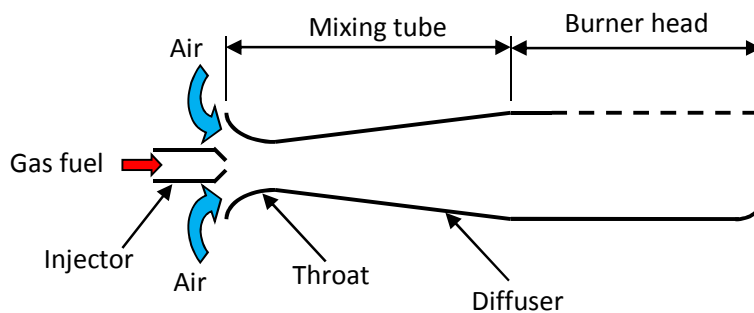


บทที่ 3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 เตาเผาเชื้อเพลิงแก๊สชนิดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง



รูปที่ 3.1 แบบ โครงสร้าง โดยทั่วไปของเตาชนิดที่มีการเหนี่ยวนำอากาศด้วยตนเอง

รูปที่ 3.1 แสดงถึงแบบ โครงสร้าง โดยทั่วไปของเตาชนิดที่มีการผสมอากาศ โดยแก๊สจะถูกพ่นออกจากหัวฉีดซึ่งอาจมีเพียงหนึ่งรูหรือมากกว่าก็ได้ ในขณะที่แก๊สถูกพ่นออกจากหัวฉีด แก๊สจะเหนี่ยวนำอากาศที่อยู่ด้านข้างด้วยกระบวนการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างแก๊สความเร็วสูงที่พุ่งออกมากับอากาศนิ่งที่อยู่ภายนอก ส่วนผสมของแก๊สกับอากาศจะเข้าสู่ท่อผสมที่อาจมีรูปร่างเป็นแบบคอขวด (venturi) หรือท่อตรงก็ได้ โดยมีรูปร่างแบบนี้ออกแบบมาเพื่อให้เกิดการผสมระหว่างแก๊สกับอากาศอย่างสมบูรณ์เพื่อให้อัตราส่วนของอากาศต่อแก๊สคงที่และสม่ำเสมอก่อนไหลผ่านออกไปที่หัวเผา (burner head) ส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามาคือตัว ปิด-เปิด ช่องการเหนี่ยวนำอากาศหรือแผ่นควบคุมที่ทางเข้าท่อผสมเพื่อควบคุมปริมาณอากาศส่วนแรก (primary air) ที่จะถูกเหนี่ยวนำ หรืออาจจะติดตั้งแผ่นรังผึ้งหรือผ้าก๊อชที่ตัวเตาเพื่อช่วยให้เกิดการผสมที่ดีขึ้นและป้องกันการเกิดคราบอุดตัน (clogging) ที่รูทางออกหัวเผา (burner ports)

3.2 การเผาไหม้ในวัสดุพรุน (Combustion in Porous Medium)

ปัจจุบันเทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพรุน (Porous Medium, PM) เป็นที่ยอมรับกันทั่วไป และมีการศึกษาอย่างจริงจังทั้งการทดลอง และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากการเผาไหม้ในวัสดุพรุนทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนได้ด้วยตัวเอง ซึ่งลักษณะดังกล่าวมีข้อได้เปรียบเหนือการเผาไหม้แบบปกติ (Free-flame Combustion) หลายประการ คือ ให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าเปลวไฟแบบปกติ [2, 4] ที่สภาวะเดียวกัน ความเร็วในการเผาไหม้ (burning velocity) สูงขึ้น [5] ความเข้มของการเผาไหม้มีค่าสูง (high combustion intensity) ทำให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็ก รวมถึงฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากการแผ่รังสี (radiative heat flux) มีค่าสูงและสม่ำเสมอ การปลดปล่อยมลพิษต่ำเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบปกติและที่สำคัญก็คือ สามารถเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ (เชื้อเพลิงเกรดต่ำ) หรือเผาไหม้ในสภาวะเจือจาง (Lean Combustion) [6] หรือเข้มข้น (Rich Combustion) เกินกว่าที่เตาเผาทั่วไป (Conventional Burner) จะสามารถเผาไหม้ได้

การเผาไหม้ด้วยวัสดุพรุน (Porous media combustion, PCM) แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ การเผาไหม้โดยที่เปลวไฟติดและเสถียรอยู่ในวัสดุพรุน (Submerged combustion flame) หรือบางครั้งอาจรู้จักกันดีในชื่อของการเผาไหม้แบบไม่มีเปลวไฟ (Flameless combustion) และประเภทที่สองคือ การเผาไหม้ที่เปลวไฟติดและเสถียรอยู่ที่ผิวของวัสดุพรุน (Surface combustion flame) ซึ่งการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนนั้น มีข้อดีต่างๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้น และมีอีกส่วนหนึ่งที่ดีกว่าการเผาไหม้แบบปกติ คือ การเผาไหม้ในวัสดุพรุนจะมีการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพรุนทางด้านท้ายน้ำ (downstream) ซึ่งมีการเผาไหม้เกิดขึ้นกลับมาทางด้านต้นน้ำ (upstream) ช่วยให้เกิดการอุ่นส่วนผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงก่อนเกิดการเผาไหม้ เนื่องด้วยว่าการเผาไหม้ในวัสดุพรุนมีการอุ่นส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง จึงได้มีการแบ่งชั้นของวัสดุพรุนออกเป็นสองชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นอุ่นส่วนผสม และชั้นที่สองเป็นชั้นการเผาไหม้ ซึ่งการแบ่งชั้นของวัสดุพรุนนั้นจะใช้ Peclet Number (Pe) [22] เป็นตัวกำกับ โดย Pe เป็นสัดส่วนระหว่างการพาความร้อนภายในช่องว่างของวัสดุพรุนกับการนำความร้อนในเนื้อแก๊ส ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Pe = \frac{S_L d_m c_p \dots}{k} \quad (3.1)$$

