การพัฒนาเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 สำหรับปฏิกิริยา NO Reduction

นายสุทัศน์ ธุระพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายสุทัศน์ ธุระพันธ์
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 สำหรับปฏิกิริยา NO Reduction
สาขาวิชา : วิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร.ไพศาล คงคาฉุยฉาย
ปีการศึกษา : 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคือ ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 และ เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเริ่มจากสังเคราะห์ซีโอไลต์ K/SUZ-4 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้แลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลาย Fe(II) ที่ปริมาณเหล็ก 1 3 5 8 และ 10 wt.% ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน (conventional ion exchange) จากนั้นศึกษาปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซ NO โดยมีก๊าซ H_2 เป็นตัวรีดิวซ์ภายใต้สภาวะที่มีก๊าซ O_2 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) ที่อุณหภูมิ 100-400 °C พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5 %wt. Fe/SUZ-4 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัด NO ดีที่สุด ที่อุณหภูมิ 300 °C โดยให้ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ที่ 59 % ส่วนที่ 2 เป็นการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 บนตัวรองรับมัลไลต์ โดยใช้เทคนิคการปั่นเคลือบท่อมัลไลต์ในสารคอลลอยด์ของซีโอไลต์ 5 %wt. Fe/SUZ-4 ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซ NO ของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 เมมเบรน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเมมเบรน (membrane reactor) พบว่าให้ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ เฉลี่ยที่ 18 % เมื่อพัฒนาใช้เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสมโดยการบรรจุผงซีโอไลต์ 5 %wt. Fe/SUZ-4 ร่วมกับเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 พบว่าให้ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ที่สูงขึ้น เฉลี่ยที่ 65.5 %

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 103 หน้า)

คำสำคัญ : ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4, เมมเบรนซีโอไลต์, รีดักชันไนตริกออกไซด์, เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง, เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน

_____อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Suthat Turapan
Thesis Title : Development of Fe/SUZ-4 Zeolite Membrane for NO Reduction
Major Field : Chemical Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Patcharin Worathanakul, D.Eng
Co-Advisor : Associate Professor Paisan Kongkachuichay, Ph.D.
Academic Year : 2011

Abstract

The objective of this work was to study the removal of nitric oxide by Fe/SUZ-4 zeolite powder and Fe/SUZ-4 zeolite membrane. There are 2 parts of experiments. In the first part, the K/SUZ-4 zeolite was synthesized via hydrothermal process. Different amounts of Fe(II) were loaded in the synthesized K/SUZ-4 with different weight percentages: 1, 3, 5, 8 and 10 by conventional ion exchange method. The reduction of NO by H_2 in excess oxygen was studied with fixed bed reactor at temperature in the range of 100-400 °C. 5 wt.% Fe/SUZ-4 exhibit high activity for NO reduction and NO conversion of 59 % can be achieved at 300 °C. The second part was synthesis of Fe/SUZ-4 zeolite membrane on mullite tube supporter with 5 wt.% Fe/SUZ-4 colloidal solution using spin coating. The reduction of NO was performed in membrane reactor at 300 °C and NO conversion was 18 %. Development of Fe/SUZ-4 zeolite membrane with packing 5 wt.% Fe/SUZ-4 powder has been achieved high activity of NO conversion with 65.5 %

(Total 103 pages)

Keywords : Fe/SUZ-4 zeolite, zeolite membrane, NO reduction, fixed bed reactor, catalytic membrane reactor

_____ Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงต่อ ผศ.ดร.พัชรินทร์ วรธนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ รศ.ดร.ไพศาล คงคาฉุยฉาย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ปัญหาต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชนาธิป สามารถ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้กรุณาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.กำชัย นุ้ยธิติกุล อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการตรวจแก้และสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณโครงการทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้สัญญาทุนเลขที่ ภค/2554-พท. 18 และศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติภาย ใต้สัญญาทุนเลขที่ P-11-00980 ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณศูนย์วัสดุเชิงนิเวศน์และเทคโนโลยีสะอาด สำนักวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบัณฑิตวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย

สุดท้ายนี้ขอบพระคุณครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่ต้นจนถึงปัจจุบัน ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องทุกคนที่ให้การช่วยเหลือที่ดีตลอดมาไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สุทัศน์ ธุระพันธ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ซีโอไลต์	5
2.2 ซีโอไลต์ SUZ-4	9
2.3 เมมเบรนซีโอไลต์	13
2.4 ออกไซด์ของไนโตรเจน	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	31
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ K/SUZ-4 และ Fe/SUZ-4	31
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ K/SUZ-4 และ Fe/SUZ-4	31
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	33
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	33
3.5 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด NO	34
3.6 เครื่องมือวิเคราะห์	36
3.7 ขั้นตอนการทดลอง	41
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	49
4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ K/SUZ-4	49
4.2 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	50
4.3 ผลการสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	59

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) 62

4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดก๊าซไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วยเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน (Catalytic Membrane Reactor, CMR) 74

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 81

5.1 สรุปผลการทดลอง 81

5.2 ข้อเสนอแนะ 82

บรรณานุกรม 83

ภาคผนวก ก 89

การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด SUZ-4 90

ภาคผนวก ข 93

องค์ประกอบธาตุของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 94

ภาคผนวก ค 97

การคำนวณค่า GHSV (Gas Hourly Space Velocity) 98

ภาคผนวก ง 99

แบบเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน 100

ประวัติผู้วิจัย 103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ขนาดเชิงจลนศาสตร์ของโมเลกุลก๊าซ	16
2-2	เมมเบรนซีโอไลต์สำหรับกระบวนการแยกก๊าซ	20
2-3	ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา สารที่ใช้ในการรีดิวซ์และสภาวะที่ใช้ในการกำจัด NO_x	28
3-1	สภาวะที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด NO เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	45
3-2	สภาวะที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัด NO เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน	47
4-1	เปรียบเทียบปริมาณธาตุในสารละลายก่อนและหลังการแลกเปลี่ยนไอออน	50
4-2	ปริมาณองค์ประกอบของธาตุในซีโอไลต์ SUZ-4 และ Fe/SUZ-4	54
4-3	พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดของรูพรุนของ Fe/SUZ-4	56
4-4	ปริมาณของซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 ที่ยึดเกาะบนตัวรองรับมัลไลต์และชั้นความหนาของเมมเบรน	61
4-5	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาหาอุณหภูมิในการ pretreat ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4	63
4-6	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4	64
4-7	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	73
4-8	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	74
4-9	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม	76
4-10	สภาวะที่ใช้ในการศึกษาผลของค่า Space velocity ต่อประสิทธิภาพในการกำจัด NO ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม	77
ก-1	สูตรโมเลกุล ความบริสุทธิ์ และน้ำหนักโมเลกุลของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด SUZ-4	90
ข-1	องค์ประกอบธาตุของซีโอไลต์ 1 wt.% Fe/SUZ-4	94
ข-2	องค์ประกอบธาตุของซีโอไลต์ 3 wt.% Fe/SUZ-4	94
ข-3	องค์ประกอบธาตุของซีโอไลต์ 5 wt.% Fe/SUZ-4	95
ข-4	องค์ประกอบธาตุของซีโอไลต์ 8 wt.% Fe/SUZ-4	95

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข-5	องค์ประกอบธาตุของซีโอไลต์ 10 wt.% Fe/SUZ-4	96

