



น้ำมันปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิงใต้พิภพรูปหนึ่ง ที่ถูกค้นพบในส่วนต่าง ๆ ของโลกเกิดขึ้น โดยการย่อยสลายของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ๆ จากการวิเคราะห์พบว่าน้ำมันปิโตรเลียม (3) ประกอบด้วยส่วนสำคัญคือ ไฮโดรเจน 12-14% คาร์บอน 80-89% นอกจากนี้ยังมีกำมะถัน ออกซิเจน และไนโตรเจน จำนวนเล็กน้อย โดยธาตุต่าง ๆ เหล่านี้รวมตัวกันทางเคมี (chemical combination) เป็นน้ำมันปิโตรเลียม

### 2.1 น้ำมันปิโตรเลียม (petroleum oil)

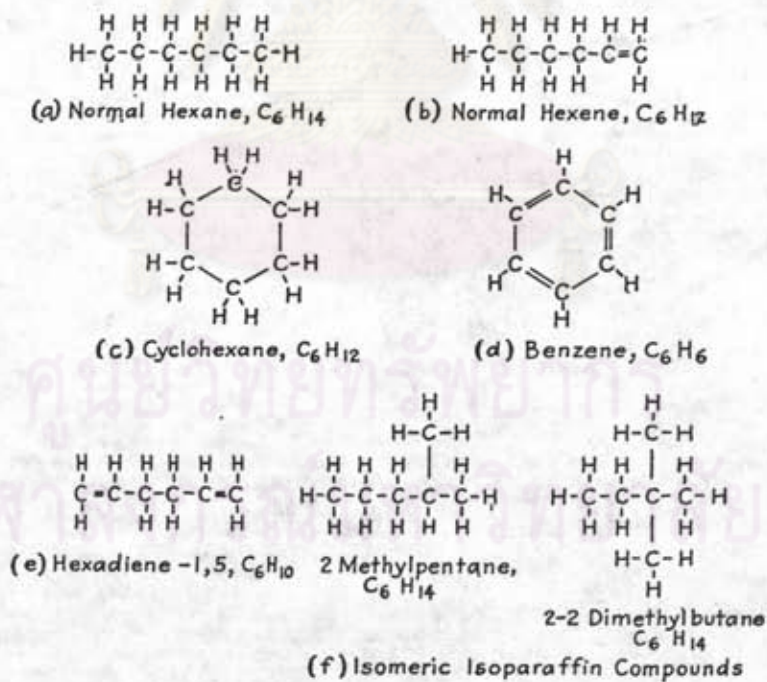
2.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม (2, 3) ส่วนใหญ่คือ ไฮโดรเจนและคาร์บอน ซึ่งมีหลายชนิดแตกต่างกันตามโครงสร้างคือ พาราฟิน (paraffin), โอลิฟิน (olefin), แนฟทีน (naphthene), อะโรมาติก (aromatic), ไดโอลิฟิน (diolefin) และอะเซทิลีน (acetylene)

พาราฟิน สูตรโครงสร้าง  $C_n H_{2n+2}$  เป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbon) มีอะตอมของคาร์บอนที่ประสานเข้าด้วยกันเป็นลูกโซ่ด้วยพันธะเดี่ยว (single bond) โดยมีไฮโดรเจนล้อมรอบ ชื่อท้ายจะออกเสียงด้วยแอน (-ane) เช่นมีเทน (methane), อีเทน (ethane), เฮกเซน (hexane) และเฮกซะเดคาเคน (hexadecane) ที่อุณหภูมิห้อง ไฮโดรคาร์บอนกลุ่มนี้จะไม่ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก (fuming sulfuric acid), สารละลายต่างเข้มข้น, กรดไนตริก และกรดโครมิก ยกเว้นพวกที่ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมองศา 3 (tertiary carbon atom) แต่จะทำปฏิกิริยาอย่างช้า ๆ กับคลอรีนภายใต้แสงแดด และกับคลอรีนและโบรมีน ถ้ามีตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบแทนที่ (substitution) ของอะตอมไฮโดรเจน ดังรูปที่ 2.1 a และ f รูปที่ 2.1 แสดงสูตรโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน

โอลิฟิน สูตรโครงสร้าง  $C_n H_{2n}$  เป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว (unsaturated hydrocarbon) กล่าวคืออะตอมคาร์บอน 2 อะตอมจับกันด้วยพันธะคู่ (double bond) ทำให้ผลิตภัณฑ์นั้นไม่อิ่มตัวคือในสภาวะปกติสามารถจะรับอะตอมไฮโดรเจนหรือธาตุอื่นได้อีก โอลิฟินสามารถเปลี่ยนเป็น พาราฟิน ได้โดยทำปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) โดยการให้ไฮโดรเจน 2 อะตอมสร้างพันธะกับคาร์บอน 2 อะตอมที่จับกันด้วยพันธะคู่เปลี่ยนเป็นพันธะ

เดี่ยว การเรียกชื่อลงท้ายด้วยอิน (-ene) เช่น ethylene, propylene และ butene โอลีฟิน . สามารถทำปฏิกิริยาและละลายได้ใน กรดซัลฟูริก ในน้ำมันดิบจะไม่พบ โอลีฟิน ที่จุดเดือดต่ำ แต่จะพบในผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กจากกระบวนการกะตะลิติก เครกกิง (catalytic cracking) ดังรูป 2.1B

แนฟทีน สูตรโครงสร้าง  $C_n H_{2n}$  เหมือน โอลีฟิน . แต่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เป็น ไฮโดรคาร์บอนที่เชื่อมตัวประกอบด้วยนิวเคลียสวงแหวน (ring nuclei) หนึ่งหรือมากกว่า ในขณะที่ โอลีฟิน เป็นสารประกอบที่มีโซ่สายตรง (straight-chain compound) และไม่เชื่อมตัว การเรียกชื่อกลุ่มนี้ในอดีตนิยมเรียกเป็น methylene เช่น tetramethylene, pentamethylene, และ hexamethylene แต่ในปัจจุบันเรียกว่า cyclobutane, cyclopentane, และ cyclohexane naphthene ไม่ละลายใน กรดซัลฟูริก ดังรูปที่ 2.1 C



รูปที่ 2.1    สูตรโครงสร้างของไฮโดรคาร์บอน

อะโรมาติก สูตรโครงสร้าง  $C_n H_{2n-6}$  บางทีเรียกเป็นอนุกรมเบนซีน (benzene series) อะโรมาติก สามารถเกิดการออกซิเดชันกับ กรดอินทรีย์ ได้โดยการรวมตัวกัน และเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวหรือการแทนที่ขึ้นอยู่กับสภาวะของปฏิกิริยานั้น น้ำมันปิโตรเลียมเพียงไม่กี่แหล่งที่มี อะโรมาติก จุดเดือดต่ำซึ่งได้แก่ benzene และ toluene ดังรูปที่ 2.1 d

ไดโอสีน สูตรโครงสร้าง  $C_n H_{2n-2}$  เหมือนกับ โอสีน : แต่มีอะตอมไฮโดรเจน น้อยกว่า 2 ตัว หรือมีพันธะคู่ในแต่ละโมเลกุล ทำให้มีความว่องไวต่อปฏิกิริยา (active series) ไดโอสีน . มักจะเกิดการรวมตัวหรือโพลีเมอร์ไรเซชัน (polymerization) กับโมเลกุลที่ไม่อิ่มตัว เป็นของแข็งที่สภาวะคล้ายยางเหนียว (gum) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไดโอสีน และ ยางเหนียว จะพบอยู่ใน untrated cracked gasoline แต่จะไม่พบในน้ำมันดิบ สามารถแยกออกได้ด้วย กรดซัลฟูริก ดังรูปที่ 2.1 e

น้ำมันปิโตรเลียมที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ ของโลก แตกต่างกันในสัดส่วนของไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ที่ประกอบกันอยู่ ตัวอย่างเช่น Pennsylvania crudes มี paraffinic hydrocarbons มาก ขณะที่น้ำมันดิบแหล่งแคลิฟอร์เนีย มี แนฟทีน และ อะโรมาติก มาก (4) เนื่องจากน้ำมันดิบประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลและจุดเดือดต่างกันมาก จึงทำให้องค์ประกอบบางส่วนเดือดที่อุณหภูมิห้องและบางส่วนไม่สามารถกลั่นได้ถึงแม้ว่าการกลั่นทำภายใต้สูญญากาศ (vacuum distillation)

2.1.2 สัดส่วนส่วนปิโตรเลียม (petroleum fraction) (5, 6) เป็นการแบ่ง ผลิตรถยนต์ปิโตรเลียมออกตามน้ำหนักโมเลกุล ช่วงจุดเดือดหรือความหนืด

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

ปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum) หรือปิโตรเลียมอีเธอร์ (petroleum ether) ช่วงจุดเดือด  $20-60^{\circ}C$  ประกอบด้วย  $C_5$  ถึง  $C_6$  ใช้เป็นตัวทำละลาย

น้ำมันเบนซินหรือแก๊สโซลีน (gasoline) ช่วงจุดเดือด  $40-205^{\circ}C$  จุดไหลเทต่ำ ประกอบด้วย  $C_5-C_{10}$  และ ไฮโคอัลเคน เป็นของเหลวไม่มีไขปน (wax free liquid) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน (internal combustion engine)

น้ำมันก๊าดหรือเคโรซีน (kerosine) เป็นของเหลวใสไม่มีไขปน ช่วงจุดเดือด 175-325 °C ประกอบด้วย  $C_{12}-C_{18}$  และ cycloalkane มีกลิ่นฉุน ใช้จุดให้ความสว่างและเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ไอพ่น (jet engine)

น้ำมันแก๊ส (gas oil) ช่วงจุดเดือดอยู่ระหว่างเคโรซีนกับน้ำมันหล่อลื่นคือ 230-243 °C ประกอบด้วยไฮพาราฟินที่มีจุดเดือดต่ำปริมาณเล็กน้อย

น้ำมันโลทด์ิลลิเกต (light distillate fuel oil) หรือน้ำมันเตาใสเบา ผลิตจากหน่วยกลั่นสูญญากาศ มีจุดเดือด ความหนืด และจุดไหลเทสูง ประกอบด้วยไฮพาราฟินพอสมควร

น้ำมันเตาใสหนัก (heavy fuel oil) ผลิตจากหน่วยกลั่นสูญญากาศหรือหน่วยกลั่นไอน้ำร้อนยิ่งยวด (superheated steam distillation) โดยปกติประกอบด้วยไฮเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นไฮที่อยู่ระหว่างไฮพาราฟินกับไฮไมโครคริสตัลไลน์ (microcrystalline waxes)

เรซิดิว (residue) มีความหนืดสูง ประกอบด้วยน้ำมันที่หนืด (viscous oil) microcrystalline wax และยางมะตอย (asphalt) นอกจากนี้ยังแยกได้อีกสองส่วนตามจุดประสงค์ของโรงกลั่น

น้ำมันดีเซล (diesel oil หรือ fuel oil) ช่วงจุดเดือด 250-400 °C ประกอบด้วย  $C_{15}-C_{20}$  และ ไฮโคอัลเคน ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล

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

ผลิตภัณฑ์เบา (light distillates) ที่ได้ระหว่างการกลั่นน้ำมันดิบ พวก พาราฟินที่มีกิ่งสาขา ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ส่วน พาราฟินสายตรง จะเป็นของแข็งที่เรียกว่า ไฮพาราฟิน . ในทางพาณิชย์เรียกว่า macrocrystalline wax เพราะว่าไฮโดรคาร์บอนจะตกผลึกออกจากสารละลายในรูปเข็มขนาดใหญ่ (large needle) หรือเพลท (plate) ส่วนผลิตภัณฑ์หนัก (heavy distillates) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะประกอบด้วย

ไอทีเป็นกิ่งลำซาหรือวงแหวน และจะตกผลึกแยกตัวออกจากสารละลายในรูปแบบผลึกขนาดเล็ก (Smaller crystal) - ผลึกที่เล็กกว่า มีน้ำหนักโมเลกุลสูงประกอบด้วย โมเลกุลที่ซับซ้อน เป็นของแข็งที่อุดมทึบและตกผลึกออกมาในรูปแบบผลึกขนาดเล็ก เรียกว่า ไอไมโครคริสตัลไลน์ (microcrystalline waxes)

2.1.3 โรงกลั่นน้ำมันผาง (1) ทำการกลั่นน้ำมันดิบได้ในอัตราวันละ 1,000 บาเรล ต่อวันและสามารถเพิ่มได้ถึง 1,500 บาเรลต่อวัน เมื่อเปลี่ยนเตาให้ความร้อนน้ำมันดิบก่อนเข้า หอกกลั่น ผลิตรวมที่กลั่นได้ในปัจจุบันสรุปได้ดังนี้

น้ำมันดีเซลทราน	ประมาณ 6%
น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว	ประมาณ 26%
น้ำมันโกลดีเซลเกรด	ประมาณ 17%
น้ำมันเตาไล่หนัก	ประมาณ 14%
น้ำมันเตาหนัก	ประมาณ 37%

โรงกลั่นน้ำมันผางเมื่อได้รับการดัดแปลงตามความจำเป็น เพื่อกลั่นน้ำมันดิบ แม่ลุ่มหลวง แล้วประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

หน่วยกลั่นที่บรรยากาศ (topping distillation unit)  
 หน่วยกลั่นที่สุญญากาศ (vacuum distillation unit)  
 หน่วยฟอกน้ำมันแก๊สโซลีน (gasoline treating unit)  
 หน่วยผสมแก๊สโซลีน (gasoline blending unit)  
 หน่วยกำลัง (power unit) และหน่วยประกอบต่าง ๆ มีโรงสูบน้ำมันและ  
 ฝั่งเก็บน้ำมัน (pump house and tank farm), หอทำให้เย็น (cooling tower), หน่วยหม้อน้ำ  
 (boiler unit), หน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ (water treatment unit), หน่วยไฟฟ้า (electric  
 generating unit), หน่วยเครื่องอัดลม และลมเครื่องวัด (air compressor and instrument  
 air unit) และห้องควบคุม (control room)

น้ำมันดิบจากหลุมแม่ลุ่มหลวงจะถูกส่งมาโรงกลั่นโดยรถแทงค์ เข้าแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบ  
 ในหน่วยแยกซึ่งใช้ Tret-O-lite เป็นน้ำยาแยกน้ำ (demulsifier) น้ำมันดิบจะถูกแยกน้ำให้เหลือ

ได้ไม่เกิน 0.4% แล้วจึงส่งเข้าอุ่นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้ไอน้ำร้อนจากหอกลั่น  
 สูญญากาศมาอุ่นจนถึงอุณหภูมิ 120°ซ แล้วจึงส่งต่อไปให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 340°ซ  
 ใน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งใช้ไอน้ำเตาเป็นเชื้อเพลิงแล้วถูกส่งไปกลั่นที่หอกลั่น  
 บรรยากาศ ซึ่งมีความดันภายใน 1 บรรยากาศ ในหน่วยกลั่นบรรยากาศจะกลั่นได้ผลิตภัณฑ์ 3  
 ชนิดคือ น้ำมันดีเซล, น้ำมันก๊าด และน้ำมันดีเซล

น้ำมันดิบที่กลั่นเอาผลิตภัณฑ์เบา 3 ชนิดข้างต้นออกไปแล้ว จะแยกตัวตกสู่กันห่อเรียก  
 รีดิวซ์ครูด (reduced crude) จากนั้นหอกลั่นบรรยากาศจะถูกส่งผ่าน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน  
 ซึ่งใช้ไอน้ำเตาเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนเช่นเดียวกับ H-1 เพื่อเพิ่มอุณหภูมิไปจนถึง 365°ซ  
 แล้วจึงส่งเข้ากลั่นในหอกลั่น สูญญากาศ ภายในหอรักษาความดันให้ต่ำกว่าบรรยากาศ 25 นิ้วปรอท  
 รีดิวซ์ครูดเมื่อผ่านหน่วยกลั่นสูญญากาศจะได้ผลิตภัณฑ์ 3 ชนิดคือ น้ำมันไลท์ดีสทิลเลต  
 (light distillate fuel oil) น้ำมันเฮลวีดีสทิลเลต (heavy distillate fuel oil)  
 น้ำมันเตาหนัก (heavy fuel oil)

