บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านไม้

วัตถุดิบที่นำมาใช้ในโครงการวิจัยนี้ได้แก่ เศษถ่านไม้โกงกางที่มีขนาดเล็กละเอียดจนถึงขนาด 6 มิลลิเมตร ถ่านชนิดนี้มีค่าความร้อนประมาณ 7,000 แคลอรีต่อกรัม มีปริมาณเถ้าประมาณร้อยละ 8.14 โดยน้ำหนัก จึงเกิดปัญหาน้อยกับกระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง หรือแม้กระทั่งนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้กับเครื่องยนต์ เพราะเถ้าที่มีอยู่ถูกดักไว้ด้วยเครื่องแยกฝุ่นเกือบหมด เมื่อนำไปผ่านเครื่องกรองอากาศอีกครั้ง ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีความสะอาดใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยตรง

ความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดเซชันของถ่านไม้ได้กระทำที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ ผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.1-3 ถ่านไม้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 มม. มีค่า V_{mf} = 66.5 เมตร/นาที และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4-6 มม. มีค่า V_{mf} = 74.5 เมตร/นาที โดยทั่ว ๆ ไปการทำงานของระบบฟลูอิไดเซชันมักจะใช้ความเร็วของไหลสูงกว่าความเร็วต่ำสุดฟลูอิไดเซชัน 1.2 เท่าขึ้นไป แล้วแต่ชนิดของวัสดุที่บรรจุอยู่ในเบด แต่การทดลองครั้งนี้ใช้ความเร็วของอากาศต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดเซชันทุกการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างอากาศและถ่านไม้อยู่ในการควบคุมของปริมาณของออกซิเจน แต่เบดก็เกิดอยู่ในลักษณะฟลูอิไดเซชันเช่นกัน ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิภายในเบดสูงมาก เมื่ออากาศผ่านแผ่นกระจายขึ้นมาก็เริ่มขยายตัวทันที ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจากเดิมจนสูงกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิไดเซชัน ปรากฏการณ์นี้ยืนยันได้จากการมองผ่านช่องกระจกที่ได้ทำไว้เหนือเบด สามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเบดอยู่ในลักษณะของฟลูอิไดเซชัน นอกจากนี้ยังมีถ่านไม้ผ่านท่อล้นออกมาจากเบดในลักษณะของการถูกเผาไหม้บางส่วนแล้ว ดังเช่นการทดลองที่ 49, 53 และ 57 (ตารางที่ 4.9) ซึ่งสามารถผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ถึงร้อยละ 27 โดยปริมาตร

ผลการทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

ปฏิกิริยาการเผาไหม้ระหว่างอากาศและคาร์บอนในถ่านไม้ มีความซับซ้อนมากพอสมควร นักวิทยาศาสตร์ได้ตั้งสมมติฐานไว้หลายอย่าง สำหรับการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ในเตาแบบ

ฟลูอิไดซ์เบดนี้ และเพื่อความเข้าใจของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยขอตั้งสมมติฐานบางอย่างไว้ดังนี้

1. เม็ดถ่านไม้เมื่อเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้ ขนาดของเม็ดเล็กลงตลอดเวลา

2. เถ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของเม็ดถ่านไม้จะหลุดลอยไปตามกระแสของก๊าซ

3. โซนของปฏิกิริยาภายในเบดแบ่งออกเป็น 3 โซนคือ ออกซิเดชัน, ออกซิเดชันบางส่วน และ รีดักชัน กล่าวคือบริเวณที่ป้อนถ่านไม้เข้ามา ก็คือ รีดักชันโซน ส่วนล่างสุดของเบดซึ่งเกิดการเผาไหม้ก็จะเป็นออกซิเดชันโซน และช่วงระหว่างทั้ง 2 โซน จะเป็นออกซิเดชันโซนบางส่วนนั่นเอง

สำหรับตัวแปรที่ใช้ศึกษาการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีอยู่หลายตัว อาทิ

