

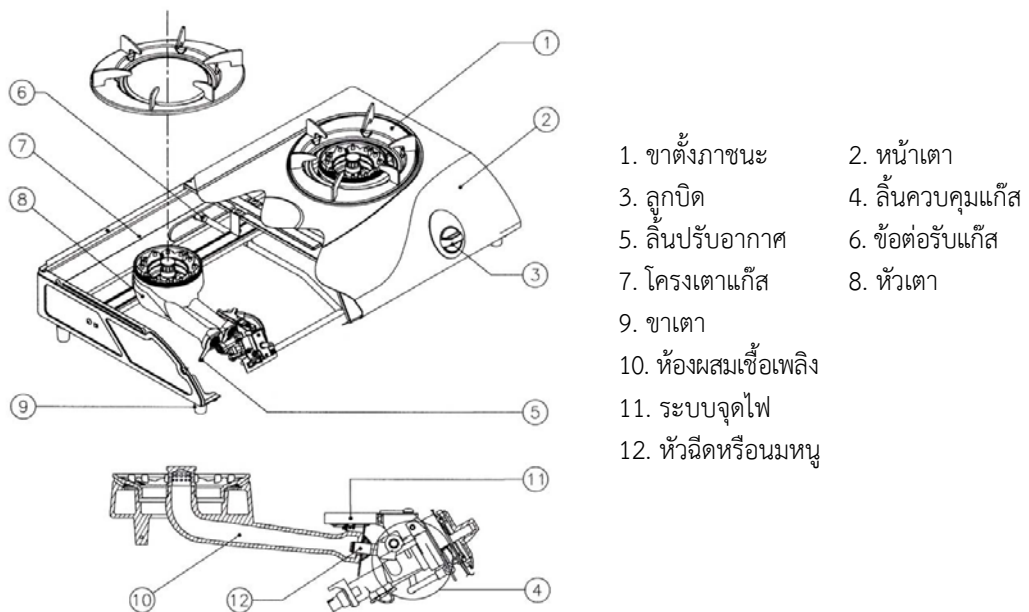
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 2.1.1 นิยามของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน

เตาหุงต้มในครัวเรือนใช้กับแก๊สปิโตรเลียมเหลว หรือเรียกโดยทั่วไปว่าเตาแก๊ส หุงต้มในครัวเรือนตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 [1] หมายถึง เตาหุงต้ม ซึ่งใช้ในครัวเรือนโดยใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิง มีปริมาณการใช้แก๊สสูงสุดของแต่ละหัวเตา จะต้องไม่เกิน 5.78 kW หรือ 0.42 kg/hr และรวมทุกหัวเตาต้องไม่เกิน 13.76 kW หรือ 1 kg/hr ซึ่งปริมาณการใช้แก๊สสูงสุดของแต่ละหัวเตาจะแตกต่างจากค่าที่ระบุได้ไม่เกินบวกลบร้อยละ 10 และมีความดันแก๊สไม่เกิน 280 mmH<sub>2</sub>O มีส่วนประกอบทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 2.1

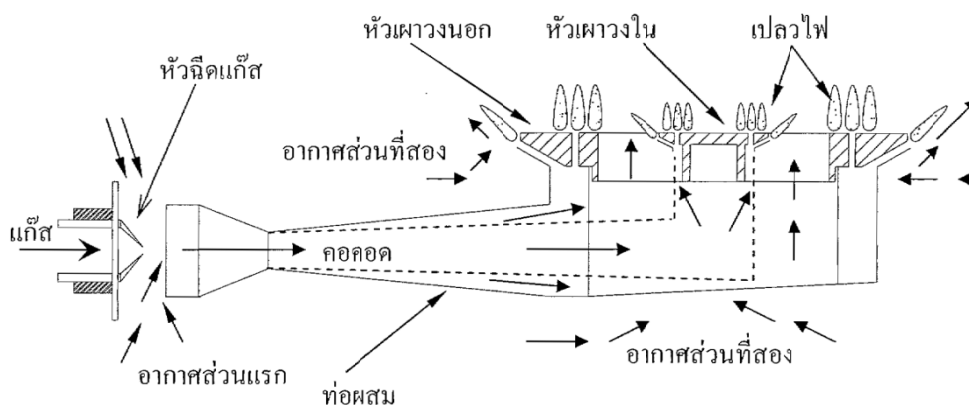


ภาพที่ 2.1 ส่วนประกอบทั่วไปของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน [1]

##### 2.1.2 หลักการทำงานของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน [1]

ส่วนประกอบหลักของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนมาตรฐานประกอบด้วย ส่วนหลัก ๆ สามส่วน คือ ท่อผสม (mixing tube) หัวเผา (burner head หรือ cap) และรูพ่นแก๊ส (injector orifice) ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ท่อผสมส่วนใหญ่ที่ทำจากเหล็กหล่อ ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะเป็นคอขวด (throat) ใกล้เคียงบริเวณทางเข้าของแก๊สและอากาศส่วนแรก (primary air) เพื่อผลทางด้านอากาศพลศาสตร์ของการไหลในท่อ โดยอาจมีมากกว่าหนึ่งท่อนก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับ การออกแบบเพื่อผลของ การปรับเปลี่ยนอัตราไหลของแก๊สหรือค่า Turn - down ratio

ของเตาหัวเผาส่วนใหญ่จะทำจากทองเหลือง มีรูปร่างได้หลายแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น อาจเป็นแผ่นวงกลมตัน (cap) หรือเป็นแผ่นวงแหวน (ring) และอาจมีจำนวนมากกว่าหนึ่งวงแหวนก็ได้ ที่ขอบวงแหวนด้านล่างตรงที่สัมผัสกับขอบท่อผสมทำเป็นบานูน และถูกเจาะเป็นร่อง ๆ จำนวนหลายร่องในแนวรัศมี เพื่อทำหน้าที่เป็น รูกระจายแก๊ส (burner port) และเปลวไฟที่ติดอยู่เหนือรูกระจายแก๊ส ให้กระทยอย่างสม่ำเสมอกับภาชนะหุงต้มที่จะวางอยู่เหนือหัวเผา



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของหัวเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน [1]

