

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์โดยใช้
คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต

STUDY ON HARD DISK DRIVE ASSEMBLY PARTS
CLEANING PROCESS BY USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE



T110365



ณ.
๒๖/๑ก
๒๕๕๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**110365**
วัน,เดือน,ปี.....- 1 11/๑ 2553

b.....12263278.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ทำซ้ำ แจกจ่าย หรือเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
พ.ศ. 2553
KMITL-2010-EN-M-220-079

**STUDY ON HARD DISK DRIVE ASSEMBLY PARTS
CLEANING PROCESS BY USING SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE**



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMITL-2010-EN-M-220-079 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2010

FACULTY OF ENGINEERING

เอกรัง KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต
นักศึกษา	นายปิยวุฒิ มาศโค้ง
รหัสนักศึกษ	51061107
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เสนอผลการศึกษาการความเป็นไปได้ในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต (Supercritical Carbon Dioxide, $scCO_2$) แทนที่ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำสำหรับกระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ทำการทดลองโดยใช้สแตนเลสทรงกลมเคลือบด้วยพาราฟินแว็กซ์แทนตัวอย่างของชิ้นงาน จากนั้นทำการล้างโดยอัด $scCO_2$ เข้าสู่เครื่องล้างทนความดันสูงที่บรรจุชิ้นงาน เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของ $scCO_2$ ต่อกระบวนการล้าง ชิ้นงานจะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่เหลืออยู่และหาประสิทธิภาพการล้างที่สภาวะการล้างต่างๆ จากการศึกษาการล้างที่ความหนาแน่นของ $scCO_2$ คงที่เท่ากับ 0.5 g/ml และแปรเปลี่ยนอุณหภูมิการล้างในช่วง 40 ถึง 70 °C พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพการล้างมากขึ้น และเวลาในการล้างลดลง เมื่อทำการทดลองที่ อุณหภูมิคงที่ 60 °C โดยแปรเปลี่ยนความหนาแน่นของ $scCO_2$ ในช่วง 0.5 ถึง 0.7 g/ml พบว่าประสิทธิภาพการล้างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ $scCO_2$ จากนั้นได้ศึกษากลไกของการล้างโดยใช้หลักการของจลนพลศาสตร์การคายซับ พบว่าการล้างในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 50 °C มีกลไกเป็นแบบการคายซับอันดับสอง ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 60 ถึง 70 °C เป็นแบบการคายซับอันดับหนึ่ง และยังพบว่า การเพิ่มความหนาแน่นของ $scCO_2$ ส่งผลให้กลไกในการล้างที่อุณหภูมิการล้าง 40 ถึง 60 °C เป็นไปในแบบการคายซับอันดับหนึ่ง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิและความหนาแน่นของ $scCO_2$ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง อีกทั้งการศึกษการล้างท่อโลหะทรงกระบอกกลวงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างกับลูกปืนสแตนเลส พบว่ารูปทรงของชิ้นงานมีผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพการล้าง ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นในช่วง 0.5 ถึง 0.7 /ml มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการล้างในอุตสาหกรรม ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์กระบวนการล้างเบื้องต้น พบว่าในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สภาวะดังกล่าวมีต้นทุนการล้างอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.46 บาทต่อชิ้นงาน ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study on Hard Disk Drive Assembly Parts Cleaning Process by Using Supercritical Carbon Dioxide
Student	Mr. Piyawut Maskong
Student ID.	51061107
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2010
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

Abstract

This research presented the feasibility study of using supercritical carbon dioxide (scCO₂) to substitute organic solvents and water in the hard disk drives assembly parts cleaning process. The scCO₂ washing process was carried out by using spherical stainless balls coated by paraffin wax. The samples were cleaned in high pressure vessel to study the influence of temperature and scCO₂ density on cleaning process. A gravimetric method is developed to determine the weight loss during the washing, is due only to the paraffin wax removal. The residual paraffin wax was determined by percent of residual contaminate as cleaning efficiency. Effects of temperatures on cleaning efficiency were evaluated with the washing temperature ranging from 40-70 °C and the constant scCO₂ density of 0.5 g/ml. From the experimental results, it was found that cleaning efficiencies increase with cleaning time and temperatures. Effects of the scCO₂ density in range of 0.5-0.7 g/ml at constant temperature 60 °C shown that cleaning efficiency increases with scCO₂ density. Mathematical modeling of desorption kinetic was used to estimate the order of desorption and desorption rate constant. This model shows the second order desorption on the temperature range of 40-50 °C and first order desorption on the temperature range of 60-70 °C. The increasing of scCO₂ density affect the model by trend the model to be first order desorption. Desorption rate constant increased with increasing temperature and scCO₂ density. Moreover the effect of specimen shape was studied by comparisons of spherical stainless steel and cylindrical metal pipe. Cleaning profiles were observed, it was found that the shapes of cleaning parts are slightly effect on cleaning efficiency. The scCO₂ cleaning process conditions as the constant temperature 60 °C and scCO₂ density in the range of 0.5-0.7 g/ml, these conditions are suitable for applying to utilize for industries as an alternative solvent. Furthermore, from the economic evaluating that shown the cost of cleaning in the range of 0.14 - 0.46 baht/part.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จได้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุรัตน์ อารีรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบความรู้และความกรุณาอบรมสั่งสอน อีกทั้งประสบการณ์ในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ สำนักงานวิจัยร่วมด้านเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลและการประยุกต์ใช้งาน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และ บริษัทธิดาชิโกลบอลสตอเรจ เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับเงินทุนในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณพงศ์ประภาส ปิยะมโนชา คุณปิยพงศ์ บัวโสม และนักศึกษาภายใต้การดูแลของ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ในการช่วยเหลือและให้คำปรึกษาดำเนินงานวิจัย อีกทั้งกำลังใจที่คอยผลักดันให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้อย่างราบรื่น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา พี่สาว ผู้ให้อุปการะคุณ ที่ช่วยส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีการศึกษา รวมถึงให้กำลังใจยามที่ข้าพเจ้าเหน็ดเหนื่อยจากการทำงาน ข้าพเจ้าจะนำความรู้ความสามารถที่ได้ศึกษาไปใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อสังคมอย่างสุดความสามารถและมีลืมนที่จะตอบแทนพระคุณทุกท่าน

ทั้งนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่อบรมบ่มวิชา สั่งสอนและมอบความรู้แก่ข้าพเจ้า ขอให้คุณพระศรีรัตนตรัย คัลบันดาลให้ครูอาจารย์ของข้าพเจ้ามีแต่ความสุขและความเจริญยิ่งขึ้นไป

หากเกิดความผิดพลาดใด ในงานวิจัย ผู้วิจัยขออภัยไว้ ณ ที่นี้ และผู้วิจัยยินดีให้นำข้อมูลอันจะมีประโยชน์แก่ผู้สนใจ สามารถนำไปใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้า เพื่อเป็นประโยชน์ในวันข้างหน้า ข้าพเจ้าจักยินดียิ่ง และคุณประโยชน์อันใดอันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ปิยวุฒิ มาศโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	IX

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	2
1.2 แนวคิดในการศึกษา	3
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การทำความสะอาดแบบประณีตด้วยทำลายและสารลดแรงตึงผิว.....	5
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับคาร์บอน ไดออกไซด์เหนือวิกฤต	6
2.3 ค่าการละลายสำหรับการล้างด้วยของไหลเหนือวิกฤต.....	9
2.3.1 แบบจำลองสำหรับกลไกการทำความสะอาด.....	11
2.4 การประมาณค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนใน $scCO_2$	17
2.5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$	20
2.6 จลนพลศาสตร์การคายซับ.....	21
2.7 Integral Method	22
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24

บทที่ 3 การทดลอง	26
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	26
3.2 ขั้นตอนการทดลอง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.2.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการทำความสะอาด ไปลงสมุดในหัวไปใต้ประโยค 26 งานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO ₂	26
3.2.3 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการล้างด้วย scCO ₂	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	30
4.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO ₂	30
4.2 ผลของความหนาแน่นของ scCO ₂ ต่อประสิทธิภาพการล้าง	32
4.3 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO ₂	34
4.4 การสร้างแบบจำลองการล้างด้วย scCO ₂	36
4.5 ผลของความหนาแน่นของ scCO ₂ ต่อแบบจำลองการล้าง	39
4.6 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ค่าคงที่อัตราการคายซับและอุณหภูมิ	41
4.7 ผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO ₂	42
บทที่ 5 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการล้างด้วย scCO₂	44
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง	49
6.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO ₂	49
6.2 ผลของความหนาแน่นของ scCO ₂ ต่อประสิทธิภาพการล้าง	49
6.3 ผลการสร้างแบบจำลองการล้างด้วย scCO ₂	49
6.4 ผลของความหนาแน่นของ scCO ₂ ต่อแบบจำลองการล้าง	50
6.5 ผลการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ค่าคงที่อัตราการคายซับและอุณหภูมิ ..	50
6.6 ผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO ₂	51
6.7 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์กระบวนการล้างด้วย scCO ₂	51
6.8 ข้อเสนอแนะ	51
เอกสารอ้างอิง.....	52
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงาน	
และค่าคงที่การคายซับ.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข. ข้อมูลผลการทดลอง.....	58
ภาคผนวก ค. การคำนวณความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ค่าคงที่การคายซับ กับอุณหภูมิ.....	77
ภาคผนวก ง. การประมาณค่าการละลายพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ และปริมาณแวกซ์ที่ถูกดึง.....	79
ภาคผนวก จ. การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$	85
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	87
ประวัติผู้เขียน	96



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ	7
ตารางที่ 2.2	สภาวะวิกฤตของสารชนิดต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.3	การเปรียบเทียบต้นทุนดำเนินการ ของกระบวนการล้างด้วย Trichloroethylene และ scCO ₂	24
ตารางที่ 4.1	สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO ₂ ที่สภาวะต่างๆ.....	35
ตารางที่ 4.2	ค่าคงที่การคายซับอุณหภูมิต่างๆ ที่ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml	37
ตารางที่ 4.3	ผลของความหนาแน่นและอุณหภูมิต่อความแบบจำลองการทำความสะอาด	40
ตารางที่ 5.1	ต้นทุนทุนทรัพย์และข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์	45
ตารางที่ 5.2	ต้นทุนดำเนินงานของกระบวนการล้างด้วย scCO ₂	45
ตารางที่ 5.3	ข้อมูลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการล้างด้วย scCO ₂ ที่อุณหภูมิ 60 °C.....	47
ตารางที่ ข.1	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C	59
ตารางที่ ข.2	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 45 °C	60
ตารางที่ ข.3	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 50 °C	61
ตารางที่ ข.4	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C.....	62
ตารางที่ ข.5	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 70 °C	63
ตารางที่ ข.6	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.6 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C	64
ตารางที่ ข.7	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.6 g/ml อุณหภูมิล้าง 50 °C	65
ตารางที่ ข.8	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.6 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C.....	66
ตารางที่ ข.9	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C	67
ตารางที่ ข.10	ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO ₂ 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 50 °C.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.11 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C.....	69
ตารางที่ ข.12 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลม ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C.....	70
ตารางที่ ข.13 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกระบอกกลวง ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C.....	71
ตารางที่ ข.14 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกระบอกกลวง ที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C.....	72
ตารางที่ ค.1 ข้อมูลค่าคงที่อัตราการคายซับที่อุณหภูมิ 40-60 °C การคายซับอันดับหนึ่ง	78
ตารางที่ ค.2 ข้อมูลค่าคงที่อัตราการคายซับที่อุณหภูมิ 40-50 °C การคายซับอันดับสอง.....	78
ตารางที่ ง.1 ค่าตัวแปรของสารบริสุทธิ์ที่ใช้ในการประมาณค่าการละลาย.....	80
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2	83
ตารางที่ ง.3 ข้อมูลปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่ล้างได้จากการประมาณค่าการละลาย.....	84
ตารางที่ ฉ.1 ต้นทุนค่าไฟฟ้าจากการจำลองกระบวนการ	88
ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิ อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml	91
ตารางที่ ฉ.3 ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิ อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.6 g/ml	92
ตารางที่ ฉ.4 ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิ อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.7 g/ml	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	กระบวนการล้างด้วยตัวทำละลายและสารลดแรงตึงผิว	5
รูปที่ 2.2	แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ แสดงบริเวณสถานะและกระบวนการ เปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์	6
รูปที่ 2.3	แผนภูมิวิภาคของคาร์บอนไดออกไซด์	7
รูปที่ 2.3	แผนภาพแสดงการล้างด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤต	8
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ของค่าการละลายของสารประกอบในตัวทำละลายเหนือวิกฤต กับความดัน	9
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ของค่าการละลายในตัวทำละลายเหนือวิกฤตกับความดัน	11
รูปที่ 2.6	ความสัมพันธ์ความเข้มข้นบนพื้นผิวชิ้นงานและของไหล	12
รูปที่ 2.7	แบบจำลองอย่างง่ายของการขจัดสิ่งปนเปื้อนในของไหลเหนือวิกฤต	13
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์ปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ถูกสกัดกับเวลา	15
รูปที่ 2.9	แบบจำลองกลไกการล้างชิ้นงานผิวเรียบด้วยของไหลเหนือวิกฤต	16
รูปที่ 2.10	แบบจำลองกลไกการล้างชิ้นงานผิวขรุขระด้วยของไหลเหนือวิกฤต	17
รูปที่ 2.11	แผนภาพการแพร่ของสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานทรงกลม	20
รูปที่ 2.12	แผนภาพจำลองการล้าง	22
รูปที่ 2.13	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นกับเวลาที่แบบจำลองต่างๆ	23
รูปที่ 3.1	ชุดกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$	27
รูปที่ 3.2	ชิ้นงานทดสอบการล้าง	28
รูปที่ 3.3	เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวนแม่เหล็ก Yellow Mag HS 72	28
รูปที่ 3.4	ปั๊มแรงอัดแรงดันสูง ISCO 260D Syringe pump	28
รูปที่ 3.5	เครื่องล้างความดันสูง	29
รูปที่ 3.6	เครื่อง Micro balance Mettler Toledo AX205	29
รูปที่ 4.1	ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้างที่ความหนาแน่นของ $scCO_2$ 0.5 g/ml	31
รูปที่ 4.2	การเปรียบเทียบปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่สภาวะการล้าง ความหนาแน่นของ 0.5 g/ml อุณหภูมิ 40 - 70 °C	32
รูปที่ 4.3	ผลของความหนาแน่นต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย $scCO_2$ อุณหภูมิ 60 °C	33
รูปที่ 4.4	การเปรียบเทียบปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ 0.5 - 0.7 g/ml	37
รูปที่ 4.5	การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ ที่ความหนาแน่นของ $scCO_2$ 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 - 70 °C	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.6 แบบจำลองกลไกการคายซับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 45, 50 °C

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 60, 70 °C.....	37
รูปที่ 4.8	การเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการคายซัับแบบจำลองการคายซัับอันดับหนึ่ง.....	38
รูปที่ 4.9	การเปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลองที่อุณหภูมิต่างๆ	39
รูปที่ 4.10	แนวโน้มนประสิทธิภาพการล้างที่อุณหภูมิ 40-50 °C ความหนาแน่น scCO ₂ 0.6-0.7 g/ml.....	40
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์อาร์เรีเนียสของค่าคงที่อัตราการคายซัับและอุณหภูมิ ของแบบจำลองการคายซัับอันดับหนึ่งและอันดับสอง.....	42
รูปที่ 4.12	ผลของรูปทรงต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO ₂ ที่สภาวะต่างๆ.....	40
รูปที่ 5.1	แผนผังกระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO ₂	44
รูปที่ 5.2	แผนผังกระแสเงินสดสุทธิ.....	46
รูปที่ 5.3	แผนผังกระแสเงินสดสุทธิ ที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO ₂ 0.7 g/ml.....	47
รูปที่ ข.1	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 40, 45, 50, 60 และ 70 °C.....	73
รูปที่ ข.2	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C ความหนาแน่น scCO ₂ 0.5 g/ml.....	73
รูปที่ ข.3	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับสองที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C.....	74
รูปที่ ข.4	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C.....	74
รูปที่ ข.5	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C.....	75
รูปที่ ข.6	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C.....	75
รูปที่ ข.7	แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซัับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C.....	76
รูปที่ ง.1	การเปรียบเทียบค่าการละลายของ C ₂₈ H ₅₈ ใน scCO ₂ อุณหภูมิ 45 °C.....	80
รูปที่ จ.1	การเปรียบเทียบเส้นโค้งจากสมการการแพร่และผลการทดลองสภาวะการล้าง อุณหภูมิ 40 °C ความหนาแน่นของ scCO ₂ 0.5 g/ml.....	86
รูปที่ ฉ.1	แผนผังกระบวนการสำหรับวิเคราะห์ต้นทุนดำเนินงาน	88
รูปที่ ฉ.2	Operating labor requirement in chemical industry	90
รูปที่ ฉ.3	การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของกระบวนการล้างด้วย scCO ₂ ที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO ₂ 0.7 g/ml.....	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่กำลังพัฒนาเทคโนโลยี ทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีผลิตภัณฑ์ป้อนสู่ตลาดหลายหมื่นชิ้นต่อวัน ซึ่งในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องมีกระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ส่วนก่อนเข้าสู่กระบวนการประกอบ เนื่องจากกระบวนการผลิตและขึ้นรูปชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ย่อมมีการสัมผัสสิ่งปนเปื้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต เช่น น้ำมันหล่อลื่นจากเครื่องจักร น้ำมันจากกระบวนการขึ้นรูป (cutting fluid) [1] อีกทั้งความสะอาดของชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความสำคัญอย่างมากต่อประสิทธิภาพและการทำงานของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถือเป็นกระบวนการล้างอย่างละเอียด (precision cleaning) ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการล้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ทำจากโลหะในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์และการผลิตชิ้นส่วนสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์และน้ำเป็นหลักในกระบวนการล้าง [1] อีกทั้งการใช้น้ำในกระบวนการล้าง ยังต้องมีการเติมสารเคมี เช่น สารซักล้างและสารลดแรงตึงผิวร่วมในกระบวนการล้างอีกด้วย และที่เป็นปัญหาหลักในกระบวนการล้างคือ การสูญเสียสารไฮโดรคาร์บอนเนื่องจากการระเหย (volatile organic compound, VOC) การบำบัดสารเคมีที่เหลือ และน้ำเสียที่เหลือจากกระบวนการล้าง ซึ่งจัดเป็นน้ำเสียที่ถูกเจือปนด้วยสารเคมีที่เป็นพิษยกต่อการบำบัด ไม่ว่าจะป็นวิธีบำบัดแบบปกติหรือการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพทำให้ต้องใช้ต้นทุนการผลิตอย่างมากในการบำบัดน้ำเสียเหล่านี้

จากการตื่นตัวเกี่ยวกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการแพร่กระจายของสารเคมีที่เป็นอันตราย เป็นปัญหาที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน เพราะส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงาน ซึ่งในภาคอุตสาหกรรมได้ตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว จึงเริ่มมีการนำเทคโนโลยีการผลิตแบบสะอาดมาใช้ในกระบวนการผลิต เช่น การหลีกเลี่ยงการใช้สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นอันตรายในขั้นตอนการผลิต และการพัฒนากระบวนการเพื่อลดการใช้น้ำในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการช่วยลดการบำบัดของเสียจากกระบวนการผลิต ทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมาก และเพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง พร้อมกับช่วยลดต้นทุนการผลิตและช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาต้นแบบกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีสะอาด ที่ช่วยทำให้กระบวนการผลิตเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และช่วยลดต้นทุนการผลิต ดังนั้นการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพื่อใช้สาร

ในกระบวนการทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์มีกลไกคล้ายกับการสกัด โดยอาศัยความสามารถในการละลาย (solubility) และการแพร่ (diffusion) เป็นกลไกในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงาน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้ของไหลเหนือวิกฤตมาใช้ในการกระบวนการสกัดเป็นจำนวนมาก เพราะสามารถควบคุมสมบัติทางกายภาพได้โดยการควบคุมอุณหภูมิและความดัน โดยเฉพาะ $scCO_2$ ได้ถูกนิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพราะมีข้อดีคือ จุดวิกฤตที่ต่ำไม่เป็นพิษ ไม่ติดไฟ และเป็นสารเคมีที่มีราคาถูกลง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้ง่ายกว่าของไหลเหนือวิกฤตประเภทอื่น ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำคาร์บอนไดร็อกไซด์เหนือวิกฤตมาทดแทนตัวทำละลายอินทรีย์ในอุตสาหกรรม

จากการงานวิจัยที่ได้ศึกษา พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการทำความสะอาดโดยใช้ $scCO_2$ มี 3 ตัวแปรหลักคือ สิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน สภาพะในการทำความสะอาด และลักษณะรูปทรงของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ $scCO_2$ โดยใช้การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้เนื่องจากดัดลูกปืน (ball bearing) เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1] ซึ่งรูปทรงชิ้นงานเป็นทรงกลม รวมถึงแกนมอเตอร์และฝาครอบแกนมอเตอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงทรงกระบอก ดังนั้นในงานวิจัยจึงเลือกใช้สแตนเลสทรงกลมและทรงกระบอกกลวงเป็นตัวแทนชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ ซึ่งเป็นรูปทรงมาตรฐานและสามารถใช้แบบจำลองการแพร่ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ คราบสิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนกับชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ส่วนใหญ่เป็นคราบน้ำมันไฮโดรคาร์บอนและแวกซ์ [1] ที่เป็นสารประกอบประเภทนอร์มัลอัลเคนหรือเรียกว่าพาราฟิน ดังนั้นการพัฒนาการล้างโดยใช้ของไหลเหนือวิกฤตกำหนดให้พาราฟินแวกซ์ที่ทราบจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นสิ่งปนเปื้อนที่เคลือบบนชิ้นงาน เนื่องจากมีพาราฟินแวกซ์มีมวลโมเลกุลสูงส่งผลให้มีค่าการละลายต่ำกว่าไฮโดรคาร์บอนที่เป็นน้ำมันและเป็นของแข็งซึ่งมีความยึดเกาะกับพื้นผิวโลหะได้ดี เพราะฉะนั้นหาก $scCO_2$ สามารถล้างพาราฟินแวกซ์ออกจากชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพก็จะเป็นไปได้อย่างดีในการประยุกต์ใช้ $scCO_2$ สำหรับการล้างน้ำมันที่เป็นสิ่งปนเปื้อน การศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการล้างชิ้นงานด้วย $scCO_2$ โดยศึกษาผลของเวลาการล้าง อุณหภูมิ ความหนาแน่นของ $scCO_2$ ต่อประสิทธิภาพการล้าง จากนั้นทำการศึกษาผลของรูปทรงชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบความสามารถการล้างชิ้นส่วนรูปทรงต่างกันของ $scCO_2$ โดยสังเกตจากความแตกต่างของแนวโน้มการล้าง ซึ่งกำหนดให้ร้อยละปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เคลือบบนชิ้นงานเป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพการทำความสะอาด พร้อมทั้งประมาณค่าการละลายและสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวกับประสิทธิภาพการล้าง รวมถึงสร้างแบบจำลองการทำความสะอาดเพื่อทราบกลไกของการล้างและอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ เพื่อใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.3.1 ศึกษากลไกการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลายในกระบวนการล้าง
- 1.3.2 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการล้าง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน เวลา และรูปทรงของชิ้นงานเพื่อใช้ในการออกแบบกระบวนการล้างให้มีประสิทธิภาพ
- 1.3.3 สร้างแบบจำลองการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 ศึกษาประสิทธิภาพการล้างในช่วงอุณหภูมิ 40-70 °C ความดัน 93-203 bar
- 1.4.2 ศึกษาผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้าง โดยใช้สแตนเลสทรงกลมและท่อโลหะทรงกระบอกกกลาง
- 1.4.3 สร้างแบบจำลองการล้างด้วย scCO₂ โดยใช้จลนพลศาสตร์การคายซับ
- 1.4.4 ศึกษาการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการล้างด้วย scCO₂ โดยการประเมินต้นทุนการล้างและความเป็นไปได้ทางการลงทุน

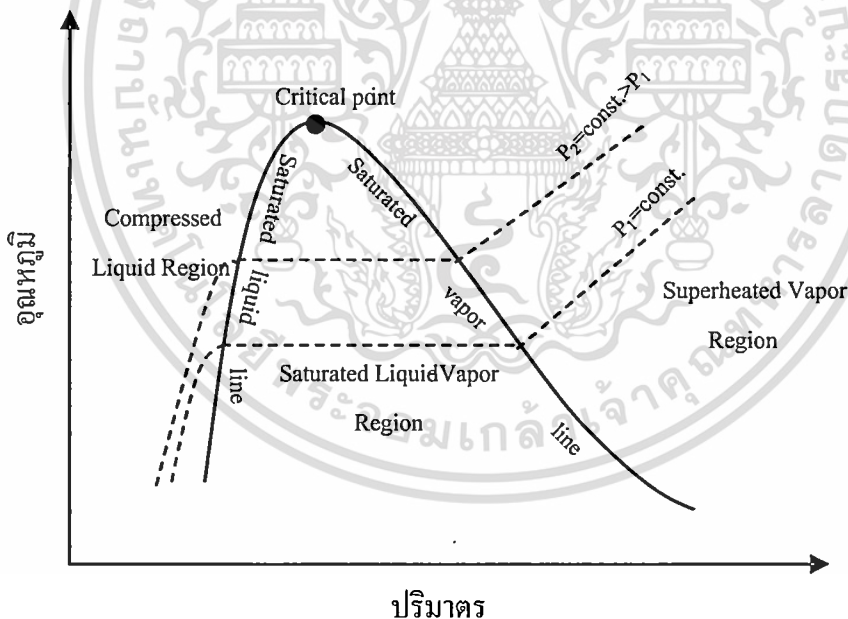
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สร้างองค์ความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการล้างชิ้นส่วนโลหะด้วย scCO₂ และนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้
- 1.5.2 เป็นการพัฒนาให้เกิดกระบวนการผลิตในลักษณะของเทคโนโลยีสะอาดและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม

ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต ซึ่งมีความนิยมใช้ในการเป็นตัวทำละลายเหนือวิกฤตในหลายอุตสาหกรรมก็จะช่วยให้กระบวนการล้างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและส่งเสริมภาพลักษณ์ต่อผลิตภัณฑ์ในฐานะเป็นเทคโนโลยีสีเขียว

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับของไหลเหนือวิกฤต [4]

ของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid) เริ่มได้รับความสนใจตั้งแต่ต้นทศวรรษที่ 1800 เมื่อ Baron Cagniard De La Tour ค้นพบจุดวิกฤต (critical point) ของสารประกอบ โดยที่จุดวิกฤตนี้สารที่มีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัวจะมีสมบัติเหมือนกัน และสารต่างชนิดกันจะมีสถานะที่จุดวิกฤตที่แตกต่างกัน โดยเมื่อให้ความร้อนแก่สารที่ความดันเหนือจุดวิกฤตจะไม่พบการเปลี่ยนสถานะ จะสังเกตเห็นได้แต่เพียงว่าปริมาตรจำเพาะของสารจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และตลอดกระบวนการสารจะมีเพียงสถานะเดียวเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถระบุได้ว่าสารนั้นมีสมบัติเป็นของเหลวหรือไอ และเรียกสารที่มีความดันสูงกว่าความดันที่จุดวิกฤตว่าเป็นของไหลเหนือวิกฤต โดยแสดงดังรูปที่ 2.2

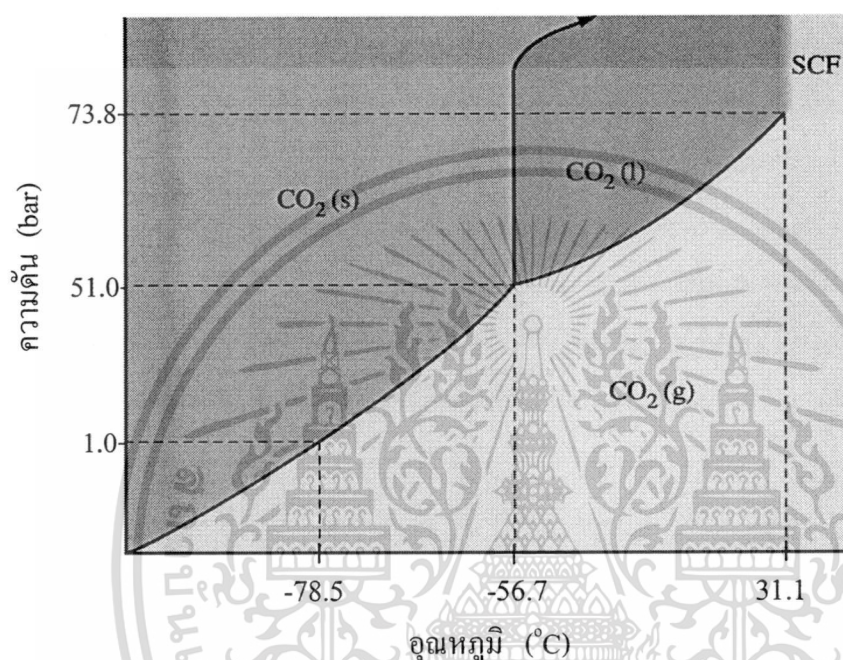


รูปที่ 2.2 แผนภาพอุณหภูมิ-ปริมาตรจำเพาะ แสดงบริเวณสถานะและกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารบริสุทธิ์ [4]

รูปที่ 2.2 พบว่าเมื่อเชื่อมสถานะของของเหลวอิ่มตัวที่ระดับความดันต่างๆ เข้าด้วยกันจะได้เส้นที่เรียกว่าเส้นของเหลวอิ่มตัว (saturated liquid line) เช่นเดียวกันเมื่อทำการเชื่อมสถานะของไออิ่มตัวที่ระดับความดันต่างๆ เข้าด้วยกันจะได้เส้นที่เรียกว่าเส้น ไออิ่มตัว (saturated vapor line)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สืบค้นไว้สำหรับการใช้ภายในของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเหลวอัดตัวเป็นบริเวณที่แสดงสถานะของสารที่มีสถานะเป็นของเหลวอัด(compressed liquid region) ด้านขวาของเส้นไออัดตัวเป็นบริเวณของไอร้อนยิ่งยวด (superheated vapor region) ส่วนบริเวณที่อยู่ภายในเส้นโค้งเป็นบริเวณของของเหลว-ไออัดตัว (saturated liquid-vapor mixture region) สำหรับของไหลเหนือวิกฤตที่ได้รับความสนใจมากคือ scCO_2 เนื่องจากมีจุดวิกฤตที่ต่ำคือความดันวิกฤต 73.8 bar และอุณหภูมิวิกฤต 31.1 °C [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภูมิวิภาคของคาร์บอนไดออกไซด์ [4]