ผลิตภัณฑ์น้ำมันดีเซลจะถูกล้างไปฟอกในหน่วยฟอกแกล์โซลีนเพื่อขจัดพวกสารประกอบ  
 กำมะถัน (mercaptan) โดยทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซดัลไฮดรอกไซด์ (caustic soda  
 solution) แกล์โซลีนที่ฟอกแล้ว ส่งเก็บในถังในหน่วยผสมแกล์โซลีน เพื่อรอการผสม  
 แกล์โซลีนกับสารเพิ่มออกเทน (TEL, tetra ethyl-lead) ในอัตราส่วน 3 มิลลิตร TEL  
 ต่อน้ำมันแกล์โซลีน 1 แกลลอน นอกจากนี้ยังผสมสารต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติดังนี้

สารป้องกันการเกิดปฏิกิริยาของโลหะ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันกับโลหะ  
 สารป้องกันการออกไซด์ ป้องกันการเกิดปฏิกิริยากับอากาศกลายเป็นยางเหนียว  
 สี (แดง-เหลือง) สีตามค่าออกเทน

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของน้ำมันดิบแหล่งแม่สุชลวง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของน้ำมันดิบแหล่งแม่ลูนหลวง

คุณสมบัติ	น้ำมันดิบแหล่งแม่ลูนหลวง
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)

ไชคือ ของผสมหรือสารประกอบอินทรีย์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นของแข็งที่อุดมไขมัน ซึ่งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบเหมือนไขมันและน้ำมัน แต่ไม่มีกลีเซอไรด์ (glyceride) ไชมีคุณสมบัติเหมือนพวก thermoplastic แต่การสัดเรียงตัวของโมเลกุลมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย จึงไม่สัดอยู่ในประเภทพลาสติก

### 2.2.1 ชนิดของไข (7, 8) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

ธรรมชาติ (natural)

1. สัตว์ เช่น bee wax, lanolin, shellac wax และ chinese insect wax

2. พืช เช่น carnauba, candelilla, baybery, sugar cane

3. แร่ (mineral) แยกออกเป็น

- fossil หรือ earth wax เช่น oxocerite, ceresin และ montan

- petroleum waxes เช่น โยพาราฟิน (paraffin waxes)

ไฮไมโครคริสตัลไลน์ (microcrystalline waxes)

สังเคราะห์ (synthetic)

1. ethylenic polymers และ polyol ether-esters เช่น carbo wax, sorbitol

2. chlorinated naphthalenes เช่น halo wax

3. hydrocarbon type

petroleum waxes (9) คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า 90°ฟ แบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ

โยพาราฟิน ประกอบด้วยพาราฟินสายตรง (straight chain hydrocarbon) เป็นส่วนใหญ่ และไฮโดรคาร์บอนกิ่งสาขา (branched chain hydrocarbon) บางส่วนซึ่งแยกได้จากสัตว์ส่วนไฮโดรคาร์บอน โดยโยพาราฟินมีจุดเดือดช่วง 670-900°ฟ ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งอยู่ในช่วงน้ำมันเบา และช่วงจุดหลอมเหลว 105-155°ฟ สำหรับเกรดทั่วไปช่วง 118-132°ฟ ลักษณะของไขจะมีขนาดใหญ่ (macro crystals) และสามารถแบ่งออกได้อีก 3 ชนิด ตามปริมาณน้ำมันที่ปนอยู่



- softer paraffin waxes ได้แก่ slack wax มีปริมาณ  
น้ำมันปนอยู่สูง (3-40% oil) จุดหลอมเหลวช่วง 122-140 °ฟ

- intermediate paraffin waxes ได้แก่ scale wax มีปริมาณ  
น้ำมันอยู่ต่ำกว่า slack wax (1-3 % oil) จุดหลอมเหลวช่วง 118-135 °ฟ

- harder paraffin waxes ได้แก่ โยพาราฟินที่ฟอกแล้ว (refined  
wax) หรือ block paraffins มีน้ำมันปนอยู่น้อยกว่า 0.5% จุดหลอมเหลวช่วง 123-165 °ฟ

ไฮไมโครคริสตัลไลน์ ประกอบด้วย ไอโซพาราฟิน (iso-paraffin) และแนพทีน  
กับ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน: ปริมาณเล็กน้อย ซึ่งแยกได้จากสัดส่วนไฮโดรเจนหนักและเรซิดิว  
ลักษณะของผลึกไขจะละเอียด (microcrystals) จุดหลอมเหลวสูงซึ่งโดยปกติสูงกว่า 145 °ฟ  
และอาจสูงถึง 200 °ฟ แบ่งออกได้อีก 3 ชนิด

- medium soft ได้แก่ petrowax

- medium hard ได้แก่ petrosure A

- hard ได้แก่ "Be square 190/195"

medium soft microcrystalline wax มีความสามารถในการทะลุ  
(needle penetration) ประมาณ 25-80 (100 gm/77 °F/5 sec) ส่วน medium hard  
wax มีค่าอยู่ระหว่าง 10-25 และ hard wax มีค่า 3-10 โดยค่าความสามารถในการทะลุ  
กำหนดโดยวิธี ASTM D5-25

petrolatum มีโครงสร้างของผลึกเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน (amorphous-  
like) และมีปริมาณผลึกค่อนข้างน้อยคือน้อยกว่า 25%

### 2.2.2 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ (10, 11) ของไฮโดรเจน

ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัว ไขทั้งสองชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลสูง กล่าวคือ โยพาราฟินเกรดการค้า  
(commercial grade) โดยทั่วไปมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 360-420 ส่วน ไฮไมโคร  
คริสตัลไลน์เกรดการค้า มีค่าประมาณ 580-700 มีคาร์บอน 41-50 อะตอม จากความแตกต่าง  
ของน้ำหนักโมเลกุลแสดงให้เห็นว่า โยพาราฟินสามารถแยกได้โดยการกลั่นที่ความดันบรรยากาศ  
ขณะที่ไมโครคริสตัลไลน์ไม่สามารถแยกได้

ไฮพาราฟินและไมโครคริสตัลไลน์สามารถละลายซึ่งกันและกันได้ และละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น carbon disulfide, ethyl ether, ester, benzene ฯลฯ ความสามารถในการละลาย (solubility) เป็นฟังก์ชันกับจุดหลอมเหลว ถ้าจุดหลอมเหลวสูงจะละลายได้น้อยที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวของไฮจะละลายได้หมดในตัวทำละลาย คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของไฮแสดงในตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของไฮ

คุณสมบัติ	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	depends on color
thermal stability	poor	depends on color
reactivity with sulfuric acid	low	high

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของไข

คุณสมบัติ	Paraffin	Microcrystalline
metting 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, properties when mixed with- petroleum oil	0	low to high
ductility	low	low to high
staining or blending	high	low

2.2.3 ประโยชน์ของไขปิโตรเลียมในทางอุตสาหกรรม (industrial application of petroleum waxes) (12, 13):

- กระดาษสำหรับห่อหุ้ม (paper packaging materials) กระดาษ  
และกระดาษแข็ง (cardboard) ไขเป็นวัสดุในการห่อหุ้ม แต่งานหลายประเภทไม่สามารถใช้ได้

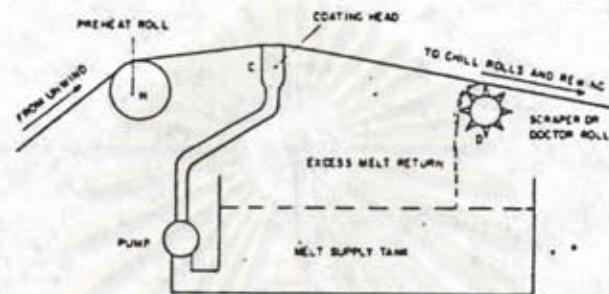
เนื่องจากไม่กันน้ำ (waterproof) คือยอมให้น้ำและไอน้ำซึมผ่าน เกิดความสูญเสียความแข็งแรงไปเมื่อสัมผัสน้ำ

- กระดาษเคลือบไข (waxed paper) พื้นฐานเบื้องต้นของกระบวนการเตรียมกระดาษเคลือบไขคือ การผ่านใบกระดาษ (paper web) อย่างต่อเนื่องลงสู่อ่างไขเหลวหรือไขผล้ม แล้วจึงผ่านเข้าเครื่องรีด (roller) เพื่อรีดไขที่มากเกินไป ไขผล้มจะมีความหนืดน้อยกว่า 15 CP ที่อุณหภูมิปฏิบัติงาน ซึ่งทั่วไปไม่เกิน 125°ซ และไขผล้มจะประกอบด้วยไขพาราฟินที่มีปริมาณไฮโมโครคลิสต์ลอสันต่ำ กระดาษเคลือบไขที่มีผิวมันทำโดยการลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว (shock chilling) ของกระดาษเคลือบไข โดยการจุ่มลงในอ่างน้ำเย็น

- การเคลือบแบบคิส (kiss coating) เป็นการเคลือบกระดาษด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ยังสามารถเคลือบผิวทั้งสองด้านได้ โดยการจุ่มกระดาษลงในอ่างให้ทั่ว ถ้าต้องการให้มีปริมาณไขมันผิวกระดาษเล็กน้อย ทำโดยการผ่านกระดาษเคลือบไขเข้าเครื่องรีดที่ร้อน ไขจะถูกรีดเข้าไปในรูพรุนของกระดาษ เรียกกระดาษแบบนี้ว่า กระดาษเคลือบไขแบบแห้ง (dry-waxed paper) ส่วนกระดาษเคลือบไขแบบเปียก (wet-waxed paper) ทำได้โดยผ่านกระดาษลงในอ่างและทำให้เป็นตัวลงอย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งกำจัดไขส่วนเกินออกไป ไขจะถูกทำให้ร้อนจนมีอุณหภูมิสูงเกินกว่า 65-85°ซ ไมได้ (ไขผล้มบางชนิดอาจถึง 125°ซ) เนื่องจากจะเกิดการออกซิเดชันของไขเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เราสามารถลดการเกิดออกซิเดชันโดยเติมสารยับยั้งลงไปเช่น 2, 6 di-tertiary-butyl-4-methylphenol

- กล่องพับ (folding cartons) กล่องพับจะเคลือบด้วยไขผล้มโพลีเมอร์ ไขเป็นกล่องบรรจุเนย, เบคอน, ผักแช่เย็น, ไอศกรีม, พาย ฯลฯ โดยทั่วไปจะมีโพลีเมอร์มากกว่า 10% ซึ่งเรียกของผล้มนี้ว่า hot melt ของผล้มนี้เมื่อเคลือบผิวจะมีลักษณะคล้ายพลาสติกยืดหยุ่น (flexible plastic-like coating) แต่มีคุณสมบัติในการกันไอน้ำซึมผ่านดีกว่าพลาสติก

-เทียนไข (candles) ประกอบด้วยไขพาราฟินกับไขจากพืชหรือสัตว์ และผล้มกรดล้เคลือบกับไขพาราฟิน การผลิตเทียนไขใช้กระบวนการหล่อแบบ (moulding) หรือ เอกทรูชัน (extrusion)



รูปที่ 2.2 การเคลือบกระดาษใยแบบคิลล์

- ยีผึ้งขัดเงา (polishes) เป็นของผสมที่ประกอบด้วยใยจากพืชหรือสัตว์ ใยพาราฟิน, โยไมโครคลิสต์ลโลนและตัวทำละลาย เช่น น้ำมันสน บางครั้งก็ผสมน้ำหอมและสีลงไป การผสมใยพาราฟินลงไปเพื่อเพิ่มเนื้อของผลิตภัณฑ์ ทำให้มีราคาถูกลงและจุดหลอมเหลวต่ำลง ส่วนโยไมโครคลิสต์ลโลนทำให้ผิวเรียบ
- ไมซ์ด (matches) ไมซ์ดจะจุ่มใยที่มีจุดหลอมตัวต่ำ (44-48°) เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่ดี
- ใยเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมเคมี การแตกตัวของใยจะได้  $\alpha$ -olefin ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการเปลี่ยนเป็นผงซักฟอกชนิดอัลคิลซัลเฟต และสารเคมีตัวอื่น ปฏิกิริยาคลอรีเนชัน (chlorination) ของใยจะได้อัลเคนที่มีอะตอมคลอรีนแทนที่ ที่สามารถใช้เป็น สารที่ใยสำหรับกันน้ำ และสารที่ใยสำหรับป้องกันไฟ หรือเป็นสารเติมสำหรับน้ำมันหล่อลื่น นอกจากนี้โยไมโครคลิสต์ลโลน ใยในอุตสาหกรรมยาง (rubber industry) เพื่อป้องกันผิวยางแตกและใยในอุตสาหกรรมเทกซ์ไทล์ (textile) เป็นตัวเคลือบเชือก (cordage)

ตารางที่ 2.4 Application of waxes

QUALITY REQUIREMENTS OF PRODUCTS FOR THE MAJOR WAX APPLICATIONS

<u>Application</u>	<u>Typical Waxes Used*</u>	<u>Principal End Use Requirements**</u>
<i>Nested Containers</i>		
Paper Cups	140 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.
<i>Folding Cartons</i>		
Overwrapped Carton	TERVAN Brands 130-145° Paraffin	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.
<i>Waxed Papers</i>		
Unblended Paraffin	130 to 145° Paraffins	Fair blocking and scuff resistance, sealing strength and gloss.
Blends	Above + microwaxes + polyethylene	Good blocking and scuff resistance, sealing strength and gloss.
<i>Laminated Papers</i>		
	MIKROVAN Brands	Good laminating strength, stain resistance.
<i>Corrugated Paperboard</i>		
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.
<i>Candles</i>		
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.
<i>Chlorination Feed Stocks</i>		
40% Chlorinated Wax	123-130° Scale (special specs.)	Proper end composition and thermal stability.
70% Chlorinated Wax	123-127° 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 การแยกไขในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (dewaxing)

การแยกไขเป็นกระบวนการกำจัดสารพาราฟินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยจะเป็นพวก พาราฟิน ไอโซพาราฟินและไซโคพาราฟิน ออกจากน้ำมันที่กลั่นได้ ทั้งนี้เพราะ ไขที่มีในน้ำมันได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ จะมีผลต่อการขนถ่ายน้ำมันและการนำผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไปใช้งาน เพราะไขจะตกผลึกที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการแข็งตัว การแยกไขไม่ล่ามารถ ทำได้โดยการกลั่น เนื่องจากจุดเดือดของไขอยู่ในช่วงเดียวกับน้ำมัน ซึ่งเมื่อแยกไขออกบางส่วน จะทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีจุดไหลเทลดต่ำลงได้และได้ไขเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดเพิ่มขึ้น

2.3.1 การแยกไขโดยไม่ใช้ตัวทำให้เจือจาง (dewaxing without the use of diluent) (14) เป็นวิธีเก่าและธรรมดาในการแยกไข โดยการลดอุณหภูมิของน้ำมันลงโดยตรง จนถึงจุดหลอมจุดไหลเทที่ต้องการแล้วสูบของผสมเป็นผ่านเครื่องกรองแบบอัด (filter press) ขนาดใหญ่ ซึ่งจะกรองผลึกของไขไว้ ส่วนน้ำมันที่แยกไขออก (dewaxed oil) จะไหลผ่านไป เมื่อผลึกไขเต็มเครื่องกรองจะถูกเปิดออกเพื่อทำการแยกไขออกจากผ้ากรอง ผลึกของไขบนเค้ก (cake) ควรจะมีลักษณะหยาบเพื่อการกรองจะกระทำได้ง่าย ซึ่ง พาราฟิน ตกผลึก จะให้ผลึกที่หยาบ ส่วน ไอโซพาราฟินหรือไซโคพาราฟิน ให้ผลึกที่ละเอียด ข้อเสียของ กระบวนการนี้คือ (15)

