บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 การคาร์บอไนซ์ถ่านหินในรีทอร์ทมาตรฐานแบบฟิชเชอร์

5.1.1 ปริมาณผลิตภัณฑ์

ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ในรีทอร์ทมาตรฐานแบบฟิชเชอร์ ปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งก๊าซถ่านหินและน้ำมันทาร์ในช่วงอุณหภูมิต่ำ ๆ 300-400 องศาเซลเซียสเกิดขึ้นน้อย เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะได้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มากขึ้น (ตารางที่ 4.2-4.5) เนื่องจากว่าการคาร์บอไนซ์เป็นการให้ความร้อนไปทำลายโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินทำให้พันธะที่อ่อนแอถูกปลดปล่อยที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พันธะในโมเลกุลที่แข็งแรงกว่าก็จะถูกปล่อยออกมาเพิ่มมากขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์มากขึ้น สังเกตได้จากปริมาตรก๊าซถ่านหินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส น้ำมันทาร์ก็เช่นเดียวกันเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จึงได้น้ำมันทาร์เพียงเล็กน้อยและได้ปริมาณสูงขึ้นตามลำดับจนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสได้ปริมาณสูงที่สุด จากนั้นจะคงที่หรือลดลงเล็กน้อยทั้ง ๆ ที่ปฏิกิริยาการสลายตัวยังคงดำเนินต่อไปทั้งนี้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่แตกตัวออกจากโครงสร้างของถ่านหินนี้บางส่วนทำปฏิกิริยาต่อไปอย่างรวดเร็ว เกิดปฏิกิริยาขึ้นที่สอง เช่นการแตกตัว (cracking) หรือการรวมตัวใหม่ (repolymerization) ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้ได้ก๊าซมากขึ้นหรือน้ำมันทาร์มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากขึ้น ในขณะที่การสลายตัวของโครงสร้างถ่านหินน้อยลงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ค่อนข้างคงที่ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นของแข็งที่เหลือมีปริมาณเป็นสัดส่วนกลับในแนวเดียวกัน คือน้ำหนักลดลงมากในช่วงอุณหภูมิ 400-700 องศาเซลเซียส และค่อนข้างคงที่ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ ส่วนของเหลวใสส่วนใหญ่เป็นน้ำในรูปของความชื้น, น้ำในโมเลกุลและน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัว ของเหลวใสจึงเริ่มปรากฏตั้งแต่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามช่วงอุณหภูมิจนถึง 600 องศาเซลเซียสก็จะเกือบคงที่ เนื่องจากน้ำที่อยู่ในรูปของความชื้นระเหยออกหมดตั้งแต่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่มีน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวมาเพิ่มขึ้นอีกอยู่ในช่วง 23-29 มิลลิลิตรทั้ง 4 ช่วงขนาดและปริมาตรค่อน

ข้างคงที่ แล่ดงว่าน้ำที่ได้จากปฏิกิริยาน้อยลงจนเกือบไม่มี ของเหลวใส่นี้ยังมีแอมโมเนียละลายปนมาด้วยสังเกตได้จากกลิ่นฉุนและมีฤทธิ์เป็นด่าง แต่ค่าความหนาแน่นยังคงใกล้เคียงกับของน้ำ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าอิทธิพลของช่วงขนาดของเศษถ่านหินที่มีต่อปริมาณผลิตภัณฑ์นั้นไม่มากนัก สำหรับการทดลองในรีทอร์ทขนาดนี้และในช่วงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10-25 องศา-เซลเซียส่ต่อนาที เปรียบเทียบผลการทดลองกับการคารับอไนซ์ด้วยกระบวนการต่าง ๆ โดยเฉลี่ยปริมาณผลิตภัณฑ์ของเศษถ่านหินแต่ละช่วงขนาดที่อุณหภูมิเดียวกันดังต่อไปนี้คือ

5.1.1.1 เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์จากการคารับอไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกับกระบวนการต่าง ๆ

เปรียบเทียบผลผลิตของ ผลิตภัณฑ์จากการคารับอไนซ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซล-เซียส่ กับการคารับอไนซ์ในรีทอร์ทมาตรฐานของฟิชเชอร์ (Fischer Assay) จากเอกสาร อ้างอิง (46) ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลผลิตของการคารับอไนซ์จากการทดลองกับ จากรีทอร์ทมาตรฐานของฟิชเชอร์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส่