1. <u>อัตราการป้อนถ่านไม้</u>

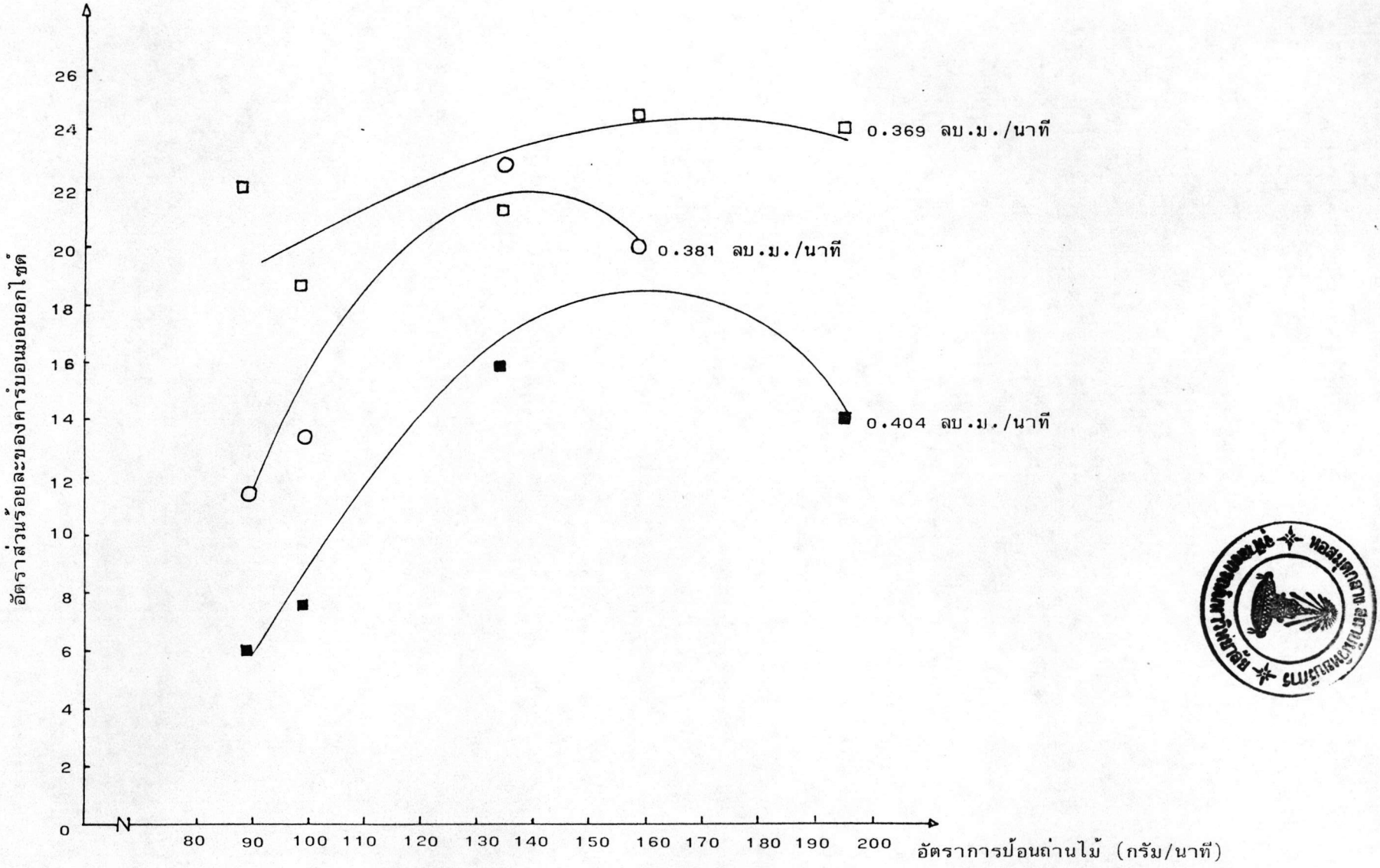
ดังที่ O. Boudouard (33) ได้กล่าวไว้ว่า ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดดีที่สุดที่ช่วงอุณหภูมิ 900-1200°ซ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงพยายามรักษาอุณหภูมิของเบดให้อยู่ในช่วงดังกล่าวแล้ว ปรับความสูงของเบดให้คงที่ที่ 50 ซม. และอัตราการไหลของอากาศ 0.369-0.404 ลบ.ม./นาที ปรากฏว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการป้อนถ่านไม้จาก 88 กรัม/นาที จนถึง 195 กรัม/นาที ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือเพิ่มจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 24.5 ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.369 ลบ.ม./นาที และเพิ่มจากร้อยละ 6.5 เป็นร้อยละ 21.5 ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.404 ลบ.ม./นาที (ตารางที่ 5.1, รูปที่ 5.1) ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนถ่านไม้มากขึ้น โซนของรีดักชันหรือโซนของออกซิเดชันบางส่วนกว้างขึ้น ดังนั้นโอกาสของปฏิกิริยา Boudouard reaction เกิดได้มากในโซนนี้ ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน ส่วนปริมาณออกซิเจนเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย จากข้อสันนิษฐานว่าโซนของออกซิเดชันบางส่วนหรือรีดักชันโซนมีขนาดกว้างขึ้น ได้ลองทดลองเพิ่มอัตราการป้อนถ่านไม้ไปเป็น 280 กรัม/นาที ที่อัตราการไหลของอากาศ 0.430 ลบ.ม./นาที ความสูงของเบด 60 ซม. เริ่มต้นอุณหภูมิของเบด 850°ซ ได้ผลผลิต CO ร้อยละ 15 (ตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2)

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองที่อัตราการป้อนถ่านไม้ 88, 99, 132, 157 และ 195 กรัม/นาที เปรียบเทียบก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่อัตราการไหลของอากาศและความสูงเบดเดียวกัน