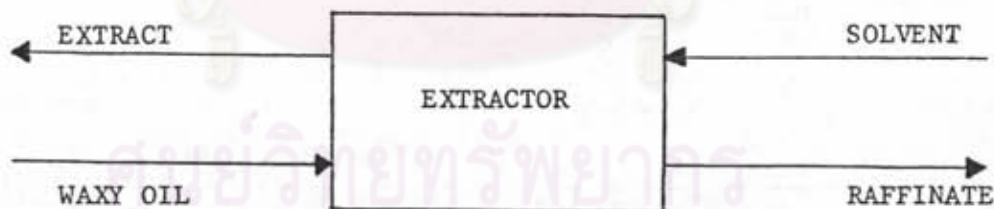
- กระบวนการเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discontinuous process) และ ใช้คนงานปฏิบัติงานที่เครื่องกรองมาก
- การแยกไขในน้ำมันที่มีความหนืดสูง เช่น พวกน้ำมันหนัก (heavy oil) การกรองจะทำได้ลำบาก
- ไม่ล่ามารถใช้กับน้ำมันกันหอกที่มีผลึกขนาดเล็กมาก (microscopic size) ของไฮโดรคาร์บอนอัลโลไนต์

กระบวนการที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบันนี้ ใช้ตัวทำละลายเข้ามาช่วยในการแยกไขและช่วยลดความหนืดของน้ำมันลง

2.3.2 การแยกไขด้วยตัวทำละลาย (solvent dewaxing) สามารถแบ่งออก ได้เป็น 2 กระบวนการใหญ่ ๆ คือ

### 2.3.2.1 กระบวนการสกัดแยกสาร (solvent extraction processes)

(17) เป็นกระบวนการที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน เช่น ความหนืด สีของน้ำมัน ตัวทำละลายส่วนใหญ่ที่ใช้ในกระบวนการสกัดแยกสารปิโตรเลียม (petroleum extraction process) มักจะเป็นตัวทำละลายที่หนักกว่าน้ำมันและละลายไฮโดรคาร์บอนได้ดี แต่ไม่ละลายหรือละลายน้ำมันได้น้อย ตัวทำละลายเหล่านี้ได้แก่ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลว (liquid  $\text{SO}_2$ ), furfural, phenol, N-methyl-2-pyrrolidone (MP) ฯลฯ ตัวทำละลายเหล่านี้จะไปละลายไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ละลายน้ำมัน ทำให้เกิดการแยกชั้นของของเหลวเป็นชั้นของน้ำมัน (raffinate) และชั้นของตัวทำละลายที่ละลายไฮโดรคาร์บอน (extract) ดังนั้นเมื่อแยกของเหลวแต่ละชั้นออกก็จะได้น้ำมันที่ไฮโดรคาร์บอนอยู่ในปริมาณน้อยลง ส่วนชั้นของตัวทำละลายก็จะนำไปแยกตัวทำละลายออกแล้วนำกลับไปใช้ใหม่อีก (solvent recovery) ส่วนที่เหลือก็คือไฮโดรคาร์บอน กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงในรูปของแผนภูมิอย่างง่าย ๆ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 . แผนภูมิการแยกสกัดสารอย่างง่าย



- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เหลว ปัจจุบันไม่นิยมใช้เนื่องจากความเป็นพิษ (toxicity) ทำให้เกิดปัญหาทางด้าน การควบคุมมลภาวะและมีขีดจำกัดในการใช้คือเหมาะสำหรับ น้ำมันที่มีไขมัน (waxy oil) ที่ผลิตไหลเต๋า ๆ เท่านั้น

- การแยกสกัดด้วยฟีนอล ซึ่ง phenol เป็นตัวทำละลายที่ละลายพวก แนพทีนและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ได้ดีมาก ทำให้ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมันเต๋า (solvent to oil ratio) แต่จากการที่ phenol สามารถละลายพวกไฮโดรคาร์บอนบางตัวได้ดี ทำให้บางส่วนของน้ำมันถูกละลายด้วย ดังนั้นจึงต้องฉีดน้ำลงไปเพื่อควบคุมการละลายของไฮโดรคาร์บอนใน phenol โดยน้ำจะถูกฉีดลงไปในส่วนขุ่นของ ส่วนสกัด (extract) ซึ่งมีไฮโดรคาร์บอนละลายอยู่ ทำให้ไฮโดรคาร์บอนบางตัวแยกตัวออกมาจากชั้นของ ส่วนสกัด เกิดเป็นชั้น pseudo-raffinate ซึ่งจะถูกแยกออกและล้างกลับเข้าหน่วยแยกสกัดใหม่ นอกจากนี้ phenol ยังมีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงและความเป็นพิษสูงทำให้ เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้ต้องทนฤทธิ์กัดกร่อนได้ จึงมีราคาแพง ดังนั้นปัจจุบันจึงไม่ค่อยนิยมใช้

- การแยกสกัดด้วย MP ซึ่ง N-methyl-2-pyrrolidone (MP) เป็นตัวทำละลายที่ดี ค่าการเลือก สูง ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมันเต๋า ความเป็นพิษ และการกัดกร่อนต่ำเหมาะสำหรับใช้กับน้ำมันพวก พาราฟินหรือแนพทีน

น้ำมันที่ได้หลังจากการสกัดแล้วจะมีคุณภาพสูง ข้อเสียคือ MP มีราคาแพง หากได้ยากและยังไม่ค่อยแพร่หลาย ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงกระบวนการที่ใช้ตัวทำละลายอื่น ๆ เช่น phenol ให้เป็นกระบวนการที่ใช้ MP แทน เพื่อให้ผลที่ดีกว่าและเป็นที่ยอมรับ

- การแยกสกัดด้วย furfural ซึ่ง furfural เป็นตัวทำละลายที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ความสามารถในการละลายพวกไฮโดรคาร์บอนค่อนข้างสูง แต่ต่ำกว่า phenol และ MP ดังนั้นอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อน้ำมันเต๋าสูงกว่ากรณีที่ใช้ phenol และ MP furfural เป็นสารที่ไวต่อปฏิกิริยาเคมี ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ดังนั้นในกระบวนการ จึงมักจะมี ล่าร์กำจัดออกซิเจน (deaerator) เพื่อป้องกันไม่ให้มีอากาศเข้าไปออกซิไดซ์ furfural นอกจากนี้ furfural ละลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสูญเสียตัวทำละลายในกระบวนการมากกว่าใช้ตัวทำละลายอื่น

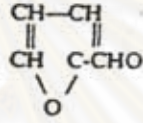
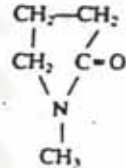
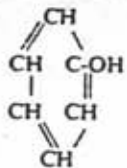
ในกระบวนการสกัดแยกสารด้วยตัวทำละลายที่ใดก็ตามมาแล้วนั้น จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมัน สิ่งที่ต้องการแยกสกัดหรือสิ่ง เติมน้ำมันมากหรือน้อยและชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ การเลือกใช้ตัวทำละลายนั้นมีข้อพิจารณา ในการเลือกดังนี้

- high selectivity มีความเลือกละลายตัวถูกละลายชนิดที่ต้องการแยกออกสูง เช่น ละลายไฮโดรคาร์บอนแต่ไม่ละลายน้ำมัน
- good solvent power สามารถละลายตัวถูกละลายในปริมาณสูง ทำให้ใช้อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อตัวน้ำมันต่ำ
- high extraction temperature สามารถใช้อุณหภูมิสูงในการแยกสกัดได้ เพราะจะทำให้เกิดอัตราการถ่ายเทมวลได้ดี
- easy recovery ตัวทำละลายสามารถแยกออกจากตัวถูกละลายได้ง่าย เช่น แยกออกโดยการกลั่นธรรมดา
- low vapor pressure ตัวทำละลายที่ใช้ควรมีความดันไอต่ำเพื่อจะได้ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ทนความดันสูงนัก
- high density มีความหนาแน่นสูงเพื่อจะได้เกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำมันและตัวทำละลายได้เร็วและดี
- no emulsification ไม่เกิดอิมัลชัน ทำให้เกิดการแยกชั้นของตัวทำละลายและน้ำมันได้ดี
- stability มีเสถียรภาพสูง ไม่เกิดการสลายตัวทางความร้อนและทางเคมี
- adaptable สามารถใช้ได้กับน้ำมันที่ต้องการแยกไฮโดรคาร์บอนได้หลายชนิด
- available at reasonable cost ราคาของตัวทำละลายไม่ควรสูงเกินไป
- non-corrosive มีฤทธิ์กัดกร่อนน้อยหรือไม่กัดกร่อนเลย ทำให้เลือกสารหรือโลหะในการสร้างเครื่องมือได้ง่ายและราคาถูก
- non-toxic ไม่มีความเป็นพิษหรือไม่ทำให้เกิดมลพิษ

ตารางที่ 2.5 และ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของตัวทำละลายทั้งสามคือ furfural, MP และ phenol พบว่า phenol นั้น แม้ว่าจะมีราคาถูกที่สุด แต่ค่าการเลือกไม่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับ furfural และ MP และยังมีความเป็นพิษสูงที่กัดกร่อน

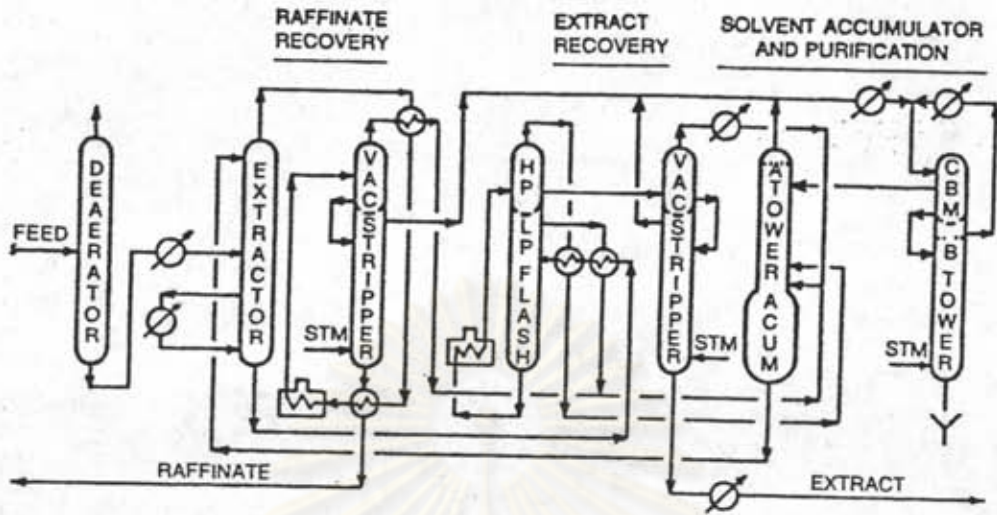
รุนแรง ปัจจุบันนี้จึงไม่ค่อยนิยมใช้ phenol แต่จะใช้ MP และ furfural แทน แต่อย่างไรก็ตามในปัจจุบัณนี้นิยมใช้ furfural มากกว่า MP เนื่องจากมีราคาถูก หาได้ง่าย อีกทั้งยังเป็นพิษต่ำและ ค่าการเลือก สูง

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ furfural, MP และ phenol ในการใช้เป็นตัวทำละลายสกัดแยกถั่ว (16)

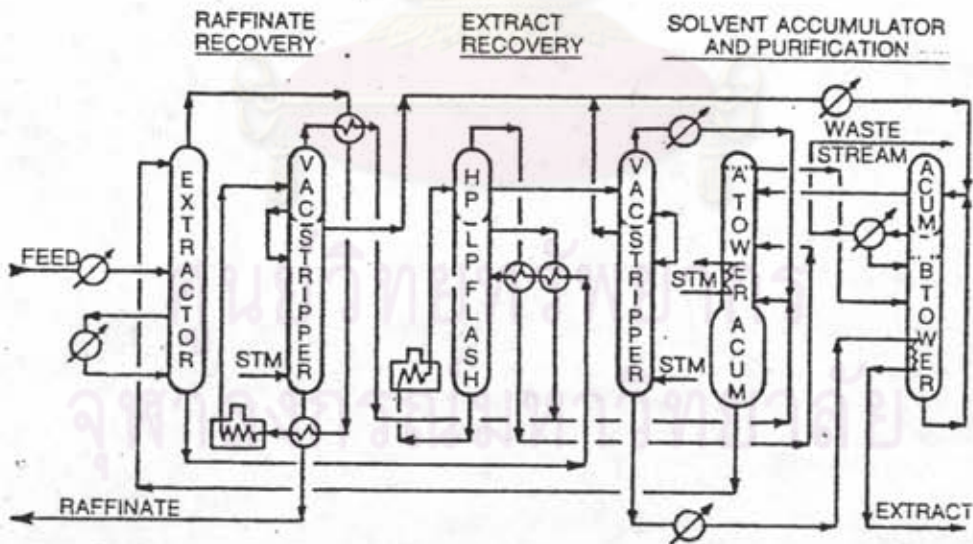
Characteristic	Furfural	MP	Phenol
Molecular structure			
Relative cost, 1980	1.0	2.1	0.77
Density, 25/4 C	1.15	1.03	1.07
Boiling point, F	323	395	359
Melting point, F	-34	-12	106
$\Delta H$ Vap at 760 mm Hg			
Btu/lb	194	212	206
Btu/gal	1625	1537	1547
Viscosity, cp at 140 F	0.95	1.02	2.58
Specific heat, Btu/lb at 250 F	0.42	0.42	0.56
Selectivity	Excellent	Very good	Good
Solvent power	Good	Excellent	Very good
Stability	Good	Excellent	Very good
Biodegradability	Good	Good	Good
Toxicity	Moderate	Low	High

ตารางที่ 2.6 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของ furfural, MP และ phenol ในกระบวนการสกัดแยกถั่ว (16)

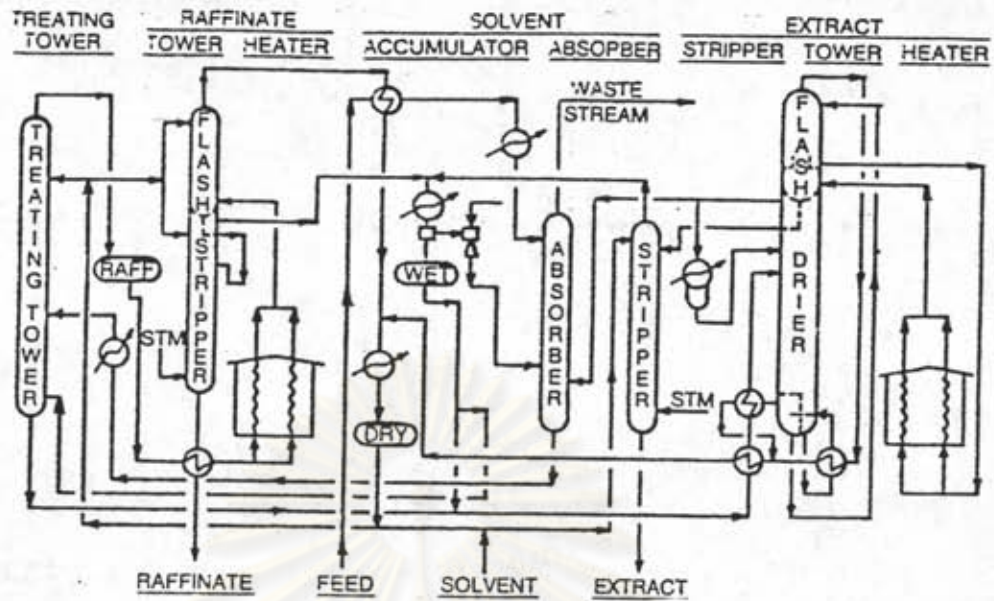
Characteristic	Furfural	MP	Phenol
Adaptability	Excellent	Very good	Good
Emulsibility	Low	Moderate	High
Solvent-to-oil ratio	Moderate	Very low	Low
Extraction temperature	Moderate	Low	Intermediate
Refined oil yield	Excellent	Very good	Good
Product color	Very good	Excellent	Good
Corrosiveness	Intermediate	Low	Moderate
Energy cost	Moderate	Low	Intermediate
Investment cost	Intermediate	Low	Moderate
Maintenance cost	Low	Low	Moderate
Operating cost	Intermediate	Low	Moderate



รูปที่ 2.4 แผนผังแสดงกระบวนการแยกสกัดสารด้วย Furfural (16)



รูปที่ 2.5 แผนผังแสดงกระบวนการแยกสกัดสารด้วย MP (16)



รูปที่ 2.6 แผนผังแสดงกระบวนการแยกสกัดสารด้วย Phenol (16)