โดย	S_L	คือ Laminar flame speed (ที่ $\Phi = 1.0$ LPG มีค่า $S_L = 0.4158$ m/s)
	d_m	คือ equivalent pore diameter หรือ quenching distance
	c_p	คือ specific heat capacity
	...	คือ density
	k	คือ thermal conductivity of gas mixture

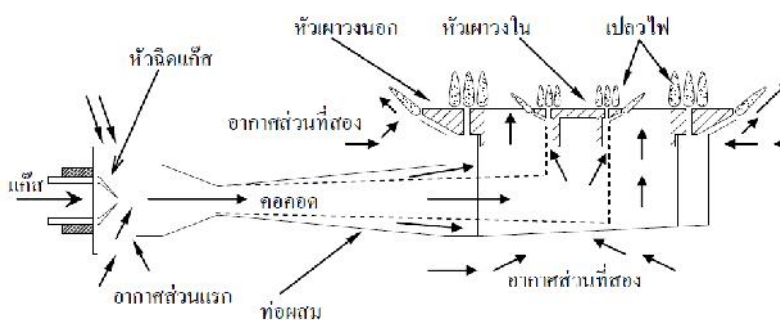
ค่า Pe ที่ใช้ออกแบบชั้นของวัสดุพอร์นมีค่าวิกฤตอยู่ที่ 65 นั่นคือถ้า $Pe < 65$ จะไม่มีเกิดการติดไฟ เพราะว่ขนาดของโพรงหรือรูภายในวัสดุพอร์นมีค่าน้อยมาก ทำให้เกิด quenching effect ขึ้นภายในวัสดุพอร์น จึงเป็นเหตุทำให้เปลวไฟไม่สามารถติดหรือลามได้ ซึ่งเหมาะกับการออกแบบชั้นวัสดุพอร์นที่ใช้ในส่วนผสม และ เปลวไฟสามารถติดและลามในชั้นวัสดุพอร์นได้เมื่อ $Pe > 65$

3.3 โครงสร้างและการทำงานของเตาหุงต้มแอลพีจีมาตรฐาน

รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างเตาหุงต้มแอลพีจีมาตรฐาน (Conventional Burner) ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นเตาที่นิยมใช้หุงต้มในครัวเรือนแพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบันเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ ทั้งนี้เพราะมีลักษณะเด่นหลายประการเช่น โครงสร้างเรียบง่าย ราคาถูก ใช้งานสะดวกหรือและแรงไฟได้เร็วและมีช่วงการทำงานที่กว้างพอสมควร ทนทาน เชื้อถือได้สูง มีความปลอดภัยสูง เตาแก๊สหุงต้มแอลพีจีมาตรฐาน

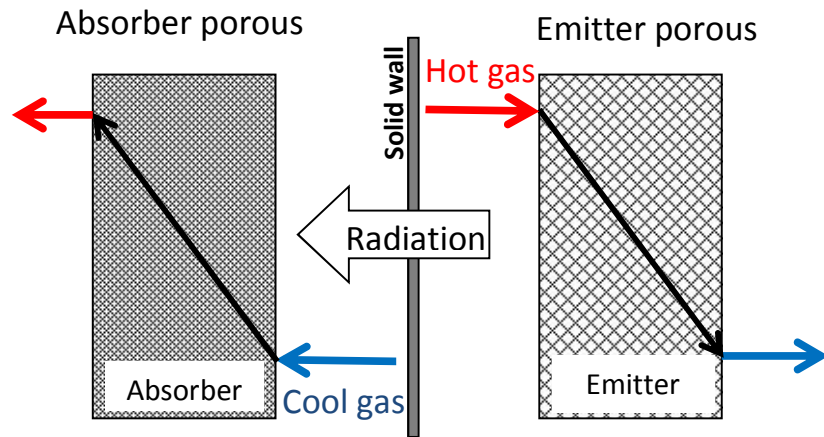
ประกอบด้วยส่วนหลักๆ สามประการ [13] คือ ท่อผสม (Mixing Tube) หัวเผา (Burner Head หรือ Cap) และรูพ่นแก๊ส (Injector Orifice) ท่อผสมส่วนใหญ่มักจะจากเหล็กหล่อ ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นคอขวด (Throat) ใกล้เคียงบริเวณทางเข้าของแก๊สและอากาศส่วนแรก เพื่อผลทางด้านอากาศพลศาสตร์ของการไหลในท่อ โดยอาจมีมากกว่าหนึ่งท่อก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อผลของการปรับเปลี่ยนช่วงอัตราไหลแก๊สหรือค่า Turn-down Ratio ของเตา หัวเผาส่วนใหญ่มักจะทำจากทองเหลือง มีรูปร่างได้หลายแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น อาจเป็นแผ่นวงกลมตัน (Cap) หรือเป็นแผ่นวงแหวน (Ring) และอาจมีจำนวนมากกว่าหนึ่งวงแหวนก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นต้น ที่ขอบวงแหวนด้านล่างตรงที่สัมผัสกับ