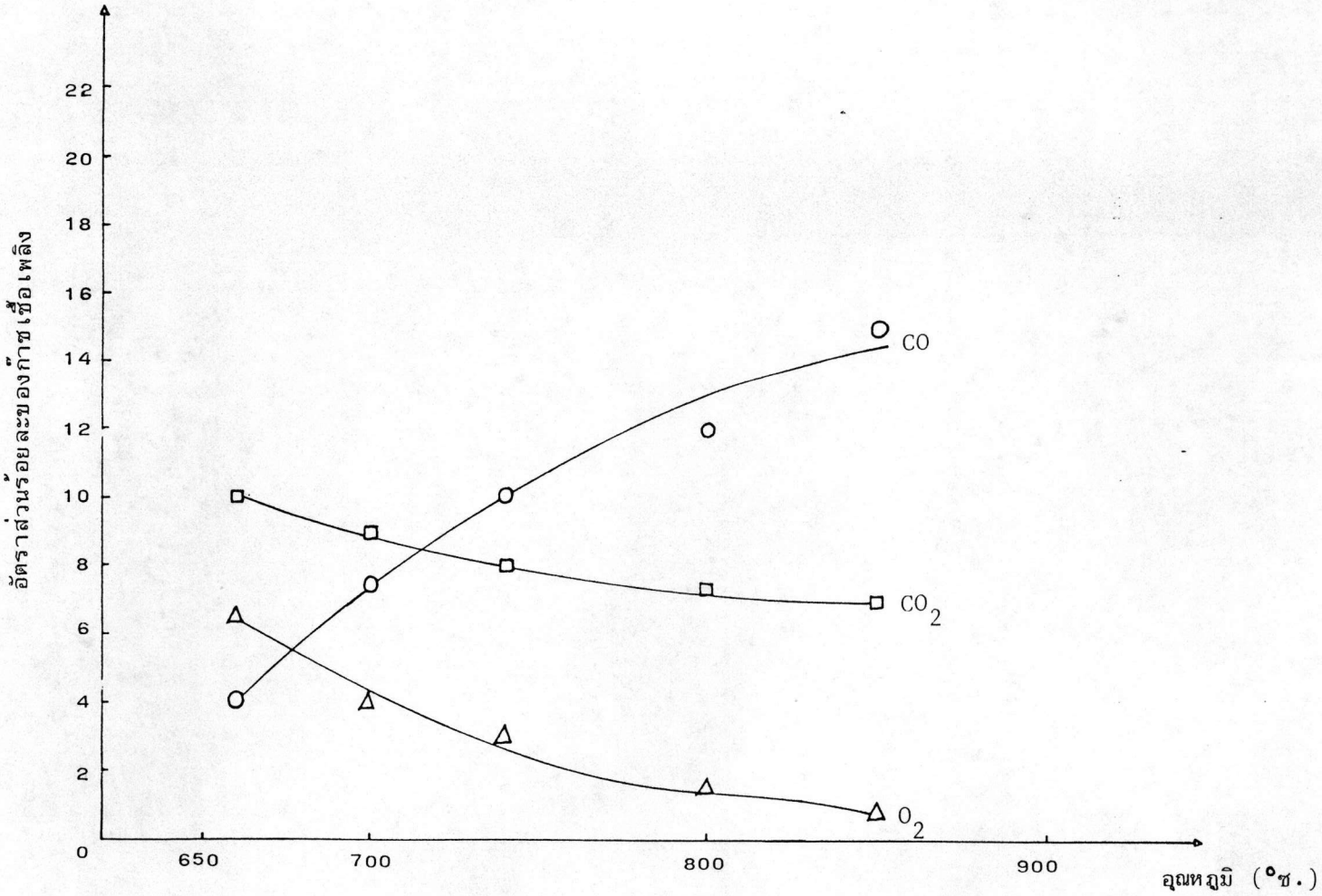
การทดลองที่	อัตราการป้อนถ่านไม้ (กรัม/นาที)	ความสูงเบด (ซม.)	อัตราการไหลของอากาศ (ลบม/นาที)	อุณหภูมิ (°ซ.)	ก๊าซผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนร้อยละ)		
					CO	CO_2	O_2
41	88	60	0.369	1130	22.0	3.0	0.7
54	99	60	0.369	1200	18.5	8.0	1.2
73	132	60	0.369	1190	21.0	5.5	0.3
79	157	60	0.369	1070	24.5	5.0	0.6
65	195	60	0.369	1120	24.0	4.5	0.1
42	88	60	0.381	1190	11.5	10.0	0.6
55	99	60	0.381	1200	13.5	10.5	0.9
74	132	60	0.381	1170	23.0	6.0	0.2
80	157	60	0.381	1100	20.0	7.5	0.9
44	88	60	0.404	1050	6.0	15.0	1.8
56	99	60	0.404	1160	7.5	13.5	2.3
76	132	60	0.404	1090	16.0	10.5	0.4
66	195	60	0.404	1070	22.5	5.0	0.4

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองที่อัตราการป้อนถ่านไม้ 280 กรัม/นาที ความสูงเบด 60 ซม. ความเร็วลม 2.3 ซม. น้ำ (0.430 ลบ.ม./นาที)

อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนร้อยละ)		
	CO_2	CO	O_2
850	7.0	15.0	0.9
800	7.5	12.0	1.6
740	8.0	10.0	2.5
710	9.0	7.5	4.0
660	10.0	4.0	6.2



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของคาร์บอนมอนอกไซด์กับอัตราการป้อนถ่านไม้ที่อัตราการไหลของอากาศ ความสูง เบดและขนาดถ่านไม้เดียวกัน



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนร้อยละของก๊าซเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิที่อัตราการไหลของอากาศ 0.430 ลบ.ม./นาที