การทำงานของเตาแก๊สหุงต้มเริ่มจากแก๊สความดันต่ำที่ใช้งานตามปกติประมาณ 6.25 ถึง 70 mmH<sub>2</sub>O ถูกพ่นออกจากรูพ่นแก๊สเข้าไปในท่อผสม ขณะเดียวกันอากาศส่วนแรก (primary air) ที่อยู่บริเวณใกล้ ๆ จะถูกชักนำผ่านช่องอากาศส่วนแรก เข้าไปในท่อผสมพร้อม ๆ กับแก๊ส โดยอาศัยการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างแก๊สและอากาศโดยรอบ ด้วยวิธีการดังกล่าวอากาศส่วนแรกจะมีค่าประมาณ 50 – 70 % ของปริมาณอากาศที่จำเป็นเพื่อการเผาไหม้ที่สมบรูณ์ (stoichiometric air) และมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้อากาศส่วนแรกนี้มีค่าถึง 100 % ขึ้นอยู่กับความดันของแก๊สที่ใช้ จากนั้นส่วนผสมของอากาศส่วนแรกและแก๊สจะไหลผ่านรูพ่นแก๊สและถูกจุดประกายไฟ ซึ่งการจุดติดไฟที่เหมาะสม เช่น ใช้เปลวล้อ (pilot flame) หรือการ spark ขณะเดียวกันอากาศส่วนที่สอง (secondary air) ซึ่งจะถูกระบายเข้ามาจากทางด้านข้างเปลวไฟ และจากด้านล่างของหัวเผา ซึ่งทำเป็นช่องว่างไว้ระหว่างหัวเผากับวงแหวน โดยอาศัยการถ่ายเทโมเมนตัมและแรงลอยตัวของแก๊สร้อนที่จะขยายตัวและลอยสูงขึ้น ช่วยทำให้อากาศโดยรอบที่เย็นกว่าถูกดูดเข้ามาผสมกับเปลวไฟได้มากขึ้นและส่งผลให้เกิดการเผาไหม้สมบรูณ์ดียิ่งขึ้น

### 2.1.3 ชนิดของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน [3]

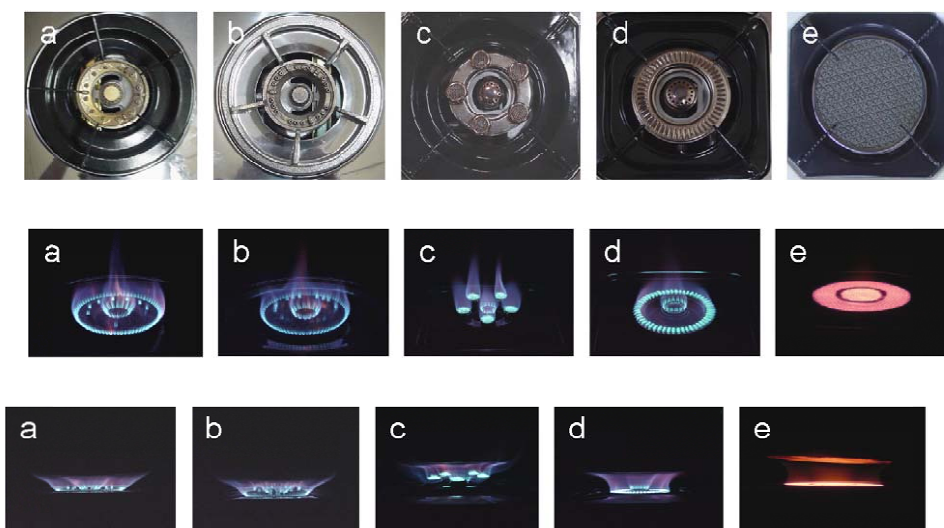
เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมีหลายชนิดโดยส่วนใหญ่แบ่งตามลักษณะของหัวเตาได้ดังนี้คือ

1) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบมาตรฐาน radial slotted ports เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในตลาด ดังแสดงในภาพที่ 2.3a และ 2.3b

2) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบ vertical ports เริ่มมีวางขายในท้องตลาดแต่ยังใช้ไม่แพร่หลายนักดังแสดงในภาพที่ 2.3c

3) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบ whirl pots เริ่มมีวางขายในท้องตลาด แต่ยังไม่แพร่หลายนักดังแสดงในภาพที่ 2.3d

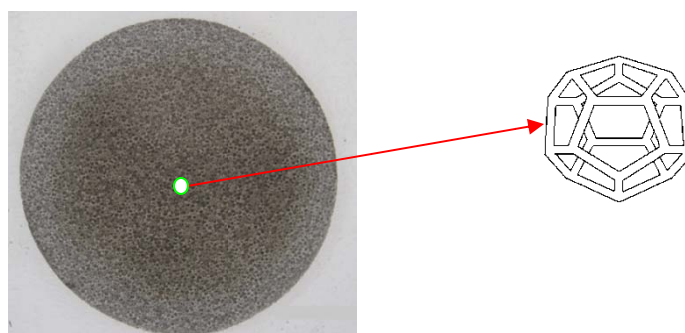
4) เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนแบบ porous ceramic มีการใช้งานค่อนข้างน้อย ทำงานโดยอาศัยการแผ่รังสีความร้อน เหมาะกับงานเฉพาะอย่าง เช่น ปิ้ง ย่าง เป็นต้น แต่ราคาค่อนข้างแพงดังแสดงในภาพที่ 2.3e



ภาพที่ 2.3 หัวเตาแก๊สหุงต้มและลักษณะของเปลวไฟของหัวเตาแก๊สชนิดต่าง ๆ [3]

#### 2.1.4 คุณสมบัติของวัสดุพอร์น และวัสดุพอร์นชนิดเซลล์ลาร์เปิด

วัสดุพอร์นที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้นั้นเป็นวัสดุพอร์นเซลล์ลาร์เปิดชนิดโลหะผสมชนิดนิกเกิล – โครม (Nickel – Chrome, Ni-Cr) ดังแสดงในภาพที่ 2.4 [4] และสมบัติทางกายภาพแสดงไว้ในตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.4 วัสดุพอร์นแบบเซลล์ลาร์เปิดชนิด นิกเกิล-โครม (Ni-Cr)

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุพรุน [4]

| Material | Porosity, $\phi$ | PPI  | $x_0$ | $\tau$ | $\beta$ ( $m^{-1}$ ) |
|----------|------------------|------|-------|--------|----------------------|
| Ni-Cr    | 0.951            | 23.5 | 10 cm | 2.932  | 287.5                |

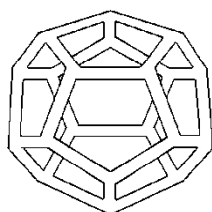
จากตารางที่ 2.1 จพบพบว่าตัวแปร  $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญสลาย (extinction coefficient) หมายถึง ค่าของความสามารถในการกระเจิงรังสีความร้อน (radiation scattering) และการดูดซับรังสีความเข้ม (radiation absorption) สำหรับวัสดุพรุนชนิดเซลล์ลูนาร์เปิดสามารถหาได้จากแบบจำลองของ Kamiuto [5] ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ส่งผลให้มีการคำนวณหาค่า  $\beta$  ดังนี้

$$\beta = \frac{\pi}{4} \left[ \frac{6}{\pi} \right]^{\frac{2}{3}} w^2 + \frac{4w}{\sqrt{\pi}} (1-w) / [D_c (1-w)] \quad (2.1)$$