ขอบท่อผสมทำเป็นบานูน และถูกเจาะเป็นร่องๆ จำนวนหลายร่องในแนวรัศมี เพื่อทำหน้าที่เป็นรูกระจายแก๊ส (Burner Port) และเปลวไฟที่ติดอยู่เหนือรูกระจายแก๊สให้กระทบอย่างสม่ำเสมอต่อภาชนะหุงต้มที่จะวางอยู่เหนือหัวเผา การทำงานของเตาแก๊สหุงต้มแอลพีจีเริ่มจากแก๊สความดันต่ำที่ใช้งานตามปกติ (ประมาณ 625 ถึง 2,000 Pa (6.25 ถึง 20 mBar) หรือ 2.5 ถึง 8 inH₂O) ถูกพ่นออกจากรูพ่นแก๊สเข้าไปในท่อผสม ขณะเดียวกันอากาศส่วนแรกที่อยู่บริเวณใกล้ๆ จะถูกชักนำผ่านช่องอากาศส่วนแรก เข้าไปในท่อผสมพร้อมๆ กับแก๊ส โดยอาศัยการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างแก๊สและอากาศโดยรอบ ด้วยวิธีการดังกล่าวอากาศส่วนแรกนี้จะมีค่าประมาณ 70% ของปริมาณอากาศที่จำเป็นเพื่อการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ (Stoichiometric Air) และมีความเป็นไปได้ที่ทำให้อากาศส่วนแรกนี้มีค่าถึง 100% ขึ้นอยู่กับความดันของแก๊สที่ใช้ จากนั้นส่วนผสมของอากาศส่วนแรกและแก๊สจะไหลผ่านรูพ่นแก๊สและติดไฟให้ Premixed Flame ลอยนิ่งอยู่เหนือรูพ่นแก๊ส ภายหลังจากที่ถูกจุดประกายไฟ (Ignition) ด้วยวิธีการที่เหมาะสม เช่น ใช้เปลวท่อหรือการ Spark ด้วยขั้วไฟฟ้าแรงดันสูงจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น Piezo Electric ซึ่งจะผลิตแรงดันไฟฟ้าสูงออกมาทันทีที่ได้รับควมกระตุ้นจากการกระทบบ่อยอย่างรุนแรง เป็นต้น ในขณะเดียวกันอากาศส่วนที่สอง (Secondary Air) จะถูกชักนำเข้ามาจากด้านข้างเปลวไฟและจากด้านล่างหัวเผา ซึ่งทำเป็นช่องว่างไว้ระหว่างหัวเผาวางในกับวงนอก ทั้งนี้โดยอาศัยการถ่ายเทโมเมนตัม และแรงลอยตัวของแก๊สร้อนที่จะขยายตัวและลอยสูงขึ้น ช่วยทำให้อากาศโดยรอบที่เย็นกว่าถูกดูดเข้ามาผสมกับเปลวไฟได้มากขึ้นและส่งผลให้การเผาไหม้สมบูรณ์ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเตาแก๊สหุงต้มแก๊สแอลพีจี

3.4 การหมุนเวียนความร้อนโดยการเปลี่ยนรูปความร้อนระหว่างการพาความร้อน และ แผ่รังสีความร้อนในวัสดุพรุน