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ของซีโอไลต์	5
2-2	ตำแหน่งของ charge balancing cation ที่อยู่ใน Negative Framework Charge	6
2-3	หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์	7
2-4	รูพรุนของวงแหวนของซีโอไลต์ SUZ-4	10
2-5	โครงสร้างของซีโอไลต์ SUZ-4	11
2-6	หลักการของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (Membrane process)	14
2-7	กลไกที่เป็นไปได้สำหรับกระบวนการแยกก๊าซด้วยเมมเบรน	15
2-8	กระบวนการเตรียมซีโอไลต์เมมเบรน	17
3-1	เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล พร้อมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ และความเร็วรอบ	32
3-2	ชุดกวนระบบปิด พร้อมระบบป้อนก๊าซที่ใช้ในการทดลอง	32
3-3	ท่อมัลไลต์ที่ใช้ในการทดลองขนาดความยาว 40 mm.	33
3-4	ชุดอุปกรณ์ปั่นเคลือบ (Spin dip coating) ที่สร้างขึ้นเพื่อสังเคราะห์เมมเบรนซีโอไลต์	34
3-5	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ใช้ในการทดลอง	35
3-6	เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนที่ใช้ในการทดลอง	35
3-7	ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นสำหรับทดสอบปฏิกิริยากำจัด NO	36
3-8	เครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุในสารละลาย (AAS)	36
3-9	เครื่องวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (TGA)	37
3-10	เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)	38
3-11	เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (XRF)	38
3-12	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ (SEM/EDS)	39
3-13	เครื่องวิเคราะห์พื้นผิวและปริมาตรรูพรุน (BET)	40
3-14	เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (FTIR)	40
3-15	เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซ NO ที่ใช้ในการทดลอง	41
3-16	การปั่นเคลือบท่อมัลไลต์ในสารคอลลอยด์ของซีโอไลต์ 5 %wt. Fe/SUZ-4	43
3-17	แผนภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-18	แผนภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน (Catalytic Membrane Reactor)	46
3-19	แผนภาพอุปกรณ์ทดสอบปฏิกิริยาในการกำจัด NO	46
4-1	XRD pattern ของซีโอไลต์ K/SUZ-4 ที่สังเคราะห์ได้	49
4-2	ปริมาณความเข้มข้นของโพแทสเซียมและ Fe exchange ในสารละลาย	51
4-3	ผลการวิเคราะห์ของ 10 wt.% Fe/SUZ-4 ด้วยเครื่อง TGA	52
4-4	XRD pattern ของ ซีโอไลต์ K/SUZ-4 และ 10 wt.% Fe/SUZ-4	53
4-5	FTIR-spectra ของ K/SUZ-4 และ Fe/SUZ-4	55
4-6	การกระจายตัวของรูพรุน ของ K/SUZ-4 และ Fe/SUZ-4	57
4-7	ภาพ SEM รูปร่างผลึกของซีโอไลต์ K/SUZ-4 และ Fe/SUZ-4	58
4-8	ค่า Zeta potential ของซีโอไลต์ SUZ-4 และตัวรองรับมัลไลต์	59
4-9	ค่า Zeta potential ของสารละลายพอลีเอมีน	60
4-10	ภาพ SEM ตัดขวางและผิวด้านบนของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	61
4-11	ผลของอุณหภูมิในการ pretreated ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์	63
4-12	ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 1 wt.% Fe/SUZ-4	65
4-13	ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 wt.% Fe/SUZ-4	65
4-14	ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt.% Fe/SUZ-4	66
4-15	ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 8 wt.% Fe/SUZ-4	66
4-16	ผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10 wt.% Fe/SUZ-4	67
4-17	FTIR-spectra ของ 5 wt.% Fe/SUZ-4 ที่ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ	68

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-18	ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 100 °C	69
4-19	ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 200 °C	69
4-20	ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 300 °C	70
4-21	ผลของ Fe loading ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 ที่อุณหภูมิทำปฏิกิริยาที่ 400 °C	70
4-22	FTIR-spectra ของ Fe/SUZ-4ผ่านการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 ºC	71
4-23	ค่าการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/SUZ-4 เทียบกับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	72
4-24	ผลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 wt. % Fe/SUZ-4	73
4-25	ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4	75
4-26	ค่าเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของเมมเบรนซีโอไลต์ Fe/SUZ-4 แบบผสม	76
4-27	อิทธิพลของค่า space velocity ต่อการเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของเมมเบรนซีโอไลต์ 5 wt.% Fe/SUZ-4 แบบผสม	78
4-28	การเปลี่ยนแปลงไนตริกออกไซด์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง เครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนและเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรนแบบผสม	79
ง-1	ภาพอุปกรณ์ด้านก๊าซเข้า	100
ง-2	ภาพตัดขวางอุปกรณ์ด้านก๊าซเข้า	100
ง-3	ภาพอุปกรณ์ด้านก๊าซออก	101
ง-4	ภาพตัดขวางอุปกรณ์ด้านก๊าซออก	101
ง-5	ภาพตัดขวางการประกอบเครื่องปฏิกรณ์เมมเบรน	102