ตัวอย่าง	ถ่านชาร์ (ร้อยละ)	น้ำมันทาร์ (แกลลอน/ตัน)	ก๊าซ (ลบ.ฟุต/ตัน)	น้ำ (ร้อยละ)
ถ่านหินลิกไนท์ (เอกสารอ้างอิง)	36.5	6.7-27.0	2,100	44.0
เศษถ่านหินลิกไนท์ (การทดลองนี้)	58.4	8.7	2,499	27.5

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ให้ปริมาตรก๊าซถ่านหินใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน, ปริมาณน้ำมันทาร์ค่อนข้างต่ำแต่ยังอยู่ในพิสัยที่กำหนด ส่วนปริมาณถ่านชาร์สูงกว่าที่กำหนดซึ่งอาจเนื่องมาจากมีเถ้าอยู่ในถ่านชาร์สูงมาก ดังนั้นการคารับอไนซ์ในรีทอร์ทมาตรฐานแบบฟิชเชอร์ ของงานวิจัยนี้ให้ผลผลิตอยู่ในมาตรฐานที่ยอมรับได้

เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลผลิตของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการคารับอไนเซชันในระดับอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิต่ำคือ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ความร้อนทางอ้อมอีก 2 กระบวนการ

คือ กระบวนการ Brennstoff-Technik และกระบวนการ Parker (47) ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยทั้ง 4 ช่วง ขนาดกับกระบวนการของ Brennstoff-Technik และ Parker (47)

ตัวอย่างถ่านหิน 1 ตัน	ถ่านชาร์ (กิโลกรัม)	น้ำมันทาร์ (แกลลอน/ตัน)	ก๊าซ (ลบ.ฟุต/ตัน)	ของเหลวใส (แกลลอน/ตัน)
กระบวนการ Brennstoff-Technik				
ผลิตภัณฑ์/ตันของถ่านหินแห้ง	680	19.7	4,550	ไม่ได้รายงาน
ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้/ตันของถ่านหินแห้ง (เฉลี่ยความชื้นร้อยละ 20)	679	12.0	4,570	ไม่ได้รายงาน
กระบวนการ Parker				
ผลิตภัณฑ์/ตัน ของถ่านหิน	680	16.5	4,000	30.0
ผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้ /ตันของถ่านหิน	543	9.6	3,656	75.2

ผลการทดลองเปรียบเทียบกับกระบวนการของ Brennstoff-Technik ในหน่วยของผลผลิตต่อตันของถ่านหินแห้ง ได้ก๊าซถ่านหินและถ่านชาร์ใกล้เคียงกัน ส่วนปริมาณน้ำมันทาร์ที่ได้ในงานวิจัยนี้คิดเป็นร้อยละ 61 ของน้ำมันทาร์จากกระบวนการ Brennstoff-Technik ส่วนผลการเปรียบเทียบกับกระบวนการของ Parker ในหน่วยของผลิตภัณฑ์ต่อตันของถ่านหินที่นำมาคาร์บอไนซ์ พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยนี้ต่ำกว่าของกระบวนการ Parker ยกเว้นของเหลวใสมีปริมาณสูงกว่าถึงเท่าตัว ทั้งนี้เนื่องจากถ่านหินจากแหล่งแม่ตีบ มีความชื้นสูง

ผลการเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกับกระบวนการต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่าได้ปริมาณก๊าซถ่านหินเท่า ๆ กัน เนื่องจากเป็นถ่านหินที่มีสารระเหยสูงใกล้เคียงกันคือประมาณร้อยละ 30 และได้ปริมาณถ่านชาร์เท่า ๆ กันเช่นกัน อาจเนื่องมาจากเศษถ่านหินจากเหมืองแม่ตีบมีเถ้าสูงมาก แต่งานวิจัยนี้ปริมาณน้ำมันทาร์ได้ค่อนข้างน้อย คือ

9.6 แกลลอนต่อตัน ซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุหลายประการ เช่น เนื่องจากการสูญเสียที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสสูงถึงร้อยละ 5.3 และอาจเนื่องจากเป็นถ่านหินต่างแหล่งกัน อัตราการให้ความร้อนต่างกันหรือลักษณะรีทอร์ทต่างกัน อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันทาร์นี้ยังอยู่ในช่วงที่ได้จากการคาร์บอไนซ์ถ่านหินแหล่งต่าง ๆ ในสหรัฐอเมริกา คือ 9-44 แกลลอนต่อตัน

5.1.1.2 เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิสูงกับกระบวนการต่าง ๆ

