

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์



2.1 ชนิดของ เตา

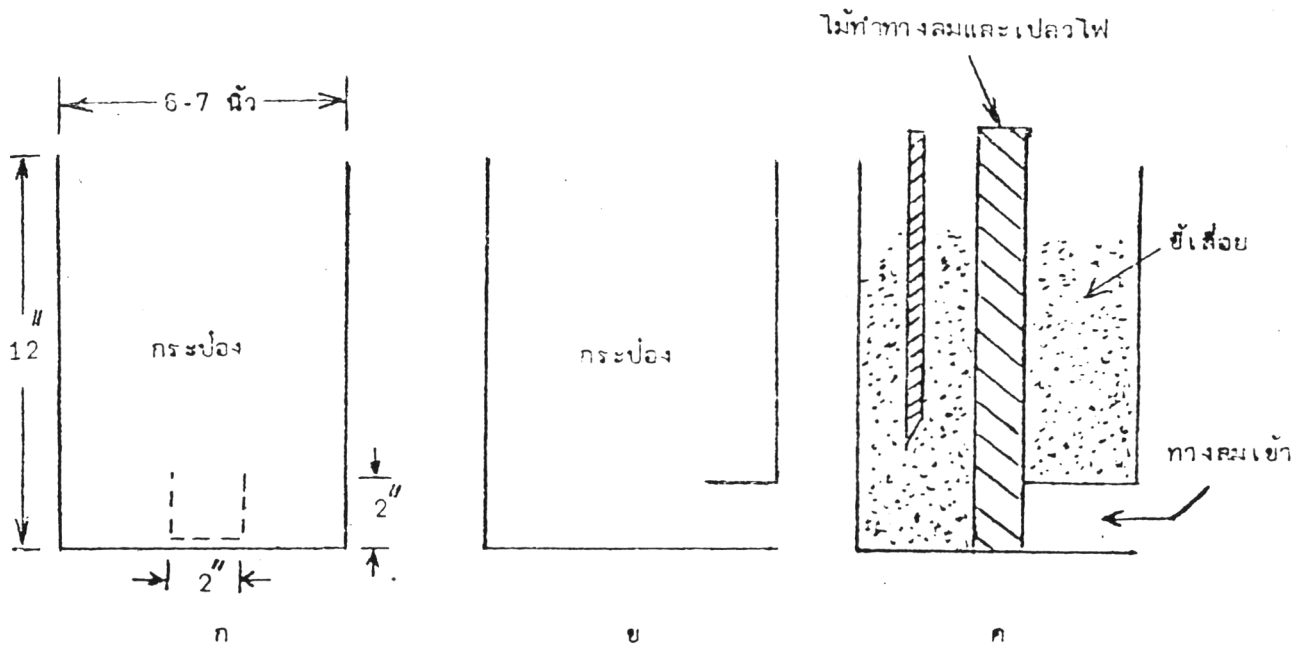
ในต่างประเทศได้มีการทดสอบและพัฒนาเตามาก่อนแล้ว จากโปรแกรมเตาของ ไอ ที ดี จี (ITDG Stoves Programm) (10) ได้จำแนกเตาออกตามวัสดุส่วนใหญ่ที่ใช้ในการสร้าง เตา ดังนี้

1. เตาที่ทำจากโคลน (Mud stoves)
2. เตาเซรามิก (Ceramic stoves)
3. เตาทำด้วยโลหะ (Metal stoves)
4. เตาทำด้วยอิฐ/ซีเมนต์/เหล็ก (Brick/Cement/Steel stoves)
5. เตาทำด้วยเหล็กและเซรามิก (Metal and ceramic stoves)

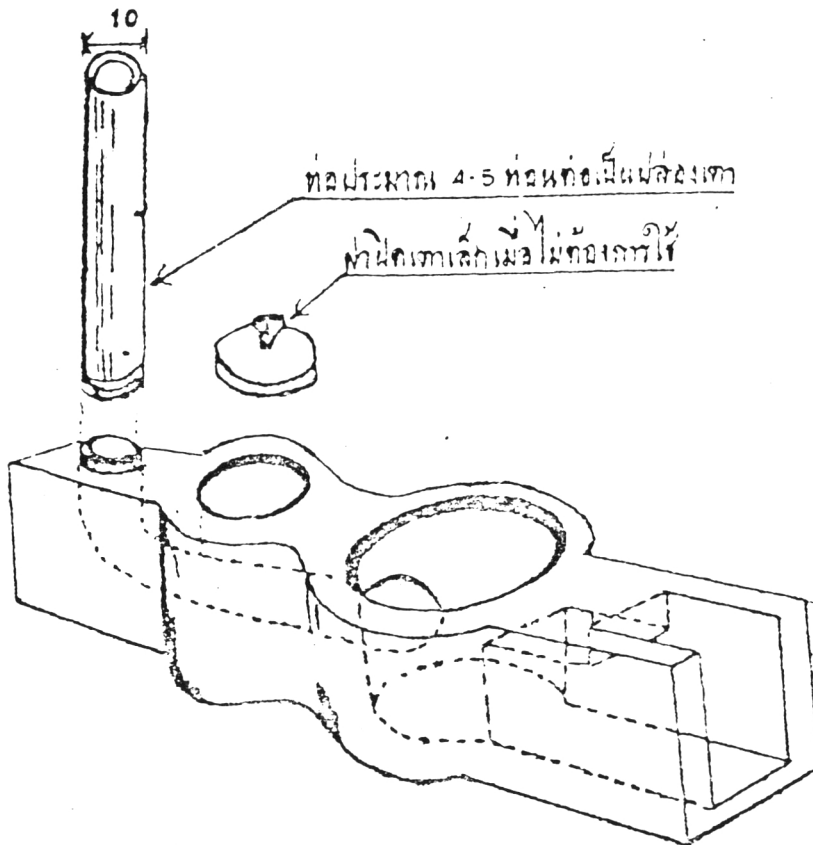
สำหรับในประเทศไทย การปรับปรุง เตาได้เริ่มทำกันมาหลายปี จากรายงานการสัมมนาทางวิชาการ เรื่อง เตา เศรษฐกิจและ เชื้อเพลิงของ สสวท. (1) พบว่า เตามีอยู่ด้วยกันหลายแบบ คือ

1. เตาจากแนวคิดของนายหล่า คืออำมาตย์ ได้ประดิษฐ์เตาหุงต้มแบบประหยัดตามรูป 2.1 โดยใช้ซี่เหลียงซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาอัดให้แน่นในกระป๋องขนาดใหญ่สูงประมาณ 1 ฟุต ซึ่งเจาะช่องว่างคานกลางคล้ายกับเตาดานธรรมดา
2. เตาระดับหมู่บ้านโดยนายสุขสันต์ สุทธิผลไพฑูรย์ ตามรูป 2.2 เตาชนิดนี้ทำจากดินจอมปลวกผสมกับเกลบ
3. เตาของนายน้อย พลายนู ตามรูป 2.3 เตาแบบนี้ทำด้วยโลหะ คือเหล็ก

