



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)  
ปริญญา

วิศวกรรมเคมี	วิศวกรรมเคมี
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและการทำความสะอาดพลาสติกจากขจัดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น  The Solubility of Lubricating Oil in Supercritical Carbon Dioxide and Plastics Cleaning
نامผู้วิจัย	นางสาวชณิดาภา ด้านยุทธพลชัย
ได้พิจารณาเห็นชอบ	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( ..... รองศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D. .... )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( ..... อาจารย์ชลิตา เนียมนุ่น, D.Eng. .... )
หัวหน้าภาควิชา	( ..... รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D. .... )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( ..... รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. .... )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น

The Solubility of Lubricating Oil in Supercritical Carbon Dioxide  
and Plastics Cleaning

โดย

นางสาวชนิดาภา ด่านยุทธพลชัย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2555

ชณิศดาภา ด้านยุทธพลชัย 2555: ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอน ไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล, Ph.D. 131 หน้า

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมส่งผลให้ปริมาณของเสียที่เกิดจากพลาสติกมีมากขึ้น โดยเฉพาะพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นการรีไซเคิลจึงมีความสำคัญ เนื่องจากสามารถลดการฝังกลบขยะได้ และสามารถนำมาผลิตขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (SC-CO<sub>2</sub>) จึงเริ่มเข้ามามีบทบาทในกระบวนการทำความสะอาด เพราะมีราคาถูก ไม่มีพิษ และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งการหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> มีความสำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้ทำความสะอาดพลาสติก ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ที่ 0.5-1 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันในช่วง 120-190 บาร์ และอุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> ผลการทดลอง พบว่าอัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ที่เหมาะสม คือ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที นอกจากนี้พบว่า ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น เมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น สำหรับทุกๆอุณหภูมิ และที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส เกิดจุด crossover ที่ความดัน 165 บาร์ โดยความสามารถในการละลายสูงสุดของน้ำมันหล่อลื่นเท่ากับ 12.36 กรัม/น้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความดัน 190 บาร์ เมื่อนำค่าความสามารถในการละลายที่ได้มาหาสมการที่เหมาะสมในการทำนายความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> พบว่า สมการของ Charstil เป็นสมการที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสมการของ Del-Valle and Aquilera และสมการของ Adachi and Lu จากข้อมูลความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วย SC-CO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ โดยไม่เติมตัวทำละลายร่วมและเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) พบว่า ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเพิ่มขึ้นเมื่อเติมตัวทำละลายร่วม และเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดลดลงด้วย นอกจากนี้ พบว่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate, MFR) ของพลาสติกที่ทำความสะอาดด้วยเฮกเซนและพลาสติกที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วย SC-CO<sub>2</sub> ทั้งที่เติมตัวทำละลายร่วม และไม่เติมตัวทำละลายร่วม มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

---

ลายมือชื่อผู้ผลิต

---

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chanidapa Danyuthapolchai 2012: The Solubility of Lubricating Oil in Supercritical Carbon Dioxide and Plastics Cleaning. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Manop Charoenchaitrakool, Ph.D. 131 pages.

Rapid growth in industrial development leads to an increase in plastics waste generation, in particular, lubricating oil containers. Therefore, recycling of containers is desirable because it avoids accumulation in landfills and clean plastics are required in the recycling process for making new lubricating oil containers. Supercritical carbon dioxide (SC-CO<sub>2</sub>) has been established as a good alternative solvent for cleaning since CO<sub>2</sub> is inexpensive, non-toxic and environmentally friendly. Prior to the cleaning process being undertaken, the solubility data are required. The effects of CO<sub>2</sub> flow rate, pressure and temperature on the solubility of the lubricating oil were investigated at 0.5–1 mL/min, in the pressure range of 120–190 bar and temperatures of 35, 40 and 45 °C. It was found that proper CO<sub>2</sub> flow rate was maintained at 0.5±0.2 mL/min and the oil solubility increased as the pressure was increased for all investigated isotherms. For 40 °C and 45 °C isotherms, the crossover pressure for oil–CO<sub>2</sub> system was observed at 165 bar. For a given pressure, the oil solubility at 35 °C was found to be the highest compared to the other isotherms. Within the range of operating conditions studied, a maximum oil solubility of 12.36 g/kgCO<sub>2</sub> was obtained at 35 °C and 190 bar. Then the empirical correlations purposed by Charstil, Del-Valle and Aquilera and Adachi and Lu were evaluated to correlate the experimental solubility data. It was found that the best correlation of the solubility data of lubricating oil was obtained using the Charstil equation. Plastics cleaning by using SC-CO<sub>2</sub> with and without adding co-solvent (5 mol% of acetone) were then carried out at a temperature of 35 °C and pressures of 120 and 180 bar. It was observed that adding co-solvent to the process could enhance plastics cleaning efficiency and reduce the cleaning time. Moreover, it was found that the melt flow rates (MFR) of the original waste plastics cleaned with hexane and the cleaned plastics using SC-CO<sub>2</sub> were not significantly different.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์มานพ เจริญไชยตระกูล ประธานกรรม ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ และช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งงานวิจัยและวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ดร.ชลิตา เนียมนุ้ย ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.ไพศาล คงคาอุยฉาย ประธานการสอบ และดร.ปริญญา คงพรม ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่ให้คำแนะนำต่างๆซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณชนาธิป อูทัย เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ ขอขอบคุณ คุณศุภกรสรรพ พุทธกุลอนันต์ เจ้าหน้าที่เทคนิค ผู้ควบคุมและดูแลเครื่องมือ ศูนย์บริการวิเคราะห์/ทดสอบจากวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัว รุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และสนับสนุนจนประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ชณิดาภา ต้านยุทธพลชัย

พฤษภาคม 2555

## สารบัญ

### หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	55
อุปกรณ์	55
วิธีการ	56
ผลและวิจารณ์	62
สรุปและข้อเสนอแนะ	96
สรุป	96
ข้อเสนอแนะ	98
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	99
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก การคำนวณหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมัน หล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและ ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเศษพลาสติก	107
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง	116
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	131

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมรรถนะของเครื่องยนต์เบนซิน	14
2	สมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล	15
3	ข้อมูลคุณสมบัติที่จุดวิกฤตของสารชนิดต่างๆ	19
4	ค่าความหนาแน่น การแพร่กระจายและความหนืดของของเหลวที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับก๊าซและของเหลว	22
5	ค่าคงที่จากสมการทางคณิตศาสตร์ และค่า $R^2$ ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Özkal (2004)	51
6	ค่าคงที่จากสมการทางคณิตศาสตร์ และค่า $R^2$ ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Özkal <i>et al.</i> (2005)	52
7	ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ	65
8	ค่าคงที่ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการทำละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	80
9	ค่าความสามารถในการละลาย (กรัม น้ำมันต่อกิโลกรัม ของคาร์บอนไดออกไซด์) จากการทดลอง เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการละลายจากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	81
10	ค่าคงที่ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการทำละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 40-45 องศาเซลเซียส	83
11	ค่าความสามารถในการละลาย (กรัม น้ำมันต่อกิโลกรัม ของคาร์บอนไดออกไซด์) จากการทดลอง เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการละลายจากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการ ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส	84

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
12	ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการล้าง และประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกชีวและพลาสติกสีกา ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์	88
13	ปริมาณของผสม (คาร์บอนไดออกไซด์ + อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) ที่ใช้เวลาที่ใช้ในการล้าง และประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกชีวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์	90
14	อัตราการไหลของพลาสติกชีว และพลาสติกสีกาที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่มี การเติมตัวทำละลายร่วมและมีการเติมตัวทำละลายร่วม(อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	93
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ข1	ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์)ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	117
ข2	ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์)ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	120
ข3	ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์)ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	123
ข4	ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์)ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	126

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข5 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์)ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	126
ข6 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์)ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส	127
ข7 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุ น้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ กรณีที่ไม่เติมตัวทำละลายร่วม	127
ข8 ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเศษพลาสติกสีเขียวจากขวดบรรจุ น้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ กรณีที่เติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์)	128
ข9 ข้อมูลการทำความสะอาดเพื่อนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดเศษพลาสติกสีเขียวจากขวดบรรจุ น้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์	129
ข10 ข้อมูลการทำความสะอาดเพื่อนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดเศษพลาสติกสีเทาจากขวดบรรจุ น้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์	130

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	18
2	21
3	24
4	25
5	30
6	35
7	39
8	41
9	43
10	44
11	45
12	47
13	56
14	66

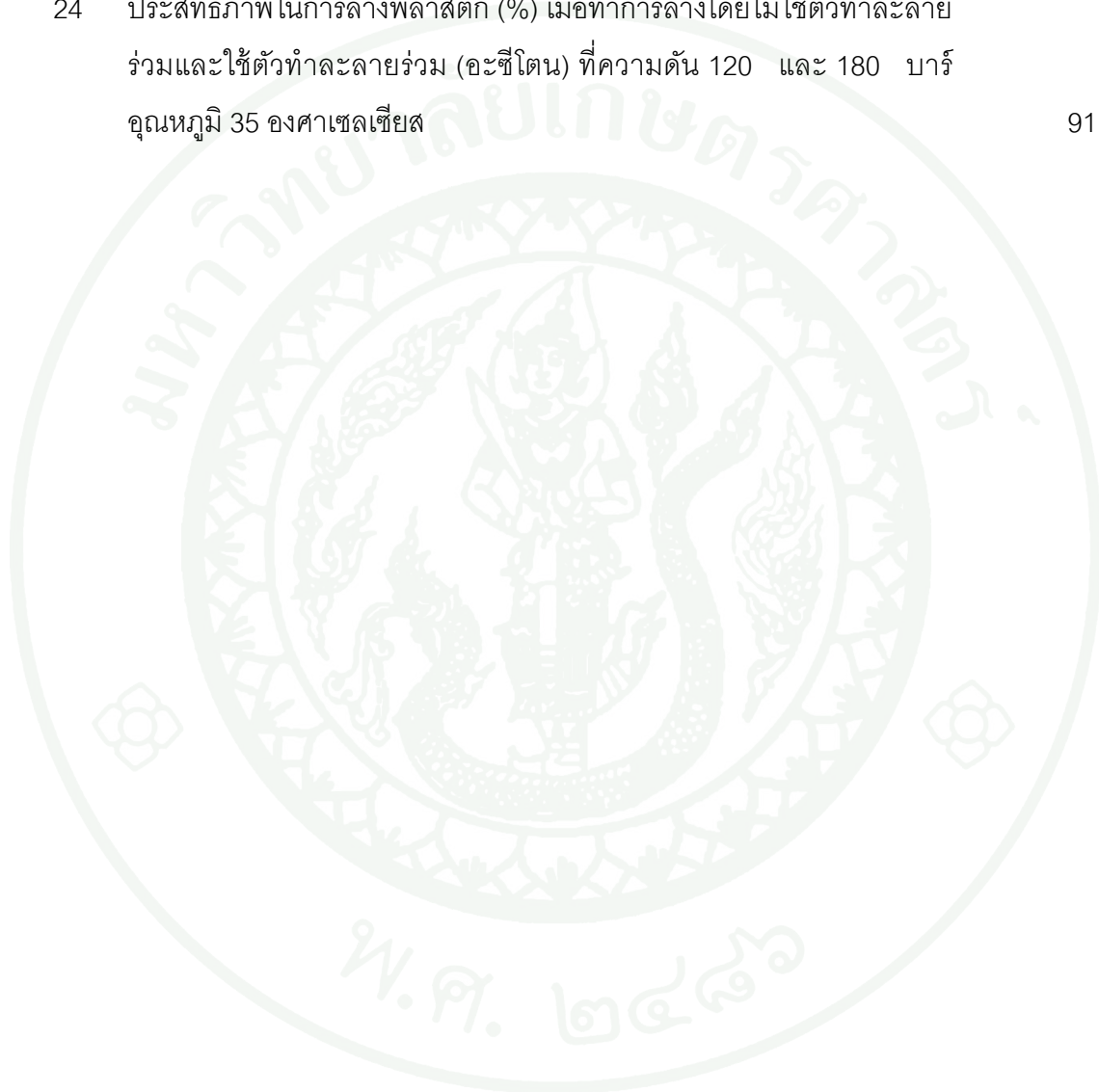
## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	อิทธิพลของความหนาแน่นที่มีต่อความสามารถในการทำลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ	67
16	ผลของความดันในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551)	69
17	ผลของความดันในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552)	70
18	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ความดันต่างๆ	73
19	ผลของอุณหภูมิของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551)	75
20	ผลของอุณหภูมิของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552)	77
21	ค่าลดการตีหมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เปรียบเทียบกับค่าลดการตีหมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดลองที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส	79
22	ค่าลดการตีหมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Adachi and Lu เปรียบเทียบกับค่าลดการตีหมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส	82
23	ค่าลดการตีหมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เปรียบเทียบกับค่าลดการตีหมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดลองที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส	85

**สารบัญญภาพ (ต่อ)****ภาพที่****หน้า**

- 24 ประสิทธิภาพในการล้างพลาสติก (%) เมื่อทำการล้างโดยไม่ใช้ตัวทำละลาย  
ร่วมและใช้ตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ที่ความดัน 120 และ 180 บาร์  
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

91



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CFC	=	Chlorofluorocarbon
CO <sub>2</sub>	=	Carbon dioxide
CP.	=	Critical point
GRAS	=	Generally Regarded As Safe
HDPE	=	High-density polyethylene
HSS	=	High Speed Steel
K	=	Kelvin
MFR	=	Melt Flow Rate
OF	=	Objective Function
PAO	=	Polyalphaolefin
P <sub>c</sub>	=	Critical pressure
SC-CO <sub>2</sub>	=	Supercritical carbon dioxide
SCF	=	Supercritical Fluids
SFC	=	Supercritical Fluid Chromatography
SFE	=	Supercritical Fluid Extraction
T <sub>c</sub>	=	Critical temperature
T.P.	=	Triple point
W	=	Winter
ZDDP	=	Zinc-alkyl-dithio-phosphate

## ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น

### The Solubility of Lubricating Oil in Supercritical Carbon Dioxide and Plastics Cleaning

#### คำนำ

พลาสติกเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญมากในปัจจุบัน ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน มีแนวโน้มในการใช้งานเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทั้งในด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงมากมาย สาเหตุมาจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่เด่นกว่าวัสดุอื่นๆ คือ ในหนึ่งโมเลกุลมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่น ทำให้มีคุณสมบัติหลายอย่างพร้อมๆกัน ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพ มีความแข็งแรง เหนียว และยืดหยุ่น มีน้ำหนักเบา สามารถขึ้นรูปได้ง่าย หลากหลายรูปแบบ คุณสมบัติทางไฟฟ้า เป็นฉนวนไฟฟ้า ทนต่อความร้อนได้ดี และคุณสมบัติทางเคมี ทนต่อการกัดกร่อนของกรด ต่าง และสารเคมีอื่นๆได้ดี ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของจำนวนพลาสติกที่ผ่านการใช้งานแล้วจึงเป็นปัญหาสำคัญทำให้ปริมาณขยะที่ย่อยสลายได้ยากเพิ่มขึ้นทุกปีและจะส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ในภายหลัง

ปัญหาจากขยะต่างๆ เป็นสาเหตุที่สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆตามมามากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณขยะที่เกิดจากขวดน้ำมันหล่อลื่นที่มีแนวโน้มการใช้งานเพิ่มขึ้นทุกปีตามการขยายตัวทางด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมทางด้านยานยนต์ ปัญหาที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อาจเกิดขึ้นได้จากการปล่อยทิ้งขวดน้ำมันหล่อลื่นให้กลายเป็นขยะโดยไม่แก้ปัญหานั้น เช่น น้ำมันหล่อลื่นที่อยู่ในขวด หากปล่อยทิ้งไว้อาจถูกชะล้างได้ด้วยน้ำฝนและไหลลงสู่แหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดมลพิษทางน้ำ ทำให้น้ำเน่าเสีย สัตว์น้ำที่อาศัยอยู่บริเวณนั้นไม่มีที่อยู่อาศัย ระบบนิเวศเสื่อมโทรม หรือหากนำขวดน้ำมันหล่อลื่นมาเผาโดยใช้เตาเผาที่มีอุณหภูมิสูง อาจส่งผลให้เกิดก๊าซพิษที่มีผลต่อมลภาวะทางอากาศ เป็นต้น ปัจจุบันจึงมีการหาแนวทางเพื่อแก้ปัญหามลพิษที่เกิดจากขวดน้ำมันหล่อลื่น เช่น การรีไซเคิล (Recycle) ซึ่งวิธีนี้จะช่วยลดการผลิตขวดน้ำมันหล่อลื่นชนิดใหม่ โดยจะทำการยืดอายุการใช้งานของขวดน้ำมันหล่อลื่นให้ยาว

ขึ้นและมีประสิทธิภาพดีขึ้น โดยกระบวนการรีไซเคิลจะเริ่มจากการแยกพลาสติกชนิดต่างๆออกจากกัน จากนั้นนำพลาสติกมาบดเป็นชิ้นเล็กๆ และถูกล้างทำความสะอาดในบ่อน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งในขั้นตอนนี้อาจเป็นปัญหาเนื่องจากขวดน้ำมันหล่อลื่นมีสารปนเปื้อนที่เป็นน้ำมันอยู่ จึงต้องมีการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่นให้สะอาดเสียก่อนแล้วจึงนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล

สำหรับขั้นตอนในการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่นก่อนกระบวนการรีไซเคิลเพื่อกำจัดสารปนเปื้อน สามารถทำได้หลายวิธี กรรมวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปในการกำจัดน้ำมันหล่อลื่น จะใช้น้ำผสมกับสารลดแรงตึงผิวจำพวกผงซักฟอก คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) และสบู่ เป็นต้น ซึ่งสารลดแรงตึงผิวที่เรานำมาใช้ในการทำความสะอาดเหล่านี้อาจมีผลในการทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การปล่อยน้ำที่ได้จากผงซักฟอกซึ่งมีสารจำพวกฟอสเฟตปนอยู่ลงสู่ม่าน้ำลำคลอง จะทำให้สาหร่ายและพืชชั้นต่ำในน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและจะอาศัยออกซิเจนที่มีอยู่ในน้ำจนหมด ทำให้สิ่งมีชีวิตอื่นๆไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ทำให้เกิดน้ำเน่าเสียขึ้น และอาจต้องใช้เวลานานที่กระบวนการทางธรรมชาติหรือจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารลดแรงตึงผิวได้หมด นอกจากนี้ยังเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกและสภาวะโลกร้อนได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องหาวิธีในการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่นด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด รวมไปถึงสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้ดีที่สุด ซึ่งในปัจจุบันวิธีที่กำลังได้รับความสนใจอยู่ คือ การนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical Fluid) มาใช้ในการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งตัวทำละลายที่เลือกใช้คือคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความปลอดภัยมากกว่าการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ หรือการใช้สารลดแรงตึงผิวจำพวกผงซักฟอก สามารถแยกตัวทำละลายออกมาได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ไม่มีสารตกค้างหลงเหลืออยู่ที่ขวดน้ำมันหล่อลื่นหรือวัสดุที่จะนำมาทำความสะอาด เหมาะกับวัสดุที่เรียบและมีขนาดเล็ก แต่การทำความสะอาดสารโดยใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตยังมีข้อจำกัด คือ ของไหลที่สภาวะเหนือจุดที่นำมาใช้ในการสกัดสารส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของอุณหภูมิวิกฤตที่ 0-100 องศาเซลเซียส และมักเป็นสารที่ไม่มีขั้วจึงทำให้สกัดสารที่มีขั้วได้ค่อนข้างต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารให้ดีขึ้น ต้องมีการเติมตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ลงไป เช่น กรดอะซิติก เมทานอล อะซีโตน เฮกเซน เป็นต้น

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical carbon dioxide, SC-CO<sub>2</sub>) โดยข้อมูลการละลายที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่นต่อไป



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมที่อุณหภูมิต่างกันและความดันต่างๆ
2. เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ 3 สมการ ได้แก่ สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera และสมการของ Adachi and Lu และเปรียบเทียบเพื่อหาสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น
3. เพื่อนำค่าความสามารถในการละลายมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น

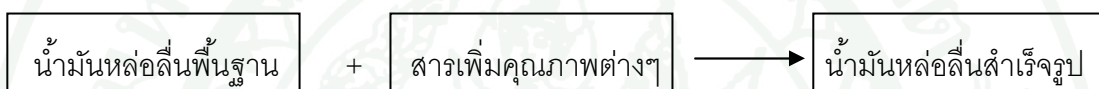
## การตรวจเอกสาร

กระบวนการรีไซเคิลพลาสติกนั้นเข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดปัญหาการฝังกลบขยะที่เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ดังนั้นขั้นตอนการทำความสะอาดพลาสติกจึงมีความสำคัญ ซึ่งโดยปกติแล้วการทำความสะอาดพลาสติกก่อนเข้ากระบวนการต่างๆนั้นมักใช้สารจำพวกผงซักฟอกหรือตัวทำละลายอินทรีย์ต่างๆในการทำความสะอาด แต่สารเหล่านี้ล้วนก่อให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมทั้งสิ้น งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งเป็นวิธีทางเลือกวิธีหนึ่งที่สามารถทำความสะอาดพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซเฉื่อย ไม่ไวไฟ มีราคาถูก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เพื่อนำค่าความสามารถในการละลายที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาด เช่น การหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำความสะอาดเศษพลาสติก และนำค่าความสามารถในการละลายมาหาสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ต่อไป ก่อนจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการละลายควรทำความเข้าใจทฤษฎีเบื้องต้นของน้ำมันหล่อลื่น คุณสมบัติของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต คุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต วิธีในการวัดความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต รวมไปถึงการทำนายค่าความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ อีกด้วย

## น้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น(Lubricating oil) เป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม ซึ่งเป็นวัสดุหล่อลื่นที่มีลักษณะเป็นของเหลว โดยทั่วไปจะนำมาใช้หล่อลื่นชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องยนต์ และเครื่องจักรที่มีลักษณะปิด เช่น ภายในห้องเพลาข้อเหวี่ยง ห้องเกียร์ และเฟืองท้าย เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องของเครื่องยนต์เบนซินและดีเซลอีกด้วย (ประเสริฐ, 2544)

ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณภาพดี สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน และขั้นตอนการเติมสารเพิ่มคุณภาพลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป



### 1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน( base oil )

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีใช้อยู่ในนั้น แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากพืช หรือสัตว์ (Vegetable or animal base oil) สมัยก่อนนิยมนำมาใช้ในงานหลายประเภท แต่ปัจจุบัน นำมาใช้น้อยมาก เนื่องจากน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ จะมีความคงตัวทางเคมีต่ำ เสื่อมสภาพได้ง่ายขณะใช้งาน เมื่อนำมาใช้ต้องผ่านกระบวนการปรับปรุง ทำให้มีราคาแพง ความนิยมจึงหมดไป ส่วนใหญ่มักใช้เป็นตัวเติมสำหรับเพิ่มคุณภาพให้น้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อเพิ่มความข้น และความสามารถในการผสมกับน้ำได้ เป็นต้น ตัวอย่างของน้ำมันพืชที่มักนำมาใช้ได้แก่ น้ำมันละหุ่ง และน้ำมันปาล์ม ส่วนน้ำมันจากสัตว์ได้แก่ น้ำมันหมู และน้ำมันปลา เป็นต้น

1.2 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียม หรือน้ำมันแร่ (Mineral base oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่นิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีคุณภาพดี และราคาถูก น้ำมันชนิดนี้เป็นผลผลิตที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบในหอกกลั่น น้ำมันดิบที่มีจุดเดือดสูง ไม่ระเหยเป็นไอ จะเหลืออยู่เป็นพวกน้ำมันเตา ไซ และยางมะตอย ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ เพื่อผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน น้ำมันดิบบางประเภทก็ไม่เหมาะที่จะนำมาผลิตน้ำมันแร่ น้ำมันแร่ที่ได้จากน้ำมันดิบพวก

พาราฟินิก มักจะมีไขสูง ต้องนำมาผ่านกระบวนการกำจัดเอาไขออก น้ำมันที่ได้จากการกลั่นแยกภายใต้สูญญากาศนี้ ปกติคุณภาพจะไม่ได้ดีพอที่จะนำมาใช้ในการผลิตน้ำมันหล่อลื่น ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อกำจัดเอาสารที่ไม่ต้องการออก และเพื่อให้มีความอยู่ตัวเชิงเคมี และเชิงความร้อนที่ดีพอ

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากปิโตรเลียมนั้น สามารถแยกคุณสมบัติได้ 3 แบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับฐานของน้ำมันปิโตรเลียมที่นำมาใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ดังนี้

1) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานพาราฟินิก (Paraffinic base oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีจุดวาบไฟสูง มีการระเหยตัวต่ำสามารถรักษาคุณสมบัติทางเคมีไว้ได้ดี มีจุดไหลเทสูง ความถ่วงจำเพาะต่ำ ไขได้ง่าย โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนยึดเกาะกันเหนียวแน่น ทำให้ฟิล์มน้ำมันแตกตัวได้ยากจึงมีความเหนียวและแข็งแรง และต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี

2) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานแนฟธิก (Naphthenic base oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีจุดวาบไฟต่ำ การระเหยตัวต่ำ รักษาคุณสมบัติโครงสร้างทางเคมีได้ดีพอควร มีจุดไหลเทต่ำ ความถ่วงจำเพาะและรวมตัวกันได้ดี มีการหล่อลื่นต่ำ การยึดเกาะโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดได้ดีในบางส่วน และการต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ

3) น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันดิบฐานอะโรแมติก (Aromatic base oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่มีสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีคุณสมบัติคือ มีจุดไหลเทต่ำมาก ไม่มีไข การหล่อลื่นไม่ดี การจับตัวระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจนไม่เสถียร การต้านทานการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนต่ำ การรักษาคุณสมบัติทางเคมีไม่แน่นอน และความถ่วงจำเพาะสูง

1.3 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic base oil) เป็นน้ำมันที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการทางเคมี วัสดุที่นำมาสังเคราะห์มักนำมาจากน้ำมันปิโตรเลียม ส่วนใหญ่ใช้ในงานที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษในด้านดัชนีความข้นใสสูง จุดไหลเทต่ำ และมีการระเหย

ต่ำ เป็นต้น น้ำมันสังเคราะห์ที่ใช้กันมากมีหลายชนิดและมีราคาค่อนข้างสูง ตัวอย่างของน้ำมันสังเคราะห์ที่นิยมใช้กันมากคือ

- พวกลพอลิแอลฟาโอเลฟิน (Polyalphaolefin: PAO) เป็นสารที่มีค่าดัชนีความข้นใสสูงมาก จุดไหลเทต่ำ การระเหยตัวต่ำ และมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันดี ปัจจุบันนิยมใช้กันมากขึ้น เพราะราคาถูกลงและสามารถผลิตได้ง่าย

- พวกลเอสเทอร์ (Ester) ไดเอสเทอร์ (Diester) และคอมเพล็กซ์เอสเทอร์ (Complex ester) เป็นสารที่มีดัชนีความข้นใสสูงมาก มีการระเหยตัวต่ำ และมีความอยู่ตัวดี ใช้ในงานที่ต้องทำงานกับสภาวะที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมากๆ เช่น น้ำมันเทอร์ไบน์ของเครื่องบินไอพ่น นอกจากนี้พวกฟอสเฟตเอสเทอร์ (Phosphate ester) ก็ยังใช้ทำพวกน้ำมันไฮดรอลิกที่ไม่ติดไฟ หรือที่เรียกกันว่าน้ำมันทนไฟ

- พวกลพอลิไกลคอล (Polyglycol) เป็นสารที่มีจุดเดือดสูง จุดไหลเทต่ำ นิยมใช้ในงานที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใช้ทำน้ำมันเบรก

- พวกลซิลิโคน (Silicone) ใช้เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานในงานที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ

- พวกลฮาโลจีเนตไฮโดรคาร์บอน (Halogenated hydrocarbon) เช่น คลอโรฟลูออโรคาร์บอน (Chlorofluorocarbons) หรือสารซีเอฟซี (CFC) ใช้ทำน้ำมันสำหรับเครื่องอัดออกซิเจน เพราะมีความอยู่ตัวทางเคมีและความอยู่ตัวเชิงความร้อนดีมาก

- พวกลพอลิฟีนิลอีเทอร์ (Polyphenyl ether) เป็นสารที่ใช้ในงานในอุณหภูมิสูงมากถึง 800 องศาเซลเซียส เช่น น้ำมันไฮดรอลิกในยานอวกาศ เนื่องจากมีความอยู่ตัวเชิงความร้อนสูงมาก และมีความสามารถในการต้านทานต่อรังสีนิวเคลียร์อีกด้วย

คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานและน้ำมันหล่อลื่นในเครื่องยนต์

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานเมื่อผ่านจากโรงกลั่น จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัว ดังนี้

1. ความหนืดหรือความข้นใส (Viscosity) หมายถึง ความใสและความเข้มข้นของน้ำมัน โดยวัดที่อุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง น้ำมันที่มีความข้นใสน้อยจะไหลง่าย แต่เยื่อหล่อลื่นจะบางมาก ส่วนน้ำมันที่มีความข้นใสมากจะไหลยากแต่จะมีเยื่อหล่อลื่นหนากว่าหรือแข็งกว่าน้ำมันที่มีความข้นใสน้อย
2. ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน (Anti-oxidant) เมื่อสารไฮโดรคาร์บอนสัมผัสกับออกซิเจนในอากาศก็จะเกิดการทำปฏิกิริยากัน ทำให้เกิดสิ่งไม่พึงประสงค์หลายชนิด เช่น กรด ความเหนียว นอกจากนี้ ถ้าอุณหภูมิสูง อัตราการรวมตัวก็ยิ่งเกิดเร็วขึ้นอีก น้ำมันที่ดีย่อมรวมตัวกับออกซิเจนได้มาก
3. จุดวาบไฟ (Flash point) คือ อุณหภูมิของน้ำมันที่ได้รับความร้อนจนกลายเป็นไอ แล้วเกิดการลุกไหม้เมื่อโดนเปลวไฟ ซึ่งจุดวาบไฟนี้มีความสำคัญในเรื่องความปลอดภัย
4. จุดไหลเท (Pour point) คือ อุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมันจะไหลได้โดยไม่มีอะไรมาบกรวน สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ควรเลือกน้ำมันที่มีจุดไหลเทต่ำ
5. ดัชนีความหนืด (Viscosity index) ความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ ดังนั้นน้ำมันจะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะมีความหนืดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จึงมีการวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงนี้ในรูปค่าดัชนีความหนืด หรือที่เรียกกันว่า VI ถ้า น้ำมันหล่อลื่นมีค่า VI สูง แสดงว่าน้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก ถ้า น้ำมันหล่อลื่นมีค่า VI ต่ำ แสดงว่าค่าความหนืดของน้ำมันจะเปลี่ยนแปลงมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้น น้ำมันที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงจะเป็นน้ำมันที่มีคุณภาพดีทางด้านความหนืดเหมาะสมกับอุณหภูมิการใช้งาน

## หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น

น้ำมันหล่อลื่น เป็นน้ำมันที่นำไปหล่อลื่นเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลต่างๆ ในปัจจุบันมีการใช้น้ำมันหล่อลื่นมากมายหลายชนิด ซึ่งน้ำมันหล่อลื่นนั้นมีหน้าที่หลักและประโยชน์ในการใช้งานดังนี้

1) ช่วยในการหล่อลื่น (Lubricate) พิล์มหรือเยื่อบางๆของน้ำมันหล่อลื่น จะทำหน้าที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานที่มีการเคลื่อนที่ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียดสีกันโดยตรง หรือเพื่อเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงาน น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของเยื่อน้ำมันและฟิล์มน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลาแม้ว่าอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไป คือต้องไม่บางเกินไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และไม่หนาเกินไปเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง ซึ่งคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ เราเรียกว่า ดัชนีความหนืด (Viscosity index) ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

2) ช่วยในการระบายความร้อน (Coolant) คุณสมบัติข้อนี้มีความสำคัญมากข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งจะต้องลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในระบบสูบ และระบายความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของชิ้นส่วนต่างๆในเครื่องยนต์เช่น ระบบเกียร์ หรือเฟืองท้าย เป็นต้น

3) ช่วยรักษาความสะอาด (Clean) ขณะที่ทำหน้าที่หล่อลื่นก็จะต้องเป็นตัวทำความสะอาดชิ้นงานนั้นไปด้วย คือจะต้องสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆจากผิวชิ้นงานได้เป็นอย่างดี

4) ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน (Protect) น้ำมันหล่อลื่นที่ดีนั้นจะต้องไม่มีสารที่เป็นอันตรายในการกัดกร่อนเสียเอง นอกจากนี้เมื่อมีสารจากภายนอกที่อาจทำให้เกิดกรดได้ เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำ หรือไอน้ำ น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติในการทำให้ความเป็นกรดนั้นเจือจางลง และไม่สามารถที่จะไปกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5) ช่วยกระจายความสกปรก (Dispersancy) น้ำมันหล่อลื่นที่ดีควรมีคุณสมบัติในการกระจายสิ่งสกปรกต่างๆที่ปนอยู่ในน้ำมันหล่อลื่นที่เกิดจากการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงาน เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกต่างๆเหล่านี้รวมตัวกันได้ง่าย เพราะหากสิ่งสกปรกในน้ำมันหล่อลื่นเกิดการ