ปฏิกิริยา $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ เป็นปฏิกิริยาที่ดูดความร้อน พร้อมกับปริมาณของถ่านไม้ที่เพิ่มเข้ามามาก ปริมาณของความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในเบดไม่เพียงพอกับปริมาณความร้อนที่ต้องการ ดังนั้นอุณหภูมิของเบดจะค่อย ๆ ลดลง โซนของออกซิเดชันจะค่อย ๆ ลดลง และปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงด้วยเช่นกัน จนกระทั่งอุณหภูมิต่ำเกินกว่าที่จะเกิดปฏิกิริยา Boudouard Reaction อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิของเบดก็ลดลงไปเรื่อย ๆ อีก แม้ว่าปฏิกิริยา Boudouard Reaction ไม่เกิดแล้วก็ตาม เพราะว่าถ่านไม้ป้อนเข้ามามากเกินกว่าปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้น แสดงว่าโซนของออกซิเดชันลดลงด้วยเช่นกัน (ดูรายละเอียดอุณหภูมิจากตาราง 5.2) ออกซิเจนเหลือใช้มากขึ้นตามลำดับด้วย

สรุปได้ว่าที่อัตราความเร็วของอากาศ และความสูงของเบดค่าหนึ่ง การป้อนของถ่านไม่ควรใช้อัตราที่สูงมากเกินไป เพราะจะทำให้การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง พร้อมทั้งอุณหภูมิของเบดลดลงด้วย (ตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.2)

2. <u>อัตราการไหลของอากาศ</u>

จากข้อจำกัดของอัตราการป้อนอากาศมีผลต่อการเกิดของก๊าซเชื้อเพลิงและอัตราการป้อนของถ่าน ดังนั้นทางปฏิบัติอีกทางหนึ่งที่เป็นไปได้คือ จำกัดอัตราการป้อนถ่านและความสูงของเบด แล้วค่อย ๆ เพิ่มความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าไปในเบด ปฏิกิริยาออกซิเดชันย่อมมีโอกาสเกิดมากขึ้น โซนนี้ขยายตัวเพิ่มขึ้นพร้อมกับการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์มากตามไปด้วย โซนของรีดักชันค่อย ๆ แคบลง เพราะความสูงของเบดจำกัด อุณหภูมิของเบดก็ยังคงอยู่ในช่วง 900-1200 °ซ เช่นเดิม แต่ที่ปริมาณอากาศมากอุณหภูมิของเบดควรอยู่ใกล้ 1200 °ซ. มากกว่า

ผลการทดลองที่กระทำในเบดที่มีขนาดความสูงต่าง ๆ กัน แล้วเพิ่มปริมาณของอากาศจาก 0.365 ถึง 0.405 ลบ.ม./นาที ได้ผลคล้ายกันที่ทุกความสูงของเบดก็คือปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงลดลงตามลำดับจากร้อยละ 22 เหลือร้อยละ 8 ที่ความสูงของเบด 60 ซม. อัตราการป้อนถ่านไม้ที่ 88 กรัม/นาที (รูป 4.16) หรือลดจากร้อยละ 27 เหลือร้อยละ 8 ที่อัตราการป้อนถ่านไม้ 99 กรัม/นาที (รูป 4.17) หรือลดจากร้อยละ 24 เหลือร้อยละ 14 ที่อัตราการป้อนถ่านไม้ 195 กรัม/นาที (รูป 4.18) แต่อัตราการลดลงของปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อัตราการป้อนถ่านน้อย ๆ จะมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็ว ด้วยอัตราประมาณ -1.64 ที่อัตราการป้อนถ่านไม้ 88 กรัม/นาที แล้วอัตราการลดลงนี้จะค่อย ๆ ช้าลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนถ่านสูงขึ้น ดังเช่นที่อัตราการป้อนถ่าน 99 กรัม/นาที มีค่าประมาณ -0.81 ที่อัตราการป้อนถ่าน 195 กรัม/นาที มีค่าการลดลงประมาณ -0.69 ในเวลาเดียวกันนั้นขณะที่ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

ลดลง ในก๊าซเชื้อเพลิงก็กลับมีปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ดังผลการทดลองที่แสดงในรูป 4.19 ที่อัตราการป้อนถ่าน 88 กรัม/นาที คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณของอากาศ นั่นคือปริมาณของคาร์บอนในถ่านลดอย่างรวดเร็ว ไม่เหลือพอที่จะเกิดปฏิกิริยาของ Boudouard Reaction หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ โซนของออกซิเดชันกว้างขึ้น ๆ แต่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนของถ่านมากขึ้น ปรากฏว่าปริมาณการเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงช้าลงอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.21) ที่ความเร็วของอากาศยังน้อยอยู่ และเมื่อเพิ่มจนถึง 0.49 ลบ.ม./นาที แล้วปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก็เพราะมีออกซิเจนเกินพออย่างมาก

การทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 900-1200 °ซ. ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์อย่างมีเสถียรภาพ (33)

3. อุณหภูมิ

ในการทดลอง แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ

ส่วนแรกเป็นการทดลองโดยให้อุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสม่ำเสมอ (Steady State) ที่อัตราการป้อนถ่าน, อัตราการไหลของอากาศ, ความสูงเบด และขนาดถ่านไม้ค่าหนึ่ง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง อุณหภูมิที่สภาวะสม่ำเสมอของแต่ละการทดลองอยู่ในช่วง 900-1200 °ซ. (พิจารณาผลการทดลองรูปที่ 4.6-8 และ 4.15-17)

