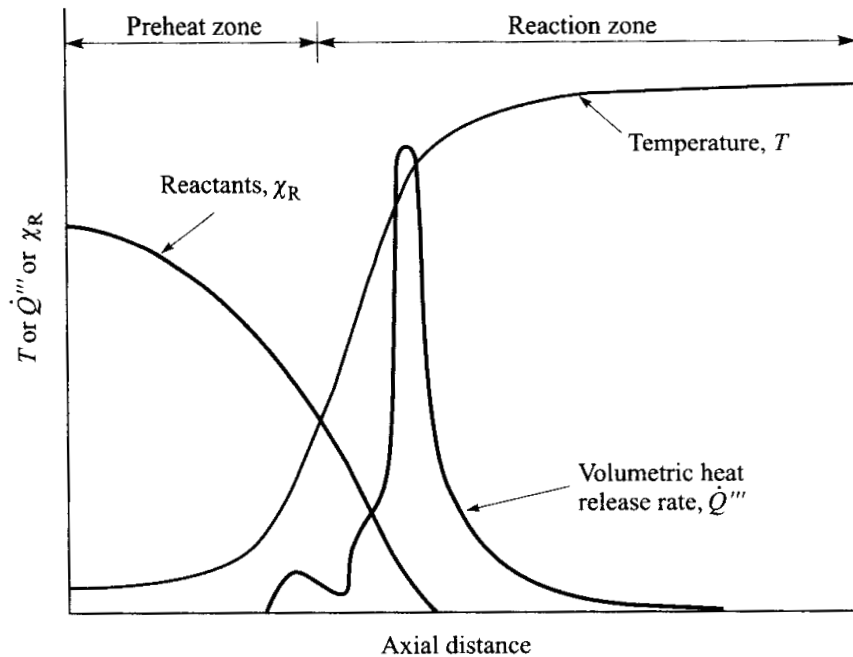


บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี

3.1 การเผาไหม้เปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed flame)

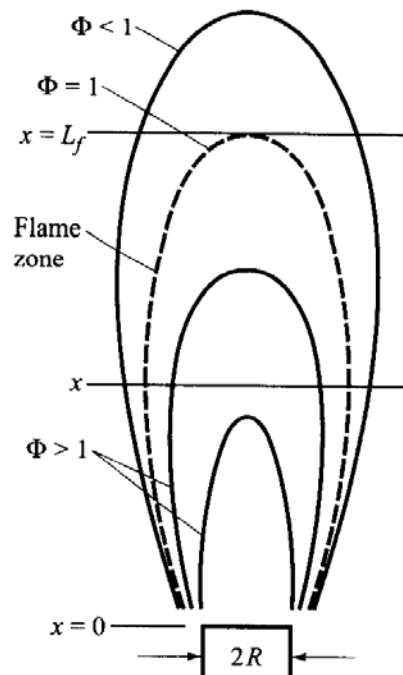


รูปที่ 3.1 โครงสร้างเปลวไฟแบบลามินาร์ของเชื้อเพลิงผสมมาก่อน [16]

จากรูปที่ 3.1 พบว่าการเผาไหม้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือบริเวณอุ่นไอดี (Preheat zone) ซึ่งในบริเวณนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเล็กน้อย และบริเวณการเกิดปฏิกิริยา (Reaction zone) ซึ่งพลังงานทางเคมีทั้งหมดจะถูกปลดปล่อยในบริเวณนี้ นอกจากนี้บริเวณที่เกิดปฏิกิริยายังสามารถแบ่งออกได้เป็นอีก 2 ส่วนตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีคือช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้สูง ซึ่งในบริเวณนี้สังเกตได้ว่าจำนวนโมเลกุลของเชื้อเพลิงจะลดลงจนหมดและเกิดการเผาไหม้ส่งผลให้การปลดปล่อยพลังงานความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสูงสุดในบริเวณนี้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่แคบมาก ซึ่งเป็นกลไกที่ทำให้เกิดแรงผลักดันให้เกิดการติดไฟอย่างต่อเนื่องด้วยตัวเองเนื่องจากการแพร่ของความร้อนและตัวก่อปฏิกิริยาจากบริเวณการเกิดปฏิกิริยากลับไปยังเชื้อเพลิง จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาช้า ซึ่งเกิดจากสารก่อปฏิกิริยา 3 ตัว จึงทำให้บริเวณนี้กว้างกว่าช่วงแรกมาก และนอกจากนี้จะเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของ CO และ OH กลับไปเป็น CO₂ และ H₂O ในช่วงนี้ด้วย เปลวไฟของเชื้อเพลิง Hydrocarbon นั้นสามารถแยกประเภทได้โดยการพิจารณาจากสีของเปลวไฟ โดยที่การเผาไหม้ที่มี

