



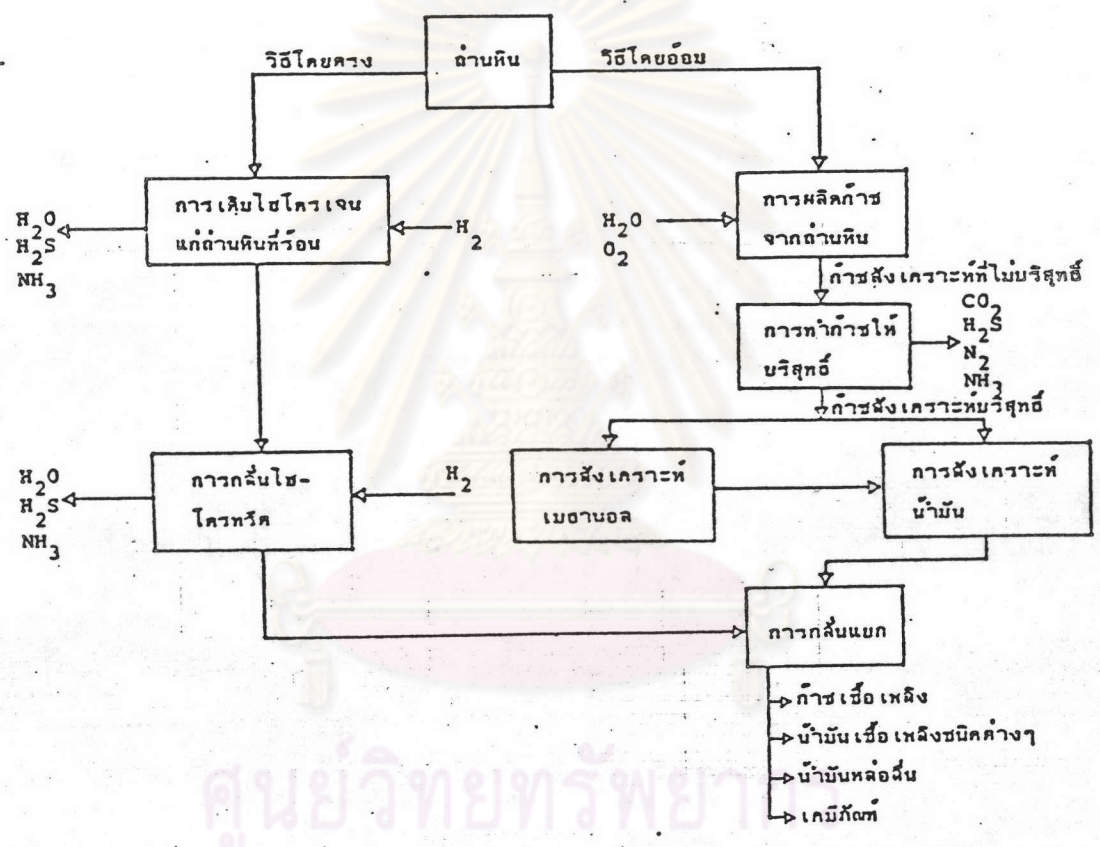
บทที่ 1

บทนำ

การเกิดวิกฤตการณ์น้ำมันในปี ค.ศ. 1973 ทำให้หลายประเทศสนใจในการศึกษาหาแหล่งพลังงานทดแทน โดยเฉพาะที่สามารถผลิตขึ้นเองได้เพื่อเตรียมไว้ใช้สำหรับอนาคต ถ่านหินนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีมากที่สุดในโลก แต่การใช้งานในปัจจุบันไม่สะดวกเหมือนกับการใช้น้ำมันหรือแก๊สธรรมชาติ น้ำมันมีความหนาแน่นต่ำกว่า ถ่านหินแต่ให้พลังงานสูงกว่า (คาลอรีต่อน้ำหนัก) สามารถกำจัดมลพิษที่เกิดจากน้ำมันได้ง่ายกว่า และการขนส่งผ่านท่อหรือถังเก็บมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพกว่า ดังนั้นจึงมีการศึกษาการแปลงรูปถ่านหินไปให้เป็นน้ำมันและแก๊ส (2)

