

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การทำปราศจากเชื้อ (Sterilization)

อุปกรณ์ทางการแพทย์ถือว่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับใช้ในการรักษาผู้ป่วย และมีความเกี่ยวข้องกับใกล้ชิดกับผู้ป่วยเป็นอย่างมาก ซึ่งผู้ป่วยเป็นผู้ที่มีความต้านทานต่อเชื้อโรคต่ำทำให้สามารถเกิดโรคแทรกซ้อนต่างๆ ได้ง่ายจนอาจทำให้เกิดอาการรุนแรงของโรคเพิ่มขึ้นได้ ฉะนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ที่มีการใช้งานกับผู้ป่วยจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อเพื่อให้เกิดการปราศจากเชื้อ โดยมีความจำเป็นอย่างมากเพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าจะไม่ก่อให้เกิดการติดเชื้อกับผู้ป่วย การศึกษากระบวนการฆ่าเชื้อหรือการทำปราศจากเชื้อหมายถึง กระบวนการที่มีความสะอาด การฆ่าเชื้อซึ่งก่อโรคที่ทำให้เกิดการเน่าเสีย หรือการเจ็บป่วย หรือกรรมวิธีการทำให้เกิดการปราศจากเชื้อด้วยกระบวนการต่างๆ

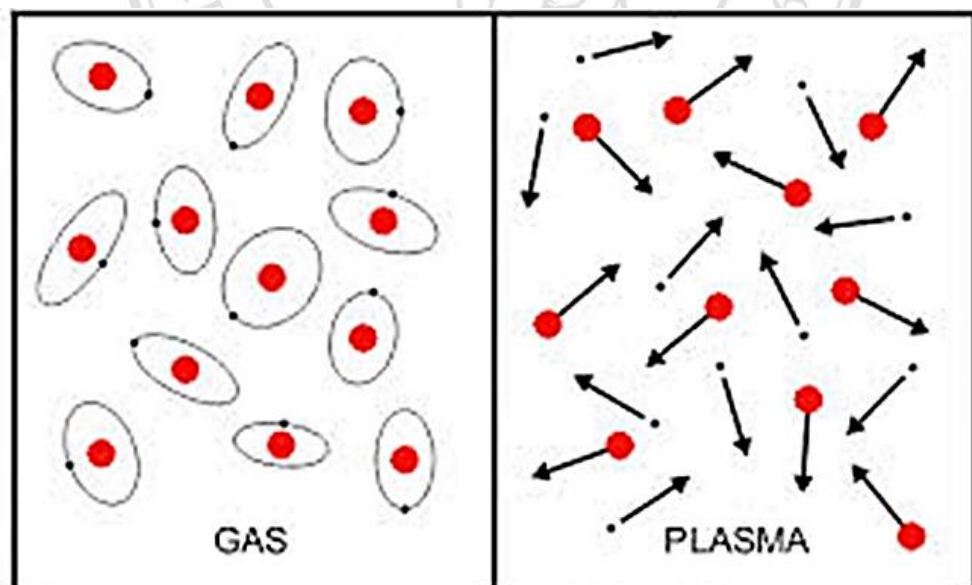
แรกเริ่มในปี ค.ศ. 1847 Ignaz Semmelweis แพทย์ผู้เริ่มประกาศให้มีการล้างมือด้วยน้ำคลอรีน (Chlorine) เพื่อลดอัตราการเสียชีวิตได้ร้อยละ 2.5 ของสตรีหลังจากคลอด จึงถือได้ว่าเป็นผู้บุกเบิกเริ่มต้นในการทำ ความสะอาดในขั้นตอนการผ่าตัด หลังจากนั้น Louis Pasteur ปี 1822–1895 ค้นพบสาเหตุเน่า ซึ่งเป็นผลมาจากเชื้อแบคทีเรียได้ทำการฆ่าเชื้อด้วยการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) จนนำไปสู่งานวิจัยของ Joseph Lister ซึ่งได้พัฒนาเอาวิธีการของ Louis Pasteur ทดลองใช้กับคน และนำเอกรดคาร์บอนิก (Carbonic Acid; H_2CO_3) มาใช้ในการเช็ดทำความสะอาดอุปกรณ์การแพทย์ โดยมีการวิจัยที่ได้ทำการศึกษาโดยทำการทดลองล้างอุปกรณ์ผ่าตัดที่ส่วนมากจะตรวจพบเชื้อแบคทีเรียจำพวก *Staphylococcus* และ *Bacillus* ผลที่ได้พบว่าหลังจากการล้างอุปกรณ์แล้วจำนวนเชื้อเหล่านี้ลดลง (Rutala et al., 1998) และยังมีงานวิจัย (Chu et al., 1999) ที่สามารถยืนยันได้ว่าการล้างอุปกรณ์ผ่าตัดช่วยให้เชื้อแบคทีเรียก่อโรคลดลง

วิธีการฆ่าเชื้อหรือการทำปราศจากเชื้อมีหลายวิธีซึ่งเป็นที่นิยมตามการศึกษางานวิจัยของ (Wilson and Nayak, 2013) และ (Rutala and Weber, 2013) ได้แก่ วิธีการใช้ลมร้อน (Dry hot air) ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงและไม่เหมาะกับการใช้ในโรงพยาบาล เนื่องจากอาจไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์บางชนิด นอกจากนี้ยังใช้ระยะเวลาในกระบวนการนานและประสิทธิภาพที่ได้ยังไม่เทียบเท่ากับการอบนิ่งฆ่าเชื้อ (Autoclave) หรือวิธีการใช้เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide; C_2H_4O) การใช้รังสีแกมมา (Gamma ray) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ส่งผลให้เกิดการสะสมของสารพิษเมื่อใช้เป็นระยะเวลานานรวมไปถึงรังสีตกค้างได้ (Moreira et al., 2004) นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีคือการเลือกใช้อิโคโนเจนเปอร์ออกไซด์ก๊าซพลาสมา (Hydrogen peroxide gas plasma) ซึ่งสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ ไม่สร้างความร้อน แต่ถึงจะมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเทคนิคการฆ่าเชื้ออื่น เทคนิคนี้ก็ยังมีย่อจำกัดในการเลือกใช้งานในการทำด้วย (MacFie, 2013)

2.1.2. ความหมายพลาสมา

พลาสมา คือ ก๊าซที่แตกตัวอย่างสมบูรณ์อยู่ในสภาพที่เป็นกลุ่มของไอออนและอิเล็กตรอนดังแสดงในรูปที่ 2.1 พลาสมาจึงจัดเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร เนื่องจากมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างไปจากสถานะอื่นอย่างชัดเจน พลาสมาประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุทั้งประจุบวกและลบในสัดส่วนที่เท่ากัน ทำให้ประจุสุทธิเป็นศูนย์ การอยู่ร่วมกันของอนุภาคเหล่านี้เป็นแบบประหนึ่งเป็นกลาง ซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนและไอออนในบริเวณนั้น โดยรวมแล้วมีจำนวนเท่าๆ กัน และแสดงพฤติกรรมร่วม (Collective Behavior) ซึ่งหมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆ ในพลาสมา ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในบริเวณนั้นๆ เท่านั้น ยังรวมไปถึงผลโดยรวมจากพลาสมาส่วนใหญ่ และผลเหล่านี้มีอิทธิพลมากกว่าการชนกันของอนุภาคที่อยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากอนุภาคในพลาสมาที่สถานะสมดุลจะมีการสั่นด้วยความถี่ที่สูงกว่าความถี่ในการชนกันของอนุภาค 2 ตัวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพฤติกรรมร่วมนี้เป็นพฤติกรรมที่กลุ่มพลาสมาแสดงออกมารวมกันพลาสมาสามารถเกิดได้โดยการให้พลังงานที่มากเพียงพอแก่สสารในสถานะก๊าซจนทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนตัวอย่างเช่น การสร้างสนามไฟฟ้าความเข้มสูงให้ก๊าซซึ่งจะทำให้ไอเล็กตรอนอิสระได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่ชนกับอะตอม หากพลังงานที่อิเล็กตรอนอิสระ มีมากเพียงพอ ก็จะทำให้ไอเล็กตรอนใน อะตอมของก๊าซหลุดออกมากลายเป็นไอเล็กตรอนอิสระ และอะตอมของก๊าซจะกลายเป็นไอออน โดยกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งจะทำให้จำนวนไอเล็กตรอนอิสระเพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก และกระบวนการนี้ก็จะเกิดต่อไปเรื่อยๆ จนในที่สุดก๊าซก็จะกลายเป็นพลาสมาทั้งหมด