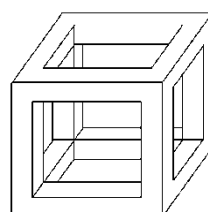
$$w = 0.5 + \cos \left[ \frac{1}{3} \cos^{-1} (2\phi - 1) + \frac{4}{3} \pi \right] \quad (2.2)$$

$$D_c = 0.0254 / PPI \quad (2.3)$$

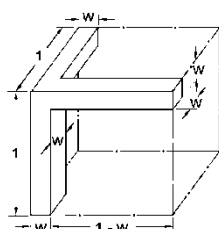
เมื่อ  $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์การสูญสลาย (extinction coefficient),  $w$  คือ ความกว้างไร้หน่วยของพื้นที่หน้าตัดแท่งค่าเซลล์ของเซลล์เปิด (dimensionless width of a strut with a square cross section), PPI คือ จำนวนรูพรุนต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (pores per inch, PPI) และ  $D_c$  หมายถึง เส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์สมมุติ (nominal cell diameter, m)



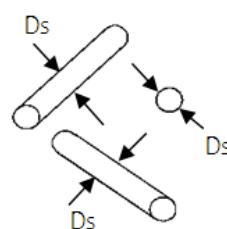
(ก) ผลึกแบบห้าเหลี่ยมสิบสองหน้า (pentagonal dodecahedron)



(ข) ผลึกเซลล์หนึ่งหน่วย (Unit cell)



(ค) รูปแบบการจัดแบ่งเซลล์แบบใหม่



(ง) แท่งค้ำและจุดต่อสมมูลการแผ่รังสีกระจาย (equivalent strut scattered)

ภาพที่ 2.5 ขั้นตอนการจัดรูปแบบโครงสร้างเซลล์ของโฟมเซลล์เปิดที่มีผลต่อการแผ่รังสี [5]

พิจารณาภาพที่ 2.5(ก) เซลของวัสดุพูนชนิดเซลล์ลาร์เปิด (open-cellular porous material) จะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบห้าเหลี่ยมสิบสองหน้า ทำให้ง่ายต่อการนำไปคำนวณ ดังนั้น Kamiuto [5] จึงเปลี่ยนโครงสร้างแบบห้าเหลี่ยมสิบสองหน้าให้เป็นแบบเซลล์หนึ่งหน่วย (unit cell) ตามหลักการของดูลเนฟ (Dul'nev model) ดังภาพที่ 2.5(ข) ด้วยรูปร่างแบบนี้ส่งผลทำให้พื้นที่ที่มีอิทธิพลต่อการแผ่รังสีความร้อนมีเพียงแท่งค้ำ 3 แท่ง เท่านั้น ดังภาพที่ 2.5(ค) อย่างไรก็ตามในการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุพูนชนิดเซลล์ลาร์เปิดนี้ โดยทั่วไปจะกำหนดในรูปของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของแท่งค้ำ (equivalent strut diameter, DS) ดังนั้นเพื่อให้สะดวกต่อการเลือกใช้และคำนวณ จึงเปลี่ยนให้เป็นรูปทรงกระบอก สำหรับแท่งค้ำทรงกระบอกในตำแหน่งแนวตั้ง พื้นที่หน้าตัดของแท่งค้ำเท่านั้นที่มีผลต่อรังสีตกกระทบที่แผ่เข้ามายังโครงสร้างแบบนี้ จึงกำหนดให้แท่งค้ำในแนวตั้ง คล้ายเป็นจตุรรมหรือมีรูปร่างเป็นทรงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ  $D_s$  ดังแสดงในภาพที่ 2.5(ง)

สำหรับตัวแปร  $\tau$  ที่ปรากฏในตารางที่ 2.1 เช่นเดียวกับตัวแปร  $\beta$  คือ ความหนาเชิงแสง (Optical thickness) เป็นเทอมไร้หน่วยของค่าสัมประสิทธิ์การลื่นสูญ โดยพิจารณาแค่เพียงความหนาทางกายภาพ (physical thickness,  $x_0$ ) ของวัสดุพูน ซึ่งคำนวณจาก

$$\tau = \beta x_0 \quad (2.4)$$

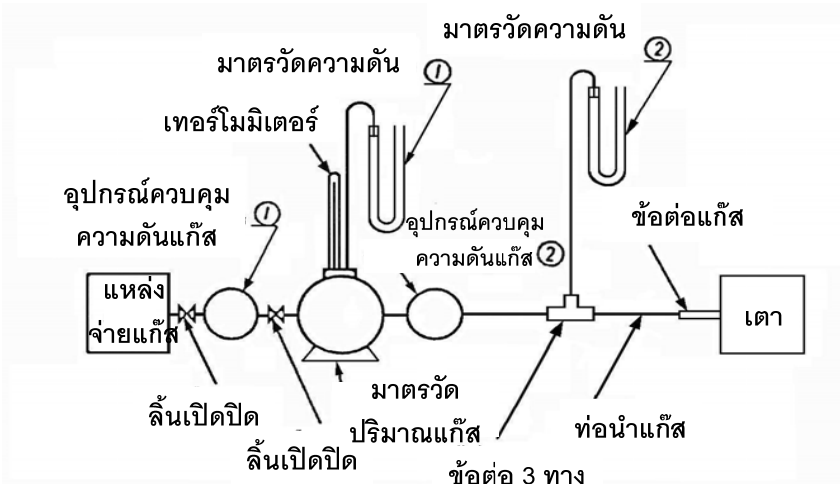
### 2.1.5 การหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (Thermal efficiency, $\eta_{th}$ )

การหาค่าประสิทธิภาพของเตาแก๊สหุงต้มตามมาตรฐาน DIN EN 203-2, EN 203-1: 1992 หรือ EN 203-2: 1995 ต่างก็ใช้หลักการทดสอบโดยการต้มน้ำ (boiling Test) ทั้งสิ้น โดยในประเทศไทยเองได้กำหนดวิธีการทดสอบประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือน โดยใช้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 2312-2549 ซึ่งใช้หลักการ boiling test เช่นกัน โดยมีรายละเอียดการทดสอบ คือ ก่อนการทดสอบต้องต่อเตาแก๊สเข้ากับมาตรปริมาณแก๊ส มาตรความดันแก๊ส อุปกรณ์ควบคุมความดันแก๊ส มาตรอุณหภูมิแก๊สและแหล่งจ่ายแก๊สให้เรียบร้อย ดังภาพที่ 2.6 ขั้นแรกติดเตาโดยเปิดเตาในอัตราการใช้แก๊สสูงสุด เป็นเวลา 15 นาที จึงปิดเตา หลังจากนั้นวางหม้ออะลูมิเนียมซึ่งใส่น้ำพร้อมฟาเทอร์โมคัปเปิลบนเตาแก๊ส ติดเตาในอัตราการใช้แก๊สสูงสุดต้มจนน้ำ จากอุณหภูมิเริ่มต้น  $30^\circ\text{C}$  ต้มจนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น  $90^\circ\text{C}$  ให้ปิดแก๊สและทำการกวนต่อไปจนได้อุณหภูมิสูงสุด วัดค่าการใช้แก๊สระหว่างการทดสอบและค่าต่าง ๆ และบันทึกผลนำค่าที่ได้จากการทดสอบแทนลงในสูตรการคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อน [1]

$$\eta_{th} = \left\{ \frac{m \times C \times (T_2 - T_1)}{V \times LHV} \times \frac{273 + T_g}{298} \times \frac{101.3}{B + P_m - S} \right\} \times 100 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของน้ำที่ใช้ในการทดสอบ (kg),  $C$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำที่ใช้ทดสอบ ซึ่งเท่ากับ  $4.186 \times 10^{-3} \text{ MJ/kg} \cdot \text{K}$ ,  $T_1$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ ( $^\circ\text{C}$ ),  $T_2$  คือ อุณหภูมิสุดท้าย

