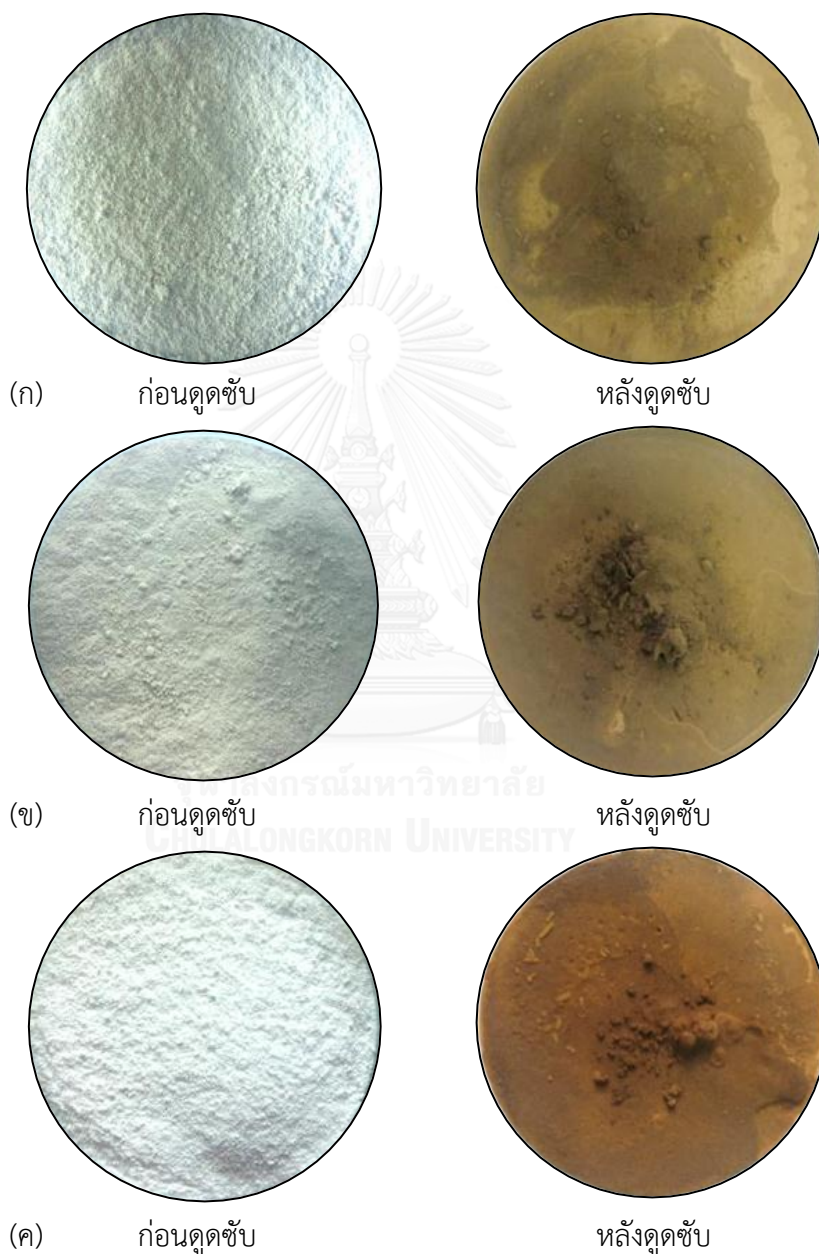


สมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์ม

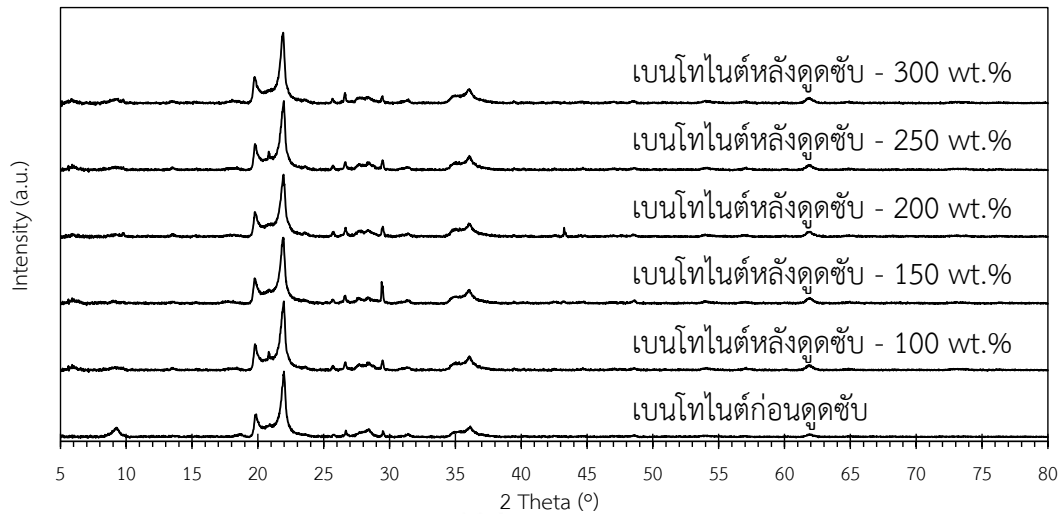
รูปที่ 4.25 สมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์มและสมการฟรอนด์ลิชไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนใน
 งามะตอยที่ผ่านการตกตะกอนด้วย (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินพอกสี และ (ค) ไฮโดรทาลไซด์

4.12 การศึกษาลักษณะของตัวดูดซับหลังการใช้งาน

ลักษณะของเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์หลังดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่า สีของตัวดูดซับทั้งสามชนิดเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล โดยไฮโดรทัลไซต์มีสีเข้มกว่าดินฟอกสีและเบนโทไนด์