การแปลงรูปถ่านหินให้เป็นน้ำมัน

การแปลงรูปถ่านหินให้เป็นน้ำมันเรียกว่า การทำลิควิแฟกชันถ่านหิน (Coal liquefaction) มีสองวิธี (2, 3, 4, 5) ดังรูปที่ 1.1 วิธีการแรกคือ การทำลิควิแฟกชันโดยตรง (Direct coal liquefaction) โดยการเติมไฮโดรเจนให้กับถ่านหินที่กำลังแตกสลายด้วยความร้อน ที่อุณหภูมิ $700-900^{\circ}\text{F}$, ความดัน 2000-3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกจ และช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา (Resident Time) 30-60 นาที วิธีการที่สองคือ การทำลิควิแฟกชันโดยอ้อม (Indirect Coal Liquefaction) กระบวนการแปลงรูปนี้มีสองแนวทาง โดยเริ่มจากการผลิตแก๊สสังเคราะห์จากถ่านหิน (Coal Gasification) โดยใช้ไอน้ำและแก๊สออกซิเจน แก๊สที่ได้ประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน แก๊สที่ได้จะผ่านเข้ากระบวนการทำแก๊สให้บริสุทธิ์ แนวทางแรก แก๊สสังเคราะห์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นเมทานอล (Methanol) แล้วจึงเปลี่ยนเมทานอลให้เป็นน้ำมันหรือของเหลวอื่น ๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แนวทางที่สอง คือ การเปลี่ยนแก๊สสังเคราะห์ให้เป็นน้ำมัน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 1.1 แนวทางการแปลงรูปถ่านหินให้เป็นน้ำมัน

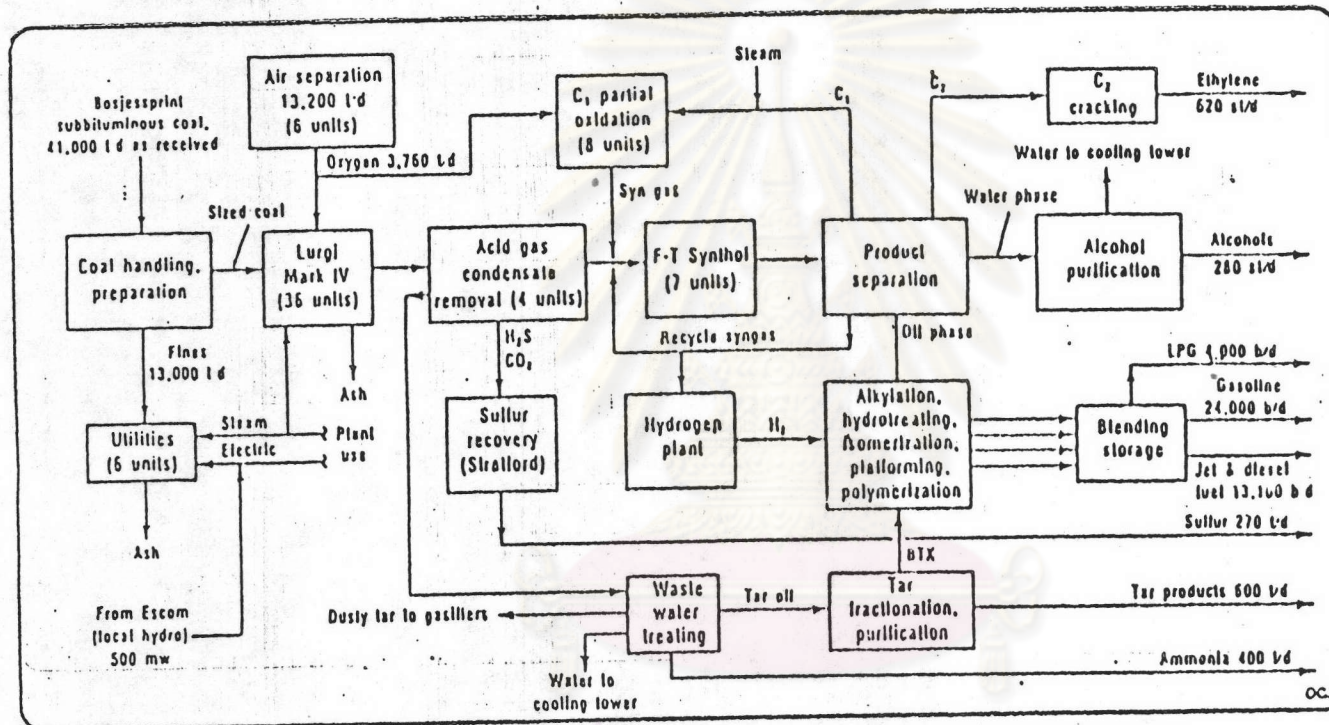
โดยตรงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เรียกว่า การสังเคราะห์แบบฟิสเชอร์-โทรป (Fischer-Tropsch Synthesis)