พลาสมามีสมบัติเฉพาะที่แตกต่างจากสถานะอื่นๆ (ของแข็งของเหลวและก๊าซ) โดยมีคุณสมบัติ 3 ประการ คือ ประการแรกคือความยาวเดบายด์ (Debye Length; λ_D) ซึ่งเป็นระยะที่สนามจากประจุนั้นโดนกำบัง (Shielding) และโดยหลักพื้นฐานของพลาสมาระยะนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่าระยะระหว่างพลาสมาหลายๆ ($\lambda_D \ll L$, L คือระยะระหว่างพลาสมา) ประการที่สองจำนวนอนุภาคภายในทรงกลมเดบายด์ (Number of Particle; N_D) ซึ่งเป็นทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวเดบายด์จะต้องมีอนุภาคอยู่จำนวนมากและประการสุดท้ายความถี่พลาสมา (Plasma Frequency; ω_p) คือความถี่ของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเพื่อให้พลาสมากลับคืนสู่สภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้า ภายหลังจากที่พลาสมาถูกรบกวนกล่าวคือเมื่อพลาสมาถูกรบกวนโดยสัณญาณนอกมากระทำทำให้อิเล็กตรอนซึ่งมีมวลน้อยกว่าไอออนมากเคลื่อนที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งสมดุลพลาสมาจึงเสียความเป็นกลางทางไฟฟ้าจะนั้นเพื่อให้พลาสมากลับเข้าสู่สภาพความเป็นกลางทางไฟฟ้าตามเดิมก็จะเกิดแรงดึงดูดกระทำต่ออิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่กลับไปยังจุดสมดุลแต่เนื่องจากแรงเฉื่อยอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่เลยจุดสมดุลและเกิดการสั่นรอบจุดสมดุลนี้ด้วยความถี่ที่เรียกว่าความถี่ของพลาสมาและการสั่นนี้ก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจนไอออนไม่มีเวลาที่จะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วนี้จนสามารถพิจารณาได้ว่าไอออนมีตำแหน่งคงที่



รูปที่ 2.1 ความแตกต่างของสถานะก๊าซ (Gas) และพลาสมา (Plasma)

(ธวัชชัย อ่อนจันทร์, 2551)

2.1.3. กระบวนการเกิดพลาสมา

กระบวนการเกิดพลาสมาโดยเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นกับอนุภาคของก๊าซ ในที่นี้ได้ทำการยกตัวอย่างก๊าซอะเซทิลีนประกอบเพื่อให้เข้าใจถึงสภาวะการเปลี่ยนแปลงในแต่ละขั้นตอนอย่างชัดเจน ดังต่อไปนี้

2.1.3.1. กระบวนการ Ionization

ในการเกิดปฏิกิริยาของพลาสมาในห้องสุญญากาศซึ่งมีก๊าซไหลผ่านในระดับคงที่และความดันต่ำมาก โมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซในสุญญากาศอาศัยการชนของอิเล็กตรอนกับโมเลกุลหรืออะตอมเป็นสำคัญโดยคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) หรือคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานจนไปชนกับโมเลกุลหรืออะตอมดังสมการที่ (2.1) เป็นตัวอย่างสมการของอะตอมของอะเซทิลีนซึ่งในกรณีนี้แสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนนั้นมีค่ามากกว่า Ionization Energy



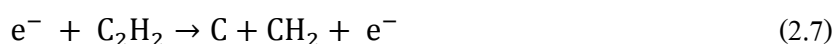
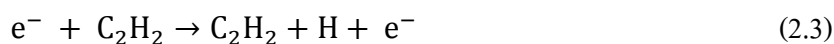
2.1.3.2. กระบวนการ Excitation

พลังงานที่ส่งผ่านเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าทำให้อะตอมนั้นไปอยู่ในสถานะกระตุ้นซึ่งแสดงว่าพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่า Ionization Energy ดังแสดงในสมการที่ (2.2) โดย $C_2H_2^*$ คืออะตอมของอะเซทิลีนที่อยู่ในสถานะกระตุ้น

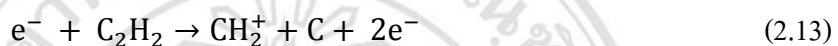
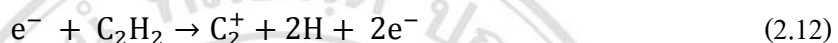
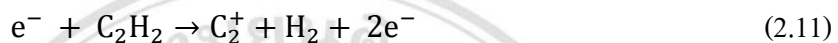
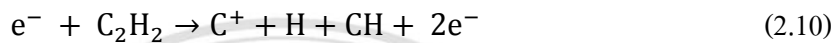
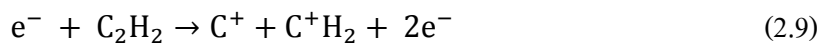
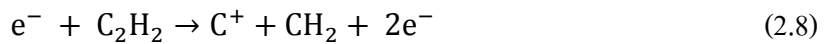


2.1.3.3. กระบวนการ Dissociation

กระบวนการสุดท้ายที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยโมเลกุลเกิดการแตกตัว (Dissociation) ซึ่งโมเลกุลของอะเซทิลีนสามารถเกิดการแตกตัวดังแสดงในสมการที่ (2.3) - (2.7)



ผลของการแตกตัวจะเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีคือผลผลิตที่ได้จะมีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าตอนที่อะตอมยังไม่แตกตัวการแตกตัว (Dissociation) อาจเกิดควบคู่กับ Ionization หรือไม่ก็ได้ถ้าเกิดคู่กันจะเรียกว่า Dissociative Ionization ซึ่ง โมเลกุลของอะเซทิลีนสามารถเกิดการ Dissociative Ionization ได้ดังสมการที่ (2.8) - (2.13)



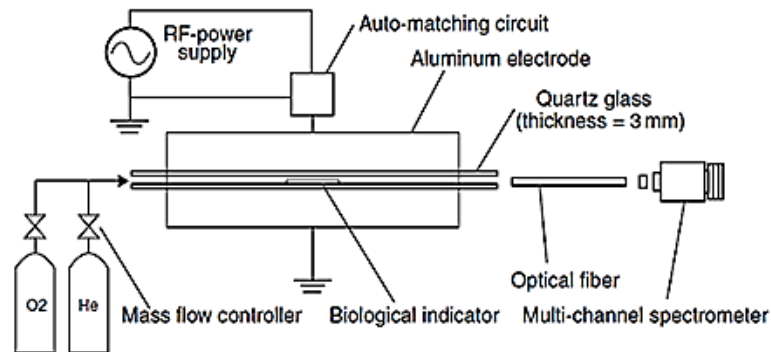
เมื่อก๊าซได้รับพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency; RF) หรือคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ที่ความดันต่ำเราจะมองเห็นพลาสมาที่เปล่งแสงออกมาเนื่องจากพลังงานภายนอกทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนเปลี่ยนจากสถานะพื้นไปอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นโดยธรรมชาติอิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะกระตุ้นได้เพียงประมาณ 10-18 วินาทีหลังจากนั้นเวเลนซ์อิเล็กตรอนจะกลับคืนสู่สถานะพื้นพร้อมทั้งปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่ตาสามารถเห็นได้ (Visible Light) การเปล่งแสงของพลาสมาสามารถบ่งถึงลักษณะของก๊าซที่แตกตัวได้ เช่น ก๊าซอาร์กอน (Argon; Ar) จะเปล่งแสงสีม่วงและก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen; N₂) จะเปล่งแสงเป็นสีชมพูซึ่งบ่งบอกถึงสภาวะกระตุ้นโมเลกุลของไนโตรเจน