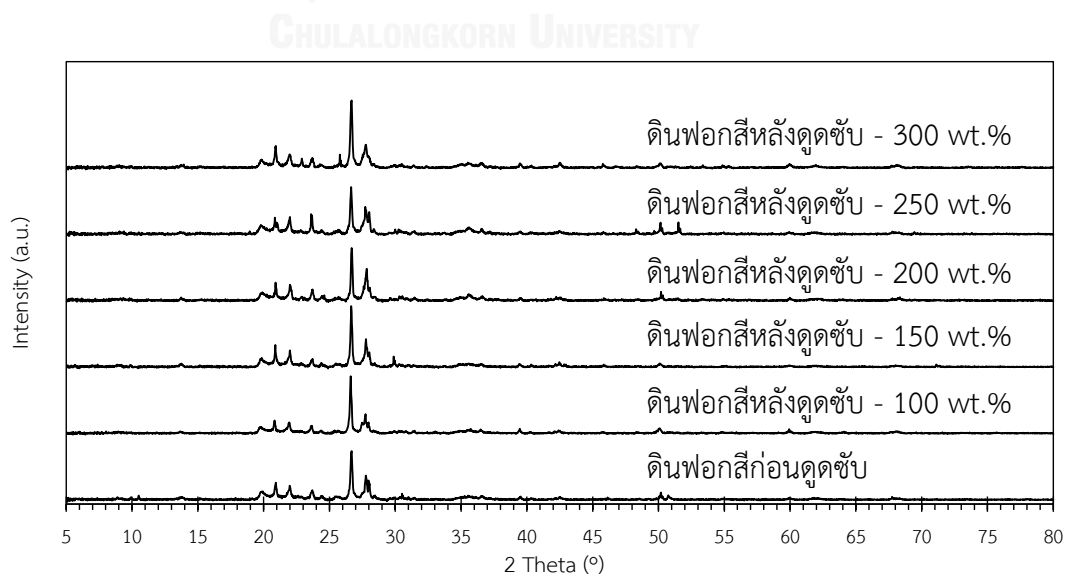


รูปที่ 4.26 สีของ (ก) เบนโทไนด์ (ข) ดินฟอกสี และ (ค) ไฮโดรทัลไซต์ ก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอน

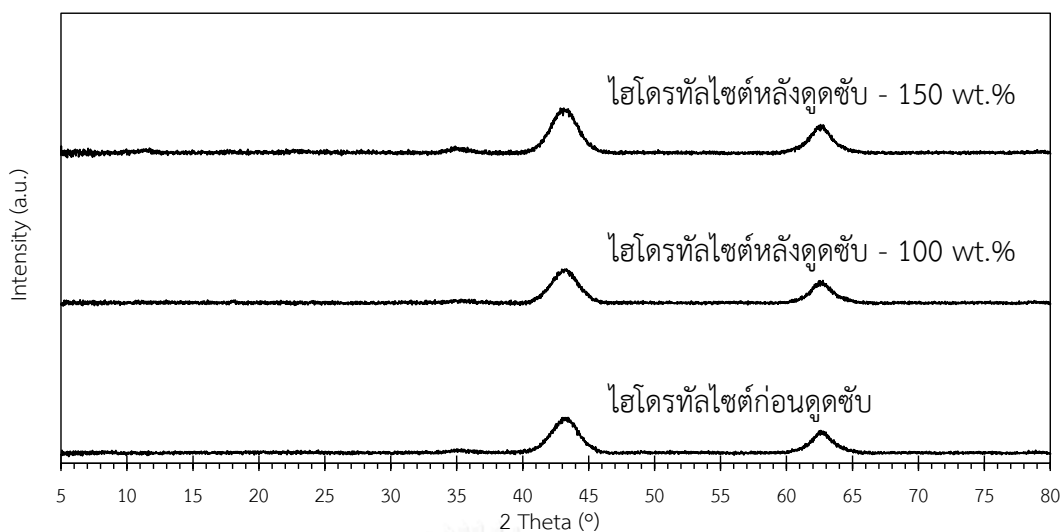


รูปที่ 4.27 รูปแบบ XRD ของเบนโทไนต์ก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ

รูปที่ 4.27 แสดงรูปแบบ XRD ของเบนโทไนต์ก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอย ที่ผ่านการตกตะกอนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ พบว่า โครงสร้างผลึกของเบนโทไนต์หลังการดูดซับ แอสฟัลทีนมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยระนาบผลึก (001) เลื่อนตำแหน่งจาก 2θ ประมาณ 9.2 เป็น 5.9 ดีกรี ระยะห่างระหว่างระนาบผลึกจึงเพิ่มขึ้น เนื่องจากเบนโทไนต์ดูดซับโมเลกุลขนาดเล็ก เข้าไปในช่องว่างภายในทำให้ช่องว่างภายในนั้นเกิดการขยายตัวกลับสู่โครงสร้างผลึกเดิมของเบนโท ไนต์ (ก่อนเผา) หรืออาจเป็นผลมาจากการบวมตัว (swelling) ของเบนโทไนต์ในนอร์มอลเฮปเทน ซึ่งการบวมตัวของเบนโทไนต์ไม่ส่งผลต่อการดูดซับแอสฟัลทีน [11] ขณะที่โครงสร้างผลึกของดิน ฟอกสีหลังการดูดซับแอสฟัลทีน (รูปที่ 4.28) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.28 รูปแบบ XRD ของดินฟอกสีก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ



รูปที่ 4.29 รูปแบบ XRD ของไฮโดรทอลล์ไซด์ก่อนและหลังดูดซับแอสฟัลทีนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ

รูปที่ 4.29 แสดงรูปแบบ XRD ของไฮโดรทอลล์ไซด์ก่อนและหลังการดูดซับแอสฟัลทีนใน อยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ พบว่า โครงสร้างผลึกของไฮโดรทอลล์ไซด์ หลังการดูดซับปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 35.1 และ 43.4 และ 62.6 ดีกรี ซึ่งไม่แตกต่างจาก โครงสร้างผลึกของไฮโดรทอลล์ไซด์ก่อนการดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลของแอสฟัลทีนมีขนาดใหญ่ทำให้ โครงสร้างผลึกของไฮโดรทอลล์ไซด์หลังการดูดซับไม่สามารถกลับคืนสู่โครงสร้างผลึกเดิมของไฮโดรทอลล์ ไซด์ (ก่อนเผา) ดังนั้นการดูดซับแอสฟัลทีนในอยางมะตอยด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิดน่าจะเกิดขึ้นบน พื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากแอสฟัลทีนมีโมเลกุลขนาดใหญ่จึงไม่สามารถ แทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นของโครงสร้างของดินเหนียวได้ [11, 59]

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

การลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยด้วยเทคนิคการตกตะกอนโดยใช้ตัวทำละลาย นอร์มอลเฮปเทนสามารถลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยได้ 68.7 เปอร์เซ็นต์ โดยยางมะตอยที่ได้จะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน เท่ากับ 3.5 70.4 20.9 และ 5.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้การตกตะกอนแอสฟัลทีนด้วย นอร์มอลเฮปเทนยังสามารถลดปริมาณไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และโลหะหนักวานาเดียมพอร์ไฟรินในยางมะตอยได้ อย่างไรก็ตามสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนแอสฟัลทีนยังคงมีสีดำ ไม่แตกต่างจากสีของยางมะตอยเริ่มต้น

การลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับ เบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ พบว่า การใช้ไฮโดรทัลไซต์เป็นตัวดูดซับเหมาะสมต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอย เนื่องจากสามารถลดปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดพอลิไซคลิกแอโรแมติก ซัลเฟอร์ รวมทั้งโลหะหนักวานาเดียมพอร์ไฟรินในยางมะตอยได้ นอกจากนี้สีของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์จะมีสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งให้ค่าความแตกต่างของสีเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทีนมากที่สุด โดยภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยไฮโดรทัลไซต์ คือ การใช้ปริมาณตัวดูดซับที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในตัวทำละลายนอร์มอลเฮปเทน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับจะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน เท่ากับ 6.9 78.2 14.0 และ 0.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับ เบนโทไนต์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ สอดคล้องกับสมการอันดับสองเทียม แสดงว่าการดูดซับเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมี ซึ่งอาศัยอันตรกิริยาเจาะจงระหว่างหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวดูดซับและหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างของแอสฟัลทีน โดยไฮโดรทัลไซต์มีความจุการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยมากที่สุด ซึ่งความจุการดูดซับขึ้นกับพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ แต่อัตราเร็วของการดูดซับในช่วงเริ่มต้นขึ้นกับชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ

การศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ สอดคล้องกับสมการแลงเมียร์ไอโซเทิร์ม ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยมีความสามารถสูงสุดในการดูดซับแบบชั้นเดียวของตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ เท่ากับ 53.76 129.87 และ 196.08 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

การดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์ ดินฟอกสี และไฮโดรทัลไซต์ จะเกิดขึ้นบนพื้นผิวด้านนอกของตัวดูดซับ เนื่องจากโมเลกุลของแอสฟัลทีนมีขนาดใหญ่ไม่สามารถแทรกเข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นของตัวดูดซับได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับ เช่น ความหนืดความแข็ง ความอ่อนตัว ความเหนียว และจุดวาบไฟ เป็นต้น
- 5.2.2 ศึกษาการผสมสีของยางมะตอยที่ผ่านการดูดซับเพื่อผลิตยางมะตอยสี
- 5.2.3 ศึกษาการนำไฮโดรทัลไซต์กลับมาใช้ในการดูดซับใหม่

รายการอ้างอิง

1. Lesueur, D. *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification*. *Advances in colloid and Interface Science*, 2009. 145(1): p. 42-82.
2. Bahaia, H. *Understanding and using asphalt*. 1996 [cited 10 April 2013]; Available from: http://epdfiles.engr.wisc.edu/pdf_web_files/tic/bulletins/Bltn_001_Aspphalt.pdf.
3. Chompreda, P. *Construction materials: Asphalt*. 2010 [cited 10 April 2013]; Available from: <http://mucc.mahidol.ac.th/~egpcp/Handout271/27110%20-%20Asphalt.pdf>.
4. Buckley, J.S. *NMT Asphaltene FAQ: What are resins?* 2010 [cited 18 June 2013]; Available from: <http://www.learningace.com/doc/1747550/fa7e17e4dd1249a88e19c5dabe8452e5/intro-2-asphaltenes>.
5. Chrisman, E., Lima, V. and Menechini, P. *Asphaltenes - Problems and solutions in E&P of Brazilian crude oils*. 2012 [cited 16 July 2013]; Available from: <http://www.intechopen.com/books/crude-oil-emulsions-composition-stability-and-characterization/asphaltenes-problems-and-solutions-in-e-p-of-brazilian-crude-oils>.
6. Murgich, J., Isea, R., Abanero, J. and Strauz, O. *The stability of the asphaltene and resin aggregates and their chemical reactivity*. ACS Div. Fuel Chem. Reprints, 1999. 44(4): p. 746-749.
7. The-Crankshaft Publishing. *Petroleum refining: Upgrading of heavy feeds Part 1*. [cited 1 February 2013]; Available from: <http://what-when-how.com/petroleum-refining/upgrading-of-heavy-feeds-part-1-petroleum-refining>.
8. Rio, Y., Rodriguez-Morgade, M.S. and Torres, T. *Modulating the electronic properties of porphyrinoids: a voyage from the violet to the infrared regions*

