

วารสารปริทัศน์

2.1 น้ำมันปิโตรเลียม (petroleum oil)

น้ำมันปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ โดยจะรวมตัวกันทางเคมีเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนั้นยังมีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจนปนอยู่เล็กน้อย

2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม (1, 2) ส่วนใหญ่คือ ไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีหลายชนิดแตกต่างกันตามโครงสร้างคือ พาราฟิน (paraffin), โอลิฟิน (olefin), แนฟทีน (naphthene), แอโรมาติก (aromatic), ไดโอลิฟิน (diolefin) และแอเซทิลีน (acetylene)

พาราฟิน มีสูตรทั่วไปคือ $C_n H_{2n+2}$ เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) ที่มีเสถียรภาพ (stability) สูง มีอะตอมของคาร์บอนที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นลูกโซ่ด้วยพันธะเดี่ยว (single bond) โดยมีไฮโดรเจนล้อมรอบดังรูปที่ 2.1 a และ f พยางค์ท้ายของชื่อออกเสียงว่าแอน (-ane) เช่น มีเทน (methane) อีเทน (ethane) เฮกเซน (hexane) และเฮกซะเดเคน (hexadecane) ที่อุณหภูมิห้องไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับกรดฟumingซัลฟูริก (fuming sulfuric acid) สารละลายต่างเข้มข้น กรดไนตริก และกรดโครมิกยกเว้นพวกที่ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมตติยภูมิ (tertiary carbon atom) แต่จะทำปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ กับคลอรีนภายใต้แสงแดด และจะทำปฏิกิริยากับคลอรีนและโบรมีนถ้ามีตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมักจะเป็นปฏิกิริยาแบบแทนที่ (substitution) อะตอมของไฮโดรเจน

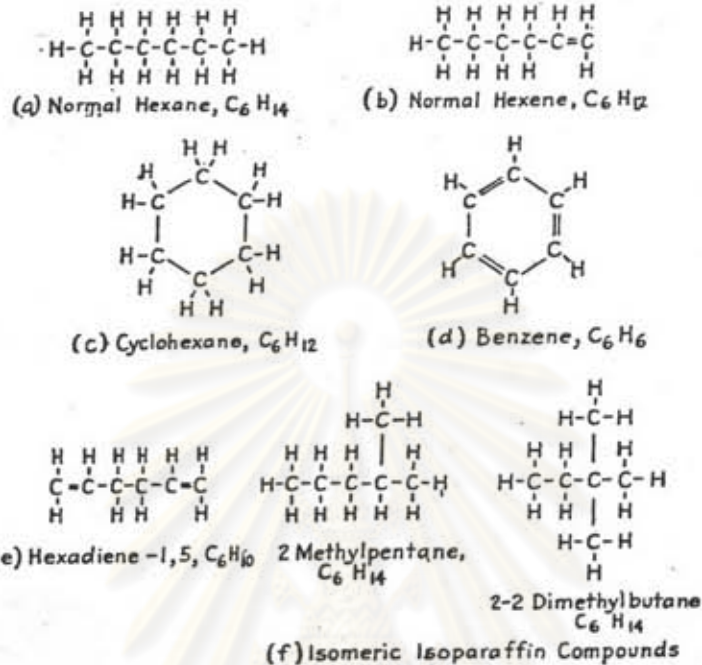
โอลิฟิน มีสูตรทั่วไปคือ $C_n H_{2n}$ พยางค์ท้ายของชื่อออกเสียงว่าอิน (-ene) เช่น เอทิลีน โพรพิลีน และบิวทีน เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) กล่าวคือ อะตอมคาร์บอน 2 อะตอมจับกันด้วยพันธะคู่ (double bond) ดังรูปที่ 2.1 b ทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นไม่อิ่มตัว ในสภาวะปกติสามารถจะรับอะตอมไฮโดรเจนหรือธาตุอื่นได้อีก โอลิฟินสามารถเปลี่ยนเป็นพาราฟินได้โดยทำปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) โดยการให้ไฮโดรเจน 2 อะตอมสร้างพันธะกับคาร์บอน 2 อะตอมที่จับกันด้วยพันธะคู่เปลี่ยนเป็นพันธะเดี่ยว โอลิฟินสามารถทำปฏิกิริยาและละลายได้ในกรดกำมะถัน (sulfuric acid) นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดี เช่น คลอรีน โบรมีน และกรดเกลือ (hydrochloric acid) โอลิฟินที่มีจุดเดือดต่ำ ๆ นั้นส่วนมากจะไม่มีอยู่ในน้ำมันดิบ แต่จะพบมากในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคะตะลิติก แครกกิง (catalytic cracking)

แนฟทีน มีสูตรทั่วไปคือ C_nH_{2n} เหมือนโอเลฟิน แต่มีคุณสมบัติแตกต่างกันมาก โดยแนฟทีนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวที่มีลักษณะเป็นวงแหวน (ring หรือ cyclic) หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งมาต่อกันอยู่ ดังรูปที่ 2.1 c ในขณะที่โอเลฟินเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่เป็นโซ่เปิด (open-chain) การเรียกชื่อกลุ่มนี้ในอดีตเรียกเป็นเมทิลีน เช่น เทตระเมทิลีน (tetramethylene) เพนทาเมทิลีน (pentamethylene) และเฮกซะเมทิลีน (hexamethylene) แต่ในปัจจุบันเรียกว่า ไซโคลบิวเทน (cyclobutane) ไซโคลเพนเทน (cyclopentane) และ ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) แนฟทีนไม่ละลายในกรดกำมะถัน (sulfuric acid)

แอโรมาติก บางครั้งเรียกเป็นอนุกรมเบนซีน (benzene series) ถ้าเป็น แอลคิลเบนซีน (alkyl benzene) มีสูตรทั่วไปคือ C_nH_{2n-6} แอโรมาติกเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งแบบ รวมตัวหรือแทนที่ขึ้นอยู่กับสภาวะของปฏิกิริยานั้น มีน้ำมันปิโตรเลียมเพียงไม่กี่แหล่งที่มีแอโรมาติก จุดเดือดต่ำ ซึ่งได้แก่ โทลูอิน (toluene) และเบนซีน (benzene) ดังรูปที่ 2.1 d

ไดโอเลฟิน มีสูตรทั่วไปคือ C_nH_{2n-2} มีลักษณะเหมือนกับโอเลฟิน แต่มี ไฮโดรเจนน้อยกว่า 2 อะตอม หรือมีพันธะคู่อยู่ 2 พันธะในแต่ละโมเลกุลดังรูปที่ 2.1 e ทำให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมี diolefin มักจะเกิดการรวมตัวหรือพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) กับโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวเกิดเป็นของแข็งที่มีลักษณะคล้ายยางเหนียว (gum) และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไดโอเลฟินและ gum จะไม่ค่อยพบในน้ำมันดิบ แต่มักจะพบอยู่ใน untreated cracked gasoline สามารถแยกออกได้ด้วยกรดกำมะถัน (sulfuric acid)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 สูตรโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน (2)

2.1.2 ลำดับส่วนปิโตรเลียม (petroleum fraction) (3, 4) น้ำมันปิโตรเลียมที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของโลก จะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ แตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น Pennsylvania crudes มีพาราฟินิกไฮโดรคาร์บอนมาก ในขณะที่ California crudes มีแนฟทีน และแอโรมาติกมาก (5) ไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ มีน้ำหนักโมเลกุล และจุดเดือดต่างกันมาก จึงทำให้องค์ประกอบบางส่วนเดือดที่อุณหภูมิห้อง และบางส่วนไม่สามารถกลั่นได้ถึงแม้ว่าการกลั่นทำภายใต้สูญญากาศ (vacuum distillation) ก็ตาม จึงมีการแบ่งผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมออกตามน้ำหนักโมเลกุล ช่วงจุดเดือดหรือความหนืดดังนี้

แก๊สปิโตรเลียม (petroleum gas) ช่วงจุดเดือดต่ำกว่า $20^{\circ}C$ และประกอบด้วย $CH_4 - C_4H_{10}$ ใช้เป็นเชื้อเพลิงและแก๊สหุงต้ม

ปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum) หรือปิโตรเลียมอีเทอร์ (petroleum ether) ช่วงจุดเดือด $20-60^{\circ}C$ ประกอบด้วย $C_2 - C_4$ ใช้เป็นตัวทำละลาย

น้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซลีน (gasoline) ช่วงจุดเดือด $40-205^{\circ}C$

จุดไหลเทต่ำ ประกอบด้วย $C_{10} - C_{15}$ และไฮโคลแอลเคน เป็นของเหลวไม่มีไขปน (wax free liquid) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (internal combustion engine)

น้ำมันก๊าดหรือเคโรซีน (kerosene) เป็นของเหลวใสไม่มีไขปน ช่วงจุดเดือด $175 - 325^{\circ}\text{C}$ ประกอบด้วย $C_{12} - C_{18}$ และไฮโคลแอลเคน มีกลิ่นฉุน ใช้จุดให้ความสว่างและเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ไอพ่น (jet engine)

น้ำมันแก๊ส (gas oil) ช่วงจุดเดือดอยู่ระหว่างเคโรซีนกับน้ำมันหล่อลื่นคือ $230 - 243^{\circ}\text{C}$ ประกอบด้วยไฮพาราฟินที่มีจุดเดือดต่ำปริมาณเล็กน้อย

น้ำมันดีสทิลเลชันเบา (light distillates) หรือน้ำมันเตาใสเบาผลิตจากหน่วยกลั่นสูญญากาศ มีจุดเดือด ความหนืด และจุดไหลเทสูง ประกอบด้วยไฮพาราฟินปริมาณพอควร branched-paraffin ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ส่วน normal paraffin จะเป็นของแข็งที่เรียกว่าไฮพาราฟิน (paraffin wax) ในทางพาณิชย์เรียกว่า macrocrystalline wax เพราะไฮพาราฟินจะตกผลึกออกจากสารละลายเป็นรูปเข็มขนาดใหญ่ (large needle) หรือเพลท (plate)

น้ำมันดีสทิลเลชันหนัก (heavy distillates) หรือน้ำมันเตาใสหนักผลิตจากหน่วยกลั่นสูญญากาศหรือหน่วยกลั่นไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam distillation) โดยปกติประกอบด้วยไฮเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นไฮที่อยู่ระหว่างไฮพาราฟินกับไฮไมโครคริสตัลไลน์ (microcrystalline waxes) หรือไฮที่เป็นกิ่งสาขาหรือวงแหวน และจะตกผลึกแยกตัวออกจากสารละลายในรูปผลึกขนาดเล็ก (smaller crystal)

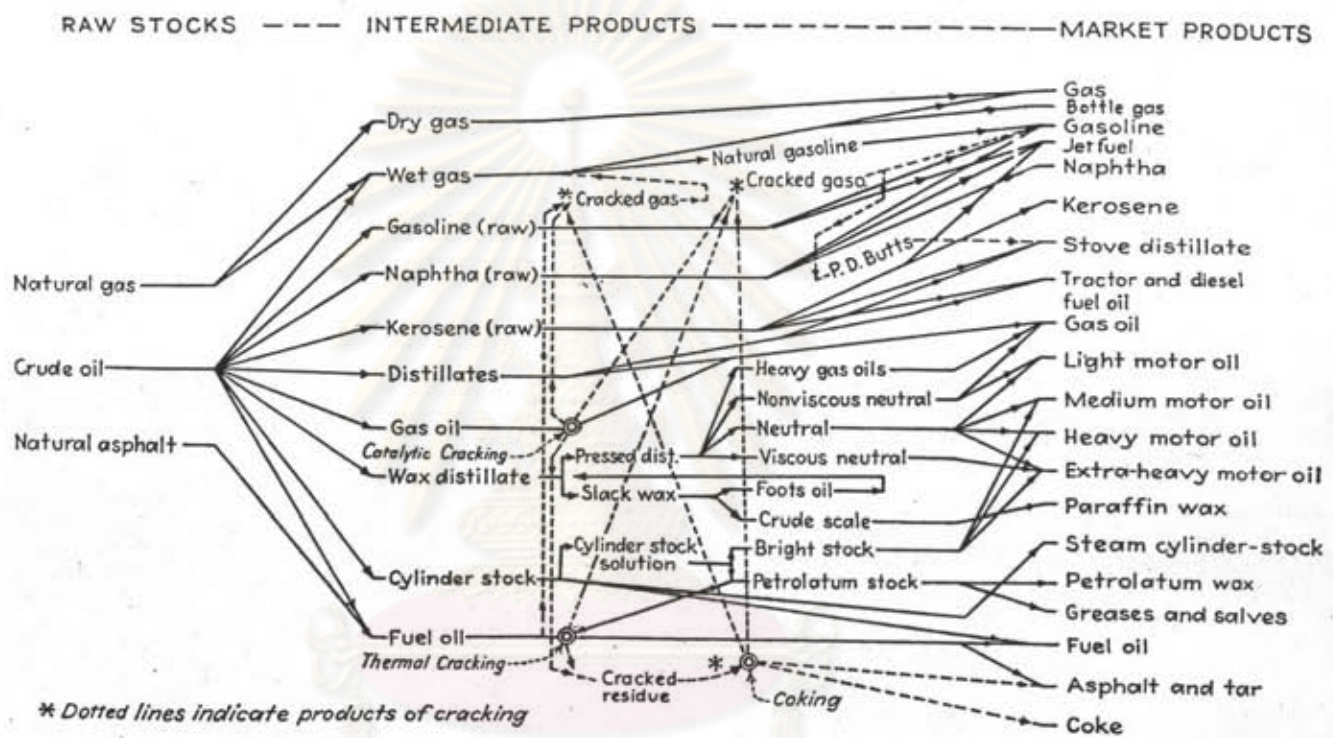
เรซิดิว (residues) มีความหนืดสูง ประกอบด้วยน้ำมันที่หนืด (viscous oil) ไฮไมโครคริสตัลไลน์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงซึ่งเป็นโมเลกุลที่สลับซับซ้อน เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้องและตกผลึกออกมาในรูปผลึกขนาดเล็ก และยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (asphalt)

นอกจากนี้ยังแยกได้อีกสองส่วนตามจุดประสงค์ของโรงกลั่นคือ

น้ำมันดีเซล (diesel oil) ช่วงจุดเดือด $250 - 400^{\circ}\text{C}$ ประกอบด้วย $C_{15} - C_{20}$ และไฮโคลแอลเคน ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

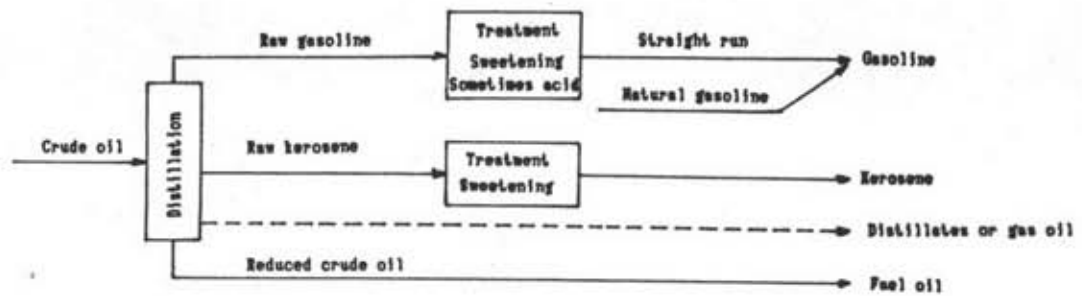
น้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil) ช่วงจุดเดือดสูงกว่า 300°C ประกอบด้วย $C_{18} - C_{22}$ และไฮโคลแอลเคน ใช้เป็นสารหล่อลื่น

นอกจากนี้ปริมาณและชนิดของลำดับส่วนปิโตรเลียมที่แยกได้ยังขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของน้ำมันดิบ ตลอดจนกระบวนการที่ใช้แยกลำดับส่วนปิโตรเลียม ดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 และอาจกล่าวได้ว่าไม่มีโรงกลั่นน้ำมันที่มีลักษณะการทำงาน of กระบวนการต่าง ๆ เหมือนกันทุกประการ