2.1.4. พลาสมาอุณหภูมิต่ำ

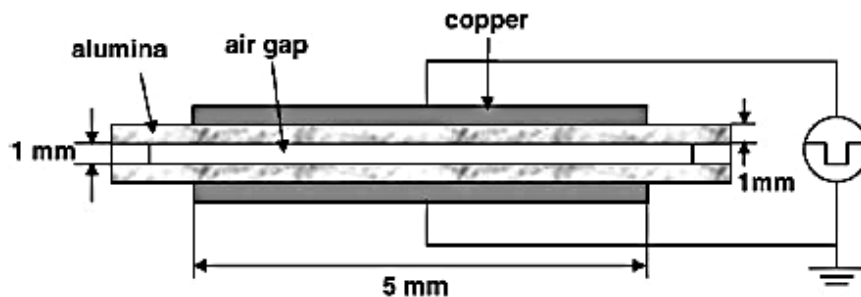
2.1.4.1. เทคนิคพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge)

เบื้องต้นในปี 1857 Ernst Werner von Siemens นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมัน ทำการศึกษาการสร้างก๊าซไอโซนภายในหลอดด้วยการใช้ก๊าซออกซิเจนหรือชั้นบรรยากาศเป็นตัวนำ และทำการดิสชาร์จพลาสมาที่แรงดันอาร์คสูงที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นอิเล็กโทรดระนาบกับแผ่นไดอิเล็กทริกหรือโดยอิเล็กโทรดชั้นไว้ อาจทำมาจากวัสดุจำพวกอลูมินา (Alumina) และวางในตำแหน่งที่ตรงข้ามกัน เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าเกินจุดวิกฤติ ทำให้ก๊าซแตกตัว โดยพลาสมาที่ได้จะมีความสม่ำเสมอสูง ดังเช่นรูปที่ 2.2 แสดงแบบจำลองของพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ พลาสมาที่อาศัยคลื่นความถี่วิทยุเป็นแหล่งพลังงาน แม้ว่าพลาสมาลักษณะนี้จะสามารถดิสชาร์จผ่านแหล่งกำเนิดที่อุณหภูมิระดับความดันบรรยากาศ แต่ก็ทำให้มีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพและการ

ใช้งาน หรือที่อุณหภูมิสูงก็ได้เช่นกันขึ้นกับลักษณะของผลิตภัณฑ์และอุตสาหกรรมที่นำไปใช้ด้วย และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แบบจำลองไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นแรงดันไฟฟ้า (Akitsu *et al.*, 2005)



รูปที่ 2.3 แบบจำลองไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จโดยใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC pulse) (Choi *et al.*, 2006)

2.1.4.2. ปฏิกริยาของพลาสมาต่อเซลล์แบคทีเรีย

กระบวนการของก๊าซพลาสมาที่สร้างขึ้นจากก๊าซที่มีความเฉื่อยนั้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับผนังเซลล์ของแบคทีเรียเพื่อเกิดการปราศจากเชื้อ โดยมีสร้างความเสียหายให้กับเซลล์ของแบคทีเรีย ทั้งคุณสมบัติกายภาพและเคมี (Choi *et al.*, 2006) ยกตัวอย่าง ปฏิิกายการชน (Collision) ของโมเลกุลของก๊าซออกซิเจนและอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2.14) ซึ่งทำให้เกิดกระบวนการสร้างก๊าซไอโซนด้วย ปฏิิกายการชนกันอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับผนังเซลล์ของแบคทีเรีย ดังสมการ (2.15) – (2.17) ต่อไปนี้

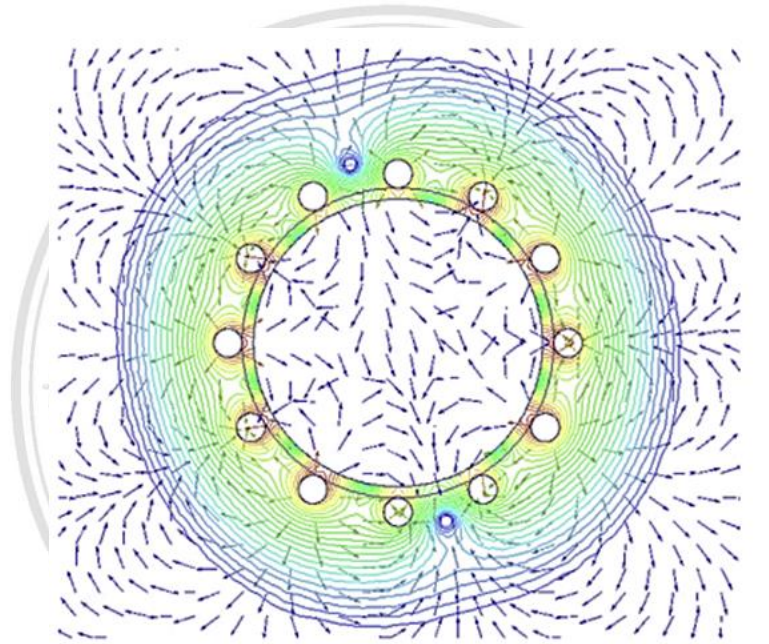


จากกระบวนการชนกันของปฏิกิริยาการพัฒนาเทคนิคพลาสมาสำหรับการทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างความเสียหายต่อเซลล์ของแบคทีเรีย เช่น การทำลายที่ผนังเซลล์ กระบวนการทำลายโปรตีน และกรดนิวคลีอิก เพื่อให้องค์ประกอบภายในเซลล์ของแบคทีเรียเกิดความเสียหาย อาจอาศัยการสร้างพลาสมาด้วยก๊าซเฉื่อยอื่นๆ ได้ ยกตัวอย่าง ไอออนของก๊าซอาร์กอนและอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจากพลังงานคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz สำหรับจุดพลาสมา เมื่อ Ionization Energy ของอาร์กอนมีมากกว่า N_2 และ O_2 จะทำให้เกิดกระบวนการพลาสมาและเปลี่ยนเป็น N_2^+ N^+ O_2^+ O^+ O_2^- และ O^- (Guo et al., 2015) โดยอธิบายได้จากสมการ ดังต่อไปนี้



โดยที่ ΔE คือ พลังงาน e คือ อิเล็กตรอนอิสระ และ M คือ สถานะของก๊าซพลาสมาหรือในที่นี้คือ ไอออนของก๊าซอาร์กอนและอิเล็กตรอนอิสระที่ทำให้เกิดกระบวนการ Excitation ของ NO และจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Law of Conservation of Charge) จำนวนของไอออนของอาร์กอนและอิเล็กตรอนจะเท่ากัน ตามเงื่อนไขของการศึกษาจากสมการของไนโตรเจน พบว่า จำนวนของประจุบวกของไนโตรเจนและประจุลบของออกซิเจนไม่ต่างกัน ในกรณี NO ที่เกิดมีมากกว่ากรณีที่สร้างกระแสไฟฟ้าโดยตรงในบรรยากาศ ดังนั้นจะทำให้เกิดสถานะกระตุ้น (Excited State) ของ NO เพราะฉะนั้นรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 200-300 นาโนเมตรจากเงื่อนไขของปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดอนุพันธ์ต่างๆข้างต้นนี้เองจึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์แบคทีเรีย (Laroussi &

Leipold, 2004) แต่อย่างไรก็ตามการสร้างพลาสมาที่ทำให้เกิดความเสียหายกับเซลล์แบคทีเรียได้และทำให้เซลล์ตายในที่สุด จะต้องอาศัยความเข้มของสนามไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดอนุภาคประจุที่มากพอ (Astumian & Robertson, 1989) ที่จะสามารถรบกวนและสร้างความเสียหายโครงสร้างของเซลล์เมมเบรน(cell membrane) โดยทำการแยกโปรตีนจากเซลล์เมมเบรนเกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่พอที่จะทำให้เซลล์อ่อนแอ อาจทำให้ไซโตพลาสซึม (Cytoplasm) ไหลออกจากเซลล์ผ่านช่องว่างเหล่านั้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ตายในที่สุด ดังแสดงตามรูป 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแบบจำลองของการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าจากประจุอนุภาคบนเซลล์ (Guo et al., 2015)

2.1.5. การวิเคราะห์พลาสมา

2.1.5.1. วิเคราะห์ด้วยสเปกโตรสโกปีแบบเปล่งแสง(Optical Emission Spectroscopy; OES)

เป็นหนึ่งในหลายๆ เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของสสารทั้งในเชิงฟิสิกส์ และเคมี โดยการใช้สเปกโตรสโกปีแบบเปล่งแสงสามารถทำให้ตรวจสอบองค์ประกอบของสสารได้ ตรวจสอบธาตุที่ประกอบขึ้นเป็นดาวเคราะห์ ดาวฤกษ์ และศึกษาสมบัติภายในของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล อีกทั้งยังสามารถตรวจคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 100-900 นาโนเมตร (UV-VIS-IR) ที่เปล่งออกมาจากอะตอม

สเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสงเป็นเทคนิควิเคราะห์สสารที่รู้จัก และยอมรับกันมานาน แต่เป็นเทคนิคใหม่เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าประกอบ และศึกษาสมบัติของพลาสมาแบบโกลว์ (Glow Discharge Plasma) โดยมีหลักการพื้นฐานของสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สเปกตรัม แต่เทคนิคนี้ยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถสังเกตกลไกการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง แต่ไอออนที่ได้มีโอกาสถูกกระตุ้นต่อและเปล่งแสงออกมาเป็นสเปกตรัมของไอออนได้เช่นกัน ซึ่งจะส่งผลทำให้สามารถสังเกตเส้นสเปกตรัมของไอออนชนิดต่างๆ ได้ และวิเคราะห์ผลจากกราฟความเข้มของแสงที่ปรากฏ ลักษณะพิคของกราฟซึ่งสามารถชี้วัดถึงชนิดของกลุ่มก๊าซที่เกิดขึ้นโดยอาจเทียบกับกราฟมาตรฐาน โดยการวิเคราะห์จากสภาวะ ต่อไปนี้

(1) วิเคราะห์จากสภาวะการกระตุ้นและการผ่อนคลาย(Excitation and Relaxation)

เมื่ออะตอมหรือไอออนสถานะพื้นถูกรบกวนด้วยพลังงานจากภายนอก เช่น การชนด้วยอิเล็กตรอนไอออน หรือโฟตอน (Photon) ตามสมการ (2.26) ถึง (2.28) ทำให้เวเลนซ์อิเล็กตรอนมีพลังงานที่สูงขึ้น แต่ยังโคจรอยู่ภายในอะตอม หรือไอออนด้วยพลังงาน เพราะค่าตามทฤษฎีของควอนตัมอะตอม หรือไอออนที่อยู่ในสถานะกระตุ้นนี้ แทนด้วยสัญลักษณ์ “*” เช่น Ar^* Cu^+ แทนอะตอมของอาร์กอน และไอออนของทองแดงประจุ +1 ที่อยู่ในสถานะกระตุ้นตามลำดับ เป็นต้น โดยธรรมชาติแล้วอะตอมหรือไอออนจะอยู่สถานะกระตุ้นได้ประมาณ $10^{-8} - 10^{-9}$ วินาที จากนั้นก็จะกลับสู่สถานะพื้นในครั้งเดียวหรือหลายครั้ง พร้อมทั้งปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วย



จากนั้นในช่วงเวลา 10^{-8} วินาที อะตอมที่อยู่ในสภาวะกระตุ้น A^* จะปลดปล่อยโฟตอนออกมาตามสมการที่ (2.29) และถูกตรวจวัดได้ด้วยสเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง



พลังงานภายนอกประมาณ 6 eV (ยังไม่เกินพลังงานที่จะทำให้เป็นไอออน 7.7 eV) จะถูกกระตุ้นให้เปลี่ยนจากสถานะพื้นขึ้นไปยังระดับกระตุ้นที่มีพลังงานประมาณ 6

eV จากนั้นอะตอมทองแดงจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ระหว่างการกลับมายังสถานะพื้น โดยอาจจะลงมาแค่เพียงครั้งเดียว (ปล่อยพลังงานโฟตอนประมาณ 6 eV ออกมาซึ่งเกินขอบเขตของสเปกโทรโกปีแบบเปล่งแสง) หรืออาจจะลงมาอย่างเป็นลำดับซึ่งจะทำให้ได้โฟตอนที่มีความยาวคลื่น 521.82 นาโนเมตร และ 324.75 นาโนเมตร

(2) วิเคราะห์จากการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization)

ถ้าอะตอมได้รับพลังงานมากพอ เวเลนซ์อิเล็กตรอนก็สามารถเอาชนะพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมไปเป็นไอออน และอิเล็กตรอนอิสระได้ เรียกพลังงานที่ทำให้อะตอมเปลี่ยนไปเป็นไอออนประจุ +1 ว่าเป็นพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนอันดับที่ 1 เรียก พลังงานที่ทำให้อะตอมเปลี่ยนไปเป็นไอออนประจุ +2 ว่าเป็นพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนอันดับที่ 2 แสดงดังตัวอย่าง พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนประจุลำดับสูงนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบคือ

ก. การได้รับพลังงานในครั้งเดียว เช่น อะตอมของก๊าซอาร์กอนต้องการพลังงานถึง 45 eV ในการแตกตัวเป็นไอออนอาร์กอนประจุ +2 ตามสมการ (2.30)

ข. การได้รับพลังงานหลายครั้งอย่างเป็นลำดับ เช่น อะตอมอาร์กอนต้องการพลังงาน 15.5 eV สำหรับเป็นไอออนอาร์กอนประจุ +1 ดังสมการ (2.31) และอาร์กอนประจุ +1 นี้ต้องการพลังงานอีก 29.5 eV สำหรับการแตกตัวเป็นไอออนอาร์กอนประจุ +2 ดังสมการ (2.32)



สังเกตว่าสมการที่ (2.30) ต้องใช้พลังงานการกระตุ้นมากกว่าในสมการที่ (2.31) ดังนั้นโอกาสเกิดไอออนแบบได้รับพลังงานครั้งเดียวจึงน้อยกว่าในแบบได้รับพลังงานหลายครั้ง พลังงานสำหรับการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม มีสาเหตุมาจากหลายกลไก ดังต่อไปนี้

(2.1) $A + B^{(+)} \rightarrow A^- + B^{(+)} + e^-$: อนุภาคของก๊าซสามารถเกิดการชนกันเอง และเป็นไอออนด้วยพลังงานจลน์ที่อุณหภูมิสูงๆ (ถ้าอุณหภูมิของระบบมี

ค่าประมาณ 11,000 K อนุภาคจะมีพลังงานจลน์เป็น 1eV) พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนมีค่าน้อย 5 eV นั้นหมายถึง แหล่งกำเนิดต้องมีอุณหภูมิอย่างน้อย 55,000 K ถึงจะทำให้เกิดไอออนจากการชนกันเองของอนุภาคได้ กลไกนี้จึงเกิดขึ้นได้ยากในห้องปฏิบัติการทั่วไป

(2.2) $A + B^* \rightarrow A^+ + B + e^-$: อะตอม A สามารถเป็นไอออนได้เมื่อถูกชนด้วยอะตอมสถานะอุปเสถียร B^* โดยพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม A ต้องน้อยกว่าพลังงานระดับอุปเสถียรของอะตอม B

(2.3) $A + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$ หรือ $A^* + h\nu \rightarrow A^+ + e^-$: เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออนด้วยโฟตอน พลังงานของโฟตอนที่จะทำให้อะตอมสภาวะพื้นต้องมีค่าพลังงานมากกว่า 5 eV ซึ่งเป็นโฟตอนที่อยู่ในช่วงรังสีเหนือม่วง

(2.4) $E_{fast}^- + A \rightarrow A^+ + e_{slow}^- + e_{slow}^-$: กลไกหลังของการแตกตัวเป็นไอออนในห้องปฏิบัติการทั่วไปเกิดจากการชนด้วยอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนมีมวลน้อยเทียบกับอะตอม สามารถเร่งหรือให้พลังงานกับอิเล็กตรอนได้ง่าย อิเล็กตรอนสามารถถ่ายเทพลังงานจลน์ให้อะตอมได้ถึง 99% จึงทำให้อิเล็กตรอนเกิดขึ้นได้ง่ายกว่ากลไกอื่นๆ

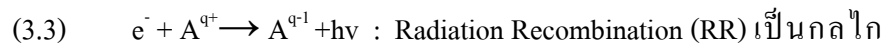
(3) การรวมตัวกลับ (Recombination)

ในขณะที่อะตอมจำนวนหนึ่งกลายเป็นไอออนเนื่องจากถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานนั้น ไอออนที่มีอยู่ในขณะนั้นก็มีโอกาสเกิดการรวมกับอิเล็กตรอนพลังงานต่ำ เรียกว่ากลไกนี้ว่า “การรวมกลับ” การรวมตัวระหว่างไอออน 1 ตัว กับอิเล็กตรอน 1 ตัว กลายเป็นอะตอม 1 ตัว ซึ่งการกลายเป็นอะตอม 1 ตัวนี้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้จริง เพราะไม่เป็นไปตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน และ โมเมนตัม (Momentum) ดังนั้นจึงได้มีการอธิบายการรวมตัวกลับด้วย 3 กลไกดังนี้