- of the electromagnetic spectrum*. Organic & biomolecular chemistry, 2008. 6(11): p. 1877-1894.
9. Priyanto, S., Mansoori, G.A. and Suwono, A. *Measurement of property relationships of nano-structure micelles and coacervates of asphaltene in a pure solvent*. Chemical Engineering Science, 2001. 56(24): p. 6933-6939.
 10. Mullins, O.C. and Sheu, E.Y. *Structures and dynamic of asphaltenes*. in *Proceeding of the International Symposium on Asphaltenes*. New York: Springer, 1998.
 11. Adams, J.J. *Asphaltene adsorption, A literature review*. Energy & Fuels, 2014. 28(5): p. 2831-2856.
 12. Goual, L. *Petroleum Asphaltenes*. 2012 [cited 16 July 2013]; Available from: <http://www.intechopen.com/books/crude-oil-emulsions-composition-stability-and-characterization/petroleum-asphaltenesCrude>.
 13. Peramanu, S., Clarke, P.F. and Pruden, B.B. *Flow loop apparatus to study the effect of solvent, temperature and additives on asphaltene precipitation*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999. 23(2): p. 133-143.
 14. เรืองพรพิสุทธิ์, ว. เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป, 2554.
 15. Taylor, D.R., *Bleaching*. in *Bailey's industrial oil and fat products*, Shahidi, F., Editor. 2005, A John Wiley & Sons, Incorporated: Hoboken, NJ (USA). p. 285-399.
 16. Jairo, T., Ana, C.B., Zeki, N. and João, B.V. *Conducting polymers/layered double hydroxides intercalated nanocomposites*. 2013 [cited 23 May 2013]; Available from: <http://www.intechopen.com/books/materials-science-advanced-topics/conducting-polymers-layered-double-hydroxides-intercalated-nanocomposites>.
 17. Cavani, F., Trifirò, F. and Vaccari, A. *Hydrotalcite-type anionic clays: Preparation, properties and applications*. Catalysis Today, 1991. 11(2): p. 173-301.
 18. Li, Z. *Novel solid base catalysts for Michael additions*. Master's thesis, Department of chemistry, Humboldt-Universität zu Berlin, 2005.

19. Sanchez-Minero, F., Ancheyta, J., Silva-Oliver, G. and Flores-Valle, S. *Predicting SARA composition of crude oil by means of NMR*. Fuel, 2013. 110: p. 318-321.
20. Liu, C., Zhu, C., Jin, L., Shen, R. and Liang, W. *Step by step modeling for thermal reactivities and chemical compositions of vacuum residues and their SFEF asphalts*. Fuel processing technology, 1999. 59(1): p. 51-67.
21. Alvarez, E., Marroquín, G., Trejo, F., Centeno, G., Ancheyta, J. and Díaz, J.A. *Pyrolysis kinetics of atmospheric residue and its SARA fractions*. Fuel, 2011. 90(12): p. 3602-3607.
22. Calles, J.A., Dufour, J., Marugán, J., Peña, J.L., Giménez-Aguirre, R. and Merino-García, D. *Properties of asphaltenes precipitated with different n-alkanes. A Study to assess the most representative species for Modeling†*. Energy & Fuels, 2007. 22(2): p. 763-769.
23. López-Linares, F., Carbognani, L., Sosa-Stull, C., Pereira-Almao, P. and Spencer, R.J. *Adsorption of virgin and visbroken residue asphaltenes over solid surfaces. 1. Kaolin, Smectite clay minerals, and Athabasca siltstone*. Energy & Fuels, 2009. 23(4): p. 1901-1908.
24. Li, J., Wang, C. and Yang, Z. *Decolorization of biopetroleum and analysis of colored components*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008. 47(14): p. 4924-4928.
25. Koyuncu, H., Kul, A.R., Çalimli, A., Yıldız, N. and Ceylan, H. *Adsorption of dark compounds with bentonites in apple juice*. LWT-Food Science and Technology, 2007. 40(3): p. 489-497.
26. Orthman, J., Zhu, H. and Lu, G. *Use of anion clay hydrotalcite to remove coloured organics from aqueous solutions*. Separation and Purification Technology, 2003. 31(1): p. 53-59.
27. Bionis instrumentation scientifique. *IATROSCAN MK-6*. [cited 17 September 2014]; Available from: <http://www.bionissarl.com/bionis/descriptif%20MK6%20s%20E%20lipids.pdf>.
28. Hunter Associates Laboratory, Incorporated. *Applications note: CIE L*a*b* color scale*. 1996 [cited 25 May 2014]; Available from: <http://www.hunterlab.com/an-1005b.pdf>.

