

การชะละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว

นางสาว พรฤดี มั่งสมานกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

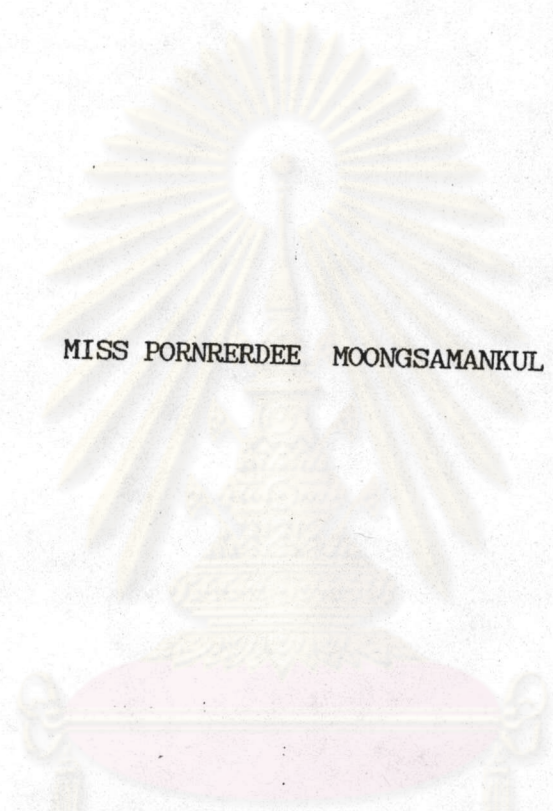
พ.ศ. 2535

ISBN 974-581-911-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

019222 117209068

LEACHING OF NATURAL RUBBER PELLETS BY LIQUID CARBON DIOXIDE



MISS PORNRERDEE MOONGSAMANKUL

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Chemical Technology

Graduate School

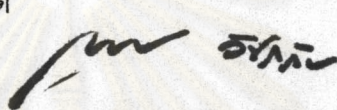
Chulalongkorn University

1992

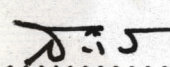
ISBN 974-581-911-5

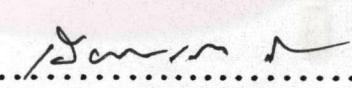
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การชะละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว
โดย นางสาวพรฤดี มุ่งสมานกุล
ภาควิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. เพ็ญพรพรค ทัศคร

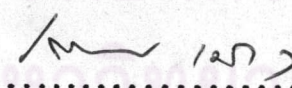
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

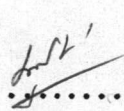

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรวิทย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ตำรงค์เลิศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.เพ็ญพรพรค ทัศคร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสิรวง เมฆสุต)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชูชาติ บารมี)



พรวฤดี มุ่งสมานกุล : การชะละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว
(LEACHING OF NATURAL RUBBER PELLETS BY LIQUID CARBON DIOXIDE)

อ.ที่ปรึกษา : ดร.เพ็ชรพรค ทัศนกร, 123 หน้า. ISBN 974-581-911-5

การชะละลายโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นเทคนิคการแยกสารแบบใหม่โดยใช้คุณสมบัติของตัวทำละลายที่สภาวะวิกฤต (73.8 บาร์, 31.06 องศาเซลเซียส) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำออกจากสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเป็นสารไม่มีขั้ว (non polar) มีการแพร่สูง ความหนืดต่ำทำให้สามารถแยกสารและเกิดการแยกวัฏภาคได้เร็วจึงได้นำเทคนิคนี้มาใช้ในการลดปริมาณของไนโตรเจนหรือโปรตีนในเนื้อยางให้น้อยลง โดยคาร์บอนไดออกไซด์เหลวจะเข้าไปเกาะที่กลุ่มโมเลกุลพอลิเมอร์ไอโซพรีน และไล่น้ำที่มีโปรตีนละลายอยู่ออกมา ทั้งยังช่วยปรับปรุงสีของยางให้ดีขึ้น ซึ่งทำให้คุณสมบัติของยางเป็นที่ต้องการในงานวิศวกรรมและอุตสาหกรรมมากขึ้น