2.3.2.2 กระบวนการแยกไขด้วยตัวทำละลาย (solvent dewaxing process) (17) กระบวนการนี้พัฒนามาจากกระบวนการแยกไขโดยไม่ใช้ตัวทำให้เสีย ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับความหนืดของน้ำมันที่ป้อนเข้าเครื่องแยกไขขณะปฏิบัติงานที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีการใช้ตัวทำละลายช่วยลดความหนืดของน้ำมันลงและจะส่งผลทำให้การแยกไขออกจากน้ำมันทำได้ง่ายขึ้นด้วยถ้าหากไขที่ปนในน้ำมันที่ต้องการแยกนั้นละลายได้น้อยในตัวทำละลายที่เลือกใช้ จากตอนแรกที่ใช้ naphtha หรือ gas oil เป็นสารทำให้เสียจึงหันมาใช้ตัวทำละลายอื่นมากขึ้น เช่น เมทิล เอทิลคีโตน (methyl ethyl ketone) สารละลายที่มีกลุ่มคลอรีนเป็นองค์ประกอบหรือ โพรเพนเฮลวเป็นต้น ซึ่งตัวทำละลายที่นำมาใช้เหล่านี้ควรมีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังต่อไปนี้

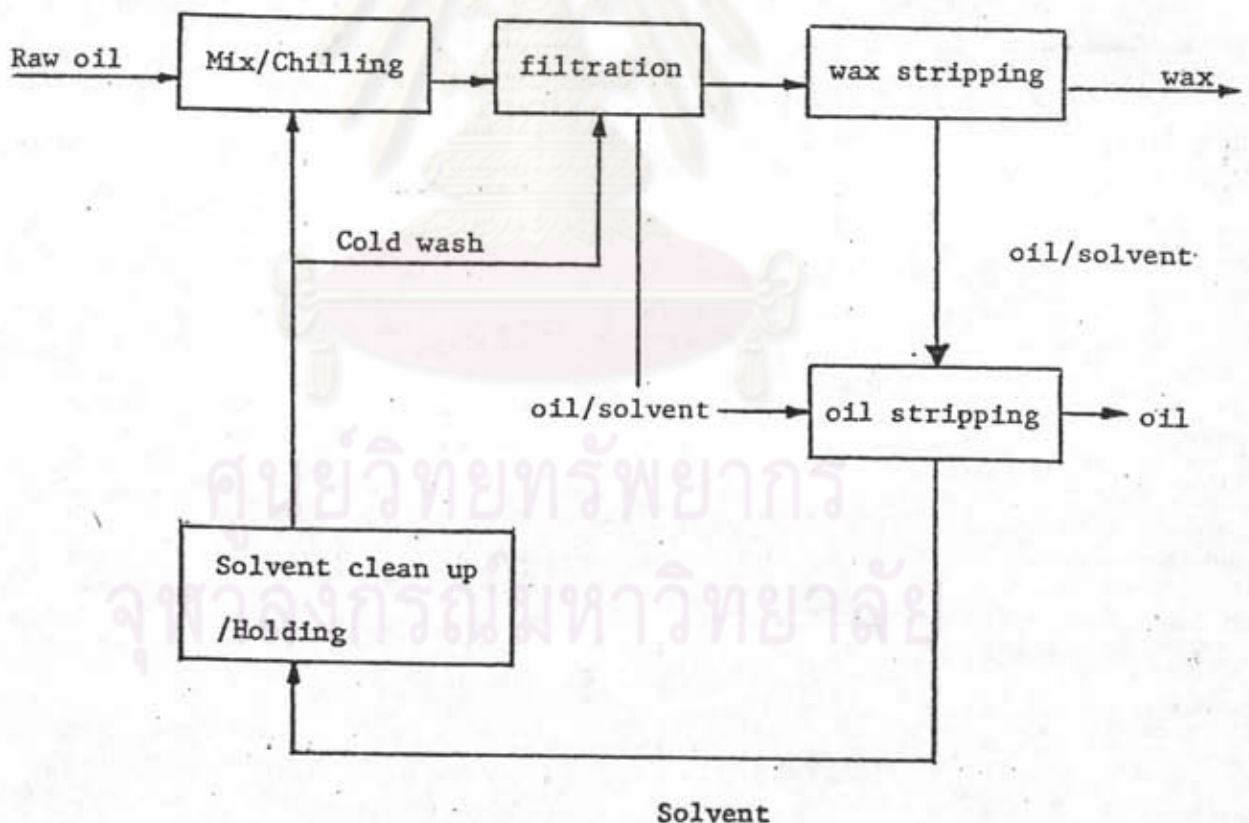
- ละลายได้อย่างสมบูรณ์เป็นเนื้อเดียวกับน้ำมันที่อุณหภูมิของ
- ความสามารถในการละลายไขต่ำ
- ไขที่ปนในน้ำมันจะเป็นโมเลกุลเส้นตรงหรือมีลักษณะเป็นกิ่ง

ก็สามารถแยกได้โดยการกรองที่เหมาะสม

- ควรพิจารณาถูก ไม่กัดกร่อน ไม่ละลายตัวง่ายเมื่อถูกความร้อน และไม่เป็นพิษ

กระบวนการนี้จะลดจุดไหลเทของน้ำมันให้ต่ำลงเมื่อแยกไขออก สามารถสรุปขั้นตอนของกระบวนการได้คือ

1. ทำให้น้ำมันที่มีไขปนอยู่เสอจางโดยเติมตัวทำละลายลงไป แล้วทำให้ของผสมเป็นลง ไขจะตกผลึกออก (crystallization)
2. กรองผลึกของไขออกจากของผสม (filtration)
3. แยกตัวทำละลายออกจากผลึกไข และ ล้างละลาย เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถเขียนเป็นแผนผัง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภูมิแสดงกระบวนการแยกไขด้วยตัวทำละลาย

ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของผลึกไขมัน

ถ้าผลึกมีขนาดใหญ่จะกรองได้ง่ายกว่าผลึกขนาดเล็กและผลึกที่มีรูปร่างแบน เพลท (plates) จะกรองได้ง่ายกว่าผลึกเข็ม (needles) เพราะผลึกเข็มและผลึกขนาดเล็กจะอมไขมันไว้ ซึ่งขนาดและรูปร่างของผลึกที่ได้จะขึ้นอยู่กับ

- ชนิดของไขมันและไขมันที่อยู่ในไขมัน ถ้าเป็นไขมันที่ได้จากไขมันหล่อลื่นเบา (light lube oil) จะได้ผลึกไขมันที่มีขนาดใหญ่และอมไขมันไว้น้อย ซึ่งเรียกว่า macro-crystalline wax ส่วนไขมันที่ได้จากไขมันหล่อลื่นหนัก (heavy lube oil) มีรูปร่างผลึกเล็กเกิดการจับตัวรวมเป็นก้อนได้ง่ายและอมไขมันไว้มาก เรียกว่า ไขมันโครคิลล์สตอลล์

- อุณหภูมิที่สกัดผลึกไขมัน (crystallization temperature)
- อัตราการลดอุณหภูมิ (cooling rate) ถ้าอัตราการลดอุณหภูมิจำกัดเกินไป (shock chilling) จะเกิดผลึกไขมันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมีขนาดเล็ก และจับตัวเป็นก้อนใหญ่

- ชนิดของตัวทำละลายที่ใช้และอัตราส่วนของตัวทำละลายต่อไขมัน

ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการนี้จะเป็นตัวทำให้ไขมันตกผลึกและทำให้ไขมันแข็งหรือลดความหนืดของไขมันลง ที่อุณหภูมิตกผลึก ทำให้กรองได้ง่าย ดังนั้นตัวทำละลายที่จะใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

1. ทำให้สารประกอบ พาราฟินไฮโดรคาร์บอน ตกผลึก
2. ละลายไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงได้ดี
3. ทำให้จุดหมอกของการกรองและจุดไหลเทของไขมันที่แยก

ไขมันออกแล้วมีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุด

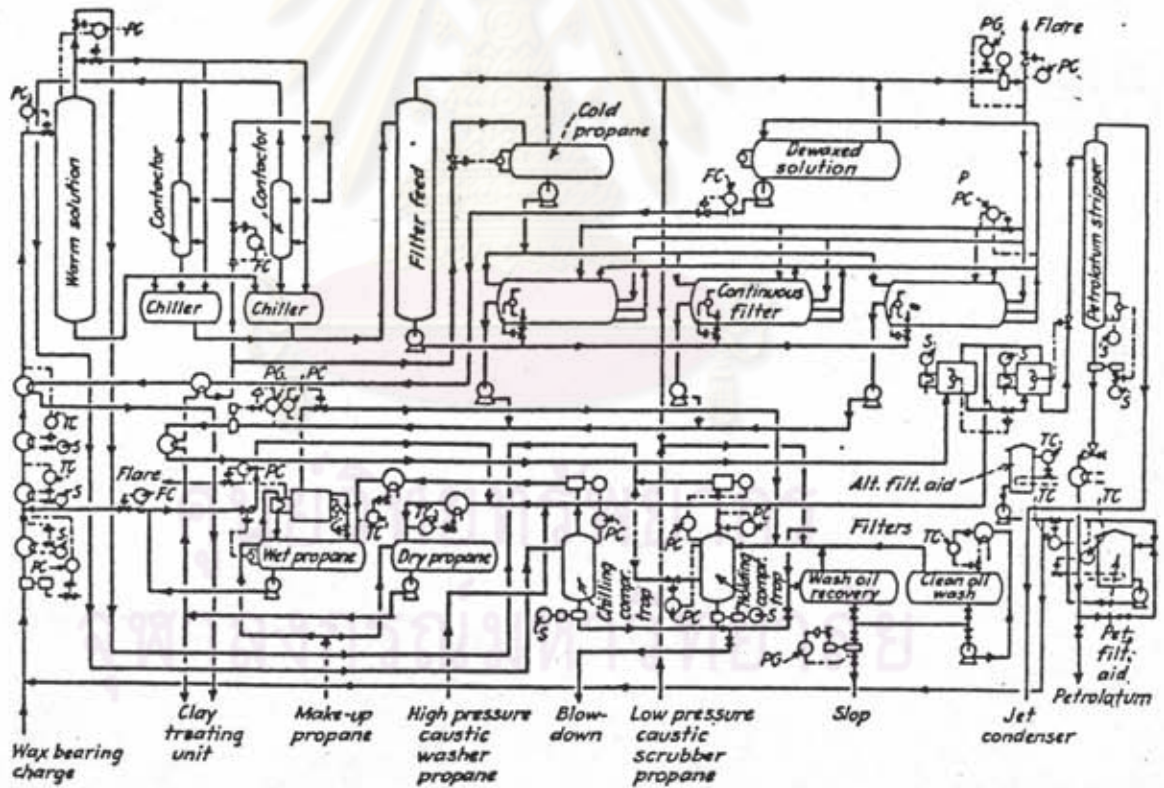
ซึ่งตัวทำละลายที่พบส่วนมากมักจะมีคุณสมบัติไม่ครบทั้ง 3 ข้อ ดังนั้นจึงแบ่งตัวทำละลายออกเป็น 2 กลุ่มคือ

- ตัวทำละลายเดี่ยว (single solvent) ซึ่งตัวทำละลายที่นิยมใช้กันคือ propane โดย propane เหลวจะผสมกับไขมันที่มีไขมันอยู่ภายใต้จุดหมอกและความดัน

ที่สูง จากนั้นก็จะลดความดันลง ทำให้จุดหลอมลดลงตาม โยจะตกผลึกแยกตัวออกจากสารละลาย ส่วน propane จะระเหยกลายเป็นไอแล้วทำการกรองแยกผลึกโยออก ข้อดีของกระบวนการนี้คือ propane ราคาค่อนข้างถูกและเป็นทั้งตัวทำละลายและตัวทำความเย็น (self refrigeration) การแยกโยด้วยโพรเพนแสดงได้ในรูปที่ 2.8

- ตัวทำละลายผสม ประกอบด้วยตัวทำละลายที่ช่วยให้ โยตกผลึกและตัวทำละลายที่ละลายไขมัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้สองพวกคือ ตัวทำละลายผสมของพวก chlorinated hydrocarbon และของพวก ketones

ตัวทำละลายผสมของพวก ไฮโดรคาร์บอนที่มีอะตอมคลอรีน (chlorinate hydrocarbons) ที่นิยมใช้คือ



รูปที่ 2.8 แผนผังแสดงการแยกโยด้วยโพรเพน



1. ethylenedichloride หรือ carbon tetrachloride

ผสมกับ benzene ในกระบวนการ Barisol โดยตัวทำละลายผสมนี้ จะมีความถ่วงจำเพาะสูง เมื่อผสมกับน้ำมันที่มีไขมันอยู่แล้วทำให้เป็น ไขจะตกผลึกออกมาและความถ่วงจำเพาะของไข กับตัวทำละลายผสมและส่วนของน้ำมันจะมีค่าแตกต่างกันมาก ทำให้สามารถแยกออกจากกันได้ โดยการเหวี่ยงลึศิต (centrifugation) กระบวนการ Barisol แสดงในรูปที่ 2.9

2. dichloroethane ผสมกับ methylene chloride

ในกระบวนการ Di-Me ซึ่ง dichloroethane จะเป็นตัวทำให้ไขตกผลึก ส่วน methylene chloride เป็นตัวทำละลายน้ำมัน ดังนั้นเมื่อผสมน้ำมันที่มีไขมันอยู่เข้ากับตัวทำละลายผสมนี้แล้ว ทำให้เป็นลงไขจะตกผลึกและสามารถแยกออกได้โดยการกรอง กระบวนการ Di-Me แสดงในรูปที่ 2.10

ตัวทำละลายผสมของพวก คีโตน ใช้ในกระบวนการ

Dillchill dewaxing ซึ่งกระบวนการนี้เมื่อผสมตัวทำละลายผสมกับน้ำมันที่มีไขมันอยู่แล้วทำให้เป็น ไขจะตกผลึกและผลึกไขที่ได้มักจะมีขนาดใหญ่ ทำให้ง่ายต่อการกรอง ตัวกรองที่นิยมใช้กันคือตัว กรองลู่ญญากาค์แบบหมุน (rotary vacuum filtration) คีโตน เป็นตัวทำละลายที่ ละลายไขและน้ำมันได้น้อย แต่ช่วยให้ไขตกผลึกได้ดี ดังนั้นจึงนิยมผสมล้าบางตัวลงไปเพื่อช่วย ละลายน้ำมัน เช่น

1. methyl ethyl ketone (MEK) ผสมกับ toluene

หรือ benzene เป็นตัวทำละลายผสมที่นิยมแพร่หลายที่สุด Dillchill dewaxing process โดย MEK เป็นตัวช่วยให้ไขตกผลึกดีขึ้น (crystallization agent) และ toluene เป็นตัวทำละลาย น้ำมันและช่วยไม่ให้เกิดการแยกชั้นที่อุณหภูมิต่ำ ข้อได้เปรียบในการใช้ toluene คือราคาถูกและ ความเป็นพิษน้อยกว่า จึงนิยมใช้กันมากกว่า benzene