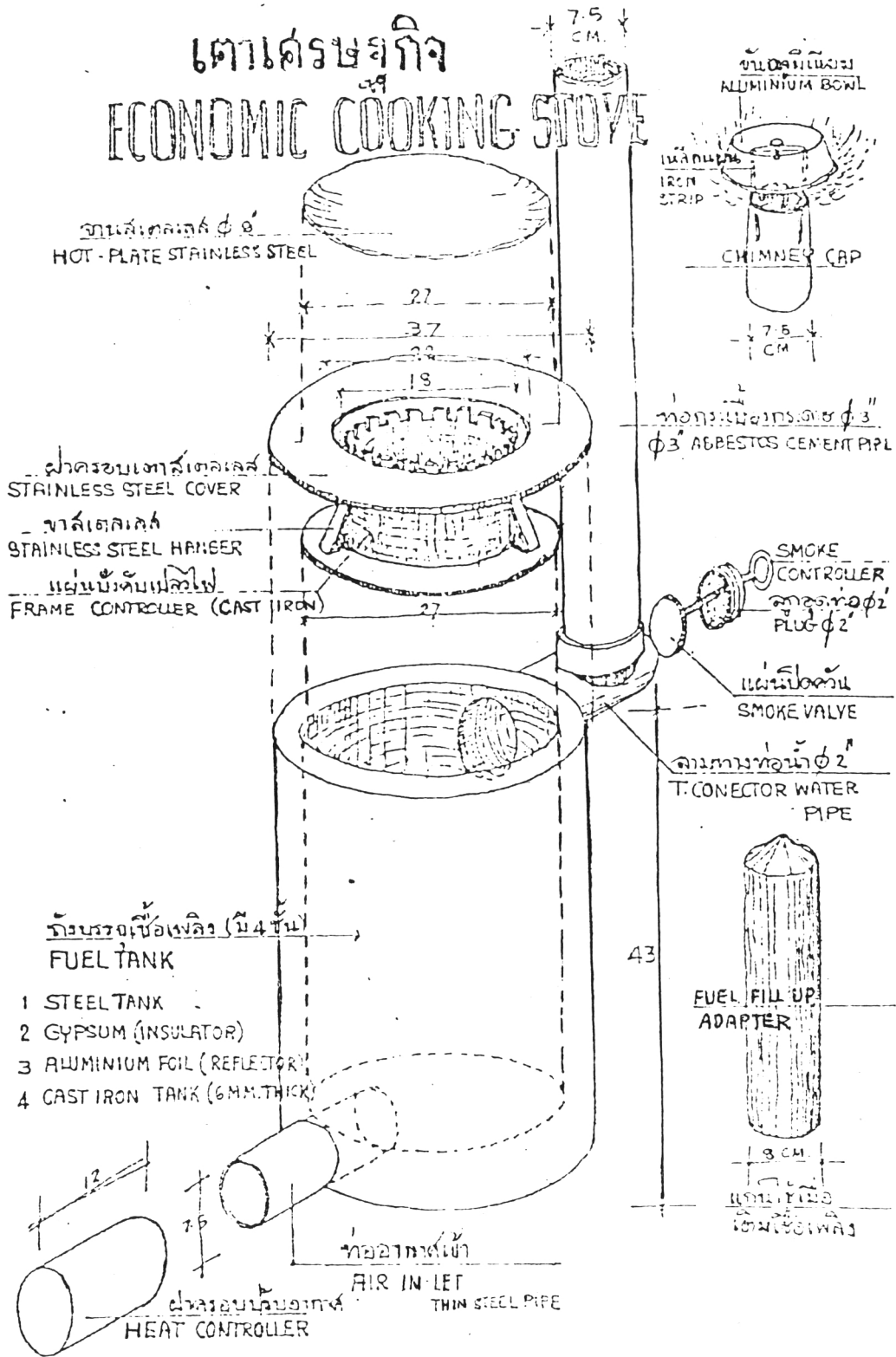
2.2 การเผาไหม้ของ เชื้อเพลิงในเตาเผาแบบห้องเผาไหม้ 2 ห้อง



รูปที่ 2.1 เตาของนายหล้า คืออำมาตย์



รูปที่ 2.2 เตาหุงต้มระดับหมู่บ้านของนายสุขสันต์ สุทธิผลไพบูลย์

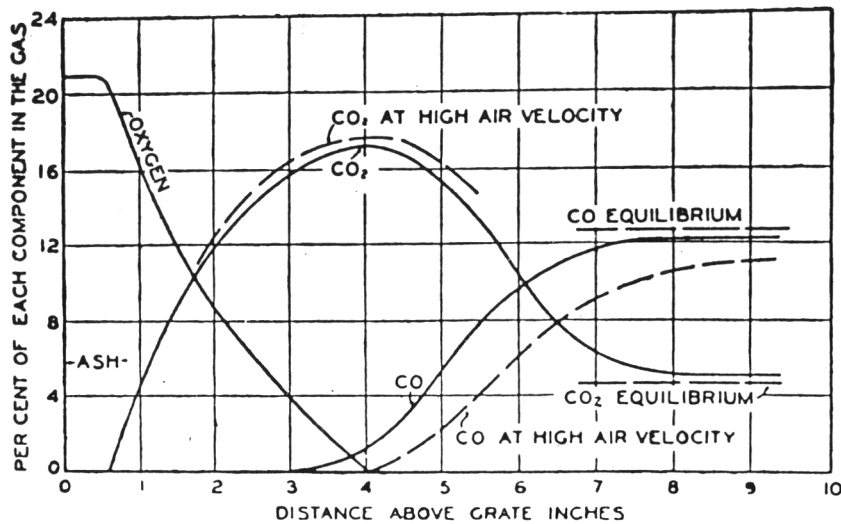


รูปที่ 2.3 เตาของนายน้อย พลายภู

2.2.1 การเผาไหม้ของ เชื้อเพลิงบนตะแกรง เหล็ก

เชื้อเพลิงมีชั้นของ เถ้า เป็นชั้นบาง ๆ ปริมาณของ เถ้าขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของแร่ธาตุ และเวลาที่เผาไหม้ อากาศที่เข้าตอนแรกจะผ่านชั้นมาระหว่างร่องของตะแกรง ผ่านทะลุชั้นของ เถ้า เข้าไปสัมผัสกับถ่านที่คุ้แดงอยู่

ลำดับเหตุการณ์ต่าง ๆ อธิบายได้ตามรูป 2.4 ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการศึกษาของ H.Kreisinger, F.K. Ovitz และ C.E. Augustine (12,13)

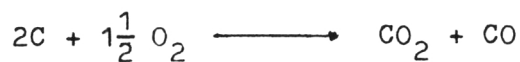


รูปที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบของ ก๊าซในเตาเผาเชื้อเพลิงแข็ง

จากรูปจะเห็นว่า ในขณะที่อากาศเข้าสัมผัสกับเชื้อเพลิง ออกซิเจนอิสระจะค่อย ๆ หดหายไป ขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น กราฟของออกซิเจนที่หายไป จะเป็นส่วนกลับกับกราฟของการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นั่นคือผลของการเกิดการเผาไหม้ในชั้นแรก คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะไม่เกิดขึ้นในช่วงระยะประมาณ 3 นิ้วเหนือผิวตะแกรง แต่จะเริ่มเกิดขึ้นขณะที่ออกซิเจนอิสระมีอยู่ไม่มากกว่าร้อยละ 3 หรือขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง การเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในตอนแรกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และช้าลงเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยลง การเพิ่มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะอยู่ในขอบ

เขตที่ขึ้นอยู่กับสมมูลของปฏิกิริยา $C + CO_2 \rightleftharpoons 2CO$ ถ้าอุณหภูมิของเชื้อเพลิงสูงขึ้นและเวลาการสัมผัสระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับถ่านที่คุ้แรงแมกขึ้น ปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ก็จะมากขึ้น ดังนั้นการจะไหม้เตกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไม่มีก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ โดยการให้ความสูงจากตะแกรงถึงผิวบนของเตาไม่สูงมากนัก คือ จำกัดระยะเวลาการสัมผัสระหว่างก๊าซกับถ่านคุ้แคง สำหรับผลของการเพิ่มอัตราการผ่านอากาศแสดงเป็นกราฟเส้นปะ จะเห็นว่าจุดสูงสุดของการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราการให้อากาศ และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ก็จะเกิดขึ้นที่ระยะสูง จากตะแกรงมากขึ้นเช่นกัน ในทำนองเดียวกันถ้าลดอัตราการให้อากาศ ก็จะมีผลให้จุดสูงสุดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นต่ำลงกว่าเดิม และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้น ก็จะเกิดขึ้นที่ระยะใกล้ผิวตะแกรงมากขึ้น จึงอาจสรุปได้ว่า แนวโน้มที่ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์จะเกิดได้มากเป็นผลจากอุณหภูมิการเผาไหม้สูง ซึ่งก็เนื่องมาจากอัตราการเผาไหม้สูง

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่าที่ระยะห่างจากตะแกรง 6 นิ้ว ก๊าซที่เกิดขึ้นประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10 และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ร้อยละ 10 นั่นคือครึ่งหนึ่งของถ่านจะถูกเผาอย่างสมบูรณ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอีกครึ่งหนึ่งจะถูกเผาไหม้บางส่วนเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ คือ



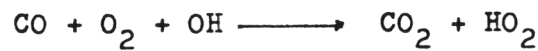
กล่าวคือ 3 ใน 4 ของอากาศที่ต้องการในการเผาไหม้ถ่านให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างสมบูรณ์ จะได้จาก การผ่านอากาศเข้าใต้ตะแกรงในตอนแรก (primary air) เหลือ 1 ใน 4 ของอากาศที่จะใช้ในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์จะได้จากการให้อากาศที่เหนือเชื้อเพลิง (secondary air) ซึ่งสรุปได้ดังนี้