29. X-rite, Incorporated. *A guide to understanding color communication*. 2007 [cited 25 May 2014]; Available from: http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001_Understand_Color_en.pdf.
30. สมเดช กนกเมธากุล. สเปกโทรสโกปีในการพิสูจน์โครงสร้างของสารอินทรีย์. ขอนแก่น: ขอนแก่นการพิมพ์, 2547.
31. Hernández, M.A., Asomoza, M., Rojas, F., Solís, S., Salgado, M.A., Portillo, R. and Jiménez, D. *VOCs physisorption on micro-mesoporous solids: Application for dichloroethylene, trichloroethylene, and tetrachloroethylene on SiO₂ and Ag/SiO₂*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2013. 1(4): p. 967–974.
32. World of chemicals. *Chemicals: Toluene*. 2014 [cited 18 October 2014]; Available from: <http://www.worldofchemicals.com/chemicals/chemical-properties/toluene.html>.
33. LSU Macromolecular studies group. *Dipole moment*. 2013 [cited 18 October 2014]; Available from: <http://macro.lsu.edu/howto/solvents/Dipole%20Moment.htm>.
34. Akbarzadeh, K., Alboudwarej, H., Svrcek, W.Y. and Yarranton, H.W. *A generalized regular solution model for asphaltene precipitation from n-alkane diluted heavy oils and bitumens*. *Fluid Phase Equilibria*, 2005. 232(1): p. 159-170.
35. Burke, J. *Solubility Parameters: Theory and Application*. 1984 [cited 18 October 2014]; Available from: <http://cool.conservation-us.org/byauth/burke/solpar/solpar2.html>.
36. Fusová, L. *Modification of the structure of ca-montmorillonite* *GeoScience Engineering*, 2009. LV(1): p. 27-32.
37. นพิตา หิฎฐิระนันท์ และชวลิต งามจรัสศรีวิชัย. เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
38. Meesuk, L. and Vorasith, N. *The use of bentonite to remove dark colour in repeatedly used palm oil*. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2006. 41(6): p. 1189-1200.

39. Kanezaki, E., *Preparation of layered double hydroxides*. in *Clay surfaces: Fundamentals and applications*, Satyanarayana, K.G. and Wypych, F., Editors. 2004, Academic Press: Amsterdam. p. 345-373.
40. Wang, Q., Tay, H.H., Guo, Z., Chen, L., Liu, Y., Chang, J., Zhong, Z., Luo, J. and Borgna, A. *Morphology and composition controllable synthesis of Mg–Al–CO₃ hydrotalcites by tuning the synthesis pH and the CO₂ capture capacity*. *Applied Clay Science*, 2012. 55: p. 18-26.
41. สุขเชษฐ์ สมิตินันท์. จิตกรรม: หลักการใช้สี. 2544; Available from: <http://e-book.ram.edu/e-book/a/AE223/AE223-3.pdf>.
42. แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ชวนพิมพ์ 50 จำกัด, 2552.
43. Orbulescu, J., Mullins, O.C. and Leblanc, R.M. *Surface chemistry and spectroscopy of UG8 asphaltene Langmuir film, part 1*. *Langmuir*, 2010. 26(19): p. 15257-15264.
44. Evdokimov, I.N. and Losev, A.P. *On the nature of UV/vis absorption spectra of asphaltenes*. *Petroleum science and technology*, 2007. 25(1-2): p. 55-66.
45. Krishnamoorthy, K., Kim, G-S. and Kim, S.J. *Graphene nanosheets: ultrasound assisted synthesis and characterization*. *Ultrasonics sonochemistry*, 2013. 20(2): p. 644-649.
46. Mao, Y., Bao, Y., Wang, W., Li, Z., Li, F. and Niu, L. *Layer-by-layer assembled multilayer of graphene/Prussian blue toward simultaneous electrochemical and SPR detection of H₂O₂*. *Talanta*, 2011. 85(4): p. 2106-2112.
47. Huang, P., Xu, C., Lin, J., Wang, C., Wang, X., Zhang, C., Zhou, X., Guo, S. and Cui, D. *Folic acid-conjugated graphene oxide loaded with photosensitizers for targeting photodynamic therapy*. *Theranostics*, 2011. 1: p. 240.
48. Evdokimov, I., Eliseev, N.Y. and Akhmetov, B. *Assembly of asphaltene molecular aggregates as studied by near-UV/visible spectroscopy: I. Structure of the absorbance spectrum*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2003. 37(3): p. 135-143.

49. Dechaine, G.P. *Solubility and diffusion of vanadium compounds and asphaltene aggregates*. Doctor's Philosophy Dissertation, Department of Chemical and Materials Engineering, University of Alberta, 2010.
50. Harada, R., Ōkawa, H. and Kojima, T. *Synthesis, characterization, and distortion properties of vanadyl complexes of octaphenylporphyrin and dodecaphenylporphyrin*. *Inorganica chimica acta*, 2005. 358(3): p. 489-496.
51. Márquez, N., Ysambertt, F. and De La Cruz, C. *Three analytical methods to isolate and characterize vanadium and nickel porphyrins from heavy crude oil*. *Analytica chimica acta*, 1999. 395(3): p. 343-349.
52. Yin, C-X., Tan, X., Müllen, K., Stryker, J.M. and Gray, M.R. *Associative π - π interactions of condensed aromatic compounds with vanadyl or nickel porphyrin complexes are not observed in the organic Phase*. *Energy & Fuels*, 2008. 22(4): p. 2465-2469.
53. Chemistry at Hunter College. *UV-VIS Database*. 2014 [cited 20 November 2014]; Available from: <http://www.hunter.cuny.edu/chemistry/faculty/Mike/drain-group-homepage/research-links/porphyrin-databases/uv-vis-database>.
54. Zhao, X., Liu, Y., Xu, C., Yan, Y., Zhang, Y., Zhang, Q., Zhao, S., Chung, K., Gray, M.R. and Shi, Q. *Separation and characterization of vanadyl porphyrins in Venezuela Orinoco heavy crude oil*. *Energy & Fuels*, 2013. 27(6): p. 2874-2882.
55. จตุพร วิทยาคูณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา: พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
56. Wu, G., Wang, X., Wei, W. and Sun, Y. *Fluorine-modified Mg-Al mixed oxides: a solid base with variable basic sites and tunable basicity*. *Applied Catalysis A: General*, 2010. 377(1): p. 107-113.
57. Kok, W.T. *Application of nonaqueous capillary electrophoresis in asphaltene analysis*. Master's thesis, Department of chemistry, Universiteit van Amsterdam, 2011.
58. Jamilia O. Safieva, Kristofer G. Paso, Ravilya Z. Safieva and Syunyaev, R.Z. *Adsorption and aggregation of asphaltenes in petroleum dispersed systems*.