อากาศเพียงพอ บริเวณที่อัตราการผลิตปฏิกิริยาสูงจะให้เปลวไฟสีฟ้าซึ่งเกิดจากการส่องสว่างทางเคมีของ CH จากนั้นเมื่ออากาศลดลงจนน้อยกว่าสภาวะ Stoichiometry จะให้เปลวไฟเขียวซึ่งเกิดจากการส่องสว่างทางเคมีของ C_2 และถ้าหากปริมาณเชื้อเพลิงต่ออากาศมีค่าสูงขึ้นไปอีกจะทำให้เกิดเขม่าตามมาซึ่งมีความเข้มอยู่ในช่วง Infrared ซึ่งจากข้อจำกัดของสายตามนุษย์จะทำให้เห็นเปลวไฟในแบบนี้เป็นสีเหลือง

3.2 การเผาไหม้เปลวไฟแบบแพร่ (diffusion flame)



รูปที่ 3.2 โครงสร้างเปลวไฟแบบแพร่ชนิดราบเรียบ [16]

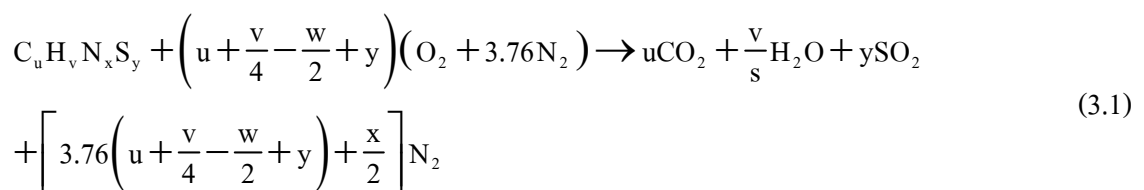
จากโครงสร้างของเปลวไฟ (รูปที่ 3.2) แสดงการไหลของเชื้อเพลิงตามแนวแกนของเปลวไฟ โดยที่ระหว่างเส้นทางการไหลของเชื้อเพลิงจะมีการเหนี่ยวนำอากาศเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิง ซึ่งจากรูปสามารถแบ่งบริเวณการเผาไหม้ออกเป็น 3 ส่วนซึ่งให้รูปแบบการเผาไหม้ที่แตกต่างกันคือ บริเวณด้านบนสุดจะเป็นบริเวณการเผาไหม้ที่มีอัตราส่วนสมมูล (Φ) น้อยกว่า 1 (Lean burn) บริเวณชั้นกลางของการเผาไหม้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่า Φ เท่ากับ 1 (Stoichiometry) และด้านในสุดซึ่งเป็นบริเวณการเผาไหม้ที่มีค่า Φ มากกว่า 1 (Rich burn) ซึ่งบริเวณที่ถูกนิยามให้เป็นพื้นผิวของเปลวไฟคือ บริเวณการเผาไหม้ที่มีค่า Φ เท่ากับ 1 โดยที่ความยาวของเปลวไฟ (Flame length, L_f) สามารถหาได้จาก

$$\Phi(R=0, x=L_f) = 1$$

สำหรับเชื้อเพลิง Hydrocarbon มักจะเกิดเขม่าขึ้นซึ่งส่งผลให้เปลวไฟปรากฏเป็นสีส้มและเหลือง เนื่องจากการที่มีระยะเวลาเพียงพอสำหรับการก่อตัวของเขม่าซึ่งจะเกิดในบริเวณของการเกิดปฏิกิริยาทางด้านของเชื้อเพลิง และจากนั้นจะเกิดการเผาไหม้ของเขม่าต่อไปเมื่อเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มี Oxidizer เช่นด้านปลายสุดของเปลวไฟ