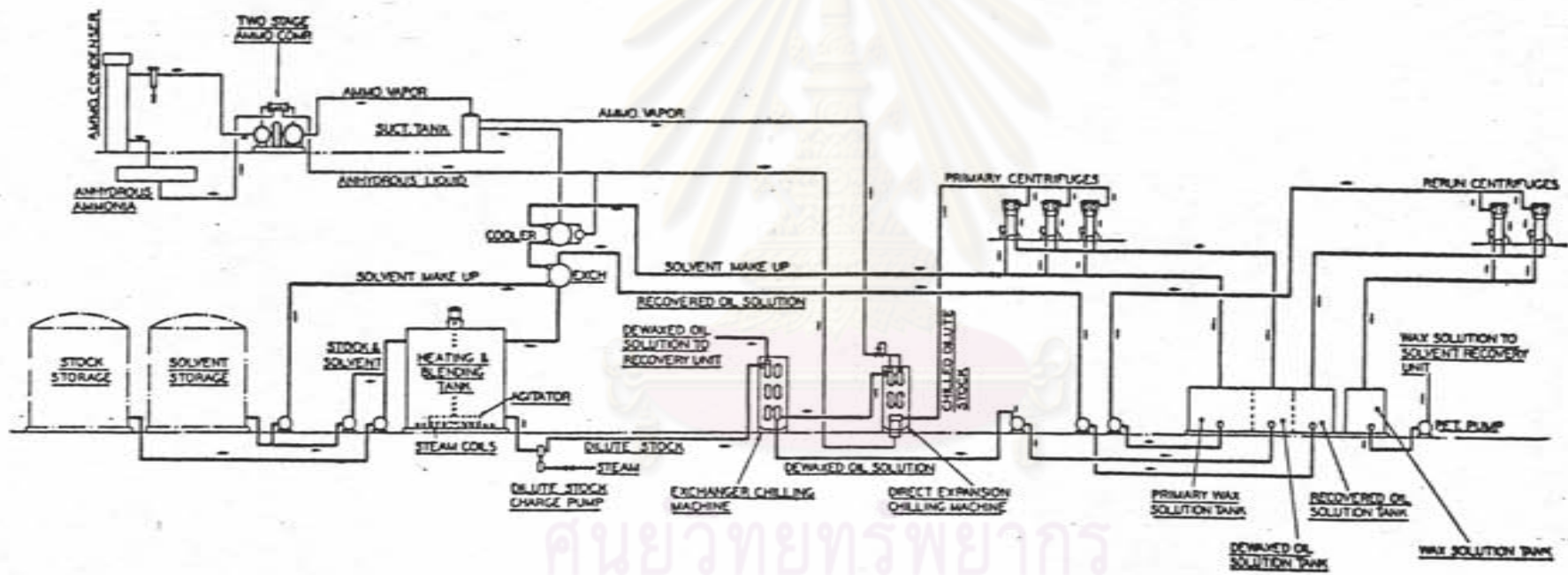
2. MEK ผสมกับ methyl tertiary butyl ether

(MTBE) โดย MTBE ทำหน้าที่เหมือน toluene

3. ตัวทำละลายผสมของพวก ketones เช่น MEK กับ

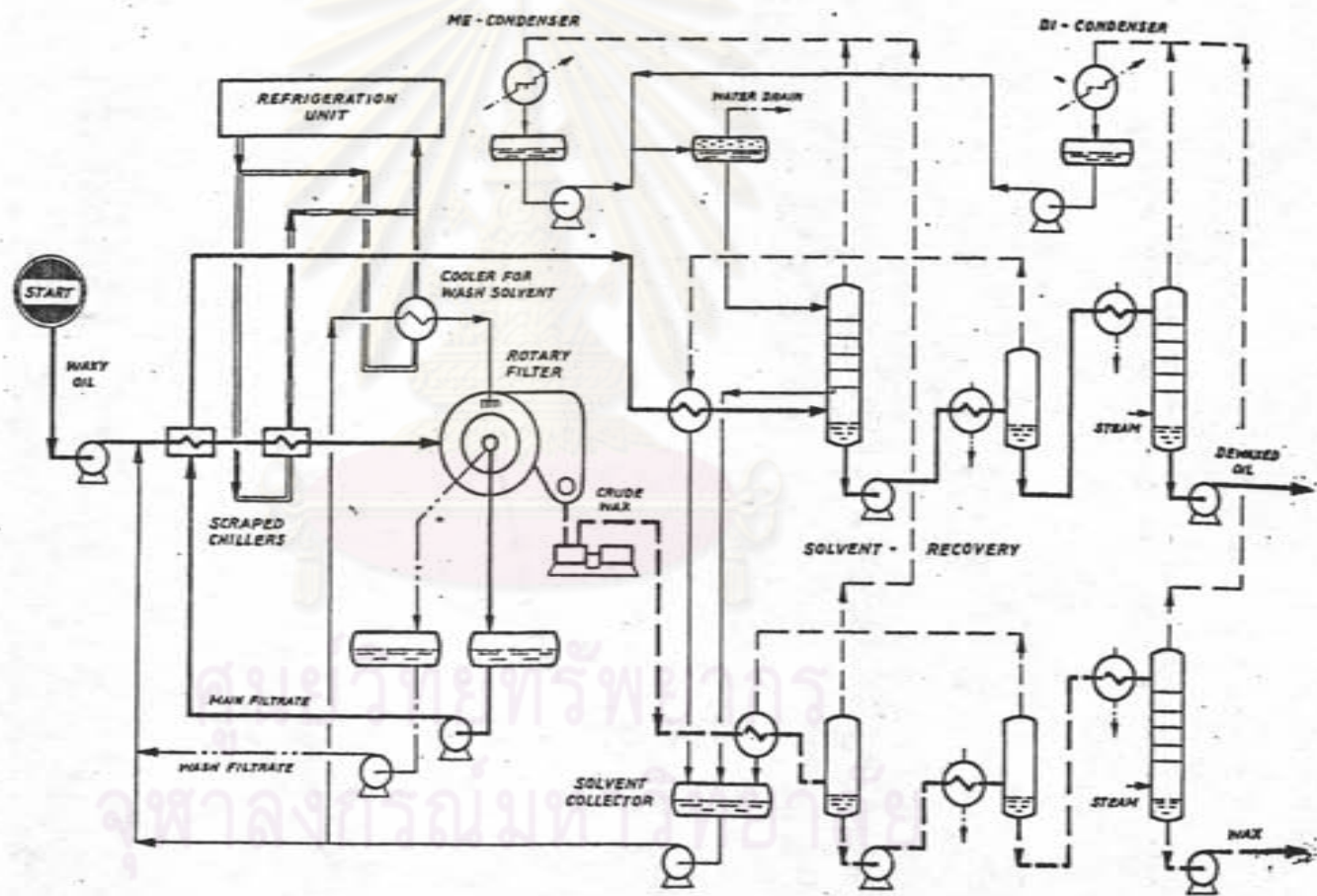
methyl iso-butyl ketone (MIRK) หรือ methyl n-propyl ketone (MPK)

กระบวนการ Dillchill dewaxing แสดงในรูปที่ 2.11

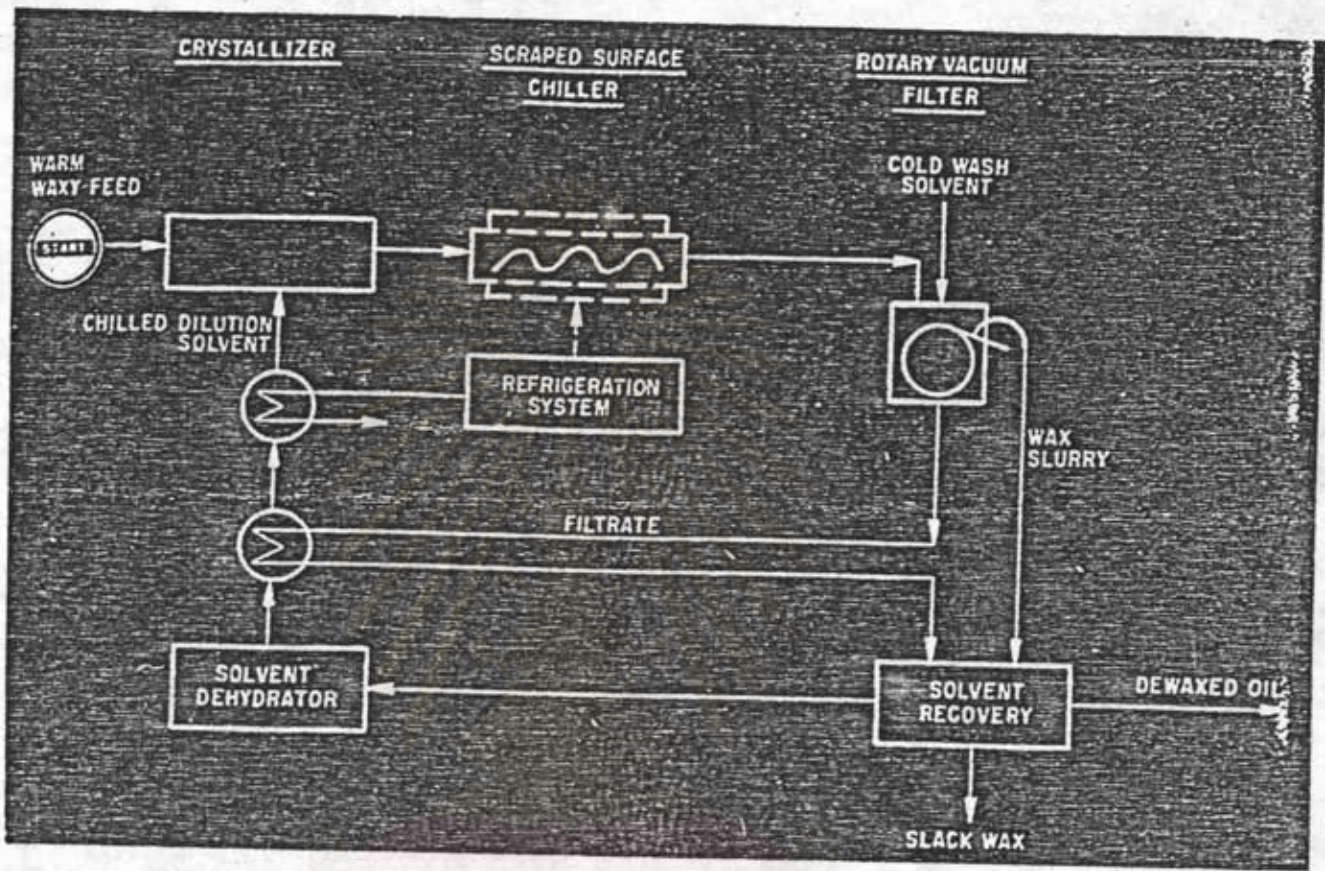


ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.9 แผนผังแสดงกระบวนการ Barisol (18)

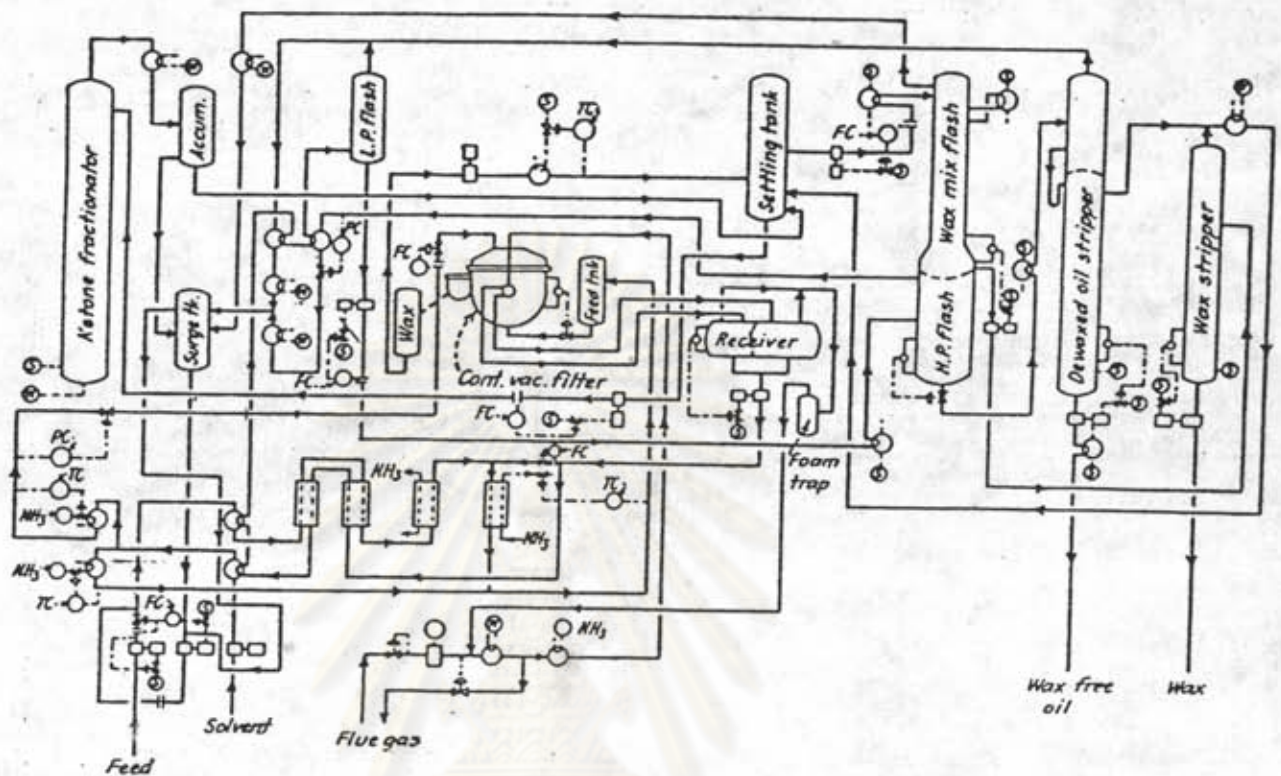


รูปที่ 2.10 แผนผังแสดงกระบวนการ Di-Me



รูปที่ 2.11 แผนผังแสดง Dillchill dewaxing process

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 แผนผังแสดง methyl ethyl ketone dewaxing process

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการแยกไข ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะบอกให้ทราบถึงประสิทธิภาพของตัวทำละลายแต่ละชนิด กล่าวคือ

- ความเป็นขั้ว (polarity) ถ้าตัวทำละลายมีค่า ความเป็นขั้ว สูง จะเป็นตัวกลาง ในการตกผลึกไขได้ดี
- ความสามารถในการละลายไข (wax solubility) ความสามารถในการละลายของไขในตัวทำละลาย จะบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ใช้ตกผลึกและกรองผลึก
- คุณสมบัติทางความร้อน (thermal properties) ทำให้ทราบว่า จะใช้ ปริมาณความร้อนมากน้อยเท่าใด ในการลดอุณหภูมิของของผลึกให้เย็นลง รวมทั้งปริมาณความร้อนที่ ต้องใช้ใน การแยกตัวทำละลายกลับคืน (solvent recovery)

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการแยกไขด้วยตัวทำละลาย (19)

Solvent	(a) Polarity		(b) Wax Solubility At 20° C. g of 126° F. mp wax/100 ml solvent	(c) Viscosity		Density 20° C.	(d) Thermal		
	Dipole Moment	Dielectric Constant 20° C.		cS at 0° C.	cP at 0° C.		Average Specific Heat Cal/g	Latent Heat of Vaporization Cal/g	BP 20° C.
			MEK			3.18			
Acetone	2.89	20.7	0.05	0.32	0.4	0.79	0.518	124.6	56.1
MIBK	2.7	13.1	0.9	0.6	0.75	0.8	0.46	86.5	115.9
Toluene	0.36	2.4	13	0.61	0.7	0.87	0.41	98.5	110.6
Methylene Chloride	1.5	9.08	1.6	0.66	0.5	1.32	0.28	78.7	39.8
Methyl Tertiary Butyl Ether	1.23	4.5	7	0.31	0.42	0.74	0.51	77	55

จากตารางที่ 2.7 MEK และ acetone สัดเป็นพวก ไม่ใช่ตัวทำละลาย คือละลายน้ำมันได้น้อยมาก ส่วนตัวทำละลายอื่น ๆ สัดเป็นพวก ตัวทำละลาย ละลายน้ำมันได้ดี เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง acetone กับ MEK จะเห็นได้ว่า acetone ช่วยให้ไขตกผลึกได้น้อยกว่า เพราะมีความเป็นขี้ว ต่ำกว่าและมีความดันไอสูง ทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับความดันไอเมื่อนำไปใช้ในกระบวนการ จึงนิยมใช้ MEK กันมากกว่า ส่วนตัวทำละลายพวกไม่ใช่ตัวทำละลาย เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นได้ว่า MTBE มีความหนืดต่ำกว่า MIBK และ toluene แต่มีความดันไอสูงกว่า และมีราคาแพง ส่วน MIBK นั้นราคาแพงกว่า toluene และละลายน้ำมันได้น้อยกว่าด้วย ดังนั้นจึงนิยมใช้ toluene