อากาศที่ให้	จุดที่ให้	สิ่งที่มีผลเกี่ยวข้อง
ตอนแรก	ใต้กองเชื้อเพลิง	ความจุของเตาและปริมาณของเชื้อเพลิงที่เผาไหม้ต่อชั่วโมง
ตอนที่ 2	เหนือเชื้อเพลิง	ประสิทธิภาพของการเผาไหม้

2.2.2 การเผาไหม้ขั้นตอนที่ 2

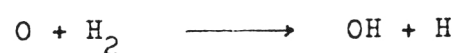
การเผาไหม้ในช่วงนี้ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นจะต้องให้อากาศมากพอที่จะให้ออกซิเจนเพียงพอในการเผาไหม้คาร์บอนให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด และก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมดให้เป็นไอน้ำ

การเผาไหม้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (17, 18) ซึ่งประกอบด้วย 4 ขั้นตอนคือ

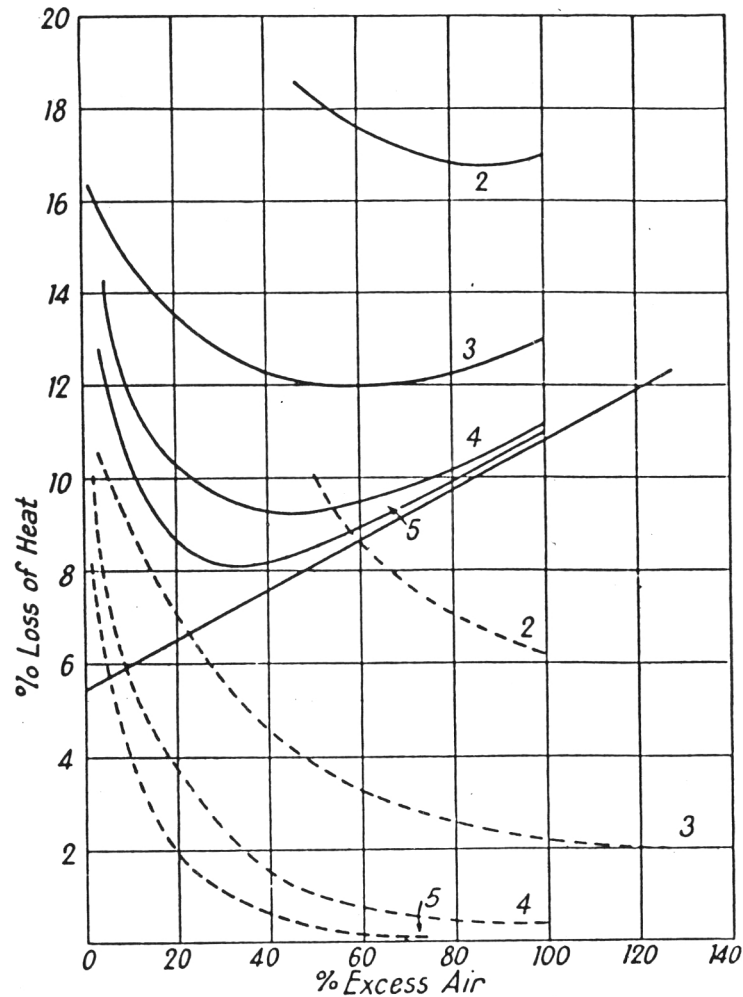


แม้ว่าปฏิกิริยาเหล่านี้จะเกิดขึ้นเร็วมาก แต่ก็จะไม่เกิดขึ้นทันทีทันใด จะต้องใช้เวลาเพียงพอเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ ถ้าปริมาณของออกซิเจนมากเนื่องจากการให้อากาศที่มากเพียงพอ จะทำให้ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์เข้าสัมผัสกับออกซิเจน และอนุภาคของไฮโดรเจนได้มากขึ้น ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องให้ออกซิเจนมากเกินพอ จึงจะมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ นั่นคือ ปริมาณความร้อนที่สูญเสียไปเนื่องจากให้อากาศที่มากเกินพอก็จะมากขึ้นด้วย

สำหรับการเผาไหม้ไฮโดรเจน เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (17) ขั้นตอนที่สำคัญคือ



ถ้าอัตราส่วนของห้องเผาไหม้ต่อพื้นที่ตะแกรงมีค่าคงที่ และปริมาณเชื้อเพลิงแน่นอน อัตราการเผาไหม้ให้สมบูรณ์จะขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศที่ไหลมากเกินพอ และสามารถหาปริมาณอากาศที่เหมาะสม



รูปที่ 2.5 แสดงถึงผลของอากาศที่มากเกินไปต่อการสูญเสียความร้อนในเตาเผา (5)

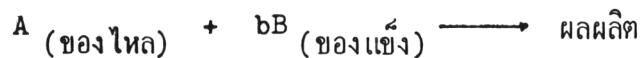
กราฟเส้นตรงชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มของปริมาณความร้อนที่สูญเสียจากอากาศโดยเพิ่มจากอุณหภูมิบรรยากาศไปยังอุณหภูมิของไอน้ำในเตาเผา และกราฟเส้นประแสดงถึงปริมาณความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ (undeveloped heat) สำหรับกราฟเส้นโค้งที่บ่งแทนผลรวมของความร้อนที่สูญเสียเนื่องจากความร้อนสัมผัสของก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้และความร้อนเนื่องจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ตัวเลขที่กำกับบนเส้นคืออัตราส่วนของปริมาตรของห้องเผาไหม้กับพื้นที่ตะแกรง (หน่วยเป็นฟุต)

เพื่อทำให้การสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ความร้อนที่สูญเสียก็เนื่องจากการ เผาไหม้ไม่สมบูรณ์และ ความร้อนสัมผัส (sensible heat) ของก๊าซที่เผาไหม้ (5) พิจารณาจากรูปที่ 2.5 ได้ดังนี้

1. ถ้าให้อุณหภูมิของก๊าซคงที่ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากความร้อนสัมผัสของก๊าซจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักของก๊าซ และปริมาณของอากาศส่วนเกิน
2. ปริมาณของความร้อนเนื่องจากการ เผาไหม้ไม่สมบูรณ์จะลดลง ขณะที่ปริมาณของอากาศส่วนเกินเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำให้ผลรวมของความร้อนที่จะสูญเสียไปน้อยลง

2.3 แบบจำลอง (Model)

ปฏิกิริยาของการ เผาไหม้เป็นแบบปฏิกิริยาที่สาร เริ่มต้นอยู่ในสถานะต่างกัน (heterogeneous reaction) โดยเชื้อเพลิงแข็งทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนให้ผลเป็นก๊าซต่าง ๆ ดังนี้

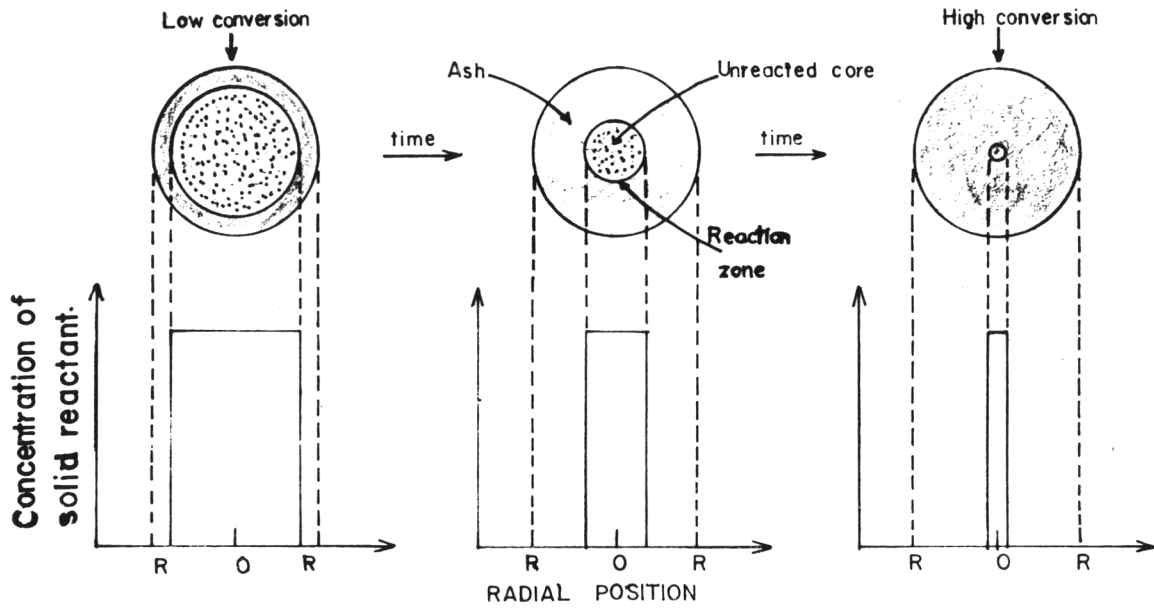


พิจารณาการ เผาไหม้เป็นแบบจำลองของแกนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา

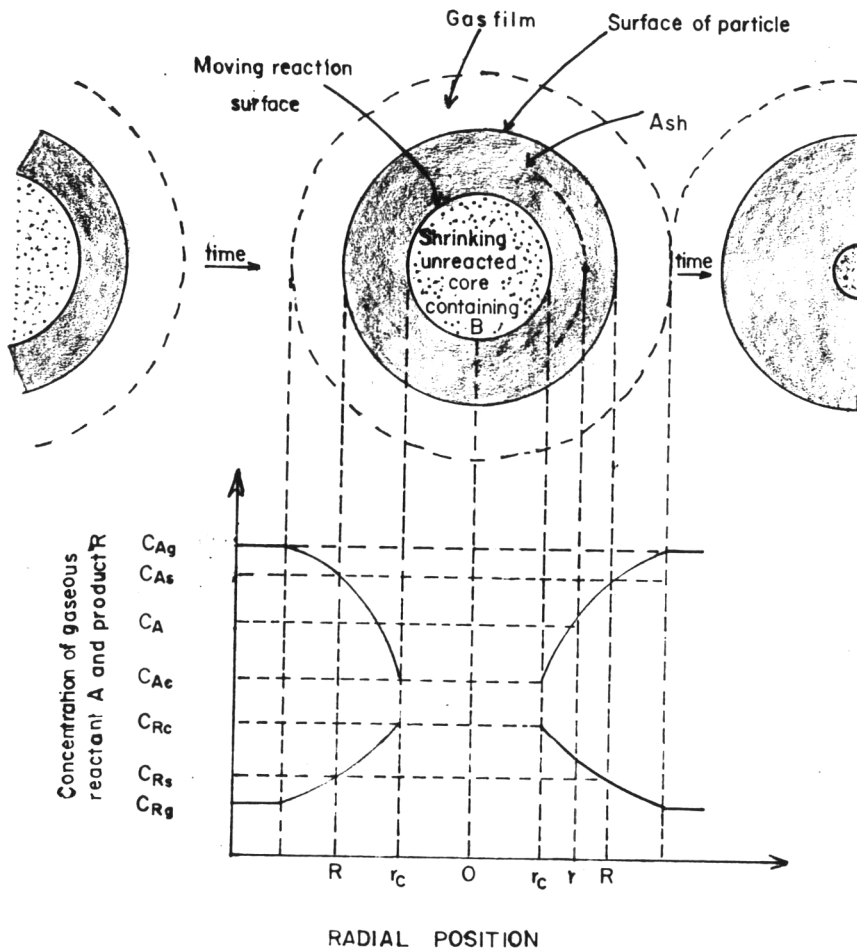
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นตอนแรกที่ผิวหน้าของ เชื้อเพลิง ก่อน จากนั้นบริเวณของปฏิกิริยาจะค่อย ๆ เคลื่อนเข้าไปโดยจะเหลือส่วนที่เกิดจากการ เผาไหม้ไว้และเป็นสาร เหนื่อย คือ ซี้เต่า ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป ส่วนใจกลางของ เชื้อเพลิงที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาจะลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ปฏิกิริยาการ เผาไหม้ดำเนินไป จนเผาไหม้หมดทั้งก้อน

แบบจำลองนี้ Yagi และ Kunii (30) ได้คิดขึ้น โดยพิจารณาขบวนการที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเป็น 3 ขั้นตอน ตามรูปที่ 2.7

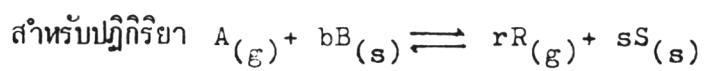
- | | |
|--------------|--|
| ขั้นตอนที่ 1 | ก๊าซ A จะแพร่ผ่านชั้นบรรยากาศ เข้าไปที่ผิวของ เชื้อเพลิง แข็ง B |
| ขั้นตอนที่ 2 | ก๊าซ A จะซึมผ่านชั้นของซี้เต่าที่หมักอยู่เข้าไปในส่วนแกนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา |
| ขั้นตอนที่ 3 | ก๊าซ A เข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อเพลิง แข็ง B |



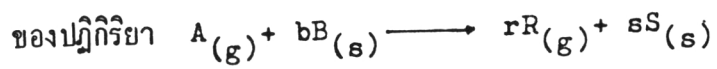
รูปที่ 2.6 แบบจำลองที่แกนยังไม่เกิดปฏิกิริยา



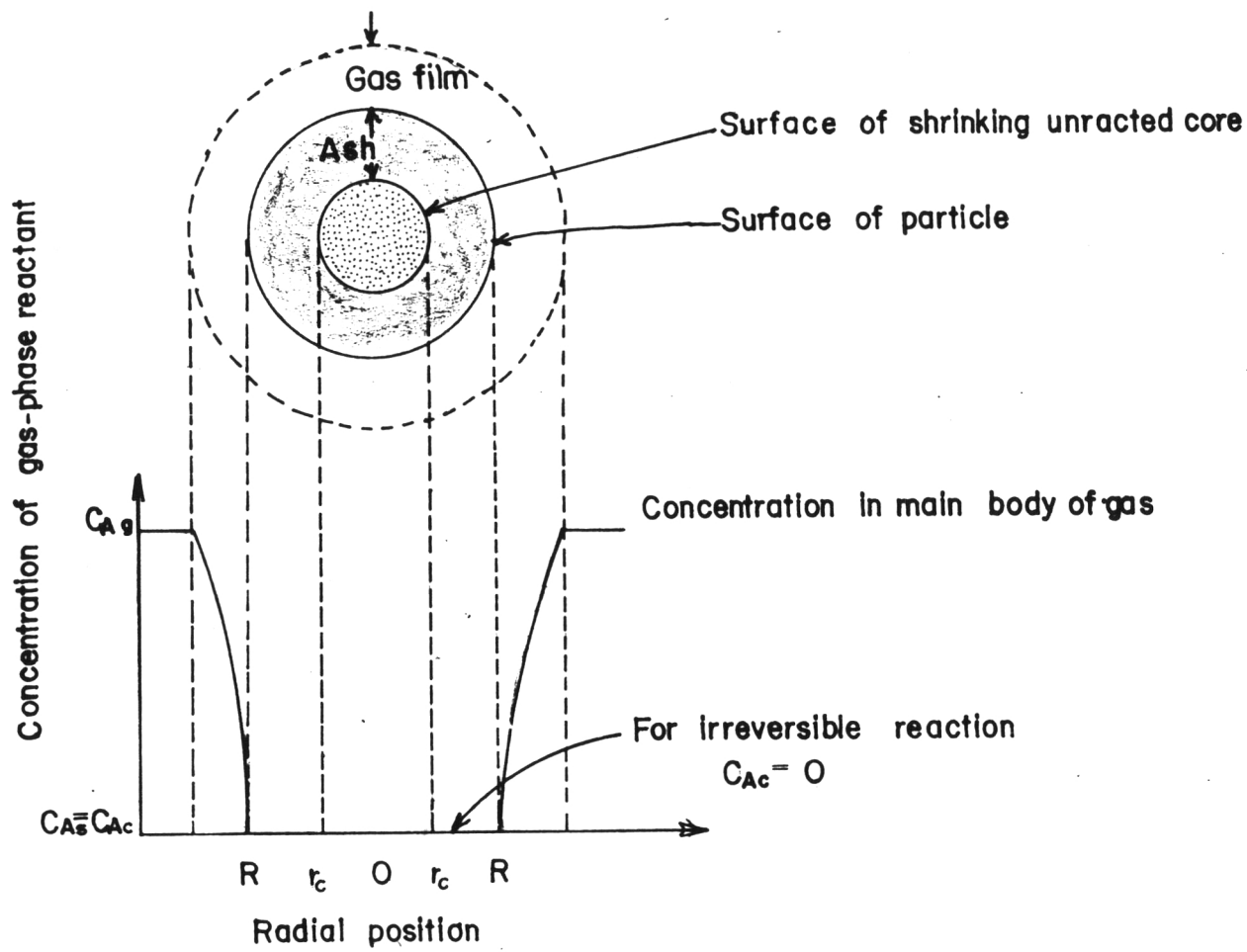
รูปที่ 2.7 แสดงถึงความเข้มข้นของ เชื้อเพลิงและผลที่เกิดขึ้น



