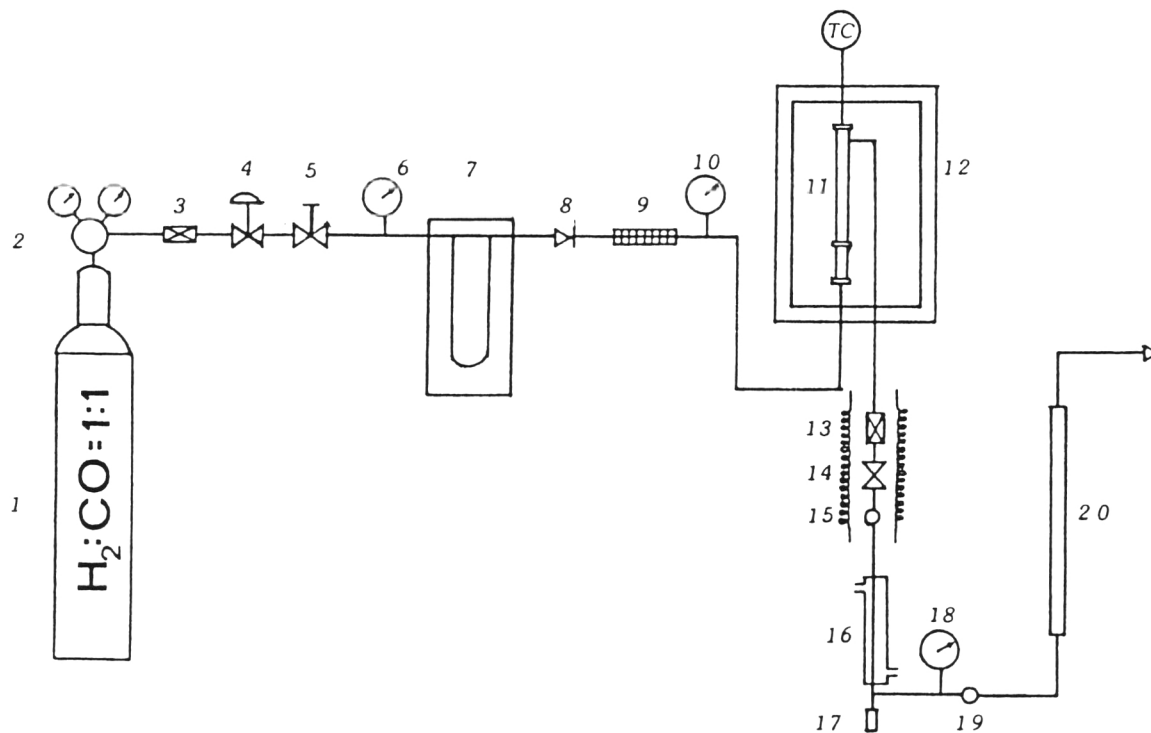


บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 เครื่องมือทดลอง

เครื่องมือทดลองประกอบด้วยสี่ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ถังก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์กับก๊าซไฮโดรเจน ในอัตราส่วน 1:1 , ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซขาเข้า , ส่วนเตาปฏิกรณ์เคมี , และส่วนควบคุมการไหลของก๊าซขาออกและการเก็บตัวอย่างก๊าซผลิตภัณฑ์ ดังแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 4.1 ก๊าซที่ออกจากถังจะผ่านเครื่องควบคุมความดัน (pressure regulator) แล้วผ่านทางท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว เข้าสู่ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซขาเข้า ซึ่งประกอบด้วยตัวกรองฝุ่น (dust filter) , วาล์วเข็ม (needle valve) , วาล์วละเอียด (fine metering valve) , เกจวัดความดัน (pressure gauge) เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ (manometer) , วาล์วกั้นก๊าซไหลกลับ (check valve) และตัวจับความชื้นและมลทินในก๊าซ ตามลำดับ ก๊าซจะไหลผ่านเข้าสู่ส่วนเตาปฏิกรณ์เคมี โดยผ่านเกจวัดความดันและเข้าสู่เตาปฏิกรณ์เคมีทางด้านล่าง เตาปฏิกรณ์เคมีจะอยู่ในเตาอบที่ควบคุมอุณหภูมิได้ ภายในเตาอบก่อนถึงเตาปฏิกรณ์เคมีจะเป็นท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเตาปฏิกรณ์เคมีภายในบรรจุทราย เพื่อช่วยให้การไหลของก๊าซสม่ำเสมอตลอดพื้นที่ผิวหน้าตัดขวางของท่อ และช่วยให้ก๊าซร้อนขึ้นก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์เคมี ด้านบนของเตาปฏิกรณ์เคมีมีท่อปลายปิดสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เพื่อรายงานอุณหภูมิของเบดขณะทำการทดลองผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะอยู่ในรูปของก๊าซ ไหลออกทางด้านบนของเตาปฏิกรณ์เคมี ผ่านท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ออกทางด้านล่างของเตาอบ เข้าสู่ส่วนควบคุมการไหลของก๊าซขาออกและการเก็บตัวอย่างก๊าซผลิตภัณฑ์ โดยผ่านตัวกรองก๊าซ , วาล์วไมโคร (micro metering valve) (เพื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซในเตาปฏิกรณ์เคมีและลดความดันของก๊าซขาออกให้เท่ากับความดันบรรยากาศ) และ จุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อน ทั้งสามตัวนี้จะถูกพันด้วยลวดความร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิของก๊าซให้สูงประมาณ 180⁰ซ ก่อนนำไปวิเคราะห์ขณะร้อน หลังจากนั้นก๊าซจะถูกทำให้เย็นตัวลง



- 1 = ถังก๊าซผสม $H_2:CO = 1:1$
 2 = เครื่องควบคุมความดัน
 3,13 = ตัวกรองฝุ่น
 4 = วาล์ว เข็ม
 5 = วาล์วละเอียด
 6,10,18 = เกจวัดความดัน
 7 = เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ
 มาโนมิเตอร์
 8 = วาล์วกักเก็บก๊าซไหลกลับ
 9 = ตัวจับความชื้นและมลทิน
 11 = เตาปฏิกรณ์เคมี
 12 = เตาอบ
 14 = วาล์วไมโคร
 15 = จุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อน
 16 = เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
 17 = ที่เก็บผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว
 19 = จุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็น
 20 = เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ
 TC = เทอร์โมคัปเปิล

รูปที่ 4.1 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

โดยผ่าน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ด้านล่างของ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีที่เก็บผลิตภัณฑ์ ที่เป็นของเหลว ก๊าซขาออกขณะนั้นจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ผ่าน เกจวัดความดัน , จุดเก็บ ตัวอย่างก๊าซเย็น และ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ (bubble flow meter) ก่อน จะปล่อยทิ้งไป

4.1.1 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์

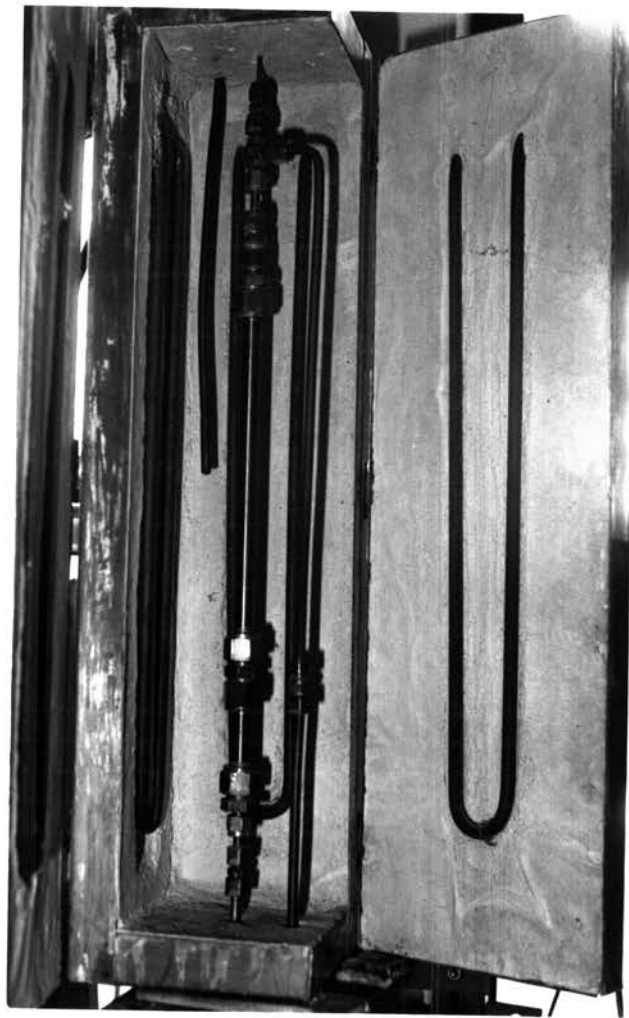
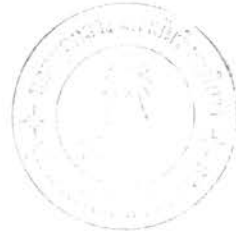
เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ทำด้วยแก้วรูปตัวยู (U) ภายในบรรจุปรอท หล่อทับหลอดแก้วด้วยเรซิน เพื่อให้สามารถทนความดันสูงๆ ได้ ด้านหลังมีขีดบอกความสูงของ ปรอท เมื่อก๊าซไหลผ่านท่อที่บรรจุทรายไว้ภายใน จะเกิดความดันลดความแตกต่างของระดับความ สูงของปรอท จะสามารถบอกอัตราการไหลของก๊าซได้

4.1.2 เตาอบ

เตาอบที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ประกอบขึ้นเอง มีลักษณะ เป็นกล่องสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีขนาด 18 x 18 x 60 ซม. ด้านนอกทำด้วยแผ่นสแตนเลส ด้านในหล่อด้วยซีเมนต์ทนไฟหนา 3 ซม. ด้านทั้งสี่ของเตาอบติดหลอดทำความร้อนขนาด 750 วัตต์ จำนวน 4 เส้น ซึ่งจะมีกำลังไฟรวมทั้งหมด 3,000 วัตต์ เตาอบจะมีประตูเปิดได้ทั้งสองทาง เพื่อความสะดวกในการติดตั้งเตาปฏิกรณ์เคมี ด้านบนของเตาอบมีท่อปลายปิดสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเตา ผ่านเครื่อง ควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) และ ตัวตัดและจ่ายไฟแบบแม่เหล็ก (mag- netic contactor) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นรูปถ่ายด้านในของเตาอบ พร้อมทั้งเตาปฏิกรณ์ เคมี

4.1.3 เตาปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รี

เตาปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รีทำด้วยท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.27 ซม. และเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.94 ซม. ยาว 25 ซม. (รูปที่ 4.2) มีพื้นที่หน้าตัดภายใน 0.694 ตารางเซนติเมตร ด้านล่างตรงทางเข้าเตาปฏิกรณ์เคมีติดตะแกรงสแตนเลสขนาด 400 เมช เพื่อทำหน้าที่กระจายก๊าซและกั้นไม่ให้ไขและตัวเร่งปฏิกิริยาไหลลงด้านล่าง ด้านล่างของ เตาได้ติดตะแกรงสแตนเลส เป็นท่อสแตนเลสขนาดเดียวกับเตาปฏิกรณ์เคมียาว 7 ซม. ภายในบรรจุ ทราย เพื่อ ช่วยให้ก๊าซขาเข้ามีการไหลที่สม่ำเสมอ ตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อและมีอุณหภูมิสูงขึ้น ก่อน เข้าสู่เตาปฏิกรณ์เคมี ท่อทั้งสองต่อ เข้ากันด้วยข้อต่อสแตนเลส ด้านบนของเตาปฏิกรณ์เคมี



รูปที่ 4.2 ภาพลักษณะภายในของเตาอบ ที่มีเตาปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอรัรีติดตั้ง
อยู่ภายใน

เป็นข้อต่อสแตนเลสสามทาง มีท่อปลายปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1/8$ นิ้ว เสียบบ่อยภายในเตาปฏิกรณ์เคมี สูงจากตะแกรงสแตนเลส 1 ซม. ไว้สำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล เพื่ออ่านอุณหภูมิของเบคขณะทำการทดลอง ก๊าซขาออกจะไหลผ่านท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1/4$ นิ้ว ออกทางด้านล่างของเตาอบ