ของไหลเหนือวิกฤตโดยทั่วไป มีสมบัติบางประการอยู่ระหว่างสถานะของเหลวและสถานะก๊าซ เมื่อพิจารณาสมบัติของ scCO_2 แสดงดังตารางที่ 2.1 พบว่า CO_2 ที่อยู่ในสถานะเหนือจุดวิกฤตมีความหนาแน่นที่สูงใกล้เคียงกับ CO_2 ที่อยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้นจึงทำให้ scCO_2 มีความสามารถในการละลาย หรือการสกัดตัวถูกละลายของเหลวสูง และ scCO_2 มีความหนืดที่ต่ำใกล้เคียงกับ CO_2 ที่อยู่ในสถานะก๊าซ จึงทำให้มีความสามารถในการแพร่หรือการถ่ายเทมวลที่รวดเร็วในลักษณะของก๊าซทั่วไป

ตารางที่ 2.1 สมบัติของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานะต่างๆ [5]

	ก๊าซ	ของไหลเหนือวิกฤต	ของเหลว
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.001	0.1-0.8	1
ความหนืด (Pa.s)	0.001	0.005-0.01	0.05-0.1
สัมประสิทธิ์การแพร่ (m^2/s)	1×10^{-5}	1×10^{-7}	1×10^{-9}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ข้อดีในการประยุกต์ใช้ scCO_2 คือเป็นสารที่ไม่มีพิษและไม่ติดไฟจึงมีความปลอดภัยในการใช้งาน อีกทั้งเป็นสารที่มีราคาถูก เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดจากอุตสาหกรรมโรงแยกแก๊ส เพราะฉะนั้นการนำ scCO_2 มาใช้จึงเป็นการลดการปลดปล่อย CO_2 ออกสู่สิ่งแวดล้อม อีกทั้ง scCO_2 ยังสามารถแยกออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่ายหลังการสกัด หรือการล้าง โดยการลดความดันเหลือเท่าความดันบรรยากาศ CO_2 สามารถเปลี่ยนวัฏภาคเป็นก๊าซและแยกออกจากผลิตภัณฑ์โดยธรรมชาติ จึงไม่เกิดการตกค้างในผลิตภัณฑ์และยังไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย นอกจากนี้ scCO_2 แล้วยังมีการนำสารอื่นมาทำเป็นของไหลเหนือวิกฤตดังแสดงในตารางที่ 2.2 อีกทั้งข้อดีของการใช้ตัวทำละลายเหนือวิกฤตที่เป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับกระบวนการสกัดและกระบวนการล้างชิ้นส่วนแบบแห้ง ซึ่งจะมาแทนที่กระบวนการล้างแบบเปียกโดยใช้น้ำหรือตัวทำละลายอินทรีย์เป็นตัวกลาง เพราะกระบวนการล้างด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤตจะสามารถลดปริมาณน้ำเสียได้ในปริมาณมาก รวมทั้งยังเป็นการลดต้นทุนในการสร้างโรงบำบัดน้ำเสีย ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตต่ำลงและเป็นการเพิ่มกำไรให้แก่อุตสาหกรรมโดยทั่วไปกระบวนการล้างชิ้นส่วน โลหะที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางนั้นจะมีสารเคมีที่เจือปนออกมาเนื่องจากต้องมีการเติมตัวเร่งอัตราการชะล้าง เติมสารลดแรงตึงผิว หรือเติมสารเติมแต่งต่างๆ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการล้างที่ดี ทำให้ยังมีสารเคมีที่เหลือตกค้างจากกระบวนการล้าง ซึ่งเป็นการยากที่จะทำการบำบัดทั้งหมดด้วยวิธีการปกติและวิธีการทางชีวภาพ

ตารางที่ 2.2 สภาวะวิกฤตของสารชนิดต่างๆ [6]

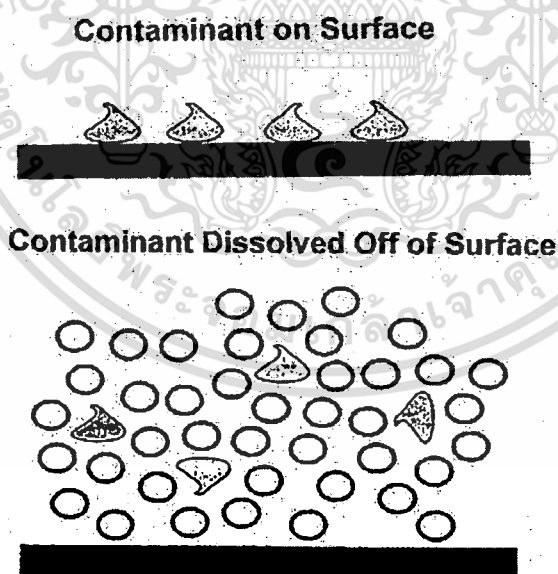
	สูตร โมเลกุล	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	P_c (bar)
Ammonia	NH_3	132.5	112.8
Bromine	Br_2	311	103.4
Carbon dioxide	CO_2	31.1	73.8
Chlorine	Cl_2	144	77.1
Water	H_2O	374.3	220.9
Xenon	Xe	16.8	58.8

จากข้อดีหลายประการของการใช้ของไหลเหนือวิกฤต ส่งผลให้ปัจจุบันได้มีการนำเอาของไหลเหนือวิกฤตประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม ได้แก่ การใช้เป็นของไหลในกระบวนการโครมาโทกราฟีด้วยของไหลเหนือวิกฤต (supercritical fluid chromatography, SFC) กระบวนการย้อมสีในพอลิเมอร์ (supercritical fluid dyeing) การเป็นทำละลายในการเกิดปฏิกิริยาและการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการทางด้านวัสดุศาสตร์ เช่น การลดขนาดอนุภาค การตกผลึก การสร้างไมโครเซลล์ลูลาร์โฟม และการสร้างรูพรุนระดับนาโนในพอลิเมอร์ อีกทั้งไม่เว้นกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสกัดสารจากพืชและการคายซับสารจากคาร์บอนกัมมันต์ด้วยของไหลเหนือวิกฤตได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถแยกตัวถูกละลายได้ง่ายเมื่อลดความดัน CO_2 เข้าใกล้ความดันบรรยากาศ ซึ่งการล้างมีกลไกคล้ายกับการสกัด ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ scCO_2 เป็นตัวทำละลายในกระบวนการล้างได้

2.3 ค่าการละลายสำหรับการล้างด้วยของไหลเหนือวิกฤต [6]

โดยทั่วไปชนิดของสิ่งปนเปื้อนและระดับความสะอาดเป็นตัวกำหนดวิธีการทำความสะอาด โดยกระบวนการล้างสิ่งปนเปื้อนเป็นการเอาชนะแรงยึดติดของสิ่งปนเปื้อนจากพื้นผิวชิ้นงาน เช่น แรงไฟฟ้าสถิตจนถึงแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ซึ่งวิธีการทำความสะอาดโดยทั่วไปในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี เช่น การใช้แรงทางกล สารชะล้าง สารลดแรงตึงผิว หรือตัวทำละลาย เป็นต้น การทำความสะอาดด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤต (supercritical fluids, SCFs) ถือเป็นทางเลือกหนึ่งในกระบวนการทำความสะอาดโดยใช้ตัวทำละลาย โดยหลักการการทำงานของตัวทำละลายในการทำความสะอาดคือละลายสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนชิ้นงาน ซึ่งกระบวนการกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้แสดงดังรูปที่ 2.4 โดยสิ่งปนเปื้อนซึ่งอยู่บนผิวชิ้นงานที่จะถูกทำความสะอาดเมื่อของไหลเหนือวิกฤตอยู่ล้อมรอบและละลายสิ่งปนเปื้อนออกจากผิวชิ้นงาน



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการล้างด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤต [6]

ในกระบวนการล้างมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการสลายตัวของสิ่งปนเปื้อน สิ่งสำคัญสำหรับประสิทธิภาพของตัวทำละลายในการกำจัดสิ่งปนเปื้อน คือสิ่งปนเปื้อนสามารถละลายในตัวทำละลายได้ จากความรู้พื้นฐานค่าการละลายคือปริมาณของสารตั้งต้นหรือตัวถูกละลายมากที่สุดที่สามารถละลายในตัวทำละลายจำนวนหนึ่งได้ ซึ่งโดยทั่วไปการละลายตัวถูกละลายหรือ

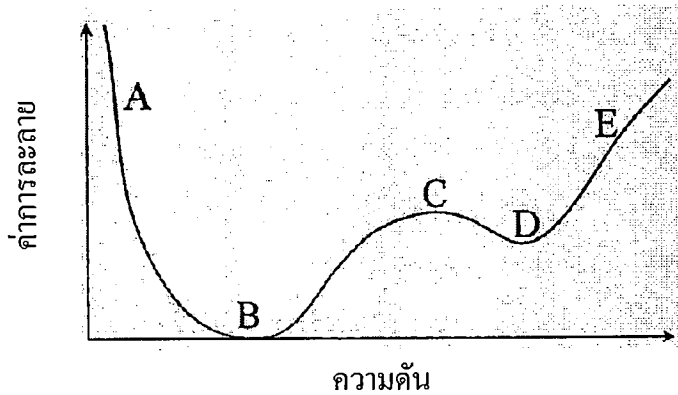
สิ่งปนเปื้อนใช้หลักการที่เรียกว่า สารที่เหมือนกันละลายกันได้ (like dissolves like) ยกตัวอย่าง สารประกอบมีขั้ว เช่น เกลือ สามารถละลายได้ในน้ำ หรือสารไม่มีขั้ว เช่น aliphatic hydrocarbon ละลายได้ Hexane ซึ่งไม่มีขั้ว นอกจากนี้ตัวทำละลายอินทรีย์ เช่น 1, 1, 2- trichlorotrifluoroethane หรือ Freon-113 ได้นิยมมาใช้ในการล้างสารประกอบไม่มีขั้ว เช่น สิ่งปนเปื้อนที่เป็น ไฮโดรคาร์บอนหรือน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจาก chlorofluorocarbon และ Freon-113 ได้ถูกยกเลิกให้ใช้ตามสนธิสัญญา Montreal ดังนั้นความต้องการสารชะล้างที่มีคุณสมบัติที่เหมือนเดิม จึงมีมากขึ้น ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ถูกนำเสนออีกคือ การใช้ scCO₂

โดยทั่วไป ความรู้เกี่ยวกับความสามารถในการละลายของสารประกอบในของไหลเหนือวิกฤตมีความสำคัญเมื่อพิจารณาถึงการเลือกใช้ของไหลเหนือวิกฤตในการล้างสารดังกล่าว เนื่องจากสามารถบอกความสามารถในการสกัดและการล้างได้ เพราะเหตุนี้จึงได้มีการคำนวณตามทฤษฎีและผลการทดลองเพื่อทราบค่าการละลายของแต่ละสารในของไหลเหนือวิกฤตโดยเป็นสมบัติขึ้นกับอุณหภูมิและความดันและค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อน

ค่าการละลายนิยามได้หลายแบบ เช่น ร้อยละโดยโมล (y_i) ร้อยละโดยมวล (Y_i) ปริมาณของตัวถูกละลายในหนึ่งหน่วยปริมาตรหรือความเข้มข้น ซึ่งปัจจัยหลักของค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนในของไหลเหนือวิกฤต คือการระเหยของของสิ่งปนเปื้อนและความสามารถในการละลายของของไหลเหนือวิกฤต ซึ่งความสามารถในการละลายของของไหลเหนือวิกฤตเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับความหนาแน่น โดยการเพิ่มความหนาแน่นส่งผลให้ของไหลเหนือวิกฤตมีความสามารถในการละลายเพิ่มมากขึ้น และการเพิ่มความหนาแน่นของไหลเหนือวิกฤตทำได้โดยการเพิ่มความดันในระบบ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อน เนื่องจากค่าการระเหยของสิ่งปนเปื้อนเป็นผลโดยตรงจากอุณหภูมิ ในการออกแบบกระบวนการล้างแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในระบบส่งผลให้ความหนาแน่นของของไหลเหนือวิกฤตลดลง แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิเป็นมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการระเหยของสิ่งปนเปื้อนมากกว่าการลดลงของค่าการละลายและช่วยเพิ่มการล้างสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงาน

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการละลายและความดันของของไหลเหนือวิกฤต โดยเส้น A-B แสดงถึงการลดลงของค่าการละลายเนื่องจากการถูกทำให้เจือจางโดยของไหลและการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของค่าการละลายตามเส้น B-C เกิดขึ้นจากการเพิ่มความหนาแน่นของไหลอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความดันจนเกินจุดวิกฤต รวมถึงการเพิ่มความสามารถในการละลาย ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า threshold pressure และการลดลงของค่าการละลายแสดงดังเส้น C-D เกิดขึ้นเนื่องจากที่ความดันสูงส่งผลให้เกิดแรงผลักของโมเลกุลทำให้เกิดการจับตัวถูกละลายออกจากตัวทำละลาย และเส้น D-E แสดงการเพิ่มขึ้นของค่าการละลาย ซึ่งเป็นผลจากการผสมของตัวถูกละลายและตัวทำละลายที่ความดันสูงส่งผลให้ค่าการละลายมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ของค่าการละลายในตัวทำละลายเหนือวิกฤตกับความดัน [3]

2.3.1 แบบจำลองสำหรับกลไกการทำความสะอาด [6]

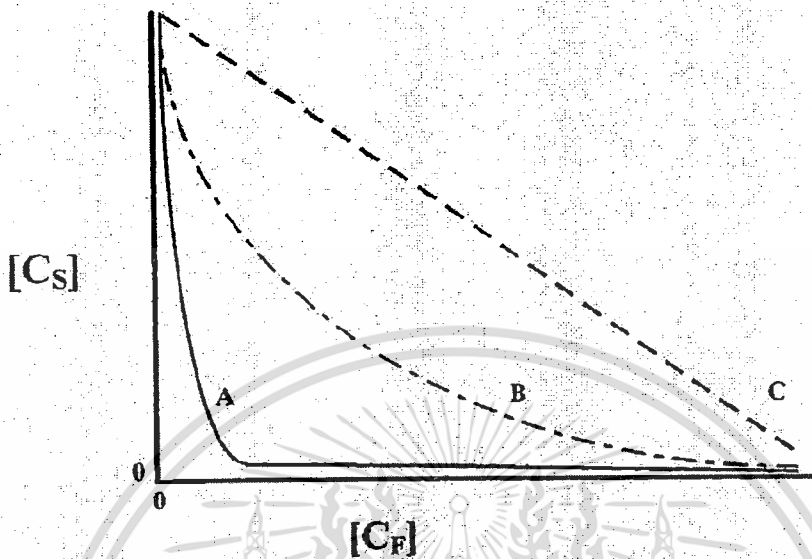
การนำเสนอแบบจำลองการทำความสะอาดมีหลายปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง สำหรับปัจจัยแรกคือสัมประสิทธิ์การแบ่งแยก ซึ่งเป็นอัตราส่วนของ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวต่อความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในตัวทำละลาย ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังสมการ 2.1

$$P = \frac{[C_S]}{[C_F]} \quad (2.1)$$

โดยที่ P คือ สัมประสิทธิ์ความแบ่งแยก $[C_S]$ คือ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวชิ้นงาน และ $[C_F]$ คือ ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในตัวทำละลายเหนือวิกฤต ในกรณีการทำความสะอาด หาก $[C_S]$ ถูกกำหนดให้เป็นความสัมพันธ์ของ $[C_F]$ แล้ว พฤติกรรมการแพร่กระจายของสิ่งปนเปื้อนดังแสดงในรูปที่ 2.6 คือความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวและในตัวทำละลายเหนือวิกฤต เส้นโค้งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวที่มีต่อจำนวนของความเข้มข้นสิ่งปนเปื้อนในตัวทำละลายที่ใช้ทำความสะอาด เริ่มต้น $[C_S]$ จะมีค่าสูง และเมื่อดำเนินกระบวนการทำความสะอาดค่า $[C_S]$ จะลดลง ในขณะที่ $[C_F]$ สูงขึ้น

ในกระบวนการทำความสะอาด รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ความแบ่งแยกความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวชิ้นงาน และความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในตัวทำละลายเหนือวิกฤต โดยเส้นที่ C เป็นตัวแทนของกรณีที่สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกมีค่าคงที่ครอบคลุมช่วงความเข้มข้นที่สิ่งปนเปื้อนสามารถละลายได้ แต่โดยทั่วไปพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะคล้ายกับเส้น A และ B ซึ่งเส้นโค้ง B แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการละลายตัวของสิ่งปนเปื้อนในตัวทำละลายเป็นตัวแปรที่จำกัดกระบวนการล้าง หรือสิ่งปนเปื้อนอาจเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับพื้นผิวจำกัดการละลายตัวของสิ่งปนเปื้อนส่งผลให้ไม่สามารถล้างชิ้นส่วนออกจากชิ้นงานได้ทั้งหมด ซึ่งในกรณีนี้ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในสารละลายมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ดูดซับบนพื้นผิว เนื่องจากเส้นโค้งเข้าใกล้บางค่ากำกับ (asymptotic value) การดูดซับบนพื้นผิวจึงเป็นปัจจัยควบคุมในการไม่ละลายสิ่งปนเปื้อนจากพื้นผิวโดยไม่คำนึงถึงความสามารถในการละลายทำโดยทั่วไปแล้วเส้นโค้งแสดงถึงว่าการใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

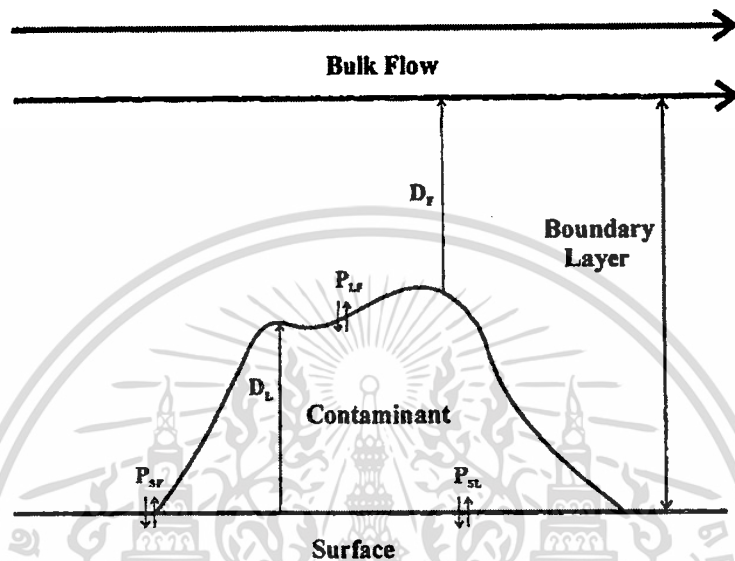
ความสามารถการละลายได้ดีในตัวทำละลายเหนือวิกฤต ถือว่าเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญของการดูดซับ isotherm ต่อการดำเนินกระบวนการตัวทำละลายเหนือวิกฤต



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ความเข้มข้นบนพื้นผิวชั้นงานและของไหล [6]

ในกระบวนการล้างด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤตต้องพิจารณาปรากฏการณ์การแบ่งแยก ทั้ง 3 แบบ เมื่อทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจาก 3 พื้นผิว สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่แตกต่างกัน ทั้ง 3 แบบสามารถแทนด้วยค่า P ตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.7 สิ่งปนเปื้อนสามารถแบ่งแยก พื้นผิวออกจากตัวทำละลายได้โดยตรง ซึ่งในที่นี้ใช้สัญลักษณ์เป็น P_{SF} ซึ่งตัวอักษร S เกี่ยวข้องกับพื้นผิว L เกี่ยวข้องกับสิ่งปนเปื้อนที่เป็นของเหลว และ F หมายถึงกับของไหลเหนือวิกฤต ในส่วนของ P_{SF} หมายถึง isotherm การดูดซับ ซึ่งได้เคยอธิบายไว้ก่อนหน้านี้ P_{SL} คือการแบ่งแยกระหว่างกันเองของสิ่งปนเปื้อน ระหว่างสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนพื้นผิว และ สิ่งปนเปื้อนส่วนใหญ่ที่อยู่ในกรณีนี้คือเป็นสถานะของเหลว เช่น น้ำมัน เป็นต้น อย่างไรก็ตาม P_{SL} มีค่าเท่ากับสิ่งปนเปื้อนที่เป็นของแข็ง และ P_{LF} ก็คือการแยกตัวของสิ่งปนเปื้อนระหว่างของเหลวส่วนใหญ่และตัวทำละลายที่ใช้ทำความสะอาด โดยทั่วไปกระบวนการทำให้แยกชั้นได้ถูกอธิบายให้อยู่ในรูปแบบของสมดุลความเข้มข้น เนื่องจากการแยกสิ่งปนเปื้อนเกิดขึ้นแบบย้อนกลับได้ระหว่าง 2 สถานะ เช่น ในกรณีของ P_{LF} สิ่งปนเปื้อนสามารถแบ่งแยกออกไปอยู่ในของไหลที่ใช้ทำความสะอาดและกลับเข้าไปอยู่ในของไหลที่ถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิว หากสิ่งปนเปื้อนไม่สามารถละลายตัวอยู่ในของไหลที่ใช้ทำความสะอาดได้ดีพอ หรือ ถ้ามีการดูดซับอย่างแรงของพื้นผิว การแยกตัวเข้าไปอยู่ในตัวทำละลายที่ใช้ทำความสะอาดก็จะทำได้เพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกเฉพาะ P_{LF} เกี่ยวข้องโดยตรงกับความสามารถการละลาย เนื่องจากเกี่ยวข้องกับ ความดันไอและอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เพิ่มการแยกตัวเข้าไปอยู่ในของไหลที่ใช้ทำความสะอาด ดังนั้นจึงเป็นการส่งเสริมการทำความสะอาดโดยรวมของพื้นผิว โดยสามารถไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นได้ถึงกระบวนการแบ่งแยกระหว่างรอบการทำความสะอาด เนื่องจากการแยกตัวของสิ่งปนเปื้อนจะเข้าไปอยู่ในตัวทำละลายก่อนในชั้นแรก และการแยกตัวจากพื้นผิวไปเป็นของไหลเป็นขั้นสุดท้าย เมื่อความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวถึงจุดที่ไม่มีของเหลวเหลือค้างอยู่ การแยกตัวสิ่งปนเปื้อนจะอยู่ในตัวทำละลายโดยตรง



รูปที่ 2.7 แบบจำลองอย่างง่ายของการขจัดสิ่งปนเปื้อนในของไหลเหนือวิกฤต [6]

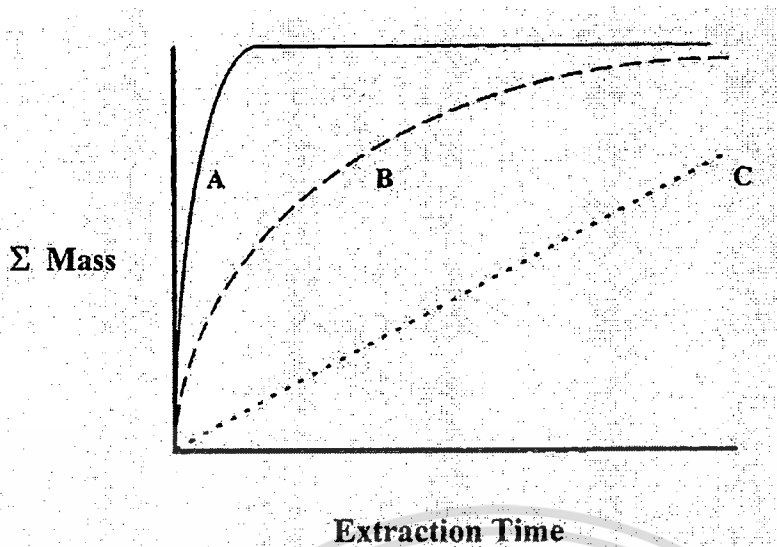
สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกไม่ใช่เป็นตัวแปรเพียงตัวเดียวที่คำนึงถึงในกระบวนการทำความสะอาด โดยสัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient, D) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเคลื่อนไหวของโมเลกุลและแนวโน้มการเคลื่อนที่ของโมเลกุลจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงซึ่งก็คือส่วนที่มีการปนเปื้อนไปสู่บริเวณที่วัฏภาคตัวทำละลายซึ่งมีสิ่งปนเปื้อนเจือจาง โดยที่ตัวห้อย S หมายถึงพื้นผิว L หมายถึงสิ่งปนเปื้อนที่เป็นของเหลว (หรือของแข็ง) และ F หมายถึงของไหลเหนือวิกฤต เพื่อทำให้มีการขจัดสิ่งปนเปื้อนออกและมีการทำความสะอาดในขั้นต่อไปเกิดขึ้น สิ่งปนเปื้อนจะต้องเข้าไปอยู่ในการไหลส่วนใหญ่ของตัวทำละลายเหนือวิกฤต

กระบวนการล้างมีหลายกลไกที่เกิดขึ้น โดยสิ่งปนเปื้อนมีการแยกตัวออกจากพื้นผิวของชิ้นงานและเข้าไปอยู่ในของไหล หลังจากนั้นสิ่งปนเปื้อนแพร่กระจายไปสู่พื้นผิวที่สัมผัสกับตัวทำละลายเพื่อการทำความสะอาด ซึ่งแทนด้วย D_L ในรูปที่ 2.7 จากนั้นสิ่งปนเปื้อนสามารถแยกตัวเข้าไปอยู่ในสถานะของไหลของชั้นขอบเขต (boundary layer) ซึ่งเป็นชั้นของตัวทำละลายที่สัมผัสกับตัวทำละลายซึ่งไม่มีการไหลด้วยพื้นผิวของชิ้นงานที่ถูกทำความสะอาดและสิ่งปนเปื้อน สิ่งปนเปื้อนแพร่จะกระจายจากพื้นผิวผ่านชั้นขอบเขตและเข้าไปอยู่ในการไหลซึ่งแทนด้วย D_T เพื่อให้ถูกขับออกไปจากพื้นผิว เนื่องจากตัวทำละลายเหนือวิกฤตมีการแพร่คล้ายกับก๊าซ และมากกว่าของเหลว ซึ่งโดยทั่วไปกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเหนือวิกฤตไม่พบว่ามีข้อจำกัดในการถ่ายเทมวลของกระบวนการสกัดแยกของของเหลว ดังนั้นจึงให้ผลลัพธ์การแยกตัวและ

การทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพมากกว่า ซึ่งอาจเป็นกรณีที่หากขั้นตอนการจำกัดอัตราของกระบวนการสกัดแยกเป็นการถ่ายเทที่เป็นจริงของสิ่งปนเปื้อนจากผิวหน้าของ ชิ้นงานไปสู่ตัวกลางของการแบ่งแยก ซึ่งแสดงให้เห็นโดยการดูดซับ isotherm หรือ P_{SF} ในความเป็นจริง ความต้านทานการแพร่ในสถานะของเหลว D_L คล้ายกับขั้นตอนกำหนดอัตรา ตั้งแต่การสกัดแยกออกจากสถานะของเหลวไปเป็นสถานะตัวทำละลายเหนือวิกฤตอาจจะถือได้ว่าเป็นปรากฏการณ์ โดยทั่วไปในการทำความสะอาดเชิงอุตสาหกรรม ในกรณีนี้ลักษณะสภาพของตัวทำละลายเหนือวิกฤต ไม่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลรวม

ในกระบวนการทำความสะอาดความหนาของชั้นขอบเขตเป็นสิ่งที่สำคัญของการขจัดสิ่งปนเปื้อน หากชั้นขอบเขตหนาการแพร่ของสิ่งปนเปื้อนเข้าไปในชั้นตัวทำละลายส่วนใหญ่จะช้าลงส่งผลทำให้กระบวนการล้างเป็นไปอย่างเชื่องช้า ผลดังกล่าวอาจจะเป็นเพราะเกิดสภาพการแยกสลายหรือการแยกสกัดแบบคงที่ของสิ่งปนเปื้อนที่ซึ่งไม่มีการไหลเวียนภายในห้องทำความสะอาดหรือแยกสกัด ในกรณีนี้ชั้นขอบเขตคือตัวทำละลาย และหากเมื่อตัวทำละลายนี้อยู่ในสภาพอิ่มตัวไปด้วยสิ่งปนเปื้อน ก็จะทำให้เกิดการหยุดการแยกสลายหรือการทำความสะอาดในทางตรงกันข้ามหากชั้นขอบเขต ค่อนข้างบางดังเช่นในกระบวนการเชิงพลวัต การแพร่ของสิ่งปนเปื้อนข้ามชั้นขอบเขตเข้าสู่สถานะของไหลจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำความสะอาด เพราะฉะนั้นเพื่อทำให้เกิดศักยภาพการทำความสะอาดสูงสุด จึงจำเป็นต้องทำให้มีการไหลของตัวทำละลายข้ามพื้นผิวที่กำลังถูกทำความสะอาดอย่างสูงที่สุด

โดยทั่วไปความหนาของชั้นขอบเขตและความสามารถในการละลายของสิ่งปนเปื้อนนั้น มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการขจัดสิ่งปนเปื้อนหรือการสกัดแยก โดยแสดงในรูปที่ 2.8 เส้นโค้ง A เป็นตัวแทนของกระบวนการทำความสะอาดโดยทั่วไปและการสกัดมีอัตราการล้างอย่างรวดเร็วซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสิ่งปนเปื้อนสามารถละลายในตัวทำละลายได้มาก ด้วยแนวโน้มของการสกัดแสดงด้วยเส้นโค้ง A ที่เข้าใกล้ค่ากำกับของ isotherm การดูดซับ ที่ซึ่งอันตรกิริยาบนพื้นผิวกลายเป็นข้อจำกัดการล้าง เส้น C ของรูปที่ 2.8 แทนกรณีที่ซึ่งสัมประสิทธิ์การแบ่งแยกเหนือช่วงกว้างของความเข้มข้นสิ่งปนเปื้อน สิ่งนี้สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากชั้นขอบเขตกระบวนการคงที่ หรือสิ่งปนเปื้อนซึ่งมีความสามารถในการละลายตัวที่จำกัด เส้นโค้ง B สามารถจำลองถึงกระบวนการในช่วงระหว่างเส้นโค้ง A และ C ที่ซึ่งการแพร่ของชั้นขอบเขตถูกระงับโดยความสามารถในการละลายหรืออันตรกิริยาบนพื้นผิวของสิ่งปนเปื้อน โดยที่กระบวนการล้างสิ่งปนเปื้อนขึ้นอยู่กับความสามารถการละลายของสิ่งปนเปื้อนในตัวทำละลายที่ใช้ทำความสะอาด หากสิ่งปนเปื้อนไม่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย การเพิ่มปริมาณการไหลให้มากที่สุด ก็ย่อมง่ายกว่าที่จะเคลื่อนย้ายสิ่งปนเปื้อนตามพื้นผิวโดยอาศัยแรงจากความเร็วเฉือน และการแยกตัวของสิ่งปนเปื้อนที่ข้ามผ่าน ชั้นขอบเขตแล้ว ยังมีการแยกตัวโดยตรงจากพื้นผิวไปสู่สถานะของไหลอีกด้วย สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่เกี่ยวข้องกับ P_{LF} ในรูปที่ 2.7 ขึ้นอยู่กับความสามารถการละลายซึ่ง และการคำนวณ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