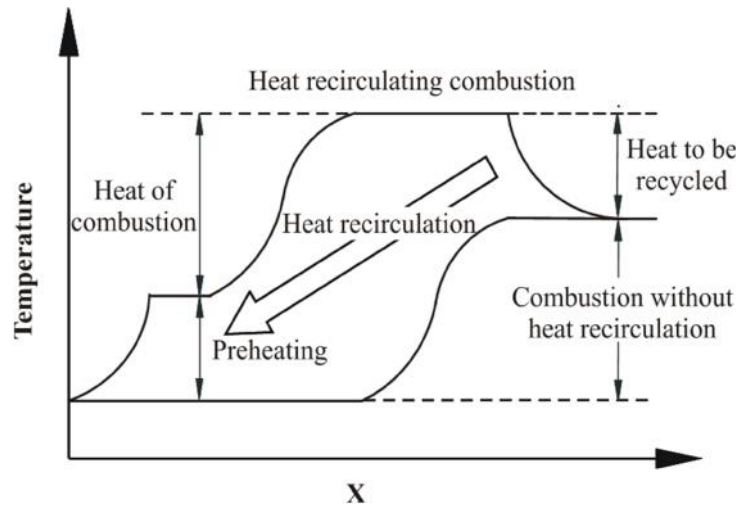
รูปที่ 3.3 หลักการทำงานของวัสดุพรุน

วัสดุพรุนเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีความร้อนสูง และทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงๆ ได้ คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพรุนคือ สามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานกลับไปกลับมาระหว่างเอนทัลปีของแก๊สและการแผ่รังสีความร้อนได้ [7] เนื่องจากวัสดุพรุนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงมาก (Surface Area to Volume Ratio) ดังนั้นในการถ่ายเทความร้อนจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ จึงถือได้ว่าวัสดุพรุนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยมีหลักการการทำงานดังนี้คือ เมื่อแก๊สร้อนไหลผ่านวัสดุพรุนอันขาดังแสดงในรูปที่ 3.2 วัสดุพรุนดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นตัวดูดกลืนเอนทัลปีของแก๊สร้อนเอาไว้ส่วนหนึ่งแล้วเปลี่ยนพลังงานส่วนที่ดูดกลืนมานี้ไปเป็นการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งเรียกลักษณะเช่นนี้ว่าเป็นตัวแผ่ (Emitter) แผ่รังสีสวนทางกับการไหลของแก๊สร้อนมายังวัสดุพรุนอีกด้านหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็น (Absorber) ดังนั้นอากาศร้อนที่ไหลผ่านตัวแผ่รังสีจะมีอุณหภูมิลดลง และเมื่อมีอากาศเย็นไหลผ่านตัวรับรังสีอากาศเย็นก็จะดูดเอาความร้อนที่ถูกดูดกลืนไว้ทำให้อากาศมีค่าเอนทัลปีและอุณหภูมิสูงขึ้น จากหลักการดังกล่าวถ้านำตัวแผ่รังสีและตัวรับรังสีมาอยู่ใกล้ๆ กัน แล้วให้อิเสียซึ่งมีอุณหภูมิสูงที่เกิดจากการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพรุนตัวที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี แล้วเอาอากาศเย็นที่จะใช้ในการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนจากอิเสียมาสู่ (ดูรูปที่ 3.2 1)

ดังกล่าวจะมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เพิ่มสูงขึ้นเนื่องมาจากผลของการอุ่นอากาศ (preheat) ที่มี

ประสิทธิภาพ ส่งผลให้การเผาไหม้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังทำให้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) (High Combustion Intensity) มีขนาดกะทัดรัด นอกจากนี้ยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ได้ (Flammability Limits) กว้างขึ้น

3.5 หลักการทำงานของ การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน



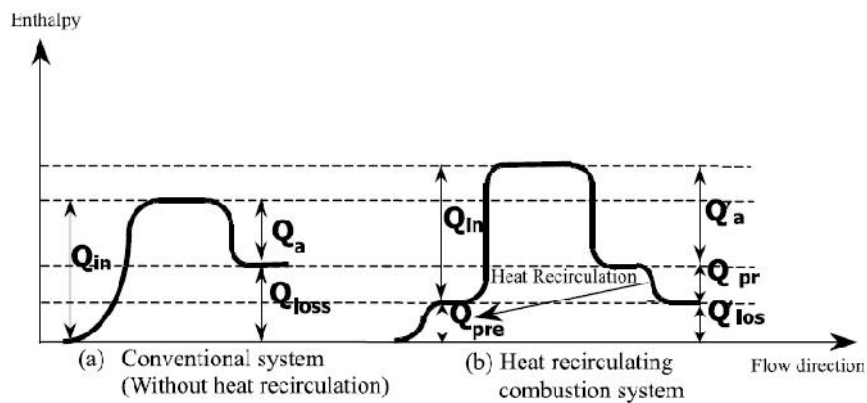
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน

รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบหลักการทำงานของระบบที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน [2] ขณะที่ยังไม่มี การความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องเมื่อใช้ปริมาณเชื้อเพลิงเท่ากันพบว่าระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน เมื่อไอดีไหลเข้าทางด้านซ้ายมือและมีการเผาไหม้เกิดขึ้น อุณหภูมิการเผาไหม้จะสูงอยู่ในระดับหนึ่ง แก๊ส ไอเสียที่เกิดขึ้นในระบบก็จะไหลออกทางด้านขวา โดย ประโยชน์ และเมื่อนำมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นบน ซึ่งแสดงระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจาก แก๊สไอเสียมาทำการอุ่นไอดี ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงขึ้น แต่อุณหภูมิสุดท้ายที่ทาง ออก เหมือนกับกรณีที่ไม่มี การหมุนเวียน

ไอดีอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุนี้ระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะให้ อุณหภูมิการเผาไหม้และอัตราการเผาไหม้ที่สูงกว่าระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน เมื่อทำการเปรียบเทียบในกรณีอุณหภูมิสูงสุดของการ

เผาไหม้เท่ากัน พบว่าปริมาณเชื้อเพลิงซึ่งใช้ในระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะต่ำกว่าระบบที่ไม่มี
 การหมุนเวียนความร้อน จึงประหยัดพลังงานได้มากกว่า นอกจากนี้ระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียน
 (Burning Velocity) ความเข้มในการเผาไหม้ที่
 (High Combustion Intensity) ทำให้สามารถออกแบบให้เตาเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัด ทั้งยังช่วย
 (Flammability Limits) ให้กว้างขึ้นเหมาะแก่การนำไปเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่า
 ความร้อนน้อยๆ ที่ไม่สามารถทำการเผาไหม้ในระบบปกติ

3.6



รูปที่ 3.5 ๑

การส่งเสริมการประหยัดพลังงานในระบบการเผาไหม้นั้นสามารถทำได้หลายวิธีการด้วยกันแต่วิธีหนึ่งที
 นโดยการนำความร้อนจากไอดีเสียมาอุ่นอากาศส่วนแรกก่อนที
 จะไปผสมกับเชื้อเพลิงก่อนทำการเผาไหม้ซึ่งการอุ่นอากาศส่วนแรกก็เป็นเหมือนการอุ่นไอดีไปในตัวจากร
 รูปที่ 3.4 แสดงหลักการประหยัดพลังงานด้วยการหมุนเวียนความร้อนจากไอดีมาสู่ไอดีเสียโดยพิจารณา
 (3.4 a) ซึ่งเป็นระบบ conventional Burner เมื่อปริมาณความร้อนที่ป้อนให้กับระบบ Q_{in}
 ให้ได้ความร้อนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้มีค่าเท่ากับ Q_a และจะมีความร้อนที่สูญเสียไปจากระบบซึ่งมี
 Q_{loss} ซึ่งสามารถลดการสูญเสียความร้อนได้ด้วยหลักการหมุนเวียนความร้อนโดยจากรูปที่ 3.4