4.1.4 จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ

จุดเก็บตัวอย่างก๊าซมี 2 แห่ง คือ จุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อนและจุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็น ท่อที่ออกจากเตาอบ , ตัวกรองก๊าซ , วาล์วไมโคร และจุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อน จะถูกพันด้วยลวดความร้อน เพื่อรักษาอุณหภูมิของก๊าซให้อยู่ระหว่าง $180-190^{\circ}\text{C}$ ซึ่งควบคุมด้วยเครื่องปรับความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage regulator) วาล์วไมโครนอกจากจะช่วยปรับอัตราการไหลของก๊าซในเตาปฏิกรณ์เคมีแล้ว ยังช่วยลดความดันของก๊าซขาออกให้เท่ากับความดันบรรยากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ทำการทดลองขณะเก็บตัวอย่างก๊าซ

จุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อน ทำด้วยข้อต่อสี่ทาง ด้านบนและล่างต่อเข้ากับท่อก๊าซ ด้านข้างด้านหนึ่งต่อกับท่อปลายปิดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1/8$ นิ้ว ยาว 6 นิ้ว ไว้สำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล ส่วนอีกด้านหนึ่ง ติดแผ่นเซ็ปตัม (septum) ซึ่งจะทำหน้าที่กั้นก๊าซไม่ให้รั่วออกมาขณะใช้เข็มเก็บก๊าซ ตัวอย่าง

จุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็น จะเป็นท่ออย่างหนา ต่อกับท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1/4$ นิ้ว ที่ออกมาจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ท่ออย่างจะมีลักษณะพิเศษเหมือน เซ็ปตัม คือ เมื่อดึง เข็มเก็บก๊าซตัวอย่างออกมาแล้ว รูที่เกิดจากการเก็บตัวอย่างก๊าซจะปิดสนิทไม่เกิดการรั่วของก๊าซ

4.1.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้เป็นแบบท่อสองชั้น (double-pipe heat exchanger) โดยท่อชั้นนอกเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $3/4$ นิ้ว สำหรับให้น้ำเย็นผ่าน และท่อชั้นในเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง $1/8$ นิ้ว สำหรับให้ก๊าซร้อนผ่าน ท่อทั้งสองยาว 35 ซม. ด้านล่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะต่อด้วยข้อต่อสามทาง ด้านล่างสุดปะติดด้วยขวดแก้วกันแดด สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ที่กลั่นตัวเป็นของเหลว ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำ และไฮโดรคาร์บอนหนัก

4.1.6 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซทำจากบิวเรตต์ (burette) เนื่องจากมีขีดบอกปริมาตรที่แน่นอน นำมาต่อเข้ากับแก้วสามทางรูปตัววาย (Y) ด้านหนึ่งคือ เข้ากับบิวเรตต์ อีกด้านหนึ่งต่อกับท่อก๊าซขาออก และด้านสุดท้ายต่อกับลูกยางที่มีแชมพูบรรจุอยู่ภายใน เมื่อบีบลูกยางก๊าซจะไหลผ่านชั้นของแชมพู เกิดเป็นฟิล์มของแชมพูไหลเข้าสู่บิวเรตต์ จับเวลาของฟิล์มตามปริมาตรที่กำหนด ก็จะทราบอัตราการไหลของก๊าซขาออก

4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กหลอม ของบริษัทไอซีไอ (Imperial Chemical Industries Lim.) ชนิด ICI 35-4 ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับสารสังเคราะห์แอมโมเนีย มีคุณสมบัติดังนี้

ความหนาแน่น (He)	4.9×10^3	กก.ม ⁻³
(Hg)	4.5×10^3	กก.ม ⁻³
ปริมาตรรูพรุน (pore volume)	2×10^{-5}	ม ³ .กก. ⁻¹
องค์ประกอบทางเคมี		
K ₂ O	0.8	%
CaO	2.0	%
MgO	0.3	%
Al ₂ O ₃	2.5	%
SiO ₂	0.4	%
TiO ₂	Trace	
ZrO ₂		
V ₂ O ₅		

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะนำมาบดให้ละเอียดและร่วมนำผ่านตะแกรงขนาด 250 เมช ซึ่งจะมีความอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า 61 ไมครอน

น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 1.1490 กรัม

4.3 ตัวกลางของเหลว (Liquid medium)

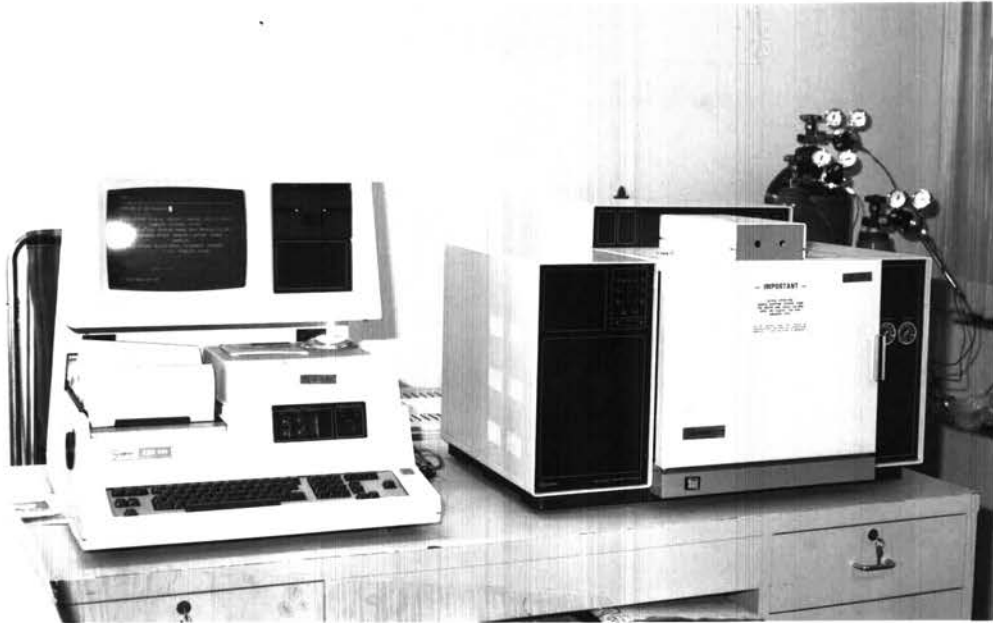
ตัวกลางของเหลวที่ใช้ในการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาในขณะทดลอง เป็นชนิดไฮโพลี-เอธิลีน (Polyethylene wax) ของบริษัทอัลลายเคมิคอล จำกัด (Allied Chemical Co.) มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาวของโพลีเมอร์เชิงเดี่ยว (Homopolymers) มีคุณสมบัติดังนี้

จุดหลอมตัว (Softening point) (ASTM E-28)	106	$^{\circ}\text{C}$ (222 $^{\circ}\text{F}$)
ค่าความแข็ง (Hardness) (ASTM D-5)	3.5	เคซีมิลลิเมตร
ความหนาแน่น (ASTM D-1505)	0.92	กรัม/ซม. ³
ความหนืด (Viscosity) ที่ 140 $^{\circ}\text{C}$	200	เซ็นติพอยส์ (cps)
น้ำหนักของไฮโพลีเอธิลีนที่ใช้	3.0704	กรัม
ปริมาตรของเบคหรือของไฮโพลีเอธิลีน เท่ากับ	2.82	ลบ.ซม.
ความสูงของเบค	4.06	ซม.

4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์

การวิเคราะห์ก๊าซขาเข้าและก๊าซผลิตภัณฑ์ จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี (Gas Chromatography) โดยเก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซทั้งสองจุด การเก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อน จะใช้เข็มเก็บก๊าซที่พันด้วยฉนวนกันความร้อน และอบให้เข็มมีอุณหภูมิประมาณ 180 $^{\circ}\text{C}$ ขณะเก็บก๊าซตัวอย่างที่ร้อนทั้ง เข็มและก๊าซจะมีอุณหภูมิเดียวกันคือประมาณ 180 $^{\circ}\text{C}$ นำก๊าซที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี VARIAN รุ่น VISTA 4600 ที่มีตัวตรวจแบบ FID ข้อมูลจากเครื่อง VISTA 4600 จะส่งเข้าคำนวณผลและพิมพ์ในส่วนประมวลผล VISTA 401 (รูปที่ 4.3) เครื่องนี้จะวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ ฉนวนกันความร้อนที่พันเข็มไว้จะช่วยรักษาอุณหภูมิของก๊าซตัวอย่างไว้ได้นานพอที่จะนำไปวิเคราะห์โดยไม่เกิดการกลั่นตัวของไฮโดรคาร์บอนหนัก ซึ่งการวิเคราะห์จะต้องกระทำอย่างรวดเร็ว

การเก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็น จะสามารถใช้เข็มเก็บตัวอย่างแบบธรรมดาได้ เนื่องจากอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ก๊าซตัวอย่างที่เก็บครั้งแรกจะนำไปวิเคราะห์ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์, ก๊าซไฮโดรเจน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เป็นต้น ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี GOW MAC รุ่น Series 150 ที่มีตัวตรวจแบบ TCD (รูปที่ 4.4)



รูปที่ 4.3 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี VARIAN VISTA 4600 และ VISTA 401



รูปที่ 4.4 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี GOW MAC รุ่น Series 150

และก๊าซตัวอย่างที่เก็บครั้งที่สอง จะนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ GOW MAC รุ่น Series 750 ที่มีตัวตรวจแบบ FID (รูปที่ 4.5) เพื่อวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนก๊าซสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สภาวะการวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่

	VISTA 4600	เครื่อง GOW MAC Series 150		เครื่อง GOW MAC Series 750
		ค้ำน A	ค้ำน B	
สารตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้	ไฮโดรคาร์บอนหนัก	CO, H ₂	CO ₂ , H ₂ O	ก๊าซไฮโดรคาร์บอน
ชนิดของตัวตรวจ(Detector)	FID ⁽¹⁾	TCD ⁽²⁾	TCD	FID
ชนิดของคอลัมน์	3% OV-1 on Chromosorb WHP (80/100)	MS 5A (80/100)	Porapak Q (80/100)	20% DC-200 on Chromosorb-P (80/100)
ขนาดและความยาวของคอลัมน์	1/8" x 1.8 m(SS)	1/8" x 3m SS)	1/8" x 3m(SS)	1/8" x 1.1 m(SS)
ชนิดของก๊าซพา(Carrier gas)	N ₂	Ar	Ar	N ₂
อัตราการไหลของก๊าซพา(ซม. ³ /นาที)	30	30	30	30
ขนาดของสารตัวอย่าง(ซม. ³)	1	1	1	1
อุณหภูมิตัวฉีด(Injector) (°ซ)	80-300	60	60	50
อุณหภูมิตัวตรวจ(°ซ)	300	80	80	110
กระแสไฟฟ้าสำหรับ TCD (มิลลิแอมป์)	-	80	80	-

(1) TCD = Thermal conductivity detector

(2) FID = Flame ionization detector



รูปที่ 4.5 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ GOW MAC รุ่น Series 750

4.5 สภาวะการทดลอง

จากการศึกษาค้นเอกสารของการทดลองการสังเคราะห์แบบพิสเซอร์-โทรป ในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รี ดังแสดงในตารางที่ 3.9 และ 3.10 ส่วนใหญ่จะกระทำที่อุณหภูมิ 200-300⁰ซ , ความดันตั้งแต่ 10-20 บรรยากาศ , ความเร็วเชิงสเปซ 100-500 ปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน/(ปริมาตรสเลอร์รี) (ชม.) , ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 10-200 กรัมตัวเร่งปฏิกิริยา/ลิตรสเลอร์รี , อัตราส่วนของ H₂:CO ในก๊าซสังเคราะห์ = 0.6-2.0 , ปริมาตรของเตาปฏิกรณ์เคมี 1-1,000 ลิตร และ การศึกษาทั้งหมดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก

ดังนั้นการทดลองนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความดัน และ ความเร็วเชิงสเปซ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปและการกระจายผลิตภัณฑ์ ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กหลอมที่มีขนาดเล็กกว่า 61 ไมครอน และมีรจวมเข้มข้นในสเลอร์รี 27.23% น้ำหนัก ปริมาตรของสเลอร์รี 2.82 ลบ.ชม. และใช้ก๊าซผสมระหว่าง H₂ กับ CO ในอัตราส่วน 1:1 โดยเลือกศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ 220 , 250 และ 280⁰ซ ตามลำดับ ที่ความดัน 10 บรรยากาศและความเร็วเชิงสเปซ 300 ชม.⁻¹ , ศึกษาอิทธิพลของความเร็วเชิงสเปซ 200 , 300 และ 400 ชม.⁻¹

โดยประมาณ ที่อุณหภูมิ 220°C และความดัน 10 บรรยากาศ และศึกษาอิทธิพลของความดันที่ 10 และ 20 บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 220°C และความเร็วเชิงสเปซ 400 ชม^{-1} ส่วนการทดสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาจะกระทำไปพร้อมกับการทดลอง โดยทดสอบเมื่อเริ่มการทดลองที่ อุณหภูมิ 250°C ความดัน 10 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 300 ชม^{-1} และกลับมาทดสอบที่สภาวะเดิมอีกครั้งเมื่อเลิกการทดลอง

4.6 การทดสอบลักษณะของสเลอรรี่

เนื่องจากลักษณะของสเลอรรี่ในเตาปฏิกรณ์เคมี จะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัว คือ ความเร็วของก๊าซขาเข้า และ ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์เคมี นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความสูงของชั้นสเลอรรี่, ชนิดของตัวกระจายก๊าซ, ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา และ ลักษณะทางฟิสิกส์และเคมี ของตัวกลางของเหลวที่ใช้ ผู้ทดลองได้สร้างแบบจำลองการทดสอบลักษณะของสเลอรรี่ขึ้น โดยใช้หลอดแก้วบิวเรตต์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. มีพื้นที่หน้าตัดภายใน 0.7854 ซม. สูง 20 ซม. นำมาตัดปลายและฝนให้เรียบ ติดตะแกรงสแตนเลสขนาด 400 เมช ไว้ด้านล่าง ด้วยยางซิลิโคน และต่อเข้ากับวาล์วละเอียด เพื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซ หลอดแก้วบิวเรตต์จะต่อเข้ากับเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซแบบฟองก๊าซ ดังรูปที่ 4.6 ก๊าซที่ใช้ทดสอบ เป็นก๊าซสังเคราะห์ $\text{H}_2:\text{CO} = 1$ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กทลอมบดละเอียด ผ่านตะแกรง 250 เมช หนัก 1.3069 กรัม และโซโพลีเอธิลีนคองหนัก 3.8585 กรัม ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาในสเลอรรี่ 25.30% น้ำหนัก ปริมาตรของสเลอรรี่ 3.5 ลบ.ซม. ความสูงของชั้นสเลอรรี่ 4.5 ซม.

การทดสอบจะเริ่มโดยการผสมผงตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กกับผงโซโพลีเอธิลีน กวนให้เข้ากัน แล้วใส่ในหลอดแก้วบิวเรตต์ จากนั้นเริ่มปล่อยก๊าซเข้า พร้อมกับรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับหลอดความร้อน จนกระทั่งโซผสมตัวเร่งปฏิกิริยาละลาย เริ่มปรับวาล์วละเอียดให้มีอัตราการไหลของก๊าซจากน้อยที่สุดไปจนถึงมากที่สุด คือตั้งแต่ความเร็วของก๊าซขาออก 4.17 ลบ.ซม./นาท ไปจนถึง 18.75 ลบ.ซม./นาท หรือคำนวณเป็นความเร็วเชิงสเปซได้ 64 และ 290 ปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน/(ปริมาตรสเลอรรี่)(ซม.) ตามลำดับ ปรากฏว่าการกระจายตัวของผงตัวเร่งปฏิกิริยาในโซโพลีเอธิลีน เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ เป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีการตกตะกอนของตัวเร่งปฏิกิริยาให้เห็นแม้ว่าจะหยุดการไหลของก๊าซ



รูปที่ 4.6 แบบจำลองการทดสอบลักษณะของสเลอว์รี

ในการทดลองจริง จะเลือกทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซมากกว่าที่ทดสอบประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ คือที่ความเร็วเชิงสเปซ 200 , 300 และ 400 ชม⁻¹ ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่า เมื่อทดลองที่ความดันสูง ความเร็วของก๊าซที่ผ่านชั้นสเลอรรี่ จะมีความเร็วพอที่จะกระจายผงตัวเร่งปฏิกิริยาในสเลอรรี่อย่าง เป็นเอกพันธ์ นอกจากนี้ทำให้มั่นใจได้ว่า เมื่อใช้ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากัน ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาและปริมาณของสเลอรรี่ เท่าๆ กับที่ทดสอบ และใช้แผ่นตะแกรงสแตนเลสขนาด 400 เมช เป็นตัวกระจายก๊าซ สเลอรรี่ที่อยู่ภายในจะมีลักษณะ เป็นเนื้อเดียวกัน เช่นเดียวกับที่ทดสอบ และแน่ใจได้ว่าที่ความเร็วเชิงสเปซที่เลือกทดลอง จะไม่มีส่วนใดของสเลอรรี่ไหลล้นออกจากเตาปฏิกรณ์เคมีได้

4.7 การคาลิเบรตเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ จำเป็นต้องมีการคาลิเบรต (Calibrate) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซสังเคราะห์ที่มี H₂:CO = 1 กับ ความแตกต่างของความสูงของปรอท

ความดันลด (pressure drop) ที่เกิดขึ้นในท่อที่มีทรายขนาด เท่าๆ กันบรรจุอยู่ของเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ สามารถหาได้จากสมการเออร์กัน (Ergun) (59)

$$\frac{\Delta P}{L} g_c = 150 \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu U_o}{(\phi_s d_p)^2} + 1.75 \frac{1-\epsilon_m}{\epsilon_m^3} \frac{\rho_g U_o^2}{\phi_s d_p} \dots\dots\dots(4.1)$$

โดยที่ ΔP = ความดันลด, กรัม-นน./ตร.ซม.

L = ความยาวของชั้นทราย, ซม.

g_c = 980 กรัม.ซม./(กรัม.นน.) (วินาที)²

ϵ_m = เศษส่วนของที่ว่าง

μ = ความหนืดของของไหล, กรัม./(ซม.) (วินาที)

U_o = ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียล (superficial velocity)

d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตร เท่ากับปริมาตรของอนุภาค, ซม.

ϕ_s = ความเป็นทรงกลม (sphericity)

= พื้นที่ผิวของทรงกลมที่มีปริมาตร เท่ากับปริมาตรของอนุภาค
พื้นที่ผิวของอนุภาค

ความดันตกในสมการที่ 4.1 ประกอบด้วยแฟคเตอร์ 2 ตัว คือ พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความหนืด (viscous energy losses) และพลังงานสูญเสียเนื่องจากพลังงานจลน์ (kinetic energy losses)

ที่เรโนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number) (Re) ต่ำๆ พลังงานจะสูญเสียไปเนื่องจากความหนืดเป็นหลัก จึงสามารถลดสมการที่ 4.1 เป็น

$$\Delta P = \frac{150 L}{g_c} \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{\mu U_o}{(\phi_s d_p)^2} \dots\dots\dots (4.2)$$

เมื่อ เรโนลด์นัมเบอร์ $Re_p = \frac{d_p \rho U_o}{\mu} < 20$

การคำนวณค่าเรโนลด์นัมเบอร์

d_p = เส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทราย ขนาด 270 เมช = 53×10^{-4} ซม.

ρ_g = ความหนาแน่นของก๊าซ $H_2:CO = 1$ ที่อุณหภูมิ 30^0 ซ ความดัน 10 บรรยากาศ = 6.0342×10^{-3} กรัม/ลบ.ซม.

U_o = ความเร็วซูเปอร์ฟิเชี่ยลของก๊าซ $H_2:CO = 1$ สูงที่สุดที่ใช้ในการทดลอง ขณะผ่านมาไนมิเตอร์ที่ความดัน 10 บรรยากาศ อุณหภูมิ 30^0 ซ
= 30.05 ซม./วินาที

μ = ความหนืดของก๊าซ $H_2:CO = 1$ ที่อุณหภูมิ 30^0 ซ ความดัน 10 บรรยากาศ
= 155×10^{-6} กรัม/(ซม.) (วินาที)

ค่าเรโนลด์นัมเบอร์สูงสุดของก๊าซ $H_2:CO=1$ ที่ใช้ในการทดลองขณะผ่านมาไนมิเตอร์
 $Re = \frac{(53 \times 10^{-4})(6.0342 \times 10^{-3})(30.05)}{(155 \times 10^{-6})}$
= 6.20

จะเห็นว่า เรโนลด์นัมเบอร์ ของก๊าซ $H_2:CO = 1$ ที่ผ่านมาไนมิเตอร์ ที่ความเร็วก๊าซสูงสุดของการทดลอง จะมีค่าน้อยกว่า 20 จึงสามารถนำสมการที่ 4.2 มาใช้คำนวณหาความดันตกของมาไนมิเตอร์ได้

จากสมการที่ 4.2

$$\Delta P = k \mu U_o \dots\dots\dots (4.3)$$

$$\text{โดยที่} \quad k = \frac{150 L}{g_c} \frac{(1-\epsilon_m)^2}{\epsilon_m^3} \frac{1}{(\frac{\phi d_p}{s p})^2}$$

ค่าความหนืด (μ) จะเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิและความดัน แต่เนื่องจากอุณหภูมิของมา-
โนมิเตอร์คงที่ = 30^oซ ที่ความดัน 10 บรรยากาศ ความหนืดของก๊าซ $H_2:CO = 1$ มีค่า
 155×10^{-6} กรัม/(ซม.) (วินาที) และที่ความดัน 20 บรรยากาศ ความหนืดของก๊าซ
 $H_2:CO = 1$ มีค่า 157×10^{-6} กรัม/(ซม.) (วินาที) จะเห็นว่าค่าความหนืดที่ความดันทั้ง-
สองมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก จึงถือว่าค่าความหนืดมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความดัน

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta P = k' U_o \quad \dots\dots\dots(4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad k' &= k\mu \\ \Delta P &= \frac{k U_o A}{A} = KQ \quad \dots\dots\dots(4.5) \end{aligned}$$

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อที่บรรจุชั้นทราย (ตารางเซนติเมตร)

Q = อัตราการไหลของก๊าซผ่านมาโนมิเตอร์ (ลบ. ซม. /วินาที)

$$K = \frac{k'}{A}$$

ดังนั้นจะเห็นว่า ความดันลดเป็นฟังก์ชันโดยตรงกับอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านมาโน-
มิเตอร์ และสามารถใช้ได้กับทุกความดัน

เนื่องจากหน่วยของความดัน สามารถแสดงในรูปของความสูงของปรอทได้ เช่น
มม.ปรอท, ซม.ปรอท เป็นต้น

$$\text{ดังนั้น} \quad \Delta h = KQ \quad \dots\dots\dots(4.6)$$

$$\Delta h = \text{ความแตกต่างของความสูงของปรอท (ซม.ปรอท)}$$

การที่ของไหลเป็นของไหลที่ไม่สามารถอัดได้ (incompressible fluid) ไหล
ผ่านเบคนี้ อัตราการไหลที่ผ่านขึ้นเบคจะคงที่ตลอดความยาวของเบค แต่ในกรณีของไหลเป็น
ก๊าซ ซึ่งเป็นของไหลที่สามารถอัดได้ (compressible fluid) อัตราการไหลที่ผ่านเบคจะ
ไม่คงที่โดยจะลดลงตามความยาวของเบค เพราะความดันที่จุดต่างๆ ในเบคลดลง โดยที่ความ
ดันขาเข้ามีค่ามากกว่าความดันขาออก แต่อย่างไรก็ดี ในกรณีที่ความดันขาเข้ามีค่ามาก และ
ความดันลดที่ผ่านเบคมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความดันขาเข้า จะถือได้ว่า อัตราการไหลของก๊าซ