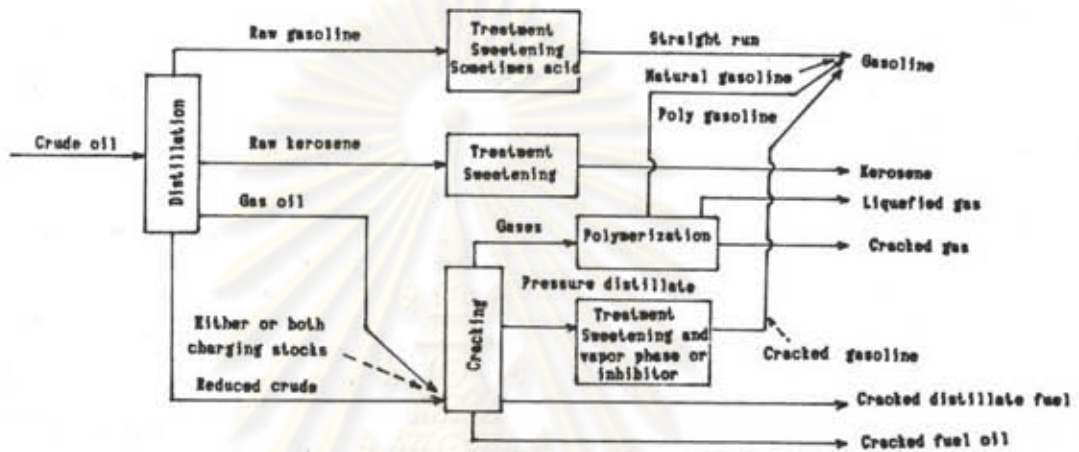


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

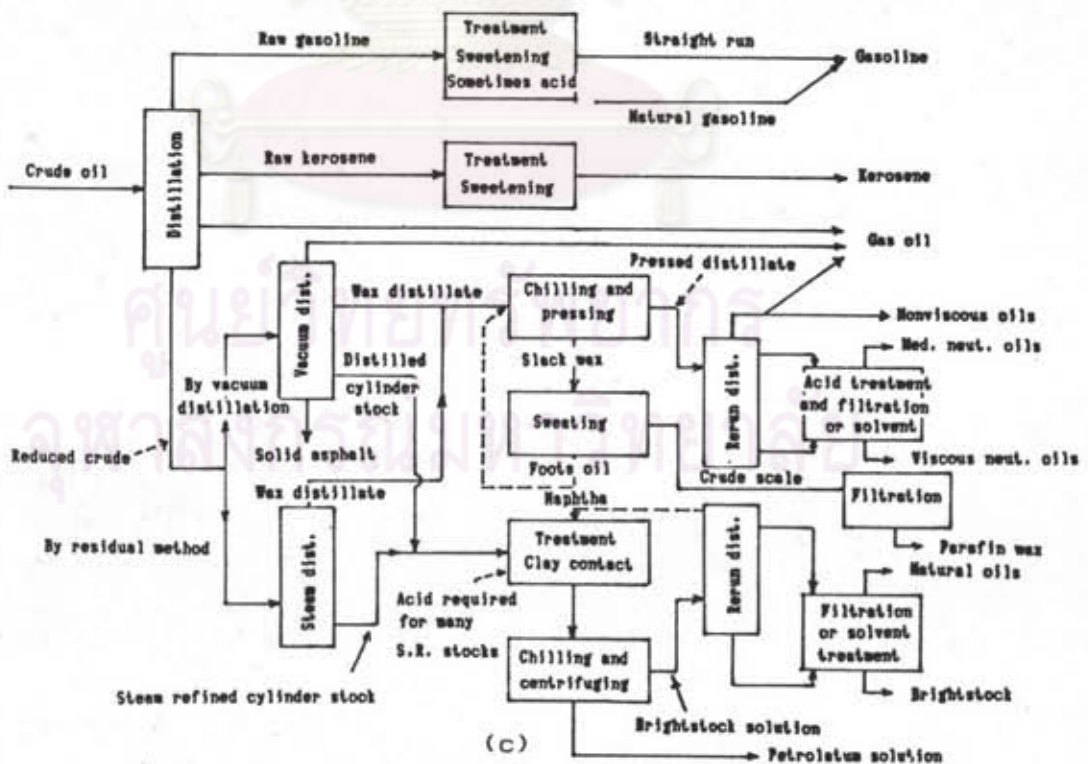
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลิตภัณฑ์สุดท้าย intermediate และสารตั้งต้น (2)



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.3 แบบต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตน้ำมัน (2)

(a) Topping or skimming processing

(b) cracking processing

(c) lubricating oil processing

2.1.3 โรงกลั่นน้ำมันฝาง (6) ทำการกลั่นน้ำมันดิบได้ในอัตรา 1,000 บาเรลต่อวันและสามารถเพิ่มได้ถึง 1,500 บาเรลต่อวัน เมื่อเปลี่ยนเตาให้ความร้อนน้ำมันดิบก่อนเข้าหอกลั่น ผลผลิตที่ได้ที่กลั่นได้ในปัจจุบันสรุปได้ดังนี้

น้ำมันสเตอร์ทรีน	ประมาณ 6%
น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว	ประมาณ 26%
น้ำมันเตาไฮเบา	ประมาณ 17%
น้ำมันเตาไฮหนัก	ประมาณ 14%
น้ำมันเตาหนัก	ประมาณ 37%

โรงกลั่นน้ำมันฝางเมื่อได้รับการตัดแปลงตามความจำเป็น เพื่อกลั่นน้ำมันดิบแม่สุ่นหลวง แล้วประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

หน่วยกลั่นที่บรรยากาศ (topping distillation unit)

หน่วยกลั่นที่สุญญากาศ (vacuum distillation unit)

หน่วยฟอกน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline treating unit)

หน่วยผสมน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline blending unit)

หน่วยกำลัง (power unit) และหน่วยประกอบต่าง ๆ มีโรงสูบน้ำมัน

และถังเก็บน้ำมัน (pump house and tank farm), หอทำให้เย็น (cooling tower), หน่วยหม้อน้ำ (boiler unit), หน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ (water treatment unit), หน่วยไฟฟ้า (electric generating unit), หน่วยเครื่องอัดลมและเครื่องวัด (air compressor and instrument air unit) และห้องควบคุม (control room)

น้ำมันดิบจากหลุมแม่สุ่นหลวงจะถูกส่งมาโรงกลั่นโดยรถแทงค์ เข้าแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบในหน่วยแยกซึ่งใช้ Tret-O-lite เป็น demulsifier น้ำมันดิบจะถูกแยกน้ำให้เหลือได้ไม่เกิน 0.4% แล้วจึงส่งเข้าอุ่นใน pre-heat exchanger โดยใช้ น้ำมันร้อนจากหอกลั่นสุญญากาศมาอุ่นจนถึงอุณหภูมิ 120 °ซ แล้วจึงส่งต่อไปให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 340 °ซ ใน atmospheric heater (H-1) จึงใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงแล้วถูกส่งไปกลั่นที่หอกลั่นบรรยากาศ ซึ่งมีความดันภายใน 1 บรรยากาศ ในหน่วยกลั่นบรรยากาศจะกลั่นได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิด คือ น้ำมันสเตอร์ทรีน น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล

น้ำมันดิบที่กลั่นเอาผลิตภัณฑ์เบา 3 ชนิดข้างต้นออกไปแล้ว จะแยกตัวตกสู่กันหอบเรียกน้ำมันส่วนนี้ว่า รีดิวิซครูด (reduced crude) จากกันหอกลั่นบรรยากาศจะถูกส่งผ่าน vacuum heater (H-2) ซึ่งใช้น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนเช่นเดียวกับ H-1 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 365 °ซ แล้วจึงส่งเข้ากลั่นในหอกลั่นสุญญากาศ ภายในหอรักษาความดันให้ต่ำกว่า

บรรยากาศ 25 นิ้วปรอท วิติวส์ครูดเมื่อผ่านหน่วยกลั่นสุญญากาศจะได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิดคือ น้ำมัน
ดิสทิลเลทชนิดเบา น้ำมันดิสทิลเลทชนิดหนัก และน้ำมันเตาหนัก

ผลิตภัณฑ์น้ำมันสเตอร์ทรีนจะถูกส่งไปฟอกในหน่วยฟอกแก๊สโซลีนเพื่อขจัดพวกสาร
ประกอบกำมะถัน (mercaptan) โดยทำปฏิกิริยากับ caustic soda solution ในหอฟอก
เรียก แก๊สโซลีนที่ฟอกแล้วว่า sweet gasoline ส่งเก็บในถังในหน่วยผสมแก๊สโซลีน เพื่อรอการ
ผสมแก๊สโซลีนกับสารเพิ่มออกเทน (tetraethyllead, TEL) ในอัตราส่วน 3 มิลลิลิตร TEL
ต่อน้ำมันแก๊สโซลีน 1 แกลลอน นอกจากนี้ยังเติมสารต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ เช่น เติม
metal deactivator เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับโลหะ เติม antioxidant
เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับอากาศกลายเป็นยางเหนียว และเติมสีตามค่าออกเทน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สมบัติของน้ำมันดิบแหล่งแม่สุหลวง (6)

สมบัติ	น้ำมันดิบแหล่งแม่สุหลวง
Sp.gr @ 60/60 °F	0.8900
API gravity @ 60 °F	30.8
Flash point °F	<32
Pour point °F	95
Saybolt universal viscosity @	
100 °F	waxy
130 °F	-
150 °F	67.0
180 °F	55.8
Product fraction %	
gasoline	7
kerosene	8
gas oil	12.5
reduced crude	72.5
Sulfur %	0.18
Base	paraffin crude

2.2 ไช (waxes)

ไช คือ ของผสมหรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีสมบัติเหมือนพวก thermoplastic แต่การจัดเรียงตัวของโมเลกุลมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จึงไม่จัดอยู่ในประเภทพลาสติก สมบัติโดยทั่วไป คือ กั้นน้ำ ผิวเรียบ ไม่เป็นพิษ ติดไฟได้ ไม่นำไฟฟ้า ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์

2.2.1 ชนิดของไข (7,8) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

ไขธรรมชาติ (natural waxes) ได้แก่

(1) ไขที่ได้จากสัตว์ เช่น bee wax, lanolin, shellac wax และ chinese insect wax

(2) ไขที่ได้จากพืช เช่น carnauba, candelilla, bayberry, sugar cane

(3) ไขเกลือแร่ (mineral waxes) แยกออกเป็น

- fossil หรือ earth wax เช่น ozokerite, ceresin และ montan wax

- ไขปิโตรเลียม (petroleum waxes) เช่น ไชพาราฟิน (paraffin wax), ไขไมโครคริสตัลไลน์ (microcrystalline wax)

ไขสังเคราะห์ (synthetic wax) ได้แก่

(1) ethylenic polymers และ polyol ether-esters เช่น carbowax, sorbitol

(2) chlorinated naphthalenes เช่น halo wax

(3) hydrocarbon type

2.2.2 ไขปิโตรเลียม (8, 9) คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 90 °F แบ่งได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของผลึก คือ

(1) ไชพาราฟิน ประกอบด้วย normal หรือ straight-chain hydrocarbon เป็นส่วนใหญ่ และมี isoparaffins หรือ branched-chain hydrocarbon บางส่วน แยกได้จากสัดส่วนปิโตรเลียมเบา โดยไชพาราฟินมีจุดเดือดช่วง 670-900 °F ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งอยู่ในช่วงน้ำมันเบา มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 225-450 และมีช่วงจุดหลอมเหลว 105-155 °F สำหรับเกรดทั่วไปอยู่ในช่วง 118-132 °F ลักษณะและรูปร่างของผลึกไชพาราฟิน มักจะมีลักษณะเป็นแบบเพลท (plate) หรือแบบเข็ม (needle) ขนาดใหญ่ (macrocrystals)

ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ไชพาราฟินสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ชนิด ตามปริมาณน้ำมันที่ปนอยู่

- soft paraffins ได้แก่ slack wax มีปริมาณน้ำมันปนอยู่สูง ประมาณ 3-40% ช่วงจุดหลอมเหลว 122-140 °F

- intermediate paraffins ได้แก่ scale wax หรือ white scale หรือ semi-refined paraffin wax มีปริมาณน้ำมันปนอยู่ประมาณ 1-3 % ช่วงจุดหลอมเหลว 118-135 °F

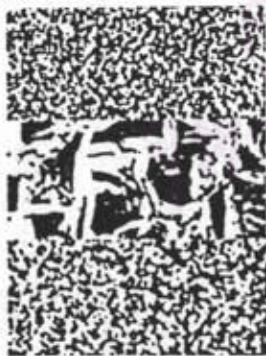
- hard paraffins ได้แก่ ไชพาราฟินที่ฟอกแล้ว (fully refined wax) หรือ block paraffins มีน้ำมันปนอยู่น้อยกว่า 0.5 % ช่วงจุดหลอมเหลว 123-165 °F

(2) ไชไมโครคริสตัลไลน์ หรือ petroleum ceresins ประกอบด้วย normal และ isoparaffins หรือ Branched-chain paraffins ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แยกได้จากสัดส่วนปิโตรเลียมหนัก (heavy distillates) และเรซิดิว (residues) ผลึกของ ไชไมโครคริสตัลไลน์มีลักษณะละเอียด (microcrystal) ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 มีจุดหลอมเหลวสูงซึ่งโดยปกติสูงกว่า 145 °F และอาจสูงถึง 200 °F แบ่งออกได้อีก 3 ชนิด คือ

- medium soft ได้แก่ petrowax
- medium hard ได้แก่ petrosene A
- hard ได้แก่ "Be square 190/195"

ไชไมโครคริสตัลไลน์ชนิด medium soft มีความสามารถในการทะลุ (needle penetration) ประมาณ 25-80 (100 gm/77 °F/5 sec) ส่วนชนิด medium hard มีค่าอยู่ระหว่าง 10-25 และชนิด hard มีค่า 3-10 โดยค่าความสามารถในการทะลุกำหนดโดยวิธี ASTM D5-25

(3) ไชปิโตรลาตัม (petrolatum waxes) ประกอบด้วย normal และ branched-chain paraffins ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และมักจะมีแนพทินกับแอโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเกาะอยู่ทำให้มีโครงสร้างของผลึกเป็นอสัณฐาน (amorphous-like) และมีปริมาณผลึกค่อนข้างน้อยคือ น้อยกว่า 25 % แยกได้จากสัดส่วนปิโตรเลียมหนักและเรซิดิว มีลักษณะต่างจาก ไชไมโครคริสตัลไลน์คือ ปิโตรลาตัมจะอ่อนกว่า ส่วนไชไมโครคริสตัลไลน์จะแข็งและเปราะกว่า



- Microcrystalline wax
(melting point 160 °F)
- Paraffin wax
(melting point 130 °F)
- Microcrystalline wax
(melting point 180 °F)



- Ozocerite
(melting point 160 °F)
- Carnauba wax
- Beeswax

รูปที่ 2.4 ผลึกของไชชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ขยาย 150 เท่า (10)

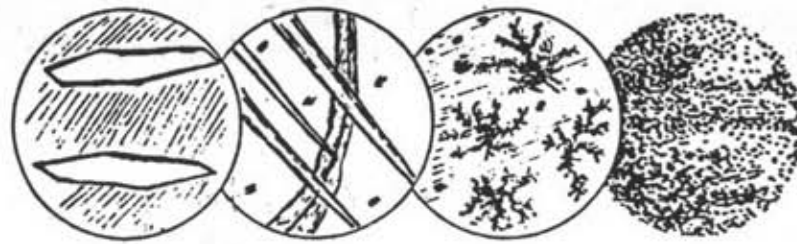


Plate Needle Malcrystalline Microcrystalline

รูปที่ 2.5 รูปร่างต่าง ๆ ของผลึกไข (10)

2.2.3 สมบัติทางเคมีและกายภาพ (8, 10, 11) ทั้งไขพาราฟินและไมโครคริสตัลไลน์ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว ไขทั้งสองชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูง กล่าวคือ commercial paraffin wax โดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 360-420 มีคาร์บอน 26-30 อะตอม ส่วน commercial microcrystalline wax มีค่าประมาณ 580-700 มีคาร์บอน 41-50 อะตอม จากความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลแสดงให้เห็นว่า ไขพาราฟินสามารถแยกได้ โดยการกลั่นที่ความดันบรรยากาศแต่ไขไมโครคริสตัลไลน์ไม่สามารถแยกได้

สมบัติทางเคมี ไขพาราฟินมีความคงตัวสูง สามารถเกิดปฏิกิริยา halogenation โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม ทำปฏิกิริยาได้เล็กน้อย หรือไม่เกิดปฏิกิริยากับ fuming sulfuric acid, chlorosulphonic acid และกรดไนตริก (nitric acid) ส่วนไขไมโครคริสตัลไลน์จะทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับกรดทั้งสามชนิด ไซปิโตรเลียมจะเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนที่อุณหภูมิสูง ๆ (ประมาณ 450 °C) กลายเป็นพาราฟินและโอเลฟินโมเลกุลเล็ก ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางเคมีของไข (10)

สมบัติ	Paraffin (n-paraffin)	Microcrystalline (isoparaffin, naphthene n-paraffin)
Molecular weight	360-420	575-700
Oil content (ASTM-D721), %	0-1	0-15
Urea reactible, %	75-100	10-90
Iodine no., Hanus	approx. zero	0-10
Neutralization no., mg KOH/g, max	0.2	0.2
Saponification no., mg KOH/g, max	2.0	2.0
Light-stability	fairly good	depend on colour *
Thermal stability	poor	depend on colour *
Reactivity with sulfuric acid	low	high

* The darker the color, the more resistant is the wax to light and heat

สมบัติทางกายภาพ

- ความสามารถในการละลาย (solubility) ไขพาราฟินและไมโครคริสตัลไลน์ สามารถละลายในกันและกันได้ และละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น carbon disulfide, ethyl ether, ester, benzene ฯลฯ ความสามารถในการละลายเป็นฟังก์ชันกับจุดหลอมเหลว ถ้าจุดหลอมเหลวสูงจะละลายได้น้อยที่อุณหภูมิห้อง และจะละลายได้หมดในตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของไข (จะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป)
- ดรรชนีหักเห (refractive index) เมื่อไขอยู่ในสถานะของเหลว ค่าดรรชนีหักเหของไขจะเพิ่มขึ้นตามจุดหลอมเหลว (melting point) ที่เพิ่มขึ้นดังตารางที่ 2.3

ความสัมพันธ์ระหว่างครรชนหักเหและจุดหลอมเหลวของ n-paraffins เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$n_D^{60} = 0.0004275 \times (\text{melting point, } ^\circ\text{C}) + 1.4113 \quad (2.1)$$

