

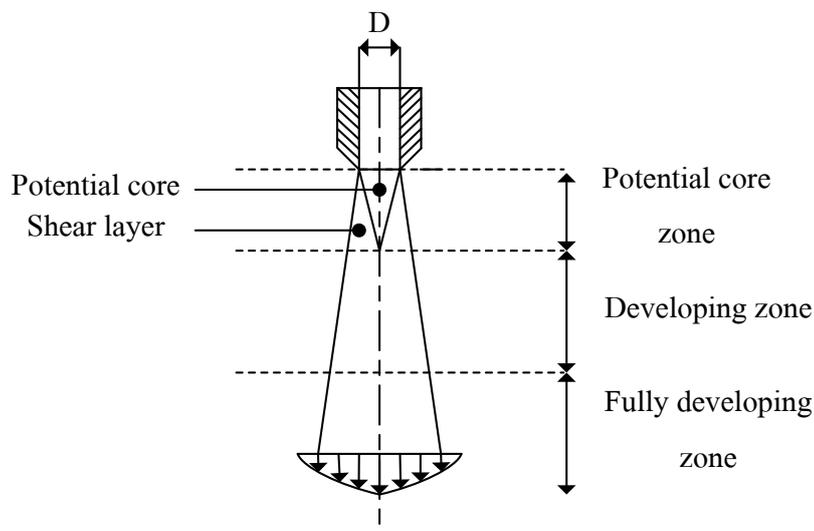
## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

โดยปกติถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของเจ็ทที่ออกมาจากหัวฉีด ในกรณีที่ต้องการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวจำเป็นต้องควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟให้เหมาะสม ซึ่งในการควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟนั้นจะต้องศึกษาให้เข้าใจถึงตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ท

สำหรับในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ โครงสร้างการไหลของเจ็ทพุ่งชนพื้นผิว ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว ผลของอัตราส่วนผสมผสมมูลของเชื้อเพลิงแก๊ส LPG และออกซิเจน สำหรับการตัดเหล็กแผ่นเหล็กด้วยเจ็ทเปลวไฟจำเป็นต้องเลือกสัดส่วนการผสมของออกซิเจนมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟและอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ ทำให้มีผลต่อการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานและส่งผลกระทบต่อลักษณะรอยตัดที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานด้วย เช่น เจ็ทเปลวไฟที่มีลักษณะแผ่กระจายในแนวรัศมีมากเกินไปในขณะที่พุ่งชนพื้นผิว ในระหว่างทำการตัดเหล็กจะทำให้วัสดุเสียรูปทรงได้ ในขณะที่โครงสร้างของเปลวไฟที่มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์และให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูงส่งผลให้ระยะเวลาในการให้ความร้อนพื้นผิวสั้นลง

### 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

เจ็ทอิสระ (Free jet) คือ ของไหลที่มีความเร็วไหลออกจากหัวฉีดสู่ของไหลที่อยู่รอบๆ โดยที่บริเวณแกนกลางของเจ็ทจะมีความเร็วสูงสุด เมื่อห่างจากปากทางออกการกระจายความเร็วความเร็วในแนวรัศมีจะลดลงอย่างต่อเนื่อง และความเร็วในแนวแกนของเจ็ทก็จะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ในกรณีที่อุณหภูมิระหว่างเจ็ทและของไหลที่อยู่รอบเจ็ทมีความแตกต่างกันก็จะเกิดการแพร่ของอุณหภูมิขึ้นระหว่างเจ็ทกับของไหลที่อยู่รอบๆ โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างการไหลของเจ็ทอิสระ

(1) ช่วงโพเทินเชียลคอร์ (Potential core zone) เป็นบริเวณที่เจ็ทเริ่มไหลออกจากหัวฉีด ความเร็วของเจ็ทที่เกือบเท่ากับความเร็วที่ปากทางออกของหัวฉีด หลังจากที่เจ็ทพุ่งออกจากหัวฉีด แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดจากผลต่างของความเร็วระหว่างเจ็ทกับของไหลที่หยุดนิ่งอยู่รอบๆ จะทำให้บริเวณส่วนของโพเทินเชียลคอร์ (Potential core) ของเจ็ทมีขนาดเล็กลงและของไหลบริเวณรอบๆ เจ็ทถูกดูดให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น มีผลทำให้หน้าตัดของเจ็ทขยายตัวกว้างขึ้นตามระยะห่างจากปากทางออก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในหน้าตัดเจ็ทรอบๆ โพเทินเชียลคอร์เรียกว่าเชียร์เลเยอร์ (Shear layer) ที่ตำแหน่งห่างจากปากทางออกของหัวฉีดอย่างมาก ความหนาของเชียร์เลเยอร์ก็จะเพิ่มขึ้นและความยาวของโพเทินเชียลคอร์จะลดลง โดยปกติเจ็ทหน้าตัดวงกลมมีความยาวของโพเทินเชียลคอร์อยู่ในช่วงระหว่าง 4-6 ของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลที่ปากทางออกหัวฉีด

(2) ช่วงการไหลกำลังพัฒนาตัว (Developing zone) เป็นช่วงที่โพเทินเชียลคอร์หมดไป และเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ท โดยความเร็วในแนวแกนจะค่อยๆ ลดลงและมีการขยายตัวของหน้าตัดเจ็ทในแนวแกนรัศมี ระดับความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ภายในเจ็ทจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วงนี้

(3) ช่วงการไหลที่พัฒนาตัวแล้ว (Fully developed zone) เป็นบริเวณต่อจากช่วงการไหลกำลังพัฒนาตัวของเจ็ท ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วภายในเจ็ทอย่างสมบูรณ์ และเป็นบริเวณที่โมเมนต์ของเจ็ทจะลดลงเมื่อห่างออกมาจากปากทางออกของหัวฉีดมากขึ้น

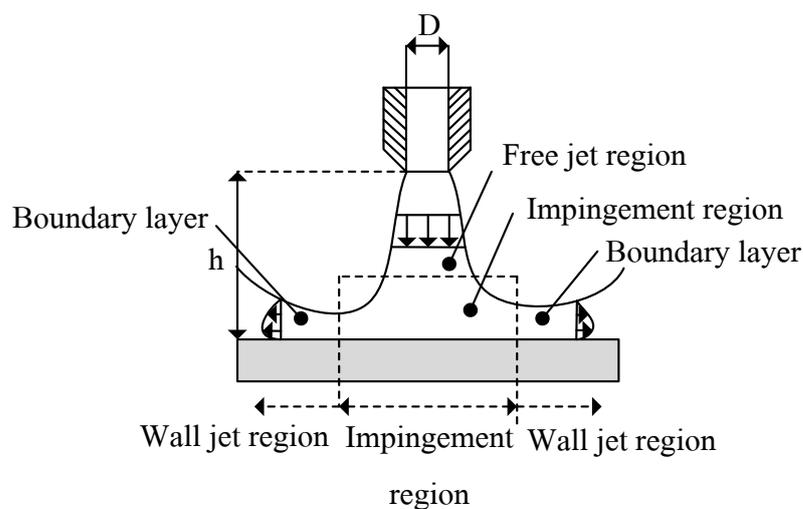
## 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชน

เจ็ทพุ่งชน (Impinging jet) คือของไหลที่พุ่งออกจากหัวฉีดถูกบังคับให้ไหลพุ่งชนพื้นผิว รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการไหลกรณีเจ็ทพุ่งชนตั้งฉากบนพื้นผิว จากรูปโครงสร้างของเจ็ทพุ่งชนสามารถแบ่งได้ 3 ช่วง ดังนี้

(1) ช่วงเจ็ทอิสระ (Free jet region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลออกจากหัวฉีดซึ่งจะมีโพ텐เชียลคอร์ (Potential core) อยู่กึ่งกลางโดยที่ความยาวของโพ텐เชียลคอร์ขึ้นอยู่กับระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนและการจำกัดบริเวณการไหลของเจ็ทหลังจากที่เจ็ทพุ่งชนพื้นผิว โดยลักษณะทั่วไปส่วนที่เป็นเจ็ทอิสระของเจ็ทพุ่งชนจะเหมือนกับลักษณะทั่วไปของโครงสร้างการไหลเจ็ทอิสระ

(2) บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Impingement region) เป็นส่วนที่เจ็ทไหลพุ่งชนพื้นผิวโดยตรงและบริเวณรอบๆ ซึ่งก่อนเจ็ทจะพุ่งชนพื้นผิวความเร็วของเจ็ทเริ่มลดลงและมีความเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) หลังจากนั้นเจ็ทจะไหลบนพื้นผิวล้อมรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนภายในบริเวณนี้จะเกิดความเร่งของการไหลรอบจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนเนื่องจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลจากแนวแกนเป็นแนวรัศมีอย่างกะทันหันหลังจากการชนพื้นผิว

(3) ช่วงเจ็ทผนัง (Wall jet region) เป็นการไหลของเจ็ทในแนวขนานบนพื้นผิวรอบๆ บริเวณที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) หลังจากการชน ในบริเวณนี้ความเร็วของเจ็ทที่ไหลบนพื้นผิวจะเริ่มลดลง โดยที่อัตราการลดความเร็วจะแปรผกผันจากระยะจุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนตามแนวรัศมี ซึ่งส่งผลให้ชั้นขอบเขต (Boundary layer) บนพื้นผิวจะค่อยๆ หนาขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิว

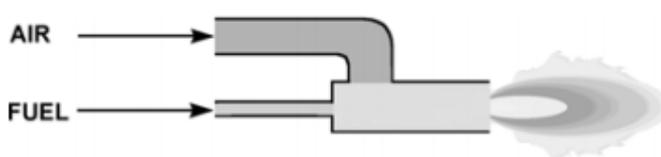
## 2.3 เจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อนและแบบแพร่กระจาย

โดยปกติแล้วเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนจะมีใช้ในกระบวนการให้ความร้อน เพราะสามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงและง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ เจ็ทเปลวไฟสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

(1) เจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed flame jet)

(2) เจ็ทเปลวไฟแบบแพร่ (Non-premixed flame jet หรือ Diffusion flame jet)

ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งจะแสดงลักษณะของเปลวไฟเมื่อแบ่งประเภทของเปลวไฟตามพฤติกรรมการผสมของเชื้อเพลิง และออกซิไดเซอร์



(ก) เปลวไฟแบบผสมมาก่อน



(ข) เปลวไฟแบบแพร่

รูปที่ 2.3 แสดงประเภทของเปลวไฟแบบผสมมาก่อน และแบบแพร่ [3]

แบบผสมมาก่อน (Premixed mode) อากาศและเชื้อเพลิงจะมีการผสมกันก่อนที่จะมีการเผาไหม้ ส่วนแบบการผสมภายหลัง (Diffusion mode) อากาศจะไหลเข้าชานกับการไหลของเชื้อเพลิงซึ่งอากาศจะกระจายผสมกับเชื้อเพลิงที่ปากทางออกของห้องเผาไหม้และเกิดการเผาไหม้ขึ้นที่ปากทางออก

สำหรับการใช้ประโยชน์ของเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed flame jet) โดยพื้นฐานจะมีการนำมาประยุกต์ใช้ในห้องเผาไหม้ที่มีขนาดเล็กโดยเฉพาะและการนำมาประยุกต์ใช้ภายในเครื่องยนต์ ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงโหมดของการเผาไหม้ การผสมเชื้อเพลิงแก๊สกับตัวออกซิไดเซอร์ที่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ความร้อน และลดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สกับตัวออกซิไดเซอร์

การศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อนพุ่งชนพื้นผิวขึ้นอยู่กับ 2 ตัวแปรหลัก คือ ตัวแปรมีผลมาจากเชื้อเพลิงแก๊สและตัวออกซิไดเซอร์ ได้แก่ ชนิดของ

เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ อัตราส่วนผสมสมมูล ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เป็นต้น และตัวแปรที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพทางความร้อนโดยตรง ได้แก่ รูปทรงและขนาดของปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟ ระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทเปลวไฟถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน รูปทรงของพื้นผิวที่พุ่งชน เป็นต้น ซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการศึกษาค่าถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อนพุ่งชนพื้นผิวทั้ง 2 กรณีข้างต้น ยังมีการศึกษาข้อมูลในส่วนนี้ค่อนข้างน้อย

## 2.4 การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ

วิธีการให้ความร้อนโดยใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมและนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น การให้ความร้อนแก่โลหะ การหลอมแก้ว เป็นต้น

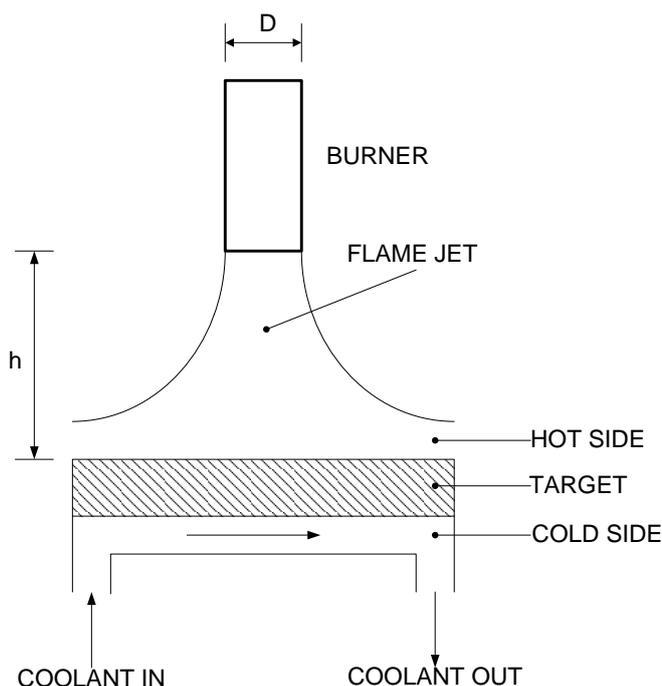
การถ่ายเทความร้อน โดยใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนมีทั้งหมด 4 โหมด ได้แก่ การพาความร้อน (Convection) การแผ่รังสี (Radiation) ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจากการเผาไหม้ (Thermochemical heat release, TCHR) การควบแน่น (Condensation)

### 2.4.1 การพาความร้อน

การพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) และการพาความร้อนแบบผสม (Mixed convection) ซึ่งการพาความร้อนแบบบังคับเป็นโหมดของการพาความร้อนที่สำคัญต่อการพาความร้อนบนพื้นผิว ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเจ็ทเปลวไฟที่ผ่านมาได้ให้ความสนใจการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก เพราะการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนระหว่างเปลวไฟไปยังพื้นผิวที่พุ่งชนเป็นเทคนิคที่ให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว และข้อดีของการถ่ายเทความร้อนแบบการพาความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนคือ สามารถให้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่รวดเร็ว โดยปกติการถ่ายเทความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวกว่า 80% เป็นการพาความร้อนแบบบังคับ และเป็นโหมดสำคัญในการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนสำหรับเจ็ทเปลวไฟพุ่งชน

โดยปกติในโหมดของการถ่ายเทความร้อนเป็นการพาความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟพุ่งไปยังพื้นผิวที่พุ่งชน ดังนั้นเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวจึงเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากและได้รับความสนใจอย่างมากในการศึกษาการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ซึ่งได้มีการศึกษาเพิ่มเติมโดย Van Der Meer [2] ได้ให้คำแนะนำในการใช้เจ็ทเปลวไฟแบบพุ่งชนพื้นผิวในการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็วในเตาเผา สามารถช่วยประหยัดพลังงานและเวลา ซึ่งการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟจะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบ Turbulent force convection

เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความสำคัญอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ในรูปที่ 2.4 เป็นตัวอย่างการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิวที่พุ่งชนซึ่งบริเวณด้านตรงข้ามของพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีการใช้น้ำในการระบายความร้อนด้านหลังพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน



รูปที่ 2.4 แสดงการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อน

#### 2.4.2 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ การแผ่รังสีแบบไม่เรืองแสง (Non-Luminous) การแผ่รังสีแบบเรืองแสง (Luminous) และการปลดปล่อยพลังงานจากพื้นผิว (Emission) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ซึ่งเป็นการแผ่รังสีในกรณีที่ไม่มีการเรืองแสงของเปลวไฟ สำหรับการแผ่รังสีจากการเรืองแสงของเปลวไฟเกิดขึ้นเมื่อการเผาไหม้นั้นมีอนุภาคของเขม่า ซึ่งการแผ่รังสีความร้อนในกรณีนี้จะมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการเผาไหม้ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลวและเชื้อเพลิงแข็ง แต่จะไม่พบในการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊ส เช่น แก๊สชีวเทน แก๊สโพรเพน และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวการแผ่รังสีความร้อนมีผลน้อยมากในโหมดการถ่ายเทความร้อนเมื่อเทียบกับการพาความร้อน

### 2.4.3 ปฏิกริยาการคายความร้อนทางเคมี

การถ่ายเทความร้อนเป็นการปลดปล่อยพลังงานจากปฏิกริยาทางเคมี (Thermochemical heat release, TCHR) ซึ่งเป็นโหมคการถ่ายเทความร้อนที่มีความสำคัญมากในกรณีที่เปลวไฟมีอุณหภูมิสูง เพราะเป็นการแยกตัวทางเคมีของเชื้อเพลิงซึ่งมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเปลวไฟ

### 2.4.4 การควบแน่น (Condensation)

การควบแน่นจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิมบนพื้นผิวต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point) จากการเผาไหม้แก๊สเชื้อเพลิง ซึ่งไอน้ำจากการเผาไหม้แก๊สจะเกิดการกลั่นตัวและปลดปล่อยพลังงานออกมา ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดการควบแน่นจึงควรให้อุณหภูมิมบนพื้นผิวมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง เพื่อป้องกันการเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำจากการเผาไหม้

## 2.5 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทบนพื้นผิว

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวด้วยเจ็ทพุ่งชน ได้แก่ ความยาวของเปลวไฟ ระยะจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน อัตราส่วนผสมผสม และลักษณะปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟ ซึ่งมีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทที่พุ่งชนบนพื้นผิว

### 2.5.1 ความยาวของเปลวไฟ

สำหรับการเผาไหม้ที่สมดุลทางทฤษฎี ในโซนของปฏิกริยาของเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed flame jet) จะมีลักษณะเป็นกรวยสีฟ้าเกิดขึ้นบริเวณส่วนยอดของเปลวไฟ และมีลักษณะที่ยาวขึ้นในแนวแกนและมีลักษณะโค้งเข้าหากันบริเวณส่วนยอดของเจ็ทเปลวไฟ ซึ่งความยาวของโซนปฏิกริยานี้มีความสำคัญในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว และความยาวของโซนปฏิกริยาจะความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของเชื้อเพลิงแก๊ส Morcos และ Abdel-Rahim [20] ได้ทำการวิเคราะห์ความยาวของเปลวไฟจากรูปทรงของเตาเผาและพารามิเตอร์ต่างๆ ดังสมการ

$$L_f = 0.8 + L_f + D_t \left( \frac{X}{L_t} \right)^{0.5} \left[ \frac{401.1}{\left( \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \right)} - \frac{776.25}{\left( \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \right)^2} - 27.37 \left( \frac{P_f}{P_a} \right)^{0.65} + \frac{10.39}{g D_t^5} \left( \frac{\dot{m}_f}{\rho_f} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

โดยที่

$L_f$  คือ ความยาวของเปลวไฟ

$D_t$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ออกจากห้องเผาไหม้

$L_t$  คือ ความยาวท่อที่ออกจากห้องเผาไหม้

$X$  คือ ระยะห่างระหว่างปากทางออกของเตาเผาถึงปากทางเข้าห้องเผาไหม้

$\dot{m}_a / \dot{m}_f$  คือ อัตราส่วนการไหลเชิงมวลของอากาศและเชื้อเพลิง

$P_f / P_a$  คือ อัตราส่วนความดันของเชื้อเพลิงและอากาศ

จากสมการคำนวณความยาวของเปลวไฟ พบว่าความยาวของเปลวไฟจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของอากาศและเชื้อเพลิง และความยาวของเปลวไฟเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความยาวท่อที่ออกจากห้องเผาไหม้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ความยาวของท่อที่ออกจากห้องเผาไหม้และอัตราส่วนการไหลเชิงมวลของอากาศและเชื้อเพลิงมีผลต่อลักษณะความยาวของเปลวไฟ

### 2.5.2 ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน

ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน (Nozzle-to-plate distance, H/D) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวและเจ็ทเปลวไฟอิสระก่อนการพุ่งชน ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลและมีผลต่อการพัฒนาการไหลของเจ็ทเช่นเดียวกับเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเจ็ทเปลวไฟ ผลทางกายภาพจากการพุ่งชนพื้นผิวจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน และเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อจุดที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) และอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟ การเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนมีผลทำให้โครงสร้างของเปลวไฟและอัตราการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลง

โดยทั่วไป บริเวณที่เจ็ทพุ่งชนโดยตรงจะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่สูง โดยเฉพาะที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชน (Stagnation point) จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงที่สุดเมื่อเทียบกับบริเวณรอบๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับ

ระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และ โครงสร้างการไหลของเจ็ทก่อนที่จะพุ่งชนพื้นผิว ในกรณีที่ส่วนปลายสุดของ Potential core พุ่งชนพื้นผิว จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนสูงที่สุด เนื่องจากการไหลของเจ็ทมีโมเมนตัมและมีค่าความปั่นป่วน (Turbulence intensity) ที่สูง แต่กรณีระยะจากปากทางออกของเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนที่จุดศูนย์กลางที่เจ็ทพุ่งชนจะลดลง เนื่องจาก โมเมนตัมของเจ็ทที่พุ่งชนพื้นผิวลดลง

### 2.5.3 อัตราส่วนผสมสมมูล

สำหรับอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) ที่ใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนจะอยู่ในช่วง  $0.65 \leq \phi \leq 1.83$  ซึ่งอัตราส่วนสมมูลมีผลต่อแนวโน้มในการเกิดเขม่าและระดับการแยกตัวของแก๊สจากการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ การเผาไหม้เชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ที่มีอัตราการเผาไหม้เข้าใกล้การเผาไหม้ทางทฤษฎีคือ มีลักษณะการเผาไหม้ที่สมบูรณ์มีผลทำให้อุณหภูมิของเปลวไฟมีค่าสูงสุด อัตราส่วนสมมูลสามารถพิจารณาได้ 3 กรณี คือ กรณีที่เชื้อเพลิงมากกว่าตัวออกซิไดเซอร์ ( $\phi > 1$ ) กรณีที่เชื้อเพลิงน้อยกว่าอากาศ ( $\phi < 1$ ) และกรณีที่อัตราส่วนเชื้อเพลิงเท่ากับตัวออกซิไดเซอร์ ( $\phi = 1$ )

อัตราส่วนผสมสมมูล (Equivalence ratio) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_{stoic}} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\Phi$  คือ อัตราส่วนผสมสมมูล

$F/A$  คือ อัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิง-ออกซิเจนที่ใช้จริง

$(F/A)_{stoic}$  คือ อัตราส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิง-ออกซิเจนทางทฤษฎีที่เผาไหม้สมบูรณ์

### 2.5.4 ลักษณะปากทางออกเจ็ทเปลวไฟ

รูปร่างของปากทางออกเจ็ทมีผลอย่างมากต่อคุณสมบัติการไหลของเจ็ทสองประการคือ ลักษณะการกระจายความเร็ว (Velocity profile) และความปั่นป่วน (Turbulence profiles) ซึ่งคุณสมบัติการไหลของเจ็ททั้งสองประการมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว คือเจ็ทพุ่งชนที่มีความเร็วและระดับความปั่นป่วนที่สูงจะมีผลทำให้การถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวสูงตามไปด้วย

## 2.6 งานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีให้ความร้อนอย่างรวดเร็วด้วยวิธีใช้เปลวไฟพุ่งชนบนพื้นผิว โดยตรงเป็นวิธีการให้ความร้อนแก่พื้นผิวที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมผลิตโลหะ อุตสาหกรรมผลิตแก้ว และอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ รวมถึงกระบวนการในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วน เช่น งานตัด เชื่อม หลอมเหลวโลหะ การขึ้นรูปวัสดุแก้วและโลหะ เนื่องจากการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ ทำให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนแก่พื้นผิวสูงกว่าวิธีเดิมที่ใช้กลไกการแผ่รังสีให้ความร้อนแก่พื้นผิว สามารถให้ความร้อนแก่พื้นผิวได้อย่างรวดเร็วขึ้น ทำให้สามารถลดเวลาของกระบวนการให้ความร้อนและช่วยประหยัดพลังงานได้ นอกจากนี้ยังมีการนำมาประยุกต์ใช้ในเตาเผาอุตสาหกรรม เนื่องจากให้อัตราการพาความร้อนที่สูง โดยทั่วไปแล้วการใช้เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนจะเหมาะสมกับงานให้ความร้อนแบบเฉพาะจุด

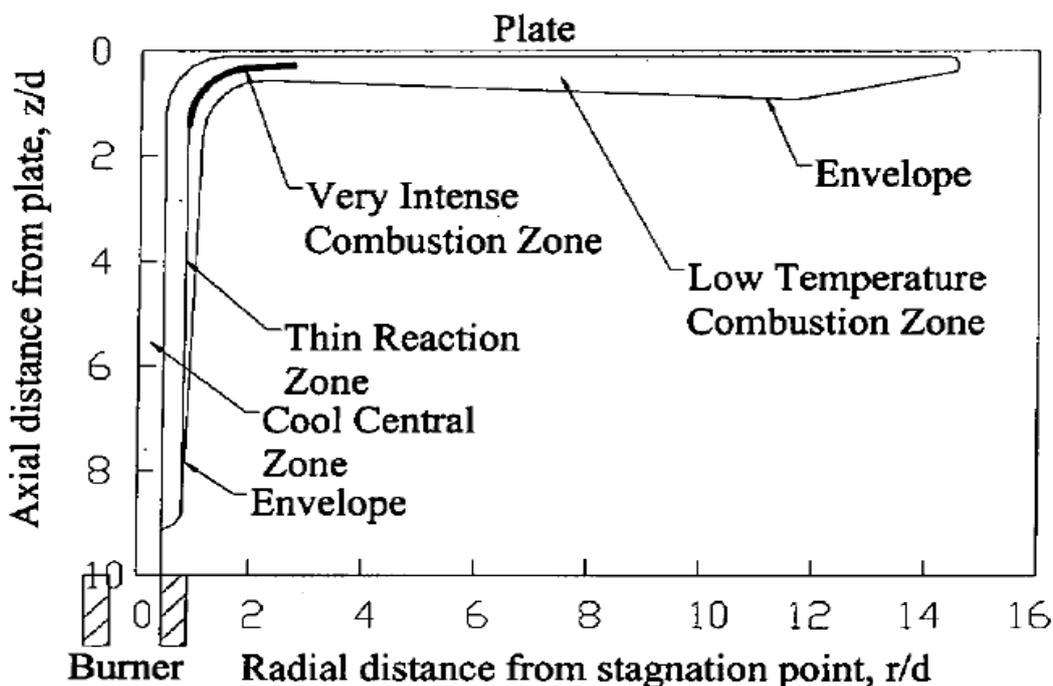
ในการศึกษาเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวนั้นจะให้ความสำคัญในส่วนของตัวแปรที่มีผลกระทบต่อลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟและมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนพื้นผิวเป็นหลัก ซึ่งโดยปกติแล้วเจ็ทเปลวไฟสามารถแบ่งตามลักษณะออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ เจ็ทลำเดี่ยวจากท่อ (Single circular jet) เจ็ทลำเดี่ยวจากสลีต (Single slot jet) และกลุ่มเจ็ทจากสลีต (Multiple slot jet) เป็นต้น และพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของเปลวไฟและคุณลักษณะในการถ่ายเทความร้อนเจ็ทเปลวไฟได้แก่ ระยะห่างจากปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน (Nozzle-to-plate distance) ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ทเปลวไฟ อัตราส่วนผสมสมมูลของเจ็ทเปลวไฟ และลักษณะปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟ เป็นต้น

Zhang และ Bray [3] ได้ศึกษารูปร่างและโครงสร้างของเปลวไฟ ได้นำเสนอโหมดพื้นฐานในการเผาไหม้ของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนไว้ 5 โหมด ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการทดลองโดยพิจารณาจากการทำปฏิกิริยาของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวซึ่งได้แก่ Conical flame, Disc flame, Envelop flame, Ring flame และ Cool central core flame เงื่อนไขดังกล่าวข้างต้นมีผลต่อรูปร่างของเปลวไฟและเสถียรภาพของเปลวไฟโดยตรง

Schulte และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟแบบราบเรียบที่มีการผสมมาก่อน พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงบริเวณที่อยู่ห่างจากจุดยอดของชั้น Primary cone และจะทำให้ชั้น Cool central core ลดลงด้วย

Milson และ Chigier [5] ได้ทำการทดลองเพื่อพิจารณาการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟ และได้ระบุโซนจากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากการทดลองการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟนั้นบริเวณที่มีการเผาไหม้ที่มีความเข้มข้นสูงนั้นจะอยู่ในบริเวณที่เจ็ทเปลวไฟพุ่ง

ชนพื้นผิว (Stagnation region) และในโซนที่มีการเผาที่อุณหภูมิต่ำลงนั้นจะอยู่ในบริเวณที่เปลวไฟเกิดการยกตัวขึ้นหลังจากที่พุ่งชนพื้นผิว (Wall jet region) บริเวณ Cool central core ของเปลวไฟทั้งสองกรณีคือ เปลวไฟแบบผสมมาก่อน และเปลวไฟแบบผสมกันภายหลัง เป็นบริเวณที่ไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์



รูปที่ 2.5 แสดงโซนการเผาไหม้จากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟ [5]

ความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่เกิดจากการพุ่งชนของเปลวไฟดังรูปที่ 2.5 จะเป็นการแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละโซนของการเผาไหม้ Fairweather และคณะ [6] ได้ให้คำแนะนำในส่วนบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงจะอยู่ในบริเวณที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิว ซึ่งบริเวณนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์จะสอดคล้องกับการเผาไหม้ทางทฤษฎีประกอบกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนผสมจะทำให้เกิดการพุ่งชนแบบหมุนวน นอกจากนี้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำซึ่งเกิดขึ้นในส่วนของบริเวณเจ็ทผนัง (Wall jet region) จะมีลักษณะการเผาไหม้เป็นแบบบาง (Fuel-lean, การเผาไหม้ที่มีการผสมของแก๊สเชื้อเพลิงน้อยกว่าออกซิไดเซอร์) ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของอากาศภายนอกห้องเผาไหม้ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการศึกษาของ Milson และ Chigier [5]

Posillico และ Lederman [7] ได้ทำการศึกษาความเสถียรของเปลวไฟที่ปากทางออก พบว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ที่ส่วนปลายของโพเทินเซิลคอร์ เนื่องจากเป็น

บริเวณที่ความเข้มข้นของก๊าซออกซิเจนมีค่าเป็นศูนย์จึงสอดคล้องกับการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ตามทฤษฎี

Hargrave และคณะ [8,9] ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนแบบบังคับ จากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed Flames) พบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงจะอยู่ในโซนที่เกิดปฏิกิริยาเพราะในโซนนี้เปลวไฟจะมีความเร็วที่สูงที่สุด ในส่วนปลายของโซนที่เกิดปฏิกิริยาค่าฟลักซ์จะลดลงเนื่องจากการลดลงของความเร็วและอุณหภูมิของเจ็ทเปลวไฟ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนพื้นผิวจะพิจารณาจากเงื่อนไขของเจ็ทเปลวไฟและคุณสมบัติของเปลวไฟซึ่งตัวแปรที่มีผลกระทบโดยตรงคือ อัตราส่วนผสมสมมูล (Equivalence ratio) ระหว่างเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์

Milson และ Chigier [5] ได้ทำการศึกษาลักษณะการผสมของแก๊สเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ พบว่ากรณีเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อน (Premixed flame jet) มีอัตราการเผาไหม้และอุณหภูมิสูงกว่า เจ็ทเปลวไฟแบบผสมภายหลังหรือแบบแพร่ (Diffusion flame jet) และสามารถเผาไหม้สมบูรณ์ได้รวดเร็วกว่าเจ็ทเปลวไฟแบบผสมภายหลัง

นอกจากนี้ Milson และ Chigier [5] และ Hargrave และคณะ [8,9] ได้เสนอว่าค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดไม่ได้เกิดขึ้นที่จุดพุ่งชน (Stagnation point) จากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟไปยังพื้นผิว แต่จะเลื่อนออกตามแนวรัศมีจากจุดพุ่งชน (Stagnation point) ที่อยู่บนพื้นผิวพุ่งชน ซึ่งระยะการเลื่อนออกของค่าสูงสุดของฟลักซ์ความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์บริเวณปากทางออกของเจ็ทเปลวไฟ

Dong และคณะ [10] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวโดยใช้เชื้อเพลิงบิวเทนผสมกับอากาศ จากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุดจะเลื่อนออกจากจุดพุ่งชน (Stagnation point) เมื่อระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนลดลงซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ นอกจากนี้ Mizuno และคณะ [11] ได้พิจารณาค่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer efficiency) จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟแบบผสมมาก่อนพุ่งชนพื้นผิวพบว่าค่าการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มค่าความร้อนแต่จะทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนลดลง

ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทเปลวไฟถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งมีผลต่อโครงสร้างการไหลของเจ็ทเปลวไฟและคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในบริเวณเจ็ทพุ่งชน (Stagnation region) การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟ แต่การศึกษาข้อมูลในส่วนนี้ยังมีไม่มากนัก การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขตการไหล (Boundary layer) ที่เกิดจากการพุ่งชนของเปลวไฟทำได้ยาก ซึ่งจำเป็นจะต้องพิจารณาจากตัวแปรค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของเจ็ท

เปลวไฟ และอัตราส่วนผสมสมมูลของเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ซึ่งยากต่อการพิจารณา จึงมีการศึกษาโครงสร้างเปลวไฟโดยพิจารณาจากความยาวของเปลวไฟและความกว้างของเปลวไฟแทน

Zang และBray [3] ได้อธิบายว่าระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่น้อยมากๆจะทำให้เกิด Cool center core ขึ้นใกล้กับพื้นผิว และจะทำให้การผสมระหว่างเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดเซอร์ในแนวแกนไม่สมบูรณ์

Baukal และGebhart [12] ได้ทำการศึกษาผลของระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนพบว่าประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนจากการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mizuno และคณะ [11]

สำหรับการศึกษาการพุ่งชนของเจ็ทเปลวไฟมีความสำคัญเป็นอย่างมากซึ่งจะมีผลต่อความยาวของโพเทนเชียลคอร์ (Potential core) และพบว่าการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟจะมีค่าสูงขึ้นโดยขึ้นอยู่กับระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนที่เหมาะสมจะทำให้สมรรถนะในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟมีค่าสูงสุดและสอดคล้องกับความยาวของโพเทนเชียลคอร์ ซึ่งระยะที่เหมาะสมที่สุดคือที่ระยะ  $H/D=6$  [13]

ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เหมาะสมจำเป็นจะต้องพิจารณาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และค่าอัตราส่วนผสมสมมูลด้วยเพราะตัวแปรดังกล่าวมีผลต่อความเร็วของเจ็ทเปลวไฟ ความยาวของเจ็ทเปลวไฟ และอัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชนด้วย

Viskanta [14] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ได้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่มากที่สุด สำหรับเจ็ทลำเดียวโดยพิจารณาค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และอัตราส่วนผสมสมมูลซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hargrave และคณะ [7, 8] พบว่าที่ระยะ  $H/D=2$  และค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ 2,000 จะได้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่สูงที่สุด ซึ่งอยู่ใกล้โซนที่เกิดปฏิกิริยาและเปลวไฟจะมีความเร็วมากที่สุด Vandermeer [3] พบว่า ที่ระยะห่างจากปากทางออกเจ็ทถึงพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชนที่ระยะ  $H/D=5$  และค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์อยู่ในช่วง 1,771-2,700 จะให้สมรรถนะทางความร้อนที่สูงที่สุด

Cremers และคณะ [15] ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟผสมก่อนแบบราบเรียบ เพื่อนำไปใช้ในการให้ความร้อนแกวในอุตสาหกรรมผลิตหลอดไฟ ในงานวิจัยได้ศึกษาเปลวไฟ 2 ชนิด คือกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนผสมออกซิเจน และกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนผสมอากาศเป็นตัว

ออกซิไดซ์ ที่ใช้ในการศึกษาใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเพื่อทำนายสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของเปลวไฟบนพื้นผิว

M.J. Remie และคณะ [16] ได้ใช้โปรแกรมจำลองพลศาสตร์ด้านการไหล ANSYS, Fluent ในการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว เพื่อยืนยันกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ พบว่าผลจากทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน หลังจากนั้น M.J. Remie และคณะ [17] ได้ทดลองวัดการกระจายของอุณหภูมิบนแผ่นควอทซ์ที่ถูกเปลวไฟของมีเทนผสมออกซิเจนและมีเทนผสมไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยใช้เทคนิควัดการเรืองแสงจากสารเคลือบเทอร์โมกราฟิฟฟอสฟอรัส เพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการความสัมพันธ์ของฟลักซ์การพาความร้อนบนพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

Tuttle และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาการกระจายของฟลักซ์ความร้อนบนพื้นผิวที่ถูกเจ็ทเปลวไฟผสมระหว่างมีเทนและอากาศพุ่งชนตั้งฉากกับพื้นผิว ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนสมมูลเชื้อเพลิง เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ และระยะห่างระหว่างปากทางออกเจ็ทกับพื้นผิวที่เจ็ทพุ่งชน และศึกษาโครงสร้างของเปลวไฟโดยวิธีถ่ายภาพ พบว่าที่เงื่อนไขระยะพุ่งชนน้อยกว่า 14 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากทางออกเจ็ท เปลวไฟจะมีลักษณะเสถียรและมีโครงสร้างเปลวไฟที่สมมาตร แต่ที่ระยะพุ่งชนสูงกว่านี้ จะสังเกตเห็นการสั่นของเปลวไฟซึ่งเป็นผลจากแรงลอยตัวทำให้เปลวไฟไม่เสถียร เปลวไฟที่มีค่าอัตราส่วนสมมูลต่ำกว่า 2 จะมีโครงสร้างเป็นเปลวไฟเจ็ทแบบผสมมาก่อน แต่จะแสดงลักษณะโครงสร้างเปลวไฟแบบแพร่เมื่อมีอัตราส่วนสมมูลสูงขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนสมมูลจะมีผลทำให้เปลวไฟในบริเวณผนังมีขนาดเพิ่มขึ้น ในขณะที่เปลวไฟที่บริเวณตำแหน่งเจ็ทอิสระและตำแหน่งที่เจ็ทพุ่งชนมีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง ฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนของเปลวไฟแบบผสมมาก่อนจะสูงกว่าของเปลวไฟแบบแพร่ เนื่องจากการคายความร้อนแก่พื้นผิวของเปลวไฟจะรวดเร็วกว่า และ Tuttle และคณะ [19] ได้วัดการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ความร้อนที่เวลาต่างและแสดงผลการเปลี่ยนแปลงในรูปของ RMS (Root mean square), PDF (Probability distribution function) และ PSD (power spectral density) พบว่าเปลวไฟแบบผสมก่อนจะให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ความร้อนแบบ RMS ที่ต่ำ และลักษณะของความถี่จะบ่งบอกถึงโครงสร้างของการไหลแบบหมุนวนที่เกิดจากแรงลอยตัวในชั้นการไหลแบบเนียนระหว่างแก๊สอากาศร้อนกับอากาศที่อยู่รอบๆ ซึ่งให้ผลตรงข้ามกับกรณีของเปลวไฟแบบแพร่ที่จะมีค่า RMS ที่สูงกว่ามาก สำหรับค่า PSD จะบ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างการไหลแบบหมุนวนที่มีขนาดใหญ่กว่า พุ่งชนพื้นผิว

อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้แบบเพิ่มออกซิเจนน้อยมาก เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างเดียว จึงจำเป็นต้องมีศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ในโครงการวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาเจ็ทเปลวไฟที่ใช้กระบวนการเผาไหม้แบบเติมออกซิเจนเพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการตัดเหล็กในอุตสาหกรรม

ลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟพุ่งชนพื้นผิวได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง เพราะมีความสำคัญอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม งานวิจัยที่ผ่านมาเป็นการศึกษาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแก๊สกับอากาศ สำหรับงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาลักษณะการไหลและการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟเป็นการศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟได้แก่ ระยะห่างจากปากทางออกถึงพื้นผิวที่เจ็ทเปลวไฟพุ่งชน อัตราส่วนผสมสมมูล ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ ชนิดของเชื้อเพลิงแก๊ส และตัวออกซิไดเซอร์ เป็นต้น โดย Viskanta [14] และ Baukal และ Gebhart [12] ได้ทำการศึกษาลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญ

จากการทบทวนเอกสารวิจัย พบว่าอัตราการให้ความร้อนโดยใช้เปลวไฟพุ่งชนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเปลวไฟส่วนที่พุ่งชนพื้นผิว ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเปลวไฟ (เป็นแบบผสมภายหลังหรือแบบผสมมาก่อน) ระยะห่างระหว่างหัวเผาและพื้นผิวให้ความร้อน ชนิดของเชื้อเพลิงและออกซิไดเซอร์ที่ใช้ อัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) และเรย์โนลด์นัมเบอร์ ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบนพื้นผิว จนถึงปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟที่พุ่งชนพื้นผิวเรียบเป็นจำนวนมาก มีการศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของเจ็ทเปลวไฟ การถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟบนพื้นผิวทั้งแบบเฉาะจุดและแบบเฉื่อย และการปลดปล่อยมลพิษ แต่ยังมีประเด็นที่ยังต้องศึกษาเพิ่มเติมอีก เช่น การเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟบนพื้นผิว เนื่องจากการให้ความร้อนเป็นกระบวนการในอุตสาหกรรมที่สำคัญ ประกอบกับการเติบโตของอุตสาหกรรมมีผลทำให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในกระบวนการให้ความร้อนด้วยเจ็ทเปลวไฟจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนหรือควบคุมลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทเปลวไฟบนพื้นผิว สามารถทำได้ด้วยวิธีการควบคุมลักษณะการไหลของเจ็ทเปลวไฟจากปากทางออกเจ็ท หรือเพิ่มระดับความปั่นป่วนของเจ็ทเปลวไฟ

## 2.7 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

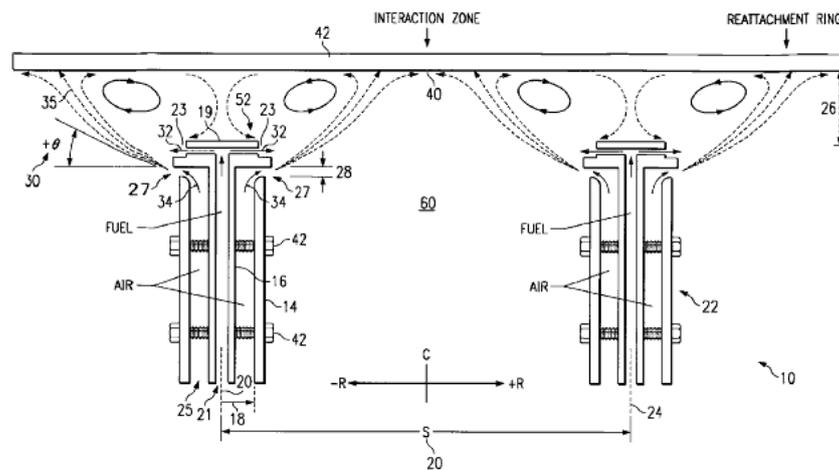
มีสิทธิบัตรจำนวนมากที่นำเสนอเกี่ยวกับการใช้เจ็ทเปลวไฟ งานเจาะ งานตัด และงานให้ความร้อนแผ่นโลหะ ตัวอย่างเช่น

Farmer และ คณะ [21] ได้นำเสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับวิธีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานโลหะโดยใช้เปลวไฟจากออกซิเจนผสมกับเชื้อเพลิง ฟุ้งชนพื้นผิวโลหะโดยตรง เปลวไฟจะฟุ้งชนกับผิวโลหะแบบเป็นจังหวะเปิดและปิด เช่น เปิดให้เปลวไฟฟุ้งชน 10 วินาที และมีการปิดเปลวไฟ 10 วินาทีสลับกันไป วิธีนี้สามารถช่วยลดเวลาในการให้ความร้อนและประหยัดเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนชิ้นงานได้โดยไม่ทำให้ผิวโลหะเสียหายหรือละลายระหว่างให้ความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2.6

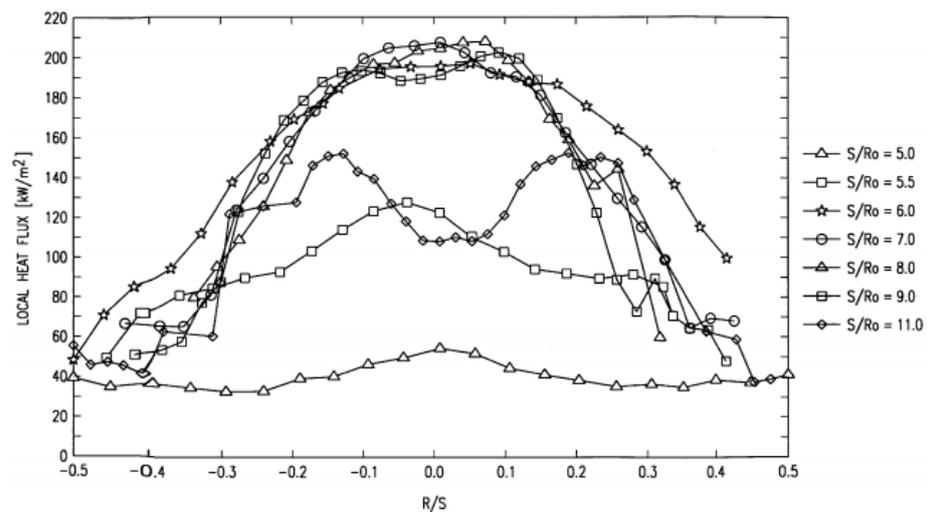
Trial #: 3A1		
Test Material: 4" RCS Medium Carbon Steel (1040)		
Initial Temperature: 40° F.		
Final Temperature: 2080° F. ± 30° F.		
Heating Time: 9 minutes		
Heating Rate: 227° F/min. vs. Heating Rate (Conventional): 20–50° F/min		
Method - Single Zone Heating, On/Off Cycling, Multiple Firing Rates		
Step	Cycle On time/Off time (sec)	(Heat Flux) (MM Btu · hr <sup>-1</sup> · ft <sup>-2</sup> )
1	120/10	1.125
2	30/10	1.125
3	15/15	1.50
4	15/15	1.50
5	10/10	1.50
6	10/10	1.50
7	10/10	1.50
8	10/10	1.50
9	10/10	1.125
10	10/10	1.125
11	10/10	1.125
12	10/10	1.125
13	08/10	1.125
14	08/10	1.125
15	08/10	1.125
16	08/10	1.125
17	08/70	1.125
Total	300/240	

รูปที่ 2.6 แสดงค่าฟลักซ์ความร้อนของเปลวไฟฟุ้งชนพื้นผิวโลหะแบบเป็นจังหวะเปิดและปิด [21]

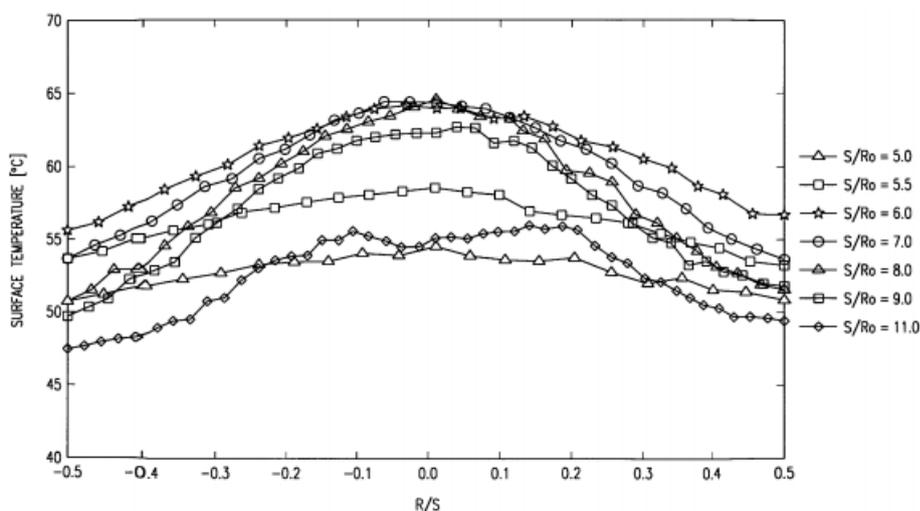
Yagoobi และ คณะ [22] ได้นำเสนอสิทธิบัตรเกี่ยวกับหัวเผาเจ็ทแบบไหลออกในแนวรัศมี ที่มีปากทางออก 2 ตำแหน่งวางอยู่ในแนวแกนเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยเปลวไฟที่ออกมาจากปากทางออกทั้งสองจะไหลชนกับผนังที่ต้องการให้ความร้อน และในสิทธิบัตรนี้ได้ นำเสนอข้อมูลการกระจายของฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิบนพื้นผิวในกรณีที่เปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวเผาเจ็ทจำนวน 2 หัว พบว่าในกรณีที่มี  $S/R_0 = 7.0$  เป็นกรณีที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนและอุณหภูมิบนพื้นผิวสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะปากทางออกเจ็ทแบบไหลออกในแนวรัศมีพุ่งชนพื้นผิว 2 ตำแหน่งที่วางอยู่ในแนวเดียวกัน [22]



รูปที่ 2.8 แสดงค่าฟลักซ์ความร้อนเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวเผาเจ็ทแบบไหลออกในแนวรัศมี [22]



รูปที่ 2.9 แสดงอุณหภูมิบนพื้นผิวเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างหัวเผาเจ็ทแบบไหลออกในแนวรัศมี [22]

## 2.8 การเผาไหม้แบบเพิ่มออกซิเจน

ในอุตสาหกรรมกระบวนการให้ความร้อนจะได้ความร้อนส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง น้ำมันและก๊าซ และใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์ในการเผาไหม้ ในบางกรณีที่ต้องการอุณหภูมิเปลวไฟที่สูงกว่าปกติอาจใช้ตัวออกซิไดซ์ที่มีปริมาณหรือความเข้มข้นของออกซิเจนมากกว่าอากาศ ซึ่งเรียกว่า การเผาไหม้แบบเพิ่มออกซิเจน (Oxygen-enhanced combustion, OEC) ซึ่งการเผาไหม้อาจใช้ออกซิเจนบริสุทธิ์ผสมกับอากาศ หรือใช้ออกซิเจนเป็นตัวออกซิไดซ์แทนอากาศเลยก็ได้ ในอดีตเนื่องจากราคาต้นทุนของก๊าซออกซิเจนมีราคาสูง จึงทำให้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเติมออกซิเจนยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมมากนัก แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตออกซิเจนได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นสามารถลดต้นทุนในการแยกออกซิเจนจากอากาศได้ ทำให้เทคโนโลยีการเผาไหม้แบบเติมออกซิเจนถูกนำมาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากขึ้น ประกอบกับปัจจุบันมีการคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและปัญหามลพิษมากขึ้น เทคโนโลยีนี้สามารถช่วยลดมลพิษที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ได้ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อน สามารถช่วยประหยัดการใช้เชื้อเพลิงได้ ในขณะที่ช่วยเพิ่มความสามารถของกระบวนการผลิตได้

กระบวนการให้ความร้อนในหลายอุตสาหกรรมอาจเหมาะสำหรับใช้ออกซิเจนผสมกับอากาศ หรือใช้ออกซิเจนแทนอากาศในการเผาไหม้ เช่น กระบวนการให้ความร้อนหรือละลายโลหะ หลอมวัสดุแก้ว อุตสาหกรรมที่ต้องใช้ก๊าซเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1200°C หรือ

กระบวนการที่มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำหรือมีข้อจำกัดทางด้านการถ่ายเทความร้อน ซึ่งมีหลายวิธีที่สามารถทำได้ เช่น วิธีเติมออกซิเจนผสมกับอากาศก่อนเผาไหม้กับเชื้อเพลิง วิธีพ่นออกซิเจนผ่านท่อฉีดโดยตรงผสมกับเปลวไฟที่เผาไหม้ระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง

การใช้ออกซิเจนเผาไหม้กับเชื้อเพลิง ปริมาณของออกซิเจนในตัวออกซิไดเซอร์สามารถนิยามจากสมการ

$$\Omega = \frac{20.9}{0.209(\text{vol}\% \text{O}_2) + (\text{vol}\% \text{air})} \quad (2.3)$$

กระบวนการเผาไหม้แบบเพิ่มออกซิเจน อาจแบ่งได้เป็น 3 ระดับตามค่า  $\Omega$  คือ ในช่วง  $\Omega < 0.30$  เป็นช่วงการเติมปริมาณออกซิเจนระดับต่ำ สามารถนำไปใช้กับหัวเผาที่ออกแบบสำหรับเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศได้โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งระบบเผาไหม้เป็นพิเศษ ในช่วง  $0.30 < \Omega < 0.90$  เป็นช่วงการเติมปริมาณออกซิเจนระดับปานกลาง ต้องใช้หัวเผาที่ออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้เปลวไฟมีความเสถียร และในช่วง  $\Omega > 0.90$  เป็นช่วงการเติมปริมาณออกซิเจนระดับสูง เหมาะสำหรับงานในอุตสาหกรรมที่ต้องการอุณหภูมิสูง อุณหภูมิของเปลวไฟจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสัดส่วนของออกซิเจน

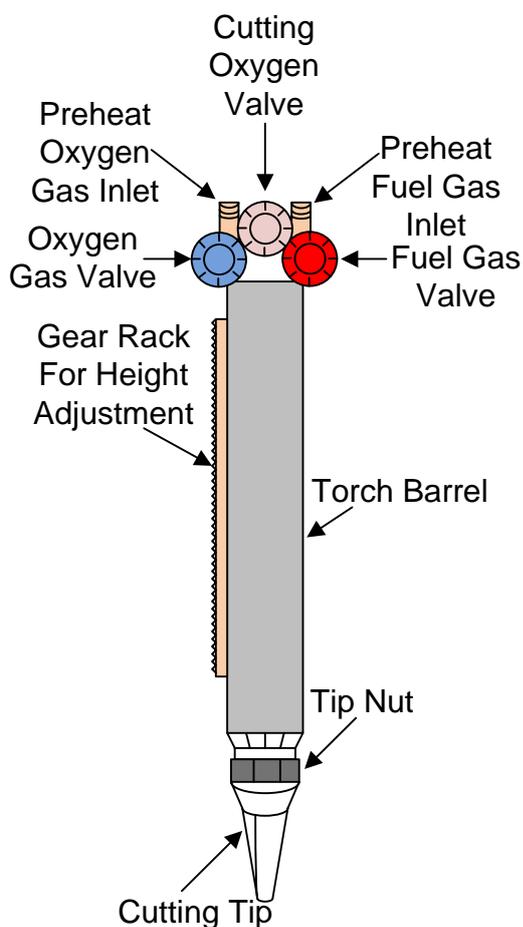
## 2.9 การตัดโลหะด้วยเปลวไฟ

กระบวนการตัดด้วยแก๊สเชื้อเพลิงผสมกับออกซิเจน (Fuel-Oxy cutting) เป็นวิธีที่มีใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเทคนิคที่ให้ความร้อนแก่ชิ้นงานอย่างรวดเร็ว และเทคนิคดังกล่าวสามารถตัดเหล็กที่มีความหนา 0.5-250 mm ได้ สำหรับกระบวนการในการตัดเหล็กดังกล่าวแสดงในรูปแบบที่ ซึ่งการตัดโดยทั่วไปจะเป็นการผสมระหว่างออกซิเจนและเชื้อเพลิงแก๊ส ได้แก่ แก๊สอะเซทิลีน แก๊สโพรเพน แก๊สโพรพิลีน และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น เพื่อเป็นการให้ความร้อนแก่โลหะจนเกิดการเผาไหม้ ซึ่งอุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่โลหะจะอยู่ในช่วง 700-900°C ซึ่งจะมีลักษณะเป็นจุดสีแดงเกิดขึ้นบนบริเวณที่ให้ความร้อนแต่น้อยกว่าอุณหภูมิที่ทำให้โลหะเกิดการหลอมเหลว กรณีที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงผสมกับออกซิเจนบริสุทธิ์ให้ความร้อนแก่พื้นผิวจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างออกซิเจนและโลหะซึ่งจะทำให้เกิดออกไซด์ของเหล็กหรือซีลีม (Slag) หลังจากนั้นจึงทำการเปิดก๊าซออกซิเจนเพื่อไล่ซีลีมและทำให้เหล็กขาดออกจากกัน ในกระบวนการตัดเหล็กที่สมบูรณ์มีสิ่งจำเป็น 4 ข้อดังนี้

- (1) อุณหภูมิในการให้ความร้อนแก่วัสดุต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุนั้นมิฉะนั้นวัสดุจะเกิดการหลอมละลายและไหลออกก่อนที่จะทำการตัด
- (2) จุดหลอมเหลวของออกไซด์เหล็กจะต้องสูงกว่าบริเวณที่อยู่รอบๆพื้นที่ที่ทำการตัดซึ่งจะถูกไล่ออกไปโดยอัตโนมัติด้วยก๊าซออกซิเจนในขณะที่ทำการตัด
- (3) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนที่ใช้สำหรับไล่โลหะที่หลอมละลายและโลหะที่หลอมละลายจะต้องเพียงพอเพื่อรักษาอุณหภูมิในการเผาไหม้ของเหล็ก
- (4) ปฏิกิริยาขั้นต่ำของแก๊สผลิตภัณฑ์ควรจะมีเพียงพอเพื่อไม่ให้ออกซิเจนที่ใช้ในการตัดเจือจาง

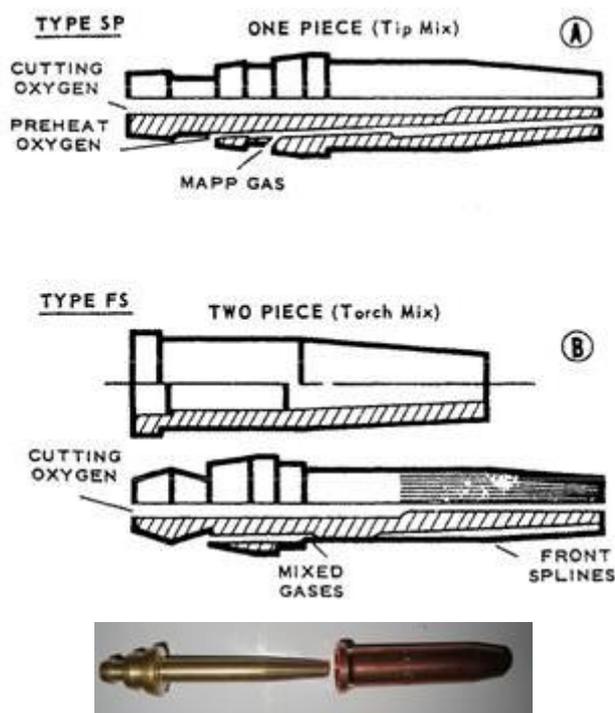
สำหรับลักษณะและส่วนประกอบของอุปกรณ์หัวตัดเปลวไฟ (Flame cutting Torch) ดังแสดงในรูปแบบที่ 2.10 ประกอบด้วย ท่อทางเข้าแก๊สเชื้อเพลิง (Preheat Fuel Gas Inlet), ท่อทางเข้าออกซิเจน (Preheat Oxygen Gas Inlet), วาล์วออกซิเจนในการตัด (Cutting Oxygen Valve), วาล์วแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel Gas Valve), วาล์วออกซิเจน (Oxygen Gas Valve), เฟืองเกียร์สำหรับปรับระดับความสูง (Gear Rack for Height Adjustment), ถังผสมแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจน (Torch Barrel), น็อตยึดหัวตัด (Tip Nut) และ ส่วนปลายหัวตัด (Cutting Tip) การทำงานในส่วน Cutting Tip เมื่อแก๊สเชื้อเพลิง LPG และออกซิเจน ไหลผ่านจากเครื่องมือควบคุมอัตราการไหล และไหลเข้าสู่เครื่องตัดแก๊สอัตโนมัติ โดยแก๊สเชื้อเพลิง LPG ไหลเข้าสู่ท่อทางเข้าแก๊สเชื้อเพลิง โดยจะถูกควบคุมอัตราการไหลโดยวาล์วแก๊สเชื้อเพลิง และไหลผ่านทางถังผสมแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจน และเข้าสู่หัวตัดเปลวไฟ เพื่อผสมกับออกซิเจน สำหรับออกซิเจนเมื่อไหลผ่านเครื่องมือควบคุมอัตราการ

ไหลและไหลเข้าสู่ท่อทางเข้าออกซิเจนโดยจะถูกควบคุมด้วยอัตราการไหลโดยวาล์วออกซิเจนสำหรับนำออกซิเจนไปผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง เพื่อสร้างเปลวไฟที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน และออกซิเจนอีกส่วนหนึ่งจะถูกควบคุมอัตราการไหลด้วยวาล์วออกซิเจนในการตัดเพื่อใช้สำหรับการตัดเหล็ก สำหรับส่วนปลายหัวตัดจะอยู่บริเวณส่วนปลายของถังผสมแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนโดยมีน๊อตยึดหัวตัดเป็นตัวยึดอุปกรณ์ทั้งสองเข้าด้วยกัน และ เฟืองเกียร์สำหรับปรับระดับความสูงเป็นเฟืองที่ช่วยในการปรับระยะห่างตัดเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบอุปกรณ์หัวตัดเปลวไฟ [23]

สำหรับหัวตัดเปลวไฟที่มีใช้ในการตัดเหล็กโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 ลักษณะซึ่งขึ้นอยู่กับเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการตัดเหล็กเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.11



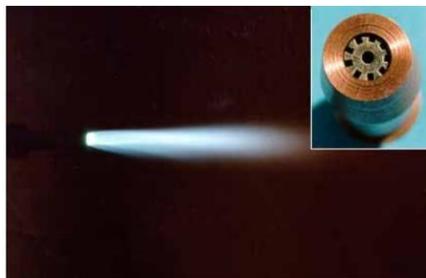
รูปที่ 2.11 แสดงภาพตัดขวางหัว Cutting Torch [21]

เมื่อพิจารณาหัวตัดเปลวไฟ จากลักษณะการไหลของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่นำมาใช้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ หัวตัด ชนิด A ลักษณะของหัวตัดเป็นหัวตัดแบบเดี่ยว ซึ่งมีช่องทางสำหรับการไหลของแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนแยกจากกัน ซึ่งหัวชนิดนี้เหมาะสมสำหรับใช้กับเชื้อเพลิงแก๊สอะเซทิลีน การผสมของเชื้อเพลิงแก๊สและออกซิเจนจะผสมกันบริเวณ ส่วนปลายของหัวตัด และ หัวตัดชนิด B จะมีส่วนประกอบด้วยกัน 2 ส่วนคือ ส่วนปลอกของหัวตัดซึ่งมีความสำคัญอย่างมากเพราะเป็นบริเวณที่แก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนทำการผสมกัน และส่วนของแกนกลางเป็นบริเวณที่ออกซิเจนที่ใช้สำหรับตัดวิ่งผ่าน เมื่อพิจารณาความแตกต่างหัวตัดทั้ง 2 ชนิดที่กล่าวมาข้างต้น จะพบว่า มีความแตกต่างในส่วนของเชื้อเพลิงแก๊สที่นิยมนำมาใช้ และการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงแก๊สและออกซิเจน เป็นต้น

รูปที่ 2.12 แสดงการเปรียบเทียบเปลวไฟจากหัวตัดแก๊สที่ใช้กับแก๊สอะเซทิลีน และหัวตัดแก๊สที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊ส LPG



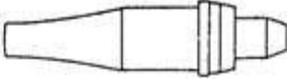
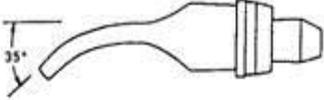
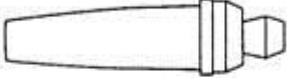
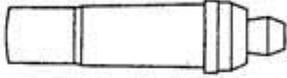
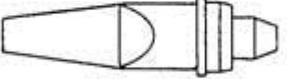
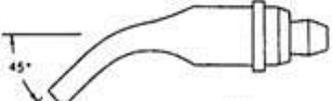
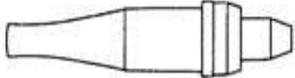
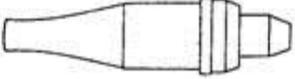
(ก) หัวตัดแก๊สสำหรับเชื้อเพลิงแก๊สอะเซทิลีน



(ข) หัวตัดแก๊สสำหรับเชื้อเพลิงแก๊ส LPG

รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะปากทางออกเจ็ทเปลวไฟ [23]

นอกจากนี้ยังมีหัวตัดเปลวไฟอีกหลายชนิดที่นิยมนำมาใช้ในการตัดเหล็กดังแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงให้เห็นความแตกต่างของหัวตัดเปลวไฟ โดยพิจารณาจากลักษณะของหัวตัดปากทางออกของแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจน ความเหมาะสมของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับหัวตัดเปลวไฟแต่ละชนิด และขนาดของหัวตัดเปลวไฟแต่ละชนิด

STYLE	PREHEAT	DESCRIPTION	SIZE	TYPE
	 Medium	<b>MAPP<sup>®</sup> GAS — One-Piece</b> Preheat: Medium. Typical use: Hand and machine cutting.	00-6	1-303M
	 Medium	<b>MAPP<sup>®</sup> GAS — One-Piece</b> Preheat: Medium. Typical use: Cutting close to bulkheads, hand cutting of rivet heads, machine cutting 35° with torch perpendicular.	1, 2, 3	1-312M
	 Medium	<b>MAPP<sup>®</sup> GAS — Two-Piece</b> Preheat: Medium. Typical use: General-purpose cutting hand and machine thru 4".	000-4	2-210M
	 Heavy	<b>MAPP<sup>®</sup> GAS — Two-Piece</b> Preheat: Heavy. Typical use: General-purpose cutting hand and machine 4" and over.	5-8, 10	2-210M
	 Light	<b>ACETYLENE</b> Preheat: Very light. Typical use: Clean metal. Plate cutting and trimming.	00-2	1-110
	 Medium	<b>ACETYLENE</b> Preheat: Medium. Typical use: Clean plate, straight line or circle machine cutting and trimming. Special lengths available on request.	00-4	1-111
	 Medium	<b>ACETYLENE</b> Preheat: Medium. Typical use: Cutting close to bulkheads, hand cutting of rivet heads. Machine cutting 45° with torch perpendicular.	00-4	1-112
	 Light	<b>ACETYLENE</b> Preheat: Light. Typical use: Hand & machine cutting. Clean plate.	0, 1, 2	1-100
	 Medium	<b>ACETYLENE</b> Preheat: Medium. Typical use: General hand & machine cutting.	000-8	1-101

รูปที่ 2.13 แสดงหัวตัดเปลวไฟและการนำมาใช้กับแก๊สเชื้อเพลิง [21]