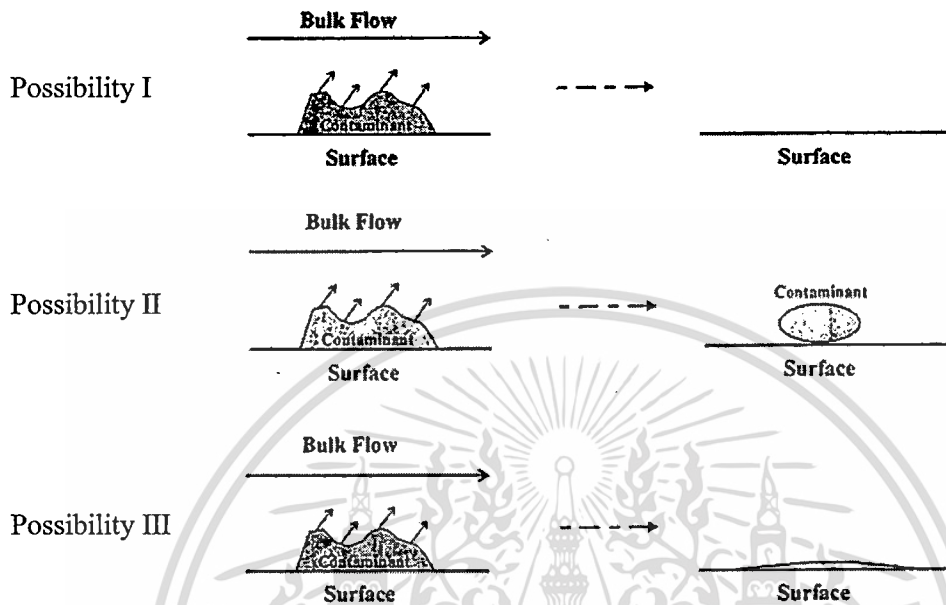


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่ถูกสกัดกับเวลา [6]

สัมประสิทธิ์การแบ่งแยกที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับ P_{SL} และ P_{SF} เป็นความสัมพันธ์ของอันตรกิริยาบนพื้นผิว โดยพื้นฐานประกอบด้วยปรากฏการณ์การดูดซับ เช่น การดูดซับเชิงเคมี หรือการดูดซับเชิงกายภาพ ในกรณีของการดูดซับเชิงเคมี สิ่งปนเปื้อนจะถูกดูดซับเชิงเคมีบนพื้นผิวผ่านทางพันธะของไฮโดรเจน หรือ แรงกระทำเชิงเคมีอื่น และในส่วนของ การดูดซับเชิงกายภาพ สิ่งปนเปื้อนจะถูกดักจับบนพื้นผิว ยกตัวอย่างเช่น การดูดซับเชิงกายภาพเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยบนพื้นผิวที่ถูกขัดเงามาแล้วอย่างดี และพื้นผิวที่มีรูพรุนอาจจะเป็นตัวลดความสามารถในการขจัดสิ่งปนเปื้อนจากชิ้นงาน เป็นต้น ในกรณีอื่นๆ การดูดซับเชิงเคมีและการดูดซับเชิงกายภาพล้วนเกี่ยวข้องกับ isotherm ของการดูดซับ หากมีอันตรกิริยาบนพื้นผิวเพียงเล็กน้อย โดยที่มี P_{SL} และ P_{SF} ขนาดใหญ่ ดังนั้นการบ่งชี้ถึงการแยกตัวไปเป็นสถานะของไหลเหนือวิกฤต จึงมีทิศทางไม่แน่นอน ในทางกลับกัน หากสัมประสิทธิ์เหล่านี้มีขนาดเล็ก (หมายถึงมีระดับอันตรกิริยาบนพื้นผิวมาก) ก็จะเป็นการยากที่จะแยกสลายชิ้นพื้นผิวของสิ่งปนเปื้อนของไหลเหนือวิกฤตเองก็สามารถแยกตัวไปเป็นสิ่งปนเปื้อนที่เป็นของเหลวหรือเป็นของแข็ง และก็จะขึ้นอยู่กับอัตราของการแพร่ที่สามารถเพิ่มหรือลดอัตราเชิงจลนพลศาสตร์ของการขจัดให้เข้าไปอยู่ในชิ้นตัวทำลาย

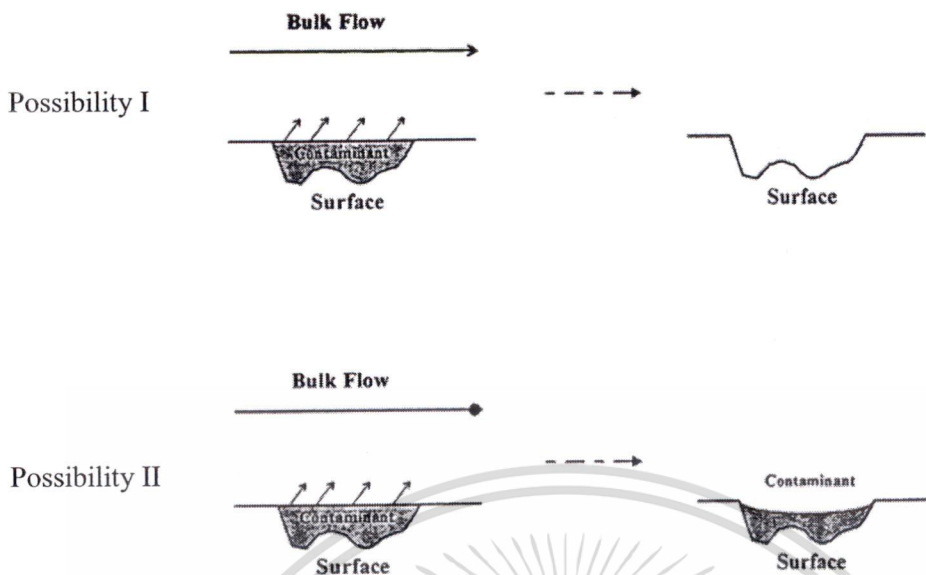
รูปที่ 2.9 แสดงความเป็นไปได้ 3 กรณีในการทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานผิวเรียบด้วยของไหลเหนือวิกฤต โดยกรณีที่ 1 แสดงผลของการทำความสะอาดที่ต้องการซึ่งเกิดขึ้นเมื่อความสามารถการละลายของสิ่งปนเปื้อนสูงพอที่จะให้กระบวนการล้างเกิดขึ้นสามารถทำลายการดูดซับเชิงเคมีหรือเชิงกายภาพของสิ่งปนเปื้อนที่เกาะติดกับพื้นผิวของชิ้นงานความเป็นไปได้กรณีที่ 2 สามารถเกิดขึ้นเมื่อสิ่งปนเปื้อนไม่มีความสามารถในการละลายในของไหลเหนือวิกฤต อย่างเพียงพอ และมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสูง ซึ่งเป็นผลให้มีความตึงผิวสูง และสิ่งปนเปื้อนชอบที่จะอยู่รวมกันมากกว่าอยู่ในของไหลเหนือวิกฤตหรือ ผิวหน้าของชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดการรวมตัวเป็นก้อนบนพื้นผิว ความเป็นไปได้กรณีที่ 3 สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อ $P_{SL} > P_{LF}$

สิ่งปนเปื้อนถูกละลายออกไปบางส่วนโดยของไหลเหนือวิกฤต แต่การดูดซับต่อพื้นผิวของ
 ซินงานเป็นตัวที่ลดความสามารถในการทำความสะอาด



รูปที่ 2.9 แบบจำลองกลไกการล้างซินงานผิวเรียบด้วยของไหลเหนือวิกฤต [6]

การจัดสิ่งปนเปื้อนออกจากพื้นผิวหยาบขรุขระเป็นสิ่งที่ทำความสะอาดได้ยาก ซึ่งการ
 ดูดซับเชิงกายภาพมีบทบาทมากกว่าการดูดซับเชิงเคมี ในการล้างตัวทำละลายที่เป็นของไหล
 เหนือวิกฤตมีข้อดีมากกว่าตัวทำละลาย เพราะ โดยทั่วไปเมื่อทำความสะอาดพื้นผิวที่มีสิ่งปนเปื้อน
 ถูกกักเอาไว้อยู่ในรอยแยกหรือในสิ่งกีดขวางเชิงกายภาพอื่น เนื่องจากของไหลเหนือวิกฤตมี
 ความหนืดและแรงตึงผิวต่ำกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวที่ใช้กันโดยทั่วไป ดังนั้นจึงส่งผลให้
 ของไหลเหนือวิกฤตมีการแทรกซึมเข้าไปในรอยแยกหรือรอยแตกขนาดเล็กได้มากกว่าทำให้
 สามารถละลายสิ่งปนเปื้อนได้ดีกว่า รูปที่ 2.10 แสดงความเป็นไปได้ที่สามารถเกิดขึ้นเมื่อมีการ
 ทำความสะอาดสิ่งปนเปื้อนจากพื้นผิวหยาบขรุขระ โดยผลลัพธ์ที่ต้องการคือการขจัดสิ่ง
 ปนเปื้อนออกจากรอยแยกได้อย่างสมบูรณ์ดังกรณีที่ 1 ซึ่งหากสิ่งปนเปื้อนสามารถละลายได้
 อย่างดีเพียงพอและแยกตัวไปอยู่ในของไหลเหนือวิกฤต ส่วนใหญ่สิ่งปนเปื้อนที่สามารถละลาย
 ตัวได้น้อยสามารถถูกขจัดออกได้หากได้ใช้การไหลแบบปั่นป่วนในระบบและส่งผลให้
 สิ่งปนเปื้อนที่สามารถละลายตัวได้บางส่วนได้ถูกกวาดออกไป การขจัดสิ่งปนเปื้อนบางส่วน
 สามารถเกิดขึ้นได้ในกรณีที่ความสามารถในการละลายของสิ่งปนเปื้อนนั้นต่ำกว่ากระแสมของ
 ไหลเหนือวิกฤตส่วนใหญ่ นั่นไหลรุนแรงพอที่จะกวาดเอาสิ่งปนเปื้อนที่ถูกกักอยู่นั้นออกไป
 อย่างไม่รู้ตัว หากสิ่งปนเปื้อนที่ถูกกักอยู่มีความสามารถในการละลายต่ำ และมีความยึดติดสูงกับ
 พื้นผิวของซินงาน การทำความสะอาดก็จะเป็นไปได้ยากไม่ว่าจะใช้ตัวทำละลายใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แบบจำลองกลไกการล้างชิ้นงานผิวขรุขระด้วยของไหลเหนือวิกฤต [6]

ในภาพรวมของการทำความสะอาดด้วยของไหลเหนือวิกฤต ที่ซึ่งความสามารถละลายของสิ่งปนเปื้อนเป็นประเด็นสำคัญก็คือในกระบวนการแยกสิ่งปนเปื้อนออกจากตัวทำละลายในเครื่องแยก ตัวทำละลายเพื่อทำความสะอาดที่ถูกใช้แล้ว ได้ถูกส่งผ่านมาจากห้องทำความสะอาดเข้าสู่เครื่องแยกที่ทำให้ตัวทำละลายเหนือวิกฤตขยายตัวเป็นก๊าซ สารที่ถูกสกัดออกมาจะถูกเก็บรวบรวมไว้ในเครื่องแยก และ CO_2 ในสถานะก๊าซจะถูกส่งผ่านกลับไปในกระแสการไหลเพื่อให้ถูกนำไปใช้อีกครั้งหนึ่งในกระบวนการทำความสะอาด หากสิ่งปนเปื้อนสามารถถูกรวมเข้าด้วยกันได้กับของเหลวและมีความดันไอสูง ก็มีความเป็นไปได้ที่สิ่งปนเปื้อนจะถูกส่งต่อเข้าไปในถังเก็บตัวทำละลาย เพราะว่าสิ่งปนเปื้อนชนิดดังกล่าว นั้น ยากที่จะถูกขจัดออกไปจาก CO_2 อย่างสมบูรณ์

จากการศึกษากลไกการล้างสิ่งปนเปื้อนด้วย scCO_2 พบว่าค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนใน scCO_2 เป็นปัจจัยหลักในการล้าง เพราะฉะนั้นหากทราบค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนใน scCO_2 ก็จะสามารถประเมินประสิทธิภาพเบื้องต้นของการล้างได้

2.4 การประมาณค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนใน scCO_2

จากหัวข้อ 2.3 ได้แสดงถึงความสำคัญของค่าการละลายที่มีผลต่อประสิทธิภาพล้างโดยใช้ scCO_2 เพราะฉะนั้นการคำนวณค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนใน scCO_2 ซึ่งเป็นตัวแปรของอุณหภูมิและความดันจึงมีความจำเป็นเพื่อใช้ในการออกแบบกระบวนการและทราบถึงความเป็นไปได้ในการล้างสิ่งปนเปื้อนนั้น โดยทั่วไปการประมาณค่าการละลายของตัวถูกละลายในตัวทำละลายใช้พื้นฐานการคำนวณจากสมดุลวัฏภาคและสมการสถานะ [7] เมื่อกำหนดให้ไม่ทราบกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งปนเปื้อนเป็นของแข็งบริสุทธิ์และ scCO_2 เป็นตัวทำละลาย โดยที่สมดุลวัฏภาคสามารถเขียน สมดุลของฟูกาซิตี (fugacity) ได้ดังสมการที่ 2.2

$$f_i^{\text{solid}} = f_i^{\text{vapour}} \quad (2.2)$$

โดย f_i^{solid} คือฟูกาซิตีของตัวถูกละลายในวัฏภาคของแข็งที่นี้หมายถึงสิ่งปนเปื้อน และ f_i^{vapour} คือฟูกาซิตีของตัวถูกละลายในวัฏภาคก๊าซ

อย่างไรก็ตามสมการสถานะไม่สามารถประยุกต์ใช้กับเฟสของแข็งจึงจำเป็นต้องใช้ แบบจำลองสัมประสิทธิ์ฟูกาซิตี สมมติฐานว่าของไหลจะไม่ถูกดูดซับในของแข็งซึ่งก็ หมายความว่าของแข็งยังคงเป็นสารบริสุทธิ์ ฟูกาซิตีของของแข็งองค์ประกอบ i สามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.3

$$f_i^{\text{solid}} = P_i^{\text{sub}} \phi_i^{\text{solid}} \exp\left(\frac{v_i^{\text{solid}}(P - P_i^{\text{sub}})}{RT}\right) \quad (2.3)$$

โดย P_i^{sub} คือความดันย่อยของของแข็งที่อุณหภูมิ T , v_i^{solid} คือปริมาตรเชิงโมลของ ของแข็ง, ϕ_i^{vapour} คือ สัมประสิทธิ์ฟูกาซิตีขององค์ประกอบ i เนื่องจากของแข็งเป็นสารบริสุทธิ์ เพราะฉะนั้นค่า ϕ_i^{vapour} มีค่าเท่ากับหนึ่ง

ฟูกาซิตีในวัฏภาคก๊าซสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.4

$$f_i^{\text{vapour}} = y_i \phi_i^{\text{vapour}} P \quad (2.4)$$

โดย y_i คือค่าการละลายขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคไอ และ ϕ_i^{vapour} คือ สัมประสิทธิ์ ฟูกาซิตีขององค์ประกอบ i เมื่อแทนค่าสมการ 2.3 และ 2.4 ลงในสมการ 2.2 จะได้ดังสมการที่ 2.5

$$y_i = \frac{P_i^{\text{sub}}}{\phi_i^{\text{vapour}} P} \exp\left(\frac{v_i^{\text{solid}}(P - P_i^{\text{sub}})}{RT}\right) \quad (2.5)$$

ดังนั้นสามารถเขียนค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนเป็นองค์ประกอบที่ 2 และตัวทำละลาย เป็นองค์ประกอบที่ 1 ได้ดังสมการที่ 2.6

$$y_2 = \frac{P_2^{\text{sub}}}{\phi_2^{\text{vapour}} P} \exp\left(\frac{v_2^{\text{solid}}(P - P_2^{\text{sub}})}{RT}\right) \quad (2.6)$$

เนื่องจากความดันในระบบของไหลเหนือวิกฤตมีความดันสูง จึงไม่สามารถพิจารณาเฟส ไอเป็นก๊าซอุดมคติได้ เพราะฉะนั้นจึงใช้สมการสถานะของก๊าซจริงในการประมาณค่า ϕ_i^{vapour} และจากการงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [8-10] พบว่าสมการสถานะ Peng – Robinson สามารถทำนายค่า การละลายของไฮโดรคาร์บอนใน scCO_2 ได้แม่นยำ โดยมีความผิดพลาดร้อยละ 10-20 เนื่องจาก ค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนใน scCO_2 มีค่าน้อยมาก จึงกำหนดให้การละลายของไฮโดร- คาร์บอนใน scCO_2 เป็นสารละลายเจือจางอนันต์ (infinite dilution) [8] โดยสามารถเขียน

ϕ_i^{vapour} จากสมการสถานะ Peng – Robinson ได้ดังสมการ 2.7 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \phi_2 = \frac{b_2}{b_1} (z_1 - 1) - \ln \left[z_1 - \frac{b_1 \cdot P}{RT} \right] - q_1 I_1 \left[2 \left(\frac{a_1 a_2}{a_1} \right)^{0.5} \cdot (1 - k_{12}) - \frac{b_2}{b_1} \right] \quad (2.7)$$

โดยที่

$$q_1 = \frac{a_1}{2RT\sqrt{2b_1}} \quad (2.8)$$

$$I_1 = \ln \left[\frac{Z_1 + (1 + \sqrt{2}) \cdot \left(\frac{b_1 P}{RT} \right)}{Z_1 + (1 - \sqrt{2}) \cdot \left(\frac{b_1 P}{RT} \right)} \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ a และ b คือค่าคงที่ของสมการสถานะ Peng – Robinson, z คือแฟกเตอร์สภาพอัด (compressibility factor) คำนวณได้จากสมการที่ 2.10-2.15 และ k_{12} คือ ค่าพารามิเตอร์ปรับแก้ อันตรกิริยา (binary interaction parameter)

$$a_i = 0.45724 \left(\frac{R^2 T_{ci}^2}{P_{ci}} \right) \Psi \quad (2.10)$$

$$\Psi = \left[1 + (0.37464 + 1.54226 \cdot \omega_i - 0.26992 \cdot \omega_i^2) (1 - \sqrt{T_r}) \right]^2 \quad (2.11)$$

$$b_i = 0.0778 \left(\frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \right) \quad (2.12)$$

โดยที่ ω คืออะเซนทริกแฟกเตอร์ (acentric factor) ของสารบริสุทธิ์ และ T_r คือ อุณหภูมิลดที่อุณหภูมิ T โดยมีค่าเท่ากับ $T_r = \frac{T}{T_c}$

$$z^3 - (1 - B)z^2 + (A - 3B^2 - 2B)z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (2.13)$$

$$A = \frac{aP}{R^2 T^2} \quad (2.14)$$

$$B = \frac{bP}{RT} \quad (2.15)$$

จากข้อมูลสิ่งปนเปื้อนในชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ พบว่าส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมวลโมเลกุลสูง [1] และงานวิจัยนี้ได้ใช้พาราฟินแวกซ์เป็นตัวแทนสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานตัวอย่าง ดังนั้นสามารถที่จะใช้วิธีการคำนวณดังกล่าวประมาณค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนใน scCO_2 ได้

แต่อย่างไรก็ตามจากแบบจำลองการล้างได้แสดงผลของการแพร่ของสิ่งปนเปื้อนใน scCO_2 โดยเป็นปัจจัยที่กำหนดความเร็วในการทำความสะอาด ซึ่งมีสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นตัวแปรที่ชี้วัดอัตราการแพร่ เพราะฉะนั้นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงช่วยให้การออกแบบกระบวนการสามารถประเมินเวลาการล้างได้ในเบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ [11]

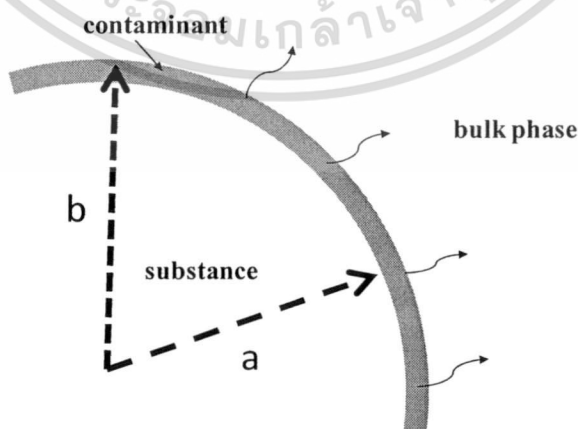
การแพร่คือการกระจายตัวของโมเลกุลของสสารจากจุดที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ไปยังจุดที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าด้วยการเคลื่อนที่เชิงสุ่มของโมเลกุล การแพร่จะทำให้เกิดการผสมของวัสดุอย่างช้าๆ สำหรับวิภาคหนึ่งๆของวัสดุใดๆก็ตามที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และไม่มีแรงภายนอกมากระทำกับอนุภาค กระบวนการแพร่ก็จะยังคงเกิดขึ้นแม้ว่า จะสารจะผสมกันโดยสมบูรณ์หรือเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว

ในกระบวนการสกัดหรือการล้างนับว่าการแพร่เป็นกลไกที่สำคัญที่ส่งผลต่ออัตราเร็วในการล้าง โดยปกติแล้วการแพร่ของโมเลกุลการแพร่แบบสถานะไม่คงตัว ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้กฎข้อที่สองของฟิค (Fick's second law) [11] ดังสมการที่ 2.16

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{AB} \nabla^2 C \quad (2.16)$$

เมื่อ C คือความเข้มข้น, t คือเวลา และ D_{AB} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ จากสมการที่ 2.16 จะเห็นได้ว่าพจน์ด้านซ้าย แสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นต่อเวลา และพจน์ $\nabla^2 C$ ทางด้านขวาแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่แนวแกนใดๆของระบบ ซึ่งมี D_{AB} เป็นสัมประสิทธิ์ที่แสดงถึงอัตราการแพร่ของสารผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ต่อเวลา โดยระบบของแข็งกับของไหลพบว่าค่า D_{AB} ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและความดันของสาร

โดยทั่วไปวิธีในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ต้องทราบวาระบบที่พิจารณาว่าเป็น ระบาย ทรงกระบอก หรือทรงกลม ซึ่งวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่แต่ละระบบก็จะใช้สมการในการพิจารณาต่างกัน [11] ซึ่งในกระบวนการล้างชิ้นงานในงานวิจัยนี้เริ่มต้นได้ใช้วัสดุทรงกลมเพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ โดยกำหนดให้สิ่งปนเปื้อนเคลื่อนบนผิวของชิ้นงานลักษณะดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพการแพร่ของสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานทรงกลม

โดยพื้นผิวที่ $r = a$ มีความเข้มข้นคงที่ C_0 และที่ $r = b$ มีความเข้มข้น C_1 ขณะที่การแพร่ของสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เริ่มต้น ภายในช่วง $a \leq r \leq b$ สามารถเขียนการแพร่ผ่านทรงกลมกลาง ได้ดังสมการที่ 2.17 [11] ไม่วางกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2(a^2 + ab + b^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b \cos n\pi - a}{n} \right)^2 \exp\{-Dn^2\pi^2 t / (b-a)^2\} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 สามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สภาวะดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการล้างวัสดุชิ้นงานรูปทรงอื่นได้ อีกทั้งช่วยในการออกแบบกระบวนการล้างและประเมินเวลาในการล้างเบื้องต้นได้

2.6 จลนพลศาสตร์การคายซับ (Kinetic of Desorption)

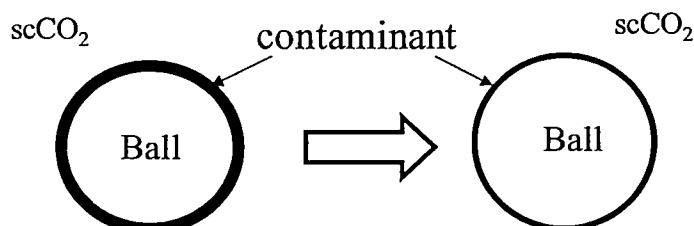
การคายซับเป็นปรากฏการณ์ที่ตัวถูกละลายแพร่หรือซึมผ่านผิวของชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศของไหล ซึ่งกระบวนการดังกล่าวมีลักษณะตรงข้ามกับการดูดซับ การคายซับเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานและบรรยากาศของไหล โดยเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคของไหลรวมมีค่าต่ำ ตัวถูกละลายจะแพร่จากชิ้นงานเข้าสู่วัฏภาคของไหลรวม เนื่องจากผลของความแตกต่างของความเข้มข้น (concentration gradient) และสิ้นสุดการแพร่เมื่อกระบวนการเข้าสู่สมดุล

ในกระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO_2 มีกลไกที่คล้ายกับการสกัด และนิยมใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับ [3,12,13] แสดงดังสมการที่ 2.18

$$\frac{dS}{dt} = -k_d S^\alpha \quad (2.18)$$

เมื่อ S คือร้อยละปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลืออยู่ (g) k_d คือ ค่าคงที่อัตราการคายซับ (1/min) และ α คืออันดับของการคายซับ

จากสมการที่ 2.18 ค่าคงที่อัตราการคายซับเป็นตัวชี้วัดความเร็วในการคายซับ และอันดับของการคายซับเป็นผลเนื่องมาจากกลไกในการล้าง หากการล้างมีกลไกที่ซับซ้อน และมีปัจจัยในการควบคุมการล้างมากกว่าหนึ่งตัวแปร แนวโน้มอันดับของการคายซับจะมีค่ามากกว่าหนึ่ง ซึ่งการที่กลไกการล้างมีความซับซ้อนมากขึ้นทำให้อัตราการคายซับช้าลงตามลำดับ ในงานวิจัยนี้ใช้จลนพลศาสตร์การคายซับในการเป็นแบบจำลองการล้างด้วย scCO_2 โดยมีสมมติฐานว่าเป็นกระบวนการคายซับแบบย้อนกลับไม่ได้ (irreversible desorption) เพื่อประมาณค่าคงที่อัตราการคายซับและอันดับของการคายซับต่อไป แผนภาพจำลองการล้างแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยสมมติฐาน สิ่งปนเปื้อนเคลื่อนบนชิ้นงานมีความหนาเท่ากัน



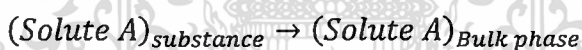
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ที่ เวลาเริ่มต้นงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ที่ เวลาใดๆให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้รูปที่ 2.12 แผนภาพจำลองการล้าง เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 เริ่มต้นกำหนดให้สิ่งปนเปื้อนเคลื่อนอยู่บนพื้นผิวชิ้นงาน มีปริมาณ S_0 เมื่อเวลาผ่านไปแก๊สจะถูกละลายเข้าไปในวัสดุภาค $scCO_2$ ทำให้ปริมาณแก๊สบนพื้นผิวชิ้นงานลดลง จึงสามารถสร้างแนวโน้มการล้างชิ้นงานได้จากปริมาณแก๊สที่เคลื่อนบนพื้นผิวชิ้นงานที่เวลาใดๆ และหาอันดับของการคายซับโดยการใช่วิธี integral method และใช้ข้อมูลจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับแนวโน้มการล้างเพื่อประมาณค่าคงที่อัตราการคายซับ

2.7 Integral Method

วิธี integral method นิยมใช้อย่างมากในการประมาณค่าคงที่อัตราและอันดับของปฏิกิริยาเคมีในจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา [14] ซึ่งมีรูปแบบสมการที่คล้ายกับจลนพลศาสตร์การคายซับ ดังนั้นจึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการวิจัยนี้ได้ การประมาณค่าอันดับของการคายซับด้วยวิธี integral method เริ่มต้นโดยการสมมติอันดับของการคายซับ จากนั้นอินทิเกรตสมการเพื่อหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นและเวลา และนำข้อมูลจากการทดลองสร้างกราฟตามความสัมพันธ์ดังกล่าว หากอันดับของการคายซับที่สมมติในเริ่มต้นเป็นจริง กราฟความสัมพันธ์ที่ได้ข้อมูลการทดลองจะเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยทั่วไปการสมมติอันดับการคายซับกำหนดเป็นจำนวนเต็ม เช่น ศูนย์ หนึ่ง และ สอง ดังนี้

โดยสมมติฐานกระบวนการเป็นการคายซับแบบย้อนกลับไม่ได้



กรณีที่ I. สำหรับการคายซับอันดับศูนย์ จากสมการที่ 2.18 จะได้

$$\frac{dS}{dt} = -k_a \quad (2.19)$$

เมื่อกำหนดให้ $S = S_0$ ที่ $t = 0$ อินทิเกรตสมการที่ 2.19 ได้เป็น

$$S_0 - S = k_a t \quad (2.20)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ $s - s_0$ กับ t ได้เป็นเส้นตรงมีความชัน k_a ดังนั้นแบบจำลองนี้เป็นการคายซับอันดับศูนย์ ดังรูปที่ 2.13 ก.

