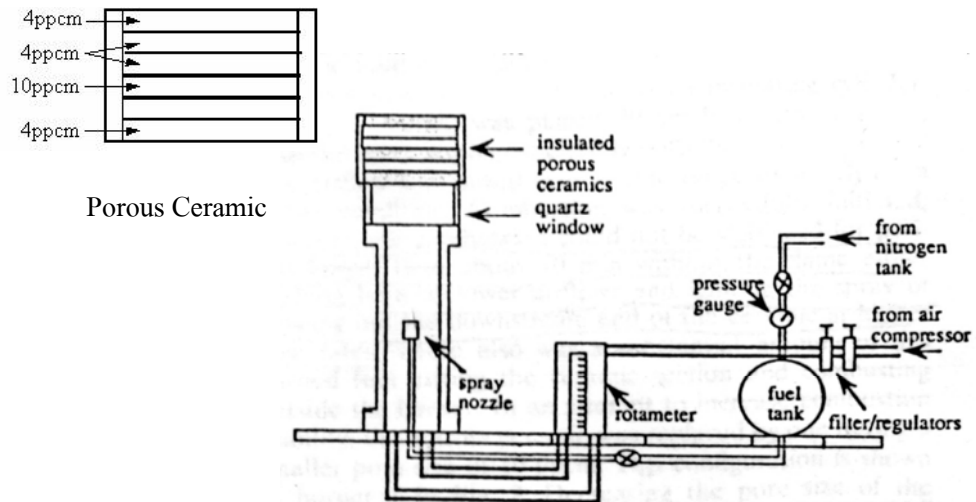


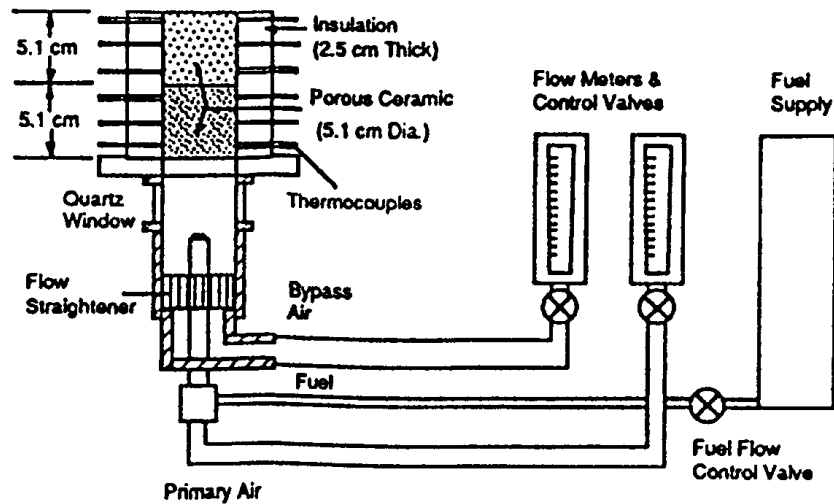
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่ผ่านมาการศึกษาการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส (Gaseous fuel) ในวัสดุพรุน (Porous medium) อย่างแพร่หลาย ซึ่งวัสดุพรุนมีคุณลักษณะเด่นคือพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นทั้งในรูปแบบการพาความร้อน การนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน การศึกษาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) และการเผาไหม้ (Combustion) จนทำให้เกิดความเข้าใจว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สภายในวัสดุพรุนนั้นมีข้อได้เปรียบหลายอย่างเมื่อเทียบกับการเผาไหม้แบบเปิด (Free flame) ทั้งนี้เนื่องจากการเผาไหม้ในวัสดุพรุนมีการหมุนเวียนความร้อนภายในตัวเองจากทางด้านท้ายน้ำ (Downstream) ไปยังต้นน้ำ (Upstream) ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculating combustion) ซึ่งช่วยส่งเสริมสมรรถนะการเผาไหม้ทั้งในส่วนของอุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าทางทฤษฎี (Super adiabatic flame temperature) [2] และในด้านมลภาวะที่ลดลงทั้ง HC, CO และ NO_x และจากการที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เพิ่มขึ้นรวมทั้งความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion intensity) สูง ทำให้ขนาดห้องเผาไหม้ที่ต้องการมีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มของการแผ่รังสีมีค่าสูงซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอตลอดห้องเผาไหม้ ทำให้สามารถขยายขอบเขตการติดไฟ (Flammability Limits) ไปทางสภาวะไอดีบาง (Lean) ได้มากขึ้น หรือสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำซึ่งไม่สามารถเผาไหม้แบบปกติได้ จากแนวคิดและข้อดีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สภายในวัสดุพรุน นำมาซึ่งการนำเอาวัสดุพรุนไปประยุกต์ใช้กับเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยทั่วไปนั้นจำเป็นต้องใช้หัวฉีดความดันสูงเพื่อทำให้เชื้อเพลิงเหลวแตกตัวเป็นฝอยละอองซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนสู่ละอองเชื้อเพลิง ส่งผลให้ความสามารถในการระเหยกลายเป็นไอเพิ่มขึ้นรวมทั้งทำให้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศดีขึ้น การเผาไหม้ดังกล่าวนี้ต้องการห้องเผาไหม้ในลักษณะเปิด (Free flame) ห้องเผาไหม้จึงจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เพื่อรองรับการฟุ้งกระจายของละอองเชื้อเพลิง รวมทั้งอุณหภูมิต้องสูงตลอดห้องเผาไหม้เพื่อให้แน่ใจว่าละอองเชื้อเพลิงสามารถระเหยได้หมด การเผาไหม้ในลักษณะนี้ส่งผลให้ความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion intensity) ต่ำ ขนาดห้องเผาไหม้ใหญ่ ความมีเสถียรภาพของการเผาไหม้ขึ้นกับลักษณะการไหลของแก๊สร้อนภายในเป็นหลัก ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการทั้งสิ้น

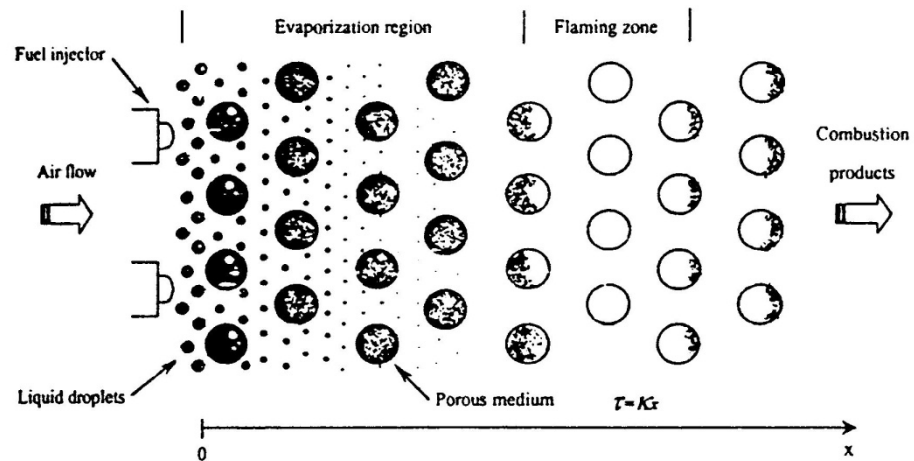


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์การทดลองของ Kaplan และ Hall [3]