รวมตัวกันมากขึ้นจะทำให้เกิดเป็นยางเหนียว ทำให้เป็นอุปสรรคที่สำคัญในการหล่อลื่นเครื่องยนต์ได้

## 2. สารเพิ่มคุณภาพ

ในปัจจุบันเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ประเภทต่างๆได้รับการออกแบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้น เช่น มีความเร็วรอบสูงขึ้น แรงม้า แรงเสียดทาน และรับน้ำหนักได้สูงขึ้น ขณะที่ขนาดของเครื่องจักรกลและเครื่องยนต์ถูกสร้างให้เล็กลง จึงมักประสบกับปัญหาด้านอุณหภูมิ ความเครียด รวมถึงภาวะการรับน้ำหนักสูง น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานล้วนๆที่ไม่มีสารเพิ่มคุณภาพจึงมีคุณภาพไม่ดีพอ ทำให้ไม่สามารถทำหน้าที่ต่างๆได้อย่างครบถ้วน อายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเพิ่มคุณภาพลงไป ในน้ำมันหล่อลื่น เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานให้มีคุณภาพดีและเหมาะสมกับการใช้งานที่ต้องการ โดยต้องคำนึงถึงคุณภาพ ชนิด และปริมาณของสารเพิ่มคุณภาพที่เติมด้วย

2.1 สารต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Anti-oxidants) ได้แก่ ซิงค์ไดอัลคิลไดไฮโอฟอสเฟต (ZDDP) บิสฟีนอล และอะโรมาติกเอมีน เป็นต้น ใช้กับน้ำมันหล่อลื่นในงานที่มีอุณหภูมิสูงและน้ำมันที่ต้องมีการสัมผัสกับอากาศ ใช้ลดการเกิดยางเหนียวและตะกอนจากน้ำมัน สามารถยืดอายุการใช้งานของน้ำมันได้อีกด้วย

2.2 สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitors) ได้แก่ สารเพิ่มความเป็นด่างซัลโฟเนตฟอสเฟต ไฮดรอกไซด์ฟอสเฟต ซิงค์ไดอัลคิลไดไฮโอฟอสเฟต (ZDDP) และฟอสโฟซัลฟูไรซ์เทอร์ปีน เป็นต้น ใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของสารเคมี เช่นกรดที่จะกระทำต่อผิวชิ้นส่วนของเครื่องจักรกล เช่น ในเครื่องกล

2.3 สารป้องกันสนิม (Anti-rust additives) ได้แก่ สารประกอบประเภทเมทาลิกไซโปแบบมีซั่ว เช่น เอสเทอร์ อีเทอร์ กรดอินทรีย์ และเอมีน เป็นต้น ใช้เพื่อป้องกันการเกิดสนิมในงานที่อาจจะมีน้ำหรือความชื้นหรือมาเกี่ยวข้องหรือสัมผัสกับผิวของโลหะ

2.4 สารป้องกันการสึกหรอ (Anti-wear additives) ได้แก่ ซิงค์ไดอัลคิลไดไฮโอฟอสเฟต (ZDDP) และไตรครีซิลฟอสเฟต เป็นต้น ใช้เพื่อป้องกันการสึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่รับภาระน้ำหนักสูง ซึ่งมักจะเกิด boundary lubrication ขึ้น

2.5 สารชะล้างและกระจายสิ่งสกปรก (Detergents and dispersants) ได้แก่ เมทาลิก ซัลโฟเนต ฟีนีต และฟอสเฟต เอมีนฟีนอล อัลคิลซัลฟิทธิวท์ซาลิซิเลต และซัคซินิมิด เป็นต้น ใช้ชะล้างสิ่งสกปรกออกจากผิวชิ้นส่วนของเครื่องจักร และการกระจายไม่ให้อวมตัวเป็นโคลน ตะกอน จำเป็นสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์

2.6 สารลดปฏิกิริยาเร่งของผิวโลหะ (Metal deactivators) ได้แก่ ซิงค์ไดอัลคิลไดไฮโอ ฟอสเฟต (ZDDP) เมทอลฟีนีต และสารประกอบอินทรีย์ของไนโตรเจน เป็นต้น ใช้ลดและป้องกันผลจากปฏิกิริยาเร่งของผิวโลหะต่างๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว เหล็ก โคโรเมียม ในเครื่องจักรกลที่กระตุ้นให้น้ำมันทำปฏิกิริยากับออกซิเจน มีผลให้น้ำมันเสื่อมสภาพช้าลง

2.7 สารเพิ่มค่าดัชนีความหนืด (Viscosity-index improver) ได้แก่ พอลิไอโซบิวทีลีน เมทาครีเลต อะครีเลตโคโพลีเมอร์ ใช้ลดอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดตามอุณหภูมิของน้ำมัน ใช้ในน้ำมันชนิดมัลติเกรดหรือเกรดรวม

2.8 สารลดจุดไหลเท (Pour point depressants) ได้แก่ เมทาครีเลตพอลิเมอร์ แวกซ์อัลคิลเลตฟีนอล และอีตส์พอลิเมอร์ แวกซ์อัลคิลเลตแนพธาไลน์ และอีตส์พอลิเมอร์ เป็นต้น ใช้ลดจุดแข็งตัวของน้ำมัน ซึ่งเกิดขึ้นเพราะไขในน้ำมันแยกตัวเป็นผลึก โดยป้องกันไม่ให้ไขเกาะตัวกันเป็นกลุ่ม ทำให้น้ำมันสามารถไหลได้ในอุณหภูมิต่ำๆ

2.9 สารป้องกันการเกิดฟอง (Anti-foamants) ได้แก่ ซิลิโคนโพลีเมอร์ และออร์แกนิกโพลีเมอร์ เป็นต้น ใช้ป้องกันการเกิดฟองถาวร เมื่อน้ำมันถูกหมุนเวียนใช้ในระบบ เช่น ในอ่างน้ำมันเครื่อง เกียร์ไฮโดรลิก

ประโยชน์ในการใส่สารเพิ่มคุณภาพชนิดต่างๆลงในน้ำมัน มีดังนี้คือ

- 1) ปรับให้น้ำมันมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นได้สมบูรณ์ตลอดอายุการใช้งานของน้ำมันหล่อลื่น
- 2) ปรับค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นตามอุณหภูมิการทำงานที่แตกต่างกัน
- 3) ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะอย่าง ซึ่งเหมาะกับกระบวนการใช้งานในแต่ละประเภท

- 4) ช่วยลดการสึกหรอ และยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรกลหรือเครื่องยนต์ให้ยาวนานขึ้น
- 5) ทำให้น้ำมันหล่อลื่นมีอายุการใช้งานนานขึ้น
- 6) ทำให้เครื่องจักรกลหรือเครื่องยนต์มีสมรรถนะในการทำงานสูงขึ้น

### มาตรฐานการแยกประเภทของน้ำมันเครื่อง

น้ำมันเครื่องที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่มากมายหลายชนิด สำหรับการใช้งานและเครื่องยนต์ต่างชนิดกัน เพื่อการใช้งานที่ถูกต้องและเหมาะสม จึงแบ่งน้ำมันเครื่องออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

#### 1. มาตรฐานการแยกตามความหนืด

ความหนืดของน้ำมันเรียกได้อีกอย่างว่าความข้นใสของน้ำมัน ซึ่งมีการกำหนดมาตรฐานโดยผู้ที่กำหนดมาตรฐานคือสมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งสหรัฐอเมริกา (SAE) โดยจะมีการแบ่งออกเป็นเบอร์ต่างๆ แยกได้เป็น

##### 1.1 ความหนืดเดี่ยว (Single grade)

น้ำมันในพวกนี้จะถูกระบุเป็นเบอร์เดี่ยว เช่น เบอร์ 10 W, เบอร์ 40, เบอร์ 90, เบอร์ 140 เป็นต้น ซึ่งเบอร์ในแต่ละชุดนั้น หมายถึงความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น น้ำมันที่มี W (Winter) ต่อท้ายนั้น หมายถึง ใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ และตัวเลขที่มี W ต่อท้าย ถ้าตัวเลขน้อยแสดงว่าคงค่าความหนืดในอุณหภูมิที่ติดลบมากๆ จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานในประเทศที่มีความหนาวเย็น

##### 1.2 ความหนืดรวม (Multigrade)

น้ำมันในพวกนี้ถูกปรับปรุงโดยใช้สารเคมีเข้ามาผสม เพื่อให้มีความหลากหลายในการใช้งานตามสภาพภูมิประเทศที่ต่างกัน สามารถสังเกตได้จากการที่มีการระบุช่วงของเบอร์น้ำมัน เช่น 15 W-40, 20 W-40, 20 W-50 (W ย่อมาจากคำว่า winter) เป็นต้น น้ำมันประเภทนี้มีความหนืดสูงกว่าพวกแรก จะทำให้ประสิทธิภาพในการหล่อลื่นเป็นไปตามปกติไม่ว่าในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำ ซึ่งค่าตัวเลขหน้า W แสดงถึงการวัดการต้านทานความเป็นไข ซึ่งแสดงเป็นค่า

ตัวเลข โดยวัดตั้งแต่อุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ต่ำลงมาจนถึงจุดเยือกแข็งตั้งแต่ 0 องศา จนถึงต่ำกว่า -30 องศาเซลเซียส ค่าตัวเลขหลัง W บอกระดับความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งจะ แทนค่าในรูปตัวเลข ซึ่งค่าตัวเลขมากแสดงถึงความหนืดที่มาก และตัวเลขน้อยแสดงถึงค่าความหนืดที่น้อยตามลำดับ

## 2. มาตรฐานการแยกตามสภาพในการใช้งาน

### 2.1 มาตรฐานน้ำมันเครื่อง API

สถาบันปิโตรเลียมแห่งอเมริกา หรือ API ได้กำหนดมาตรฐานตามสภาพการใช้งาน ซึ่งเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับน้ำมันเครื่อง โดยจะทำการแบ่งสมรรถนะของเครื่องออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของเครื่องยนต์ คือ ประเภทที่ใช้กับเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งมีอยู่ 8 ระดับ ได้แก่ SA SB SC SD SE SF SG และ SH ประเภทที่ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลมี 10 ระดับ ได้แก่ CA CB CC CD CDII CE CF CF-2 CF-4 และ CG-4 โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน

#### ตารางที่ 1 สมรรถนะของเครื่องยนต์เบนซิน

มาตรฐานน้ำมันเครื่อง	ความเหมาะสมในการใช้งาน
SA	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ที่มีสภาพงานเบา ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ ไม่มีการผสมสารเพิ่มคุณภาพ ดังนั้นในปัจจุบันจึงไม่นิยมใช้น้ำมันเครื่องประเภทนี้
SB	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ที่มีสภาพงานเบา ความเร็วรอบค่อนข้างต่ำ มีการผสมสารเพิ่มคุณภาพลงไปเล็กน้อย ใช้สำหรับป้องกันการสึกหรอและการรวมตัวกับออกซิเจน ปัจจุบันไม่นิยมใช้น้ำมันเครื่องประเภทนี้
SC	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์เบนซินในปี 2507-2510 มีการผสมสารเพิ่มคุณภาพเพื่อใช้ในการป้องกันการเกิดตะกอน ป้องกันสนิม การกัดกร่อนและการสึกหรอของเครื่องยนต์

### ตารางที่ 1 (ต่อ)

มาตรฐาน น้ำมันเครื่อง	ความเหมาะสมในการใช้งาน
SD	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์เบนซินในปี 2511-2513 มีสารเพิ่มคุณภาพมากกว่าใช้เพื่อต้านทานการรวมตัวของเขม่าและตะกอนทั้งที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ ป้องกันสนิม การกัดกร่อน และการสึกหรอ
SE	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์เบนซิน ปี 2515 เป็นต้นไป มีการผสมสารเพิ่มคุณภาพ เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้สูงกว่า SD และ SC ป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจน การรวมตัวของเขม่าและตะกอน การกัดกร่อนและการสึกหรอ
SF	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์เบนซิน ปี 2523 เป็นต้นไป มีคุณสมบัติต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจนและการป้องกันการสึกหรอได้สูงกว่า SE นอกจากนี้ ยังรักษาความสะอาดป้องกันสนิมและป้องกันการกัดกร่อน
SG	มีคุณสมบัติเพิ่มเติมจาก SF ในการป้องกันการเกิดตะกอนสกปรก (Sludge) ป้องกันการสึกหรอ และยืดอายุในการใช้งาน
SH	เหมาะสำหรับเครื่องยนต์เบนซินปี 2535 เป็นต้นไป มีคุณสมบัติครอบคลุมการทดสอบเครื่องยนต์ของ SG ทุกประการและต้องผ่านการทดสอบ Bench Tests รวมทั้ง Volatility Filterability และ Form Tests

หมายเหตุ S ตัวแรก = Service Station = ศูนย์บริการรถส่วนใหญ่ที่เป็นรถนั่งส่วนบุคคล

#### 2.1.2) น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล

### ตารางที่ 2 สมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล

มาตรฐาน น้ำมันเครื่อง	ความเหมาะสมในการใช้งาน
CA	เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาที่ต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูง ป้องกันการกัดกร่อนที่แข็ง และคราบตะกอนที่อุณหภูมิสูง

## ตารางที่ 2 (ต่อ)

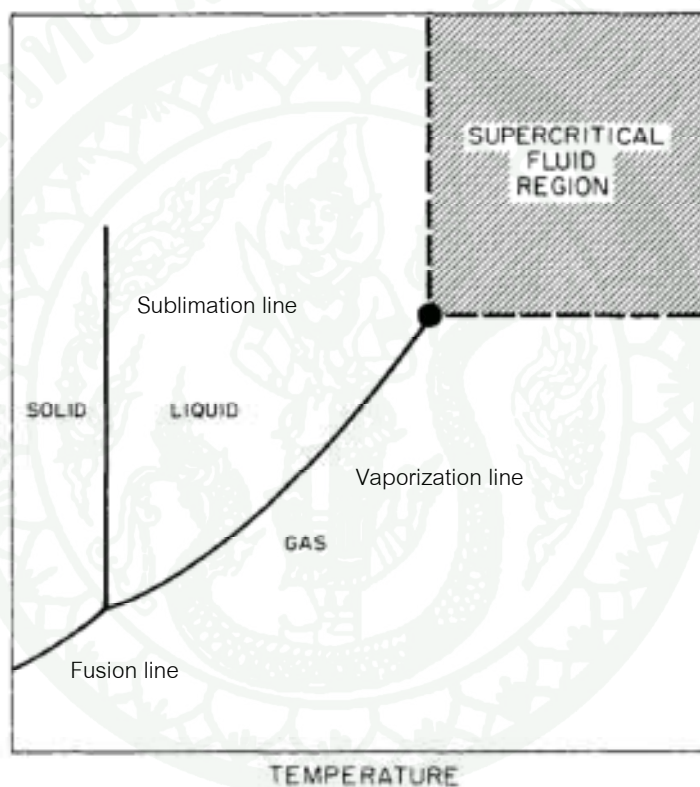
มาตรฐาน น้ำมันเครื่อง	ความเหมาะสมในการใช้งาน
CB	เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาที่ต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพสูง เครื่องยนต์เบนซินใช้งานปานกลางซึ่งใช้น้ำมันเชื้อเพลิงคุณภาพต่ำกว่าที่ใช้ใน CA รวมทั้งเครื่องยนต์เบนซิน มีคุณสมบัติในการชะล้างเขม่า ป้องกันการกัดกร่อนแบร็งและคราบตะกอนที่อุณหภูมิสูง
CC	เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลธรรมดาหรือซูเปอร์ชาร์จ ที่มีสภาพงานเบาปานกลางและหนัก มีคุณสมบัติป้องกันการเกิดคราบตะกอนที่อุณหภูมิสูงและต่ำ ป้องกันสนิมและรวมไปถึงการกัดกร่อน
CE	เป็นมาตรฐานของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบัน เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องยนต์ดีเซลเทอร์โบชาร์จ ที่ทำงานภายใต้สภาวะที่มีความเร็วต่ำ/น้ำหนักสูง และความเร็วสูง/น้ำหนักสูง
CF	เหมาะสำหรับการใช้งานกับเครื่องยนต์ธรรมดา รวมไปถึง Indirect Injected Diesel Engines เทอร์โบชาร์จที่มีสภาพงานหนัก ความเร็วรอบสูง สามารถใช้งานร่วมกับน้ำมันดีเซลชนิดกัมมันต์ต่ำและสูงได้ดี นอกจากนี้สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล API CD ทุกประการ
CF-2	เป็นน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล 2 จังหวะ มีคุณสมบัติครอบคลุมการทดสอบของเครื่องยนต์ API CD-2 ทุกประการ แต่ไม่จำเป็นต้องผ่านมาตรฐาน API CF หรือ CF-4
CF-4	เป็นมาตรฐานสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลยุคใหม่ รวมไปถึงเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการใช้งานหนักหรือทำงานภายใต้ความเร็วรอบสูงๆ
CG-4	เป็นมาตรฐานสูงสุดสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลในปัจจุบัน นอกจากนี้ยังเป็นมาตรฐานสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลที่มีการใช้งานหนัก หรือทำงานภายใต้ความเร็วรอบสูงๆ

**หมายเหตุ** ตัวแรกขึ้นต้นด้วย C = Commercial = รถและเครื่องยนต์เพื่อการพาณิชย์และอุตสาหกรรม เป็นเครื่องดีเซล

ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าขวดพลาสติกนั้น ใช้เวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนานมาก ดังนั้นจึงนำขวดพลาสติกกลับมาใช้ใหม่โดยการนำมารีไซเคิล โดยพลาสติกที่ในงานวิจัยนี้ให้ความสนใจ คือขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากมีความต้องการนำขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นกลับมาใช้ใหม่เพื่อลดปริมาณขยะที่มีอยู่มากในประเทศ ในอดีตวิธีที่นิยมใช้กันมากในการทำความสะอาดขวดน้ำมัน คือ การล้างด้วยผงซักฟอกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอิมัลซิไฟเออร์ เพื่อช่วยให้สามารถล้างน้ำมันออกจากขวดได้ แต่เราพบว่า การทำความสะอาดโดยวิธีนี้นั้นมีข้อเสีย คือ อาจทำให้เกิดการตกค้างของผงซักฟอกหรือสารชะล้างซึ่งมีส่วนประกอบของฟอสเฟตอยู่มาก เมื่อปล่อยลงท่อระบายน้ำทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลองจึงเกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมามากมาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่หาง่าย ไม่มีพิษ และมีราคาถูก

## ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical fluids, SCF) หมายถึง สารใดๆที่อยู่ในสภาวะที่ไม่สามารถจำแนกได้อย่างชัดเจนว่าเป็นของเหลวบริสุทธิ์ หรือ ก๊าซ สภาวะดังกล่าวอธิบายได้จากแผนภาพที่ 1 ซึ่งแสดงความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ (Pressure-temperature diagram for pure component)



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงความดันและอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์

ที่มา: McHugh and Krukonis (1994)

จากภาพที่ 1 แสดงสถานะต่างๆของสาร ทั้งของเหลว ของแข็ง และก๊าซ มีเส้นสมดุลเฟสเป็นตัวแบ่งแยกแต่ละเฟสออกจากกัน โดยมีเส้นการระเหิด (Sublimation line) คือ เส้นที่สารมีสถานะอยู่ในสมดุลระหว่างของแข็งกับก๊าซ เส้นการหลอมเหลว (Fusion line) คือ เส้นที่สารมีสถานะอยู่ในสมดุลระหว่างของแข็งกับของเหลว และเส้นการระเหย (Vaporization line) คือ เส้นที่

สารมีสถานะอยู่ในสมดุลระหว่างของเหลวและก๊าซ จุดที่อยู่ตรงกลางเชื่อมระหว่างเส้นทั้งสาม คือ Triple point (T.P.) ซึ่งเป็นจุดที่สารอยู่ในสมดุลทั้ง 3 สถานะ หรือมี 3 สถานะ

การเปลี่ยนสถานะของสารเมื่อต้องการทำให้สารซึ่งมีสถานะของเหลวเกิดการระเหยเป็นก๊าซ สามารถทำได้โดยการลดความดันหรือการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ทำให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น การดึงดูดซึ่งกันและกันเกิดได้ยากขึ้นมีผลให้สารที่เป็นของเหลวระเหยเป็นก๊าซได้ ส่วนการทำให้สารซึ่งมีสถานะเป็นก๊าซควบแน่นกลายเป็นของเหลว นั้นสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มความดันหรือการลดอุณหภูมิ เพื่อลดพลังงานจลน์ระหว่างโมเลกุลของสารทำให้โมเลกุลของสารชิดกันมากขึ้น เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันได้ดีขึ้นทำให้ก๊าซเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ แต่ ณ ที่อุณหภูมิหนึ่งที่ไม่ว่าจะเพิ่มความดันมากขึ้นเท่าไรก็ไม่สามารถทำให้เกิดการควบแน่นได้ และณ ที่ความดันหนึ่งการเพิ่มอุณหภูมิมากเท่าใดก็ไม่สามารถทำให้สารเกิดการระเหยได้ โดยเรียกอุณหภูมิและความดันที่กล่าวมาแล้วนี้ว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature,  $T_c$ ) และความดันวิกฤต (Critical pressure,  $P_c$ ) จุดสุดท้ายที่ของเหลวสามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซหรือก๊าซเปลี่ยนเป็นของเหลวได้ คือ จุดวิกฤต (Critical point, CP.) จุดนี้เป็นจุดที่สารมีความดันวิกฤต และมีอุณหภูมิวิกฤต ซึ่งจุดที่อยู่เหนือจากจุดนี้ไปเป็นจุดที่ของเหลวและก๊าซไม่สามารถแยกจากกันได้อย่างชัดเจน เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นเส้นแบ่งเฟสได้ จึงมองเห็นเป็นของไหลที่มีเฟสเดียว เรียกว่า ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งของไหลมีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างของเหลวและก๊าซ โดยมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว ส่วนความหนืดและการแพร่ใกล้เคียงกับก๊าซ ตารางที่ 3 แสดงค่าอุณหภูมิที่จุดวิกฤต ( $T_c$ ) และค่าความดันที่จุดวิกฤต ( $P_c$ ) ของตัวทำละลายชนิดต่างๆ

ตารางที่ 3 ข้อมูลคุณสมบัติที่จุดวิกฤตของสารชนิดต่างๆ

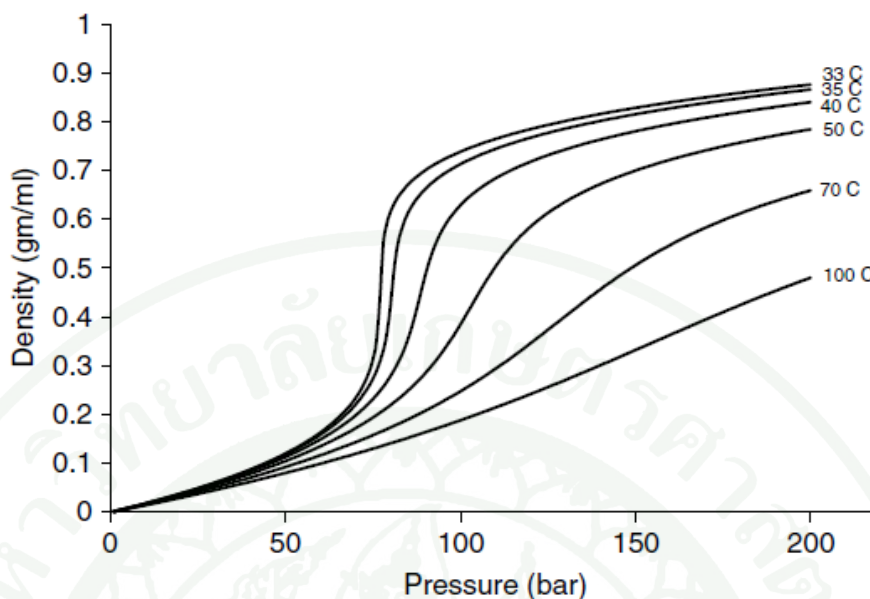
สาร	อุณหภูมิวิกฤต (K)	ความดันวิกฤต (MPa)	ความหนาแน่นวิกฤต ( $\text{g/cm}^3$ )
มีเทน	190.6	4.60	0.162
เอทิลีน	282.4	5.03	0.218
คลอโรไตรฟลูออโรมีเทน	302.0	3.92	0.579
คาร์บอนไดออกไซด์	304.2	7.38	0.468

## ตารางที่ 3 (ต่อ)

สาร	อุณหภูมิวิกฤต (K)	ความดันวิกฤต (MPa)	ความหนาแน่นวิกฤต (g/cm <sup>3</sup> )
อีเทน	305.4	4.88	0.203
โพรพีลีน	365.0	4.62	0.233
โพรเพน	369.8	4.24	0.217
แอมโมเนีย	405.6	11.30	0.235
ไดเอทิล อีเทอร์	467.7	3.64	0.265
นอร์มัล-เพนเทน	469.6	3.37	0.237
อะซีโตน	508.1	4.70	0.278
เมทานอล	512.6	8.09	0.272
เบนซีน	562.1	4.89	0.302
โทลูอีน	591.7	4.11	0.292
ไพริดีน	620.0	5.63	0.312
น้ำ	647.3	22.00	0.322
ซีโนน	289.7	5.84	1.113

ที่มา: Rizvi *et al.* (1986)

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ (Physiochemical) คือ ความหนาแน่น ความหนืด และการแพร่กระจาย อยู่ระหว่างก๊าซและของเหลว ในบริเวณใกล้เคียงกับจุดวิกฤต (Critical region) การเปลี่ยนแปลงความดันเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างมาก ดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน

ที่มา: Gupta and Johnston (2006)

จากตารางที่ 3 ความหนาแน่น (Density) ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าใกล้เคียงของเหลว การนำมาใช้เป็นตัวทำละลายโมเลกุลของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ซึ่งกันและกัน พลังงานเอนทาลปี (Enthalpy) ลดลง การละลายเกิดได้ดี ในส่วนของความหนืด (Viscosity) ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความหนืดใกล้เคียงกับก๊าซ และการแพร่กระจายเกิดได้ดีกว่าของเหลว จึงมีความสามารถในการแทรกเข้าไปในโครงสร้างของตัวถูกละลาย (Solute matrix) เป็นอย่างดี นอกจากนี้แรงดึงดูดของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตต่ำจึงสามารถแทรกในโครงสร้างของตัวถูกละลายได้ดีเช่นเดียวกัน จากที่กล่าวมาจึงนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลายอย่างแพร่หลายมากขึ้นแทนที่จะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ คือ มีความสามารถในการละลาย (Solvating power) ดีกว่า เช่นมีการทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสกัดของคาร์บอนไดออกไซด์เหลว (Liquid  $\text{CO}_2$ ) กับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical  $\text{CO}_2$ ) ผลคือคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีประสิทธิภาพในการสกัดสารได้ดีกว่า 2-5 เท่า บางครั้งเราจึงสามารถเรียกของไหลที่สภาวะเหนือ

จุดวิกฤตได้ว่า Super solvent นอกจากนี้ยังพบว่าตัวทำละลายที่เป็นของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีอัตราการถ่ายเทมวล (Mass transfer) เร็วกว่าตัวทำละลายของเหลว

**ตารางที่ 4** ค่าความหนาแน่น การแพร่กระจายและความหนืดของของเหลวที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับก๊าซและของเหลว

สถานะ	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	การแพร่กระจาย (cm <sup>2</sup> /sec)	ความหนืด (g/cm•sec)
ก๊าซ P = 1 atm, T = 15-30°C	(0.6-2)×10 <sup>-3</sup>	0.1-0.4	(1-3)×10 <sup>-4</sup>
ของเหลว P = 1 atm, T = 15-30°C	0.6-1.6	(0.2-2)×10 <sup>-5</sup>	(0.2-3)×10 <sup>-2</sup>
ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต P = P <sub>c</sub> , T = T <sub>c</sub> P = 4P <sub>c</sub> , T = T <sub>c</sub>	0.2-0.5 0.4-0.9	0.7×10 <sup>-3</sup> 0.2×10 <sup>-3</sup>	(1-3)×10 <sup>-4</sup> (3-9)×10 <sup>-4</sup>

ที่มา: Rizvi *et al.* (1986)

การศึกษาประสิทธิภาพในการทำละลายของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเริ่มต้นขึ้นเมื่อปีค.ศ.1879 โดย Hannay และ Hogarth โดยศึกษาการละลายของเมทิลฮาไลด์ (Methyl halides) ในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของเอทานอล และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ แต่ยังไม่ได้รับความสนใจมากนัก การศึกษาถึงประโยชน์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตอย่างจริงจังเกิดขึ้นเมื่อนานมานี้ โดยหลักฐานที่แสดงถึงการศึกษเกี่ยวกับของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและถูกตีพิมพ์ลงใน Journal Analytical Chemistry ก่อนปี 1986 มีเพียง 2 เรื่องเท่านั้น แต่หลังจากนั้น ตั้งแต่ปี 1986 จนถึงปี 1989 มีการตีพิมพ์ลงในวารสารมากถึง 26 เรื่อง สาเหตุสำคัญที่ทำให้ของไหลที่

สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้รับความสนใจ คือ การเป็นตัวทำละลายที่ดี หาง่าย ไม่เป็นพิษ สามารถใช้ทดแทนตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดต่างๆได้

การใช้ประโยชน์จากของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเริ่มต้นอย่างจริงจังเป็นครั้งแรกในทศวรรษ 1930 ซึ่งในระยะแรกของขอบเขตของงานจะมุ่งเน้นที่การนำมาใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical fluid extraction, SFE) โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมอาหาร และถูกนำมาใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ในงานวิเคราะห์ (Supercritical fluid chromatography, SFC) ครั้งแรกในปี 1962 ซึ่งคุณสมบัติและประโยชน์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

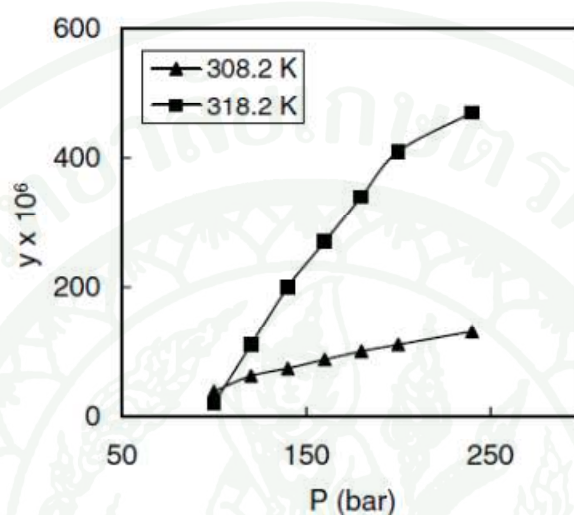
### คุณสมบัติของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

#### 1. ความสามารถในการทำละลาย (Solvating power)

ความสามารถในการละลายเป็นหนึ่งในคุณสมบัติเด่นของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ดีกว่าตัวทำละลายซึ่งเป็นของเหลว เนื่องจากสามารถปรับให้มีความเข้มข้นได้ง่ายกว่า โดยตัวแปรที่มีความสำคัญในการปรับสภาวะของตัวทำละลาย คือ อุณหภูมิและความดัน โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้เกิดการละลายได้เพิ่มขึ้น แต่ในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตการเพิ่มอุณหภูมิจะให้ผลที่มีความขัดแย้งกัน 2 ประการ คือ การเพิ่มอุณหภูมิจะมีผลในการเพิ่มความดันไอของตัวถูกละลาย และเมื่อเพิ่มความดันไอให้กับตัวถูกละลาย จะทำให้การละลายของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการลดความหนาแน่นของตัวทำละลาย และเมื่อความหนาแน่นของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตลดลง ทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายและของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตอยู่ห่างกัน ตัวถูกละลายจึงละลายได้น้อยลง

จากสาเหตุดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น มีผลทำให้ความสามารถในการทำละลายของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตไม่สามารถเห็นผลได้อย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลาย ในกรณีที่การเพิ่มอุณหภูมิแล้วทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความดันกับของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตก่อน เพื่อให้มีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับความหนาแน่นที่สภาวะเดิม จากนั้นจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลาย จะเห็นได้ว่า ตัวแปร

ที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการทำละลาย คือ อุณหภูมิและความดัน ดังนั้นจึงควรเลือก อุณหภูมิและความดันให้เหมาะสมกับการสกัด เนื่องจากปัจจัยทั้งสองมีผลต่อประสิทธิภาพในการ สกัดสาร ดังแสดงให้เห็นได้ในภาพที่ 3