เนื่องจากเศษถ่านหินนี้ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่อถูกคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำคือ 600-700 องศาเซลเซียส จากนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลิตภัณฑ์น้อยลง ยังคงมีแต่ปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอและอัตราการเพิ่มเป็นไปอย่างช้า ๆ นั่นแสดงว่าโครงสร้างของถ่านหินถูกสลายตัวค่อนข้างสมบูรณ์แล้วที่อุณหภูมิดังกล่าว จึงทดลองเปรียบเทียบผลการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิสูงที่สุด คือ 1,000 องศาเซลเซียสกับกระบวนการคาร์บอไนซ์ในระดับอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิสูง โดยเน้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซถ่านหิน เพราะถ่านหินจากแหล่งนี้ไม่มีคุณสมบัติในการนำมาผลิตถ่านโค้ก กระบวนการดังกล่าวได้แก่กระบวนการผลิตในรีทอร์ทแนวนอน (Horizontal retort) รีทอร์ทแนวตั้งแบบครั้งคราว (Intermittent vertical ovens) และรีทอร์ทแนวตั้งแบบต่อเนื่อง (continuous vertical retorts) ใช้ไอน้ำร้อยละ 5 แสดงในตารางที่ 5.3 (48)

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการทดลองคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส โดยเฉลี่ยทั้ง 4 ช่วงขนาดกับผลผลิตจากกระบวนการต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสเช่นกัน

ผลิตภัณฑ์	รีทอร์ทพีซโซ่อร์งานวิจัยนี้	รีทอร์ทแนวนอน	รีทอร์ทแนวตั้งแบบครั้งคราว	รีทอร์ทแนวตั้งแบบต่อเนื่อง
ถ่านโค้ก, ร้อยละ	49	70-75	65-70	60-65
น้ำมันทาร์,แกลลอน/ตัน	9	14-17	13-16	17-20
ก๊าซ, ลบ.ฟุต/ตัน	7,777	10,594	14,832	16,245
ค่าความร้อนของก๊าซถ่านหิน, บีทียู/ลบ.ฟุตที่สภาวะมาตรฐาน	516	550	518	488

ผลการเปรียบเทียบจากตารางที่ 5.3 จะเห็นว่าผลผลิตที่อุณหภูมิสูงมีปริมาณน้อยทุกผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ก๊าซถ่านหินมีปริมาณน้อยกว่าก๊าซถ่านหินจากกระบวนการอื่นในระดับอุตสาหกรรมมาก ทั้งนี้ด้วยสาเหตุหลายประการเช่นการสลายตัวของถ่านหินจากแหล่งแม่ตีบที่อุณหภูมิสูง ๆ ลดน้อยลง ก็อาจเนื่องมาจากถ่านหินแหล่งแม่ตีบนี้เป็นถ่านหินศักดิ์ ซับ-บิทูมินัส ซี มีอายุน้อย การสลายตัวเนื่องจากความร้อนสมบูรณ์แล้วที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (อุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส) และทำให้โอกาสที่จะเกิดการสลายตัวครั้งที่ 2 (secondary decomposition) น้อยด้วย ทั้งกระบวนการผลิตเหล่านี้ได้ใช้เทคนิคในการเพิ่มผลผลิตของก๊าซเช่นในกระบวนการคาร์บอไนซ์ในรีทอร์ทแนวตั้งแบบครั้งคราวมีการพ่นไอน้ำผ่านถ่านหินใน 2 ชั่วโมงสุดท้ายของการคาร์บอไนซ์เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซ และเนื่องจากในกระบวนการเหล่านี้ได้เลือกใช้ถ่านหินที่เหมาะสมในการนำมาผลิตก๊าซคือ ถ่านหินชนิด High volatile bituminous หรือถ่านหินชนิด cannel coals