จะมีค่าคงที่ ตลอดความยาวของเบค

$$P_1 = \text{ความดันขาเข้า} = 10 \text{ บรรยากาศ} = 760 \text{ ซม.ปรอท}$$

$$P_2 = \text{ความดันขาออก} = 753 \text{ ซม.ปรอท}$$

$$\Delta P = \text{ความดันลด} = 760 - 753 = 7 \text{ ซม.ปรอท}$$

จากกฎของก๊าซในอุดมคติ

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

$$\frac{1-P_2}{P_1} = \frac{1-V_1}{V_2}$$

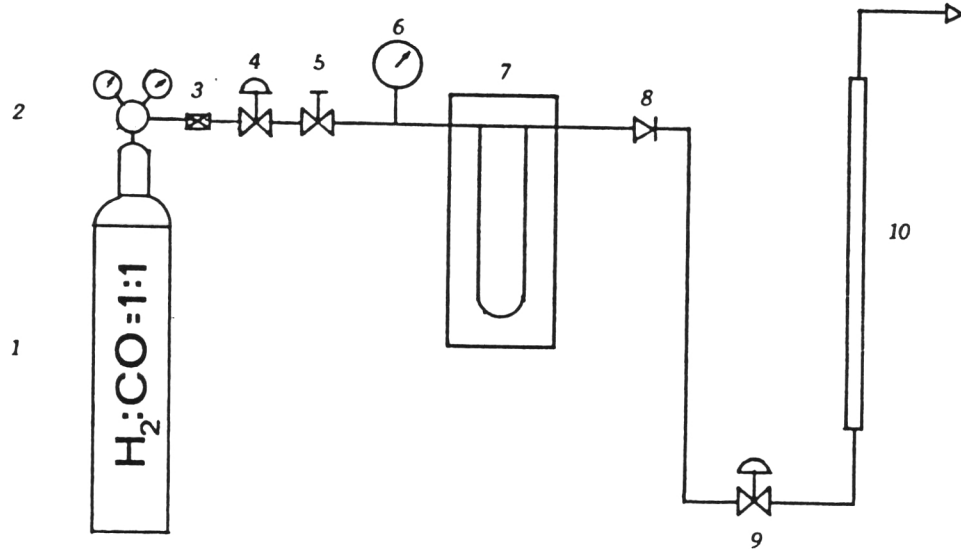
$$\frac{P_1 - P_2}{P_1} = \frac{V_2 - V_1}{V_2} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

$$\text{ความดันลดเทียบกับความดันขาเข้า} = \frac{7}{760} \times 100 = 0.92\%$$

∴ ปริมาตรของก๊าซที่เปลี่ยนไป จะมีค่า = 0.92% คำนวณ

จะเห็นได้ว่า ปริมาตรของก๊าซขาออก (V_2) จะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรของก๊าซขาเข้า (V_1) มาก จึงอาจถือได้ว่า อัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านเบคมีค่าคงที่ ซึ่งจะไม่ผิดพลาดมากนัก ดังนั้น ในการคาลิเบรท เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ จึงต้องกระทำที่ความดันสูง

แผนภาพของเครื่องมือขณะทำการคาลิเบรท แสดงในรูปที่ 4.7 การคาลิเบรทจะทำการที่ความดันตั้งแต่ 6.2 ถึง 20 บรรยากาศ ดังข้อมูลที่แสดงในภาคผนวก ง. โดยปรับวาล์วทั้ง 3 ตัวในภาพ ก๊าซที่ไหลผ่านมาโนมิเตอร์จะมีความดันตามที่อ่านได้จากเกจวัดความดัน ขณะที่ก๊าซไหลผ่านชั้นทรายในท่อจะเกิดความดันลดขึ้นในหลอดแก้วด้วย อ่านความแตกต่างของระดับความสูงของปรอท และวัดอัตราการไหลของก๊าซขาออกจากมาโนมิเตอร์ ด้วย เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ ซึ่งเป็นอัตราการไหลที่อุณหภูมิ = 30⁰ซ และที่ความดันบรรยากาศ



- 1 = ถังก๊าซผสม $H_2:CO = 1:1$
- 2 = เครื่องควบคุมความดัน
- 3 = ตัวกรองฝุ่น
- 4 = วาล์วเข็ม
- 5 = วาล์วละเอียด
- 6 = เกจวัดความดัน
- 7 = เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์
- 8 = วาล์วกันก๊าซไหลกลับ
- 9 = วาล์วไมโคร
- 10 = เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ

รูปที่ 4.7 แผนภาพของเครื่องมือขณะทำการคาลิเบรท

เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีค่าคอมเพรสซิเบิลิตี้แฟกเตอร์ (compressibility factor) (Z) ที่อุณหภูมิ 500 เคลวินและความดัน 10 บรรยากาศ เป็น 1.0040 และ 1.0041 ตามลำดับ(59) ค่าคอมเพรสซิเบิลิตี้ของก๊าซทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสามารถนำกฎของก๊าซในอุดมคติมาคำนวณอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านมาโนมิเตอร์ได้ โดยที่อุณหภูมิของมาโนมิเตอร์และอุณหภูมิของก๊าซขาออก คือ อุณหภูมิ 30⁰ซ ดังสมการ

$$V_M P_M = P_{out} V_{out} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

$$P_{out} P_M = \text{ความดันของก๊าซขาออกเท่ากับ 1 บรรยากาศและความดันที่เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ตามลำดับ (บรรยากาศ)}$$

$$V_{out} V_M = \text{อัตราการไหลของก๊าซขาออก และอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ตามลำดับ (ลบ.ซม./นาที)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

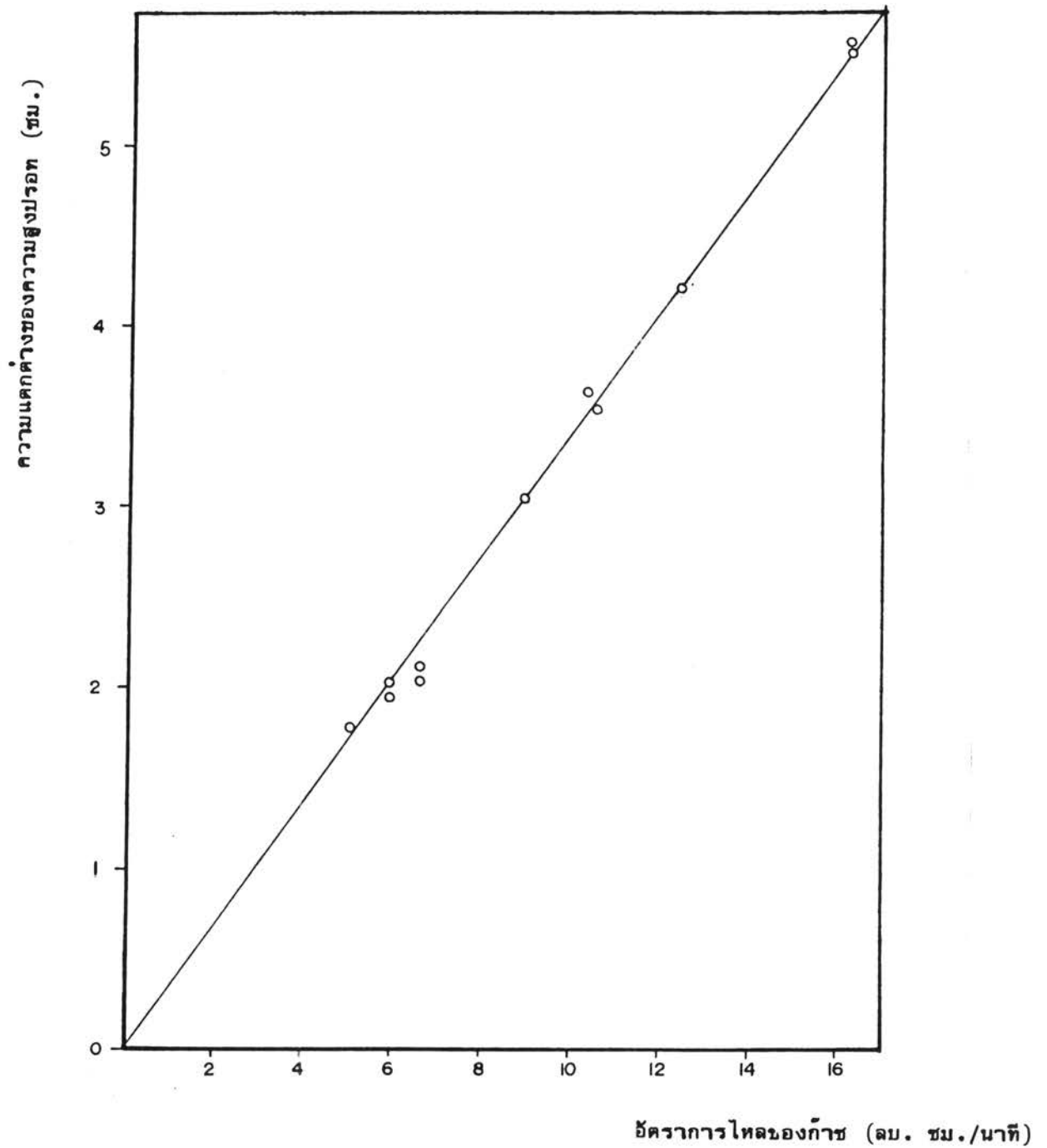
จากผลการทดสอบวัดความแตกต่างของความสูงปรอทได้ 12.5 ซม. ที่ความดัน 10.8 บรรยากาศ และ วัดอัตราการไหลของก๊าซขาออกที่ความดันบรรยากาศได้ 45.28 ลบ.ซม./นาที ดังนั้นอัตราการไหลของก๊าซผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ (V_m)

$$V_M = \frac{(1)(45.28)}{(10.8)} = 4.19 \quad \text{ลบ.ซม./นาที}$$

นำค่าอัตราการไหลของก๊าซที่ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ ตามที่คำนวณได้มาเขียนกราฟกับความแตกต่างของความสูงปรอท ตามความสัมพันธ์จากสมการที่ 4.6 ดังกราฟรูปที่ 4.8 ซึ่งจะเป็นอัตราการไหลที่อุณหภูมิ 30⁰ซ และที่ความดันใดๆ

4.8 การทดสอบการแตกหักของโซโพลีเอธิลีน

การทดสอบจะนำเฉพาะโซโพลีเอธิลีน หนัก 3.5 กรัม บรรจุในเตาปฏิกรณ์เคมี แล้วผ่านก๊าซสังเคราะห์ $H_2:CO = 1$ ที่อุณหภูมิ 280⁰ซ ความดัน 10 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 400 ซม.⁻¹ หลังจากปล่อยทิ้งไว้ 1 ชม. จะทำการเก็บก๊าซตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็นไปวิเคราะห์ ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ GOW MAC รุ่น Series 750 ซึ่งใช้วิเคราะห์ก๊าซไฮโดรคาร์บอน และหลังจากนั้น 7 ชม. จะเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์อีก



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซผสม $H_2:CO = 1$ ที่ไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ กับความแตกต่างของความสูงปรอท

ครึ่งหนึ่ง ปรากฏว่ามีการแตกหักของไฮโดรไลซิสเอธิลีน เป็นก๊าซไฮโดรคาร์บอน โดยจะมีก๊าซประเภท C_3 มากที่สุด และการแตกหักจากไฮโดรไลซิสเอธิลีนจะมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงถึงโครมาโตแกรม (chromatogram) ของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ เทียบกับ โครมาโตแกรมของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากการแตกหักของไฮโดรไลซิสเอธิลีน โดยที่ ปริมาณของตัวอย่างก๊าซที่วิเคราะห์มีปริมาตรหนึ่ง ลบ.ซม. เท่ากัน โครมาโตแกรมของที่ได้จากการสังเคราะห์จะใช้ค่าแอทเทนูเอชัน (Attenuation) = 16 และค่าความไวของเครื่อง (Sensitivity) = 10^{-10} ในขณะที่โครมาโตแกรมของการแตกหักของไฮโดรไลซิสเอธิลีนจะใช้ค่าแอทเทนูเอชัน = 4 และค่าความไวของเครื่อง = 10^{-11} จะเห็นว่า เมื่อต้องการขนาดของพีค (peak) เท่ากัน จะต้องใช้กำลังขยายของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ต่างกันถึง 40 เท่า แสดงว่า การแตกหักของไฮโดรไลซิสเอธิลีน จะมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์ ดังนั้นการแตกหักของไฮโดรไลซิสเอธิลีนจะไม่มีผลกระทบต่อการวิเคราะห์ข้อมูลผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์