3.3 สตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ (Combustion stoichiometry) [15]

การเผาไหม้โดยทั่วไปแล้วจะเป็นการทำปฏิกิริยากันระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ ซึ่งสตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้คือสภาวะการเผาไหม้ที่มีปริมาณอากาศและเชื้อเพลิงพอดีสำหรับการที่จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งสามารถหาได้จากการดุลสมการทางเคมีการเผาไหม้ โดยที่เมื่อทราบถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงแล้ว จะสามารถคำนวณหาปริมาณของออกซิเจนหรืออากาศที่จำเป็นให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ได้ ก่อนที่จะสามารถทำสตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้จำเป็นจะต้องทราบถึงลักษณะการวิเคราะห์ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดเสียก่อน ซึ่งการรายงานผลการวิเคราะห์ของเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็จะมี ความแตกต่างกันออกไปขึ้นกับสถานะของเชื้อเพลิง ในการวิเคราะห์เชื้อเพลิงแก๊สจะใช้การวิเคราะห์โดยประมาณและรายงานผลการวิเคราะห์เป็นร้อยละโดยปริมาตร หรือ โมลของแต่ละแก๊สที่เป็นองค์ประกอบของแต่ละเชื้อเพลิงผสมนั้น ในส่วนของเชื้อเพลิงแข็งและเชื้อเพลิงเหลวจะใช้การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและรายงานผลเป็นร้อยละโดยมวลของธาตุต่างๆ เช่น การรายงานขององค์ประกอบของเชื้อเพลิงในรูปแบบของร้อยละของธาตุคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N), และซัลเฟอร์ (S) เป็นต้น ซึ่งหากทราบถึงองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ประกอบไปด้วยธาตุ C, H, O, N และ S และทราบว่าอากาศจะมีส่วนประกอบของแก๊สไนโตรเจน 79% โดยปริมาตร และออกซิเจน 21% โดยปริมาตร สามารถทำสตอยคิโอเมตรีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศเป็นสูตรโดยทั่วไปได้ดังสมการเคมีต่อไปนี้



จากการดุลสมการเคมีข้างต้นจะทำให้สามารถคำนวณหาอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงหรืออัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง หรือ $(A/F)_{stoi}$ ที่ทำให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง คือ อัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงโดยมวลทางทฤษฎี หรือตามสตอยคิโอเมตรีของการเผาไหม้ เขียนเป็นสมการที่ 3.2

$$(A/F)_{\text{stoi}} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (3.2)$$

เมื่อ \dot{m}_a คือ ปริมาณของอากาศ (kg)

\dot{m}_f คือ ปริมาณของเชื้อเพลิง (kg)

เนื่องจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจริงนั้น โดยส่วนใหญ่ไม่ได้เป็นไปตามอัตราส่วนระหว่างอากาศต่อเชื้อเพลิงทางทฤษฎี ฉะนั้นจึงมีการนิยามอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio, Φ) เป็นปริมาณไร้มิติที่นิยมใช้ในการเผาไหม้ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกให้ทราบว่าส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับออกซิไดเซอร์อยู่ห่างไกลจากทฤษฎีแค่ไหน ซึ่งนิยามตามสมการที่ 3.3

$$\Phi = \frac{(A/F)_{\text{stoi}}}{(A/F)_{\text{act}}} = \frac{(\dot{m}_a / \dot{m}_f)_{\text{stoi}}}{(\dot{m}_a / \dot{m}_f)_{\text{act}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ $(A/F)_{\text{stoi}}$ คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ทางทฤษฎี