2012 [cited 16 July 2013]; Available from:

<http://www.intechopen.com/books/howtoreference/crude-oil-emulsions-composition-stability-and-characterization/adsorption-aggregation-relations-in-asphaltene-containing-dispersed-systems>.

59. Cosultchi, A., Cordova, I., Valenzuela, M., Acosta, D., Bosch, P. and Lara, V. *Adsorption of crude oil on Na⁺-montmorillonite*. *Energy & fuels*, 2005. 19(4): p. 1417-1424.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ข้อมูลในการศึกษาการลดปริมาณแอสฟัลท์หินที่เหลือในยางมะตอยด้วยเทคนิคการดูดซับ

ตารางที่ ก.1 การลดปริมาณแอสฟัลท์หินที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับเบนโทไนด์

ปริมาณตัวดูดซับ (wt.%)	การตกตะกอน				การดูดซับ				ปริมาณที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
	น้ำหนัก ยางมะตอย เริ่มต้น (g)	น้ำหนัก ตะกอน (g)	เปอร์เซ็นต์การ ตกตะกอน (wt.%)	น้ำหนักตัวดูดซับ ที่กรองได้ (g)	น้ำหนักยางมะ ตอยที่เหลือ (g)	น้ำหนักรวมของ ยางมะตอย (g)	เปอร์เซ็นต์การ ดูดซับ (wt.%)	น้ำหนักตัวดูดซับ ที่กรองได้ (g)	
100	2.004	0.168	8.36	2.109	1.760	2.035	5.83	2.035	13.71
150	2.016	0.166	8.22	3.156	1.704	2.023	8.28	2.023	15.82
200	2.022	0.170	8.40	4.214	1.646	2.026	11.36	2.026	18.81
250	2.008	0.168	8.36	5.295	1.593	2.048	15.57	2.048	22.62
300	2.007	0.168	8.37	6.420	1.466	2.049	22.54	2.049	29.02

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาณตัวทำละลาย; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น, ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปเทน, อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.2 การลดปริมาณแอสฟัลท์ที่เหลือน้อยลงด้วยยางมะตอยด้วยตัวดูดซับดินฟอสเฟต

ปริมาณตัวดูดซับ (wt.%)	น้ำหนัก				การตกตะกอน				การดูดซับ				ปริมาณที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
	น้ำหนักรวม		น้ำหนักรวมของเปอร์เซ็นต์การ		เปอร์เซ็นต์การ		น้ำหนักรวมของ		น้ำหนักรวมของ		เปอร์เซ็นต์การ		
	ยางมะตอย เริ่มต้น (g)	ตะกอน (g)	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวมของเปอร์เซ็นต์การ	ตกตะกอน (wt.%)	น้ำหนักรวม	น้ำหนักรวมของเปอร์เซ็นต์การ	ยางมะตอย (g)	น้ำหนักรวมของ	น้ำหนักรวมของเปอร์เซ็นต์การ	ดูดซับ (wt.%)		
100	2.023	0.169	8.37	2.309	1.547	2.021	16.46	23.46					
150	2.016	0.171	8.48	3.401	1.465	2.028	21.26	27.94					
200	2.001	0.169	8.43	4.578	1.283	2.023	31.15	36.96					
250	2.017	0.168	8.34	5.707	1.187	2.060	38.10	43.26					
300	2.012	0.169	8.40	6.808	1.085	2.057	43.57	48.31					

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปแทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาณ; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น, ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปแทน, อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ ก.3 การลดปริมาณแอสฟัลต์ในทีเหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับไฮโดรฟิไลเซนต์

ปริมาณตัวดูดซับ (wt.%)	การตกตะกอน				การดูดซับ				ปริมาณที่ลดลงโดยรวม (wt.%)
	น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น (g)	น้ำหนักตะกอน (g)	เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	น้ำหนักตัวดูดซับที่กรองได้ (g)	น้ำหนักยางมะตอยที่เหลือ (g)	น้ำหนักรวมของดูดซับ (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (wt.%)		
100	2.027	0.170	8.39	2.469	1.442	2.074	24.84	31.14	
150	2.020	0.171	8.46	3.646	1.256	2.065	34.52	40.06	

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย: นอร์มอลเฮปแทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ปริมาณตัวดูดซับเทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น, ตัวทำละลาย: นอร์มอลเฮปแทน, อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ภาคผนวก ข

ข้อมูลในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่าน

การตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์

ตารางที่ ข.1 ผลของชนิดตัวทำละลายต่อการลดปริมาณแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไซต์

ตัวทำละลาย	การตกตะกอน				การดูดซับ				เปอร์เซ็นต์ที่ลดลง โดยรวม (wt.%)
	น้ำหนัก ยางมะตอย เริ่มต้น (g)	น้ำหนัก ตะกอน (g)	เปอร์เซ็นต์การ ตกตะกอน (wt.%)	น้ำหนักตัวดูดซับ ที่กรองได้ (g)	น้ำหนักยางมะ ตอยที่เหลือ (g)	น้ำหนักรวมของ ยางมะตอย (g)	เปอร์เซ็นต์การดูด ซับ (wt.%)		
นอร์มอลเฮปเทน	2.020	0.171	8.46	3.646	1.256	2.065	34.52	40.06	
โทลูอีน	2.032	0.170	8.34	3.434	1.435	2.034	23.04	29.46	
ไตรคลอโรเอทิลีน	2.001	0.168	8.37	3.476	1.421	2.058	25.62	31.84	