ของน้ำ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $V$  คือ ปริมาณของแก๊สที่ใช้ทดสอบ ( $\text{m}^3$ ), LHV คือ ค่าความร้อนทางต่ำของแก๊สทดสอบที่ใช้ ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ) ที่ความดัน 101.3 kPa และอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $T_g$  คือ อุณหภูมิของแก๊สทดสอบในมาตรวัด ปริมาณแก๊สในระหว่างทดสอบ ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $B$  คือ ความดันบรรยากาศในขณะทดสอบ (kPa),  $P_m$  คือ ความดันของแก๊สทดสอบในมาตรวัดปริมาณแก๊สในระหว่างทดสอบ (kPa) และ  $S$  คือ ความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่  $T_g$  (kPa) หาได้จากตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.6 การทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อน [1]

ตารางที่ 2.2 ค่าความดันของไอน้ำอิ่มตัวที่  $T_g$   $^{\circ}\text{C}$  [1]

| อุณหภูมิ<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | ความดัน (S)<br>(kPa) | อุณหภูมิ<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | ความดัน (S)<br>(kPa) |
|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| 0.15                               | 0.661                | 52                                 | 13.51                |
| 2                                  | 0.697                | 57                                 | 17.19                |
| 7                                  | 0.990                | 62                                 | 21.67                |
| 12                                 | 1.387                | 67                                 | 27.13                |
| 17                                 | 1.917                | 72                                 | 33.13                |
| 22                                 | 2.617                | 77                                 | 41.63                |
| 27                                 | 3.531                | 82                                 | 51.00                |
| 32                                 | 4.712                | 87                                 | 62.09                |
| 37                                 | 6.221                | 92                                 | 75.14                |
| 42                                 | 8.132                | 97                                 | 90.40                |
| 47                                 | 10.530               | 100.15                             | 101.33               |

### 2.1.6 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน

เตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีการเผาไหม้แบบเปิดจึงไม่สามารถนำความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้มาใช้ประโยชน์อย่างเต็มที่ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังภาชนะถูกจำกัดโดยการพาความร้อน (Convection) เป็นส่วนใหญ่ จึงทำให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนไม่สูงเท่าที่ควรโดยจะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50 ดังนั้นจึงมีความพยายามในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้มในหลายรูปแบบหรือหลายวิธีการโดยอาศัยอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งทุกรูปแบบหรือทุกวิธีการ อยู่บนแนวความคิดและหลักการใหญ่ ๆ เพียงสามประการคือ

#### 1) ลดการสูญเสียความร้อน [6]

เนื่องจากการเผาไหม้ของเตาแก๊สหุงต้มในครัวเรือนเป็นการเผาไหม้แบบเปิด จึงมีการสูญเสียความร้อนจำนวนมากไปกับแก๊สไอเสียโดยการพาความร้อน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน ต้องลดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน จากแนวคิดดังกล่าว กระทรวงพลังงานจึงประดิษฐ์ฝาครอบแก๊สประสิทธิภาพสูง [6] ดังภาพที่ 2.7 เพื่อลดการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อน โดยมีลักษณะและการใช้งานคือ ทำจากเหล็กใช้ครอบหัวเตาแก๊ส และเป็นขาตั้งภาชนะแทนที่ขาตั้งภาชนะเดิมที่ติดตั้งมากับเตาแก๊สหุงต้ม มีขนาดความสูง 8 cm ความกว้างวงนอก 30 cm ความกว้างวงใน 24 cm จากการทดสอบของกระทรวงพลังงานพบว่าทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 15 ซึ่งสามารถใช้ติดตั้งได้กับเตาแก๊สหุงต้มทั่วไป สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

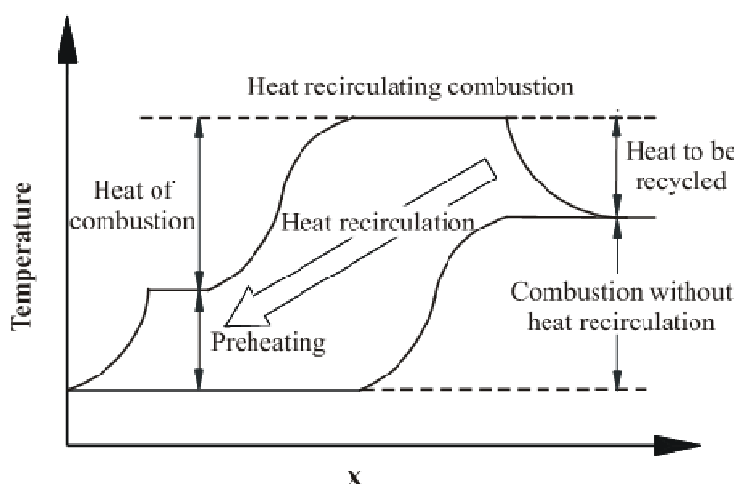


ภาพที่ 2.7 ฝาครอบแก๊สประสิทธิภาพสูง [6]

#### 2) อุ่นอากาศ

การอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ อาศัยหลักการการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (heat-recirculating combustion) [7] ดังภาพที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ระหว่างระบบที่มีและไม่มีการหมุนเวียนความร้อน เมื่อพิจารณากรณีที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน อากาศไหลเข้าทางด้านซ้ายมือของระบบ ผสมคลุกเคล้ากับเชื้อเพลิงและเกิดการเผาไหม้ โดยได้อุณหภูมิการเผาไหม้ปกติ ซึ่งแก๊สไอเสียจากการเผาไหม้จะไหลออกจากระบบทางด้านขวามือ โดยไม่มีการนำความร้อนจากแก๊สไอเสียมาหมุนเวียนใช้ในกระบวนการ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนจากแก๊สไอเสียมาอุ่นอากาศ (preheat)

ให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องก่อนเข้าสู่การเผาไหม้ ทำให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าปกติ ที่สภาวะเดียวกัน ซึ่งส่งผลทำให้การเผาไหม้ที่ได้มีความสมบูรณ์มากกว่าระบบการเผาไหม้ปกติ (conventional combustion) นอกจากนี้ยังทำให้ได้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (burning velocity) หรือความเร็วในกระบวนการเผาไหม้ระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงเร็วขึ้นและให้ความเข้มข้นการเผาไหม้สูง (high combustion intensity) นอกจากนี้ระบบการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน ยังช่วยขยายขอบเขตการเผาไหม้ได้ (flammability limits) กว้างขึ้น ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำมาก ๆ ซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ในอุปกรณ์เผาไหม้แบบปกติได้