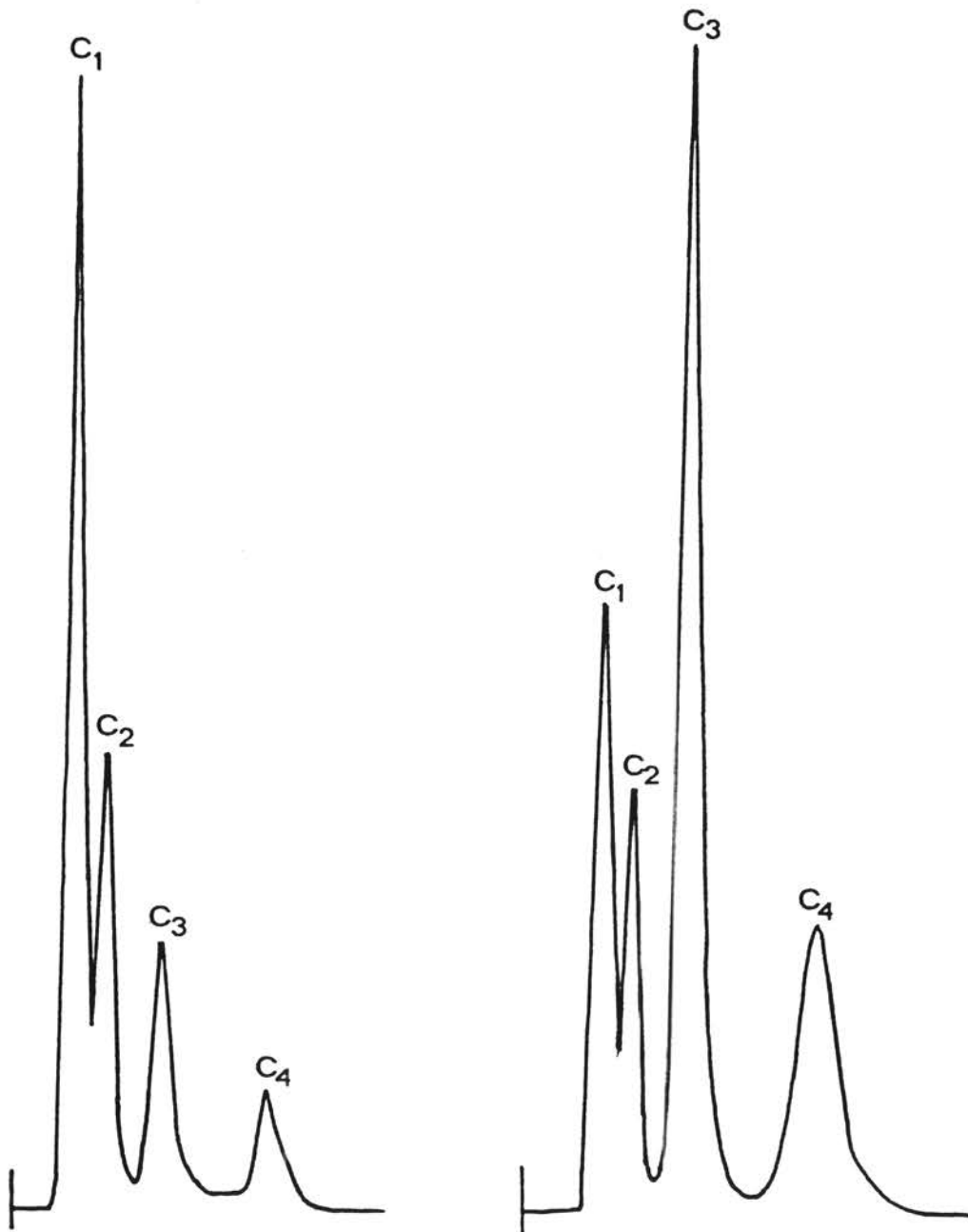
4.9 การรีดิวซ์ด้วยแรงปฏิกิริยาเหล็กหลอม

การรีดิวซ์ (reduced) ด้วยแรงปฏิกิริยาเหล็กหลอม เพื่อทำให้ด้วยแรงปฏิกิริยาเหล็ก ว่องไวในการทำปฏิกิริยา โดยใช้ก๊าซสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วน $H_2:CO = 1$ ซึ่งเป็นก๊าซสังเคราะห์ชนิดเดียวกับที่ใช้ในการสังเคราะห์ การรีดิวซ์จะกระทำที่อุณหภูมิ $2800^\circ C$ ความดัน 1 บรรยากาศ และที่ความเร็วเชิงสเปซ 80 ชม.^{-1}

ปฏิกิริยาการรีดิวซ์จะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้(5)



จากสมการจะเห็นว่าระหว่างการรีดิวซ์จะเกิดน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นขณะรีดิวซ์จะทำการเก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ GOW MAC รุ่น Series 150 ปริมาณของน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากในช่วงแรก และจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งวัดเกือบไม่ได้ จึงเลิกทำการรีดิวซ์รวมเวลาทั้งสิ้น 21 ชั่วโมง



โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรคาร์บอน
ที่ได้จากการสังเคราะห์

ค่าแอมพลิจูด = 16

ค่าความไวของเครื่อง = 10^{-10}

โครมาโตแกรมของก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่เกิด
จากการแตกหักของโซลีส เอธิลีน

ค่าแอมพลิจูด = 4

ค่าความไวของเครื่อง = 10^{-11}

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบโครมาโตแกรมการวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์
กับที่ได้จากการทดสอบการแตกหักของโซลีส เอธิลีน

4.10 ลำดับขั้นการทดลอง

1. เปิดเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ทั้งสามเครื่อง ตามสภาวะวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.1
2. เปิดถังก๊าซและปรับ เครื่องควบคุมความดันของถังก๊าซ ให้ความดันของก๊าซขาออก ประมาณ 22 บรรยากาศ โดยที่วาล์วทั้ง 3 ตัวจะปิดอยู่
3. ค่อยๆ เปิดวาล์วเข็มและวาล์วละเอียด ให้มีก๊าซไหลผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ ขณะนั้นจะเกิดความดันลดและระดับปรอทจะแตกต่างกัน รอจนกระทั่งระดับปรอทลงมาเท่ากัน ซึ่งหมายถึงความดันค่อยๆ เพิ่มขึ้น โดยอ่านได้จากเกจวัดความดันหมายเลข 6 และ 9 ทำเช่นนี้ซ้ำหลายๆ หน จนกระทั่งได้ความดัน 10 บรรยากาศ
4. ค่อยๆ ปรับวาล์วไมโครและวาล์วละเอียดร่วมกัน ให้ได้อัตราการไหลของก๊าซคำนวณเป็นความเร็วเชิงสเปซได้ 300 ซม.^{-1} โดยอ่านจากระดับความแตกต่างของความสูงของปรอท และพยายามปรับให้ความดันคงที่ประมาณ 10 บรรยากาศ และวัดอัตราการไหลของก๊าซออก ด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ
5. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิของเตาอบ และเปิดเครื่องปรับความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่วัดความร้อนที่พื้นจุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อนและวาล์วไมโคร ให้มีอุณหภูมิ 250°ซ และ 180°ซ ตามลำดับ
6. รอให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงเริ่มเก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซทั้งสองไปวิเคราะห์ การทดลองแต่ละจุดจะกินเวลาประมาณ 3 ชั่วโมง
7. เมื่อวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว จะปรับอุณหภูมิให้เป็น 280°ซ และ 220°ซ ตามลำดับ แล้วทำตามขั้นตอนที่ 6
8. ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการศึกษาอิทธิพลของความเร็วเชิงสเปซ โดยจะคงอุณหภูมิไว้ที่ 220°ซ ปรับวาล์วละเอียดและวาล์วไมโคร ให้ความเร็วเชิงสเปซประมาณ 200 และ 400 ซม.^{-1} ตามลำดับ และทำตามขั้นตอนที่ 6
9. ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทดสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะปรับให้มีอุณหภูมิ 250°ซ และความเร็วเชิงสเปซ 300 ซม.^{-1} อีกครั้งหนึ่ง และทำตามขั้นตอนที่ 6
10. การศึกษาอิทธิพลของความดัน ทำโดยการหรวาล์วไมโคร แล้วปรับวาล์วเข็มและวาล์วละเอียด ตามขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งมีความดัน 20 บรรยากาศ ปรับความเร็วเชิงสเปซประมาณ 400 ซม.^{-1} และ ปรับอุณหภูมิเป็น 220°ซ แล้วจึงทำตามขั้นตอนที่ 6

11. การปิดเครื่องจะค่อยๆ ลดอุณหภูมิลง ปรับวาล์วไมโคร ให้มีการไหลมากขึ้น ซึ่งความดันจะค่อยๆ ลดลง รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เคมีลดลงต่ำกว่า 100⁰ซ ซึ่งแน่ใจได้ว่าไฮโดรเจนเอซิสจะแข็งตัวหมด แล้วจึงปิดถังก๊าซ และปรับวาล์วทั้งสามให้ก๊าซไหลออกจากเตาปฏิกรณ์เคมีจนหมด

(หมายเหตุ - ลำดับขั้นการทดลองนี้จะกระทำหลังจากการรีเซ็ตตัวเร่งปฏิกิริยาเรียบร้อยแล้ว)

4.11 การตรวจสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา

การตรวจสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา กระทำที่อุณหภูมิ 250⁰ซ , ความดัน 10 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 300 ซม.⁻¹ ที่เวลาเมื่อเริ่มการทดลอง และเมื่อเสร็จสิ้น การทดลองที่ชั่วโมงที่ 17 ดังตารางที่ 4.2 โดยที่

$$\Delta h = \text{ความแตกต่างของความสูงปรอท ในเครื่องวัดอัตราการไหลแบบ มาโนมิเตอร์ของก๊าซสังเคราะห์ } H_2:CO = 1$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ก๊าซ } H_2+CO \text{ ที่เข้าทำปฏิกิริยา} = \frac{\text{อัตราการไหลของก๊าซ } H_2+CO \text{ ขาเข้า} - \text{อัตราการไหลของก๊าซ } H_2+CO \text{ ขาออก}}{\text{อัตราการไหลของก๊าซ } H_2+CO \text{ ขาเข้า}} \times 100$$

.....(4.12)

ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 250⁰ซ ความดัน 10 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 300 ซม.⁻¹

ชั่วโมงที่	ก๊าซ H ₂ +CO ขาเข้า		ก๊าซขาออก (ลบ.ชม./นาฬิกา)	ผลการวิเคราะห์ ก๊าซขาออก (x)		ก๊าซขาออก (ลบ.ชม./นาฬิกา)			ก๊าซ H ₂ +CO ที่หายไป (ลบ.ชม./นาฬิกา)	% ก๊าซ H ₂ +CO ที่เข้าทำปฏิกิริยา
	h	(ลบ.ชม./นาฬิกา)		H ₂	CO	H ₂	CO	H ₂ +CO		
1	5.3	18.00	17.11	46.19	44.69	7.90	7.65	15.55	2.45	13.61
17	5.4	18.56	17.65	46.34	44.77	8.18	7.90	16.08	2.48	13.36

จากตารางจะเห็นว่า ตลอดช่วงเวลาการทดลอง 17 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ของก๊าซ H_2+CO ที่เข้าทำปฏิกิริยาจะมีค่าคงที่ แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เสื่อมสภาพขณะทดลอง ดังนั้นผลการทดลองจะไม่มีผลสืบเนื่องจากการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.12 ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่สภาวะของการปฏิบัติการต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 โดยแสดงอัตราการไหลของก๊าซขาเข้าและก๊าซขาออก อัตราการไหลของก๊าซขาเข้าจะอ่านได้จากรูปที่ 4.8 และอัตราการไหลของก๊าซขาออกวัดได้จากเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่สภาวะของการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	ความดัน (บรรยากาศ)	อัตราการไหลของก๊าซขาเข้า		อัตราการไหลของก๊าซขาออก (ลบ.ชม./นาที)
		Δh	(ลบ.ชม./นาที)	
220	10.2	5.3	18.36	18.30
250	10.0	5.3	18.00	17.11
280	10.2	5.4	18.56	17.71
220	9.8	3.6	11.96	10.74
220	10.2	5.3	18.36	18.30
220	10.2	7.0	24.28	24.11
220	10.2	7.0	24.28	24.11
220	19.9	3.5	23.08	20.76

ผลการวิเคราะห์ก๊าซขาออกด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ GOW MAC รุ่น Series 150 แสดงในตารางที่ 4.4 ก๊าซขาออกที่วิเคราะห์ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จะหาได้จากการทำคาลิเบรทระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยโมลของก๊าซทั้งสองกับพื้นที่ใต้พีค ดังแสดงในภาคผนวก ข.