Kaplan และ Hall [3] ได้ประสบความสำเร็จเบื้องต้นในการประยุกต์ใช้วัสดุพอร์นกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลว (Liquid Fuel) เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยใช้เชื้อเพลิง n-heptane สเปรย์เข้าไปในห้องเผาไหม้ด้วยหัวฉีดความดันสูงด้วยอัตราการไหลของเชื้อเพลิงคงที่ 0.025 lpm ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฝอยละอองเชื้อเพลิง 50-100 μm โดยที่ภายในห้องเผาไหม้ประกอบด้วยวัสดุพอร์นเซรามิก (Magnesia stabilized zirconia) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 cm หนา 2.5 cm จัดเรียงเป็นชั้น ขนาดของวัสดุพอร์นมี 2 ขนาดคือ 4 ppcm และ 10 ppcm ลักษณะการจัดเรียงดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยที่เชื้อเพลิงที่ถูกสเปรย์เข้าไปทางด้านล่างวัสดุพอร์นแผ่นล่าง (4 ppcm) ซึ่งทำหน้าที่เป็น Mixing ceramic ช่วยในการทำให้เกิด Pre-Vaporization ของละอองเชื้อเพลิง n-heptane ผสมคลุกเคล้ากับอากาศก่อนเผาไหม้ในวัสดุพอร์น 4 แผ่นด้านบน ซึ่งพบว่าการจัดเรียงแบบ 4-10-4-4-10 ppcm ให้เปลวไฟที่มีเสถียรภาพ (Stable flame) การเผาไหม้ค่อนข้างสมบูรณ์ และให้ปริมาณมลพิษ (แก้ไขค่ามาที่ 3% O_2) ที่ต่ำโดยที่ CO อยู่ในช่วง 3-7 ppm และ NO_x อยู่ในช่วง 15-20 ppm ในช่วงของอัตราส่วนสมมูล (Equivalent ratio, Φ) เท่ากับ 0.57-0.67 อย่างไรก็ตามการทำงานของหัวเผานี้ยังต้องการองค์ประกอบที่เหมาะสมหลายอย่างได้แก่ ต้องใช้หัวฉีดความดันสูง ชนิดของวัสดุพอร์น ลักษณะการจัดเรียงวัสดุพอร์น และระยะทางการสเปรย์เพื่อให้ได้ซึ่งผลการทำงานดังกล่าว ซึ่งเป็นการยากต่อการนำไปใช้งานจริง



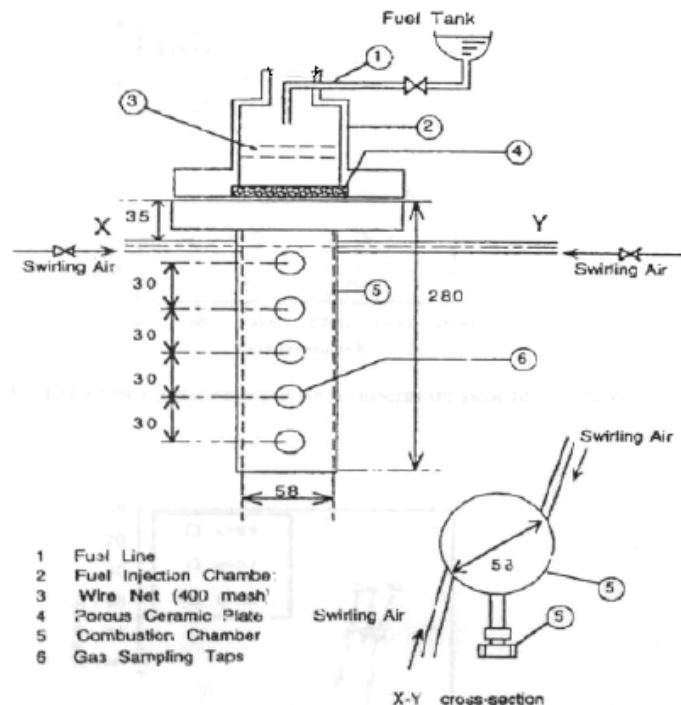
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์การทดลองของ Tseng และ Howell [4]



รูปที่ 2.3 แนวคิดการเผาไหม้ละอองเชื้อเพลิงเหลวในวัสดุพรุนของ Tseng และ Howell [4]

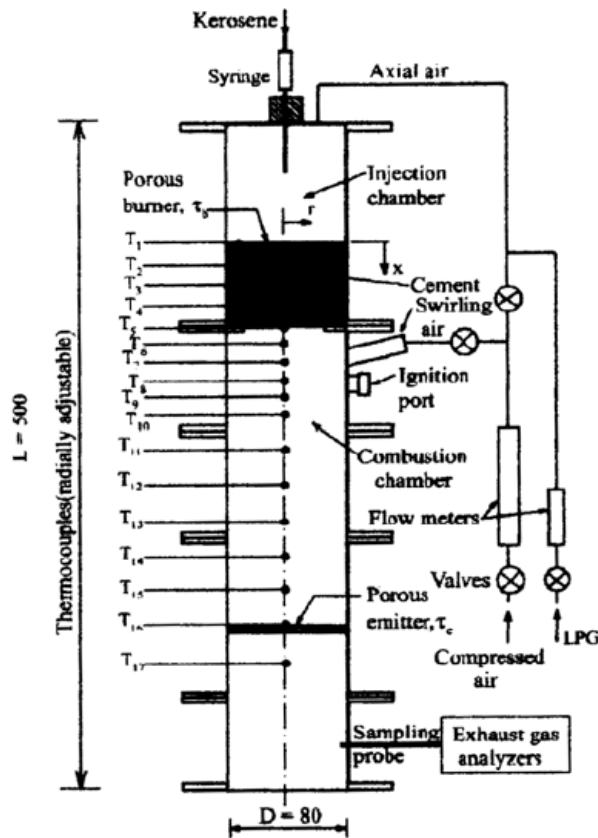
Tseng และ Howell [4] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้ละอองเชื้อเพลิงเหลว Heptane ภายในวัสดุพรุนทั้งการทดลองและแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยอุปกรณ์การทดลองมีลักษณะคล้ายกับ Kaplan [3] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในการทดลองนั้นเชื้อเพลิงเหลว Heptane ถูกฉีดด้วยความดัน 60-90 psig ซึ่งให้ขนาดละอองเฉลี่ยประมาณ $10 \mu\text{m}$ จากการทดลองนั้นพบว่าเปลวไฟมีเสถียรภาพและให้การเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถเผาไหม้ได้ในช่วง Φ ต่ำสุดถึง 0.3 โดยที่ปริมาณมลภาวะในไอเสียมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของ Kaplan [5] และในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองเป็นอย่างดี ซึ่งแนวคิดเกี่ยวกับการเผาไหม้ละอองน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวแสดงในรูปที่ 2.3

จากการศึกษาพบว่าขนาดของฝอยละออง Heptane ที่มีขนาดเล็กกว่า $25 \mu\text{m}$ นั้นสามารถที่จะระเหยได้หมดใน วัสดุพอร์ซันที่มีความหนา 30 mm (Evaporation region) ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลในการหมุนเวียนความร้อน โดยการชนหรือสัมผัสกันโดยตรงของน้ำมันเชื้อเพลิง และ วัสดุพอร์ซันที่ร้อนอันเนื่องมาจากการดูดซับรังสีความร้อนจากวัสดุพอร์ซันในบริเวณการเผาไหม้ (Flaming zone) ประกอบกับการดูดซับรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากวัสดุพอร์ซันร้อนของไอระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงเอง ช่วยเร่งให้อัตราการระเหยของละอองน้ำมันเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น จากนั้นจึงเคลื่อนที่ต่อไปยังบริเวณการเผาไหม้ (Flame zone) โดยที่ไอของ Heptane ที่ผสมคลุกเคล้ากับอากาศมาเป็นอย่างดีแล้ว จะเกิดการเผาไหม้ในบริเวณการเผาไหม้ในบริเวณนี้ ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้ได้ทั้งอัตราการระเหยของละอองน้ำมันที่สูงซึ่งเป็นผลมาจากการอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะนำเอาเทคโนโลยีของวัสดุพอร์ซัน (Porous medium technology) ไปประยุกต์ใช้ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวเฉกเช่นเดียวกับเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งประสบผลสำเร็จมาแล้วเป็นอย่างดีอย่างไรก็ตามการเผาไหม้ของฝอยละอองในลักษณะสเปรย์ดังกล่าว ยังมีจุดอ่อนคือต้องใช้หัวฉีดความดันสูงเพื่อการแตกตัวเป็นฝอย และใช้ห้องเผาไหม้ที่มีปริมาตรมาก เนื่องจากต้องรองรับการฟุ้งกระจายของฝอยละอองสเปรย์ ทำให้ค่าความเข้มของการเผาไหม้ (Combustion intensity) มีค่าต่ำ เพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้ จึงมีผู้เสนอเทคนิคการเผาไหม้แบบใหม่



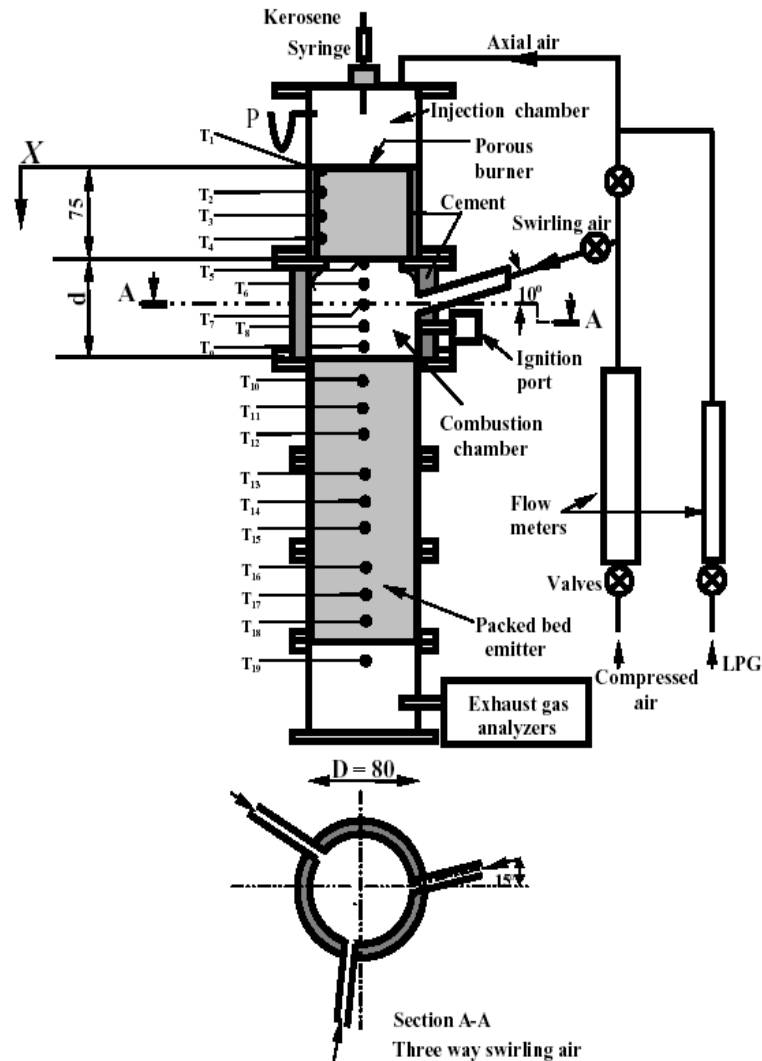
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์การทดลองของ Takami และคณะ [5]

Takami และคณะ [5] ได้ประสบความสำเร็จในการใช้หัวเผาวัสดุพอร์ซันดั่งรูปที่ 2.4 โดยที่วัสดุพอร์ซันซึ่งทำจากเซรามิกหนา 5 mm เผาเชื้อเพลิงเหลว Kerosene ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในการทดลอง Kerosene จะถูกหยดแทนการสเปรย์ลงบนวัสดุพอร์ซันรูปทรงระบอบกลุม (Porous ceramic plate) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในห้องเผาไหม้รูปทรงระบอบ โดยที่วัสดุพอร์ซันทำหน้าที่เป็นทั้ง Vaporizer และ Burner ในตัวเดียวกัน หยดของเชื้อเพลิง Kerosene จะระเหยได้หมดภายในวัสดุพอร์ซัน เนื่องจากคุณสมบัติเด่นของวัสดุพอร์ซันคือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงทำให้การดูดซับพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจากเปลวไฟ (Flame radiation) ส่งผลให้อุณหภูมิสูงและสามารถระเหยเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆกับผิวล่างของวัสดุพอร์ซัน ไอของเชื้อเพลิง Kerosene จะถูกผสมคลุกเคล้าอย่างดีด้วยอากาศที่ถูกจ่ายเข้ามาจากด้านข้างของห้องเผาไหม้แบบหมุนวน (Swirling air) ทำให้การเผาไหม้เป็นไปในลักษณะของการเผาไหม้แบบหมุนวน (Swirl combustion) โดยที่ให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้มีค่าประมาณ 1600 K และให้ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้มีค่าสูงสุดถึง 3900 kW/m² และนอกจากนี้ยังพบว่า การเผาไหม้ให้เปลวไฟที่มีเสถียรภาพ และมีขอบเขตการติดไฟ (Flammability limits) ที่กว้าง โดยที่สามารถเผาไหม้ได้ในช่วง Φ ตั้งแต่ 0.1-1 ให้ค่า Turn down ratio สูงสุดประมาณ 5.8 และ NO_x และ CO มีปริมาณต่ำ ซึ่งจากการทดลองของ Takami และคณะ [5] นั้น ได้วิเคราะห์ ค่า Φ และ อัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Thermal input) ที่มีผลต่อโครงสร้างของอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ อย่างไรก็ตามวิจัยของในครั้งนี้มีได้ทำการวัดอุณหภูมิในชั้นของวัสดุพอร์ซันซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงกลไกการระเหยเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์การทดลอง Jugjai และคณะ [6]

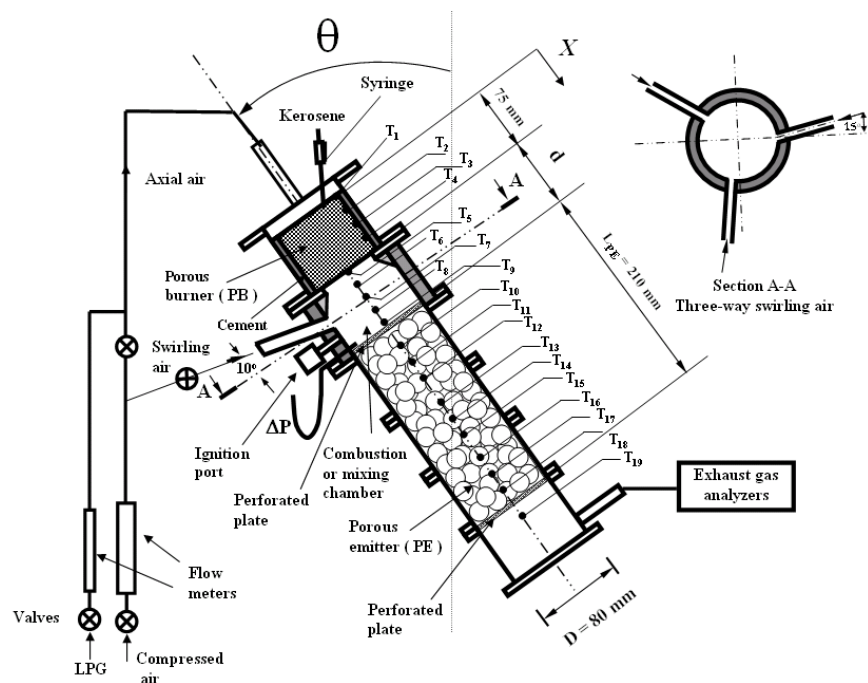
Jugjai และคณะ [6] ได้ทำการวิจัยและพัฒนาเตาเผา ที่มีลักษณะคล้ายกับเตาของ Takami และคณะ [5] โดยมีความแตกต่างอยู่ที่ในส่วนของวัสดุพอร์นในหัวเผา (Porous burner, PB) ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้ ใช้ตาข่ายสแตนเลสเป็นวัสดุพอร์นแทนในส่วนของ Porous ceramic plate รวมทั้งยังมีการวัดอุณหภูมิใน PB ที่เพื่อทราบถึงกลไกการระเหยที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.5 ผลการทดลองพบว่าการระเหยสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ในชั้นวัสดุพอร์นแบบตาข่ายสแตนเลสในผลการทดลองพบว่าการระเหยสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ในชั้นวัสดุพอร์นแบบตาข่ายสแตนเลสใน PB การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพดี ในช่วงค่า Equivalence ratio ตั้งแต่ 0.37-0.5 แต่เมื่อสังเกตลักษณะของเปลวไฟ พบว่ามีลักษณะเป็นวงกลมคล้ายวงโดนัท ตามทิศทางของ Swirling air ขณะที่ตรงกลางของวงโดนัทจะมีสีคล้ำซึ่งเกิดจากการผสมคลุกเคล้าที่ไม่ดีของไอเชื้อเพลิงกับอากาศ Swirling air ที่ป้อนในทิศทางสัมผัสกับผนังห้องเผาไหม้วงกลม (Tangential) ซึ่งส่งผลให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างไอเชื้อเพลิงกับอากาศดี เฉพาะที่บริเวณขอบผนังห้องเผาไหม้เท่านั้นซึ่งจากเหตุผลนี้ อาจจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ค่อยสมบูรณ์นัก และยังพบอีกว่าค่า Turn-down ratio มีค่า 1.75 ซึ่งค่อนข้างต่ำจึงเป็นปัญหาที่ต้องพัฒนาต่อ



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์การทดลองของ Jugjai และ Polmart [7]

Jugjai และ Polmart [7] ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์ และการเผาไหม้ (CERL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ได้ทำการแก้ไขปัญหาคาการคลุกเคล้าระหว่างไอเชื้อเพลิงกับอากาศโดยใช้อุปกรณ์การทดลองคล้ายกับงานวิจัยของ Jugjai และคณะ [6] แต่ปรับปรุงส่วนป้อนอากาศแบบทางเดียวในแนวสัมผัสกับผนังห้องเผาไหม้มาเป็นแบบสามทาง (Three way swirling air) เชื้อจุดศูนย์กลางห้องเผาไหม้ ดังรูปที่ 2.19 พบว่าการคลุกเคล้าระหว่างไอเชื้อเพลิงกับอากาศดีขึ้น เขม่า คว้น และกลิ่นหายไป เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ และหัวเผาสามารถทำงานในช่วงที่กว้างมากขึ้นกว่าเดิมรวมทั้งศึกษาเชิงตัวแปร ที่ส่งผลต่อการทำงานของหัวเผาโดยติดตั้งวัสดุพ่นก้อนหิน (Packed bed emitter) ทางด้านขาออกของห้องเผาไหม้ (Downstream) เพื่อหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียมาส่งเสริมการระเหยและการเผาไหม้ จากผลการทดลองพบว่าการ

กระจายตัวของอุณหภูมิภายในหัวเผา เมื่อมีการติดตั้งวัสดุพรุนก้อนหิน (Packed bed emitter) ทางด้านขาออกของห้องเผาไหม้ พบว่าโครงสร้างอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้ยกตัวสูงกว่ากรณีไม่มี วัสดุพรุนก้อนหิน และบางส่วนของช่วงอุณหภูมิสูงซึ่งแสดงตำแหน่งของเปลวไฟ ลามเข้าไปในชั้นของวัสดุพรุนก้อนหิน (Packed bed emitter) การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมีเสถียรภาพที่ดี สามารถทำงานได้ดี แต่ยังคงพบว่ ลักษณะของเปลวไฟยังมีสีคล้ำเกิดขึ้นบริเวณตรงกลาง ภายในห้องเผาไหม้ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการผสมคลุกเคล้ากันที่ไม่ดีระหว่างไอเชื้อเพลิงกับอากาศ จาก Swirling Air

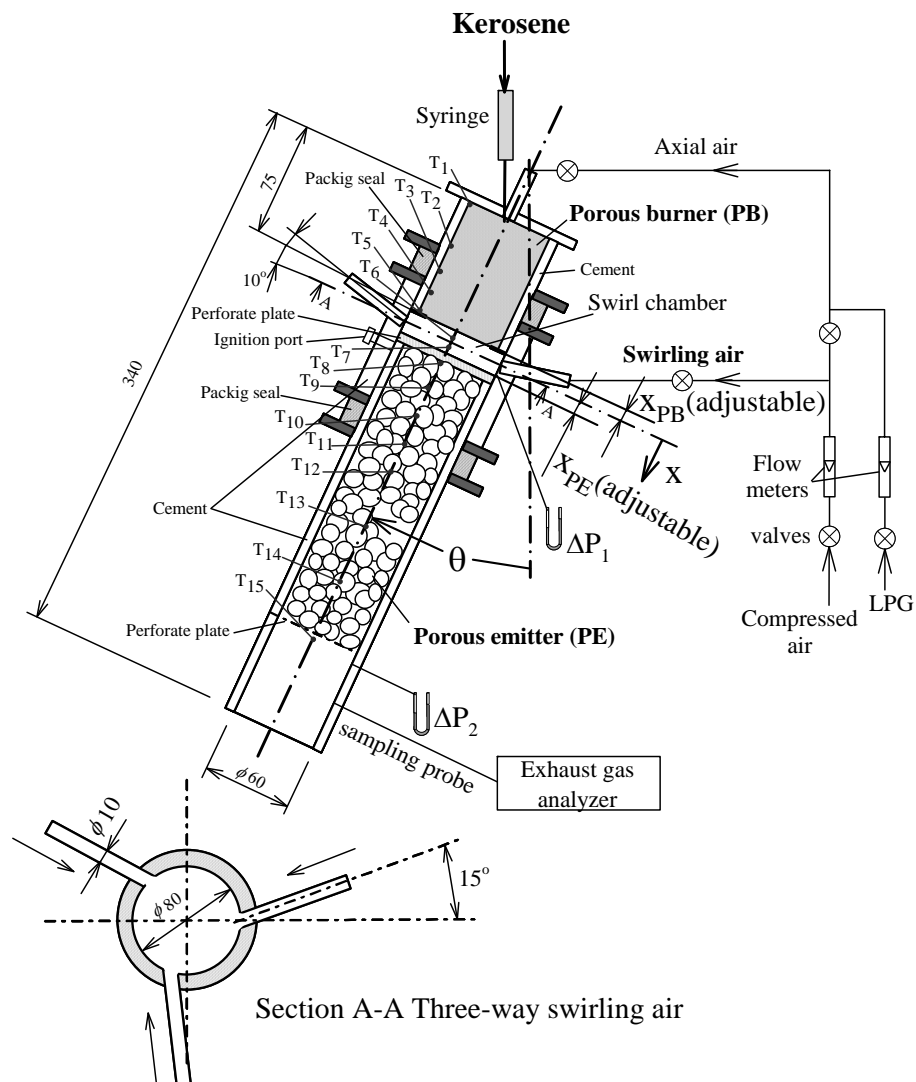


รูปที่ 2.7 อุปกรณ์การทดลองของ ชูติเดช ผ่องใส [8]

ชูติเดช ผ่องใส [8] จากห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ (Combustion and Engine Research Laboratory, CERL) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มจธ. ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมหัวเผา (θ) ต่อการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพรุน เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาเน้นเฉพาะการเผาไหม้ในหัวเผาในแนวตั้งเท่านั้น มุมหัวเผาในงานวิจัยนี้ยามให้เป็นมุมระหว่างแนวศูนย์กลางของหัวเผากับแนวตั้ง ($\theta = 0^\circ$ คือลักษณะ Down-flow) อุปกรณ์การทดลองของชูติเดช ผ่องใส [8] คล้ายกับงานวิจัยของ Jugjai และ Polmart [7] โดยมีส่วนแตกต่างกันสองส่วนคือ มีการเลื่อนตำแหน่ง Syringe ป้อนน้ำมันทางด้านบนให้ชิดเข้าในส่วนบนของตาข่ายวัสดุพรุน Porous Burner ทำให้หัวเผามีขนาดกะทัดรัดขึ้นเพื่อรองรับน้ำมัน และปรับปรุงหัวเผาให้สามารถปรับมุม θ ตั้ง 0° (Down-flow) จนถึง 180° (Up-flow) โดยมีช่วงการปรับ 15° จากผลการศึกษาพบว่า θ ส่งผลอย่างมากต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิและความดันในห้องเผาไหม้ ตลอดจนการปลดปล่อยปริมาณ CO และ NO_x เพราะผลของ

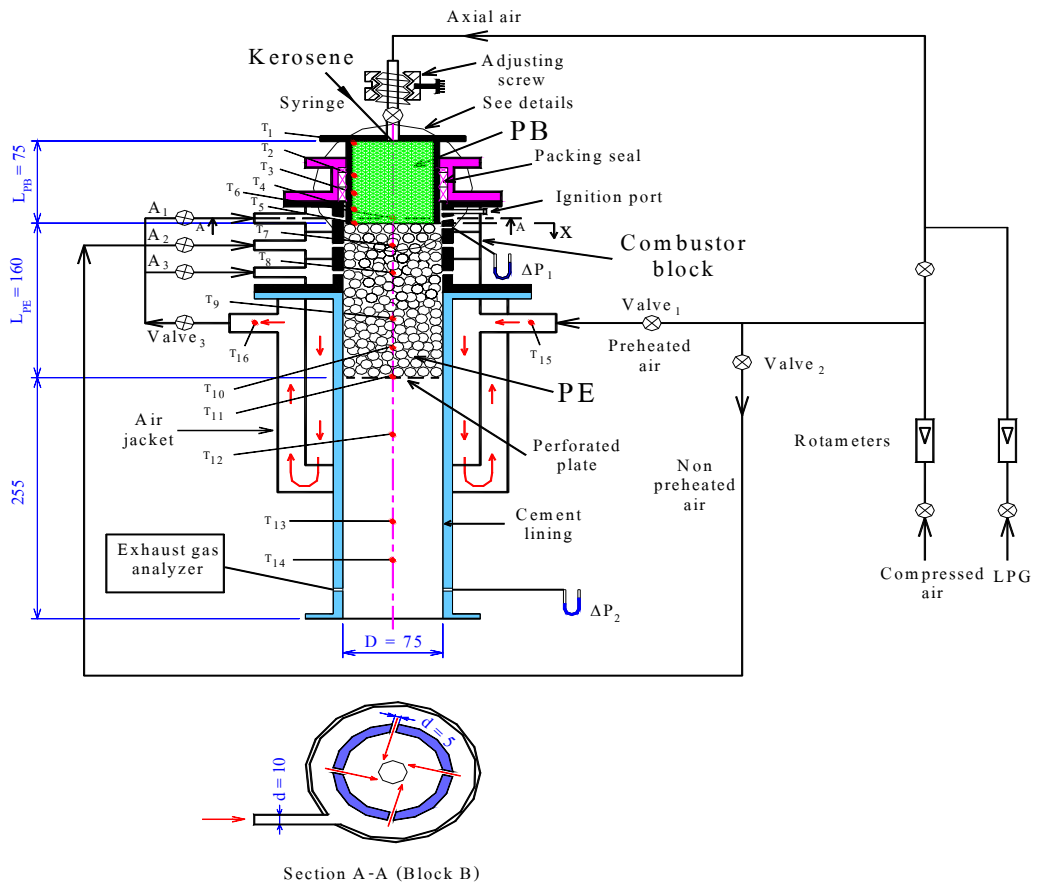
แรงลอยตัว (Buoyancy Effect) ต่อการระบายไอเสีย และผลของแรงโน้มถ่วง (Gravity Effect) ร่วมกับแรงตึงผิวต่อการกระจายตัวของน้ำมันในชั้นตาข่ายวัสดุพรุนใน PB รวมทั้งพื้นที่ในการดูดซับการแผ่รังสีเพื่อระเหย การเพิ่มความละเอียดของตาข่ายสแตนเลสใน PB ให้ละเอียดขึ้น (จาก 60, 80 เป็น 100 mesh per inch ตามลำดับ) สามารถทำให้การกระจายตัวของน้ำมันดีเซลสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดและลดอิทธิพลของ θ ต่อการเผาไหม้ลง ทำให้หัวเผาสามารถทำงานได้ดีทุกค่า θ

จากผลงานวิจัยของ Jugjai และ Polmart [7] แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการติดตั้งวัสดุพรุน Porous Burner (PB) และ Porous Emitter (PE) เทียบกับตำแหน่งป้อนอากาศมีผลอย่างมากในการผลักดันให้ตำแหน่งการเผาไหม้สามารถเข้าไปเกิดในวัสดุพรุน Porous Emitter



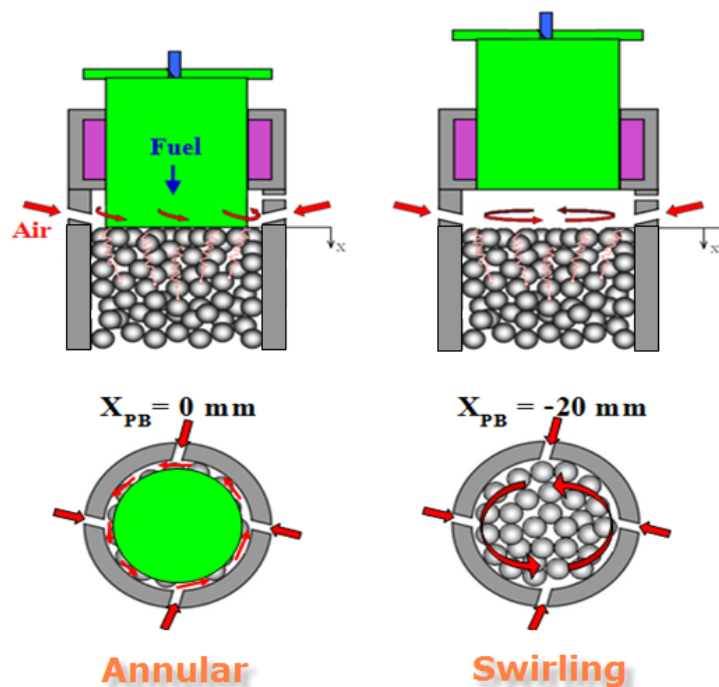
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์การทดลองของ กิตติศักดิ์ สุวรรณวิจิตร [9]

กิตติศักดิ์ สุวรรณวิจิตร [9] ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้ (Combustion and Engine Research Laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มจร. ได้มีความพยายามที่จะทำให้ตำแหน่งการเผาไหม้สามารถเข้าไปเกิดใน PE จึงได้ศึกษาอิทธิพลของระยะห่างของ PB และ PE (X_{PB}) โดยใช้อุปกรณ์การทดลองคล้ายกับงานของ Jugjai และ Polmart [7] ตามรูปที่ 2.8 แต่ในการวิจัยครั้งนี้ได้พยายามลดช่องว่างในช่องเผาไหม้ (X_{PB}) ลงให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ (20 mm) เนื่องจากข้อจำกัดของระบบจ่ายอากาศ จากการทดลองพบว่า การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมีเสถียรภาพที่ดี ตำแหน่งเปลวไฟเลื่อนเข้าไปในวัสดุพรุน PE มากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้เพิ่มขึ้นเนื่องจากการหมุนเวียนความร้อนในตัวเองช่วยส่งเสริมการเผาไหม้มากขึ้นส่งผลให้ CO มีแนวโน้มลดลงตามระยะ X_{PB} ที่ลดลงไป และนอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณ NO_x ที่ปลดปล่อยมีค่าลดลงเมื่อลดระยะ X_{PB} ด้วยเช่นกัน แม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งเปลวไฟเลื่อนเข้าไปใน PE ส่งผลต่อรูปแบบการเผาไหม้ที่เปลี่ยนไปเป็นการเผาไหม้ในวัสดุพรุน (Combustion within porous medium) ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ในสถานะแก๊สอุณหภูมิสูง ถูกถ่ายเทให้กับวัสดุพรุนในสถานะของแข็งอย่างทันทีทันใดดังนั้นจึงเป็นการยับยั้งการเกิด NO_x ได้ แต่อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถทำให้ระยะ $X_{PB} = 0$ mm ได้



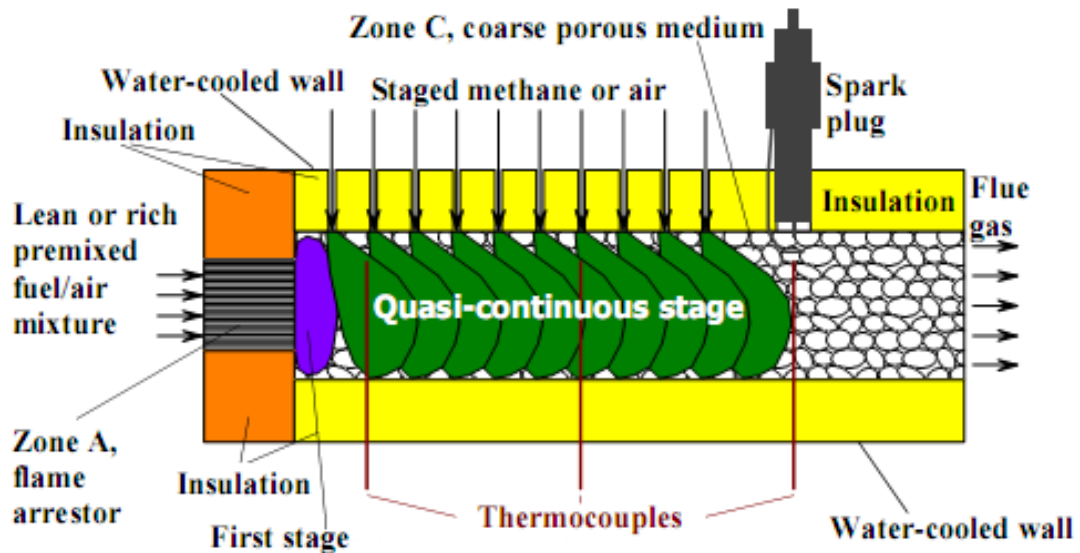
รูปที่ 2.9 อุปกรณ์การทดลองของ มกร ลักขณา [10]

มกร ถักขณา [10] ได้ปรับปรุงการจ่ายอากาศทำให้การผสมกันระหว่างไอเชื้อเพลิงกับอากาศดีขึ้นและสามารถปรับระยะ X_{PB} ให้มีค่าเท่ากับ 0 ได้ นอกจากนี้ยังเพิ่มเติมในส่วนของการอุ่นอากาศก่อนเข้าเผาไหม้ จากการทดลองพบว่าการเผาไหม้ที่เสถียร และสามารถทำงานได้ในช่วง Equivalence ratio ต่ำถึง 0.19 ซึ่งต่ำกว่าค่าขอบเขตเจือจางของการเผาไหม้ Kerosene โดยระบบปกติ พบว่าเมื่อเพิ่มระยะ X_{PB} จาก 20 mm จนเท่ากับ 0 mm ส่งผลให้รูปแบบการจ่ายอากาศเปลี่ยนจากแบบหมุนวน (Swirling) เป็นแบบวงแหวน (Annular) ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งส่งผลให้รูปแบบการเผาไหม้ค่อยๆเปลี่ยนจากการเผาไหม้แบบผสมมาก่อน (Premixed) เป็นแบบไม่มีการผสมมาก่อน (Non-Premixed) ทำให้ตำแหน่งการเผาไหม้เคลื่อนที่เข้าไปใน PE มากขึ้นและส่งผลให้ปริมาณ CO และ NO_x มีแนวโน้มลดลง และมีค่าต่ำมากแม้ว่าอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากการที่ตำแหน่งการเผาไหม้เคลื่อนที่เข้าไปยัง PE ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของการเผาไหม้กว้างขึ้นส่งผลให้ CO มีเวลาทำปฏิกิริยากับ CO_2 มากขึ้นและนอกจากนี้การกระจายตัวของการเผาไหม้ยังส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ลดลงจึงส่งผลให้ NO ที่เกิดจาก Thermal NO_x ลดลง จากงานวิจัยในครั้งนี้นอกจากจะแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะการเผาไหม้ที่ดีของรูปแบบการเผาไหม้แบบ Non-premixed เมื่อเปรียบเทียบกับ Premixed แล้ว เมื่อพิจารณาในแง่ความปลอดภัยในการใช้งานพบว่าการเผาไหม้แบบ Non-premixed ให้ความปลอดภัยที่สูงกว่าเนื่องจากการหลีกเลี่ยงการติดไฟของส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศก่อนที่จะมาถึงห้องเผาไหม้



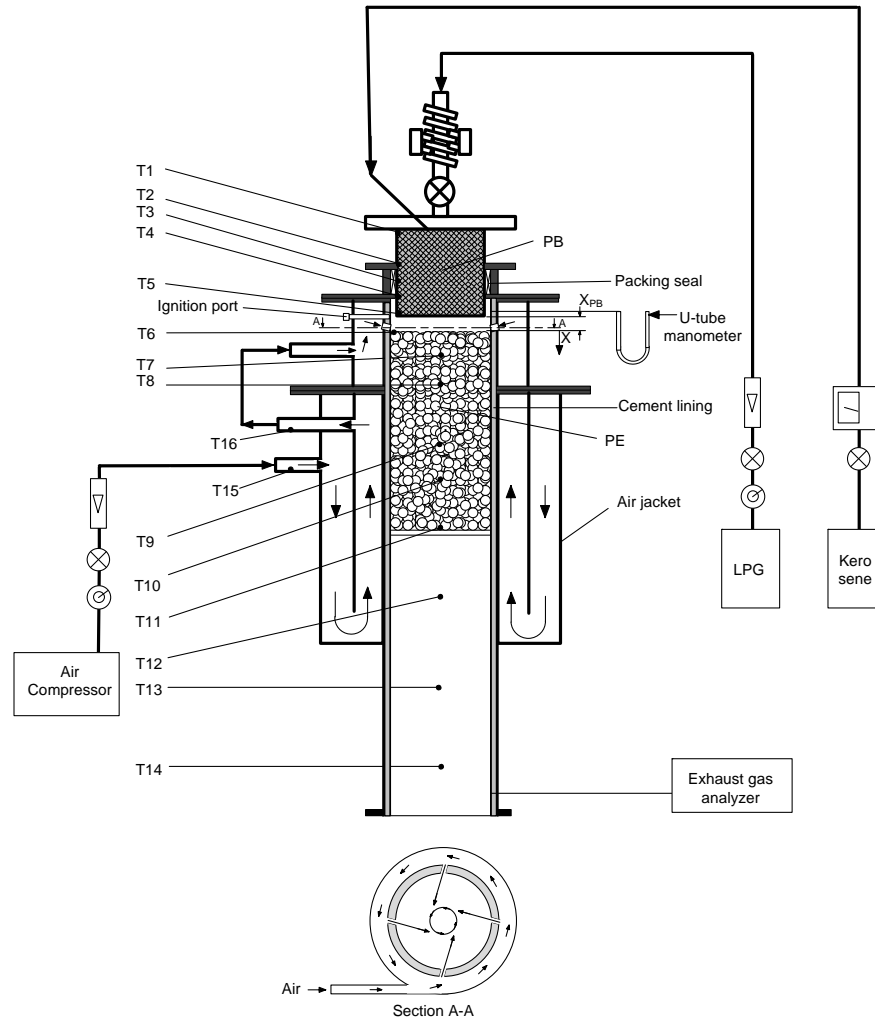
รูปที่ 2.10 ภาพเปรียบเทียบการไหลของอากาศแบบ Annular และ Swirling

จากงานวิจัยของ มกร ถักขณา [10] พบว่ารูปแบบการเผาไหม้แบบ Non-premixed ($X_{PB} = 0$ mm) รวมทั้งความสามารถในการลด NO_x นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกับการเผาไหม้แบบเป็นลำดับชั้น (Staged combustion) ซึ่งทำการวิจัยโดย Pickenacker และคณะ [11]



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์การทดลองของ Pickenacker [11]

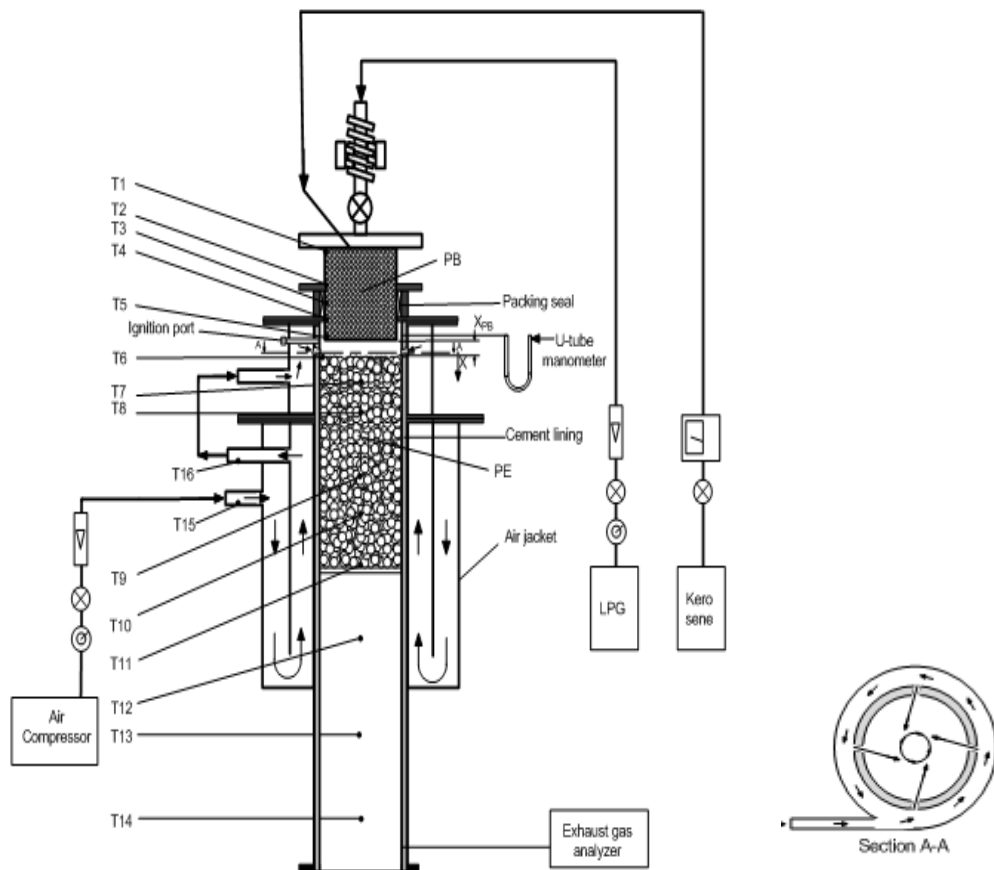
Pickenacker และคณะ [11] ทำการศึกษาการเผาไหม้ในหัวเผาวัสดุพอรุนร่วมกับการเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอนโดยมีวัตถุประสงค์ในการลด NO_x ซึ่งสามารถเผาไหม้แบบเป็นขั้นตอนได้ 2 แบบ คือ แบบ Air-staged และ Fuel-staged ซึ่งส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิงเบื้องต้นเป็นไอดีหนา (Rich mixture) และไอดีบาง (Lean mixture) ตามลำดับ โดยเชื้อเพลิงที่เข้าทางด้านต้นน้ำ (Upstream) เป็นแบบผสมมาก่อน โดยใช้ Methane เป็นเชื้อเพลิง และใช้ Alumina fiber ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-10 mm เป็นวัสดุพอรุน ซึ่งการเผาไหม้เป็นขั้นตอนทำโดยการจ่ายอากาศ หรือ Methane ทางเข้าด้านข้างของห้องเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่าหัวเผาวัสดุพอรุนแบบเป็นขั้นตอนสามารถลด NO_x ได้สูงสุดถึง 30% เมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาวัสดุพอรุนทั่วไป



รูปที่ 2.12 แสดงอุปกรณ์การทดลองของฟิรยูทท ทองเต็ม [12]

ต่อมา ฟิรยูทท ทองเต็ม [12] ได้ทำการพัฒนาโดยปรับปรุงระบบอุ่นอากาศก่อนการเผาไหม้ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จากหัวเผาวัสดุพอร์นในงานวิจัยของ มกร ลักษณะ [10] โดยการจ่ายอากาศเข้าทาง Air-jacket รอบนอกก่อนวนกลับมาด้านในเพื่อลดการสูญเสียความร้อน และนอกจากนี้ยังเพิ่มในส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องเผาไหม้เพื่อขยายช่องว่างวงแหวนระหว่างห้องเผาไหม้กับ PB ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการหมุนวนของอากาศ ยิ่งไปกว่านั้นยังมีการปรับมุมการจ่ายอากาศที่ได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นมุมที่เหมาะสมที่สุดด้วย Particle image velocimetry (PIV) โดย อรรถนพ ประวิณวิสารณ์ [13] การทดลองนี้ใช้เชื้อเพลิง 2 ชนิดในการทดลองคือ LPG และ Kerosene โดยมุ่งเน้นไปที่การหาขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability Limit) และช่วงการทำงาน (Turndown ratio) โดยศึกษาอิทธิพลของค่า Φ และอัตราการป้อนเชื้อเพลิง (Firing Rate, FR) โดยมีการจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูปที่ 2.12 จากผลการทดลองพบว่า หัวเผาวัสดุพอร์นให้ขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability limit) ที่กว้างสำหรับกรณีที่มี Mixing chamber ($X_{PB} = -20$ mm) โดยที่สามารถเผาไหม้ได้ตั้งแต่ $\Phi = 0.23$ ถึง $\Phi = 0.99$ และค่า Turndown ratio ประมาณ 3 ทั้งนี้เนื่องจากผลของการอุ่นอากาศ และการแผ่รังสีของ PE มาช่วย

ส่งเสริมการเผาไหม้ และเมื่อปรับระยะ $X_{PB} \square 0$ mm ซึ่งการเผาไหม้เปลี่ยนรูปแบบเป็นการเผาไหม้แบบ Non-premixed combustion แล้ว พบว่าโครงสร้างของอุณหภูมิต่ำกว่า Premixed combustion ($X_{PB} = -20$ mm) เมื่อพิจารณาในแง่ผลพิษพบว่าเชื้อเพลิง LPG ที่สภาวะการทดลอง $X_{PB} \square 0$ mm ปริมาณ CO สูงขึ้นเนื่องจากการผสมที่ไม่ดี แต่ให้ NO_x ที่ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับ $X_{PB} = -20$ mm ซึ่งแตกต่างกับเชื้อเพลิง Kerosene ซึ่งที่ $X_{PB} \square 0$ mm ปริมาณ CO และ NO_x ลดลงจาก $X_{PB} = -20$ mm นอกจากนี้ยังส่งผลให้ η_r มีค่าสูงขึ้นซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นในทางกลับกันให้ η_p ที่ต่ำลงซึ่งเป็นการช่วยลดความเสียหาย และการขยายตัวของ PB ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งของการเผาไหม้เคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้การศึกษาเพียงแค่ค่า Φ และ FR ยังไม่สามารถอธิบายในส่วนของ Staged combustion ได้อย่างชัดเจนจึงเป็นที่มาของงานวิจัยต่อมา



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์การทดลองของ ฟิรพงษ์ โตขลิบ [14]

พืรพงษ์ โดขลิป [14] ได้ทำการวิจัยโดยที่ชุดอุปกรณ์ทดลองมีลักษณะคล้ายกับ พืรยุทธ ทองเต็ม [12] ดังรูปที่ 2.13 โดยทำการวิจัยมุ่งเน้นไปที่ผลของการเปลี่ยนแปลงระยะ X_{PB} ซึ่งส่งผลต่อลักษณะการจ่ายอากาศคือ การจ่ายอากาศแบบหมุนวน (Swirling flow) ซึ่งให้เปลวไฟแบบ Premixed flame และการจ่ายอากาศแบบวงแหวน (Annular flow) ซึ่งให้เปลวไฟแบบแพร่ (Diffusion flame) ประกอบกับการปรับเปลี่ยนค่า Φ และ FR เพื่ออธิบายในส่วนของการเผาไหม้แบบ Staged combustion นอกจากนี้ยังเพิ่มในส่วนของการเชื่อมเพลิงผสมระหว่าง LPG และ Kerosene ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าหัวเผาวัสดุพอร์ซเลนสามารถควบคุมให้เกิดการเผาไหม้ 2 ชนิด คือ Premixed combustion และ Non-premixed combustion จากการปรับเปลี่ยนระยะ X_{PB} ซึ่งพบว่าเมื่อเปลี่ยนจากระยะ X_{PB} จาก -20 mm มาเป็น 0 mm ประสิทธิภาพในการแผ่รังสีความร้อนเพิ่มขึ้นถึง 34% เนื่องจากตำแหน่งของการเผาไหม้เคลื่อนที่ไปทางด้าน Downstream ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการปลดปล่อย CO ลดได้ถึง 1.8 เท่า และ NO_x ลดลงถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับการเผาไหม้ที่ระยะ $X_{PB} = -20$ mm เนื่องการเผาไหม้เกิดลึกเข้าไปใน PE มากยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการกระจายตัวของการเผาไหม้กว้างขึ้นซึ่งทำให้ CO มีเวลาทำปฏิกิริยากับ O_2 กลายเป็น CO_2 มากขึ้น นอกจากนี้ยังการขยายตัวของการเผาไหม้ยังส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้ลดลงจึงทำให้ NO_x ที่เกิดจาก Thermal NO_x ลดลง

แต่อย่างไรก็ตามในงานวิจัยของ พืรพงษ์ โดขลิป[14] เนื่องจากผลของอุณหภูมิการแผ่รังสีที่สูงของ PE ทำให้เกิดการขยายตัวของ PB ส่งผลให้ ทำให้การปรับระยะ X_{PB} เป็นไปได้ยาก และเกิดการหลอมละลายของดาข่ายสเตนเลสทำให้อายุการทำงานของหัวเผาสั้น เพื่อที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยไม่ส่งกระทบไปยังกลไกการระเหย และปรับปรุงหัวเผาให้เข้าใกล้เชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้