$(A/F)_{\text{act}}$ คือ อัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง ที่เกิดขึ้นจริง

ความหมายของอัตราส่วนสมมูล

$\Phi < 1$ หมายความว่าไอดีบางหรือปริมาณอากาศที่ใช้มากกว่าทางทฤษฎี (Fuel-lean mixture)

$\Phi > 1$ หมายความว่าไอดีหนาหรือปริมาณอากาศที่ใช้น้อยกว่าทางทฤษฎี (Fuel-rich mixture)

$\Phi = 1$ หมายความว่าไอดีเป็นไปตามสโตยคิโอเมทรี (Stoichiometry)

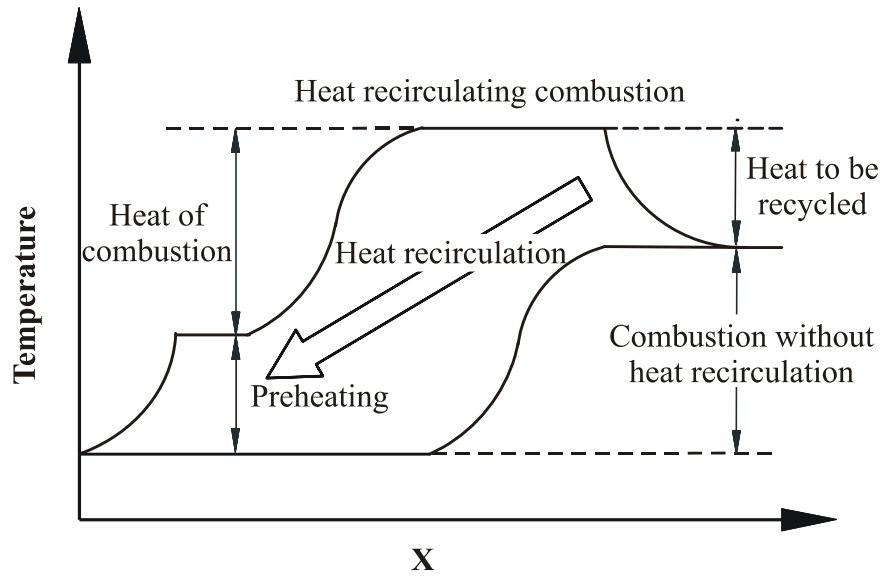
อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติพบว่าการคูณสมการเพื่อหาค่าอัตราส่วนสมมูลนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นในการคำนวณหาค่าอัตราส่วนสมมูลจะทำการคำนวณจากปริมาณออกซิเจนส่วนเกิน (%O₂) ที่สามารถวัดได้จากเครื่องวิเคราะห์ไอเสีย ดังสมการต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{21 - \%O_2}{21} \quad (3.4)$$

3.4 การเผาไหม้แบบหมุนเวียนความร้อน (Heat-recirculating combustion)

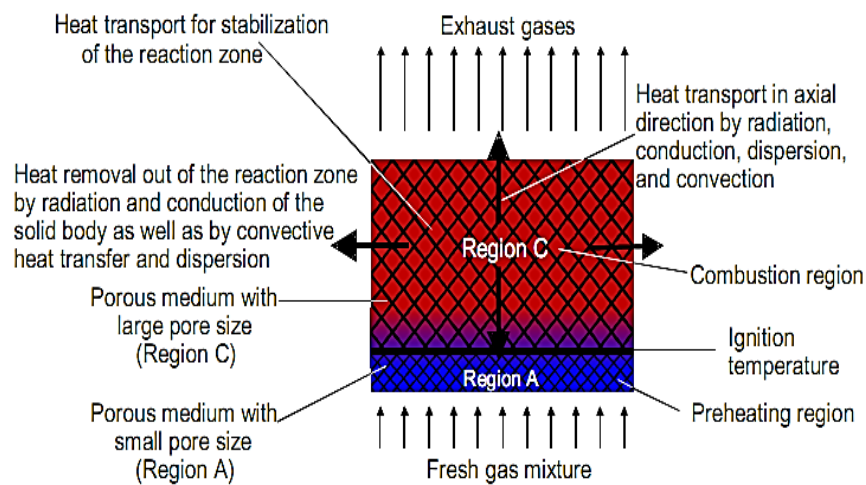
[2]