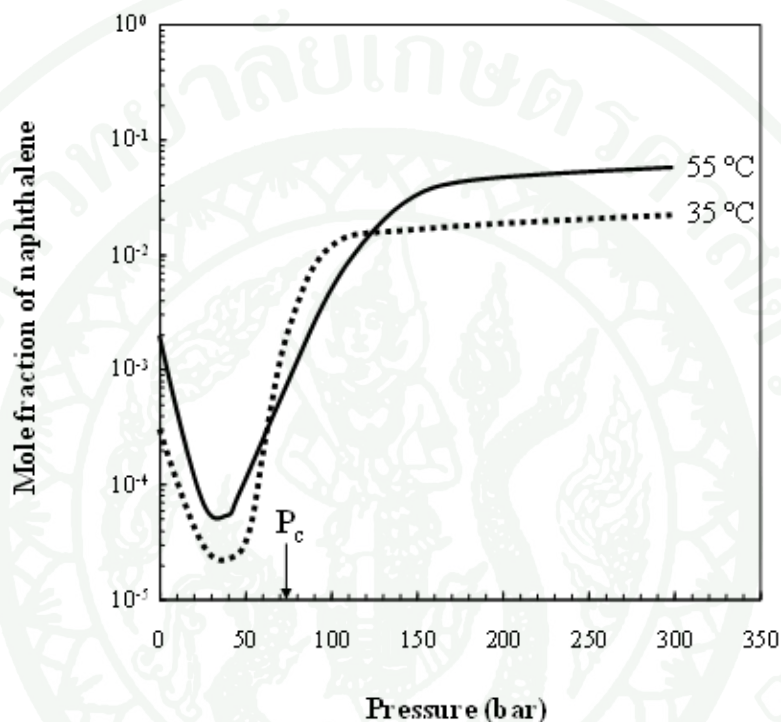
ภาพที่ 3 อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของ Octacosane

ที่มา: Gupta and Johnston (2006)

ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเพิ่มความดัน ความสามารถในการละลายของ Octacosane จะเพิ่มขึ้น และที่ความดันเท่ากัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายของ Octacosane จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิและความดันจึงมีผลให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

ภาพที่ 4 แสดงการละลายของแนฟทาลินในคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าที่ความดันสูงกว่า 120 บาร์ และความดันต่ำกว่า 60 บาร์ ความสามารถในการละลายของแนฟทาลินในคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากความดันไอของแนฟทาลินมีอิทธิพลมากกว่าความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ และในช่วงความดัน 60 ถึง 120 บาร์ ความสามารถในการละลายลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นของ

คาร์บอนไดออกไซด์มีอิทธิพลมากกว่าความดันไอของเนฟทาไลน์ และจุดที่ปรากฏการณ์ทั้งสองมีผลกระทบเท่ากัน คือ ที่ความดันเท่ากับ 60 บาร์ และ 120 บาร์ เรียกจุดนี้ว่า “cross over point” จากภาพที่ 4 จะเห็นว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ ความสามารถในการทำละลายเพิ่มขึ้น ลดลง หรือคงที่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความดันของระบบ



ภาพที่ 4 การละลายของเนฟทาไลน์ในคาร์บอนไดออกไซด์

ที่มา: Hoyer (1985)

ตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิและความดันมีผลต่อความสามารถในการทำละลายของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

Bjorklund *et al.* (1996) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความดัน อัตราการไหลของก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อการทำความสะอาดน้ำมันออกจากผิวของเหล็ก โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต การทำความสะอาดน้ำมันตัวอย่าง ซึ่งเป็นน้ำมันทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม และเป็นน้ำมันที่ต้องการกำจัดออกจากเครื่องจักร เนื่องจากมีผลทำให้

ประสิทธิภาพของเครื่องจักรลดลง ในการทดลองได้ใช้ตัวอย่างของเหล็ก แบ่งรูปร่างออกเป็น 4 ชนิด ซึ่งจะเป็นเหล็กที่เจาะรูให้มีขนาดแตกต่างกัน จากนั้นหยดน้ำมันตัวอย่าง 450-500 มิลลิกรัม ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ความดัน 90 บาร์ อุณหภูมิ 40-45 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 2 และ 4 มิลลิลิตรต่ออนาที ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.9 กรัมต่อมิลลิลิตร จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้ความดันที่ 100 บาร์และทำการลดความดันลงมาที่ 57 บาร์ พบว่าการทำความสะอาดที่ความดันสูงจะมีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดน้ำมันออกจากผิวของเหล็กสูงกว่าการทำความสะอาดโดยใช้ความดันต่ำ และจากการศึกษาอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าเมื่อใช้น้ำมันชนิด NYP อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 4 มิลลิลิตรต่ออนาทีจะให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดน้ำมันออกจากผิวเหล็กถึง 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาในการสกัดน้ำมันน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 2 และ 0.5 มิลลิลิตรต่ออนาที

Ferreira *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทมวลและความสามารถในการละลายของน้ำมันพริกไทยดำ (Black pepper oil) โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ในการทดลองจะนำน้ำมันพริกไทยดำมาบรรจุใส่ลงในคอลัมน์ที่ใช้ในการสกัดสาร (Extraction column) จากนั้นบรรจุเส้นใยแก้ว (Glass wool) เพื่อปิดส่วนบนและส่วนล่างของคอลัมน์ที่ใช้ในการสกัด การทดลองใช้อุณหภูมิ 30-50 องศาเซลเซียส ความดันที่ 150-300 บาร์ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 656-975 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 2 แบบ คือ 0.0725 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออนาทีในแบบแรก และ 0.6876 กรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่ออนาทีในแบบที่สอง จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ ความดัน และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ ความสามารถในการละลายของน้ำมันพริกไทยดำในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนอนุภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันมีมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และความสามารถในการละลายของน้ำมันพริกไทยดำจะอยู่ในช่วงระหว่าง 0.09-0.15 กรัมของน้ำมันต่อกรัมคาร์บอนไดออกไซด์

Hassan *et al.* (2000) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันปาล์มจากเมล็ดปาล์ม โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ในการทดลองได้ใช้น้ำมันปาล์มประมาณ 18.5 กรัม ใส่ในเซลล์ที่ใช้ในการสกัด (Extraction cell) จากนั้นใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในการสกัดที่อุณหภูมิ 40-80 องศาเซลเซียส ความดันที่ 26.7-48.3 เมกกะปาสคาล จากผลการทดลองพบว่า ความสามารถในการละลายของน้ำมันปาล์มเพิ่มขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุมาจากการที่ความดันเพิ่มมากขึ้น จะมีผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น จึงมีผลให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันได้มากขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันปาล์มเพิ่มมากขึ้น

Sovova *et al.* (2001) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันสองชนิด คือ น้ำมันแบล็คเคอร์แรนท์ (blackcurrant) และน้ำมันจากเมล็ดองุ่น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 12-28 เมกกะปาสคาล และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.1 กรัมต่อนาที จากการทดลองพบว่าความดันมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลาย กล่าวคือ เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายของน้ำมันจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากเมื่อความดันเพิ่มขึ้น มีผลให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันได้มากขึ้น ทำให้การละลายของน้ำมันเกิดได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการละลายพบว่าในการทดลองนี้ อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายน้อยมาก โดยพบว่าจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความสามารถในการละลายของน้ำมันทั้งสองชนิดมีความใกล้เคียงกัน

Francisco and Sivik (2002) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันยูคาลิปตัสในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยได้ศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิและความดันที่มีผลต่อความสามารถในการละลาย งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 80 ถึง 250 บาร์ พบว่า ความสามารถในการละลายของน้ำมันยูคาลิปตัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการละลายของน้ำมันยูคาลิปตัสจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ นอกจากนี้ พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายของน้ำมันยูคาลิปตัสจะแปรผันตรงกับความดัน และเมื่อพิจารณาปริมาณ limonene (ซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งในน้ำมันยูคาลิปตัส) ที่ได้จากการสกัดที่ความดัน 150 บาร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศา

เซลเซียส จะมีความสามารถในการละลายของน้ำมันยูคาลิปตัสมากกว่าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

Özkal *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมัน apricot kernel ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยปัจจัยที่งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคือ ขนาดอนุภาคของน้ำมัน อัตราการไหลของตัวทำละลาย ความดัน อุณหภูมิ และตัวทำละลายร่วม โดยทำการทดลองที่ขนาดอนุภาคต่างๆ 4 ขนาด ที่อุณหภูมิ 40 ถึง 70 องศาเซลเซียส ความดัน 300 ถึง 600 บาร์ อัตราการไหลของตัวทำละลายที่ 1 ถึง 5 กรัมต่ออนาที จากนั้นนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับกรอกแบบจำลองโดยใช้ model of broken and intact cells โดยเมื่อพิจารณาปัจจัยของอุณหภูมิและความดัน พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความดัน ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำมัน apricot kernel ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น

Machmudah *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันดอกกุหลาบโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้อุณหภูมิที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส ความดันอยู่ระหว่าง 300 ถึง 450 บาร์ และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 3 มิลลิลิตรต่ออนาที จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความสามารถในการละลายของน้ำมันดอกกุหลาบมีค่าเท่ากับ 1.067 กรัมต่อลิตร ในขณะที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 2.750 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันดอกกุหลาบในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น

Correa *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันปลาในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต การทดลองนี้ใช้น้ำมันปลาจำนวน 10 กรัม โดยได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิและความดันต่างๆและใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.22 มิลลิลิตรต่ออนาที จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิมืดที่ 313.15 เคลวิน เมื่อเพิ่มความดันของระบบ ความสามารถในการละลายของน้ำมันปลาในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้พบว่า ความดันคงที่ที่ 29.4 เมกกะปาสคาล การเพิ่มอุณหภูมิของระบบ ทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันปลาในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่ม

มากขึ้น ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันปลา และความสามารถในการละลายของน้ำมันปลาในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น

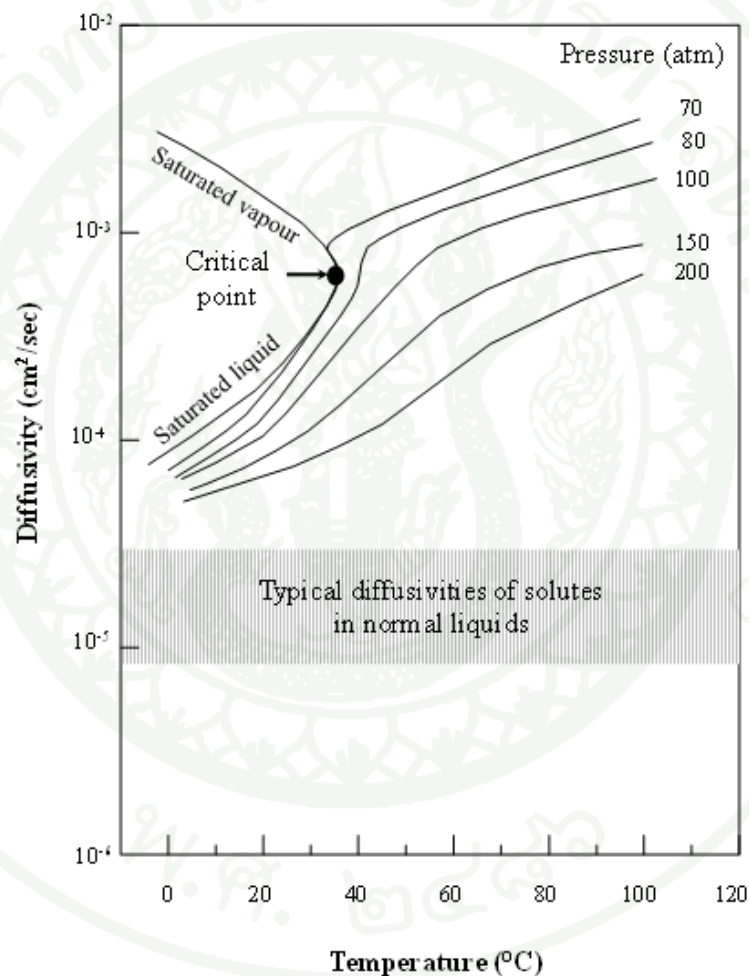
Donelian *et al.* (2009) ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันจากพืชมะเขือเทศโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเทียบกับวิธีการกลั่นโดยไอน้ำ ในการทดลองทำการสกัดพืชมะเขือเทศโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตภายใต้สภาวะ ที่ความดัน 8.5 และ 14 เมกกะปาสคาล อุณหภูมิ 40 และ 50 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังทำการกลั่นโดยไอน้ำเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ผลการทดลองพบว่า ที่ความดัน 14 เมกกะปาสคาล และอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ให้ผลได้ (yield) ที่ดีที่สุด และให้ผลการสกัดที่ดีกว่าวิธีการกลั่นโดยไอน้ำ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันที่ได้ พบว่า ความดันเท่านั้นที่มีผลต่อองค์ประกอบของน้ำมัน โดยเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของพืชมะเขือเทศจะเพิ่มขึ้นทำให้ได้องค์ประกอบหลักของน้ำมันเพิ่มขึ้นด้วย

## 2. คุณสมบัติการถ่ายเท (Transportation Property)

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีคุณสมบัติในการถ่ายเทมากกว่าของเหลวโดยทั่วไป เนื่องมาจากการที่ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความหนืดต่ำ และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูง ทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้สามารถแทรกซึม (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างของตัวถูกละลายได้ค่อนข้างดี และทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกระจายออกจากบริเวณที่สกัด (Extraction zone) ไปยังบริเวณอื่นได้ง่าย ทำให้อัตราการถ่ายเทมวล (Mass transfer rate) ดี จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสกัดตัวถูกละลายเพิ่มมากยิ่งขึ้น แสดงให้เห็นว่าของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี

ค่าความหนืดและสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการ อาทิเช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เป็นต้น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสภาวะให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถสกัดสารตามที่ต้องการให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ที่แสดงในภาพที่ 5 จะเห็นว่าความสามารถในการแพร่ของตัวถูกละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปจะอยู่ในช่วง  $10^{-4}$ - $10^{-5}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$  แต่ความสามารถในการแพร่ของตัวถูกละลายในคาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในช่วง  $10^{-2}$ - $10^{-4}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$  ซึ่งจากกราฟสามารถสรุปได้ว่า ความสามารถในการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์มีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่มากกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวถูกละลายในของเหลวที่เป็นสารอินทรีย์



ภาพที่ 5 พฤติกรรมการแพร่ของคาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับ การแพร่ของตัวถูกละลายในของเหลว

ที่มา: McHugh and Krukonic (1994)

อัตราการถ่ายเทมวล (Mass transfer rate) นอกจากเป็นผลโดยตรงจากค่าความหนืด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตแล้ว ยังขึ้นกับระยะทางในการแพร่ (Diffusion distance) และอุปสรรคในการแพร่ (Diffusion barriers) ซึ่งเป็นปัจจัยจากโครงสร้างของตัวถูกละลาย โดยพบว่า ยิ่งอนุภาคของตัวถูกละลายมีขนาดเล็กลงจะทำให้ปริมาณสารที่สกัดได้มีมากขึ้น แสดงได้จากผลของอนุภาคของตัวถูกละลายต่อผลผลิต (Yield) ของน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดถั่วเหลือง พบว่าเมื่อขนาดของอนุภาคลดลงจะได้ผลผลิตที่มากขึ้น การลดขนาดของอนุภาคของตัวถูกละลายจะไปลดระยะทางในการแพร่เข้าไปในโครงสร้างของผนังเซลล์ (Cell wall) ซึ่งพบว่าเป็นสิ่งกีดกั้นหรืออุปสรรคในการแพร่นั้นเอง (Marentis, 1988)

ประโยชน์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นที่รู้จักกันมานานแล้ว แต่การนำมาใช้ประโยชน์ก็ยังไม่แพร่หลายมากนัก โดยประโยชน์ของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถสรุปได้ ดังต่อไปนี้

1. ใช้เป็นตัวทำละลายในงานสกัด (Supercritical Fluid Extraction, SFE) ทั้งในงานสกัดเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จำนวนมากๆ และที่ได้รับการพัฒนาไปอย่างกว้างขวางมากคือ งานสกัดสารออกฤทธิ์สำคัญในพืชสมุนไพรที่มีปริมาณน้อยแต่มีราคาแพง
2. ใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ในงานที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี (Supercritical fluids chromatography)
3. ผลิตภัณฑ์ของสารบางชนิดที่ได้จากการสกัดด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะอยู่ในรูปของผลึกที่มีขนาดเล็ก (Microfine crystal) มีขนาด 10-50  $\mu\text{m}$  เมื่อนำมาศึกษาโดยใช้ X-ray diffraction แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างผลึกของผลิตภัณฑ์ที่ตรวจวัดได้จะมีลักษณะเหมือนสารนั้นในสภาพเริ่มต้น จึงมีการเสนอว่า วิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการลดขนาดของอนุภาคแทนการบด (Milling) ได้ เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้อุณหภูมิสูงกับสารที่ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อน

4. มีรายงานว่าวิธีการสกัดสารด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถใช้ฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงมีการเสนอให้ใช้วิธีนี้ในการ Sterilization สารที่ไม่ทนทานต่อความร้อน หรือใช้เป็น preliminary ในการสกัดผลิตภัณฑ์จากเชื้อจุลินทรีย์ที่เพาะเลี้ยงได้

นอกจากนี้ยังนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยหลายอย่าง (Mamata, 2000) ดังแสดงต่อไปนี้

1. การสกัดคาเฟอีนออกจากกาแฟและใบชา
2. การสกัดเครื่องเทศ (น้ำมันและโพลิโอเรซิน)
3. การสกัดน้ำมันพืชออกจากเมล็ดพืชและถั่ว
4. การสกัดน้ำหอม กลิ่นหอมจากผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติ
5. การสกัดสมุนไพรเพื่อใช้ทำยาโรค
6. การทำให้น้ำผลไม้มีความเสถียร
7. การสกัดคอเลสเตอรอลออกจากไข่แดงและเนื้อเยื่อสัตว์
8. การสกัดสารแอนติออกซิแดนท์จากพืช
9. การสกัดสีผสมอาหารจากพืชชนิดต่างๆ
10. กำจัดสารฆ่าแมลงที่เกิดจากธรรมชาติโดยการสกัด
11. การสกัดสารนิโคตินออกจากยาสูบ

ข้อดีของการสกัดสารด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

1. ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความสามารถในการทำละลาย เช่นเดียวกับกับตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไป แต่มีความหนืดต่ำกว่า และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงกว่า ทำให้มีความสามารถในการแพร่สูงกว่าของเหลวโดยทั่วไป ในสภาวะเดียวกันจึงสามารถสกัดสารได้มีประสิทธิภาพดีกว่า

2. ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถทำการสกัดสารได้ ถึงแม้จะอยู่ในสภาวะที่มีความดันและอุณหภูมิไม่สูงมากนัก เนื่องจากสารบางชนิดอาจเกิดการเสื่อมสภาพหรือสลายตัวได้ที่อุณหภูมิและความดันสูงจนเกินไป

3. สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดได้ โดยการเติมตัวทำละลายร่วมเพื่อช่วยในการสกัด

4. สามารถเลือกสกัดสารตามความต้องการได้ ส่วนใหญ่เรามักเลือกสกัดสารที่ต้องการใช้งาน แต่ในบางกรณีเราอาจต้องการสกัดสารที่เราไม่ต้องการออกจากสารซึ่งมีความซับซ้อนมาก หรือต้องการกำจัดสารออกจากผลิตภัณฑ์สุดท้าย

5. เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับก๊าซ จึงทำให้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดตัวถูกละลาย และสามารถสกัดสารได้ปริมาณมากในระยะเวลาสั้นๆ

ข้อเสียของการสกัดด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

การสกัดโดยใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีข้อเสียอยู่บางประการ เช่น ต้นทุนในการหาซื้อเครื่องมือมีราคาค่อนข้างแพง และวิธีการมีความยุ่งยากกว่าการสกัดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์

นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในการสกัดสารที่มีขั้ว เนื่องจากของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตส่วนใหญ่เป็นสารที่ไม่มีขั้ว และมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ในช่วงระหว่าง 0-100 °C ทำให้การสกัดสารที่มีขั้วมีข้อจำกัด ดังเห็นได้จากตัวอย่างเช่น การนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้เป็นตัวทำละลายของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารที่มีคุณสมบัติไม่มีขั้ว ทำให้การสกัดสารที่มีขั้วได้ประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ ค่าการละลาย (Solubility) ของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีการเติมตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ลงไปเพื่อช่วยเพิ่มช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดสารก็ตาม

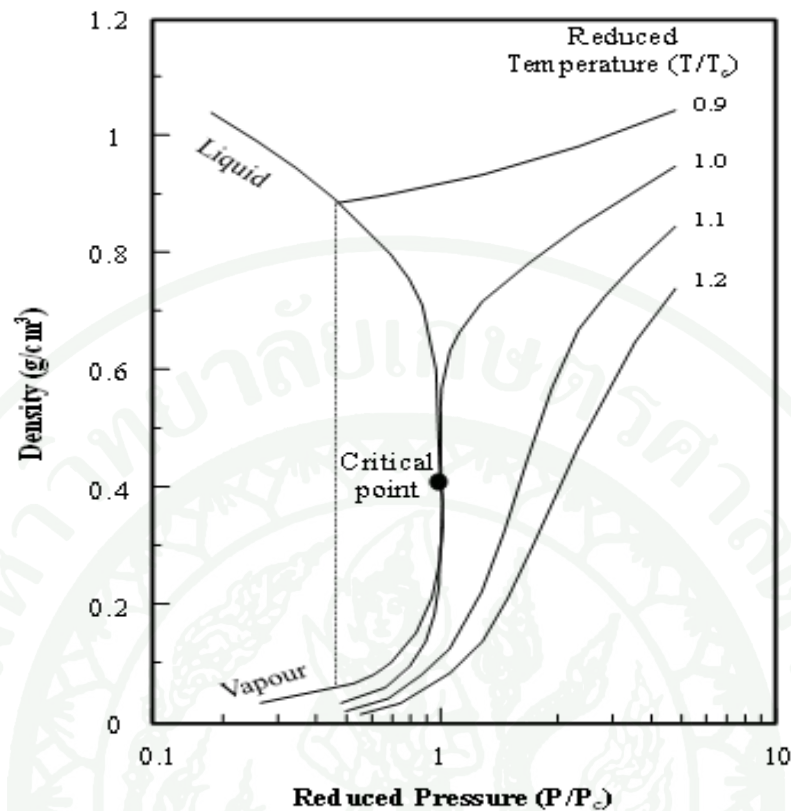
การใช้ตัวทำละลายร่วมมีข้อเสีย คือ เป็นการลดความจำเพาะเจาะจงของสารที่ต้องการสกัด ทำให้ได้สารหลายชนิดมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเลือกตัวทำละลายร่วมให้มีความเหมาะสมกับสารที่ต้องการสกัดได้ เช่น ไม่สามารถใช้น้ำร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์เพราะคาร์บอนไดออกไซด์ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้การใช้เมทานอลยังมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นพิษต่อมนุษย์ กล่าวคือ ถ้าความเข้มข้นของตัวทำละลายร่วมไม่เหมาะสม ก็อาจส่งผลกระทบต่อปริมาณสารที่ต้องการสกัดได้เช่นเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดการตกค้างของตัวทำละลายร่วมในสารที่

สกัดได้ ถ้าเลือกใช้ตัวทำละลายร่วมที่มีความดันหรืออุณหภูมิวิกฤตสูงก็จะส่งผลให้ต้องใช้ความดันหรืออุณหภูมิของระบบที่สูงขึ้นตาม ซึ่งอาจส่งผลเสียได้ในกรณีที่สารที่ต้องการสกัดไม่ทนต่อสภาวะที่ใช้ในการสกัดสารเหล่านี้ นอกจากนี้การใช้ตัวทำละลายร่วมอาจส่งผลให้ต้นทุนการผลิตมีราคาที่สูงขึ้นได้ ตัวอย่างของตัวทำละลายร่วมที่นิยมใช้ร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เช่น เอทานอล เป็นต้น

### คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

คาร์บอนไดออกไซด์สามารถมีสถานะได้ทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 31.1 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤตเท่ากับ 73.6 บาร์ และที่จุดวิกฤต (Critical point, C.P.) คาร์บอนไดออกไซด์จะมีความหนาแน่นของของเหลวและก๊าซเท่ากัน ณ จุดนี้จึงไม่สามารถแยกสถานะของสารทั้งสองจากกันได้

ในบริเวณรอบจุดวิกฤต เมื่อเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการละลายและความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีความสามารถในการอัดตัวสูง (High compressibility) (มานพ, 2553) ซึ่งความสัมพันธ์ของความหนาแน่นลด (Reduced density,  $\rho_r$ ) กับอุณหภูมิลด (Reduced temperature,  $T_r$ ) และความดันลด (Reduced pressure,  $P_r$ )



ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณใกล้จุดวิกฤต

ที่มา: Foster *et al.* (1993)

จากภาพที่ 6 จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของความดันเพียงเล็กน้อยที่บริเวณรอบๆจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิคงที่ จะส่งผลให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก โดยเปลี่ยนจากความหนาแน่นลดที่มีค่าใกล้เคียงก๊าซ ( $p_r = 0.1$ ) ไปเป็นความหนาแน่นลดที่มีค่าใกล้เคียงกับของเหลว ( $p_r = 2.5$ ) และสังเกตได้ว่าที่ความดันลดมีค่ามากกว่า 1 อุณหภูมิลดในช่วง 0.9 ถึง 1.2 ความสามารถในการทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์แปรผันตรงกับความหนาแน่น ดังนั้นการปรับอุณหภูมิและความดันจึงเป็นตัวแปรในการปรับความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้

คุณสมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ปัจจุบันนี้มีการนำของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้นในงานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสกัดสารต่างๆ ซึ่งตัวทำละลายที่นิยมใช้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ซึ่งงานวิจัยนี้นำคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้ในการทำความสะอาดน้ำมันหล่อลื่นออกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นโดยอาศัยค่าความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ตัวอย่างงานวิจัยที่แสดงการทำความสะอาดสารปนเปื้อนซึ่งเป็นน้ำมันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลาย

Hong *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการทำความสะอาดเหล็กชนิด High Speed Steel (HSS) ก่อนที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิล โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในการทำความสะอาดคราบน้ำมัน และเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำความสะอาดเศษเหล็กที่มีคราบน้ำมัน จากผลการทดลองพบว่า การทำความสะอาดโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 340 atm และเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดคราบน้ำมัน 30 นาที มีน้ำมันเหลืออยู่เพียง 5.4 เปอร์เซ็นต์โดยมวล คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในการทำความสะอาดคราบน้ำมันเท่ากับ 74.5 เปอร์เซ็นต์

Dale and Laintz (1998) ได้ทำการศึกษาการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เพื่อทำความสะอาดสารปนเปื้อน ได้แก่ น้ำมันเครื่องจักร น้ำมันหล่อเย็น และรอยนิ้วมือ ออกจากผิวของวัสดุชนิดต่างๆ เช่น โลหะ แก้ว อีพอกซี และพลาสติก ในการทดลองจะตัดวัสดุให้เป็นชิ้นมีขนาด  $0.5 \times 2$  นิ้ว โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ความดัน 300 atm อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 15 นาที จากการทดลอง พบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถทำความสะอาดสารปนเปื้อนออกจากผิวโลหะ แก้ว อีพอกซี และพลาสติกได้อยู่ในช่วง 85-99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผิวของวัสดุที่สามารถทำความสะอาดสารปนเปื้อนได้สูงสุด คือ อีพอกซี สามารถกำจัดสารปนเปื้อนได้ถึง 99 เปอร์เซ็นต์

Marsal *et al.* (1999) ได้ทำการศึกษาการทำความสะอาดหนังสัตว์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลาย เพื่อกำจัดไขมันออกจากหนังสัตว์ในอุตสาหกรรมเครื่องหนัง โดยที่ในการทดลองได้ใช้หนังแกะมาตัดให้เป็นชิ้น ขนาด 5×5 มิลลิเมตร ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความดันอยู่ที่ระหว่าง 104-240 บาร์ และใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่างกันคือ 0.55 0.70 และ 0.85 กรัมต่อมิลลิกรัม จากผลการทดลองพบว่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตสามารถทำความสะอาดหรือกำจัดไขมันบนหนังสัตว์ได้สูงที่สุดคือ 25 มิลลิกรัม คิดเป็นประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเท่ากับ 54 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดไขมันจากหนังสัตว์โดยเลือกใช้ความหนาแน่นที่ 0.85 กรัมต่อมิลลิกรัม เนื่องจากพบว่าให้เปอร์เซ็นต์ในการกำจัดสูงที่สุด และใช้อุณหภูมิ ความดันและอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากันกับการทดลองข้างต้น ผลการทดลองพบว่า เวลาที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดไขมันจากหนังสัตว์ได้สูงที่สุด (94 เปอร์เซ็นต์) คือ เวลา 30 นาที

Fu and Matthews (1999) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกับการใช้สารลดแรงตึงผิวในการทำความสะอาดน้ำมันเครื่อง (oil machining) โดยประสิทธิภาพของกระบวนการทั้งสอง สามารถประเมินได้จากน้ำมันที่เหลือจากกระบวนการทำความสะอาด นอกจากนี้ในงานวิจัย ยังนำผลที่ได้จากการทำการทดลองมาสร้างแบบจำลองกระบวนการทำความสะอาดน้ำมันเครื่องทั้งสองกระบวนการ โดยการทำมาสะอาดด้วยสารลดแรงตึงผิวได้ใช้แบบจำลองของการถ่ายเทมวลสาร ผลของแบบจำลองพบว่า อนุภาคของน้ำมันเครื่องที่มีขนาดเล็กจะทำให้น้ำมันที่เหลือภายหลังการทำมาสะอาดมีอยู่น้อยกว่าน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากการแพร่ของอนุภาคของน้ำมันที่อยู่ในสภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้แบบจำลอง linear desorption ซึ่งผลของการสร้างแบบจำลองจะให้ผลสอดคล้องกับการทดลองจริง และพบว่าอัตราการไหลของตัวทำละลายจะไม่มีผลต่อการทำความสะอาดน้ำมันเครื่อง แต่ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดคือ ความเข้มข้นของน้ำมันต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของตัวทำมาสะอาด

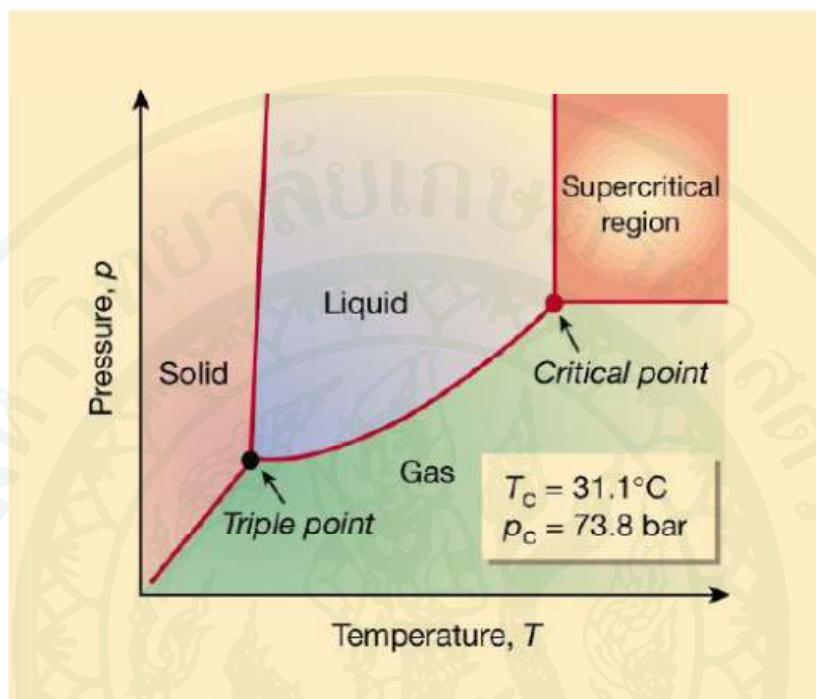
สุภิญญา และอรนุช (2551) ได้นำคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มาใช้ในการทำความสะอาดขดพลาสติกที่บรรจุน้ำมันหล่อลื่น โดยศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน อัตรา

การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ และตัวทำละลายร่วมที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาด ในการทดลอง ได้ทำการตัดพลาสติกของขวดที่บรรจุน้ำมันหล่อลื่น ให้มีขนาด 0.5×0.5 เซนติเมตร ปริมาณ 120 กรัม และนำน้ำมันเติมลงบนพลาสติกประมาณ 1.2 กรัม ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ความดัน 120 150 และ 180 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 1 และ 2 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวทำละลายร่วมคือ อะซิโตนและเฮกเซน โดยประสิทธิภาพในการทำความสะอาด วิเคราะห์ได้จากปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เทียบกับปริมาณน้ำมันเริ่มต้นที่ติดอยู่กับพลาสติก จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดสูงสุดเท่ากับ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดันเท่ากับ 180 บาร์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 1 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้เฮกเซน 10 มิลลิลิตรเป็นตัวทำละลายร่วม เนื่องจากมาจากเฮกเซนที่เป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่นเดียวกันกับโมเลกุลของน้ำมัน และคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้การสกัดน้ำมันออกจากพลาสติกเกิดขึ้นได้ดี