พิจารณาแต่ละขั้นตอน เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา (rate controlling step)



2.3.1 พิจารณาขั้นตอนที่แพร่ผ่านชั้นก๊าซเป็นขั้นตอนควบคุม



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของเชื้อเพลิงเมื่อแพร่ผ่านชั้นของก๊าซเป็นขั้นตอนควบคุม

ให้ C_{Ag} = ความเข้มข้นของสาร A ที่ผิวของก๊าซฟิล์ม (โมล/เมตร³)

C_{As} = ความเข้มข้นของสาร A ที่ผิวของของแข็ง (โมล/เมตร³)

จากรูป 2.8 จะเห็นว่า concentration driving force = $C_{Ag} - C_{As}$ = ค่าคงที่ตลอดเวลา

ให้ s_{ex} = ผิวนอกที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของอนุภาค (unchanging exterior of a particle)

จากสมการจะได้ว่า $dN_B = b dN_A \dots \dots \dots (1)$

$$-\frac{1}{S_{ex}} \frac{dN_B}{dt} = -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{dN_B}{dt} = -\frac{b}{4\pi R^2} \frac{dN_A}{dt} = bk_g (C_{Ag} - C_{As})$$

$$\therefore -\frac{1}{4\pi R^2} \frac{dN_B}{dt} = bk_g C_{Ag} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ให้ ρ_B = ความหนาแน่นของของแข็ง B

V = ปริมาตรของอนุภาค

$$N_B = \rho_B V = \frac{\text{moles B}}{m^3 \text{solid}} (m^3 \text{solid})$$

$$-dN_B = -bdN_A = -\rho_B dV = -\rho_B d\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3\right)$$

$$\therefore -dN_B = -4\pi \rho_B r_c^2 dr_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

แทนสมการ 3 ในสมการ 2 จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในรูปของรัศมีของส่วนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา

$$-\frac{\rho_B r_c^2}{R^2} \frac{dr_c}{dt} = bk_g C_{Ag} \quad \dots\dots\dots (4)$$

k_g = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient)
ระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็ง

สมการ 4 ข้าย่างและอินทิเกรต (integrate) จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดของแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยากับเวลา

$$-\frac{\rho_B}{R^2} \int_R^{r_c} r_c^2 dr_c = bk_g C_{Ag} \int_0^t dt$$

$$t = \frac{\rho_B R}{3bk_g C_{Ag}} \left[1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ถ้าให้ τ = เวลาที่เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์

และ $r_c = 0$

$$\tau = \frac{\rho_B R}{3bk_g C_{Ag}} \dots\dots\dots (6)$$

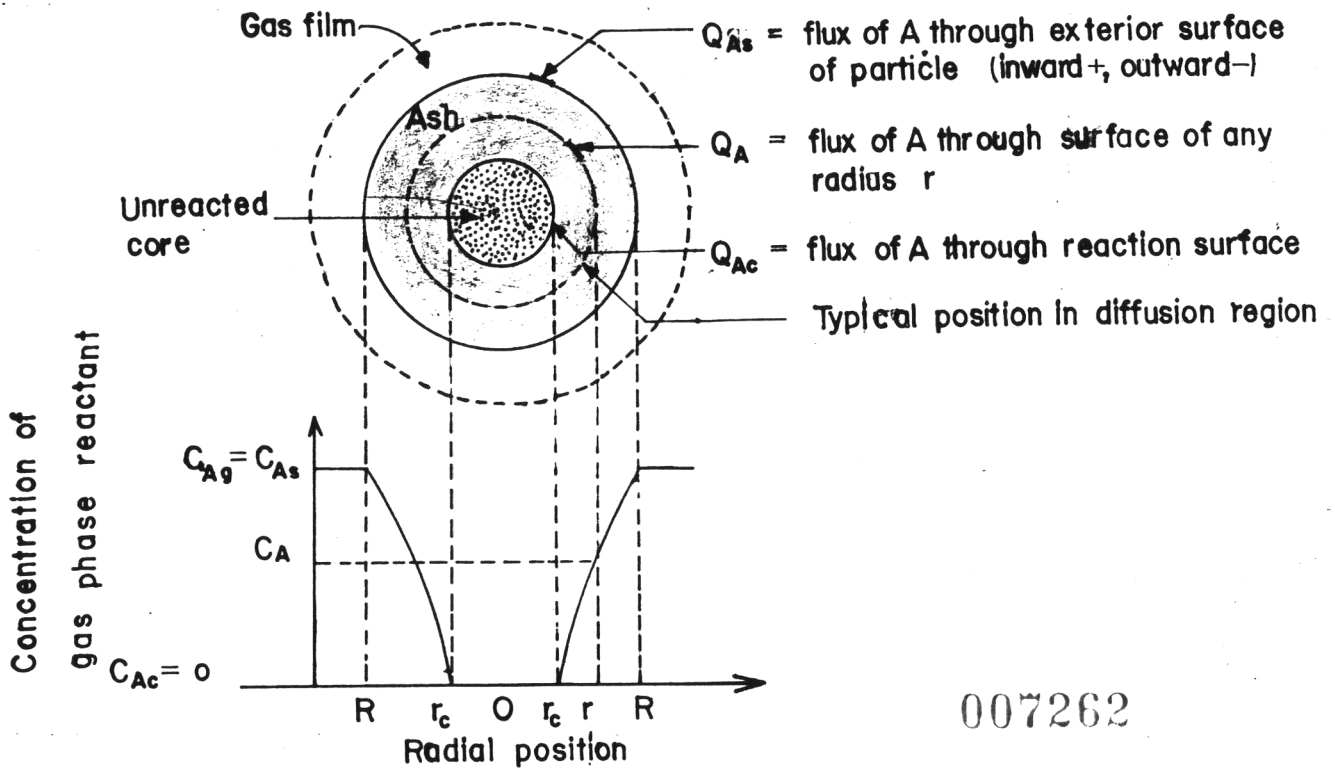
สมการ 5 ทารด้วยสมการ 6 จะได้ $\frac{t}{\tau} = 1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^3$

$$1 - x_B = \frac{\text{ปริมาตรของแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา}}{\text{ปริมาตรของอนุภาคทั้งหมด}} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_c^3}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \left(\frac{r_c}{R}\right)^3$$

$$\frac{t}{\tau} = 1 - \left(\frac{r_c}{R}\right)^3 = x_B \dots\dots\dots (7)$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เวลาในการ เกิดปฏิกิริยา รัศมีของอนุภาคและการ เปลี่ยนแปลง

2.3.2 พิจารณาระดับตอนที่ก๊าซซึมผ่านชั้นของ เถ้า เป็นชั้นตอนควบคุม



007262

รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของ เชื้อเพลิง เมื่อการซึมผ่านของ ก๊าซผ่าน ชั้นของ เถ้า เป็นชั้นตอนควบคุม

จากรูปที่ 2.9 ถ้าพิจารณาว่าความต้านทานของก๊าซ A ที่ซึมผ่านชั้นเถ้าเป็นช่วงของการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา ทั้งสาร A และสิ่งรอบ ๆ ของส่วนแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาจะเคลื่อนเข้าสู่ศูนย์กลางของอนุภาค แต่การลดลงของส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาจะช้ากว่าอัตราการไหลของ A ที่เข้าไปในส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาดัง 1000 เท่า ซึ่งเป็นอัตราส่วนอย่างคร่าว ๆ ของความหนาแน่นของแข็งกับก๊าซ ดังนั้นจึงสมมติได้ว่า ส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยานั้นคงที่ตลอดเวลาที่พิจารณาความแตกต่างของปริมาณของก๊าซในชั้นของ เถ้า

ที่สภาวะคงที่ จะได้ว่า

$$-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 Q_A = 4\pi R^2 Q_{As} = 4\pi r_c^2 Q_{Ac} = \text{คงที่} \dots\dots (8)$$

จาก Fick's Law; $Q_A = D_e \frac{dC_A}{dr} \dots\dots (9)$

$Q_A =$ อัตราการไหลผ่านของสาร A ต่อหน่วยพื้นที่ (flux of A mol/m²sec)

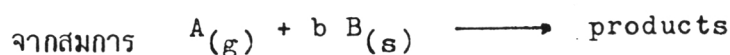
$D_e =$ สัมประสิทธิ์ประสิทธิผลการแพร่ของก๊าซในชั้นของ เถ้า (effective diffusion coefficient of gaseous reactant in the ash layer)

จากสมการที่ 8 และ 9 จะได้ $-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 D_e \frac{dC_A}{dr} = \text{คงที่} \dots\dots (10)$

