

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ไอโซเมอไรเซชันของพาราฟิน (Isomerization of Paraffin Hydrocarbons)

การลดปริมาณสารตะกั่วในน้ำมันเบนซินลงทำให้น้ำมันเบนซินมีค่าออกเทนต่ำเกินไปไม่เพียงพอในการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ ผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องหาวิธีที่จะเพิ่มค่าออกเทนให้สูงขึ้น วิธีการหนึ่งคือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reforming) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนในช่วงของแก๊สโซลีนที่มีค่าออกเทนต่ำไปเป็นสารที่มีค่าออกเทนสูงขึ้น และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงของรถยนต์โดยที่ไม่เปลี่ยนจำนวนคาร์บอนของโมเลกุล สารป้อนที่เหมาะสมได้แก่ ส่วนของเนฟทาที่มีจุดเดือดประมาณ 80-200 องศาเซลเซียส (heavy straight-run naphtha) แต่ส่วนของน้ำมันเบนซินที่เบาเกินไปคือมีจุดเดือดต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส กระบวนการรีฟอร์มมิงมักจะไม่ได้ผลเนื่องจากไม่ค่อยมีเนฟทินให้เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นส่วนน้ำมันเบนซินเบา (ทอป) จะเพิ่มค่าออกเทนได้โดยใช้ไอโซเมอไรเซชัน ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ให้เกิดไอโซพาราฟินขึ้น

2.1.1 วัตถุประสงค์หลัก

ความต้องการหลักของการทำไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินในอุตสาหกรรมการกลั่นปิโตรเลียมมีอยู่ 2 ประการด้วยกันคือ

1. เพื่อเพิ่มค่าออกเทนของพาราฟินที่อยู่ในช่วงจุดเดือดของแก๊สโซลีน โดยการเปลี่ยนโครงสร้างของพาราฟินที่มีแขนตรงไปเป็นไอโซพาราฟินและพาราฟินแบบกิ่งที่มีมวลโมเลกุลเท่าเดิม
2. เพื่อเปลี่ยนนอร์มัลบิวเทนไปเป็นไอโซบิวเทน ซึ่งเป็นสารป้อนที่จำเป็นในการทำปฏิกิริยากับโอเลฟินส์แก๊ส เช่น บิวทินและโพรพินในกระบวนการอัลคิลเลชัน (alkylation) ได้เป็นไอโซพาราฟินขนาด 7-8 คาร์บอนอะตอมซึ่งเป็นองค์ประกอบน้ำมันเบนซินที่มีค่าออกเทน

สูงและสามารถต้านทานการน็อคของเครื่องยนต์ได้เป็นอย่างดี (เช่น ไอโซออกเทน) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เรียกว่า อัลคิลเอท (alkylate)

2.1.2 ลักษณะที่สำคัญของปฏิกิริยา

ไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินและแนพทีนเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบผันกลับได้ ซึ่งถูกกำหนดโดยสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ และเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนเล็กน้อย ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันของไฮโดรคาร์บอนและตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่ทำให้เกิดสมดุลและอัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ต้องการและได้ผลิตภัณฑ์กลับคืนมา สภาวะของปฏิกิริยาจะแตกต่างกันไปขึ้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้และสารป้อน

ไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินเป็นกระบวนการสมดุล โดยที่สมดุลจะอยู่ห่างจากร้อยละ 0 หรือ 100 ของไอโซเมอร์ตัวใด ๆ ภายใต้สภาวะของการทำงานและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นที่รู้จักกันดี ดังนั้นจึงมีการใช้ไอโซเมอไรเซชันประกอบกับกระบวนการแยก (separation process) เพื่อแยกไฮโดรคาร์บอนที่มีคุณสมบัติในการต้านทานการน็อคของเครื่องยนต์ที่ต่ำและนำมาย้อนกลับ (recycle) เข้าสู่กระบวนการอีก ถ้าเป็นบิวเทนและเพนเทน กระบวนการแยกที่ใช้คือการกลั่น ถ้าเป็นเฮกเซนและพาราฟินตัวที่หนักกว่าการกลั่นจะมีค่าใช้จ่ายที่สูงเพราะไอโซเมอร์มีจุดเดือดใกล้เคียงกันเกินไปที่จะสามารถทำการแยกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือ การใช้โมเลคิวลาร์ซีฟ ซึ่งสามารถแยกนอร์มัลพาราฟินซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติในการต้านทานการน็อคได้ดีที่สุด

ไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลพาราฟิน มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการเกิดการแตกตัว สิ่งนี้ไม่เป็นปัญหาในกรณีของบิวเทนและเพนเทน แต่จะเริ่มเป็นปัญหาในกรณีของนอร์มัลเฮกเซน และเป็นปัญหาตลอดไปในกรณีของนอร์มัลเฮปเทนและพาราฟินตัวที่หนักกว่า ด้วยเหตุผลนี้เองและเหตุผลของความยากของการแยกสารที่มีคุณสมบัติในการต้านทานการน็อคได้ดี โดยปกติจึงไม่ใช้ไอโซเมอไรเซชันกับพาราฟินตัวหนัก ๆ

เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำจะสนับสนุนการเกิดของพาราฟินแบบกิ่ง การทำงานด้วยอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดจึงเป็นสิ่งที่ต้องการซึ่งช่วยให้ปัญหาของการแยกง่ายขึ้น เพราะไอโซเมอร์ตัวที่ต้องการจะปรากฏด้วยความเข้มข้นที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำงานที่อุณหภูมิต่ำดังกล่าวนี้จะมีความเป็นกรดอย่างรุนแรง (strong acids) (โดยปกติจะเป็นแอนไฮดรัส อะลูมิเนียมคลอไรด์) และก่อให้เกิดการกัดกร่อนกับอุปกรณ์ของโรงงาน ในขณะที่

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนต้องการอุณหภูมิและความดันของไฮโดรเจนที่สูงขึ้นในการทำงาน ดังนั้นสมดุลจึงได้รับการสนับสนุนน้อยลง เนื่องจากกระบวนการแบบหลังนี้จะใช้แก๊สไฮโดรเจนผสมด้วยและเกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่เป็นไอ บางครั้งจึงเรียกว่า "ไฮโดรไอโซเมอไรเซชัน" (hydroisomerization)

2.1.3 ไอโซเมอไรเซชันของบิวเทน (Isomerization of Butanes)

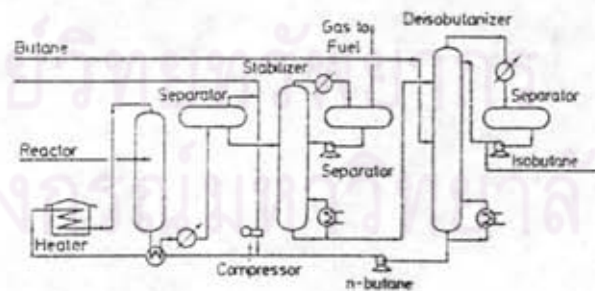
กระบวนการพื้นฐานของไอโซเมอไรเซชัน คือ ไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลบิวเทน หน่วยไอโซเมอไรเซชันของบิวเทนเชิงพาณิชย์หน่วยแรกเริ่มดำเนินการผลิตในปลายปี ค.ศ.1941 ซึ่งอยู่ในระหว่างสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ที่มีความต้องการเชื้อเพลิงอากาศยานที่มีค่าออกเทนสูง กระบวนการนี้เปลี่ยนบิวเทนให้เป็นไอโซบิวเทนสำหรับใช้ในกระบวนการอัลคิลเลชันเพื่อผลิตน้ำมันเบนซินอากาศยาน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ซึ่งมีปัญหาในเรื่องการกัดกร่อนโลหะอย่างมาก มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานสูง และประสิทธิภาพในการทำงานต่ำ กระบวนการดังกล่าวเป็นแบบฉบับสำหรับไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินเบา (light paraffins) เชิงพาณิชย์ที่มีในเวลานั้น

กระบวนการที่ใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์นั้น จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป มันสามารถที่จะยึดติดอยู่บนของแข็ง (supported) ในกระบวนการของวัฏภาคไอแบบเบดนิ่ง (fixed-bed vapor-phase process) หรือทำให้ละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น แอนติโมนี ไตรคลอไรด์และใช้ในกระบวนการของวัฏภาคของเหลว (liquid-phase process) อุณหภูมิของปฏิกิริยาจะพยายามรักษาไว้ให้ต่ำที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพราะขอบเขตของปฏิกิริยาถูกกำหนดโดยสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ เช่น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสของผสม ณ สมดุล (equilibrium mixture) จะประกอบด้วยไอโซบิวเทนร้อยละ 65 แต่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สัดส่วนของไอโซบิวเทนในของผสม ณ สมดุลจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 48

ด้วยการพัฒนาของตัวยัดอะลูมิเนียมคลอไรด์ทำให้ไอโซเมอไรเซชันมีความง่ายขึ้นอย่างมากทั้งในเรื่องของการออกแบบโรงงานและการปฏิบัติการรวมทั้งวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างแผนผังของโรงงานซึ่งนอร์มัลบิวเทนถูกไอโซเมอไรซ์ไปเป็นไอโซบิวเทนบนเบดนิ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งแสดงในรูปที่ 2.1 ในกระบวนการนี้สารป้อนบิวเทนบริสุทธิ์ถูกส่งเข้าสู่ดีไอโซบิวทาไนเซอร์ (deisobutanizer) ซึ่งไอโซบิวเทนจะถูกดึงออกมาและป้อนเข้าสู่สาย

ผลิตภัณฑ์โดยตรง ผลิตภัณฑ์ที่ก้นหอย คือนอร์มัลบิวเทนบริสุทธิ์ จากนั้นนอร์มัลบิวเทนจะถูกผสมกับไฮโดรเจนภายใต้ความดันรวมประมาณ 200-300 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจและถูกบีบอัดผ่านเครื่องให้ความร้อน (heater) ซึ่งอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 65-180 องศาเซลเซียส และผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) เมื่อปล่อยออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกทำให้เย็นลงและแยกไฮโดรเจนออกจากของเหลว ไฮโดรเจนที่แยกได้จะนำกลับมาหมุนเวียนใช้อีก ส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวจะถูกทำให้เสถียร (stabilized) ในสเตบิไลเซอร์ (stabilizer) เพื่อกำจัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวปริมาณเล็กน้อยออกมา

ผลิตภัณฑ์ที่ก้นหอยของสเตบิไลเซอร์จะถูกส่งเข้าสู่ดีไอโซบิวทาไนเซอร์ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากด้านบนของดีไอโซบิวทาไนเซอร์ คือ ไอโซบิวเทนที่มีความบริสุทธิ์สูงจะรวมเข้ากับไอโซบิวเทนที่อยู่ในสารป้อนบริสุทธิ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ก้นหอยของดีไอโซบิวทาไนเซอร์ซึ่งจัดเตรียมสารป้อนให้แก่หน่วยไอโซเมอไรเซชันจะเป็นของผสมของนอร์มัลบิวเทนย้อนกลับซึ่งได้ผ่านไอโซเมอไรเซชันแล้วกับนอร์มัลบิวเทนบริสุทธิ์ซึ่งเติมในปริมาณที่เท่ากับปริมาณของไอโซบิวเทนที่ผลิตได้ การปรับปรุงกระบวนการเป็นผลให้ความเข้มข้นของไอโซบิวเทนในส่วนของบิวเทน (butane fraction) สูงกว่าร้อยละ 60 ต่อ 1 รอบของการผ่านไอโซเมอไรเซชัน และด้วยการย้อนกลับของนอร์มัลบิวเทนที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอาจได้ผลผลิตสุดท้ายของไอโซพาราฟินที่สูงกว่าร้อยละ 90

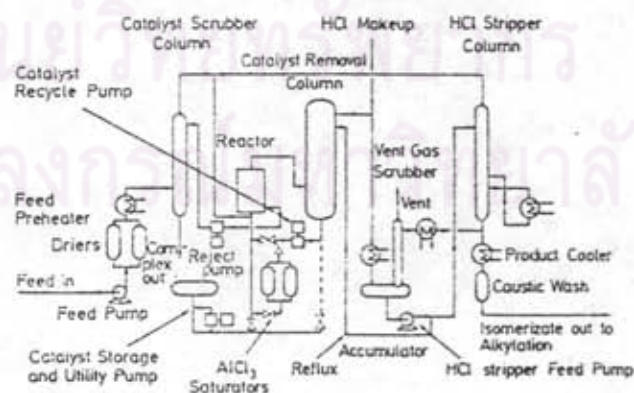


รูปที่ 2.1 กระบวนการแบบเบตนิ่งสำหรับไอโซเมอไรเซชันของบิวเทน (Hobson, 1973)

กระบวนการในวัฏภาคของเหลวเป็นอีกวิธีหนึ่งของไอโซเมอไรเซชัน มีพื้นฐานอยู่บนการใช้ประโยชน์ของอะลูมิเนียมคลอไรด์เหลวเชิงซ้อน (liquid complex aluminium

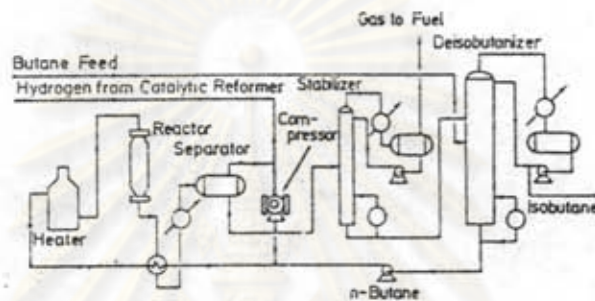
chloride) การออกแบบโรงงานของการปฏิบัติงานแบบนี้มีความซับซ้อนมากกว่า แผนผังของหน่วยนี้แสดงในรูปที่ 2.2 ในกระบวนการนี้เออร์มีลพาราฟินจะถูกส่งผ่านเครื่องทำให้แห้ง (feed drier) และผ่านเครื่องให้ความร้อน ซึ่งอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 65-120 องศาเซลเซียส ต่อมาจะผ่านเข้ากะตะลิสต์ สครับเบอร์ คอลัมน์ (catalyst scrubber column) เข้าสู่ยังเครื่องปฏิกรณ์ กระบวนการทำงานที่ความดันประมาณ 300-500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ การสกัดแยกแบบของเหลว-ของเหลวของสตรึมข้างเคียงปริมาณเล็กน้อยของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารป้อนเกิดขึ้นในสครับเบอร์ จากนั้นองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ว่องไวจะถูกส่งกลับไปเครื่องปฏิกรณ์ในรูปของสารละลาย ในขณะที่สารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ไม่ว่องไวกับไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาข้างเคียงจะวิ่งไปยังส่วนก้นของคอลัมน์และถูกระบายออกมา