จันทวรรณและจีระภา (2552) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ (0.5-1 มิลลิลิตรต่อนาที) อุณหภูมิ (35 และ 45 องศาเซลเซียส) ความดัน (120 150 และ 180 บาร์) และการเติมตัวทำละลายร่วม (อะซิโตน) ที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น  $P_1$  จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม คือ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที และการเพิ่มความดันส่งผลให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้นจาก 120 เป็น 150 และ 180 บาร์ตามลำดับ นอกจากนี้ การเพิ่มอุณหภูมิจาก 35 เป็น 45 องศาเซลเซียส จะทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นลดลง และเมื่อเติมตัวทำละลายร่วม(อะซิโตน) พบว่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่เติมตัวทำละลายร่วม

ข้อดีของการนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย คือ เป็นสารที่มีความเฉื่อย มีมวลโมเลกุลต่ำ มีราคาค่อนข้างถูก หาได้ง่าย ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสชาติ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นตัวทำละลาย GRAS (Generally Regarded As Safe) ไม่ตกค้างใน

ผลิตภัณฑ์หลังการสกัด เนื่องจากอยู่ในสถานะก๊าซ เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารที่ไม่มีขั้ว มีจุดวิกฤตต่ำ (อุณหภูมิวิกฤต = 31.1 องศาเซลเซียส และความดันวิกฤต = 73.8 บาร์)



ภาพที่ 7 แผนภาพเฟสของคาร์บอนไดออกไซด์

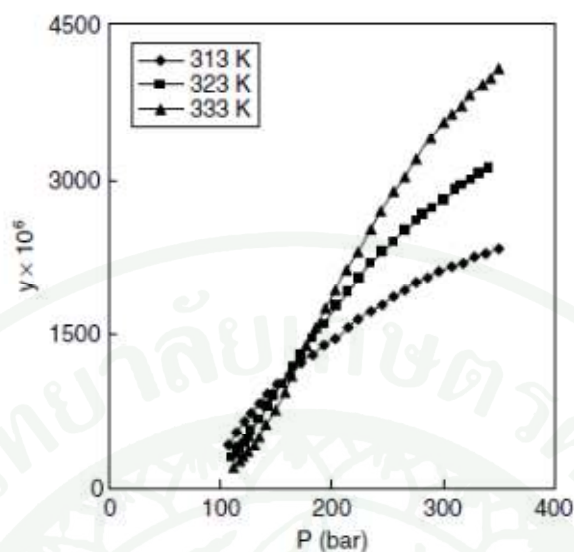
ที่มา: Nauthiz (2008)

ข้อเสียของการนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาใช้เป็นตัวทำละลาย คือ เป็นสารที่ไม่มีขั้วทำให้การสกัดสารที่มีขั้วได้ประสิทธิภาพที่ต่ำ เนื่องจากความสามารถในการละลาย (Solubility) ของตัวถูกละลายในตัวทำละลายต่ำ จึงมีการใช้วิธีการเติมตัวทำละลายร่วม (Co-solvent) ลงไป เพื่อช่วยเพิ่มความสามารถในการละลาย ซึ่งการเติมตัวทำละลายร่วมนี้จะใช้ปริมาณไม่สูงมาก ข้อดีของการเติมตัวทำละลายร่วม คือ ช่วยเพิ่มความเป็นขั้วให้กับของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเติมตัวทำละลายร่วมมีข้อเสีย คือ ลดความจำเพาะเจาะจงของสารที่ต้องการสกัด และในบางครั้งอาจตกค้างอยู่ในสารที่เราต้องการ การกำจัดให้หมดไปจากผลิตภัณฑ์ทำได้ค่อนข้างยาก

### ความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ความสามารถในการละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องทำการศึกษา เนื่องจากมีผลต่อกระบวนการทำงานของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Gupta and Johnston, 2006) ซึ่งตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือมีผลกระทบต่อโดยตรงกับอัตราเร็ว (Rate) ปริมาณของผลิตภัณฑ์ (Yield) รวมไปถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในกระบวนการอีกด้วย ความสามารถในการละลายที่ดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับกระบวนการนั้นๆว่าต้องการการละลายที่ดีหรือไม่ เช่น การละลายที่ดีนั้นมักต้องการในกระบวนการสกัดโดยใช้ของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต แต่ในทางกลับกันต้องการการละลายต่ำในของผสมระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์และตัวทำละลายอินทรีย์ซึ่งใช้ในกระบวนการตกตะกอนในสภาวะเหนือจุดวิกฤต (Supercritical antisolvent precipitation processes) เพื่อผลิตอนุภาคในขนาดต่างๆ (Chattopadhyay and Gupta 2001; 2002; Thote and Gupta 2005; Gupta and Kompella, 2006) ในกรณีนี้คุณสมบัติในการละลายมีผลกระทบต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ ต้นทุน และที่สำคัญที่สุดคือ ขนาดและโครงสร้างของผลิตภัณฑ์

ผลของความดันและอุณหภูมิที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของสารที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต แสดงให้เห็นในภาพที่ 8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของการละลาย (y) ของพีแนทรีนในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ



**ภาพที่ 8** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของการละลาย ( $y$ ) ของพีแนทรีนในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

**ที่มา:** Anitescu and Tavlarides (1997)

จากภาพที่ 8 จะเห็นว่า เมื่อความดันของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของพีแนทรีนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ในส่วนของอุณหภูมินั้นค่อนข้างมีความซับซ้อนมากกว่าความดัน กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ความดันไอของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิก็ทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ที่ความดันต่ำกว่า 180 บาร์ ความสามารถในการละลายของพีแนทรีนในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ สาเหตุเกิดจากผลของความหนาแน่นมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของสารมากกว่าผลของความดันไอ และที่ความดันสูงกว่า 180 บาร์ ความสามารถในการละลายของพีแนทรีนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ เนื่องจากอิทธิพลของความหนาแน่นที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายเริ่มลดลง จึงทำให้ผลของความดันไอของตัวถูกละลายเด่นชัดยิ่งขึ้น และส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสารมากขึ้นตามไปด้วย

## วิธีวัดค่าความสามารถในละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

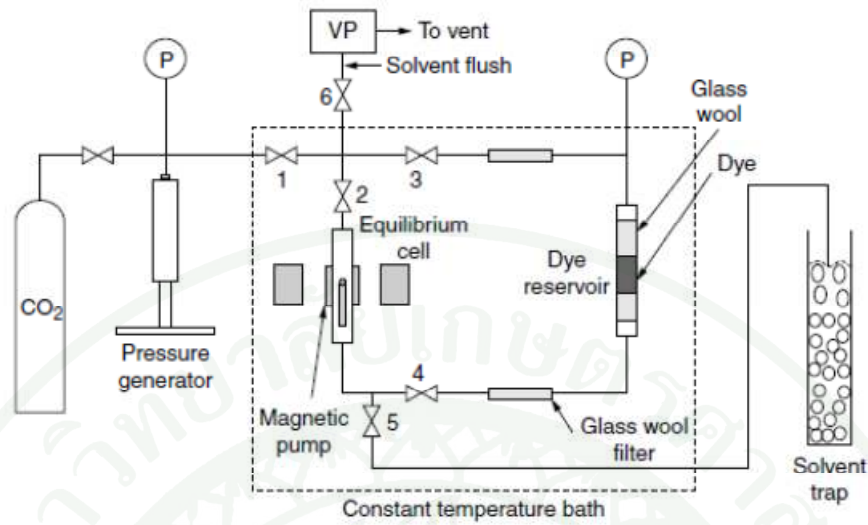
เรามักนิยามการละลายในรูปของเศษส่วนโมล (Mole fraction) หรือ เศษส่วนมวล (Mass fraction) ของตัวถูกละลายในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ในอดีตมีการวัดค่าการละลายที่จุดที่คาร์บอนไดออกไซด์เหลวอยู่ใกล้จุดวิกฤต (Near-critical liquid carbon dioxide) ที่ความดัน 61.3 บาร์ และที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน โดย Francis (1954) ซึ่งสามารถวัดค่าการละลายของสารประกอบอินทรีย์ ต่อมาเริ่มมีวิธีวัดค่าการละลายในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่หลากหลายมากขึ้นพบได้ในงานวิจัยหลายๆชิ้น (Brunner 1994; McHugh and Krukonic 1994; Dohrn and Brunner 1995; Bristow *et al.* 2001; Christov and Dohrn 2002; Galia *et al.* 2002; Aim and Fermeiglia 2003; Pauchon *et al.* 2004; Knox 2005) ซึ่งวิธีต่างๆได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ Static และ Dynamic

### Static Method

วิธีนี้เป็นวิธีที่ตัวถูกละลายมีการสัมผัสกับของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นเวลานานเพื่อที่จะทำให้ถึงจุด Equilibrium ซึ่งวิธีนี้แบ่งออกเป็นอีก 3 วิธี คือ Analytical, Synthetic และ Gravimetric

#### 1. Analytical Method

วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ Equilibrium vessel ที่มีปริมาตรคงที่ สารอยู่ในสภาวะสมดุลกับของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่รู้ปริมาณแน่นอน ตัวอย่างจำนวนเล็กน้อยของเฟสที่เป็นของไหลถูกนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของตัวถูกละลาย ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในขั้นพื้นฐานแสดงใน ภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เครื่องมือพื้นฐานที่ใช้ในการวัดค่าการละลายโดยวิธี Static / Analytical  
 VP คือปั๊มสุญญากาศ, P คือความดันเกจ (Sung and Shim., 1999)

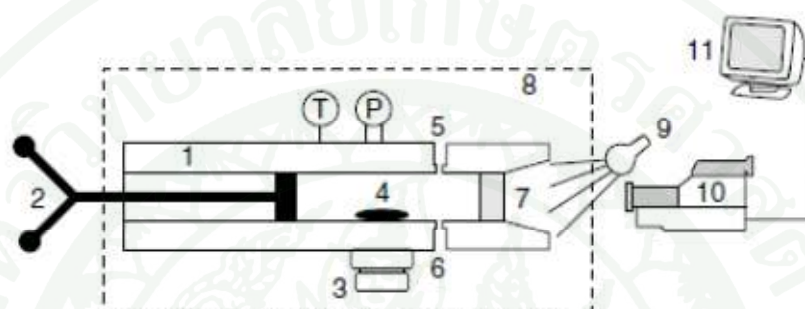
บริเวณที่ใส่ตัวอย่างถูกบรรจุด้วยตัวถูกละลาย ทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อกำจัดอากาศออกไป หลังจากนั้นปั๊มตัวทำละลายร่วม (ถ้าจำเป็น) และคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปในระบบของไหลจะสัมผัสกับตัวถูกละลายโดยปั๊มให้ไหลกลับไปมาเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการเกิดสมดุล เมื่อถึงสมดุลแล้วมีการนำตัวอย่างจำนวนเล็กน้อยออกจากระบบโดยมีลูบที่ต่อเข้ากับ Switching valve จากนั้นส่งตรงไปยัง high-pressure liquid chromatography ทำการวิเคราะห์แบบออนไลน์หรือสามารถเก็บเพื่อทำการวิเคราะห์โดยวิธีอื่นได้ ค่าการละลายของตัวถูกละลายในรูปของเศษส่วนโมลสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$y_2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \approx \frac{n_1}{V\rho_1 + n_2} \tag{1}$$

โดยที่  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นโมลของคาร์บอนไดออกไซด์และตัวถูกละลายที่เก็บมาจากลูปตัวอย่างตามลำดับ ในกรณีที่มีการทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดลง โมลของคาร์บอนไดออกไซด์จะเท่ากับปริมาตรของตัวอย่าง(V) คูณกับความหนาแน่นโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ( $\rho_1$ ) ดังที่แสดงให้เห็นในสมการ ในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายร่วม สมการที่ 2 จะถูกปรับโดยให้  $n_1$  เท่ากับผลรวมของโมลของตัวทำละลายร่วมและโมลของคาร์บอนไดออกไซด์

## 2. Synthetic Method

วิธีนี้ใช้ Variable-volume view cell เพื่อปรับเงื่อนไขในการทำงาน (ภาพที่ 10) โดยทั่วไปแล้วที่ใส่สารจะประกอบด้วยหน้าต่างแซฟไฟร์ (Sapphire window) เพื่อให้มองเห็นภายในได้



**ภาพที่ 10** Variable-volume view cell ที่ใช้ในการวัดค่าการละลายโดยวิธี Static / Synthetic มีส่วนประกอบคือ variable volume cell (1), screw pump (2), magnetic stirrer (3), magnetic bar (4), upper sampling line (5), lower sampling line (6), sapphire window (7), thermo stated bath (8), light source (9), video camera (10), and monitor (11) (Crampton C. *et al.*, 1999)

กำหนดปริมาณของตัวถูกละลายที่ละลายลงในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตซึ่งรู้ปริมาณที่แน่นอน จากนั้นทำการปรับเพื่อให้การละลายของสารผสมลดลงอย่างช้าๆ ทำให้เกิดการตกตะกอน จุดเริ่มต้นของการตกตะกอนคือ Cloud point ซึ่งจะถูกรับแล้ววัดออกมาเป็นค่าการละลาย วิธีนี้ไม่ต้องมีการเก็บตัวอย่างของสารเพื่อนำมาวิเคราะห์ ค่าการละลายสามารถคำนวณจากสมการที่ 2

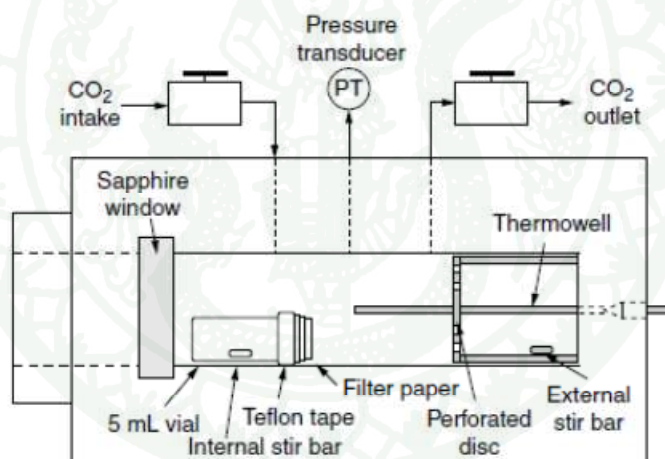
$$y_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (2)$$

โดยที่  $n_1$  และ  $n_2$  คือ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์และตัวถูกละลายที่อยู่ใน Variable-volume view cell ตามลำดับ วิธีนี้เหมาะสำหรับสารที่เป็นสารผสมที่มีองค์ประกอบหลากหลาย

(Multicomponent mixtures) การวัดใช้เวลาค่อนข้างน้อย ข้อดีอีกข้อหนึ่งของวิธีนี้คือ ใช้ตัวถูกละลายในปริมาณที่ไม่มากในการหาค่าประกอบ วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับตัวถูกละลายที่มีดัชนีหักเห (Refractive index) เท่ากับของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งความถูกต้องแม่นยำในการหา Cloud point จะเพิ่มขึ้นเมื่อความแตกต่างของดัชนีหักเหมากขึ้น

### 3. Gravimetric Method

วิธีนี้ตัวถูกละลายถูกเก็บในขวดเล็กๆ ใน Pressure vessel ที่บรรจุของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Sherman *et al.* 2000; Galia *et al.* 2002) ซึ่งฝาที่ใช้ปิดขวดโมเลกุลของตัวถูกละลายที่ถูกละลายสามารถแพร่ผ่านออกมาแต่อนุภาคของตัวถูกละลายไม่สามารถออกมาได้ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 Pressure vessel ที่ใช้กับวิธี Static / Gravimetric (Sherman *et al.*, 2000)

การทดลองโดยทั่วไป ตัวถูกละลายซึ่งรู้ปริมาณที่แน่นอนถูกใส่ลงในขวดใบเล็ก และ Vessel ถูกบรรจุด้วยของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต เมื่อของไหลเข้าไปในขวดใบเล็ก ทำการละลายตัวถูกละลายและนำออกมา เมื่อเวลาผ่านไปของไหลส่วนใหญ่ที่มีความเข้มข้นสมดุล (Equilibrium concentration) เท่ากับของไหลภายในขวดใบเล็ก Vessel จะถูกอัดความดันและปริมาณของตัวถูกละลายที่ยังอยู่ในขวดใบเล็กจะถูกวัดโดยวิธี Gravimetric ค่าการละลายของตัวถูกละลายสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

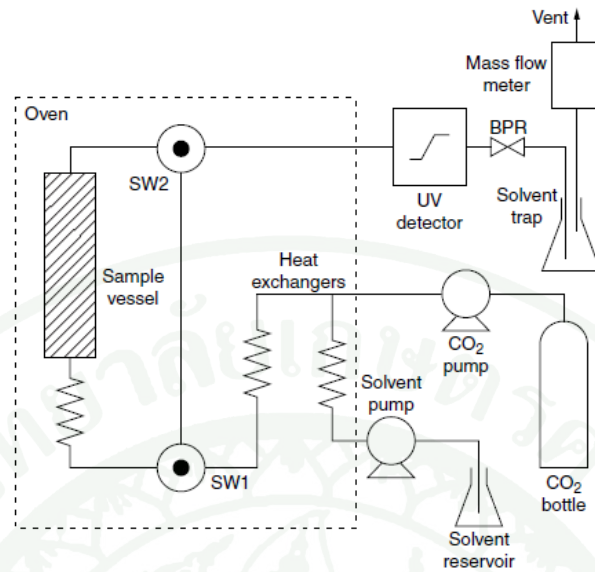
$$y_2 = \frac{\Delta n_2}{\Delta n_1 + \Delta n_2} \approx \frac{\Delta n_2}{\rho_1 \Delta V + \Delta n_2} \quad (3)$$

โดยที่  $\Delta n_1$  คือโมลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ลบโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในขวดใบเล็ก  $\Delta n_2$  คือ โมลของตัวถูกละลายเริ่มต้นลบด้วยโมลของตัวถูกละลายที่จุดสุดท้ายที่อยู่ในขวดใบเล็ก  $\Delta V$  คือ ปริมาตรของ Vessel ลบด้วยปริมาตรของขวดใบเล็ก และ  $\rho_1$  คือความหนาแน่นโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ ถึงแม้ว่าวิธีนี้จะเป็วิธีที่ไม่ยากนักแต่จะใช้กับสารที่เป็นของแข็งที่มีเศษส่วนโมลการละลายมากกว่า  $10^{-3}$  ไม่หลอมเหลวที่สภาวะที่ใช้ในการทดลอง และดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่น้อยมาก ข้อเสียอื่นคือต้องใช้เวลาค่อนข้างนานในการเข้าสู่สมดุล และวิธีนี้ก็ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีความแม่นยำและถูกต้องค่อนข้างต่ำ

การใช้ Static Method ในการวัดค่าการละลายความไม่แน่นอนของผลที่ได้มักเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดการรั่วเพราะมีข้อต่อจำนวนมาก ดังนั้นต้องมีการดูแลเป็นอย่างดีเพื่อให้มั่นใจว่าไม่เกิดการรั่วขึ้นกับเครื่องมือ นอกจากนี้อาจเกิดค่าความผิดพลาด (Errors) ได้ เนื่องมาจากการใช้ตัวอย่างหลายตัวอย่าง

#### Dynamic Method

วิธีนี้เป็นวิธีที่บรรจุตัวถูกละลายลงใน Vessel และปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างช้าๆ เพื่อให้สามารถคิดว่าเข้าสู่สมดุลให้ผ่านเข้ามาใน Vessel จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของตัวถูกละลายโดยโครมาโทกราฟี (Chromatographic) สเปกโตรสโคปี (Spectroscopic) กราวิเมตริก (Gravimetric) ไดอิเล็กตริก (Dielectric) และด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้แสดงให้เห็นในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าการละลายโดยวิธี Dynamic method ซึ่ง BPR (Back Pressure Regulator) ทำหน้าที่รักษาความดันในระบบให้คงที่ SW (Switching valves) เพื่อปรับระดับการไหล (Bristow *et al.*, 2001)

บริเวณนี้ตัวถูกละลายจะอยู่ใน Vessel ซึ่งจะมีการไหลของของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตหรือของไหลกับตัวทำละลายร่วม ถ้าทำการวิเคราะห์แบบออนไลน์จะใช้ UV detector โดยของไหลผสมจะผ่านเข้าไปโดยตรงเพื่อวิเคราะห์หาความถูกต้องของเบสไลน์ (Baseline correction) และผ่านเข้าไปใน Vessel ของสารตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ทั่วไป (ไม่ออนไลน์) มีการเก็บตัวอย่างในสารละลายหรือที่เย็น (Cold trap) ในระยะเวลาหนึ่งจากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณของตัวถูกละลาย คำนวณค่าการละลายได้จากสมการที่ 4

$$y_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} = \frac{n_1}{Q_1 \rho_1 t + n_2} \quad (4)$$

โดยที่  $n_1$  และ  $n_2$  คือ โมลของคาร์บอนไดออกไซด์และตัวถูกละลายที่ถูกเก็บที่เวลา  $t$  ตามลำดับ  $Q_1$  คืออัตราการไหลโดยปริมาตร (Volumetric flow rate) ของคาร์บอนไดออกไซด์ และ  $\rho_1$  คือความหนาแน่นโดยโมลของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งข้อดีของวิธีนี้คือ เครื่องมือสามารถควบคุมได้ง่าย การเก็บตัวอย่างทำได้ไม่ยาก ได้ข้อมูลจำนวนมากในช่วงเวลาสั้นๆ และสามารถวัดการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ได้โดยใช้ Gas flow meter ติดไว้ที่ขาออก

ในงานวิจัยนี้เราใช้การวัดค่าการละลายโดยวิธี Dynamic method ซึ่งมีข้อดีหลายประการ ดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น จากนั้นทำการคำนวณค่าการละลายของสารได้โดยวิธี Gravimetric ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ค่าความสามารถในการละลายอยู่ในหน่วยของกิโลกรัมของสารต่อกิโลกรัมคาร์บอน ไดออกไซด์

### การทำนายค่าความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ (Correlations for Solute Solubility in Supercritical Carbon Dioxide)

ในทางทฤษฎี การทำนายค่าความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์สามารถทำได้โดยใช้สมการ Equation of State และ สมการ Empirical แต่ในทางปฏิบัติการใช้สมการ Equation of State มาทำนายค่าความสามารถในการละลายนั้นค่อนข้างไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการหาข้อมูลคุณสมบัติทางกายภาพของสารนั้นทำได้ยาก นอกจากนี้สมการ Equation of State ยังไม่สามารถทำนายค่าความสามารถในการละลายของสารที่มีมวลโมเลกุลสูงๆได้ เช่น ไตรกลีเซอไรด์ ไขมันและน้ำมันชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแล้ว พบว่าค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากการทดลองจะไม่ตรงกับที่หาได้จากสมการที่ใช้ในการทำนาย ดังนั้นสมการ Empirical และ Semi Empirical จึงถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วงของความดันและอุณหภูมิตามที่กำหนด โดยสมการที่นิยมนำมาใช้ คือ สมการของ Charstil (Charstil, 1982) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของความสามารถในการละลายของสารในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆในรูปของความหนาแน่น ดังสมการต่อไปนี้

$$S = \rho^{a_1} \exp\left(a_2 + \frac{a_3}{T}\right) \quad (5)$$

โดยที่  $S$  คือ ความสามารถในการละลายในหน่วยกิโลกรัมน้ำมันต่อมิลลิลิตร (kg/mL),  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของตัวทำละลายในหน่วยกิโลกรัมต่อมิลลิลิตร (kg/mL),  $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) เมื่อทำการจัดรูปสมการข้างต้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้ ดังสมการที่ (6)

$$\ln(\bar{S}) = (a_1 - 1) \ln \rho + a_2 + \frac{a_3}{T} \quad (6)$$

โดย  $\bar{S}$  คือ ค่าความสามารถในการละลายในหน่วยกิโลกรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ (kg oil/kg CO<sub>2</sub>),  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยกิโลกรัมต่อมิลลิลิตร (kg/mL),  $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) ส่วนค่า  $a_1$ ,  $a_2$  และ  $a_3$  คือ ค่าพารามิเตอร์ที่สามารถปรับได้ตามข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ค่า  $a_1$  นั้น เป็นความชันของสมการเชิงเส้น ซึ่งแสดงถึงจำนวนโมเลกุลโดยเฉลี่ยของตัวทำละลายที่สามารถเข้าล้อมรอบตัวถูกละลายหนึ่งโมเลกุลเพื่อให้เกิด Solvato complex ได้ในสภาวะสมดุล (Equilibrium system) และอธิบายถึงผลของความหนาแน่นที่มีต่อความสามารถในการละลายของสารได้ ค่าคงที่  $a_2$  ขึ้นกับมวลโมเลกุลของตัวทำละลาย ตัวทำละลาย และค่า Association constant และค่าคงที่  $a_3$  แสดงถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการละลายของสารเมื่อความหนาแน่นคงที่

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของสารที่นอกเหนือจากสมการของ Charstil และถูกนำเสนอโดย Del Valle and Aguilera (1988) เป็นสมการที่พัฒนามาจากสมการของ Charstil ดังแสดง

$$S = \rho^{a_1} \exp\left(a_2 + \frac{a_3}{T} + \frac{a_4}{T^2}\right) \quad (7)$$

ซึ่งหน่วยของสมการข้างต้นนั้นเป็นไปตามสมการของ Charstil และเมื่อทำการจัดรูปสมการข้างต้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้สมการดังแสดง

$$\ln(\bar{S}) = (a_1 - 1) \ln \rho + a_2 + \frac{a_3}{T} + \frac{a_4}{T^2} \quad (8)$$

สมการของ Charstil และสมการของ Del Valle และ Aguilera มีความเหมือนกันตรงที่สมการทั้งสองนั้นกำหนดให้ค่า  $a_1$  เป็นค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับค่าความหนาแน่น ( $\rho$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ )

นอกจากสมการทั้ง 2 สมการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น Adachi and Lu (1983) ได้พัฒนาสมการใหม่จากสมการของ Charstil โดยจะเปลี่ยนค่า  $a_1$  จากค่าคงที่ไปเป็นค่าสมการกำลังสอง (Second-order polynomial) ซึ่งสมการดังกล่าวนี้ถูกใช้ เพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของไตรกลีเซอไรด์ โดยสมการของ Adachi and Lu (1983) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$S = \rho^{(a_1 + a_2\rho + a_3\rho^2)} \exp\left(a_4 + \frac{a_5}{T}\right) \quad (9)$$

ซึ่งหน่วยของสมการข้างต้นนั้นเป็นไปตามสมการของ Charstil และเมื่อทำการจัดรูปสมการข้างต้น เพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นจะได้สมการดังแสดง

$$\ln(\bar{S}) = ((a_1 + a_2\rho + a_3\rho^2) - 1) \ln \rho + a_4 + \frac{a_5}{T} \quad (10)$$

การหาค่าคงที่ต่างๆในสมการทั้งสามนั้นทำได้โดยวิธี Linear Regression โดยทำให้ค่า Objective Function (OF) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งค่า Objective Function (OF) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$OF = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\bar{S}_c - \bar{S}_e}{\bar{S}_e} \right]^2 \quad (11)$$

โดยที่

$\bar{S}_c$  คือ ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่คำนวณได้จากสมการ ในหน่วยกิโลกรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg oil/ kg CO<sub>2</sub>)

$\bar{S}_e$  คือ ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ได้จากการทดลอง ในหน่วยกิโลกรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg oil/ kg CO<sub>2</sub>)

งานวิจัยนี้จะนำค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ได้จากการทดลองมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นกับความหนาแน่น (ซึ่งขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ) โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามสมการที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น จากนั้นจะนำค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากสมการและที่ได้จากการ

ทดลองมาเปรียบเทียบว่าสมการใดสามารถทำนายความสามารถในการละลายได้แม่นยำกว่า จึงเป็นสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้สมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายชนิดต่างๆในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มีดังต่อไปนี้

Özkal (2004) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันแอปปริคอต เคอร์เนล (Apricot kernel oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 150 300 450 525 และ 600 บาร์ จากนั้นนำค่าความสามารถในการละลายที่ได้มาเป็นข้อมูลสำหรับการหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำนายค่าความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera และสมการของ Adachi and Lu ซึ่งค่าคงที่ต่างๆของแต่ละสมการ แสดงดังตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** ค่าคงที่จากสมการทางคณิตศาสตร์ และค่า  $R^2$  ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Özkal (2004)

สมการ	ค่าคงที่ของสมการ					$R^2$	AAD (%)
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
Charstil	11.10	-56.80	-5,369	-	-	0.995	8.45
Del Valle and Aguilera	11.10	-57.50	44,541	-8,055,332	-	0.996	8.68
Adachi and Lu	17.81	-15.85	8.40	19.94	-5,429.50	0.997	6.48

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าสมการที่สามารถทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันแอปปริคอต เคอร์เนล (Apricot kernel oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ได้แม่นยำที่สุด

( $R^2 = 0.997$ ) คือ สมการของ Adachi and Lu ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการทดลอง (Average absolute deviation, %AAD) เท่ากับ 6.48 เปอร์เซ็นต์

Özkal *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันฮาเซลนัท (Hazelnut Oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส ความดัน 13 30 45 และ 60 เมกกะปาสคาล โดยให้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.5 mL/min และนำสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการ ได้แก่ สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera และ สมการของ Adachi and Lu มาใช้เพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ซึ่งค่าคงที่ต่างๆของสมการทั้งสาม แสดงดังตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** ค่าคงที่จากสมการทางคณิตศาสตร์ และค่า  $R^2$  ที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของ Özkal *et al.* (2005)

สมการ	ค่าคงที่ของสมการ					$R^2$
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	
Charstil	8.45	-38.40	-5480	-	-	0.985
Del Valle and Aguilera	8.45	48.80	-24,101	3,005,073	-	0.986
Adachi and Lu	-19.90	75.20	-48.20	18.30	-4,919	0.995

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าสมการที่สามารถทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันฮาเซลนัทในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้แม่นยำที่สุด ( $R^2 = 0.995$ ) คือ สมการของ Adachi and Lu

Azevedo *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันออกจาก green coffee โดยทำการสกัดที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส และความดันในช่วง 15.2 ถึง 35.2 เมกกะปาสคาล อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1 มิลลิลิตรต่ออนาที จากนั้นนำปริมาณน้ำมันที่สกัดได้ หรือ ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันมาใช้ เพื่อหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้ทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันที่อุณหภูมิและความดันอื่นๆ ซึ่งสมการที่ใช้คือสมการของ Charstil แสดงดังสมการที่ (12)

$$C = d^{7.90} \exp\left(\frac{-2869.20}{T}\right) - 42.63 \quad (12)$$

ซึ่ง  $C$  คือค่าความสามารถในการละลายในหน่วยกรัมต่อลิตร (g/L)  $d$  คือ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยกรัมต่อลิตร (g/L) และ  $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K) และมีการรายงานเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของทั้งสามไอโซเทอมที่ 50 60 และ 70 องศาเซลเซียส เท่ากับ 6.28 6.27 และ 9.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าสมการของ Charstil เป็นสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันจาก Green coffee ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

Follegatti-Romeo *et al.* (2009) ได้ทำการหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันที่อุดมไปด้วยโอเมก้า-3 (Omega-3 rich oil) จากเมล็ดถั่วอินคา (Sacha inchi seeds) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ ซึ่งการหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 100 200 300 และ 400 บาร์ และวิธีที่ใช้ในการหาค่าความสามารถในการละลาย คือ Dynamic method โดยพบว่าค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันที่ได้จากทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการละลายที่คำนวณได้จากสมการของ Charstil แสดงดังสมการที่ (13)

$$\ln(\bar{Y}) = 9.4341 \ln \rho - \frac{4003.3037}{T} + 8.9781 \quad (13)$$

ซึ่ง  $\bar{Y}$  คือค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันในหน่วยกิโลกรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์ (kg/kg CO<sub>2</sub>)  $\rho$  คือความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m<sup>3</sup>) และ  $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน (K)