อินทิเกรตสมการ 10 จาก R ถึง r_c

$$-\frac{dN_A}{dt} \int_R^{r_c} \frac{dr}{r^2} = 4\pi D_e \int_{C_{Ag} = C_{As}}^{C_{Ac} = 0} dC_A$$

หรือ $-\frac{dN_A}{dt} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right) = 4\pi D_e C_{Ag} \dots\dots (11)$



$$\begin{aligned} \text{จากสมการ 3, } -dN_B &= -b dN_A = -4\pi\rho_B r_c^2 dr_c \\ dN_A &= \frac{4\pi\rho_B r_c^2 dr_c}{b} \end{aligned}$$

แทน dN_A ในสมการ 11 และอินทิเกรตจะได้

$$\begin{aligned} -\rho_B \int_{r_c=R}^{r_c} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right) r_c^2 dr_c &= b \mathcal{D}_e C_{Ag} \int_0^t dt \\ t &= \frac{\rho_B R^2}{6b\mathcal{D}_e C_{Ag}} \left[1 - 3\left(\frac{r_c}{R}\right)^2 + 2\left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \right] \dots\dots (12) \end{aligned}$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอนุภาคทั้งหมด คือ $r_c = 0$ จะได้

$$\tau = \frac{\rho_B R^2}{6b\mathcal{D}_e C_{Ag}} \dots\dots (13)$$

$$\text{จากสมการ 12, 13 จะได้ } \frac{t}{\tau} = 1 - 3\left(\frac{r_c}{R}\right)^2 + 2\left(\frac{r_c}{R}\right)^3 \dots\dots (14)$$

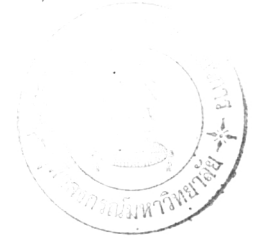
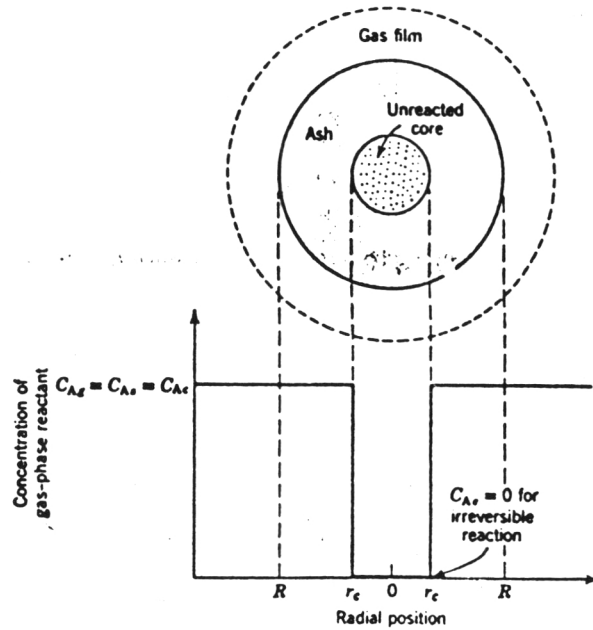
$$\frac{t}{\tau} = 1 - 3(1 - X_B)^{2/3} + 2(1 - X_B) \dots\dots (15)$$

2.3.3 พิจารณารายงานขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเป็นขั้นตอนควบคุม

$$\text{จากรูปที่ 2.10 } dN_B = b dN_A$$

$$-dN_B = -b dN_A = -\rho_B dV = -\rho_B d\left(\frac{4}{3}\pi r_c^3\right) = -4\pi\rho_B r_c^2 dr_c$$

พิจารณาความแตกต่างของปริมาณของอนุภาค เมื่อปฏิกิริยาทางเคมีเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากการเกิดขึ้นของเถ้าไม่ได้มีผลกระทบบถึงความก้าวหน้าของการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.10 แสดง การ เกิดปฏิกิริยาของอนุภาคเมื่อช่วง การ เกิดปฏิกิริยา เป็นขั้นตอนควบคุม

ปริมาณของสารที่ทำปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผิวของแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นเมื่อพิจารณาบนพื้นฐานของผิวของแกนกลางที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยา จะได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาคือ

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \frac{dN_B}{dt} = -\frac{b}{4\pi r_c^2} \frac{dN_A}{dt} = bk_s C_{Ag}$$

k_s = ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับปฏิกิริยาที่ผิว (first-order rate constant for the surface reaction)

เขียน N_B ให้อยู่ในเทอมของรัศมีที่เกิดปฏิกิริยาเข้าไปเรื่อย ๆ จะได้

$$-\frac{1}{4\pi r_c^2} \rho_B 4\pi r_c^2 \frac{dr_c}{dt} = -\rho_B \frac{dr_c}{dt} = bk_s C_{Ag}$$

อินทิเกรต จะได้
$$-\rho_B \int_R^{r_c} dr_c = bk_s C_{Ag} \int_0^t dt$$

$$t = \frac{\rho_B}{bk_s C_{Ag}} (R-r_c) \dots\dots\dots (16)$$

เมื่อ $r_c = 0$;
$$\tau = \frac{\rho_B R}{bk_s C_{Ag}} \dots\dots\dots (17)$$

จากสมการ 16 และ 17 จะได้
$$\frac{t}{\tau} = \frac{1-r_c}{R} = 1 - (1-x_B)^{1/3} \dots\dots\dots (18)$$

2.3.4 ผลรวมของความต้านทานการเกิดปฏิกิริยา (30,22,28)

จากที่กล่าวมาในหัวข้อ 2.3.1, 2.3.2, และ 2.3.3 แต่ละขั้นตอนเป็นการควบคุมความต้านทานแบบเดี่ยว ๆ แต่ในความเป็นจริงทั้ง 3 ขั้นตอนต่างก็มีความสำคัญต่อเนื่อกัน กล่าวคือในขณะที่ปฏิกิริยาเริ่มเกิดขึ้น ชั้นของ เถ้ายังไม่มีความต้านทานเนื่องจากเถ้ายังไม่มากนัก แต่เมื่อเวลาผ่านไปชั้นของ เถ้ามากขึ้นเรื่อย ๆ และแกนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาก็ลดลง ในขณะที่ความต้านทานเนื่องจากฟิล์มของชั้นเถ้าไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงไม่ควรคิดความต้านทานช่วงหนึ่ง ช่วงใด รวมสมการ (5) (12) (16) คือ

$$t_{total} = t_{film\ alone} + t_{ash\ alone} + t_{reaction\ alone}$$

หรือสำหรับการ เปลี่ยนแปลงที่สมบูรณ์

$$\tau_{total} = \tau_{film\ alone} + \tau_{ash\ alone} + \tau_{reaction\ alone}$$

นั่นคือ
$$-\frac{1}{s_{ex}} \frac{dN_B}{dt} = \frac{b C_A}{\frac{1}{k_g} + \frac{R(R-r_c)}{r_c D_e} + \frac{R^2}{r_c^2 k_s}}$$

หรือ

$$-\frac{dr_c}{dt} = \frac{bc_A / \rho_B}{\frac{r_c^2}{R^2 k_g} + \frac{(R-r_c)r_c}{R D_e} + \frac{1}{k_s}}$$

อย่างไรก็ตามจากจลนศาสตร์และขั้นตอนการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาระหว่างของไหลและของแข็ง การเปลี่ยนแปลงนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผาไหม้ ขนาดของอนุภาคและเวลาในการเผาไหม้ (7,8,27)

2.3.4.1 พิจารณาเกี่ยวกับอุณหภูมิ

สำหรับปฏิกิริยาทางเคมีนั้นอุณหภูมิจะมีผลมากกว่าขั้นตอนทางฟิสิกส์ การทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันจะสามารถเห็นถึงความแตกต่างของความต้านทานที่ขั้นตอนต่าง ๆ นั้นคือ ขั้นตอนการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาเคมีมากกว่าขั้นตอนอื่น ๆ

2.3.4.2 พิจารณาเกี่ยวกับขนาดของอนุภาค

จากสมการ 5, 12 และ 16 แสดงให้เห็นว่าเวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาจะแตกต่างกันเมื่อมีขนาดของอนุภาคต่างกัน คือ