5.1.2 คุณภาพผลิตภัณฑ์

ในแง่ความเหมาะสมของการนำเศษถ่านหินจากแหล่งแม่ตีบมาคาร์บอไนซ์ จะต้องพิจารณาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ประกอบไปด้วย คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์แรกคือก๊าซถ่านหิน พบว่ามีค่าความร้อนสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์ทั้ง 4 ช่วงขนาดจากประมาณ 300-500 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความร้อนของก๊าซถ่านหินจากกระบวนการต่าง ๆ ที่อุณหภูมิต่ำดังกล่าวมาแล้ว คือก๊าซถ่านหินจากกระบวนการ Brennstoff-Technik และกระบวนการของ Parker ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (47) มีค่าความร้อนเท่ากับ 680-793 และ 700 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตที่สภาวะมาตรฐานตามลำดับ ขณะที่ก๊าซถ่านหินจากการทดลองมีค่าความร้อนเพียง 502 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตที่สภาวะมาตรฐาน (เฉลี่ยทั้งสี่ช่วงขนาด) คิดเป็นร้อยละ 70 ของค่าความร้อนของก๊าซจากกระบวนการดังกล่าว ส่วนค่าความร้อนจากกระบวนการต่าง ๆ ที่อุณหภูมิสูงคือ 1,000 องศาเซลเซียสในตารางที่ 5.3 มีค่าใกล้เคียงกับก๊าซถ่านหินจากการทดลองที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งตามหลักการ การคาร์บอไนซ์นั้น ค่าความร้อนของก๊าซ ควรลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์จาก 500-1,000 องศาเซลเซียส เพราะปริมาณก๊าซที่มีค่าความร้อนสูง เช่นมีเทนและอีเทนลดลง ในขณะที่ก๊าซที่มีค่าความร้อนต่ำ คือไฮโดรเจน เพิ่มมากที่อุณหภูมิสูง ๆ อาจเป็นไปได้ว่าก๊าซถ่านหินจากการทดลองมีปริมาตรเพิ่มขึ้นไม่มากนักจากอุณหภูมิ 700-1,000 องศาเซลเซียส จึงทำให้ค่าความร้อนของก๊าซถ่านหินค่อนข้างคงที่ประมาณ 500 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตที่สภาวะมาตรฐาน นอกจากนี้ปริมาตรของก๊าซถ่านหินและค่า

ความร้อนขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อนของแต่ละกระบวนการด้วย

คุณสมบัติของน้ำมันทาร์คือค่าความร้อนนั้นมีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 ช่วงขนาด มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยตามอุณหภูมิ โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าเท่ากับ 9,700-9,800 แคลอรีต่อกรัม เทียบกับค่าความร้อนของน้ำมันทาร์จากเอกสารอ้างอิงในตารางที่ 5.4 โดยใช้ค่าเฉลี่ยนี้ เพราะอิทธิพลของทั้งอุณหภูมิและช่วงขนาดไม่ให้ความแตกต่างกันมากนักต่อคุณสมบัติของน้ำมันทาร์คือ ค่าความร้อน และปริมาณกำมะถันทั้งหมด

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าความร้อนของน้ำมันทาร์จากกระบวนการต่าง ๆ

กระบวนการคาร์บอไนเซชัน	ค่าความร้อนของน้ำมันทาร์ (แคลอรีต่อกรัม)	ปริมาณกำมะถัน (ร้อยละ)
การคาร์บอไนซ์ในงานวิจัยนี้	9,700-9,800	0.4-0.5
กระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิต่ำ (49)	9,340	0.8
กระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิสูง ในรีทอร์ทแนวตั้งแบบต่อเนื่อง (49)	9,222	1.6
กระบวนการคาร์บอไนเซชันที่อุณหภูมิสูง ในรีทอร์ทแนวตั้งแบบครั้งคราว (49)	9,174	1.6
การคาร์บอไนซ์ถ่านหินแหล่งลี้ (23)	9,748	0.5
การคาร์บอไนซ์ถ่านหินแหล่งแม่เมาะ (23)	9,500	0.6

จะเห็นว่าค่าความร้อนของน้ำมันทาร์จากเศษถ่านหินแหล่งแม่ตีบในงานวิจัยนี้มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหินแหล่งลี้ โดยวิธีการคาร์บอไนซ์ในรีทอร์ทที่คล้ายกัน และสูงกว่าน้ำมันทาร์จากแหล่งแม่เมาะ ทั้งปริมาณกำมะถันในน้ำมันทาร์ ก็มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการต่าง ๆ ทั้งที่อุณหภูมิสูงและต่ำจากเอกสารอ้างอิง (49) พบว่า ค่าความร้อนของน้ำมันทาร์จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงกว่าประมาณ 500 แคลอรีต่อกรัม และมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าครึ่งหนึ่ง

คุณสมบัติของถ่านชาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักในงานวิจัยนี้ พบว่าถ่านชาร์มีความชื้นต่ำประมาณร้อยละ 1-4 และลดปริมาณสารระเหยได้มากคือจากร้อยละ 30 เหลือเพียงร้อยละ 6

ในการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 300-700 องศาเซลเซียส จากนั้นจะลดลงอีก เมื่อคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทั้งปริมาณความขึ้นและสารระเหยมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิเดียวกันทั้ง 4 ช่วงขนาด ปริมาณคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกันใน 3 ช่วงขนาดแรก ในช่วงอุณหภูมิ 300-700 องศาเซลเซียส คือจากร้อยละ 28 ในถ่านหินดิบเป็นร้อยละ 56 จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเกือบคงที่และมีค่าสูงกว่าถ่านชาร์จากเศษถ่านหินช่วงขนาดเล็กที่สุด ร้อยละเถ้าในถ่านชาร์สูงกว่าเถ้าในถ่านหินเนื่องจากเป็นสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว ร้อยละเถ้าเพิ่มขึ้นช่วงอุณหภูมิละประมาณร้อยละ 2-3 จนถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสจากนั้นเพิ่มขึ้นน้อยมาก ถ่านชาร์จากเศษถ่านหิน 3 ช่วงขนาดแรกมีปริมาณเถ้าใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าเถ้าในถ่านชาร์จากเศษถ่านหินช่วงขนาดเล็กที่สุดทุกอุณหภูมิ อัตราส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยในถ่านชาร์สูงกว่าในถ่านหิน และมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์และอัตราส่วนนี้เพิ่มขึ้นเท่าตัวทั้ง 4 ช่วงขนาดในช่วงอุณหภูมิ 600-700 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ปริมาณกำมะถันในถ่านชาร์สูงกว่าในเศษถ่านหินเล็กน้อย เข้าใจว่าส่วนใหญ่เป็นกำมะถันอนินทรีย์ที่ไม่สลายตัว นอกจากนั้นเป็นกำมะถันอนินทรีย์ที่เหลืออยู่ โดยปริมาณกำมะถันในถ่านชาร์เป็นสัดส่วนกลับกับช่วงขนาด ค่าความร้อนของถ่านชาร์จากเศษถ่านหิน 3 ช่วงขนาดแรกมีค่ามากกว่าช่วงขนาดเล็กที่สุด และเพิ่มจากถ่านหินดิบไม่มากนัก เนื่องจากการคาร์บอไนซ์ทำให้สารระเหยลดลง และเพิ่มปริมาณคาร์บอนคงตัว แต่ค่าความร้อนได้จากการเผาไหม้ของสารระเหยและปริมาณคาร์บอนในถ่านหิน ดังนั้นค่าความร้อนของถ่านชาร์จึงไม่เพิ่มมากนัก

จากคุณสมบัติของถ่านชาร์ข้างต้นจึงเลือกขนาดเศษถ่านหิน 0.5-7.0 มิลลิเมตร รวมกันคาร์บอไนซ์ในรีทอร์ทขนาดห้องปฏิบัติการ เพราะถ่านชาร์จากเศษถ่านหินช่วงขนาดเล็กที่สุดมีคุณสมบัติด้อยกว่าทั้งปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า รวมทั้งค่าความร้อน เพื่อไม่ให้ถ่านลังเคราะห์มีคุณสมบัติด้อยลง จึงเลือกเฉพาะ 3 ช่วงขนาดดังกล่าวคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์สูง และคุณภาพดีคืออุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาสมดุลความร้อนของการคาร์บอไนซ์คิดจากค่าความร้อนของถ่านหินดิบ 100 กรัม เป็นค่าความร้อนตั้งต้นและค่าความร้อนในผลิตภัณฑ์จากการคาร์บอไนซ์คือ ก๊าซถ่านหิน น้ำมันทาร์และถ่านชาร์ พบว่าผลได้ทางความร้อนเฉลี่ยร้อยละ 92.6 จากตารางที่ 5.5-5.8 โดยผลได้ทางความร้อนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ทุกช่วงขนาดก็อยู่ในค่าเฉลี่ยนี้ด้วย

ตารางที่ 5.5 สมดุลความร้อนของการคาร์บอไนซ์ถ่านหินช่วงขนาด 2-7 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความร้อนของถ่านหินเริ่มแรกเท่ากับ 391.3 กิโลแคลอรี

อุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ (กิโลแคลอรี)			ค่าความร้อนทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	%
	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	ก๊าซถ่านหิน		
300	326.0	32.1	5.6	363.7	93.0
400	292.9	44.7	11.3	348.9	89.2
500	265.2	50.3	26.4	341.9	87.4
600	254.1	50.5	46.8	351.4	89.8
700	232.5	55.2	79.4	367.1	93.8
800	224.5	54.1	94.5	373.1	95.4
900	222.5	55.3	108.3	386.1	98.7
1,000	215.9	55.4	105.3	376.6	96.2