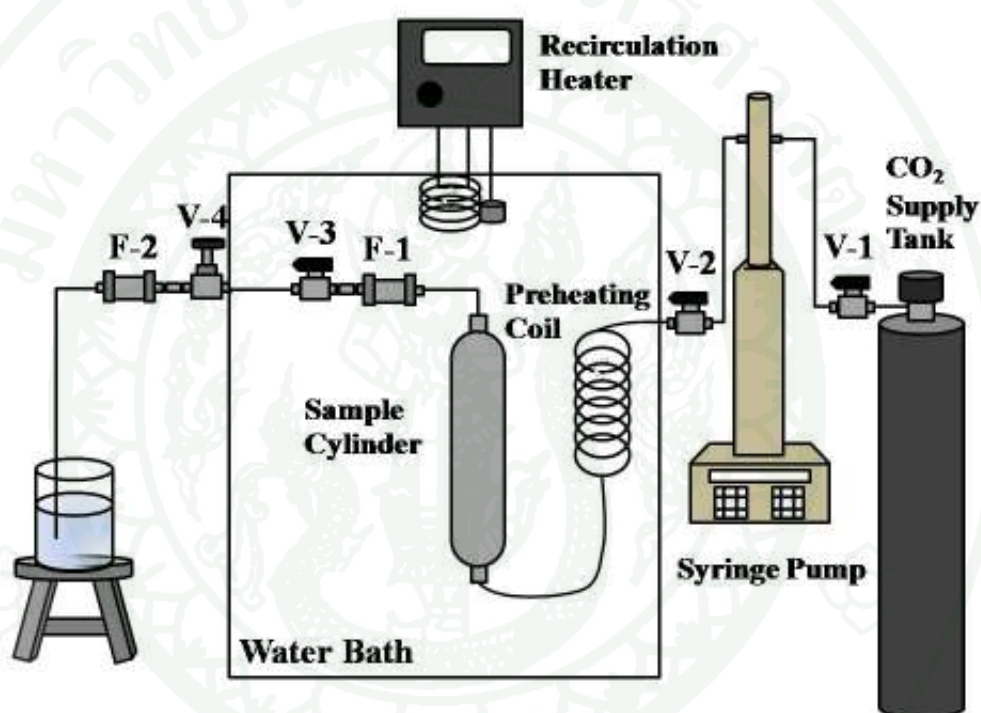
## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. ปัมเพิ่มความดัน (บริษัท ISCO รุ่น 260 D)
2. เครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสสตีล (บริษัท Swagelok)
3. ท่อสแตนเลสสตีล ข้อต่อและวาล์วต่างๆ (บริษัท Swagelok)
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Polystat ccl)
5. อ่างน้ำ (Perspex water bath)
6. ตู้อบเครื่องแก้ว
7. เครื่อง Ultrasonic bath (บริษัท Mettler Electro รุ่น ME 11)
8. เส้นใยแก้ว (Glass wool; จากบริษัท Alltech Associates Inc.)
9. เครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง (บริษัท Ohaus รุ่น Adventure)
10. อะซีโตน (Commercial grade; จากบริษัท Itlamar)
11. เฮกเซน ใช้สำหรับล้าง
12. น้ำมันหล่อลื่น (Castrol สูตร Magnatec สำหรับรถยนต์)
13. คาร์บอนไดออกไซด์ (High purity grade, บริษัท TIG)
14. พลาสติกจากขวด Castrol Magnatec (พลาสติกสีเขียว)
15. พลาสติกจากขวด PTT Performa (พลาสติกสีเทา)

## วิธีการ

1. นำน้ำมันหล่อลื่นและเส้นใยแก้วบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอกกลางที่ทำมาจากสแตนเลสสตีล เพื่อให้  $\text{CO}_2$  เกิดการสัมผัสกับน้ำมันหล่อลื่นได้ดี
2. นำตัวกรอง F-2 (Solute trap) และวาล์ว V-4 (Needle valve) ไปซั้งก่อนการทดลอง บนที่ก้นน้ำหนักของวาล์วและตัวกรอง หลังจากนั้นประกอบอุปกรณ์ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 เครื่องมือหาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นด้วย SC- $\text{CO}_2$

3. เติมน้ำลงในอ่างน้ำ (Perspex water bath) จนระดับน้ำอยู่เหนือลูกกลอยเล็กน้อย จากนั้นใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Polystat) ปรับอุณหภูมิภายในอ่างน้ำให้ได้อุณหภูมิตามที่กำหนด
4. เปิดวาล์ว V-1 ใช้ปั๊มเพิ่มความดันโหมด Constant flow ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตรต่อนาที กด Run และทำการเพิ่มความดันของระบบให้ได้ความดันตามที่กำหนด ปิดวาล์ว และเปิดวาล์ว V-2

5. จากนั้นทำการควบคุมความดันของระบบให้คงที่ โดยใช้ปั๊มเพิ่มความดันโหมด Constant Pressure จากนั้นกด Run รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่ Equilibrium เป็นเวลา 30 นาที เปิดวาล์ว V-4 ปรับอัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ตามที่กำหนด ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณของ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 100 มิลลิลิตร

6. เมื่อจบการทดลองจนกระทั่งเสร็จ ปิดวาล์ว V-3 และ V-2 และปิดปั๊ม ตามลำดับ ไล่ความดันออกจากระบบโดยเปิดวาล์ว V-4 ในขณะที่วาล์ว V-3 และ V-2 ยังคงปิดอยู่ จากนั้นนำตัวกรอง F-2 และวาล์ว V-4 ไปล้างและบันทึกน้ำหนักวาล์วและตัวกรองหลังการทดลองเพื่อหาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub>

7. ทำการทดลองซ้ำที่สภาวะอื่น เช่น ที่ความดัน 150 165 180 และ 190 บาร์ อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ที่ 0.5 และ 1 มิลลิลิตรต่อนาที

### การคำนวณหาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ความสามารถในการละลายน้ำมันหล่อลื่น (กรัม ต่อ 100 มิลลิลิตรของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ไป)

$$W_i = \frac{W_b - W_a}{V_{CO_2}} \quad (14)$$

โดยที่

$W_i$  = ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรคาร์บอนไดออกไซด์)

$W_a$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 ก่อนการทดลอง

$W_b$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 หลังการทดลอง

$V_{CO_2}$  = ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 100 มิลลิลิตร ที่ใช้ไป

## วิธีการการทำความสะอาดพลาสติกโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกรณีไม่มีตัวทำละลายร่วม

1. นำพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ขนาด  $0.5 \times 0.5$  ตารางมิลลิเมตร ที่ผ่านการล้างด้วยเฮกเซนจนสะอาด จำนวน 50 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอกกึ่งวงที่ทำจากสแตนเลสสตีล (Sample cylinder) จากนั้นชั่งน้ำมันหล่อลื่น 5 กรัม (10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพลาสติก) เพื่อบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ และบรรจุใยแก้ว (Glass wool) ประมาณ 5-10 กรัม ตามลงไป เพื่อป้องกันการล้นทะลักของน้ำมันเครื่องออกจากเครื่องปฏิกรณ์
2. นำตัวกรอง F-2 (Solute trap) และวาล์ว V-4 (Needle valve) ไปซั้ก่อนเริ่มการทดลอง แล้วบันทึกน้ำหนักของวาล์วและตัวกรอง จากนั้นนำมาประกอบได้ดังภาพที่ 13
3. เติมน้ำลงในอ่าง (Perspex water bath) จนระดับน้ำอยู่เหนือลูกกลอยเล็กน้อย จากนั้นเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Polystat) เพื่อปรับอุณหภูมิของน้ำในอ่างให้คงที่ที่ 35 องศาเซลเซียส
4. เปิดวาล์ว V-1 ใช้ปั๊มเพิ่มความดันโหมด Constant flow ที่อัตราการไหลของ  $\text{CO}_2$  เท่ากับ 10 มิลลิลิตรต่อนาที กด Run และทำการเพิ่มความดันของระบบจนได้ความดันที่ต้องการ ปิดวาล์ว V-1 และ เปิดวาล์ว V-2
5. ทำการควบคุมความดันของระบบให้คงที่โดยใช้ปั๊มเพิ่มความดันโหมด Constant Pressure จากนั้นกด run รอเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 180 บาร์ และปิดวาล์ว V-2 เพื่อแยกระบบ
6. รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปิดวาล์ว V-4 เพื่อปรับอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตให้มีค่าเท่ากับ  $1 \pm 0.2$  มิลลิลิตรต่อนาที ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 500 มิลลิลิตร
7. เมื่อจบการทดลอง ปิดวาล์ว V-3 และ V-2 ตามลำดับและกด Stop ที่ปั๊มเพิ่มความดัน จากนั้นทำการไล่ความดันออกจากระบบโดยที่เปิดวาล์ว V-4 และวาล์ว V-3 โดยที่วาล์ว V-2 ยังคง

ปิดอยู่ จากนั้นนำตัวกรอง F-2 และวาล์ว V-4 ไปซั้งและบันทึกน้ำหนักวาล์วและตัวกรองหลังจากการทดลองเพื่อหาปริมาณน้ำมันที่สามารถล้างออกจากพลาสติกได้โดย SC-CO<sub>2</sub>

8. จากนั้นนำเศษพลาสติกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอกที่ใช้ในการสกัด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่า Melt Flow Rate โดยใช้เครื่อง Melt flow indexer ต่อไป

**การหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต**

การคำนวณหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถคำนวณจากสมการต่อไปนี้

$$Y = \frac{W_b - W_a}{W_{oil}} \times 100\% \quad (15)$$

โดยที่

$Y$  = ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่น (%)

$W_a$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 ก่อนการทดลอง

$W_b$  = น้ำหนักของวาล์ว C และตัวกรอง B หลังการทดลอง (กรัม)

$W_{oil}$  = ปริมาณน้ำมันที่เติมลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสกัด (กรัม)

**วิธีการทำความสะอาดพลาสติกโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกรณีใช้ตัวทำละลายร่วม(อะซีโตน)**

1. นำพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ขนาด 0.5×0.5 ตารางมิลลิเมตรที่ผ่านการล้างด้วยเฮกเซนจนสะอาด จำนวน 50 กรัม บรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ทรงกระบอก (Sample cylinder) จากนั้นชั่งน้ำมันหล่อลื่น 5 กรัม (10 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักพลาสติก) เพื่อบรรจุลงใน

เครื่องปฏิกรณ์ และบรรจุเส้นใยแก้ว (Glass wool) ประมาณ 5-10 กรัม ตามลงไป เพื่อป้องกันการล้นทะลักของน้ำมันเครื่องออกจากเครื่องปฏิกรณ์

2. นำตัวกรอง F-2 (Solute trap) และวาล์ว V-4 (Needle valve) ไปซั้ก่อนเริ่มการทดลอง แล้วบันทึกน้ำหนักของวาล์วและตัวกรอง จากนั้นนำมาประกอบได้ดังรูปที่ 13

3. เติมน้ำลงในอ่าง (Perspex water bath) จนระดับน้ำอยู่เหนือลูกกลอยเล็กน้อย จากนั้นเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Polystat) เพื่อปรับอุณหภูมิของน้ำในอ่างน้ำให้คงที่ที่ 35 องศาเซลเซียส

4. ใช้โหมด Constant flow ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 10 มิลลิลิตรต่อนาที กด run และไขข้อต่อด้านข้างวาล์ว V-1 เพียงเล็กน้อยเพื่อไล่ความดันออกจากปั๊ม เมื่อปริมาตรของ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 0.00 มิลลิลิตร กด Stop และปล่อยความดันออกจนภายในปั๊มเหลือความดันเท่ากับ 0 บาร์ จากนั้นไขข้อต่อด้านข้างวาล์ว V-1 ปิดให้สนิท

5. นำตัวทำละลายร่วม(อะซีโตน) ปริมาณ 20.43 มิลลิลิตร (ต้องการ 5 เปอร์เซ็นต์โมลของอะซีโตน) ฉีดเข้าในปั๊มทางด้านบนพร้อมกับกด Refill ที่อัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 5 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อฉีดอะซีโตนหมดให้กด Stop

6. เติม CO<sub>2</sub> ลงไปปั๊มให้เต็มโดยใช้โหมด Refill ที่อัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ที่ 15 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากเติมปั๊มจนเต็ม ให้ปิดวาล์วที่ถัง CO<sub>2</sub> ให้สนิท แล้วทำให้ CO<sub>2</sub> และอะซีโตนผสมกันโดยใช้โหมด Constant flow ที่อัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ที่ 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นกด Run จนกระทั่งความดันเพิ่มขึ้นเป็น 190 บาร์ และกด Stop แล้วเปลี่ยนเป็นโหมด Refill ที่อัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ที่ 15 มิลลิลิตรต่อนาทีจนกระทั่งความดันลดลงเหลือ 140 บาร์ ทำสลับกันอย่างละสามครั้ง

7. จากนั้นควบคุมความดันของระบบให้คงที่ที่ 140 บาร์ โดยใช้ปั๊มเพิ่มความดันโหมด Constant pressure จากนั้นต่อระบบน้ำเข้าที่กระบอกสูบของปั๊มเพิ่มความดัน โดยหล่อเย็นที่ภายนอกกระบอกสูบด้วยน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที จากนั้น

เปลี่ยนเป็นน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส ทำสลับกันอย่างละสามครั้ง เพื่อให้อะซีโตนและ CO<sub>2</sub> ผสมกันได้ดี

8. เพิ่มความดันให้แก่ระบบโดยใช้โหมด Constant pressure แล้วเปิดวาล์ว A ซ้ำๆ เพื่อให้ความดันภายในระบบเท่ากับ 140 บาร์ จากนั้นปิดวาล์ว V-1 แล้วเพิ่มความดันไปที่ 180 บาร์ โดยใช้โหมด Constant flow กด run และเปิดวาล์ว V-1 เพื่อให้ระบบมีความดันเท่ากับ 180 บาร์

9. จากนั้นควบคุมให้ความดันคงที่ที่ 180 บาร์โดยใช้โหมด Constant pressure กด Run รอเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงปิดวาล์ว V-1 เพื่อแยกระบบอีกครั้ง รอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สมดุลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เปิดวาล์ว V-4 ปรับอัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> ให้เท่ากับ  $1 \pm 0.2$  มิลลิลิตรต่อนาที ในการล้างพลาสติก ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่ใช้เท่ากับ 250 และ 350 มิลลิลิตร ตามลำดับ

10. เมื่อเสร็จการทดลอง ปิดวาล์ว V-3 V-2 และปิดปั๊มตามลำดับ จากนั้นไล่ความดันออกจากระบบโดยเปิดวาล์ว V-4 และวาล์ว V-3 ส่วนวาล์ว V-2 ยังคงปิดอยู่ จากนั้นนำตัวกรอง F-2 และวาล์ว V-4 ไปล้างและบั่นที่ก้นน้ำหนักรวาล์วและตัวกรองหลังการทดลอง เพื่อหาปริมาณน้ำมันที่สามารถล้างออกจากพลาสติกได้โดยใช้ CO<sub>2</sub> 350 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และความดัน 180 บาร์

11. ทำการทดลองซ้ำที่สภาวะเดิมคือที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความดัน 180 บาร์ แต่เพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็น 250 มิลลิลิตร

**การหาปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สามารถล้างออกจากพลาสติกโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยมีตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน)**

การคำนวณหาปริมาณน้ำมันหล่อลื่นที่สามารถล้างออกจากพลาสติกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถคำนวณจากสมการที่ 15 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

## ผลและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อความสามารถในการละลาย ได้แก่ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5-1 มิลลิเมตรต่อวินาที อุณหภูมิที่ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส และความดันที่ 120 150 165 180 และ 195 บาร์ ซึ่งความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้น วัดได้จากปริมาณน้ำมันที่สามารถสกัดได้ในหน่วยกรัมต่อปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ไป (การทดลองนี้ใช้ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 100 มิลลิเมตร) ซึ่งปริมาณน้ำมันที่สกัดได้สามารถหาจากผลต่างของน้ำหนักวาล์วรวมกับตัวกรองทั้งก่อนและภายหลังการทดลอง โดยข้อมูลความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ ได้แก่ สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera และสมการของ Adachi and Lu ซึ่งเป็นสมการที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของค่าความสามารถในการละลาย ความหนาแน่นของตัวทำละลาย และอุณหภูมิที่ใช้ในระบบ จากนั้นจะทำการล้างเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยเลือกอุณหภูมิและความดันที่ได้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่เหมาะสม นอกจากนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลายร่วมจึงมีการเติมตัวทำละลายร่วมลงในกระบวนการทำความสะอาด ซึ่งตัวละลายร่วมที่ใช้ในการทดลองนี้คือ อะซีโตน และในขั้นตอนสุดท้ายจะนำเศษพลาสติกจากการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมาหาค่า Melt Flow Rate (MFR) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถบอกถึงคุณสมบัติการไหลของพลาสติกได้ โดยใช้เครื่อง Melt Flow Indexer นอกจากนี้ยังทำการศึกษาถึงผลของการใช้ขวดพลาสติกต่างชนิดกันที่มีต่อกระบวนการล้างพลาสติกด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

## ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

### 1. ผลของอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์

อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต การใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงๆจะทำให้เวลาที่ใช้ในการสกัดลดลง แต่จะส่งผลให้การสัมผัสกันของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเกิดได้ไม่ดี ทำให้การละลายของตัวถูกละลายเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร ในขณะที่การใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำๆ ส่งผลให้การสัมผัสกันของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเกิดได้ดี แต่อาจมีแรงขับ (Driving force) ในการสกัดไม่เพียงพอจึงทำให้การสกัดสารเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควรและใช้เวลาในการสกัดนานจนเกินไป ดังนั้นการควบคุมอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตให้เหมาะสม จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการทำการทดลอง

งานวิจัยนี้เริ่มการทดลองโดยใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที พบว่าเวลาที่ใช้ในการสกัดค่อนข้างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ที่ท่อขาออกหลังตัวกรองตัว (F-2) พิจารณาจากภาพที่ 13 พบน้ำมันหล่อลื่นและมีน้ำมันหล่อลื่นจำนวนมากปนเปื้อนในน้ำที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ ซึ่งอาจเกิดจากการที่ใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไป ทำให้น้ำหนักที่ได้จากการชั่งวาล์วและตัวกรองขาออกผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้นค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในสภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ได้จึงเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง ทั้งนี้เพราะน้ำมันที่สกัดออกมาได้ไม่ใช่ปริมาณน้ำมันที่สามารถละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจริง แต่เป็นการผลัดน้ำมันออกมาจากระบบ นอกจากนี้พบว่าการใช้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงๆ ทำให้การสัมผัสกันระหว่างน้ำมันหล่อลื่นกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเกิดได้ไม่ดี ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามงานวิจัยของ Grosso *et al.* (2008) ซึ่งได้ทำการศึกษาการสกัดน้ำมันหอมระเหยออกจากเมล็ดผักชีฝรั่ง โดยทำการทดลองที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.79 1.10 และ 1.56 กิโลกรัมต่อชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นการลดเวลาที่ใช้ในการสกัด แต่น้ำมันที่สกัดได้จะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่น้ำมันหอมระเหยและคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีเวลาในการสัมผัสกันลดลงและอัตราการไหลที่รวดเร็วเกินไป อาจทำให้ตัวทำละลายไม่

สามารถสัมผัสกับตัวถูกละลายได้อย่างสมบูรณ์ การละลายจึงเกิดได้ไม่เต็มที่เท่าที่ควร ในงานวิจัยนี้จึงลดอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ลงเหลือเพียง 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าที่บริเวณปลายท่อขาออกไม่มีการปนเปื้อนของน้ำมันหล่อลื่น ดังนั้นอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที จึงเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมในการนำมาหาค่าความสามารถในการละลาย และเป็นอัตราการไหลที่ทำให้การสัมผัสกันของน้ำมันหล่อลื่นและคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเกิดขึ้นได้อย่างพอเหมาะ การละลายจะเกิดได้อย่างสมบูรณ์ ค่าความสามารถในการละลายที่ได้จึงเป็นค่าที่มีความถูกต้อง อัตราการไหลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Özkal *et al.* (2005) ซึ่งได้ทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันฮาเซลนัทในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยให้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5-2 มิลลิลิตร จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อให้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 2 มิลลิลิตรต่อนาที จะได้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันฮาเซลนัทในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตต่ำกว่าการให้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาทีถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที จึงเป็นอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหมาะสม ทำให้ตัวถูกละลายและตัวทำละลายเกิดการสัมผัสกันได้อย่างพอเหมาะและทำให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันที่วัดได้เป็นค่าที่วัด เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล

## 2. ผลของความดัน

ความดันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต กล่าวคือ เมื่อเพิ่มความดันให้แก่ระบบจะทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวทำละลายจะลดลง ทำให้โมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวทำละลายสามารถสัมผัสกันได้เป็นอย่างดี การละลายจึงเกิดได้ดีขึ้น รวมไปถึงค่าความสามารถในการละลายจะเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยเพิ่มความดันของระบบจาก 120 เป็น 150 165 180 และ 190 บาร์ ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละความดันนั้น ทำการทดลองที่ 3 อุณหภูมิ คือ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส และควบคุมอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่  $0.5 \pm 0.2$  มิลลิลิตรต่อนาที

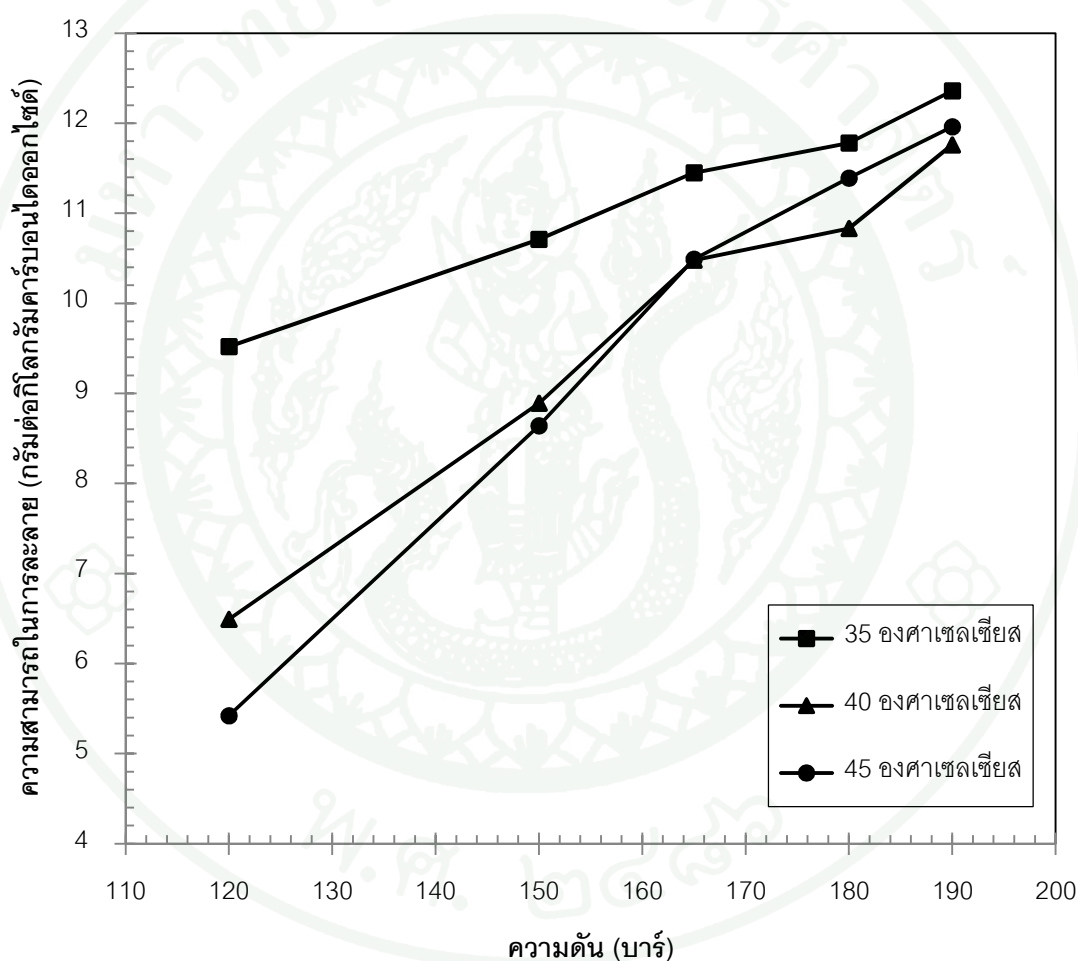
ตลอดการทดลอง ซึ่งค่าความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิและความดันต่างๆที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 7

**ตารางที่ 7** ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความดัน(บาร์)	ความหนาแน่น <sup>a</sup> (กรัมต่อมิลลิลิตร)	ความสามารถในการ ละลาย(กรัมน้ำมันต่อ กิโลกรัม คาร์บอนไดออกไซด์)
35	120	0.767	9.52±0.20
	150	0.815	10.71±0.23
	165	0.833	11.45±0.15
	180	0.848	11.78±0.25
	190	0.857	12.36±0.20
40	120	0.718	6.49±0.23
	150	0.780	8.89±0.24
	165	0.801	10.48±0.43
	180	0.820	10.83±0.44
	190	0.830	11.76±0.20
45	120	0.658	5.42±0.23
	150	0.742	8.64±0.19
	165	0.768	10.49±0.33
	180	0.789	11.39±0.21
	190	0.802	11.96±0.11

หมายเหตุ <sup>a</sup> ข้อมูลจาก Gupta and Shim. 2007. Solubility in Supercritical Carbon Dioxide. CRC Press

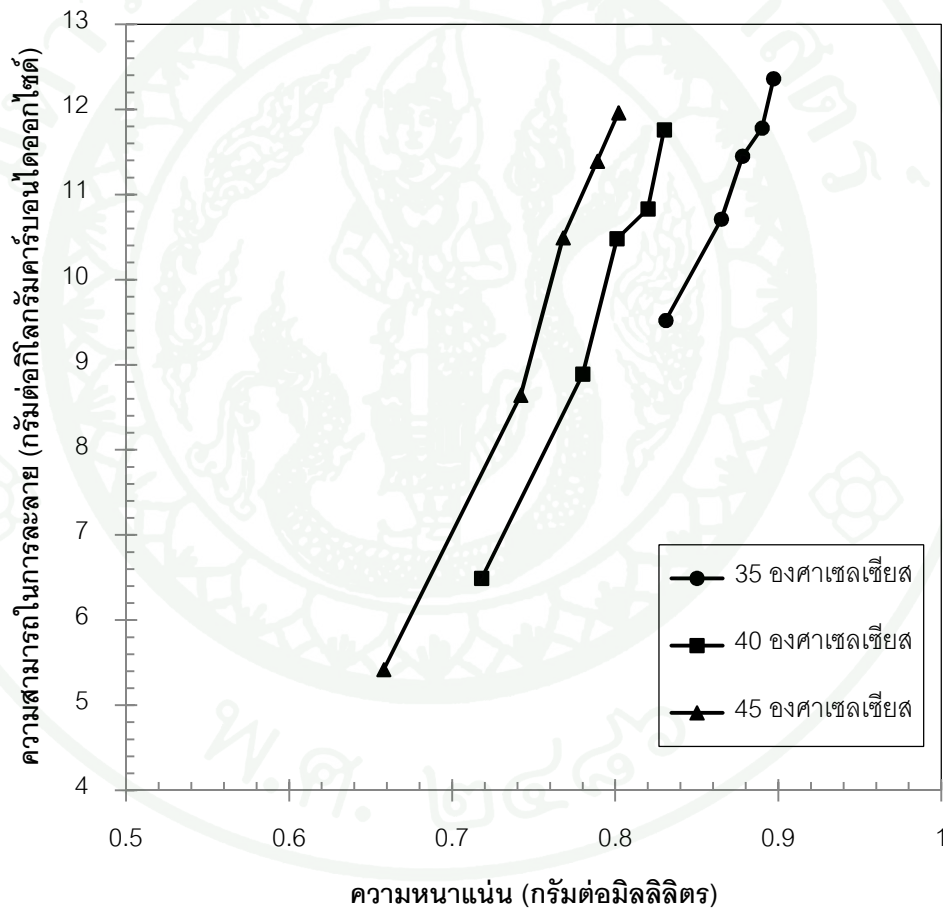
เมื่อพิจารณาค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากการเพิ่มความดันให้แก่ระบบที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 7 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความดันให้กับระบบจาก 120 เป็น 190 บาร์ที่ทุกๆ อุณหภูมิ ทั้ง 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอิทธิพลของความดันที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 อิทธิพลของความดันที่มีต่อความสามารถในการทำละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ

จากภาพที่ 14 พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความดันให้แก่ระบบที่อุณหภูมิต่างๆ ส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

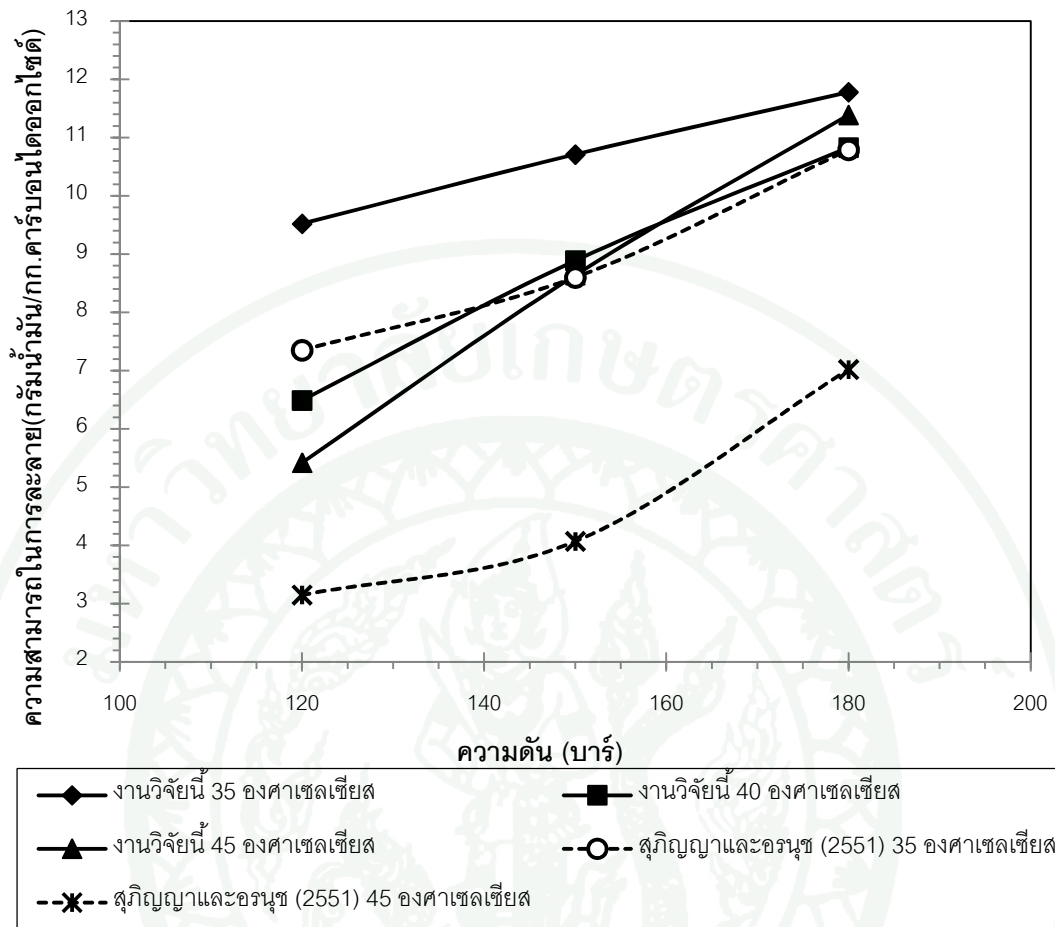
เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มความดันจะเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตและเมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นแล้ว จะส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตและน้ำมันหล่อลื่นลดลง โมเลกุลของตัวถูกละลายและตัวทำละลายจะสามารถเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างกันได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นได้ดีขึ้น ซึ่งผลของความหนาแน่นที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตได้แสดงให้เห็นดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 อิทธิพลของความหนาแน่นที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิต่างๆ