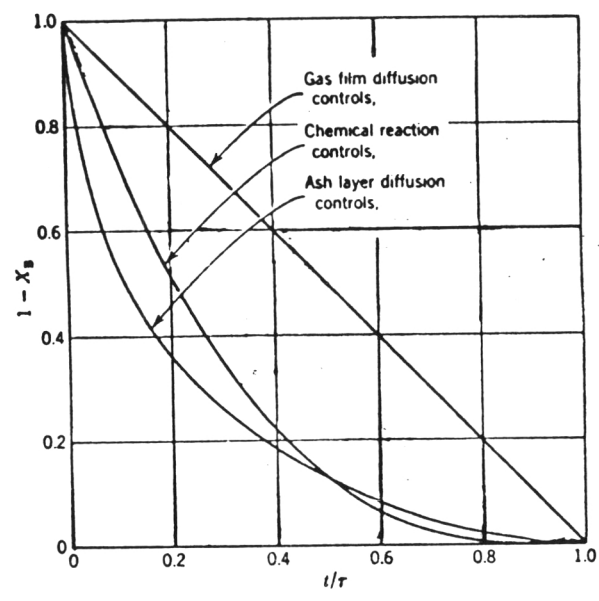
$$t \propto R^{1.5-2} \quad \text{สำหรับการควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นก๊าซ}$$

$$t \propto R^2 \quad \text{สำหรับการควบคุมโดยขั้นตอนการซึมผ่านชั้นของเถ้า}$$

$$t \propto R \quad \text{สำหรับการควบคุมโดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาเคมี}$$

2.3.4.3 พิจารณาเกี่ยวกับเวลา

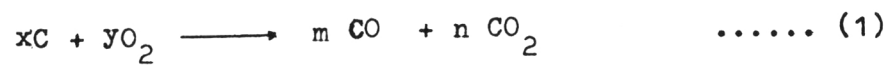
พิจารณารูปที่ 2.11 จะเห็นว่าปฏิกิริยาที่ดำเนินไปเมื่อควบคุมโดยขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของก๊าซและชั้นของเถ้า สามารถชี้ให้เห็นถึงขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้ จากการเปรียบเทียบกัน ในความแตกต่างระหว่างการแพร่ผ่านชั้นของเถ้าและการเกิดปฏิกิริยาจะไม่ต่างกันมากนัก แต่อาจจะพิจารณาอีกส่วนหนึ่งจากข้อมูลการทดลอง



รูปที่ 2.11 แสดงความก้าวหน้าของปฏิกิริยาของอนุภาคโดยของไหลที่อยู่รอบ ๆ วัคนิยมของ เวลาสำหรับการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์

2.4 การเผาไหม้ของถ่านไม้ (29)

ปฏิกิริยาเริ่มแรกในการเผาไหม้ คือ

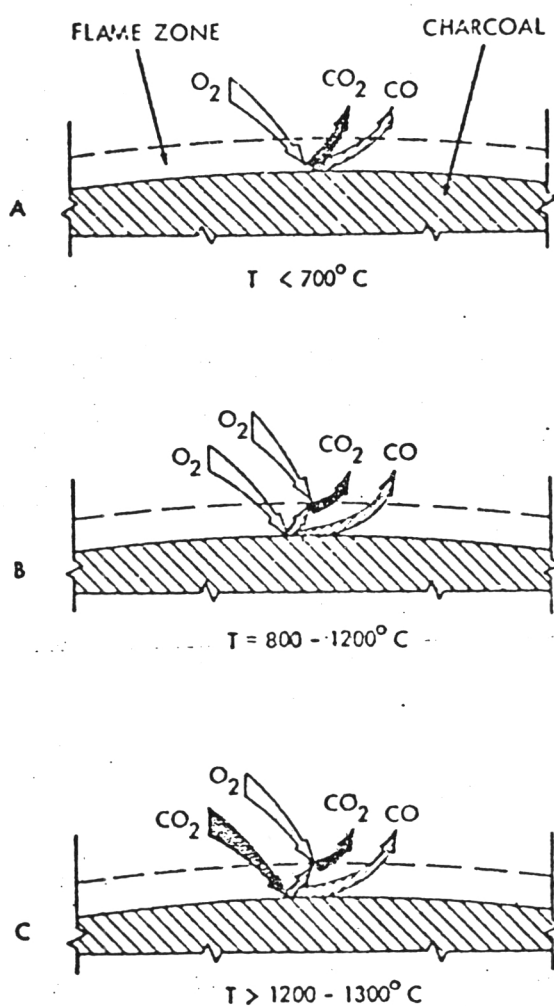


ผลของคาร์บอนมอนนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ ขึ้นอยู่กับปริมาณเริ่มต้นของคาร์บอน ออกซิเจนและอุณหภูมิ สำหรับปฏิกิริยาช่วงที่ 2 ที่จะให้ได้ผลสุดท้ายคือ



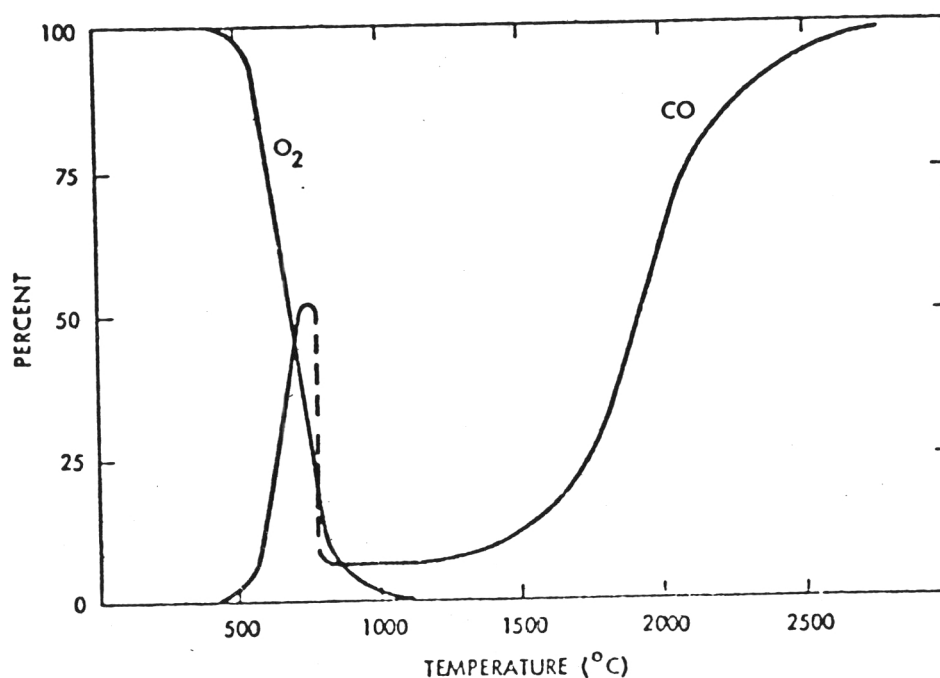
Khitrin (11) ได้อธิบายขบวนการเผาไหม้ตามรูปที่ 2.12 โดยความเร็วของอากาศที่ผ่านผิวของเชื้อเพลิงอยู่ในช่วงปานกลาง พบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 700 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่ (1) จะเด่นมาก ออกซิเจนจะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนให้คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนนอกไซด์ ดังแสดงในรูป A สำหรับช่วงอุณหภูมิการเผาไหม้ของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (800-1200 องศาเซลเซียส)

เซียส) คาร์บอนมอนนอกไซด์บางส่วนจะเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ไคกาซคาร์บอนไดออกไซด์
 คังรูป B ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก (ประมาณ 1200-1300 องศาเซลเซียส) ไคกาซคาร์บอนไดออก
 ซิดสามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่ผิวกลายเป็นไคกาซคาร์บอนมอนนอกไซด์ตามสมการ 3 ผลสุดท้าย
 ที่ไคตามอุณหภูมิในรูป C จะขึ้นอยู่กับปริมาณของออกซิเจนและคาร์บอนที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.12 แสดงความสำคัญของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการเผาไหม้ที่ผิวของถ่าน
 ในสภาวะการไหลของอากาศปานกลาง

การอธิบายการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ภาพประกอบแบบอื่นคือ แผนกราฟในรูปที่ 2.13 ความเข้มข้นที่ผิวของก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์และออกซิเจนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (11) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของออกซิเจนจะเริ่มลดลง คาร์บอนมอนนอกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ 750 องศาเซลเซียส คาร์บอนมอนนอกไซด์จะเกิดการสั่นคาบต่อไป และความเข้มข้นจะลดลงจนถึงจุดน้อยที่สุด ที่ประมาณ 1200 องศาเซลเซียส ออกซิเจนทั้งหมดจะถูกใช้หมดก่อนที่จะถึงผิวถ่าน ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเข้าทำปฏิกิริยากับคาร์บอนตามสมการที่ 3 กราฟของคาร์บอนมอนนอกไซด์จะเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.13 แสดง การ เปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของ ก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนมอนนอกไซด์ สำหรับสภาวะการไหลของอากาศปานกลาง