เมื่อ n_D^{60} คือ ค่าครรชนหักเหแสง sodium D-line ที่อุณหภูมิ 60 °ซ

สำหรับค่าครรชนหักเหของไซไมโครคริสตัลไลน์และ petrolatum waxes จะมีค่าสูงกว่า n-paraffin ที่มีจุดหลอมเหลวเท่ากัน ประมาณ 0.0050-0.0200

ตารางที่ 2.3 จุดหลอมเหลวและค่าครรชนหักเหของไซปิโตรเลียม (8)

Melting point, °C	Refractive index at 60 °C
49.4	1.4349
52.2	1.4352
55.0	1.4355
57.8	1.4370
60.6	1.4394
63.4	1.4531
71.8	1.4560
71.4	1.4442

} Paraffin waxes
} Petrolatum waxes
} Microcrystalline waxes

- ความร้อนแฝงของการหลอมตัว (latent heat of fusion)

สำหรับ n-paraffin ที่บริสุทธิ์ซึ่งอยู่ในช่วงไซพาราฟิน ($C_{21} - C_{35}$) จะมีค่าความร้อนแฝงของการหลอมตัวประมาณ 37.5-64 แคลอรี/กรัม

ตารางที่ 2.4 ความร้อนแฝงของการหลอมตัวของ commercial waxes ชนิดต่าง ๆ (8)

Melting point, °C	Latent heat of fusion, cal./g
51.7	40.3
52.2	38.9
52.4	35.1
65.3	43.8

ตารางที่ 2.5 ความร้อนแฝงของการหลอมตัวของลัดสั้นไฮปีโตรเลียมที่มีความบริสุทธิ์สูง (8)

Number of carbon atoms	Melting point, °C	Latent heat of fusion, cal./g
20	36.4	52.0
25	53.3	53.6
33	71.1	54.0

- ความร้อนจำเพาะ (specific heat) ค่าความร้อนจำเพาะของไฮพาราฟินเมื่ออยู่ในสถานะของแข็งมีค่าประมาณ 0.5 และเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวที่ช่วงอุณหภูมิระหว่างจุดหลอมเหลวกับ 300 °ซ สามารถคำนวณค่าโดยประมาณได้จากสูตร

$$c = 0.492 + 0.0009t \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$c = \text{ความร้อนจำเพาะ}$$

$$t = \text{อุณหภูมิ, °ซ}$$

ตารางที่ 2.6 สมบัติทางกายภาพบางประการของไข (10)

สมบัติ	Paraffin	Microcrystalline
Melting point (ASTM-D127) °F	120-145	130-200
Penetration, needle 77 °F (ASTM-D1312)	10-20	5-50
Viscosity, 210 °F SSU	35-50	50-100
Flash point (ASTM-D92) °F	350-450	450-600
Specific gravity @ 200 °F	about 0.75	about 0.80
Carbon residue, conradson %	about 0	0-1
Contraction from 10 °F above to 50 °F below MP, %	13.5-14.5	9-14
Adhesion (or laminating strength)	0	low to high
Flexibility at low temp.	0	low to high
Properties when mixed with petroleum oil :		
ductility	low	low to high
staining or bleeding	high	low

2.2.4 ประโยชน์ของไขในทางอุตสาหกรรม (industrial application of petroleum waxes) (12, 13)

- กระดาษเคลือบไข (waxed paper) กระดาษสำหรับห่อหุ้ม (paper packaging materials) และกระดาษแข็ง (cardboard) ใช้เป็นวัสดุในการห่อหุ้ม แต่งานหลายประเภทไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากไม่กันน้ำ (waterproof) คือยอมให้น้ำและไอน้ำซึมผ่าน เกิดการสูญเสียความแข็งแรงไปเมื่อสัมผัสน้ำ ปัญหานี้แก้ได้โดยการเคลือบหรือชุบกระดาษด้วยไข พื้นฐานเบื้องต้นของกระบวนการเตรียมกระดาษเคลือบไขคือ การผ่านใยกระดาษ (paper web)

อย่างต่อเนืองลงสู่อ่างไซเหลวหรือไซผสม แล้วจึงผ่านเข้าเครื่องรีด (roller) เพื่อรีดไซที่มากเกินไป ออกไป ไซผสมจะมีความหนืดน้อยกว่า 15 cP. ที่อุณหภูมิปฏิบัติงาน ซึ่งทั่วไปไม่เกิน 125 °ซ และไซผสมจะประกอบด้วยไซพาราฟินที่มีปริมาณไซไมโครคริสตัลไลน์ต่ำ กระดาษเคลือบไซที่มีผิวมัน ทำได้โดยการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (shock chilling) ของกระดาษเคลือบไซ โดยการจุ่มลงในอ่างน้ำเย็น การเคลือบแบบคิส (kiss coating) เป็นการเคลือบกระดาษด้านเดียว นอกจากนี้ยังสามารถเคลือบผิวทั้งสองด้านได้ โดยการจุ่มกระดาษลงในอ่างให้ทั่ว ถ้าต้องการให้มีปริมาณไซบนผิวกระดาษเล็กน้อย ทำได้โดยการผ่านกระดาษเคลือบไซเข้าเครื่องรีดที่ร้อน ไซจะถูกรีดเข้าไปในรูพรุนของกระดาษ เรียกกระดาษแบบนี้ว่า กระดาษเคลือบไซแบบแห้ง (dry-waxed paper) ส่วนกระดาษเคลือบไซแบบเปียก (wet-waxed paper) ทำได้โดยผ่านกระดาษลงในอ่างและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งกำจัดไซส่วนเกินออกไป ไซจะถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 65-85 °ซ ไม่ได้ (ไซผสมบางชนิดอาจถึง 125 °ซ) เนื่องจากจะเกิดการออกซิเดชันของไซเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เราสามารถลดการเกิดออกซิเดชันโดยเติมสารยับยั้งลงไปเช่น 2, 6 di-tertiary-butyl-4-methylphenol

- กล่องพับ (folding cartons) กล่องพับจะเคลือบด้วยไซผสมพอลิเมอร์ ใช้เป็นกล่องบรรจุเนย, เบคอน, ผักแช่แข็ง, ไอศกรีม, พาย ฯลฯ โดยทั่วไปจะมีพอลิเมอร์มากกว่า 10 % จึงเรียกของผสมนี้ว่า hot melt ของผสมนี้เมื่อเคลือบผิวจะมีลักษณะคล้ายพลาสติกยืดหยุ่น (flexible plastic-like coating) แต่มีสมบัติในการกันไอน้ำซึมผ่านดีกว่าพลาสติก

- เทียนไซ (candles) ประกอบด้วยไซพาราฟินกับไซจากพืชหรือสัตว์ และกรดสเตียริก (stearic acid) การผลิตเทียนไซใช้กระบวนการหล่อแบบ (moulding) หรือ เอกทรูชัน (extrusion)

- สารขัดเงา (polishes) เป็นของผสมที่ประกอบด้วยไซจากพืชหรือสัตว์ ไซพาราฟิน ไซไมโครคริสตัลไลน์และตัวทำละลาย เช่น น้ำมันหมู บางครั้งก็ผสมน้ำหอมและสีลงไป การผสมไซพาราฟินลงไปเพื่อเพิ่มเนื้อของผลิตภัณฑ์ ทำให้มีราคาถูกลงและจุดหลอมเหลวต่ำลง ส่วนไซไมโครคริสตัลไลน์ทำให้ผิวเรียบ

- ไม้ขีด (matches) ไม้ขีดจะจุ่มไซที่มีจุดหลอมตัวต่ำ (44-48 °ซ) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี

- ไซเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมี การแตกตัวของไซจะได้แอลฟาโอเลฟิน (alpha-olefin) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ดีในการเปลี่ยนเป็นผงซักฟอกชนิดแอลคิลซัลเฟต และสารเคมีตัวอื่น ปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (chlorination) ของไซจะได้แอลเคนที่มีอะตอมคลอรีนแทนที่สามารถใช้เป็น waterproofing และ flameproofing agent หรือเป็นสารเติมสำหรับ

น้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้ไซโมโครคริสตัลไลน์ใช้ในอุตสาหกรรมยาง (rubber industry) เพื่อป้องกันผิวยางแตก และใช้เป็นตัวเคลือบเชือก (cordage) ในอุตสาหกรรมทอผ้า (textile)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 การใช้ชนิดต่างๆในทางอุตสาหกรรม (12)

Quality requirement of products for the major wax applications

<u>Application</u>	<u>Typical waxes used</u> ‡	<u>Principal end use requirements</u> ‡‡
Nested containers		
Paper cups	145 to 155° paraffins	Stiff coating, no sticking in warm weather.
Cheese tubs	125 to 132° paraffins + microwax or polyethylene	Lactic acid resistance, no sticking in warm weather.
Folding cartons		
	TERVAN Brands	
Overwrapped carton	130 to 145° paraffins	Uniform coating, cracking resistance.
Butter carton	Simple blends or hot melts	Uniform coating, grease resistance, abrasion resistance.
Tamper-proof cartons	Hot melts	High quality, plus heat sealability.
Waxed papers		
Unblended paraffin	130 to 145° paraffins	Fair blocking and scuff resistance, sealing strength and gloss.
Blends	Above + microwax + polyethylene	Good blocking and scuff resistance, sealing strength and gloss.
Laminated papers	MIKROVAN brands	Good laminating strength, strain resistance.
Corrugated paperboard		
	SEALITE Brands	
Impregnated	130 to 145° paraffins or additive blends	Water-shielding, wet strength.
Coated	Additive blends, hot melts	Uniform coating, scuff resistance, moisture barrier, flexible coating.
Candles		
Refined wax	132 & 135° paraffins	Toughness, rigidity, good appearance, good mold release, clean burning.
Scale wax	116 to 127° scale waxes	Sag resistance, good appearance, clean burning, good oil retention, bulge resistance.
Chlorination feed		
stocks		
40 % chlorinated wax	123 to 130° scale (special specs.)	Proper end composition and thermal stability.
70 % chlorinated wax	123 to 127° special scale grade	Proper end composition and short production time.

‡ Melting points, °F, by ASTM D87.

‡‡ Waxes must also have good color, odor, stability and purity commensurate with the type of wax.

2.3 ความสามารถในการละลายของไซในน้ำมัน และตัวทำละลายต่าง ๆ (8, 14)

ความสามารถในการละลายของไซ ขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่อไปนี้คือ

(1) ชนิดและประเภทของไซ ความสามารถในการละลายจะต่ำลงเมื่อจุดหลอมเหลว และน้ำหนักโมเลกุลของ ไซสูงขึ้น

(2) ชนิดและสมบัติของตัวทำละลาย ไซจะละลายได้ดีในไฮโดรคาร์บอนและ halogen-substituted hydrocarbon ซึ่งเป็นตัวทำละลายไม่มีขั้ว แต่จะละลายได้น้อยหรือไม่ละลายในตัวทำละลายมีขั้วเช่น น้ำ แอลกอฮอล์ เป็นต้น และค่าการละลายจะต่ำลงเมื่อตัวทำละลายมีความหนืดสูงขึ้น

(3) อุณหภูมิ ไซจะละลายได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะผสมกับตัวทำละลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของไซ

2.3.1 ความสามารถในการละลายของไซพาราฟินในน้ำมันหล่อลื่น (lubricating oil) (14) ความสามารถในการละลายของของแข็งในของเหลว เกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียว และประพจน์ตัวของเหลวอุดมคติ (ideal liquid) สามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\ln N_2^* = \frac{\Delta H_f}{R} \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ

N_2^* = สัดส่วนจำนวนโมล (mole fraction)

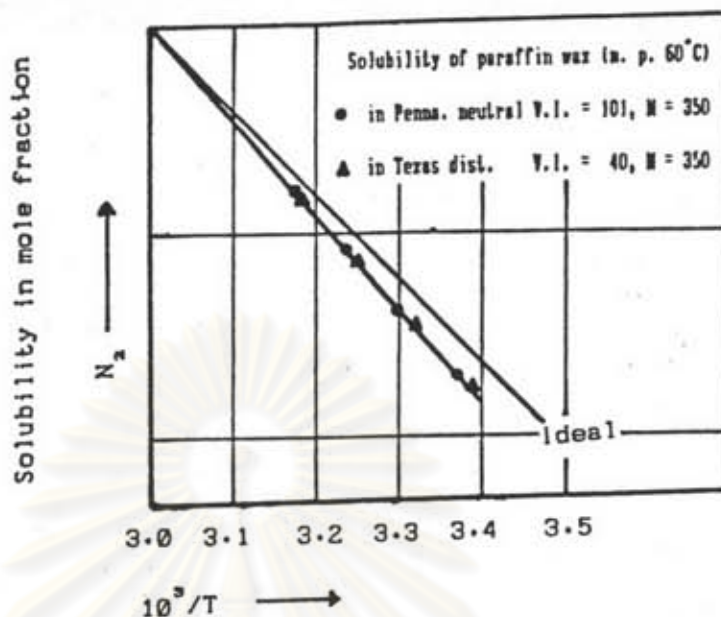
ΔH_f = ความร้อนแฝงของการหลอมตัว (heat of fusion), แคลอรี/กรัม-โมล

T_f = อุณหภูมิของการหลอมตัว, °K

R = ค่าคงที่ของแก๊สอุดมคติ, แคลอรี/(กรัม-โมล·°K)

T = อุณหภูมิใด ๆ, °K

ซึ่งความสามารถในการละลายของไซพาราฟินและไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นในน้ำมันหล่อลื่น จะเป็นไปตามสมการ (2.3) และใกล้เคียงกับเส้นโค้งการละลายอุดมคติ (ideal solubility curve) ในรูปที่ 2.6 และค่าความร้อนของการเกิดสารละลาย (heat of solution) มีค่าน้อยมาก แต่ความสามารถในการละลายของไซในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนบางตัวและ chlorinated hydrocarbon จะมีค่าสูงกว่าสมการ (2.3) ส่วนในตัวทำละลายอื่นๆ เช่น คีโตน เอสเทอร์ (esters) อีเทอร์ (ethers) แอลกอฮอล์ ฯลฯ จะละลายได้น้อยกว่าในน้ำมันหล่อลื่นมาก เพราะคีโตนกับ oxygenated solvents จะไปลดความสามารถในการละลายของไซในน้ำมันลง ทำให้ไซตกผลึกออกมา



รูปที่ 2.6 ความสามารถในการละลายของไซพาราฟินในน้ำมันหล่อลื่น เปรียบเทียบกับสารละลายอุดมคติ (14)

2.3.2 ความสามารถในการละลายของไซพาราฟินในตัวทำละลาย (8, 15)

ความสามารถในการละลายของไซพาราฟินในตัวทำละลายอินทรีย์ต่าง ๆ

สามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\log W_u = A (\log T - K_u) \quad (2.4)$$

เมื่อ

W_u = กรัมของไซต่อ 100 กรัมของตัวทำละลาย

A = ค่าคงที่ (ขึ้นอยู่กับชนิดของไซ) สำหรับไซพาราฟินโดยทั่วไปมีค่าประมาณ 38.5

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

K_u = ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลายดังตารางที่ 2.8

ความสามารถในการละลายของไซในตัวทำละลาย จะบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ใช้แยกไซออกจากน้ำมันในกระบวนการแยกไซด้วยตัวทำละลาย ตารางที่ 2.9 แสดงความสามารถในการละลายของไซพาราฟิน (จุดหลอมเหลว 125-127 °ฟ) ในตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ รูปที่ 2.7 แสดงความสามารถในการละลายของไซ (จุดหลอมเหลว 110 °ฟ) ใน aliphatic ketones รูปที่ 2.8 แสดงอุณหภูมิของการละลาย เมื่อค่าความสามารถในการละลายของไซในของผสมของ MEK (methyl ethyl ketone) กับโทลูอีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ เท่ากัน และเทียบเท่ากับใน MPK

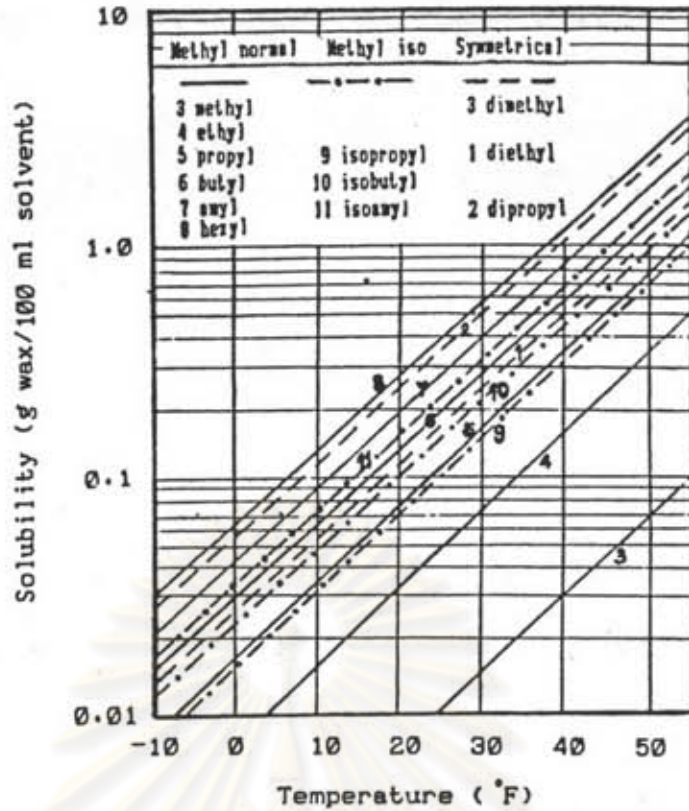
(methyl propyl ketone) ที่ 0 °ฟ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ MEK อุณหภูมิของการละลายจะเพิ่มขึ้น
รูปที่ 2.9 แสดงความสามารถในการละลายของไซพาราฟิน (จุดหลอมเหลว 55.6 °ซ) ใน
แอมโรมาติกไฮโดรคาร์บอน รูปที่ 2.10 แสดงความสามารถในการละลายของไซและน้ำมันใน MEK