ตารางที่ 5.6 สมดุลความร้อนของการคาร์บอไนซ์ถ่านหินช่วงขนาด 1-2 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความร้อนของถ่านหินเริ่มแรกเท่ากับ 407.4 กิโลแคลอรี

อุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ (กิโลแคลอรี)			ค่าความร้อนทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	%
	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	ก๊าซถ่านหิน		
300	332.6	38.3	6.0	376.9	92.5
400	300.5	49.1	11.3	360.9	88.6
500	277.2	48.9	26.8	352.9	86.6
600	257.4	51.3	46.2	354.9	87.1
700	249.1	51.6	70.8	371.5	91.2
800	227.0	51.9	86.5	365.4	89.7
900	234.2	49.6	96.2	380.0	93.3
1,000	233.2	51.6	99.3	384.1	94.3

ตารางที่ 5.7 สมดุลความร้อนของการคาร์บอไนซ์ถ่านหินช่วงขนาด 0.5-1.0 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความร้อนของถ่านหินเริ่มแรกเท่ากับ 398.4 กิโลแคลอรี

อุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ (กิโลแคลอรี)			ค่าความร้อนทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	%
	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	ก๊าซถ่านหิน		
300	322.8	30.3	6.5	359.6	90.3
400	298.7	40.7	14.7	354.1	88.9
500	268.2	51.9	30.6	350.7	88.0
600	262.0	54.3	50.1	366.4	92.0
700	246.4	52.0	76.8	375.2	94.2
800	237.1	51.5	89.5	378.1	94.9
900	235.0	51.9	90.6	377.5	94.8
1,000	238.5	50.9	100.4	389.8	97.8

ตารางที่ 5.8 สมดุลความร้อนของการคาร์บอไนซ์ถ่านหินช่วงขนาด 0.25-0.50 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความร้อนของถ่านหินเริ่มแรกเท่ากับ 362.7 กิโลแคลอรี

อุณหภูมิที่คาร์บอไนซ์ (องศาเซลเซียส)	ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์(กิโลแคลอรี)			ค่าความร้อนทั้งหมด (กิโลแคลอรี)	%
	ถ่านชาร์	น้ำมันทาร์	ก๊าซถ่านหิน		
300	304.6	26.2	6.6	337.4	93.0
400	276.5	41.2	11.9	329.6	90.9
500	251.9	45.2	28.6	325.7	89.8
600	245.1	53.9	42.0	341.0	94.0
700	230.8	49.7	69.7	350.2	96.6
800	216.2	50.8	82.9	349.9	96.5
900	211.2	50.1	94.0	355.3	98.0
1,000	207.4	50.0	99.3	356.7	98.3

5.2 การคาร์บอไนซ์ถ่านหินในรีทอร์ทขนาดห้องปฏิบัติการ

การคาร์บอไนซ์เศษถ่านหินขนาด 0.5-7.0 มิลลิเมตร ในรีทอร์ทขนาดห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับรีทอร์ทแบบฟิชเชอร์ ปริมาณก๊าซถ่านหิน ของเหลวใส และถ่านชาร์ใกล้เคียงกันมากคือร้อยละ 7,28 และ 53 ตามลำดับที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และร้อยละ 10, 28 และ 50 ตามลำดับที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แต่ปริมาณน้ำมันทาร์เก็บได้คิดเป็นร้อยละ 13.2 และ 16.6 ของน้ำมันทาร์จากรีทอร์ทแบบฟิชเชอร์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เพราะไอน้ำมันทาร์ไปกลั่นตัวติดตามผนังของเครื่องควบแน่นและเครื่องดักไอทำให้เกิดการสูญเสียสูงคือร้อยละ 10 แม้ว่าจะใช้ตัวทำละลายล้างน้ำมันทาร์ที่เกาะอยู่ออกเพื่อเก็บรวบรวมให้ได้มากที่สุดแล้วก็ตาม คาดว่าถ้าปรับปรุงเครื่องดักไอให้ดักไอน้ำมันทาร์ได้ดีกว่านี้ การสูญเสียก็จะน้อยลง อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุดในการทดลองกับรีทอร์ทขนาดห้องปฏิบัติการนี้คือ ถ่านชาร์มีคุณสมบัติดีขึ้นกว่าเดิม คือ ปริมาณสารระเหยลดลงอีกครึ่งหนึ่ง คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นเป็นผลให้อัตราส่วนคาร์บอนคงตัวต่อสารระเหยเพิ่มขึ้นเช่นกัน ความชื้น และเถ้ายังคงเท่าเดิม ผลเป็นดังนี้ทั้งที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส และค่าความร้อนก็เพิ่มขึ้นร้อยละ 6 จากค่าเดิม และปริมาณกำมะถันใกล้เคียงกับค่าเดิม ดังนั้นจึงไม่เห็นความแตกต่างของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน ทั้งอัตราการแตกร่วนก็ใกล้เคียงกัน