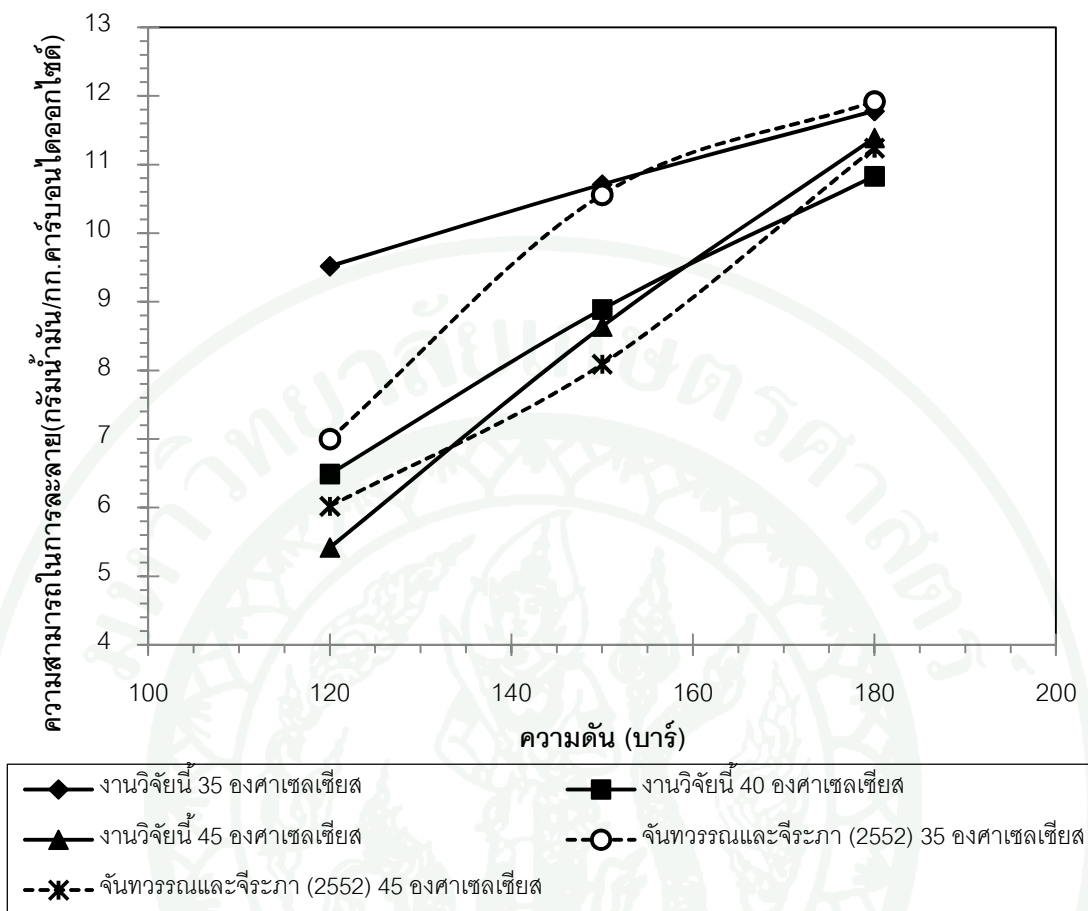
จากภาพที่ 15 แสดงให้เห็นว่าสำหรับทุกไอโซเทอม (Isotherm) เมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะ เมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น จะทำให้โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นได้มากขึ้น การละลายของน้ำมันหล่อลื่นจึงเกิดได้ดีขึ้น ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Johanson and Brunner (1997) ที่ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของวิตามินที่สามารถละลายในน้ำมัน คือ วิตามินเอ, ดี, อี และ เค โดยทำการทดลองที่ 313 333 และ 353 เคลวิน ในช่วงของความดันที่ 20 ถึง 35 เมกะปาสกาล จากผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิคงที่ ค่าความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของตัวทำละลายเพิ่มขึ้น และ งานวิจัยของ Follegati-Romeo *et al.* (2009) ซึ่งทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันที่อุดมไปด้วยโอเมก้า-3 จากเมล็ดอินคา (Sacha inchi seeds) ที่อุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 300 และ 400 บาร์ จากผลการทดลองพบว่า ค่าความสามารถในการละลายมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิคงที่

เมื่อนำค่าการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจากงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส และที่ความดัน 120 150 และ 180 บาร์ ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551) ซึ่งได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดขวดพลาสติกซึ่งผ่านการใช้งานบรรจุน้ำมันหล่อลื่นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลาย นำข้อมูลจากการศึกษาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดขวดพลาสติกมาเปลี่ยนเป็นค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551)

นอกจากนี้ เมื่อนำข้อมูลในงานวิจัยนี้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) ซึ่งได้ศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่สภาวะในการทดลองคือ ที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ความดัน 120 150 และ 180 บาร์และ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 มิลลิลิตรต่ออนาที ซึ่งผลที่ได้แสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเปรียบเทียบกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552)

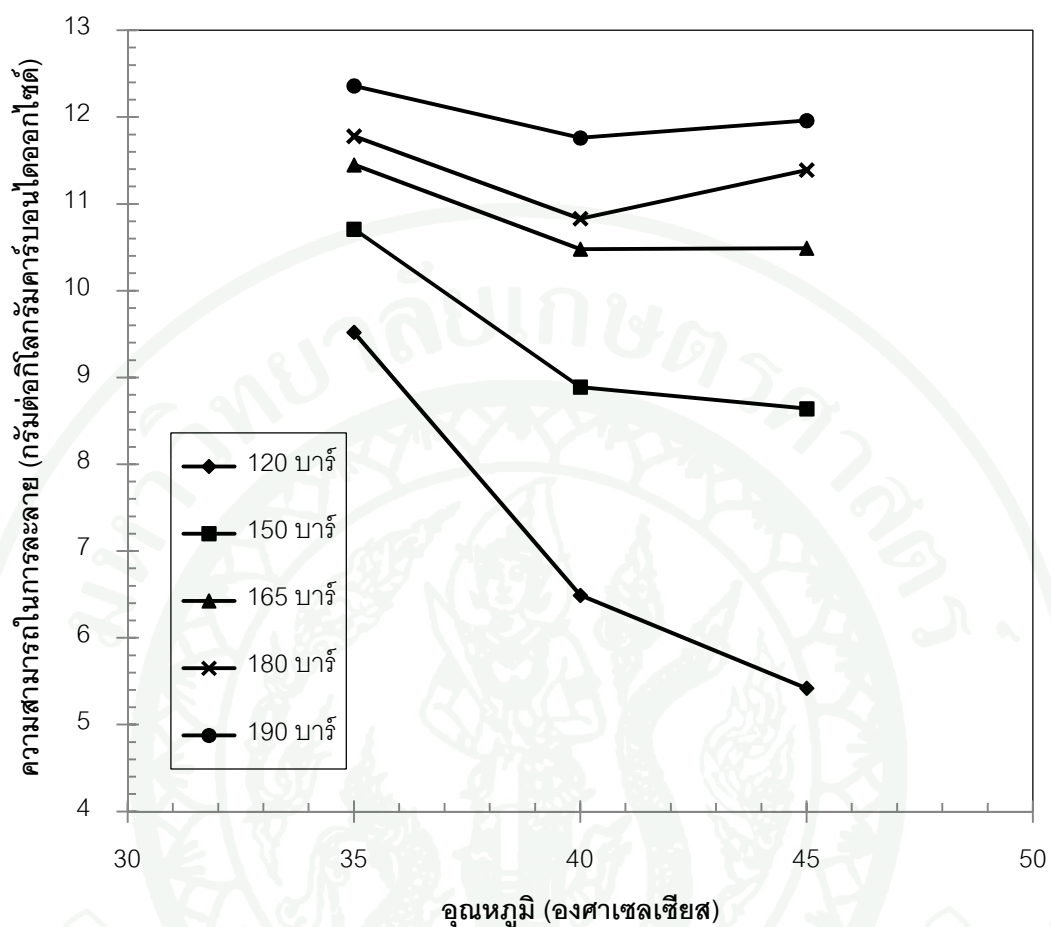
จากภาพที่ 16 และภาพที่ 17 จะเห็นว่า ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่าทั้ง 2 งานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นเล็กน้อย ซึ่งสาเหตุที่ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่างานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551) อาจเป็นเพราะงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551) นั้น ผู้ทดลองนำเศษพลาสติกที่ใช้แล้วจากการบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งปนเปื้อนน้ำมันมาบรรจุในเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสสตีล (Sample cylinder) ที่ใช้ในการสกัด ซึ่งจะมีปริมาณน้ำมันเริ่มต้นน้อยกว่างานวิจัยนี้ที่ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันหล่อลื่นบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสกัดโดยตรง อีกทั้งน้ำมันที่ติดอยู่ที่พลาสติกอาจจะแทรกอยู่ในเนื้อ ทำให้ยากต่อการสกัด ดังนั้นพลาสติกงานวิจัยนี้จึงสามารถสกัดน้ำมันออกมาได้ในปริมาณที่มากกว่า ในส่วนงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) นั้น สาเหตุที่ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นมี

ความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยนี้เล็กน้อย อาจมาจากการทำการทดลองของงานวิจัยนี้มีการทิ้งให้ระบบเข้าสู่สมดุลนานกว่า 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าระบบเข้าสู่สมดุลอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตซึ่งเป็นตัวทำละลาย สามารถเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นซึ่งเป็นตัวถูกละลายได้ดีขึ้น ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกันได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังมีการควบคุมอัตราการไหลให้สม่ำเสมอยิ่งขึ้น เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่พบน้ำมันปนออกมาบริเวณปลายท่อขาออกในระหว่างการทดลอง ทำให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้มีความแน่นอนและถูกต้องกว่างานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) แต่อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้จากสองงานวิจัยข้างต้นมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับงานวิจัยนี้ กล่าวคือ เมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น ซึ่งก็เป็นผลมาจากการเพิ่มความดันให้กับระบบ ทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำมันหล่อลื่นต่ำลง ความสามารถในการทำละลายจึงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้นมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ Salgin *et al.* (2006) ซึ่งทำการศึกษาการสกัดน้ำมันดอกทานตะวันโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลาย ซึ่งทำการทดลองที่ความดัน 20 30 40 50 และ 60 เมกกะปาสกาลและที่อุณหภูมิ 313 333 และ 353 เคลวิน พบว่าปริมาณน้ำมันที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อทำการเพิ่มความดันจาก 20 เมกกะปาสกาลไปเป็น 60 เมกกะปาสกาล นอกจากนี้ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Azevedo (2008) ซึ่งได้ทำการศึกษาความสามารถในการสกัดน้ำมันจาก Green coffee โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 50 ถึง 70 องศาเซลเซียสและความดัน 15.2 ถึง 35.2 เมกกะปาสกาล นอกเหนือจากงานวิจัยทั้งสองที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังพบว่าผลที่ได้จากงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกับงานวิจัยของ Jokic *et al.* (2011) โดยได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันถั่วเหลืองในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต และทำการทดลองที่ช่วงของอุณหภูมิ 313 ถึง 323 องศาเซลเซียส ช่วงของความดัน 100-300 บาร์ พบว่าค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันถั่วเหลืองในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันให้แก่ระบบ

### 3. ผลของอุณหภูมิ

การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบส่งผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตให้มีการละลายที่ดีขึ้นหรือน้อยลงได้ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบทำให้เกิดผลสองประการที่ตรงข้ามกันต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต กล่าวคือ การเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบทำให้ความหนาแน่นของตัวทำละลายลดลง ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลายมีมากขึ้น การสัมผัสกันของโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลายเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควร จึงส่งผลให้เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความสามารถในการละลายจะลดลง ในทางตรงกันข้าม การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้ความดันไอของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ตัวถูกละลายจึงสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในโมเลกุลของตัวทำละลายได้มากขึ้น การละลายจึงเกิดได้ดีขึ้น ความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะเรียกจุดที่ความหนาแน่นของตัวทำละลายและความดันไอของตัวถูกละลายมีผลต่อความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเท่าๆกันนี้ว่า จุด Crossover ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่อค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียสเพื่อศึกษาว่าอุณหภูมิมีผลอย่างไรกับค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยให้อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์คงที่ที่  $0.5 \pm 0.2$  มิลลิลิตรต่อนาที และความดันคงที่ที่ 120 150 165 180 และ 190 บาร์ ตามลำดับ ซึ่งผลของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองแสดงดังภาพที่ 18



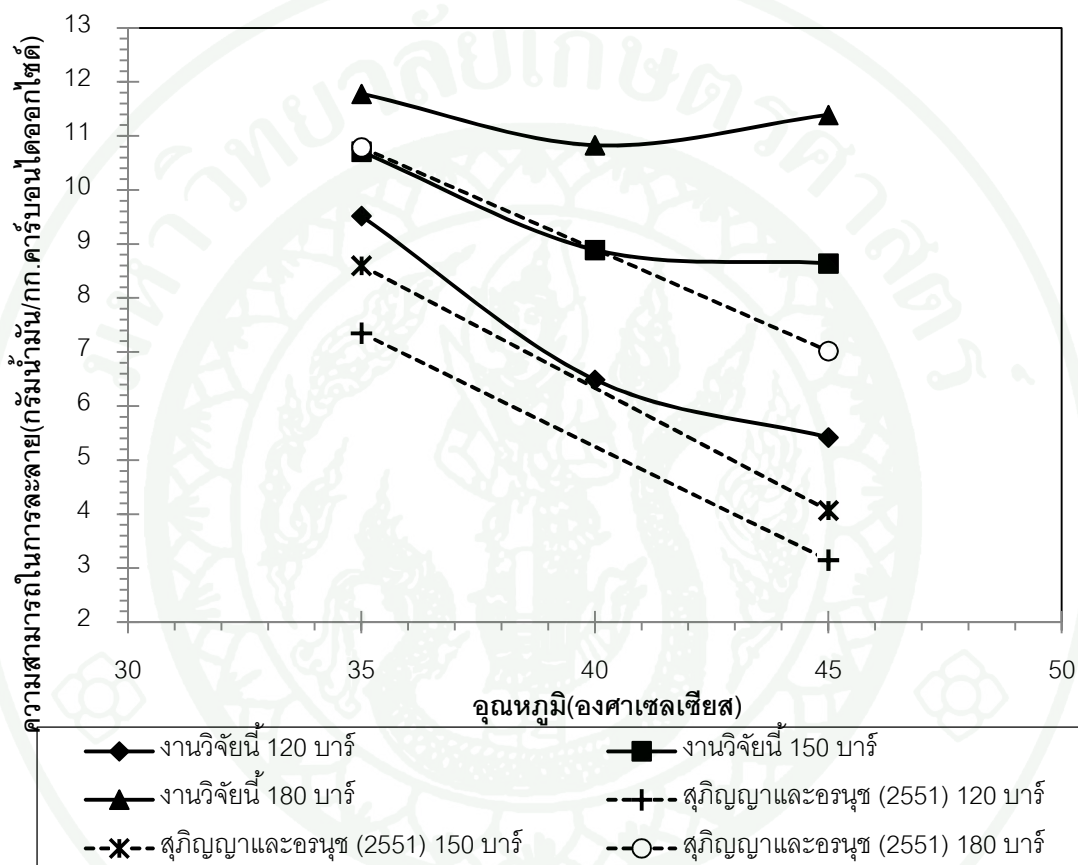
ภาพที่ 18 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ความดันต่างๆ

จากภาพที่ 14 พบว่า ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียสจะสังเกตเห็นการ Crossover ของเส้นกราฟที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส จุดที่เกิดการ Crossover คือ ที่ความดัน 165 บาร์ เมื่อพิจารณาภาพที่ 18 จะเห็นว่า ที่ความดันต่ำกว่า 165 บาร์ คือ เส้นกราฟที่ความดัน 120 และ 150 บาร์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งจากผลการทดลองสามารถอธิบายได้ว่า ที่ความดันต่ำกว่า 165 บาร์ ผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความหนาแน่นมีผลมากกว่าความดันไอ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของน้ำมันหล่อลื่นลดลง เมื่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น การเกิดอันตรกิริยา

(Interaction) ระหว่างโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจึงเกิดได้ยากขึ้น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นสามารถละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตลดลง ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จึงมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ความดันที่ความดัน 165 บาร์ จะสังเกตเห็นว่าค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 40 ไปเป็น 45 องศาเซลเซียสจะลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากความดันที่ 165 บาร์นั้น คือ ความดันที่จุด Crossover ดังนั้นผลของความหนาแน่นที่ลดลง และผลของความดันไอของตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากัน ทำให้อัตราความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นคงที่ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Friedrich *et al.* (1982) ซึ่งทำการสกัดน้ำมันออกจากถั่วเหลืองโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย และได้ทำการทดลองที่ความดันในช่วง 5000 ถึง 8000 psig ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความดันต่ำกว่า 6000 psig ค่าความสามารถในการละลายจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 50 ไปถึง 60 องศาเซลเซียส และที่ความดันสูงกว่า 6000 psig เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้น และงานวิจัยของ Özkal *et al.* (2005) ซึ่งได้ทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันฮาเซลนัทในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วงของความดัน 15 ถึง 60 เมกกะปาสคาล และช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่าช่วงของการ Crossover เกิดที่ความดันระหว่าง 15 ถึง 30 เมกกะปาสคาล ที่ความดันต่ำกว่าช่วงการ Crossover การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันลดลง และที่ความดันสูงกว่าช่วงการ Crossover ความสามารถในการละลายของน้ำมันจะเกิดได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ระบบ รวมถึงงานวิจัยของ Follegatti-Romeo *et al.* (2009) ได้ทำการสกัดน้ำมันที่อุดมไปด้วยโอเมก้า-3 ออกจากเมล็ดถั่วอินคา (Sacha inchi seeds) ที่ช่วงความดัน 100 ถึง 400 บาร์ และอุณหภูมิ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความดันต่ำกว่า 400 บาร์ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการละลายลดลง และที่ความดันสูงกว่า 400 บาร์ การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้การละลายเกิดได้ดีขึ้น

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้ในงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิ 35 ถึง 45 องศาเซลเซียส และช่วงความดันที่ 120 ถึง 180 บาร์ กับงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551) และงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) ซึ่งพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกับทั้งสองงานวิจัย โดยที่สุภิญญาและอรนุช (2551) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการทำควม

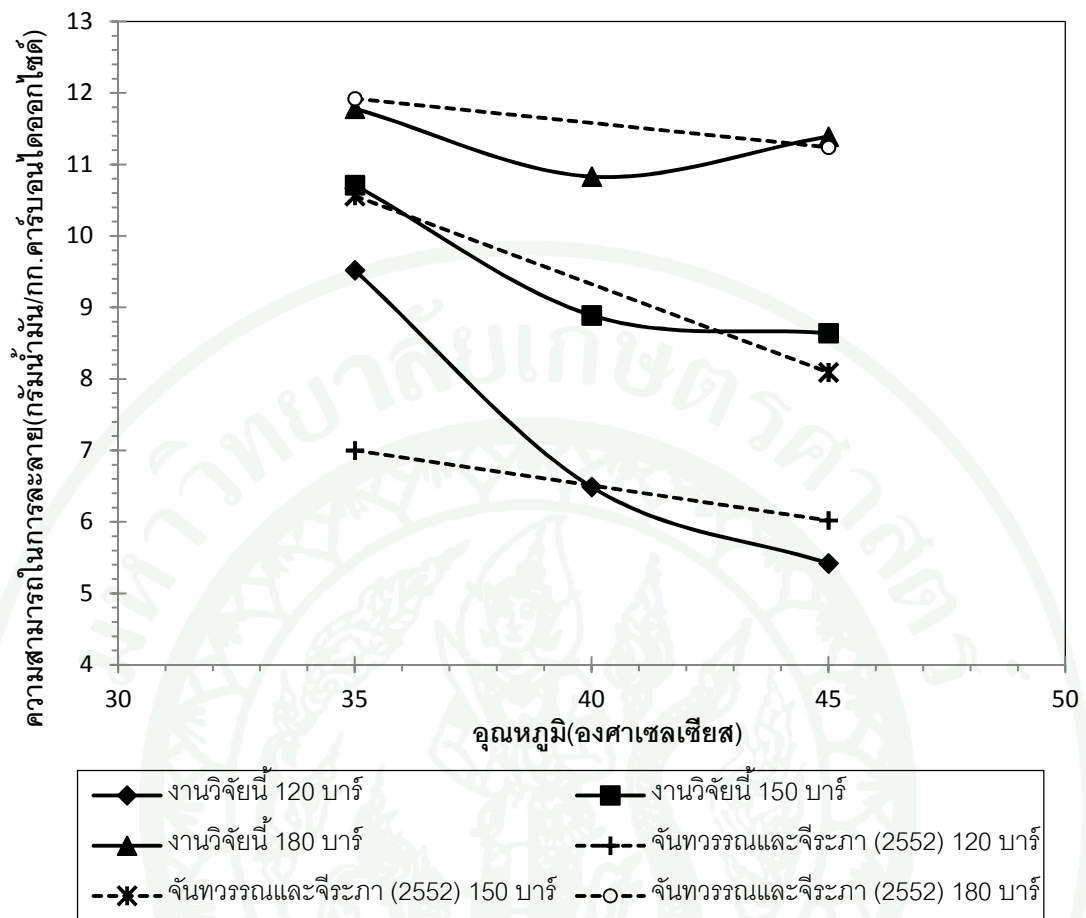
สะอาดเศษขวดพลาสติกที่ผ่านการบรรจุน้ำมันหล่อลื่นโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำความสะอาด พบว่า เมื่อนำประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกมาแปลงเป็นค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น แล้วนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้ ซึ่งผลที่ได้แสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นของงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับงานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551)

จากภาพที่ 19 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตของงานวิจัยนี้มีค่ามากกว่างานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551) ที่ความดันต่างๆ ทั้งที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากงานวิจัยของ สุภิญญาและอรนุช (2551) ทำการทดลองโดยใช้เศษพลาสติกที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น แล้วบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสกัด (Sample cylinder) ซึ่งจะมีปริมาณน้ำมันน้อยกว่าการทดลองนี้ ที่ทำการทดลองโดยบรรจุ

น้ำมันหล่อลื่นลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสกัดโดยตรง ดังนั้นปริมาณน้ำมันที่สามารถสกัดได้จึงน้อยกว่างานวิจัยนี้เห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของสุภิญญาและอรนุช (2551) ทำการทดลองที่สองอุณหภูมิ คือ 35 และ 45 องศาเซลเซียส จึงไม่เห็นผลของการ Crossover ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส ที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ หากงานวิจัยนี้สนใจเพียงแค่สองอุณหภูมิ คือที่ 35 และ 45 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 35 เป็น 45 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตลดลงที่ความดัน 120 150 และ 180 บาร์ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองมีแนวโน้มสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุภิญญาและอรนุช (2551) คือ การเพิ่มอุณหภูมิจาก 35 เป็น 45 องศาเซลเซียส จะทำให้ประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกลดลงเช่นเดียวกัน และเมื่อนำค่าการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในงานวิจัยนี้ที่อุณหภูมิ 35 ถึง 45 องศาเซลเซียส มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ จันทวรรณและจีระภา (2552) ดังแสดงในภาพที่ 20



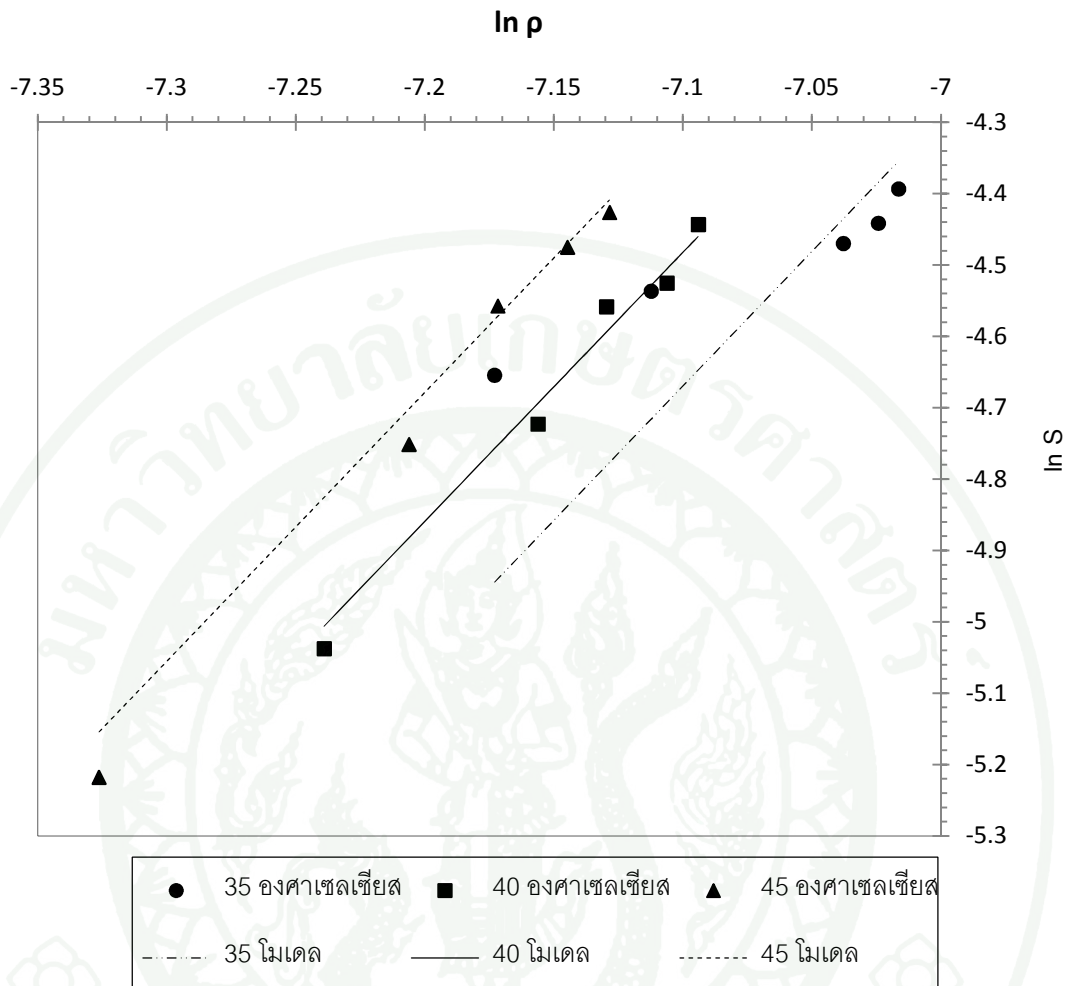
ภาพที่ 20 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นของงานวิจัยนี้  
เปรียบเทียบกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552)

งานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) ได้ทำการทดลองหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่ความดัน 120 150 และ 180 บาร์ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 มิลลิเมตรต่ออนาที และได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 35 และ 45 องศาเซลเซียส จึงไม่สามารถเห็นผลของการ Crossover ที่ความดัน 165 บาร์ของเส้นกราฟที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียสที่พบในงานวิจัยนี้ แต่อย่างไรก็ตาม แนวโน้มของงานวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) คือเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการทดลองจาก 35 เป็น 45 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตลดลงที่ความดัน 120 150 และ 180 บาร์ ทั้งนี้

เนื่องมาจากผลของความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อค่าความสามารถในการละลายมากกว่าผลของความดันไอของตัวถูกละลายที่เพิ่มขึ้น

#### 4. ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (Solubility of Lubricating Oil in Supercritical Carbon Dioxide)

ค่าความสามารถในการละลายจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายสูงสุดของตัวถูกละลาย และความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในของไหลที่สภาวะเหนือวิกฤตนั้นขึ้นกับหลายปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ ความดัน และอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตรต่ออนาที ความดัน 120 150 165 180 และ 190 บาร์ และอุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าความสามารถในการละลายนั้นแสดงดังตารางที่ 7 เมื่อนำค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้มาหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ (ซึ่งแสดงในรูปของความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์) โดยในงานวิจัยนี้นำสมการทางคณิตศาสตร์ 3 สมการ ได้แก่ สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera และสมการของ Adachi and Lu มาทำการวิเคราะห์และทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น โดยค่าคงที่ต่างๆของสมการทั้ง 3 สามารถหาได้จากการทำให้ค่า Objective Function (OF) มีค่าน้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรม Solver ใน Microsoft Excel 2007 จากนั้นคำนวณหาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากสมการทั้งสามแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในขั้นตอนแรกนำค่าความสามารถในการละลายที่อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียสที่ได้จากตารางที่ 7 มาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้สมการของ Charstil ซึ่งเป็นสมการที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของตัวทำละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต โดยที่ค่าคงที่ของสมการ Charstil ที่ได้ คือ  $a_1 = 4.77$   $a_2 = 33.77$  และ  $a_3 = -3599.90$  ซึ่งผลที่ได้แสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เปรียบเทียบกับค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดลองที่อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 21 จะเห็นว่าเมื่อใช้สมการของ Charstil ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส ค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีความคลาดเคลื่อนจากค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากสมการค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นทั้ง 3 อุณหภูมิโดยใช้สมการเดียวกันได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงทำการแยกทำนายความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยใช้ 3 สมการ ได้แก่ สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera

และสมการของ Adachi and Lu ซึ่งค่าคงที่ต่าง ๆ นั้นแสดงในตารางที่ 8 รวมไปถึงค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทั้ง 3 สมการ เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 9

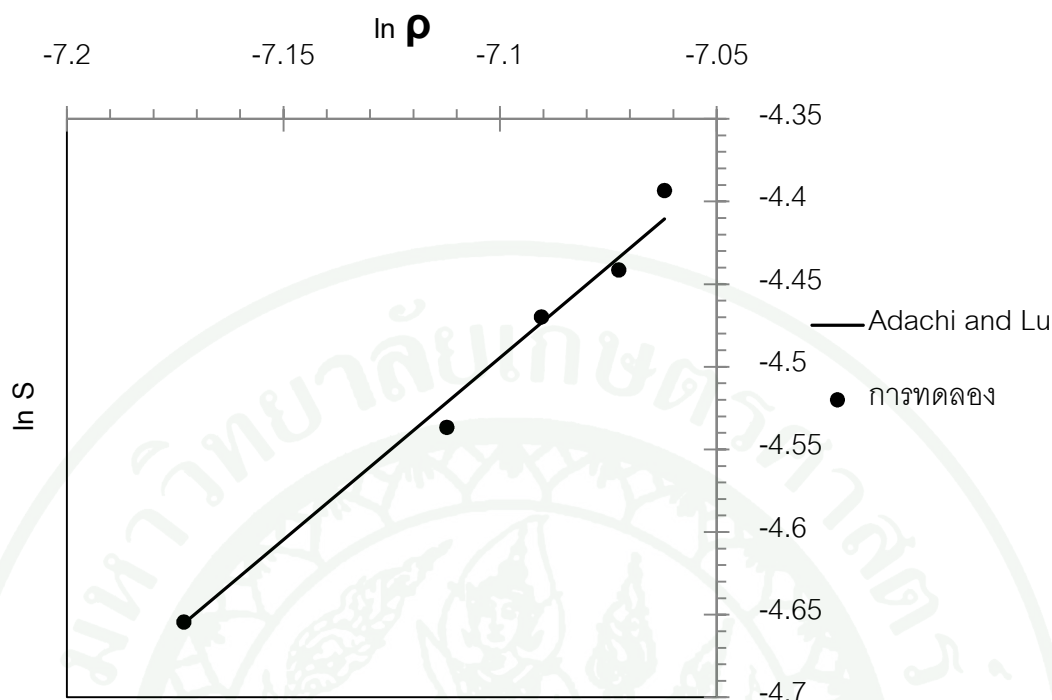
**ตารางที่ 8** ค่าคงที่ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

สมการทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่ต่างๆในสมการ					R <sup>2</sup>	OF
	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>		
Charstil	3.21	16.07	-1500.08	-	-	0.993	3.02E-05
Del Valle and Aguilera	3.21	16.06	-1500.04	14.50	-	0.993	3.02E-05
Adachi and Lu	3.02	-38.14	84.50	14.47	-1499.99	0.993	2.98E-05

**ตารางที่ 9** ค่าความสามารถในการละลาย (กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์) จากการทดลอง เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการละลายจากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการ ที่อุณหภูมิตั้ง 35 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น (กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)			
	จากการทดลอง	จากสมการ Charstil	จากสมการ Del Valle and Aguilera	จากสมการ Adachi and Lu
120	9.52±0.20	9.52	9.52	9.51
150	10.71±0.23	10.89	10.89	10.87
165	11.45±0.15	11.42	11.42	11.41
180	11.78±0.25	11.88	11.88	11.87
190	12.36±0.20	12.16	12.16	12.15

จากตารางที่ 8 ซึ่งแสดงค่าคงที่ต่างๆที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการ เมื่อนำมาใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิตั้ง 35 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิตั้ง 35 องศาเซลเซียสนั้นมีความใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการค่อนข้างมาก (ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.993 เท่ากันทั้งสามสมการ) แต่สมการของ Adachi and Lu มีค่า Objective Function ที่น้อยสุด เท่ากับ  $2.98E-05$  ซึ่งค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการของ Adachi and Lu แสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Adachi and Lu เปรียบเทียบกับค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส

ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Özkal (2004) ซึ่งได้ทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันแอปริคอต (Apricot kernel oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ 40 50 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 150 300 450 525 และ 600 บาร์ โดยได้นำค่าที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จาก 3 สมการ ได้แก่ สมการของ Charstil สมการของ Del Valle and Aguilera และสมการของ Adachi and Lu และพบว่า สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันแอปริคอตในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต คือสมการของ Adachi and Lu เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองจะเห็นว่า ที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส ถึงแม้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของ Adachi and Lu เป็นสมการที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น แต่สมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil นั้นสามารถทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นได้ดีเช่นเดียวกัน ด้วยค่า

Objective Function เท่ากับ  $3.02E-05$  อีกทั้งสมการของ Charstil ไม่ได้มีความซับซ้อนจนเกินไป และสามารถหาค่าคงที่จากสมการได้ง่ายกว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของ Del Valle and Aguilera และสมการของ Adachi and Lu

จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส การทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตนั้นไม่สามารถใช้สมการเดียวกันกับที่ใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสได้ เนื่องจาก ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส เกิดการ Crossover ขึ้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเรื่องอิทธิพลของความดันและอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ในหัวข้อที่ 2 และ 3 ดังนั้นจึงต้องหาค่าคงที่ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามอีกครั้ง เพื่อใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส และค่าคงที่ของสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามสมการแสดงไว้ในตารางที่ 10 รวมถึงค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการเมื่อเปรียบเทียบค่าความสามารถในการละลายที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส ดังแสดงในตารางที่ 11