ตารางที่ 2.8 ค่า K_u สำหรับตัวทำละลายชนิดต่างๆ (8)

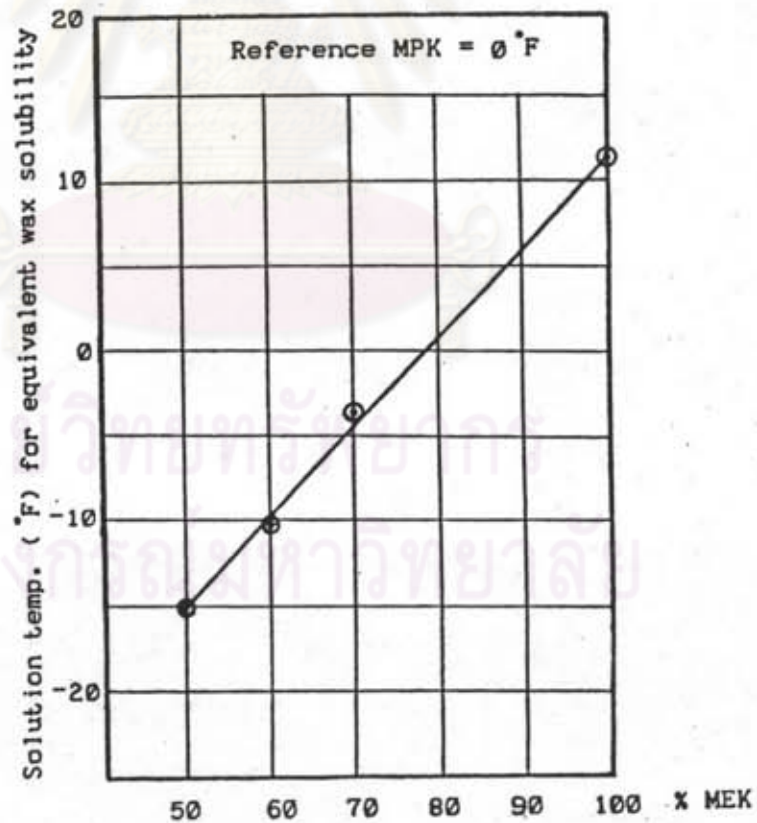
Solvent	K_u
Acetone	2.4792
n-Amyl alcohol	2.4700
Chlorobenzene	2.4351
Chloroform	2.4240
Ethylene dichloride	2.4650
Light petroleum	2.4277
Toluene	2.4307

ตารางที่ 2.9 ความสามารถในการละลายของไซพาราฟิน (จุดหลอมเหลว 125-127 °ฟ)
ในตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ (8)

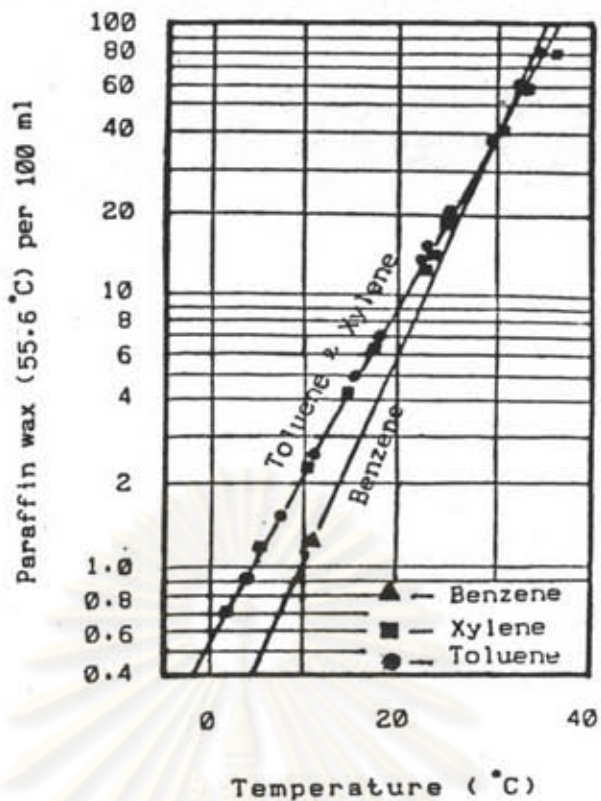
	Percentage wax in solution					
	15.5 °C	21.2 °C	26.7 °C	32.2 °C	37.8 °C	43.3 °C
Benzene	10.0	18.0	35.0	56	77	90
Carbon tetrachloride	10.0	15.0	31.0	48	68	83
Ethylene dichloride	0.2	0.8	1.6	7	30	81



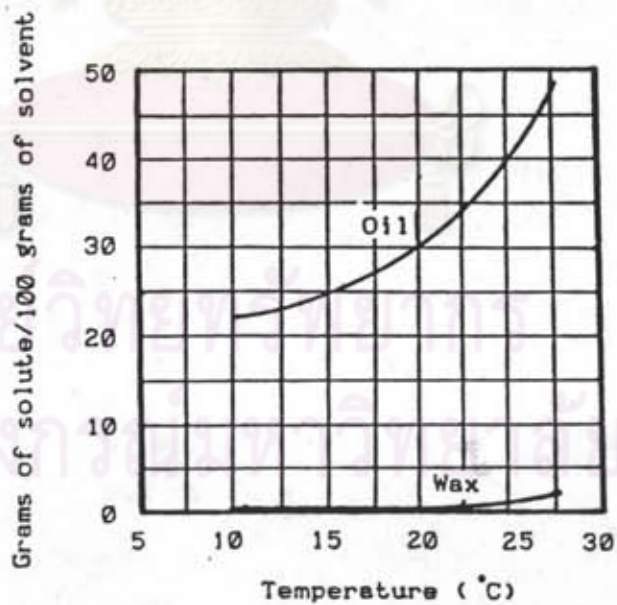
รูปที่ 2.7 ความสามารถในการละลายของไข (จุดหลอมเหลว 110°F) ใน aliphatic ketones (15)



รูปที่ 2.8 ผลของสัดส่วน MEK/toluene ต่อ solubility temperature เมื่อค่าความสามารถในการละลายที่อัตราส่วนต่าง ๆ เท่ากัน และเท่ากับใน MPK ที่ 0°F (15)



รูปที่ 2.9 ความสามารถในการละลายของไขพาราฟิน (จุดหลอมเหลว 55.6°ซ) ในแอมโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (15)

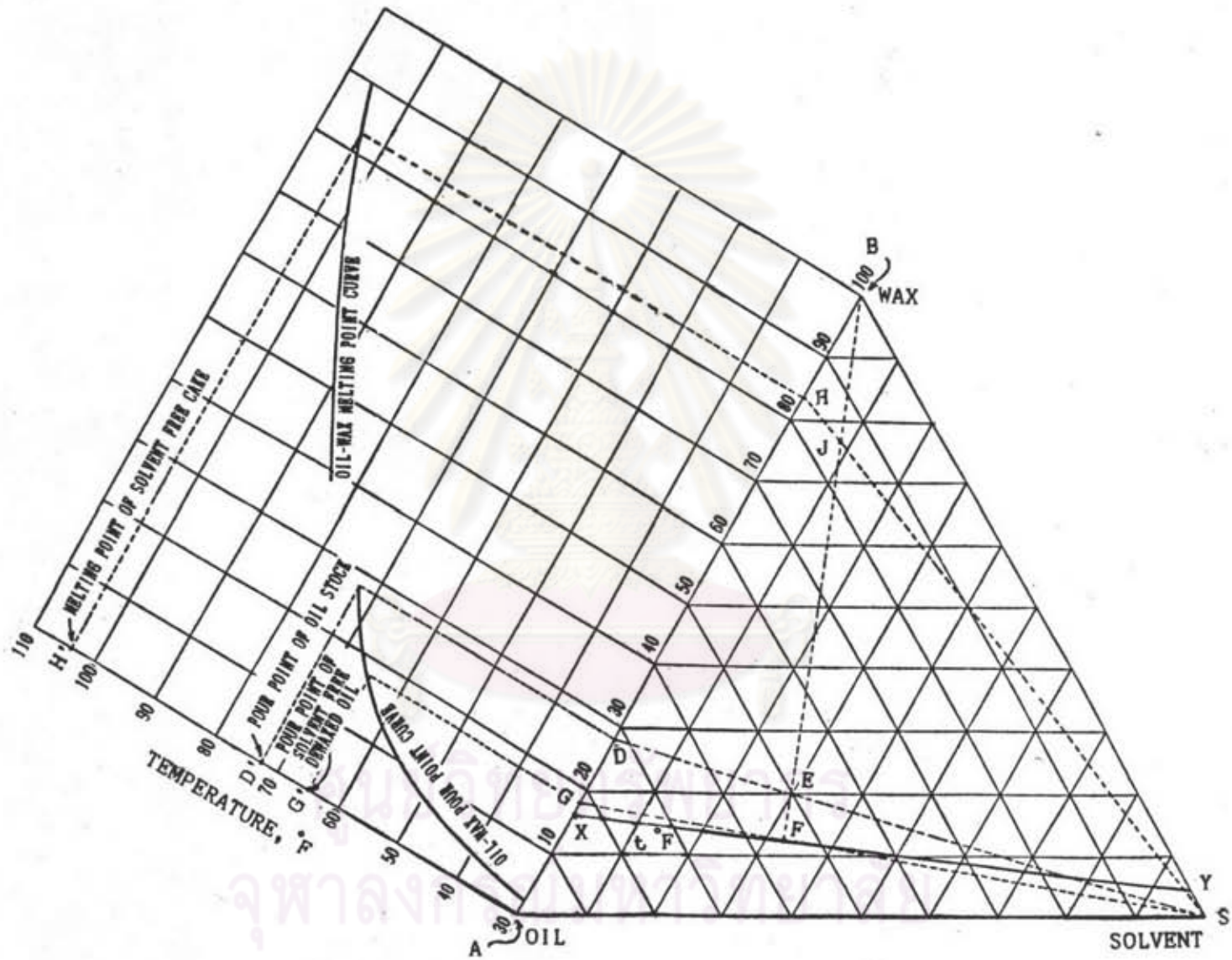


รูปที่ 2.10 ความสามารถในการละลายของไขพาราฟินและน้ำมันใน MEK (methyl ethyl ketone) (15)

2.3.3 สมดุลระหว่างน้ำมัน ไช และตัวทำละลาย (oil-wax-solvent equilibrium) (16) แผนภูมิสมดุล (equilibrium diagram) ของระบบน้ำมัน ไช และตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถหาได้โดยสมมุติว่าน้ำมันและไชต่างก็เป็นองค์ประกอบบริสุทธิ์ และมักแสดงเป็นเส้นโค้งสมดุล (equilibrium curve) บนแผนภูมิสามเหลี่ยมด้านเท่า (triangular diagram) ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 และมีวิธีการหาดังนี้

- กรองน้ำมันซึ่งมีไชปนอยู่ที่อุณหภูมิ $t^{\circ}F$
- ผสมน้ำมันซึ่งมีไชปนอยู่กับตัวทำละลายด้วยอัตราส่วนต่างๆ แล้วทำให้ของผสมเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ คือ $t^{\circ}F$ ไชจะตกผลึกลงมา กรองแยกผลึกไชออก
- ผสมไชกับตัวทำละลาย ในปริมาณที่เหมาะสม และทำให้ของผสมเย็นตัวลง แล้วกรองแยกผลึกไชมันออกที่อุณหภูมิ $t^{\circ}F$
- นำของเหลวที่ได้จากการกรอง (filtrate) แต่ละครั้งไปวิเคราะห์หาส่วนประกอบของน้ำมัน ไช และตัวทำละลาย

- นำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปสร้างกราฟก็จะได้เส้นโค้งสมดุล XY
 แผนภูมิสมดุล ดังรูปที่ 2.11 มีประโยชน์มากสำหรับการคาดคะเนผลที่จะได้รับในกระบวนการแยกไช ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการแยกไชออกจากน้ำมันซึ่งมีไชปนอยู่เป็นอัตราส่วนตามจุด D มีจุดไหลเท D' เมื่อผสมน้ำมันนี้กับตัวทำละลายโดยมีอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อน้ำมันเท่ากับ R ของผสมนี้จะมีองค์ประกอบอยู่บนเส้น DS สมมุติว่าเป็นจุด E อัตราส่วนระหว่าง DE/ES จะเท่ากับ R เมื่อลดอุณหภูมิของของผสมลง ไชก็จะตกผลึกลงมาเรื่อย ๆ ตามเส้น BE ออกไปทาง E จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแยกไช คือ $t^{\circ}F$ ที่อุณหภูมินี้ของผสมจะแบ่งเป็นสองวัฏภาค คือ ของแข็งซึ่งก็คือไช มีองค์ประกอบเป็นจุด B และของเหลวซึ่งมีองค์ประกอบตามจุด F ซึ่งอยู่บนเส้นโค้งสมดุล XY อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวเท่ากับ FE/EB แต่การกรองของกระบวนการแยกไชนั้นจะไม่ได้ไชที่มีองค์ประกอบตามจุด B (ไชบริสุทธิ์) เนื่องจากเค้กของไช (wax cake) จะดูดซับของเหลวไว้ในตัว ทำให้วัฏภาคของแข็งจะประกอบไปด้วยไชซึ่งเป็นของแข็ง น้ำมัน และตัวทำละลาย และมีองค์ประกอบตามจุดใดจุดหนึ่งที่อยู่บนเส้น FB ถ้าสมมุติว่าไชที่ได้จากกระบวนการแยกไช เมื่อแยกเอาตัวทำละลายออกแล้วมีจุดหลอมเหลว คือ H' องค์ประกอบของไชและน้ำมันที่มีอยู่ในไช คือ H วัฏภาคของแข็งหรือเค้กของไชซึ่งยังไม่ได้แยกตัวทำละลายออกก็จะมีส่วนประกอบตามจุดใดจุดหนึ่งที่อยู่บนเส้น HS ด้วย ดังนั้น องค์ประกอบของเค้กที่ยังไม่ได้แยกตัวทำละลายออก ก็คือจุดที่เส้น FB และ HS ตัดกัน (จุด J) นั่นเอง ปริมาณเค้กของไชที่ยังไม่ได้แยกตัวทำละลายออก ต่อ filtrate หาได้จากอัตราส่วนระหว่าง BF/FJ ปริมาณขององค์ประกอบของตัวทำละลายในเค้กและของเหลวสามารถอ่านได้จากจุด J และ F



รูปที่ 2.11 แผนภูมิสมมูล (equilibrium diagram) ของระบบน้ำมัน ไช และตัวทำละลาย (16)

ตามลำดับองค์ประกอบของของเหลวที่แยกตัวทำละลายแล้วจะอยู่บนด้าน AB ของสามเหลี่ยมด้านเท่า ซึ่งก็คือ จุด G ซึ่งได้จากการต่อเส้น SF ออกไปทาง F ตัดด้าน AB และจุด G นี้ ก็คือ องค์ประกอบของน้ำมันและไซที่อยู่ในน้ำมันที่ผ่านการแยกไซแล้ว (dewaxed oil) และหาจุดไหลเทได้จาก oil-wax pour point curve คือจุด G' ปริมาณของเค็ทของไซต่อ dewaxed oil ที่แยกตัวทำละลายออกแล้ว หาได้จากอัตราส่วน DG/DH

ตัวทำละลายที่รวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำมันอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิที่แยกไซ หรือตกผลึกไซ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ ดังตารางที่ 2.10 และมีแผนภูมิสมมูล หรือเส้นโค้งการละลาย ดังรูปที่ 2.12 ดังนี้

แบบที่ 1 ตัวทำละลายมีความสามารถหรือประสิทธิภาพในการละลายไซได้ดีกว่าน้ำมัน ตัวทำละลายแบบนี้จะมีเส้นโค้งการละลายเป็นแบบ A หรือ B ในรูปที่ 2.12 เมื่อใช้ในกระบวนการแยกไซจะทำให้จุดไหลเทของ dewaxed oil ต่ำลงถ้าเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมัน ตัวอย่าง เช่น light naphtha จะมีเส้นโค้งการละลายเป็นแบบ A ที่ 40 °F และแบบ B ที่ 60 °F นอกจากนี้จุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้จากการใช้ตัวทำละลายชนิดนี้ในการแยกไซจะมีค่าต่ำกว่าจุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้จากการแยกไซโดยไม่ใช้ตัวทำละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน

แบบที่ 2 ตัวทำละลายมีความสามารถในการละลายไซได้น้อยกว่าน้ำมัน หรือไม่ละลายไซเลย ตัวทำละลายแบบนี้จะมีเส้นโค้งการละลายเป็นแบบ C ในรูปที่ 2.12 ในกรณีนี้ตัวทำละลายไม่ละลายไซหรือละลายได้น้อยมาก ๆ อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมันที่ใช้ จะมีผลกระทบต่อจุดไหลเทของ dewaxed oil และเส้นโค้งการละลายจะมีลักษณะเบนไปจากเส้น C โดยจะพุ่งเข้าใกล้หรือผ่านจุดยอดของสามเหลี่ยมซึ่งเป็นตัวทำละลาย dewaxed oil ที่ได้จากการแยกไซโดยใช้ตัวทำละลายจะมีจุดไหลเทใกล้เคียงกับ dewaxed oil ที่ได้จากการแยกไซโดยไม่ใช้ตัวทำละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน ส่วนในกรณีที่ตัวทำละลายละลายไซได้น้อยกว่าน้ำมัน เช่น เอมีลแอลกอฮอล์ (amyl alcohol) จุดไหลเทของ dewaxed oil จะสูงขึ้นถ้าเพิ่มอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมัน และจุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้จากการใช้ตัวทำละลายจะสูงกว่ากรณีไม่ใช้ตัวทำละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน

แบบที่ 3 ตัวทำละลายแบบนี้เมื่อเติมลงในของผสมของไซ และน้ำมันที่อุณหภูมิที่กำหนด จะทำให้ไซตกผลึกลงมา แต่เมื่อเติมตัวทำละลายเพิ่มลงไปของผสมอีกจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า จุดวิกฤติของอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมัน (critical solvent/oil ratio) ตัวทำละลายจะละลายผลึกไซกลับเข้าไปในสารละลายถ้าเติมตัวทำละลายเพิ่มขึ้นจนมีอัตราส่วนเกินจุดนี้ ตัวทำละลายแบบนี้มีเส้นโค้งการละลายเป็นแบบ D ในรูปที่ 2.12 จุดไหลเทของ dewaxed oil จะต่ำลง เมื่อเพิ่มอัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมัน และจะต่ำกว่าจุดไหลเทของ

dewaxed oil ที่ได้จากกรณีไม่ใช้ตัวทำละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน แต่ถ้าเลขจุดวิกฤตนี้ไปแล้ว จุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้จะสูงขึ้นตามอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น และสูงกว่าจุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้จากกรณีไม่ใช้ตัวทำละลายที่อุณหภูมิเดียวกัน

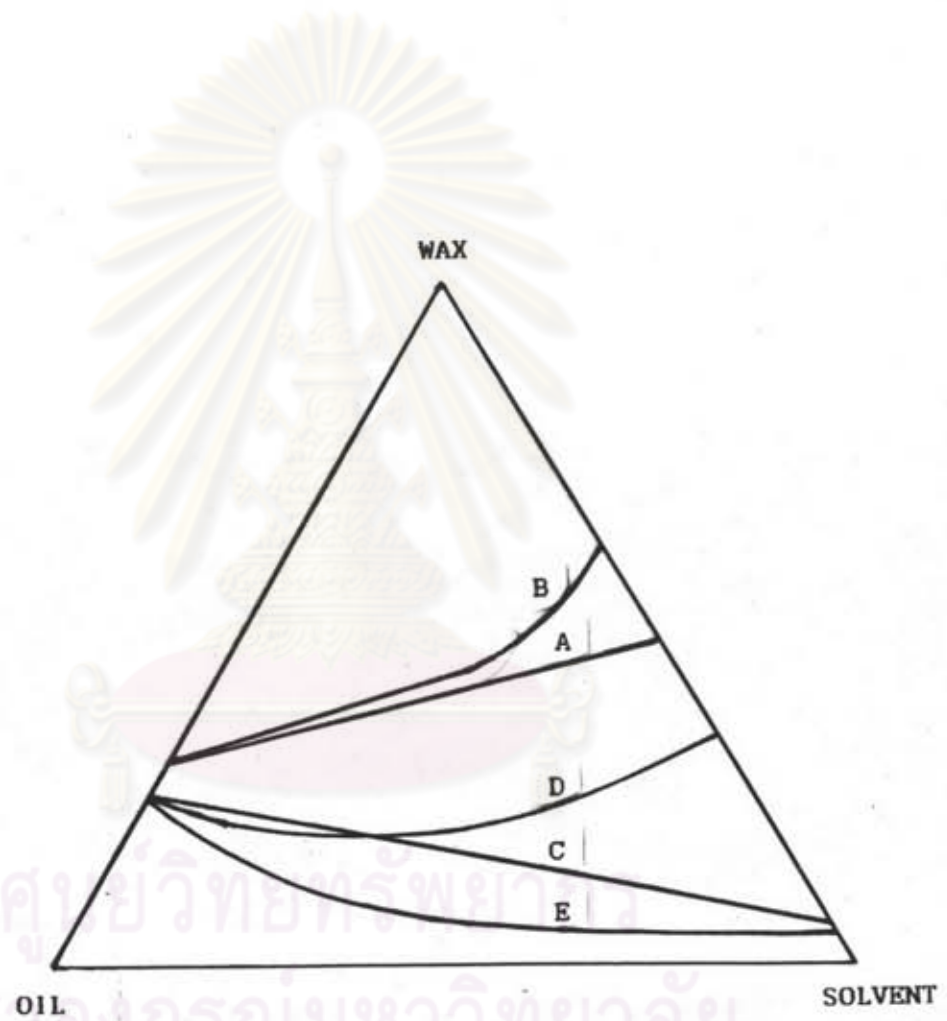
แบบที่ 4 ตัวทำละลายแบบนี้คล้ายกับแบบที่ 3 กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ ตัวทำละลายต่อน้ำมันมากขึ้นแต่ไม่เกินอัตราส่วนวิกฤตของตัวทำละลายต่อน้ำมัน จะทำให้ปริมาณไซ ที่ตกผลึกเพิ่มมากขึ้นและจุดไหลเทของ dewaxed oil จะต่ำลง จุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้นี้จะต่ำกว่าจุดไหลเทของ dewaxed oil ที่ได้จากกรณีไม่ใช้ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายสำหรับกระบวนการแยกไซดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น แบบที่ 1 มีประสิทธิภาพต่ำสุด ส่วนแบบที่ 4 มีประสิทธิภาพสูงสุด อย่างไรก็ตามตัวทำละลายส่วนใหญ่ที่มีอยู่และนิยมใช้เป็นแบบที่ 2

ตารางที่ 2.10 แบบต่าง ๆ ของตัวทำละลายที่ละลายน้ำมันเมื่อใช้ในกระบวนการแยกไซ (16)

Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Naphtha	Amyl alcohol Diethyl carbinol Methyl ethyl ketone Methylene chloride Butyl acetate Butyl formate	Chlorobenzene Butanol

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 เส้นโค้งการละลายแบบต่างๆ (16)

2.4 กระบวนการต่าง ๆ ที่ใช้แยกไขในอุตสาหกรรม

เนื่องจากไขที่ปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่น และน้ำมันดีเซลที่เลกทั้งชนิดเบาและหนัก (ซึ่งปริมาณไขที่ปนอยู่นี้อาจสูงถึง 40-50 %) จะมีจุดเดือดอยู่ในช่วงเดียวกับน้ำมันเหล่านี้ ดังนั้น การแยกไขออกจากน้ำมันจึงไม่สามารถแยกได้ด้วยการกลั่น แต่ต้องใช้วิธีการอื่น ๆ ซึ่งมีอยู่หลายวิธี ดังนี้

2.4.1 การแยกไขโดยไม่ใช้ตัวทำให้เจือจาง (dewaxing without the use of diluent) ได้แก่ กระบวนการ pressing และ sweating (8, 17, 18, 19) เป็นกระบวนการเก่าแก่ที่ใช้แยกไขพาราฟินที่ปนอยู่ในช่วงของน้ำมันดีเซลที่เลกชนิดเบา หรือ paraffin distillate ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งมีวิธีการดังนี้

ขั้นตอนแรก pressing

- ทำให้น้ำมันซึ่งมีไขอยู่เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิจุดไหลเทที่ต้องการ ไขจะตกผลึกออกมา
- สืบของผสมเย็นผ่านเครื่องกรองแบบอัด (plate-and-frame filter press) ขนาดใหญ่ซึ่งผลึกไขจะถูกกรองอยู่ภายใน ส่วนน้ำมันที่เป็นของเหลวจะไหลผ่านเครื่องกรองออกมา และถ้าน้ำมันนี้ยังมีไขปนอยู่อีกก็จะทำซ้ำตามขั้นตอนที่กล่าวมาแล้วเพื่อแยกไขออกให้ได้มากที่สุด โดยลดอุณหภูมิของของผสมให้ต่ำลงเรื่อย ๆ

- เมื่อผลึกไขเต็ม เครื่องกรองจะถูกเปิดออกเพื่อนำเค้กของไข (wax cake) ออก

ขั้นตอนที่สอง sweating

- เค้กของไข เรียกว่า slack wax ซึ่งมีน้ำมันปนอยู่ประมาณ 7-40 % จะถูกหลอมให้ละลายและสูบเข้าไปที่ถาดซึ่งกันถาดเป็นแผ่นตะแกรง ขนาดประมาณ 50 mesh และมีท่อขดเป็นวงอยู่บนตะแกรง สำหรับให้น้ำเย็นและน้ำร้อนไหลอยู่ภายใน เพื่อเพิ่มและลดอุณหภูมิของเค้กของไข ไขจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วจนจับตัวแข็งเป็นก้อนอยู่บนแผ่นตะแกรงหนาประมาณ 5-7 นิ้ว กว้าง 10 ฟุต ยาว 40-50 ฟุต

- ค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิของก้อนไข โดยให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิประมาณ 2-3 °F ต่อชั่วโมง ไขส่วนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและอยู่ชั้นรอบนอกของก้อนไข จะหลอมตัวแล้วรวมตัวกับน้ำมันที่ถูกดูดซับอยู่ระหว่างผลึกของไข เมื่อของเหลวนี้มีปริมาณมากขึ้นก็จะไหลออกมาจากก้อนไขลอดผ่านตะแกรงออกไป

- จากนั้นลดอุณหภูมิของก้อนไขลงใหม่จนส่วนรอบนอกแข็งตัว แล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิอีกโดยทำเหมือนที่กล่าวมาแล้ว ทำเช่นนี้สลับกันไปเรื่อย ๆ สุดท้าย จะได้ก้อนไขซึ่งมีปริมาณน้ำมันปนอยู่น้อยลง คือประมาณต่ำกว่า 1 % และได้น้ำมันที่มีปริมาณไขต่ำกว่าเดิม

ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของน้ำมันและไซที่ปนอยู่ กระบวนการนี้เหมาะที่จะใช้กับน้ำมันเบาซึ่งมีโซพาราฟินอยู่

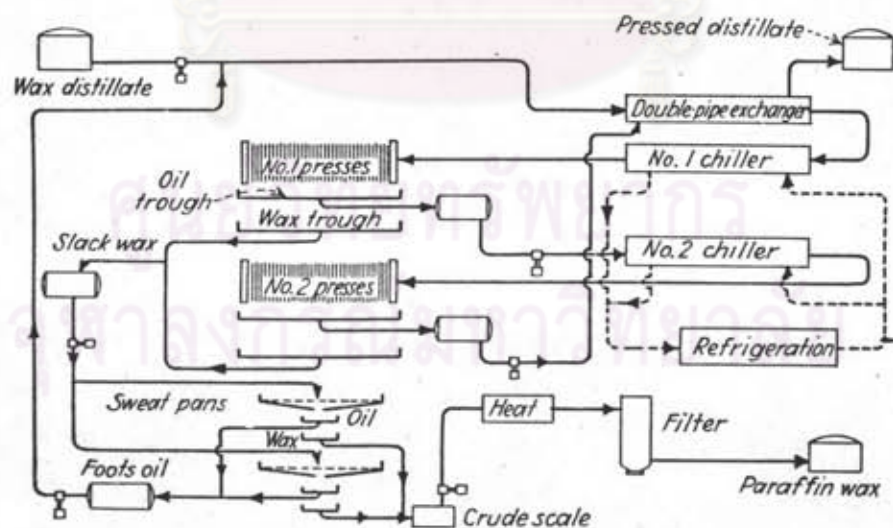
- ปริมาณไซที่ปนอยู่ ถ้าปริมาณไซมาก จะทำให้การสูบของผสมเย็นไปกรองตลอดจนการกรองเป็นไปด้วยความยากลำบาก ประสิทธิภาพการกรองจะลดลง

- ความหนืดของน้ำมัน ถ้าความหนืดสูงจะทำให้การกรองแยกไซและน้ำมันลำบากขึ้น

- รูปร่างและขนาดของผลึกไซ ผลึกขนาดใหญ่จะดูดซับน้ำมันไว้น้อยกว่า และจะยอมให้น้ำมันไหลผ่านได้ดีกว่าผลึกขนาดเล็ก

ข้อดีของกระบวนการนี้คือ เป็นกระบวนการที่ดำเนินการแบบง่าย ๆ ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ทำให้เครื่องมือที่ใช้มีราคาถูกกว่ากระบวนการอื่น ๆ

ข้อเสียของกระบวนการนี้คือ เหมาะสำหรับพวกน้ำมันเบา (light oil) ซึ่งมีโซพาราฟินปนอยู่เท่านั้น แต่ไม่เหมาะที่จะใช้กับพวกน้ำมันหนัก (heavy oil) หรือน้ำมันก้นหอ (reduced crude) ซึ่งมีความหนืดสูงและมีไซที่เป็นผลึกขนาดเล็ก ๆ ปนอยู่ นอกจากนี้ ยังเป็นกระบวนการแบบไม่ต่อเนื่องซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานมากในการทำให้ไซหลอมเหลวสลับกับการทำให้แข็งตัว และยังต้องใช้คนงานจำนวนมากเพื่อปฏิบัติงานที่เครื่องกรองอีกด้วย

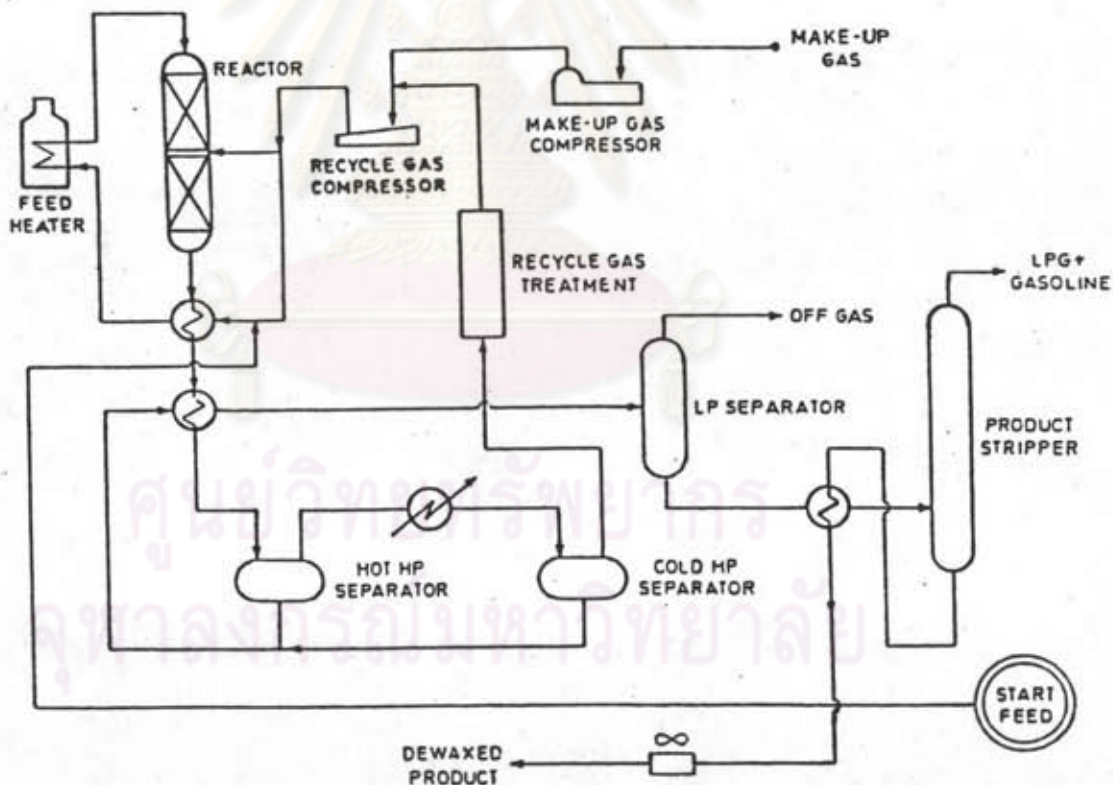


รูปที่ 2.13 กระบวนการ pressing และ sweating (19)

2.4.2 การแยกไขด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic dewaxing) (20) กระบวนการนี้จะเปลี่ยนไฮพาราฟินที่มีพันธะเส้นตรงให้เป็นไฮโดรคาร์บอนเบา (light hydrocarbon) โดยทั่วไปได้แก่ แก๊สโซลีนและตัวที่เบากว่า กระบวนการกระทำที่อุณหภูมิสูง ความดันค่อนข้างสูง โดยให้น้ำมันไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน ตัวอย่างของกระบวนการที่เหมือนกันแต่ต่างกันในชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