### 2.3.3 การแยกไข ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic dewaxing) (20)

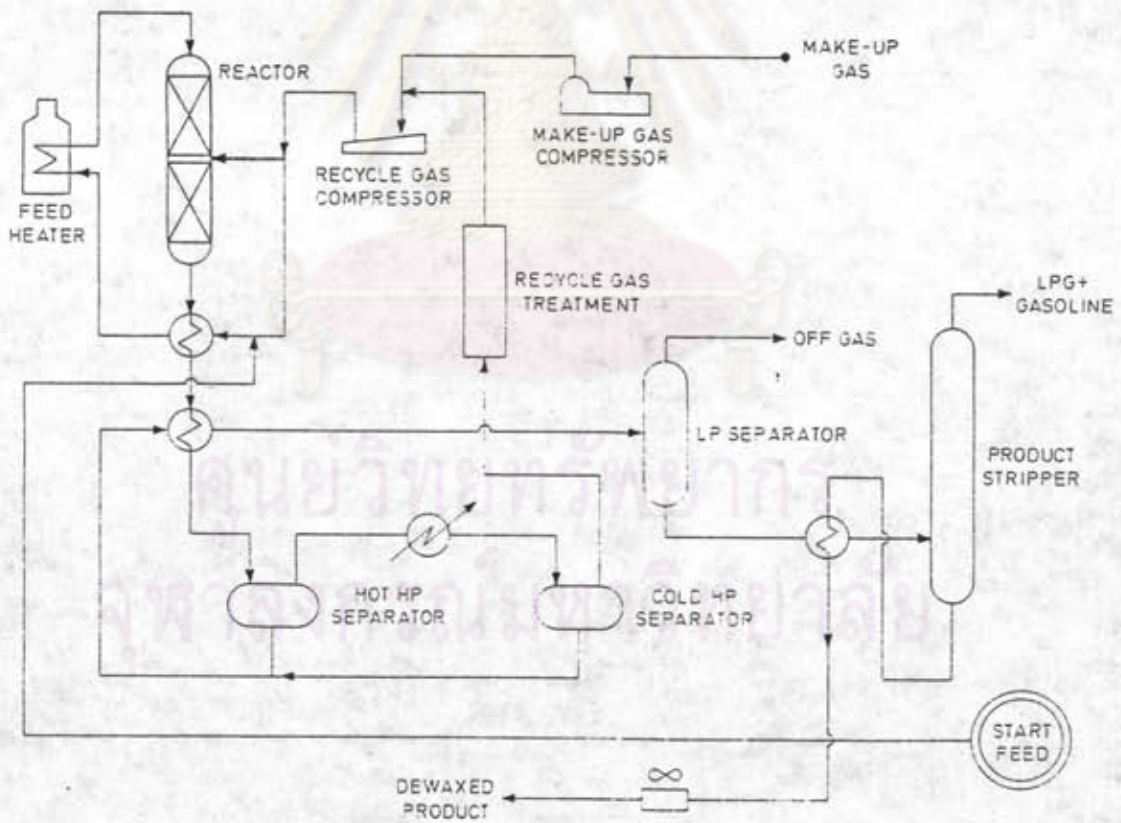
กระบวนการนี้จะเปลี่ยนไฮพาราฟินที่มีพันธะเส้นตรงเป็นไฮโดรคาร์บอนเบา (light hydrocarbon) โดยทั่วไปได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและตัวที่เบากว่า กระบวนการกระทำที่อุณหภูมิสูง ความดันปานกลาง

โดยให้น้ำมันไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้บรรยากาศของไฮโดรเจน ตัวอย่างกระบวนการที่เหมือนกันแต่ต่างกันที่ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่

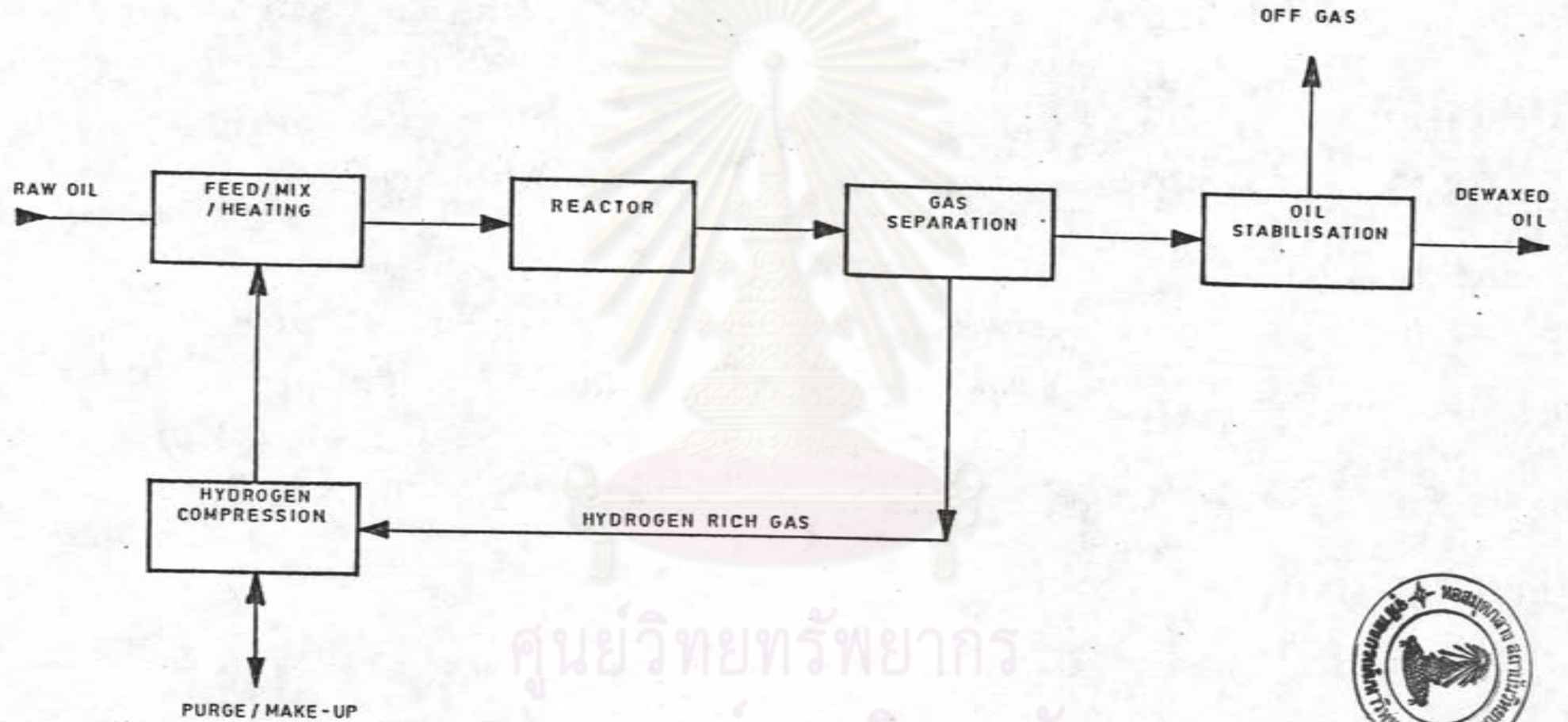
- Catalytic dewaxing (BP. international)
- Distillate dewaxing (Mobil oil corporation)

ข้อเสียของกระบวนการคือ ประสิทธิภาพการแยกไฮซีน้อยกว่าชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ได้ไฮเป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ค่าก่อสร้างเครื่องมือสูงเนื่องจากกระบวนการที่ความดันและอุณหภูมิสูง

รูปที่ 2.13 และ 2.14 แสดงกระบวนการแยกไฮด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 2.13 แผนผังแสดงกระบวนการแยกไฮด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (BP. process)



รูปที่ 2.14 แผนภูมิแสดงกระบวนการแยกไฮโดรเจนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

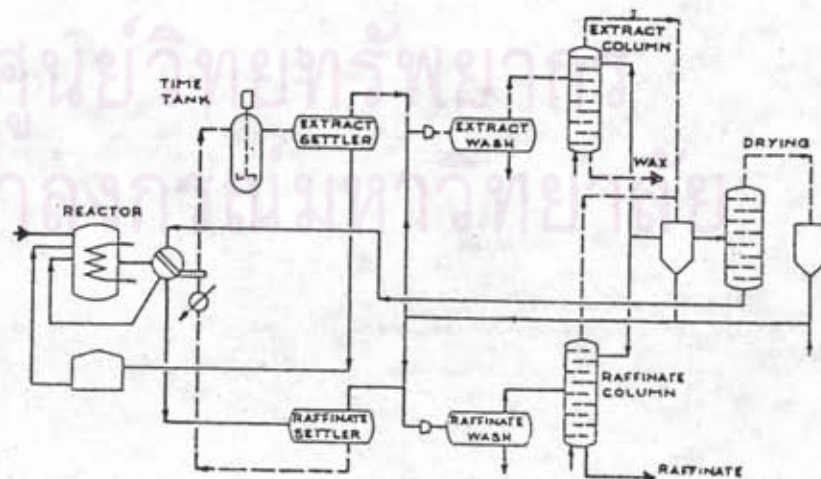




2.3.4 การแยกไขด้วยยูเรีย (urea dewaxing) (21) เป็นกระบวนการที่อาศัยคุณสมบัติในการที่โซสามารถร่วมกับผลึกยูเรียเกิดเป็นโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อน (complex) ที่เรียกว่า adduct ซึ่งจะมีความคงตัวสูงที่อุณหภูมิห้อง แต่จะเกิดการแตกตัว (decomposition) ที่อุณหภูมิสูงได้เป็นยูเรียและโซดั้งเดิมเพราะปฏิกิริยาในการรวมตัวเป็นแบบหลวม ไม่เป็นแบบถาวร

- กระบวนการใช้สารละลายยูเรียความเข้มข้นต่ำ กระบวนการนี้ได้แก่ ของบริษัท Shell Oil Co. Ltd. (Wilmington) Shell Petroleum Co. Ltd (England) และ Societe Francaise des Petrols ทั้งสามกระบวนการนี้ใช้สารละลายอิ่มตัวของยูเรีย ที่อุณหภูมิประมาณ 35°ซ แล้วทำให้เป็นลงจนถึงอุณหภูมิที่ทำการปฏิกิริยา คือ ประมาณ 15-25°ซ ซึ่ง ยูเรียจะเกิดการตกผลึก ปริมาณของสารละลายยูเรียที่ใช้ประมาณ 240-300 Vol % ของ feed stock ซึ่งนับว่าเป็นปริมาณที่สูงมากพอสมควร ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากข้อจำกัดในช่องอุณหภูมิที่แคบของการตกผลึกของยูเรียจากสารละลายนั่นเอง โดยวิธีการนี้จำนวนเฟส (phase) ในระบบแบ่งเป็น 2 liquid phase และ 1 solid phase การแยกและลดจำนวนเฟสลงสามารถทำได้และแตกต่างกัน ในทั้งสามกระบวนการ

1. Shell Oil Co. Ltd (Wilmington) ใช้ในการแยกไข ของ แก๊สโซลีน เรียกว่า extractive crystallization ตัวทำละลายที่ใช้เป็นพวกคีโตนที่มี น้ำหนักโมเลกุลต่ำ ได้แก่ MIBK อัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายอิ่มตัวของ ยูเรียต่อน้ำมันประมาณ



รูปที่ 2.15 แผนผังแสดงกระบวนการแยกไขด้วยยูเรียของ Shell Oil Co., Ltd. (Wilmington)

300% ที่อุณหภูมิ 35°ซ การแยกของผลึกทำโดยใช้ เครื่องกรองแบบหมุน (rotary filter) สภาวะที่เหมาะสมในถังพัก แสดงในรูปที่ 2.15

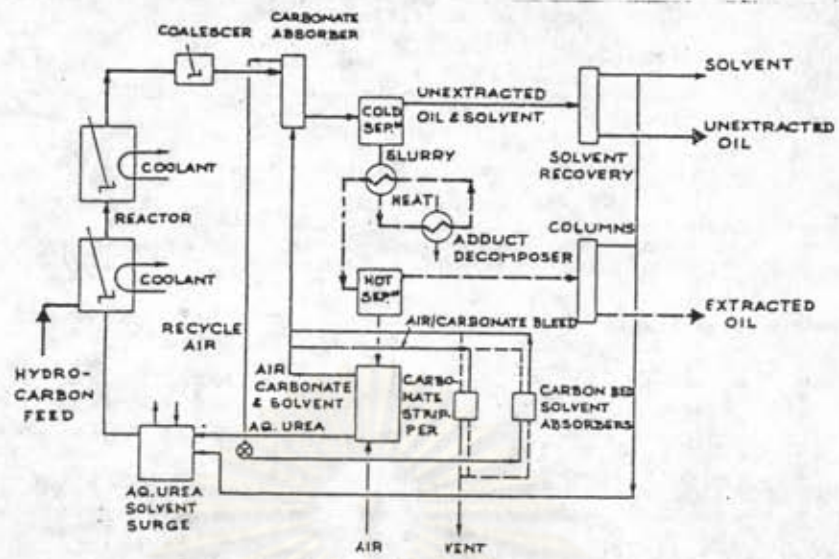
2. Shell Petroleum Co.,Ltd (England) กระบวนการเติมสารลดแรงตึงผิว (surface active agent) เพื่อช่วยให้สารประกอบเชิงซ้อนแขวนลอยอยู่ในสารละลายยูเรียเท่านั้น ทำให้ไม่ต้องอาศัยการกรองช่วยในการแยก จึงเรียก non-filtration process ใช้สารละลายยูเรียที่อุณหภูมิ 35°ซ และทำปฏิกิริยาที่ 15-20°ซ การแยก adduct โดยการแตกตัวในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ 10°ซ จะได้อิพาราฟินและสารละลายยูเรีย ภายในเวลา 0.5-1 ชั่วโมง ซึ่งกระบวนการนี้เหมาะสำหรับการแยกไอเมื่อมีปริมาณพาราฟินหรือโอสฟินในน้ำมันมากกว่า 30% แสดงในรูปที่ 2.16

3. Societe Francaise des Petrols ใช้แยกอิพาราฟิน ใน ซีโรซีนและแกสออยล์ (gas oil) ใช้ 56% methanol, 25% glycol และ 19% water เป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายเข้มข้นของยูเรียที่อุณหภูมิ 35°ซ ซึ่ง glycol จะช่วยให้สารประกอบเชิงซ้อนไหลดีขึ้น ส่วน เมทานอล ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น (activator) และน้ำเป็นตัวป้องกันไม่ให้เกิดการผลึกกันระหว่างสารละลายยูเรียและไฮโดรคาร์บอน ปฏิกิริยาทำที่ 28°ซ และใช้ปริมาตรของสารละลายยูเรีย 240 vol.% กระบวนการนี้ไม่อาศัยการกรองในการแยกสารประกอบเชิงซ้อน โดยแยกส่วนน้ำมันและสารละลายยูเรียที่มีตะกอนสารประกอบเชิงซ้อนปนอยู่ออกจากกัน แล้วทำการแยกสารประกอบเชิงซ้อนออกจากสารละลายยูเรียในถัง กระบวนการนี้เหมาะสำหรับน้ำมันที่มีไอปนอยู่มีจุดเดือดสูงกว่า 360°ซ แสดงในรูปที่ 2.17

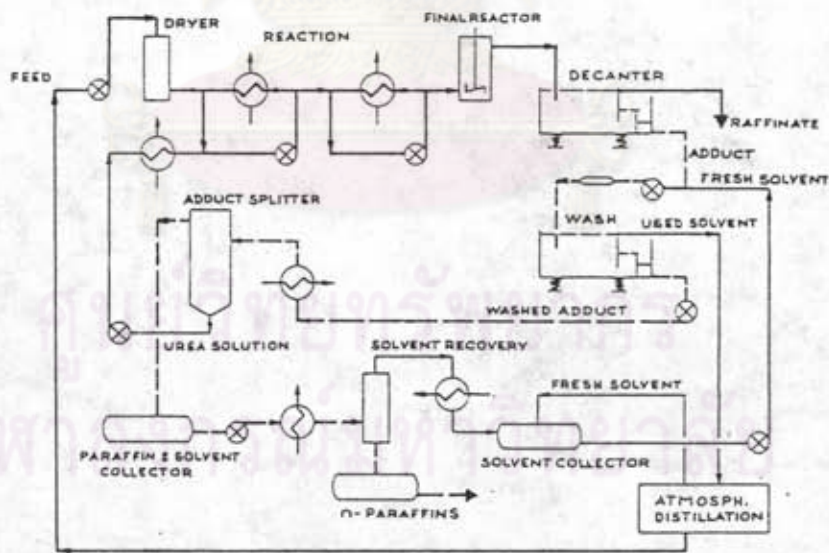
- กระบวนการใช้สารละลายยูเรียความเข้มข้นสูง ได้แก่ กระบวนการของ Edeleanu ซึ่งเป็นแบบต่อเนื่อง โดยเตรียมความเข้มข้น 76% ที่ 70°ซ และทำปฏิกิริยาช่วง 20-40°ซ ตัวทำละลายที่ใช้คือ methylene dichloride กระบวนการนี้เหมาะสำหรับน้ำมันดิบที่มีปริมาณไอประมาณ 15% โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถแยกไอได้ทั้งหมด

## 2.4 การตกผลึกของอิพาราฟิน (crystallization of paraffin waxes)

2.4.1 ชนิดของผลึกอิพาราฟิน (13) ไอที่แยกตัวออกจากน้ำมันเบาจะเป็นของผลึกน้ำมันกับไอที่มีลักษณะกึ่งแข็ง เรียกว่า ไอสแลค (slack wax) ที่ตกผลึกออกมาได้ 2 รูปแบบคือ



รูปที่ 2.16 แผนผังแสดงกระบวนการแยกไฮโดรคาร์บอนของ Shell Petroleum Co., Ltd. (England)



รูปที่ 2.17 แผนผังแสดงกระบวนการแยกไฮโดรคาร์บอนของ Societe Francaise des-Petrols.