การสังเคราะห์แบบฟิสเชอร์-โทรปซ์

เริ่มในปี ค.ศ. 1923 โดยฟราน ฟิสเชอร์ และฮานส์ โทรปซ์ (Franz Fischer and Hans Tropsh) โดยสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนจากแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนออกไซด์บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กอัลคาไลน์ (Alkalized iron)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์นี้ ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนทั้งชนิดของแข็ง ของเหลวและแก๊ส สารประกอบพวกออกซีจีเนต (oxygenated compounds), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ไฮโดรคาร์บอนที่ได้ส่วนใหญ่เป็นประเภทพาราฟิน (Paraffins) และโอเลฟิน (Olefins) ที่เป็นโซ่ตรง (Straight Chain) มีส่วนน้อยที่มีกิ่ง (Branched Chain) และแอโรแมติก (Aromatics) สารประกอบออกซีจีเนต ส่วนใหญ่เป็นแอลกอฮอล์ ส่วนที่เหลือเป็นอัลดีไฮด์, คีโตน, กรดและเอสเทอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์นอกจากจะเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและแก๊สแล้ว ยังมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่สามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นของกระบวนการผลิตเคมีภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ ต่อไปได้อีกมาก

ปัจจุบันโรงงานขนาดใหญ่ที่ผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงและเคมีภัณฑ์จากถ่านหิน ด้วยกระบวนการนี้มีชื่อว่า โรงงานซาซอล (Sasol) ในประเทศอัฟริกาใต้ (ดังรูปที่ 1.2) มีกำลังผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ กว่า 50000 บาเรลต่อวัน และเคมีภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ กว่า 2000 ตันต่อวัน (5) จุดประสงค์ของโรงงานนี้เพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงและเคมีภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ ให้เพียงพอกับความต้องการในประเทศ และเพื่อทดแทนการล้งเข้าน้ำมันดิบของประเทศอัฟริกาใต้



รูปที่ 1.2 แผนผังการผลิตน้ำมันและเคมีภัณฑ์ของโรงงานซาซอล (5)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รี่

การสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์ ได้มีการพัฒนาเป็นลำดับจนกระทั่งหยุดไปช่วงหนึ่ง เนื่องจากน้ำมันและแก๊สธรรมชาติมีราคาถูกกว่ามาก จนกระทั่งเกิดวิกฤตการณ์ด้านน้ำมันในปี ค.ศ. 1973 การวิจัยการสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์ จึงเริ่มต้นขึ้นอีกครั้ง โดยปัจจุบันเน้นหนักในด้านการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ ๆ ให้มีความว่องไว (Activity) และคุณสมบัติเลือกผลผลิต (Selectivity) มากขึ้น และการพัฒนาทางด้านเครื่องปฏิกรณ์เคมีให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (8) เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ได้รับการศึกษามากเป็นแบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) และแบบฟลูอิดซ์เบด (Fluidized bed reactor) มีการนำเครื่องปฏิกรณ์เคมีทั้งสองแบบไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่โรงงานซาซอล อย่างไรก็ตามเครื่องปฏิกรณ์เคมีทั้งสองแบบก็ยังมีข้อจำกัดอยู่มาก เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รี่ จะประกอบด้วยสามเฟส (Three Phases) คือ เฟสของแข็ง ได้แก่ ผงละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยา, เฟสของเหลว ได้แก่ ของเหลวที่ใช้แขวนลอยตัวเร่งปฏิกิริยา และเฟสแก๊สซึ่งได้แก่แก๊สที่เป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา (6)

ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รี่ในการสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์

การสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์ เป็นปฏิกิริยาที่คายความร้อนสูง ค่าความร้อนของปฏิกิริยาประมาณ 20 ถึง 25% ของการเผาไหม้แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์รวมกัน (7) เครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอร์รี่จะเหมาะสำหรับการสังเคราะห์ที่มีการคายความร้อนสูงมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบดนิ่ง และฟลูอิดซ์เบดในหลายด้านดังนี้ (4, 7, 8, 9, 10, 11, 12)

1. สามารถควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากันตลอดทั้งเครื่องปฏิกรณ์ได้ เนื่องจากของเหลวที่ใช้แขวนลอยตัวเร่งปฏิกิริยา จะเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนที่ดี และยังมี ความสำคัญมากในการป้องกันการเกิดการสะสมตัวของคาร์บอนอิสระบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา อันเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเฉพาะที่ (hot spot) มีผลให้มีอุณหภูมิสูงรบกวน

การเกิดปฏิกิริยา

2. สมบัติเลือกผลผลิตของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอว์รีจะมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งและแบบอื่น ๆ (7) โดยจะให้ผลผลิตที่มีคุณค่า เช่น ก๊าซโซลีนสูง มีก๊าซมีเทนน้อยลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการควบคุมอุณหภูมิได้ดี
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงเชิงกล (mechanical strength) สูง เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทนการแตกหักได้สูง หรือเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไชด์เบตที่ทนต่อการขัดสีได้ดี สตอร์ช (Storch) (13, 14) ที่ได้รวบรวมข้อกำหนดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 1.1 ซึ่งได้แสดงข้อดีดังที่กล่าวมาแล้ว ในแง่ของความต้านทานในชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีความสำคัญสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีชนิดนี้ อีกทั้งยังมีความว่องไวสูงอีกด้วย
4. การถ่ายเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้ง่าย ไม่รบกวนการทำงานของระบบ (9, 15)
5. ค่าใช้จ่ายด้านตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบอื่น ๆ (7)
6. การเกิดขี้ผึ้งที่ไม่ระเหย (Nonvolatile Waxy Hydrocarbons) จะไม่มีผลกระทบต่อการใช้งาน ขี้ผึ้งเป็นปัญหาสำคัญที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยารวมตัวกันในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบฟลูอิดไชด์เบตและแบบเอนเทรนเบต ส่วนเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบเบตนิ่ง การสะสมตัวของขี้ผึ้งในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการต้านทานการแพร่ของแก๊ส มีผลให้การเปลี่ยนรูปตัว และคุณสมบัติเลือกผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป (9, 12)
7. สามารถใช้กับแก๊สสังเคราะห์ที่มีอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ($H_2:CO$) (6, 7, 14, 15 หรือ 16, 17) ปกติแก๊สสังเคราะห์ที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิไฟด์ถ่านหิน จะมีอัตราส่วน $H_2:CO$ ต่ำ หากจะนำมาใช้กับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งและแบบฟลูอิดไชด์เบต จำต้องมีการเพิ่มปริมาณแก๊สไฮโดรเจนในการสังเคราะห์ให้สูงขึ้น โดยผ่านแก๊สสังเคราะห์ในหน่วยเติมไฮโดรเจนซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกเตอรแก๊สซิฟท์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดคาร์บอนอิสระจากปฏิกิริยาบัว-ดาร์ตได้ เคคเวอร์ (8) กล่าวว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอว์รีสามารถใช้แก๊สสัง-