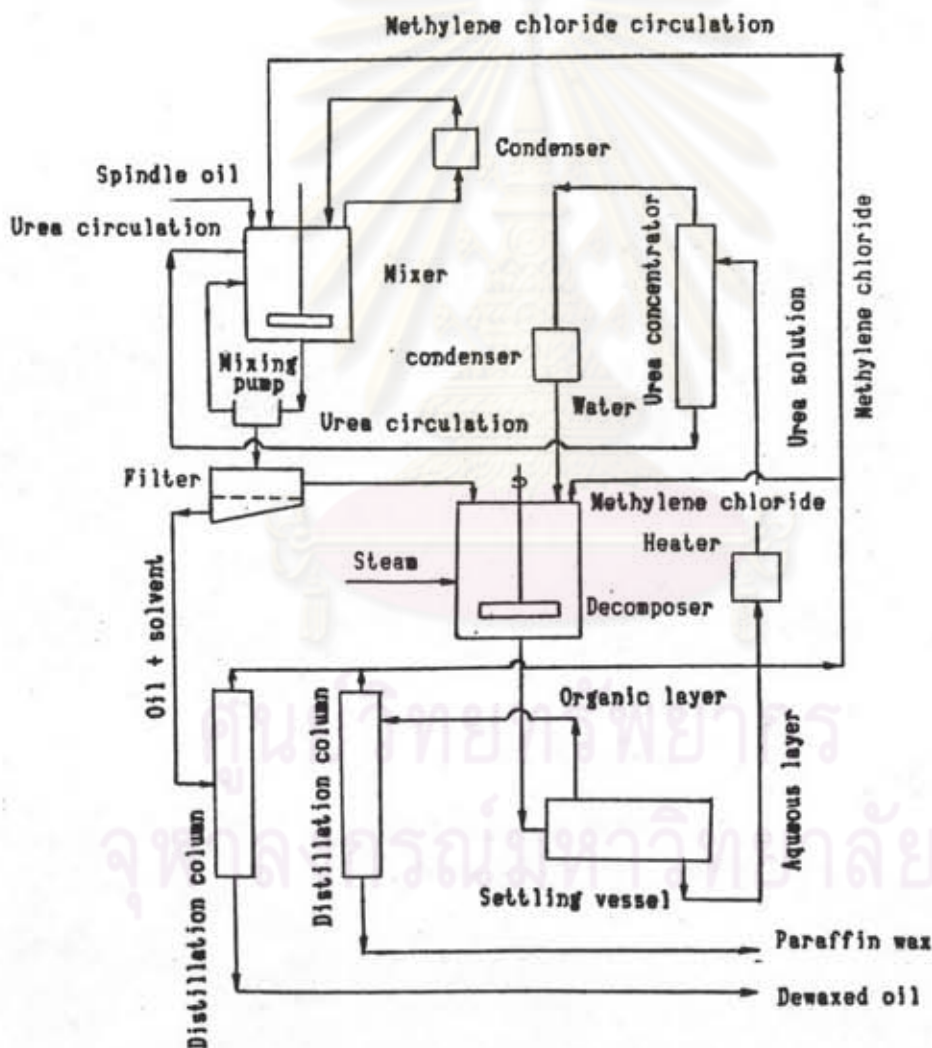
- Catalytic dewaxing (BP. international) รูปที่ 2.14
- Distillates dewaxing (Mobil oil corporation)

ข้อเสียของกระบวนการคือ ประสิทธิภาพการแยกไขขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ได้ไขเป็นผลิตภัณฑ์ เครื่องมือมีราคาสูงเนื่องจากกระบวนการทำที่ความดันและอุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.14 กระบวนการแยกไขด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (BP. process) (20)

2.4.3 การแยกไขด้วยยูเรีย (urea dewaxing) (21) เป็นกระบวนการที่อาศัยคุณสมบัติในการที่ยูเรียสามารถรวมตัวกับ normal paraffins หรือพาราฟินไซ้ตรง แต่จะไม่รวมตัวกับพาราฟินไซ้สาขา โดยยูเรียจะเกาะติดกับพาราฟินไซ้ตรงแบบหลวม ๆ เกิดเป็นโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อน (complex) ซึ่งเรียกว่า adduct มีลักษณะเป็นเกล็ดหรือผลึก และมีความคงตัวที่อุณหภูมิประมาณ 20-40 °ซ แต่จะเกิดการสลายตัวได้เป็นยูเรียและพาราฟินไซ้ตรงที่อุณหภูมิสูง ดังกระบวนการในรูปที่ 2.15



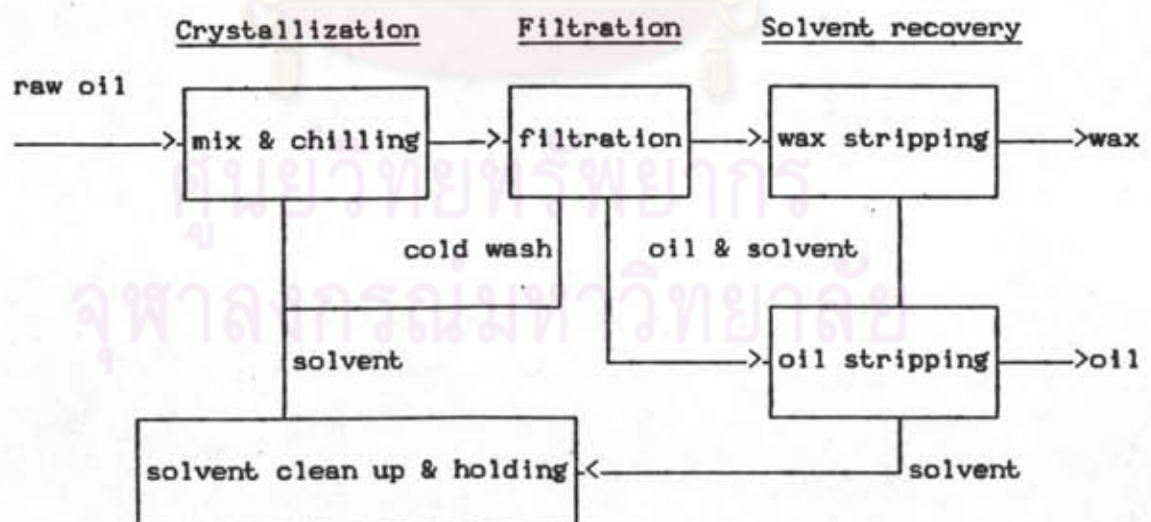
รูปที่ 2.15 กระบวนการแยกไขด้วยยูเรีย (Edeleanu GmbH process) (21)

กระบวนการนี้มีขีดจำกัดในการใช้คือ เหมาะที่จะใช้กับน้ำมันที่มีปริมาณไขต่ำและสามารถแยกได้เฉพาะพาราฟินไขตรงเท่านั้น ทำให้จุดไหลเทของน้ำมันที่ผ่านการแยกไขแล้วยังสูงอยู่เพราะมีไขที่เป็นพาราฟินชนิดอื่นปนอยู่ จุดประสงค์ในการใช้งานและเกิดประสิทธิภาพมากคือ ใช้ในการแยกพาราฟินไขตรงออกจากของผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เพื่อนำพาราฟินไขตรงไปใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นหรือเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการอื่น ๆ ต่อไป

2.4.4 การแยกไขโดยใช้ตัวทำละลาย (solvent dewaxing process) (22, 23, 24) เป็นกระบวนการแยกไขออกจากน้ำมันที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ใช้ได้กับน้ำมันทั่วไปที่มีไขปนอยู่ โดยเฉพาะน้ำมันหนักซึ่งมีปริมาณไขปนอยู่สูง ทำให้น้ำมันที่ผ่านการแยกไขแล้วมีจุดไหลเทต่ำลง และมีคุณภาพดีขึ้น สามารถนำไปปรับปรุงเป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานได้ ขั้นตอนของกระบวนการนี้แบ่งออกได้เป็น

- ทำให้น้ำมันที่มีไขปนอยู่ เจือจาง โดยเติมตัวทำละลายลงไปแล้วทำให้ของผสมเย็นลง ไขจะตกผลึกออกมา (crystallization)
- กรองแยกผลึกของไขออกจากของผสม (filtration) จะได้เค้กของไข (wax cake) และของเหลวที่ผ่านการกรอง (filtrate)
- แยกตัวทำละลายออกจากเค้กของไขและ filtrate เพื่อนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ (solvent recovery)

กระบวนการนี้สามารถเขียนเป็นแผนภูมิแบบง่าย ๆ ได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 กระบวนการแยกไขโดยใช้ตัวทำละลาย

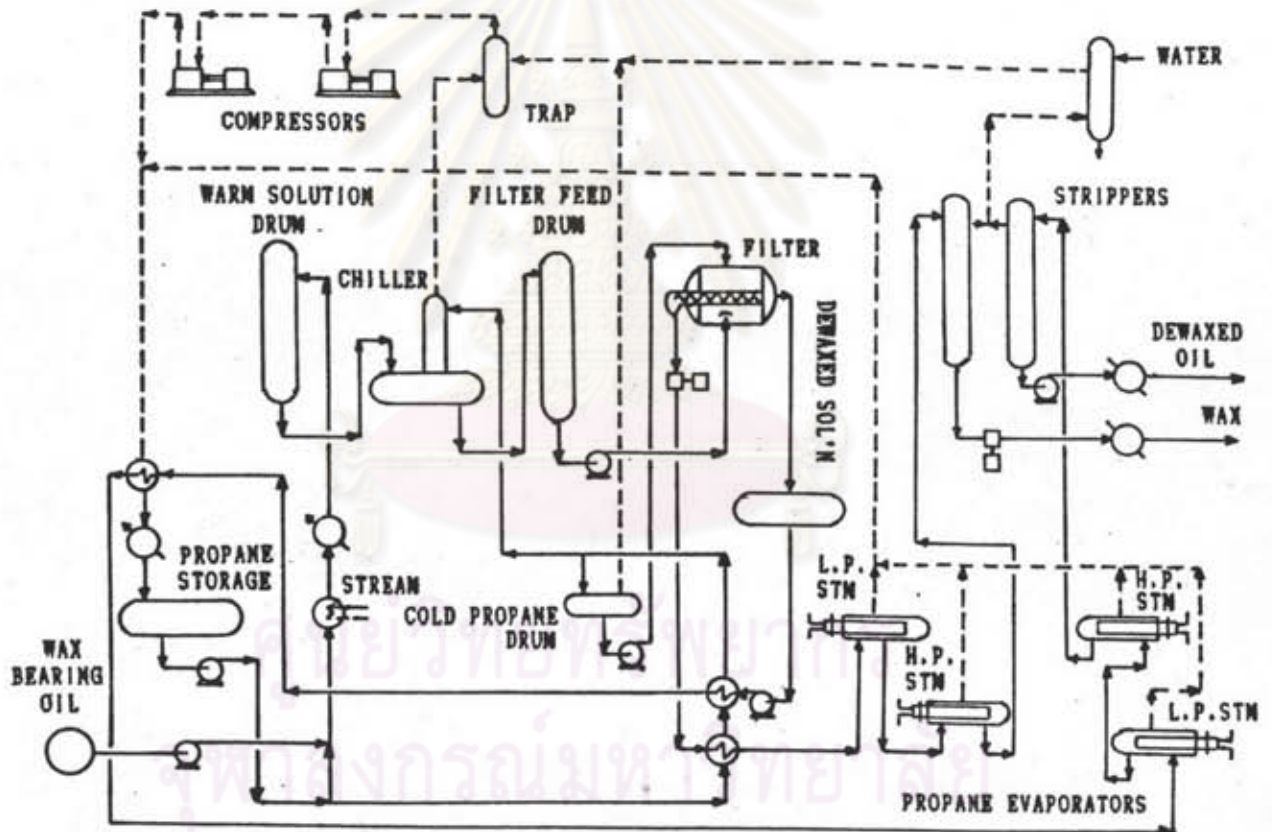
ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของผลึกไข (wax crystal) ตลอดจนปริมาณของไขที่ตกผลึกออกมา เพราะปัจจัยเหล่านี้จะมีผลต่อการกรอง คือ ผลึกขนาดใหญ่ และผลึกที่มีรูปร่างแบบเฟลท จะกรองได้ง่ายและให้อัตราการกรองมากกว่าผลึกขนาดเล็กและผลึก รูปเข็ม เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะผลึกรูปเข็มและผลึกขนาดเล็กจะอุดขั้วของเหลวไว้ในก้อนเค็่มากกว่า และยอมให้ของเหลวไหลผ่านได้ยาก ส่วนปริมาณไขที่ตกผลึกแยกได้ หรือปริมาณไขที่เหลืออยู่ในน้ำมันที่ผ่านการแยกไขแล้ว จะบอกให้ทราบถึงความสามารถของการแยกไขออกจากน้ำมัน

ขนาดและรูปร่างผลึกไขรวมทั้งปริมาณไขที่ตกผลึกขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของน้ำมันหรือไขที่ปนอยู่ในน้ำมัน ถ้าเป็นไขพาราฟินจากน้ำมันเบา (light lube oil) จะได้ผลึกของไขที่มีขนาดใหญ่และอุดขั้วน้ำมันหรือของเหลวไว้น้อย ไขชนิดนี้เรียกว่า macrocrystalline wax ถ้าเป็นไขจากน้ำมันหนัก (heavy lube oil) จะได้ผลึกไขที่มีขนาดเล็ก เกิดการจับตัวเป็นก้อนได้ง่ายและจะอุดขั้วน้ำมันหรือของเหลวไว้มาก ไขชนิดนี้เรียกว่า microcrystalline wax
 - อัตราการลดอุณหภูมิ (cooling rate) ของของผสม ถ้าอัตราการลดอุณหภูมิเร็วเกินไปจะเกิด shock chilling คือ ผลึกไขจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีขนาดเล็กและจับตัวเป็นก้อนใหญ่ อุดขั้วของเหลวไว้มาก
 - ชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ และอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมัน ถ้าใช้ตัวทำละลายในปริมาณที่เหมาะสม จะทำให้ไขตกผลึกได้ดี และมีอัตราการกรองสูง
 - อุณหภูมิที่ตกผลึกไข (crystallization temperature) ถ้าอุณหภูมิต่ำลง ไขจะตกผลึกมากขึ้น
- ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นตัวทำให้ไขตกผลึก และทำให้น้ำมันเจือจางหรือลดความหนืดของน้ำมันที่อุณหภูมิตกผลึก ทำให้กรองได้ง่าย ดังนั้นตัวทำละลายที่จะใช้ควรมีสสมบัติดังนี้
- มีความสามารถในการละลายไขต่ำ และทำให้สารประกอบพาราฟินิกไฮโดรคาร์บอนตกผลึกที่อุณหภูมิแยกไข
 - ละลายพวกน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ได้ดี และรวมเป็นเนื้อเดียวกับน้ำมันที่อุณหภูมิแยกไข
 - ทำให้อุณหภูมิของการกรองและจุดไหลเทของน้ำมันที่แยกไขออกแล้ว มีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุด
 - มีจุดเดือด ความจุความร้อนและความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอต่ำ ทำให้การแยกตัวทำละลายออกจากไขและน้ำมันทำได้ง่าย ตลอดจนประหยัดพลังงานในการทำความเย็น และแยกตัวทำละลาย

- มีราคาถูก ไม่กัดกร่อน ไม่สลายตัวง่ายเมื่อถูกความร้อนและไม่เป็นพิษ
ซึ่งตัวทำละลายที่พบส่วนใหญ่มักจะมีสมบัติไม่ครบถ้วนตามที่ต้องการ และแบ่งออกได้เป็น
2 กลุ่มคือ

(1) ตัวทำละลายเดี่ยว (single solvent) ซึ่งตัวทำละลายที่นิยมใช้คือ
โพรเพน (propane) ดังกระบวนการแยกไขด้วยโพรเพน (propane dewaxing process) ใน
รูปที่ 2.17 โดยน้ำมันที่มีไขปนอยู่จะถูกผสมกับโพรเพนเหลวและละลายรวมเป็นเนื้อเดียวกันภายใต้



รูปที่ 2.17 กระบวนการแยกไขด้วยโพรเพน (propane dewaxing) (25)

อุณหภูมิและความดันสูง จากนั้นก็จะลดอุณหภูมิและความดันลงด้วยการปล่อยให้ไพรเพนบางส่วนระเหยกลายเป็นไอจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ไชจะตกผลึกออกมา กรองแยกผลึกของไชออก ข้อดีของวิธีนี้คือ ราคาไพรเพนค่อนข้างถูกและเป็นทั้งตัวทำละลายและตัวทำความเย็น ทำให้ประหยัดพลังงานและอุปกรณ์เกี่ยวกับระบบทำความเย็น นอกจากนี้ ไพรเพนยังช่วยลดความหนืดของน้ำมันได้ดี ทำให้อัตราการกรองสูง และใช้ได้กับน้ำมันแทบทุกประเภทแต่ก็มีข้อเสียคือ อุณหภูมิในการกรองและจุดไหลเทของ dewaxed oil มีค่าแตกต่างกันมาก และกระบวนการทำภายใต้ความดัน มีบางส่วนทำภายใต้สูญญากาศ การควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิของของผสมโดยการระเหยกลายเป็นไอของไพรเพนทำได้ยาก

(2) ตัวทำละลายผสม (mixed solvent) ประกอบด้วยตัวทำละลายที่ทำให้ไชตกผลึกและตัวทำละลายที่ละลายน้ำมัน ซึ่งแบ่งออกได้เป็นตัวทำละลายผสมของพวก chlorinated hydrocarbons และตัวทำละลายผสมของพวกคีโตน

ตัวทำละลายผสมของพวก Chlorinated hydrocarbons ที่นิยมใช้คือ - เอทิลีนไดคลอไรด์ (ethylene dichloride) หรือคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (carbon tetrachloride) ผสมกับเบนซีน (benzene) ใช้ใน Barisol process โดยตัวทำละลายผสมนี้มีความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) สูง เมื่อผสมกับน้ำมันที่มีไชปนอยู่แล้วทำให้เย็น ไชจะตกผลึกออกมาและความถ่วงจำเพาะของไชกับของผสมของตัวทำละลายและน้ำมันจะมีค่าต่างกันมาก ทำให้สามารถแยกออกจากกันได้โดยการเหวี่ยงสลัด (centrifugation)