การเผาไหม้แบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนถูกเสนอโดย Weinberg [2] โดยในระบบการทำงานดังกล่าวจะมีการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียไปสู่ไอดี (หรืออากาศเผาไหม้) โดยใช้อุปกรณ์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดใดๆก็ได้ โดยที่ต้องไม่มีการผสมกันของแก๊สทั้งสองเกิดขึ้นก่อน ทั้งนี้เพื่อยกระดับอุณหภูมิไอดี (หรืออากาศเผาไหม้) ให้สูงขึ้นก่อนการเผาไหม้ ทำให้สามารถเพิ่มความเข้มการเผาไหม้ เพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานเนื่องจากสามารถใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่น้อยลงเมื่อต้องการอุณหภูมิการเผาไหม้เท่าเดิม จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบระหว่างหลักการเผาไหม้แบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนและการเผาไหม้ที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อนที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นเดียวกัน ความร้อนบางส่วนจากแก๊สร้อนหลังการเผาไหม้ของระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะหมุนเวียนไปให้กับไอดี โดยเกิดจากการป้อนเชื้อเพลิงเกรดสูงเข้าสู่เตาขณะเริ่มอุ่นเตาก่อนป้อนเชื้อเพลิงจริง เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) ภายหลังจากที่ป้อนด้วยเชื้อเพลิงที่ต้องการเผาไหม้จริงแล้วจะได้ว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ทางออกของระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนยังคงเท่าเดิมเหมือนกรณีที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อนทุกประการเพราะต้องนำความร้อนหมุนเวียนกลับเข้าสู่ห้องเผาไหม้ไปให้แก่ไอดีอย่างต่อเนื่องผ่านทางอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตามในระหว่างการเผาไหม้นั้น ระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้และอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขีดความสามารถของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ตลอดจนข้อจำกัดในเรื่องของการจุดระเบิดก่อน (Pre-ignition) ของส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศที่ถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นที่อาจเป็นอันตรายได้ ถ้าสามารถควบคุมเรื่องดังกล่าวได้ระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะมีประโยชน์มากในการเผาไหม้แก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำๆ เช่น แก๊สระบายจากเหมืองถ่านหิน แก๊สระบายจากโรงงานอุตสาหกรรมอบแห้ง เป็นต้น ทำให้สามารถนำความร้อนจากแก๊สเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในขณะเดียวกันก็เป็นการทำลายมลพิษที่เกิดจากแก๊สเหล่านี้ไปพร้อมๆกัน โดยการเผาไหม้เพื่อเปลี่ยนให้เป็นไอน้ำ (H_2O) และ CO_2 ซึ่งมีอันตรายน้อย



รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบการเผาไหม้แบบหมุนเวียนความร้อนและการเผาไหม้แบบไม่มีการหมุนเวียนความร้อน [2]

3.5 การหมุนเวียนความร้อนจากการเผาไหม้ในวัสดุพรุน [14]