(b) เป็นรูปแสดงระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อน โดยจะนำความร้อนจาก Q_{loss} ส่วนหนึ่ง (Q_{Pr}) ไปใช้ในการอุ่นไอดีซึ่งทำให้ความร้อนที่นำไปใช้มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งมีค่าเท่ากับ Q'_a ซึ่ง Q_{loss} จะลดน้อยลงซึ่งให้เห็นถึงการประหยัด เนื่องจากความร้อนที่นำไปใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นหาก Conventional ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงของระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนจะ

$$\text{Energy saving} = \frac{Q_{pre}}{Q_{pa} + Q_{pre}} = \frac{y_{th,2} - y_{th,1}}{y_{th,2}} \quad (3.2)$$

3.7

(Primary Aeration)

[24]

O_2 แล้วใช้ในการคำนวณด้วยสมการความสัมพันธ์ที่ 3.3

$$PA = \frac{\%O_2}{(A/F)_{stoi} \times (21 - \%O_2)} \times 100 \quad (3.3)$$

3.8

การวัดค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน ในที่นี้อ้างอิงมาตรฐาน EN 203-2 [23] ซึ่งค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนหาได้จาก ค่าความร้อนสัมผัสที่น้ำได้รับ โดยวิธีการคั่นน้ำจากอุณหภูมิห้องจนใกล้จุดเดือดของน้ำ (ประมาณ 90°C) เพราะไม่ต้องการให้น้ำเดือด ซึ่งทำให้มวลของน้ำลดลง ส่วนค่าของ LHV ได้จาก certificate ของบริษัทที่จัดจำหน่าย และ V_c ได้จากการอ่านค่าจาก volume flow meter

โดยที่ Pa

Pw คือความดันของไอน้ำของ vaporizer ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊ส

LPG Tg

LPG ซึ่งวัดก่อนผ่าน flow meter และคำนวณตามสมการที่ 3.5 แล

อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับปริมาณความร้อนที่ได้รับจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งหาได้จากเวลาที่ใช้ในการต้มน้ำ และอัตราการไหลของแก๊สเชื้อเพลิง แล้วนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้

3.4

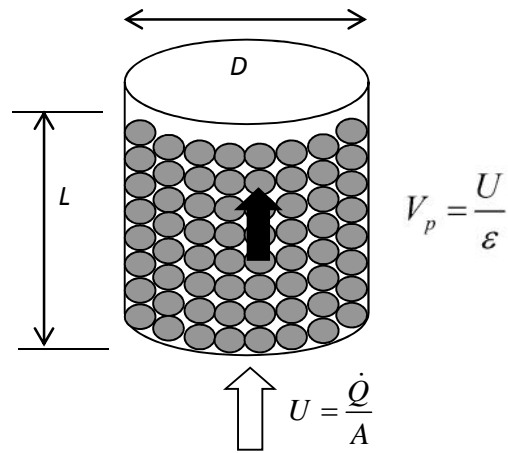
$$y_{th} = \frac{m_{water} c_{p,water} (90 - T_{water,i})}{V_c \times LHV \times t} \quad (3.4)$$

$$V_c = V_{mes} \times \frac{p_a + p - p_w}{1013.25} \times \frac{288.15}{273.15 + T_g} \quad (3.5)$$

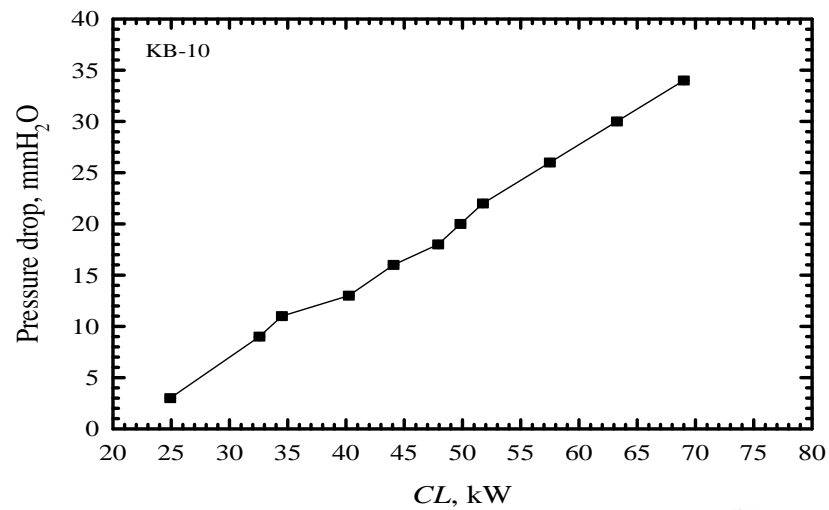
วิธีการนี้ เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงของเตาหุงต้มแอลพีจี เนื่องจากวิธีนี้จะมีการอุ่นเตาให้ร้อนก่อนการทดสอบ ซึ่งสามารถลดความร้อนที่สูญเสียให้กับอุปกรณ์ประกอบเตา เช่น ท่อผสม ฐานตั้งภาชนะ เป็นต้น

3.9 เตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มี Packed Bed (Cylindrical Bed Porous Burner)