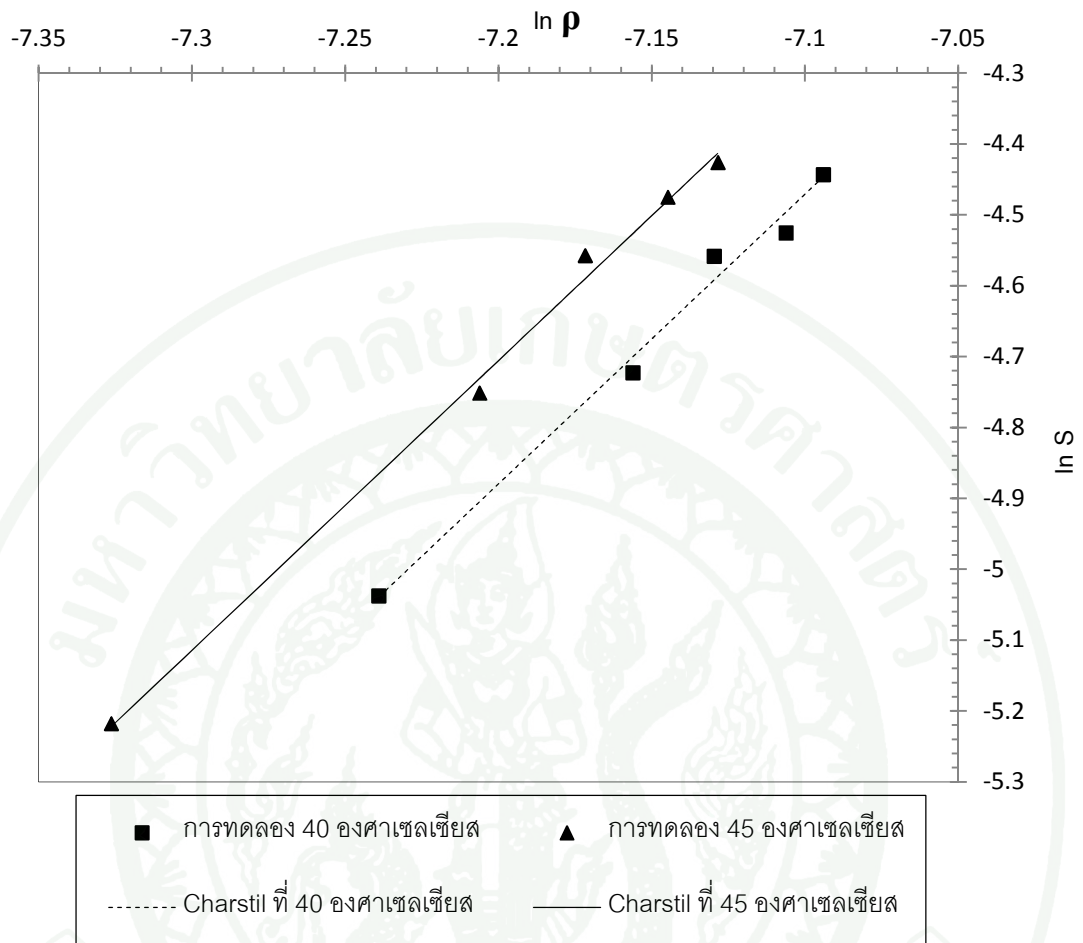
**ตารางที่ 10** ค่าคงที่ที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้ในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส

สมการทางคณิตศาสตร์	ค่าคงที่ต่างๆในสมการ					$R^2$	OF
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$		
Charstil	5.09	35.59	-3,455	-	-	0.997	2.01E-04
Del Valle and Aguilera	5.00	34.96	-3,455	14.50	-	0.997	2.06E-04
Adachi and Lu	5.06	15.00	10.57	35.51	-3,455	0.997	2.07E-04

**ตารางที่ 11** ค่าความสามารถในการละลาย (กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์) จากการทดลอง เปรียบเทียบกับค่าความสามารถในการละลายจากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ทั้ง 3 สมการ ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น (กรัมน้ำมันต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)				
	ความดัน (บาร์)	จากการ ทดลอง	จากสมการ Charstil	จากสมการ Del Valle and Aguilera	จากสมการ Adachi and Lu
40	120	6.49±0.23	6.48	6.52	6.52
	150	8.89±0.24	9.09	9.08	9.08
	165	10.48±0.23	10.13	10.10	10.10
	180	10.83±0.44	11.15	11.09	11.09
	190	11.76±0.16	11.72	11.64	11.64
45	120	5.42±0.23	5.40	5.47	5.47
	150	8.75±0.06	8.82	8.85	8.85
	165	10.49±0.18	10.15	10.15	10.15
	180	11.45±0.21	11.33	11.31	11.31
	190	11.96±0.18	12.12	12.07	12.07

จากตารางที่ 10 และ 11 ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตจากการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ทั้งสามสมการ ( $R^2$  เท่ากับ 0.997) ซึ่งค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการของ Charstil ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 23



**ภาพที่ 23** ค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เปรียบเทียบกับค่าลอการิทึมของความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจากการทดลองที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 23 และค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในตารางที่ 11 พบว่าสมการที่มีความแม่นยำในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต คือ สมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เนื่องจาก ค่าความสามารถในการละลายที่คำนวณได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil มีความใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ได้จากการทดลองมากที่สุดด้วยค่า Objective Function เท่ากับ  $2.01E-04$  ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยหลายงานวิจัย เช่น งานวิจัยของ Ferreira *et al.* (1998) ซึ่งทำการหาสมการเพื่อทำนายค่าความสามารถในการละลายของ

น้ำมันพริกไทยดำ (Black pepper oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 30 40 และ 50 องศาเซลเซียส และความดัน 150 200 และ 300 บาร์ ซึ่งจากการทดลองพบว่า สมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil เป็นสมการที่เหมาะสมในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันพริกไทยดำในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต นอกจากนี้ งานวิจัยของ Follegatti-Romeo (2009) ได้ทำการสกัดน้ำมันที่อุดมไปด้วยโอเมก้า-3 จากเมล็ดถั่ว อินคาที่อุณหภูมิ 40 และ 60 องศาเซลเซียส และความดัน 100 200 300 และ 400 บาร์ พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากสมการ โดยสมการทางคณิตศาสตร์ของ Charstil สามารถทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันได้อย่างแม่นยำ นอกเหนือจากงานวิจัยทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยของ Tae Kwon *et al.* (2011) ได้ทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันพริกไทยแดง (Red pepper oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตในช่วงของอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส และช่วงของความดันที่ 10 ถึง 35 เมกกะปาสคาล จากนั้นนำมาหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ทำนายค่าความสามารถในการละลาย และพบว่าสมการทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันพริกไทยแดงในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต คือ สมการของ Charstil เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าคงที่ในตารางที่ 8 และ 10 พบว่า ค่า  $a_1$ ,  $a_2$  และ  $a_3$  จากสมการของ Charstil ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสนั้น มีค่าเท่ากับ 3.21 16.07 และ -1500.08 ตามลำดับ และค่า  $a_1$ ,  $a_2$  และ  $a_3$  จากสมการของ Charstil ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 5.09 35.59 และ -3455 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นแล้วจะเห็นว่าค่าคงที่ที่ได้ อาจไม่สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นซึ่งได้กล่าวมาแล้วในส่วนการตรวจเอกสารที่ทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันต่างๆในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต สาเหตุเป็นเพราะน้ำมันแต่ละชนิดมีองค์ประกอบและส่วนผสมที่แตกต่างกัน จึงทำให้ได้ค่าคงที่ต่างๆไม่เท่ากัน อีกทั้ง ความสามารถในการละลายของน้ำมันแต่ละชนิดในคาร์บอนไดออกไซด์ยังไม่เท่ากัน อีกด้วย

5. การทำความเข้าใจความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่มีตัวทำละลายร่วม

จากข้อมูลความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต พบว่าที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่น้ำมันหล่อลื่นสามารถละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้ดีที่สุด จึงทำการเลือกความดัน 2 ค่าจากอุณหภูมินี้มาเพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกจากเศษขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งความดันที่เลือกใช้ในการทำความสะอาดพลาสติกคือที่ 120 และ 180 บาร์ ซึ่งมีความสามารถในการละลายเท่ากับ 0.791 กรัม/น้ำมันต่อ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์ และ 1.048 กรัม/น้ำมันต่อ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์ ตามลำดับ จากนั้นนำความสามารถในการละลายมาคำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องใช้ในการทำความสะอาดพลาสติก (มิลลิลิตร) ซึ่งรายละเอียดการคำนวณได้แสดงในภาคผนวก ก2 [รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด(นาที)] โดยการทดลองเริ่มจากนำพลาสติกจากขวดน้ำมันหล่อลื่นมาตัดเป็นชิ้นขนาด 0.5×0.5 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 50 กรัม ล้างด้วยเฮกเซน เพื่อกำจัดน้ำมันหล่อลื่นที่ติดอยู่ออกให้หมด และเติมน้ำมันลงไปจำนวน 5 กรัม ซึ่งคิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยมวล จากนั้นเริ่มต้นกระบวนการล้างโดยใช้อุณหภูมิและความดันดังที่กล่าวมาข้างต้น และอัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 1 มิลลิลิตรต่ออนาที โดยจะทำการศึกษาประสิทธิภาพการทำความสะอาดพลาสติก (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ก3) ทั้ง 2 ชนิด คือ ขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น Castrol Magnatec (พลาสติกสีเขียว) และ ขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น PTT Performa (พลาสติกสีเทา) แล้วนำมาเปรียบเทียบว่าชนิดของพลาสติกส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกหรือไม่ ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 12

**ตารางที่ 12** ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการล้าง และประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกสีเขียวและพลาสติกสีเทา ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์

ชนิดของขวดพลาสติก	ความดัน (บาร์)	ปริมาณ CO <sub>2</sub> ที่ใช้ทางทฤษฎี (มิลลิลิตร)	ปริมาณ CO <sub>2</sub> ที่ใช้จริง (มิลลิลิตร)	เวลาที่ใช้ในการล้าง (นาที)	ประสิทธิภาพในการล้าง (%)
พลาสติกสีเขียว	120	663.59	750	724	80.79
	180	489.89	650	580	85.35
พลาสติกสีเทา	120	675.02	750	731	80.32
	180	489.39	650	550	84.17

จากตารางที่ 12 จะเห็นว่า เมื่อทำการล้างพลาสติกสีเขียวที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มความดันให้แก่ระบบจาก 120 ไปเป็น 180 บาร์จะส่งผลให้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องใช้ในการทำความสะอาดทางทฤษฎีลดลง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความสามารถในการละลายในตารางที่ 7 พบว่าที่ความดัน 120 บาร์ ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่าความดัน 180 บาร์ เนื่องจากที่ความดัน 180 บาร์ ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันให้แก่ระบบ ทำให้ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น โมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์จึงสามารถเข้าไปล้อมรอบโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่น (ตัวถูกละลาย) ได้มากขึ้น ทำให้น้ำมันหล่อลื่น สามารถละลายในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดน้ำมันหล่อลื่นดีขึ้น ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทำความสะอาดจึงน้อยลงตามไปด้วย นอกจากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทำความสะอาดจะลดลง การเพิ่มความดันยังส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นลดลง ซึ่งมีผลดีต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดในทางอุตสาหกรรม นอกจากนี้ พบว่าปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องใช้ในการล้างพลาสติกนั้นมากกว่าปริมาณที่คำนวณได้จากทฤษฎี ทั้งนี้เพราะเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ตามทฤษฎีแล้ว ประสิทธิภาพ

ในการทำความสะอาดน้ำมันออกจากเศษพลาสติกยังไม่ดีเท่าที่ควร ดังนั้นจึงต้องเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ให้มากขึ้น จนกระทั่งการเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้ในการทำความสะอาดนั้น ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาด จึงจะได้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้จริงในการทดลอง

นอกจากนี้ เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกทั้งสองชนิด คือ พลาสติกสีเขียวและพลาสติกสีเทา ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้ความดันเท่ากัน ที่ 120 และ 180 บาร์ พบว่า ประสิทธิภาพในการล้างน้ำมันหล่อลื่นออกจากพลาสติกทั้งสองชนิดนั้น มีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่อสภาวะที่ใช้ในการล้างเหมือนกัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ชนิดของพลาสติกที่แตกต่างกันนั้นไม่ได้ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการล้างเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

6. การทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยใช้ตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน)

จากการทดลองล้างเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมข้างต้น จะเห็นว่ามีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกค่อนข้างดี แต่เวลาที่ใช้ในการล้างค่อนข้างนาน ซึ่งเวลาในการล้างที่มากเกินไปนั้นเป็นอุปสรรคในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในทางอุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อลดเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาด จึงมีการทดลองเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ลงในกระบวนการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น เนื่องจากเมื่อสิ้นสุดกระบวนการทำความสะอาดพลาสติก ขั้นตอนการนำพลาสติกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการล้าง (Sample cylinder) จะมีอะซีโตนปนเปื้อนออกมากับพลาสติกเล็กน้อยจึงต้องทำการระเหยอะซีโตนออกจากพลาสติก นอกจากนี้ไอของอะซีโตนยังมีผลกระทบต่อระบบหายใจและเป็นสารอันตราย ดังนั้นในการงานวิจัยนี้ จึงมีความพยายามใช้อะซีโตนในปริมาณที่น้อย คือ 5 มิลลิเปอร์เซ็นต์ (การคำนวณหาปริมาตรที่เต็มแสดงในภาคผนวก ก4) จากนั้นทำการล้างพลาสติกที่ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ อัตราการไหลของของผสม (คาร์บอนไดออกไซด์ + อะซีโตน 5 มิลลิเปอร์เซ็นต์) ที่ 1 มิลลิเมตรต่อนาที่ จากตารางที่ 12 จะเห็นว่าชนิดของพลาสติกไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการล้าง

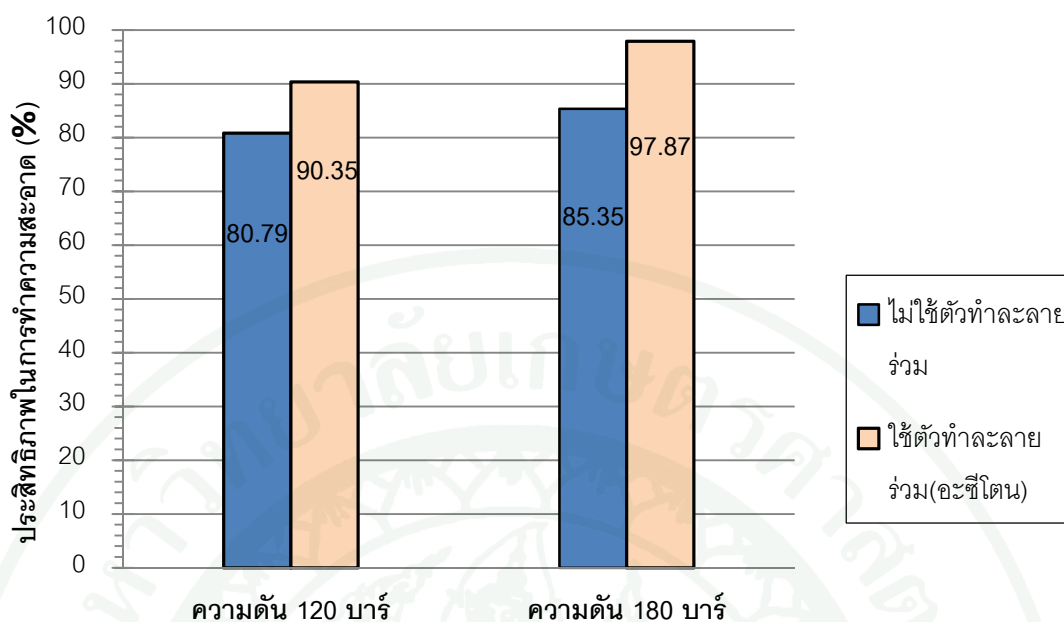
ดังนั้น จึงทำการล้างเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นเพียงชนิดเดียวคือ ขวดบรรจุ น้ำมันหล่อลื่น Castrol Magnatec (พลาสติกสีเขียว) ซึ่งผลการทดลองแสดงในตารางที่ 13

**ตารางที่ 13** ปริมาณของผสม (คาร์บอนไดออกไซด์ + อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) ที่ใช้ เวลาที่ใช้ ในการล้าง และประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกสีเขียวที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักพลาสติก (กรัม)	น้ำหนักน้ำมันที่เติม(กรัม)	ปริมาณของผสมที่ใช้ (มิลลิลิตร)	เวลาที่ใช้ในการล้าง (นาที)	ประสิทธิภาพในการล้าง (%)
120	50.673	5.310	350	325	90.35
180	50.217	5.087	350	337	98.87
180	50.424	5.265	250	205	95.45

จากผลการทดลองในตารางที่ 13 เมื่อเพิ่มความดันให้ระบบจาก 120 บาร์ เป็น 180 บาร์ และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่ใช้เท่ากัน คือ 350 มิลลิลิตร จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกเพิ่มขึ้น จึงสรุปได้ว่า เมื่อทำการเพิ่มความดันจะทำให้ประสิทธิภาพในการล้างดีขึ้น นอกจากนี้ที่ความดัน 180 บาร์ เมื่อทำการลดปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่มีตัวทำละลายร่วม เหลือ 250 มิลลิลิตร พบว่าประสิทธิภาพในการล้างลดลงเล็กน้อย ดังนั้นหากต้องการนำมาประยุกต์ใช้จริงในการล้างควรเลือกใช้ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 250 มิลลิลิตร เพื่อประหยัดต้นทุนในการล้าง เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการล้างพลาสติกน้อยกว่า แต่มีประสิทธิภาพในการล้างต่างกันเพียงเล็กน้อย

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบการล้างเศษพลาสติกจากขวดน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมและใช้ตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในภาพที่ 24



**ภาพที่ 24** ประสิทธิภาพในการล้างพลาสติก (%) เมื่อทำการล้างโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมและใช้ตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ที่ความดัน 120 และ 180 บาร์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 24 จะเห็นว่าที่ความดัน 120 บาร์ เมื่อทำการเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ลงในกระบวนการทำความสะอาดพลาสติก ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกเพิ่มขึ้นค่อนข้างมาก และที่ความดัน 180 บาร์ ผลการทดลองก็มีแนวโน้มตรงกันคือ เมื่อเติมตัวทำละลายร่วมลงไปในช่วงขั้นตอนของการทำความสะอาดพลาสติก พบว่า ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเพิ่มขึ้นอย่างมากเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมอะซีโตนลงในระบบ ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นและโมเลกุลของอะซีโตน ซึ่งทำให้โมเลกุลของอะซีโตน สามารถจับกับโมเลกุลของน้ำมันได้ อีกทั้งยังทำให้ความหนืดของน้ำมันลดลง ดังนั้นจึงทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของจันทวรรณและจีระภา (2552) ได้ทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมและใช้ตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ลงในเครื่องปฏิกรณ์ (Sample cylinder) ที่อุณหภูมิ 35 และ 45 องศาเซลเซียส และความดัน 120 150 และ 180 บาร์ พบว่าเมื่อเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน) ลงในกระบวนการ ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆความดัน นอกจากนี้ผลที่ได้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ

Lucas *et al.* (2007) ซึ่งทำการหาความสามารถในการละลายของน้ำมันเปลือกโอลีฟ (Olive husk oil) ในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่ใช้ตัวทำละลายร่วมและใช้ตัวทำละลายร่วม (เมทานอลและเอทานอล) ที่อุณหภูมิ 328-338 เคลวิน และความดัน 30-35 เมกะปาสคาล จากผลการทดลอง พบว่า ความสามารถในการละลายของน้ำมัน เพิ่มขึ้นเมื่อเติมตัวทำละลายร่วม (เมทานอลและเอทานอล) ลงในระบบ

#### 7. อัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Rate, MFR)

หลังจากกระบวนการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งที่เติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) และไม่เติมตัวทำละลายร่วมลงในกระบวนการที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสและความดัน 120 และ 180 บาร์ เศษพลาสติกที่ผ่านการทำความสะอาด จะถูกนำมาวัดอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow rate, MFR) ซึ่งการวัดอัตราการไหลของพลาสติกนั้นทำได้โดยนำพลาสติกฉีดผ่านเครื่อง Melt Flow Indexer ในงานวิจัยนี้ทำการวัดอัตราการไหลของเศษพลาสติกที่ได้จากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นทั้ง 2 ชนิด คือ ขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น Castrol Magnatec (พลาสติกสีเขียว) และ ขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น PTT Performa (พลาสติกสีเทา) ซึ่งอัตราการไหลของพลาสติกนั้นแสดงในตารางที่

ตารางที่ 14 อัตราการไหลของพลาสติกชีว และพลาสติกเททาที่ผ่านกระบวนการทำความ  
 สะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตโดยไม่มีการเติมตัวทำละลาย  
 ร่วมและมีการเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) ที่อุณหภูมิ 35 องศา  
 เซลเซียส

ชนิดของพลาสติก	ตัวอย่าง	สภาวะในการทำความ สะอาดพลาสติก	MFR (กรัมต่อ 10 นาที)
พลาสติกชีว	1	ล้างโดยใช้เฮกเซน	0.46
	2	ล้างที่ 120 บาร์ โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub>	0.53
	3	ล้างที่ 180 บาร์ โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub>	0.48
	4	ล้างที่ 120 บาร์ โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub> (เติมอะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์)	0.57
	5	ล้างที่ 180 บาร์ โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub> (เติมอะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์)	0.54

ตารางที่ 14 (ต่อ)

ชนิดของพลาสติก	ตัวอย่าง	สภาวะในการทำความเข้าใจ สถานะพลาสติก	MFR (กรัมต่อ 10 นาที)
พลาสติกสีเทา	6	ล้างโดยใช้เฮกเซน	0.42
	7	ล้างที่ 120 บาร์ โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub>	0.40
	8	ล้างที่ 180 บาร์ โดยใช้ SC-CO <sub>2</sub>	0.41

จากตารางที่ 14 แสดงให้เห็นว่า ค่าอัตราการไหลของเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นที่นำมาศึกษานั้นมีอัตราการไหลมากกว่าอัตราการไหลมาตรฐานของพลาสติก HDPE ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 0.4 (ASTM D1238, 2004) เนื่องจากเศษพลาสติกที่นำมาใช้นั้น เป็นพลาสติกที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปภายใต้อุณหภูมิและความดันที่ค่อนข้างสูง จึงมีผลทำให้อัตราการไหลเปลี่ยนแปลงจากค่ามาตรฐานเล็กน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลของพลาสติกสีเขียวในตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเป็นพลาสติกที่ถูกทำความสะอาดโดยใช้เฮกเซน กับพลาสติกในตัวอย่างที่ 2 ซึ่งผ่านการกระบวนการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์ และตัวอย่างที่ 3 ซึ่งผ่านกระบวนการทำความสะอาดที่อุณหภูมิเดียวกัน ความดัน 180 บาร์ จะเห็นว่า อัตราการไหลของตัวอย่างที่ 1 และตัวอย่างที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงถึงการทำความสะอาดน้ำมันออกจากพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่อัตราการไหลของพลาสติกตัวอย่างที่ 3 มีค่ามากกว่าอัตราการไหลของตัวอย่างที่ 1 เล็กน้อย แสดงว่าการทำความสะอาดน้ำมันออกจากพลาสติกทำได้ค่อนข้างดี และเมื่อวิเคราะห์ผลของตัวอย่างที่ 4 และ 5 ซึ่งมีการเติมอะซีโตน 5 มิลลิเปอร์เซ็นต์ลงในกระบวนการทำความสะอาด พบว่า ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการทำความสะอาดจะดีขึ้น แต่อัตราการไหลของพลาสติก

เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากการที่โมเลกุลของอะซีโตนเข้าไปอยู่ในรูพรุนของพลาสติก ทำให้อัตราการไหลที่ได้มีค่ามากกว่าอัตราการไหลปกติ นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลของพลาสติกสีเทาในตัวอย่างที่ 1 ซึ่งเป็นพลาสติกที่ถูกทำความสะอาดโดยใช้เฮกเซน กับพลาสติกในตัวอย่างที่ 2 ซึ่งผ่านการกระบวนการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์ และตัวอย่างที่ 3 ซึ่งผ่านการกระบวนการทำความสะอาดที่อุณหภูมิเดียวกัน ความดัน 180 บาร์ จะเห็นว่า อัตราการไหลของตัวอย่างทั้ง 3 นั้น มีค่าใกล้เคียงกันมาก

จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของเศษพลาสติกที่ผ่านการล้างด้วยเฮกเซนเพียงอย่างเดียวและ อัตราการไหลของเศษพลาสติกที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นการทำความสะอาดพลาสติกโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้แทนการล้างด้วยตัวทำความสะอาดชนิดอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ได้แก่ อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ 0.5 ถึง 1 มิลลิลิตรต่อนาที ความดันที่ 120 150 165 180 และ 190 บาร์ และ อุณหภูมิ 35 40 และ 45 องศาเซลเซียส จากนั้นนำข้อมูลความสามารถในการละลายมาหาสมการที่เหมาะสม เพื่อใช้ทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> จากนั้นได้เลือกอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม มาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วย SC-CO<sub>2</sub> โดยไม่เติมตัวทำละลายร่วม และเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์) โดยเลือกขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น 2 ชนิด คือ ขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น Castrol Magnatec (พลาสติกสีเขียว) และ ขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น PTT Performa (พลาสติกสีเทา) แล้วทำการเปรียบเทียบว่า ชนิดของพลาสติกนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการล้างพลาสติกหรือไม่ สุดท้ายเมื่อกระบวนการล้างเสร็จสิ้นนำพลาสติกทั้งสองชนิดมาวัดอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Rate, MFR) โดยเครื่อง Melt Flow Indexer เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติก ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อัตราการไหลที่เหมาะสมในการหาค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> คือ 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากเมื่อทำการทดลองโดยใช้อัตราการไหลของ CO<sub>2</sub> เท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที พบน้ำมันหล่อลื่นจำนวนค่อนข้างมากปนเปื้อนในน้ำที่บรรจุอยู่ในบีกเกอร์ ดังนั้นค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> ที่ได้จึงเป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง ทั้งนี้เพราะน้ำมันที่สกัดออกมาได้ไม่ใช่ปริมาณน้ำมันที่สามารถละลายใน SC-CO<sub>2</sub> แต่เป็นการลบน้ำมันออกมาจากระบบ

2. เมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น ในทุกๆอุณหภูมิ ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย สาเหตุเกิดจากการเพิ่มความดันจะส่งผลให้ความหนาแน่นของ SC-CO<sub>2</sub> เพิ่มขึ้น ทำให้โมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นถูกล้อมรอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น การเกิดอันตรกิริยาซึ่งกันและกันสามารถเกิดได้ดีขึ้นเช่นเดียวกัน

3. ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส เกิดจุด Crossover ที่ความดัน 165 บาร์ ทำให้การเพิ่มอุณหภูมิในช่วงความดันที่ต่ำกว่าจุด Crossover ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นมีค่าลดลง เนื่องจากผลของความหนาแน่นของ CO<sub>2</sub> แสดงอิทธิพลเหนือผลของความดันไอของตัวถูกละลาย และการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงความดันสูงกว่าจุด Crossover จะทำให้ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นเกิดได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของความดันไอที่มีผลต่อความสามารถในการละลายที่ชัดเจนยิ่งขึ้น ทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น ตามไปด้วย

4. จากข้อมูลค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น พบว่า สมการของ Charstil เป็นสมการที่เหมาะสมที่สุดในการทำนายค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 40 และ 45 องศาเซลเซียส

5. ในกระบวนการทำความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วย SC-CO<sub>2</sub> เลือกอุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม คือ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ พบว่า ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกเพิ่มขึ้น เมื่อความดันที่ใช้เพิ่มขึ้น และชนิดของพลาสติกไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติก นอกจากนี้ ยังพบว่า การเพิ่มความดันทำให้ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่ใช้ในการทำความสะอาดลดลง จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดลดน้อยลงตามไปด้วย

6. เมื่อเติมอะซีโตน 5 มิลลิเปอร์เซ็นต์ลงในปั๊มก่อนเริ่มต้นกระบวนการล้างที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ พบว่า การเติมตัวทำละลายร่วมส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกดีขึ้น ปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่ใช้ในกระบวนการทำความสะอาดและเวลาที่ใช้ในการทำความสะอาดมีค่าลดลง ตามไปด้วย

7. เมื่อนำเศษพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วย SC-CO<sub>2</sub> โดยไม่เติมตัวทำละลายร่วม และเติมตัวทำละลายร่วม (อะซีโตน 5 มิลลิเปอร์เซ็นต์) ไปทดสอบค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate, MFR) พบว่า อัตราการไหลของพลาสติกที่ผ่านการ

ล้างด้วยเฮกเซน และอัตราการไหลของพลาสติกที่ผ่านการทำความสะอาดด้วย SC-CO<sub>2</sub> มีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

### ข้อเสนอแนะ

1. นอกเหนือจากปัจจัยที่ได้ทำการศึกษา คือ ผลของอัตราการไหล ผลของความดัน และผลของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> อาจมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการละลาย เช่น อัตราส่วนของตัวทำละลายร่วม จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป
2. ควรเปรียบเทียบชนิดของตัวทำละลายร่วมชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากอะซีโตน ที่มีผลต่อความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต
3. ควรมีการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตชนิดอื่นที่ไม่ใช่คาร์บอนไดออกไซด์ แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบความสามารถในการละลายที่ได้ รวมไปถึงประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเศษพลาสติก
4. ควรทำการศึกษาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นใน SC-CO<sub>2</sub> โดยใช้น้ำมันที่ปนเปื้อนกับเศษพลาสติก (โดยไม่ทำการล้างพลาสติกด้วยเฮกเซนก่อน) เพื่อศึกษาว่าค่าที่ได้มีค่าแตกต่างจากงานวิจัยนี้หรือไม่อย่างไร
5. การล้างพลาสติกโดยใช้อะซีโตนเป็นตัวทำละลายร่วม พบว่า เวลาที่ใช้ในการล้างและปริมาณ CO<sub>2</sub> ที่ใช้ลดลง อย่างไรก็ตาม ควรศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการใช้อะซีโตน และควรคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้อะซีโตนในโรงงานอุตสาหกรรมด้วย
6. ควรทำการศึกษาว่า MFR ที่เหมาะสมควรมีค่าเท่าไร จึงสามารถนำไปใช้งานได้ในกระบวนการรีไซเคิลพลาสติก

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ปกรณ โสภาประกาศิต และมัณฑนา โสภาประกาศิต. 2551. **พลาสติกกับปัญหาสิ่งแวดล้อม.**  
แหล่งที่มา <http://www.vcharkarn.com/varticle/18774>, 25 ตุลาคม 2550.

ประเสริฐ เทียนนิมิต. 2544. **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น.** ซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

จันทวรรณ ปราบปรึ และ จีระภา พรหมจรรย์. 2552. **ความสามารถในการละลายของ  
น้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต.** โครงการวิจัย  
ปริญญาตรี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มานพ เจริญไชยตระกูล. 2553. **เทคโนโลยีของไหลที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตกับอุตสาหกรรม  
ยา.** พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักส่งเสริมและฝึกอบรม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุภิญญา แสงเฟื่อง และอรนุช กังแฮ. 2551. **การใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุด  
วิกฤตทำความสะอาดพลาสติกที่ปนเปื้อนน้ำมันหล่อลื่น.** โครงการวิจัยปริญญาตรี.  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Adachi, Y. and B.C.Y. Lu. 1983. Supercritical fluid extraction with carbon dioxide and ethylene. *Fluid Phase Equilib.* 14: 147–156.

Aim, K. and M. Fermeglia. 2003. Solubility of solids and liquids in supercritical fluids, pp. 493–555. *In* G.T. Hefter and R.P.T. Tomkins., eds. *The Experimental Determination of Solubilities.* Wiley Sons, New Jersey.

Anitescu, G. and L.L. Tavlarides. 1997. Solubilities of solids in supercritical fluids: I. New quasistatic experimental method for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) + pure fluids. *J Supercrit Fluid.* 10: 175-189.

The American Society for Testing and Materials. 2004. **Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer**. ASTM D1238-04. PA, USA.

Avezado, A.B.A., T.G. Kieckbush, A.K. Tashima, R.S. Mohamed, P. Mazzafera and S.A.B. Vieira de Melo. 2008. Extraction of green coffee oil using supercritical carbon dioxide. *J Supercrit Fluid*. 44: 186-192.

Bjorklund, E., C. Turner, L. Karlsson and L. Mathiasson. 1996. The influence of oil extractability and metal part geometry in degreasing processes using supercritical carbon dioxide. *J Supercrit Fluid*. 9: 56-60.