ผลึกรูปเฟลทหรือรูปเข็ม ถ้าเป็นผลึกรูปเฟลทที่มีหกเหลี่ยม จะช่วยให้อัตราการกรองในกระบวนการบีบน้ำมัน (sweating) ได้เร็วกว่า ผลึกรูปเข็ม ตัวแปรที่มีผลต่อรูปผลึก

- ความเข้มข้น เกิดผลึกรูป เฟลท เมื่อความเข้มข้นล้าละลายต่ำ
- ความหนืด ล้าละลายที่มีความหนืดปานกลางและต่ำจะให้ ผลึกรูปเฟลท
- ความบริสุทธิ์ ถ้ามีการปนเปื้อนของไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ จะให้ผลึกรูปเข็ม
- จุดหลอม transition temp ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวทำละลายที่ใช้
- ความเร็วของการหล่อเย็น ถ้าสูงจะได้ ผลึกรูปเข็ม

การละลายของไฮดรอกซีเอมีน จะดีกว่า เฟลท เมื่อน้ำหนักโมเลกุลเท่ากัน

2.4.2 การตกผลึกบนผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ (crystallization on a constant temperature surface) (22) การถ่ายเทความร้อนและมวลสาร (heat and mass transfer) จะมีผลต่ออัตราการตกผลึกบนผิวที่มีอุณหภูมิคงที่ ซึ่งสามารถพบได้ใน เครื่องตกผลึกแบบท่อผิวขูด (scraped-pipe crystallizer) การตกผลึกบนผิวเป็นนิรวมค่าความร้อนแฝงและความร้อนสัมผัส (latent and sensible heat) ผ่านชั้นของแข็ง (solid phase) ลู่วิวเป็น

1. ค่าความจุความร้อน (thermal capacity) ของ ชั้นของแข็ง สามารถตัดทิ้งได้นั้นคือ อุณหภูมิใน ชั้นของแข็ง เป็นเส้นตรง
2. ไม่มีแรงขับสำหรับการตกผลึก นั่นคือ อุณหภูมิ ณ จุดต่อ (interfacial temperature) เท่ากับจุดเยือกแข็งของล้าละลาย
3. ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและมวลสารที่จุดต่อ (interfacial) มีค่าคงที่
4. ให้ความสัมพันธ์ของจุดเยือกแข็งเป็นเส้นตรง นั่นคือ
 
$$C = A - B(T) \quad (1)$$
5. เนื้อล้าละลาย (bulk of the liquid) อยู่ที่อุณหภูมิจุดอิ่มตัว (saturation temperature)

อัตราการเติบโตของ ชั้นของแข็ง จากสมการสมดุลความร้อนคือ

$$k_s \frac{(T_i - T_w)}{x} = \lambda \rho_s \frac{dx}{dt} + h_o (T_b - T_i) \quad (2)$$

สมดุลมวลสารของ องค์ประกอบ ที่แพร่จาก จุดต่อ แสดงด้วย

$$K(C_i - C_b) = \frac{C_b}{\rho_b - C_b} \rho_s \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

แทนค่า  $(C_i - C_b)$  ลงในสมการ (3) จะได้

$$T_b - T_i = \frac{C_b \rho_s}{\rho_b - C_b} \frac{dx}{KB dt} \quad (4)$$

ใส่เทอมในสมการ (2) ใหม่ได้

$$\frac{k_s}{x} (T_b - T_w) - (T_b - T_i) = \lambda \rho_s \frac{dx}{dt} - h_o (T_b - T_i) \quad (5)$$

แทนค่า  $(T_b - T_i)$  จากสมการ (4) ใน (5) จัดเทอมและอินทิเกรต  
กับ สภาวะเริ่มต้น (initial condition)  $X=0$  ที่  $t=0$  ได้

$$X = \sqrt{\alpha^2 + 2\beta t} - \alpha \quad (6)$$

เมื่อ  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\phi$  คือ

$$\alpha = \frac{k_s \phi}{h_o (1+\phi)} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{k_s (T_b - T_w)}{\lambda \rho_s (1+\phi)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{h_o C_b}{\lambda k (\rho_b - C_b) B} \\ &= \frac{k_b N_{NU} C_b}{\lambda DN_{sh} (\rho_b - C_b) B} \end{aligned} \quad (9)$$

ค่า  $\phi$  ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล

ดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (6) จะได้อัตราการเติบโต (growth rate) คือ

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha^2 + 2\beta t}} \quad (10)$$

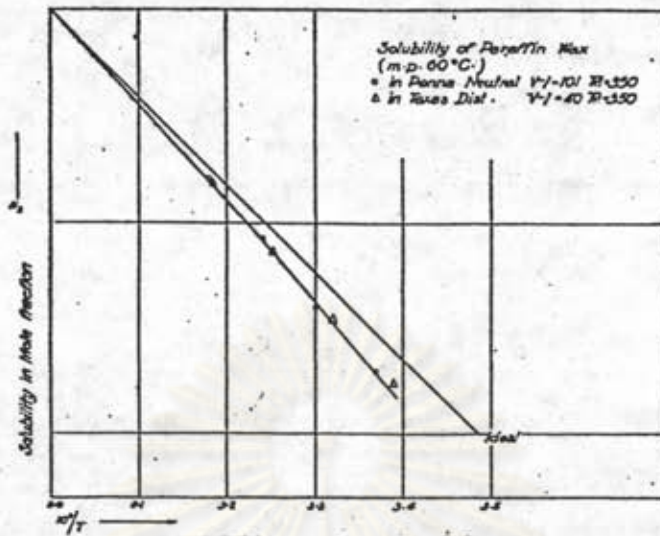
อัตราการเติบโต สูงสุดที่เวลาเริ่มต้น ( $t=0$ )

2.4.3 ความสามารถในการละลายของไฮพาราฟินในน้ำมันหล่อลื่น (solubility of paraffin waxes in lubricating oil) (23) ความสามารถในการละลาย ของของแข็งในของเหลว แสดงได้ด้วยสมการ (A)

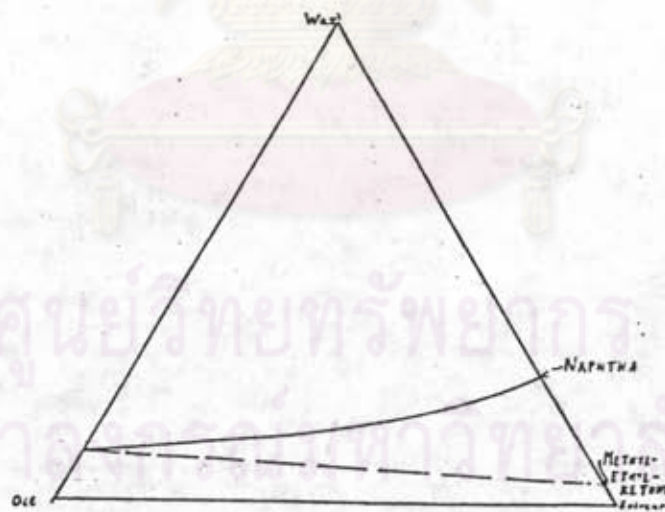
$$\ln N_2 = \frac{\Delta H_f}{R} \left( \frac{1}{T_f} - \frac{1}{T} \right) \quad (A)$$

ซึ่งไฮพาราฟินและไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นในน้ำมันหล่อลื่นเป็นไปตามสมการ และใกล้เคียงกับ เส้นโค้งความสามารถในการละลายอุดมคติ (ideal solubility curve) ในรูปที่ 2.18 นอกจากนี้ทั้ง พาราฟินและไฮพาราฟินในตัวทำละลายใกล้เคียงกับสารละลายของ น้ำมันหล่อลื่นกับไฮ พาราฟินอุดมคติ การหาค่าความร้อนของการละลาย (heat of solution) ของไฮพาราฟิน ในน้ำมันหล่อลื่นได้ว่า ค่าความร้อนของการผสม (heat of mixing) ของทั้งสองมีค่าน้อย แต่การละลายใน ตัวทำละลายบางตัว จะมีค่าสูงกว่าสมการ (A) ส่วนในตัวทำละลายอื่น ๆ เช่น ketones, esters, ethers, alcohols ฯลฯ จะละลายได้น้อยกว่าในน้ำมันหล่อลื่นมาก ketones กับ oxygenated solvents จะทำให้ไฮตกผลึกออกมาเพราะจะไปลด ความสามารถในการละลายของไฮในน้ำมันลง รูปที่ 2.19 แสดงผลของ solvent (MEK) ใน tertiary equilibrium diagram





รูปที่ 2.18 ideal solubility curve

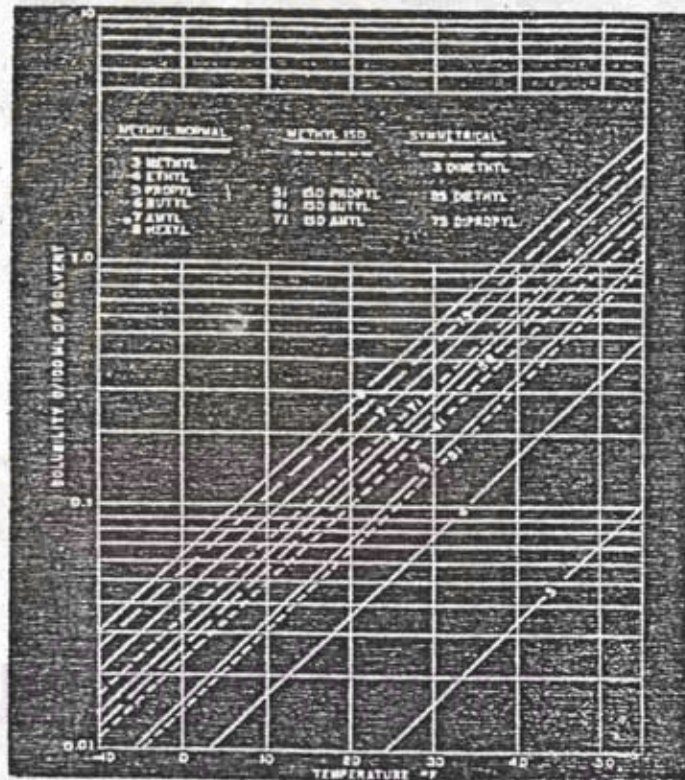


รูปที่ 2.19 tertiary equilibrium diagram ของ oil, wax และ solvents

2.4.4 ความสามารถในการละลายของไฮพาราฟินในตัวทำละลาย (24) ความสามารถในการละลาย จะบอกให้ทราบถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการแยกไขออกจากน้ำมัน รูปที่ 2.20 แสดง solubility ของไข m.p 110°f ใน aliphatic ketones และรูปที่ 2.21 แสดง อุณหภูมิของสารละลายเมื่อความสามารถในการละลายของไขเทียบเท่า MPK

(methyl propyl ketone) 0°f ของของผสม MEK กับ toluene พบว่าเมื่อ MEK

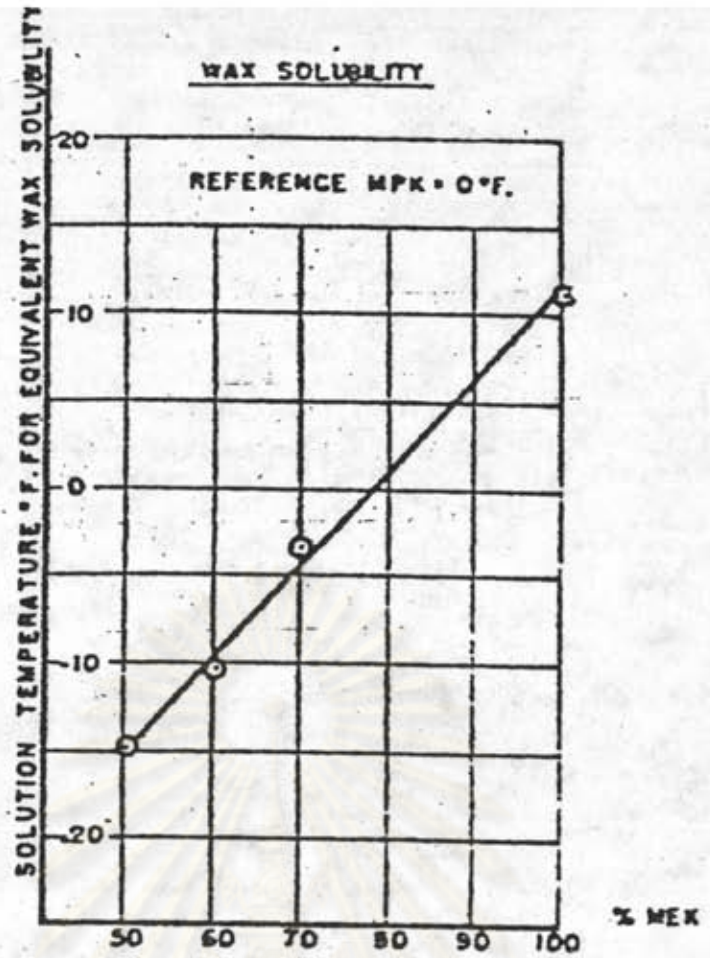
เพิ่มขึ้นจะได้อุณหภูมิสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย



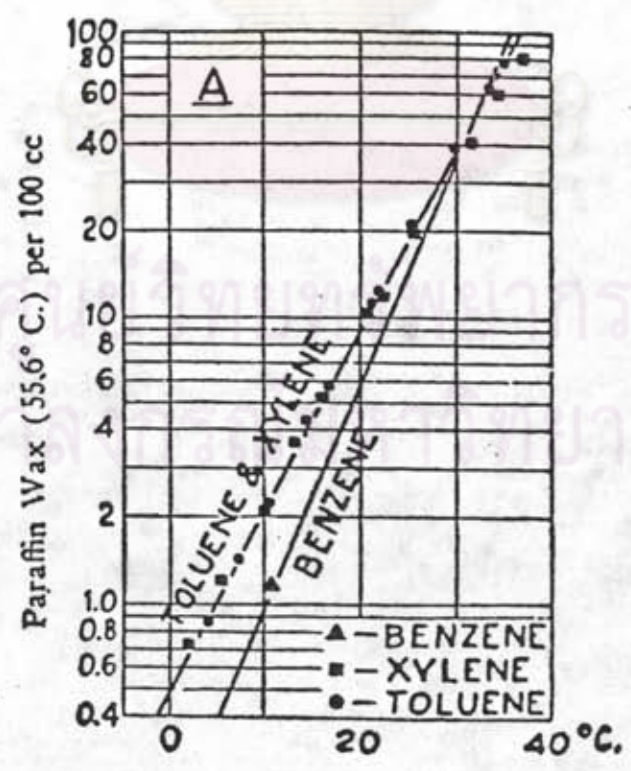
รูปที่ 2.20 ความสามารถในการละลายของไข (m.p 110°f) ใน aliphatic ketones