ส่วนที่สองเป็นการตั้งอุณหภูมิไว้ที่ค่าหนึ่งที่ต้องการ ควบคุมการเปิด-ปิด การป้อนถ่านโดยใช้ Temperature Controller ดังผลการทดลองในตารางที่ 5.5 ที่จะกล่าวต่อไป

สำหรับการเกิด Boudouard Reaction ตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิ เพราะถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป ปฏิกิริยานี้เกิดได้น้อยหรือไม่เกิดเลย (33) ดังการทดลองของ Rhead และ Wheeler (33) แสดงไว้ในตารางที่ 5.3

การทดลองในส่วนแรกได้กระทำที่ความสูงเบด, ขนาดถ่านไม้ขนาดเดียวกัน เพิ่มความเร็วของอากาศแล้วได้ค่าอุณหภูมิที่สภาวะสม่ำเสมอต่าง ๆ ตามตารางที่ 5.3 เห็นได้ว่าอัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจากเบดมีปริมาณสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละ 19.4 (ที่ความสูงเบด 50 ซม., ขนาดถ่านไม้ 2-4 มม., อัตราการไหลของอากาศ 0.290-0.362 ลบ.ม/นาที) ครั้นอุณหภูมิของเบดสูงมากๆ ปฏิกิริยาจะสันกลับ อัตราส่วนร้อยละของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากเบดลดลงร้อยละ 54.1 ที่อุณหภูมิ 1180 °ซ. (ดังผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.3)

ปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction)

$$C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO \qquad \Delta H_f = +172.5 \text{ kJ/mol}$$

ความร้อนที่ต้องใช้เป็นปริมาณมาก สำหรับในฟลูอิไดซ์เบดนี้ ความร้อนได้จากการเผาไหม้ของถ่านกับออกซิเจนเท่านั้น ถ้าอุณหภูมิยังต่ำอยู่ ปริมาณความร้อนที่จะทำให้เกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ก็ยังน้อย ดังเช่นที่อุณหภูมิ 920°ซ. ได้อัตราส่วนร้อยละของคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงเพียงร้อยละ 1.5 โดยปริมาตร แต่พออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 1070°ซ. ได้คาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 11.5 ในก๊าซเชื้อเพลิง ผลการทดลองนี้จึงสอดคล้องกับผลการทดลองของนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน ทั้งยังสนับสนุนว่าคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 900-1200°ซ. (4,33,34) ด้วย

สำหรับการทดลองส่วนที่สอง เป็นการควบคุมอุณหภูมิในการทดลองโดยใช้ Temperature Controller นั้นเป็นการควบคุมโดยอาศัยการเปิด-ปิดการป้อนถ่าน การทดลองมีปัญหามาก เนื่องจากเครื่องมือในการควบคุมอุณหภูมิมีลักษณะเป็น ON-OFF CONTROLLER ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของเบดสูงถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ก็จะตัดการป้อนถ่าน ขณะนั้นอุณหภูมิก็ยังสูงขึ้นต่อไปอีกระยะเวลาหนึ่ง (ประมาณ $\frac{1}{2}$-1 นาที) จนกว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นกับถ่านที่ป้อนเข้ามาใหม่นั้นจนหมด อุณหภูมิก็จะลดลง เมื่อลดลงถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ก็จะมีการป้อนถ่านเข้ามาอย่างต่อเนื่องใหม่ อุณหภูมิในเบดเชื้อเพลิงก็จะลดลงไปอีกช่วงระยะเวลาหนึ่ง ($\frac{1}{2}$-1 นาที) จนกว่าการเผาไหม้เกิดขึ้นกับถ่านที่ป้อนเข้ามาใหม่นั้น และอุณหภูมิก็จะสูงถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ก็จะตัดการป้อนถ่านอีกครั้ง เป็นเช่นนี้ต่อ ๆ ไป พบว่าระยะเวลาในการป้อนถ่านแต่ละครั้งนานพอสมควร ซึ่งใช้เวลาประมาณ $\frac{1}{2}$- 1 นาที พบว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ในเบดเชื้อเพลิงเป็นการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยมาก และอุณหภูมิขึ้นลงตามการป้อนถ่าน นอกจากนี้แล้วปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ก็จะขึ้น ๆ ลง ๆ เช่นเดียวกัน จากการวิเคราะห์ก๊าซพบว่า มีอัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำและไม่คงที่ อัตราส่วนร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์สูงและไม่คงที่เช่นกัน ดังนั้นในการควบคุมอุณหภูมิโดยวิธีนี้ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เพื่อผลิตก๊าซเชื้อเพลิงให้ได้ปริมาณสูงพอและคงที่สำหรับเครื่องยนต์

ตารางที่ 5.3 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

การทดลองที่	อุณหภูมิ (°ซ)	ความสูงเบด (ซม.)	ก๊าซผลิตภัณฑ์ * (อัตราส่วนร้อยละ)			การทดลองที่	อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์ ** (อัตราส่วนร้อยละ)		
			CO	CO_2	O_2			CO	CO_2	O_2
14	1010	50	16.5	12.5	0.2	4	920	1.5	13.5	5.5
15	1020	50	15.5	12.5	0.1	1	1000	7.5	10.0	5.0
13	1100	50	18.5	10.5	0.5	3	1040	8.5	10.0	6.0
16	1180	50	8.5	16.0	0.3	2	1070	11.5	9.5	4.0