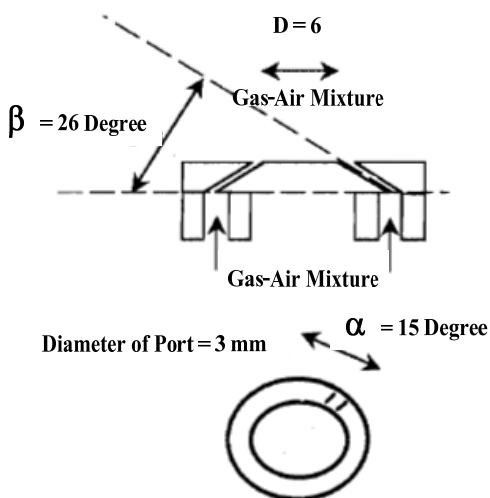


ภาพที่ 2.8 การเปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ชนิดที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน [7]

### 3) ปรับปรุงลักษณะการฉีดแก๊สของหัวเตา

การปรับปรุงลักษณะการฉีดแก๊สของหัวเตา ทำได้โดยการปรับปรุงจากหัวเตาแบบเดิม (conventional burner) เปลี่ยนมาเป็นหัวเตาที่มีการหมุนวนดังภาพที่ 2.9 พบว่า swirl burner ที่ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดมีลักษณะเฉพาะคือ มุมเงย ( $\beta$ ) เท่ากับ 26 องศา มุมเอียง ( $\alpha$ ) เท่ากับ 15 องศา โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มขึ้นเฉลี่ยประมาณร้อยละ 6 ซึ่งเป็นผลจากการหมุนวนของเปลวไฟ โดยแรงเฉื่อยขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดผลดีต่อการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อน คือเพิ่มระยะเวลาในการผสมของเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มากขึ้น เพิ่มเวลา และผิวสัมผัสในการสัมผัสของเปลวไฟกับภาชนะ ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และเพิ่มการดึงดูดอากาศส่วนที่สอง (secondary air) ทำให้การเผาไหม้สมบูรณ์มากขึ้น

จากการพิจารณาหลักการปรับปรุงลักษณะการฉีดแก๊ส สรุปได้ว่าเป็นหลักการที่เน้นการปรับปรุงการไหลของอากาศส่วนที่สอง (secondary air) ที่จะใช้ในการเผาไหม้และปรับเปลี่ยนให้เหมาะสม นั่นเอง



ภาพที่ 2.9 หัวเผาไหม้ที่มีการหมุนวน (swirl burner) [8]

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Yoshizawa และ Echigo [9] ได้ทำการศึกษาดังผลของการแผ่รังสีในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้วัสดุพรุน (Porous medium) เป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อนและพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานการแผ่รังสีความร้อน จุดประสงค์ในงานวิจัยนี้ ก็เพื่อที่จะพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (radiant heater) ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นโดยการพยายามทำให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถที่จะเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมดไปเป็นพลังงานการแผ่รังสีความร้อนโดยอาศัยหลักการของวัสดุพรุน ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วยส่วนหลัก ๆ 2 ส่วนคือ หัวพ่นไฟ (burner) และ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ซึ่งจากการทดลองทำให้ทราบว่าอุณหภูมิภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (radiant heater) นั้น โดยส่วนใหญ่ จะถูกควบคุมโดยการแผ่รังสีความร้อนจากตัวของวัสดุพรุน ดังนั้นจากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ไปเป็นพลังงานการแผ่รังสีความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (radiant heater) นี้ จะมีค่าเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดถึง 88%

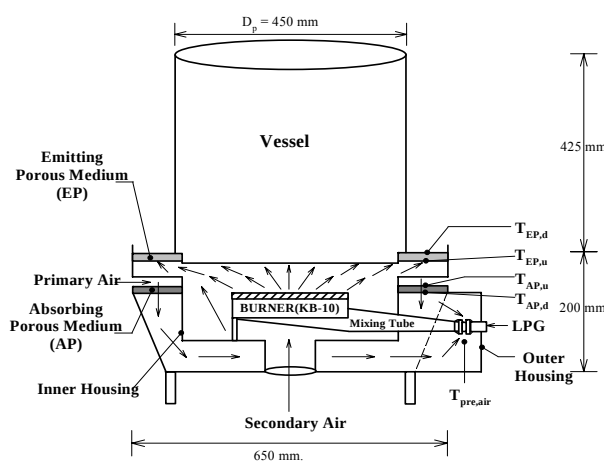
Jugjai และ Sanijai [10] ได้ทำการศึกษาดังปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพทางความร้อนใน Porous Radiant Recirculated Burner (PRRB) โดยที่ในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะปรับปรุงให้เตาแก๊สหมุนวนที่ใช้ในครัวเรือนทั่ว ๆ ไปให้มีประสิทธิภาพทางความร้อนเพิ่มขึ้นโดยการทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ภายในเตามีค่าสูงขึ้นควบคุมให้มีการหมุนเวียนของพลังงานความร้อนจากไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้น่ากลับมาอุ่น (Preheat) อากาศก่อนที่จะเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงภายในห้องเผาไหม้โดยอาศัยหลักการของการแผ่รังสีความร้อนของวัสดุพรุน ในการทดลองนี้ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิของอากาศที่จะเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ที่มีการอุ่น อากาศก่อนจะมีค่าสูงถึง 210°C และผลของการอุ่นอากาศที่จะเข้ามาผสมกับเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้นั้นยังพบว่าการอุ่นอากาศ

ที่อากาศปฐมภูมิ (primary air) นั้นทำให้เตา PRRB มีประสิทธิภาพสูงกว่าการอุ่นอากาศที่อากาศทุติยภูมิ (secondary air) ซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิของอากาศปฐมภูมิสูงกว่าอากาศทุติยภูมิ ดังนั้นในการอุ่นอากาศที่จะเข้าผสมกับเชื้อเพลิงที่อากาศปฐมภูมิจะมีความสำคัญมากกว่าการอุ่นอากาศที่อากาศทุติยภูมิและจากการทดลองจึงได้ข้อสรุปว่าเตาแก๊สแบบ PRRB จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเตาแก๊สที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไปในปัจจุบันเนื่องจากในเตาชนิดนี้จะมีการอุ่นอากาศให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนการเผาไหม้ ซึ่งจากหลักการนี้เองทำให้เราสามารถที่จะพัฒนา เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเตาแก๊สหุงต้มที่ใช้กันภายในครัวเรือนได้ต่อไป