(3.1) $e + AB \rightarrow AB$ และ $AB + C^+ \rightarrow AB + C$: อธิบายกลไกการรวมตัวกลับของไอออน C^+ ไปเป็นอะตอม C ได้ดังนี้ โมเลกุล AB ชนกับอิเล็กตรอนเกิดเป็น AB จากนั้น ไอออนลบ AB^- เข้าชนกับไอออนบวก C^+ เกิดการแลกเปลี่ยนประจุ กลายเป็นโมเลกุล AB และอะตอม C กลไกนี้จะเกิดขึ้นได้ง่ายหากมีอนุภาคที่มีสมบัติจับอิเล็กตรอนได้ง่ายอยู่เป็นจำนวนมาก เช่น โมเลกุลพวกโคโรไลร์ (Chlorine)

(3.2) $e_{slow}^- + e_{slow}^- + A^+ \rightarrow A + e_{fast}^-$: หรือ Three-Body Recombination กลไกนี้เป็นกลไกส่วนกลับของกลไกการแตกตัวเป็นไอออนที่เกิดจากการชนของอิเล็กตรอนต้องใช้อนุภาค 3 ตัวด้วยกัน คือ อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ 2 ตัว และไอออน 1

ตัวไอออนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนตัวหนึ่ง และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินให้กับอิเล็กตรอนตัวที่เหลือเพื่อให้เป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน และโมเมนตัม



ส่วนกลับของการแตกตัวเป็นไอออนด้วยโฟตอน เมื่ออิเล็กตรอนอิสระถูกจับด้วยไอออนประจุ +q ให้เข้าไปอยู่ในระดับยึดเหนี่ยวของไอออนประจุ +(q-1) จะมีการปลดปล่อยโฟตอนออกมาเพื่อรักษากฎการอนุรักษ์พลังงาน และโมเมนตัม พลังงานโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมามีค่าตามสมการ (2.33)

$$E_p = KE_e + (I[A^{(q-1)}] - E_k) \quad (2.33)$$

เมื่อ E_p = พลังงานของโฟตอนที่ปล่อยออกมาจากกลไก RR

KE_e = พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนอิสระ

$I[A^{(q-1)}]$ = พลังงานระดับสูงสุดของไอออน $A^{(q-1)+}$ เทียบกับสถานะพื้นของไอออน $A^{(q-1)+}$

E_k, E_j = พลังงานระดับกระตุ้น k และ j ตามลำดับของไอออน $A^{(q-1)+}$

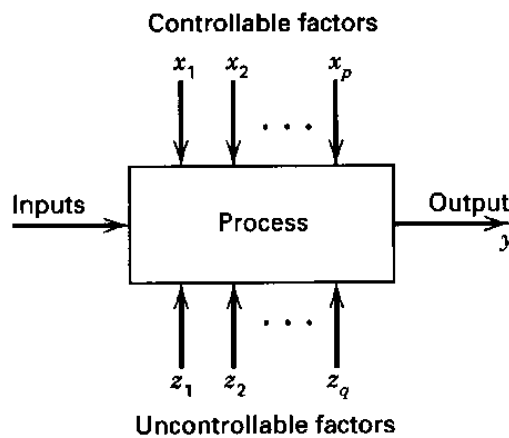
$A^{(q-1)+}$ = เป็นไอออนที่รวมตัวอิเล็กตรอนแล้วกลายเป็นไอออนประจุ q-1

โอกาสการเกิดกลไก RR จะมีมากขึ้นเมื่อ ความเร็ว และทิศทางของไอออน A^{q+} และอิเล็กตรอนอิสระมีค่าใกล้เคียงกันนั้น แสดงว่ากลไก RR จะเกิดมากในกรณีที่ไอออนอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในลักษณะขนานกันไปด้วยความเร็วเฉลี่ยใกล้เคียงกัน

2.1.6. การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment; DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสมโดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สามารถศึกษาผลของหลายๆปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัยการออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของปัจจัย (Factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลตอบ (Response) ที่เกิดขึ้นกระบวนการที่มีปัจจัยหรือผลตอบ (Response; X_1, X_2, X_3, X_4) ต่างๆที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการในการออกแบบการทดลองเราต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X อื่นๆโดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มี

ประสิทธิภาพมากที่สุดความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เรามีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการเพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป



รูปที่ 2.5 ปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ
(จิตรถเวช, 2552)

จากรูปที่ 2.5 สามารถอธิบายได้ว่ากระบวนการคือการรวมกันของวิธีการคนเครื่องจักร และทรัพยากรอื่นๆเข้าด้วยกันเพื่อเปลี่ยนอินพุต (Input) ไปสู่เอาต์พุต (Output) ที่มีผลออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าโดยที่ตัวแปรของกระบวนการบางตัว $x_1, x_2, \dots, x_p$ เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ในขณะที่ตัวแปรอื่น $z_1, z_2, \dots, z_q$ เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ตัวแปรในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือตัวแปรที่สามารถควบคุมได้หมายถึง สามารถกำหนดค่าของตัวแปรในการผลิตและตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้หมายถึงไม่สามารถกำหนดค่าของตัวแปรในการผลิตเนื่องจากไม่สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมในการผลิตได้หรือต้นทุนที่ใช้ในการควบคุมสูง

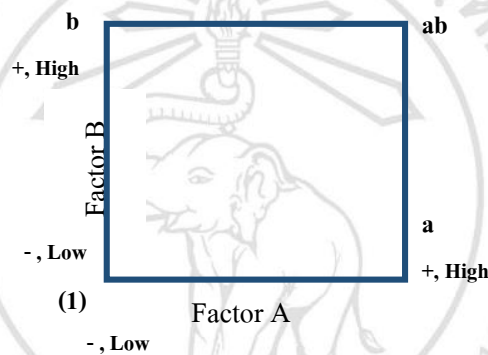
2.1.6.1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Experiment)

การออกแบบการทดลองในกรณีที่มีการศึกษามากกว่า 2 ปัจจัยได้ภายใต้ทั้งยังสามารถศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละปัจจัยภายในคราวเดียวกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถให้ข้อสังเกตเกี่ยวกับอิทธิพลของการกระทำร่วมกัน (Interaction Effect) ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ด้วย การทดลองแฟกทอเรียลนี้จะทำให้การออกแบบการทดลองมีประสิทธิภาพสูงกว่าลักษณะของการทำการทดลองหลายๆครั้งที่ละปัจจัย สามารถใช้ข้อมูลทั้งหมดในการประมาณอิทธิพลของปัจจัยทุกปัจจัย

(1) การออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล

เมื่อมีจำนวนปัจจัยที่พิจารณาจำนวน k ปัจจัย แต่ละปัจจัยสามารถปรับเปลี่ยนได้ 2 ระดับ เรียกว่า ระดับสูง (High level) แทนด้วยเครื่องหมาย “+” และระดับต่ำ (Low level) แทนด้วยเครื่องหมาย “-” ดังนั้น จำนวนของการทดลองจึงเป็นแบบ

$2 \times 2 \times \dots \times 2$ จำนวน k ครั้ง จึงเรียกได้ว่าเป็นการทดลองแฟกทอเรียลหรือแบบ 2^k แฟกทอเรียล ซึ่งตามปกติถือว่าระดับของปัจจัยทั้งหมดเป็นค่าคงที่ เช่น ถ้ามีปัจจัยที่ต้องการศึกษาจำนวน 2 ปัจจัยคือ A และ B ระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย A จะแทนได้ด้วย +A และ -A ตามลำดับ และระดับสูงและระดับต่ำของปัจจัย B จะแทนได้ด้วย +B และ -B ตามลำดับ แบบการทดลองที่ง่ายที่สุดสำหรับกรณีนี้คือ $k = 2$ หรือ มี 2 ปัจจัย ซึ่งเรียกว่า 2^2 Factorial Design 4 Combinations หรือ Runs หมายถึง แฟกทอเรียลทรีตเมนต์ (Treatment combination) จะต้องนำไปทดลองตามแบบแผนที่กำหนด ซึ่งอาจเป็นแบบแผนใดแบบแผนหนึ่ง โดยอาจมีจำนวนการทดลอง n ซ้ำ รูปแบบของการทดลองแฟกทอเรียลแสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างรูปการทดลอง 2^2 แฟกทอเรียล
(ชุตินา, 2545)