- ไดคลอโรอีเทน (Dichloroethane) ผสมกับเมทิลีนคลอไรด์ (methylene chloride) ใช้ใน Di-Me process ไดคลอโรอีเทนจะเป็นตัวทำให้ไชตกผลึก ส่วนเมทิลีนคลอไรด์เป็นตัวละลายน้ำมัน ดังนั้น เมื่อผสมน้ำมันที่มีไชปนอยู่เข้ากับตัวทำละลายผสมนี้แล้วทำให้เย็น ไชจะตกผลึกออกมาและสามารถแยกออกได้โดยการกรอง

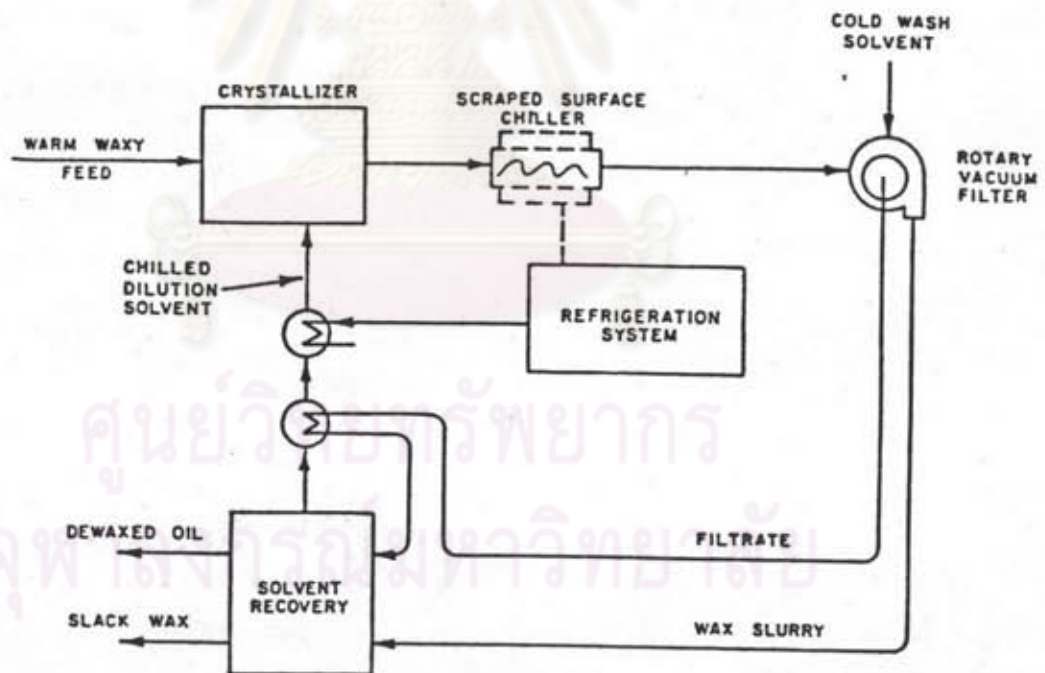
ตัวทำละลายผสมของพวกคีโตน ใช้ใน ketone dewaxing process ซึ่งกระบวนการนี้เมื่อผสมตัวทำละลายกับน้ำมันที่มีไชปนอยู่แล้วทำให้เย็น ไชจะตกผลึกและผลึกของไชที่ได้มักจะมีขนาดใหญ่ทำให้กรองได้ง่าย ดังนั้น มักจะกรองโดยใช้ระบบสูญญากาศ (vacuum filtration) คีโตนเป็นตัวทำละลายที่ละลายไชและน้ำมันได้น้อย แต่ช่วยให้ไชตกผลึกได้ดี ดังนั้น จึงต้องเติมสารบางตัวลงไปเพื่อละลายน้ำมัน คีโตนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะละลายไชได้น้อยกว่าพวกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่จะให้อัตราการกรองสูงกว่า ตัวทำละลายผสมของพวกคีโตนที่นิยมใช้คือ

- เมทิลเอทิลคีโตน (MEK) ผสมกับโทลูอิน (toluene) หรือเบนซีน (benzene) ซึ่งเป็นตัวทำละลายผสมที่นิยมใช้แพร่หลายที่สุดใน Dilchill dewaxing process

ดังรูปที่ 2.18 โดย MEK จะทำให้ไซตกลผลึก ส่วนโทลูอินจะเป็นตัวละลายน้ำมันและไซ แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ โทลูอินจะละลายไซได้น้อย โทลูอินมักจะนิยมใช้มากกว่าเบนซีนเพราะราคาถูกกว่า และความเป็นพิษน้อยกว่า ข้อดีของกระบวนการนี้คือ ควบคุมอัตราการลดยุณหภูมิของของผสมได้ง่าย สามารถใช้อัตราการลดยุณหภูมิสูง ๆ ได้ ให้อัตราการกรองที่ดีแต่ต่ำกว่าไพโรเพน เค้กของไซที่กรองได้ดูดซับของเหลวไว้น้อย และอุณหภูมิในการกรองกับจุดไหลเทของ dewaxed oil มีค่าต่างกันน้อย ส่วนข้อเสียของกระบวนการนี้คือ ใช้ได้ดีกับพวกน้ำมันดีเซลที่เลขที่มีไซปนอยู่สูง แต่ไม่เหมาะที่จะใช้กับน้ำมันเตาหนัก และใช้พลังงานมากในการลดยุณหภูมิของของผสม

- เมทิลเอทิลคีโตน ผสมกับ methyl tertiary butyl ether (MTBE) โดย MTBE ทำหน้าที่เหมือนกับโทลูอิน

- ตัวทำละลายผสมของพวกคีโตน เช่น MEK ผสมกับ methyl isobutyl ketone (MIBK) หรือ methyl n-propyl ketone (MPK)



รูปที่ 2.18 Dilchill dewaxing process (23)

สมบัติต่าง ๆ ของตัวทำละลายแต่ละชนิด จะเป็นปัจจัยที่บอกให้ทราบถึงประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการใช้งานของตัวทำละลายนั้น ๆ เช่น (26)

- สภาพมีขั้ว (polarity) ถ้าตัวทำละลายมีสภาพมีขั้วสูงจะเป็นตัวกลางในการตกผลึกไซได้ดี
- ความสามารถในการละลายไซ (wax solubility) ความสามารถในการละลายไซของตัวทำละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะทำให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ตกผลึกและกรองผลึก
- ความหนืด (viscosity) ทำให้ทราบว่าต้องใช้ตัวทำละลายและน้ำมันเป็นอัตราส่วนเท่าใดในการทำให้ไขมันเจือจางจนทำให้กรองผลึกของไซได้เร็วที่สุด
- สมบัติทางความร้อน (thermal properties) ทำให้ทราบว่าต้องใช้ปริมาณความร้อนมากน้อยเท่าใดในการทำให้ของผสมเย็นลง รวมทั้งปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแยกตัวทำละลายออกจากไซและน้ำมันด้วย

ในตารางที่ 2.11 MEK และ acetone จัดเป็นพวก antisolvents คือ ละลายน้ำมันได้น้อยมาก ส่วนตัวทำละลายอื่น ๆ จัดเป็นพวก prosolvents คือ ละลายน้ำมันได้ดี เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง acetone กับ MEK จะเห็นได้ว่า acetone ช่วยให้ไซตกผลึกได้น้อยกว่า MEK เพราะสภาพมีขั้วต่ำกว่า และมีจุดเดือดต่ำหรือความดันไอสูงทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับความดันไอและการสูญหายของตัวทำละลายเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการ ดังนั้นจึงนิยมใช้ MEK มากกว่า ส่วนตัวทำละลายพวก prosolvents ซึ่งละลายน้ำมันได้ดีนั้น เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นได้ว่า MTBE มีความหนืดต่ำที่สุด แต่มีความดันไอสูงเพราะว่าจุดเดือดต่ำ และมีราคาแพงสำหรับเมทิลีนคลอไรด์มีฤทธิ์กัดกร่อน และความดันไอสูง ส่วน MIBK นั้นราคาแพง และละลายน้ำมันได้น้อยกว่าโทลูอิน ดังนั้น จึงนิยมใช้โทลูอินเป็น prosolvent เพราะมีราคาถูกที่สุด แม้ว่าค่าการละลายไซจะสูง แต่ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ จะละลายไซได้น้อย

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.11 สมบัติต่าง ๆ ของตัวทำละลาย (26)

SOLVENT PROPERTIES									
Solvent	(a)		(b)	(c)			(d)		
	Polarity						Wax solubility	Thermal	
	Dipole moment	Dielectric constant	at 20 °C	Dynamic viscosity	Kinematic viscosity	Density	Average specific heat	Latent heat of vaporization	Boiling point
		20 °C	g of 126 °F m.p. wax/100 ml solvent						
MEX	3.18	18.5	0.25	0.40	0.50	0.80	0.55	106.0	79.6
Acetone	2.89	20.7	0.05	0.32	0.40	0.79	0.52	124.6	56.1
MIBK	2.70	13.1	0.90	0.60	0.75	0.80	0.46	86.5	115.9
Toluene	0.36	2.4	13.00	0.61	0.70	0.87	0.41	98.5	110.6
Methylene chloride	1.50	9.08	1.60	0.66	0.50	1.32	0.28	78.7	39.8
Methyl tertiary butyl ether (MTBE)	1.23	4.5	7.00	0.31	0.42	0.74	0.51	77.0	55.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การตกผลึกไข (crystallization)

ไขสามารถตกผลึกเป็นรูปร่างและขนาดต่าง ๆ ได้หลายแบบ เช่น รูปเพลท (plate) รูปเข็ม (needle) และแบบที่เป็นรูปร่างไม่แน่นอน (malcrystalline) รูปร่างและขนาดของผลึกไขขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ซึ่งได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อรูปผลึกของไขที่เกิดขึ้นในการตกผลึก เช่น

Padgett, Hefley และ Henriksen (27) ใช้ Photomicrographs เพื่อศึกษารูปร่างและลักษณะผลึกไขชนิดต่าง ๆ พบว่าปัจจัยที่สำคัญ คือ ธรรมชาติและชนิดของไข ส่วนสารประกอบพวกแอสฟัลต์ (asphalts) และน้ำมันซึ่งมีความหนืดจะมีผลกระทบบ้างเล็กน้อย โดยไขจากน้ำมันเรซิดิว (residue) จะมีลักษณะอสัณฐาน (amorphous หรือ non-crystalline) หรือมีรูปร่างไม่แน่นอน (malcrystalline) ไขที่ได้จากน้ำมันดีเซลเกรดหนัก จะมีรูปผลึกขนาดเล็กมีรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนไขจาก slack wax และพาราฟินเกรดคอมเมอเชียล (commercial paraffin wax) จะให้รูปผลึกเป็นรูปเพลท หรือรูปเข็ม โดยผลึกรูปเพลทจะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีปริมาณไขในน้ำมันต่ำ ส่วนในสภาวะที่มีปริมาณไขสูง ผลึกของไขจะเป็นรูปเพลทขนาดเล็กในตอนแรก จากนั้นจะเกิดผลึกรูปเข็มมาเกาะที่เพลทเรื่อย ๆ จนกระทั่งผลึกไขกลายเป็นรูปเข็ม ส่วนความหนืดของน้ำมันหรือตัวกลางในการตกผลึกจะมีผลต่อขนาดของผลึก คือ ถ้าความหนืดสูงขนาดของผลึกจะเล็ก ถ้าความหนืดต่ำขนาดของผลึกจะใหญ่กว่า และถ้าการตกผลึกเกิดขึ้นภายใต้ภาวะที่อัตราการลดอุณหภูมิลดลงอย่างช้า ๆ ผลึกที่ได้จะมีขนาดใหญ่

Rhodes, Mason และ Sutton (28) นำ slack wax ที่ได้จากน้ำมันดิบเพนซิลวาเนียมาทำการ sweated พบว่า ไขซึ่งมีรูปร่างผลึกเป็นรูปเพลทในตอนแรกนั้นจะเกิดการโค้งงอและม้วนงอของขอบเพลท และเกิดเป็นผลึกรูปเข็มขึ้นที่ขอบเพลทที่ม้วนงอขึ้น ในที่สุดผลึกทั้งหมดของไขจะเป็นรูปเข็ม

Ferris, Cowles, และ Henderson (29) นำ slack wax ที่ได้จากน้ำมันดิบ Mid-Continent มาทำการสกัดแยกน้ำมันออกด้วยเอทิลีนไดคลอไรด์ที่อุณหภูมิ -12 ถึง -14 °C. แล้วทำการกลั่นแยกออกเป็นสัดส่วนต่าง ๆ ที่ความดัน 1-3 มม.ปรอท แล้วนำตกผลึกโดยใช้ตัวทำละลายต่าง ๆ กัน พบว่า ไขพาราฟินสามารถตกผลึกได้เป็นรูปร่างต่าง ๆ กัน โดยสัดส่วนที่มีจุดเดือดต่ำมักจะให้ผลึกรูปเพลท และสัดส่วนที่มีจุดเดือดสูงมักจะให้ผลึกรูปเข็ม กับ malcrystalline โดยปริมาณของผลึกรูปเข็ม และ malcrystalline จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามจุดเดือดที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงจุดเดือดเดียวกัน หรือที่น้ำหนักโมเลกุลของไขเท่ากัน จุดหลอมเหลว และความสามารถในการละลาย จะเรียงจากสูงไปหาต่ำได้ตามรูปผลึก คือ ผลึกรูปเพลท malcrystalline และผลึกรูปเข็ม ตามลำดับ ไขที่มีจุดหลอมเหลวเท่ากันจะมีความ

สามารถในการละลายในตัวทำละลายชนิดเดียวกันเท่านั้น ไม่ขึ้นอยู่กับรูปผลึก นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนืดและชนิดของตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการตกผลึกจะมีผลต่อขนาดของผลึก แต่จะไม่มีผลต่อรูปร่างผลึก ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของไซ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถนำไปใช้อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการ pressing และ sweating ได้ว่า ที่ความเข้มข้นของไซพาราฟินต่ำ ๆ ในน้ำมันดีเซลที่เลขชนิดเบา เมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ ไซพาราฟินจะตกผลึกเป็นรูปเฟลก ซึ่งทำให้การกรองทำได้ อย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากกรองแล้วจะได้ slack wax เมื่อนำไปหลอมแล้วทำให้เย็นในขั้นตอน sweating ไซจะตกผลึกออกมาเป็นรูปเข็ม เนื่องจาก ความเข้มข้นของไซพาราฟินในน้ำมันสูง ซึ่งผลึกรูปเข็มจะให้ประสิทธิภาพที่ดีในกระบวนการ sweating

Padgett (30) กล่าวว่า ไซจะตกผลึกเป็นรูปเฟลก รูปเข็ม malcrystalline หรือเป็นแบบอสัณฐานขึ้นอยู่กับ ชนิดและธรรมชาติของไซ ความเข้มข้นของไซ ปริมาณสารประกอบอื่น ๆ ที่ปนอยู่ และอัตราการลดอุณหภูมิของของผสม ในการตกผลึกไซ ผลึกรูปเฟลกจะถูกแทนที่หรือบดบัง ถ้ามีผลึกรูปเข็ม หรือ malcrystalline ซึ่งนำไปสู่ลักษณะของอสัณฐาน สิ่งที่ Padgett กล่าวไว้นี้สอดคล้องกับการศึกษาข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้ว

Clarke (31) ได้ทำการทดลองตกผลึกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ ซึ่งมีทั้งพาราฟินิก แนฟทีนิก และแอโรมาติก ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงของไซพาราฟิน ทั้งจากสถานะหลอมเหลวและจากสถานะสารละลาย พบว่าปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้ผลึกเป็นรูปเข็ม รูปเฟลก หรือ malcrystalline คือ อัตราการลดอุณหภูมิ หรืออัตราการตกผลึก และค่าแตกต่างระหว่างจุดหลอมเหลวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์กับ cloud point หรืออุณหภูมิตกผลึกของสารละลาย โดย malcrystalline จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิเร็วมาก และค่าแตกต่างของจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิตกผลึกต่ำ ผลึกรูปเข็มจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิเร็ว และค่าแตกต่างของจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิตกผลึกปานกลาง ส่วนผลึกรูปเฟลกจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการลดอุณหภูมิช้ามาก และค่าความแตกต่างของจุดหลอมเหลวและอุณหภูมิตกผลึกมีค่าปานกลางหรือสูง

จากที่กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดของผลึก ไซที่เกิดขึ้น คือ ชนิดและธรรมชาติของไซ ความเข้มข้นของไซ ความหนืดของน้ำมันหรือตัวทำละลาย ที่ใช้เป็นตัวกลางในการตกผลึก ความบริสุทธิ์ของไซในสารละลาย หรือ ปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นที่ปนอยู่ อัตราการลดอุณหภูมิของของผสมและค่าความแตกต่างของอุณหภูมิตกผลึกกับจุดหลอมเหลวของไซ

2.6 การกรอง (filtration)