จากการศึกษา พบว่า เมื่ออุณหภูมิและความดันสูงขึ้นสามารถลดปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยางลงได้มากขึ้น ยางที่ได้หลังการชะละลายจะมีสีเหลืองน้อยลง ขาวขึ้น และสภาวะที่เหมาะสมในการชะละลาย คือ ที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส และเวลาในการชะละลาย 30 นาที จะสามารถลดปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยางลงได้จาก 0.27 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 0.04 เปอร์เซ็นต์ และยางที่ได้จะมีระดับสีลดลงจากเดิม ผลจากการชะละลายโปรตีนออกจากเนื้อยางด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงได้ในรูปสมการ ดังนี้

$$\varepsilon = 1 - 0.95 (P_r/T_r) e^{-2\eta}$$

โดย ε คือสัดส่วนของโปรตีนที่ถูกชะออกมาต่อโปรตีนทั้งหมด และ η คือสัดส่วนของน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2535

ลายมือชื่อนิสิต *Dr. Jyeez.*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Samut*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

C325689 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : LEACHING/NATURAL RUBBER/LIQUID CARBON DIOXIDE

PORNREERDEE MOONGSAMANKUL : LEACHING OF NATURAL RUBBER PELLLETS BY LIQUID CARBON DIOXIDE. THESIS ADVISORS : PIENPAK TASAKORN, Ph.D., 123 pp., ISBN 974-581-911-5

Liquid carbon dioxide leaching is a new separation technique that exploits the solvent power at supercritical conditions (73.8 bar and 31.06°C). It is particularly effective for the isolation of substances of low molecular weight and relatively low polarity. Carbon dioxide has high diffusivity and low density, viscosity and polarity, thus allowing rapid leaching and phase separation. This technique is, therefore, employed to decrease protein content in natural rubber. It is achieved through the removal of protein surrounding isoprene polymer molecules by carbon dioxide molecules, and the protein leached out afterwards. The color of natural rubber pellets is also making it desirable for industrial usage.

From the study, it is observed that the nitrogen content and color index decreased with both temperature and pressure. The optimum condition for leaching is at 80 bar and 30 °C for 30 min. The nitrogen content of natural rubber pellets is decreased from 0.27 % to 0.048 %, and the color index of the natural rubber pellet is lower from the original. The ability in leaching out protein from natural rubber pellets by carbon dioxide can be represented by

$$\varepsilon = 1 - 0.95 (P_r/T_r) e^{-2.0 \eta}$$

where ε is the fraction of protein leached out and η is the weight ratio of carbon dioxide and rubber pellets.

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2535

ลายมือชื่อนิสิต *W. Apr.*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Pienpak Tasakorn*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทศคร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ที่ให้คำปรึกษา แนะนำตักเตือนและช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้ง
คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเลที่กรุณาให้ใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำ
วิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวก
สะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ การเบิกจ่ายเครื่องมือ สารเคมี ช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ ในการทำ
วิจัยครั้งนี้จนสามารถดำเนินการวิจัยได้ดีมาตลอด และขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ใน
ภาควิชาเคมีเทคนิค และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่เป็นกำลังใจให้การสนับสนุน ช่วยเหลือในการ
ทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

เนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอ
ขอบพระคุณทางบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจและให้คำแนะนำ ให้ความช่วย
เหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตารางประกอบ	ฅ
สารบัญรูปประกอบ	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์ และคำย่อ	ฅ
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วารสารปริทรรศน์	3
2.1 การสกัดสารด้วยก๊าซสภาวะวิกฤต	3
2.2 ความสามารถในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย	5
2.3 การสกัดสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ	7
2.4 ทฤษฎีการสกัดสารด้วยของไหลสภาวะวิกฤต	9
2.4.1 ขนาดของกลุ่มโมเลกุลในสารละลาย	9
2.4.2 การละลายของของแข็งในสารละลายเจือจาง	10
2.4.3 การวิเคราะห์การละลายโดยใช้ศักย์ทางเคมี	12
2.5 กระบวนการสกัดสารโดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ความดันสูง	15
2.6 ประโยชน์ของการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวทำละลาย	20
2.7 ยางธรรมชาติ	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.8 การจับตัวของน้ำยาง	30
2.9 โครงสร้างและ โมเลกุลของยางธรรมชาติ	31
2.9.1 โครงสร้างและ โมเลกุลของยางธรรมชาติ	31
2.9.2 น้ำหนักโมเลกุลและการกระจายน้ำหนักโมเลกุล	32
2.9.3 ขนาดโมเลกุลของยางธรรมชาติ	32
2.10 คุณสมบัติทั่วไปของยางธรรมชาติ	33
2.11 การพัฒนาการผลิตยาง โปรตีนต่ำ	38
2.12 การใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติ	40
2.13 งานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์	41
3. อุปกรณ์ และวิธีทดลอง	43
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	43
3.1.1 เครื่องมือการชะละลายเม็ดยางด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหลว ...	43
3.1.2 เครื่องทำยางเม็ด	44
3.2 สารเคมี และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	45
3.3 การดำเนินการวิจัย	54
3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำยางชั้น	54
3.3.2 การเตรียมยางเม็ด	56
3.3.3 การทดลองการชะละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์	56
3.3.4 การวิเคราะห์เม็ดยางธรรมชาติ	57

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	59
4.1 การเตรียมยางเม็ดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบ	59
4.2 สมมติฐานการชะละลายสารที่มีชี้ออกจากเม็ดยางธรรมชาติ ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์	60
4.2 การศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการลดปริมาณไนโตรเจน และการปรับปรุงสีของยาง	68
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ	86
เอกสารอ้างอิง	88
ภาคผนวก	95
ก. คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของคาร์บอนไดออกไซด์	96
ข. ข้อมูลทางด้านพาณิชย์ของยางประเภทต่าง ๆ	101
ค. ข้อมูลการทดลอง	110
ง. ตัวอย่างการคำนวณ	119
ประวัติผู้เขียน	123

สารบัญตารางประกอบ

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการสกัดโดยใช้ของไหลสภาวะวิกฤตชนิดต่าง ๆ ในงานอุตสาหกรรม	4
2.2 แสดงการละลายของสารประกอบต่าง ๆ ในคาร์บอนไดออกไซด์เหลว	6
2.3 แสดงการสกัดสารด้วยของไหลสภาวะวิกฤตในกระบวนการทางอุตสาหกรรม	17
2.4 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางสด	21
2.5 แสดงองค์ประกอบของน้ำยางชั้น	22
2.6 แสดงองค์ประกอบของเนื้อยางแห้ง	25
2.7 มาตรฐานยางแห้งของประเทศไทย	28
2.8 แสดงคุณสมบัติของยางธรรมชาติ	36
2.9 แสดงอิทธิพลของสารต่าง ๆ ต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ	37
2.10 การพัฒนาการผลิตยางที่มีปริมาณโปรตีนต่ำ	39
2.11 แสดงการใช้ประโยชน์ของยางธรรมชาติในประเทศไทย	40
4.1 แสดงข้อมูลการเทียบดัชนีสีของยาง	82
ก.1 แสดงค่าการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ	100
ข.1 ผลผลิตยางธรรมชาติของประเทศไทย พ.ศ. 2524-2534	101
ข.2 ปริมาณการใช้ยางเพื่ออุตสาหกรรมภายในประเทศ พ.ศ. 2528-2532	102
ข.3 ปริมาณยางส่งออกแยกประเภท พ.ศ. 2524-2534	103
ข.4 มูลค่ายางส่งออกแยกประเภท พ.ศ. 2524-2534	104
ข.5 ปริมาณยางสังเคราะห์นำเข้าจากประเทศผู้ส่งออก	105
ข.6 มูลค่ายางสังเคราะห์นำเข้า	106
ข.7 มูลค่าผลิตภัณฑ์ยางนำเข้า	107
ข.8 ปริมาณผลิตภัณฑ์ยางกึ่งสำเร็จรูปนำเข้า	108
ข.9 มูลค่าผลิตภัณฑ์ยางกึ่งสำเร็จรูปนำเข้า	109