เคราะห์ที่มีอัตราส่วนของ $H_2:CO$ ได้ต่ำถึง ๐.6 โดยไม่เกิดการสะสมตัวของคาร์บอน
อิสระบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และแซทเทอร์ฟีลด์ และฮัฟฟ์ (Satterfield and

ตารางที่ 1.1 ข้อกำหนดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์เคมีแบบต่าง ๆ (13)

Type of Reactor	Desirable Characteristics Catalysts			
	Activity	Mechanical Strength	Mechanical and Chemical Stability	Pressure Drop in Catalyst Bed
Externally cooled				
Fixed-bed	High	Moderate	High	Low
Fluidized-bed	Moderate	High	High	Unimportant
Internally cooled, oil phase				
Fixed-bed	High	Moderate	High	Low to Moderate
Agitated-bed	High	High	High	
Slurry	High	Unimportant	unimportant	Unimportant
Internally cooled, gas phase				
Hot gas recycle	Moderate	High	High	Low

Huff) (19) เสนอให้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ยาวขึ้น เพื่อช่วยให้การผสมของแก๊สกับของ
เหลวดีขึ้น และใช้ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซึ่งว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาอวเตอร-
แก๊สซิฟิ์



8. การเปลี่ยนรูปจะมีค่าสูงต่อการผ่านแก๊สสังเคราะห์เพียงครั้งเดียว (6, 9, 12, 20)
9. สามารถยอมรับการเกิด คาร์บอนอิสระได้มากกว่าเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบอื่น ๆ (12, 16, 21) แชนเทอร์พิวต์และผู้ร่วมงาน (22) รายงานว่า ความหนืดของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลอว์รีคอล์มเฟืองแก๊สจะเพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดคาร์บอนอิสระมากกว่าเป็นเหตุมาจากการสะสมตัวของขี้ผึ้ง
10. การสร้างทำได้ง่ายไม่ยุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ (9, 15, 7)
11. การปฏิบัติงานทำได้ง่าย และค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานต่ำ (23)

นอกจากนี้บัลชีเมียร์ (Bussemier) (4) ได้รวบรวมเปรียบเทียบข้อมูลลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์ ดังตารางที่ 1.2

ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก (Iron Catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์, เหล็ก, นิเกิล และรูทีเนียม (Ruthenium) (13, 24, 25, 26, 27, 28) ตารางที่ 1.3 (29) เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กับปฏิกิริยาโคบอลต์ที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยานิเกิลมักใช้ในการผลิตขี้ผึ้งและตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กมีช่วงคุณสมบัติเลือกผลึกกว้างและราคาถูก

โปเนคและแวน บาร์เนเวลด์ (Ponec and Van Barneveld) (42) ได้แสดงให้เห็นว่า การดูดซับ CO ของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นตอนสำคัญของการสังเคราะห์แบบฟิสเซอร์-โทรปซ์โดยโลหะซึ่งไม่สามารถแยก CO ได้ง่ายนั้นแทบไม่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาฟิสเซอร์-โทรปซ์ โลหะซึ่งสามารถแยก CO ได้ง่ายแต่ทำให้เกิดเป็นโลหะออกไซด์และโลหะคาร์ไบด์ที่เสถียรเกินไป ก็ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยานี้เช่นกัน

ตารางที่ 1.2 ข้อมูลลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบต่าง ๆ ที่ใช้ในการสังเคราะห์แบบฟลิวอิเดชัน-โทรป (4)