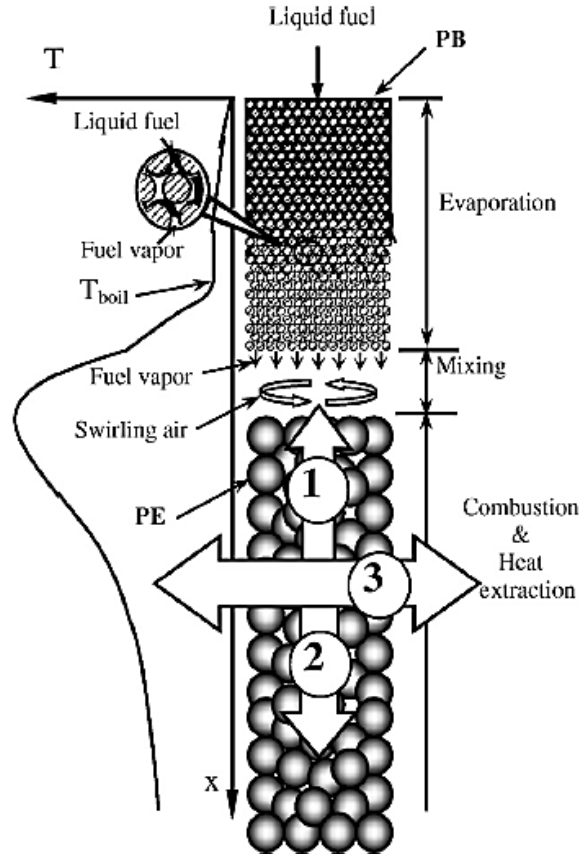
รูปที่ 3.4 แสดงการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุพรุน [14]

การเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนสามารถเรียกได้ว่าเป็นการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน เนื่องจากส่วนผสมของไอดี (อากาศและเชื้อเพลิง) จะถูกอุ่นให้ร้อนด้วยความร้อนที่ถูกยืมชั่วคราวจากไอเสียร้อนบริเวณหลังตำแหน่งเปลวไฟ (Post-flame zone) โดยอาศัยวัสดุพรุนเป็นอุปกรณ์ในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งสามโหมด (การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน) ที่เกิดขึ้นในชั้นวัสดุพรุนจะเป็นตัวช่วยส่งเสริมการหมุนเวียนความร้อน

อย่างมีประสิทธิภาพ กล่าวคือในบริเวณหลังตำแหน่งเปลวไฟ หรือทางด้านท้ายน้ำ (Downstream) ของชั้นวัสดุพอรุน ความร้อนจากแก๊สไอเสียจะถูกถ่ายเทให้วัสดุพอรุน โดยการพาความร้อน และความร้อนในส่วนนี้จะถูกถ่ายเทไปช่วยในการอุ่น (Preheating) ส่วนผสมไอดี ที่ถูกป้อนเข้ามาในช่วงต้นน้ำ (Upstream หรือ Pre-flame zone) โดยการนำและการแผ่รังสีความร้อนในชั้นวัสดุพอรุน

กลไกการการหมุนเวียนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุพอรุนนี้จะส่งผลให้ได้การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน ซึ่งเป็นผลให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าอุณหภูมิเปลวไฟทางทฤษฎี (Adiabatic flame temperature) เป็นผลให้การเผาไหม้ในวัสดุพอรุนถูกเรียกถึงในชื่อ “การเผาไหม้แบบซูเปอร์แอดิยาบัติก (Super adiabatic combustion)” หรือ “Excess enthalpy combustion” นอกจากนี้การเผาไหม้ในวัสดุพอรุนยังปลดปล่อยมลพิษ (CO, NO_x) ที่ต่ำกว่าการเผาไหม้แบบทั่วไป (Conventional free flame combustion) สำหรับในกรณีที่ต้องการอุณหภูมิการเผาไหม้เท่าเดิม การเผาไหม้ในวัสดุพอรุนสามารถขยายขอบเขตไปยังบริเวณส่วนผสมเจือจาง (Lean mixture) ได้ เป็นผลให้มีอากาศมากเกินพอในการเผาไหม้ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์ CO จึงลดลง อีกทั้งที่บริเวณเปลวไฟ ความร้อนจากการเผาไหม้บริเวณเปลวไฟจะถูกถ่ายเทไปยังวัสดุพอรุน และวัสดุพอรุนจะแผ่รังสีความร้อนออกไปอย่างทันทีทันใด เป็นผลให้อุณหภูมิเปลวไฟถูกกดให้ต่ำลง เป็นผลให้ Thermal NO_x ลดลง