จากนั้นเออร์มีลบิวเทนซึ่งมีไฮโดรเจนคลอไรด์ย้อนกลับละลายอยู่จะสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะเป็นอะลูมิเนียมคลอไรด์ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนหรือเป็นสารละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกดึงเอากรดไฮโดรคลอริกออกซึ่งอาจจะกำจัดออกไปหรือนำกลับมาหมุนเวียนใช้ในเครื่องปฏิกรณ์อีก ผลิตภัณฑ์ที่ถูกแยกได้ การเปลี่ยนแปลง (conversion) และผลผลิต (yield) ของไอโซพาราฟินของการทำงานแบบนี้จะเท่ากับที่ได้จากการทำงานแบบเบดนิ่ง



รูปที่ 2.2 กระบวนการในวัฏภาคของเหลวสำหรับไอโซเมอไรเซชันของบิวเทน (Hobson, 1973)

กระบวนการที่ใช้แพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับการพัฒนาขึ้นมาโดยยูโอที และเป็นที่รู้จักกันในชื่อของกระบวนการบิวทาเมอร์ (Butamer process) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 อุณหภูมิของการทำงานอยู่ในช่วง 315-455 องศาเซลเซียส และผลผลิต (หลังจากการย้อนกลับ) เท่ากับร้อยละ 96 โดยโมลหรือร้อยละ 100.3 โดยปริมาตร



รูปที่ 2.3 กระบวนการบิวทาเมอร์ ไอโซเมโรเซชัน (Hobson, 1973)

2.1.4 ไอโซเมโรเซชันของเพนเทนและเฮกเซน (Isomerization of Pentanes and Hexanes)

ไอโซเมโรเซชันของเพนเทนและเฮกเซนในระดับเชิงพาณิชย์ ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในระยะหลัง เมื่อมีความต้องการลดปริมาณสารตะกั่วในน้ำมันเบนซินลงจึงต้องหาทางเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันเบนซินทุกส่วน และไอโซเมอร์ของเพนเทนและเฮกเซนสามารถให้องค์ประกอบที่มีค่าออกเทนสูงอย่างดีเยี่ยมในช่วงปลายจุดเดือดที่ต่ำของแก๊สโซลีนซึ่งขาดแคลน องค์ประกอบที่มีค่าออกเทนสูงโดยเฉพาะในแก๊สโซลีนที่มีค่าออกเทนสูงซึ่งได้ผ่านกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ตารางที่ 2.1 แสดงค่าออกเทนของนอร์มัลและไอโซเมอร์ของเพนเทนและเฮกเซนแบบที่ไม่มีการเติมสารเพิ่มค่าออกเทน (แบบเคลียร์) และแบบที่มีการเติมเตตระเอทิลเลด

ตารางที่ 2.1 จุดเดือดและค่าออกเทนของไอโซเมอร์ของเพนเทนและเฮกเซน

Boiling Points and Octane Numbers of Isomeric Pentanes and Hexanes

Compound	Boiling point at 760 mm Hg °C	Octane Number F.1 (Research)	
		Clear	+ 3 ml TEL/US gal
n-Pentane	36	61.7	84.7
Isopentane	28	92.6	103.5
n-Hexane	69	34.0	65.3
2-Methylpentane	60	73.4	92.2
3-Methylpentane	63	74.5	92.3
2,2-Dimethylbutane	50	92.3	103.4
2,3-Dimethylbutane	58	103.5	112.0
Cyclopentane	49	101.3	111.1

ที่มา : Hobson, 1973

จากสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์พบว่า ไอโซเมโรเซชันของเพนเทนซึ่งทำงานที่อุณหภูมิต่ำนั้นมีข้อได้เปรียบกว่าการทำงานที่อุณหภูมิสูง แต่ข้อได้เปรียบนี้มีผลน้อยกว่าข้อได้เปรียบในไอโซเมโรเซชันของบิวเทนและเฮกเซน ของผสม ณ สมดุลของเพนเทนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสประกอบด้วยไอโซเพนเทนประมาณร้อยละ 85 และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของไอโซเพนเทนจะลดลงเหลือประมาณร้อยละ 80 เท่านั้น ดังนั้นไอโซเมโรเซชันของเพนเทนอาจจะกระทำที่อุณหภูมิสูงขึ้นอยู่ในช่วง 260-480 องศาเซลเซียส และความดัน 300-1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อย่างไรก็ตามสำหรับไอโซเมโรเซชันของเฮกเซน ถ้ากระบวนการมีความยืดหยุ่นน่าจะทำงานที่อุณหภูมิต่ำกว่าดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้เท่านั้นที่ผลิตได้ไอโซเมอร์แบบ 2 กิ่งของเฮกเซน (double-branched hexane isomers) ที่มีค่าออกเทนสูง

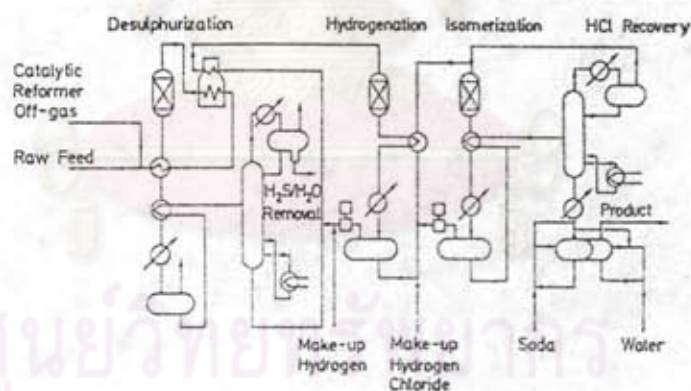
ตารางที่ 2.2 สมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ของเฮกเซน

Thermodynamic Equilibria of Hexanes			
Compound, % vol	100° C	300° C	430° C
n-Hexane	9	14	ca 21
2-Methylpentane	28	38	ca 40
3-Methylpentane	13	19	ca 20
2,2-Dimethylbutane	39	20	ca 10
2,3-Dimethylbutane	11	9	ca 9

ที่มา : Hobson, 1973

รูปที่ 2.4 แสดงแผนผังสำหรับกระบวนการที่ทำงานด้วยอุณหภูมิต่ำ สภาวะการทำงานอยู่ที่ความดัน 250-257 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 1 รอบ (single pass liquid space velocity) เท่ากับ 1.0-2.0 ชั่วโมง⁻¹ (v/v/hr) และอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 2 ต่อ 1

ในกระบวนการนี้ ชั้นแรกสารป้อนถูกทำให้บริสุทธิ์ขึ้นโดยการกำจัดกำมะถัน และน้ำด้วยกระบวนการดีซัลเฟอร์ไรซ์ (desulphurization) และการทำให้แห้ง (distilled drying) สารป้อนที่แห้งแล้วจะถูกดีไฮโดรจีเนทไปเป็นโอเลฟินอิ่มตัว (saturated olefins) และเบนซีน (benzene) มีการใช้ไฮโดรเจนคลอไรด์ปริมาณเล็กน้อยในแก๊สย้อนกลับเพื่อช่วยรักษาความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ แต่เนื่องจากไฮโดรเจนคลอไรด์ได้กลับคืนมาจากผลิตภัณฑ์ไอโซเมอร์ด้วยการกลั่น จึงเกิดการสูญเสียในปริมาณต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจนำไปผสมกับน้ำมันเบนซิน (gasoline) ได้โดยตรงโดยไม่ต้องทำสแตบิลไลเซชัน หรือรีรันนิ่ง (rerunning)



รูปที่ 2.4 ไอโซเมโรเซชันของเพนเทนและเฮกเซน

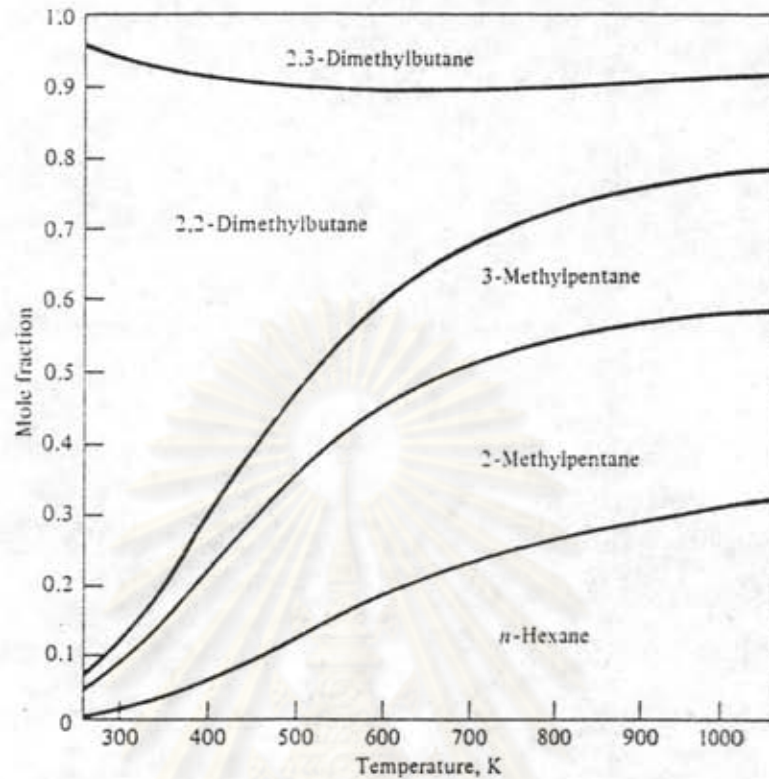
(BP's HCl-catalysed process for pentane/hexane isomerization) (Hobson, 1973)

นอกเหนือจากไอโซเมโรเซชันของบิวเทนแล้ว ยูโอเพียงได้พัฒนากระบวนการสำหรับไอโซเมโรเซชันของเพนเทนและเฮกเซนบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบซึ่งมีชื่อว่า กระบวนการพีเน็กซ์ (Penex process) ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในอันดับต่อไป

2.2 ข้อจำกัดทางสมดุล (Equilibrium Limitations)

สมดุลเคมี (chemical equilibrium) เป็นตัวที่กำหนดปริมาณของสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบกึ่งอันเกิดจากไอโซเมอไรเซชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้สภาวะสมดุลพาราฟินที่มีแขนแบบกึ่งมาก ๆ ซึ่งมีค่าออกเทนสูงที่สุดจะมีความเข้มข้นสูงที่สุด ณ อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่ต่ำที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.5 ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงซึ่งต้องการสารป้อนที่ปราศจากสารปนเปื้อนและช่วยให้ปฏิกิริยาเข้าใกล้สมดุลที่อุณหภูมิต่ำเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบนี้เหมือนกับที่ใช้ในการทำรีฟอร์มมิ่งแต่โดยปกติจะมีความเป็นกรดที่ค่อนข้างจะรุนแรงกว่า ดังนั้นจึงอาจจะใช้แพลทินัมบนฟลูออไรด์-อะลูมินาหรือแพลทินัมบนซิลิกา-อะลูมินาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างของสภาวะของปฏิกิริยาที่ใช้ ได้แก่ อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส (ต่ำกว่าที่ใช้ในรีฟอร์มมิ่งมาก) และความดัน 2-3.5 เมกะปาสคาลโดยใช้ความดันย่อยของไฮโดรเจนที่สูงเพื่อลดการเกิดโค้ก โลหะมีตระกูลที่เคลือบอยู่บนซีโอไลต์ที่เป็นกรด (an acidic zeolite loaded with noble metal) อาจใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เช่นกัน ณ อุณหภูมิและความดันของปฏิกิริยาที่ค่อนข้างต่ำกว่า ในปี ค.ศ.1970 เริ่มมีการแนะนำกระบวนการไฮโซเมอร์ (Hysomer process) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ โลหะมีตระกูลที่เคลือบอยู่บนไฮโดรเจนมอร์ดไนต์ซึ่งมีปริมาณโซเดียมต่ำ (a low-sodium hydrogen mordenite containing a noble metal) กระบวนการนี้จะไม่ใช้กับเฮปเทนหรือพาราฟินตัวที่หนักกว่าเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาแตกตัวมากเกินไป (ปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ) บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ความเข้มข้น ณ สมดุลของเฮกเซน 5 ตัวในวัฏภาคแก๊ส (ความกว้างของแถบ แสดงเศษส่วนโมลของไอโซเมอร์แต่ละตัว ณ สภาวะสมดุล) (Rossini และคณะ, 1941 อ้างถึงใน Satterfield, 1980)

2.3 กลไกของปฏิกิริยา (Reaction Mechanism)

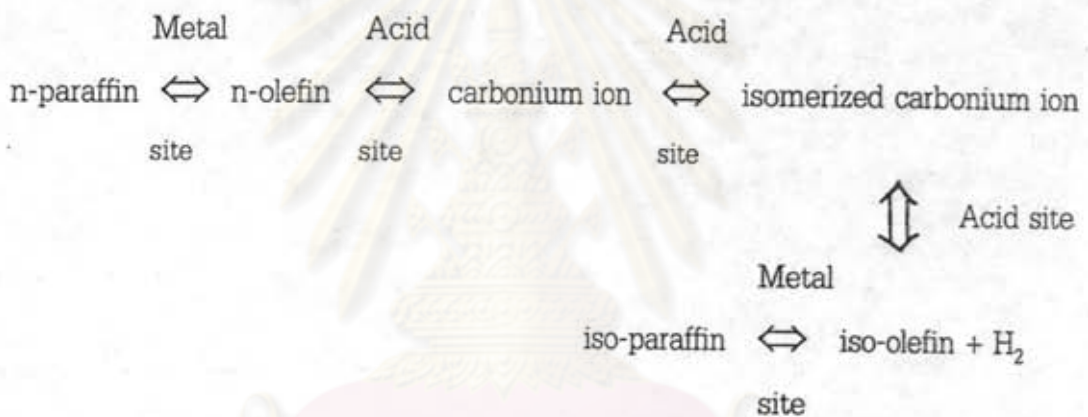
กลไกที่ยอมรับกันในปัจจุบันสำหรับไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลพาราฟิน ประกอบด้วย กระบวนการ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การดูดซับ (adsorption) ของโมเลกุลของนอร์มัลพาราฟินบนบริเวณที่ทำหน้าที่ดีไฮโดรจีเนชัน-ไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation-hydrogenation site) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นโลหะ (metal site) จากนั้นเกิดดีไฮโดรจีเนชันไปเป็นนอร์มัลโอเลฟิน
2. การคาย (desorption) ของนอร์มัลโอเลฟินออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดีไฮโดรจีเนชัน-ไฮโดรจีเนชัน และเกิดการแพร่ (diffusion) ไปยังบริเวณที่เกิดการจัดเปลี่ยนโครงสร้าง

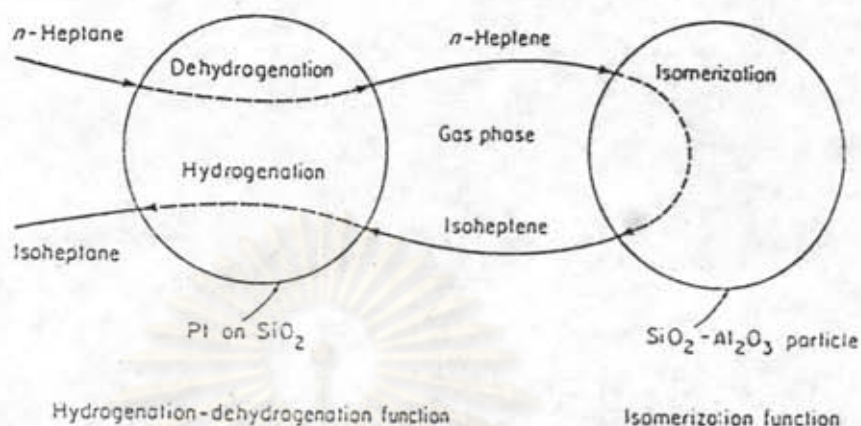
(skeletal rearranging site) ซึ่งเป็นส่วนที่เป็นกรด (acid site) และเกิดการเปลี่ยนของนอร์มัลโอเลฟินไปเป็นไอโซโอเลฟินโดยผ่านกลไกคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion mechanism)

3. การคายของไอโซโอเลฟินออกจากบริเวณที่เกิดการจัดเปลี่ยนโครงสร้าง และเกิดการแพร่ไปยังบริเวณที่ทำหน้าที่ไฮโดรจีเนชัน-ดีไฮโดรจีเนชัน (ส่วนที่เป็นโลหะ) ซึ่งโมเลกุลจะถูกไฮโดรจีเนทไปเป็นไอโซพาราฟินเป็นอันดับสุดท้าย

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา riforming ที่กระทำ 2 หน้าที่ (bifunctional reforming catalyst) ในระดับอุตสาหกรรม กลไกดังกล่าวสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังนี้



ทฤษฎีนี้ได้ทำการทดสอบโดย Weisz และ Swegler ซึ่งเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่ 2 อย่าง (dual-function catalyst) โดยการผสมเชิงกลของอนุภาคซิลิกา-อะลูมินา (ส่วนของไอโซเมโรเซชัน) กับอนุภาคของแพลทินัม (ส่วนของดีไฮโดรจีเนชัน-ไฮโดรจีเนชัน) ที่อยู่บนตัวรองรับเฉื่อย (inert support) อนุภาคที่จัดเตรียมมีขนาดเล็กเพียงพอ (เล็กกว่า 1 ไมครอน) ของผสมที่ได้นี้มีความไวเท่ากับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้นโดยมีหน้าที่ของการเร่งปฏิกิริยา (catalytic functions) ทั้ง 2 หน้าที่อยู่บนอนุภาคเดียวกัน อนุภาคแต่ละชนิดนี้จะไม่แสดงความไวเมื่อทำการทดสอบเพียงชนิดเดียว จากการทดสอบแสดงว่าชนิดของบริเวณดังกล่าวทั้ง 2 ชนิดกระทำหน้าที่อย่างเป็นอิสระไม่ขึ้นต่อกัน และสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (intermediates) สามารถแพร่ด้วยวฏภาคแก๊สจากบริเวณที่เกิดการเร่งปฏิกิริยา (catalytic site) บริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง



รูปที่ 2.6 แบบการถ่ายโอนของสารตั้งต้นในไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลพาราฟินโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยของผสมเชิงกลของอนุภาคซึ่งแต่ละอนุภาคประกอบด้วยหน้าที่ของการเร่งปฏิกิริยาเพียงหน้าที่เดียว (Gates, Katzer และ Schuit, 1979)

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสารชนิดหนึ่งที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาของกระบวนการใด ๆ ที่ภาวะสมดุล อาศัยการเร่งกลไกของปฏิกิริยาทางเคมีเพียงอย่างเดียว การพัฒนาและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานับได้ว่าเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการศึกษาแนวทางใหม่ ๆ เพื่อช่วยเพิ่มปริมาณของผลิตภัณฑ์และให้ได้กลไกที่เหมาะสม ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบโฮโมจีเนียส (homogeneous catalyst) เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาปนอยู่ในสารละลายกับสารตั้งต้นอย่างน้อย 1 ชนิด
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเฮเทอโรจีเนียส (heterogeneous catalyst) เกี่ยวข้องกับวัฏภาคที่มากกว่า 1 วัฏภาค โดยปกติแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาจะอยู่ในวัฏภาคของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จะอยู่ในสภาพของเหลวหรือแก๊ส

เนื่องจากปฏิกิริยาอะตอมของเหลว เป็นการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคในวัฏภาคของเหลว กับของแข็ง (fluid-solid interface) การมีพื้นที่ผิวมากๆ จะสามารถช่วยให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ พื้นที่เหล่านี้เกิดจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุน เรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีรูพรุน (porous catalyst) บางครั้งรูพรุนก็มีขนาดเล็กจนโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้าไปภายในรูพรุนนั้นได้ซึ่งจะเรียกตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ว่า โมเลกุลาร์ซีฟ ทำจากสารธรรมชาติ เช่น ดินเหนียว ซีโอไลต์ (zeolite) หรือสารสังเคราะห์ประเภทผลึกของอะลูมิโนซิลิเกต (alumino silicates) สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีรูพรุนเรียกว่า โมโนลิธิค (monolithic catalyst) ในบางครั้งตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะประกอบด้วยอนุภาคเล็ก ๆ ที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นกระจายอยู่บนสารที่มีความกระตุ้นน้อยกว่า อนุภาคที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะเป็นพวกโลหะบริสุทธิ์หรืออัลลอย รวมเรียกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีตัวรองรับ (supported catalyst) จะมีความแตกต่างอย่างชัดเจนจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่มีตัวรองรับ (unsupported catalyst) ซึ่งจะประกอบด้วยสารหลายชนิดที่จะช่วยเพิ่มความว่องไว ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบมีตัวรองรับ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนอะลูมินาในกระบวนการไอโซเมอไรซ์ และในทางตรงกันข้ามตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้สำหรับปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันที่ใช้ในการผลิตบิวทาไดอีน (butadiene) จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบไม่มีตัวรองรับ

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนมากจะไม่สามารถรักษาความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไว้เหมือนเดิมได้ตลอดเวลา ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องมาจากการที่มีสารแปลกปลอมเข้ามาเกาะบริเวณกระตุ้นของพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเสื่อมสภาพจากความเป็นพิษซึ่งอาจจะเร็วมาก

ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแข็งเป็นประเภทการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemisorption) การดูดซับทางกายภาพเป็นกระบวนการคายความร้อน ปริมาณความร้อนน้อยมาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของแก๊สและผิวหน้าของแข็งน้อย การดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

สำหรับการดูดซับที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเรียกว่า การดูดซับทางเคมี โมเลกุลจะถูกยึดไว้บริเวณผิวหน้าและเป็นกระบวนการคายความร้อนเช่นเดียวกับการดูดซับทางกายภาพ

ได้มีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยากันตลอดเวลาทั้งนี้เพื่อที่จะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม (selectivity) และเสถียรภาพ (stability) ที่ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้แพลทินัมเพียงอย่างเดียว

คุณสมบัติจะดีเท่ากับการเพิ่มโลหะอีกหนึ่งตัวเข้าไปในแพลทินัมด้วยไม่ได้ จึงมีการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยโลหะสองชนิด (bimetallic catalyst) ขึ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาดีขึ้นก็ต้องการสารตั้งต้นที่ตีมากขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเรื่องกำมะถันและน้ำ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยโลหะสองชนิดต้องการสารตั้งต้นที่มีปริมาณกำมะถันน้อยกว่า 1 พีพีเอ็ม (ppm) หากปริมาณกำมะถันลดลงเหลือเพียง 0.5 พีพีเอ็ม ยิ่งถือว่าสารตั้งต้นตีมากขึ้น ขณะเดียวกันน้ำที่ติดอยู่ก็ต้องการให้มีปริมาณต่ำมาก ๆ เช่นกัน มิฉะนั้นคุณสมบัติพิเศษของตัวเร่งปฏิกิริยาจะหายไป ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยโลหะสองชนิดจะมีอายุการใช้งานได้นานในรอบหนึ่ง (cycle) เป็นสองเท่าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะเพียงชนิดเดียว (monometallic catalyst) และได้ผลผลิตที่ดีกว่า ใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่า

แพลทินัมในตัวเร่งปฏิกิริยาจะกระจายอยู่ที่ผิวของอะลูมินาในรูปของอะตอมเล็กๆ ช่วยเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ เมื่อใช้งานไปโลหะก็ยังคงติดอยู่บนอะลูมินาแต่อาจเสื่อมสภาพลงโดยสาเหตุสามประการคือ

ประการแรก เพราะมีโค้กมาเกาะในบริเวณนั้นมากขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทำให้แพลทินัมไม่สามารถทำงานได้เต็มที่ ในกรณีเช่นนี้ถ้าเผาไล่โค้กออกไปเสียจะทำให้แพลทินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้เหมือนเดิม

ประการที่สอง เพราะถูกพิษจากสารที่ติดเข้าไปกับสารตั้งต้น ตัวสำคัญที่สุดคือกำมะถันที่พบอยู่เสมอ กำมะถันจะไปเกาะติดกับแพลทินัมทำให้มันไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้อีกต่อไป รีเจนเนอเรชัน (regeneration) ไล่กำมะถันออกก็พอทำได้ แต่วิธียุ่งยากและได้ไม่สมบูรณ์จึงจำเป็นต้องระวังไม่ให้ปริมาณกำมะถันในสารตั้งต้นมีมากเกินไปกำหนดอันจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุสั้น นอกจากนั้นสารแปลกปลอมอื่น ๆ ก็จะทำลายฤทธิ์ของแพลทินัมได้โดยเฉพาะพวกโลหะ เช่น สารประกอบของตะกั่ว ของสารหนูและโลหะหนักอื่น ๆ เป็นต้น ถ้ามีสารดังกล่าวติดเข้ามาด้วยแล้วจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียหาย ไม่สามารถทำอะไรได้

ประการที่สาม แพลทินัมจะเสื่อมได้ถ้าใช้อุณหภูมิสูง ๆ และมีน้ำปนเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์ ชนิดที่เรียกว่า วอเตอร์ อัปเซต (water upset) ในกรณีเช่นนี้แพลทินัมที่แผ่ตัวกระจายออกไป จะรวมกันเข้าเป็นเม็ดใหญ่ ๆ ทำให้ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง ดังนั้นผิวหน้าที่จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาจึงลดลงมากซึ่งจำเป็นต้องทำให้มันกระจายออกไปใหม่ ในการรีเจนเนอเรท จะเห็นว่าความสะอาดของสารตั้งต้นเป็นเรื่องสำคัญมาก

ความสำเร็จของกระบวนการนี้ จึงขึ้นอยู่กับว่าสามารถทำไฮโดรทรีตเมนต์ (hydrotreatment) ให้สารตั้งต้นสะอาดได้เพียงใด ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยโลหะสองชนิดได้จำกัดไว้ว่า กัมมะถันจะต้องมีไม่เกิน 0.5-1.0 พีพีเอ็มโดยน้ำหนัก และน้ำที่มีอยู่ในระบบต้องอยู่ในช่วง 20-30 พีพีเอ็มโดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะเพียงชนิดเดียวจะมีข้อจำกัดน้อยกว่ากล่าวคือ มีกัมมะถันได้ไม่เกิน 5-10 พีพีเอ็ม และน้ำมีได้ไม่เกิน 30-50 พีพีเอ็มโดยปริมาตร

มีเอกสารสิทธิบัตรเป็นจำนวนหลายร้อยฉบับที่ลงเกี่ยวกับองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำงานเชิงพาณิชย์ ทุกที่จะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีแพลทินัมเป็นองค์ประกอบอาจจะมีแพลทินัมเพียงตัวเดียวหรืออยู่รวมกับโลหะตัวอื่น ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะเพียงตัวเดียวจะมีแพลทินัมอยู่ในปริมาณร้อยละ 0.35-0.60 โดยน้ำหนัก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะสองชนิด (เช่น แพลทินัมกับเรเนียม) จะประกอบด้วยแพลทินัมและเรเนียมอย่างละร้อยละ 0.30 โดยน้ำหนัก ถ้าเป็นโลหะตัวอื่นจะประกอบด้วยแพลทินัมร้อยละ 0.30 โดยน้ำหนักเช่นกัน นอกเหนือจากบทบาทของแพลทินัมในการเตรียมบริเวณสำหรับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ดีไฮโดรจีเนชันแล้วยังก่อให้เกิดผลในการลดอัตราการเกิดของคาร์บอนที่เกาะตัวบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้ต่ำที่สุด โดยไฮโดรเจนจะเกิดการดูดซับทางเคมีลงบนแพลทินัมด้วยการแตกตัว (dissociation) และปรากฏการแพร่อยู่ตามพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา บางทีก็ตามคาร์บอนที่เกาะอยู่ (ปรากฏการณ์ของการดูดซับแล้วตามด้วยการแพร่ผ่านพื้นผิวนั้นบางทีก็เรียกว่า spillover) โค้กจะถูกไฮโดรจีเนชันซึ่งช่วยให้เกิดการคายออกมจากตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการเกิดโค้กเป็นฟังก์ชันกับความดันของไฮโดรเจน ความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดของแพลทินัมที่ยังสามารถใช้งานได้บนผิวตัวเร่งปฏิกิริยานั้นถูกกำหนดไว้โดยความจำเป็นเพื่อรักษาตัวเร่งปฏิกิริยาให้สะอาดมากกว่าปริมาณที่จำเป็นเพื่อจัดเตรียมส่วนที่เป็นโลหะไว้ให้มากพอ ปริมาณของแพลทินัมค่านี้นั้นถูกกำหนดโดยลักษณะของสารป้อนและสภาวะของการทำงาน ตัวอย่างเช่น ไดโอสเฟนส์เป็นสาเหตุให้อัตราการเกิดโค้กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากซึ่งสามารถที่จะเอาชนะได้ในขอบเขตหนึ่งโดยการใช้ปริมาณของแพลทินัมให้สูงขึ้น

ส่วนความเป็นกรด (acid function) ซึ่งจะได้จากอะลูมินาเองประกอบกับคลอไรด์ที่ใส่บนตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจำเป็นต้องให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินได้ตามต้องการ คลอไรด์ไม่สามารถติดแน่นอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบพวกโลหะแต่จะอยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหลวม ๆ โดยมีสภาพสมดุลอยู่กับปริมาณของน้ำที่มีอยู่ เพราะคลอไรด์จะถูกไล่ออกจากตัวเร่ง

ปฏิกิริยาด้วยน้ำกลายเป็นกรดไฮโดรคลอริกติดอยู่ในแก๊ส ถ้ามีน้ำมากจะมีคลอไรด์เหลืออยู่บนตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยไม่พอทำให้เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงต้องมีการเติมคลอรีนเข้าไปในรูปของสารคลอไรด์อินทรีย์ (organic chloride) ตลอดเวลาเพื่อรักษาระดับของคลอไรด์ในตัวเร่งปฏิกิริยา สมดุลระหว่างคลอไรด์บนตัวเร่งปฏิกิริยากับอัตราส่วนของน้ำและกรดไฮโดรคลอริกที่มีอยู่ในแก๊สเหนือตัวเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ดังนั้นการปรับคลอไรด์จึงต้องมีการวัดค่าของน้ำที่มีอยู่ในแก๊สย้อนกลับและในสารตั้งต้น จึงจะมาคำนวณได้ว่าควรจะเติมสารคลอไรด์ลงไปเท่าใด สารคลอไรด์นี้ต้องเติมในสารตั้งต้นตลอดเวลา เรียกว่า ตัวดัดแปรปฏิกิริยา (reaction modifier) ถ้าความเป็นกรดเสื่อมไปจะทำให้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนพาราฟินไม่ดี ทำให้ค่าออกเทนลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าความเป็นกรดสูงเกินไปจะเกิดการแตกตัวเป็นแก๊ส ค่าออกเทนจะสูงขึ้น แต่ผลผลิตจะต่ำและเกิดโค้กทำให้อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง จะเห็นได้ว่าการควบคุมให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสภาพที่กำหนดต้องอาศัยความรู้หลายอย่างและจำต้องทำด้วยความระมัดระวัง สิ่งที่ยกได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในสภาพที่ดีก็คือ ค่าออกเทนและผลผลิตที่ได้ว่าเป็นตามที่ควรหรือเปล่า

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการที่จะให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีจำต้องปรับสมดุลระหว่างความเป็นโลหะและกรดให้พอเหมาะ ถ้ามีสารพิษแปลกปลอมเข้ามาอาจทำให้การทำงานของความเป็นกรดหรือโลหะหรือทั้ง 2 อย่างของตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมไปได้ สารพิษบางอย่าง เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน ฟลูออไรด์ และคลอไรด์อินทรีย์จัดเป็นสารพิษชั่วคราว (temporary poison) กล่าวคือ ถ้าเอาสารพิษออกไปเสียแล้วอาจปรับปรุงให้คุณภาพของตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนดังเดิมได้ แต่ทั้งนี้หมายความว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องไม่ถูกกับสารพิษเหล่านั้นนานเกินไปนัก สารพิษบางอย่างเป็นสารพิษถาวร (permanent poison) เช่น ตะกั่ว อาร์เซนิกหรือสารหนู แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และโซเลนซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียหายไม่อาจทำให้ดีขึ้นดังเดิมได้

2.5 ไอโซเมอไรเซชันทางพาดินทรีย์

กระบวนการไอโซเมอไรซ์ที่ได้รับการอนุญาต (licensed isomerization processes) เท่าที่ค้นหามีอยู่อย่างน้อย 10 กระบวนการด้วยกัน ในบรรดากระบวนการเหล่านี้ส่วนใหญ่ ออกแบบสำหรับไอโซเมอไรเซชันของบิวเทน ส่วนกระบวนการอื่น ๆ ออกแบบสำหรับไอโซ

เมอไรเซชันของเพนเทนและสารตัวที่หนักกว่า กระบวนการดังกล่าวแสดงในตารางที่ 2.3 โดยเรียงตามลำดับตัวอักษร

ตารางที่ 2.3 กระบวนการไอโซเมอไรซ์ที่ได้รับการอนุญาต

ชื่อกระบวนการ	ผู้อนุญาต (Licensor)
Butamer	Universal Oil Products Co.
Butomerate	The Pure Oil Co.
Catalytic Isomerization	Phillips Petroleum Co.
Hysomer	Union Carbide Co. and Shell Co.
Isomerate	The Pure Oil Co.
Isomerization (BP)	The British Petroleum Co.Ltd.
Light Naphtha Isomerization	Standard Oil Co. (Indiana)
Liquid-phase Isomerization	Shell Development Co.
Penex	Universal Oil Products Co.
Pentafining	The Atlantic Refining Co.

ลักษณะของกระบวนการบางกระบวนการที่ได้รับความนิยมเป็นดังนี้

2.5.1 กระบวนการบิวทาเมอร์ (Butamer process)

ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (หัวข้อ 2.1.3)

2.5.2 กระบวนการไฮโซเมอร์ (Hysomer process)

กระบวนการนี้กระทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีบรรยากาศของไฮโดรเจน และเกิดในวัฏภาคไอ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีหน้าที่ 2 หน้าที่ซึ่งประกอบด้วยโลหะมีตระกูลบนซีโอไลต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำการรีเจนเนอเรตได้ใหม่และทนทานต่อสารป้อนเพนเทน/เฮกเซนที่มีปริมาณกำมะถันสูงถึง 35 พีพีเอ็มโดยน้ำหนัก และมีน้ำ 15-20 พีพีเอ็มโดยน้ำหนักได้ นอกจากนี้เอโรเมติกส์ โอลิฟินส์ และแนฟทีนยังไม่สามารถทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพได้ อย่างไรก็ตามสารป้อนควรจะได้ผ่านการไฮโดรทรีตเสียก่อน สภาวะของการทำงานอยู่ที่อุณหภูมิ

450-550 องศาฟาเรนไฮต์ ความดัน 200-600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซในช่วง 1-3 ชั่วโมง¹ และอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วง 1-4

กระบวนการไฮโซเมอร์ของเซลล์ออย ซึ่งเป็นกระบวนการไอโซเมอไรซ์ได้ถูกนำมารวมกับกระบวนการไอโซซิฟ (Isosiv process) ของยูเนียน คาร์ไบด์ ซึ่งเป็นกระบวนการแยกนอร์มัลและไอโซพาราฟิน (นอร์มัลพาราฟินสามารถนำมาแยกกลับเข้าสู่กระบวนการไอโซเมอไรซ์ได้อีกจนกว่าจะหมด) กระบวนการที่เกิดจากการรวมกันนี้เรียกว่า กระบวนการที่ไอพี (TIP; Total Isomerization Process) และได้รับอนุญาตจากบริษัทยูเนียน คาร์ไบด์

ผลผลิตของสารป้อนเพนเทน/เฮกเซนที่มีจุดเดือดเริ่มต้น/จุดเดือดปลาย (IBP / FBP) เท่ากับ 90 / 170 องศาฟาเรนไฮต์ มีดังนี้

	Feed	Hysomer	TIP
Gravity, API	82.9	85.6	86.0
C ₅₊ yield, wt%	-	97.0	96.0
C ₅₊ RON clear	68	79	88
C ₅₊ sensitivity	3.0	3.0	3.0

2.5.3 กระบวนการบีพี (British Petroleum's C₅C₆ isomerization process)

ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (หัวข้อ 2.1.4)

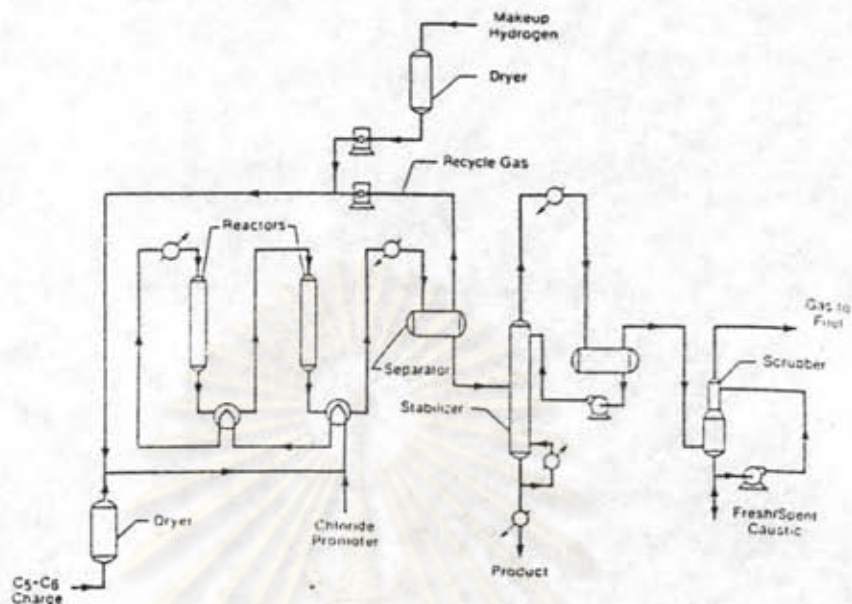
2.5.4 กระบวนการพีเนกซ์ (Penex process)

ยูโอพีได้ออกแบบกระบวนการพีเนกซ์สำหรับไอโซเมอไรซ์เพนเทน เฮกเซน และส่วนผสมของเพนเทน / เฮกเซน ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในบรรยากาศของไฮโดรเจนบนเบตนิงของตัวเร่งปฏิกิริยา I-8 ซึ่งมีความว่องไวสูง และที่สภาวะซึ่งสนับสนุนการเกิดไอโซเมอไรเซชันแต่เกิดไฮโดรแครกกิงได้น้อยที่สุด สภาวะของการทำงานไม่รุนแรงนัก โดยกระทำที่ความดันปานกลาง อุณหภูมิต่ำ ความเร็วเชิงสเปซสูง และความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ สารป้อนได้แก่ แนพทา (straight-run naphtha) , เรฟอร์มเมทา (light reformat) , ไฮโดรแครกเกต (light hydrocrackate) และแรฟฟินेट (raffinate)

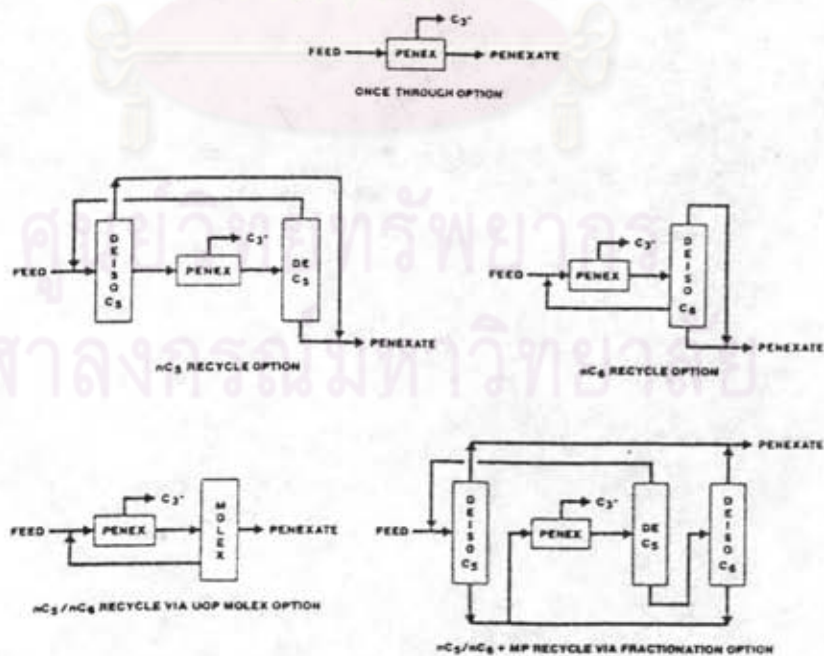
รูปที่ 2.7 แสดงแผนผังการทำงานของกระบวนการที่เนกซ์ แนพทาเบซิ่งที่ใช้เป็นสารตั้งต้นถูกป้อนเข้าสู่เครื่องทำให้แห้ง (dryer) ที่บรรจุโมเลคิวลาร์ซีฟไว้จนเต็มเพื่อกำจัดน้ำออกจากสารตั้งต้นและเป็นการปกป้องตัวเร่งปฏิกิริยาจากความชื้น จากนั้นสารป้อนจะถูกผสมกับแก๊สไฮโดรเจนย้อนกลับและเพิ่มอุณหภูมิได้โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับสารที่ไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ (reactor effluent) สารป้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นนี้จะไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ซึ่งต่อกันเป็นอนุกรมจำนวน 2 ตัว ส่วนสารที่ไหลออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะเย็นตัวลง เกิดการควบแน่นเป็นบางส่วนและแยกออกเป็นสตรีมของของเหลวและไอ สตรีมของไอซึ่งมีไฮโดรเจนอยู่ในปริมาณมากจะถูกรวมเข้ากับแก๊สไฮโดรเจน (จากหน่วยคะตะไลติกริฟอร์มเมอร์) ที่ผ่านการทำให้แห้งแล้ว และไหลย้อนกลับมาที่ทางเข้าของเครื่องปฏิกรณ์อีก สตรีมของของเหลวจะไหลเข้าสู่สเตบิลิเซอร์ ไอที่ออกจากด้านบนของสเตบิลิเซอร์จะถูกจับด้วยด่าง (caustic - scrubbed) ในสครับเบอร์เพื่อกำจัดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ได้จากคลอไรด์อินทรีย์ ซึ่งเติมลงในสารป้อนด้วยปริมาณที่น้อยมากเป็นพีพีเอ็ม แก๊สที่ออกทางด้านบนของสครับเบอร์จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ส่วนผลิตภัณฑ์ไอโซเมอร์ในสถานะของเหลวที่ได้จากส่วนล่างของสเตบิลิเซอร์จะนำไปเป็นส่วนผสมของแก๊สโซลีน

กระบวนการย้อนกลับอาจจะใช้กระบวนการโมเล็กซ์ (Molex process) ของยูโอพี ซึ่งเป็นกระบวนการแยกโดยใช้โมเลคิวลาร์ซีฟ หรือใช้กระบวนการดีไอโซเฮกซาไนซ์ (deisohexanizer) ซึ่งเป็นการแยกสำหรับการย้อนกลับของไอโซเมอร์ที่มีค่าออกเทนต่ำกว่า กระบวนการโมเล็กซ์เหมาะกับสารป้อนที่มีเพนเทนปริมาณมาก และเกิดการย้อนกลับของนอร์มัลเพนเทน / นอร์มัลเฮกเซน กระบวนการดีไอโซเฮกซาไนซ์เหมาะกับสารป้อนที่มีเฮกเซนปริมาณมากและเกิดการย้อนกลับของเมทิลเพนเทนและนอร์มัลเฮกเซน การทำงานเพียงรอบเดียว (single-pass operation) ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าออกเทนแบบริเซอร์ช เคลียร์ประมาณ 85 ส่วน การทำงานแบบย้อนกลับเพิ่มค่าออกเทนของผลิตภัณฑ์โดยให้ค่าออกเทนแบบริเซอร์ช เคลียร์สูงกว่า 90 กระบวนการนี้ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงที่สูงโดยมีการสูญเสียของผลผลิตเพียงเล็กน้อย โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นเหล็กกล้าผสมคาร์บอนจะไม่ถูกกัดกร่อนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ได้

แผนผังกระบวนการแยกมีอยู่หลายแบบด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.8 การจะเลือกใช้กระบวนการแบบใดก็ตามให้เหมาะสมนั้นขึ้นกับองค์ประกอบของสารป้อนและค่าออกเทนที่ต้องการของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.7 กระบวนการพีนิกซ์ (ทำงานเพียงรอบเดียว) (Meyers, 1986)



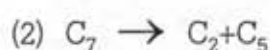
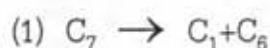
รูปที่ 2.8 กระบวนการพีนิกซ์ (ทำงานแบบย้อนกลับ) (Meyers, 1986)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

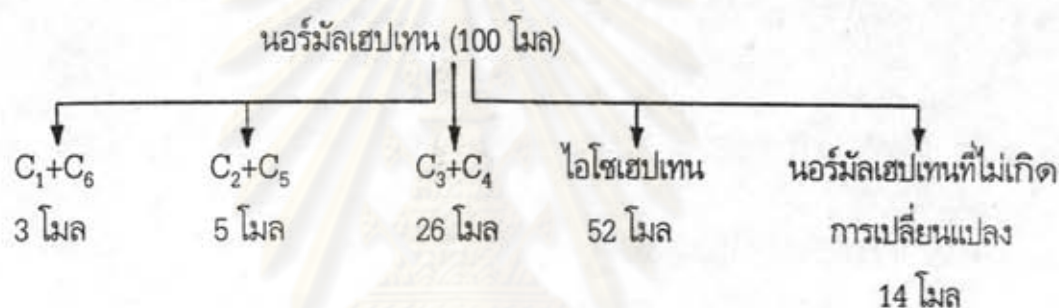
Haensel, V. และ Donaldson, G.R. (1951) อ้างถึงใน Emmett, 1958

1. ศึกษาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเพนเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีปริมาณโลหะแพลทินัมร้อยละ 0.1-1.0 โดยน้ำหนัก และตัวรองรับเป็นอะลูมินา สภาวะของปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 432 องศาเซลเซียส ความดัน 950 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกจ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเพนเทนเท่ากับ 2.9 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1.0 ปริมาตรต่อปริมาตร ชั่วโมง⁻¹ (หน่วยของความเร็วเชิงสเปซในที่นี้คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร ในรูปของเหลวที่ไหลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยา) จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลง (conversion) ของนอร์มัลเพนเทนเท่ากับร้อยละ 39.9 โดยโมล ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะแสดงการเลือกเกิด (selectivity) เป็นไอโซเพนเทนที่สูง (แฟคเตอร์การเลือกเกิด = 0.96) นั่นคือร้อยละ 96 โดยโมลของนอร์มัลเพนเทนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะเกิดเป็นไอโซเพนเทนปรากฏในผลิตภัณฑ์

2. ศึกษาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม สภาวะของปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 459 องศาเซลเซียส ความดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกจ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮปเทนเท่ากับ 3.3 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 2.0 ชั่วโมง⁻¹ จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมินี้เกิดการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮปเทนเท่ากับร้อยละ 87.5 โดยโมล และร้อยละ 59 โดยโมลของนอร์มัลเฮปเทนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะถูกไอโซเมอไรซ์ไปเป็นไอโซเฮปเทน (แฟคเตอร์การเลือกเกิด = 0.59) ส่วนที่เหลือของนอร์มัลเฮปเทนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะเกิดไฮโดรแครกกิงได้เป็นโพรเพนและบิวเทนเป็นส่วนใหญ่ ไฮโดรคาร์บอนมวลโมเลกุลต่ำที่พบในผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงจะเกิดขึ้นทั้ง 3 ปฏิกิริยา ดังนี้คือ



การที่พบโพรเพนและบิวเทนในผลิตภัณฑ์มากกว่าตัวอื่น แสดงว่าปฏิกิริยาที่ (3) ซึ่งเป็นการแตกที่บริเวณศูนย์กลางของโมเลกุลมากกว่าปฏิกิริยาอื่น เป็นปฏิกิริยาที่มักจะเกิดในปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ การที่ความเข้มข้นโดยโมลของมีเทนกับเฮกเซน , อีเทนกับเพนเทน และโพรเพนกับบิวเทนเกือบจะมีค่าเท่ากันนั้น (3.1 กับ 3.0 , 5.2 กับ 6.1 และ 25.1 กับ 26.7 โมลตามลำดับเมื่อนอร์มัลเฮปเทนตั้งต้นเท่ากับ 100 โมล) ชี้ให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงทั้งสามปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นโดยเป็นอิสระต่อกัน ถ้าเริ่มต้นด้วยนอร์มัลเฮปเทน 100 โมล ปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการทดลองดังกล่าวจะเกิดขึ้นในลักษณะต่อไปนี้

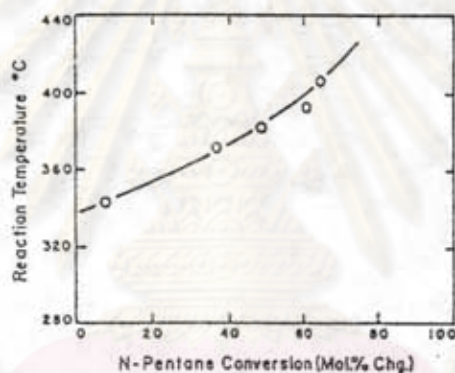


Ciapetta, F.G. และ Hunter, J.B. (1953) อ้างถึงใน Emmett, 1958

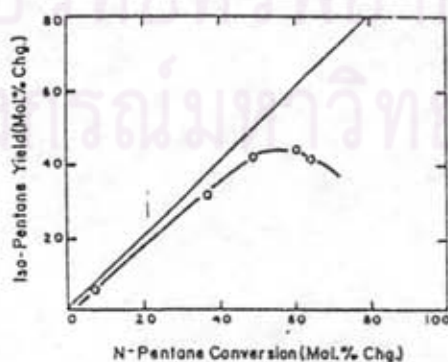
1. ศึกษาไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลเพนเทน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิล ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและมีซิลิกา-อะลูมินาเป็นตัวรองรับ (พื้นที่ผิวเท่ากับ 420 ตารางเมตรต่อกรัม) สภาวะของปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 343-407 องศาเซลเซียส ความดัน 24.8 บรรยากาศ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเพนเทนเท่ากับ 4.0 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1.0 ชั่วโมง⁻¹ จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮปเทนเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 340 องศาเซลเซียสและเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 65 โดยโมลที่อุณหภูมิ 407 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์พบว่าไอโซเพนเทนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการเลือกเกิดเป็นไอโซเพนเทนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮปเทน และแฟกเตอร์การเลือกเกิด (โมลของไอโซเพนเทนต่อโมลของนอร์มัลเพนเทนที่เกิดการเปลี่ยนแปลง) มีค่าเท่ากับ 0.86 ที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทนเท่ากับร้อยละ 49 โดยโมล รูปที่ 2.10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของไอโซเพนเทนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทน พบว่าผลผลิตของไอโซเพนเทนมีค่าสูงสุดที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทนซึ่งอยู่ระหว่างร้อยละ

55 และ 60 โดยโมล และที่การเปลี่ยนแปลงซึ่งสูงกว่าค่านี้อีเทน โพรเพน และบิวเทนจะเกิดขึ้น ซึ่งเป็นผลของการเกิดไฮโดรแครกกิงของเพนเทนโดยที่ผลผลิตของนอร์มัลบิวเทนจะสูงกว่าของ ไอโซบิวเทน แสดงว่านอร์มัลเพนเทนเกิดไฮโดรแครกกิงได้ง่ายกว่าไอโซเพนเทน

จากการเปรียบเทียบข้อมูลการทดลองของ Haensel และ Donaldson (1951) กับ Ciapetta และ Hunter (1953) ในการเกิดไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเพนเทน แสดงว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม-อะลูมินามีความว่องไวน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซิลิกาอะลูมินา โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม-อะลูมินาต้องใช้อุณหภูมิถึง 432 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับ 375 องศาเซลเซียสเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทนเท่ากับร้อยละ 40 โดยโมล



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทน



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของไอโซเพนเทนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทน

2. ศึกษาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ-อะซิดิก ออกไซด์ที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของนิกเกิลบนซิลิกา-อะลูมินา) ได้แก่ SA-5N (VII) , SA-5N (VII-E) และ SA-5N (VII-D) สภาวะของการทดลองคือ อุณหภูมิ 328-413 , 314-342 และ 316-411 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความดัน 24.8 บรรยากาศ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮกเซนเท่ากับ 4.0 และความเร็วเชิงสเปกเท่ากับ 1.0 ชั่วโมง⁻¹ จากการทดลองพบว่า

- การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 305-310 องศาเซลเซียส และมีค่าเท่ากับร้อยละ 85 โดยโมลที่อุณหภูมิ 410-415 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.11

- ผลผลิตของไอโซเฮกเซนเพิ่มขึ้นตามร้อยละการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 70-75 ของการเปลี่ยนแปลงโดยประมาณ และเมื่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนมีค่าสูงขึ้น ผลผลิตของไอโซเฮกเซนจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเกิดไฮโดรแครกกิงได้ผลิตภัณฑ์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 2.12

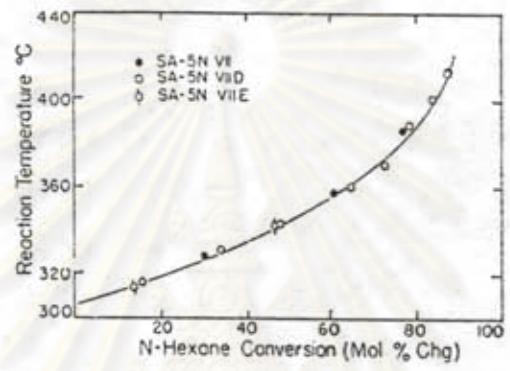
- ตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนสูงที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 70 โดยโมล และการเลือกเกิดมีค่าลดลงเมื่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.13 และพบว่าเมทิลเพนเทนเป็นไอโซเมอร์ที่ปรากฏอยู่ด้วยความเข้มข้นสูงสุด

- ผลผลิตของ 2- และ 3-เมทิลเพนเทนมีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 36 และ 25 โดยโมลตามลำดับที่ร้อยละ 75 ของการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ในขณะที่ผลผลิตสูงสุดของ 2,2- และ 2,3-ไดเมทิลเพนเทนมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยโมล ดังแสดงในรูปที่ 2.15

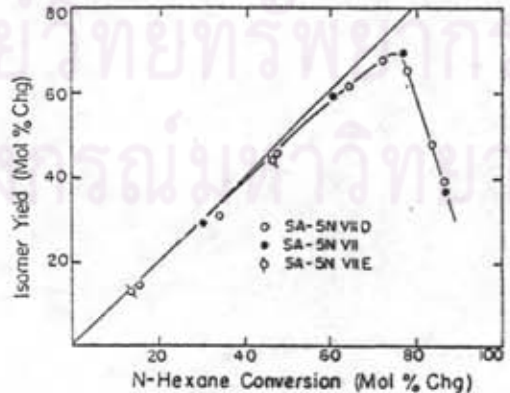
- ปริมาณของมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทนซึ่งเกิดจากไฮโดรแครกกิง มีค่าน้อยมากในช่วงต้นของการเปลี่ยนแปลง แต่จะมีค่ามากขึ้นเมื่อการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนสูงกว่าร้อยละ 75 โดยโมล ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17

- โลหะตัวอื่นของหมู่ 8 ในตารางธาตุ ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน-ดีไฮโดรจีเนชันที่สูงก็สามารถใช้แทนโลหะนิกเกิล (Ni) ได้เช่นกัน ผลจากการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะโคบอลต์ (Co) และโลหะแพลทินัม (Pt) ปริมาณร้อยละ 5 และ 0.5 โดยน้ำหนักบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินาในการเกิดไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน พบว่า

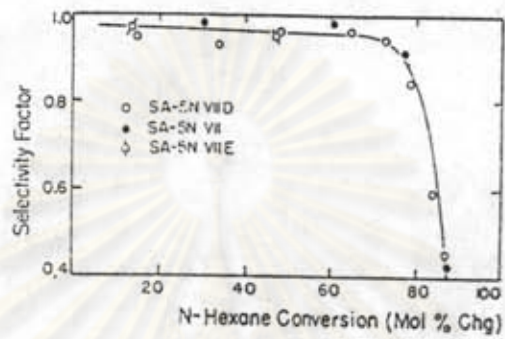
ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้มีความว่องไวและการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮกเซนที่สูงเช่นกัน โดยที่ 0.5 wt%Pt มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยานี้มากกว่า 5 wt%Co และเกือบเท่ากับ 5 wt%Ni ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19



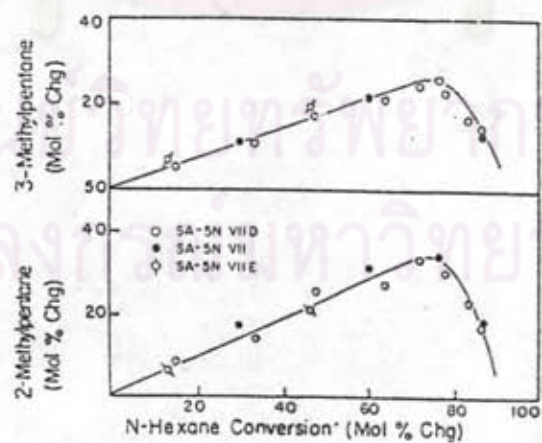
รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



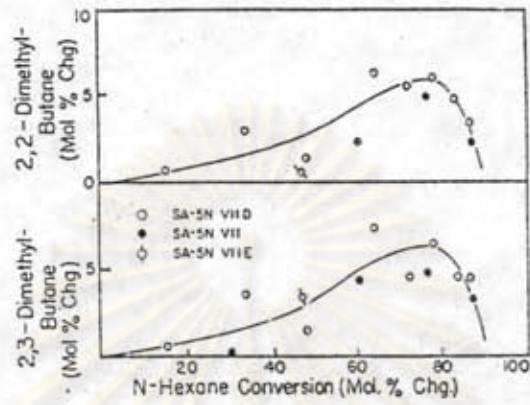
รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของเฮกเซนไอโซเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



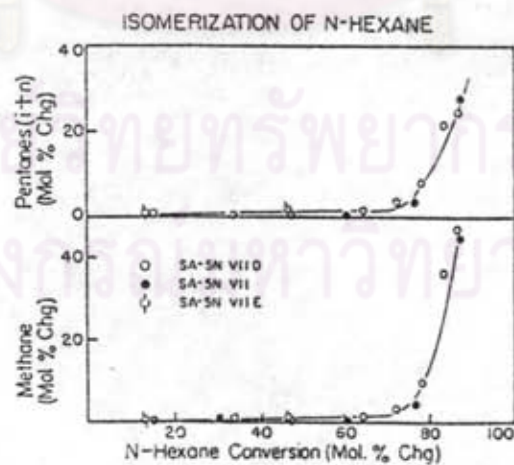
รูปที่ 2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเลือกเกิดเป็นเฮกเซนไอโซเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



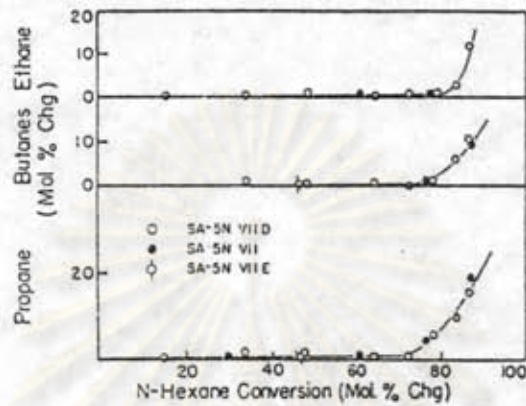
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของ 2-เมทิลเพนเทนและ 3-เมทิลเพนเทนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



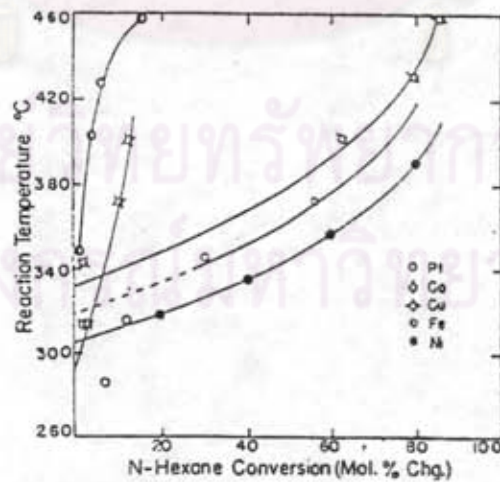
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของ 2,3-ไดเมทิลบิวเทนและ 2,2-ไดเมทิลบิวเทนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



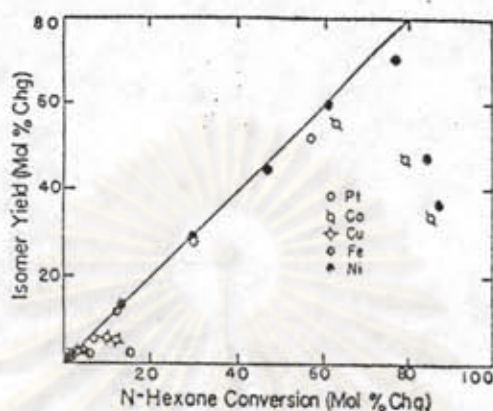
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของมีเทนและเพนเทนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของโพรเพน บิวเทน และอีเทน
กับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน



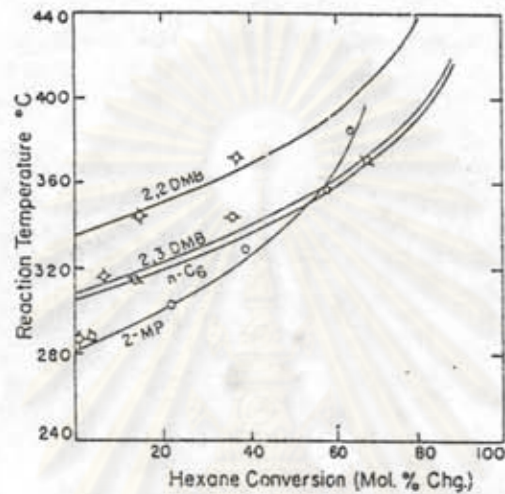
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน
ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ-ซิลิกา-อะลูมินา



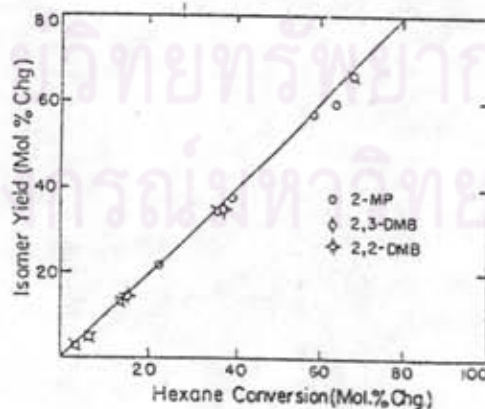
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของเฮกเซนไอโซเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ-ซิลิกา-อะลูมินา

3. ศึกษาไอโซเมอร์ไรเซชันของไอโซเมอร์ของเฮกเซนคือ 2-เมทิลเพนเทน (2-MP) , 2,3-ไดเมทิลบิวเทน (2,3-DMB) และ 2,2-ไดเมทิลบิวเทน (2,2-DMB) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา สภาวะของการทดลองคืออุณหภูมิ 287-385 , 288-371 และ 287-372 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความดัน 24.8 บรรยากาศ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 4.0 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1.0 ชั่วโมง⁻¹ จากรูปที่ 2.20 พบว่าที่การเปลี่ยนแปลงของไอโซเมอร์ต่ำกว่าร้อยละ 50 โดยโมล โดยประมาณ 2-MP มีความว่องไวกว่านอร์มัลเฮกเซนเนื่องมาจากการมีเทอเชียรี คาร์บอนอะตอม (tertiary carbon atom) จะกระตุ้นโมเลกุลของเฮกเซน แต่อย่างไรก็ตามการปรากฏของเทอเชียรี คาร์บอนอะตอม 2 ตัวที่อยู่ติดกัน (พบใน 2,3-DMB) กลับไม่ได้ช่วยส่งเสริมความว่องไวของโมเลกุล และพบว่า 2,3-DMB และนอร์มัลเฮกเซนต้องการอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกันเพื่อให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เท่ากัน(โดยประมาณ) นอกจากนี้ยังพบว่าผลที่ได้เมื่อใช้ 2,2-DMB แสดงว่าการปรากฏของควอเทอนารี คาร์บอนอะตอม (quaternary carbon atom) จะสแตบิลไลซ์โมเลกุล ทำให้ต้องใช้อุณหภูมิของปฏิกิริยา

สูงขึ้นประมาณ 30 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่เท่ากับของนอร์มัลเฮกเซน และจากรูปที่ 2.21 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีการเลือกเกิดต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่สูงมาก แม้กระทั่งที่การเปลี่ยนแปลงของไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะมีค่าสูงถึงร้อยละ 70 โดยโมล

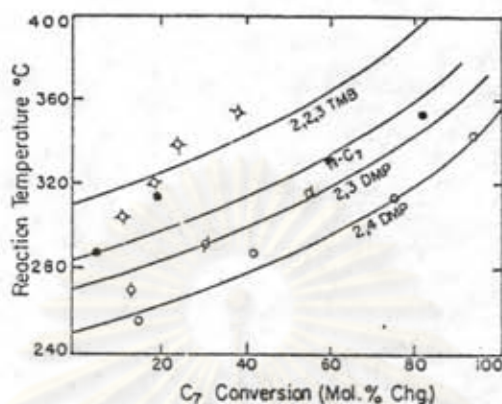


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของเฮกเซนไอโซเมอร์



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตของเฮกเซนไอโซเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซน

4. ศึกษาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทน , 2,3- และ 2,4-ไดเมทิลเพนเทน (2,3- และ 2,4-DMP) และ 2,2,3-ไตรเมทิลบิวเทน (2,2,3-TMB) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา สภาวะของปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 288-353 , 270-316 , 256-343 และ 304-354 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความดัน 24.8 บรรยากาศ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 4.0 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1.0 ชั่วโมง⁻¹ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความว่องไวอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของเฮปเทน ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทนเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส การปรากฏของเทอซีรี คาร์บอนอะตอมในโมเลกุลของเฮปเทนจะช่วยเพิ่มความว่องไวให้แก่โมเลกุลอย่างมาก ดังนั้น 2,3-DMP และ 2,4-DMP จึงต้องการอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่ำกว่านอร์มัลเฮปเทนประมาณ 15 และ 35 องศาเซลเซียสตามลำดับเพื่อให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าเดียวกัน โดยที่ 2,4-DMP มีความว่องไวมากกว่า 2,3-DMP อย่างไรก็ตาม การปรากฏของควอเทอนารี คาร์บอนอะตอมอยู่ติดกับเทอซีรี คาร์บอนอะตอม เช่นใน 2,2,3-TMB เป็นการลดความว่องไว (deactivate) ของโมเลกุลจึงต้องการอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่านอร์มัลเฮปเทนประมาณ 25 องศาเซลเซียสเพื่อให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงค่าเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ยังมีการเลือกเกิดที่สูงสำหรับการเกิดไอโซเมอไรเซชันของเฮปเทนแม้ว่าการเปลี่ยนแปลงสูงถึงร้อยละ 60-80 โดยโมล เช่น ในปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทนที่อุณหภูมิ 332 องศาเซลเซียสซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮปเทนเท่ากับร้อยละ 59.3 โดยโมล จะมีการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮปเทนสูงถึงร้อยละ 96 (แฟคเตอร์การเลือกเกิด = 0.96) ในทำนองเดียวกันที่อุณหภูมิ 313 องศาเซลเซียสของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของ 2,4-DMP นั้น ร้อยละ 93 โดยโมลของ 2,4-DMP ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (ร้อยละ 75.1 โดยโมล) จะถูกไอโซเมอไรซ์ไปเป็นเฮปเทนตัวอื่น



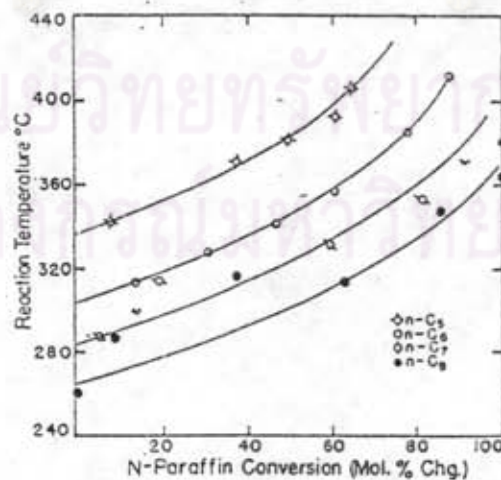
รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของเฮปแทนไอโซเมอร์

5. ศึกษาไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลออกเทนและ 2,2,4-ไตรเมทิลเพนเทน (2,2,4-TMP) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา สภาพของการทดลองคือ อุณหภูมิ 260-380 องศาเซลเซียสตามลำดับ ความดัน 24.8 บรรยากาศ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 4.0 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1.0 ชั่วโมง⁻¹ จากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลออกเทนเริ่มเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าของนอร์มัลเฮปแทนและนอร์มัลเฮกเซน การเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลสำหรับปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของนอร์มัลออกเทนจะปรากฏในลักษณะเดียวกับของเฮปแทนและเฮกเซน โดยที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลออกเทนเท่ากับร้อยละ 97.9 โดยโมลจะได้แฟคเตอร์การเลือกเกิดสูงถึง 0.71 ในกรณีของออกเทนปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงจะเกิดขึ้นที่บริเวณศูนย์กลางของโซ่เป็นส่วนใหญ่ ปริมาณเชิงโมลสัมพันธ์ (relative molar quantities) ของบิวเทนและโพรเพนชี้ให้เห็นว่าออกเทน 3 โมเลกุลจะแตกไปเป็นบิวเทน 2 โมเลกุล (โดยประมาณ) และทุก ๆ โมเลกุลที่ทำปฏิกิริยาจะให้โพรเพน 1 โมเลกุลและเพนเทน 1 โมเลกุล จากผลที่ได้พบว่า 2,2,4-TMP เกือบจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์ได้เป็นไอโซบิวเทน 2 โมเลกุลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซิลิกา-อะลูมินา และมีไอโซเมอร์ของออกเทนปรากฏอยู่ใน

ผลิตภัณฑ์ในปริมาณเล็กน้อยเท่านั้น (ต่ำกว่าร้อยละ 2) แสดงว่าในกรณีของพาราฟินที่มีกิ่งมาก ๆ เช่น 2,2,4-TMP ปฏิกริยาไฮโดรแครกกิงจะเกิดที่อัตราเร็วสูงมาก

6. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณคาร์บอน (carbon content) และโครงสร้างของโมเลกุล (molecular structure) ต่อความว่องไวของโมเลกุล โดยทำปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชันของอัลเคน ด้วยตัวเร่งปฏิกริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา จากการทดลองพบว่าที่การเปลี่ยนแปลงร้อยละ 50 โดยโมลของนอร์มัลอัลเคน การเลือกเกิดสำหรับปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน นอร์มัลเฮปเทน และนอร์มัลออกเทนจะมากกว่าร้อยละ 95 และของนอร์มัลเพนเทนเท่ากับร้อยละ 86 โดยโมล ในขณะที่อุณหภูมิที่ต้องการในการเกิดปฏิกริยาของนอร์มัลเพนเทน นอร์มัลเฮกเซน นอร์มัลเฮปเทน และนอร์มัลออกเทนเท่ากับ 384, 346, 323 และ 302 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังรูปที่ 2.23 จะเห็นว่าความว่องไวของโมเลกุลเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของปริมาณคาร์บอน ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นที่ได้จากปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน นอร์มัลเฮปเทน และนอร์มัลออกเทนคือเมทิลไอโซเมอร์

นอร์มัลเฮกเซน → 2- และ 3- เมทิลเพนเทน
 นอร์มัลเฮปเทน → 2- และ 3- เมทิลเฮกเซน
 นอร์มัลออกเทน → 2-, 3- และ 4-เมทิลเฮปเทน

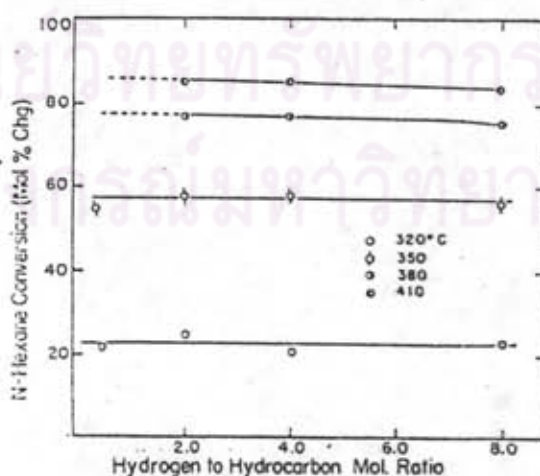


รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเพนเทน นอร์มัลเฮกเซน นอร์มัลเฮปเทน และนอร์มัลออกเทน

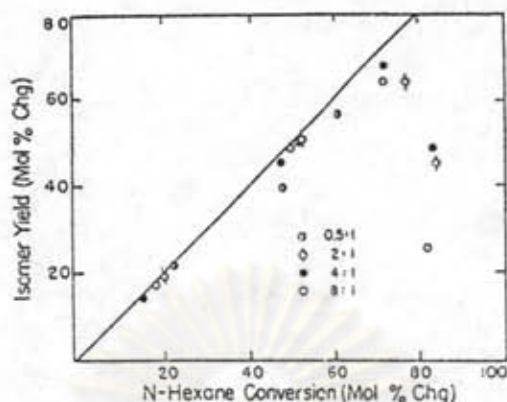
7. ศึกษาถึงผลกระทบของอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา สภาวะของการทดลองคือ อุณหภูมิ 316-404 องศาเซลเซียส ความดัน 350 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ

อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอน	0.5	2	8
ความเร็วเชิงสเปซ, ชั่วโมง ⁻¹	2.2	1.32	0.55

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนไม่ขึ้นกับอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนดังแสดงในรูปที่ 2.24 ปฏิกิริยาที่ใช้อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าต่ำ (0.5 ต่อ 1) จะสังเกตเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นเนื่องมาจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดจากการเกาะตัวของคาร์บอนโดยมีปริมาณคาร์บอนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จนแล้วเท่ากับร้อยละ 0.65 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับร้อยละ 0.03 โดยน้ำหนักสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จนแล้วซึ่งใช้ค่าอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนที่มีค่าสูงกว่าและพบว่าอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนมีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยต่อผลผลิตของไอโซเมอร์ที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนค่าเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.25



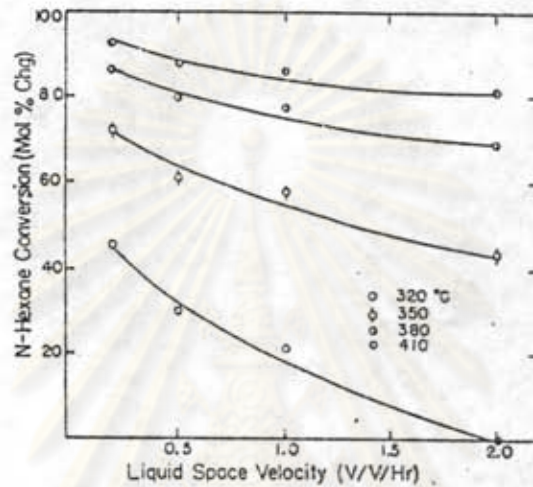
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่



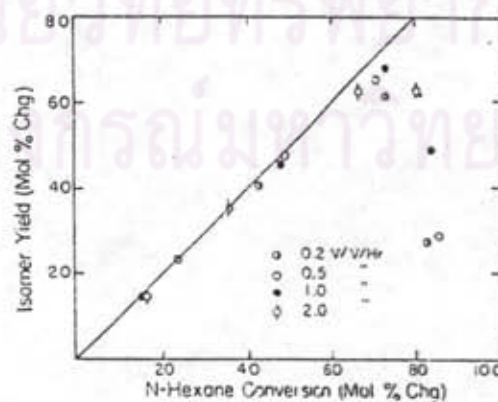
รูปที่ 2.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอน กับผลผลิตของไอโซเมอร์

8. ศึกษาผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซ (liquid space velocity) ที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา สภาวะของการทดลองคืออุณหภูมิ 315-404 องศาเซลเซียส ความดัน 350 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกจ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 4.0 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 0.2 , 0.5 และ 2.0 ชั่วโมง⁻¹ จากรูปที่ 2.26 แสดงว่าที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนจะลดลงในขณะที่ความเร็วเชิงสเปซของสารป้อนเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงของการเปลี่ยนแปลงจะมีค่าต่ำลงที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้น เนื่องมาจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงซึ่งกลายเป็นปฏิกิริยาหลักเมื่อการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนสูงกว่าร้อยละ 70-80 โดยโมล และเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนสูงจึงทำให้การควบคุมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเรื่องที่ยากมากขึ้น ขณะที่อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจึงเป็นการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซจะสังเกตเห็นความเปลี่ยนแปลงของค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าในกรณีที่ใช้อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่ต่ำกว่าซึ่งปฏิกิริยาหลักคือ ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันไปเป็นไอโซเมอร์ของเฮกเซน และจากรูปที่ 2.27 พบว่าความเร็วเชิงสเปซมีผลกระทบน้อยมากต่อการเลือกเกิดของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจนถึงการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนที่เท่ากับร้อยละ 65-70 โดยโมล แสดงว่าด้วยเวลาในการสัมผัสค่าที่ใช้ในตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวแสดง

ความไวต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้มากกว่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันซึ่งคำนวณที่การเปลี่ยนแปลงคงที่เท่ากับร้อยละ 50 โดยโมลมีค่าอยู่ในช่วง 52-56 กิโลคาลอรีต่อโมล



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงสเปกกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่

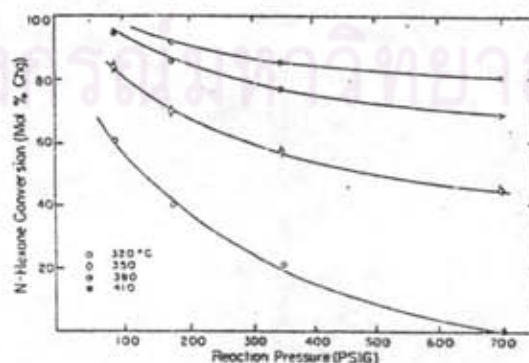


รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงสเปกกับผลผลิตของไอโซเมอร์

9. ศึกษาผลกระทบของความดันรวมของปฏิกิริยาที่มีต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซิลิกา-อะลูมินา สภาวะของการทดลองคือ อุณหภูมิ 316-406 องศาเซลเซียส อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 4.0

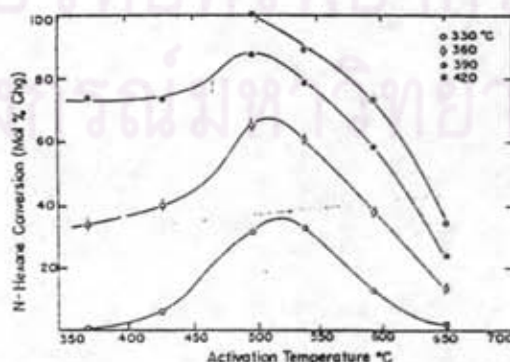
ความดัน, ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ	90	175	700
ความเร็วเชิงสเปซ, ชั่วโมง ⁻¹	0.26	0.5	2.0

จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่ การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนจะลดลง ในขณะที่ความดันรวมของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เช่น ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนที่ความดัน 90 และ 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ มีค่าเท่ากับร้อยละ 61 และน้อยกว่าร้อยละ 15 โดยโมลตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.28 และในช่วงของความดันที่ทำการทดลองนั้นความดันรวมของปฏิกิริยาไม่มีผลกระทบต่อการเลือกเกิดของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน และพบว่าที่ความดันบรรยากาศ ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเป็นปฏิกิริยาแรกที่สังเกตพบในการผ่านนอร์มัลเฮกเซนและไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซิลิกา-อะลูมินา ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 0.5 ชั่วโมง⁻¹ พบว่าร้อยละ 20 โดยโมลของนอร์มัลเฮกเซนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์ตัวอื่น และได้ผลผลิตของไอโซเฮกเซนเพียงร้อยละ 4.4 โดยโมลเท่านั้น ส่วนที่เหลือของนอร์มัลเฮกเซนที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะปรากฏในรูปของไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่า (มีมีเทนมากที่สุด)

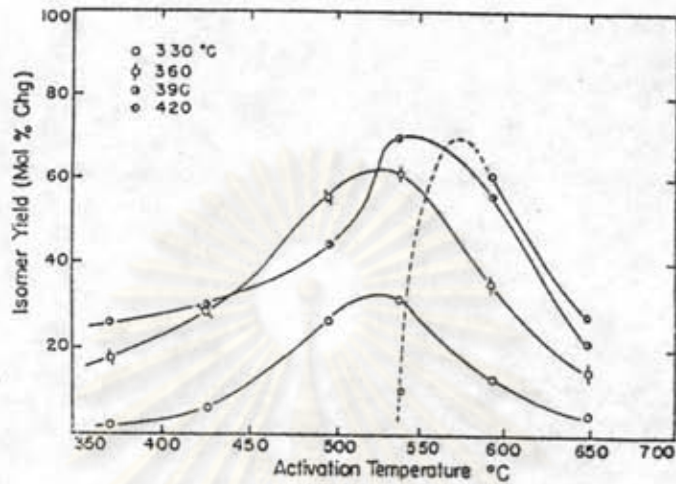


รูปที่ 2.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่

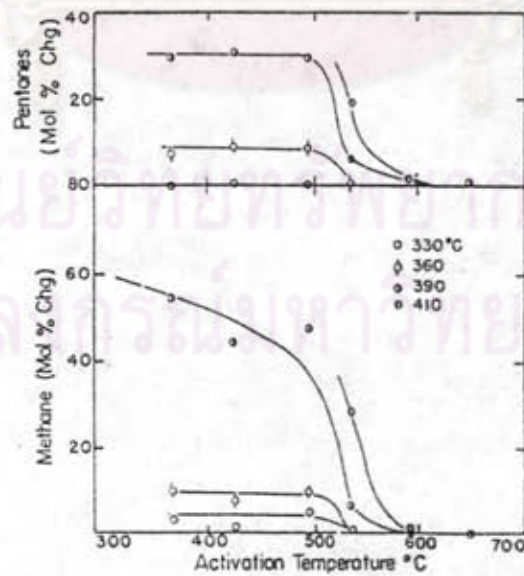
10. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst activation temperature) ที่มีต่อความว่องไวและการเลือกเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซิลิกา-อะลูมินา สำหรับการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน โดยทำการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิแตกต่างกันคือ 371, 427, 496, 593 และ 649 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16 ชั่วโมง โดยใช้ อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 6 ลิตรต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาคงที่ (ในช่วง 330-390 องศาเซลเซียส) การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและผลผลิตของไอโซเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาและได้ค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิกระตุ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 500-550 องศาเซลเซียส จากนั้นการเปลี่ยนแปลงและผลผลิตของไอโซเมอร์จะลดลงที่อุณหภูมิกระตุ้นสูงกว่า 500-550 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 2.29 และ 2.30 และพบว่าที่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาคงที่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิต่ำกว่าจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงที่สูงกว่า (ได้ผลผลิตของมีเทนและเพนเทนที่มากกว่า) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิสูงกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.31 ในการกำหนดขอบเขตของรีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่ใช้ (อัตราการไหลของไฮโดรเจนเท่ากับ 6 ลิตรต่อชั่วโมงเป็นเวลา 16 ชั่วโมง) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลออกไซด์มีรีดักชันเพียงร้อยละ 40-50 เท่านั้น ที่อุณหภูมิกระตุ้นเท่ากับ 427 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับรีดักชันที่เท่ากับร้อยละ 90-95 ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิเท่ากับ 538 องศาเซลเซียส จากผลที่ได้แสดงว่านิกเกิลออกไซด์ที่เกิดรีดักชันไม่สมบูรณ์มีผลทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนและการเลือกเกิดต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่น้อยกว่า



รูปที่ 2.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยากับการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่



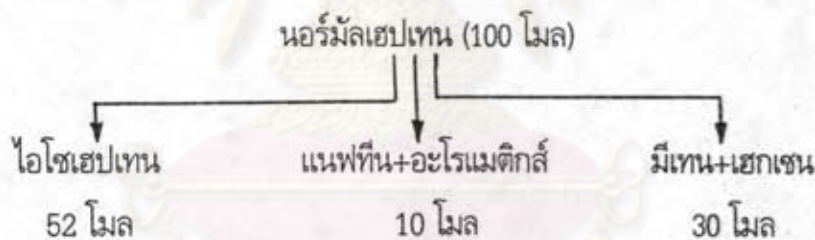
รูปที่ 2.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยากับผลผลิตของไอโซเมอร์ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่



รูปที่ 2.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยากับผลผลิตของมีเทนและเพนเทนที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาคงที่

Hettinger, W.P., Keith, C.D., Gring, J.L. และ Teter, J.W. (1955) อ้างถึงใน Emmett, 1958

ศึกษาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะแพลทินัม เท่ากับร้อยละ 0.6 โดยน้ำหนักบนอะลูมินา สภาวะของการทดลองคือ อุณหภูมิ 468 และ 496 องศาเซลเซียส ความดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮปเทนเท่ากับ 4.7 , 4.8 และ 5.1 และความเร็วเชิงสเปซ (WHSV) เท่ากับ 5.0 , 5.1 , 48.1 และ 49.0 กรัมต่อกรัมต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานี้มีความไวต่อปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทนแม้แต่ที่ความเร็วเชิงสเปซซึ่งมีค่าสูง ๆ และมีการเลือกเกิดสำหรับปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันที่ไม่สูงเท่ากับที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซิลิกา-อะลูมินา ได้มีการประมาณว่าที่อุณหภูมิ 496 องศาเซลเซียสและความดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกจ และการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นของปฏิกิริยา (primary reaction products) มีดังต่อไปนี้



ที่การเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮปเทนมีค่าสูง ๆ กล่าวคือร้อยละ 85.8 และ 95.3 โดยโมล ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะเหมือนกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-ซิลิกา-อะลูมินาตรงที่ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงจะเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญปฏิกิริยาหนึ่ง

Weisz (1962) อ้างถึงใน Satterfield, 1980

ศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนและนอร์มัลเฮปเทน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยหน้าที่ของดีไฮโดรจีเนชัน หรือหน้าที่ของความเป็นกรดอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของผสมเชิงกล (mechanical mixtures) ของทั้งสองหน้าที่นี้ โดยที่สารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาอยู่ในวัฏภาคแก๊สซึ่งถูกส่งผ่านโดยการแพร่ของ

แก่ระหว่างบริเวณที่แตกต่างกันของตัวเร่งปฏิกิริยา และทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดดังนี้

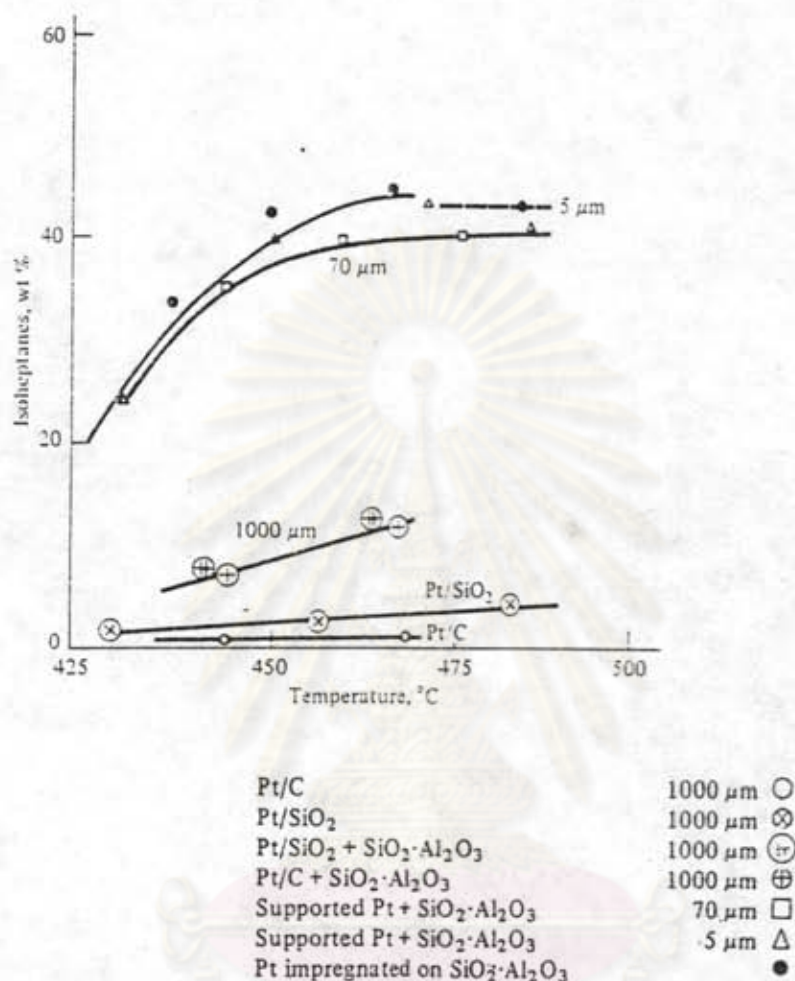
1. ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.4 ซึ่งได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 373 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮกเซนเท่ากับ 5 ต่อ 1 พบว่าเกิดปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อยบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม / ซิลิกาหรือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเพียงซิลิกา-อะลูมินา (เป็นกรด) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของผสมเชิงกลจะมีความว่องไวมากทีเดียว

2. ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทน ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 2.32 พบว่าเกิดปฏิกิริยาได้เพียงเล็กน้อยบนตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม / ซิลิกาหรือแพลทินัม / คาร์บอน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของผสมเชิงกลของตัวใดตัวหนึ่งดังกล่าวกับซิลิกา-อะลูมินาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าอย่างมาก และจาก upper curves ทั้ง 3 เส้นในรูปที่ 2.32 แสดงว่ายิ่งอนุภาคขององค์ประกอบที่ใช้ในตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็กลงเท่าใดก็จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเพิ่มขึ้นได้มากเท่านั้น ของผสมของอนุภาคที่ละเอียดที่สุดให้ผลการทดลองเทียบเท่ากับแพลทินัมที่ถูกเคลือบอยู่บนซิลิกา-อะลูมินาโดยวิธีแพร่ซึม (Pt impregnated on $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$)

ตารางที่ 2.4 ไอโซเมอไรเซชันของเฮกเซนบนของผสมเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยา

Catalyst charge to reactor	Wt % conversion to isohexanes
10 cm ³ of platinum/silica	0.9
10 cm ³ of silica-alumina	0.3
Mixture of 10 cm ³ of each of above	6.8

*Weisz (1962). (Reprinted with permission from *Advances in Catalysis*. Copyright by Academic Press.)



(Weisz, 1962.) (Reprinted with permission from *Advances in Catalysis*. Copyright by Academic Press.)

รูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิของไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทน (Satterfield, 1980)

Mohammed Abdul, H-A-K, Radhi, M.A., Naji, A.R. และ Abdul-Aziz, F.S. (1988)

ศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของเฮกเซน (จุดเดือด 68-69 องศาเซลเซียส) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม-อะลูมินาในเครื่องปฏิกรณ์เคมี bench scale ซึ่งทำงานอย่างต่อเนื่อง สภาวะของปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 300-450 องศาเซลเซียส ความดัน 1.5 เมกะปาสกาล

อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอนเท่ากับ 3.0 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 2.0 ชั่วโมง¹ โดยศึกษาผลของการเติมคลอไรด์ในเฮกเซนที่มีต่ออัตราเร็วของการเกิดไอโซเมอร์ไรเซชันพบว่าผลผลิตของไอโซเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ (สูงถึงร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก) ในสารป้อนแต่การเพิ่มของผลผลิตของไอโซเมอร์จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าร้อยละ 0.12 โดยน้ำหนัก

Radhi, M.A., Al-Mutawalli, F.S. และ Al-Sammarie, E.A. (1989)

ศึกษาไอโซเมอร์ไรเซชันของสารผสมของนอร์มัลเฮกเซนและนอร์มัลเพนเทน ซึ่งมีอัตราส่วนเชิงปริมาตรเท่ากับ 1 ต่อ 1 (ปริมาณของไอโซเพนเทน นอร์มัลเพนเทน และนอร์มัลเฮกเซนเท่ากับร้อยละ 0.37 , 55.32 และ 44.31 โดยน้ำหนักตามลำดับ) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม-อะลูมินาเชิงพาณิชย์ (Pro-Catalyse RG-412) ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่งที่ทำงานอย่างต่อเนื่องด้วยความดันบรรยากาศ โดยได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วเชิงสเปซ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อไฮโดรคาร์บอน และความเข้มข้นของคลอไรด์ที่เติมลงในไฮโดรคาร์บอน จากการทดลองพบว่าผลผลิตของไอโซเฮกเซนและไอโซเพนเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของคลอไรด์จนถึงร้อยละ 0.1 และ 0.2 โดยโมลของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ตามลำดับ ในขณะที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของคลอไรด์สูงขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาจนอยู่ในช่วง 350-400 องศาเซลเซียส และผลผลิตของไอโซเมอร์จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจนสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส และพบว่าที่สภาวะเดียวกันการเปลี่ยนแปลงของนอร์มัลเฮกเซนในสารผสมจะสูงกว่านอร์มัลเฮกเซนบริสุทธิ์

มานะ อมรกิจบำรุง (2536)

ศึกษาไฮโดร-ไอโซเมอร์ไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิดต่างๆ งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจำนวน 6 ตัวอย่าง โดยให้มีปริมาณโลหะแพลทินัมหรือแพลเลเดียมคงที่เท่ากับร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และมีตัวรองรับเป็นซีโอไลต์ 3 ชนิดคือ HM , HY และ USY จากนั้นทำการคัดเลือกหาตัวที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไอโซเมอร์ไรเซชันของนอร์มัลเฮกเซนในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบท่อบรรจุเบดนิ่งชนิดไหลผ่านลงที่สามารถทนความดันสูง เงื่อนไขที่ใช้คัดเลือกคือ อุณหภูมิ

200-400 องศาเซลเซียส ความดัน 5 และ 20 บาร์ อัตราส่วนเชิงโมลของไฮโดรเจนต่อนอร์มัลเฮปเทนเท่ากับ 10 และความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 5.5 ปริมาตรต่อปริมาตร ชั่วโมง¹ จากการทดสอบพบว่าในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น 6 ตัวอย่าง ตัวที่เหมาะสมที่สุดคือ 0.5 wt% Pt/USY ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความดัน และความเร็วเชิงสเปซที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดร-ไอโซเมอไรเซชันของนอร์มัลเฮปเทนบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่คัดเลือกไว้แล้วคือ 0.5 wt% Pt/USY ค่าของอุณหภูมิ ความดันและความเร็วเชิงสเปซที่แปรเปลี่ยนในการศึกษานี้จะอยู่ในช่วง 240-320 องศาเซลเซียส ช่วง 5-30 บาร์และช่วง 2.7-30 ชั่วโมง¹ ตามลำดับ

จากการทดลองพบว่าความดันที่เหมาะสมในแง่รวมคือ 5 บาร์ ส่วนเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิตไอโซเฮปเทนจะแปรเปลี่ยนไปตามเกณฑ์ที่ใช้เป็นเครื่องตัดสิน กล่าวคือถ้ามุ่งสนใจที่ค่าการเลือกเกิดเป็นไอโซเฮปเทนสูงสุด (การสูญเสียของสารทำปฏิกิริยาน้อยที่สุด) ควรเดินเครื่องที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ โดยใช้ความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 5.5 ชั่วโมง¹ ผลิตภัณฑ์ปฐมภูมิที่พบคือ เฮปเทนโซกิงเดี่ยว ส่วนไอโซเมอร์ชนิดหลายโซกิงและผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวบางชนิดจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาต่อเนื่อง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักวิจัย	ไฮโดรคาร์บอน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะของการทดลอง	ผลการทดลอง
Haensel และ Donaldson	n-pentane	Pt = 0.1-1.0 %wt บนอะลูมินา	T = 432 °C, P = 950 psig, H ₂ /HC = 2.9 LHSV = 1.0 hr ⁻¹	ที่ conversion = 39.9 %mol จะได้ selectivity factor = 0.96
	n-heptane	Pt	T = 459 °C, P = 500 psig, H ₂ /HC = 3.3 LHSV = 2.0 hr ⁻¹	conversion = 87.5 %mol และ selectivity factor = 0.59
Ciapetta และ Hunter	n-pentane	Ni = 5.0 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 343-407 °C, P = 24.8 atm, H ₂ /HC = 4.0 LHSV = 1.0 hr ⁻¹	เริ่มเกิด conversion ที่ 340 °C และได้ conversion = 65 %mol ที่ 407 °C, selectivity factor = 0.86 ที่ conversion = 49 %mol, ได้ max. yield ของ isopentane ที่ conversion ในช่วง 55-60 %mol
	n-hexane	Ni = 5.0 %wt บนซิลิกาอะลูมินา ได้แก่ SA-5N (VII) SA-5N (VII-E) SA-5N (VII-D)	T = 328-413 °C, 314-342 °C และ 316-411 °C, สำหรับ SA-5N (VII), SA-5N (VII-E) และ SA-5N (VII-D) ตามลำดับ, P = 24.8 atm, H ₂ /HC = 4.0, LHSV = 1.0 hr ⁻¹	เริ่มเกิด conversion ที่ 305-310 °C และได้ conversion = 85 %mol ที่ 410-415 °C, มี selectivity สูงที่ conversion < 70 %mol, ได้ max. yield ของ isohexane ที่ conversion 70-75 %mol

นักวิจัย	ไฮโดรคาร์บอน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะของการทดลอง	ผลการทดลอง
Ciapetta และ Hunter (ต่อ)	ไฮโดรเมอร์ของ hexane ได้แก่ 2-MP, 2,3-DMB, 2,2-DMB	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 287-385 °C, 288-371 °C, 287-372 °C ตามลำดับ, P = 24.8 atm, H ₂ /HC = 4.0, LHSV = 1.0 hr ⁻¹	ที่ conversion < 50 %mol จะได้ความว่องไวของ 2-MP > n-C ₆ = 2,3-DMB > 2,2-DMB
	n-heptane, 2,3- และ 2,4-DMP, 2,2,3-TMB	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 228-353 °C, 270-316 °C, 256-343 °C และ 304-354 °C ตามลำดับ, P = 24.8 atm, H ₂ /HC = 4.0, LHSV = 1.0 hr ⁻¹	ความว่องไวของ 2,4-DMP > 2,3-DMP > n-C ₇ > 2,2,3-TMB
	n-octane, 2,2,4-TMP	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 260-380 °C, และ 259-336 °C ตามลำดับ, P = 24.8 atm, H ₂ /HC = 4.0, LHSV = 1.0 hr ⁻¹	ไฮโดรเมอร์ของ n-octane เริ่มเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าของ n-heptane และ n-hexane ที่ conversion ของ n-octane = 97.9 %mol จะได้ selectivity factor = 0.71 ในกรณีของออกเทน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงจะเกิดขึ้นที่บริเวณศูนย์กลางของโซ่เป็นส่วนใหญ่ ในกรณีของพาราฟินที่มีกิ่งมาก ๆ เช่น 2,2,4-TMP ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงจะเกิดด้วยอัตราเร็วสูงมาก

นักวิจัย	ไฮโดรคาร์บอน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะของการทดลอง	ผลการทดลอง
Ciapetta และ Hunter (ต่อ)	n-alkane ศึกษาอิทธิพลของ ปริมาณแคโรบอนและ โครงสร้างของ โมเลกุลต่อความ ว่องไวของโมเลกุล	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 316-404 °C, P = 350 psig, H ₂ /HC = 0.5, 2.0, 8.0 ที่ LHSV = 2.2, 1.32, 0.55 hr ⁻¹ ตามลำดับ	ที่ conversion = 50 %mol selectivity ของ n-C ₆ , n-C ₇ , n-C ₈ มากกว่า 95 %mol และ ของ n-C ₅ = 86 %mol และความว่องไวของ n-C ₈ > n-C ₇ > n-C ₆ > n-C ₅ conversion ของ n-C ₆ ไม่ขึ้นกับ H ₂ /HC ซึ่งมี อิทธิพลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยต่อ yield ของ ไอโซเมอร์ ที่ conversion ของ n-C ₆ ค่าเดียวกัน
	ศึกษาผลกระทบของ อัตราส่วนเชิงโมล ของไฮโดรเจนต่อ ไฮโดรคาร์บอนที่มี ต่อไอโซเมอร์ไรเซชัน ของ n-hexane	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา		

นักวิจัย	ไฮโดรคาร์บอน	ตัวเร่งปฏิกิริยา	สภาวะของการทดลอง	ผลการทดลอง
Ciappetta และ Hunter (ต่อ)	ศึกษาผลกระทบบของความเร็วเชิงสเปกที่มีต่อไอโซเมอไรเซชันของ n-hexane	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 315-404 °C, P = 350 psig, H ₂ /HC = 4.0 LHSV = 0.2, 0.5, 2.0 hr ⁻¹	ที่ T คงที่ conversion ลดลงในขณะที่ LHSV เพิ่มขึ้น แต่อัตราการลดลงของ conversion จะมีค่าน้อยลงเมื่อ T เพิ่มขึ้น และ LHSV มีผลน้อยมากต่อ selectivity จนถึง conversion ในช่วง 65-70 %mol
	ศึกษาผลกระทบบของ ความเข้มข้นของปฏิกิริยาที่มีต่อไอโซเมอไรเซชันของ n-hexane	Ni = 5 %wt บนซิลิกาอะลูมินา	T = 316-406 °C, H ₂ /HC = 4.0, P=90,175,700 psig ที่ LHSV = 0.26, 0.5, 2.0 hr ⁻¹ ตามลำดับ	ที่ T คงที่ conversion ลดลงในขณะที่ P เพิ่มขึ้น และ P ไม่มีผลต่อ selectivity ของปฏิกิริยา และที่ความเข้มข้นบรรยากาศ ไฮโดรแครกกิง เป็นปฏิกิริยาแรกที่สังเกตพบ
	ศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิกระตุ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อไอโซเมอไรเซชันของ n-hexane	Ni บนซิลิกาอะลูมินา	ทำการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 371, 427, 496, 593 และ 649 °C เป็นเวลา 16 hr อัตราการไหลของ H ₂ = 6 l/hr	อุณหภูมิกระตุ้นที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 500-550 °C ซึ่งจะได้ conversion ของ n-hexane และ yield ของไอโซเมอร์สูงสุด