2.6.1 ชนิดของกระบวนการกรอง (32) การกรองเป็นการแยกของแข็งออกจากของไหลโดยให้ของไหลไหลผ่านตัวกลางซึ่งมีรูพรุน (porous medium) ซึ่งของไหลจะไหลผ่านไปด้วยแรงดัน ส่วนของแข็งจะถูกกักไว้โดยตัวกลางซึ่งติดตั้งอยู่ในเครื่องกรอง (filter) เครื่องกรองที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีหลายชนิด และออกแบบสร้างให้มีรูปร่างต่าง ๆ กันเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน โดยพิจารณาถึงแรงขับเคลื่อน (driving force) เป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบ แรงขับเคลื่อนเหล่านี้แบ่งออกได้เป็น แรงโน้มถ่วง (gravity) แรงดูด (suction) ความดัน (pressure) หรือแรงเหวี่ยง (centrifugal force) การทำงานของเครื่องมืออาจจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (batch) กึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) อย่างไรก็ตามลักษณะของกระบวนการกรองสามารถแบ่งออกได้เป็นแบบต่าง ๆ ดังนี้

(1) Medium filtration การกรองแบบนี้อนุภาคของแข็งจะมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวกลาง ทำให้ตัวกลางทำหน้าที่คล้ายตะแกรงกักอนุภาคของแข็งไว้ ส่วนของไหลจะไหลผ่านไป

(2) Depth filtration ในกรณีนี้อนุภาคของแข็งจะมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนในตัวกลางการกรองจะเกิดขึ้นภายในเนื้อของตัวกลาง ถ้าพิจารณาว่ารูพรุนของตัวกลางนี้เป็นช่องอุโมงค์คดเคี้ยวเมื่ออนุภาคของแข็งผ่านเข้าไปปะทะกับผนังของอุโมงค์แล้ว จะเกาะติดอยู่ที่ผนังอุโมงค์ ส่วนของไหลจะไหลผ่านไป ตัวอย่างของกรณีนี้ได้แก่ การกรองน้ำด้วยเบดของทราย (deep-bed sand filter) โดยตัวกลางในที่นี้คือชั้นเบดของทราย ทั้ง medium และ depth filtration เหมาะสำหรับใช้กับกรณีความเข้มข้นของอนุภาคต่ำเท่านั้น

(3) Cake filtration ในกรณีนี้อนุภาคของแข็งจะถูกกรองและสะสมอยู่บนผิวหน้าของตัวกลาง ทำให้ชั้นอนุภาคของแข็งนี้ทำหน้าที่คล้ายเบด และทำหน้าที่กรองอนุภาคของแข็งที่ไหลเข้ามากรองต่อไป จนทำให้ชั้นของของแข็งหนาขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเครื่องกรองเต็มหรือความดันในการกรองสูงสุดจึงหยุดการกรอง การกรองแบบนี้ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม และเหมาะที่จะใช้กับกรณีของความเข้มข้นของของแข็งในของไหลมีค่าสูง ปัจจัยสำคัญของกระบวนการนี้คือ ความต้านทานการกรองของเค้กของของแข็ง ถ้าความต้านทานน้อยการกรองจะมีประสิทธิภาพดี

2.6.2 ทฤษฎีการกรอง (33) สมการพื้นฐานของการกรองสามารถเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\text{อัตราการกรอง} = \frac{\text{ความดันตกในการกรอง}}{\mu (\text{ความต้านทานของเค้ก} + \text{ความต้านทานของตัวกลาง})}$$

หรือ

$$dv/dt = \frac{\Delta P}{\mu c \alpha_v w + R_m} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$dv/dt = \text{อัตราการกรอง, ลบ.ชม./ (ตร.ชม.วินาที)}$$

$$v = \text{ปริมาตรของ filtrate ต่อหน่วยพื้นที่การกรอง, ลบ.ชม./ตร.ชม.}$$

$$t = \text{เวลา, วินาที}$$

$$\Delta P = \text{ความดันตกในการกรอง, กรัม/ชม. (วินาที)}^2 = \text{dyne/ (ชม.)}^2$$

$$\mu = \text{ความหนืดของ filtrate, กรัม/ (ชม.วินาที)}$$

$$\alpha_v = \text{ความต้านทานการกรองเฉลี่ยของเค้ก, ชม./กรัม}$$

$$w = \text{มวลของของแข็งต่อหน่วยพื้นที่การกรอง, กรัม/ตร.ชม.}$$

ซึ่งมักจะแทนค่าให้อยู่ในรูปของ v โดย

$$w = cv$$

$$c = \text{มวลของของแข็งต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของ filtrate, กรัม/ลบ.ชม.}$$

$$R_m = \text{ความต้านทานการกรองของตัวกลาง, ชม.}^{-1}$$

กรณีการกรองที่ความดันคงที่โดยมีสมมติฐานว่า α_v, R_m และ c มีค่าคงที่ตลอดการกรองเมื่อแทนค่า w ลงในสมการที่ (2.5) พร้อมจัดรูปใหม่จะได้

$$\mu c \alpha_v \frac{dv}{dt} + \mu R_m \frac{dv}{dt} = \Delta P \quad (2.6)$$

อินทิเกรตสมการ (2.6) จะได้

$$\frac{\mu c \alpha_v v^2}{2} + \mu R_m v = \Delta P t \quad (2.7)$$

ซึ่งสมการที่ (2.7) แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง v และ t เป็นรูปกราฟพาราโบลา

โดยทั่วไปแล้วความต้านทานของตัวกลางในการกรองมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความต้านทานของเค้ก ดังนั้นจึงมักตัดทิ้งไปทำให้ได้

$$\frac{\mu c \alpha_v v^2}{2} = \Delta P t \quad (2.8)$$

สมการที่ (2.6) เมื่อจัดรูปใหม่และเขียนให้อยู่ในรูปฟอร์มง่าย ๆ จะได้

$$\frac{dt}{dv} = \frac{2v}{K} + b \quad (2.9)$$

เมื่อ

$$K = \frac{2\Delta P}{\mu c \alpha_v} \quad (2.10)$$

$$b = \frac{\mu R_m}{\Delta P} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.9) แสดงว่าความสัมพันธ์ระหว่าง dt/dv และ v เป็นเส้นตรง ดังนั้นเมื่อ

สร้างกราฟระหว่างทั้งสองค่านี้ขึ้นจะได้

$$\text{slope} = 2/K \quad \text{และ} \quad \text{intercept} = b$$

ซึ่งนำไปคำนวณหาค่า α_{uv} และ R_u

2.7 งานวิจัยเกี่ยวกับการแยกไขออกจากน้ำมัน

Reeves และ Pattillo (34) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของตัวทำละลายและปริมาณตัวทำละลายที่เติมในขั้นแรกที่มีต่ออัตราการกรองผลึกไข ปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในไข และปริมาณน้ำมันซึ่งได้จากการแยกไข โดยใช้ MEK และ โทลูอินเป็นตัวทำละลายในการแยกไขออกจากน้ำมัน Mid-Continent distillate ที่มีความหนืด SUS 70 sec. ที่ 130 °F ได้ น้ำมันที่ผ่านการแยกไขมีจุดไหลเท 30 °F ใช้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมัน 4/1 และใช้อัตราส่วน MEK/toluene 0/100 ถึง 100/0 ร้อยละโดยปริมาตร กับปริมาณตัวทำละลายที่เติมในขั้นแรก เป็นอัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมัน 1 ถึง 3 พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ MEK/toluene จะทำให้ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิตกผลึกและจุดไหลเทของน้ำมันที่ผ่านการแยกไขน้อยลง ทำให้อัตราการกรองสูงขึ้น แต่จะไม่มีผลต่อปริมาณน้ำมันที่ได้จากการแยกไข โดยที่อัตราส่วน MEK/toluene เท่ากับ 100 จะให้อัตราการกรองสูงที่สุด ส่วนปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในไขจะต่ำลงเมื่อปริมาณตัวทำละลายที่เติมในขั้นแรกลดลง ซึ่งปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในไขจะต่ำที่สุดเมื่อปริมาณตัวทำละลายที่เติมในขั้นแรกเป็นอัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมัน 1

Francis และ King (35) ได้ทดลองแยกไขออกจากน้ำมัน distillate-type raffinate และน้ำมัน bright-stock (95 V.I.) โดยใช้ MPK และ MEK เป็นตัวทำละลายผสมกับโทลูอินเปรียบเทียบกัน พบว่า เมื่อใช้ MPK ตัวเดียวในการแยกไขออกจากน้ำมัน distillate-type raffinate จะได้ผลดีกว่าการใช้ตัวทำละลายผสมของ MEK และ โทลูอิน แต่สำหรับน้ำมัน bright-stock จะให้อัตราการกรองต่ำมาก เนื่องจากน้ำมันส่วนที่มีความหนืดสูงจะไม่ละลายและเค้กของไขจะมีลักษณะเป็นยางเหนียว เมื่อใช้อัตราส่วน MPK ต่อโทลูอิน 80/20 ร้อยละโดยปริมาตรเป็นตัวทำละลายในการแยกไขออกจากน้ำมัน bright-stock เพื่อให้ได้น้ำมันซึ่งผ่านการแยกไขแล้วมีจุดไหลเท 20 °F พบว่า ได้ผลลัพธ์เหมือนกับเมื่อใช้ MEK ต่อโทลูอิน 55/45 ร้อยละโดยปริมาตร

Marple และ Landry (24) ได้ทดลองแยกไขออกจากน้ำมัน East Texas 250 neutral raffinate โดยใช้ตัวทำละลายผสมของ MEK/toluene พบว่า อัตราการกรองจะเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ MEK ที่เพิ่มขึ้นในตัวทำละลายผสม เมื่อใช้โทลูอินอย่างเดียวยังจะตกผลึกยาก ผลึกของไขจะเล็กละเอียด กรองได้ยากทำให้ค่าแตกต่างระหว่างอุณหภูมิตกผลึกและจุดไหลเท

ของน้ำมันซึ่งผ่านการแยกไขมีค่าสูง ส่วนกรณีที่ใช้ MEK อย่างเดียวไขจะตกผลึกได้ดี แต่ที่อุณหภูมิ ต่ำ ๆ จะเกิดการแยกขึ้นของน้ำมันและ MEK ทำให้ไขและน้ำมันรวมตัวกันใหม่

Passut กับคณะ (36) ได้ทำการแยกไขออกจากน้ำมัน paraffinic white oil ซึ่งมีช่วงจุดเดือด 685-795 °F ที่อุณหภูมิ -80 °F โดยใช้ MIBK/MEK 3/1 โดยปริมาตรเป็นตัว ทำละลาย อัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมัน 7.6 ช่วงอัตราการลดอุณหภูมิ 2 °F ถึง 45 °F ต่อนาที และใช้ผ้ากรองไนลอนที่มีขนาดรูพรุน 50 μm พบว่า อัตราการกรองจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก 9 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต ไปเป็น 1.5 แกลลอนต่อนาทีต่อตารางฟุต เมื่อเพิ่มอัตราการลดอุณหภูมิ จาก 2 °F ต่อนาที เป็น 45 °F ต่อนาที

West (26) ได้ทดลองใช้ตัวทำละลายผสมของ MEK/MTBE, MEK/MIBK, MEK/CH₂Cl₂ และ MEK/toluene 60/40 ร้อยละโดยปริมาตร แยกไขออกจากน้ำมัน Baytown 600 N โดยใช้ อัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมัน 3/1 โดยปริมาตร พบว่า ตัวทำละลายผสมของ MEK/toluene และ MEK/MTBE ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการละลายเป็นเนื้อเดียวกันของน้ำมันและตัวทำละลาย กับอัตราส่วนของ MEK/MTBE และ MEK/toluene ในตัวทำละลายผสมเหมือนกัน ระบบตัวทำละลาย ผสมของ MEK กับโทลูอินหรือ MTBE สามารถใช้อัตราส่วน MEK สูงกว่าระบบตัวทำละลายผสมอื่น ที่อุณหภูมิการละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ MEK อุณหภูมิการละลายเป็น เนื้อเดียวกันของตัวทำละลายและน้ำมันจะสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบตัวทำละลาย MEK/MTBE และ MEK/toluene ที่ใช้ในการแยกไข พบว่า MEK/MTBE จะให้ผลดีกว่า คือ ให้อัตราการกรอง และปริมาณน้ำมันที่ผ่านการแยกไขสูงกว่า เมื่อกรองของผสมที่อุณหภูมิ -18 °F โดยใช้อัตราส่วน ตัวทำละลายต่อน้ำมันเท่ากับ 2 จะทำให้จุดไหลเทของน้ำมันที่ผ่านการแยกไขมีค่าเท่ากับ -14.5 °F ต่ำกว่ากรณีของ MEK/toluene ซึ่งใช้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อน้ำมันเท่ากับ 3 และทำให้จุดไหลเท ของน้ำมันที่ผ่านการแยกไขมีค่าเท่ากับ -12.5 °F

อภิษฐ์ (37) ศึกษาการตกผลึกแยกไขพาราฟินออกจากน้ำมันไลท์ดีเซลที่เสกที่ได้จากโรงกลั่น ผ่างในเครื่องตกผลึกแบบจานเหล็กหมุนอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ MEK/toluene 1/1 โดยปริมาตร เป็นตัวทำละลาย อัตราการป้อนเข้า 0.5 ลิตรต่อนาที และอุณหภูมินำหล่อเย็น 16.0 °F คงที่ตลอด ทุกการทดลอง ช่วงอัตราส่วนตัวทำละลายผสมต่อน้ำมันระหว่าง 1/1 ถึง 6/1 ความเร็วรอบของ จาน 0.05 ถึง 1.28 รอบต่อนาที อุณหภูมิสารละลายน้ำมัน 30 °F ถึง 34 °F และจำนวนครั้งที่ สารละลายน้ำมันไหลผ่านเครื่องตกผลึก 1 ถึง 10 ครั้ง พบว่า สภาวะที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนตัวทำ- ละลายผสมต่อน้ำมันเท่ากับ 5/1 ความเร็วรอบของจาน 0.5 รอบต่อนาที อุณหภูมิสารละลายน้ำมัน 30.0 °F จะได้น้ำมันที่แยกไขออกบางส่วนมีจุดไหลเทลดลงจาก 35.0 °F เป็น 31.6 °F เมื่อสาร- ละลายน้ำมันไหลผ่านเครื่องตกผลึกครั้งเดียวและเมื่อผ่าน 10 ครั้ง ลดลงเป็น 25.5 °F และเมื่อ

ศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของอัตราการเติบโตของไซบนมิวจานเหล็กที่มีอุณหภูมิคงที่ พบว่า ความหนาของชั้นไซ เป็นฟังก์ชันกับเวลาที่สภาวะที่ดีที่สุดในการทดลองแยกไซแสดงได้ด้วยสมการ $dx/dt = 1/\sqrt{1.56 + 71.4t}$

สรวงสุดา (38) ได้ทำการศึกษาการสกัดแยกสารไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารผสมไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว โดยใช้ช่วงเวลาของการกวนผสมสาร 0-120 นาที อุณหภูมิ 10 °ซ ถึง อุณหภูมิห้อง และความดัน 30-100 บาร์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ช่วงเวลาของการกวนผสมสาร 60 นาทีที่อุณหภูมิห้อง และความดัน 80 บาร์ ปริมาณไซในสิ่งสกัดลดลงจากร้อยละ 20.6 เป็น 8.7 โดยน้ำหนัก ในการสกัดสาร 5 ครั้ง ปริมาณไซในสิ่งสกัดลดลงจากร้อยละ 20.6 เป็น 3.1 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดและที่เหลือจากการสกัด พบว่าไฮโดรคาร์บอนในสิ่งสกัดมีการกระจายโมเลกุลค่อนข้างไปทางสารอัลเคนโมเลกุลเล็กในขณะที่ไฮโดรคาร์บอนในส่วนที่เหลือ มีการกระจายโมเลกุลค่อนข้างไปทางสารอัลเคนโมเลกุลใหญ่ เมื่อเปรียบเทียบผลของความดันและอุณหภูมิต่อการสกัดสาร พบว่า ในการสกัดสารไฮโดรคาร์บอน ความดันมีผลมากกว่าอุณหภูมิ

ประเสริฐ (39) ได้ศึกษาการกรองแบบพลวัตในการขจัดน้ำมันของไซปิโตรเลียม ซึ่งมีปริมาณน้ำมันปนอยู่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยใช้ MEK เป็นตัวทำละลาย จากการศึกษาเบื้องต้นโดยใช้เครื่องกรอง buchner funnel ที่ความดันตกในการกรอง 5 ซม.ปรอท อุณหภูมิของการตกผลึกไซ -10 °ซ ถึง 40 °ซ อัตราส่วนไซต่อตัวทำละลาย 1/4 ถึง 1/10 พบว่าสภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิตกผลึก 25 °ซ อัตราส่วนไซต่อตัวทำละลาย 1/8 เมื่อนำสภาวะดังกล่าวนี้ไปใช้ขจัดน้ำมันออกจากไซในเครื่องกรองแบบพลวัตที่ความเร็วของใบกวนในเครื่องกรอง 85 และ 240 รอบต่อนาที ความดันเฉลี่ยของการกรอง 30.4 ซม.ปรอท พบว่า ความเร็วของใบกวนจะมีผลน้อยมากต่อการกรอง และเครื่องกรองสามารถกรองได้อย่างต่อเนื่องเมื่อ slurry ที่ได้มีอัตราส่วนตัวทำละลายต่อไซ 3.65/1 และเมื่อให้ไซผ่านเครื่องกรอง 2 ครั้ง ปริมาณน้ำมันในไซจะลดลงเหลือร้อยละ 9.54 และ 5.71 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย