

## การสกัดสารด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

## 3.1 การสกัดสารด้วยแก๊สภาวะวิกฤต(extraction with supercritical gases)

การสกัดสารด้วยแก๊สภาวะวิกฤต เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ solvent power ของของไหลภาวะวิกฤต(supercritical fluids) ที่อุณหภูมิและความดันใกล้จุดวิกฤต มีประสิทธิภาพพิเศษในการแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง และเป็นสารชนิดที่มีสภาพมีขั้วต่ำ(low polarity) หลักการของเทคนิคนี้มีข้อดีกว่าการกลั่น คือสามารถแยกสารที่อุณหภูมิปานกลางได้ จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจในอุตสาหกรรมด้านอาหารและอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

ในการเปรียบเทียบกับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว พบว่าของไหลภาวะวิกฤตมีความสามารถในการแพร่สูง(high diffusivity) และมีความหนืดต่ำทำให้สามารถสกัดสารได้เร็วและเกิดการแยกเฟสได้เร็วด้วย solvent power ของของไหลภาวะวิกฤตเปลี่ยนไปได้ในช่วงกว้างโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดัน และสามารถหมุนเวียนนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ได้ (7)

ข้อมูลสมดุลระหว่างไอกับของเหลว (vapor-liquid equilibrium data) ของระบบไฮโดรคาร์บอนทวิภาค (binary hydrocarbon systems) ที่ความดันสูง เริ่มมีขึ้นในปี 1930 และปี 1943 เริ่มมีการใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการแยกยางมะตอยออกจากน้ำมันปิโตรเลียม

ในรัสเซีย ชูซ(Zhuze)อธิบายการใช้โพรเพนภาวะวิกฤต (supercritical propane) และแสดงการแยกลำดับส่วนของน้ำมันปิโตรเลียมด้วยมีเทนภาวะวิกฤต(supercritical methane) รวมทั้งการสกัดไซโอโซซีไรท์(ozocerite) จากลินแร่ และการสกัดลาโนลิน(lanolin) จากไขมันของไวลต์วูล์ฟ(wool grease)

ในปี 1971 พอล (Paul) และไวซ (Wise) ได้จัดทำหนังสือเรื่องหลักการสกัดสารด้วยแก๊ส (The principle of gas extraction) และได้มีการประชุมแลกเปลี่ยนความคิดเห็นเรื่อง การสกัดสารด้วยแก๊สภาวะวิกฤตเป็นครั้งแรกในปี 1978 ที่ประเทศเยอรมัน

การนำไปใช้ประโยชน์ของของไหลภาวะวิกฤต แสดงในตารางที่ 3.1 (8)



ตารางที่ 3.1 แสดงการนำไปใช้ประโยชน์ของของไหลภาวะวิกฤต

OBJECT	SOLVENT	INDUSTRIAL DEVELOPMENT
NATURAL SUBSTANCES AND FOOD PRODUCTS		
Decaffeination		
- coffee	CO <sub>2</sub>	Industrial unit (HAG, RFA)
- tea	CO <sub>2</sub>	Industrial production (RFA)
Resins from hop	CO <sub>2</sub>	Industrial unit (Australia, GB, RFA, USA)
Spices: pepper, nutmeg, pimento	CO <sub>2</sub>	Industrial production (RFA)
Aroma: fruit, meat, fishes	CO <sub>2</sub>	Laboratory, Pilot
Essential oil	CO <sub>2</sub>	Laboratory
Nicotin from tobacco	CO <sub>2</sub>	Laboratory, Pilot
Pyridine	CO <sub>2</sub>	Industrial development on moving, Pilot
Oils (animals and vegetables)	CO <sub>2</sub>	Pilot, First industrial development on moving in RFA
AQUEOUS MIXTURE		
Ethanol during fermentation	CO <sub>2</sub>	Pilot
Alcohol	CO <sub>2</sub>	Laboratory, Pilot

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

Carboxylic acids	CO <sub>2</sub>	Patent
Recovery of organic waste	CO <sub>2</sub> ,	Laboratory
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	
Desalting of sea water	HCs.C <sub>11</sub> -C <sub>12</sub>	Patent
	Isopropyl- benzene	
REGENERATION OF ACTIVATED CARBON		
	CO <sub>2</sub>	Pilot
TREATMENT OF PETROLEUM PRODUCTS		
Deasphalting of residues	C <sub>9</sub> -C <sub>5</sub>	Industrial unit
Regeneration of turpentine	C <sub>9</sub> (CO <sub>2</sub> ,	Pilot
	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	
Extraction of bitumen	Benzene,	Pilot
	C <sub>5</sub>	
Clearing of drilling	CO <sub>2</sub> , Freon	Laboratory, Pilot
	12	
TREATMENT OF WOOD		
Extraction of turpentine	CO <sub>2</sub>	Patent, Pilot



### 3.2 ความสามารถในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สเฉื่อยไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีพิษ ไม่ช่วยในการเผาไหม้ แต่ช่วยให้ไฟดับ หนักกว่าอากาศประมาณ 1.5 เท่า อยู่ในสภาพที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ  $-55$  ถึง  $31$  °ซ. และที่ความดัน 5 ถึง 74 บาร์ คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในภาคผนวก ข.

คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว(non-polar solvent) สภาพมีขั้วได้(polarizability)ของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ  $26.5 \times 10^{-25}$  ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับพวกไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด ยกเว้นมีเทน (methane) สภาพมีขั้ว(polarity) ของคาร์บอนไดออกไซด์ใกล้เคียงกับเฮกเซน(hexane) และเพนเทน(pentane) สามารถผสมกันได้ดีกับตัวทำละลายตั้งแต่เมทานอล(methanol) ไปจนถึงเพนเทน(pentane) และพวกไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ (pure hydrocarbons) โมโนเทอร์ปีน(monoterpenes) อัลดีไฮด์ริคและคีโตนิก โมโนเทอร์ปีน(aldehydic and ketonic monoterpenes) และพวกกรดคาร์บอนิกเหลว(liquid carbonic acid) การละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว แสดงในตารางที่ 3.2 (2)

ในสภาพแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์สามารถละลายในน้ำมันดิบและสารไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่าน้ำ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นตัวทำให้สภาพเคลื่อนที่ได้(mobility) ของน้ำมันเพิ่มขึ้น นั่นคือทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลง เมื่อเพิ่มความดันการละลายของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมันก็เพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิ การละลายจะลดลง

ความเหมาะสมของคาร์บอนไดออกไซด์เหลวที่ใช้เป็นตัวทำละลายพิจารณาจากข้อดี ดังนี้

#### 1. สมดุลย์เฟส(phase equilibria)

เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารอินทรีย์หลายชนิด (9)

การละลายซึ่งกันและกันกับน้ำมีค่าน้อย

การระเหยสัมพัทธ์(relative volatility)สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์

ที่สกัดได้ ทำให้สามารถแยกออกจากสารชนิดอื่นได้ง่าย

#### 2. สมบัติการขนถ่าย(transport properties)

ค่าความหนืดต่ำ

สัมประสิทธิ์การกระจาย(diffusion coefficients) มีค่าสูง



ตารางที่ 3.2 แสดงการละลายของสารประกอบต่างๆในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

Fully miscible (Francis, 1954)	Partial (%by wt.) (Francis, 1954)	Insoluble (Schultz, 1966)
H <sub>2</sub> S ,CS <sub>2</sub> ,CCl <sub>4</sub> ,SO <sub>2</sub>	Water 0.1	Most inorganic salts
Gasoline	Iodine 0.2	B-carotene
Limonene	Lubricating oil 0.7	Urea
Benzene	Paraffin wax 1.0	Glycine
Acetonitrile	Naphthalene 2.0	Phenylacetic acid
Pyridine	Aniline 3.0	Oxalic acid
Acetic acid	o-Nitroanisole 2.0	Succinic acid
Caprylic acid	Oleic acid 2.0	Malic acid
Ethyl lactate	Lactic acid 0.5	Tartaric acid
Amyl acetate	Buthyl stearate 3.0	Citric acid
Glycerol triacetate	Ethyl anthranilate 6.0	Ascorbic acid
Ethyl alcohol	Glycerol monoacetate 1.0	Dextrose
Hexyl alcohol	Glycerol 0.05	Sucrose
Benzaldehyde	n-Decyl alcohol 1.0	
Camphor	Aldol 11.0	
Thiophene		
Stannic chloride		



3. สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์(thermodynamic properties)  
สามารถสร้างสภาพที่จุดวิกฤต(critical point) ได้  
ค่าความร้อนของการระเหย(enthalpy of vaporization) มีค่าต่ำ
4. ความปลอดภัย(safety)  
ไม่เป็นพิษและไม่ติดไฟ
5. ทางเศรษฐศาสตร์(economics)  
ราคาถูกกว่าตัวทำละลายอื่นๆ และหาได้ง่าย

### 3.3 การสกัดสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ(extraction of natural products)

สารที่มีอยู่ในธรรมชาติประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังแสดงในรูป 3.1 โดยเรียงตามน้ำหนักโมเลกุลของสารจากน้อยไปมาก หรือความสามารถในการระเหยจากมากไปน้อย ดังนี้ หัวน้ำหอม(essential oil) โมเลกุลใหญ่ของเทอร์ปีน(heavier terpenes) กรดไขมัน(fatty acid) ไข(waxes) เรซิน(resins) และสี(pigments)

การเปรียบเทียบการแยกองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ ด้วยเทคนิคการกลั่นด้วยไอน้ำ และการสกัดโดยการใช้อัตว์ทำละลายดังนี้ คาร์บอนไดออกไซด์ ตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้ง และตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งอื่นๆ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.2 ถึง 3.5 (10)

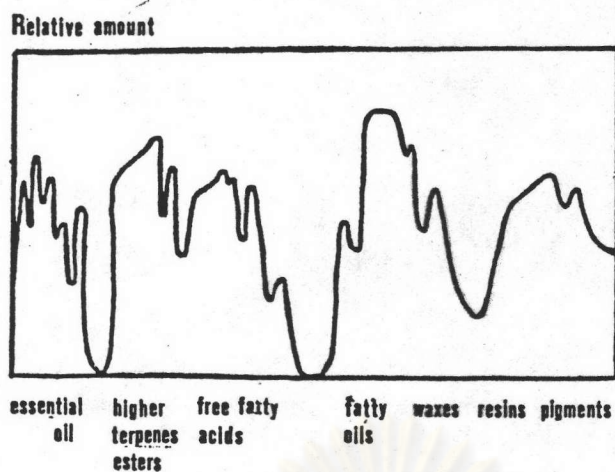
การกลั่นด้วยไอน้ำ(steam distillation) สามารถแยกองค์ประกอบที่เป็นหัวน้ำมันที่ระเหยได้เท่านั้น จากรูปส่วนที่แรงเงาคือบริเวณที่สามารถกลั่นออกมา องค์ประกอบส่วนที่เหลือไม่สามารถกลั่นออกมาได้

การสกัดด้วยตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งอื่น ๆ ตัวทำละลายที่ไม่มีขี้ผึ้งในที่นี้ใช้เมทคลอไรด์(methylene chloride) พบว่าวิธีนี้เกิดการสูญเสียสารที่ระเหยง่าย และไม่สามารถสกัดองค์ประกอบที่เป็นโพลิเมอร์โมเลกุลใหญ่(heavy polymer)

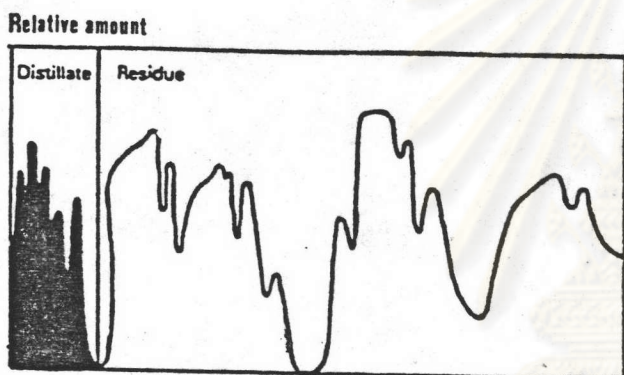
การสกัดด้วยตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้ง(polar solvent extraction) ตัวทำละลายคือสารผสมของน้ำกับเอทานอล พบว่าวิธีนี้เกิดการสูญเสียสารที่ระเหยได้ง่าย และสามารถสกัดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทางซ้ายมือดังในรูปที่ 3.3

การสกัดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าสามารถแยกองค์ประกอบของสารได้ดีกว่าวิธีอื่น และไม่เกิดการสูญเสียสารที่ระเหยได้ง่าย การสกัดที่ความดัน 60 บาร์ อุณหภูมิ 60 °C. สามารถสกัดสารพวกหัวน้ำมันและเทอร์ปีนโมเลกุลใหญ่บางส่วน การสกัดที่ความดัน 100 บาร์สามารถ

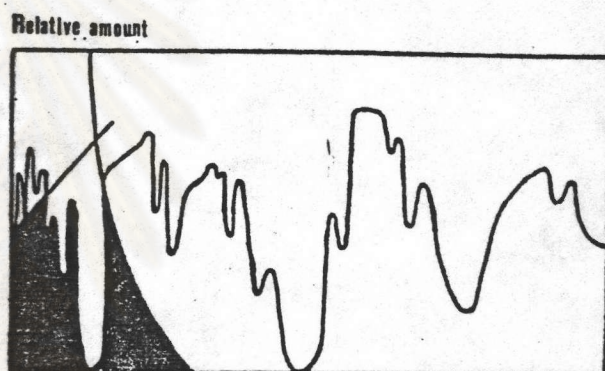




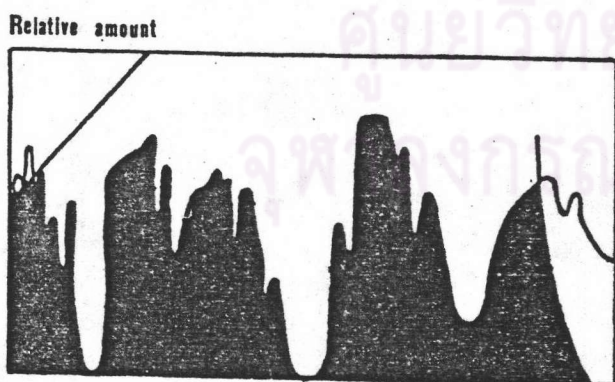
รูปที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ



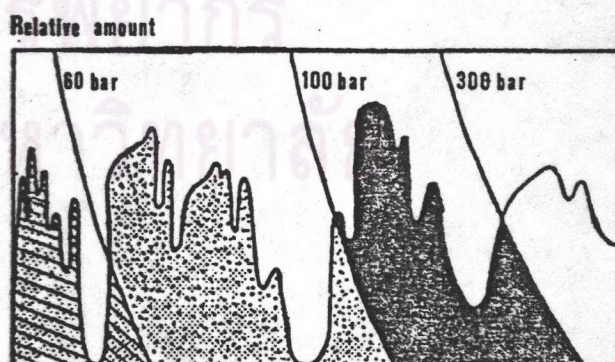
รูปที่ 3.2 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการกลั่นด้วยไอน้ำ



รูปที่ 3.3 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายผสมของเอทานอลและการระเหย



รูปที่ 3.4 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วของเมทิลีนคลอไรด์



รูปที่ 3.5 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์



สกัดสารพวกหัวน้ำมัน เทอร์ปีน โมเลกุลใหญ่ทั้งหมด และกรดไขมัน การสกัดที่ความดัน 300 บาร์ สามารถสกัดองค์ประกอบทั้งหมดของสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ การสกัดสารที่มีอยู่ในธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย สามารถทำการสกัดแบบลำดับส่วน (fractionated extraction) โดยการใช้ความดันต่างๆกันที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

### 3.4 ทฤษฎีการสกัดสารด้วยของไหลภาวะวิกฤต

การแยกสารละลายออกเป็นเฟสของตัวถูกละลาย (solute-rich phase) กับเฟสของตัวทำละลาย (solvent-rich phase) กระทำโดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิใกล้จุดวิกฤตของตัวทำละลาย ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างปริมาตรอิสระ (free volume) หรือความสามารถในการขยายตัว (thermal expansivity) ของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย ดังนั้นจึงสามารถแยกสารละลายเป็นเฟสของตัวถูกละลาย และเฟสของตัวทำละลายได้ พบว่าการใช้ของไหลภาวะวิกฤตที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะทำให้อุณหภูมิวิกฤตของสารละลายลดลง ดังนั้นจึงสามารถแยกสารละลายได้ที่อุณหภูมิต่ำ

อุณหภูมิวิกฤตของสารละลาย ขึ้นอยู่กับธรรมชาติทางเคมีของส่วนประกอบ (chemical nature of the components) ขนาดโมเลกุล (molecular size) น้ำหนักโมเลกุลสาร และจุดวิกฤตของตัวทำละลายนั้น (11)

การละลายของสารในสารละลายที่เจือจางของของไหลภาวะวิกฤต เกิดขึ้นเนื่องจากการที่โมเลกุลของตัวทำละลายล้อมรอบโมเลกุลของสาร ทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ได้ (mobile) ตัวทำละลายในที่นี้หมายถึงของไหลภาวะวิกฤต ของไหลภาวะวิกฤตจะอยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวมากกว่าแก๊ส ทั้งนี้เพราะการละลายของสารจะเกิดขึ้นในสารละลาย โมเลกุลของสารที่มีขนาดใหญ่ การละลายจะลดลง ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของตัวทำละลายไม่สามารถที่จะทำให้โมเลกุลของสารเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่าย

#### 3.4.1 ขนาดของกลุ่มโมเลกุลในสารละลาย (12)

จำนวนโมเลกุลของตัวทำละลายที่ล้อมรอบ 1 โมเลกุลของสาร เรียกว่าขนาดกลุ่ม (cluster sizes) การละลายของสารจะแปรตามขนาดกลุ่ม ทั้งนี้เพราะเมื่อขนาดกลุ่มใหญ่ขึ้น การบีบ (compressibility) ก็เพิ่มขึ้น ทำให้การละลายเพิ่มขึ้น

สมการแสดงขนาดกลุ่มของสารมีดังนี้



$$\xi_{\infty} = \lim_{X_T \rightarrow 0} ( \langle dN_1 dN_2 \rangle / \langle N_1 \rangle ) \quad 4.1$$

หรือแสดงได้ด้วยสมการ

$$\bar{V}_1^{\infty} d^{\circ} = d^{\circ} k T K_T^{\circ} - \xi_{\infty} \quad 4.2$$

เทอม 1            เทอม 2            เทอม 3

เทอม 1 แสดง partial molar volume term

เทอม 2 แสดง compressibility term

เทอม 3 แสดง cluster sizes term

เมื่อ  $N_1, N_2$  แสดงจำนวนโมเลกุลของสารและตัวทำละลายตามลำดับ  
 $d^{\circ}$  แสดงความหนาแน่นของตัวทำละลายในสารละลายที่เจือจาง  
 $k$  แสดงค่า Boltzmann's constant  
 $K_T^{\circ}$  แสดงค่า isothermal compressibility ของ

ตัวทำละลายในสารละลายที่เจือจาง

การเติมตัวทำละลายร่วม (cosolvent) ในปริมาณเล็กน้อยลงในสารละลายที่เจือจางของของไหลภาวะวิกฤต จะทำให้การละลายของสารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นทางเลือกการละลายสารชนิดต่างๆตามน้ำหนักโมเลกุลของสารด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดที่แข็งแรงระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายร่วมกับโมเลกุลของสารทำให้ขนาดกลุ่มเพิ่มขึ้น ดังนั้นการละลายของสารจึงเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนโมเลกุลของสารที่มีขนาดใหญ่ตัวทำละลายร่วมไม่ค่อยมีผลต่อการละลายมากนัก เพราะถึงแม้ว่าขนาดกลุ่มจะเพิ่มขึ้นแต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ได้

### 3.4.2 การละลายของของแข็งในสารละลายเจือจาง (7)

ตัวแปรที่มีผลต่อการละลายของสารในสารละลายเจือจางของของไหลภาวะวิกฤต ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดัน ความหนาแน่น และความเข้มข้นของตัวทำละลายร่วม การละลายของสารกำหนดให้อยู่ในสมการดังนี้

$$Y_1 = E (P_1^{\text{sat}} / P) \quad 4.3$$



เมื่อ  $Y_1$  แสดงความสามารถในการละลายของของแข็งในของไหลภาวะวิกฤต (the solubility of the solid in supercritical fluid)

$E$  แสดง enhancement factor ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เฉพาะของระบบที่ศึกษา

$P_1^*$  แสดงความดันไอของของแข็งที่จะละลายในสภาพบริสุทธิ์ (vapor pressure of pure solid)

$P$  แสดงความดันรวม (total pressure)

ค่า  $E$  หาได้จากสมการ

$$\ln E = (V_1^* - 2B_{1,2}) / V \quad 4.4$$

เมื่อ  $B_{1,2}$  แสดง cross-virial coefficient

$V_1^*$  แสดงปริมาตรของของแข็ง (volume of pure solid)

$V$  แสดงปริมาตรรวม (total volume)

ค่า  $B_{1,2}$  แสดงแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและโมเลกุลของสาร ถ้าแรงดึงดูดมาก  $B_{1,2}$  จะมีค่าเป็นลบมากขึ้นทำให้การละลายเพิ่มขึ้น

การละลายของสารจากสมการ 4.3 และ 4.4 สามารถนำมาสรุปผลได้

2 ประการ คือ

### 1. การสกัดสารด้วยของไหลภาวะวิกฤต

การสกัดสารที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ปริมาตร ( $V$ ) ลดลง ดังนั้น  $E$  เพิ่มขึ้น การละลายก็เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันการสกัดสารที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้  $P_1^*$  ลดลงด้วย ดังนั้น การละลายจึงลดลง จากผลทั้ง 2 กรณีที่ขัดแย้งกันจึงทำให้ การละลายของสารมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิที่เหมาะสม (optimum temperature)

ในทำนองเดียวกันความดันก็มีผลต่อการละลายของสารด้วย ดังนั้น การละลายของสารจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ และความดันที่เหมาะสม (optimum temperature and optimum pressure)



## 2. การสกัดสารที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

แก๊สที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่สูงจะทำให้ค่า  $B_{1,2}$  เป็นลบมากขึ้น ดังนั้น การละลายจึงเพิ่มขึ้น นั่นคือแก๊สที่มีอุณหภูมิวิกฤตสูงจะมีความสามารถในการเป็นตัวทำละลายที่ดีกว่าแก๊สที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำ แต่ในทางปฏิบัตินิยมใช้แก๊สที่มีอุณหภูมิวิกฤตที่ใกล้เคียงกับสภาวะแวดล้อม ทั้งนี้เพราะคำนึงถึงการปฏิบัติงานและการลงทุน ดังนั้นการสกัดสารโดยทั่วไปนิยมใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

### การวิเคราะห์การละลายโดยใช้ศักย์ทางเคมี (13)

การวิเคราะห์การละลายของสารทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในที่นี้วิเคราะห์ในแง่ของสัดส่วนโมลกับความดัน (ดังแสดงในรูปที่ 3.6) ความชันของการละลายแบ่งเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณที่ต่ำกว่าจุดวิกฤต (I) บริเวณใกล้จุดวิกฤต (II) และบริเวณที่อยู่เหนือจุดวิกฤต (III)

ที่สภาวะสมดุล ศักย์ทางเคมี (chemical potential) ของสารในเฟสของของแข็งจะเท่ากับในเฟสของแก๊ส

$$\mu_1^s = \mu_1^g \quad 4.5$$

เนื่องจากศักย์ทางเคมี ขึ้นกับ อุณหภูมิ ความดัน และสัดส่วนโมลของสาร สัดส่วนโมลของสารในเฟสของของแข็งมีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นสมการ 4.5 จึงเขียนใหม่เป็น

$$\Delta\mu(T, P, X) = \mu_1^s(T, P) - \mu_1^g(T, P, X) = 0 \quad 4.6$$

เมื่อนำสมการ 4.6 มาหาอนุพันธ์ (differential) ที่อุณหภูมิคงที่จะได้

$$d\mu(T, P, X) = \left(\frac{\partial\mu_1^s}{\partial P}\right)_{T,P} dP - \left(\frac{\partial\mu_1^g}{\partial P}\right)_{T,P} dP - \left(\frac{\partial\mu_1^g}{\partial X}\right)_{T,P} dX = 0 \quad 4.7$$

นั่นคือ

$$\left(\frac{\partial X}{\partial P}\right)_{T,P} = (V^s - \bar{V}) / \left(\frac{\partial\mu_1^g}{\partial X}\right)_{T,P} \quad 4.8$$

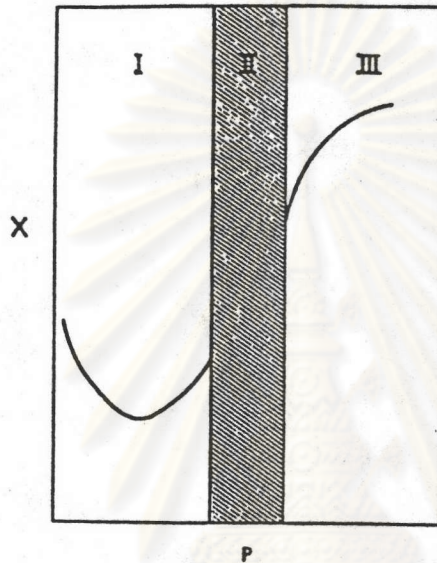


โดยที่  $V^s$  (molar volume in the solid phase) แทนด้วย

$$\left(\frac{\partial \mu_1^s}{\partial P}\right)_T$$

$\bar{V}$  (partial volume of the solute) แทนด้วย

$$\left(\frac{\partial \mu_1^s}{\partial P}\right)_{T,x}$$



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการละลายกับความดัน

สมการ 4.8 เป็นสมการทั่วไปที่ใช้ในการอธิบายความดันของการละลาย ทั้ง 3 บริเวณได้เป็นอย่างดี

(1.) บริเวณที่ใกล้จุดวิกฤต

ที่บริเวณใกล้จุดวิกฤตจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงค้ำยทางเคมี กล่าวคือ  $\left(\frac{\partial \mu_1^s}{\partial X}\right)_{T,P}$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ทำให้ความดันของการละลายเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังนั้นบริเวณที่ใกล้จุดวิกฤตการละลายของสารจะเพิ่มขึ้นมาก และที่จุดวิกฤต  $\left(\frac{\partial \mu_1^s}{\partial X}\right)_{T,P} = 0$   $\left(\frac{\partial X}{\partial P}\right)_{T,x} = \infty$  มีค่าเข้าใกล้ infinite นั่นคือการละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

(2.) บริเวณที่ต่ำกว่าจุดวิกฤต

เนื่องจาก

$$\mu_1^s = \mu_1^s(T,P) + RT \ln X \tag{4.9}$$



ดังนั้น  $(\partial \mu_1^* / \partial X)_{T,P} = RT / X$  4.10

แทนค่า  $(\partial \mu_1^* / \partial X)_{T,P}$  ลงในสมการ 4.8 จะได้

$$(\partial \ln X / \partial P)_{T, \text{eq. line}} = (V^* - \bar{V}) / RT \quad 4.11$$

ที่ความดันต่ำกว่าจุดวิกฤต สภาวะของแก๊สจะเป็นแก๊สอุดมคติ (ideal gas) และสัดส่วนปริมาตร (partial volume) ของสาร ( $\bar{V}$ ) มีค่ามากกว่าปริมาตรโมลในเฟสของของแข็ง ( $V^*$ )

$$\bar{V} \gg V^*$$

นั่นคือ  $(\partial \ln X / \partial P)_{T, \text{eq. line}} < 0$  กล่าวคือที่บริเวณต่ำกว่าจุดวิกฤต ความชันของการละลายเป็นลบ โดยมีจุดต่ำสุดที่  $\bar{V} = V^*$

เมื่ออนุพันธ์ครั้งที่ 2 ในสมการ 4.11 จะได้

$$(\partial^2 \ln X / \partial P^2)_{T, \text{eq. line}} = 1 / (RT ((\partial V^* / \partial P)_T - (\partial V / \partial P)_{T,x})) \quad 4.12$$

เนื่องจาก compressibility ของของแข็งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น  $|\partial V^* / \partial P| \ll |\partial \bar{V} / \partial P|$  พบว่าเมื่อเพิ่มความดันความชันของการละลายจะเป็นบวก ทั้งนี้เพราะเมื่อเพิ่มความดัน  $(\partial V / \partial P)$  จะยังมีค่าเป็นลบเพิ่มขึ้นทำให้การละลายเพิ่มขึ้น

(3.) บริเวณที่อยู่เหนือจุดวิกฤต

อธิบายโดยใช้สมการ 4.13 เมื่อเพิ่มความดันมีผลทำให้

การละลายเพิ่มขึ้นด้วย

3.4.3 ผลของตัวทำละลายร่วมที่มีต่อการละลายของสารไฮโดรคาร์บอน

การละลายของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นของแข็ง เป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) กับความหนาแน่นของตัวทำละลายภาวะวิกฤตที่ไม่มีขั้ว (non-polar supercritical solvent) ตัวทำละลายดังกล่าวเช่น คาร์บอนไดออกไซด์ อีเทน เอทรีลีน เป็นต้น แต่ความหนาแน่นขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน ดังนั้นการละลายของสารจึงขึ้นกับอุณหภูมิและความดันด้วย



การวิจัยค้นคว้าเกี่ยวกับการละลายของสารไฮโดรคาร์บอนในตัวทำละลายของของไหลภาวะวิกฤตที่ไม่มีขี้นิวมาตลอดเวลา จนกระทั่งพบว่า การเติมสารตัวที่สามลงในระบบมีผลทำให้การละลายเพิ่มขึ้น สารตัวที่สามที่เติมนี้เรียกว่า ตัวทำละลายร่วม(cosolvent) ในที่นี้ไม่สามารถใช้ตัวทำละลายร่วมเป็นตัวทำละลายโดยตรง ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิวิกฤตของตัวทำละลายร่วมมีค่าสูงมาก จุดวิกฤตของสารประกอบต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.3

การใช้ตัวทำละลายร่วมในการสกัดสารมีประโยชน์อย่างสูงในทางอุตสาหกรรม เพราะนอกจากเป็นการปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น ยังมีผลต่อเศรษฐกิจ ทำให้สามารถสกัดสารที่ความดันต่ำ และเพิ่มปริมาณสารที่สกัดได้

ได้มีการทดลองการละลายของกรดเบนโซอิก (benzoic acid) และกรด 2-อะมิโนเบนโซอิก(2-aminobenzoic acid) ในคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับในระบบที่มีตัวทำละลายร่วมต่างๆกัน แสดงในรูปที่ 3.7 ถึง 3.9 (14)

ในรูปที่ 3.7 ปริมาณของตัวทำละลายร่วมมีผลต่อการละลาย ค่าการละลายของกรดเบนโซอิกที่ความดัน 120 บาร์ และมีซิลเฟออร์ไดออกไซด์ร้อยละ 5.8 โมล มีค่าใกล้เคียงกับการละลายที่ 280 บาร์ที่ไม่มีการใช้ตัวทำละลายร่วม ดังนั้นสภาวะในการละลายจึงไม่จำเป็นต้องใช้ความดันสูงเพื่อที่จะเพิ่มการละลาย แต่สามารถทำในสภาวะความดันต่ำได้โดยการเติมตัวทำละลายร่วม

ความหนาแน่นของระบบคาร์บอนไดออกไซด์ และระบบคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีตัวทำละลายร่วมใกล้เคียงกัน แต่สภาพมีขี้นิวของทั้งสองระบบต่างกัน ดังนั้นการละลายของสารเพิ่มขึ้นในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีตัวทำละลายร่วม เนื่องจากสภาพมีขี้นิว(polarity effect)มากกว่าผลจากความหนาแน่น(density effect) ตัวอย่างตัวทำละลายร่วมที่ใช้ ได้แก่ เมทานอล(methanol) อะซิโตน(acetone) ออกเทน(n-octane) ดังแสดงในตารางที่ 3.4 สภาวะการละลายที่ 35°C ความดัน 25 MPa ความหนาแน่น 20.5 กรัม-โมล ต่อลิตร

ค่า  $y_{\text{binary}}$ , แสดงการละลายของของแข็งในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม

ค่า  $y_{\text{ternary}}$ , แสดงการละลายของของแข็งในระบบของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีตัวทำละลายร่วม

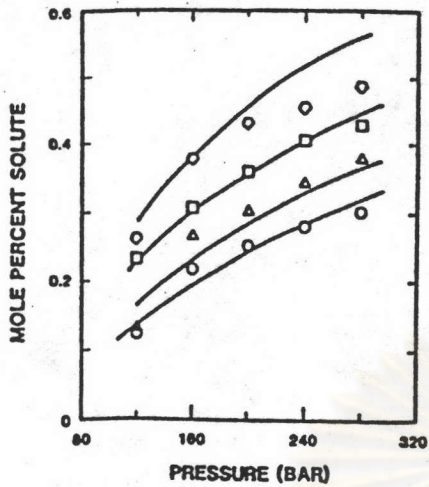
การที่สารสามารถละลายในตัวทำละลายได้นั้น แสดงว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายและโมเลกุลของตัวทำละลาย มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลนี้เรียกว่า configurational pair energy ประกอบด้วยแรง 4 ชนิด



ตารางที่ 3.3 แสดงจุดวิกฤติกลของสารประกอบต่างๆ

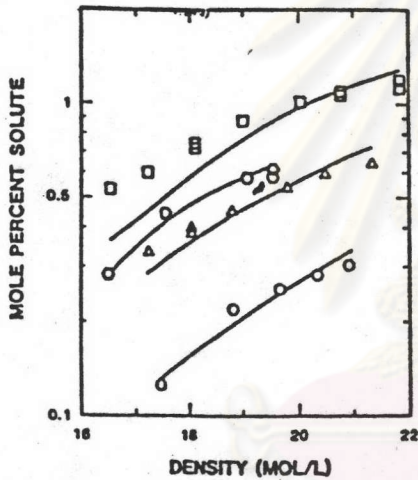
compound	Tc , °C	Pc , atm	$\rho_c$ , g/cm <sup>3</sup>
Methane	-82.09	45.44	0.162
Ethane	32.40	48.16	0.203
Propane	96.80	41.94	0.217
n-Butane	152.01	37.7	0.228
n-Pentane	196.34	33.35	0.237
n-Hexane	234.15	29.3	0.233
n-Heptane	267.13	27.00	0.232
n-Octane	295.41	24.54	0.232
n-Nonane	321.41	22.8	-
n-Decane	344.4	-	-
n-Undecane	365.66	-	-
n-Dodecane	385.1	-	-
CS <sub>2</sub>	277.0	73.55	0.441
CO <sub>2</sub>	31.04	72.85	0.468
Methanol	239.43	79.7	0.272
Ethanol	243.1	62.96	0.276
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	245.0	99.44	-
Benzene	288.94	48.34	0.302
Toluene	318.57	40.55	0.292
Cyclohexane	280.01	-	-
CCl <sub>4</sub>	283.15	44.97	0.558
CHCl <sub>3</sub>	260.0	53.8	0.486
SO <sub>2</sub>	157.50	77.9	0.524
Water	374.2	218.3	0.325
Acetone	236.0	58.84	0.252





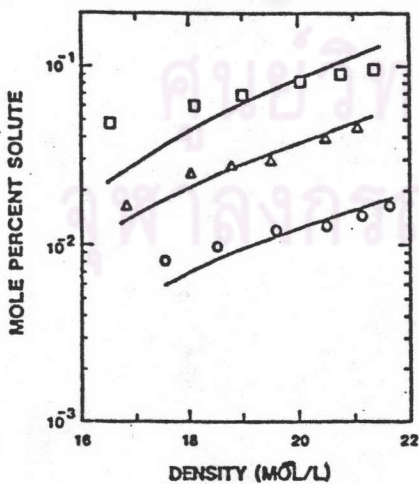
รูปที่ 3.7 แสดงการละลายของกรดเบนโซอิก  
ใน  $\text{CO}_2$  โดยใช้  $\text{SO}_2$  เป็นตัวทำละลายร่วม

- ระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม
- △ ระบบที่มี  $\text{SO}_2$  ร้อยละ 1.86 โมล
- ระบบที่มี  $\text{SO}_2$  ร้อยละ 4.35 โมล
- ระบบที่มี  $\text{SO}_2$  ร้อยละ 5.85 โมล



รูปที่ 3.8 แสดงการละลายของกรดเบนโซอิกใน  $\text{CO}_2$   
โดยใช้ตัวทำละลายร่วมร้อยละ 3.5 โมลที่  $35^\circ\text{C}$ .

- ระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม
- △ ระบบที่มี อะซิโตน
- ระบบที่มี เมทานอล
- ระบบที่มี เอ็นเอมัล-ออกเทน



รูปที่ 3.9 แสดงการละลายของกรด 2-อะมิโนเบนโซอิก  
ใน  $\text{CO}_2$  โดยใช้ตัวทำละลายร่วมร้อยละ 3.5 โมลที่  $35^\circ\text{C}$ .

- ระบบที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม
- △ ระบบที่มี อะซิโตน
- ระบบที่มี เมทานอล

ได้แก่ (14)

1. dispersion force
2. orientation force
3. induction force
4. acid-base force

แรงดึงดูดดังกล่าว แสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$\Delta U_{1,2}^T = \Delta U_{1,2}^D + \Delta U_{1,2}^O + \Delta U_{1,2}^I + \Delta U_{1,2}^{AB}$$

โดยที่  $\Delta U_{ij}$  = configurational pair energy

D = dispersion

O = orientation

I = induction

A = acid

B = base

T = total

dispersion force ( $U_{1,2}^D$ ) และ orientation force ( $U_{1,2}^O$ ) หาได้จาก

สูตร

$$\Delta U_{1,2} = C_{1,2} \cdot v_{1,2} = d_1 \cdot d_2 \cdot (v_1 \cdot v_2)^{1/2}$$

โดยที่ C = cohesive energy density

$d$  = solubility parameter

v = molar volume

1 = solute

3 = cosolvent

acid-base force;  $\Delta U_{1,2}^{AB} = 1.8 (d_1^A \cdot d_2^B + d_1^B \cdot d_2^A) \cdot (v_1 \cdot v_2)^{1/2} - RT$

induction force;  $\Delta U_{1,2}^I = 0.6 (d_1^I \cdot d_2^D + d_1^D \cdot d_2^I) \cdot (v_1 \cdot v_2)^{1/2}$



ตารางที่ 3.4 แสดงค่าการละลายของสารใน CO<sub>2</sub> โดยมีตัวทำละลายร่วมต่าง ๆ กัน

solid	cosolvent	$y_1$ (ternary)/ $y_1$ (binary)
benzoic acid	methanol	3.7
	acetone	2.1
2-aminobenzoic acid	<i>n</i> -octane	2.3
	methanol	7.2
phthalic anhydride	acetone	3.1
	acetone	1.7
hexamethylbenzene	methanol	1.1
	acetone	1.2
	<i>n</i> -octane <sup>a</sup>	2.1
acridine	<i>n</i> -pentane <sup>a</sup>	1.8
	methanol	2.3
	acetone	1.7
2-naphthol	methanol	4.5

ตารางที่ 3.5 แสดงพารามิเตอร์การละลายของสารและตัวทำละลายร่วม

	$\delta^T$ <sup>a</sup>	$\delta^D$ <sup>b</sup>	$\delta^O$ <sup>c</sup>	$\delta^I$ <sup>c</sup>	$\delta^A$ <sup>c</sup>	$\delta^H$ <sup>c</sup>
benzoic acid	13.0	8.9	2.5	0.3	9.3 <sup>d</sup>	0.0
2-aminobenzoic acid	12.7	8.9	2.5			
phthalic anhydride	11.0	8.9	4.5	2.9		
hexamethylbenzene	8.3	8.0			0.0	2.0
2-naphthol	12.2	10.1	1.8	0.2	8.6	2.0
acridine	10.5	9.5	3.0	0.3	0.0	3.6
acetone	9.6	7.2	5.1	1.5	0.0	3.0
methanol	14.5	6.8	4.9	0.8	8.3	8.3
<i>n</i> -octane	7.6	7.6	0.0	0.0	0.0	0.0

ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พารามิเตอร์การละลายของสารและตัวทำละลายร่วม แสดงในตารางที่ 3.5 ส่วนค่า configurational pair energy ของสารและตัวทำละลายร่วมต่างๆแสดงในตารางที่ 3.6 การละลายของกรดเบนโซอิกในคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีตัวทำละลายร่วมต่างๆกัน พบว่าการละลายของกรดเบนโซอิกที่มีเมทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม มีค่ามากกว่าในตัวทำละลายร่วมที่เป็นอะซิโตนหรือออกเทน ทั้งนี้เพราะกรดเบนโซอิกกับเมทานอลมีค่า configurational pair energy ที่สูงกว่า ทำนองเดียวกันการละลายของกรด 2-อะมิโนเบนโซอิกในคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีเมทานอลเป็นตัวทำละลายร่วม มีค่ามากกว่าในตัวทำละลายร่วมที่เป็นอะซิโตน ดังนั้นสำหรับสารที่มีขั้ว แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารและตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อการละลาย คือ acid-base force และ dispersion force แต่สำหรับสารที่ไม่มีขั้ว dispersion force จะมีผลต่อการละลายมาก

### 3.5 กระบวนการสกัดสารโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูง

เมื่อพิจารณาแผนผังวัฏภาค (phase diagram) ในรูป 3.10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ จะเห็นว่า มีเส้น 3 เส้นที่แบ่งคาร์บอนไดออกไซด์ออกเป็น 3 บริเวณตามสถานะ เส้นดังกล่าวคือ เส้นการเดือด (boiling line) เส้นการหลอม (melting line) และเส้นการระเหิด (sublimation line) บริเวณสามเหลี่ยมที่เป็นของของเหลวอยู่ระหว่างเส้นการเดือด เส้นการหลอม และได้เส้นความดันวิกฤต เรียกว่า คาร์บอนไดออกไซด์เหลวภาวะวิกฤต (subcritical liquid carbon dioxide) เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงแต่มีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจึงมีความสามารถในการเป็นตัวทำละลายแบบ medium solvent power โดยมากจะสกัดสารที่อุณหภูมิ 0 ถึง 20 °ซ.

บริเวณที่อยู่เหนือจุดวิกฤต (critical point ในรูปคือ CP) เรียกว่า บริเวณภาวะวิกฤต (supercritical region) เป็นบริเวณที่ไม่สามารถแบ่งแยกคาร์บอนไดออกไซด์เป็นของเหลว หรือแก๊สได้ ในสภาพนี้ solvent power จะขึ้นกับความดัน และอุณหภูมิ

การสกัดสารในทางปฏิบัตินิยมใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะภาวะวิกฤต กล่าวคือ มีความดันลดทอน (reduced pressure, Pr) มากกว่า 1.0 และอุณหภูมิลดทอน (reduced temperature, Tr) มากกว่า 1.0 นอกจากนี้อาจจะใช้ในสภาวะของเหลวที่ใกล้ภาวะวิกฤต (near-critical liquid) คือมีอุณหภูมิลดทอนอยู่ในช่วง 0.95 ถึง 1.0 เพราะถ้าอุณหภูมิลดทอนยิ่งสูงความหนาแน่นยิ่งลดลงทำให้ solvent power ลดลง และถ้าความดันลดทอนสูงกว่า 5 หรือ 6 จะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากเนื่องจาก



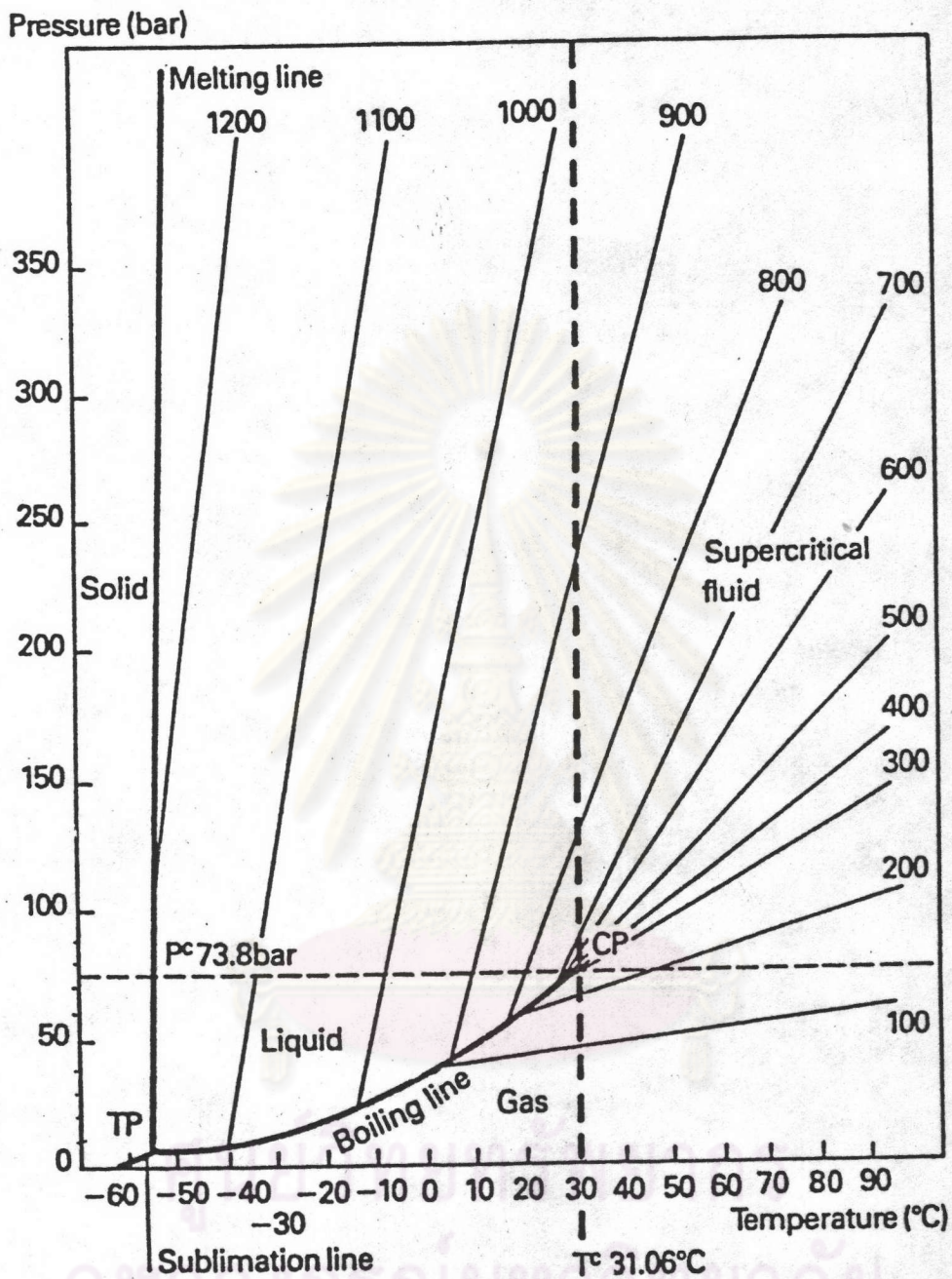
ตารางที่ 3.6 แสดงค่า configurational pair energy ของสารกับตัวทำละลายร่วม

compound	cosolvent	$\Delta U_{12}^{T, \text{expt}}$	$\Delta U_{12}^{T, \text{calc}}$	$\Delta U_{12}^D$	$\Delta U_{12}^O$	$\Delta U_{12}^I$	$\Delta U_{12}^{AB}$
benzoic acid	acetone	49.1	47.4	23.6	4.7	3.2	15.9
	methanol	66.7	58.6	16.8	3.4	2.5	35.9
	n-octane	52.7	37.1	37.1	0.0	0.0	0.0
2-aminobenzoic acid	acetone	59.5		20.8			
	methanol	82.9		14.2			
phthalic anhydride	acetone	47.2	40.6	24.3	8.7	7.6	
hexamethylbenzene	acetone	34.3	30.5	27.3	0.0	3.2	0.0
	methanol	32.2	29.0	19.5	0.0	1.4	8.1
acridine	acetone	48.1	41.3	30.4	6.8	4.1	0.0
	methanol	57.1	44.8	21.6	4.9	1.9	16.4
2-naphthol	methanol	72.0	65.4	18.8	2.6	1.7	42.3

$\Delta U$  หน่วยเป็น kJ/g-mol

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดัน และความหนาแน่นของ CO<sub>2</sub>



การใช้ความดันสูง กระบวนการทางพาณิชย์ในการสกัดสารด้วยของไหลภาวะวิกฤต แสดงในตารางที่ 3.7 (15)

กระบวนการสกัดสารด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูงมีข้อได้เปรียบหลายประการ นอกจากคุณสมบัติพิเศษที่กล่าวข้างต้นยังมีข้อได้เปรียบกว่าตัวทำละลายอื่นในการสกัด ดังนี้

1. ไม่เกิดปัญหาภาวะมลพิษ
2. ใช้พลังงานน้อย
3. คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลายที่เฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยาเคมี
4. สามารถทำการสกัดสารแบบลำดับส่วนได้
5. คาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูก และไม่เป็นพิษ
6. ในการสกัดสารภายใต้ความดัน สารที่มีจุดเดือดสูงสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้สามารถสกัดสารที่มีจุดเดือดสูงได้
7. ไม่เกิดการสูญเสีย หรือการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารที่ไม่อยู่ตัวหรือสลายตัวได้ง่ายที่อุณหภูมิต่ำ
8. สามารถแยกตัวทำละลายและตัวถูกละลายออกจากกันได้ง่ายภายหลังจากทำการสกัดแล้ว
9. ในการสกัดสารทางด้านอาหารซึ่งคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้บริโภค สามารถใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในการสกัดสารได้เพราะคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่ไม่เป็นพิษ
10. สามารถหมุนเวียนนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่ได้ เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยง่าย
11. ไม่มีสารเหลือคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตกค้างในสารที่สกัดได้

ส่วนข้อเสียเปรียบของกระบวนการดังกล่าวมีดังนี้

1. เป็นการยากที่จะยอมรับการใช้ความดันสูงในอุตสาหกรรม ที่ไม่มีปฏิบัติงานเกี่ยวกับการใช้ความดันสูง
2. การลงทุนสร้างโรงงานสูงมากทำให้เสี่ยงต่อการลงทุน
3. ต้นทุนในการบำรุงรักษาสูง