จากรูปที่ 2.6 การศึกษาผลของปัจจัยร่วมหรือผลรวมนั้นอาจอธิบายได้ คือ ผลจากปัจจัยเดี่ยวๆ เรียกว่า Main effect เช่น A หรือ B ผลจาก ผลร่วม ของ 2 ปัจจัยเรียกว่า First order interactions เช่น AB หรือ BC และผลจาก ผลร่วม ของ 3 ปัจจัยเรียกว่า Second order interactions เช่น ABC ตามลำดับไป โดยความหมายของผลร่วม คือ เป็นตัววัดผลการตอบสนองของแต่ละระดับของปัจจัยที่หนึ่ง ที่ระดับหนึ่งของปัจจัยที่สอง เปรียบเทียบกับการตอบสนองในระดับอื่นของปัจจัยที่สอง หากการตอบสนองดังกล่าวมีความแตกต่างกันก็ กล่าวได้ว่า ทั้งสองปัจจัยนี้มีผลร่วมต่อกัน และในทางตรงกันข้าม หากการตอบสนองดังกล่าว ไม่มีความแตกต่างกันก็กล่าวได้ว่าทั้งสองปัจจัยนี้ไม่มีผลร่วมต่อกัน ในการทดลองโดยทั่วไปแล้วเมื่อ พิจารณาจากค่าสังเกตที่ได้จากการทดลอง มักจะพบ ผลร่วมระหว่างปัจจัยเสมอแต่ผลนี้จะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับว่า ค่าความแตกต่างของการตอบสนองมีมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 กรณีคือ

(1.1) ค่าความแตกต่างของการตอบสนอง มีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็สามารถสรุปได้ว่า มีผลร่วมระหว่างปัจจัยที่ศึกษา

(1.2) ค่าความแตกต่างของการตอบสนอง ไม่มีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็สามารถสรุปได้ว่า ไม่มีผลร่วมระหว่างปัจจัยที่ศึกษา

การแสดงผลร่วม ระหว่างปัจจัยสามารถใช้ค่าสังเกตจากแต่ละทริทเมนต์คอมพิวเตอร์ขึ้นมาแสดงแนวทางการตอบสนองของแต่ละระดับของปัจจัยได้

(2) การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM)

การออกแบบการทดลองของพื้นผิวผลตอบ คือ เครื่องมือที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัวแปรหรือมากกว่ากับตัวแปรปัจจัยของกระบวนการที่ทำการทดลอง ขั้นตอนนี้จะมาหลังจากที่ทำการหาได้แล้วว่าปัจจัยตัวใดมีความสำคัญและคุณต้องการที่จะทำการหาค่าของปัจจัยนั้นที่ทำให้เกิดค่าตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด ตัวแบบที่มีการใช้ Response Surface เพราะว่าในสมการตัวแบบอาจจะมีเรื่องเส้นโค้ง (Curvature) เกี่ยวข้องด้วยวิธีดังกล่าวอาจใช้ในวิธีการ ดังต่อไปนี้

(2.1) หาค่าระดับปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุด

(2.2) หาค่าระดับปัจจัยที่ทำให้สามารถทำงานได้ตรงตามข้อกำหนดเฉพาะ

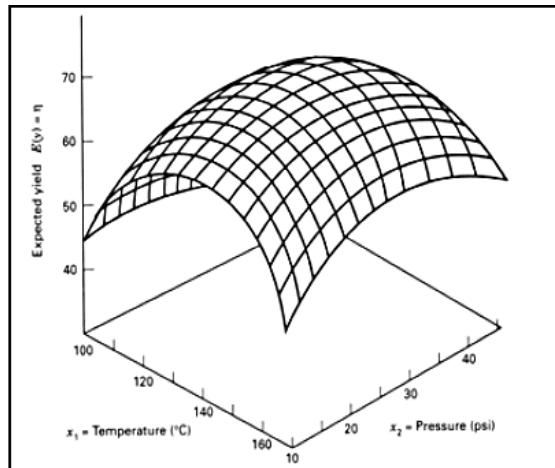
(2.3) หาเงื่อนไขปัจจัยในกระบวนการเพื่อให้เกิดการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น

(2.4) เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเชิงปริมาณกับตัวแปรตอบสนอง

ในปัญหาพื้นผิวผลตอบส่วนมากไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ในขั้นตอนแรกต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และตั้งค่าของตัวแปรอิสระ ซึ่งปกติแล้วใช้พหุนามที่มีฟังก์ชันต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์ในแบบจำลองกำลังหนึ่ง เขียนสมการทำนายผลได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.34)$$

และหากเป็นพหุนามกำลังสูงขึ้นจะมีเส้นโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบดังรูปที่ 2.7 จะได้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง



รูปที่ 2.7 แสดงพื้นผิวผลตอบแทนแบบสามมิติ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_{in} + \beta_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii}x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij}x_i x_j + \varepsilon_i \quad (2.35)$$

จากสมการทำนายผลข้างต้นทั้งสองสมการ (2.34) และ (2.35) ไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระได้ จากสมการผู้วิจัยสามารถสร้างแบบจำลองกำลังสองเพื่อนำไปสู่การเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบแทนส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบแทน แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระได้ ถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดใหญ่ มีการออกแบบวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแทนอีกหลายชนิด แต่มีวิธีที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การออกแบบส่วนประสมส่วนกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นวิธีการหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบแทนที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบแทนการออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟคทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนการรันที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย ซึ่งการทดลองเหล่านี้ ทำให้ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดลองเพราะจำนวนการทดลองลดลงแต่ยังคงสามารถทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลได้ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบทางสถิติ

2.1.6.2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองผู้วิเคราะห์ต้องการทราบว่าปัจจัยใดบ้างส่งผลต่อผลตอบแทน (Response) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งประเมินได้จากเมื่อเปลี่ยนระดับของปัจจัยหรือทรีตเมนต์แล้วทำให้ผล

ตอบของการทดลองเปลี่ยนไปอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการวิเคราะห์จึงเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแต่ละระดับของแต่ปัจจัย หรือกล่าวได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบผลตอบ เมื่อมีประชากรหรือข้อมูลศึกษามากกว่า 2 กลุ่ม ดังนั้นการวิเคราะห์ทำได้โดยการประยุกต์หลักการของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) โดยสามารถวิเคราะห์สมการในการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะต้องประเมินผลรวมกำลังสอง (Sum of Square; SS) ของความผันแปรเป็น ดัชนีบ่งชี้ความผันแปร โดยความผันแปรรวม (Total Variation) ซึ่งประเมินจาก Sum of Square of Total (SS_T) จะประกอบด้วย ความผันแปรจากปัจจัย ประเมินจาก Sum of Square of Treatment (SS_{tr} หรือ SS_{within}) และ ความผันแปร ความผิดพลาดของการทดลองหรือปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งไม่ได้ควบคุม ประเมินจาก Sum of Square of Error (SS_E หรือ $SS_{between}$) หรือแสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ดังสมการ (2.36)

$$SS_T = SS_{tr} + SS_E \quad (2.36)$$

2.1.7. เชื้อจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ หรือ จุลชีวน หรือ จุลชีพ (Microorganism) เป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าจึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ ได้แก่ แบนทีเรีย รา และ ยีสต์ เป็นต้น ซึ่งสามารถพบจุลินทรีย์ได้ทุกสภาวะแวดล้อม แม้แต่ในสภาวะแวดล้อมที่สิ่งมีชีวิตอื่นอยู่ไม่ได้ แต่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถปรับตัวอาศัยอยู่ได้ เช่น ในน้ำพุร้อนบริเวณภูเขาไฟใต้ทะเลลึก หรือภูเขาไฟธรรมดา ไต้มหาสมุทรที่มีความกดดันของน้ำสูงๆ ในน้ำแข็งที่มีอุณหภูมิเย็นจัด บริเวณที่มีสภาพความเป็นกรดต่ำสูง หรือแม้กระทั่งในบริเวณที่ไม่มีออกซิเจนส่วนใหญ่หมายถึงสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว หรือหลายๆเซลล์ โดยแต่ละเซลล์เป็นอิสระจากกัน