สารบัญตารางประกอบ (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.1 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของน้ำยางชั้น	110
ค.2 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของน้ำยางชั้น	110
ค.3 แสดงข้อมูลการทดลองหาปริมาณไนโตรเจน	111
ค.4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนระหว่างการใช้เม็ดยาง และน้ำยางชั้นที่มี ปริมาณเนื้อยางแห้ง 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์เป็นวัตถุดิบในการชะละลายที่ความดัน 80 บาร์ และเวลา 30 นาที	113
ค.5 แสดงปริมาตรการคายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาตรรวมและอัตราการปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเม็ดยางธรรมชาติ	114
ค.6 แสดงผลการคำนวณข้อมูลต่าง ๆ ในการทดลอง	118

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปประกอบ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบของสารที่มีอยู่ในธรรมชาติ	8
2.2 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการกลั่นด้วยไอน้ำ	8
2.3 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายผสมของเอทานอลและน้ำ	8
2.4 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายผสมของเมธิลีนคลอไรด์	8
2.5 แสดงองค์ประกอบของสารที่ได้จากการสกัดด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์	8
2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการละลายกับความดัน	13
2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ความดันและความหนาแน่นของคาร์บอน ไดออกไซด์	16
2.8 แสดงความสัมพันธ์ของความดันลตทอน อุณหภูมิลตทอน และความหนาแน่นลตทอน ...	17
2.9 แสดงขั้นตอนการสกัดสารด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์ เหลว	19
2.10 แสดงกระบวนการผลิตน้ำยาล้างที่มีปริมาณเนื้อเยื่อแห้ง 60 เปอร์เซ็นต์	24
2.11 แสดงกระบวนการผลิตยางดิบในรูปยางแห้ง	26
2.12 แสดง โครงสร้าง โมเลกุลของยางธรรมชาติ	31
2.13 แสดงการกระจายน้ำหนัก โมเลกุลของยางธรรมชาติ	32
2.14 แสดงการกระจายขนาด โมเลกุลของยางธรรมชาติ	33
2.15 แสดงผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของยางธรรมชาติ	35
3.1 แสดงแผนผังการชะละลายเม็ดยางด้วยคาร์บอน ไดออกไซด์ เหลว	46
3.2 ถึงพักคาร์บอน ไดออกไซด์ เหลว	47
3.3 เครื่องสูบลมแรงดันสูง	47
3.4 เครื่องปฏิกรณ์เคมี	48
3.5 หน่วยทำความเย็น	48
3.6 แสดงแผนผัง เครื่องทำยางเม็ด	49
3.7 แสดง เครื่องทำยางเม็ด	50

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 เครื่องวัดความหนืดของของเหลว (Thomas-Stormer viscometer)	50
3.9 เครื่องวัดแรงตึงผิว (tensiometer)	51
3.10 เครื่องย่อยสาร Kjeldatherm digestion	51
3.11 เครื่องกลั่นไอน้ำ (Kjeldatherm distillation)	52
3.12 เครื่องวัดดัชนีสีของยาง (Lovibond)	52
4.1 แสดงการจับตัวของโมเลกุลของยาง ไอโซพรีนและสารอื่น ๆ	60
4.2 แสดงสมมติฐานการชะละลายเม็ดยางธรรมชาติด้วยคาร์บอนไดออกไซด์	61
4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่า $\ln(1-E)(T_r/P_r)$ และ η ในการหาสมการ เอ็กซ์โปเนนเชียล	65
4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณและผลการทดลอง	66
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยาง และเวลาในการชะละลายที่ อุณหภูมิ 18 องศาเซลเซียส ความดัน 40, 60 และ 80 บาร์	69
4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยาง และเวลาในการชะละลายที่ อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความดัน 40, 50, 60 และ 80 บาร์	69
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยาง และเวลาในการชะละลายที่ อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส ความดัน 40, 60 และ 80 บาร์	70
4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยาง และเวลาในการชะละลายที่ ความดัน 40 บาร์ อุณหภูมิ 18, 28 และ 38 องศาเซลเซียส	70
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยาง และเวลาในการชะละลายที่ ความดัน 60 บาร์ อุณหภูมิ 18, 28, 38 และ 48 องศาเซลเซียส	71
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจนในเนื้อยาง และเวลาในการชะละลายที่ ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 18, 28 และ 38 องศาเซลเซียส	71

สารบัญรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางและความดัน ที่ เวลาในการชะละลาย 30 นาที อุณหภูมิ 18, 28, 38 และ 48 องศาเซลเซียส .	76
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางและความดัน ที่ เวลาในการชะละลาย 60 นาที อุณหภูมิ 18, 28 และ 38 องศาเซลเซียส	76
4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยางและความดัน ที่ เวลาในการชะละลาย 120 นาที อุณหภูมิ 18, 28, 38 และ 48 องศาเซลเซียส	77
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง และเวลาในการ ชะละลายที่ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	77
4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการลดของปริมาณไนโตรเจนในเม็ดยาง และน้ำหนัก คาร์บอนไดออกไซด์ต่อน้ำหนักยาง	78
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการพองตัวของเบด และสัดส่วนเวลา (θ) ที่ ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส	80
4.17 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณไนโตรเจนภายหลังการชะละลายเมื่อใช้ (ก) ยางเม็ด และ (ข) น้ำยางชั้นที่มีปริมาณเนื้อยางแห้ง 30 และ 60 เปอร์เซ็นต์ เป็นวัตถุดิบที่ ความดัน 80 บาร์ อุณหภูมิ 38 และ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	85
ก.1 แผนผังวัฏภาคของคาร์บอนไดออกไซด์	96
ก.2 แสดงผลของความดันที่มีต่อความหนาแน่นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณวิกฤต	96
ก.3 แผนผัง Compressibility factor ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันต่ำ ...	97
ก.4 แผนผัง Compressibility factor ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันปานกลาง	97
ก.5 แผนผัง Compressibility factor ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีความดันสูง ...	97

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- ξ_c = ขนาดกลุ่ม (cluster size), ไม่มีหน่วย
 N = จำนวนโมเลกุล, ไม่มีหน่วย
 d^0 = ความหนาแน่นของตัวทำละลายในสารละลายที่เจือจาง, L^{-3}
 k = ค่าคงที่โบลท์ซแมน, $ML^2t^{-2}T^{-1}$
 K_T^0 = isothermal compressibility, Lt^2M^{-1}
 Y_1 = ความสามารถในการละลายของของแข็งในของไหลสภาวะวิกฤต
 E = Enhancement factor แสดงสัดส่วนระหว่างการละลายจริงต่อการละลายสัมบูรณ์, ไม่มีหน่วย
 P = ความดัน, $ML^{-1}t^{-2}$
 B_{12} = cross-virial coefficient แสดงแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย
 V = ปริมาตร, L^3
 T = อุณหภูมิ, T
 x = สัดส่วนโมล, ไม่มีหน่วย
 u = ศักย์ทางเคมี, ML^2t^{-2}
 R = ค่าคงที่ของก๊าซ
 $\langle \rangle$ = ค่าเฉลี่ยทางเทอร์โมไดนามิกส์
 $-$ = ปริมาตรโดยมวล, L^3M^{-1}
 σ = ค่าเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ย, ไม่มีหน่วย
 s = วัฏภาคของแข็ง
 g = วัฏภาคก๊าซ
 $1,2$ = ตัวถูกละลาย, ตัวทำละลาย
 c = สมบัติที่จุดวิกฤต
 ∞ = คุณสมบัติของตัวถูกละลายในสารละลายเจือจาง
 o = คุณสมบัติของตัวทำละลายในสารละลายเจือจาง