* อัตราการป้อนถ่านไม้ 162 กรัม/นาที

** อัตราการป้อนถ่านไม้ 130 กรัม/นาที

4. ความสูงเบด

ดังได้กล่าวในหัวข้อ 2 ว่าโซนของการเผาไหม้และโซนของการเกิดปฏิกิริยารีดักชั่นเปลี่ยนแปลงไป เมื่อปริมาณของอากาศมากขึ้น การทดลองนี้จึงได้ลองพยายามเพิ่มความสูงเบดจาก 50 เป็น 60 และ 70 ซม. ตามลำดับ เพื่อขยายโซนของออกซิเดชั่นและรีดักชั่นกว้างขึ้น จุดประสงค์ต้องการปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงมีปริมาณสูงขึ้น ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.6

ความเร็วของอากาศที่ใช้งานทดลองกับถ่านไม้ขนาด 2-4 มม. นั้นค่อนข้างสูง คือประมาณ 1.2 เท่าของความเร็วต่ำสุดนั้น เนื่องจากเมื่อเคลื่อนตัวเข้าไปในเบด อากาศจะขยายตัวจากเดิมนั่นเอง ฉะนั้นเบดจึงอยู่ในสภาพปั่นป่วนมาก โซนรีดักชั่นจึงอาจจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้จะเพิ่มความสูงของเบดจาก 50 ซม. เป็น 70 ซม. แล้วก็ตาม ปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์สูงขึ้นเพียงร้อย 30 ถึง 70 เมื่อสังเกตปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงมีถึงร้อยละ 10 ถึง 14.5 และยังมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความสูงเบดมากขึ้น แสดงว่าโซนของออกซิเดชั่นกว้างขึ้นตามความสูงของเบดด้วย ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณของออกซิเจนในก๊าซเชื้อเพลิงมีปริมาณน้อยมาก และน้อยลงเมื่อความสูงของเบดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสัดส่วนช่องว่างของเบดมีมากหรือปริมาณของ Solid hold up น้อย สำหรับเบดที่มีขนาดถ่านเล็ก

เมื่อเพิ่มขนาดของถ่านไม้ให้ใหญ่ขึ้นเป็นขนาด 4-6 มม. แม้ว่าความเร็วของอากาศที่ป้อนเข้าสู่เบดสูงขึ้นปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงก็ยังสูงพอที่จะใช้เดินเครื่องยนต์ได้ (คาร์บอนมอนอกไซด์ประมาณร้อยละ 18 ในก๊าซเชื้อเพลิง) อาจเป็นเพราะขนาดของเม็ดถ่านโตขึ้นทำให้สัดส่วนช่องว่างของเบดลดลง เป็นสาเหตุให้โซนของออกซิเดชั่นแคบลง ดังเห็นได้จากปริมาณร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซเชื้อเพลิงมีน้อยกว่าจากเบดที่ใช้ถ่านขนาด 2-4 มม. มาก (มีประมาณร้อยละ 6 ถึงร้อยละ 8.5) และปริมาณออกซิเจนก็เหลือน้อยกว่าร้อยละ 1.0 ในก๊าซเชื้อเพลิง แสดงว่าออกซิเจนจากอากาศใช้ในโซนออกซิเดชั่นแล้วเหลือมาใช้ในโซนรีดักชั่นพอดี

สำหรับเม็ดของถ่านไม้ขนาด 2-4 มม. นี้ มีปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นจากเบดสูง 50 ซม. เป็น 70 ซม. นั้นอยู่ในช่วงระหว่าง 6.25 ถึงร้อยละ 15 นั่นก็คือความสูงของเบดมีผลต่อการผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ในเบดน้อย ในขณะที่ใช้เม็ดถ่านไม้ขนาดใหญ่ ส่วนในเบดที่มีเม็ดถ่านไม้เล็กลงไป มีผลต่อการผลิตก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์พอสมควรที่ความเร็วของอากาศใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดเซชั่น

ตารางที่ 5.4 แสดงอิทธิพลของความสูงเบดต่ออัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่ขนาดถ่านไม้ 2-4 มม.

การทดลองที่	ความสูงเบด (ซม.)	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม/นาที)	อุณหภูมิ (^{o}ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์			การทดลองที่	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม/นาที)	อุณหภูมิ (^{o}ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์			การทดลองที่	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม/นาที)	อุณหภูมิ (^{o}ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์		
				CO	CO_2	O_2				CO	CO_2	O_2				CO	CO_2	O_2
1	50	0.329	1000	7.5	10.0	5.0	2	0.340	1070	11.5	9.5	4.0	3	0.350	1040	8.5	10.0	6.0
5	60	0.329	990	9.5	10.5	5.0	6	0.340	1050	13.0	13.0	0.3	7	0.350	1000	13.0	13.0	0.5
9	70	0.329	1140	10.5	14.5	0.4	11	0.340	1200	14.0	12.5	0.2	11	0.350	1200	14.5	12.0	0.4

ตารางที่ 5.4 (ต่อ) ที่ขนาดถ่านไม้ 4-6 มม.