Characteristic data	Phases	Gas/solid			Gas/solid/liquid
	Reactor type	Fixed bed	Entrained fluid bed	Fluidized bed	Bubble reactor
Heat-transfer velocity or heat removal through transferring surfaces		Slow	Medium up to high	High	High
Actual heat conductivity within the system		Poor	Good	Good	Good
Max. reactor diameter as limited by heat removal		Approx. to 8 cm ^{**}	No limitation		
Pressure drop at high gas velocity		Small	Medium	High	Medium up to high
Residence time distribution of the gaseous phase		Narrow	Narrow	Broad	Narrow up to medium
Axial mixing of the gas		Small	Small	Large	Small up to medium
Axial mixing of the solid catalyst		None	Small	Large	Large
Catalyst concentration as volume portion of solid $(1 - \epsilon)^*$		0.55-0.7	0.01-0.1	0.3-0.6	Up to max. 0.6
Particle size range of the solids, mm		1-5	0.01-0.5	0.03-1	0.01-1
Mechanical stress of the solid by shock or friction		None	Great	Great	Small
Catalyst losses		None	2-4% per day due to abrasion	Not recoverable discharge due to abrasion	Small
Regenerability or exchangeability of the catalyst during synthesis		Interruption of synthesis necessary	Without interruption of synthesis by continuous purge and feed		

* ϵ = Relative, solid free particle interspace

** A small increase seems to be possible if the heat transfer can be increased by higher gas velocities

ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก ที่มีคุณสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น แมกเนไทต์ (Magnetite) (Fe_2O_3) (27) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กที่สำคัญได้แก่

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กตกตะกอน (Precipitated iron catalysts) เตรียมได้จากการตกตะกอนของสารละลายเหล็ก บนตัวรองรับ (Supporter) ที่เป็นกลาง พวกคิเซลกูร์ (Kieselguhr) หรือ โดโลไมท์ (Dolomite) แล้วนำมาฝัง (Impregnated) ด้วยโปรโมเตอร์ (Promoters) ต่าง ๆ เช่น Al_2O_3 , CaO , K_2CO_3 เป็นต้น ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาตกตะกอน ได้แก่ Fe-Kieselguhr - K_2CO_3 , Fe-Cu- Al_2O_3 - SiO_2 - K_2CO_3 เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มีผู้นิยมศึกษาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีวิธีการเตรียมที่ง่ายและสามารถเปลี่ยนชนิดโปรโมเตอร์หรือปริมาณของโปรโมเตอร์ได้ง่าย

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กหลอม (Fused iron catalyst) เตรียมจากการหลอมของผลระหว่างเหล็กแมกเนไทต์กับโปรโมเตอร์ต่าง ๆ เข้าด้วยกันในเตาหลอมไฟฟ้าในทางอุตสาหกรรมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้จะใช้มากในการสังเคราะห์แอมโมเนีย และสามารถนำมาใช้ได้ผลดีกับการสังเคราะห์แบบนิสเซอร์-โทรปซ์

ตารางที่ 1.3 เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ที่ใช้กับปฏิกิริยาระหว่างแก๊สคาร์บอนมอนนอกไซด์ กับแก๊สไฮโดรเจน (29)