กรณีที่ II. สำหรับการคายซับอันดับหนึ่ง จากสมการที่ 2.18 จะได้

$$\frac{dS}{dt} = -k_a S \quad (2.21)$$

เมื่อกำหนดให้ $S = S_0$ ที่ $t = 0$ อินทิเกรตสมการที่ 2.21 ได้เป็น

$$\ln \frac{S_0}{S} = k_a t \quad (2.22)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ $\ln \frac{S_0}{S}$ กับ t ได้เป็นเส้นตรงมีความชัน k_a ดังนั้น

แบบจำลองนี้เป็นการคายซับอันดับหนึ่ง ดังรูป 2.13 ข.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

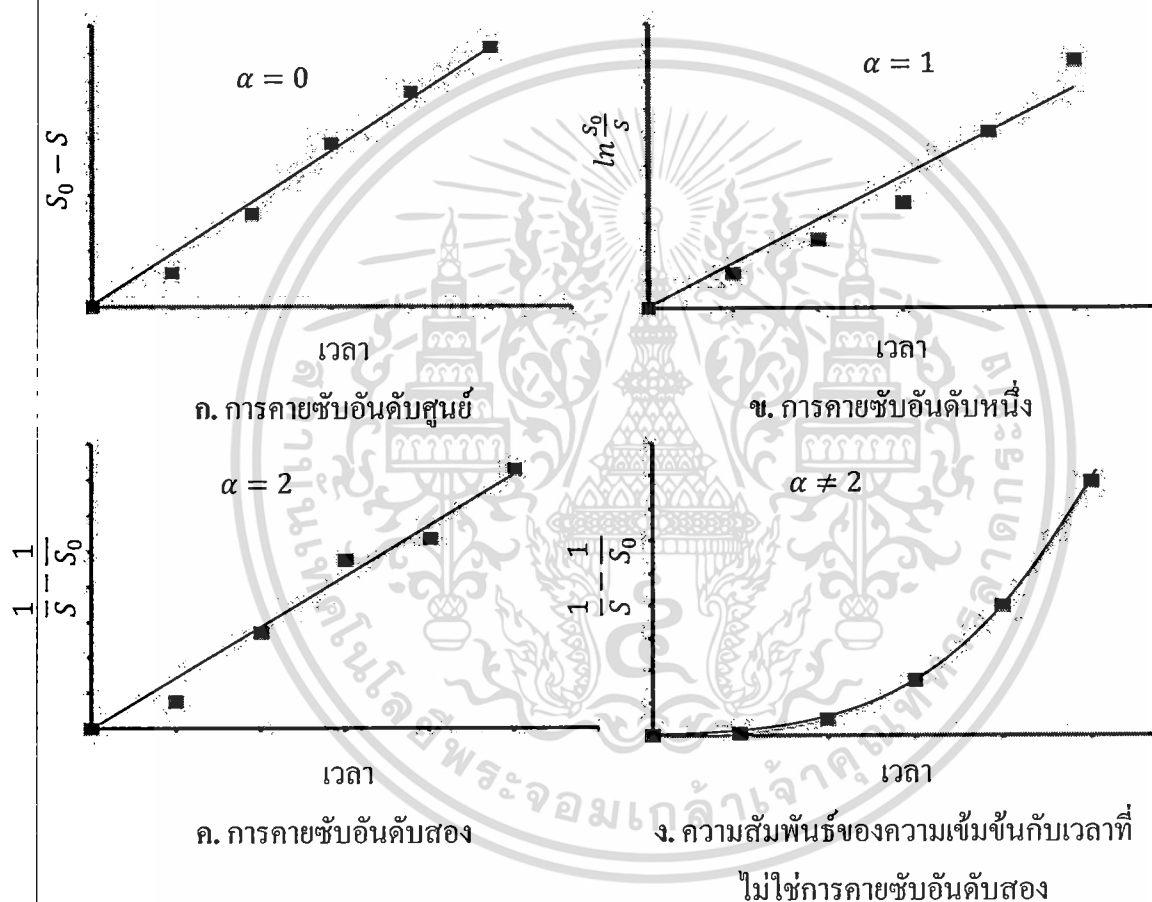
กรณี III. สำหรับการคายซับอันดับสอง จากสมการที่ 2.18 จะได้

$$\frac{dS}{dt} = -k_d S^2 \quad (2.23)$$

เมื่อกำหนดให้ $S = S_0$ ที่ $t = 0$ อินทิเกรตสมการที่ 2.23 ได้เป็น

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0} = k_d t \quad (2.24)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ $\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0}$ กับ t ได้เป็นเส้นตรงมีความชัน k_d ดังนั้นแบบจำลองนี้เป็นการคายซับอันดับสอง ดังรูป 2.13 ค.



รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นกับเวลาที่แบบจำลองต่างๆ

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาเห็นได้ว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการคายซับในรูปที่ 2.13ก ถึง 2.13ค เป็นการคายซับอันดับศูนย์, หนึ่ง, สอง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามหากอันดับการคายซับในกระบวนการไม่เป็นไปตามที่ตั้งสมมติฐานไว้ในเบื้องต้น กราฟดังกล่าวไม่เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ดังรูปที่ 2.13ง จึงต้องสมมติอันดับการคายซับใหม่ หรือใช้วิธีการอื่นเช่น Differential method of analysis เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

W. Dale Spa และคณะ [2] ได้ศึกษากระบวนการล้างน้ำมันและสารประกอบอินทรีย์บนผิววัสดุชนิดต่างๆ โดยใช้ $scCO_2$ ที่อุณหภูมิ $45\text{ }^{\circ}C$ ความดัน 300 bar พบว่า $scCO_2$ มีประสิทธิภาพในการล้างน้ำมันและสารประกอบอินทรีย์บนพื้นผิวโลหะชนิดต่างๆ ได้เฉลี่ยร้อยละ 85 - 90 และร้อยละ 70-90 ตามลำดับ โดยสรุปว่าประสิทธิภาพในกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ วิฤกตมีปัจจัยหลักคือ ความเป็นขั้วของสิ่งเจือปน โดยที่ $scCO_2$ สามารถล้างสิ่งเจือปนที่ไม่มีขั้วได้ดี และอีกปัจจัยที่สำคัญคือเมื่อวัสดุมีความพรุนมากขึ้นประสิทธิภาพของการล้างจะลดลง

กลไกพื้นฐานในการทำความสะอาดด้วย $scCO_2$ วิฤกตได้ถูกอธิบายโดย A. Matthews และคณะ [3] โดยกลไกที่สำคัญในการทำความสะอาดด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิฤกตคือค่าการละลายของน้ำมันในสารสกัดจากของแข็งและละลายในวัฏภาคของไหล อีกทั้งการที่คาร์บอนไดออกไซด์มีความหนืดต่ำทำให้สามารถซึมผ่านเข้าสู่อนุภาคของแข็งได้ง่ายและเร็ว จากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์จะละลายน้ำมันกลับเข้ามาในวัฏภาคของไหล นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนละลายในน้ำมันทำให้ความหนืดและแรงตึงผิวของน้ำมันลดลงช่วยเพิ่มความสามารถในการทำความสะอาด

R. Bergström [15] ได้เปรียบเทียบต้นทุนการปฏิบัติงาน ของกระบวนการล้างด้วย Trichloroethylene (TCE) และ $scCO_2$ พบว่าปริมาณ $scCO_2$ ที่ใช้ในการทำความสะอาดมากกว่า TCE ส่งผลให้ต้นทุนของสารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดมีมากขึ้นตามไปด้วย แต่กระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ มีของเสียที่น้อยกว่ากระบวนการล้างด้วย TCE ถึง 10 เท่า จึงช่วยลดต้นทุนด้านพลังงานในส่วนของการบำบัดของเสียดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การเปรียบเทียบต้นทุนดำเนินการ ของกระบวนการล้างด้วย Trichloroethylene และ $scCO_2$ [15]

Items	$scCO_2$	TCE
ความสิ้นเปลืองสารเคมี (กิโลกรัม/กิโลกรัมชิ้นงาน)	0.15	0.05
ต้นทุนสารเคมี (บาท/กิโลกรัมชิ้นงาน)	4.29	2.57
ความสิ้นเปลืองพลังงาน(kWh/กิโลกรัมชิ้นงาน)	0.3	1.0
ของเสีย (ลิตร/ปี)	100	1000

H. Smith [6] ทำการประเมินต้นทุนกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ กับการล้างด้วย DI water โดยเปรียบเทียบ cumulative net cash flow ของกระบวนการทั้งสอง พบว่าต้นทุนของกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ ในปีแรกสูงกว่า DI water เนื่องจากต้นทุนทางด้านการลงทุนของการล้างด้วย $scCO_2$ มีมูลค่าสูง เช่น ค่าออกแบบทางด้านวิศวกรรม ค่าอุปกรณ์ทนต่อแรงดันสูง เป็นต้น ไม่รวมกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากกระบวนการล้างด้วย DI water มีต้นทุนการปฏิบัติการที่สูงกว่า เช่น ค่าบำรุงรักษา ค่าบำบัดสารเคมีและน้ำ ค่าไฟฟ้า ส่งผลให้หลังจากปีแรก ต้นทุนของกระบวนการล้างด้วย DI water สูงกว่าการล้างด้วย scCO₂ อีกทั้ง normalized annual costs ของกระบวนการทั้งสองใน 5 ปี พบว่ากระบวนการล้างด้วย DI water มีต้นทุนการลงทุนและการปฏิบัติการสูงกว่าการล้างด้วย scCO₂ เนื่องจากการล้างด้วย DI water มีต้นทุนเพิ่มในการบำบัดสารเคมีและน้ำ อีกทั้งการล้างด้วย scCO₂ มีต้นทุนด้านพลังงานที่น้อยกว่า เนื่องจากเป็นระบบที่มีการนำ CO₂ หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ และเป็น dry process จึงไม่มีกระบวนการอบแห้งชิ้นงาน และการบำบัดน้ำเสีย ส่งผลให้ช่วยลดต้นทุนด้านพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในแต่ละด้านกระบวนการล้างด้วย scCO₂ จึงมีต้นทุนน้อยกว่า

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยใช้ scCO₂ โดยใช้การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาผลจากสภาวะการล้างและรูปทรงของชิ้นงานต่อประสิทธิภาพของการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้จลนพลศาสตร์การคายซับในการอธิบายกระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยใช้ scCO₂ และจากการประเมินด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่ากระบวนการล้างด้วย scCO₂ เป็นเทคโนโลยีทางเลือกใหม่ที่สามารถเข้ามาทดแทนกระบวนการล้างแบบเดิมได้ โดยในเบื้องต้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงต้นทุนการล้างของชิ้นงานจากกระบวนการล้างด้วย scCO₂

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

- 1) สแตนเลสทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.65 mm
- 2) ท่อโลหะกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายใน 1.6 และ 0.9 mm ตามลำดับ ความยาว 10 mm
- 3) พาราฟินแวกซ์
- 4) คาร์บอนไดออกไซด์ ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.95
- 5) เครื่องให้ความร้อนและเครื่องกวนแม่เหล็ก Yellow line MAG HS 7
- 6) ป้อนความดันสูง ISCO 260D Syringe pump
- 7) เครื่องล้างความดันสูงบริษัท Taiatsu Techno/Japan ปริมาตรบรรจุ 15 ml
- 8) เครื่อง Micro balance Mettler Toledo AX205
- 9) เทอร์โมคัปเปิล

3.2 ขั้นตอนการทดลอง

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานก่อนการทำความสะอาด

ในการทดลองได้ นำชิ้นงานตัวอย่าง ชุบในพาราฟินแวกซ์เหลวที่อุณหภูมิ 150 °C จากนั้นนำไปทำให้แห้งโดยเก็บไว้ในหม้อสุญญากาศขึ้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักพาราฟินแวกซ์เริ่มต้นก่อนทำความสะอาดโดยใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง Micro balance Mettler Toledo/Swiss รุ่น AX 205 (readability +/- 10 µg) โดยมีปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เคลือบบนผิวลูกบอลเท่ากับ 3-5 mg ต่อชิ้นงาน เพื่อควบคุมปริมาณพาราฟินแวกซ์ในเครื่องล้างทนแรงดันสูงให้ใกล้เคียงกับค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂

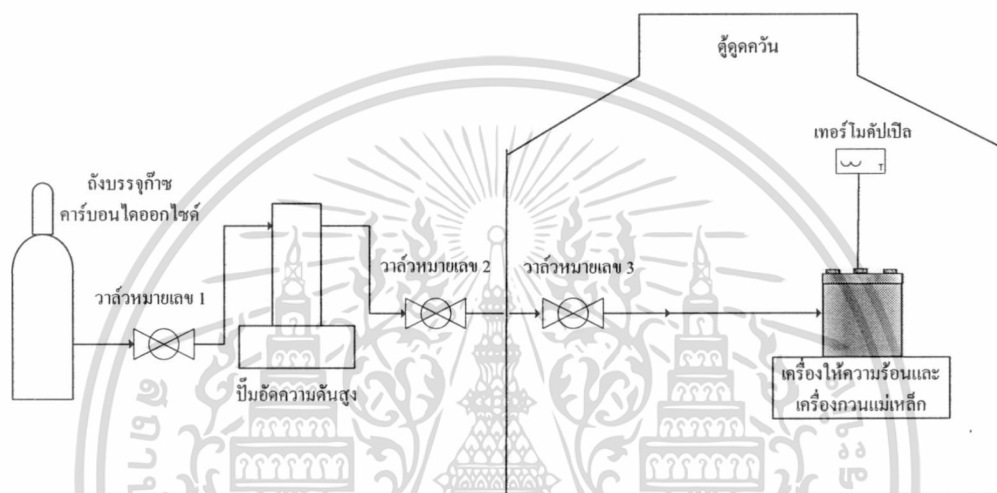
3.2.2 กระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO₂

ชุดกระบวนการทำความสะอาดแสดงดังรูปที่ 3.1 และมีขั้นตอนการล้างดังนี้

- 1) นำตัวอย่างชิ้นงานที่เตรียมจากหัวข้อ 3.2.1 ใส่ในเครื่องล้างทนแรงดันสูง
- 2) เปิดเครื่องให้ความร้อน เพื่อควบคุมอุณหภูมิเครื่องล้างความดันสูงให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด
- 3) เปิดวาล์วหมายเลข 1 และเติมก๊าซเข้าเก็บภายในปั๊มความดัน โดยใช้ชุดควบคุมปั๊ม
- 4) ปิดวาล์วหมายเลข 1 และเปิดวาล์วหมายเลข 2 และ 3 ทำการไล่อากาศจากท่อและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ตั้งค่าความดันที่ต้องการและเริ่มต้นอัดความดันจนถึงความดันที่กำหนด
- 6) เมื่อถึงเวลาที่กำหนด หยุดการทำงานของปั๊มความดันสูงและปิดวาล์วหมายเลข 3
- 7) ถอดข้อต่อท่อระหว่างวาล์วหมายเลข 2 และ 3 จากนั้นเปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อปล่อย CO₂
- 8) นำชิ้นงานมาชั่งด้วยเครื่อง micro balance เพื่อหาน้ำหนักที่เปลี่ยนไป
- 9) นำตัวอย่างใส่ในเครื่องล้างทนแรงดันสูง จากนั้นดำเนินการตั้งแต่วัดข้อ 2 จนชิ้นงานมีน้ำหนักคงที่หรือล้างพาราฟินเวกซ์ออกจากชิ้นงานจนหมด



รูปที่ 3.1 ชุดกระบวนการล้างด้วย scCO₂

3.2.3 การประเมินประสิทธิภาพของกระบวนการล้างด้วย scCO₂

กระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO₂ สามารถประเมินประสิทธิภาพการล้างได้จากปริมาณพาราฟินเวกซ์ที่หลุดตกค้างบนผิวชิ้นงานที่เวลาใดๆ ซึ่งกระบวนการล้างในงานวิจัยนี้เป็นระบบ semi batch จากข้อที่ 3.2.1 เมื่อทราบปริมาณเริ่มต้นของชิ้นงาน และทำชิ้นงานที่ล้าง ณ เวลาใดๆ สามารถคำนวณร้อยละปริมาณพาราฟินเวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงาน (Percent Residual Contaminate, %PRC) เพื่อบอกถึงประสิทธิภาพการล้าง ตามสมการ 3.1

$$\text{ปริมาณพาราฟินเวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงาน (\%PRC)} = \frac{S_t - S_b}{S_0 - S_b} \times 100 \quad (3.1)$$

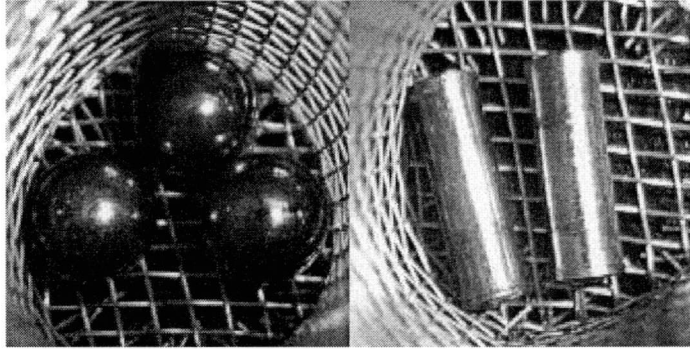
เมื่อ

S_t = น้ำหนักของชิ้นงานที่เวลา t ใดๆ (g)

S_0 = น้ำหนักของชิ้นงานที่เวลาเริ่มต้น (g)

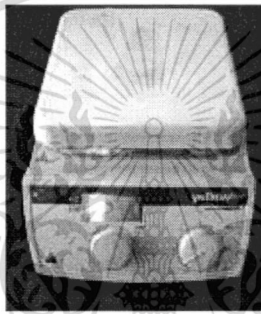
S_b = น้ำหนักของชิ้นงานก่อนการเคลือบพาราฟินเวกซ์ (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.สแตนเลสทรงกลม ข.ท่อโลหะทรงกระบอกกลวง

รูปที่ 3.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการล้าง

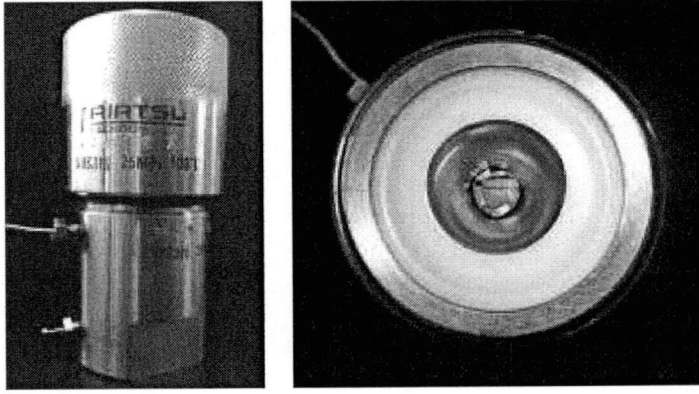


รูปที่ 3.3 เครื่องให้ความร้อนและปั่นกวนแม่เหล็ก Yellow Mag HS 7



รูปที่ 3.4 ปั๊มแรงอัดแรงดันสูง ISCO 260D Syringe pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องล้าความคั่นสูง



รูปที่ 3.6 เครื่อง Micro balance Mettler Toledo AX205

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในการพัฒนากระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยใช้ $scCO_2$ จากการศึกษาจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการล้างคือ ค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนใน $scCO_2$ และข้อดีของการประยุกต์ใช้ $scCO_2$ ในการเป็นตัวทำละลายในการล้างคือค่าการละลายของ $scCO_2$ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความดันซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของ $scCO_2$ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการล้างของอุณหภูมิในช่วง 40 ถึง 70 °C และความหนาแน่นของ $scCO_2$ ตั้งแต่ 0.5 ถึง 0.7 g/ml เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบกระบวนการล้าง จากนั้นได้ประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ โดยใช้สมการ Peng-Robinson เพื่อคำนวณปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่สามารถล้างได้เปรียบเทียบกับผลการทดลอง

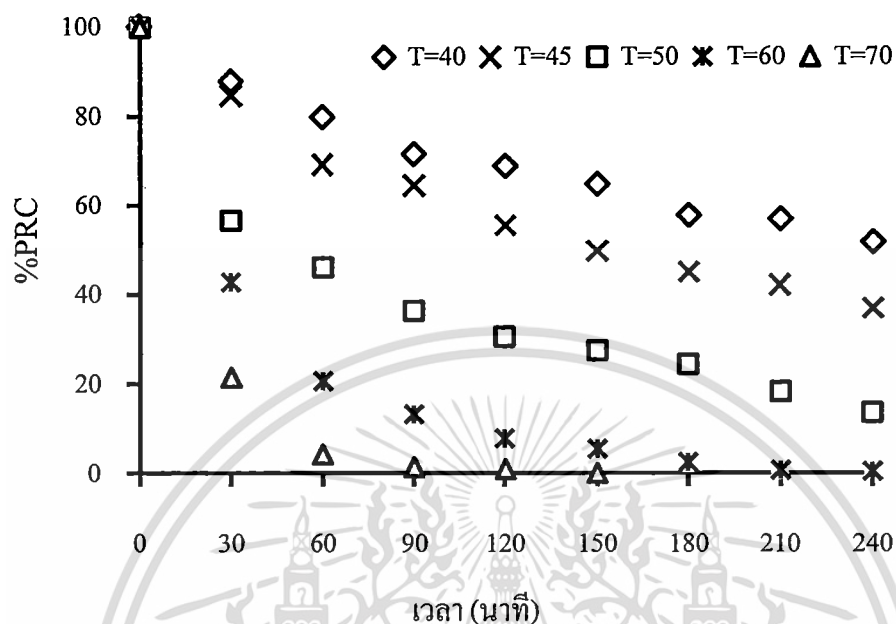
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกสร้างเพื่อทราบถึงกลไกและปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับเพื่อหาอันดับการคายซับและค่าคงที่อัตราการคายซับที่สภาวะการล้างต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและควบคุมกระบวนการ นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาด เพื่อประเมินความสามารถในการล้างเมื่อชิ้นงานมีความซับซ้อนมากขึ้น

4.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย $scCO_2$

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้าง โดยควบคุมความหนาแน่นของ $scCO_2$ ที่ 0.5 g/ml และใช้สแตนเลสทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.65 mm เป็นตัวแทนชิ้นงานในการทำความสะอาด เนื่องจากที่การล้างความหนาแน่นของ $scCO_2$ 0.5 g/ml อุณหภูมิการล้าง 40 ถึง 70 °C มีค่าการละลายในช่วง 1.9×10^{-3} ถึง 2.7×10^{-1} รั้อยละโดยมวล จึงควบคุมปริมาณแวกซ์ที่เคลือบอยู่บนชิ้นงานประมาณ 3-5 mg ต่อชิ้นงาน เพื่อให้ปริมาณแวกซ์ในเครื่องล้างความดันสูงอยู่ในช่วงของค่าการละลายดังกล่าว และทราบผลของค่าการละลายต่อประสิทธิภาพการล้างสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล้างจากปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลืออยู่บนชิ้นงานกับเวลาที่อุณหภูมิ 40 ถึง 70 °C จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการล้างมีมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิการล้าง 40, 45, 50 และ 60 °C เมื่อเพิ่มเวลาการทำความสะอาดปริมาณของแวกซ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที พบว่ามีปริมาณแวกซ์ที่เหลืออยู่บนชิ้นงานประมาณ รั้อยละ 55, 37, 10 และ 0.5 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาในการทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

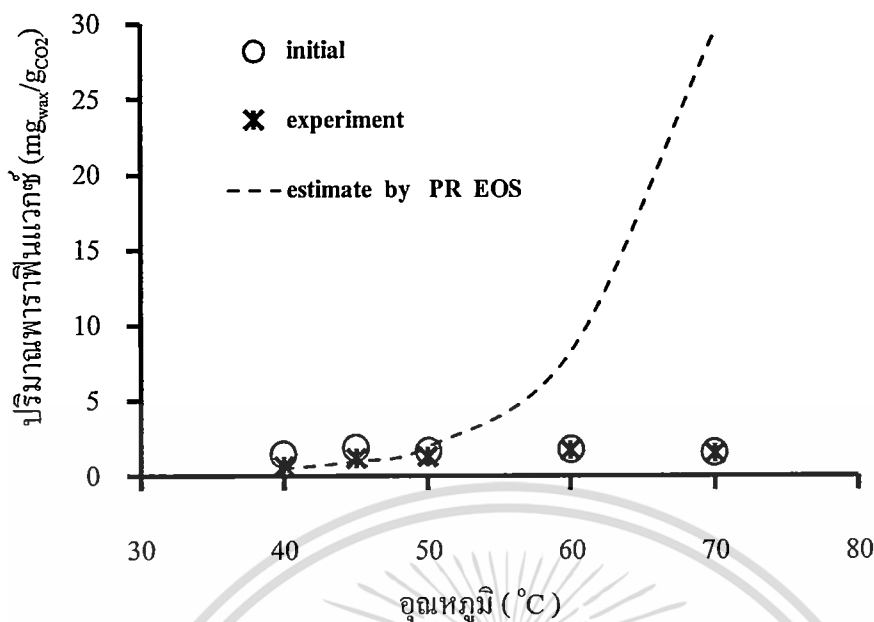
150 นาที ก็สามารถล้างจนมีปริมาณแก๊สที่เหลือบนชิ้นงานอยู่เพียงร้อยละ 0.2 สังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการล้างทำให้สามารถลดเวลาในการล้างได้



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้างที่ความหนาแน่นของ $scCO_2$ 0.5 g/ml

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าการละลายในไฮโดรคาร์บอนใน $scCO_2$ เพิ่มขึ้น [8-10] ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพ การทำความสะอาดเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณพาราฟินแก๊สที่ถูกล้างจากการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณพาราฟินแก๊สที่สามารถล้างได้ซึ่งประมาณค่าจากการค่าการละลาย โดยใช้พื้นฐานสมดุลวัฏภาคจากสมการสถานะ Peng-Robinson ดังแสดงตามเส้นประตามรูปที่ 4.2 โดยพาราฟินแก๊สที่ใช้ในการจำลองเป็นสิ่งปนเปื้อนมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 24 และปริมาณพาราฟินแก๊สเริ่มต้นบนชิ้นงานก่อนทำความสะอาด (สัญลักษณ์วงกลม) และปริมาณพาราฟินแก๊สที่ล้างได้จากการทดลอง (สัญลักษณ์ดอกจัน) จากรูปที่ 4.2 พบว่าที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C มีปริมาณพาราฟินแก๊สเริ่มต้นมากกว่าปริมาณที่ได้จากสมดุลของสมการสถานะ จึงส่งผลให้ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวไม่สามารถล้างพาราฟินแก๊สออกจากชิ้นงานได้ทั้งหมด เนื่องจากค่าการละลายเป็นตัวจำกัดความสามารถในการล้างในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าการละลายของพาราฟินแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C พบว่าปริมาณพาราฟินแก๊สที่ล้างได้จากการประมาณค่าการละลายมีค่ามากกว่าปริมาณพาราฟินแก๊สเริ่มต้น ดังนั้นการล้างที่อุณหภูมิดังกล่าวจึงสามารถล้างพาราฟินแก๊สออกจากชิ้นงานได้ทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มความสามารถในการแพร่ของพาราฟินแก๊สใน $scCO_2$ จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการล้าง [6]

การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



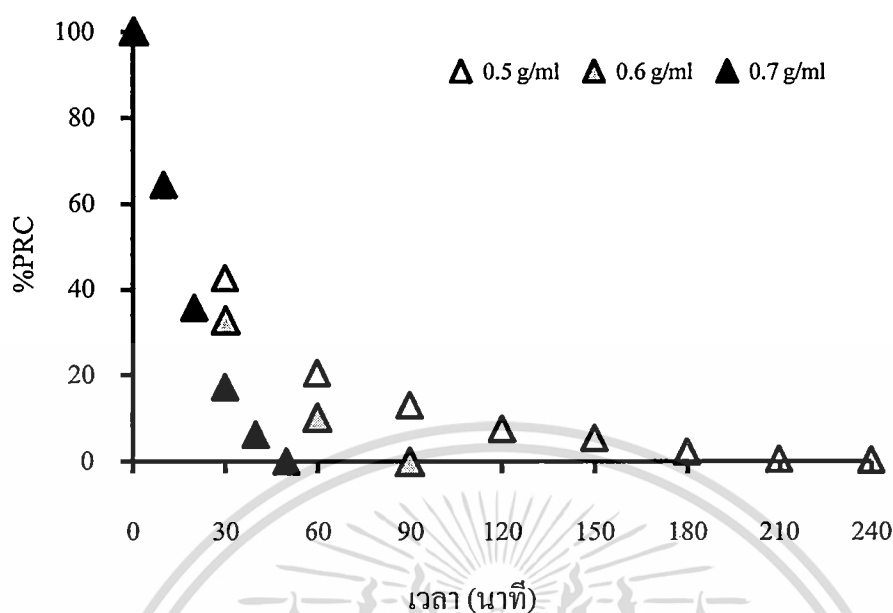
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่ สภาวะการล้าง ความหนาแน่นของ 0.5 g/ml อุณหภูมิ 40-70 °C

4.2 ผลของความหนาแน่นของ scCO₂ ต่อประสิทธิภาพการล้าง

จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้าง พบว่าค่าการละลายมีผลต่อ กลไกการล้างสำหรับกระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO₂ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [8-10,16,17] พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ scCO₂ ในระบบส่งผลให้ค่าการละลายของ ไฮโดรคาร์บอนใน scCO₂ เพิ่มขึ้น ดังนั้นความหนาแน่นของ scCO₂ จึงเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่นำมา ศึกษาผลต่อความสามารถการล้าง

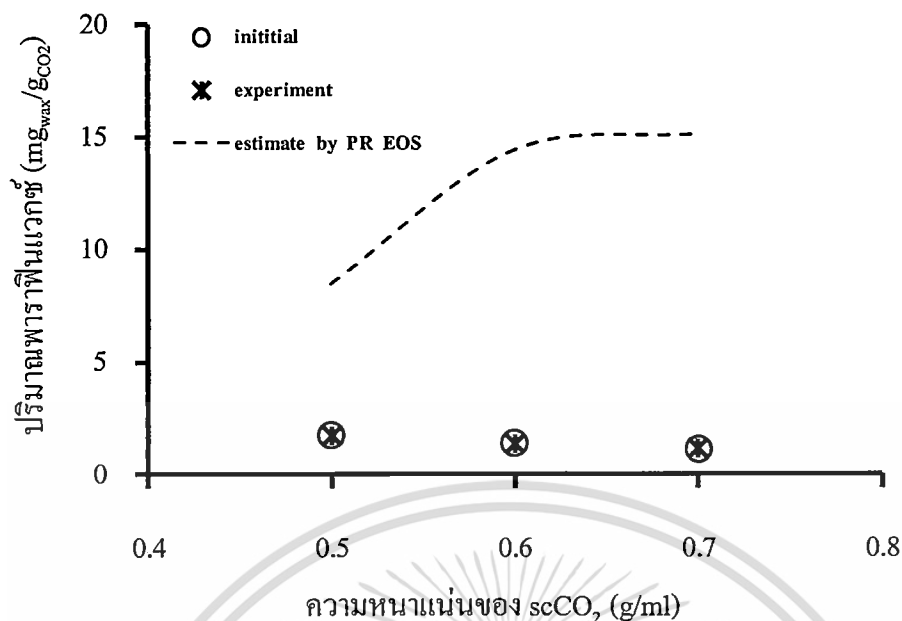
ผลการทดลองหัวข้อ 4.1 พบว่าที่ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิการล้าง 70 °C เป็น สภาวะที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการล้างดีที่สุด แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิการล้างดังกล่าว ไม่สามารถล้างที่ scCO₂ ความหนาแน่นสูงได้ เนื่องจากมีความดันของระบบมากกว่าความสามารถ ในการทนความดันของเครื่องล้างความดันสูง ดังนั้นจึงได้ทำการล้างที่อุณหภูมิคงที่เท่ากับ 60 °C และศึกษาประสิทธิภาพการล้างความหนาแน่น scCO₂ 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml โดยมีความดันใน ระบบ 131, 167 และ 203 bar ตามลำดับ

ผลการทดลองศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นต่อประสิทธิภาพการล้าง โดยรูปที่ 4.2 แสดงปริมาณสิ่งปนเปื้อนที่เหลืออยู่บนชิ้นงานกับเวลาในการล้าง ที่ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 ถึง 0.7 g/ml พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO₂ ส่งผลให้อัตราเร็วการล้างมากขึ้น และสามารถ ล้างพาราฟินแว็กซ์ออกจากชิ้นงานมากขึ้นที่เวลาเท่ากัน โดยที่การล้าง 240 นาที ความหนาแน่น 0.5 g/ml มีปริมาณพาราฟินแว็กซ์เหลือบนชิ้นงานร้อยละ 0.53 ในขณะที่ ความหนาแน่น 0.6 g/ml และ 0.7 g/ml ใช้เวลาทำความสะอาด 90 และ 50 นาที ตามลำดับ สามารถล้างพาราฟินแว็กซ์ ทั้งหมดออกจากชิ้นงาน



รูปที่ 4.3 ผลของความหนาแน่นต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO_2 ที่อุณหภูมิการล้าง 60°C

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการล้าง เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 และการค่าละลายเป็นตัวแปรควบคุมการล้าง ส่งผลให้แนวโน้มการล้างที่มีความหนาแน่น 0.6 g/ml และ 0.7 g/ml มีลักษณะคล้ายเส้นโค้ง B ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งหมายถึงการล้างถูกควบคุมด้วยค่าการละลาย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่ถูกล้างจากการทดลองและการประมาณค่าปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่สามารถล้างได้ที่ความหนาแน่น scCO_2 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml อุณหภูมิการล้างคงที่ 60°C แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าการล้างที่ความหนาแน่น 0.5 g/ml ถึง 0.7 g/ml ปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่สามารถล้างได้จากการประมาณค่าการละลายมากกว่าปริมาณพาราฟินแวกซ์เริ่มต้นบนชิ้นงาน ดังนั้นในช่วงความหนาแน่นของ scCO_2 ดังกล่าวจึงสามารถล้างพาราฟินแวกซ์ออกจากชิ้นงานได้ทั้งหมด อีกทั้งการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 ส่งผลให้ค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 เพิ่มขึ้น จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายและลดเวลาการล้าง แต่อย่างไรก็ตามจากรูปที่ 4.4 ปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่สามารถล้างได้จากการประมาณค่าการละลายที่ความหนาแน่นของ scCO_2 0.6 g/ml และ 0.7 g/ml มีความสามารถในการล้างใกล้เคียงกัน เนื่องจากการล้างที่อุณหภูมิกว่าที่ พบว่าการเพิ่มความดันในช่วงความดันสูงส่งผลต่อการเพิ่มค่าการละลายน้อยมาก เพราะฉะนั้นกระบวนการล้างที่ความหนาแน่นของ scCO_2 0.6 ถึง 0.7 g/ml จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้กระบวนการล้างชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ scCO_2



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่อุณหภูมิ 60 °C
ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.5 - 0.7 g/ml

4.3 ผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂

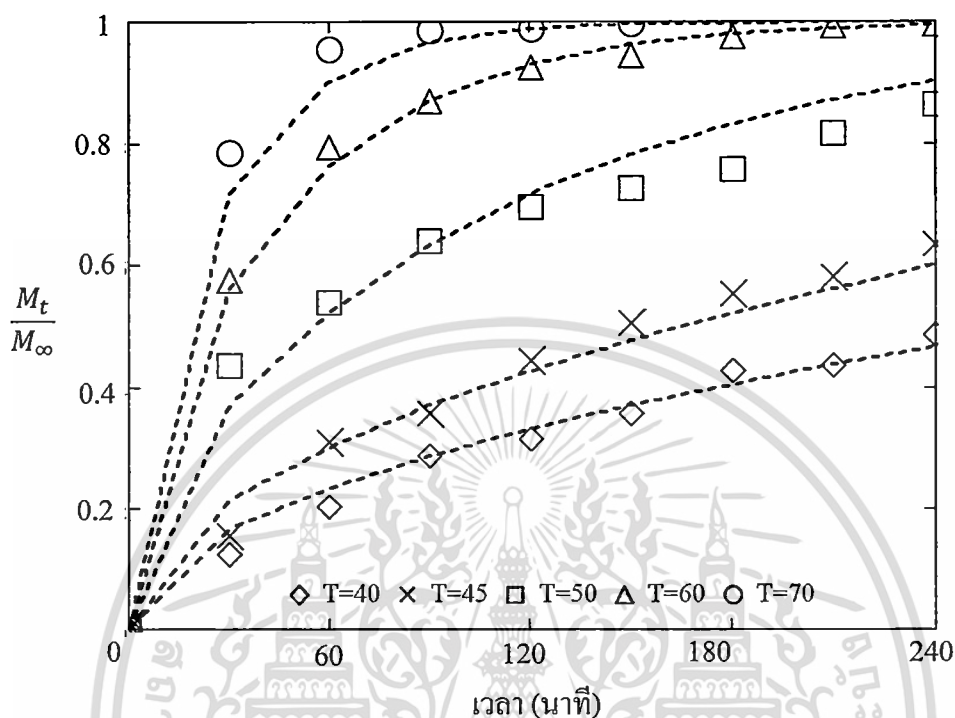
จากการศึกษากลไกการล้างได้แสดงให้เห็นว่าการแพร่เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการล้างด้วย scCO₂ โดยบ่งบอกถึงอัตราเร็วในการแพร่ของสิ่งปนเปื้อนเข้าสู่วัฏภาค scCO₂ ซึ่งมีความสำคัญต่ออัตราเร็วในการล้าง ดังนั้นการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสิ่งปนเปื้อนใน scCO₂ จึงมีความสำคัญต่อการออกแบบกระบวนการและสามารถทำนายเวลาในการล้างได้

ในการทดลองล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟโดยจำลองสิ่งปนเปื้อนคือพาราฟินแวกซ์บนสแตนเลสทรงกลม ซึ่งกำหนดให้พาราฟินแวกซ์เคลือบบนผิวของชิ้นงานมีความหนาเท่ากัน ดังนั้นสามารถนำสมการการแพร่ของวัสดุทรงกลมกลวงมาใช้เพื่อประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ ดังสมการที่ 2.17

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \frac{6}{\pi^2(a^2 + ab + b^2)} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b \cos n\pi - a}{n} \right)^2 \exp\{-Dn^2\pi^2 t / (b - a)^2\} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 เมื่อนำสมการเปรียบเทียบกับผลการทดลองสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ ที่สภาวะต่างๆ โดยใช้โปรแกรมช่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์ Mathcad 14 ซึ่งผลการเปรียบเทียบการแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ จากการทดลองและสมการการแพร่ทรงกลมกลวงแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งพบว่าการแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ จากการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการการแพร่ของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวทรงกลม ดังนั้นสามารถนำสมการดังกล่าวในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ที่สภาวะต่างๆ ได้ โดยตารางที่ 2.1 ได้แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ที่สภาวะต่างๆ พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความหนาแน่นของ scCO₂ ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มขึ้น

สอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1 และ 4.2 ได้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มอุณหภูมิในการล้าง และการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 ส่งผลให้อัตราเร็วในการล้างเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 ที่ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิการล้าง 40 – 70 °C

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 ที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s)		
	0.5 g/ml	0.6 g/ml	0.7 g/ml
40	6.0×10^{-11}	1.4×10^{-10}	2.5×10^{-10}
45	1.1×10^{-10}	-	-
50	3.0×10^{-10}	6.5×10^{-10}	1.2×10^{-9}
60	7.0×10^{-10}	1.2×10^{-9}	1.6×10^{-9}
70	1.1×10^{-9}	-	-

จากผลการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการแพร่บนวัสดุทรงกลมสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับกระบวนการล้างพาราฟินแวกซ์บนสแตนเลสทรงกลมด้วย scCO_2 ได้ ดังนั้นเมื่อทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งปนเปื้อนใน $scCO_2$ สามารถแทนค่าในสมการการแพร่เพื่อใช้ในการออกแบบการล้างชิ้นงานรูปทรงอื่นๆต่อไป

แต่อย่างไรก็ตามจากผลของอุณหภูมิและความหนาแน่นของ $scCO_2$ ต่อประสิทธิภาพการล้างแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการล้างที่แต่ละสถานะ เมื่อสิ่งปนเปื้อนมีปริมาณมากกว่าค่าการละลายพบว่าแนวโน้มการล้างมีความแตกต่างกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการล้าง เพื่อเพิ่มการเข้าใจถึงกลไกในการล้างมากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและควบคุมกระบวนการ

4.4 การสร้างแบบจำลองการล้างด้วย $scCO_2$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการอธิบายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เพื่อเพิ่มเข้าใจถึงกลไกและปัจจัยที่มีผลต่อปรากฏการณ์ในการล้าง อีกทั้งยังสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการล้างได้ ในกระบวนการสกัดด้วย $scCO_2$ ได้นิยมใช้แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับ (kinetic desorption) ทั้งนี้กระบวนการทำความสะอาดด้วย $scCO_2$ มีกลไกที่คล้ายกับการสกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับมาอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในการล้างดังสมการที่ 2.18

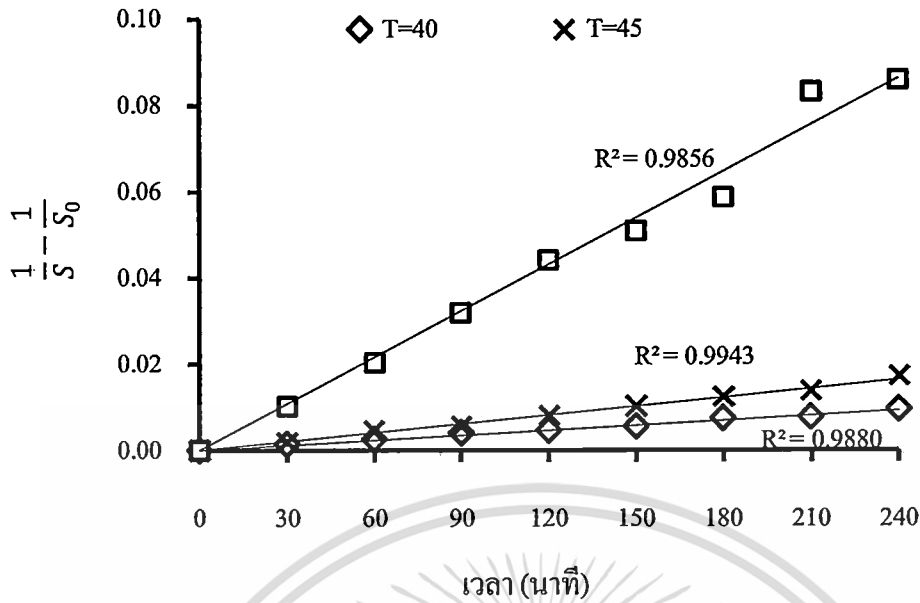
$$\frac{dS}{dt} = -k_a S^\alpha \quad (2.18)$$

เริ่มต้น จากสมการจลนพลศาสตร์การคายซับมี 3 ตัวแปร คือ อันดับการคายซับ α ค่าคงที่การคายซับ k_a และ S คือร้อยละปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลืออยู่ จากข้อมูลผลการทดลองสามารถหาอันดับการคายซับโดยใช้วิธี integral method และเปรียบเทียบข้อมูลจากผลการทดลองกับแบบจำลองการล้างเพื่อประมาณค่าคงที่อัตราการคายซับ โดยเริ่มต้นตั้งสมมติฐานว่าแบบจำลองเป็นการคายซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง ตามสมการที่ 2.20 และ สมการที่ 2.22

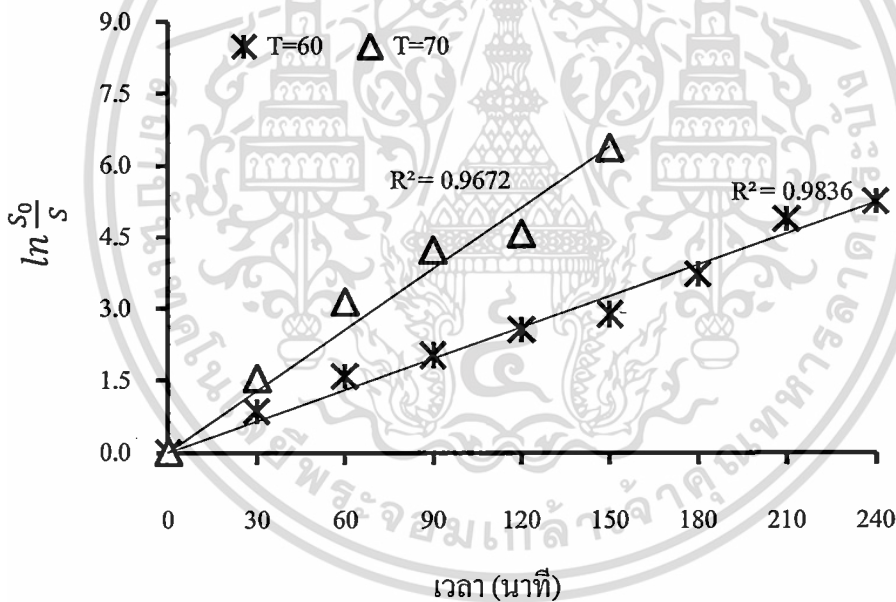
$$\ln \frac{S_0}{S} = k_a t \quad (2.20)$$

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0} = k_a t \quad (2.22)$$

จากการหาอันดับการคายซับและประมาณค่าคงที่การคายซับพบว่าแบบจำลองมีสองกรณี โดยอุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C เป็นการคายซับอันดับสอง และ อุณหภูมิ 60 และ 70 °C เป็นการคายซับอันดับหนึ่ง ซึ่งผลจากทำ integral method และประมาณค่าคงที่การคายซับในแต่ละอุณหภูมิ คำนวณจากความชันของเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 และตารางที่ 4.2 ค่าคงที่การคายซับในแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 4.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซ้บอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C



รูปที่ 4.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซ้บอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C

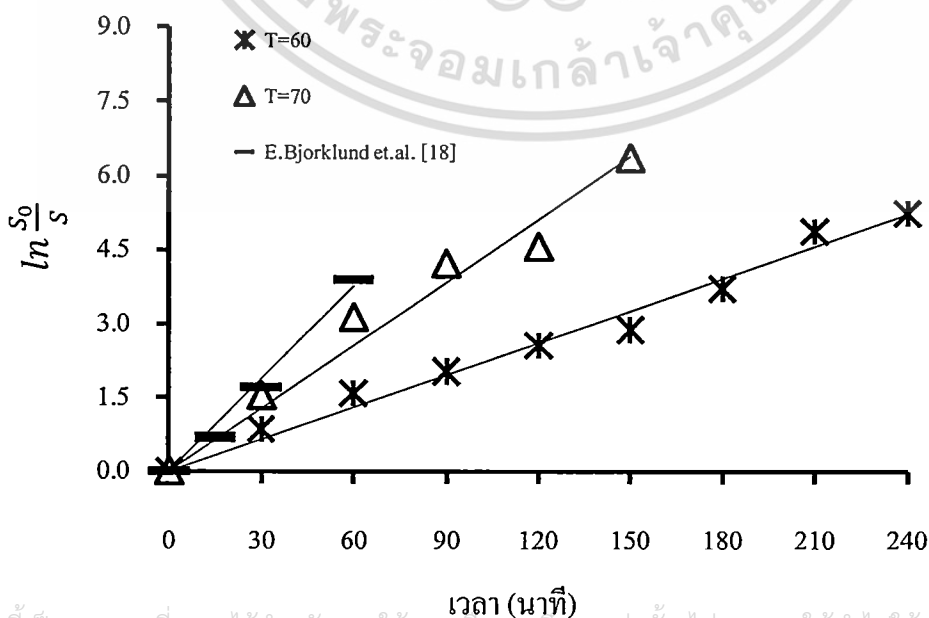
ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่การคายซ้บที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 g/ml

อุณหภูมิ(°C)	ค่าคงที่การคายซ้บ 1/min	
	การคายซ้บอันดับหนึ่ง	การคายซ้บอันดับสอง
40	-	3.88x10 ⁻⁵
45	-	6.69x10 ⁻⁵
50	-	1.95x10 ⁻⁴

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ 2.45x10⁻² ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ ่งไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 70 ลิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 4.20x10⁻² และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

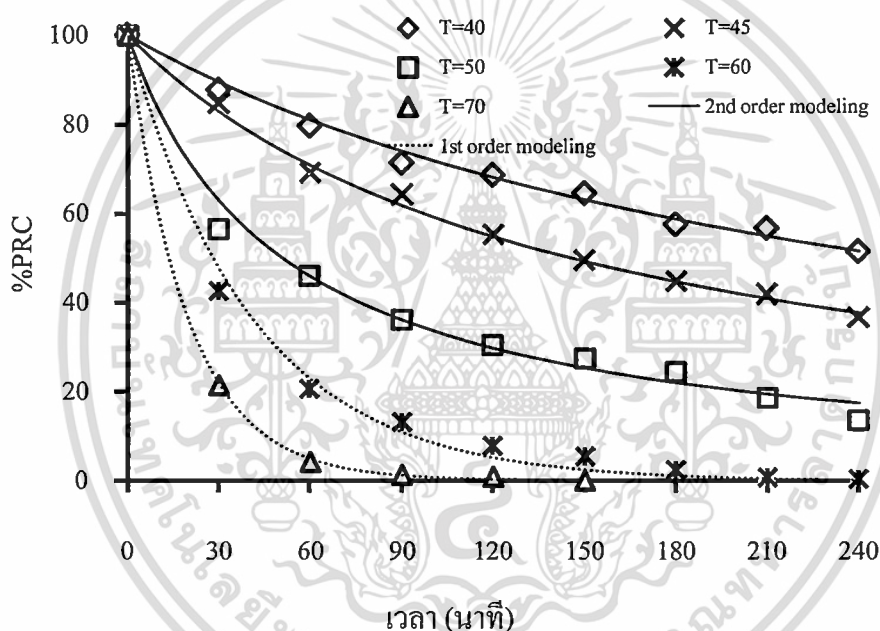
จากแบบจำลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C เป็นแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซ้บอันดับสอง เนื่องจากในสภาวะดังกล่าวสิ่งปนเปื้อนมีปริมาณมากกว่าค่าการละลาย ดังนั้นจึงส่งผลให้ในการล้างมีปัจจัยที่ควบคุมมีสองกลไก คือ scCO_2 แพร่ในชั้นพาราฟินแวกซ์เพื่อละลายพาราฟินแวกซ์ออกมาสู่วัฏภาคของไหล และกลไกที่ 2 คือ scCO_2 ละลายพาราฟินแวกซ์บริเวณผิวของชิ้นงานเข้าสู่วัฏภาคของไหลส่งผลให้แบบจำลองการล้างเป็นแบบจำลองเป็นการคายซ้บอันดับสอง ในขณะที่จากประมาณค่าการละลายที่ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิ 60 และ 70 °C จากรูปที่ 4.2 พบว่ามีค่าการละลายมากกว่าปริมาณพาราฟินแวกซ์บนชิ้นงานเริ่มต้น ซึ่งจากแบบจำลองการล้างที่กล่าวในหัวข้อ 2.4 แสดงให้เห็นว่าค่าการละลายเป็นปัจจัยหลักของกลไกการล้าง เนื่องจากกระบวนการล้างจึงถูกควบคุมด้วยค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 ดังนั้นการแพร่ของ scCO_2 ในแวกซ์เพื่อชะล้างมีน้อยมาก ส่งผลให้กลไกในการล้างลดลง อีกทั้งพาราฟินแวกซ์ที่นำมาทดลองมีจุดหลอมเหลวที่ 58 °C เพราะฉะนั้นการล้างที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวจึงส่งผลให้ช่วยลดแรงยึดเกาะของพาราฟินแวกซ์บนผิวชิ้นงาน กระบวนการทำความสะอาดจึงเป็นการคายซ้บอันดับหนึ่งและส่งผลให้ประสิทธิภาพในการล้างมากขึ้น

E. Bjorklund และคณะ [18] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการล้างน้ำมันชนิดต่างๆบนผิวโลหะด้วย scCO_2 ที่อุณหภูมิ 40 °C ความหนาแน่นของ scCO_2 เท่ากับ 0.9 g/ml จากสภาวะในกระบวนการล้างดังกล่าว น้ำมันมีสถานะเป็นของเหลว จึงสามารถนำแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซ้บอันดับหนึ่งเปรียบเทียบผลการทดลองของ E. Bjorklund จากรูปที่ 4.8 พบว่าค่าคงที่อัตราการคายซ้บในการล้างน้ำมันชนิดต่างๆอยู่ในช่วง 7.0×10^{-3} ถึง 6.2×10^{-2} 1/min มีค่าใกล้เคียงและอยู่ในช่วงเดียวกับค่าคงที่อัตราการคายซ้บที่ได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซ้บอันดับหนึ่งในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าคงที่อัตราการคายซ้บแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซ้บอันดับหนึ่ง
ไม่ทราบชนิดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่าอันดับของการคายซึบและค่าคงที่การคายซึบในแต่ละอุณหภูมิสามารถนำไปแทนค่าในสมการที่ 2.20 และ 2.22 เพื่อหาแนวโน้มการล้าง เมื่อนำแบบจำลองทั้งสองเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่าแนวโน้มการล้างของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซึบอันดับหนึ่งและการคายซึบอันดับสองมีความใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง และแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมามีผลต่อประสิทธิภาพการล้าง โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้เพิ่มการล้างมีประสิทธิภาพมากขึ้นในเวลาที่เท่ากัน อีกทั้งอุณหภูมียังส่งผลต่อกลไกของกระบวนการล้าง เพราะจากแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซึบที่อุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เพิ่มค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 ทำให้แบบจำลองเป็นการคายซึบอันดับหนึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น



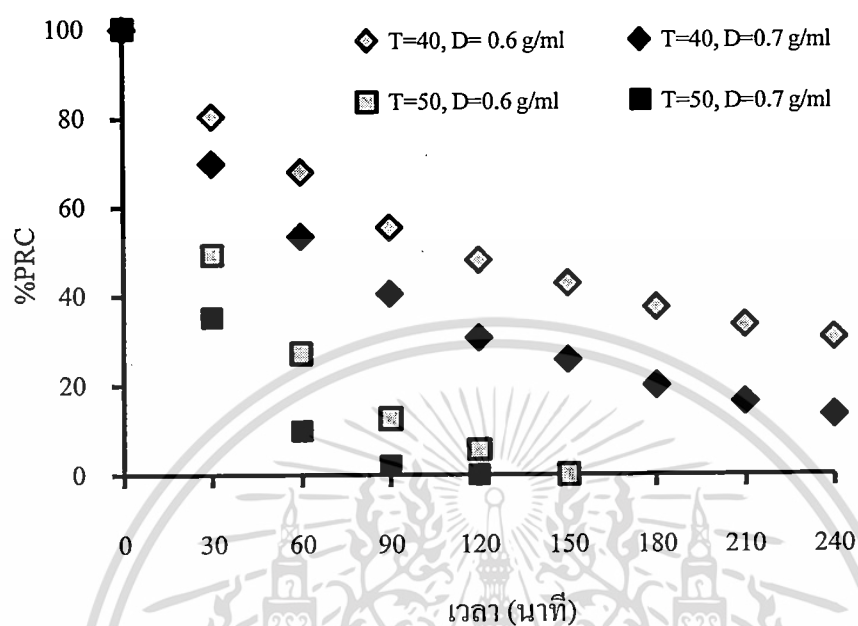
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบผลการทดลองและแบบจำลองที่อุณหภูมิ 40 – 70 °C
ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml

4.5 ผลของความหนาแน่นของ scCO_2 ต่อแบบจำลองการล้าง

กลไกการล้างของกระบวนการล้างด้วย scCO_2 ได้ถูกอธิบายในหัวข้อ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของ scCO_2 เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อกลไกการล้าง เนื่องจากหากแบบจำลองเป็นการคายซึบอันดับหนึ่ง ค่าการละลายเป็นปัจจัยหลักในการล้าง ส่งผลให้อัตราการล้างสูงและสามารถล้างสิ่งปนเปื้อนจากชิ้นงานได้มาก

ในหัวข้อนี้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นต่อกลไกการล้าง โดยศึกษาสถานะการล้างที่อุณหภูมิ 40 และ 50 °C ที่ความหนาแน่น scCO_2 0.6 และ 0.7 g/ml เพื่อศึกษาแนวโน้มการล้างและสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซึบ โดยรูปที่ 4.10 แสดงแนวโน้มการล้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการล้างที่สภาวะต่างๆ และผลของความหนาแน่นต่อแบบจำลองการทำความสะอาดที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.10 แนวโน้มประสิทธิภาพการล้างที่อุณหภูมิ 40-50 °C ความหนาแน่น scCO₂ 0.6-0.7 g/ml

ตารางที่ 4.3 ผลของความหนาแน่นและอุณหภูมิต่อความแบบจำลองการทำความสะอาด

อุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่การคายซับ อันดับการคายซับเป็น 1 (1/min)			ค่าคงที่การคายซับ อันดับการคายซับเป็น 2 (1/min)		
	0.5 g/ml	0.6 g/ml	0.7 g/ml	0.5 g/ml	0.6 g/ml	0.7 g/ml
40	-	-	8.88×10^{-3}	3.88×10^{-5}	9.24×10^{-5}	-
50	-	2.33×10^{-2}	4.12×10^{-2}	2.00×10^{-4}	-	-
60	2.18×10^{-2}	3.79×10^{-2}	6.30×10^{-2}	-	-	-

จากผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการล้างต่อกลไกการล้างจากแบบจำลอง จลนพลศาสตร์การคายซับ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิมิมีผลต่อกลไกการล้าง จากการสร้างแบบจำลอง จลนพลศาสตร์การคายซับพบว่า การล้างที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของเท่ากับ scCO₂ 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml เป็นการคายซับอันดับ 1 มีค่าคงที่การคายซับ 2.18×10^{-2} , 3.79×10^{-2} และ 6.30×10^{-2} 1/min ตามลำดับ สอดคล้องกับที่นำเสนอในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งพบว่าเมื่อกระบวนการล้าง ถูกควบคุมด้วยความสามารถในการละลายและกลไกการล้างเป็นการคายซับอันดับหนึ่ง

จากการทดลองนี้พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ scCO₂ เท่ากับ 0.6 g/ml และ 0.7 g/ml ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหาและตั้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ แบบจำลองที่อุณหภูมิการล้าง 50 °C เป็นการคายซับอันดับหนึ่ง และที่อุณหภูมิการล้าง 40 °C เป็น

การคายซับอันดับหนึ่ง เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ scCO₂ เท่ากับ 0.7 g/ml เมื่อประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ ที่อุณหภูมิ 40 °C ความหนาแน่น scCO₂ 0.7 g/ml และอุณหภูมิ 50 °C ความหนาแน่น scCO₂ 0.6 และ 0.7 g/ml พบว่ามีปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่สามารถล้างได้มากกว่าปริมาณพาราฟินแวกซ์เริ่มต้น ดังนั้นจึงส่งผลให้แบบจำลองการล้างเป็นการคายซับอันดับหนึ่ง

จากผลการศึกษาผลของความหนาแน่นต่อแบบจำลองการคายซับแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ มากกว่าปริมาณพาราฟินแวกซ์เริ่มต้นบนชิ้นงานส่งผลให้แบบจำลองการล้างเป็นการคายซับอันดับหนึ่ง ซึ่งค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนเป็นปัจจัยหลักในกระบวนการล้าง เพราะฉะนั้นในการออกแบบกระบวนการล้างด้วย scCO₂ ควรดำเนินการที่สถานะที่มีค่าการละลายของสิ่งปนเปื้อนใน scCO₂ มากกว่าปริมาณสิ่งปนเปื้อนบนชิ้นงาน ซึ่งช่วยลดเวลาการล้าง และสามารถล้างสิ่งปนเปื้อนออกจากชิ้นงานได้ทั้งหมด

4.6 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ค่าคงที่อัตราการคายซับและอุณหภูมิ

การสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของค่าคงที่อัตราการคายซับและอุณหภูมิ ช่วยให้สามารถทำนายค่าคงที่อัตราการคายซับของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ ที่อุณหภูมิการล้างอื่น ๆ ได้ และช่วยความเข้าใจต่อกลไกการล้างจากหัวข้อที่ผ่านมา ผลจากการสร้างแบบจำลองจะเห็นว่ากระบวนการล้างมีสองประเภทคือ การคายซับอันดับหนึ่ง และการคายซับอันดับสอง เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในช่วงอุณหภูมิการล้าง 40 ถึง 50 °C ที่ความหนาแน่น 0.5 g/ml สำหรับการคายซับอันดับสอง และในช่วงอุณหภูมิการล้าง 40 ถึง 60 °C ที่ความหนาแน่น scCO₂ 0.7 g/ml สำหรับการคายซับอันดับหนึ่ง โดยความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราการคายซับกับอุณหภูมิใช้รูปแบบสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius Equation) [12] ตามสมการที่ 4.1 ดังนี้

$$k_d = k_{do} \exp\left(-\frac{E_A}{RT}\right) \quad (4.1)$$

โดย k_{do} คือค่าคงที่อัตราการคายซับมาตรฐาน 1/min, E_A คือพลังงานกระตุ้นการคายซับ (kJ/mol), R คือค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/mol.K) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ของระบบ (Kelvin)

