

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา I-8 เพื่อเปลี่ยนนอร์มัลเฮกเซนซึ่งมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงให้เป็นไอโซเฮกเซนซึ่งมีโครงสร้างแบบกิ่งและมีมวลโมเลกุลเท่าเดิม

#### 4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยน

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน ได้ศึกษาภายใต้สภาวะความดันและเวลาคงที่ โดยกระทำที่อุณหภูมิช่วง 125 ถึง 165 องศาเซลเซียส ด้วยความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที ดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 และที่อุณหภูมิช่วง 165 ถึง 195 องศาเซลเซียส ด้วยความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิช่วง 125 ถึง 165 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณ 200 กรัม ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที

ตารางที่ 4.1 ก. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน  
กับอุณหภูมิของการทดลองที่ 1 ถึง 4

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน
1	125	9.01
2	135	5.75
3	155	9.75
4	165	10.53

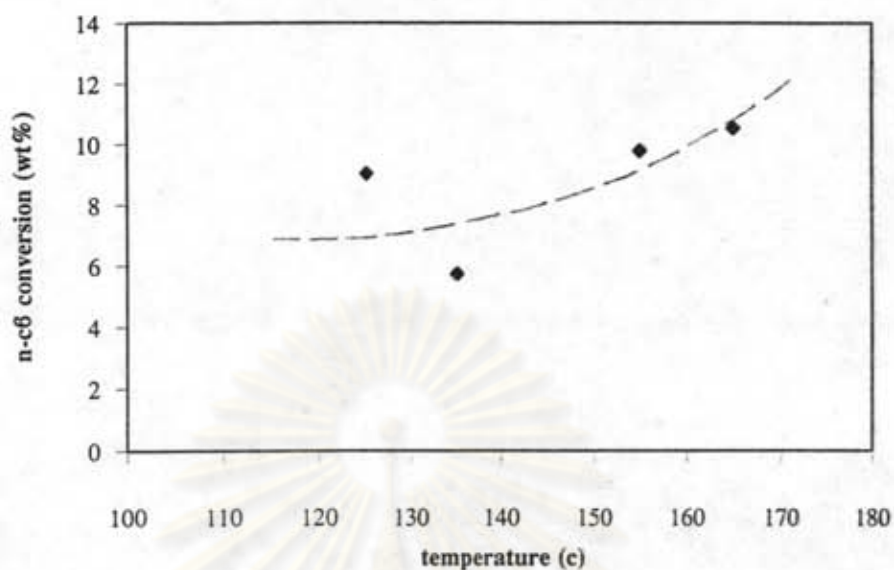
ตารางที่ 4.1 ข. ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนกับอุณหภูมิ  
ของการทดลองที่ 1 ถึง 4

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนแต่ละตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)			ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนทุกตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)
		2-เมทิล เพนเทน	3-เมทิล เพนเทน	2,2-ไดเมทิล บิวเทน	
1	125	4.33	*	0.36	4.69
2	135	2.94	0.20	0.32	3.46
3	155	3.86	0.18	0.54	4.58
4	165	5.37	0.38	0.59	6.34

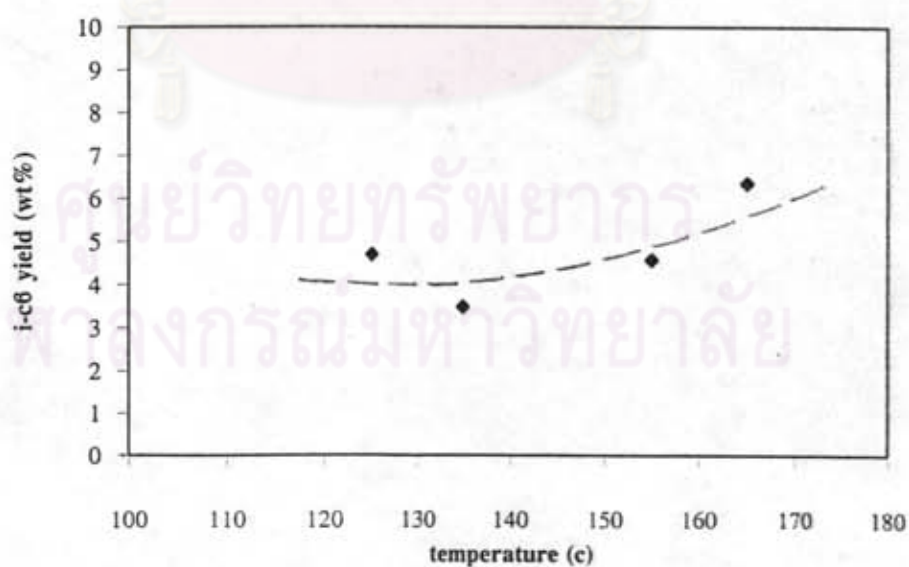
\* ปริมาณของ 3-เมทิลเพนเทนในผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยกว่าในสารตั้งต้น