การไหลในวัสดุพรุนที่ไม่มีการเคลื่อนที่จะมีความดันลด (Pressure Drop in Fixed Bed, ΔP) เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุน [3,25] ซึ่ง ΔP ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนจะขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุพรุน (d) ความพรุน (V) ความสูงของ Packed bed (L) ขนาดของ Packed bed (D) และความเร็วก่อนเข้า Packed bed (Superficial velocity, U) [26] ดังรูปที่ 3.5 โดยการออกแบบเตาแก๊สที่ใช้วัสดุพรุนเป็นหัวเผา ต้องคำนึงถึงค่า ΔP ให้มีค่าเท่ากับเตาแก๊สแบบหัวเผาวงแหวนทั่วไป (Conventional Burner ขนาด KB-10) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ลักษณะของ Fixed bed



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลของ ΔP ของเตาแก๊สหุงต้มขนาด KB-10 ที่ FR ต่างๆ

Packed bed (L)

Ergun [3,25] ตามสมการ (3.6)

U

Packed bed (D)

(3.9) Q

[17] โดย V หาได้จากความสัมพันธ์ของ Zou

และ Yu [26] ตามสมการ (3.11) ซึ่งค่า L ที่คำนวณได้จะเป็นค่าที่บอกว่าการออกแบบ Packed bed ที่เหมาะสม ต้องมีความสูงไม่เกินกว่าค่าที่คำนวณได้ ถ้า L มากกว่าค่าที่คำนวณได้จะทำให้เกิด ΔP

KB-10

L ที่ต่ำกว่าการคำนวณได้ สำหรับ D ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความเร็วที่อยู่ในวัสดุ

(Interstitial Velocity, V_p) V_p S_L เพื่อให้เปลวไฟเสถียรอยู่ในวัสดุ

$$V_p \quad \text{ที่ (3.10)}$$

$$\frac{\Delta P}{L} = aU + b^2U^2 \quad (3.6)$$

$$a = 150 \frac{(1-v)^2}{d^2 v^3} \quad (3.7)$$

$$b = \sqrt{1.75 \frac{(1-v)}{d v^3}} \quad (3.8)$$

$$U = \frac{Q}{A} \quad (3.9)$$

$$V_p = \frac{U}{v} \quad (3.10)$$

$$v = v_b + 0.01 \left[\exp\left(\frac{10.686}{(D/d)}\right) - 1 \right], \quad v_b = 0.4 \quad (3.11)$$

3.10 เตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มี Packed Bed (Annular PMB)

การไหลของของไหลในวัสดุพรุนที่มี Packed bed แบบวงแหวนนั้น[21]
 ที่มี packed bed (Pressure drop, ΔP) เกิดขึ้นภายในชั้นวัสดุ
 พรุน ซึ่ง ΔP ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนจะขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุพรุน (d) (v)
 Packed bed (L) Packed bed (D) Packed bed (Superficial velocity, U)
 ΔP Packed bed แบบวงแหวนนั้น จะมีความแตกต่างจากการไหลใน
 Packed Bed (Wall Effects) ที่มีต่อความพรุน
 (Porosity, v) (Velocity Distributions) เนื่องจาก packed bed
 แหวนนั้นจะมีพื้นที่ที่เป็นผนังมากกว่า Packed Bed ΔP
 Packed bed Packed bed
 คำนวณหาขนาดของวัสดุพรุนที่ใช้สำหรับเตาเผาที่มี Packed bed แบบวงแหวนนั้น

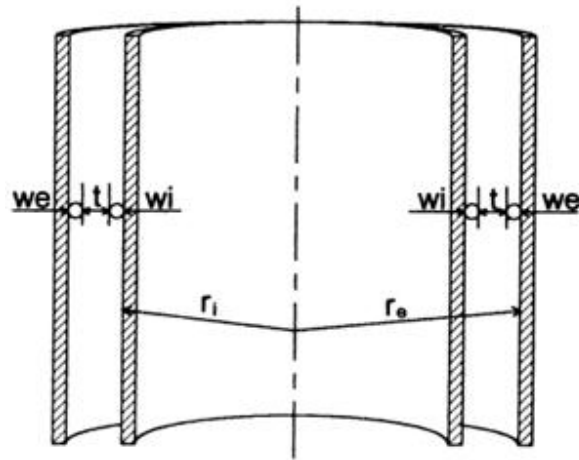
Peclet Number (Pe) Packed bed
 ทั้งขนาดของเม็ดหินซึ่งใช้เป็นชั้นเผาไหม้ และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูของแผ่นที่ใช้
 Flash Back (Pressure drop) Packed bed
 Pressure drop Packed bed แบบทรงกระบอกตัน ซึ่ง Pressure
 Drop Packed bed แบบทรงกระบอกตันนั้นสามารถหาได้จาก Ergun's Equation [3] (3.6)
 เป็นสมการที่ใช้หา Pressure drop Packed bed แบบทรงกระบอกตันที่มีวัสดุพรุนลักษณะเป็นทรง
 (Spherical Porous Medium) Packed bed (Infinite bed)
 (Wall Effects) ที่เกิดขึ้น แต่ในทำ Pressure drop Packed bed
 แหวนนั้นจะมีการพิจารณาผลของผ (Wall Effects) รวมด้วยดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ต้องมีการแก้
 Superficial velocity ซึ่งอยู่ใน Ergun's Equation [3] C (3.14) C นี้ว่า
 "Correction Factor" ซึ่งเสนอโดย J.R. Sode & J.A.R. Parise [21] ไ้ความเร็วในท่อไหลใน
 packed bed ซึ่งจะท Pressure drop Packed bed
 มากยิ่งขึ้น