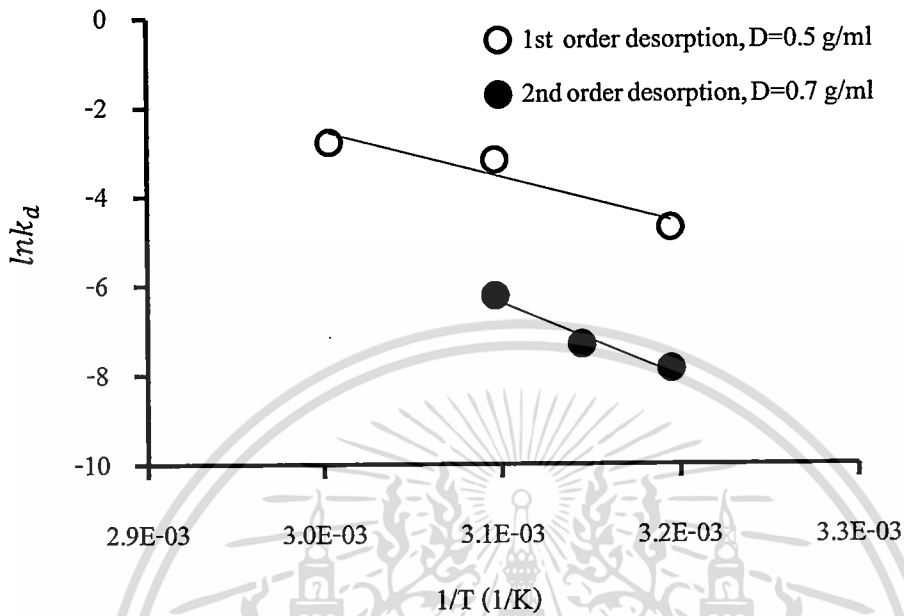
จากข้อมูลตามตารางที่ 4.2 และ 4.3 สามารถประมาณค่า k_{do} และ E_A โดยการใส่ฟังก์ชันลอการิทึมธรรมชาติในสมการที่ 4.1 และจัดรูปดังสมการที่ 4.2

$$\ln k_d = \ln k_{do} - \frac{E_A}{RT} \quad (4.2)$$

เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k_d$ และ $\frac{1}{T}$ ได้กราฟเส้นตรง โดยความชันคือ $\frac{E_A}{R}$ และจุดตัดแกน Y คือ $\ln k_{do}$

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์อาร์เรเนียสของค่าคงที่อัตราการคายซับและอุณหภูมิของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง โดยประมาณค่า k_{do} มีค่าเท่ากับ

1.85×10^{12} 1/min และ E_A เท่ากับ 85.36 kJ/mol สำหรับการคายซับอันดับหนึ่ง และ k_{d0} เท่ากับ 7.51×10^{17} 1/min และ E_A เท่ากับ 133.76 kJ/mol สำหรับการคายซับอันดับสอง



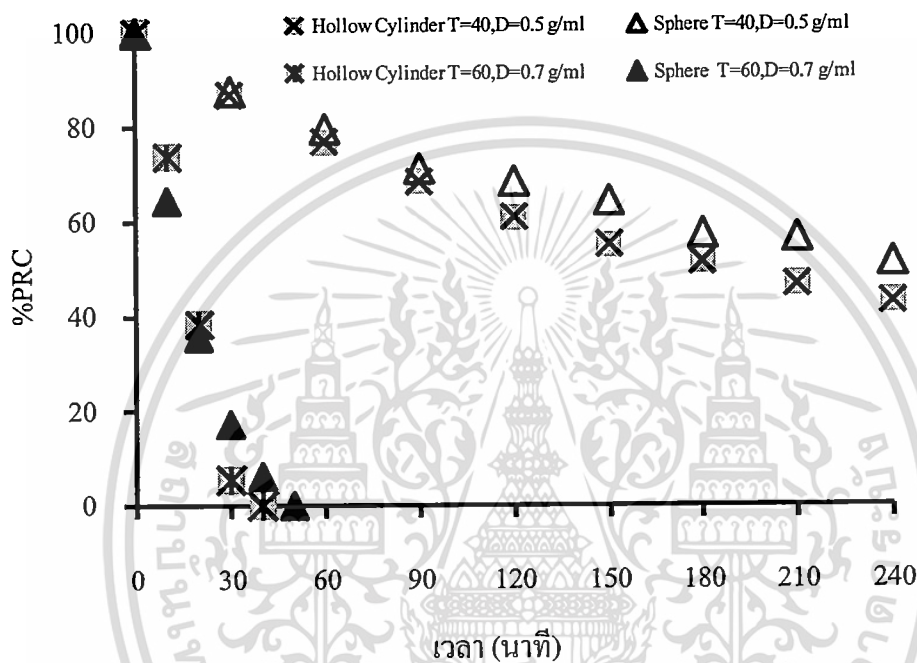
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์อาร์เรเนียสของค่าคงที่อัตราการคายซับและอุณหภูมิของแบบจำลองการคายซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง

ผลจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการคายซับกับอุณหภูมิของแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง จะเห็นได้ว่าค่า E_A ของการคายซับอันดับหนึ่งมีค่าน้อยกว่าการคายซับอันดับสอง เนื่องจากผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า การเพิ่มความหนาแน่นของ $scCO_2$ ส่งผลต่อกลไกการล้างมีแนวโน้มเป็นการคายซับอันดับหนึ่ง ซึ่งมีการละลายเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมกระบวนการล้าง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสำหรับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งจึงมีอิทธิพลต่อการล้างต่ำกว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสอง

4.7 ผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย $scCO_2$

จากการศึกษาการล้างชิ้นงานเคลือบพาราฟินแวกซ์ พบว่ากระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ มีความสามารถในการล้างพาราฟินแวกซ์ออกจากชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามการนำไปในการทดลองที่ผ่านมาใช้สแตนเลสทรงกลมเป็นตัวอย่างชิ้นงานในการล้าง ซึ่งชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์โดยทั่วไปมีรูปทรงซับซ้อนและอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำความสะอาดชิ้นงาน โดยที่รูปทรงที่มีความซับซ้อนอาจเกิดแรงแคปิลารีดึงตัวถูกละลายไว้ในรูขนาดเล็ก ดังนั้นความซับซ้อนของรูปทรงจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการทำความสะอาด เนื่องจากตัวทำละลายเหนือวิกฤตทั่วไปมีแรงดึงผิวต่ำกว่าตัวทำละลายทั่วไป เพราะฉะนั้นการใช้ $scCO_2$ ในการล้างจึงเป็นข้อได้เปรียบในการล้างชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อน ในการศึกษานี้จึงเลือก

รูปทรงสองชนิดคือ ทรงกลม ซึ่งมีความซับซ้อนน้อยมีลักษณะคล้ายกับลูกปัดในฮาร์ดดิสก์ แต่มีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งผลการทดลองได้นำเสนอในหัวข้อที่ผ่านมา และนำทรงกระบอกกลวง มีรูขนาดเล็กอยู่ที่แกนกลางทำให้การล้างมีความซับซ้อนมากขึ้น เปรียบเทียบกับผลการทดลองการล้างสแตนเลสทรงกลม และเลือกสภาวะการล้างดีที่สุด คือ scCO_2 ความหนาแน่น 0.7 g/ml อุณหภูมิ 60 °C และสภาวะการล้างประสิทธิภาพต่ำสุด คือ scCO_2 ความหนาแน่น 0.5 g/ml อุณหภูมิ 40 °C เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการล้างของรูปทรงทั้งสอง



รูปที่ 4.12 ผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO_2 ที่สภาวะต่างๆ

รูปที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการล้างที่สภาวะการล้างด้วยความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml และอุณหภูมิการล้างเท่ากับ 40 °C พบว่าชิ้นงานที่มีรูปทรงแบบทรงกระบอกกลวงมีปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่ตกค้างบนชิ้นงานลดลงตามเวลามากกว่าทรงกลม โดยที่เวลาการล้าง 240 นาที มีพาราฟินแว็กซ์ตกค้างบนชิ้นงานทางทรงกระบอกกลวงร้อยละ 43.1 ในขณะที่ทรงกลมมีปริมาณพาราฟินแว็กซ์ตกค้างร้อยละ 51.5 ในทำนองเดียวกันการล้างด้วย scCO_2 ความหนาแน่น 0.7 g/ml อุณหภูมิ 60 °C รูปทรงกระบอกกลวงสามารถล้างพาราฟินแว็กซ์ออกไปได้หมด โดยใช้ระยะเวลาการล้าง 40 นาที ในขณะที่รูปทรงกลมใช้ระยะเวลาการล้าง 50 นาที จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการล้างชิ้นงานทรงกลมและทรงกระบอกกลวงที่ศึกษามีประสิทธิภาพแตกต่างกันเล็กน้อย โดยทรงกระบอกกลวงมีประสิทธิภาพในการล้างดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากได้ควบคุมปริมาณพาราฟินแว็กซ์ที่เคลือบบนชิ้นงานทั้งสองรูปทรงเท่ากัน และทรงกระบอกกลวงมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าทรงกลมจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการล้างสูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามชิ้นงานทรงกระบอกมีรูปทรงที่ซับซ้อนกว่าจึงส่งผลให้ชิ้นงานทรงกระบอกกลวงมีประสิทธิภาพการล้างใกล้เคียงกับชิ้นงานทรงกลม

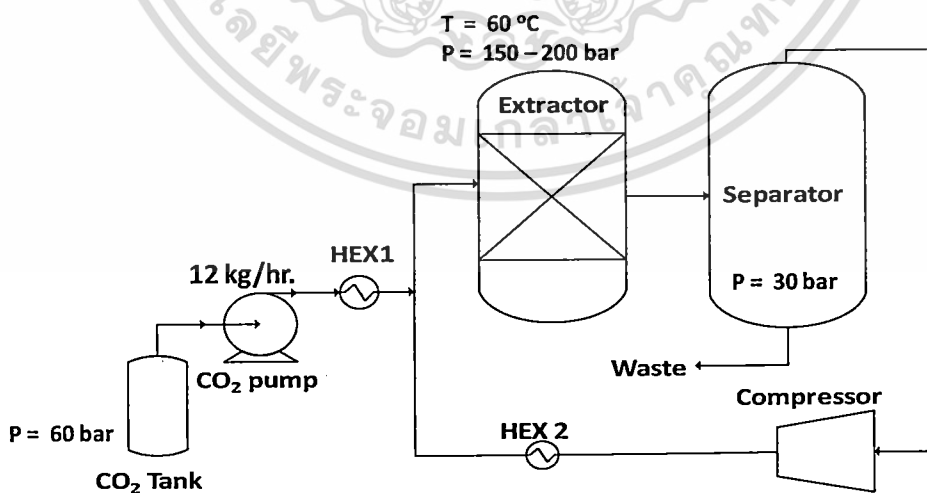
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ของกระบวนการล้างด้วย scCO₂

การพัฒนาการใช้ scCO₂ ในกระบวนการล้างชิ้นส่วนเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม เพราะฉะนั้นการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จึงมีความสำคัญ เนื่องจากทำให้สามารถประเมินความเป็นไปได้และความคุ้มค่าในการลงทุน ในการเลือกใช้เทคโนโลยีใหม่ทดแทนกระบวนการเดิม โดยทั่วไปในการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการจะพิจารณาถึงองค์ประกอบต้นทุนในกระบวนการ เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน ค่าซ่อมบำรุง แรงงาน ค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการจัดการ เป็นต้น

การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์กระบวนการล้างด้วย scCO₂ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม และเปรียบเทียบต้นทุนในการล้างต่อชิ้นงานที่สถานะต่างๆ จากผลการทดลองเบื้องต้น พบว่ากระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO₂ มีความสามารถในการล้างพาราฟินแวกซ์ออกจากชิ้นงานโดยประสิทธิภาพการล้างเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความหนาแน่นของ scCO₂ ในกระบวนการล้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบต้นทุนการล้างที่สถานะที่สามารถทำความสะอาดชิ้นงานพาราฟินแวกซ์ 3 สถานะการล้างคือที่ อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ เท่ากับ 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml



รูปที่ 5.1 แผนผังกระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO₂

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5.1 แสดงแผนผังกระบวนการทำความสะอาดด้วย scCO₂ ซึ่งหน่วยปฏิบัติการและ
ในอุปกรณ์ในกระบวนการทำความสะอาดออกแบบเบื้องต้นตามหลักทางวิศวกรรม สำหรับ

กระบวนการความดันสูง [11] โดย CO₂ ถูกปั๊มโดย CO₂ pump จากถังบรรจุ เพื่อเพิ่มความดัน จากนั้น CO₂ จะไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึงสถานะเหนือวิกฤต ชิ้นงานจะถูกล้างภายในเครื่องสกัด (Extractor) หลังจากนั้น scCO₂ ที่ออกจากเครื่องสกัดจะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องแยกและลดความดันเพื่อแยก CO₂ นำกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านเครื่องอัดความดัน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HEX 2 และป้อนเข้ากระบวนการล้างอีกครั้ง

จากแผนผังกระบวนการทำความสะอาดสามารถประเมินต้นทุนทุนทรัพย์ของกระบวนการตามตารางที่ 5.1 โดยแสดงข้อมูลจำเพาะและราคาของอุปกรณ์การล้าง รวมถึงค่าการติดตั้ง และต้นทุนการเดินเครื่องเริ่มต้น รายละเอียดของกระบวนการใช้ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองในแต่ละสถานะการล้าง และออกแบบจากโปรแกรมจำลองกระบวนการ Aspen Hysys

ตารางที่ 5.1 ต้นทุนทุนทรัพย์และข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์

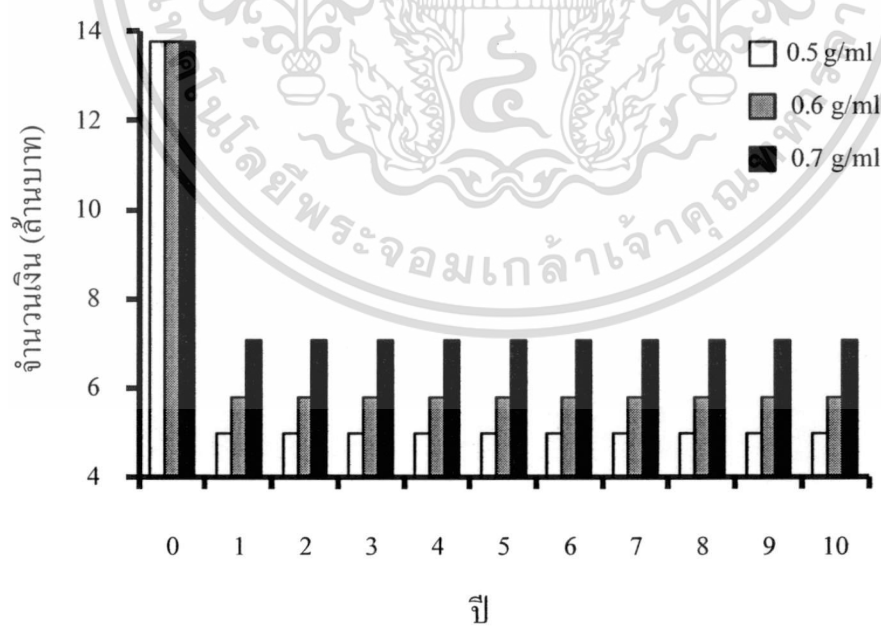
ต้นทุนทุนทรัพย์ (บาท)			
	ราคา	การติดตั้ง	รวม
CO ₂ Pump (12 kg/hr.)	630,300	1,260,600	1,890,900
Extractor (H= 4.25 m, Φ =0.6 m)	990,000	1,683,000	2,673,000
Separator (H= 3.38 m, Φ =1.12 m)	2,019,600	3,433,320	5,452,920
Compressor (53.66 kW)	1,234,200	1,851,300	3,085,500
Heat exchanger 1 (80.5 kW)	110,880	188,496	299,376
Heat exchanger 2 (51.57 kW)	136,950	232,815	369,765
Start up expenses (5% fixed capital)			783,090
สุทธิ			13,771,461

ตารางที่ 5.2 ต้นทุนดำเนินงานของกระบวนการล้างด้วย scCO₂

	ต้นทุนดำเนินงาน		
	ความหนาแน่นของ scCO ₂ (g/ml)		
	0.50	0.60	0.70
จำนวนรอบการล้างต่อวัน	6	16	28
ปริมาณชิ้นงานต่อรอบการล้าง	6,000	6,000	6,000
ค่าบำรุงรักษา (บาท/ปี)	688,573	688,573	688,573
ค่าแรงงาน (บาท/ปี)	1,003,950	1,003,950	1,003,950
ค่าไสหุ่ย (บาท/ปี)	940,875	940,875	940,875
ต้นทุนค่าก๊าซ CO ₂ (บาท/ปี)	361,653	1,149,341	2,342,399
ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	36,826	37,985	40,499

จากการจำลองกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ ต้นทุนดำเนินงาน (operating cost) แสดงตามตารางที่ 5.2 ซึ่งจำนวนชิ้นงานต่อการล้างคำนวณจากปริมาณของชิ้นงานที่สามารถบรรจุในเครื่องสกัด จำนวนรอบของการล้างในหนึ่งวันกำหนดโดยเวลาการล้างของแต่ละสภาวะการประมวลค่าซ่อมบำรุงประเมินจากร้อยละ 5 ของต้นทุนทุนทรัพย์ ในส่วนของค่าแรงงานประมวลค่าตามกำลังการล้าง [15] และค่าโซลูยประมวลค่าจาก ร้อยละ 80 ของค่าแรงงานและร้อยละ 20 ของค่าซ่อมบำรุง [16] ต้นทุนของ CO_2 ที่ใช้ในแต่ละปีคำนวณจากปริมาณที่ใช้ในการล้างทั้งหมดในหนึ่งปี โดยสูญเสียปริมาณ CO_2 ร้อยละ 5 ต่อหนึ่งรอบการล้าง [3] และปริมาณ CO_2 ที่สูญเสียจะถูกเติมเข้าสู่ระบบทุกรอบการล้าง ในส่วนของค่าไฟฟ้าคำนวณจากพลังงานที่ใช้ในแต่ละอุปกรณ์จากโปรแกรมจำลองกระบวนการ โดยอัตราค่าไฟฟ้า 1.7 บาทต่อหน่วย [17]

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ กำหนดให้โครงการมีอายุ 10 ปี โดยมีอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำ (minimum attractive rate of return, %MARR) ร้อยละ 7 ซึ่งกำหนดจากดอกเบี้ยกู้ยืมจากธนาคารและกระบวนการมีความเสี่ยงต่ำ เนื่องจากผลจากการทดลองแสดงถึงกระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ มีประสิทธิภาพในการทำมาสะอาด กระแสเงินสดสุทธิแสดงดังรูปที่ 5.2 พบว่าต้นทุนดำเนินงานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ $scCO_2$ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาแน่นของ $scCO_2$ ในการล้างเพิ่มขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการล้างสั้นลงกำลังการผลิตจึงมีมากขึ้น



รูปที่ 5.2 แผนผังกระแสเงินสดสุทธิที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ $scCO_2$ 0.5 - 0.7 g/ml

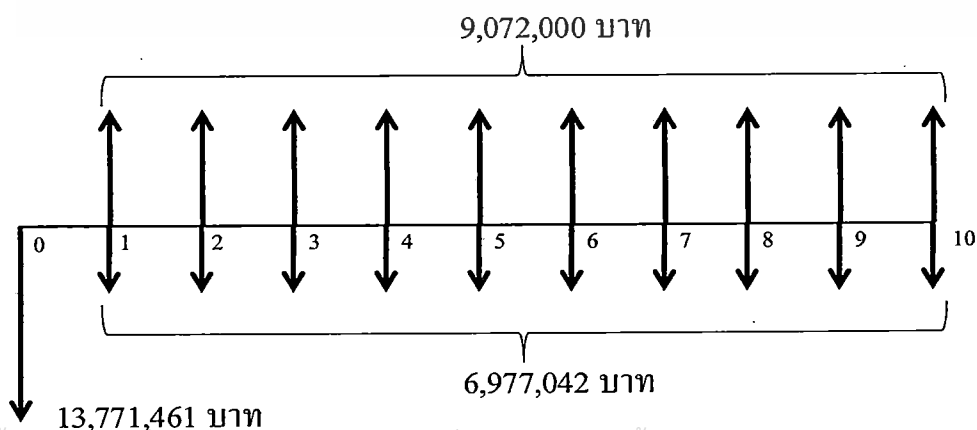
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หรือการนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า การบริการ หรือการอื่นใดที่มิใช่เพื่อการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวเนื่องและการประเมินทางเศรษฐศาสตร์จะเห็นได้ว่า กระบวนการล้างด้วย $scCO_2$ มีความคุ้มค่าต่อการลงทุนและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน

อุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์กระบวนการล้างเบื้องต้นพบว่าที่อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml สามารถประมาณต้นทุนการล้างต่อหนึ่งชิ้นงาน (บาท/ชิ้น) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีต้นทุนการล้างที่ต่ำอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.24 บาทต่อชิ้นงาน ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการประเมินกำลังการผลิตและต้นทุนของกระบวนการล้างด้วย scCO₂ ที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.5 ถึง 0.7 g/ml

	ความหนาแน่นของ scCO ₂ (g/ml)		
	0.5	0.6	0.7
กำลังการผลิต (ชิ้นงาน/ปี)	10,800,000	28,800,000	50,400,000
ต้นทุนรวมต่อปี (บาท/ปี)	4,992,623	5,781,471	6,977,042
ต้นทุนการล้าง (บาท/ชิ้นงาน)	0.46	0.20	0.14

เนื่องจากข้อมูลต้นทุนการล้างด้วยตัวทำละลายชนิดเดิมมีน้อย จึงไม่สามารถเปรียบเทียบต้นทุนของการล้างด้วยตัวทำละลายชนิดเดิมและการล้างด้วย scCO₂ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำประเมินมูลค่าต่ำสุดที่ทำให้กระบวนการล้างด้วย scCO₂ มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน ซึ่งจากการที่กำหนดอัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำเท่ากับ 7% เมื่อพิจารณาที่สภาวะการล้างที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่น scCO₂ 0.7 g/ml ซึ่งมีต้นทุนการล้าง 0.17 บาทต่อชิ้นงาน พบว่าหากกระบวนการล้างด้วย scCO₂ สามารถลดต้นทุนการล้างจากการะบวนการเดิมได้ 0.18 บาทต่อชิ้น จะทำให้อัตราผลตอบแทน (rate of return, %ROR) เท่ากับร้อยละ 8 ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดที่ทำให้กระบวนการล้างด้วย scCO₂ มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน เมื่อกำหนดให้ ณ ปีที่ 10 กระบวนการไม่มีค่าซากของอุปกรณ์สามารถเขียนผังกระแสเงินสดสุทธิของกระบวนการล้างที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.7 g/ml ได้ดังรูปที่ 5.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 5.3 แผนผังกระแสเงินสดสุทธิ ที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.7 g/ml

จากข้อมูลฟังก์กระแสนเงินสดสุทธิของการล้างที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.7 g/ml ทำให้สามารถประมาณค่า capital recovery ซึ่งแสดงจำนวนรายรับน้อยที่สุดต่อปีของกระบวนการ และสามารถประมาณค่าจุดคุ้มทุนและระยะเวลาในการคืนทุน ตารางที่ 5.4 ได้แสดงข้อมูลผลการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ซึ่งพบว่ากระบวนการมี capital recovery เท่ากับ 1,960,746 บาทต่อปี โดยจุดคุ้มทุนเท่ากับ 34,619,442 ชิ้นงานต่อปี และระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 6.57 ปี

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการล้างด้วย scCO₂ ที่อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.7 g/ml

ระยะเวลาโครงการ (ปี)	10
อัตราผลตอบแทนการลงทุนขั้นต่ำ	7%
Capital recovery (บาท/ปี)	1,960,746
อัตราผลตอบแทน	8%
จุดคุ้มทุน (ชิ้น/ปี)	34,615,310
ระยะเวลาคืนทุน (ปี)	6.57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

6.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO₂

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพการล้าง โดยควบคุมความหนาแน่นของ scCO₂ ที่ 0.5 g/ml พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการล้างมีมากขึ้น ในอุณหภูมิ 40, 45, 50 และ 60 °C เมื่อเพิ่มเวลาการล้างปริมาณของแวกซ์จะลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเวลาผ่านไป 240 นาทีพบว่ามีปริมาณแวกซ์ที่เหลืออยู่บนชิ้นงานประมาณร้อยละ 55, 37, 10 และ 0.5 ตามลำดับ ในขณะที่อุณหภูมิ 70 °C ใช้เวลาในการล้าง 150 นาที สามารถล้างปริมาณแวกซ์ที่เหลือบนชิ้นงานอยู่ร้อยละ 0.2 ซึ่งสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการล้างทำให้สามารถลดเวลาในการล้างได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่เท่ากัน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ประสิทธิภาพในการล้างเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ ส่งผลให้เพิ่มความเร็วในการล้างชิ้นงาน และการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ โดยใช้สมการสถานะ Peng-Robinson สามารถทำนายประสิทธิภาพการล้างเบื้องต้นได้

6.2 ผลของความหนาแน่นของ scCO₂ ต่อประสิทธิภาพการล้าง

จากการศึกษาประสิทธิภาพการล้าง ที่อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ ที่ 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO₂ ส่งผลให้อัตราเร็วการล้างมากขึ้น และสามารถล้างพาราฟินแวกซ์ออกจากชิ้นงานมากขึ้นที่เวลาเท่ากัน โดยที่การล้าง 240 นาที ความหนาแน่น 0.5 มีปริมาณพาราฟินแวกซ์เหลือบนชิ้นงานร้อยละ 0.53 ในขณะที่ ความหนาแน่น 0.6 และ 0.7 g/ml ใช้เวลาทำความสะอาด 90 และ 50 นาที ตามลำดับ ในการล้างพาราฟินแวกซ์ทั้งหมดออกจากชิ้นงาน จากผลการสร้างแบบจำลองการล้างพบว่า ที่อุณหภูมิการล้าง 60 °C พบว่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ เป็นปัจจัยหลักในกลไกการล้าง ดังนั้นการเพิ่มความหนาแน่นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการล้างเพิ่มขึ้นอย่างมาก

6.3 ผลการสร้างแบบจำลองการล้างด้วย scCO₂

การศึกษาการสร้างแบบจำลองการล้าง โดยใช้จลนพลศาสตร์การคายซับพบว่า ที่ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 g/ml อุณหภูมิการล้างส่งผลต่ออันดับการคายซับ โดยอุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C เป็นการคายซับอันดับสอง มีค่าคงที่อัตราการคายซับ 3.88×10^{-5} , 6.69×10^{-5} และ 1.95×10^{-4} 1/min เนื่องจากในกระบวนการล้างมีปัจจัยที่ควบคุมมีสองกลไกคือ scCO₂ แพร่เข้าไปในชั้นพาราฟิน

แก๊สเพื่อละลายแก๊สออกมาสู่บรรยากาศของไหล และกลไกที่ 2 ที่มีผลต่อการล้างคือ scCO_2 ละลายแก๊สบริเวณผิวของชิ้นงานเข้าสู่บรรยากาศของไหลส่งผลให้โปรไฟล์การล้างเป็นแบบจำลองเป็นการคายชั้นอันดับสอง ในขณะที่อุณหภูมิ 60 °C และ 70 °C แบบจำลองการล้างเป็นการคายชั้นอันดับหนึ่ง มีค่าคงที่อัตราการคายชั้น 2.45×10^{-2} และ 4.20×10^{-2} 1/min ตามลำดับ เนื่องจากอุณหภูมิการล้างเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการละลายของพาราฟินแก๊สใน scCO_2 เพิ่มขึ้น กระบวนการล้างจึงถูกควบคุมด้วยค่าการละลายของพาราฟินแก๊สใน scCO_2 และอิทธิพลของการแพร่ของ scCO_2 ในแก๊สเพื่อชะล้างแก๊สมีน้อยมาก ส่งผลให้กลไกในการล้างลดลง กระบวนการทำความสะอาดจึงเป็นการคายชั้นอันดับหนึ่งและส่งผลให้ประสิทธิภาพในการล้างเพิ่มขึ้น อีกทั้งพาราฟินแก๊สที่นำมาทดลองมีจุดหลอมเหลว 58 °C เพราะฉะนั้นการล้างที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวจึงทำให้แนวโน้มการล้างแตกต่างจากช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเนื่องจากแรงยึดเกาะระหว่างสปรกและผิวชิ้นงานน้อยลง

6.4 ผลของความหนาแน่นของ scCO_2 ต่อแบบจำลองการล้าง

การศึกษาผลของความหนาแน่นของ scCO_2 ต่อแบบจำลองการล้าง โดยศึกษาสภาวะการล้างที่อุณหภูมิ 40 ถึง 60 °C และความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 ถึง 0.7 g/ml และสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายชั้นพบว่า การเพิ่มความหนาแน่น scCO_2 ส่งผลให้กลไกการล้างมีแนวโน้มเป็นการคายชั้นหนึ่ง จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิการล้าง 60 °C เป็นแบบจำลองการคายชั้นอันดับหนึ่งทุกความหนาแน่น ที่ความหนาแน่นของ scCO_2 เท่ากับ 0.6 g/ml ที่อุณหภูมิการล้าง 50 °C เป็นการคายชั้นอันดับหนึ่ง ในขณะที่อุณหภูมิการล้าง 40 °C เป็นการคายชั้นอันดับสอง และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 เท่ากับ 0.7 g/ml แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายชั้นที่อุณหภูมิ 40 และ 50 °C เป็นการคายชั้นอันดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 ส่งผลให้ค่าการละลายของพาราฟินแก๊สใน scCO_2 เพิ่มขึ้น เมื่อค่าการละลายของพาราฟินแก๊สใน scCO_2 มากกว่าปริมาณพาราฟินแก๊สบนชิ้นงานเริ่มต้น ส่งผลให้แบบจำลองการล้างเป็นการคายชั้นอันดับหนึ่ง เนื่องจากกลไกการล้างจึงถูกควบคุมด้วยความสามารถละลายของสิ่งปนเปื้อนใน scCO_2

6.5 ผลการสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ค่าคงที่อัตราการคายชั้นและอุณหภูมิ

ความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราการคายชั้นกับอุณหภูมิ โดยใช้รูปแบบสมการของอาร์เรเนียสแสดงความสัมพันธ์ของค่าคงที่อัตราการคายชั้นและอุณหภูมิ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้นการคายชั้น เท่ากับ 85.36 และ 133.76 kJ/mol สำหรับการคายชั้นอันดับหนึ่งและการคายชั้นอันดับสองตามลำดับ ซึ่งจากผลจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของ scCO_2 ส่งผลต่อกลไกการล้างมีแนวโน้มเป็นการคายชั้นอันดับหนึ่งมีโดยใช้

ค่าการละลายเป็นปัจจัยหลักในการควบคุมกระบวนการล้าง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสำหรับแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งจึงมีอิทธิพลต่อการล้างต่ำกว่าแบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสอง

6.6 ผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO_2

จากผลการทดลองการศึกษาผลของรูปทรงชิ้นงานต่อประสิทธิภาพการล้างโดยเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานแสดนเลสทรงกลมและชิ้นงานทรงกระบอกกลวง ที่อุณหภูมิการล้าง $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml และที่การล้างที่อุณหภูมิ $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความหนาแน่นของ scCO_2 0.7 g/ml โดยสังเกตจากแนวโน้มการล้างของแต่ละรูปทรงในทั้งสองสภาวะการล้าง พบว่ารูปทรงของชิ้นงานมีผลน้อยมากต่อประสิทธิภาพการล้างด้วย scCO_2 เพราะนั้นจากการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมรวมถึงผลจากการสร้างแบบจำลองการล้างของกระบวนการล้างด้วย scCO_2 ที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำไปประยุกต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