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ก๊าซขาออก

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ โดยประมาณ (cm^{-1})	เปอร์เซ็นต์โดยมวล	
			H_2	CO
220	10.2	300	45.61	44.95
250	10.0	300	46.19	44.69
280	10.2	300	44.60	43.92
220	9.8	200	46.34	46.44
220	10.2	300	45.61	44.95
220	10.2	400	48.07	48.20
220	10.2	400	48.07	48.20
220	19.9	400	46.77	47.72

จากค่าอัตราการไหลของก๊าซจากตารางที่ 4.3 และผลการวิเคราะห์ก๊าซขาออก
ในตารางที่ 4.4 จะสามารถคำนวณปริมาณของก๊าซไฮโดรคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่เปลี่ยนรูปไป
เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ ผลของการคำนวณรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.5 โดยที่

$$\text{เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนรูป} = \frac{\text{ปริมาณของก๊าซที่เข้าทำปฏิกิริยา}}{\text{ปริมาณของก๊าซขาเข้าเตาปฏิกรณ์เคมี}} \times 100$$

และ ความเร็วเชิงสเปซ ที่แสดงในสมการที่ 3 มีหน่วยเป็น ชั่วโมง $^{-1}$ หมายถึง

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซ} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซตั้งเครื่องที่ผ่านเตาปฏิกรณ์เคมีที่สภาวะมาตรฐาน}}{\text{(ปริมาตรของสเลอร์รี) (ชั่วโมง)}}$$

..... (4.14)

ตัวอย่างการคำนวณ ความเร็วเชิงสเปซ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก.

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองสภาวะการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ (ชั่วโมง $^{-1}$)	อัตราการไหลของก๊าซ H_2 (ลบ.ชม./นาถ์)				อัตราการไหลของก๊าซ CO (ลบ.ชม./นาถ์)				อัตราการไหลของก๊าซ H_2+CO (ลบ.ชม./นาถ์)			
			ขาเข้า	ขาออก	หายไป	% การเปลี่ยนรูป	ขาเข้า	ขาออก	หายไป	% การเปลี่ยนรูป	ขาเข้า	ขาออก	หายไป	% การเปลี่ยนรูป
220	10.2	352	9.18	8.35	0.83	9.04	9.18	8.22	0.96	10.46	18.36	16.57	1.79	9.75
250	10.0	345	9.00	7.90	1.1	12.22	9.00	7.65	1.35	15.00	18.00	15.55	2.45	13.61
280	10.2	356	9.28	7.89	1.39	14.99	9.28	7.78	1.50	16.16	18.56	15.67	2.89	15.57
220	9.8	229	5.98	4.98	1.00	16.72	5.98	5.00	0.98	16.39	11.96	9.98	1.98	16.56
220	10.2	352	9.18	8.35	0.83	9.04	9.18	8.22	0.96	10.46	18.36	16.57	1.79	9.75
220	10.2	465	12.14	11.59	0.55	4.53	12.14	11.62	0.52	4.28	24.28	23.21	1.07	4.41
220	10.2	465	12.14	11.59	0.55	4.53	12.14	11.62	0.52	4.28	24.28	23.21	1.07	4.41
220	19.9	442	11.54	9.71	1.83	15.86	11.54	9.91	1.63	14.12	23.08	19.62	3.46	15.00

4.13 การกระจายผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน

ผลการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์จากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อน แสดงในตารางที่ 4.6 และผลการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์จากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซเย็น แสดงในตารางที่ 4.7 ส่วนการกระจายผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน ที่แสดงในตารางที่ 4.8 เป็นการนำผลวิเคราะห์จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 มารวมกันโดยแยกเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน แต่ละเลขคาร์บอนตั้งแต่ C_1 ถึง C_{10} ซึ่งรวมกันเป็นหนึ่งร้อยหน่วยน้ำหนัก การกระจายผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน ที่แสดงเป็นในลักษณะเชิงเปรียบเทียบ จะไม่สามารถหาค่าน้ำหนักที่แท้จริงของแต่ละเลขคาร์บอนได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ดี น้ำหนักคาร์บอนของ C_{11}^+ จะสามารถทำนายได้ โดยการใช้การกระจายผลิตภัณฑ์ของซูลส์-พลอริย์

เมื่อหารน้ำหนักคาร์บอนในตารางที่ 4.8 ด้วยตัวเลขคาร์บอน จะได้ตารางที่ 4.9 ซึ่งแสดงจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์แต่ละเลขคาร์บอนที่เกิดขึ้น ในลักษณะเปรียบเทียบ และจะนำข้อมูลตั้งแต่ C_5 ถึง C_{10} มาเขียนกราฟ แสดงการกระจายผลิตภัณฑ์ของซูลส์-พลอริย์ ดังรูปที่ 4.10 ถึง รูปที่ 4.15 กราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง การที่ไม่นำข้อมูลตั้งแต่ C_1 ถึง C_4 มาเขียนกราฟด้วยเพราะข้อจำกัดของเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ ไม่สามารถแยกผลิตภัณฑ์พวกออกซิเจนต์ ออกจากผลิตภัณฑ์ก๊าซไฮโดรคาร์บอนได้ แต่ผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ C_5 ขึ้นไปจะไม่มีผลิตภัณฑ์พวกออกซิเจนต์หรือมีน้อยมาก ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะเป็นพวกไฮโดรคาร์บอนอย่างเดียว และจะมีการกระจายผลิตภัณฑ์เป็นไปตามการกระจายผลิตภัณฑ์ของซูลส์-พลอริย์(67) ค่า α ของการกระจายผลิตภัณฑ์ของซูลส์-พลอริย์ แสดงไว้ในตารางที่ 4.10

การทำนายการเกิดของผลิตภัณฑ์ C_{11}^+ ทำได้โดยอาศัยรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.10 โดยการต่อเส้นกราฟออกไป จนกระทั่งถึงตัวเลขคาร์บอนที่มีน้ำหนักคาร์บอนน้อยกว่า 0.005 จากนั้นรวมน้ำหนักคาร์บอนตั้งแต่ C_{11} ขึ้นไป จะได้เป็นน้ำหนักของ C_{11}^+ น้ำหนักของ C_{11}^+ ที่แสดงในตารางที่ 4.11 เป็นการคำนวณบนพื้นฐานเปอร์เซ็นต์น้ำหนัก โดยการรวมน้ำหนักคาร์บอนตั้งแต่ C_1 ถึง C_{11}^+ ให้เป็นหนึ่งร้อยหน่วยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ก๊าซผลิตภัณฑ์จากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซร้อนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟที่ VARIAN VISTA 401 & VISTA 4600

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ (cm^{-1})	น้ำหนักคาร์บอน (%)						
			C ₁ -C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
220	10.2	352	59.81	10.25	9.09	6.94	6.48	3.85	3.58
250	10.0	345	62.36	10.69	7.90	6.59	6.31	3.00	3.14
280	10.2	356	62.86	10.69	9.10	6.87	6.38	2.61	1.49
220	9.8	229	60.52	11.35	8.98	6.96	5.07	3.96	3.16
220	10.2	352	59.81	10.25	9.09	6.94	6.48	3.85	3.58
220	10.2	465	55.79	11.45	10.69	7.43	6.66	4.22	3.75
220	10.2	465	55.79	11.45	10.69	7.43	6.66	4.22	3.75
220	19.9	442	47.59	12.91	11.68	8.90	7.47	6.15	5.30

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลผลิตกักเก็บด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี Gow Mac รุ่นseries 750

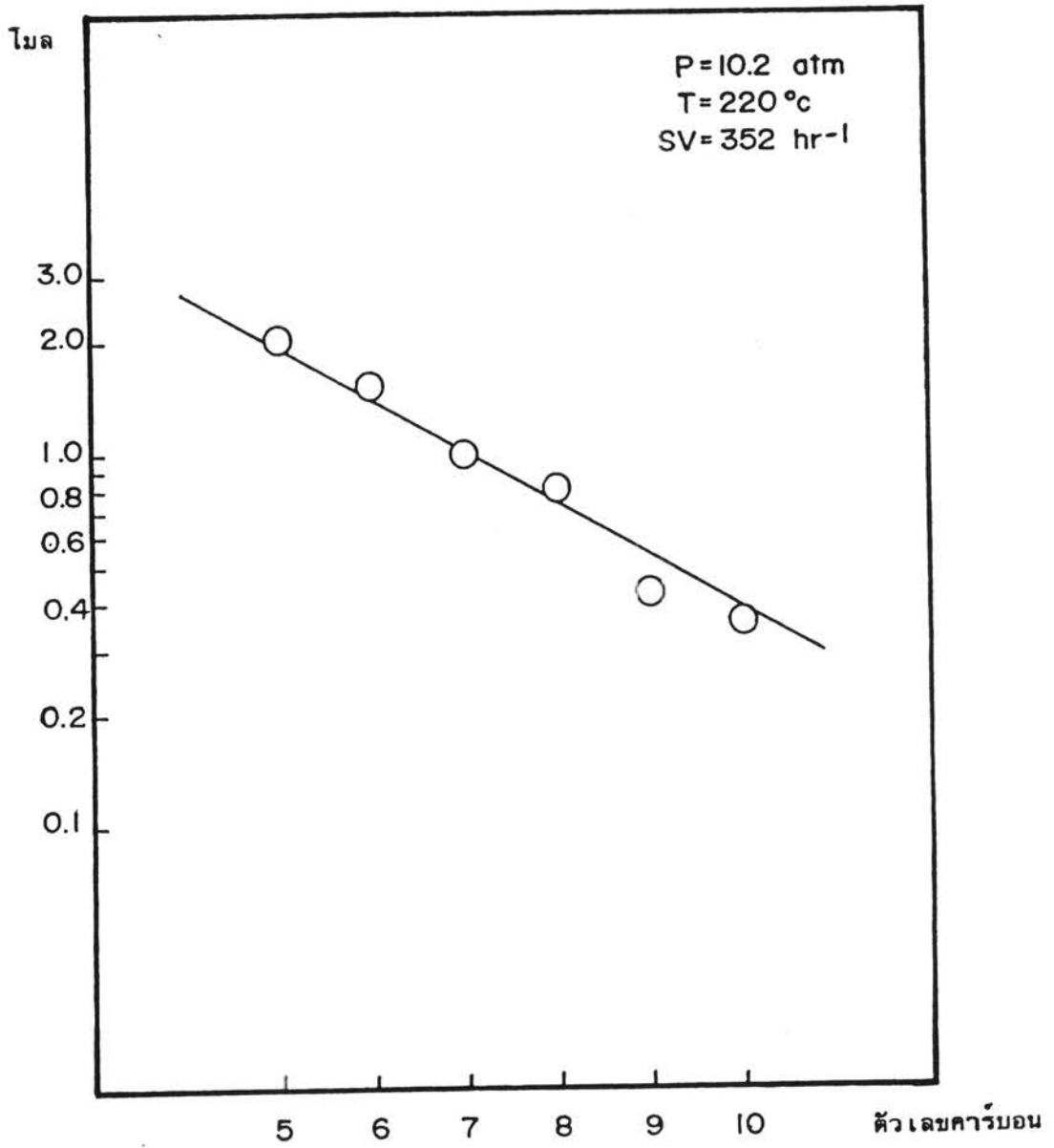
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ ($\text{ซม}^3\text{ม}^{-1}$)	น้ำหนักคาร์บอน(%)			
			C_1	C_2	C_3	C_4
220	10.2	352	47.88	22.59	15.03	14.49
250	10.0	345	50.77	23.71	15.44	10.08
280	10.2	356	53.34	23.74	12.52	6.40
220	9.8	229	46.82	22.72	16.30	14.16
220	10.2	352	47.88	22.59	15.03	14.49
220	10.2	465	51.49	21.65	14.46	12.39
220	10.2	465	51.49	21.65	14.46	12.39
220	19.9	442	46.92	23.38	16.29	13.40