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย: นอร์มอลเฮปเทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาณ, 1: 50 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง

ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไซต์, ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น; อุณหภูมิ, 30 องศาเซลเซียส; เวลา, 4 ชั่วโมง

ตารางที่ ข.2 ผลของอุณหภูมิต่อการลดปริมาณแอสฟัลท์ในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยไฮโดรทัลไลต์

อุณหภูมิ (°C)	การตกตะกอน				การดูดซับ				เปอร์เซ็นต์ที่ลดลงโดยรวม (wt.%)
	น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น (g)	น้ำหนักตะกอน (g)	เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน (wt.%)	น้ำหนักตัวดูดซับที่กรองได้ (g)	น้ำหนักยางมะตอยที่เหลือ (g)	น้ำหนักรวมของดูดซับ (g)	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ (wt.%)		
30	2.020	0.171	8.46	3.646	1.256	2.065	34.52	40.06	
40	2.008	0.167	8.33	3.617	1.262	2.039	33.15	38.72	
50	2.001	0.169	8.42	3.613	1.244	2.017	33.01	38.65	

ภาวะการตกตะกอน: ตัวทำละลาย; นอร์มอลเฮปแทน, อัตราส่วนของยางมะตอยต่อตัวทำละลาย, 1: 50 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร; อุณหภูมิ, 80 องศาเซลเซียส; เวลา, 1 ชั่วโมง
 ภาวะการดูดซับ: ตัวดูดซับ, ไฮโดรทัลไลต์; ปริมาณตัวดูดซับ, 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับน้ำหนักของยางมะตอยเริ่มต้น; ตัวทำละลาย, นอร์มอลเฮปแทน; เวลา, 4 ชั่วโมง

ภาคผนวก ค

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การตกตะกอน เปอร์เซ็นต์การดูดซับ และปริมาณที่ลดลงโดยรวม

1. การคำนวณเปอร์เซ็นต์การตกตะกอน

$$\text{เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน} = \left(\frac{\text{น้ำหนักตะกอน (g)}}{\text{น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น (g)}} \right) \times 100 \quad (\text{ค.1})$$

2. การคำนวณการดูดซับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \left(\frac{\text{น้ำหนักของตัวดูดซับที่กรองได้ (g) - น้ำหนักตัวดูดซับ (g)}}{\text{น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น (g) - น้ำหนักตะกอน (g)}} \right) \times 100 \quad (\text{ค.2})$$

3. การคำนวณปริมาณที่ลดลงโดยรวม

$$\text{ปริมาณที่ลดลงโดยรวม} = \left(\frac{\text{น้ำหนักตะกอน (g) + (น้ำหนักของแข็ง (g) - น้ำหนักตัวดูดซับ (g))}}{\text{น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น (g)}} \right) \times 100 \quad (\text{ค.3})$$

ตัวอย่างการคำนวณการลดปริมาณแอสฟัลท์หินที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับดินฟอกสีที่ ปริมาณตัวดูดซับ 300 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ ก.2

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง: น้ำหนักยางมะตอยเริ่มต้น 2.012 กรัม

น้ำหนักตะกอน 0.169 กรัม

น้ำหนักตัวดูดซับ 6.005 กรัม

น้ำหนักตัวดูดซับที่กรองได้ 6.808 กรัม

น้ำหนักยางมะตอยที่เหลือ 1.085 กรัม

น้ำหนักรวม 2.056 กรัม

$$\text{เปอร์เซ็นต์การตกตะกอน} = \left(\frac{0.169}{2.012} \right) \times 100 = 8.40 \text{ wt.}\%$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซับ} = \left(\frac{6.808 - 6.005}{2.012 - 0.169} \right) \times 100 = 43.57 \text{ wt.}\%$$

$$\text{ปริมาณที่ลดลงโดยรวม} = \left(\frac{0.169 + (6.808 - 6.005)}{2.012} \right) \times 100 = 48.31 \text{ wt.}\%$$

ภาคผนวก ง
การคำนวณค่าความแตกต่างของสี

การคำนวณค่าความแตกต่างของสี (ΔE)

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (\text{ข.1})$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าความแตกต่างของสีของยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนและการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เทียบกับยางมะตอยเริ่มต้นและมอลทิน ในตารางที่ 4.9

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง: ค่าสี L^* เท่ากับ 8.82

ค่าสี a^* เท่ากับ 5.50

ค่าสี b^* เท่ากับ 14.05

เมื่อ ค่าสี L^* a^* และ b^* ของยางมะตอยเริ่มต้น เท่ากับ 0.18 0.45 0.31ตามลำดับ

ค่าสี L^* a^* และ b^* ของมอลทิน เท่ากับ 0.72 0.58 0.66 ตามลำดับ

ค่าความแตกต่างของสีเทียบกับยางมะตอยเริ่มต้น

$$\Delta E^{\text{ก}} = \sqrt{(0.18-8.82)^2 + (0.45-5.50)^2 + (0.31-14.05)^2} = 17.00$$

ค่าความแตกต่างของสีเทียบกับมอลทิน

$$\Delta E^{\text{ข}} = \sqrt{(0.72-8.82)^2 + (0.58-5.50)^2 + (0.66-14.05)^2} = 16.40$$

ภาคผนวก จ

ข้อมูลในการศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทิร์มของการดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์และไอโซเทิร์มของการดูดซับด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร แสดงดังตารางที่ จ.1 และ จ.2 ตามลำดับ