2.5 ทฤษฎีการสันดาปและทฤษฎีกระแสน้ำอากาศ

2.5.1 การสันดาป

เป็นปฏิกิริยาการรวมตัวของ เชื้อเพลิง กับออกซิเจนอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเกิดแสงและการคายความร้อน การสันดาปเป็นปฏิกิริยาที่ผิวของ เชื้อเพลิง ดังนั้นการเพิ่มเนื้อที่ผิวของเชื้อเพลิง เช่น ย่อยเชื้อเพลิงให้มีขนาดเล็กลง จะทำให้อัตราการสันดาปเร็วขึ้น อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการสันดาปจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่างคือ

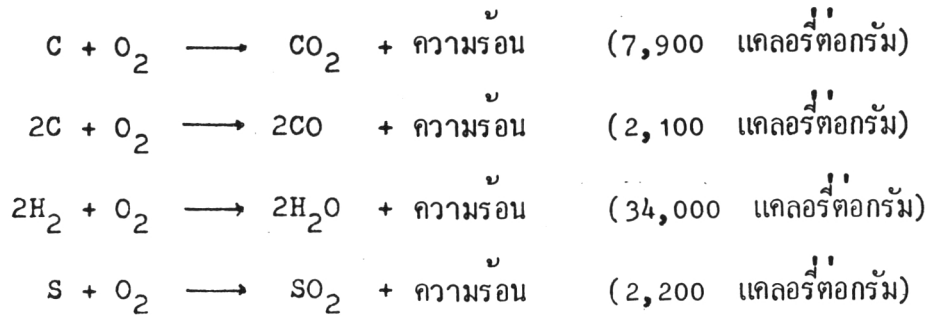
1. เวลา จะต้องนานพอที่เชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนในอากาศ
2. อุณหภูมิ จะต้องสูงพอหรือสูงถึง จุดติดไฟของ เชื้อเพลิง จึงทำให้เกิดการสันดาป
3. กระแสน้ำอากาศปั่นป่วน (Turbulence) เป็นสภาวะที่ต้องการ เพื่อให้การผสมระหว่าง เชื้อเพลิงกับอากาศ เป็นไปอย่างทั่วถึง ทำให้มีปริมาณออกซิเจนในอากาศ เหลือเพื่อที่จะทำให้การสันดาปเป็นไปอย่างสมบูรณ์

2.5.1.1 ออกซิเจนในอากาศ

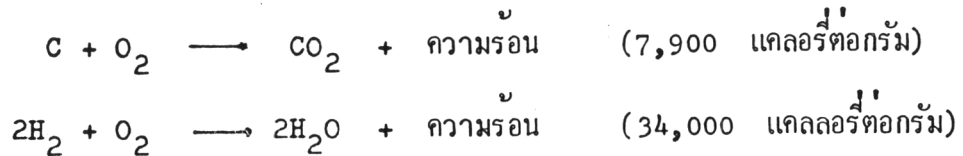
ในบรรยากาศมีออกซิเจนและไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนก๊าซอื่น ๆ มีปะปนอยู่น้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ออกซิเจนมีอยู่ในบรรยากาศประมาณร้อยละ 21.0 โดยปริมาตรหรือ ร้อยละ 23.2 โดยน้ำหนัก ส่วนที่เหลือเป็นไนโตรเจน ซึ่งเป็นตัวทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศเจือจางลงมีประมาณร้อยละ 78.0 โดยปริมาตร ออกซิเจนเท่านั้นที่มีความสำคัญต่อการสันดาปของ เชื้อเพลิง

2.5.1.2 ปฏิกิริยาเคมี

เชื้อเพลิงแข็งจำพวกถ่านหิน มีโครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนไฮโดรเจนและกำมะถัน เมื่อนำไปเผาไหม้จะเกิดปฏิกิริยาเคมี แสดงโดยสมการดังต่อไปนี้



ส่วนเชื้อเพลิงแข็งอย่างอื่นเช่น ไม้ ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 50-55 ออกซิเจนร้อยละ 40-45 ไฮโดรเจนร้อยละ 6-7 และไนโตรเจนกับซัลเฟอร์เล็กน้อยประมาณร้อยละ 1 ไม้เมื่อเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ รวมทั้งความร้อนซึ่งโดยทั่วไปค่าความร้อนของไม้จะอยู่ระหว่าง 4200-4700 แคลอรีต่อกรัม สมการที่ใช้แสดงการเผาไหม้ของไม้ก็เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงอื่นที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ ดังนี้



2.5.2 กระแสอากาศ

กระแสอากาศหมายถึงทิศทางการไหลของอากาศ เพื่อให้เกิดการสัมผัสกับผิวของเชื้อเพลิง การสันดาปอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นได้เมื่ออากาศสัมผัสกับเชื้อเพลิงในสภาวะและอัตราส่วนที่เหมาะสม กระแสอากาศนอกจากจะมีผลต่อประสิทธิภาพของการสันดาป ยังเป็นตัวนำผลที่ได้จากการสันดาปออกสู่ภายนอกด้วย

ในการควบคุมให้เกิดกระแสอากาศภายในเตาเผามี 2 วิธี คือ

1. วิธีธรรมชาติ

ในการสันดาป สามารถควบคุมให้อากาศไหลไปตามทิศทางที่ต้องการได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์ตามธรรมชาติคือ ความแตกต่างของความหนาแน่น อากาศร้อนมีความหนาแน่นต่ำ จึงมีน้ำหนักเบากว่าอากาศเย็นที่มีปริมาตรเท่ากัน ดังนั้นอากาศร้อนจึงลอยตัวสู่เบื้องบน วิธีง่าย ๆ ที่ทำให้เกิดกระแสอากาศขึ้นตามธรรมชาติคือปล่องไฟ ซึ่งทำงานได้เพราะอากาศร้อน ภายในปล่อง

ไฟมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศเย็นรอบ ๆ ปล่องควัน อากาศในปล่องจึงลอยตัวขึ้นข้างบน ทำให้เกิดแรงดูดภายในปล่องไฟ

2. วิธีกล

การควบคุมให้อากาศไหลออกจากปล่อง โดยใช้พัดลมดูดหรือใช้วิธีกลอื่น ๆ มีข้อดีดังนี้

- ก. การไหลของอากาศเร็วขึ้น
- ข. การสันดาปเร็วขึ้น
- ค. อุณหภูมิในการสันดาปสูงขึ้น ทำให้การสันดาปมีประสิทธิภาพสูง
- ง. ปล่องไฟมีความจำเป็นเพียงเพื่อขจัดควัน
- จ. การควบคุมกระแสอากาศทำได้ง่ายขึ้น

2.6 ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านไม้ (20)

ถ่านไม้ไม่ใช่คาร์บอนแท้ ๆ แต่ประกอบด้วยสารต่าง ๆ คิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักดังนี้

1. คาร์บอน ประมาณร้อยละ 80-90
2. สารที่ระเหยได้ ประมาณร้อยละ 7-30 ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณร้อยละ 9 คาร์บอนมอนนอกไซด์ร้อยละ 20 ไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 64 และไฮโดรคาร์บอนอื่น ๆ ประมาณร้อยละ 7
3. ซี้ไธล์ ประมาณร้อยละ 0.5-10 ซึ่งประกอบด้วย

ส่วนประกอบ	ร้อยละ
SiO_2	15-25
CaO	25-30
MgO	6-7
Al_2O_3	2-4
Fe_2O_3	3-5

ส่วนประกอบ	ร้อยละ
Mn	0.5
Na ₂ O	1-2
K ₂ O	10-15
P (ในรูปของ P ₂ O ₅)	1-3
S	0.05-0.06

เป็นที่น่าสังเกตว่า ถ่านไม่มีกำมะถันน้อยมาก ทำให้ถ่านไม่เหมาะสำหรับใช้งานและป้องกันอากาศเสียมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น

ถ่านมีความถ่วงจำเพาะระหว่าง 0.2-0.5

ความพรุน ร้อยละ 70-75

ความชื้น ร้อยละ 1-16 (เฉลี่ยประมาณร้อยละ 10 ในสภาวะที่ไม่สัมผัสกับน้ำโดยตรง)

จุดติดไฟ 240-250 องศาเซลเซียส

ค่าความร้อนประมาณ 6,000-7,200 แคลอรีต่อกรัม