ตารางที่ 4.8 การกระจายผลติดตั้งไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C₁ ถึง C₁₀ เปรียบเทียบโดยน้ำหนัก

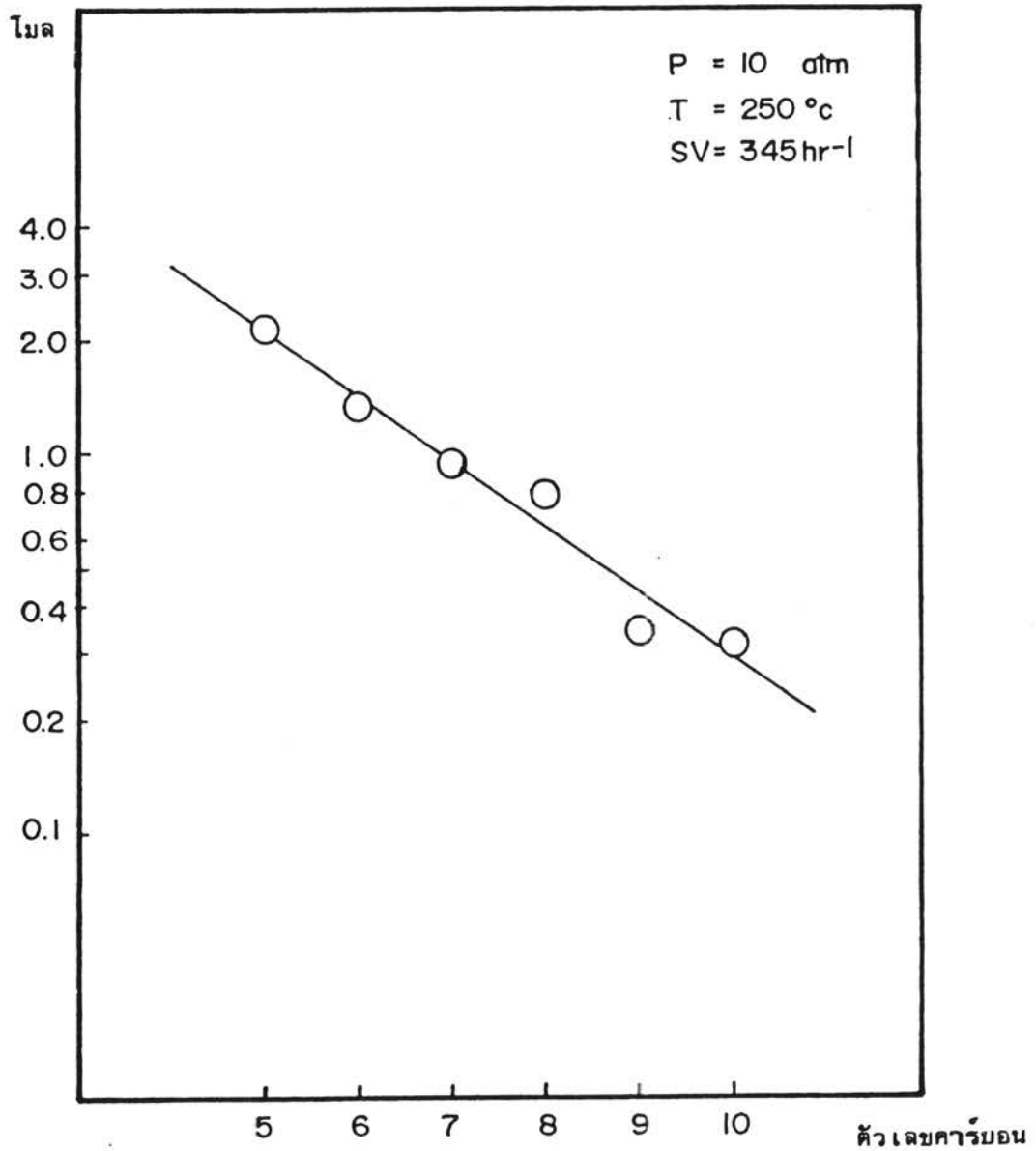
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ (ชั่วโมง ⁻¹)	น้ำหนักคาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)									
			C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
220	10.2	352	28.64	13.51	8.99	8.67	10.25	9.09	6.94	6.48	3.85	3.58
250	10.0	345	31.66	14.78	9.63	6.29	10.69	7.90	6.59	6.31	3.00	3.14
280	10.2	356	33.53	17.44	7.87	4.02	10.69	9.10	6.87	6.38	2.61	1.49
220	9.8	229	28.34	13.75	9.86	8.57	11.35	8.98	6.96	5.07	3.96	3.16
220	10.2	352	28.64	13.51	8.99	8.67	10.25	9.09	6.94	6.48	3.85	3.58
220	10.2	465	28.73	12.08	8.07	6.91	11.45	10.69	7.43	6.66	4.22	3.75
220	10.2	465	28.73	12.08	8.07	6.91	11.45	10.69	7.43	6.66	4.22	3.75
220	19.9	442	22.33	11.13	7.75	6.38	12.91	11.68	8.90	7.47	6.15	5.30

ตารางที่ 4.9 การกระจายผลสัมฤทธิ์ไฮโดรคาร์บอนเปรียบเทียบกับโดยโมล

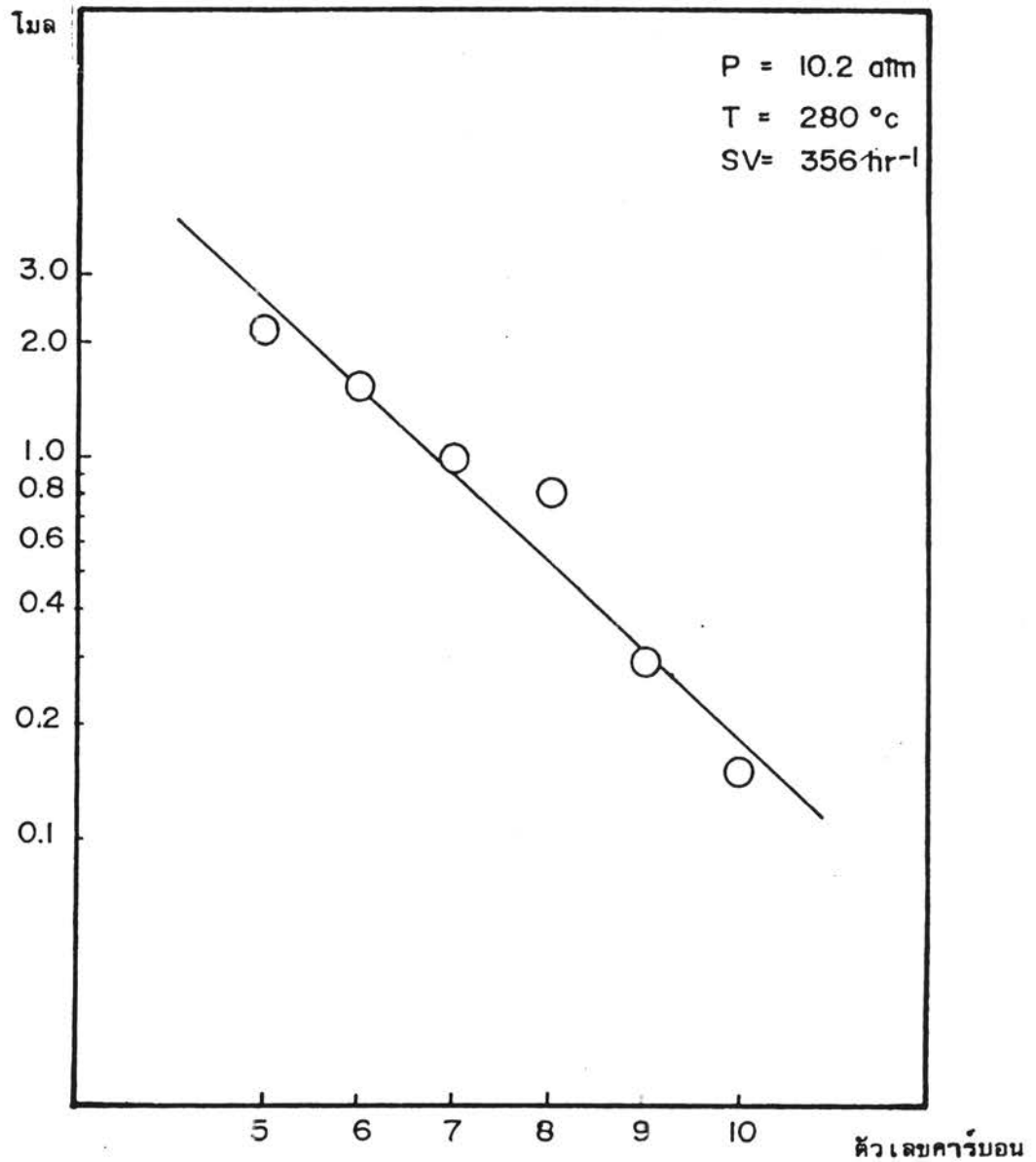
อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปก (ชั่วโมง ⁻¹)	โมลคาร์บอน									
			C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
220	10.2	352	28.64	6.76	3.00	2.17	2.05	1.52	0.99	0.81	0.43	0.36
250	10.0	345	31.02	7.24	3.14	1.54	2.09	1.29	0.92	0.77	0.33	0.31
280	10.2	356	33.53	8.72	2.62	1.01	2.14	1.52	0.98	0.80	0.29	0.15
220	9.8	229	28.34	6.88	3.29	2.14	2.27	1.50	0.99	0.63	0.44	0.32
220	10.2	352	28.64	6.76	3.00	2.17	2.05	1.52	0.99	0.81	0.43	0.36
220	10.2	465	28.73	6.04	2.69	1.73	2.29	1.78	1.06	0.83	0.49	0.38
220	10.2	465	28.73	6.04	2.69	1.73	2.29	1.78	1.06	0.83	0.49	0.38
220	19.9	442	22.33	5.56	2.58	1.60	2.58	1.95	1.27	0.93	0.68	0.53



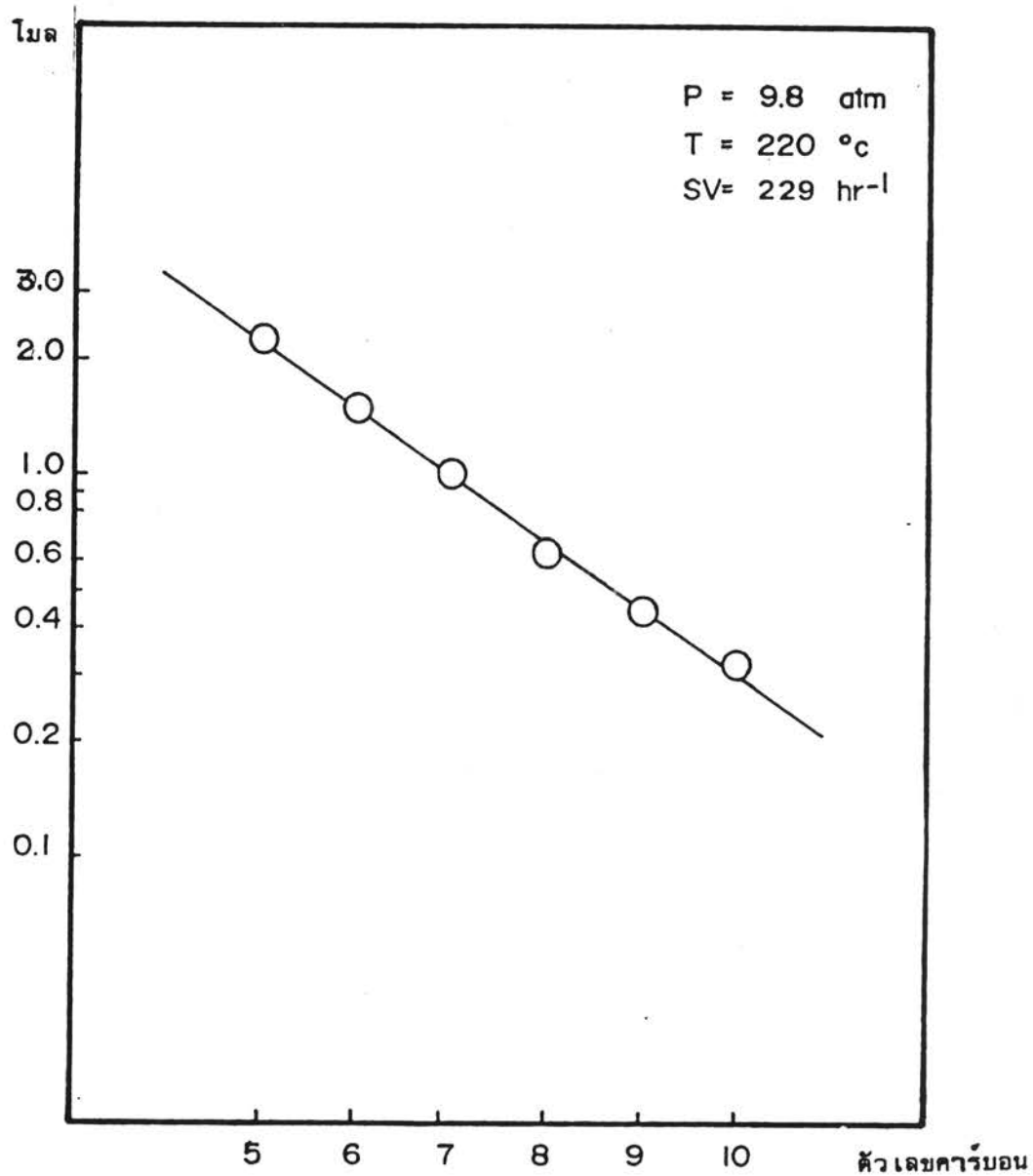
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอนของ
 การทดลองที่อุณหภูมิ 220°C , ความดัน 10.2 บรรยากาศ และ
 ความเร็วเชิงสเปซ 352 ชั่วโมง^{-1}



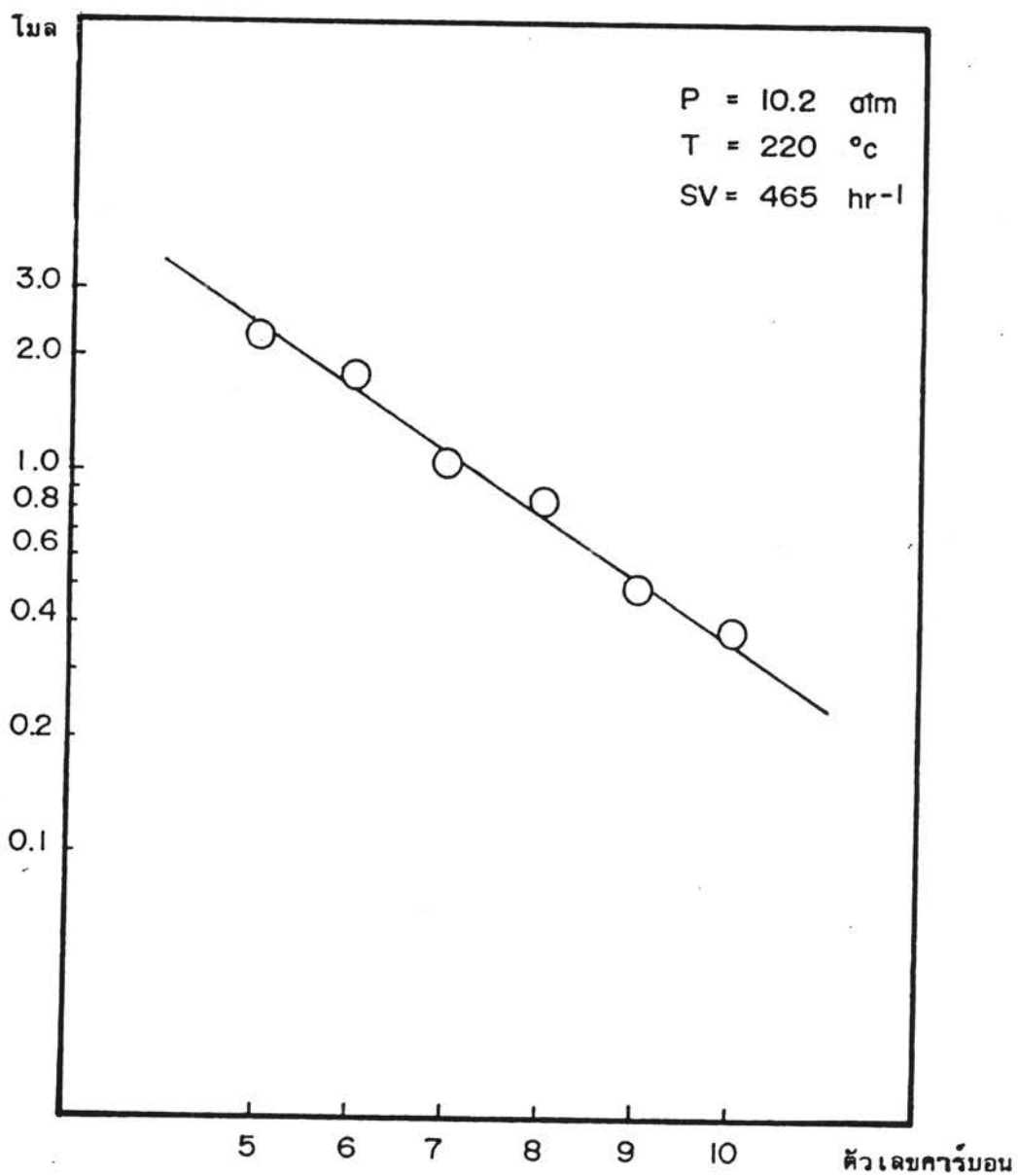
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอนของการทดลองที่ อุณหภูมิ 250°C , ความดัน 10.0 บรรยากาศ และ ความเร็วเชิงสเปซ 345 ชั่วโมง^{-1}



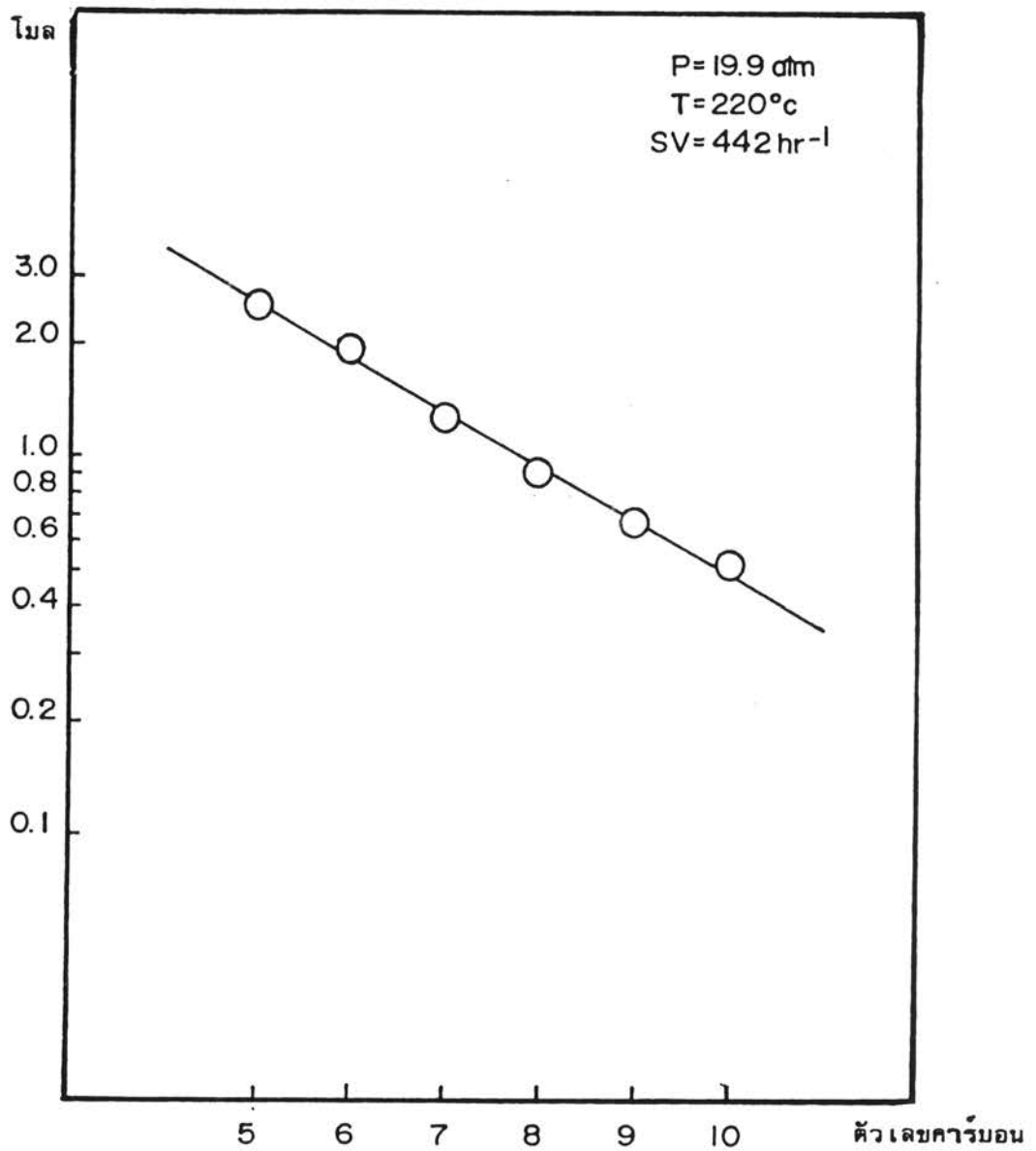
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอนของการทดลองที่ อุณหภูมิ 280°C , ความดัน 10.2 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 356 ชั่วโมง^{-1}



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอนของการทดลองที่ อุณหภูมิ 220°C , ความดัน 9.8 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 229 ชั่วโมง^{-1}



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอนของการทดลองที่อุณหภูมิ 220°C , ความดัน 10.2 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 465 ชั่วโมง^{-1}



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอนของการทดลองที่อุณหภูมิ 220°C , ความดัน 19.9 บรรยากาศ และความเร็วเชิงสเปซ 442 ชั่วโมง^{-1}

ตารางที่ 4.10 ค่า α ของการทดลองที่สภาวะการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ (ชั่วโมง $^{-1}$)	α
220	10.2	352	0.69
250	10.0	345	0.67
280	10.2	356	0.59
220	9.8	229	0.67
220	10.2	352	0.69
220	10.2	465	0.68
220	10.2	465	0.68
220	19.9	442	0.72

ตารางที่ 4.11 การกระจายผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่สภาวะการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความดัน (บรรยากาศ)	ความเร็วเชิงสเปซ (ชั่วโมง $^{-1}$)	น้ำหนักคาร์บอน (%)										
			C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁ ⁺
220	10.2	352	25.98	12.25	8.15	7.86	9.30	8.24	6.28	5.89	3.49	3.25	9.31
250	10.0	345	29.43	13.74	8.95	5.58	9.94	7.34	6.12	5.86	2.79	2.92	7.06
280	10.2	356	32.48	16.89	7.62	3.89	10.36	8.82	6.65	6.18	2.53	1.44	3.13
220	9.8	229	26.27	12.75	9.14	7.95	10.52	8.32	6.45	4.70	3.67	2.94	7.29
220	10.2	352	25.98	12.25	8.15	7.86	9.30	8.24	6.28	5.89	3.49	3.25	9.31
220	10.2	465	26.10	10.98	7.33	6.28	10.40	9.71	6.75	6.05	3.83	3.41	9.15
220	10.2	465	26.10	10.98	7.33	6.28	10.10	9.71	6.75	6.05	3.85	3.41	9.15
220	19.9	442	18.97	9.46	6.58	5.42	10.96	9.92	7.56	6.34	5.23	4.50	15.16