วิเชียร ตรีเวชอักษร [11] ศึกษาทฤษฎีการเผาไหม้ รวมถึงการเผาไหม้ของเตาหุงต้ม LPG เพื่อพัฒนาและปรับปรุงเตาหุงต้มแอลพีจีแบบมาตรฐาน (conventional burner, CB) ให้เป็นแบบ swirling burner พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นกว่าเดิม โดยอาศัยผลของการ swirl burner เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพาและเหนี่ยวนำอากาศส่วนที่สอง (secondary air) รวมถึงการเก็บกลับความร้อนด้วยระบบอุ่นอากาศและการปรับปรุงฐานตั้งภาชนะให้เหมาะสมและมีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เตาหุงต้มแอลพีจีแบบมาตรฐานเป็นต้นแบบในการศึกษา โดยในการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนอ้างอิงตามมาตรฐานอังกฤษ (BS 2491) จากการทดลองพบว่า เตาหุงต้มที่ใช้โดยทั่วไปเป็นเตาแบบ radial flow slotted-burner มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ประมาณ 35% ตลอดช่วงการใช้งาน แต่เมื่อปรับเปลี่ยนมาใช้หัวเตาแบบ Swirl burner พบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 51% ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนวนก่อให้เกิดผลดีในการเผาไหม้ และถ่ายเทความร้อนดังนี้ คือ เพิ่มปริมาณอากาศส่วนที่สองให้มากขึ้น เพิ่มเวลาในการเผาไหม้และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าของเตาแบบเดิม จึงเป็นผลให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้น โดยการใช้ฐานตั้งภาชนะที่มีน้ำหนักเบา การเพิ่มระบบอุ่นอากาศส่วนที่สอง และระบบหมุนเวียนความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนกลับสู่ภาชนะพบว่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเพิ่มสูงขึ้นอีก 3-4% อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดลองไม่ได้มีการตรวจวัดปริมาณมลพิษที่ปล่อยจากการเผาไหม้ ทำให้ไม่ทราบประสิทธิภาพการเผาไหม้และความปลอดภัยในการใช้งานของเตาชนิดนี้

ณัฐวุฒิ รังสิมันตุชาติ [12] ได้นำเอาเทคโนโลยีวัสดุพูนมาประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สหุงต้ม แสดงในภาพที่ 2.10 เนื่องจากวัสดุพูนมีลักษณะเด่นคือ สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับความร้อนและตัวแผ่รังสีความร้อนจึงสามารถใช้เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดลองใช้หัวเตาฟู่ KB - 10 ที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดมาประกอบเข้ากับโครงสร้างของเตาที่ทำขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน จากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 12 และคิดเป็นอัตราการประหยัดโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 เมื่อเปรียบเทียบกับเตา KB - 10 ที่ใช้กันอยู่ทั่ว ๆ ไป และในการทดลองนี้ยังได้มีการพัฒนาให้เตาแก๊สหุงต้มนี้มีค่าประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นไปอีกโดยการปรับปรุงหัวเผาให้เปลวไฟที่พุ่งออกมีลักษณะของการหมุนวนเข้าสู่ศูนย์กลาง และจากการทดลองพบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นได้โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 20 เมื่อเปรียบเทียบกับเตาแบบ swirl burner ที่ยังไม่ได้มีการประกอบเข้ากับโครงสร้างที่ออกแบบไว้

และเมื่อเปรียบเทียบกับเตา KB - 10 ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนให้สูงขึ้นโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 30 และคิดเป็นอัตราการประหยัดโดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 51 จากการทดลองของ ณัฐวุฒิ จะศึกษาเฉพาะหัวเตาวงนอกเท่านั้น (ลักษณะทั่วไปของเตาแก๊สขนาด KB - 10 จะมีหัวเตา 2 วง คือวงในและวงนอก) ซึ่งหัวเตาวงในยังคงเป็นหัวเตาแบบ CB อยู่ และยังไม่ได้มีการศึกษาถึงระยะห่างรูแก๊สออก รวมไปถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูแก๊สออก ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของเปลวไฟ และการคิดประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะเป็นตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งจะได้มองถึงคุณภาพของพลังงานที่นำมาใช้หมุนเวียนความร้อน



ภาพที่ 2.10 เตาแก๊สประสิทธิภาพสูงของ ณัฐวุฒิ รังสมันตุชาติ [12]

Dong และคณะ [13] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างหัวเผากับกันภาชนะ (H) ที่เหมาะสมกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเผา (d) ซึ่งหัวเผาที่นำมาใช้ทดสอบเป็นแบบ slot จำนวน 1 หัวเผา โดยเงื่อนไขการทดลองจะทำการปรับค่า Reynolds number (Re) จาก 800 ถึง 1,700 และปรับระยะ H จาก  $2d_e$  ถึง  $12d_e$  โดยใช้เชื้อเพลิง บิวเทน พบว่าที่ตำแหน่ง  $H/d = 6$  จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีที่สุด และที่บริเวณแกนกลางของเปลวไฟจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำเนื่องจากตรงแกนกลางไม่เกิดการเผาไหม้ (cool central core) ซึ่งจะเกิดเหตุการณ์ลักษณะนี้สองกรณี คือ  $Re < 1,500$  หรือที่ระยะ  $H/d_e < 4$

Dong และคณะ [14] ทำการศึกษาเหมือนกับ [13] แต่ว่าเปลี่ยนจำนวนหัวเผาจาก 1 หัว มาเป็น 2 หัว โดยจะพบว่านอกจากระยะ H ที่มีผลกระทบท่ออัตราการถ่ายเทความร้อนแล้วยังมีระยะห่างระหว่างทางออกของแก๊ส (Jet-to-Jet Spacing, S) ซึ่งมีผลกระทบท่ออัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยเช่นกัน โดยในการทดลองจะทำการปรับเปลี่ยนค่า  $S/d_e$  จาก 0.9 ถึง 4.1 และค่า  $H/d_e$  จาก 1 ถึง 6 และค่า  $Re = 800$  คงที่ตลอดการทดลอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าที่  $S/d_e = 2$  และ  $H/d_e = 1$  จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด และอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยจะลดลงเมื่อ  $H/d_e$  เพิ่มขึ้น