2.1.7.1. การตรวจนับเชื้อจุลินทรีย์ (Plate Count Agar)

การนับตรวจจำนวนจุลินทรีย์จากตัวอย่างของวัสดุที่จุลินทรีย์นั้นเจริญอยู่ ใช้ โดยมีวิธีการนับได้ 2 วิธีคือ

- (1) วิธีการทางกายภาพ ได้แก่ การนับจำนวนรวม การวัดความขุ่น การวัดปริมาณเซลล์ที่ตกตะกอน
- (2) วิธีการทางชีวภาพได้แก่การนับจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตด้วยวิธี Plate count เป็นต้นโดยการนับจำนวนจุลินทรีย์จะได้ผลดีเพียงใด ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่นการเก็บและการรักษา ประเภทและชนิดของจุลินทรีย์ที่ต้องการนับ อาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ เป็นต้น

2.1.7.2. การนับจำนวนแบคทีเรียในจานเพาะเชื้อ

เป็นการเพาะเชื้อแบคทีเรียแบบ Suspension ลงในจานเพาะเลี้ยงเชื้อ โดยการเติมอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีฐานเป็นองค์ประกอบเพื่อให้เกิดความแข็งแรงจากนั้นนำเชื้อแบคทีเรียไปบ่ม 24-48 ชั่วโมงเพื่อตรวจสอบจำนวนปกติมักแสดงในรูปของ CFU/ml หรือ CFU/g (Colony Forming Unit; CFU) สามารถตรวจสอบเฉพาะแบคทีเรียที่มีชีวิตเป็นวิธีการที่นิยมใช้ห้องปฏิบัติการเช่น Pour plate Spread plate เป็นต้นในการนับเซลล์แบคทีเรียด้วยวิธีนี้จำนวนโคโลนีที่เจริญบนจานอาหารมีความสำคัญ คือ ต้องมีจำนวนไม่มากหรือน้อยเกินไป โดยทั่วไปจะนับเฉพาะจานอาหารที่มีจำนวนเซลล์ระหว่าง 25-250 เซลล์เท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้จำนวนโคโลนีที่เจริญบนจานอาหารอยู่ในช่วงดังกล่าว ควรทำการเจือจางเชื้อเริ่มต้นหลายครั้ง โดยทั่วไปทำเป็นลำดับๆ ละ 10 เท่า (Serial Dilution) แล้วทำการเพาะเชื้อ แบคทีเรียที่แต่ละระดับการเจือจางลงบนจานอาหาร เมื่อเชื้อแบคทีเรียเจริญบนจานอาหารแล้วนับจำนวน ทำการคำนวณหาแบคทีเรียต่อกรัมหรือมล.ของตัวอย่างได้ การรายงานผลมักรายงานเป็น CFU มากกว่าจำนวนแบคทีเรีย เนื่องจากไม่สามารถบอกได้อย่างแน่นอน ชัดเจนว่า 1 โคโลนี มาจาก 1 เซลล์ การนับจำนวนด้วยวิธี Plate Count จึงเป็นการนับจำนวนเซลล์ที่มีชีวิต (Viable Count) ซึ่งมีหลายวิธี เช่น Spread Plate Drop Plate Membrane Filtration เป็นต้น



รูปที่ 2.8 การหยดอาหารลงบนจานเพาะเชื้อ
(สุวรรณพินิจ, 2548)

วิธีการทำ Spread Plate เป็นเทคนิคการแยกแบคทีเรียให้บริสุทธิ์ที่สามารถตรวจนับปริมาณได้โดยมีการเจือจางเป็นลำดับส่วน (Serial Dilution) จากนั้นเปิดตัวอย่างที่มีความเจือจางตามต้องการโดยวิธี Aseptic technique ปริมาตร 0.1 ml. ใส่ตัวอย่างลงบนอาหารวุ้นแข็ง และทำการเกลี่ยตัวอย่างให้กระจายทั่วผิวน้ำอาหารด้วย Sterile spreader รูป L ที่ทำจากแท่งแก้วโคโลนีของแบคทีเรียจะเจริญบนอาหารวุ้นแข็งเท่านั้น วิธีการ Spread plate นี้ ง่ายและสะดวกกว่าวิธี Pour plate แต่ไม่เหมาะกับแบคทีเรียพวกที่ไวต่อออกซิเจน

การตรวจผลทำได้โดยการนับจำนวน Colony ให้เลือกชุดจานเพาะเชื้อที่มีจำนวน Colony เจริญอยู่ประมาณ 30 -300 Colony จากความเจือจางเดียว ถ้าทำ 2 จาน ให้รวมจำนวน Colony ของทั้ง 2 จานแล้วหาร ด้วย 2 จะเท่ากับจำนวน Colony ที่นับได้ต่อหนึ่ง ความเจือจางต่อจาน คำนวณจำนวน Colony ต่อตัวอย่างวัสดุ 1 กรัม หรือ 1 ml. ได้ดังนี้

สมมติว่าจำนวนเฉลี่ยของ Colony เท่ากับ 99.9 Colony นับได้ที่มีความเจือจาง 10^{-5} เท่า หรือ 1:50 เท่า ดังนั้นจำนวน Colony ต่อตัวอย่างวัสดุ 1 กรัม หรือ 1 ml. คำนวณดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง

$$\begin{aligned} \text{วัสดุ } 1/10^{-5} \text{ กรัม นับแบคทีเรีย ได้} &= 99.9 \quad \text{Colony} \\ \text{วัสดุ } 1 \text{ กรัม นับแบคทีเรีย ได้} &= 99.9 \times 10^5 \quad \text{Colony} \\ &= 9.99 \times 10^6 \quad \text{Colony} \end{aligned}$$

2.1.7.3. การรายงานผล

การตรวจนับจำนวนโคโลนีบนจานอาหารเพาะเชื้อที่มีจำนวนโคโลนีอยู่ระหว่าง 30-300 โคโลนี หาค่าเฉลี่ยของจำนวนโคโลนีจากจานเพาะเชื้อ นิยมรายงานเป็น CFU ต่อกรัมหรือต่อมิลลิลิตร การรายงานผลการตรวจนับเป็นหน่วยโคโลนีต่อกรัม (CFU/g) ของตัวอย่าง ถ้าจำนวนโคโลนีอยู่ระหว่าง 30-300 โคโลนี ให้นับจำนวนโคโลนีและคำนวณให้อยู่ในรูป CFU/mL ของตัวอย่าง ดังสมการที่ (2.37)

$$\frac{\text{CFU}}{\text{mL}} = \frac{\sum c}{(V_1 n_1 + 0.1 n_2) d} \quad (2.37)$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรของสารละลายที่ใช้ในการเพาะเชื้อ

c = ผลรวมของโคโลนีที่นับได้ทั้งหมดจากจานเพาะเชื้อที่นับได้ในช่วง 30-300 โคโลนี

n_1 = จำนวนจานเพาะเชื้อที่นับได้ในช่วง 30-300 โคโลนี ในระดับความเข้มข้นแรก

n_2 = จำนวนจานเพาะเชื้อที่นับได้ในช่วง 30-300 โคโลนี ในระดับความเข้มข้นที่สอง

d = ระดับความเข้มข้นแรกที่สามารถนับเชื้อได้ในช่วง 30-300 โคโลนี

2.1.7.4. ชนิดของเชื้อแบคทีเรียที่ศึกษา

เชื้อแบคทีเรียสามารถจำแนกได้หลายแบบ แต่สำหรับการเลือกเชื้อแบคทีเรียในการทดลองเพื่อเป็นตัวแทนของเชื้อแบคทีเรียก่อโรคที่สามารถพบได้โดยทั่วไป มี 2 ประเภท คือ