3.6 การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพรุนชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นละออง (Combustion of liquid fuels by porous medium without spray atomization) [14]



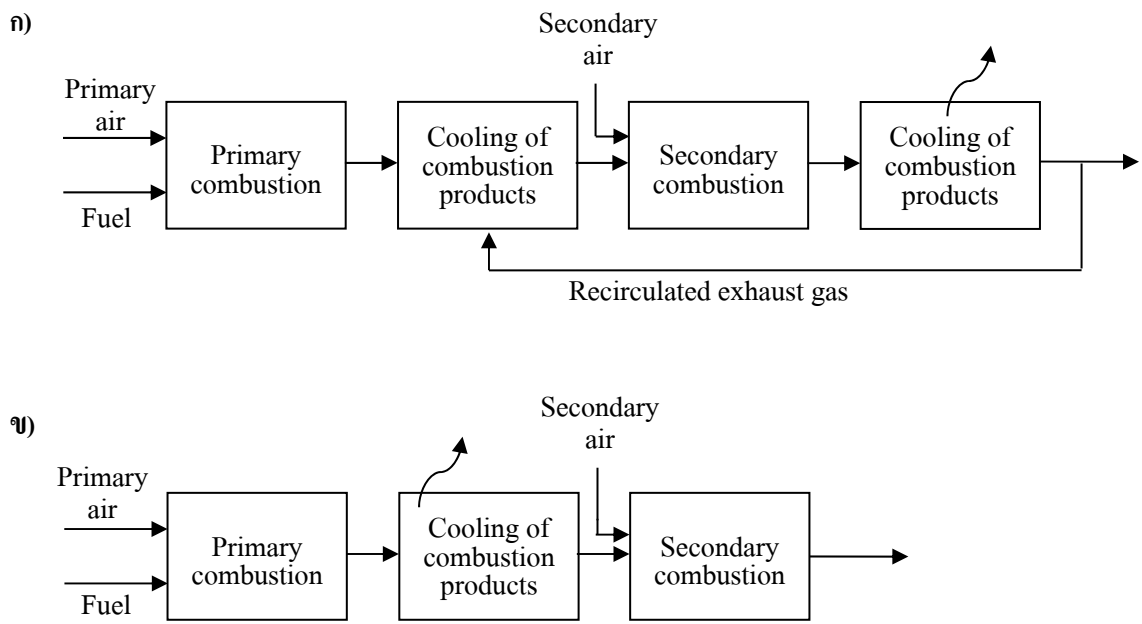
รูปที่ 3.5 แนวคิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพรุนชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นละออง [14]

แนวคิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพรุนชนิดไม่มีการแตกตัวเป็นละอองจะอาศัยการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุพรุน Porous emitter (PE) และแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้หมุนเวียนกลับไปให้ยังวัสดุพรุน Porous burner (PB) เพื่อช่วยในการระเหยเชื้อเพลิงเหลวที่ถูกป้อนเข้ามาทางด้านบนให้กลายเป็นไอ โดยเชื้อเพลิงเหลวจะถูกป้อนเข้ามาทางด้านบนของวัสดุพรุน PB ดังรูปที่ 3.5 เชื้อเพลิงเหลวจะไหลซึมลงมาตามช่องว่าง (Pore) เนื่องจากผลของแรงตึงผิว (Surface tension) และแรงโน้มถ่วง (Gravity) ส่งผลให้เชื้อเพลิงเหลวเกิดการกระจายตัวไหลเต็มพื้นที่หน้าตัดวัสดุพรุน PB ในขณะเดียวกันจะได้รับการถ่ายโอนความร้อนจากสถานะของแข็งจากวัสดุพรุน PB ทำให้เชื้อเพลิงเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนมีบางส่วนมีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเดือด (Boiling temperature) แล้วเกิดการระเหยกลายเป็นไอบางส่วนแล้วค่อยระเหยกลายเป็นไอหมด (Fuel vapor) ไอเชื้อเพลิงจะถูกอุณหตมาเรื่อยๆ จนกระทั่งไหลออกจากช่วง Evaporation ลงมาผสมกับอากาศ (Swirling air) ที่ป้อนเข้ามาทางด้านข้าง

บริเวณ Mixing แล้วเกิดการติดไฟ (Ignition) และเกิดการเผาไหม้ (Combustion) ขึ้นที่บริเวณ Combustion & Heat extraction อยู่ภายในชั้นวัสดุพอรุน PE ความร้อนจากกระบวนการเผาไหม้จะถูกถ่ายเทให้กับสถานะของแข็งของวัสดุพอรุน PE ในทันทีทันใด การถ่ายเทความร้อนที่ออกจากวัสดุพอรุน PE สามารถแบ่งได้เป็นสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งจะถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนจากของแข็งวัสดุพอรุน PE และแก๊สร้อนหมุนเวียนกลับไปยังวัสดุพอรุน PB เพื่อใช้ในการระเหยเชื้อเพลิงเพื่อเตรียมไอก่อนการผสม และเป็นการอุ่นไอดีทำให้ได้ระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนในตัวเอง ส่วนที่สองเป็นส่วนที่นำความร้อนที่ถ่ายเทไปทางด้านท้ายน้ำ (Downstream) จากวัสดุพอรุน PE และแก๊สร้อนไปใช้งานต่อ และส่วนที่สามสามารถนำความร้อนที่ถ่ายเททางด้านข้างทั้งการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนโดยของแข็งวัสดุพอรุน PE และแก๊สร้อนไปใช้ต่อได้อีกด้วย

3.7 การเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน (Staged-combustion technique) [15]

เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอนเป็นเทคนิคการเผาไหม้ที่ช่วยยับยั้งหรือลดการเกิด Thermal NO_x โดยควบคุมการผสมระหว่างเชื้อเพลิงและออกซิเจนไม่ให้ผสมกันแล้วเกิดการเผาไหม้ที่สภาวะสตอยคิโอมิตรีหรือค่าอัตราส่วนสมมูลเท่ากับหนึ่ง ($\Phi = 1.0$) ซึ่งในการลดการเกิด Thermal NO_x จะผสมเชื้อเพลิงกับอากาศในลักษณะที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ภายใต้อัตราส่วนสมมูลที่แตกต่างกันหลายค่าจากไอดีบางไปหาไอดีหนาหรือกลับกัน โดยจะหลีกเลี่ยงการผสมที่ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สภาวะสตอยคิโอมิตรีอย่างเด็ดขาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้เชื้อเพลิงขาดอากาศโดยแบ่งการจ่ายอากาศเป็นหลายๆส่วนแล้วป้อนเข้าสู่เตาเผาไหม้เพื่อเผาไหม้กับเชื้อเพลิงที่ตำแหน่งต่างๆกัน จึงเกิดการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอนขึ้นในห้องเผาไหม้ การเพิ่มภาวะการเผาไหม้เพื่อควบคุม Thermal NO_x ให้เกิดยากยิ่งขึ้น อาจทำได้โดยการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย (Recirculated exhaust gas) ซึ่งส่วนใหญ่เป็น N_2 และ CO_2 เข้ามาผสมเพิ่มเข้าไปก่อนการเผาไหม้ในขั้นตอนทุติยภูมิ (Secondary combustion) ดังแสดงในรูป 3.6ก หรือการควบคุมการเกิด NO_x ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นอาจทำได้โดยการดึงความร้อนจากแก๊สร้อนที่เกิดการเผาไหม้ในขั้นตอนทุติยภูมิ (Secondary combustion) ดังแสดงในรูปที่ 3.6ข



รูปที่ 3.6 เทคนิคการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอน

ก) ลดอุณหภูมิโดยขยายบริเวณการเผาไหม้รวมทั้งการหมุนเวียนแก๊สไอเสีย

ข) ลดอุณหภูมิโดยขยายบริเวณการเผาไหม้ [15]