6.7 ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์กระบวนการล้างด้วย scCO_2

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ กำหนดให้โครงการมีอายุ 10 ปี โดยมีอัตราผลตอบแทนต่ำสุดที่น่าสนใจ (minimum attractive rate of return, MARR) ร้อยละ 7 พบว่ากระบวนการล้างด้วย scCO_2 มีความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ ซึ่งจากการวิเคราะห์กระบวนการล้างเบื้องต้นพบว่าที่อุณหภูมิการล้าง $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 , 0.6 และ 0.7 g/ml มีต้นทุนการล้างอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.46 บาทต่อชิ้นงาน และหากสามารถลดต้นทุนการล้าง 0.18 บาทต่อชิ้นงาน กระบวนการล้างด้วย scCO_2 จะมีความคุ้มค่าในการลงทุนทดแทนการล้างด้วยตัวละลายชนิดเดิม

6.8 ข้อเสนอแนะ

6.8.1 ควรนำชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการล้างเปรียบเทียบกับกระบวนการล้างแบบเดิม

6.8.2 ควรเปรียบเทียบข้อมูลต้นทุนการล้างจากการใช้กระบวนการล้างแบบเดิมกับต้นทุนการล้างจากกระบวนการล้างด้วย scCO_2

เอกสารอ้างอิง

- [1] จุฬาลักษณ์ นาคสังข์ “การศึกษาประสิทธิภาพของตัวทำละลายอินทรีย์เพื่อนำมาใช้แทน AK-225 ในขบวนการล้างตลับลูกปืนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549
- [2] Spall W.D., Williams S.B. and Laintz K.E. “Precision cleaning with supercritical carbon dioxide for the elimination of organic solvents and the reduction of hazardous waste.” 9th Annual Aerospace Hazardous Materials Management Conference Denver, Colorado, September 28-30, 1994.
- [3] Fu H. and Matthews M. “Comparison between supercritical carbon dioxide extraction and aqueous surfactant washing of an oily machining waste”. Journal of Hazardous Materials. vol. 67, 1999, 197-213.
- [4] Hill J. W. and Petrucci R. H. **General Chemistry an integrated approach.** 3rd ed. New York: Prentice Hall, 2002.
- [5] Kemmere M.F. and Meyer T. **Supercritical carbon dioxide in polymer reation engineering.** Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [6] McHardy J. and Sawan S. P. **Supercritical Fluid Cleaning.** New Jersey: Noyes Publications, 1998.
- [7] Smith J.M., Van ness and Abbott M.M. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics.** 7th ed. Singapore: McGraw Hill, 2005
- [8] Bordet F., Passarello J.P., Chartier T., Tufeu R. and Baumard J.F. “Modelling solutions of hydrocarbons in dense CO₂ gas .” Journal of the European Ceramic Society. vol. 21, 2001. pp 1219-1227.
- [9] Garnier S., Neau E., Alessi P., Cortesi A. and Kikic I. “Modelling solubility of solids in supercritical fluids using fusion properties.” Fluid Phase Equilibria. vol. 158, 1999. pp 491-500.
- [10] Jha S.K. and Madras G. “Modeling the solubilities of high molecular weight n-alkanes in supercritical carbon dioxide.” Fluid Phase Equilibria. vol. 225, 2004. pp 59-62.
- [11] Crank J. **The mathematics of diffusion.** 2nd ed. Londod: Oxford University Press, 1975.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Tan C.S. and Liou D.C. **“Desorption of ethyl acetate from activated carbon by supercritical carbon dioxide.”** Industrial and Engineering Chemistry Research. vol.27,1988. pp 988-991.
- [13] Tan C.S. and Liou D.C. **“Modeling desorption at supercritical conditions.”** American Institute of Chemical Engineer Journal. vol. 35, 1989. pp 1029-1031.
- [14] Fogler H.S. **Elements of Chemical Reaction Engineering.** 4th ed. New York: Prentice Hall, 2006
- [15] Bergström R. **Evaluation of carbon dioxide cleaning system,** [Online]. Available: <http://www.chematur.se>. 2000.
- [16] Nieuwoudt I. and Rand M.D. **“Measurement of phase equilibria of supercritical carbon dioxide and paraffins.”** Journal of Supercritical Fluids. vol.22, 2002. pp. 185-199.
- [17] Chandler K., Pouillot F.L.L. and Eckert C.A. **“Phase equilibria of alkanes in natural gas system. 3. Alkanes in carbon dioxide.”** Journal of Chemical Engineering. vol.41, 1996. pp. 6-18.
- [18] Bjorklund E., Turner C., Karlsson L. and Mathiasson L. **“The influence of oil extractability and metal part geometry in degreasing processes using supercritical carbon dioxide.”** The Journal of Supercritical Fluids, vol. 9, 1996, pp. 56-60.
- [19] Peters M.S., Timmerhaus K.D. and West R.E. **Plant design and economics for chemical engineers.** 4th ed. Singapore: McGraw Hill, 2004.
- [20] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (อัตราค่าไฟฟ้า) [Online]. Available: <http://www.pea.co.th>. 2548.
- [21] Blank L. and Tarquin A. **Engineering Economy.** 6th ed., New York: McGraw-Hill, 2008.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 การคำนวณปริมาณร้อยละพาราฟินแวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงาน (%PRC)

การคำนวณปริมาณร้อยละพาราฟินแวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงานได้ตามสมการที่ 3.1

$$\%PRC = \frac{S_t - S_b}{S_0 - S_b} \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ

S_t = น้ำหนักของชิ้นงานที่เวลา t ใดๆ (g)

S_0 = น้ำหนักของชิ้นงานที่เวลาเริ่มต้น (g)

S_b = น้ำหนักของลูกปืนก่อนการเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)

- ตัวอย่างการคำนวณ

การล้างที่ อุณหภูมิ 40 °C เวลา 60 นาที

$$\%PRC = \frac{3.13280 - 3.12414}{3.13498 - 3.12414} \times 100$$

$$\%PRC = 80\%$$

จากการคำนวณดังกล่าวทำให้ทราบปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงานที่เวลาใด โดยผลจากการคำนวณแสดงได้ดังตาราง ข.1-ข.13

ก.2 การประมาณค่าคงที่การคายซับจากการทดลองโดยวิธีการ Integral Method

การประมาณค่าคงที่การคายซับจากการทดลองโดยใช้วิธีการ Integral Method โดยสร้างกราฟความสัมพันธ์ของปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงานกับเวลาในแต่ละแบบจำลอง จลนพลศาสตร์การคายซับ ซึ่งการล้างในงานวิจัยนี้เป็นการคายซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 5 และ 7 ตามลำดับ

$$\ln \frac{S_0}{S} = k_d t \quad (5)$$

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0} = k_d t \quad (7)$$

โดยสามารถคำนวณความสัมพันธ์ของปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่เหลือนบนชิ้นงานที่เวลาใดๆ ได้ดังนี้

ตัวอย่างการคำนวณ

- แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่ง

ตัวอย่างที่ อุณหภูมิ 60 °C เวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารจากสมการที่ 5 เป็นการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln \frac{S_0}{S} = \ln \left(\frac{100.0}{20.6} \right)$$

$$\ln \frac{S_0}{S} = 1.58$$

- แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสอง

ตัวอย่างที่ อุณหภูมิ 40 °C เวลา 60 นาที

จากสมการที่ 7

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0} = \left(\frac{1}{79.7} \right) - \left(\frac{1}{100} \right)$$

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{S_0} = 2.55 \times 10^{-3}$$

จากการคำนวณดังกล่าวทำให้สามารถได้ข้อมูลความสัมพันธ์ความเข้มข้นกับเวลาได้ โดยผลจากการคำนวณแสดงได้ดัง ตาราง ข.1-ข.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	93
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.12424
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13498
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01074

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.13498	100	0	0
30	3.13366	87.7	0.13114	0.00140
60	3.1328	79.7	0.22687	0.00255
90	3.1319	71.3	0.33796	0.00402
120	3.13161	68.6	0.37656	0.00457
150	3.13117	64.5	0.43812	0.00550
180	3.13042	57.5	0.55266	0.00738
210	3.13033	56.7	0.56733	0.00764
240	3.12977	51.5	0.66379	0.00942

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	103
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13517
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.14953
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01436

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 45 °C

เวลาในการล้าง(นาท)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.14953	100.0	0.00000	0.00000
30	3.14733	84.7	0.16605	0.00181
60	3.14510	69.2	0.36817	0.00445
90	3.14441	64.3	0.44161	0.00555
120	3.14312	55.4	0.59059	0.00805
150	3.14229	49.6	0.70118	0.01016
180	3.14161	44.8	0.80296	0.01232
210	3.14120	42.0	0.86750	0.01381
240	3.14045	36.8	0.99967	0.01717

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	115
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.12989
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13498
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01224

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 50 °C

เวลาในการล้าง(นาท)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.14487	100.0	0.00000	0.00000
30	3.1406	56.6	0.56846	0.00766
60	3.13982	46.1	0.77485	0.01170
90	3.13851	36.2	1.01545	0.01761
120	3.13776	30.4	1.18958	0.02286
150	3.1373	27.5	1.28954	0.02631
180	3.13674	24.4	1.41247	0.03106
210	3.13577	18.5	1.68665	0.04401
240	3.13515	13.6	1.99658	0.06364

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	136
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13858
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.15177
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01318

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.15177	100	0	0
30	3.14421	42.7	0.85135	0.01343
60	3.1413	20.6	1.57883	0.03849
90	3.14032	13.2	2.02557	0.06580
120	3.1396	7.7	2.55966	0.11931
150	3.13932	5.6	2.88056	0.16824
180	3.1389	2.4	3.71889	0.40219
210	3.13868	0.8	4.88204	1.30900
240	3.13865	0.5	5.23872	1.87429

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	155
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.12334
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13478
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01144

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 70 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.13478	100.0	0.00000	0.00000
30	3.12581	21.6	1.53290	0.03632
60	3.12384	4.4	3.13026	0.21880
90	3.12351	1.5	4.20907	0.66294
120	3.12346	1.0	4.55738	0.94333
150	3.12336	0.2	6.34914	5.71000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	105
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.1503
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.1614
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01112

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.6 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.1614	100	0	0
30	3.15923	80.5	0.21753	0.00243
60	3.15785	68.0	0.38540	0.00470
90	3.15646	55.5	0.58887	0.00802
120	3.15564	48.1	0.73172	0.01079
150	3.15506	42.9	0.84670	0.01332
180	3.15446	37.5	0.98143	0.01668
210	3.15402	33.5	1.09322	0.01984
240	3.15370	30.6	1.18317	0.02265

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	134
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.12116
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13324
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01208

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.6 g/ml อุณหภูมิล้าง 50 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การละลาย	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.13324	100	0	0
30	3.12712	49.3	0.70648	0.01027
60	3.12443	27.1	1.30676	0.02694
90	3.12267	12.5	2.07944	0.07000
120	3.12185	5.7	2.86261	0.16507
150	3.12116	0	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	161
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.12697
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13936
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01239

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.6 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.13936	100	0	0
30	3.13103	32.8	1.11571	0.02052
60	3.128235	10.2	2.28182	0.08794
90	3.12697	0	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	131
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.10351
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.11463
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01112

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C

เวลาในการล้าง(นาทื)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.11463	100	0	0
30	3.11128	69.9	0.35848	0.00431
60	3.10946	53.5	0.62535	0.00869
90	3.10802	40.6	0.90245	0.01466
120	3.10692	30.7	1.18203	0.02261
150	3.10637	25.7	1.35792	0.02888
180	3.10573	20.0	1.61124	0.04009
210	3.10532	16.3	1.81542	0.05144
240	3.10499	13.3	2.01670	0.06514

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	167
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13605
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.14717
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01112

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 50 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.14717	100	0	0
30	3.13997	35.3	1.04265	0.01837
60	3.13714	9.8	2.32257	0.09202
90	3.13628	2.1	3.878421	0.473478
120	3.13605	0	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	203
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.11754
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.13099
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01345

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.13099	100	0	0
30	3.12046	21.7	1.52740	0.03606
60	3.11754	0	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	203
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.11479
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	3.12669
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01190

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกลมที่สภาวะความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C

เวลาในการล้าง (นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC	การคายซับ	
			อันดับหนึ่ง $\ln(S_0/S)$	อันดับสอง $1/S-1/S_0$
0	3.12669	100	0	0
10	3.12245	64.4	0.44053	0.00554
20	3.11903	35.6	1.03198	0.01807
30	3.11684	17.2	1.75870	0.04805
40	3.11553	6.2	2.77764	0.15081
50	3.11479	0	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	93
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	0.98269
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	0.99736
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01467

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกระบอกกลวงที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml อุณหภูมิล้าง 40 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC
0	0.99736	100.0
30	0.99544	86.9
60	0.99397	76.9
90	0.99276	68.6
120	0.99162	60.9
150	0.99077	55.1
180	0.99026	51.6
210	0.98955	46.8
240	0.98901	43.1

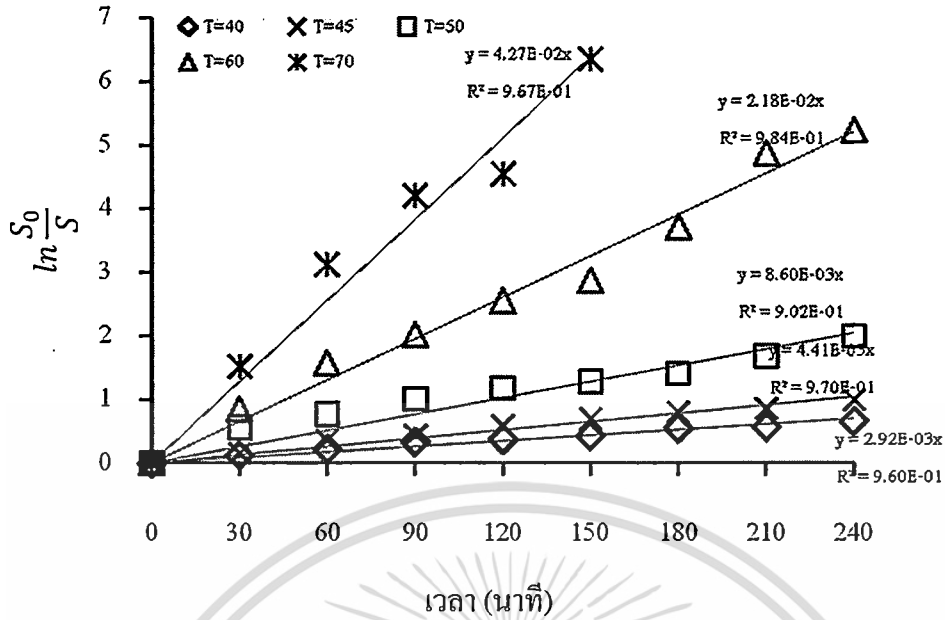
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันในระบบ (bar)	203
น้ำหนักชิ้นงานก่อนเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	0.94681
น้ำหนักชิ้นงานหลังเคลือบพาราฟินแวกซ์ (g)	1.33722
น้ำหนักพาราฟินแวกซ์ (g)	0.01298

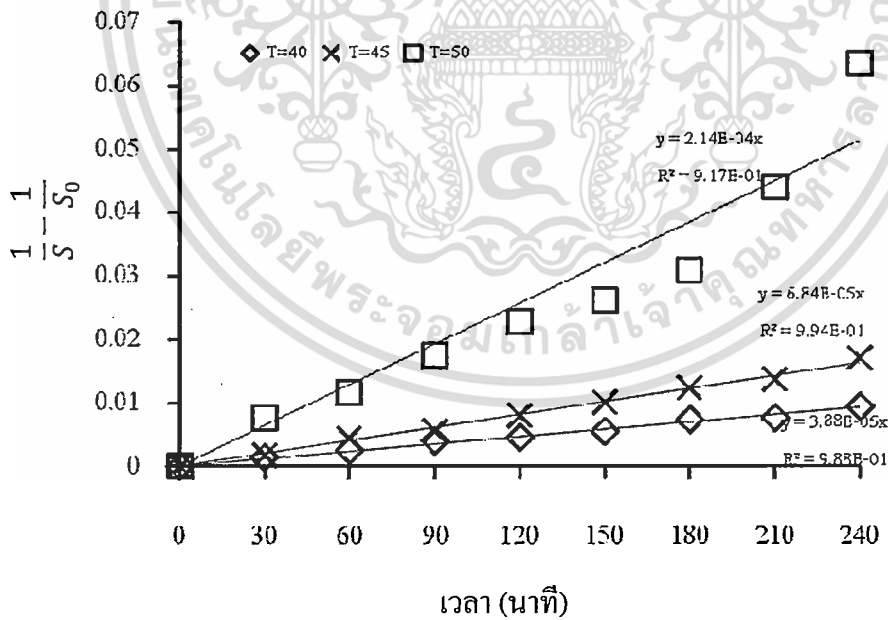
ตารางที่ ข.14 ข้อมูลการทดลองกระบวนการล้างทรงกระบอกกลวงที่สภาวะ ความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml อุณหภูมิล้าง 60 °C

เวลาในการล้าง(นาที)	น้ำหนักชิ้นงาน(g)	%PRC
0	0.95979	100
10	0.95639	73.8
20	0.95179	38.4
30	0.94752	5.5
40	0.94681	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

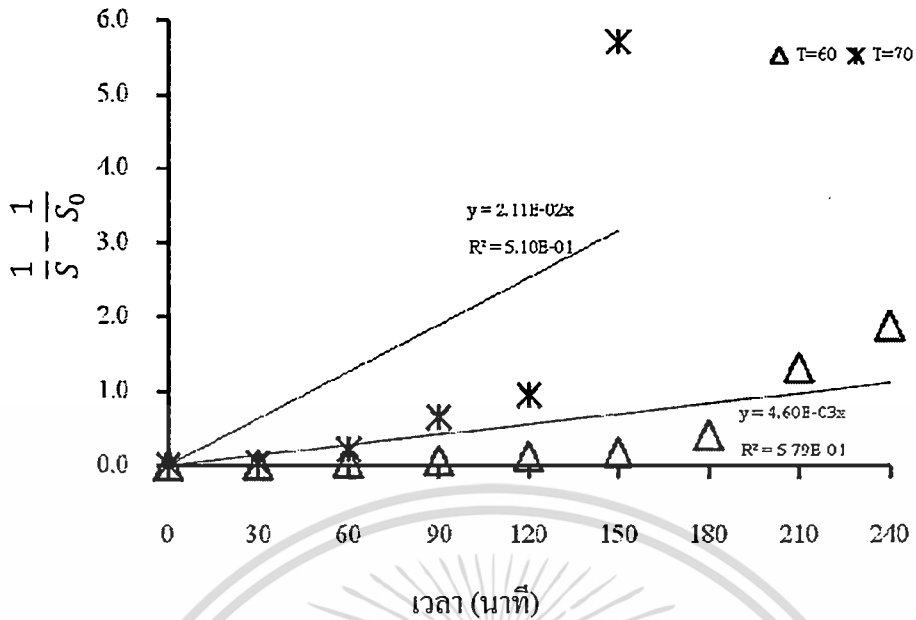


รูปที่ ข.1 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 40, 45, 50, 60 และ 70 °C
ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 g/ml

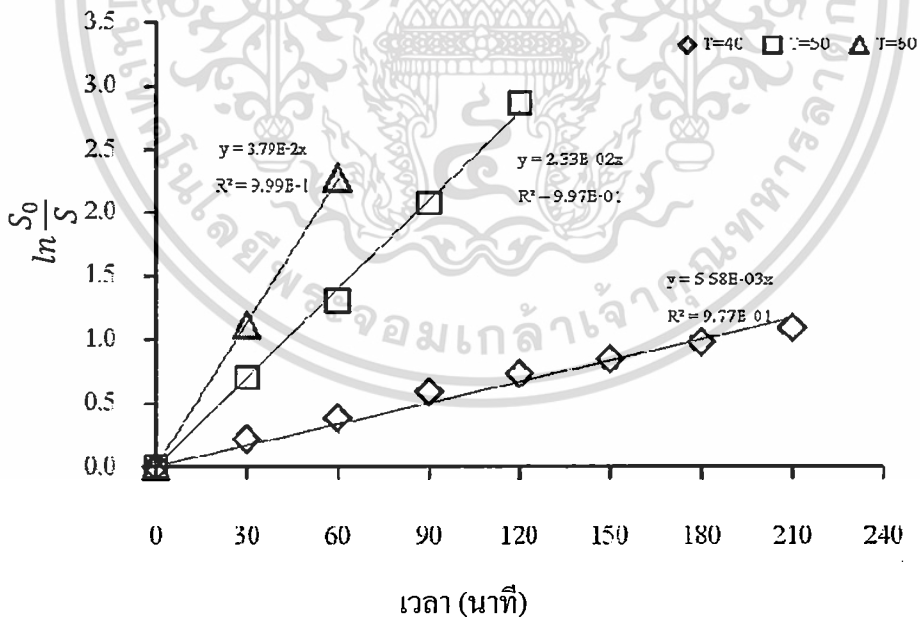


รูปที่ ข.2 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 45 และ 50 °C
ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

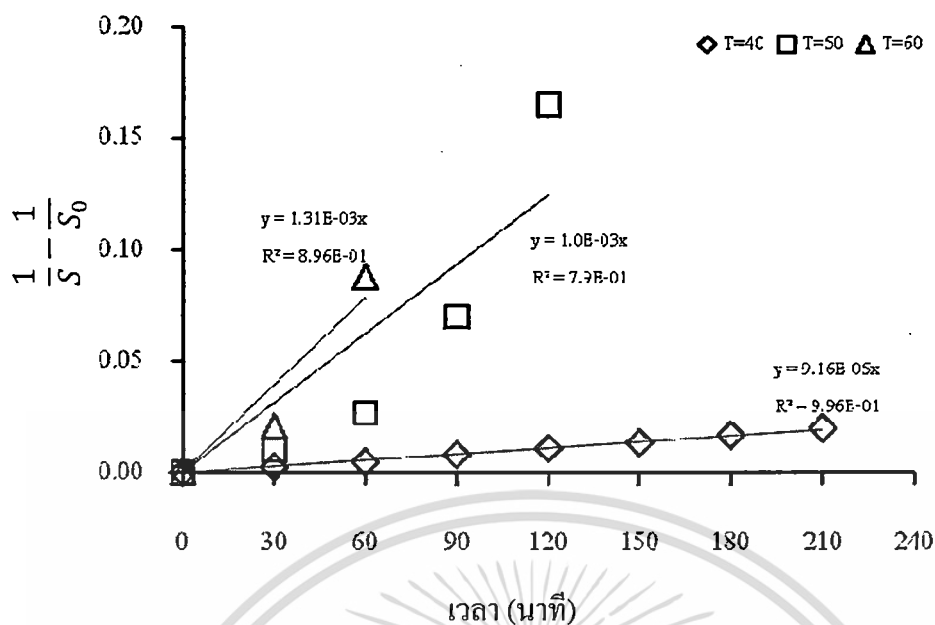


รูปที่ ข.3 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสองที่อุณหภูมิ 60 และ 70 °C
ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml

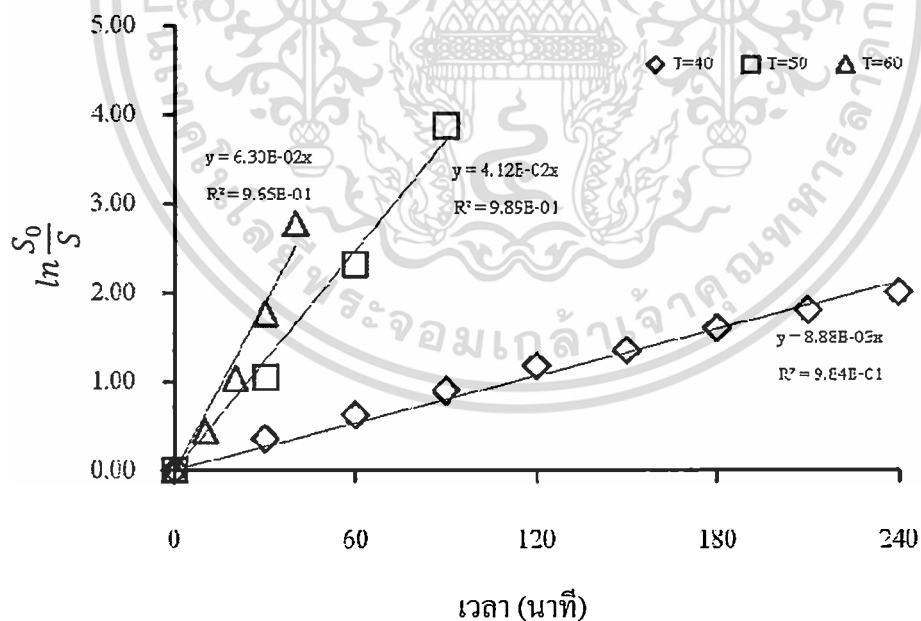


รูปที่ ข.4 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C
ความหนาแน่น scCO_2 0.6 g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

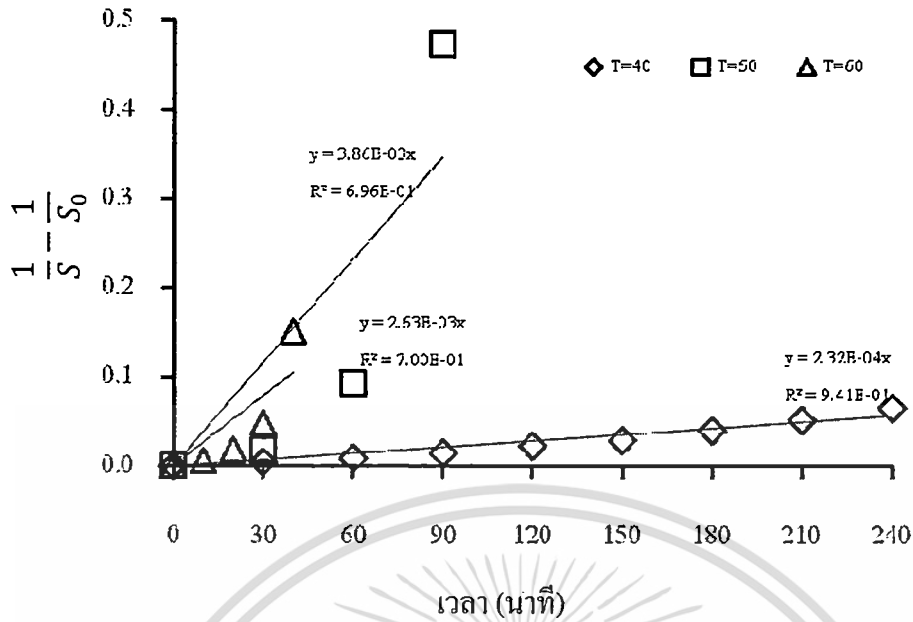


รูปที่ ข.5 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C
ความหนาแน่น $scCO_2$ 0.6 g/ml



รูปที่ ข.6 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับหนึ่งที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C
ความหนาแน่น $scCO_2$ 0.7 g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 แบบจำลองจลนพลศาสตร์การคายซับอันดับสองที่อุณหภูมิ 40, 50 และ 60 °C
ความหนาแน่น scCO_2 0.7 g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลค่าคงที่อัตราการคายซั้ที่อุณหภูมิ 40-60 °C การคายซั้อันดับหนึ่ง

อุณหภูมิ (K)	k_d	1/อุณหภูมิ (1/K)	$\ln(k_d)$
313	3.88×10^{-4}	3.19×10^{-3}	-7.8545052
318	6.69×10^{-4}	3.10×10^{-3}	-7.3097265
323	1.95×10^{-3}	3.00×10^{-3}	-6.2399259

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลค่าคงที่อัตราการคายซั้ที่อุณหภูมิ 40-50 °C การคายซั้อันดับสอง

อุณหภูมิ (K)	k_d	1/อุณหภูมิ (1/K)	$\ln(k_d)$
313	3.88×10^{-4}	3.19×10^{-3}	-7.8545052
318	6.69×10^{-4}	3.14×10^{-3}	-7.3097265
323	1.95×10^{-3}	3.10×10^{-3}	-6.2399259

- ตัวอย่างการคำนวณพลังงานกระตุ้นการคายซั้

การคายซั้อันดับหนึ่ง

จากรูปแบบ สมการอาร์เรเนียส ตามสมการที่ 4.5

$$\ln k_d = \ln k_{do} - \frac{E_A}{RT} \quad (4.5)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ของ $\ln k_d$ และ $\frac{1}{T}$ ดังรูปที่ 4.8 พบว่าความชันของเส้นตรงเท่ากับ -10267 จากสมการที่ 4.5 จะได้

$$\frac{E_A}{R} = 10267$$

$$E_A = \frac{10267 \times 8.314}{1000} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$E_A = 85.36 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ง.
การประมาณค่าการละลายพาราฟินใน $scCO_2$
และปริมาณแว็กซ์ที่ถูกล้างภายในเครื่องล้างความดันสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.1 ตัวแปรของสารบริสุทธิ์ที่ใช้ในการประมาณค่าการละลาย

การประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 สามารถคำนวณได้จากสมการวิภาคของของแข็งและก๊าซ และประยุกต์ใช้สมการ Peng-Robinson เป็นสมการสถานะในการคำนวณ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 และพาราฟินแวกซ์ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 24 ซึ่งตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังตาราง ค.1

ตาราง ง.1 ค่าตัวแปรของสารบริสุทธิ์ที่ใช้ในการประมาณค่าการละลาย [16]

สาร	อุณหภูมิวิกฤต, T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ความดันวิกฤต P_c (bar)	acentric factor	v^{solid} (ml/mol)
CO_2	31.1	73.8	0.239	-
$\text{C}_{24}\text{H}_{50}$	503.8	9.80	1.071	402.4

