

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

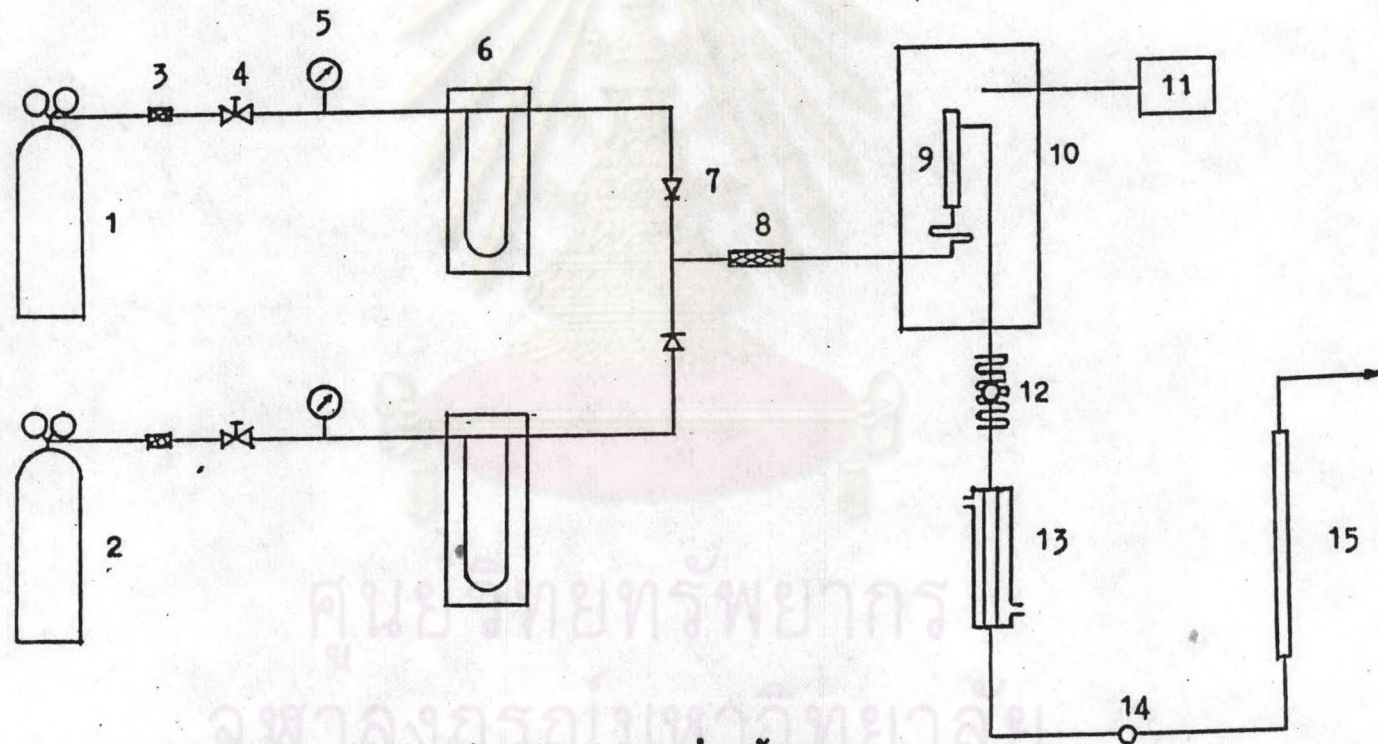
เครื่องมือทดลอง

เครื่องมือทดลองแสดงเป็นแผนภาพในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยถังก๊าซคาร์บอน-มอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนอย่างละถัง มีเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ (manometer) สำหรับวัดอัตราการไหลของก๊าซทั้งสองชนิด ระหว่างถังก๊าซและเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์มีเครื่องปรับความดัน (pressure regulator) เครื่องกรองฝุ่น วาล์วเข็ม (needle valve) และเกจ (gauge) สำหรับวัดความดัน เมื่อทำการทดลองก๊าซทั้งสองชนิดจะไหลในท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ผ่านเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์และเช็ควาล์ว (check valve) แล้วมารวมกันไหลผ่านเครื่องกักความชื้นและมลทิน แล้วจึงเข้าเตาปฏิกรณ์เคมีซึ่งอยู่ในเตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ ภายในเตาอบก่อนถึงเตาปฏิกรณ์เคมีจะเป็นชกท่อทองแดง มีไว้เพื่อทำให้ก๊าซสังเคราะห์ร้อนก่อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์เคมี ภายในเตาปฏิกรณ์เคมีมีสำหรับเสียบเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เพื่อรายงานอุณหภูมิขณะทำการทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์อยู่ในสภาวะที่เป็นก๊าซ ออกจากเตาปฏิกรณ์เคมีผ่านท่อทองแดงออกทางด้านล่างของเตาอบ และมีลวดความร้อนพันท่อชกออก รักษาอุณหภูมิของก๊าซชกออกให้สูงประมาณ 180°C เพื่อที่จะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์มาวิเคราะห์ขณะร้อน หลังจากนั้นก๊าซจะถูกทำให้เย็นด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ดังนั้นก๊าซชกออกในชั้นสุดท้ายจึงเป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้อง ก๊าซชกออกในชั้นสุดท้ายถูกวิเคราะห์และถูกวัดอัตราการไหลด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ (bubble flow meter)

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ทำด้วยหลอดแก้วทวิยู ภายในบรรจุปรอท และมีขีดบอกความสูงของปรอท เมื่อก๊าซไหลผ่านท่อซึ่งบรรจุทรายไว้ภายใน (ดูรูปที่ 4.2) จะเกิดความดันตก ซึ่งอ่านได้จากความแตกต่างของความสูงของปรอท ค่าความดันตกที่อ่านได้สามารถบอกอัตราการไหลของก๊าซ

รูปที่ 4.1 แผนภาพของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

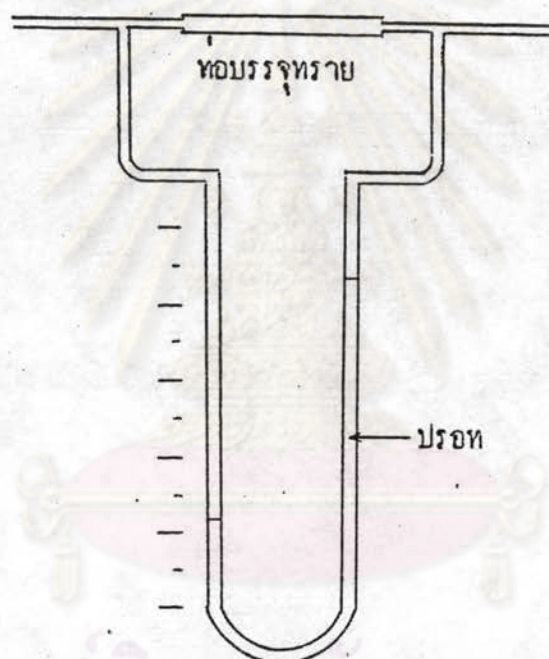


คำอธิบายของหมายเลขที่กำกับในแผนภาพอยู่ในหน้าถัดไป

หมายเลขที่กำกับในแผนภาพในรูปที่ 4.1 หมายถึงเครื่องมือดังต่อไปนี้คือ

- 1 คือ ถังก๊าซไฮโดรเจนพร้อมเครื่องปรับความดัน
- 2 คือ ถังก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พร้อมเครื่องปรับความดัน
- 3 คือ เครื่องกรองฝุ่น
- 4 คือ วาล์วเข็ม
- 5 คือ เกจวัดความดัน
- 6 คือ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์
- 7 คือ เซลล์ควอตซ์
- 8 คือ เครื่องยกความชื้นและมลทิน
- 9 คือ เทาปฏิกรณ์เคมี
- 10 คือ เทาอบ
- 11 คือ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
- 12 คือ จุดเก็บตัวอย่างจุดแรกซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีสภาวะความร้อนพันอยู่
- 13 คือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
- 14 คือ จุดเก็บตัวอย่างจุดที่สอง
- 15 คือ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ

รูปที่ 4.2 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนเมเตอร์

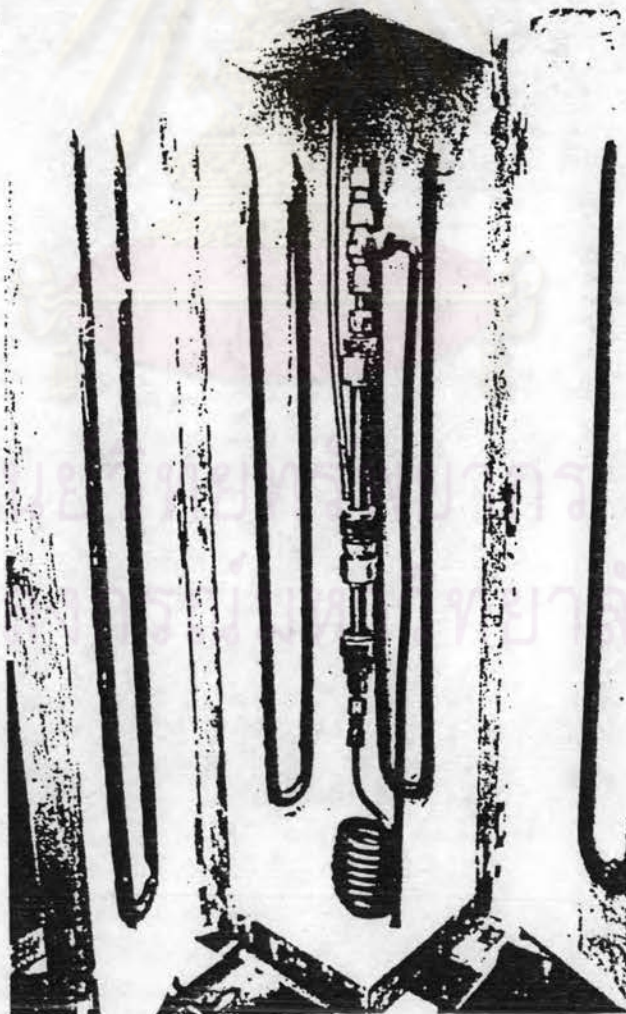


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เตาอบ

เตาอบที่ใช้เป็นเตาอบที่ทำขึ้นเอง เพื่อใช้กับงานวิจัยนี้โดยเฉพาะ มีขนาด $18 \times 18 \times 60$ ซม. ก้านนอกทำด้วยแผ่นเหล็กสเตนเลส ก้านในเป็นซีเมนต์ทนไฟหนา 3 ซม. ทั้งสี่ด้านของเตาอบมีฉนวนความร้อนขนาด 750 วัตต์ ทึบอยู่ เตาอบนี้จึงมีกำลัง 3000 วัตต์ รูปที่ 4.3 แสดงก้านในของเตาอบพร้อมกับเตาปฏิกรณ์เคมีซึ่งถ่ายจากของจริง เตาอบนี้สามารถเปิดไถ่สองข้างเพื่อความสะดวกในการทำงาน ท่อปลายปิกที่เสียบจากก้านบนของเตาอบเป็นที่เสียบเทอร์โมคัปเปิล เพื่อควบคุมอุณหภูมิของเตาอบด้วยระบบควบคุมแบบเปิด-ปิด