Bristow, S., B. Y. Shekunov and P. York. 2001. Solubility Analysis of Drug Compounds in Supercritical Carbon Dioxide Using Static and Dynamic Extraction Systems. *Ind Eng Chem Res*. 40(7): 1732–1739.

Brunner, G. 1994. Gas extraction, pp. 117. *In* H. Baumgertel, Franck E. U. and Grunbein W., eds. **An Introduction to Fundamentals of Supercritical Fluids and the Application to Separation Process**. New York.

Chrastil, J. 1982. Solubility of solids and liquids in supercritical gases. *J PHYS CHEM-US*. 86(15): 3016–3021.

Chattopadhyay, P. and R.B. Gupta. 2001. Production of antibiotic nanoparticles using supercritical CO<sub>2</sub> as antisolvent with enhanced mass transfer. *Ind Eng Chem Res*. 40: 3530-3539.

- Chattopadhyay, P. and R.B. Gupta. 2002. Supercritical CO<sub>2</sub> based production of magnetically responsive micro- and nanoparticles for drug targeting. **Ind Eng Chem Res.** 41: 6049-6058.
- Christov, M. and R. Dohrn. 2002. High-pressure fluid phase equilibria: Experimental methods and systems investigated (1994–1999). **Fluid Phase Equilib.** 202(1): 153–218.
- Correa, A.P.A., C.A. Peixoto, L.A.G. Goncalves and F.A. Cabral. 2008. Fractionation of fish oil with supercritical carbon dioxide. **J FOOD ENG.** 88: 381–387.
- Crampton, C., G. Charbit and E. Neau. 1999. **J Supercrit Fluid.** 16(1): 11–20.
- Dale, S. F.K. and K.E. Laintz. 1998. **Supercritical Fluid Cleaning; Fundamentals, Technology and Applications.** Noyes Publications, New Jersey.
- Del-Valle, J. M. and J. M. Aguilera. 1988. An improved equation for predicting the solubility of vegetable oils in supercritical CO<sub>2</sub>. **Ind Eng Chem.** 27(8): 1551–1553.
- Dohrn, R. and G. Brunner. 1995. High-pressure fluid-phase equilibria: Experimental methods and systems investigated (1988–1993). **Fluid Phase Equilib.** 106: 213–282.
- Donelian, A., L. Carlson, T. Lopes, R. Machado. 2009. Comparison of extraction of patchouli (*Pogostemon cablin*) essential oil with supercritical CO<sub>2</sub> and by steam distillation. **J Supercrit Fluid.** 48: 15-20.
- Ferreira, S. R. S., Z.L. Nikolov, L. K. Doraiswamy, M.A.A. Meireles and A.J. Petenate. 1998. Supercritical fluid extraction of black pepper (*Piper nigrum L.*) essential oil. **J Supercrit Fluid.** 14: 235-245.

- Follegatti-Romero, L.A., C.R. Piantino, R. Grimaldi and F.A. Cabral. 2009. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of omega-3 rich oil from Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds. *J Supercrit Fluid.* 49: 323-329.
- Foster, N.R., H. Singh, S.L.J. Yun, D.L. Tomasko and S.J. Macnaughton. 1993. Polar and nonpolar cosolvent effects on the solubility of cholesterol in supercritical fluids. *Ind. Eng. Chem.Res.* 32: 2849-2853.
- Francis, A.W. 1954. Ternary systems of liquid carbon dioxide. *J Phys Chem.* 58(12): 1099-1114.
- Francisco, J.C. and B. Sivik. 2002. Solubility of three monoterpenes, their mixtures and eucalyptus leaf oils in dense carbon dioxide. *J Supercrit Fluid.* 23: 11-19.
- Friedrich, J.P., G.R. List and A.J. Heakin. 1982. Petroleum-free extraction of oil from soybeans with supercritical CO<sub>2</sub>. *JAACS.* 59(7): 288-292.
- Fu, H. and M.A. Matthews. 1999. Comparison between supercritical carbon dioxide extraction and aqueous surfactant washing of an oily machining waste. *J Hazard Mater.* 67(2): 197-213.
- Galia, A., A. Argentino, O. Scialdone and G. Filardo. 2002. A new simple static method for the determination of solubilities of condensed compounds in supercritical fluids. *J Supercrit Fluid.* 24: 7-17.
- Grosso, C., V. Ferraro, A.C. Figueiredo, J.G. Barroso, J.A. Coelho, A.M. Palavra. 2008. Supercritical carbon dioxide extraction of volatile oil from Italian coriander seeds. *Food Chem.* 111: 197-203.

- Gupta, R. B. and K. P. Johnston. 2006. Supercritical fluid separation. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. McGraw Hill, New York.
- Gupta, R. B. and U. B. Kompella. 2006. **Nanoparticle Technology for Drug Delivery**. Taylor and Francis, New York.
- Hassan, M.N., N.N.Ab. Rahman, M.H. Ibrahim and O.A.K. Mohd. 2000. Simple fractionation through the supercritical carbon dioxide extraction of palm kernel oil. *Separation and Purification Technology*. 19: 113-120.
- Hong, F., M.A. Matthews and L.S. Warner. 1998. Recycling steel from grinding swarf. **Waste Management**. 18: 321-329.
- Hoyer, G.G. 1985. Extraction with Supercritical Fluids: why, how and so what. **CHEM TECH**. 15: 440-448.
- Jokic S., S. Svilovic, Z. Zekovic, S. Vidovic and D. Velic. 2011. Solubility and kinetics of soybean oil and fatty acids in supercritical CO<sub>2</sub>. *Eur J Lipid Sci Technol*. 113: 644-651.
- Knox, D. E. 2005. Solubilities in supercritical fluids. **Pure App Chem**. 77(3): 513-530.
- Machmudah, S., Y. Kawahito, M. Sasaki and M. Goto. 2007. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction of rosehip seed oil: Fatty acids composition and process optimization. **J Supercrit Fluid**. 41: 421-428.
- Marsal, A., P.J. Celma, J. Cot and M. Cequier. 1999. Supercritical CO<sub>2</sub> extraction as a clean degreasing process in the leather industry. **J Supercrit Fluid** 16: 217-223.

- Mamata, M. 2000. Natural extracts using supercritical carbon dioxide. **CRC Press**, New York.
- McHugh, M.A. and V.J. Krukonis. 1994. **Supercritical Fluid Extraction**. Butterworth-Heinemann, Boston.
- Özkal, S. G. 2004. **Supercritical Carbon Dioxide Extraction of Apricot Kernel Oil**. Ph.D. Thesis, The Middle East Technical University.
- Özkal, S. G., U. Salgın and M.E. Yener. 2005. Supercritical carbon dioxide extraction of hazelnut oil. **J FOOD ENG.** 69: 217-223.
- Pauchon V., Z. Cisse, M. Chavret and J. Jose. 2004. A new apparatus for the dynamic determination of solid compounds solubility in supercritical carbon dioxide: Solubility determination of triphenylmethane. **J Supercrit Fluid.** 32: 115–121.
- Phase diagram of CO<sub>2</sub>. 2008. Available source:  
<http://www.bautforum.com/showthread.php/80346-Can-C02-be-converted-into-liquid>, October 23, 2008.
- Rizvi, S. S. H., J. A. Daniels, A.L. Benado and J. A. Sollweg. 1986. Supercritical Fluid Extraction: Operating Principles and Food Applications. **Food Technol.** 40: 57-64
- Salgın U., O. Döker and A. Çalimli. 2006. Extraction of sunflower oil with supercritical CO<sub>2</sub>: Experiments and modeling. **J Supercrit Fluid.** 38. 326-331.

- Sherman, G., S. Shenoy, R. A. Weiss and C. Erkey. 2000. A Static Method Coupled with Gravimetric Analysis for the Determination of Solubilities of Solids in Supercritical Carbon Dioxide. **Ind Eng Chem Res.** 39(3): 846–848.
- Sovová, H., M. Zarevucka, M. Vacek and K. Stransky. 2001. Solubility of two vegetable oils in supercritical CO<sub>2</sub>. **J Supercrit Fluid.** 20: 15-28.
- Sung, H. and J. J. Shim. 1999. Solubility of C. I. Disperse Red 60 and C. I. Disperse Blue 60 in Supercritical Carbon Dioxide. **J Chem Eng Data.** 44(5): 985–989
- Thote, A. and R. B. Gupta. 2005. Formation of nanoparticles of a hydrophilic drug using supercritical carbon dioxide and microencapsulation for sustained release. **Nanomed : Nanotechnol Biol and Med.** 1(1): 85–90.
- Tae Kwon K., Md.S. Uddin, G.W. Jung, J.E. Sim, S.M. Lee, H.C. Woo and B.S. Chun. 2011. Solubility of red pepper (*Capsicum annum*) oil in near and supercritical carbon dioxide and quantification of capsaicin. **Korean J Chem Eng.** 28(6): 1433-1438.





### 1. การคำนวณหาความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต กรณีที่ไม่มีตัวทำละลายร่วม

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 14

$$W_i = \frac{W_b - W_a}{V_{CO_2}} \quad (14)$$

โดยที่

$W_i$  = ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะเหนือจุดวิกฤต

$W_a$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 ก่อนการทดลอง (พิจารณาจากภาพที่ 13)

$W_b$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 หลังการทดลอง

$V_{CO_2}$  = ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 100 มิลลิลิตร ที่ใช้ไป

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์ ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เท่ากับ 100 มิลลิลิตร  
การทดลองครั้งที่ 1

- น้ำหนักก่อนการทดลอง ( $W_a$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 275.463 + 126.920 = 402.383 \quad \text{กรัม}$$

- น้ำหนักหลังการทดลอง ( $W_b$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 275.855 + 127.311 = 403.166 \quad \text{กรัม}$$

จากสมการที่ 14

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ( $W_1$ )

$$= \frac{W_b - W_a}{V_{CO_2}}$$

$$= \frac{403.166 - 402.383}{100}$$

$$= 7.83 \times 10^{-3} \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร}$$

### การทดลองครั้งที่ 2

- น้ำหนักก่อนการทดลอง ( $W_a$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 275.496 + 126.925 = 402.421 \text{ กรัม}$$

- น้ำหนักหลังการทดลอง ( $W_b$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 276.200 + 127.028 = 403.228 \text{ กรัม}$$

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ( $W_2$ )

$$= \frac{W_b - W_a}{V_{CO_2}}$$

$$= \frac{403.228 - 402.421}{100}$$

$$= 8.07 \times 10^{-3} \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร}$$

### การทดลองครั้งที่ 3

- น้ำหนักก่อนการทดลอง ( $W_a$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 276.430 + 112.685 = 389.115 \text{ กรัม}$$

- น้ำหนักหลังการทดลอง ( $W_b$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 277.168 + 112.750 = 389.918 \text{ กรัม}$$

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ( $W_3$ )

$$= \frac{W_b - W_a}{V_{CO_2}}$$

$$= \frac{389.918 - 389.115}{100}$$

$$= 8.03 \times 10^{-3} \text{ กรัมต่อมิลลิลิตร}$$

#### การทดลองครั้งที่ 4

- น้ำหนักก่อนการทดลอง ( $W_a$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 275.503 + 112.670 = 388.173 \quad \text{กรัม}$$

- น้ำหนักหลังการทดลอง ( $W_b$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง

$$= 275.979 + 112.967 = 388.946 \quad \text{กรัม}$$

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ( $W_4$ )

$$= \frac{W_b - W_a}{V_{CO_2}}$$

$$= \frac{388.946 - 388.173}{100}$$

$$= 7.73 \times 10^{-3} \quad \text{กรัมต่อมิลลิลิตร}$$

ดังนั้น

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นเฉลี่ย ( $W_{ave}$ )

$$= \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4}{4}$$

$$= \frac{(7.83 + 8.07 + 8.03 + 7.73) \times 10^{-3}}{4}$$

$$= 7.91 \times 10^{-3} \quad \text{กรัมต่อมิลลิลิตร}$$

การเปลี่ยนหน่วยความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นจาก กรัมต่อมิลลิลิตร เป็น กรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์

โดยที่ ความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์

$$= 0.831 \quad \text{กรัมต่อมิลลิลิตร}$$

ดังนั้น

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ( $S$ )

$$= \frac{7.91 \times 10^{-3}}{0.831}$$

$$= 9.52 \times 10^{-3} \text{ กรัมต่อกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

$$= 9.52 \text{ กรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

## 2. การคำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ต้องใช้ในการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น

ตัวอย่างการคำนวณ

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์

$$= 0.791 \text{ กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร}$$

ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 180 บาร์

$$= 1.048 \text{ กรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์}$$

ต้องใช้เศษพลาสติกสีเขียวจำนวน 50 กรัม ต้องการเติมน้ำมันหล่อลื่นลงในเครื่องปฏิกรณ์จำนวน 5 กรัม

ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์

น้ำมันหล่อลื่นสามารถละลายได้ 0.791 กรัม ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 100 มิลลิลิตร

ถ้าน้ำมันหล่อลื่นสามารถละลายได้ 5.249 กรัม ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์

$$= \frac{100 \times 5.249}{0.791} = 663.59 \text{ มิลลิลิตร}$$

ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 180 บาร์

น้ำมันหล่อลื่นสามารถละลายได้ 1.048 กรัม ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ 100 มิลลิลิตร

ถ้าน้ำมันหล่อลื่นสามารถละลายได้ 5.134 กรัม ต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์

$$= \frac{100 \times 5.134}{1.048} = 489.89 \text{ มิลลิลิตร}$$

### 3. ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

การคำนวณหาประสิทธิภาพในการทำความสะอาดพลาสติกจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต สามารถคำนวณจากสมการที่ 15

$$Y = \frac{W_b - W_a}{W_{oil}} \times 100 \% \quad (15)$$

โดยที่

- $Y$  = ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดขวดน้ำมันหล่อลื่น (%)  
 $W_a$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 ก่อนการทดลอง (พิจารณาภาพที่ 13)  
 $W_b$  = น้ำหนักของวาล์ว V-4 และตัวกรอง F-2 หลังการทดลอง  
 $W_{oil}$  = ปริมาณน้ำมันที่เติมลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสกัด

ตัวอย่างการคำนวณ

ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 บาร์

การชั่งน้ำหนักครั้งที่ 1

- น้ำหนักก่อนการทดลอง ( $W_{a1}$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง  

$$= 275.589 + 126.756 = 402.345 \quad \text{กรัม}$$
- น้ำหนักหลังการทดลอง ( $W_{b1}$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง  

$$= 276.246 + 127.450 = 403.696 \quad \text{กรัม}$$

การชั่งน้ำหนักครั้งที่ 2

- น้ำหนักก่อนการทดลอง ( $W_{a2}$ ) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง  

$$= 274.818 + 112.651 = 387.469 \quad \text{กรัม}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{- น้ำหนักหลังการทดลอง (} W_{b2} \text{) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง} \\
 & \qquad \qquad \qquad = 275.361+113.087 = 388.448 \quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

### การชั่งน้ำหนักครั้งที่ 3

$$\begin{aligned}
 & \text{- น้ำหนักก่อนการทดลอง (} W_{a3} \text{) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง} \\
 & \qquad \qquad \qquad = 275.568+126.771 = 402.339 \quad \text{กรัม} \\
 & \text{- น้ำหนักหลังการทดลอง (} W_{b3} \text{) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง} \\
 & \qquad \qquad \qquad = 276.146+127.191 = 403.337 \quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

### การชั่งน้ำหนักครั้งที่ 4

$$\begin{aligned}
 & \text{- น้ำหนักก่อนการทดลอง (} W_{a4} \text{) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง} \\
 & \qquad \qquad \qquad = 274.818+112.651 = 387.469 \quad \text{กรัม} \\
 & \text{- น้ำหนักหลังการทดลอง (} W_{b4} \text{) ได้จากน้ำหนักวาล์ว+น้ำหนักตัวกรอง} \\
 & \qquad \qquad \qquad = 275.309+113.073 = 388.382 \quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักรวมก่อนการทดลอง (} W_a \text{)} &= W_{a1} + W_{a2} + W_{a3} + W_{a4} \\
 &= 402.345+387.469+402.339+387.469 \\
 &= 1579.622 \quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักรวมหลังการทดลอง (} W_b \text{)} &= W_{b1} + W_{b2} + W_{b3} + W_{b4} \\
 &= 403.696+388.448+403.337+388.382 \\
 &= 1583.863 \quad \text{กรัม}
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ 15

$$\text{ประสิทธิภาพในการทำความสะอาด} \quad Y = \frac{W_b - W_a}{W_{oil}} \times 100 \%$$

$$= \frac{1583.863 - 1579.622}{5.249} \times 100 \%$$

$$= 80.79 \%$$

4. การคำนวณหาปริมาตรของอะซีโตนที่เติมลงในบิ๊มเพื่อทำความสะดวกพิเศษพลาสติก จากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตและเติมตัวทำละลายร่วม

ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์

อะซีโตนมีความหนาแน่น ( $\rho_a$ ) เท่ากับ 0.791 กรัมต่อมิลลิลิตร

ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 60 บาร์

คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนาแน่น ( $\rho_{CO_2}$ ) เท่ากับ 0.948 กรัมต่อมิลลิลิตร

จาก โมลเปอร์เซ็นต์ =  $\frac{\text{โมลอะซีโตน}}{\text{โมลอะซีโตน} + \text{โมลคาร์บอนไดออกไซด์}} \times 100 \%$

$$5 \% = \frac{\frac{\rho_a V_a}{Mw_a}}{\frac{\rho_a V_a}{Mw_a} + \frac{\rho_{CO_2} (266 - V_a)}{Mw_{CO_2}}} \times 100 \%$$

$$0.05 = \frac{\frac{0.791 V_a}{58.08}}{\frac{0.791 V_a}{58.08} + \frac{0.948 (266 - V_a)}{44.01}}$$

$$0.05 = \frac{0.0136 V_a}{0.0136 V_a + 0.0125 (266 - V_a)}$$

$$0.05 = \frac{0.0136 V_a}{5.719 - 0.0079 V_a}$$

$$0.28595 - 0.000395 V_a = 0.0136 V_a$$

$$0.28595 = 0.013995 V_a$$

$$V_a = 20.43$$

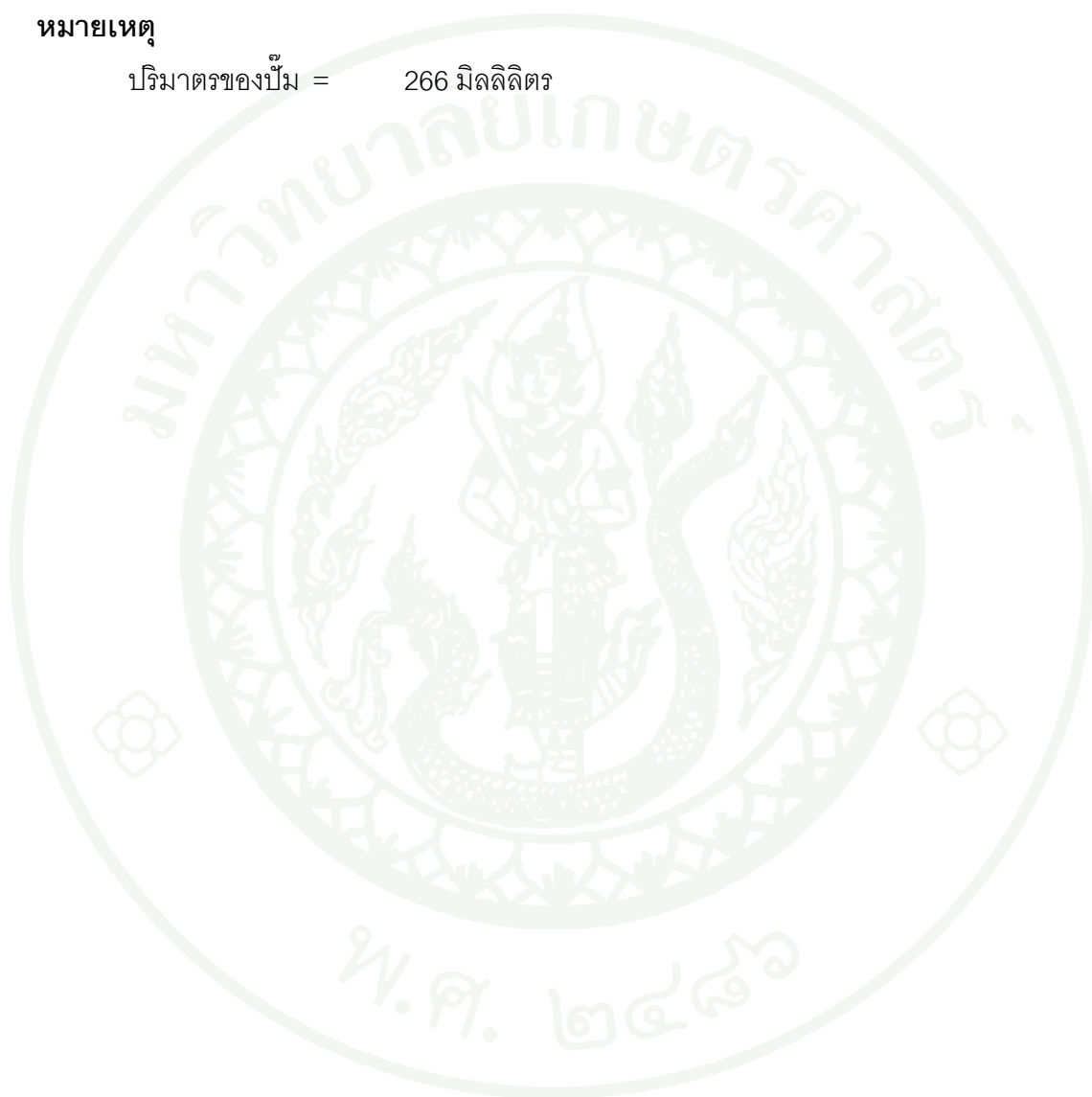
ดังนั้น

ปริมาตรของอะซีโตนที่ต้องเติม เท่ากับ 20.43 มิลลิลิตร

ปริมาตรของคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 245.57 มิลลิลิตร

หมายเหตุ

ปริมาตรของน้ำ = 266 มิลลิลิตร





ภาคผนวก ข  
ข้อมูลผลการทดลอง

1. ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของคาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อน การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลัง การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวม ก่อนการ ทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวม หลังการทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
120	275.463	126.920	275.855	127.311	402.383	403.166	0.783
	275.496	126.925	276.200	127.028	402.421	403.228	0.807
	276.430	112.685	277.168	112.750	389.115	389.918	0.803
	275.503	112.67	275.979	112.967	388.173	388.946	0.773
150	274.777	127.021	275.260	127.440	401.798	402.700	0.902
	275.640	112.684	276.166	113.076	388.324	389.242	0.918
	275.517	126.850	276.108	127.199	402.367	403.307	0.940
	275.504	126.914	276.029	127.333	402.418	403.362	0.944

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อน การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลัง การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวม ก่อนการ ทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวม หลังการ ทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
165	275.614	112.687	276.167	113.095	388.301	389.262	0.961
	274.743	126.759	275.269	127.220	401.502	402.489	0.987
	275.443	112.69	276.088	113.066	388.133	389.074	0.941
	274.885	127.043	275.344	127.498	401.928	402.842	0.914
180	275.646	126.866	276.150	127.442	402.512	403.592	1.080
	274.799	126.824	275.164	127.496	401.623	402.660	1.037
	275.630	112.762	276.169	113.254	388.392	389.423	1.031
	275.090	127.013	275.618	127.530	402.103	403.148	1.045

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	น้ำหนัก กัวล์ว ก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อน การทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก กัวล์ว หลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลัง การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวม ก่อนการ ทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวม หลังการ ทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
190	275.646	112.667	276.312	113.128	388.313	389.440	1.127
	274.885	126.869	275.514	127.364	401.754	402.878	1.124
	274.723	126.842	275.486	127.238	401.565	402.724	1.159
	276.285	112.717	276.895	113.254	389.002	390.149	1.147

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต(กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของ คาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อน การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลัง การทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวม ก่อนการ ทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวม หลังการ ทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
120	274.680	126.818	275.197	126.847	401.498	402.044	0.546
	276.972	112.679	277.419	112.743	389.651	390.162	0.511
	274.675	126.810	275.195	126.836	401.485	402.031	0.546
	276.586	112.670	277.085	112.724	389.256	389.809	0.553
150	276.385	112.662	276.872	112.969	389.047	389.841	0.794
	274.846	126.846	275.252	127.208	401.692	402.460	0.768
	276.396	112.670	276.887	112.951	389.066	389.838	0.772
	276.589	112.736	277.265	112.803	389.325	390.068	0.743

ตารางผนวกที่ ๗2 (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อน การทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลัง การทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
165	275.09	126.895	275.602	127.330	401.985	402.932	0.947
	275.811	112.707	276.399	113.054	388.518	389.453	0.935
	275.814	112.667	275.347	114.090	388.481	389.437	0.956
	276.624	112.774	277.201	113.137	389.398	390.338	0.940
180	274.870	126.858	275.480	127.225	401.728	402.705	0.977
	275.991	112.788	276.475	113.306	388.779	389.781	1.002
	274.822	126.847	275.207	127.429	401.669	402.636	0.970
	275.052	126.836	275.458	127.340	401.888	402.798	0.910

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อน การทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลัง การทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
190	275.088	126.794	275.703	127.204	401.882	402.907	1.025
	275.826	112.685	276.517	113.003	388.511	389.520	1.009
	275.044	126.774	276.689	126.199	401.818	402.888	1.070
	275.510	112.666	275.373	113.861	388.176	389.234	1.058

ตารางผนวกที่ ข3 ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (กรัมต่อ 100 มิลลิลิตรของ คาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อน การทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลัง การทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
120	274.898	126.783	275.328	126.816	401.681	402.144	0.463
	276.383	112.659	276.805	112.706	389.042	389.511	0.469
	274.918	126.812	275.337	126.822	401.73	402.159	0.429
	276.396	112.716	276.874	112.677	389.112	389.551	0.439
150	276.622	112.67	277.151	112.892	389.292	390.043	0.751
	276.425	112.664	276.818	113.031	389.089	389.849	0.760
	275.508	112.650	276.013	112.899	388.158	388.912	0.754
	274.976	126.754	275.408	127.045	401.73	402.453	0.723

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อน การทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลัง การทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
165	275.516	112.827	276.124	113.021	388.343	389.145	0.802
	274.904	126.767	275.462	126.987	401.671	402.449	0.778
	274.889	126.763	275.327	127.125	401.652	402.452	0.800
	275.722	126.754	276.248	126.974	402.476	403.222	0.746
180	274.691	126.796	275.131	127.358	401.487	402.489	1.002
	276.636	112.689	276.990	113.376	389.325	390.366	1.041
	274.904	126.811	275.475	127.246	401.715	402.721	1.006
	274.852	126.834	275.368	127.322	401.686	402.69	1.004

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการ ทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อน การทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลัง การทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
190	275.971	112.674	276.486	113.237	388.645	389.723	1.078
	274.883	126.783	275.367	127.344	401.666	402.711	1.045
	275.62	112.652	276.198	113.141	388.272	389.339	1.067
	274.702	126.782	274.255	128.331	401.484	402.586	1.102

**ตารางผนวกที่ ข4** ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่  
สภาวะเหนือจุดวิกฤต (กรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิ  
35 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น (กรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)				ค่าเฉลี่ย ความสามารถ ในการละลาย ของ น้ำมันหล่อลื่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
120	9.42	9.71	9.66	9.30	9.52±0.20
150	10.43	10.61	10.87	10.91	10.71±0.23
165	10.95	11.24	10.72	10.41	10.83±0.35
180	12.13	11.65	11.58	11.74	11.78±0.25
190	12.56	12.53	12.92	12.79	12.70±0.19

**ตารางผนวกที่ ข5** ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่  
สภาวะเหนือจุดวิกฤต (กรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิ  
40 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น (กรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)				ค่าเฉลี่ย ความสามารถ ในการละลาย ของ น้ำมันหล่อลื่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
120	6.57	6.15	6.57	6.65	6.49±0.23
150	9.18	8.88	8.92	8.59	8.89±0.24
165	10.79	10.65	10.89	10.71	10.76±0.10
180	10.98	11.26	10.87	10.22	10.83±0.44
190	11.43	11.25	11.93	11.79	11.60±0.31

**ตารางผนวกที่ ข6** ค่าความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่นในคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต (กรัมต่อกิโลกรัมของคาร์บอนไดออกไซด์) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส

ความดัน (บาร์)	ความสามารถในการละลายของน้ำมันหล่อลื่น (กรัมต่อกิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์)				ค่าเฉลี่ย ความสามารถ ในการละลาย ของ น้ำมันหล่อลื่น
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	
120	5.57	5.64	5.29	5.16	5.42±0.23
150	8.68	8.79	8.72	8.36	8.64±0.19
165	9.13	8.86	9.11	8.50	8.90±0.29
180	11.26	11.70	11.30	11.28	11.39±0.21
190	12.02	11.65	11.89	12.28	11.96±0.26

**ตารางผนวกที่ ข7** ประสิทธิภาพในการทำ ความสะอาดเศษพลาสติกจากขวดบรรจุ น้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ กรณีที่ไม่เติมตัวทำละลายร่วม

ชนิดของ พลาสติก	ปริมาณของ พลาสติก (กรัม)	ปริมาณ น้ำมันหล่อลื่น ที่เติม (กรัม)	ปริมาณคาร์บอน ไดออกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)	เวลาที่ใช้ ในการทำ ความ สะอาด (นาที)	ประสิทธิภาพ ในการทำ ความสะอาด (%)
พลาสติก	50.975	5.249	750	724	80.79
สีเขียว	50.769	5.134	650	580	85.35
พลาสติก	50.341	5.197	750	731	80.32
สีเทา	50.612	5.128	650	550	84.17

**ตารางผนวกที่ ข8** ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดเศษพลาสติกสีเขียวจากขวดบรรจุ  
น้ำมันหล่อลื่นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตที่อุณหภูมิ  
35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์ กรณีที่เติมตัวทำละลายร่วม  
(อะซีโตน 5 โมลเปอร์เซ็นต์)

ความดัน (บาร์)	ปริมาณของ พลาสติก (กรัม)	ปริมาณ น้ำมันหล่อลื่น ที่เติม (กรัม)	ปริมาณ คาร์บอนไดออกไซด์ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)	เวลาที่ใช้ใน การทำ ความ สะอาด (นาที)	ประสิทธิภาพ ในการทำ ความสะอาด (%)
120	50.673	5.310	350	325	90.35
180	50.217	5.087	350	337	98.87
180	50.424	5.265	250	205	95.45

**ตารางผนวกที่ ข9** ข้อมูลการทำความสะอาดเพื่อนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดเศษพลาสติกสีเขียวจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์

ความดัน (บาร์)	ครั้งที่	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อนการทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลังการทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
120	1	275.589	126.756	276.246	127.450	402.345	403.696	1.351
	2	274.818	112.651	275.361	113.087	387.469	388.448	0.979
	3	275.568	126.771	276.146	127.191	402.339	403.337	0.998
	4	274.805	112.664	275.309	113.073	387.469	388.382	0.913
180	1	275.746	112.559	276.533	112.867	388.305	389.400	1.095
	2	274.889	126.763	275.676	127.110	401.652	402.786	1.134
	3	275.685	112.815	276.312	113.180	388.500	389.492	0.992
	4	274.927	126.804	275.752	127.140	401.731	402.892	1.161

ตารางผนวกที่ ข10 ข้อมูลการทำความสะอาดเพื่อนำมาใช้ในการหาประสิทธิภาพของการทำความสะอาดเศษพลาสติกสีเทาจากขวดบรรจุน้ำมันหล่อลื่น ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤต ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความดัน 120 และ 180 บาร์

ความดัน (บาร์)	ครั้งที่	น้ำหนักวาล์ว ก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองก่อนการทดลอง (กรัม)	น้ำหนักวาล์ว หลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนัก ตัวกรองหลังการทดลอง (กรัม)	น้ำหนักรวมก่อนการทดลอง ( $W_a$ )	น้ำหนักรวมหลังการทดลอง ( $W_b$ )	$W_b - W_a$ (กรัม)
120	1	275.705	112.678	276.459	112.956	388.383	389.415	1.032
	2	274.743	126.747	275.490	127.109	401.490	402.599	1.109
	3	274.894	126.750	275.536	127.094	401.644	402.630	0.986
	4	274.909	126.744	275.631	127.069	401.653	402.700	1.047
180	1	275.666	112.714	275.347	113.006	388.380	389.353	0.973
	2	276.429	112.705	277.260	113.004	389.134	390.264	1.130
	3	274.713	126.752	275.597	127.027	401.465	402.624	1.159
	4	275.642	112.657	276.373	112.980	388.299	389.353	1.054

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวชณิดาภา ต้านยุทธพลชัย
เกิดวันที่	4 กันยายน 2530
สถานที่เกิด	เขตบางกอกน้อย จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เคมีอุตสาหกรรม) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และ วัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รางวัลที่ได้รับ	ได้รับรางวัล Best Oral Presentation จาก The 4 <sup>th</sup> KKU International Engineering Conference 2012