รูปที่ 2.22 แสดงความสามารถในการละลายของไข (m.p 55.6°f) ใน อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และรูปที่ 2.23 แสดง เส้นโค้งการละลาย ของไฮพาราฟิน และน้ำมันใน MEK

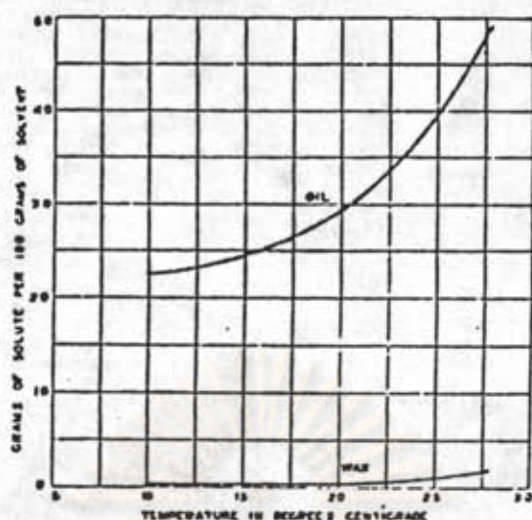




รูปที่ 2.21 ผลของสัดส่วน MEK/toluene ต่อ solubility temperature



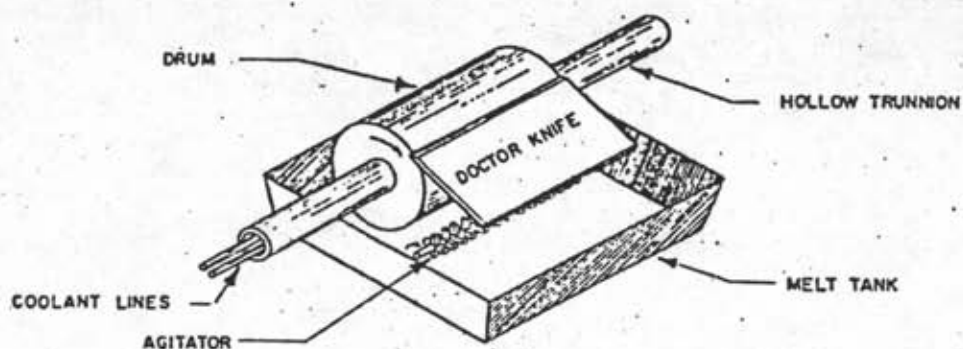
รูปที่ 2.22 แสดงความสามารถในการละลายของไข (m.p 55.6°c) ใน aromatic hydrocarbons



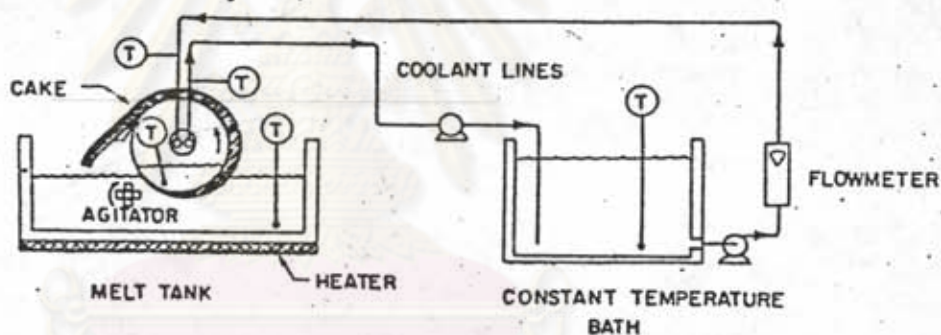
รูปที่ 2.23 แสดง solubility curve ของไขมันและน้ำมันใน MEK

#### 2.4.5 เครื่องตกผลึกแบบทรงกระบอกกลมหมุน (rotary drum crystallizer)

เครื่องตกผลึกแบบทรงกระบอกกลมหมุน ผลึกที่เกาะติดบนผิวเป็นของ ทรงกระบอก (25, 26) จะถูกขูดออก ด้วยใบมีดเมื่อมันหมุน การแยกของผลึก 2 ชนิดออกจากกันจะพิจารณาถึงช่วง อุณหภูมิสารละลาย (melt temperature), อุณหภูมิทรงกระบอก (drum temperature), อัตราการหมุนของทรงกระบอก (drum rotational rate), ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (concentration of impurity) และการกวน (agitation) ของเครื่องตกผลึก เครื่อง จะประกอบด้วยทรงกระบอกกลมที่วางขนานจมอยู่ในสารละลายที่มีน้ำหล่อเป็นไหลเข้าและออกทาง ด้านในของทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.24 ผลึกที่เกาะติดบนผิวทรงกระบอกที่เรียกว่า crystalline cake จะถูกขูดออกโดยใบมีด (doctor knife) การกวนที่เหมาะสมช่วยเพิ่ม อัตราการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer rate)



รูปที่ 2.24 rotary drum crystallizer



รูปที่ 2.25 แผนผังแสดงเครื่องตกผลึกแบบทรงกระบอกกลมหมุน

2.5 ค่าความร้อนของการตกผลึกของไขพาราฟิน (heat of crystallization of the wax) (27)

ความร้อนของการตกผลึก (heat of crystallization) หรือความร้อนของการรวมตัว (heat of fusion) ของไขพาราฟิน อยู่ในช่วง 63 ถึง 78.5 Btu/lb. ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 72.5 การทดลองหา ความร้อนของการตกผลึก อยู่ในภาคผนวก ค

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความร้อนของการแข็งตัวและการผสมของไขกับน้ำมัน และตารางที่ 2.9 แสดงค่าความร้อนของการรวมตัวของพาราฟิน

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าความร้อนของการแข็งตัวและการผสมของไฮโดรคาร์บอน

Material	Range of Solidification °F	Pour point, °F	Heat of Solidification of mixture, Btu/lb	Heat of fusion of wax, Btu/lb	Heat of mixing, Btu/lb
Paraffin wax	124-110	122	75.6		
10 percent No.1 in 500 pale oil	95-61	82	8.1	7.5	0.6
10 percent No.1 in 300 white oil	104-59	90	9.0	7.5	1.5
Pa. bright stock	59-36	28	2.9		
Pa. 150 neutral	45-18	23	3.6		
Pa. SAE 30 oil	46-19	23	3.1		
No.6 plus 0.5 percent Paraflow	46-14	3	3.1		
Waxy 300 pale oil	59-36	36	4.3		
No.8 plus 0.5 percent Paraflow	55-32	-17	4.1		

ตารางที่ 2.9

แสดงค่าความร้อนของการรวมตัวของพาราฟิน

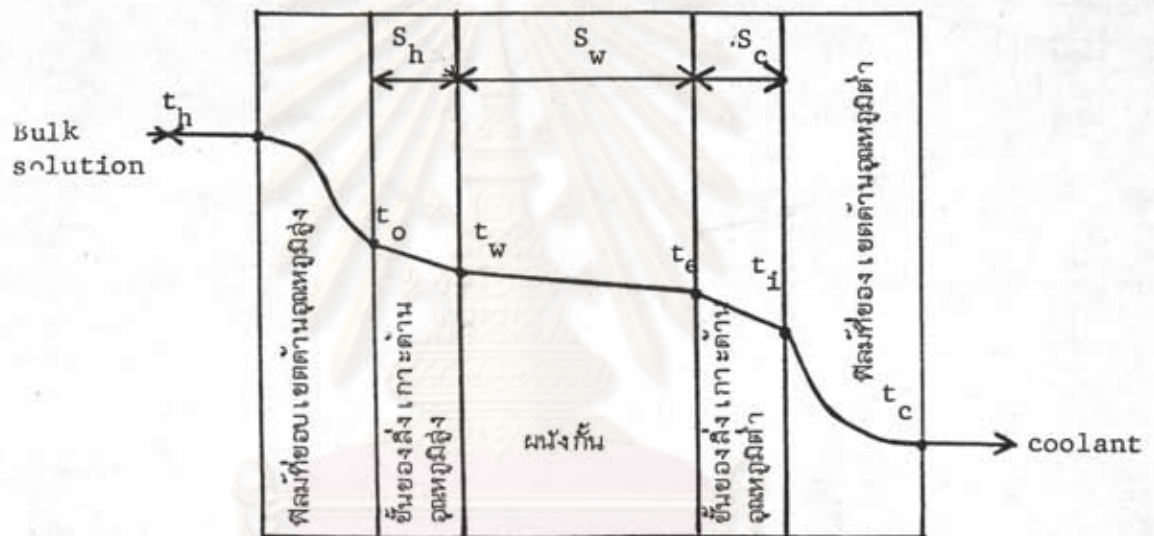
Hydrocarbon compounds	Formula	M.p., °C.	Heat of fusion, cal./g.
<b>Paraffins:</b>			
Methane.....	CH <sub>4</sub>	-182.48	14.03
Ethane.....	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-183.23	22.712
Propane.....	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-187.65	19.100
n-Butane.....	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-138.33	19.167
2-Methylpropane.....	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-159.60	18.668
n-Pentane.....	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-129.723	27.874
2-Methylbutane.....	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-159.890	17.076
2,2-Dimethylpropane.....	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-16.6	10.786
n-Hexane.....	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-95.320	36.138
2-Methylpentane.....	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-153.680	17.407
2,2-Dimethylbutane.....	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-99.73	1.607
2,3-Dimethylbutane.....	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-128.41	2.251
n-Heptane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-90.595	33.513
2-Methylhexane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-118.270	21.158
3-Ethylpentane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-118.593	22.555
2,2-Dimethylpentane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-123.790	13.982
2,4-Dimethylpentane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-119.230	15.968
3,3-Dimethylpentane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-134.46	16.856
2,2,3-Trimethylbutane.....	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-24.96	5.250
n-Octane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-56.798	43.169
2-Methylheptane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-109.04	21.458
3-Methylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-120.50	23.795
4-Methylheptane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-120.955	22.692
2,2-Dimethylhexane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-121.18	24.226
2,5-Dimethylhexane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-91.200	26.903
3,3-Dimethylhexane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-126.10	14.9
2-Methyl-3-ethylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-114.960	23.690
3-Methyl-3-ethylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-90.870	22.657
2,2,3-Trimethylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-112.27	18.061
2,2,4-Trimethylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-107.365	19.278
2,3,3-Trimethylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-100.70	3.204
2,3,4-Trimethylpentane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-109.210	19.392
2,2,3,3-Tetramethylbutane.....	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	+100.69	14.900
n-Nonane.....	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	-53.9	41.2
n-Decane.....	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	-30.0	48.3
n-Undecane.....	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	-25.9	34.1
n-Dodecane.....	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-9.6	51.3
Eicosane.....	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	+36.4	52.0
Pentacosane.....	C <sub>25</sub> H <sub>52</sub>	+53.3	53.6
Tritriacontane.....	C <sub>32</sub> H <sub>66</sub>	+71.1	54.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2.6 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกั้นราบ (28, 29)

### 2.6.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (overall heat transfer coefficient)

ความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทจากของไหลอุณหภูมิสูงผ่านผนังท่อหรือผนังกั้นไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ลักษณะการไหลของความร้อนจากของไหลร้อนผ่านผนังกั้นไปยังของไหลเย็น ความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงถ่ายเทมาถึงบริเวณใกล้กับผนังกั้นโดย



รูปที่ 2.26 แสดงการไหลของความร้อนจากของไหลร้อนผ่านผนังกั้นไปยังของไหลเย็น

การพาความร้อน (heat convection) ที่จุดนี้การถ่ายเทความร้อนจะถูกต้านทานโดยฟิล์มที่ขอบเขต (boundary film) ซึ่งคลุมผิวของผนังกั้น โดยทั่วไปแล้วการนำความร้อน (thermal conductivity) ของของไหลจะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของฟิล์ม ( $t_h$ ) กับอุณหภูมิที่ผิวของชั้นสิ่งเกาะบนผนังกั้น ( $t_o$ ) จะมีค่าสูง หลังจากถึงจุดนี้ความร้อนจะถ่ายเทผ่านชั้นของสิ่งเกาะติดไปยังผิวของผนังกั้นซึ่งมีอุณหภูมิ  $t_w$  หลังจากถ่ายเทผ่านผนังกั้นความร้อนจะถ่ายเทผ่านชั้นของสิ่งเกาะติดทางด้านอุณหภูมิต่ำ ( $t_i$ ) แล้วผ่านฟิล์มที่ขอบเขตไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ ( $t_c$ )

ความหนาของชั้นของสิ่ง เกาะติดและค่าความนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล และเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้นทั้งสองอย่างนี้มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิของชั้นต่าง ๆ สามารถได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มที่ขอบเขตทางด้านจุดอุณหภูมิสูง

$$q_1 = h_o A (t_h - t_o) \quad (11)$$

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของสิ่ง เกาะติดทางด้านจุดอุณหภูมิสูง

$$q_2 = \frac{A \Delta t_h}{r_h} = \frac{A (t_o - t_w)}{(S_h / k_h)} \quad (12)$$

3. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกัน

$$q_3 = \frac{A \Delta t_w}{r_w} = \frac{A (t_w - t_e)}{(S_w / k_w)} \quad (13)$$

4. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของสิ่ง เกาะติดทางด้านจุดอุณหภูมิต่ำ

$$q_4 = \frac{A \Delta t_c}{r_c} = \frac{A (t_e - t_i)}{(S_c / k_c)} \quad (14)$$

5. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มที่ขอบเขตทางด้านจุดอุณหภูมิต่ำ

$$q_5 = h_i A (t_i - t_c) \quad (15)$$

ที่สถานะภาพคงที่ (steady state) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นความต้านทานแต่ละชั้นย่อมเท่ากันหมด นั่นคือ  $q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = Q$

ในกรณีนี้อัตราการถ่ายเทความร้อน  $Q$  สามารถได้จาก

$$Q = UA (t_h - t_c) = UA \Delta T \quad (16)$$

โดย

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + r_h + r_w + r_c + \frac{1}{h_i}} \quad (16.1)$$

$$\Delta T = t_h - t_c \quad (16.2)$$

2.6.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ scraped-surface (scraped-surface exchanger) เมื่อจุดอุณหภูมิของสารละลาย  $t_h$  และจุดอุณหภูมิของ heat-transfer surface  $t_w$  และ  $t_h > t_w$  ของไหลที่ผิวจะมีลักษณะนิ่ง (stagnant) และของไหลที่ผิวนี้จะถูกใบมีดกวาดออกไปเมื่อหมุนผ่าน ทำให้ของไหลส่วนอื่นจะเข้ามาแทนที่โดยมีจุดอุณหภูมิ  $t_h$  ความร้อนจะถ่ายเทจากของไหลในช่วงเวลา  $T$  คือช่วงเวลาที่ใบมีดกวาดผ่านไปครึ่งหนึ่ง สามารถนำ unsteady state heat transfer ในกรณีของ semi-infinite solid มาประยุกต์ใช้กับกรณีนี้ได้

ปริมาณความร้อนทั้งหมด  $q_T$  ที่ถ่ายเทในช่วงเวลา  $T$  นิยามได้คือ

$$\frac{Q}{A} = 2k(t_h - t_w) \frac{T}{\sqrt{\pi\alpha}} \quad (17)$$

ค่าเฉลี่ยของ heat transfer coeff. ในแต่ละช่วงเวลา นิยามได้คือ

$$h_o = \frac{Q}{TA(t_h - t_w)} \quad (18)$$

แทนค่าการ (17) ใน (18) และ  $\alpha = k/\rho c_p$  ได้

$$h_o = 2 \frac{k C_p}{\pi T} \quad (19)$$

$$T = \frac{1}{nB} \quad (20)$$



แทนสมการ (20) ใน (19) ได้

$$h_o = 2 \frac{k_o \rho_o C p_o^{nB}}{\pi} \quad (21)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$h_i = 2 \frac{k_i \rho_i C p_i^{nB}}{\pi}$$

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
อุทกศาสตร์มหาวิทยาลัย