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

เวลา (นาทีก)	ค่าการดูดกลืนแสง		
	เบนโทไนต์	ดินฟอกสี	ไฮโดรทัลไซต์
0	1.938	1.977	1.947
15	1.820	1.518	1.326
30	1.806	1.498	1.298
45	1.791	1.480	1.277
60	1.781	1.472	1.254
120	1.775	1.471	1.226
240	1.771	1.466	1.220
480	1.769	1.465	1.218
1140	1.766	1.464	1.217

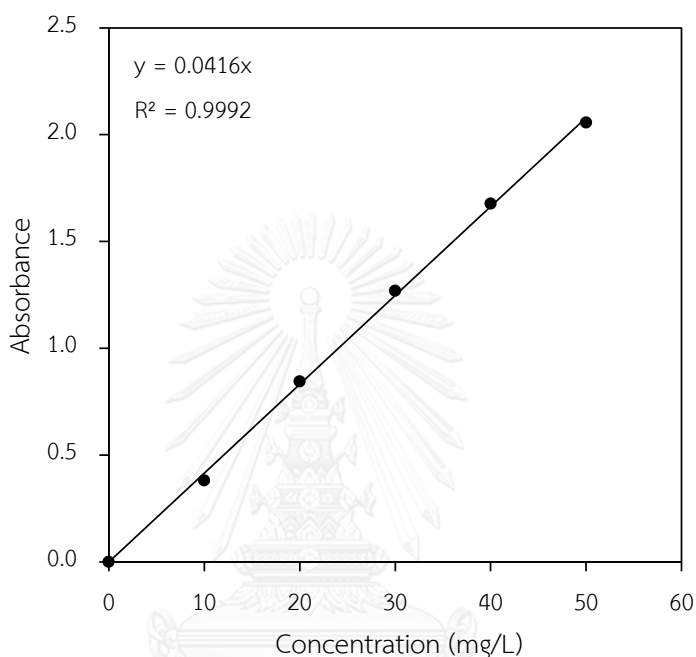
ตารางที่ จ.2 ข้อมูลการศึกษาไอโซเทิร์มของการดูดซับแอสฟัลทีนในยางมะตอยที่ผ่านการตกตะกอนโดยใช้เทคนิคการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ

ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง		
	เบนโทไนต์	ดินฟอกสี	ไฮโดรทัลไซต์
1000	0.046	0.026	0.025
2000	0.252	0.103	0.086
3000	0.221	0.134	0.124
4000	0.385	0.247	0.207
5000	0.530	0.365	0.301
6000	0.664	0.468	0.385
7000	0.789	0.561	0.450
8000	0.934	0.691	0.551
10000	1.185	0.911	0.738
12000	1.419	1.116	0.912
15000	1.882	1.461	1.334

ภาคผนวก ฉ

การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายมอลทินก่อนและหลังการดูดซับ

การคำนวณความเข้มข้นของสารละลายมอลทินก่อนและหลังการดูดซับจะอาศัยเส้นโค้งสอบเทียบของสารละลายมอลทิน ในรูปที่ ฉ.1 ซึ่งได้จากเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตเมตรี ที่ความยาวคลื่น 234 นาโนเมตร



รูปที่ ฉ.1 เส้นโค้งสอบเทียบของสารละลายมอลทิน

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายมอลทินก่อนและหลังการดูดซับด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เฟอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอลทินเริ่มต้น เท่ากับ 1.947

ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมอลทินหลังการดูดซับที่เวลา

480 นาที เท่ากับ 1.218

ความเข้มข้นของสารละลายมอลทินก่อนและหลังการดูดซับที่เวลา 480 นาที

$$C_0 = \left(\frac{1.947}{0.0416} \right) \times 300 = 14041 \text{ mg / L}$$

$$C_{480 \text{ min}} = \left(\frac{1.218}{0.0416} \right) \times 300 = 8784 \text{ mg/L}$$

ภาคผนวก ข

การคำนวณความจุการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอย

การคำนวณความจุการดูดซับสารตัวอย่าง ณ เวลาใดๆ (q_t)

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ	C_0	คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
	C_t	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ณ เวลาใดๆ หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
	V	คือ ปริมาตรของสารละลาย หน่วย ลิตร (L)
	m	คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

เมื่อระบบเข้าสู่สมดุล (q_e) โดย q_t จะถูกเปลี่ยนเป็น q_e และ C_t เป็น C_e

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อ	C_e	คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)
-------	-------	--

ตัวอย่างการคำนวณความจุการดูดซับแอสฟัลทีนที่เหลือในยางมะตอยด้วยตัวดูดซับไฮโดรทัลไซต์ที่ปริมาณตัวดูดซับ 150 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง: ความเข้มข้นของสารละลายมอลทินเริ่มต้น (C_0) เท่ากับ 14041 มิลลิกรัมต่อลิตร
ความเข้มข้นของสารละลายมอลทินหลังการดูดซับที่เวลา 480 นาที ($C_{480 \text{ min}}$) เท่ากับ 8784 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความจุการดูดซับที่เวลา 480 นาที

$$q_{480 \text{ min}} = \left(\frac{14041 - 8784}{3.007} \right) \times 0.120 = 209.79 \text{ mg/g}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสาวินี วุฒิสกุลวงศ์ เกิดวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ.2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค ปีการศึกษา 2555 และได้เข้าร่วมเสนอผลงานโครงการประชุมวิชาการนานาชาติของ the 23rd International Symposium on Chemical Reaction Engineering (ISCRE 23) and the 7th Asia Pacific Chemical Reaction Engineering Symposium (APCRE 7), September 7-10, 2014 at Centara Grand and Bangkok Convention Centre, Bangkok, Thailand ชื่อผลงานที่นำเสนอคือ Comparative study of bentonite and bleaching earth in adsorption of asphaltene