5.3 การทดลองใช้ถ่านลังเคราะห์เปรียบเทียบกับถ่านไม้

ถ่านลังเคราะห์นี้สามารถนำไปใช้แทนถ่านไม้ได้ ทั้งยังมีข้อดีคือ เถ้ารวมตัวกันเป็นก้อนไม่ปลิวฟุ้งกระจาย ทำให้บริเวณเผาไหม้สะอาด โดยเฉพาะถ่านลังเคราะห์ที่มีแป้งเปียกเป็นตัวประสานจะติดไฟได้นานกว่า ถึงแม้ว่าถ่านลังเคราะห์นี้ได้จากการผสมถ่านชาร์กับตัวประสานทำให้ค่าความร้อนลดลง แต่ยังมีค่าเท่า ๆ กับค่าความร้อนของถ่านชาร์ในรีทอร์ทแบบฟิชเชอร์ คือ 4,700-4,800 แคลอรีต่อกรัม เนื่องจากค่าความร้อนต่ำกว่าถ่านไม้ (7,400 แคลอรีต่อกรัม) จึงต้องใช้ปริมาณมากกว่า อย่างไรก็ดีถ่านหินก็มีราคาถูกกว่าถ่านไม้ ทั้งในกรณีนี้เป็นเศษถ่านหิน ซึ่งเหลือทิ้งจึงคาดว่าต้นทุนการผลิตถ่านลังเคราะห์ต่ำกว่าถ่านไม้

ความแตกต่างของถ่านลังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 600 และ 700 องศาเซลเซียส คือถ่านลังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสมีความหนาแน่นและความแข็งแรงสูงกว่าถ่านลังเคราะห์

ที่ 600 องศาเซลเซียส แต่ไม่ให้ความแตกต่างเมื่อนำไปทดลองเผาไหม้

จากผลการทดลองปรับปรุงคุณภาพเศษถ่านหินลิกไนท์ผลิตถ่านสังเคราะห์ สรุปได้ว่า ช่วงขนาดที่เหมาะสมในการคาร์บอไนซ์คือ 0.5-7.0 มิลลิเมตร และอุณหภูมิที่เหมาะสมทั้ง 600 และ 700 องศาเซลเซียส ไม่ให้ความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งคุณภาพและประสิทธิภาพในการเผาไหม้ อย่างไรก็ดีที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส น่าจะเป็นอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสมบูรณ์มากกว่า ส่วนตัวประสานใช้ได้ดีทั้งแป้งเปียกและแบลคลิกเคอร์ คุณภาพของถ่านสังเคราะห์ใกล้เคียงกันแต่วิธีการอัดก้อนโดยใช้แป้งเปียกสามารถใช้เครื่องอัดระบบ Double Ring-Roll ซึ่งทำการอัดก้อนได้ต่อเนื่อง จึงสะดวกและรวดเร็วกว่า อีกทั้งได้ผลิตภัณฑ์เป็นก้อนรูปไข่ไม่เกิดการแตกร่วน เมื่อถูกเสียดสีและสะดวกในการขนส่ง

เปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านสังเคราะห์จากการทดลองกับถ่านสังเคราะห์จากประเทศต่าง ๆ ในตารางที่ 5.9 จะเห็นว่าถ่านสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นนี้มีเถ้าสูงมาก เนื่องจากเศษถ่านหินที่นำมาทดลองปรับปรุงคุณภาพนี้มีเถ้าสูงถึงร้อยละ 20 เมื่อนำมาคาร์บอไนซ์ ปริมาณเถ้าในถ่านชาร์ยิ่งมีค่าสูงมากขึ้น เพราะถ่านชาร์เหลือแต่โครงสร้างหลักของถ่านหิน และสารอนินทรีย์ ซึ่งไม่สลายตัวอันก่อให้เกิดเถ้าเมื่อถูกเผาไหม้ ส่วนของสารระเหยและความชื้นถูกขับไล่ออกไปเป็นส่วนใหญ่ ถ่านสังเคราะห์ที่ได้นี้จึงมีคุณสมบัติด้อยไป คือมีเถ้าสูงกว่าประมาณ 3.7 เท่า ค่าความชื้นต่ำใกล้เคียงกับถ่านสังเคราะห์จากประเทศต่าง ๆ ร้อยละสารระเหยสูงกว่า คาร์บอนคงตัวต่ำกว่า ปริมาณกำมะถันไม่สูงเกินไปนักทั้งยังต่ำกว่ากำมะถันจากถ่านสังเคราะห์รูมาเนีย และค่าความร้อนของถ่านสังเคราะห์แต่ละตัวอย่างมีค่าใกล้เคียงกับถ่านสังเคราะห์จากต่างประเทศมาก ดังนั้นถ่านสังเคราะห์นี้จะมีคุณภาพดีมาก ถ้าลดปัญหาของปริมาณเถ้าอันเกิดจากสารอนินทรีย์ที่ติดมากับเศษถ่านหิน ควรทดลองใช้ถ่านหินจากเหมืองผลิต ซึ่งแยกสิ่งเจือปนและล้างทำความสะอาด ซึ่งจะช่วยลดทั้งปริมาณเถ้าและกำมะถัน ทำให้ถ่านหินมีคุณภาพดีขึ้น เมื่อนำมาผลิตถ่านสังเคราะห์ก็จะได้ถ่านสังเคราะห์คุณภาพดียิ่งขึ้น สามารถลดปัญหาต่าง ๆ ในการใช้งานได้

อย่างไรก็ดี ในแง่ของการนำเศษถ่านหินมาใช้ประโยชน์ ถ่านสังเคราะห์นี้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีค่าความร้อนสูงพอที่จะนำไปใช้ทดแทนถ่านไม้ในครัวเรือน และในอุตสาหกรรมขนาดย่อมบางประเภทที่ต้องการเชื้อเพลิงแข็งที่สะอาดมีค่าความร้อนสูงพอควร เช่นในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ การทำให้โลหะอ่อนตัว อุตสาหกรรมการผลิตเกลือสินเธาว์และอุตสาหกรรมอาหาร

เป็นต้น โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษ แก่สิ่งแวดล้อมแต่อย่างใด

ตารางที่ 5.9 คุณสมบัติของถ่านสังเคราะห์จากการทดลองและจากประเทศต่าง ๆ

คุณสมบัติ	ถ่านสังเคราะห์จากการทดลอง				ถ่านสังเคราะห์จากประเทศต่าง ๆ			
	ป600	ซ600	ป700	ซ700	อเมริกา (FMC)	เยอรมัน	ญี่ปุ่น	รูมาเนีย
ความชื้น, ร้อยละ	5.7	5.9	6.6	5.7	7.9	2.5	1.1	2.6
เถ้า, ร้อยละ	31.2	34.5	32.8	36.0	5.3	7.6	9.2	13.6
ตัวอย่างไม่รวมความชื้นและเถ้า								
สารระเหย, ร้อยละ	18.9	11.0	10.8	7.2	4.0	1.1	1.6	2.0
คาร์บอนคงตัว, ร้อยละ	81.1	89.0	89.2	92.8	96.0	98.9	98.4	98.0
ปริมาณกำมะถัน, ร้อยละ	1.6	1.9	1.8	2.0	0.8	0.9	0.8	2.5
ค่าความร้อน, แคลอรี/กรัม	7,555	8,149	7,872	8,077	8,222	7,761	7,906	8,050

ข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการคาร์บอไนเซชัน เพื่อปรับปรุงคุณภาพเศษถ่านหิน ดังต่อไปนี้คือ

1. ศึกษาวิธีเพิ่มคุณภาพเศษถ่านหินโดยลดปริมาณเถ้า ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก เพราะเศษถ่านหินมีขนาดเล็ก สามารถนำมากำจัดเถ้า โดยการล้างหรือแช่สกัดในสารละลายง่ายกว่าถ่านหินก้อนใหญ่ และสามารถนำมาอัดก้อนได้เป็นถ่านหินก้อนใหญ่ขึ้น และมีคุณสมบัติใกล้เคียงถ่านหินก้อนทำให้มีราคาสูงขึ้น

2. ศึกษาอิทธิพลของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งอาจมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์เฉพาะอย่าง

3. ปรับปรุงเครื่องมือคาร์บอไนซ์ในขนาดห้องปฏิบัติการให้มีการสูญเสียน้อยที่สุด โดยปรับปรุงเครื่องดักไอให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเพิ่มวิธีการนำก๊าซถ่านหินมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการคาร์บอไนซ์ เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตในขั้นอุตสาหกรรมต่อไป