การทดลองที่	ความสูงเบด (ซม.)	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม/นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์			การทดลองที่	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม/นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์			การทดลองที่	อัตราการไหลของอากาศ (ลบ.ม/นาที)	อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซผลิตภัณฑ์		
				CO	CO_2	O_2				CO	CO_2	O_2				CO	CO_2	O_2
50	50	0.355	1200	16.5	8.5	0.7	62	0.417	1150	21.5	7.0	0.6	63	0.493	1190	16.0	8.0	0.9
54	60	0.355	1120	18.5	8.0	1.2	66	0.417	1070	22.5	5.0	0.4	67	0.493	1130	16.5	7.5	0.6
58	70	0.355	1150	19.0	6.0	1.0	70	0.417	1080	23.0	4.5	0.8	71	0.493	1130	17.0	7.0	1.4

5. ขนาดถ่านไม้

การศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรตัวหนึ่งที่มีต่อระบบโดยทั่วไปแล้วตัวแปรอื่น ๆ ควรจะเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ แต่การศึกษาเรื่องก๊าซซิฟิเคชั่นนั้น การควบคุมตัวแปรให้คงที่กระทำได้อย่างยากมาก อาทิ อุณหภูมิของเบดดังผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 5.7 ที่ตัวแปรอื่น ๆ เท่ากัน อุณหภูมิของเบดจะแตกต่างกันตั้งแต่ 20 °ซ. ถึง 190 °ซ. อย่างไรก็ตามยังเห็นว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ผลิตได้แตกต่างกัน เห็นได้ชัดว่าขนาดของถ่านไม้ที่ 4-6 มม. ได้ก๊าซนี้มากกว่าที่ใช้ขนาดถ่านไม้ 2-4 มม. ในทุกอัตราการป้อนของอากาศ ที่ความสูงเบด 60 ซม. เท่ากัน อัตราการป้อนของถ่านไม้เดียวกัน ตั้งแต่ร้อยละ 38 ถึงร้อยละ 110

ถ่านไม้ที่มีขนาดใหญ่กว่าจะติดไฟและคงสภาพเป็นเม็ดถ่านไม้นานกว่า หรือสัดส่วนช่องว่างของเบดน้อยกว่า ทั้งนี้เพราะขณะเกิดปฏิกิริยาขนาดของเม็ดถ่านไม้จะลดลงตลอดเวลา ปริมาณของคาร์บอนในถ่านไม้เม็ดเล็กกว่าย่อมต้องหมดก่อนถ่านไม้เม็ดใหญ่กว่า จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ออกซิเดชั่นโซนในเบดของถ่านเม็ดใหญ่แคบกว่าถ่านขนาดเล็ก แล้วไปเพิ่มโซนของรีดักชั่นให้กว้างขึ้น

ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน ทดลองกับถ่านที่มีขนาดต่าง ๆ กัน แต่เป็นขนาดที่เล็กมากจนอัตราการลดขนาดของเม็ดถ่านแตกต่างกันน้อยมาก จนไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ และการผลิตปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ก็ไม่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างงานวิจัยของ N. Lebolay และผู้ร่วมงาน (35) ใช้ถ่านหิน 2 ขนาดคือ 425-1000 ไมครอน และ 1000-2360 ไมครอน ทำการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในเตาแบบฟลูอิไดเซชั่น ที่อุณหภูมิประมาณ 798-935 °ซ. ปรากฏว่าได้ปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่แตกต่างกัน Van Heek และผู้ร่วมงาน (34) พบว่าขนาดของอนุภาคระหว่าง 0.1-1.4 มม. ไม่มีผลต่อปฏิกิริยาก๊าซซิเดชั่นของถ่านบิทูมินัสในสตีมที่อุณหภูมิ 950 °ซ. และยังพบว่า Brown Coal ที่มีขนาดเดียวกันนี้ ก็ไม่มีผลต่อการก๊าซซิฟิเคชั่นที่อุณหภูมิ 800 °ซ. เหมือนกัน Ergun (34) พบว่าขนาดของอนุภาคในช่วง 0.2-1.0 มม. ไม่มีผลต่อการก๊าซซิฟิเคชั่นของถ่านโค้กในสตีมที่ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิประมาณ 1200 °ซ.

ยังไม่มีนักวิทยาศาสตร์ได้ทดลองกับเม็ดถ่านขนาดใหญ่ดังเช่นงานวิจัยนี้ คิดว่าขนาดของเม็ดถ่านมีอิทธิพลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงเมื่อใช้ถ่านขนาดที่โตกว่าขนาดวิกฤต ซึ่งคงจะต้องนำมาศึกษาต่อไปว่าขนาดวิกฤตของเม็ดถ่านจะเป็นเท่าไร

ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ขนาด 2-4 มม. อัตราการป้อนถ่าน 130 กรัมต่อนาที เปรียบเทียบกับขนาดถ่านไม้ 4-6 มม. อัตราการป้อนถ่าน 132 กรัมต่อนาที ที่ความสูงเบด 60 ซม. และ M_R เดียวกัน

การทดลองที่	ความสูงเบด (ซม.)	M_R	อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ขนาด 2-4 มม. (130 กรัม/นาที)			การทดลองที่	อุณหภูมิ (°ซ)	ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ขนาด 4-6 มม. (132 กรัม/นาที)		
				CO	CO_2	O_2			CO	CO_2	O_2
5	60	0.54	990	9.5	10.5	5.0	73	1190	21.0	5.5	0.3
6	60	0.56	980	13.0	13.0	0.3	74	1170	23.0	6.0	0.2
7	60	0.57	1000	13.0	13.0	0.5	75	1150	20.5	5.5	0.8
8	60	0.59	1200	9.0	14.5	1.0	76	1090	16.0	10.5	0.4