ง.2 คำสั่งที่ใช้ในการประมาณค่าการละลาย

ในการประมาณค่าการละลายมีความซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำโปรแกรม Matlab 7.8 ช่วยในการคำนวณ โดยคำสั่งที่ใช้ในการคำนวณมีดังนี้

```
clear all
```

```
clc
```

```
%% Input data
```

```
T=input('Input T :');
```

```
P=input('Input P :');
```

```
K=0.12
```

```
%% parameter
```

```
Tcco2=304.2; Pcco2=73.83; wco2=0.239; Trco2=T/Tcco2;
```

```
Tcc28= 804.0; Pcc28=9.80; wc28=1.071; %I. Nieuwoud c24
```

```
Trc28=T/Tcc28 ;
```

```
aco2=(0.45724)*((RG^2)*((Tcco2^2)/Pcco2)) ;
```

```
bco2=(0.0778)*((RG*Tcco2)/Pcco2) ;
```

```
ac28=(0.45724)*((RG^2)*((Tcc28^2)/Pcc28)) ;
```

```
bc28=(0.0778)*((RG*Tcc28)/Pcc28) ;
```

```
afco2=(1+(((0.37464+(1.54226.*wco2)-(0.26992.*(wco2^2))))*(1-Trco2^0.5))))^2 ;
```

```
afc28=(1+((0.37464+(1.54226.*wc28)-(0.26992.*(wc28^2)))*(1-Trc28^0.5)))^2 ;
```

```
aTco2=aco2*afco2 ;
```

```
aTc28=ac28*afc28 ;
```

```
sigma=1+(2^0.5) ;
```

```
fclon=1-(2^0.5) ;
```

```
% end parameter
```

```
%% sub Solve for Z
```

```
Aco2=aco2*afco2*(P/(RG^2*T^2)) ;
```

```
Bco2=(bco2*P)/(RG*T) ;
```

```
Ac28=ac28*afc28*(P/(RG^2*T^2)) ;
```

```
Bc28=bc28*(P/(RG*T)) ;
```

```
syms x
```

```
c1=1; c2=1-Bco2; c3=Aco2-(3.*(Bco2.^2))-(2.*Bco2); c4=(Aco2.*Bco2)-(Bco2.^2)-(Bco2.^3);
```

```
%c=[c1 -c2 c3 -c4] ;
```

```
%z=roots(c) ;
```

```
%z1=z(3);
```

```
Z=(c1*(x^3))-(c2*(x^2))+(c3*x)-c4 ;
```

```
z=solve(Z,x);
```

```
z=z(1);
```

```
z=subs(z,{'c1','c2','c3','c4'})
```

```
% end sub solve for z
```

```
%% sub fugacity
```

```
qco2=(aTco2)/(2*(2^0.5)*(bco2*RG*T));
```

```
Ico2=log((z+(sigma*Bco2))/(z+(fclon*Bco2)));
```

```
qi=Ico2*qco2;
```

ออก $Q1 = \left(\frac{Bc28}{Bco2}\right) \cdot (z-1)$; สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ $Q2 = \log(z - Bco2)$; อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
k=(2*(1-k12)*(((aTco2*aTc28)^0.5)/aTco2))-(bc28/bco2);
```

```
Q3=qi*k;
```

```
Q=Q1-Q2-Q3;
```

```
fuga=exp(Q);
```

```
% end sub fugacity
```

```
%% estimation of Psub
```

```
Nc=24;
```

```
A=3.04549+(2.23175*Nc);
```

```
B=2080.07-(1129.73*Nc);
```

```
C=2.303;
```

```
n=A+(B/T)+C;
```

```
Psub=exp(n);
```

```
% end Psub
```

```
%% solubility
```

```
Pratio=Psub./P ;
```

```
exT=exp((402.4*(P-Psub))/(RG.*T));
```

```
y2=Pratio*(exT./fuga) % mole%
```

```
Y2=y2*338/((y2*338)+((1-y2)*44)) % mass%
```

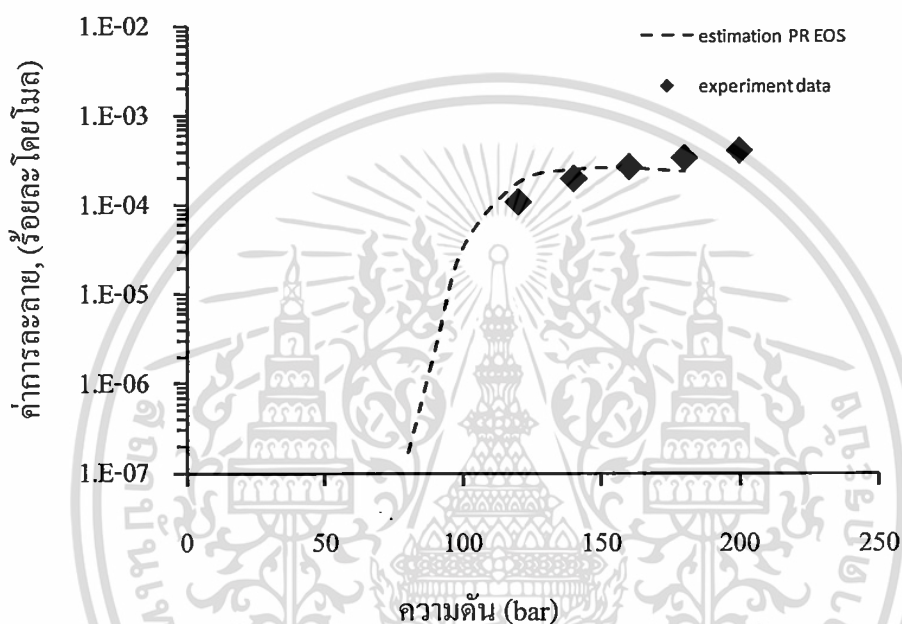
```
% end Solubility
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.3 การเปรียบเทียบค่าการละลาย

จากรูปที่ ง.1 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่าการละลายของ $C_{28}H_{58}$ ใน $scCO_2$ อุณหภูมิ 45 °C ระหว่างค่าการละลายที่ได้จากการประมาณค่าและค่าการละลายจากการทดลองของ K. Chandler และ คณะ [17] จากผลการประมาณค่าการละลายพบว่ามีความใกล้เคียงกับผลการทดลอง เพราะฉะนั้นการประมาณค่าการละลายของไฮโดรคาร์บอนใน $scCO_2$ ด้วยสมการสถานะ Peng-Robinson จึงมีความแม่นยำในการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$



รูปที่ ง.1 การเปรียบเทียบค่าการละลายของ $C_{28}H_{58}$ ใน $scCO_2$ อุณหภูมิ 45 °C

ง.4 ผลการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$

จากการประมาณค่าพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$ โดยพาราฟินแวกซ์มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 24 แสดงดังตาราง ง.2

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน $scCO_2$

อุณหภูมิ (°C)	ค่าการละลาย (ร้อยละโดยมวล)		
	0.5 g/ml	0.6 g/ml	0.7 g/ml
40	4.83×10^{-4}	1.12×10^{-4}	1.34×10^{-4}
45	9.64×10^{-4}	-	-
50	1.90×10^{-3}	4.48×10^{-4}	4.93×10^{-4}
60	8.10×10^{-3}	1.61×10^{-2}	1.69×10^{-2}
70	2.85×10^{-2}	-	-

ง.5 การคำนวณปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่ถูกล้างจากการประมาณค่าการละลาย

จากการประมาณค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ใน scCO₂ จากโปรแกรม Matlab 7.8 สามารถประมาณค่าปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่ถูกล้างได้ดังนี้

$$x_i = \frac{m_{wax}}{m_{wax} + m_{co2}} \quad (ง.1)$$

เมื่อ x_{wax} คือ ค่าการละลายของพาราฟินแวกซ์ (ร้อยละโดยมวล), m_{wax} คือ ปริมาณพาราฟินแวกซ์ (g) และ m_{co2} คือ ปริมาณก๊าซ CO₂ (g)

จากสมการ ง.1 สามารถจัดรูปเพื่อหา m_{wax} ได้ดังนี้

$$m_{wax} = \frac{x_{wax} \times m_{co2}}{1 - x_{wax}} \quad (ง.2)$$

- ตัวอย่างที่สถานะ อุณหภูมิการล้าง 40 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.5 g/ml

$$m_{wax} = \frac{(2.54 \times 10^{-4}) \times 7.5}{1 - (2.54 \times 10^{-4})}$$

$$m_{wax} = 1.91 \times 10^{-3}$$

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลปริมาณพาราฟินแวกซ์ที่ล้างได้จากการประมาณค่าการละลาย

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณพาราฟินแวกซ์ (g)		
	0.5 g/ml	0.6 g/ml	0.7 g/ml
40	3.62E×10 ⁻³	9.01×10 ⁻³	1.26×10 ⁻²
45	7.24×10 ⁻³	-	-
50	1.43×10 ⁻³	3.61×10 ⁻²	4.64×10 ⁻²
60	6.12×10 ⁻²	1.30×10 ⁻¹	1.59×10 ⁻¹
70	2.20×10 ⁻¹	-	-



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.1 คำสั่งที่ใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพาราฟินแวกซ์ใน scCO_2 โดยใช้สมการการแพร่ผ่านทรงกลม เมื่อกำหนดให้พาราฟินแวกซ์เคลือบบนชิ้นงานมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบสมการการแพร่ตามสมการที่ 2.17 กับการทดลอง ผ่านโปรแกรมช่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์ Mathcad 14 ซึ่งใช้การกำหนดค่า D_{AB} และเปรียบเทียบแนวโน้มเส้นโค้งจากสมการ และผลจากการทดลองใกล้เคียงกันดังรูปที่ จ.1 โดยมีคำสั่งดังต่อไปนี้

- ตัวอย่างการคำนวณที่สภาวะการล้าง 40°C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml

data40 :=

	0	1
0	0	100
1	30	87.7
2	60	79.7
3	90	71.3
4	120	68.6
5	150	64.5
6	180	57.5
7	210	56.7
8	240	51.5

x := 1000

pi := $\frac{22}{7}$

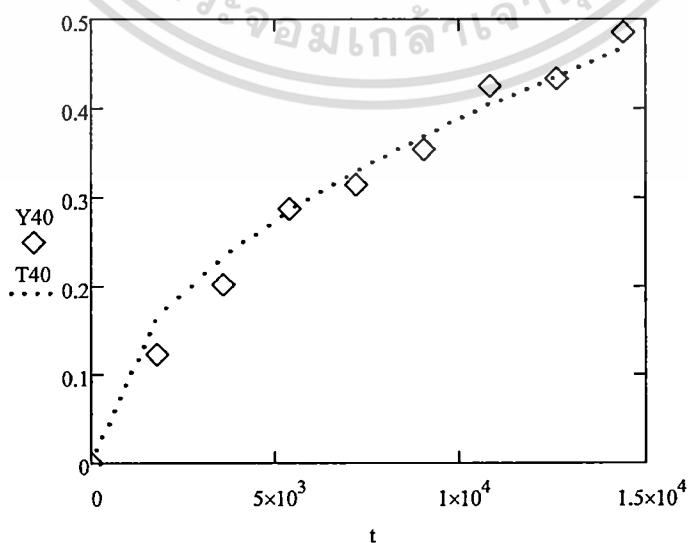
a := 0.3175

b := 0.3220

D40 := $6 \cdot 10^{-11}$

$$t := (60 \text{data40})^{(0)} \quad Y40 := 1 - \frac{\text{data40}^{(1)}}{100}$$

$$T40 := 1 - \left[\frac{6}{\pi^2 (a^2 + a \cdot b + b^2)} \right] \sum_{m=1}^x \left[\left(\frac{b \cdot \cos(m\pi) - a}{m} \right)^2 \cdot e^{-\frac{(-D40 \cdot m^2 \cdot \pi^2 \cdot t)}{(b-a)^2}} \right]$$



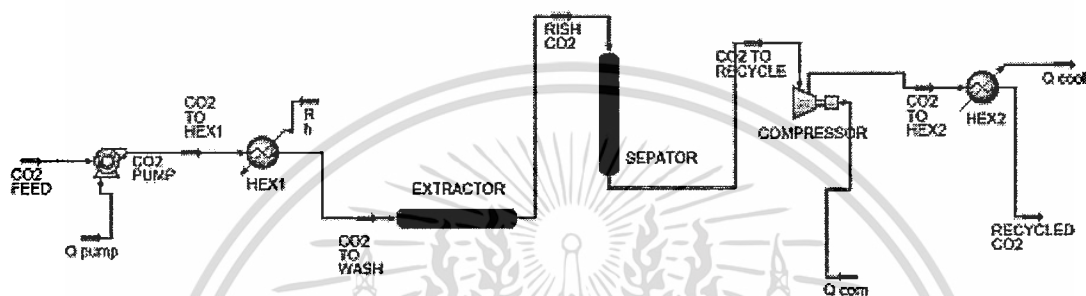
เอกสารนี้ รูปที่ จ.1 การเปรียบเทียบเส้นโค้งจากสมการการแพร่และผลการทดลองสภาวะการล้างในด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งอุณหภูมิ 40°C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.1 การประเมินต้นทุนการล้าง

จากผลการทดลองศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการล้างด้วย scCO_2 พบว่ามีหลายสภาวะที่สามารถนำมาประยุกต์ในอุตสาหกรรม ดังนั้นการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จึงถูกนำมาใช้เพื่อประเมินถึงความคุ้มค่าต่อการลงทุนของสภาวะการล้างต่างๆ การสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม Aspen Hysys 2006 เพื่อวิเคราะห์ต้นทุนค่าไฟฟ้าในการดำเนินงานโดยแผนผังกระบวนการแสดงดังรูปที่ จ.1 และตารางที่ จ.1 แสดงต้นทุนค่าไฟฟ้าจากการจำลองกระบวนการ



รูปที่ จ.1 แผนผังกระบวนการสำหรับวิเคราะห์ต้นทุนดำเนินงาน

ตารางที่ ฉ.1 ต้นทุนค่าไฟฟ้าจากการจำลองกระบวนการ

หน่วยปฏิบัติการ	กำลังไฟฟ้า (kW) อุณหภูมิการล้าง 60 °C		
	0.5	0.6	0.7
CO ₂ Pump	0.0449	0.0692	0.0934
HEX1	0.2279	0.0998	0.0236
HEX2	1.7094	1.7858	1.9392
Compressor	1.0264	1.1486	1.2525
หน่วยไฟฟ้ารวม	3.0087	3.1034	3.3087
ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)	36,826	37,985	40,499

-ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้า

หน่วยไฟฟ้ารวม (หน่วย) = กำลังไฟฟ้า (kW) × เวลา (ชั่วโมง)

ค่าไฟฟ้า = หน่วยไฟฟ้ารวม (หน่วย) × ราคาต่อหน่วย (บาท/หน่วย)

ที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่น scCO_2 0.5 g/ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\text{หน่วยไฟฟ้า (หน่วย)} &= 3.0087 \times (24 \times 300) \\ &= 21,662\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{ค่าไฟฟ้า (บาท)} &= 21,662 \times 1.7 \\ &= 36,826\end{aligned}$$

-การคำนวณค่าซ่อมบำรุง

$$\begin{aligned}\text{ค่าซ่อมบำรุง (บาท)} &= \text{ร้อยละ 5 ของต้นทุนทุนทรัพย์} \\ &= 13,771,461 \times 0.05 \\ &= 688,573\end{aligned}$$

-การคำนวณค่าแรงงาน

ค่าแรงงานสามารถประมาณได้จากการกำลังการผลิต โดยขึ้นอยู่กับหน่วยปฏิบัติการและเวลาการปฏิบัติการ [19] และใช้รูปที่ จ.2 กำหนดชั่วโมงดำเนินงานต่อปี

$$\text{ค่าแรงงาน (บาท/ปี)} = \text{ชั่วโมงดำเนินงานต่อปี} \times \text{ค่าแรงต่อชั่วโมง}$$

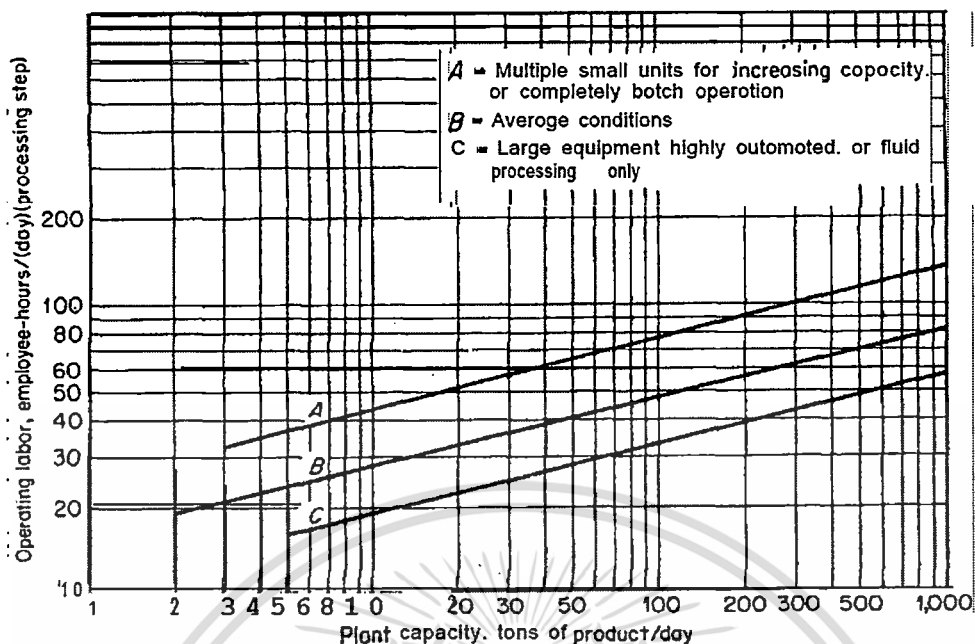
เมื่อกำหนดให้กำลังการผลิตจากอัตราการไหลเชิงมวลของ CO_2 288 กิโลกรัม/วัน จาก รูปที่ จ.2 จะได้ ชั่วโมงดำเนินงานต่อ(วัน \times ขั้นตอนการผลิต) เท่ากับ 23

$$\begin{aligned}\text{ชั่วโมงดำเนินงานต่อปี} &= \text{ชั่วโมงดำเนินงานต่อ (วัน} \times \text{ขั้นตอนการผลิต)} \\ &\quad \times \text{ขั้นตอนการผลิต} \times \text{วันดำเนินการผลิต} \\ &= 23 \times 6 \times 300 \\ &= 41,400\end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned}\text{ค่าแรงงาน (บาท/ปี)} &= 41,400 \times 24.25 \\ &= 1,003,950\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.2 Operating labor requirement in chemical industry [19]

-การคำนวณค่าโสหุ้ย

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าโสหุ้ย (บาท/ปี)} &= \text{ร้อยละ 80 ของค่าแรงงาน} + \text{ร้อยละ 20 ของค่าซ่อมบำรุง} \\
 &= (372,600 \times 0.8) + (688,573 \times 0.2) \\
 &= 435,795
 \end{aligned}$$

-การคำนวณค่าก๊าซ CO₂

ที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่น scCO₂ 0.5 g/ml ราคา CO₂ เท่ากับ 20 บาท/kg

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าก๊าซ CO}_2 \text{ (บาท/ปี)} &= \text{ราคา CO}_2 \times (\text{ก๊าซ CO}_2 \text{ เริ่มต้น} + \text{ปริมาณก๊าซที่สูญเสียต่อปี}) \\
 &= \text{ราคา CO}_2 \times (\text{ปริมาตรเครื่องล้าง} \times \text{ความหนาแน่น CO}_2) \\
 &\quad + (\text{ร้อยละ 5 ของปริมาณก๊าซเริ่มต้น} \times \text{จำนวนรอบ/ปี}) \\
 &= 20 (1.20 \text{ m}^3 \times 500 \text{ kg/ m}^3) + (0.05 \times 1.20 \times 500 \times 6 \times 300) \\
 &= 361,653
 \end{aligned}$$

-การสร้างแผนผังกระแสเงินสดสุทธิ [21]

จากข้อมูลต้นทุนทุนทรัพย์และต้นทุนดำเนินงาน สามารถคำนวณมูลค่าปัจจุบันของต้นทุนทุนทรัพย์ได้จากหลักพื้นฐานของ P/A factor จากสมการ จ.1 โดยอายุโครงการ 10 ปี MARR เท่ากับ ร้อยละ 7

เอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ (จ.1) ที่มีการนำไปใช้

$$A = P \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \text{ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ (จ.1) ที่มีการนำไปใช้}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

$$A = 13,771,461 \times 0.14038$$

$$A = 1,960,746$$

และต้นทุนรวมต่อปีที่อุณหภูมิการเลี้ยง 60 °C ความหนาแน่น scCO_2 0.5, 0.6 และ 0.7 g/ml แสดงดังตารางที่ จ.2 ถึง จ.4

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิ อุณหภูมิการเลี้ยง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.5 g/ml

ปี	ต้นทุนทุนทรัพย์ (บาท)	ต้นทุนดำเนินการ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันต้นทุน ทุนทรัพย์ (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท)
0	13,771,461	-	-	-
1	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
2	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
3	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
4	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
5	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
6	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
7	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
8	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
9	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623
10	-	3,031,877	1,960,746	4,992,623

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ.3 ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิ อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.6 g/ml

ปี	ต้นทุนทุนทรัพย์ (บาท)	ต้นทุนดำเนินการ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันต้นทุน ทุนทรัพย์ (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท)
0	13,771,461	-	-	-
1	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
2	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
3	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
4	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
5	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
6	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
7	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
8	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
9	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471
10	-	3,820,725	1,960,746	5,781,471

ตารางที่ ฉ.4 ข้อมูลกระแสเงินสดสุทธิ อุณหภูมิการล้าง 60 °C ความหนาแน่นของ scCO₂ 0.7 g/ml

ปี	ต้นทุนทุนทรัพย์ (บาท)	ต้นทุนดำเนินการ (บาท)	มูลค่าปัจจุบันต้นทุน ทุนทรัพย์ (บาท)	ต้นทุนรวม (บาท)
0	13,771,461	-	-	-
1	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
2	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
3	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
4	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
5	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
6	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
7	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
8	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
9	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042
10	-	5,016,296	1,960,746	6,977,042

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉ.2 การประมาณค่า capital recovery [21]

การคำนวณหา capital recovery (CR) มีความสำคัญในการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งเป็นจำนวนเงินรายรับอย่างน้อยที่สุดเพื่อชดเชยและคุ้มค่างบเงินลงทุนจากต้นทุนทุนทรัพย์ โดยการคำนวณ capital recovery สามารถทำได้โดยการแปลงเงินลงทุนเริ่มต้นเป็นมูลค่ารายปี ดังสมการที่ ฉ.2

$$CR = -[P(A/P, i\%, n)] - S[A/F, i\%, n] \quad \text{ฉ.3}$$

เมื่อคิด ณ ปีที่ 10 ไม่มีมูลค่าซากสามารถคำนวณ capital recovery ได้ดังนี้

$$CR = -[13,771,461(A/P, 7\%, 10)] \quad \text{ฉ.3}$$

$$CR = -1,960,746$$

ฉ.3 การประเมินอัตราผลตอบแทน [21]

เนื่องจากข้อมูลต้นทุนของกระบวนการล้างแบบใช้ตัวทำละลายชนิดเดิมมีน้อยจึงไม่สามารถเปรียบเทียบต้นทุนการล้างของกระบวนการในระดับกำลังการผลิตเดียวกันได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาต้นทุนน้อยที่สุดที่สามารถลดได้คิดเป็นรายรับที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนกระบวนการ จากการศึกษาอัตราผลตอบแทนน้อยที่สุดที่ทำให้กระบวนการล้างด้วย scCO_2 คุ้มค่าต่อการลงทุน ($\text{ROR} \geq \text{MARR}$) จากสมการที่ ฉ.2

$$0 = -AW_D + AW_R \quad \text{ฉ.3}$$

เมื่อแทนค่ารับจ่ายรายปีของกระบวนการจะสามารถหารายรับซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ROR แสดง โดยคิดที่ต้นทุนต่ำสุดของสภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60°C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.7 g/ml ได้ดังนี้

$$0 = -6,977,042 + AW_R(i^*)$$

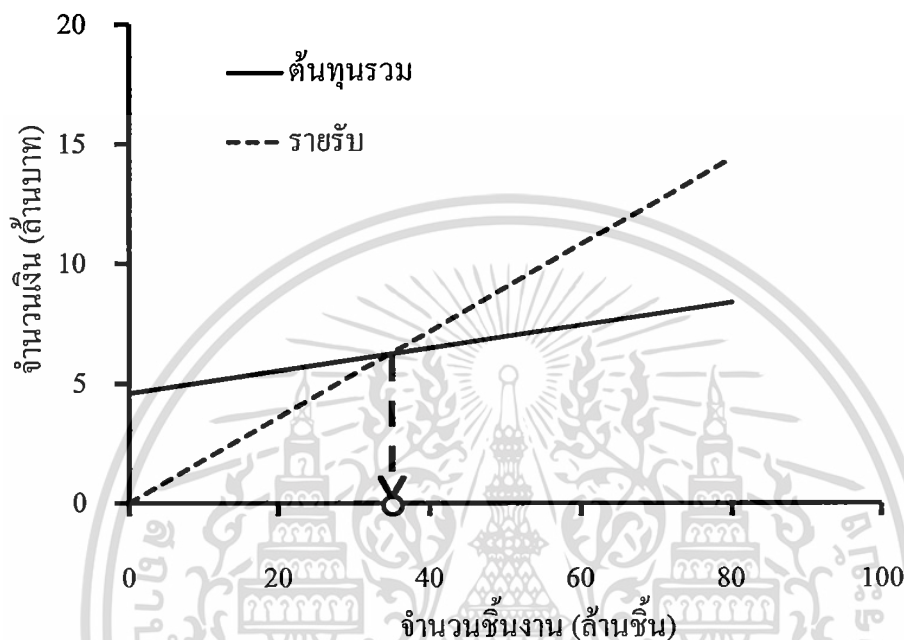
ซึ่งจากการใช้วิธีลองผิดลองถูก (trial and error) ผ่านโปรแกรม Microsoft Excel พบว่ากระบวนการต้องมีรายรับอย่างน้อย 9,072,000 บาท จะทำให้ที่อัตราผลตอบแทนเท่ากับ ร้อยละ 8 ซึ่งมากกว่าอัตราผลตอบแทนลงทุนขั้นต่ำที่ได้กำหนดไว้เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 7 และจากรายรับดังกล่าวแสดงได้ว่าหากกระบวนการล้างสามารถลดต้นทุนจากกระบวนการล้างเดิมได้ประมาณ 0.18 บาทต่อชิ้นงาน จะทำให้กระบวนการนี้มีความคุ้มค่าต่อการลงทุน

ฉ.4 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน [21]

ในการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน เป็นการพิจารณาระดับการผลิตที่ต้องการให้รายได้เท่ากับรายจ่าย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอจุดคุ้มทุนในความสัมพันธ์ปริมาณชิ้นงานต่อปี ซึ่งการประเมินจุดคุ้มทุนคิดจากจุดตัดของรายได้และต้นทุนซึ่งเป็นผลรวมของต้นทุนคงที่ (FC) และต้นทุนแปรผัน (VC) ตามสมการที่ ฉ.4

$$0 = \text{รายได้} - \text{ต้นทุนรวม} \quad \text{ฉ.4}$$

จากการประเมินอัตราการตอบแทนซึ่งคิดจากกระบวนการล้างที่ สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C และความหนาแน่นของ scCO_2 0.7 g/ml พบว่า กระบวนการดังกล่าวสามารถลดต้นทุนจากกระบวนการล้างเดิมได้ประมาณ 0.18 บาทต่อชิ้นงาน ซึ่งคิดเป็นรายได้จากกระบวนการสามารถหาจุดคุ้มทุนได้จากรูปที่ ๓.3



รูปที่ ๓.3 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของกระบวนการล้างด้วย scCO_2 ที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C ความหนาแน่นของ scCO_2 0.7 g/ml

รูปที่ ๓.3 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเส้นรายรับและเส้นต้นทุนรวมของกระบวนการกับปริมาณชิ้นงานที่ผลิตได้ เมื่อวิเคราะห์จุดตัดของทั้งสองเส้นซึ่งแสดงถึงจุดคุ้มทุนของกระบวนการล้างมีค่าเท่ากับ 34,615,310 ชิ้น

๓.5 การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุน [21]

ระยะเวลาคืนทุน (payback period, n_p) เป็นการประมาณเวลาที่ผลรวมของกำไร เทียบเท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น (P) ซึ่งนิยามบอกในลักษณะจำนวนปี ซึ่งจากกระบวนการล้างด้วย scCO_2 เมื่อคิดว่าการลดต้นทุนจากกระบวนการล้างเดิมเป็นกำไรที่ได้จากกระบวนการ ซึ่งที่สภาวะการล้าง อุณหภูมิ 60 °C และความหนาแน่นของ scCO_2 0.7 g/ml มีต้นทุนต่ำสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 0.18 บาทต่อชิ้นงาน เมื่อพิจารณากระแสเงินสดสุทธิ (net cash flow, NCF) จากรูปที่ 5.3 มีค่าเท่ากันทุกช่วงเวลา และคิดระยะเวลาคืนทุนแบบไม่คิดดอกเบี้ย ($i=0\%$) สามารถหา ระยะเวลาคืนทุนได้ดัง สมการที่ ๓.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง
$$n_p = \frac{P}{NCF}$$
 และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ ๓.5 ใช้

เมื่อแทนค่าเงินลงทุนเริ่มต้นและกระแสเงินสดสุทธิรายปีสามารถหารระยะเวลาคืนทุนได้

ดังนี้

$$n_p = \frac{13,771,461}{2,094,958}$$

$$n_p = 6.57$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล ปิยวุฒิ มาศโค้ง

วันเดือนปีเกิด 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528

ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปีที่สำเร็จการศึกษา	ชื่อสถานศึกษา
วศ บ.สาขาวิศวกรรมเคมี	2551	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์ในการทำงาน

ฝึกงานที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในหน่วยวิศวกรรมพลาสติก ระยะเวลา
ฝึกงาน 2 เมษายน 2550 ถึง 31 พฤษภาคม 2550

รางวัล

การนำเสนอแบบโปสเตอร์ดีเด่นในงานสัมมนาวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่ง
ประเทศไทย ครั้งที่ 19, วันที่ 26-27 ตุลาคม 2552

ผลงานทางวิชาการ

1. P. Maskong, P. Buahom, P. Piyamanocha, W. Rungseesantivanon and S. Areerat "Effect of fiber surface treatment on mechanical properties of jute reinforced PU composite foams" *Proc. of Japan Society of Polymer Processing Annual Meeting, JSPP 2008, Tokyo, Japan, 2008.*
2. ปิยวุฒิ มาศโค้ง, ปิยพงศ์ บัวโฮม, พงศ์ประพาส ปิยมโนชา, วุฒิพงษ์ รังษีสันติวานนท์, และ สุรัตน์ อารีรัตน์ "การเตรียมคอมโพสิตของพอลิยูรีเทนผสมเส้นใยปอ" *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 25 ฉบับที่ 3 กันยายน 2551 หน้า 42-47.
3. ปิยวุฒิ มาศโค้ง และ สุรัตน์ อารีรัตน์ "การศึกษากระบวนการล้างชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต" *วิศวกรรมลาดกระบัง*, ปีที่ 26 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2551 หน้า 43-48.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้