กระบวนการสกัดสารด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่

1. การเตรียมวัตถุดิบ
2. การสกัดสาร



ตารางที่ 3.7 แสดงกระบวนการทางพาณิชย์ในการสกัดสารด้วยของไหลภาวะวิกฤต

Charge	Extract	Solvent	Extraction conditions		Recovery conditions
			P, atm	T, °C	
Petroleum	light HC	propane, propylene	100-150	100	50 bar 100 C
Wool fat	lanolin	propane, propylene	60-110	100-105	1 bar
Petroleum	HC fractions	ethylene	40-120	20	40 bar
Coffee beans	caffeine	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O	120-180	40-80	adsorption on act. carbon
Tobacco	nicotine	CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , aromatics, halog. HC	65-1000	35-100	subcritical adsorption
Hops	resins, $\alpha$ - and $\beta$ -acids	CO <sub>2</sub>	70-400	45-50	subcritical
Black pepper	piperine, ethereal and fatty oils	CO <sub>2</sub>	<400	40-60	65 bar 25-60 C stripping with CO <sub>2</sub>
Cloves	eugenol	CO <sub>2</sub>	<400	40-60	"
Cinnamon	cinnamic aldehyde	CO <sub>2</sub>	<400	40-60	"
Vanilla beans	vanillan	CO <sub>2</sub>	<400	40-60	"
Roast coffee	aromatic substances, glycerides, fatty acids	CO <sub>2</sub>	<320	-50	65 bar
Fermented black tea	aromatic substances	CO <sub>2</sub>	<300	-50	50-70 bar

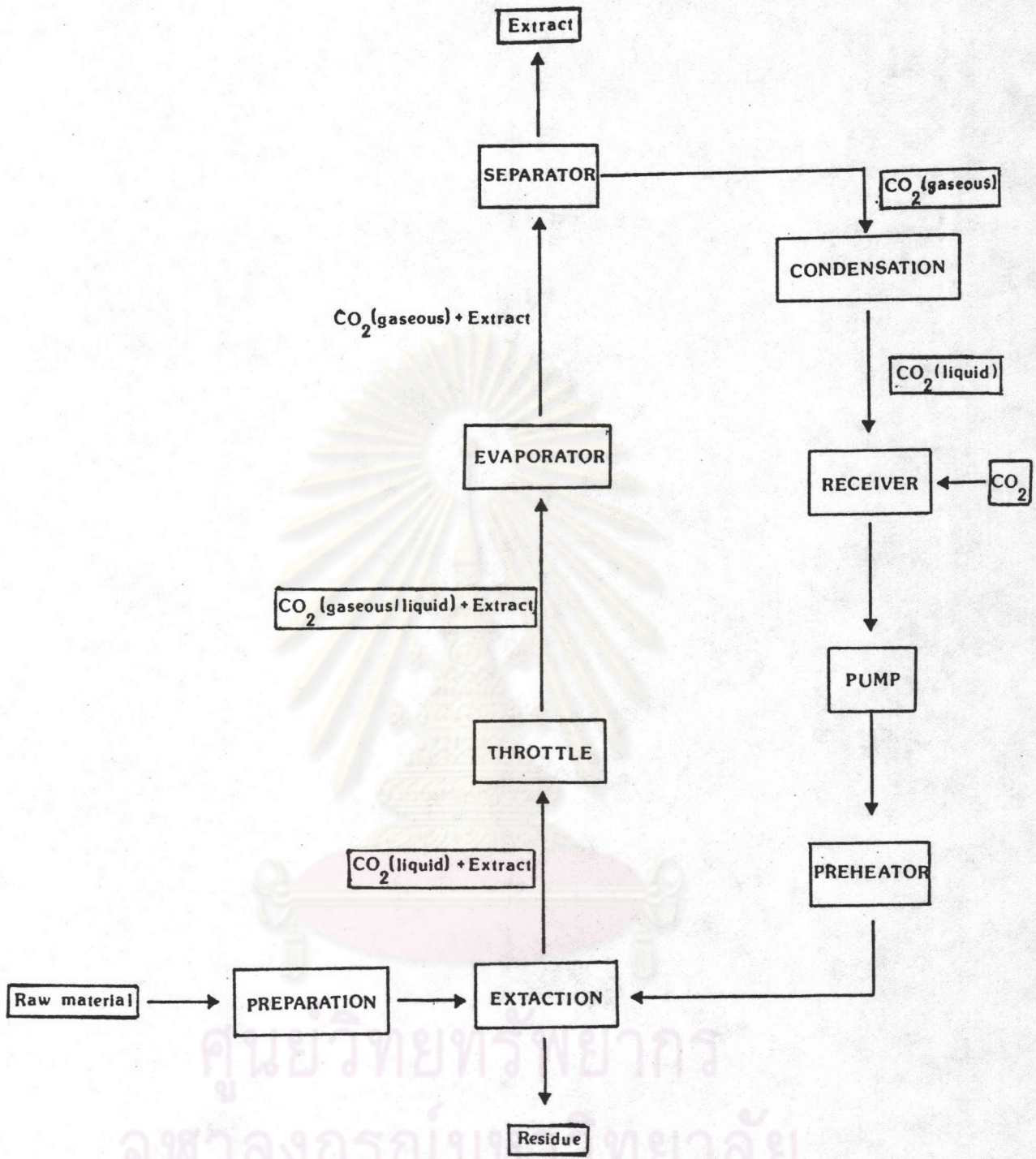
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



3. การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากสารที่สกัดได้
  4. การนำคาร์บอนไดออกไซด์กลับมาใช้ใหม่
- ขั้นตอนทั้งหมด แสดงอยู่ในรูปที่ 3.11

### 3.6 ประโยชน์การใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย

1. การแยกโพลีคลอริเนเตดไบฟีนิล (polychlorinated biphenyls, PCB's) ออกจากน้ำมันหม้อแปลง (transformer oils)
2. การสกัดน้ำมันพืชออกจากเมล็ดถั่วเหลือง ดอกทานตะวัน และต้นเรพ (rape seed)
3. การสกัดสารอินทรีย์ออกจากสารละลาย เช่น การสกัดเอทธานอล และเฟอฟูรอล (furfural)
4. การสกัดต้นฮอป (hops)
5. การสกัดดอกไลแลค (lilac flowers)
6. การสกัดน้ำมันถั่วเหลือง
7. การแยกไซเนอร์มีล-อัลเคนออกจากต้นไม้
8. การสกัดน้ำมันออกจากข้าวสาลี
9. การสกัดคาเฟอีน (caffeine) ออกจากเมล็ดกาแฟ
10. การสกัดของสารผสมกลีเซอไรด์โดยใช้คาร์บอนเตตระคลอไรด์หรือเนอร์มีล-เอกเซน เป็นสารชนิดที่สาม (entrainer)
11. การสกัดไพริดีน (pyridine) ที่เหลือค้างอยู่ในสารที่สกัดได้จากถ่านหินที่ใช้ไพริดีน เป็นตัวทำละลาย
12. การสกัดสารปนเปื้อนอินทรีย์จากคาร์บอนกัมมันต์ (activated carbon)
13. การสกัดสารนิโคตินจากยาสูบ



รูปที่ 3.11 แสดงขั้นตอนการสกัดสารด้วย CO<sub>2</sub> เหลว