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu}{d^2} \frac{(1-\bar{\epsilon})^2}{\bar{\epsilon}^3} \bar{V} + 1.75 \frac{\rho}{d} \left(\frac{1-\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}^3} \right) \bar{V}^2 \quad (3.12)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu}{d^2} \frac{(1-\bar{\epsilon})^2}{\bar{\epsilon}^3} (C\bar{V}) + 1.75 \frac{\rho}{d} \left(\frac{1-\bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}^3} \right) (C\bar{V})^2 \quad (3.13)$$

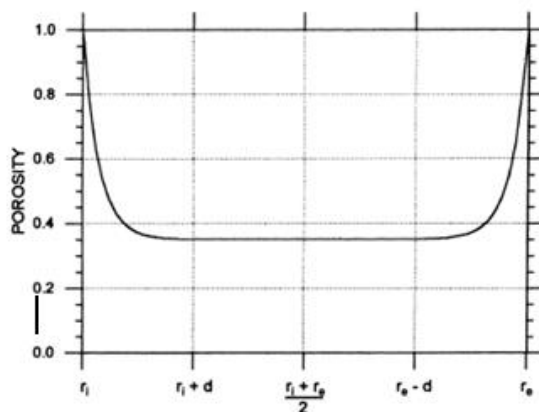
$$C = \frac{\bar{v}_c}{\bar{v}} = \frac{\bar{v}_{wi} A_{wi}}{\bar{v} A_b} + \frac{\bar{v}_t A_t}{\bar{v} A_b} + \frac{\bar{v}_{we} A_{we}}{\bar{v} A_b} \quad (3.14)$$

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่า packed bed แบบวงแหวนนั้นจะมีการพิจารณาผลของผนัง (Wall Effects) ที่มี
 (Porosity, V) (Velocity Distributions)
 3 (Internal Wall Region) (Transition
 Region) (External Wall Region) ดังรูปที่ 3.7 ซึ่งจากการแบ่งพิจารณา
 3 บริเวณดังกล่าวจะส่งผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 การแบ่งขอบเขตของผนังใน packed bed แบบวงแหวน

(Porosity Distributions) Packed bed แบบวงแหวนนั้น ถูกเสนอโดย Cohen and Metzner [20] จะเป็นไปตามรูปที่ 3.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริเวณใกล้กับผนัง ไม่ว่าจะเป็นผนังใน (Transition Region) Transition บริเวณที่มีความพรุนลงที่ไม่ขึ้นอยู่กัรัศมี (r) ต่ำ (Internal Wall Region) Exponential Equations ซึ่งเป็นการที่ Cheng and Hsu [27] ได้เสนอขึ้น เพื่ออธิบายการกระจายตัวของความ (Porosity Distributions) Annular bed



Internal Wall Region ; $r_i \leq r \leq r_i + d$
 Transition Region ; $r_i + d < r < r_e - d$
 External Wall Region ; $r_e - d < r < r_e$

รูปที่ 3.9

packed bed

$$\epsilon(r) = \epsilon_\infty [1 + C_1 e^{-C_2(r-r_i)/d}] \quad ; \quad r_i \leq r \leq \frac{r_e+r_i}{2} \quad (3.15)$$

$$\epsilon(r) = \epsilon_\infty [1 + C_1 e^{-C_2(r_e-r)/d}] \quad ; \quad \frac{r_e+r_i}{2} \leq r \leq r_e \quad (3.16)$$

โดยที่ coefficient C_1 สามารถหาได้จาก Infinite bed ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.3517 ซึ่ง Sato [28] ได้เสนอไว้

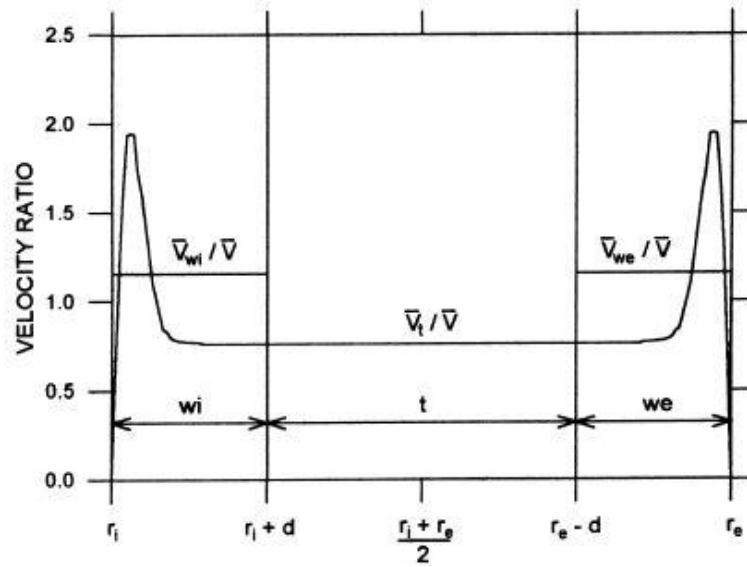
$$C_1 = \frac{1}{\epsilon_\infty} - 1 \quad (3.17)$$

$$C_2 = \frac{2C_1\epsilon_\infty d [1 - e^{-C_2(r_e-r_i)/2d}]}{(\bar{\epsilon} - \epsilon_\infty)(r_e - r_i)} \quad (3.18)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการ (3.15) และ (3.16) จะได้ค่าเฉลี่ยของ Porosity Profile ($\bar{\epsilon}$) จาก Annular bed ก็จะได้ความพรุนเฉลี่ย

$$\bar{\epsilon} = \epsilon_\infty \left\{ 1 + \frac{2C_1 d [1 - e^{-C_2(r_e-r_i)/2d}]}{C_2(r_e-r_i)} \right\} \quad (3.19)$$