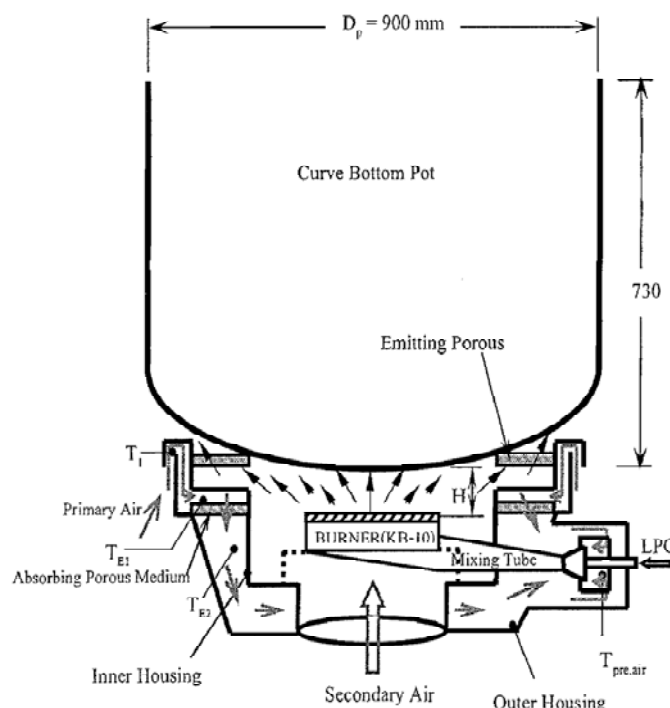
Dong และคณะ [15] ก็ยังทำการศึกษาเกี่ยวกับค่า  $H/d$  และ  $S/d$  เหมือนกับ [14] แต่จะทำการเปลี่ยนลักษณะของหัวเผาจาก slot มาเป็นท่อกลม และเพิ่มจำนวนหัวเผาจากเดิม 2 หัวเผา มาเป็น 3 หัวเผา พบว่าที่  $H/d = S/d = 5$  จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด และที่  $H/d = 2$  และ  $S/d = 2.6$  จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยต่ำสุดและนอกจากนี้ยังพบว่า ที่ตำแหน่งเปลวไฟตรงกลางที่ชนกับกันภาชนะจะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงกว่าเปลวไฟ ที่มีหัวเผาเดียวซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าถ้าเป็นหัวเผหลาย ๆ หัว จะมีการส่งเสริมการเผาไหม้ระหว่าง หัวเผา ซึ่งจะช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นมากกว่าหัวเผาเดียว

Dong และคณะ [16] ดำเนินงานวิจัยที่เหมือนกับ [15] แต่ต่างกันที่จำนวนหัวเผา โดยจะมีจำนวนลดลงจาก 3 หัวเผาเป็น 2 หัวเผา พบว่าที่  $S/d$  น้อย ๆ ( $S/d = 2.6$ ) เปลวไฟที่จะรวมตัวกันเป็นเปลวเดี่ยวแทนที่จะเป็น 2 เปลวตามจำนวนหัวเผา ซึ่งให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยนั้นลดลง อันเนื่องมาจากการขาดหายไปของการส่งเสริมการเผาไหม้ แต่ถ้า  $S/d$  เพิ่มมากขึ้น ( $S/d = 6$  ถึง  $10$ ) จะทำให้เปลวไฟจะแยกออกจากกัน และมีการส่งเสริมการเผาไหม้ระหว่างเปลวไฟด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นและเมื่อ  $H/d$  มีค่าน้อย ๆ ( $H/d = 2$ ) จะให้การส่งเสริมการเผาไหม้โดนทำลาย แต่จะดีขึ้นเมื่อเพิ่ม  $H/d$  โดยที่  $H/d = 6$  จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยสูงสุด แต่เมื่อเพิ่ม  $H/d$  มากกว่า 6 ขึ้นไป ( $H/d = 7$ ) จะให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยลดลง

X.Q. Huang และคณะ [17] ศึกษา heat flux บนแผ่น plate ของเปลวไฟ ทรงกระบอกชนิดผสมกันมาก่อนพุ่งชนแผ่น plate โดยทำการปรับปรุงเปลวไฟให้เป็นแบบหมุนวน ใช้ butane เป็นเชื้อเพลิง ค่า  $Re$  อยู่ในช่วง  $800 - 1,700$  ซึ่งเป็นการไหลแบบ laminar,  $\phi$  เป็น 1 ระยะระหว่าง nozzle ถึง plate ( $z$ ) ตั้งแต่  $1.5 - 4$  จากการศึกษาพบว่าค่า heat flux ที่กระจายตัว อยู่บนแผ่น plate จะ uniform มากกว่า ที่ทุกค่าของ  $z$  และค่า  $Re$  ต่าง ๆ และยังพบว่าที่ตำแหน่ง stagnation point จะให้ค่า heat flux ที่สูงเมื่อเทียบกับเปลวไฟที่ไม่หมุนวน

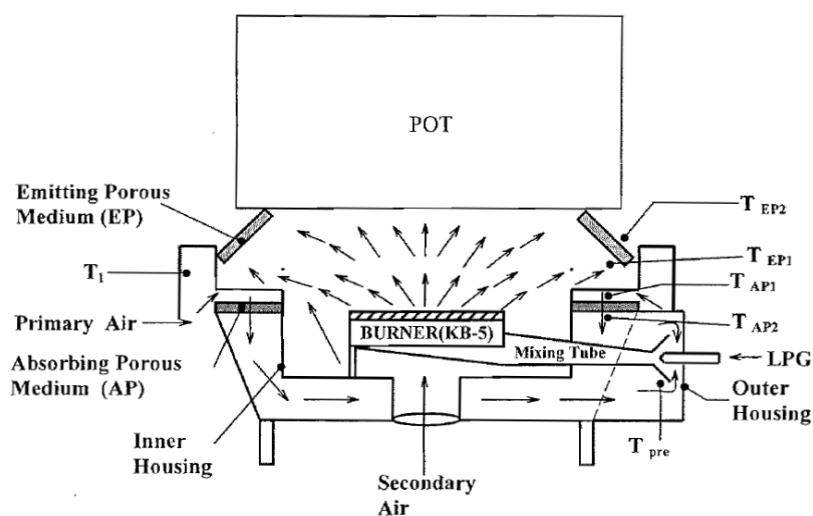
วสันต์ โยคเสนะกุล [18] นำแนวทางจาก ญัฐติ รังสิมันตุชาติ [12] มาพัฒนาต่อ โดยการศึกษาในครั้งนี้ จะใช้เตาแก๊สขนาด KB – 10 ที่มีขายในท้องตลาดมาทำการดัดแปลงหัวเผาจาก CB เป็น SB แล้วนำมาประกอบเข้ากับโครงสร้างที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Porous Radiant Recirculated Burner, PRRB) ดังแสดงในภาพที่ 2.11 จากการทดลองพบว่าหัวเผาแบบ CB มีระยะห่างระหว่างหัวเผากับกันภาชนะ ( $H$ ) ที่เหมาะสมอยู่ที่  $63.5 \text{ mm}$  ( $2.5 \text{ in}$ ) ในทุก ๆ ภาพร่าง ภาชนะโดย  $\eta_{th}$  สูงสุดของภาชนะกันโค้ง ภาชนะกันแบน และกระทะ อยู่ที่ร้อยละ 33.24, 35.83 และ 31.01 ตามลำดับ และเมื่อเปลี่ยนเป็น PRRB (SB) ซึ่งมีระยะ  $H$  ของแต่ละภาชนะไม่เท่ากัน โดยภาชนะกันโค้งมี  $H = 127 \text{ mm}$  ( $5 \text{ in}$ )  $\eta_{th}$  สูงสุดร้อยละ 45.02 ภาชนะกันแบนมี  $H = 165 \text{ mm}$  ( $6.5 \text{ in}$ )  $\eta_{th}$  สูงสุด ร้อยละ 44.27 และกระทะมี  $H = 114.3 \text{ mm}$  ( $4.5 \text{ in}$ )  $\eta_{th}$  สูงสุดร้อยละ 43.38 ซึ่งพบว่า  $\eta_{th}$  ของ PRRB (SB) เพิ่มขึ้นในทุก ๆ ภาชนะ เนื่องจากอิทธิพลของการหมุนเวียนความร้อน และปริมาณ CO ต่ำสุดของ PRRB (SB) ของทุก ๆ ภาชนะโดยภาชนะกันโค้งมี  $CO = 72.72 \text{ ppm}$  ภาชนะกันแบนมี  $CO = 140.3 \text{ ppm}$  และ PRRB (SB) มีการประหยัดพลังงานสูงสุดที่ร้อยละ 30.65 ของภาชนะกันโค้ง ภาชนะกันแบนประหยัดพลังงานสูงสุดร้อยละ 25.13 และกระทะประหยัดพลังงาน ได้สูงสุดร้อยละ 26.47 นอกจากนั้นยังมีการวิเคราะห์ Exergy ของระบบที่ไม่มีและมีการหมุนเวียน

ความร้อน โดยทำการคำนวณที่อัตราส่วนสมมูล ( $\phi$ ) เท่ากับ 1 พบว่าระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อนจะมี  $X_{\text{destroyed}}$  (Exergy ที่เกิดจากกระบวนการย้อนกลับไม่ได้ของระบบ) มากกว่าระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อน โดย  $X_{\text{destroyed}}$  จะมีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของอากาศส่วนแรกมีค่าสูงขึ้น และประสิทธิภาพตามกฎข้อสองทางเทอร์โมไดนามิกส์ ( $\eta_{II}$ ) ของระบบที่ไม่มีการหมุนเวียนความร้อนของภาชนะก้นโค้ง ภาชนะก้นแบน และกระทะ อยู่ที่ร้อยละ 65.78, 65.82 และ 65.91 ตามลำดับ และของระบบที่มีการหมุนเวียนความร้อนของภาชนะก้นโค้ง ภาชนะก้นแบน และกระทะ อยู่ที่ร้อยละ 72.78, 73.17 และ 72.27 ตามลำดับ



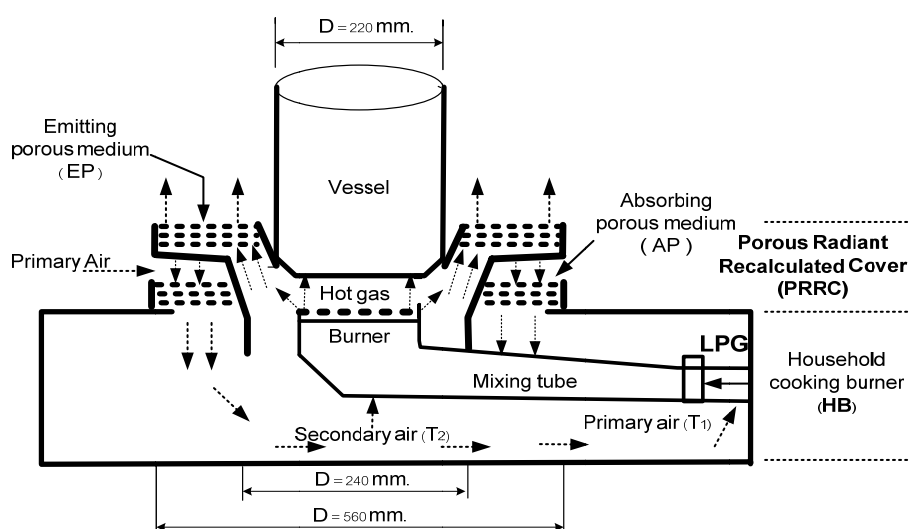
ภาพที่ 2.11 เตาแก๊สประสิทธิภาพสูงของ วสันต์ โยชนะกุล [18]

จารุณี จาบลาง [19] นำแนวทาง วสันต์ โยชนะกุล [18] มาศึกษาพัฒนาดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยใช้เตาแก๊สขนาด KB - 5 หัวไป (conventional burner, CB) ที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในครัวเรือนและตามแหล่งร้านอาหารขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ แต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อน ( $\eta_{th}$ ) ประมาณร้อยละ 35 ซึ่งค่อนข้างต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะได้ทำการพัฒนาเตาแก๊ส KB - 5 ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยแบ่งการพัฒนาออกเป็นสองส่วนโดยส่วนแรกจะทำการพัฒนาหัวเผาจากแบบทั่วไป (CB) ซึ่งมีเปลวไฟไหลตามรัศมี มาเป็นแบบหมุนวน (swirl burner, SB) ซึ่งจะให้ลักษณะของเปลวไฟหมุนวนเข้าสู่ศูนย์กลาง ส่วนที่สองทำการพัฒนาอีกขั้นหนึ่ง คือนำเตาแก๊ส KB - 5 มาใช้ควบคู่กับ (Porous Radiant Recirculated Burner, PRRB) โดยอาศัยหลักการหมุนเวียนความร้อนจะกระทำกับภาชนะสองแบบ คือ หม้อ (ภาชนะก้นแบน) กระทะ (ภาชนะก้นโค้ง)



ภาพที่ 2.12 เตาแก๊สประสิทธิภาพสูงของ จารุณี จากกลาง [19]

จรินทร์ เจนจิตต์ [20] ศึกษาการประยุกต์ใช้วัสดุพรุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาแก๊สในครัวเรือน โดยออกแบบ Porous Radiant Recirculated Cover (PRRC) ติดตั้งกับเตาแก๊สหุงต้มแบบมาตรฐาน (household cooking burner, HB) ดังภาพที่ 2.13 เมื่อทำการติดตั้งฝาครอบชนิดวัสดุพรุน PRRC (EP4+AP4) พบว่า  $\eta_{th}$  เพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 48% คิดเป็น Energy saving สูงสุดเท่ากับ 14.58 % ซึ่งจากการทดลองพบว่า การติดตั้งฝาครอบชนิดวัสดุพรุน PRRC (EP4+AP4) ไม่เพียงแต่เพิ่ม  $\eta_{th}$  ยังสามารถลดปริมาณมลพิษ CO, NO<sub>x</sub> ให้มีค่าสูงสุดไม่เกิน 124 ppm และ 120 ppm ในขณะที่ปริมาณ CO ของ HB ในเตาที่ติดตั้ง LPB-FP มีค่าสูงสุดไม่เกิน 347 ppm และ 140 ppm ตามลำดับ ส่วนปริมาณ NO<sub>x</sub> มีค่าไม่เกิน 90 ppm และ 120 ppm



ภาพที่ 2.13 เตาแก๊สประสิทธิภาพสูงของ จรินทร์ เจนจิตต์ [20]