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) แสดงผลการทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ขนาด 2-4 มม. อัตราการป้อนถ่าน 162 กรัมต่อนาที เปรียบเทียบกับขนาดถ่านไม้ 4-6 มม. อัตราการป้อนถ่าน 157 กรัมต่อนาที ที่ความสูงเบด 60 ซม. และ M_R เดียวกัน

การทดลองที่	ความสูงเบด (ซม.)	M_R	อุณหภูมิ ($^oซ$)	ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ขนาด 2-4 มม. (162 กรัม/นาที)			การทดลองที่	อุณหภูมิ ($^oซ$)	ก๊าซเชื้อเพลิงจากถ่านไม้ขนาด 4-6 มม. (157 กรัม/นาที)		
				CO	CO_2	O_2			CO	CO_2	O_2
17	60	0.50	1050	18.0	11.0	0.1	78	1030	25.0	3.5	0.8
18	60	0.54	1050	15.5	12.0	0.3	79	1070	24.5	5.0	0.6
19	60	0.57	970	12.5	13.0	0.5	80	1100	20.0	7.5	0.9

การเดินเครื่องยนต์สันดาปภายในด้วยก๊าซเชื้อเพลิง

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตได้จากเตาฟลูอิไดเซชั่นนั้นมีความร้อนสูง และเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ จำเป็นต้องแยกออกและทำก๊าซนี้ให้เย็นเสียก่อน

ไซโคลนใช้เป็นเครื่องดักจับเถ้าที่ปลิวมากับก๊าซเชื้อเพลิง มี 2 ตัวต่อกันอย่างอนุกรม ตัวแรกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 ซม. สูง 200 ซม. ส่วนกรวยสูง 90 ซม. ตัวที่สองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40.6 ซม. สูง 94.5 ซม. ส่วนกรวยสูง 55 ซม. ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผ่านไซโคลนทั้งสองตัวนี้แล้ว มีความสะอาดพอสมควร จากนั้นจึงทำให้เย็นลงในระบบหล่อเย็นด้วยอากาศ

ระบบหล่อเย็นสร้างด้วยท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.95 ซม. จำนวน 22 ท่อ แต่ละท่อมีครีบหางปลาติดอยู่จำนวน 65 แผ่นต่อท่อ แต่ละแผ่นมีขนาดกว้าง 2.5 ซม. ยาว 4.5 ซม. หนา 0.15 ซม. ทำด้วยแผ่นอลูมิเนียม พร้อมกับก๊าซเชื้อเพลิงที่เย็นลงมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้ว ไอน้ำที่ติดมากับก๊าซนี้ก็กลั่นตัวเป็นของเหลวและถูกแยกออกสู่ส่วนล่างของระบบหล่อเย็น ก๊าซนี้ถูกนำเข้าเครื่องยนต์สันดาปภายในชนิดใช้ก๊าซโซลีนขนาด 1600 ลบ.ซม. มีกำลังขับสูงสุด 96 แรงม้า (NISSAN OHC.)

ได้ทดลองป้อนปริมาณก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศ ด้วยอัตราตั้งแต่ 0.13 ลบ.ม. ต่อนาที ถึง 0.38 ลบ.ม. ต่อนาที ปรากฏว่าเครื่องยนต์เดินได้เรียบและได้ความเร็วรอบขนาดต่าง ๆ กันดังนี้คือ

0.13 ลบ.ม.		ได้ความเร็วรอบ	1250	รอบต่อนาที
0.22	"	"	2000	"
0.30	"	"	2500	"
0.38	"	"	3000	"

ปรากฏว่าเมื่อเครื่องยนต์เดินได้เรียบที่สุดที่ความเร็วรอบขนาด 2500 รอบต่อนาที ได้กำลังขับประมาณ 46 แรงม้า

นอกจากนี้ได้ทดลองต่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด Single phase ขนาด 5 กิโลวัตต์กับเครื่องยนต์ (Winchester Super Generator) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานได้ดีที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที จึงจำเป็นต้องทดรอบของเครื่องยนต์ลงให้เหลือ 1500 รอบต่อนาที เมื่อต่อกับ Load ต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เครื่องยนต์ก็ยังทำงานได้ดี เพียงแต่ปรับความเร็วรอบเพิ่มขึ้นตามเท่านั้น (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค)

ประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิง

การคำนวณประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงมีพื้นฐานการคำนวณแบบ Cold gas Efficiency (38) จะเห็นว่า ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ได้คือคาร์บอนมอนอกไซด์เพียงตัวเดียวเท่านั้นที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นประสิทธิภาพของเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจึงมีแนวโน้มตามอัตราส่วนร้อยละของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ได้และอัตราการป้อนถ่านไม้ จากการทดลองทั้งหมดได้ค่าอัตราส่วนร้อยละอยู่ในช่วง 1.57-37.20 มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของสักขี แสนสุภา (9)ที่ทำการทดลองผลิตก๊าซเชื้อเพลิงโดยใช้แกลบเป็นวัตถุดิบ