(Flow Velocity Distributions) ใน Annular bed เมื่อแบ่งพิจารณาเป็น 3 ส่วน (Flow Velocity Distributions) (Wall Effect) (Porosity Profile) แสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่ง Flow Velocity Distributions นี้ได้มาจากการวิเคราะห์ของ Parang and Keynani [29], Hunt and Tien [30] and Poulikakos and Ranken [31] ซึ่ง velocity ratio ใน packed bed ซึ่งเมื่อพิจารณาจาก Porosity Profile รูปที่ 3.8 จะเห็นว่าบริเวณที่เกิดใน packed bed นั้นเนื่องจากการไหลที่ไม่สม่ำเสมอใน packed bed ดังนั้นเนื่องจากการ Superficial Velocity ที่อยู่ใน Ergun's Equation



รูปที่ 3.10

packed bed

(Velocity Ratio)

แยกเป็นช่วงๆ ดังนี้

Transition Region

ในบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ไม่มีผลของผนัง (Wall Effect)

ความเร็วเฉลี่ยตลอดทั้งช่วง (v_t/\bar{v}) สามารถ หา ได้

(3.20)

Transition

$$\frac{\bar{v}_t}{\bar{v}} = -K_1(1 - \bar{\epsilon}_t) + [K_1^2(1 - \bar{\epsilon}_t)^2 + K_2 \frac{\bar{\epsilon}_t^3}{1 - \bar{\epsilon}_t}]^{1/2}$$

(3.20)

โดย $K_1 = \frac{150}{3.5} \frac{1}{Re}$

(3.21)

$$K_2 = [1 + 2K_1(1 - \bar{\epsilon})] \frac{(1 - \bar{\epsilon})}{\bar{\epsilon}^3}$$

(3.22)

Internal Wall Region

ในบริเวณนี้เป็นบริเวณผิวของผนังใน ซึ่งได้รับอิทธิพลของ wall Effect (Porosity, v)
(Flow Velocity Distributions) Function ที่ขึ้นอยู่กับรัศมี (r)
Internal Wall Region ต่อ ความเร็วเฉลี่ยตลอดทั้งช่วง (\bar{v}_{wi}/\bar{v}) ส

ได้จาก สมการ (3.23)

$$\frac{\bar{v}_{wi}}{\bar{v}} = -K_1(1 - \bar{\epsilon}_{wi})M_{wi} + [K_1^2(1 - \bar{\epsilon}_{wi})^2M_{wi}^2 + K_2 \frac{\bar{\epsilon}_{wi}^3}{1 - \bar{\epsilon}_{wi}} \frac{1}{M_{wi}}]^{1/2} \quad (3.23)$$

โดย M_{wi} เป็น Parameter Mehta and Hawley ซึ่งหาได้จากสมการ (3.23)

$$M_{wi} = 1 + \frac{D_i}{6(D_i + d)(1 - \bar{\epsilon}_{wi})} \quad (3.24)$$

ค่า $\bar{\epsilon}_{wi}$ เป็นค่าความพรุนเฉลี่ยในช่วง Internal Wall Region ซึ่งหาได้จากสมการ (3.24)

$$\bar{\epsilon}_{wi} = \frac{1}{A_{wi}} \int_{r_i}^{r_i+d} \epsilon(r) 2\pi r dr \quad (3.25)$$

$$A_{wi} = \pi[(r_i + d)^2 - r_i^2] \quad (3.26)$$

External Wall Region

ในบริเวณนี้เป็นบริเวณผิวของผนังนอก ซึ่งได้รับอิทธิพลของ wall Effect (Porosity, v)
ของความเร็ว (Flow Velocity Distributions) Function ที่ขึ้นอยู่กับรัศมี (r)
ภายใน Internal Wall Region โดยอาศัยส่วนของ บริเวณ External Wall Region

เฉลี่ยตลอดทั้งช่วง (\bar{v}_{we}/\bar{v}) สามารถหาได้จากสมการ (3.27)

$$\frac{\bar{v}_{we}}{\bar{v}} = -K_1(1 - \bar{\epsilon}_{we})M_{we} + [K_1^2(1 - \bar{\epsilon}_{we})^2M_{we}^2 + K_2 \frac{\bar{\epsilon}_{we}^3}{1 - \bar{\epsilon}_{we}} \frac{1}{M_{we}}]^{1/2} \quad (3.27)$$

โดย M_{we} เป็น Parameter Mehta and Hawley ซึ่งหาได้จากสมการ (3.27)

$$M_{we} = 1 + \frac{D_e}{6(D_e - d)(1 - \bar{\epsilon}_{we})} \quad (3.28)$$

ค่า $\bar{\epsilon}_{we}$ เป็นค่าความพรุนเฉลี่ยในช่วง External Wall Region ซึ่งหาได้จากสมการ (3.28)

$$\bar{\epsilon}_{we} = \frac{1}{A_{we}} \int_{r_e-d}^{r_e} \epsilon(r) 2\pi r dr \quad (3.29)$$

$$A_{we} = \pi[r_e^2 - (r_e - d)^2] \quad (3.30)$$