รูปที่ 4.3 แสดงเตาอบและเตาปฏิกรณ์เคมี



เตาปฏิกรณ์เคมี

เตาปฏิกรณ์เคมีทำด้วยท่อเหล็กสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 1.27 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.94 ซม. ยาว 12 ซม. พื้นที่หน้าตัดภายในเท่ากับ 0.694 ตร.ซม. ที่ทางเข้าของเตาปฏิกรณ์เคมีเป็นตะแกรงสแตนเลสขนาด 400 เมช ก้านล่างของตะแกรงเป็นท่อขนาดเดียวกับเตาปฏิกรณ์ยาว 6.80 ซม. บรรจุทรายไว้ภายใน เพื่อให้ก๊าซสังเคราะห์มีการไหลที่สม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของท่อก่อนเข้าไปในเตาปฏิกรณ์เคมี ท่อทั้งสองต่อกันด้วยข้อต่อสแตนเลส ก๊าซออกจากเตาปฏิกรณ์เคมีทางตอนบน แล้วไหลตามก้านท่อออกทางก้านล่างของเตาอบ (รูปที่ 4.3) ที่บนสุดของเตาปฏิกรณ์เคมีจะมีที่เสียบเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปยังข้างในของเตาปฏิกรณ์เคมี เพื่อวัดอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เคมีระหว่างการสังเคราะห์ ซกท่อทองแดงที่อยู่ก้านล่างของเตาปฏิกรณ์เคมีไว้เพื่อทำให้ก๊าซสังเคราะห์ร้อนก่อนเข้าเตาปฏิกรณ์เคมี

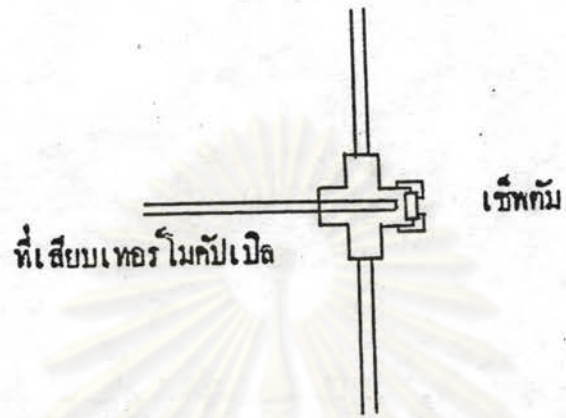
ที่สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซขณะร้อน

ท่อก๊าซที่ออกจากก้านล่างของเตาอบถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 180 ซ ด้วยชกฉลว ความร้อนที่ปรับค่าความต่างศักย์ได้ อุณหภูมิของส่วนนี้ถูกรายงานด้วยเทอร์โมคัปเปิล รูปที่ 4.4 แสดงส่วนนี้โดยไม่มีชกฉลวความร้อนอยู่ด้วย การเก็บตัวอย่างก๊าซร้อนเพื่อนำไปวิเคราะห์ ทำได้โดยการใช้เข็มเก็บก๊าซแทงทะลุเซปตัม (septum) แบบที่ใช้กับเครื่องแกสโครมาโทกราฟี (gas chromatography) ซึ่งเมื่อเข็มออกมาแล้ว รูที่เกิดจากการแทงจะปิดสนิท ไม่เกิดการรั่วของก๊าซ

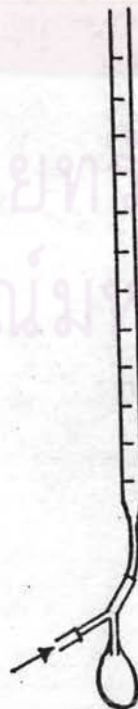
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (double-pipe heat exchanger) โดยน้ำเย็นอยู่ในท่อชั้นนอก และก๊าซอยู่ในท่อชั้นใน ท่อชั้นนอกเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว ท่อชั้นในเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1/8 นิ้ว เมื่อก๊าซผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน น้ำและไฮโดรคาร์บอนเหลวจะกลั่นตัวเป็นของเหลวอยู่ทางก้านล่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำหน้าที่เก็บของเหลวจากการกลั่นตัว

รูปที่ 4.4 ที่สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซขณะร้อน



รูปที่ 4.5 เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ



ศูนย์วิทยุวิทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ

เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซประกอบด้วยหลอดแก้วที่มีซีลขอบปริมาตร ต่อกับหลอดแก้วรูปทิว U ท้ายสายยางถึงรูปที่ 4.5 ด้านหนึ่งของหลอดแก้วรูปทิว U ต่อกับสายยาง ซึ่งเป็นทางเข้าของก๊าซที่จะวัดอัตราการไหล ด้านที่เหลือต่อกับลูกยางซึ่งภายในบรรจุแอมก ซึ่งจะถูกบีบออกมาขณะวัดอัตราการไหล เกิดเป็นฟิล์ม (film) ของแอมก ก๊าซจะพาฟิล์มนี้วิ่งไปในหลอดแก้วที่มีซีลขอบปริมาตร เมื่อทำการจับเวลาการวิ่งของฟิล์ม ก็จะวัดอัตราการไหลของก๊าซ

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์

จุดที่เก็บตัวอย่างมีสองจุด จุดแรกอยู่ที่จุดเก็บตัวอย่างก๊าซขณะร้อน อุณหภูมิประมาณ 180°C เข็มฉีกก๊าซที่ใช้เก็บตัวอย่างที่จุดนี้ถูกพันด้วยฉนวนความร้อนและอบอยู่ในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 180°C เมื่อจะเก็บตัวอย่างจึงนำเข็มฉีกก๊าซออกจากเตาอบ เก็บตัวอย่างก๊าซขณะร้อน แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกสโครมาโทกราฟี (VISTA 4000 FID) ทันที ฉนวนความร้อนที่พันเข็มฉีกก๊าซจะรักษาอุณหภูมิของก๊าซตัวอย่างให้ร้อนไถ่ตามพอสำหรับนำไปวิเคราะห์ จุดนี้มีไว้สำหรับวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการสังเคราะห์

จุดเก็บตัวอย่างจุดที่สองเป็นตัวอย่างอยู่ระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ การเก็บตัวอย่างทำโดยการใช้เข็มฉีกก๊าซแทงทะลุท่ออย่าง เก็บตัวอย่างก๊าซ แล้วนำไปวิเคราะห์ครั้งแรกด้วยเครื่องแกสโครมาโทกราฟี ชนิด TCD (GOW MAC SERIES 150 TCD) เพื่อวิเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ ครั้งที่สองนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแกสโครมาโทกราฟี ชนิด FID (GOW MAC SERIES 750 FID) เพื่อวิเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนเบาที่อยู่ในก๊าซ ตัวอย่างที่ใหม่มีลักษณะพิเศษที่เมื่อถึงเข็มฉีกก๊าซออกมาแล้ว รูที่เกิดจากการเก็บก๊าซจะปิดสนิท ไม่เกิดการรั่วของก๊าซ

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดสอบเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์, Co - 0138 E 1/8 ของบริษัทฮาร์ชอว์ จำกัด (Harshaw Ltd.) และมีลักษณะเฉพาะดังนี้

โคบอลต์	25.1 %
รีดิวส์โคบอลต์ (reduced cobalt)	8.08 %
ค่าอัตราส่วนรีดิวส์ (reduced value ratio)	32.19
บนพื้นฐานของซิลิกา (base silica)	
ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมด (total pore volume)	0.835 ลบ.ซม./กรัม
พื้นที่ผิว	72.2 ตร.ม./กรัม

ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกบดและร่อนโคลนมากังการางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงการกระจายของขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมช	น้ำหนัก (กรัม)
100-150	0.30
150-200	0.54
200-250	0.72
250-300	0.35
300-400	0.19
	รวม 2.10

จากตารางที่ 4.1 และอาศัยวิธีการหาขนาดเฉลี่ยของอนุภาคในเขตที่ 2 สามารถคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยากังแสดงในตารางที่ 4.2

$$\text{ได้} \quad \sum (x_i/d_{pi}) = 14.186$$

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum (x_i/d_{pi})} = 70.49 \text{ ไมครอน}$$

จากการวัดความหนาแน่นของตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่ามีความเท่ากับ 1.09 กรัม/ลบ.ซม. ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 2.10 กรัมที่ใช้จึงมีปริมาตร 1.93 ซม³ ตัวเร่งปฏิกิริยาถูก

ตารางที่ 4.2 แสดงการหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยา

กรัม	d_{pi} (ไมครอน)	x_i	$x_i/d_{pi} \times 10^3$
0.30	125.5	0.143	1.139
0.54	89.0	0.257	2.888
0.72	68.5	0.343	5.007
0.35	55.5	0.167	3.009
0.19	42.0	0.090	2.143

บรรจุในเตาปฏิกรณ์เคมีและมีปริมาตรของเบกเท่ากับ 3.43 ลบ.ซม. ความสูงของเบกเท่ากับ 4.94 ซม.

สถานะของการปฏิบัติการ

การทดลองนี้ได้นำที่จะผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยหลักเนื่องจากการเกิดผลิตภัณฑ์ซึ่งเพราะซึ่งจะทำให้เม็ทตัวเร่งปฏิกิริยาเกาะกันเป็นเม็ทที่ใหญ่ขึ้น (15) เป็นอุปสรรคต่อฟลูอิดไอเซชัน และทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมลง (1) เพราะซึ่งที่เก็ทขึ้นจะอยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้การทดลองนี้จึงทำให้ความดันบรรยากาศ เพราะความดันที่สูงจะเกิดซึ่งมากทั้งตารางที่ 3.5 สำหรับอุณหภูมิของการปฏิบัติการถูกเลือกให้ทดลองที่ 240 210 และ 180 °ซ เพราะที่อุณหภูมิค่าก่าานี้จะเกิดซึ่งมากทั้งรูปที่ 3.5 อัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซค์ถูกเลือกให้เท่ากับ 3:1 และ 2:1 เพราะถ้าค่าก่าานี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเสื่อมโดยเร็ว และยังให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาค่ามาก (18)

แผนการทดลอง

การทดลองได้ถูกวางแผนไว้ว่าจะทำการทดลองเป็นสองช่วง ในช่วงแรกจะใช้อัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซค์เป็นประมาณ 3:1 และอุณหภูมิประมาณ 240, 210 และ 180 °ซ ตามลำดับ ในช่วงที่สองจะใช้อัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซค์เป็นประมาณ 2:1 และอุณหภูมิ 240, 210 และ 180 °ซ

ตามลำดับ การทดลองแต่ละช่วงจะใช้เวลาประมาณ 9 ชั่วโมง (ที่สภาวะของการปฏิบัติการหนึ่งใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง) และก่อนการทดลองแต่ละช่วงจะทำการรีแอกทีเวท (reactivate) ทิวเร่งปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 250°C (1) โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซประมาณ 15 ลบ.ซม./นาที

การตรวจสอบการเสื่อมของทิวเร่งปฏิกิริยา

ก่อนการทดลองจะเริ่มขึ้น จำเป็นต้องตรวจสอบว่าทิวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมเกิดขึ้นหรือไม่ภายในช่วงเวลาของการทดลอง (9 ชั่วโมง) เพื่อจะให้ความน่าเชื่อถือของการทดลองที่เกิดขึ้นจะมีผลเนื่องจากการเสื่อมของทิวเร่งปฏิกิริยากับหรือไม่

สภาวะของการปฏิบัติการที่ใช้สำหรับการตรวจสอบ การเสื่อมของทิวเร่งปฏิกิริยา คืออัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นประมาณ 2:1 อุณหภูมิประมาณ 240°C ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ต่ำและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะเกิดการเสื่อมของทิวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย (18)

การตรวจสอบการเสื่อมของทิวเร่งปฏิกิริยาเริ่มด้วยการรีแอกทีเวททิวเร่งปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และมีอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนประมาณ 15 ลบ.ซม./นาที หลังจากนั้นจึงให้ก๊าซสังเคราะห์ไหลเข้าไปในเตาปฏิกรณ์เคมีเป็นเวลา 9 ชั่วโมง และผลของการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าต่างๆที่วัดได้ในการทดลองเพื่อตรวจสอบการเสื่อมของทิวเร่งปฏิกิริยา

ชั่วโมงของการทดลอง	อุณหภูมิ, $^{\circ}\text{C}$	CO		H_2		ก๊าซขาออก ลบ.ซม./นาที
		P (psig)	Δh (ซม.)	P (psig)	Δh (ซม.)	
2	239	4.6	16.5	4.70	18.90	20.66
4	241	4.6	16.2	4.65	18.25	19.81
6	241	4.6	16.1	4.65	18.10	19.82
7	241	4.6	16.5	4.70	18.70	20.70
8	241	4.6	16.1	4.65	18.20	19.92
9	242	4.6	16.4	4.60	18.00	19.90

ในการร่างที่ 4.3 อุณหภูมิเป็นอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เคมี เป็น °C

Δh เป็นความแตกต่างของความสูงของปรอทในเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีหน่วยเป็น มม.

P เป็นความดันของก๊าซตรงจุกก่อนเข้าเครื่องวัดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ มีหน่วยเป็น psig

อัตราการไหลของก๊าซขาออกวัดด้วยเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ จึงเป็นอัตราการไหลที่หนึ่งบรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง จากค่า Δh ในการร่างที่ 4.3 สามารถรู้อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนได้จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ซึ่งได้จากการคลาสิเบรท โดยใช้เครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ ดังนั้นอัตราการไหลของก๊าซในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 จึงเป็นอัตราการไหลของก๊าซที่อุณหภูมิห้อง และความดันหนึ่งบรรยากาศ

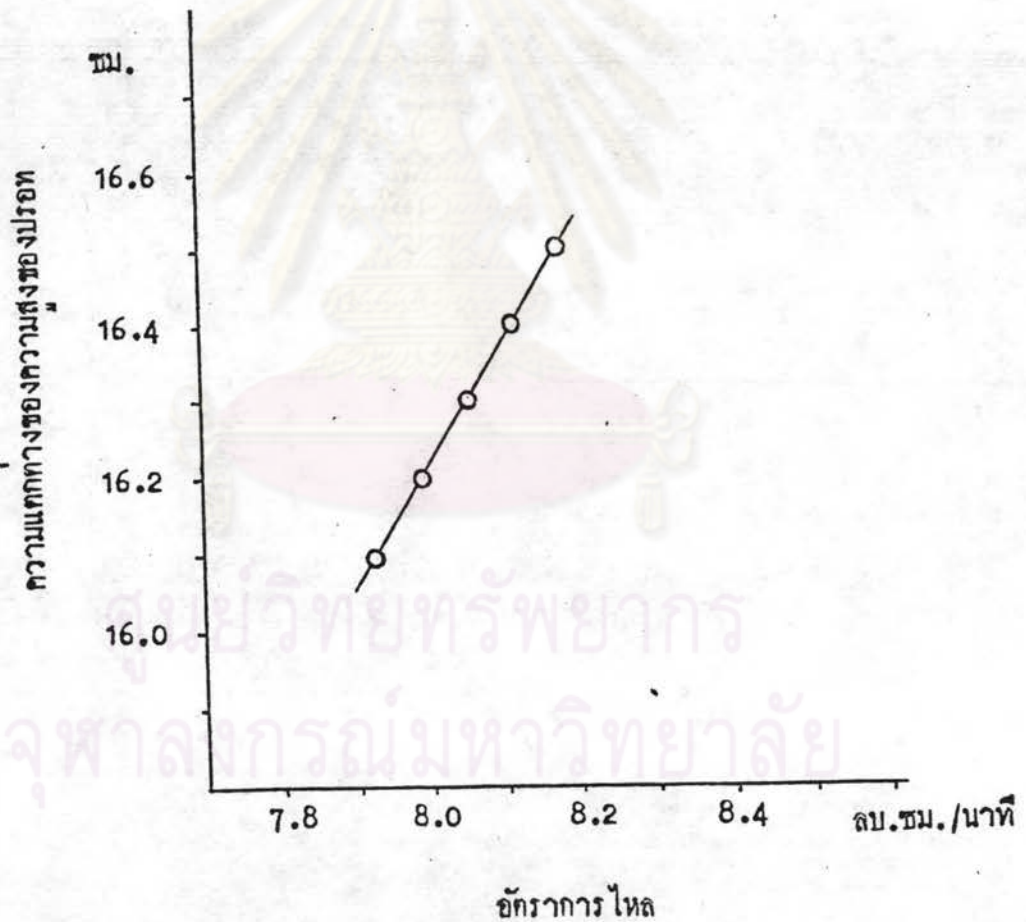
การคลาสิเบรทได้ถูกทำอย่างละเอียดโดยการปรับให้ความดันที่จุกก่อนเข้าเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์ เท่ากับความดันที่จุกเดียวกันในเวลาที่ทำการสังเคราะห์ ซึ่งทำได้โดยการปรับวาล์วที่อยู่ระหว่างเครื่องวัดอัตราการไหลแบบมาโนมิเตอร์และเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ เพื่อให้มีความดันลักษณะทำการคลาสิเบรท เท่ากับความดันลักษณะทำการทดลองสังเคราะห์ ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราการไหลของก๊าซเป็นจริงเหมือนกับขณะทำการทดลองสังเคราะห์ (รูปที่ 4.8)

การตรวจสอบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีการเสื่อมลงในช่วงของการทดลองเป็นเวลา 9 ชั่วโมงหรือไม่ ทำได้โดยการคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของก๊าซที่หกหายไป โดยที่

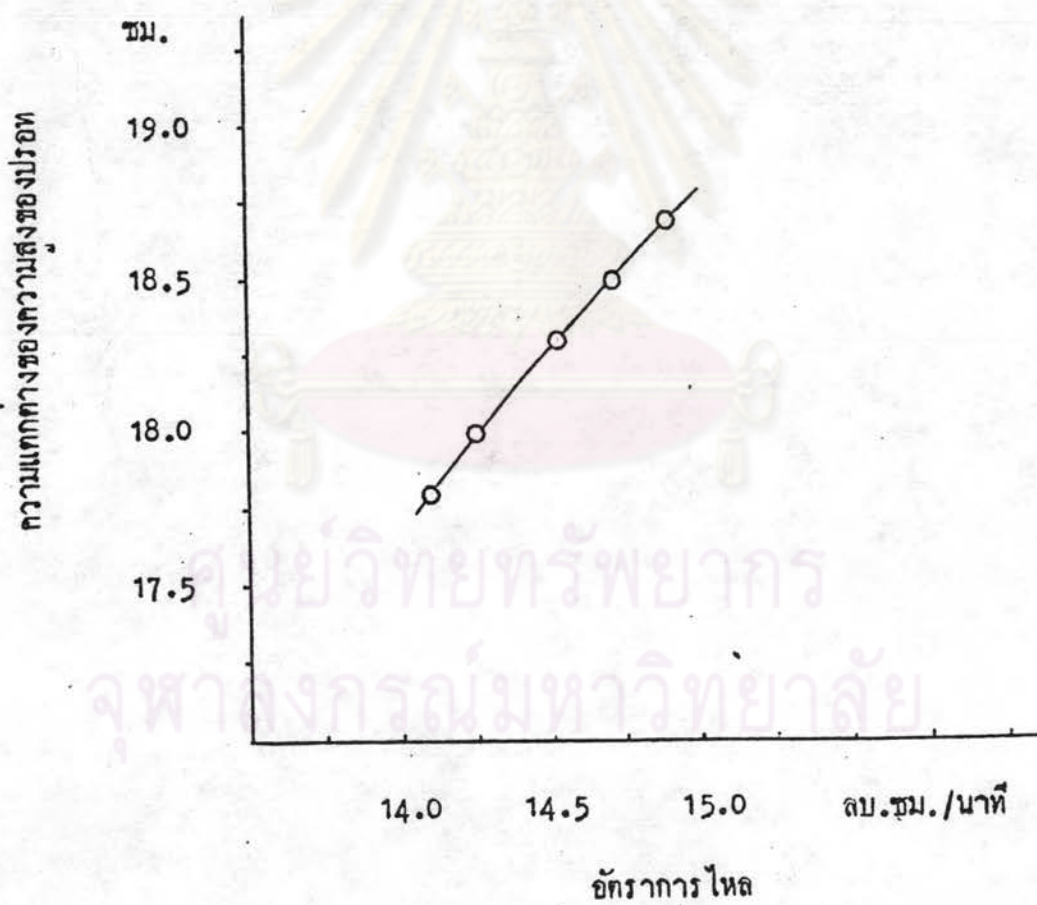
$$\% \text{ ของก๊าซที่หกหายไป} = \frac{\text{ลบ. ซม. ของก๊าซขาเข้า} - \text{ลบ. ซม. ของก๊าซขาออก}}{\text{ลบ. ซม. ของก๊าซขาเข้า}} \times 100$$

ถ้าหาก % ของก๊าซที่หกหายไปยังมีค่าคงเดิมตลอดในช่วงของการทดลอง ซึ่งก็คือ % การแปลงรมมีค่าคงเดิม แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เสื่อมในช่วงของการทดลอง อัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนได้จากรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 โดยใช้ จากตารางที่ 4.3 และผลของการคำนวณ % ของก๊าซที่หกหายไปแสดงไว้ใน

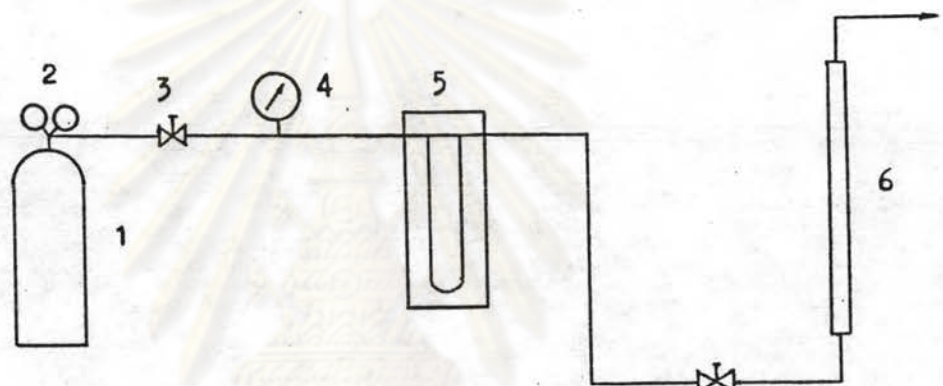
รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ กับความแตกต่างของความสูงปรอท ในช่วงการทดลองตรวจสอบ การเชื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน
กับความแตกต่างของความสูงของปรอท ในระหว่างการทดลอง
ตรวจสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.8 แผนภาพของเครื่องมือทำการคาไลเบรต



1 คือถังก๊าซ

2 คือเครื่องปรับความดัน

3 คือวาล์ว

4 คือเกจวัดความดัน

5 คือเครื่องวัดอัตราการไหลแบบไมโครมิเตอร์

6 คือเครื่องวัดอัตราการไหลแบบฟองก๊าซ

ตารางที่ 4.4 แสดงผลของการทดลองเพื่อตรวจสอบการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา

ช่วงเวลาของการทดลอง, ชม.	อุณหภูมิ (°C)	H ₂ :CO	ก๊าซเข้า, ลบ.ซม./นาที			ก๊าซออก ลบ.ซม./นาที	% ก๊าซที่หายไ
			H ₂	CO	H ₂ +CO		
2	239	1.85	15.10	8.18	23.28	20.66	11.25
4	241	1.81	14.47	7.99	22.46	19.81	11.80
6	241	1.81	14.34	7.93	22.27	19.82	11.00
7	241	1.82	14.90	8.18	23.08	20.70	10.31
8	241	1.82	14.42	7.93	22.35	19.92	10.87
9	242	1.76	14.25	8.11	22.36	19.90	11.00

ตารางที่ 4.4

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ากอลของของการทดลองเป็นเวลา 9 ชั่วโมง ไม่สามารถเห็นการเชื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นผลของการทดลองของงานวิจัยนี้จะไม่ มีผลเนื่องจากการเชื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลอง

การทดลองเริ่มด้วยการรีแอกทีเวทตัวเร่งปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 250 °ซ โดยใช้อัตราการไหลของก๊าซประมาณ 15 ลบ.ซม./นาที

หลังจากนั้นก็เริ่มการทดลองที่อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นประมาณ 3:1 และอุณหภูมิประมาณ 240, 210 และ 180 °ซ ตามลำดับ แต่ละจุดของการทดลองใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าถึงสภาวะที่คงที่ (steady state) ก่อนที่จะวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ หลังจากนั้น ได้รีแอกทีเวทตัวเร่งปฏิกิริยาอีกครั้งหนึ่งโดยใช้ สภาวะการปฏิบัติการเหมือนกับครั้งแรก จึงเริ่มการทดลองในช่วงที่สอง คือใช้อัตราส่วนของ ก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นประมาณ 2:1 และอุณหภูมิประมาณ 240, 210 และ 180 °ซ ตามลำดับ ข้อมูลของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผลของการทดลองที่สภาวะของการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ, °ซ	CO		H ₂		อัตราไหลของ ก๊าซออก ลบ.ซม./นาที
	Δh (ซม.)	P (psig)	Δh (ซม.)	P (psig)	
242	13.10	3.80	20.95	5.20	18.86
211	13.00	3.80	21.20	5.25	22.60
181	12.90	3.75	21.40	5.30	23.12
241	16.70	4.75	18.80	4.80	20.60
211	16.70	4.75	18.65	4.75	22.65
179	16.60	4.70	18.65	4.75	22.82

จากค่า Δh ในตารางที่ 4.5 สามารถรู้ค่าอัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนเข้าได้จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ซึ่งได้จากการคลาสิเบรทเช่นเดียวกับการคลาสิเบรทในการทดลองตรวจสอบการเชื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของการวิเคราะห์ก๊าซออกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงอยู่ในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลของการวิเคราะห์ก๊าซออก

H ₂ :CO โดยประมาณ	อุณหภูมิ, °C	%	
		H ₂	CO
3:1	242	66.0	23.5
3:1	211	67.8	23.9
3:1	181	68.0	23.7
2:1	241	59.2	33.1
2:1	211	60.8	33.4
2:1	179	63.5	34.3

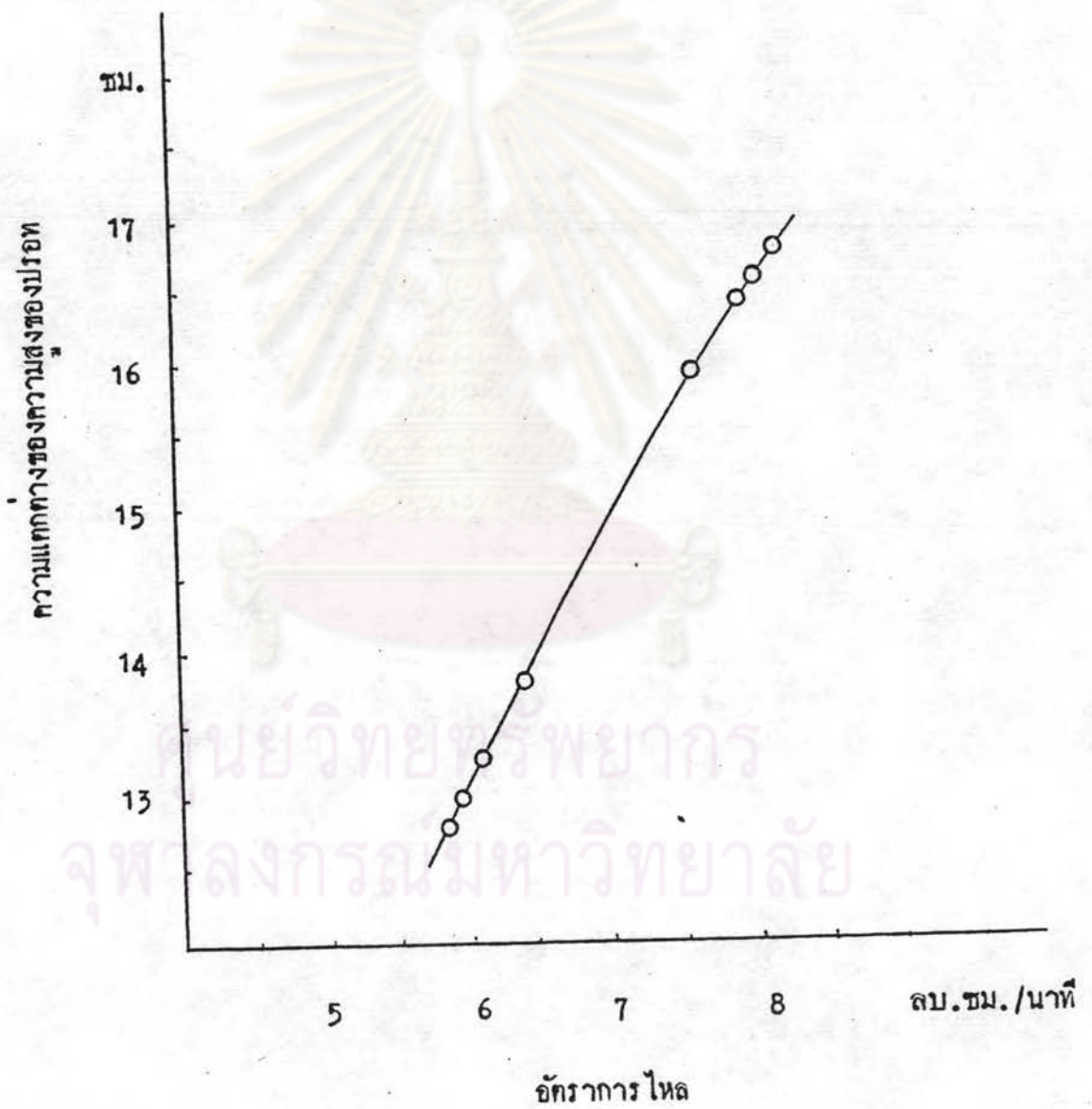
จากค่าอัตราการไหลของก๊าซออกในตารางที่ 4.5 และผลการวิเคราะห์ก๊าซในตารางที่ 4.6 จึงสามารถคำนวณปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่เหลือจากปฏิกิริยาได้ ผลของการคำนวณรวบรวมไว้ในตารางที่ 4.7 ซึ่ง

$$\% \text{ การแปลงรูป} = \frac{\text{ปริมาณของก๊าซที่ทำปฏิกิริยาไป}}{\text{ปริมาณของก๊าซที่เข้าเตาปฏิกรณ์เคมี}} \times 100$$

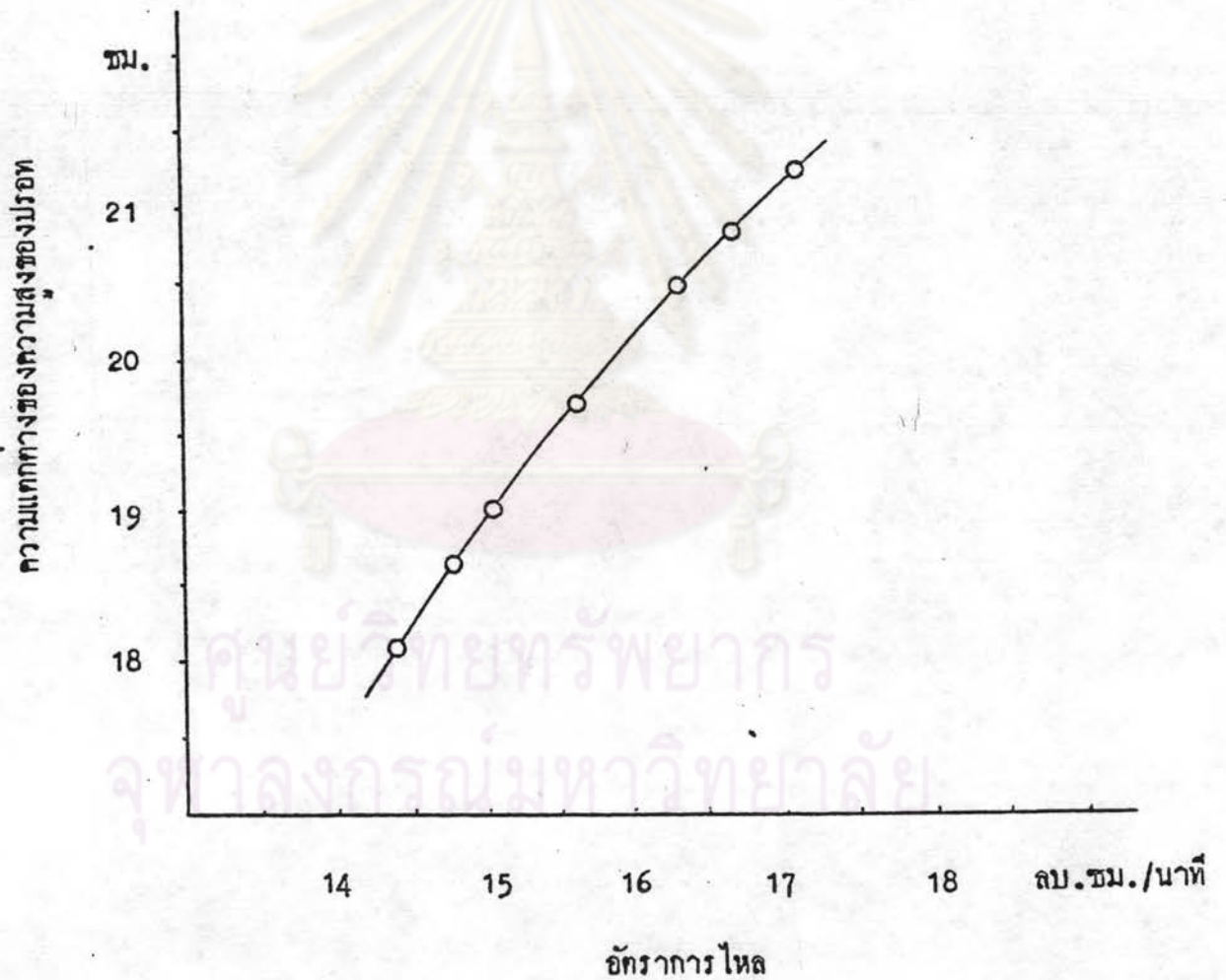
SVH ในสมการสุดท้ายของตารางที่ 4.7 คือความเร็วเชิงสเปซ มีหน่วยเป็น (ชม.)⁻¹ โดยที่

$$SVH = \frac{\text{อัตราการไหลของก๊าซสังเคราะห์ (ที่สภาวะมาตรฐาน)}}{\text{ปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา}}$$

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์กับความแตกต่างของความสูงของปรอท ในช่วงของการทดลอง



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนกับความแตกต่างของความสูงของปรอท ในช่วงของการทดลอง



ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองที่สภาวะของการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ T	H ₂ :CO	CO ลบ.ทม./นาที				H ₂ ลบ.ทม./นาที				H ₂ +CO ลบ.ทม./นาที				SVH
		เข้า	ออก	หายไป	การแปลงรูป	เข้า	ออก	หายไป	การแปลงรูป	เข้า	ออก	หายไป	การแปลงรูป	
242	2.79	6.02	4.43	1.59	26.4	16.79	12.45	4.34	25.9	22.81	16.88	5.93	26.0	640
211	2.87	5.95	5.41	0.54	9.1	17.06	15.33	1.73	10.2	23.01	20.74	2.27	9.9	646
181	2.94	5.88	5.48	0.40	6.8	17.28	15.73	1.55	9.0	23.16	21.21	1.95	8.4	650
241	1.84	8.12	6.83	1.29	15.9	14.96	12.20	2.76	18.4	23.08	19.03	4.05	17.5	648
211	1.82	8.12	7.57	0.55	6.8	14.78	13.77	1.01	6.8	22.90	21.34	1.56	6.8	643
179	1.84	8.05	7.83	0.22	2.7	14.78	14.48	0.30	2.0	22.83	22.31	0.52	0.2	641

สภาพพลูโตไคเซชันของการทดลอง

ความเร็วพลูโตไคเซชันต่ำสุดสามารถคำนวณได้โดยอาศัยสมการที่ 2.10 ถ้าเป็นค่าความหนืดของก๊าซสังเคราะห์ และหาได้จากสมการที่ 4.1 ซึ่งอาจมีความผิดพลาดได้ 10 % (11)

$$\mu_m = \frac{\sum y_1 \mu_1 (M_1)^{1/2}}{\sum y_1 (M_1)^{1/2}} \quad \dots(4.1)$$

เมื่อ μ_m คือความหนืดของก๊าซผสม

y_1 คือเศษส่วนโมล (mole fraction) ของก๊าซ

M_1 คือน้ำหนักโมเลกุลของก๊าซ

ความหนืดของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.8

ความหนืดของก๊าซสังเคราะห์ที่อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และอุณหภูมิต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.9 โดยอาศัยสมการที่ 4.1 และใช้ค่าความหนืดในตารางที่ 4.8 ตารางที่ 4.9 ก็แสดงความเร็วพลูโตไคเซชันต่ำสุดซึ่งคำนวณโดยใช้สมการ 2.10 และใช้ค่าความหนืดในตารางเดียวกันไว้ด้วย สมการที่ 2.10 จะใช้ได้เมื่อ $Re_p < 20$ เท่านั้น ผลการคำนวณ Re_p พบว่าทุกๆ จุดของการทดลอง $Re_p < 20$ เช่นที่อุณหภูมิ 242 °C อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็น 2.79 ปรากฏว่า $Re_p = 1.13 \times 10^{-3} \ll 20$ ดังนั้นสมการที่ 2.10 จึงใช้งานได้

อัตราการไหลของก๊าซสังเคราะห์ที่อุณหภูมิของการทดลองสามารถถูกคำนวณโดยอาศัยสมการที่ 4.2 ซึ่งใช้ได้กับความดันต่ำ (11)

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad \dots(4.2)$$

โดยที่ v_1 คืออัตราการไหลเข้าของก๊าซสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้อง (จากตารางที่ 4.7)

ตารางที่ 4.8 แสดงความหนืดของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (เซนติพอยส์)	
	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์
240	0.0127	0.0262
210	0.0121	0.0250
180	0.0116	0.0240

ตารางที่ 4.9 แสดงความหนืดของก๊าซสังเคราะห์ที่สภาวะของการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ, °C	H ₂ /CO	μ (poise) $\times 10^4$	u_{mf} , ซม./วินาที
242	2.79	2.04	0.157
211	2.87	1.94	0.166
181	2.94	1.85	0.173
241	1.84	2.17	0.148
211	1.82	2.08	0.158
179	1.84	1.99	0.162

V_2 คืออัตราการไหลของก๊าซสังเคราะห์ที่เข้าเตาปฏิกรณ์เคมีที่อุณหภูมิของกา-
สังเคราะห์

T_1 คืออุณหภูมิห้อง (เคลวิน)

T_2 คืออุณหภูมิของการสังเคราะห์ (เคลวิน)

ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 4.10 และเมื่อหารอัตราการไหลของก๊าซสัง-
เคราะห์ด้วยพื้นที่หน้าตัดของเตาปฏิกรณ์เคมีก็จะได้ความเร็วซูเปอร์ฟิเชียน ดังที่ได้แสดงไว้
ในตารางเดียวกัน ตารางที่ 4.10 ยังได้แสดงสภาวะของการปฏิบัติการว่าไคท์ที่กึ่งเท่าของ
ความเร็วฟลูอิดิเคชันต่ำสุด

ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคหาได้โดยการใส่สมการที่ 2.18 โดยสมมุติว่าอนุภาค
มีรูปร่างเป็นทรงกลม การคำนวณหาความเร็วสุดท้ายของอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่สุดคือ 400
เมซ เป็นสิ่งจำเป็น เพื่อความแน่ใจว่าก๊าซสังเคราะห์จะไม่พาอนุภาคไหลออกจากเบค
ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคขนาด 400 เมซ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 ในสมมุติสุดท้าย
ซึ่งมีความมากกว่าความเร็วของก๊าซสังเคราะห์ที่ทดลองครั้งนี้เป็นประมาณสี่เท่าขึ้นไป

การตรวจสอบว่าฟลูอิดิเคชันเบคของการทดลองนี้เป็นเบคแบบสม่ำเสมอ หรือเป็นเบค
แบบมีฟองก๊าซ ทำได้โดยอาศัยสมการที่ 2.21 และสมการที่ 2.22 ว่า

$$(Fr_{mf})(Re_{p,mf}) \frac{(\rho_s - \rho_g)}{\rho_g} \frac{L_{mf}}{d_t} \text{ มากกว่า } 100 \text{ หรือน้อยกว่า } 100$$

โดยที่

$$Fr_{mf} = \frac{u_{mf}^2}{d_p g}$$

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu}$$

$$u_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_g) g}{1650 \mu} \dots (2.10)$$

ตารางที่ 4.10 แสดงสภาพสูญเสียโทเคชั่นของการทดลอง

อุณหภูมิ (°C)	H ₂ :CO	อัตราการไหลของก๊าซสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิของการสังเคราะห์ คม.ทม./นาที	ความเร็วรูปเบอร์ พิเชิล (ทม./วินาที)	ค่าเททอง ค _{พรี}	น _t (ทม./วินาที)
242	2.79	38.77	0.931	5.92	3.98
211	2.87	36.76	0.883	5.32	4.19
181	2.94	34.63	0.831	4.79	4.38
241	1.84	39.23	0.942	6.37	3.74
211	1.82	36.58	0.879	5.57	3.91
179	1.84	34.13	0.820	5.08	4.08

และให้ $\rho_s - \rho_g \sim \rho_g$ เพราะ ρ_g มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ ρ_s (8)

ดังนั้น

$$(Fr_{mf})(Re_{p,mf}) \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \frac{L_{mf}}{d_t} \sim \frac{L_{mf}^4 \rho_s^4 d_p^6 g^2}{d_t \mu^4 (1650)^3}$$

ในที่นี้ $d_t = 0.94$ ซม.

$\rho_s = 1.09$ กรัม/

$d_p = 7.05 \cdot 10^{-3}$ ซม.

ให้ L_{mf} มีค่าประมาณเท่ากับ ความสูงของเบกขณะยังไม่ให้เกิดปรากฏการณ์ฟลูอิโดไรส์ คือเท่ากับ 4.94 ซม.

ใช้ค่า μ ที่อุณหภูมิ 181°C $H_2/CO = 2.94$ ซึ่งเป็นค่า μ ที่น้อยที่สุดของการทดลอง เพื่อให้ผลการคำนวณมีค่ามากที่สุด ค่า μ แสดงในตารางที่ 4.9

ผลการคำนวณปรากฏว่า

$$(Fr_{mf})(Re_{p,mf}) \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_g} \frac{L_{mf}}{d_t} \sim 0.165 \ll 100$$

ดังนั้น ฟลูอิโดไรส์เบกของการทดลองนี้ทุกจุดเป็นเบกแบบสม่ำเสมอ

การคำนวณการขยายตัวของเบกอาศัยรูปที่ 2.3 โดยสมมุติว่ารูปที่ 2.3 สามารถใช้ได้กับการทดลองนี้ การคำนวณจะใช้ค่าต่างๆที่สภาวะของการปฏิบัติการ อุณหภูมิ 241°C $H_2/CO = 1.84$ เพราะให้การขยายตัวของเบกมากที่สุด ค่าที่ใช้คำนวณมี

$$d_p = 70.49 \text{ ไมครอน} = 2.775 \cdot 10^{-3} \text{ นิ้ว}$$

$$v_Q = 0.148 \text{ ซม./วินาที}$$

$$v_0 = 0.942 \text{ ซม./วินาที}$$

$$v_0 - v_Q = 0.794 \text{ ซม./วินาที} = 0.313 \text{ ฟุต/วินาที}$$

$$\frac{0.065 (v_0 - v_Q)}{(D_p)^{0.5}} = \frac{0.065(0.313)}{(2.775 \cdot 10^{-3})^{0.5}}$$

$$= 0.386$$

ซึ่งตรงกันโดยประมาณ (จากรูปที่ 2.3) กับ $1 - \frac{L_Q}{L_{\max}} = 0.4$

หรือ $\frac{L_Q}{L_{\max}} = 0.6$

ให้ L_Q ประมาณเท่ากับความสูงของเบคที่ยังไม่เกิดฟลูอิเดชัน คือ 4.94 ซม.

ดังนั้น $L_{\max} = 8.23 \text{ ซม.}$

นั่นก็คือการขยายตัวของเบคของทุกสภาวะของการปฏิบัติการจะไม่เกินความสูง 8.23 ซม.

การกระจายของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน

การวิเคราะห์หากการกระจายของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนแสดงไว้ในภาคผนวก ข ในบทนี้แสดงผลของการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.11 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบ โดยให้น้ำหนักคาร์บอนของ C_1 ถึง C_{10} รวมกันเป็นร้อยละน้ำหนัก การทำเช่นนี้ เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวิเคราะห์ อย่างไรก็ตาม น้ำหนักคาร์บอนของ C_{11}^+ สามารถถูกทำนายโดยการวิเคราะห์การกระจายของซัลส์-ฟลอรี

เมื่อหารน้ำหนักคาร์บอนในตารางที่ 4.11 ด้วยตัวเลขคาร์บอน ก็จะได้อัตราที่ 4.12 ซึ่งแสดงจำนวนโมลที่เกิดขึ้นของตัวเลขคาร์บอนแต่ละตัวในลักษณะเปรียบเทียบ และจากตารางที่ 4.12 จึงเขียนกราฟที่แสดงการกระจายแบบซัลส์-ฟลอรี ดังแสดงในรูปที่ 4.11.ก ถึงรูปที่ 4.11.ง ตั้งแต่ C_5 จนถึง C_{10} โคลเส้นกราฟเป็นเส้นตรง (ยกเว้น C_{10} ของสภาวะของการปฏิบัติการที่ 179 ซ $H_2/CO = 1.84$ จึงไม่แสดงจุดนี้ในรูป) ค่า \propto ของการกระจายแบบซัลส์-ฟลอรีแสดงไว้ในตารางที่ 4.13 จากรูปที่ 4.11 จึงทำนายการเกิดของ C_{11}^+ ได้

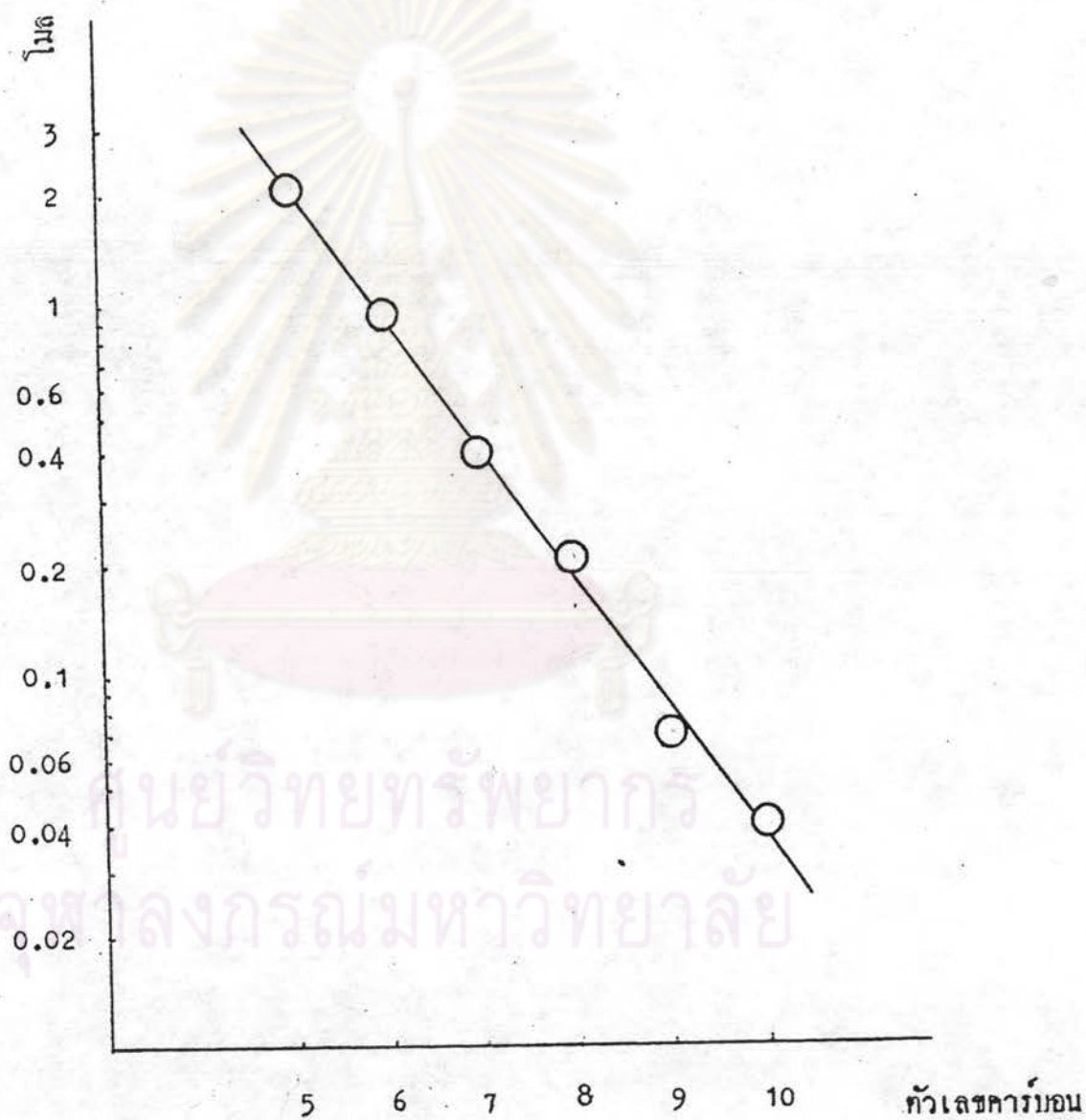
ตารางที่ 4.11 แสดงการกระจายของไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C₁ ถึง C₁₀ ในลักษณะเปรียบเทียบ

อุณหภูมิ T (°C)	H ₂ :CO	น้ำหนักคาร์บอน									
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
242	2.79	46.73	7.37	15.05	9.25	10.38	5.67	2.82	1.68	0.67	0.37
211	2.87	30.81	5.01	14.96	12.61	14.29	9.13	5.48	3.84	2.25	1.63
181	2.94	23.32	1.60	8.67	8.50	13.33	11.66	9.44	9.96	6.99	6.54
241	1.84	38.41	6.71	15.11	10.38	12.64	7.66	4.31	2.46	1.43	0.89
211	1.82	24.16	3.55	11.70	10.60	16.58	11.48	7.39	6.11	4.87	3.56
179	1.84	21.03	2.06	9.97	9.00	12.77	13.61	10.60	9.04	8.43	3.49

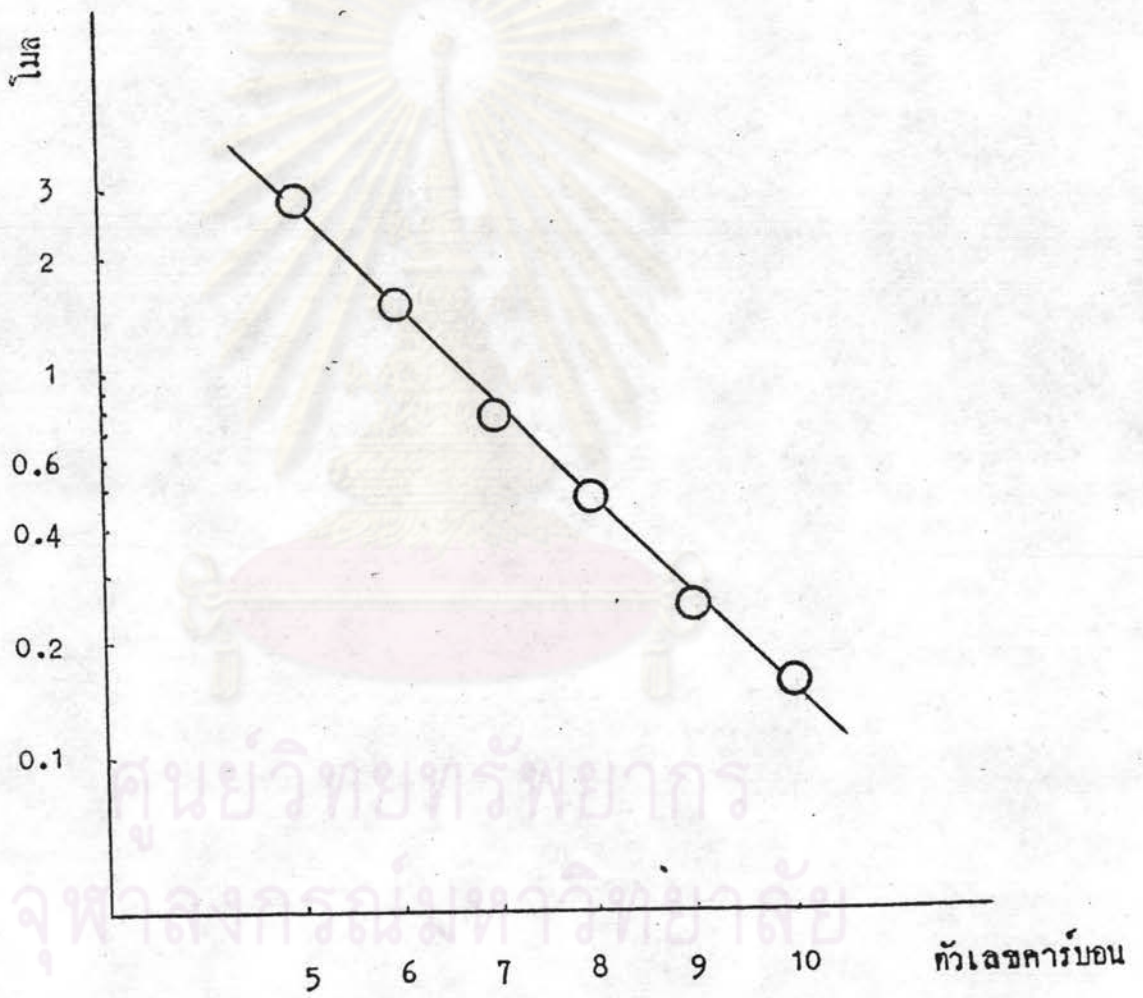
ตารางที่ 4.12 แสดงโมลเปรียบเทียบของการเกิดไฮโดรคาร์บอน

อุณหภูมิ (°C)	H ₂ :CO	โมล									
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
242	2.79	46.73	3.69	5.02	2.31	2.08	0.95	0.40	0.21	0.07	0.04
211	2.87	30.81	2.51	4.99	3.15	2.86	1.52	0.78	0.48	0.25	0.16
181	2.94	23.32	0.80	2.85	2.13	2.67	1.94	1.35	1.25	0.78	0.65
241	1.84	38.41	3.36	5.04	2.60	2.53	1.28	0.62	0.31	0.16	0.09
211	1.82	24.16	1.78	3.50	2.65	3.32	1.91	1.06	0.76	0.54	0.36
179	1.84	21.03	1.03	3.32	2.25	2.55	2.27	1.51	1.13	0.94	0.35

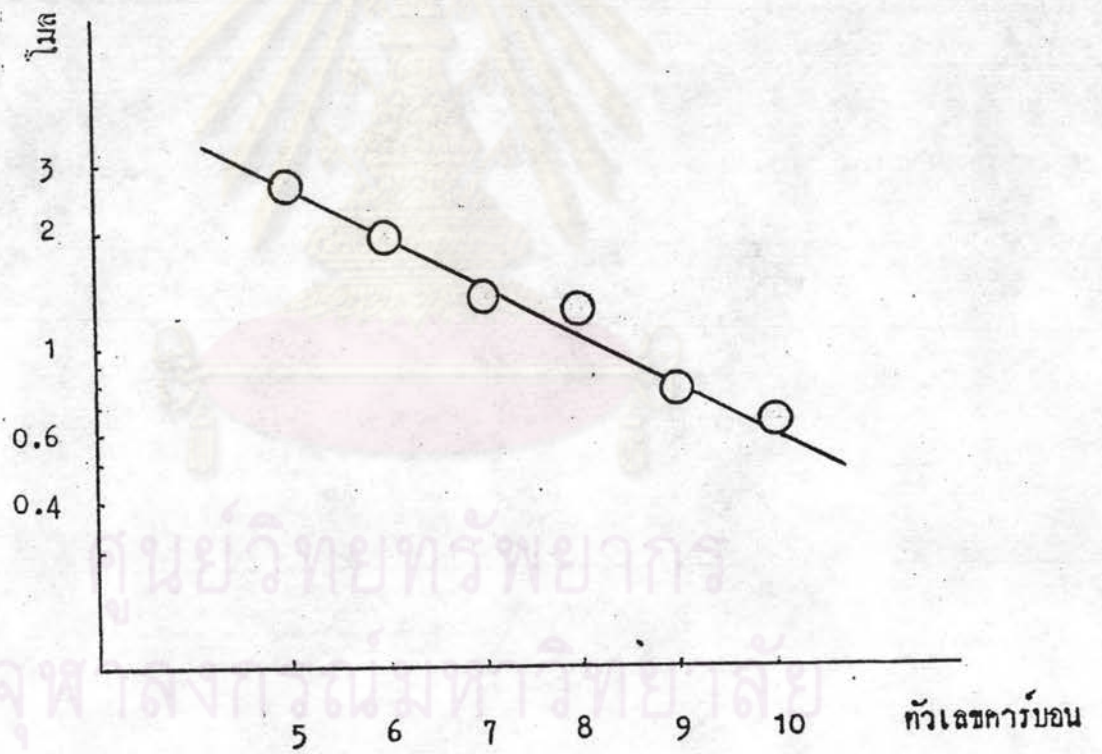
รูปที่ 4.11.ก แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอน
ของการทดลองที่อุณหภูมิ 242 °ซ $H_2/CO = 2.79$



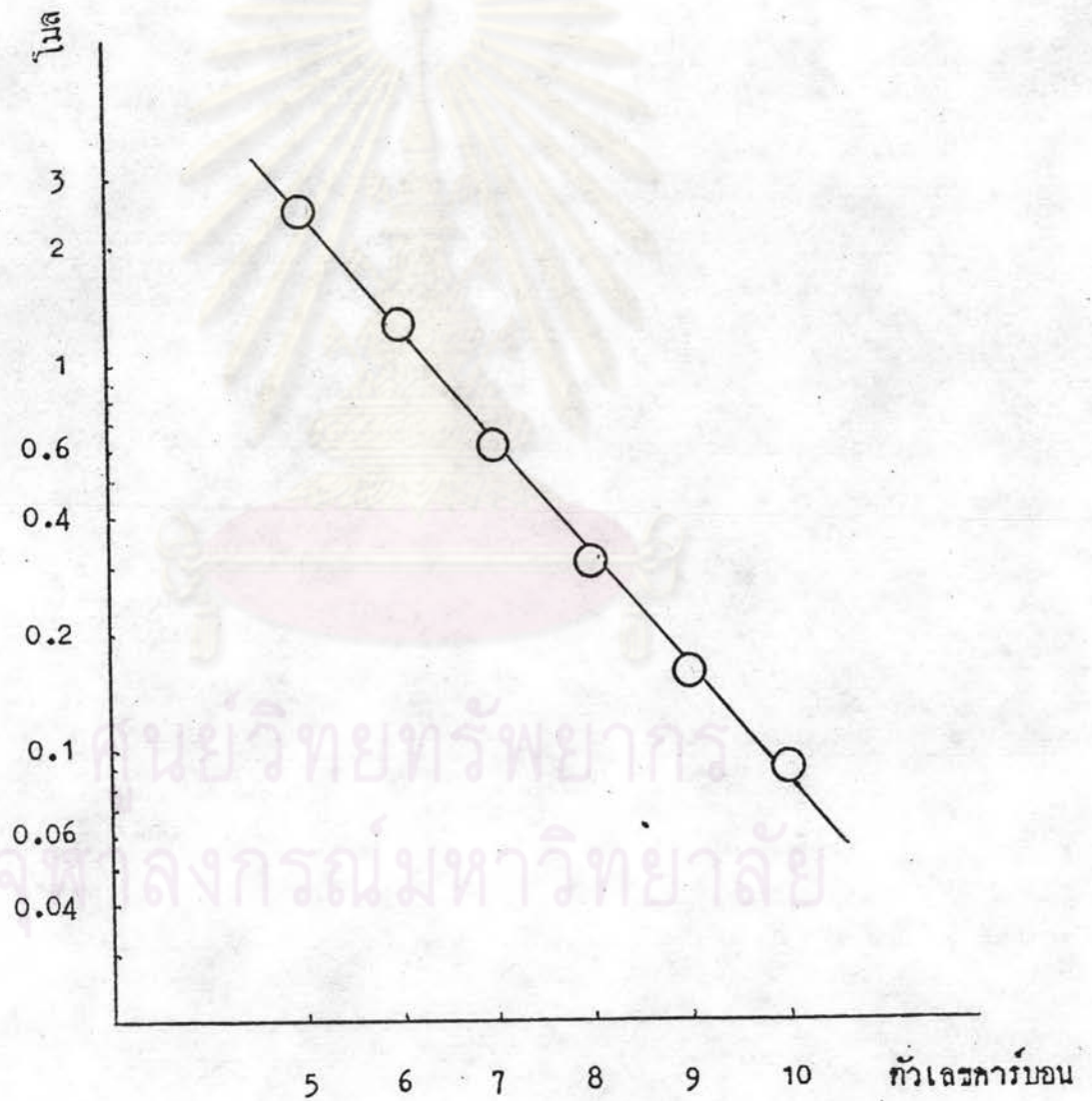
รูปที่ 4.11.๒ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอน
ของการทดลองที่อุณหภูมิ 211 °C $H_2/CO = 2.87$



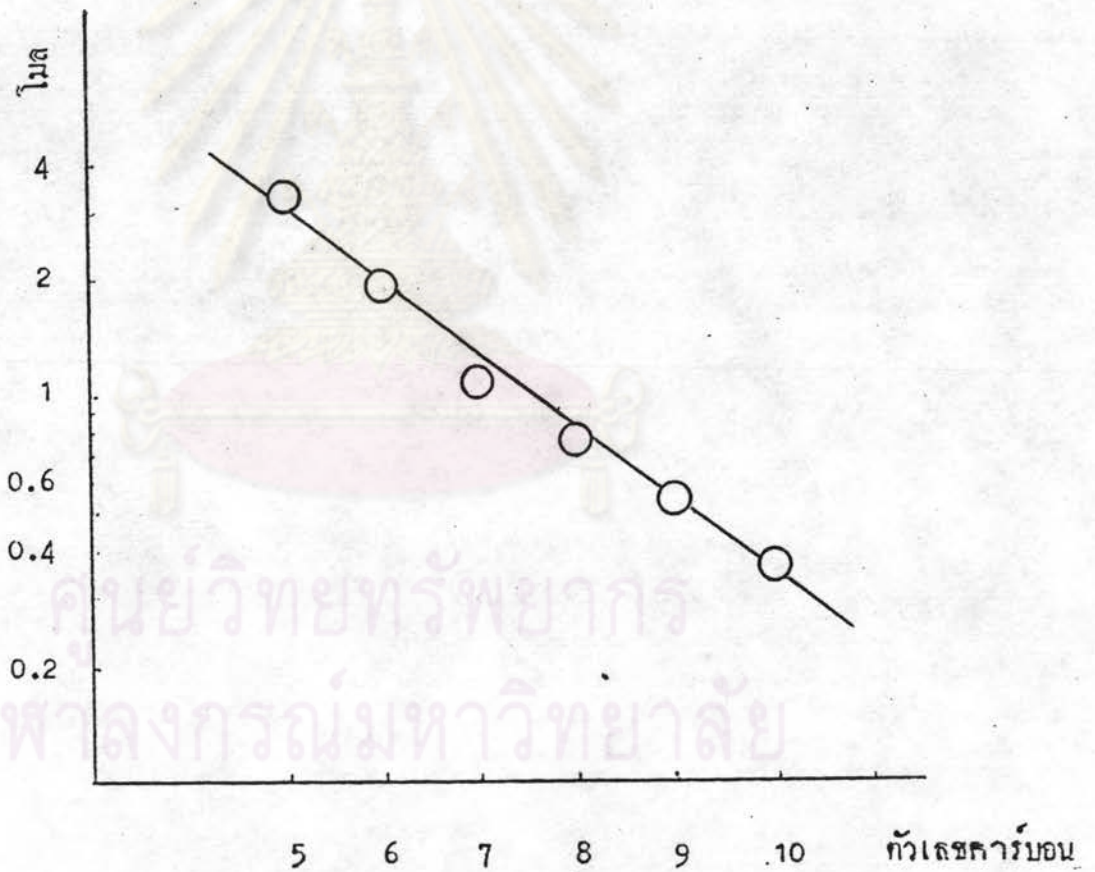
รูปที่ 4.11.ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอน
ของการทดลองที่อุณหภูมิ 181°C $\text{H}_2/\text{CO} = 2.94$



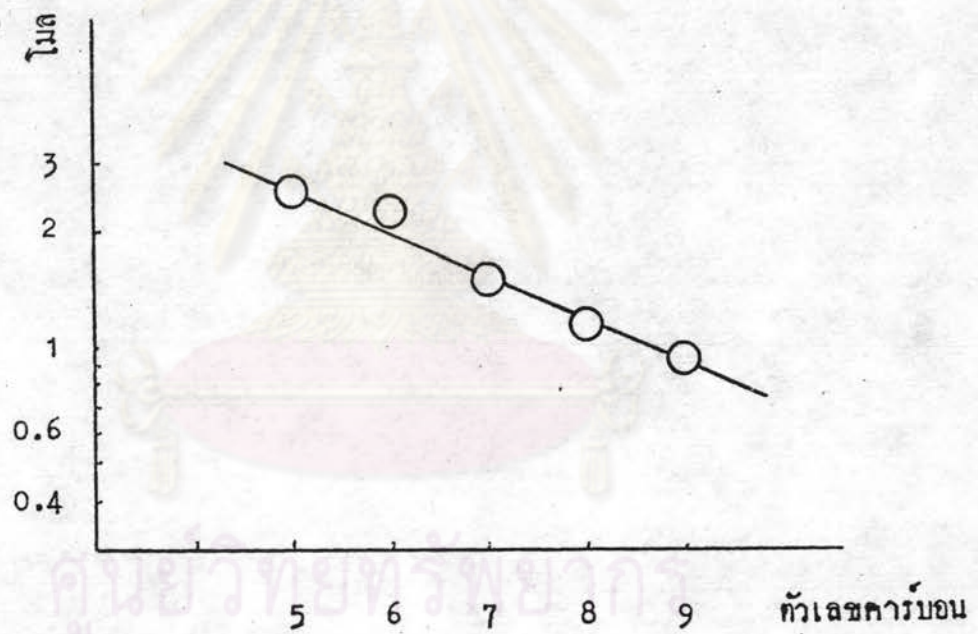
รูปที่ 4.11.ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอน
ของการทดลองที่อุณหภูมิ 241 °C $H_2/CO = 1.84$



รูปที่ 4.11.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอน
ของการทดลองที่อุณหภูมิ 211 °C $H_2/CO = 1.82$



รูปที่ 4.11.ด แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขคาร์บอนกับโมลของไฮโดรคาร์บอน
ของการทดลองที่อุณหภูมิ 179 °C $H_2/CO = 1.84$



ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 แสดงค่า α สำหรับการทดลองแต่ละครั้ง

อุณหภูมิ, °C	H ₂ /CO	α
242	2.79	0.45
211	2.87	0.56
181	2.94	0.75
241	1.84	0.51
211	1.82	0.64
179	1.84	0.77

โดยการก่อสร้างกราฟนี้ออกไปจนถึงตัวเลขคาร์บอนที่มีน้ำหนักคาร์บอนน้อยกว่า 0.005 แล้วรวมน้ำหนักคาร์บอนตั้งแต่ C₁₁ ขึ้นไป ได้เป็นน้ำหนักคาร์บอนของ C₁₁⁺ น้ำหนักคาร์บอนของ C₁₁⁺ ที่ไคโยบนพื้นฐานของน้ำหนักคาร์บอนตั้งแต่ C₁-C₁₀ ซึ่งให้เป็นร้อยละน้ำหนัก จึงได้คำนวณใหม่โดยให้น้ำหนักคาร์บอนตั้งแต่ C₁ จนถึง C₁₁⁺ เป็นร้อยละน้ำหนัก และแสดงไว้ในตารางที่ 4.14



ตารางที่ 4.14 แสดงการกระจายของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่สภาวะของการปฏิบัติการต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	H ₂ :CO	น้ำหนักคาร์บอน										
		C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁ ⁺
242	2.79	46.57	7.34	15.00	9.22	10.34	5.65	2.81	1.67	0.67	0.37	0.34
211	2.87	30.11	4.90	14.62	12.32	13.97	8.92	5.36	3.75	2.20	1.59	2.27
181	2.94	18.53	1.27	6.89	6.75	10.59	9.27	7.50	7.91	5.55	5.20	20.54
241	1.84	38.01	6.64	14.95	10.27	12.51	7.58	4.27	2.43	1.42	0.88	1.03
211	1.82	22.39	3.29	10.84	9.82	15.37	10.64	6.85	5.66	4.51	3.30	7.32
179	1.84	15.16	1.48	7.19	6.49	9.21	9.81	7.64	6.52	6.08	5.09	25.34

หมายเหตุ C₁₁⁺ ของทุกสภาวะของการปฏิบัติการ และ C₁₀ ของสภาวะของการปฏิบัติการ 179 °C H₂/CO = 1.84
 ได้จากการใช้การกระจายของซุสต์-พลอร์