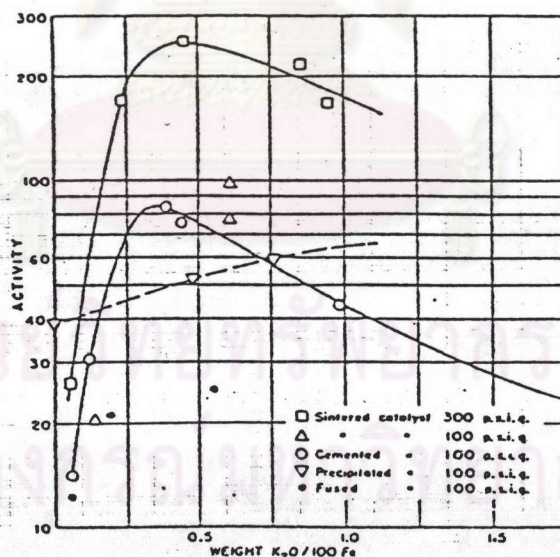
Products of Reaction Between Carbon Monoxide and Hydrogen (35)					
	Catalysts	Promoters	Temp, °C	Pressure, atm.	Product
A. Methane synthesis	Ru		250-500	1	Chiefly methane
	Ni	ThO_2 , MgO	250-500	1	Chiefly methane
B. Fischer-Tropsch synthesis	Fe, Co, Ni	ThO_2 , MgO, Al_2O_3 , K_2O	150-350	1-30	Paraffinic and olefinic hydrocarbons up to waxes, plus small to large quantities of oxygenated products
	Ru		150-250	100-1000	High molecular weight paraffinic hydrocarbons
C. Methanol synthesis	ZnO, Cu, Cr_2O_3 , MnO		200-400	100-1000	Methanol
D. Higher alcohol synthesis	Same as in C	Alkali	300-450	100-400	Methanol and higher alcohols
E. Isosynthesis	ThO_2 , ZnO + Al_2O_3	K_2O	400-500	100-1000	Saturated branched hydrocarbons
F. Oxosynthesis ^a	CO , Fe		100-200	100-200	Oxygenated organic compounds

^a This reaction involves hydrogen, carbon monoxide, and olefins.

อิทธิพลของปริมาณอัลคาไลน์

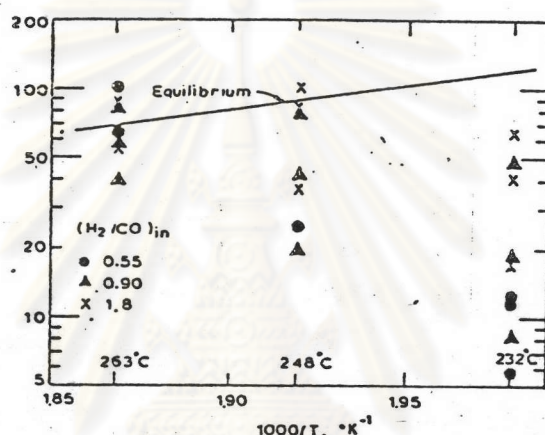
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอัลคาไลน์กับความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กชนิดต่าง ๆ (30) ดังแสดงในรูปที่ 1.3 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กหลอม, ความว่องไวในการทำปฏิกิริยา จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มปริมาณของโปแตสเซียมออกไซด์ และจะมีความว่องไวสูงสุด ที่ปริมาณโปแตสเซียมออกไซด์ประมาณ 0.4 ส่วนต่อเหล็ก 100 ส่วนโดยน้ำหนัก

อะราคาว่าและเบลล์ (Arakawa and Bell) (32) ได้เสนอว่า ปฏิกิริยาอวเตอร่าแก๊สซิฟิชั่นจะเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กตกตะกอน มีอัตราส่วนของ K/Fe สูงขึ้น



รูปที่ 1.3 อิทธิพลของปริมาณอัลคาไลน์ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กต่อความว่องไว ในการทำปฏิกิริยา (30)

ฮันฟ์และแซทเทอร์ฟีลด์(45) และเลดาโควิคซ์และคณะ(46) ได้ทดลองหาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแบบนิสเซอร์-โทรปซ์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กซึ่งเสริมด้วย K_2O 0.7%-1.2% และตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กตกตะกอนเสริมด้วย K 1.3% ตามลำดับ และพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาอเวเตอร์แก๊สซิฟท์จะเข้าสู่สมดุลที่อุณหภูมิสูงขึ้น และเวลาที่แก๊สทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น



รูปที่ 1.4 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาอเวเตอร์แก๊สซิฟท์

การกระจายผลิตภัณฑ์ของการสังเคราะห์แบบนิสเซอร์-โทรปซ์

เฮนริช-โอริฟ และ โอริฟ (Henrici-Olive and Olive) (12, 18) และแซทเทอร์ฟีลด์และคณะ (12, 19) ได้แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ของการสังเคราะห์แบบนิสเซอร์-โทรปซ์ จะเป็นไปตามกฎการกระจายของชูลซ์-ฟลอริย์ (Schultz-Flory Distribution) (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.) แซทเทอร์ฟีลด์และคณะ (12, 19) ได้รวบรวมค่าความเป็นไปได้ของการเกิดลูกโซ่ผลิตภัณฑ์ (Probability of Chain Growth), α ของผลิตภัณฑ์ที่ได้บนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กในเครื่องปฏิกรณ์-เคมีแบบสเลอร์ว์ฟลูว์อยู่ในช่วง 0.55 ถึง 0.94 ซึ่งค่า α นี้จะขึ้นกับปริมาณอัลคาไลน์ในตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก ขึ้นกับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยารองลงมา และแทบไม่มีผลกับความดันและองค์ประกอบของแก๊ส ดังแสดงในตารางที่ 1.4

ตารางที่ 1.4 รวบรวมผลการวิจัยเกี่ยวกับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบสเลออร์รี

investigator	probability of chain growth, α	basis for α estimation	reaction conditions ^b	catalyst
Kölbl et al. (1956)	0.84-0.86	C ₁ + C ₂	266-268 °C, 1.1-1.2 MPa and 220-270 v/v/h	unsupported, precipitated iron promoted with an unspecified amount of K ₂ O and Cu
Hall et al. (1952)	0.64-0.71	C ₁	266-320 °C, 2.2-4.2 MPa and 100-520 v/v/h	fused iron (normally used for NH ₃ synthesis) promoted with 3% MgO and 0.7% K ₂ O
Farley and Ray (1964)	0.71-0.74	C ₁	275 °C, 1.1 MPa and 210 v/v/h	unsupported, precipitated iron promoted with 1% K ₂ O, 1% Cu and <0.5% each of MnO, TiO ₂ , CaO, and MgO; 0.1% SO ₂ also present
Schlesinger et al. (1951)	0.76 ^a	C ₁ + C ₂	260 °C, 1.8 MPa, and 300 v/v/h	unsupported, precipitated iron promoted with 6% Cu and 0.5% K ₂ O
Schlesinger et al. (1954)	0.55-0.66 ^a	C ₁ + C ₂	220-258 °C, 2.2 MPa and 250-500 v/v/h	nitrided, fused iron promoted with 5% MgO, 0.6% SiO ₂ , 0.8% Cr ₂ O ₃ , and 0.6% K ₂ O
			260-269 °C, 2.2 MPa and 200-300 v/v/h	nitrided, precipitated iron promoted with 6% Cu and 0.4% K ₂ O
Satterfield and Huff (1982b)	0.67-0.71	total mol-% organic slate, plotted as per eq 12	234-269 °C, 0.79 MPa and 60-420 v/v/h	fused iron (normally used for NH ₃ synthesis) promoted with 2-3% Al ₂ O ₃ , 0.5-0.8% K ₂ O, 0.7-1.2% CaO, and <0.4% SiO ₂
Kölbl and Ralek (1982)	0.64	C ₁ + C ₂	for low molecular weight products: 260-280 °C and 1.1 MPa	iron catalyst promoted with alkali-high content for high molecular weight products and low content for low molecular weight products
			for intermediate molecular weight products: about 260 °C and 1.1 MPa	
			for high molecular weight products: 240-260 °C and 1.1 MPa	

^a The aqueous phase was reported to contain 25 wt % oxygenates. We have taken ethanol to represent this. ^b Volume of synthesis gas (STP/h per volume of carrier liquid).
^c The aqueous phase was assumed to contain 40 wt % ethanol.