ตารางที่ 4.1 ค. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนกับอุณหภูมิ  
ของการทดลองที่ 1 ถึง 4

การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน
1	125	52.05
2	135	60.17
3	155	46.97
4	165	60.21

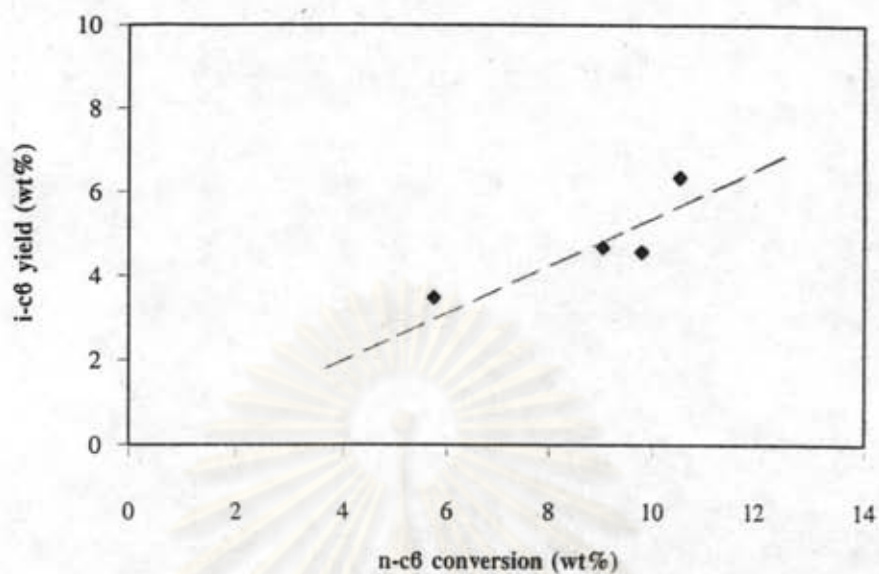


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนกับอุณหภูมิเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที

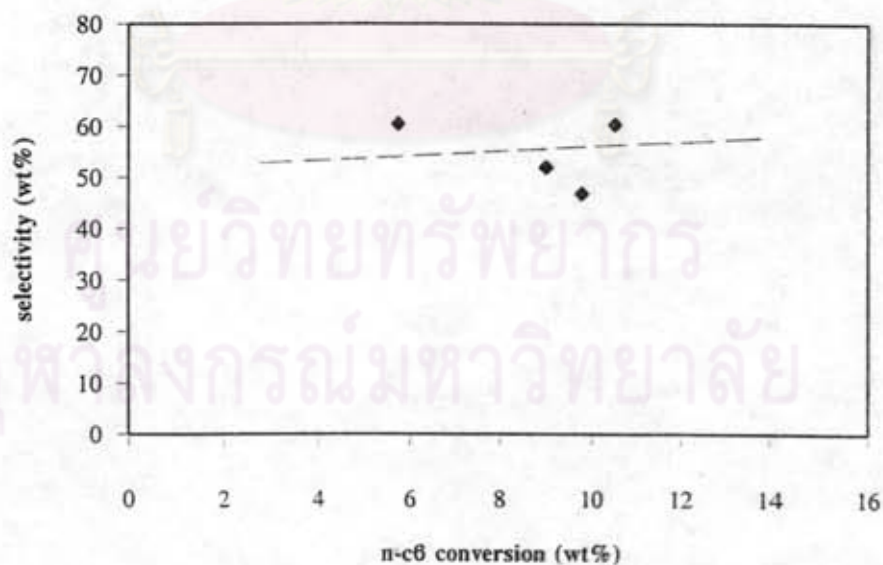


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของไอโซเฮกเซนกับอุณหภูมิเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที





รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของไอโซเฮกเซนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิช่วง 165 ถึง 195 องศาเซลเซียส เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 200 กรัม ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที

ตารางที่ 4.2 ก. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน กับอุณหภูมิของการทดลองที่ 5,7,8 และ 9

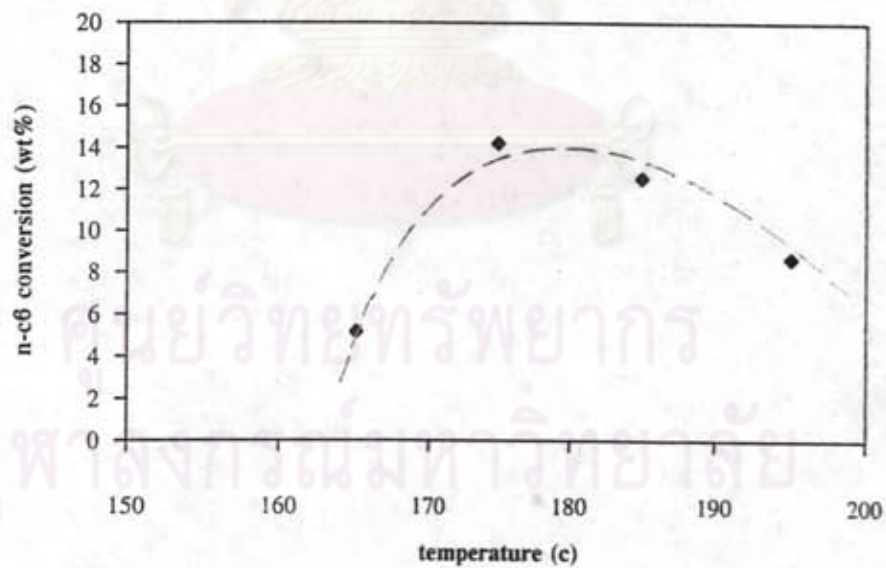
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน
5	165	5.14
7	175	14.19
8	185	12.53
9	195	8.67

ตารางที่ 4.2 ข. ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนกับอุณหภูมิ ของการทดลองที่ 5,7,8 และ 9

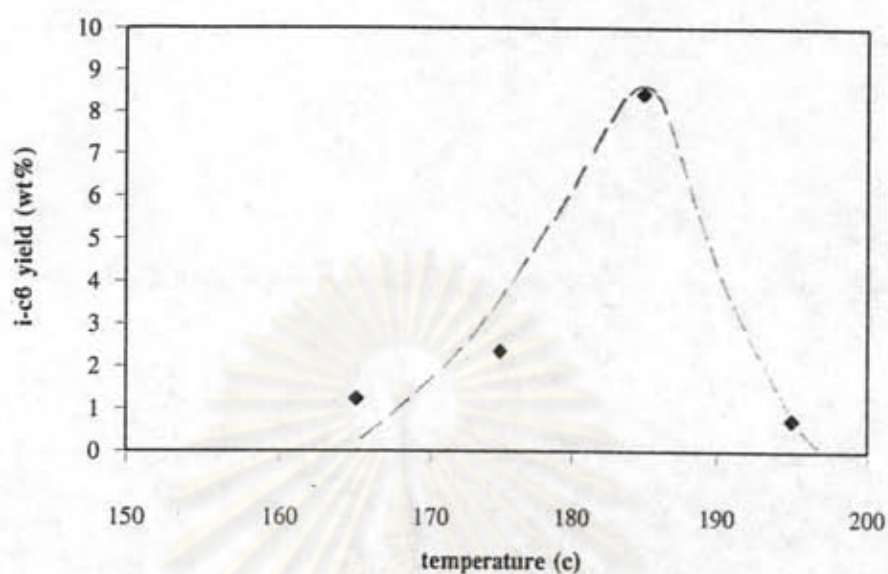
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนแต่ละตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)			ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนทุกตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)
		2-เมทิล เพนเทน	3-เมทิล เพนเทน	2,2-ไดเมทิล บิวเทน	
5	165	0.96	0.23	0.05	1.24
7	175	2.16	0.05	0.14	2.35
8	185	6.96	0.58	0.92	8.46
9	195	0.40	0.36	-	0.76

ตารางที่ 4.2 ค. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนกับอุณหภูมิของการทดลองที่ 5,7,8 และ 9

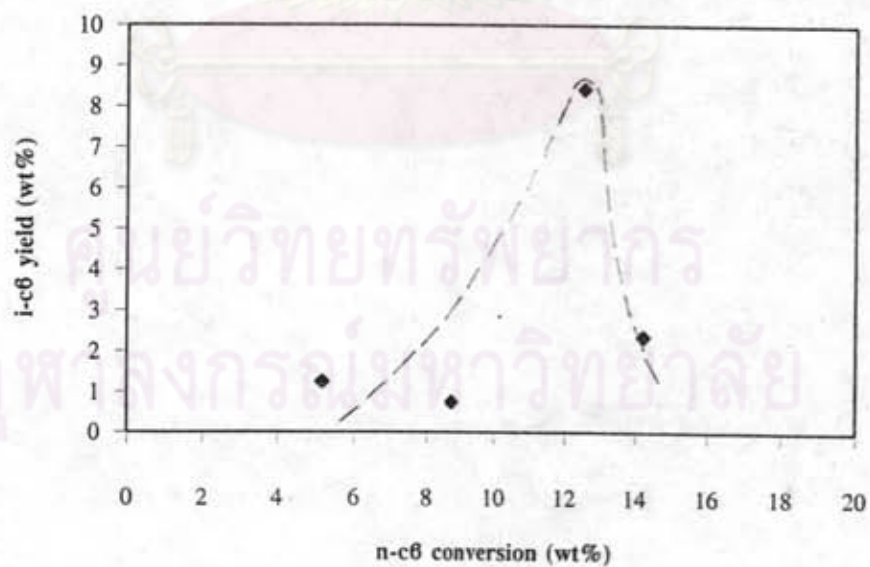
การทดลองที่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน
5	165	24.12
7	175	16.56
8	185	67.52
9	195	8.77



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนกับอุณหภูมิเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที

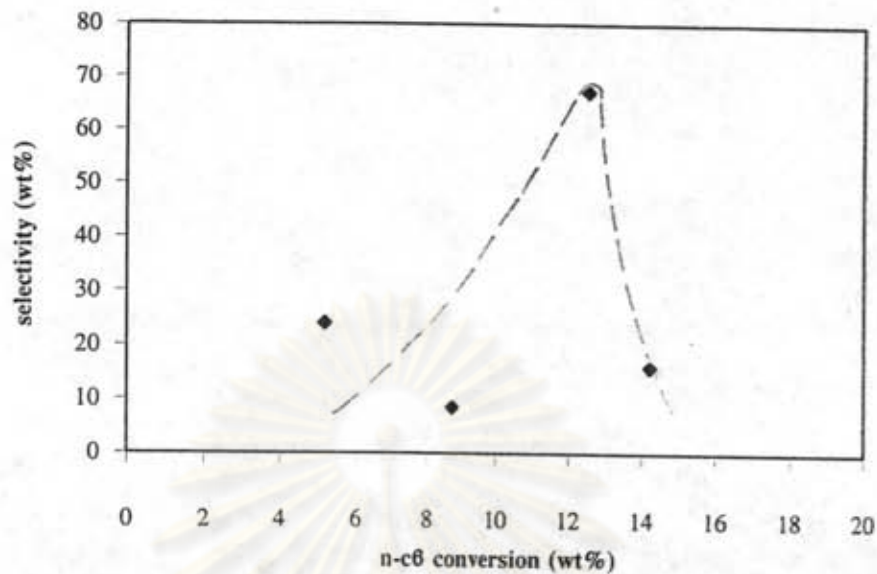


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของไอโซเฮกเซนกับอุณหภูมิเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 200 กรัม ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของไอโซเฮกเซนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที





รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเวลา 15 นาที

ผลการทดลองที่ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 125 ถึง 165 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลง (conversion) ของนอร์มัลเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4.1 ก. และรูปที่ 4.1 และพบว่าผลผลิต (yield) ของไอโซเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกัน และมีค่าในช่วงประมาณร้อยละ 3 ถึง 6 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4.1 ข. และรูปที่ 4.2 ผลการทดลองที่ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 165 ถึง 195 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกคืออุณหภูมิ 165 ถึง 175 องศาเซลเซียส และมีค่าประมาณร้อยละ 5 ถึง 14 โดยน้ำหนัก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปอีกจนถึง 185 และ 195 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนมีแนวโน้มลดลงและมีค่าประมาณร้อยละ 8 ถึง 12 โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4.2 ก. และรูปที่ 4.5 และพบว่าผลผลิตของไอโซเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการเพิ่มอุณหภูมิจาก 165 ถึง 185 องศาเซลเซียส และมีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 1 ถึง 8 โดยน้ำหนัก จากนั้นผลผลิตของไอโซเฮกเซนจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 195 องศาเซลเซียส ดังตารางที่ 4.2 ข. และรูปที่ 4.6 จากผลการทดลองที่ได้อ้างตั้ง



ข้อสมมติฐานได้ดังนี้ การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีขึ้น โดยสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและผลผลิตของไอโซเฮกเซนที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิจาก 125 ถึง 165 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้นดังการทดลองที่อุณหภูมิช่วง 165 ถึง 195 องศาเซลเซียส และความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในช่วงแรกของการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการสนับสนุนการเกิดปฏิกิริยาโดยสังเกตจากการเพิ่มของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและผลผลิตของไอโซเฮกเซน แต่หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งสมดุล (equilibrium curve) ความเข้มข้นของไอโซเฮกเซนในผลิตภัณฑ์จึงลดลง อุณหภูมิที่เหมาะสมของการทำงานอยู่ที่ 185 องศาเซลเซียส ซึ่งได้การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและผลผลิตของไอโซเฮกเซนที่ดีกว่าอุณหภูมิอื่นคือเท่ากับร้อยละ 12.53 และ 8.46 โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา I-8 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้งานกับปฏิกิริยาไฮโดรไอโซเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 390 องศาฟาเรนไฮต์ (199 องศาเซลเซียส) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในยุคที่ 3 (third-generation) ซึ่งได้ถูกพัฒนาขึ้นมาให้ทำงานด้วยอุณหภูมิที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในยุคที่ 2 (second-generation) โดยอุณหภูมิดังกล่าวนี้ สมดุลเทอร์โมไดนามิกส์จะได้รับการสนับสนุนมากกว่า ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาในยุคที่ 1 (first-generation) คือตัวเร่งปฏิกิริยา Friedel-Crafts (ใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์) ซึ่งทำงานที่อุณหภูมิต่ำมากประมาณ 120 ถึง 265 องศาฟาเรนไฮต์ (49 ถึง 129 องศาเซลเซียส) สมดุลของปฏิกิริยาจึงได้รับการสนับสนุนมากขึ้น แต่มีข้อเสียคือไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาสูง ปัญหาการกัดกร่อน และตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานสั้นและสิ้นเปลือง จึงได้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในยุคที่ 2 ขึ้นมา โดยทั่วไปจะเป็นโลหะมีตระกูล และมีเฮไลต์อยู่บ้าง ซึ่งต้องทำงานที่อุณหภูมิสูงกว่า 390 องศาฟาเรนไฮต์ (199 องศาเซลเซียส) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานี้ทำงานที่อุณหภูมิสูงและได้การเปลี่ยนแปลงไปเป็นไอโซพาราฟินที่ต่ำ จึงได้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาในยุคที่ 3 ขึ้นมาแทน

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นว่าที่ความดัน 240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิด (selectivity) เป็นไอโซเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน โดยการเลือกเกิดมีค่าอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 45 ถึง 60 โดยน้ำหนัก ผลการวิเคราะห์ไอโซเมอร์ของผลิตภัณฑ์พบว่ามี 2-เมทิลเพนเทนเป็นองค์ประกอบหลัก (คิดจากร้อยละโดยน้ำหนักของ 2-เมทิลเพนเทนที่เพิ่มขึ้น เทียบกับ 2-เมทิลเพนเทนในสารตั้งต้น) และจากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่าที่ความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลผลิตของไอโซ

เฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนมากขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ การเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับร้อยละ 12.53 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นผลผลิตจะมีค่าลดลง ส่วน การเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัล เฮกเซนเช่นกัน และมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 67 โดยน้ำหนักที่การเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่ากับ ร้อยละ 12.53 โดยน้ำหนัก (นั่นคือร้อยละ 67 โดยน้ำหนักของนอร์มัลเฮกเซนที่เกิดการเปลี่ยน แปลงจะถูกไอโซเมอไรซ์ไปเป็นไอโซเฮกเซน) หลังจากนั้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงขึ้น การ เลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนจะลดลงอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดร แครกกิงมากขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลง

#### 4.2 ผลการทดลองที่ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยน

การศึกษาผลของความดันที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน ได้ทำ การทดลองที่ความดัน 240 และ 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และ เวลา 15 นาที ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองที่ความดัน 240 และ 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 200 กรัม อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และเวลา 15 นาที

ตารางที่ 4.3 ก. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน กับความดันของการทดลองที่ 4 และ 5

การทดลองที่	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน
4	240	10.53
5	260	5.14



ตารางที่ 4.3 ข. ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนกับความดันของการทดลองที่ 4 และ 5

การทดลองที่	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนแต่ละตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซนในสารตั้งต้น)			ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนทุกตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซนในสารตั้งต้น)
		2-เมทิล เพนเทน	3-เมทิล เพนเทน	2,2-ไดเมทิล บิวเทน	
4	240	5.37	0.38	0.59	6.34
5	260	0.96	0.23	0.05	1.24

ตารางที่ 4.3 ค. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนกับความดันของการทดลองที่ 4 และ 5

การทดลองที่	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน
4	240	60.21
5	260	24.12

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนมีค่าลดลง ซึ่งอาจตั้งข้อสมมติฐานได้ดังนี้ การทดลองที่ 4 และ 5 ซึ่งกระทำที่ความดันของไฮโดรเจน 240 และ 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จำนวนโมลของไฮโดรเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาจะเท่ากับ 0.1984 และ 0.2149 โมลตามลำดับ และอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮกเซนเท่ากับ 1.04 และ 1.12 ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Ciapetta และ Hunter (1953) ซึ่งศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา พบว่าที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนไม่ขึ้นกับอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดร



คาร์บอน ซึ่งมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยต่อผลผลิตของไอโซเมอร์ที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนค่าเดียวกัน (ดังรูปที่ 2.25 และ 2.26) ดังนั้นอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮกเซนของการทดลองที่ 4 และ 5 จึงไม่น่าจะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อความดันของไฮโดรเจนภายในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้เกิดการรบกวนสมดุลของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของนอร์มัลเฮกเซนไปเป็น 1-เฮกซีน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนส่วนที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา และเป็นขั้นตอนแรกของกลไกของปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน ทำให้สมดุลดำเนินไปทางซ้ายได้มากกว่า ด้วยเหตุผลนี้การเพิ่มความดันจึงมีส่วนทำให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันได้น้อยลง

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าผลของการเพิ่มความดันรวมภายในระบบ จะเป็นการลดอัตราเร็วของปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของพาราฟิน แต่เป็นการเพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลง ทำให้ได้ผลผลิตและการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนลดลง

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์

Reaction	$K_p^*$ at 500°C, $P_i$ in atm	$\Delta H_r$ , kcal/mol of hydrocarbon
Cyclohexane $\rightleftharpoons$ benzene + 3H <sub>2</sub>	$6 \times 10^3$	52.8
Methylcyclopentane $\rightleftharpoons$ cyclohexane	0.086	-3.8
n-Hexane $\rightleftharpoons$ benzene + 4H <sub>2</sub>	$0.78 \times 10^3$	63.6
n-Hexane $\rightleftharpoons$ 2-methylpentane	1.1	-1.4
n-Hexane $\rightleftharpoons$ 1-hexene + H <sub>2</sub>	0.037	31.0

\* For the reaction



the equilibrium constant is defined as

$$K_p = \frac{P_{(HC)_2} P_{H_2}^n}{P_{(HC)_1}}$$

Source: Reprinted with permission from *Advances in Chemical Engineering*. Copyright by Academic Press.

ตารางที่ 4.5 สมบัติทางจลนพลศาสตร์

Reaction type	Relative rate <sup>b</sup>	Effect of increase in total pressure	Heat effect
Hydrocracking	Slowest	Increases rate	Quite exothermic
Dehydrocyclization	Slow	None to small decrease in rate	Endothermic
Isomerization of paraffins	Rapid	Decreases rate	Mildly exothermic
Naphthene isomerization	Rapid	Decreases rate	Mildly exothermic
Paraffin dehydrogenation	Quite rapid	Decreases conversion	Endothermic
Naphthene dehydrogenation	Very rapid	Decreases conversion	Very endothermic

<sup>a</sup> Partly from Krane et al. [6].

<sup>b</sup> Relative rates are for a modern bifunctional catalyst.

ที่มา : Gates , Katzer และ Schuit , 1979

#### 4.3 ผลการทดลองที่เวลาของการเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยน

การศึกษาผลของเวลาที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน ได้ทำการทดลองที่เวลาของการเกิดปฏิกิริยา 5 และ 15 นาที ด้วยอุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนลดลง แต่ผลผลิตและการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเวลามีผลต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนอย่างไร

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองที่เวลา 5 และ 15 นาที เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 200 กรัม อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส และความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ 4.6 ก. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน กับเวลาของการทดลองที่ 5 และ 6

การทดลองที่	เวลา (นาที)	ร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน
5	15	5.14
6	5	10.53



ตารางที่ 4.6 ข. ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนกับเวลาของการทดลองที่ 5 และ 6

การทดลองที่	เวลา (นาที)	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนแต่ละตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)			ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนทุกตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)
		2-เมทิล เพนเทน	3-เมทิล เพนเทน	2,2-ไดเมทิล บิวเทน	
5	15	0.96	0.23	0.05	1.24
6	5	0.20	0.29	-	0.49

ตารางที่ 4.6 ค. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนกับเวลา  
ของการทดลองที่ 5 และ 6

การทดลองที่	เวลา (นาที)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน
5	15	24.12
6	5	4.65

#### 4.4 ผลการทดลองของการทดลองที่ 10 และ 11

ไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนของการทดลองที่ 10 และ 11 กระทำที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส และเวลา 15 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 150 กรัมและความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทดลองที่ 10 และตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 80 กรัมและความดัน 160 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทดลองที่ 11 ดังตารางที่ 4.7



ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส และเวลา 15 นาที โดยใช้  
ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 150 กรัมและความดัน 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ในการทดลองที่ 10 และตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 80 กรัมและความดัน  
160 ปอนด์ต่อตารางนิ้วในการทดลองที่ 11

ตารางที่ 4.7 ก. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน  
ของการทดลองที่ 10 และ 11

การทดลองที่	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (กรัม)	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน
10	180	260	67.33
11	50	160	60.47

ตารางที่ 4.7 ข. ร้อยละโดยน้ำหนักของไอโซเฮกเซนของการทดลองที่ 10 และ 11

การทดลอง ที่	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (กรัม)	ความดัน (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)	ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนแต่ละตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)			ร้อยละโดยน้ำหนัก ของไอโซเฮกเซนทุกตัว (เทียบกับนอร์มัลเฮกเซน ในสารตั้งต้น)
			2-เมทิล เพนเทน	3-เมทิล เพนเทน	2,2-ไดเมทิล บิวเทน	
10	180	260	34.33	8.59	12.10	55.02
11	50	160	31.25	7.18	9.08	47.51

ตารางที่ 4.7 ค. ร้อยละโดยน้ำหนักของการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน  
ของการทดลองที่ 10 และ 11

การทดลองที่	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	ร้อยละโดยน้ำหนักของ การเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน
10	260	81.72
11	160	78.57

จากผลการทดลองที่ได้ จะเห็นว่าการทดลองที่ 10 และ 11 ได้การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนที่มีค่าสูงและมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ 1 ถึง 9 โดยที่สภาวะของการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน และเวลาที่ใช้อยู่ในช่วงเดียวกันกับการทดลองที่ 1 ถึง 9 แต่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยกว่า จึงได้แยกการทดลองที่ 10 และ 11 มาอธิบายต่างหาก ผลของการทดลองที่ 10 และ 11 ซึ่งได้ผลดีกว่าการทดลองที่ 1 ถึง 9 อาจตั้งข้อสมมติฐานได้ดังนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 10 และ 11 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา I-8 เช่นเดียวกันแต่เป็นคนละชุดกับที่ใช้ในการทดลองที่ 1 ถึง 9 โดยตัวเร่งปฏิกิริยาของการทดลองที่ 10 และ 11 จะบรรจุเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดกว่าทำให้สามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากความชื้นในอากาศได้ดีกว่า จึงอาจเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนได้ดีกว่า แต่ทั้งนี้เป็นเพียงข้อสันนิษฐานเท่านั้นเนื่องจากไม่มีหลักฐานอื่นที่จะยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 10 และ 11 มีประสิทธิภาพดีกว่าที่ใช้ในการทดลองที่ 1 ถึง 9

เมื่อเปรียบเทียบการทดลองที่ 10 และ 11 ซึ่งกระทำที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน แต่การทดลองที่ 10 ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันมากกว่าการทดลองที่ 11 จะเห็นว่าการทดลองที่ 10 ได้การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนที่ดีกว่าการทดลองที่ 11 ผลที่ได้ค้ำกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 ซึ่งทำการทดลองที่ความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยน และพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนมีค่าลดลง จากผลการทดลองที่ได้จึงอาจอธิบายได้ว่าการเพิ่มของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีผลในการเพิ่มของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา



ที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ผิวบริเวณกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้น โอกาสการเข้าทำปฏิกิริยาเคมีของสารไฮโดรคาร์บอนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมี ณ ช่วงเวลาการทดลองเท่ากันเพิ่มขึ้น (Gates et al., 1979) ซึ่งการเพิ่มของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 80 กรัมเป็น 150 กรัมนี้มีอิทธิพลมากกว่าผลในทางตรงกันข้ามของการเพิ่มความดันภายในระบบจาก 160 เป็น 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา I-8 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและทำงานเป็นกะ โดยใช้อุณหภูมิระหว่าง 125 ถึง 195 องศาเซลเซียส ความดัน 160 , 240 และ 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่เวลา 5 และ 15 นาที โดยวิธีการทดลอง ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. เมื่อความดันคงที่ และอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นจาก 125 ถึง 165 องศาเซลเซียส (240 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และ 165 ถึง 195 องศาเซลเซียส (260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและผลผลิตของไอโซเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิในช่วงแรกเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสูงกว่าอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและผลผลิตของไอโซเฮกเซนจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สมดุลของปฏิกิริยาจึงได้รับการสนับสนุนน้อยลง ผลผลิตของไอโซเฮกเซนและการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนในช่วงแรกแต่มีค่าลดลงเมื่อการเปลี่ยนแปลงมีค่าสูงขึ้นซึ่งอาจจะเนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองที่ได้อาจสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมของการทำงานอยู่ที่ 185 องศาเซลเซียส

2. เมื่อควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ และเพิ่มความดันภายในระบบจาก 240 ถึง 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันของไฮโดรเจนมีผลในการบวกลบสมดุลของปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของนอร์มัลเฮกเซนไปเป็น 1-เฮกซีน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนส่วนที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาและเป็นขั้นตอนแรกของกลไกของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน นอกจากนี้ยังมีผลทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยา

ไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินลดลง แต่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นปฏิกิริยาการแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลง

3. เมื่อควบคุมความดันและอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ให้คงที่ และเพิ่มเวลาของการเกิดปฏิกิริยาจาก 5 เป็น 15 นาที การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนลดลง แต่ผลผลิตของไอโซเฮกเซนและการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนเพิ่มขึ้น ผลที่ได้จากการทดลองยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเวลาของการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนอย่างไร

4. การทดลองที่ 10 และ 11 ซึ่งกระทำที่อุณหภูมิ ความดัน และเวลาซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับการทดลองที่ 1 ถึง 9 แต่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่น้อยกว่า พบว่าผลที่ได้ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซนและการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนมีค่าสูงและดีกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ 1 ถึง 9 อาจเป็นไปได้ว่าเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเก็บในสภาวะที่ป้องกันการเสื่อมสภาพจากความชื้นในอากาศได้ดีกว่า และเมื่อเปรียบเทียบการทดลองซึ่งกระทำที่อุณหภูมิและเวลาเดียวกัน แต่ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันเพิ่มขึ้น พบว่าการเพิ่มของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 80 กรัมเป็น 150 กรัม มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ผลผลิตของไอโซเฮกเซน และการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซน และมีอิทธิพลมากกว่าผลในทางตรงกันข้ามของการเพิ่มความดันภายในระบบจาก 160 เป็น 260 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองควรปรับปรุงให้มีการทำงานแบบต่อเนื่อง โดยนอร์มัลเฮกเซนที่บรรจุอยู่ในท่อบรรจุ นอร์มัลเฮกเซน และไหลเข้าสู่ท่อบรรจุโมเลคิวลาร์ซีฟ 13X เพื่อทำการดูดซับความชื้น จะถูกส่งเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นสารป้อนที่ผ่านการดูดซับความชื้นแล้ว จึงไม่มีโอกาสสัมผัสกับความชื้นในอากาศอีกเพราะน้ำจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดลงและเกิดการเสื่อมสภาพอย่างถาวร