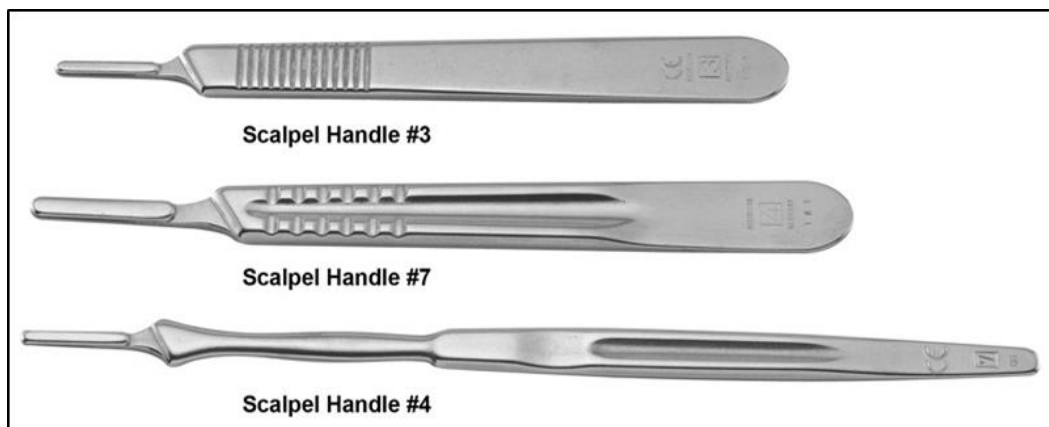
(1) *Escherichia coli* เป็นตัวแทนของแบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria) รูปร่างเป็นแท่ง (Rod shape) ไม่สร้างสปอร์เป็น facultative anaerobe เจริญได้ทั้งที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน อยู่ในวงศ์ Enterobacteriaceae และเป็นแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่ม โคลิฟอร์ม (Coliform) ประเภท fecal coliforms ซึ่งเป็นโคลิฟอร์มที่พบในอุจจาระของมนุษย์และสัตว์เลือดอุ่น จึงใช้เป็นดัชนีบ่งชี้สุขลักษณะของอาหารและน้ำ ซึ่งทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ อาการทั่วไปคือ ท้องร่วง ปวดท้อง ไข้ต่ำ คลื่นไส้ และ อ่อนเพลีย การติดเชื้อหรือแสดงอาการต่อเมื่อได้รับเชื้อเข้าไปประมาณ 100 ล้าน ถึง 10 พันล้านเซลล์ โดยระหว่างการเจริญจะสร้างสารพิษที่ทำให้เกิดการหลั่งของของเหลว (Fluid secretion) แหล่งที่พบคือน้ำที่ปนเปื้อน แล้วไปปนเปื้อนต่อในอาหาร หรือจากคนป่วยที่สัมผัสหรือปรุงอาหาร ถ้ารับเชื้อเข้าไปมาก จะมีอาการภายใน 24 ชั่วโมง

(2) *Staphylococcus Aureus* เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ที่มีลักษณะรูปร่างกลม มักเกาะกันเป็นคู่ๆ หรือเกาะกันเป็นรูปวงองุ่น (Spherical shape) ด้วยสายสั้นๆ เจริญได้แม้ในสภาวะที่มีอากาศและไม่มีอากาศ และมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญที่ 15-45 องศาเซลเซียส เป็นสาเหตุของการเกิดโรคต่างๆ เช่น การติดเชื้อ บริเวณเนื้อเยื่อ และโรคอาหารเป็นพิษ สำหรับสภาวะต่อสิ่งแวดล้อม มักพบเชื้อชนิดนี้ในคนและสัตว์เลือดอุ่น โดยเฉพาะในคนที่มือสกปรก เช่น แผลผ่าตัด แผลอักเสบ เป็นต้น

2.1.8. เครื่องมือผ่าตัด

สแตนเลส (Stainless) หรือชื่ออย่างเป็นทางการคือ เหล็กกล้าไร้สนิม เป็นศัพท์ทั่วไปสำหรับในการเรียกกลุ่มที่มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เกิดจากโลหะผสม ทำให้มีคุณสมบัติพิเศษและยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะกับงานได้ทำให้สามารถนำไปใช้กับงานหลายรูปแบบหนึ่งในการนำไปใช้ ได้แก่ เครื่องมือผ่าตัดซึ่งเป็นอุปกรณ์ในทางการแพทย์ ทำให้มีความสะดวกในการใช้งาน ช่วยในการตัด ฉีกเนื้อเยื่อหรือการคืบ เพื่อช่วยเล็งการสัมผัสโดยตรงของแพทย์กับผู้ป่วย

ทำให้ลดความเสี่ยงในระหว่างทำการรักษาได้ ตัวอย่างค้ำมีดผ่าตัดซึ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับการผ่าตัดผู้ป่วย ดังรูป



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างของค้ำมีดผ่าตัดเบอร์ 3 เบอร์ 7 และเบอร์ 4 ตามลำดับ

2.1.8.1. คุณสมบัติของสแตนเลส (Stainless)

เหล็กกล้าไร้สนิม หรือ สแตนเลส (อังกฤษ: Stainless Steel) นั้นในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% ชื่อในภาษาไทย แปลจากภาษาอังกฤษว่า Stainless steel เนื่องจากโลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมที่มีสาเหตุจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อสแตนเลส เกิดเป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสี่ยงให้กับตัวเนื้อสแตนเลสได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน และไม่ชำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป สำหรับในสหรัฐอเมริกาและในหลายประเทศ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการบิน นิยมเรียกโลหะนี้ว่า Corrosion resistant steel เมื่อไม่ได้ระบุชัดว่าเป็นโลหะผสมชนิดใด และคุณภาพระดับใด แต่ในท้องตลาดเราสามารถพบเห็น สแตนเลสเกรด 18-8 มากที่สุด ซึ่งเป็นการระบุถึงธาตุที่เจือลงในเนื้อเหล็กคือ โครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ สแตนเลสประเภทนี้จัดเป็น Commercial Grade คือมีใช้ทั่วไปหาซื้อได้ง่าย มักใช้ทำเครื่องใช้ทั่วไป ซึ่งเราสามารถจำแนกประเภทของสแตนเลสได้จากเลขรหัสที่กำหนดขึ้นตามมาตรฐาน AISI เช่น 304 304L 316 316L เป็นต้น ซึ่งส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดเกรดของสแตนเลส ซึ่งมีความต้องการในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป สแตนเลสกับการเกิดสนิม ปกติ Stainless steel จะไม่เป็นสนิมเพราะที่ผิวของมันจะมีฟิล์มโครเมียมออกไซด์บางๆเคลือบผิวอยู่ อันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cr ใน Stainless steel กับ ออกซิเจนในอากาศ การทำให้ Stainless steel เป็นสนิมคือการถูกทำลายฟิล์มโครเมียมออกไซด์ ที่เคลือบผิวออกไปในสถานะที่ Stainless steel สามารถเกิดสนิมได้ ก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมาอีกครั้งเช่น

ถ้าสแตนเลสถูกทำให้เกิดรอยขีดข่วน แล้วบริเวณรอยนั้นมีความชื้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยากับธาตุเหล็กก่อนที่ฟิล์มโครเมียมออกไซด์จะก่อตัวขึ้นมา ก็จะเป็นสาเหตุให้เกิดสนิมขึ้นได้

2.1.8.1.1. คุณสมบัติทางกายภาพของสแตนเลส

ค่าความหนาแน่นของสแตนเลสสูงแตกต่างจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอื่นๆอย่างเห็นได้ชัดในส่วนของคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถทนความร้อนของสแตนเลสมีข้อสังเกต 3 ประการคือ

- (1) การที่มีจุดหลอมเหลวสูงทำให้มีอัตราความคืบหน้าเมื่อเทียบกับเซรามิกที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 °C
- (2) การที่มีค่านำความร้อนระดับปานกลางทำให้สแตนเลสเหมาะที่จะใช้ในงานที่ต้องทนความร้อน(ตู้คอนเทนเนอร์) หรือต้องการคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี(เครื่องถ่ายความร้อน)
- (3) การมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวระดับปานกลางจึงสามารถใช้ความยาวมากๆได้โดยใช้ตัวเชื่อมน้อยเช่นในการทำหลังคา

2.1.8.1.2. ประเภทของสแตนเลส

โดยทั่วไปมักจะมีการเข้าใจผิดว่าสแตนเลสแท้ต้องแม่เหล็กดูดไม่ติด ตามความเป็นจริงแล้วการที่แม่เหล็กจะดูดติดหรือไม่ติดนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของสแตนเลสซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มพื้นฐาน ได้ 5 กลุ่มคือ ออสเทนนิติก (Austenitic) เฟอริติก (Ferritic) ดิวเพล็กซ์ (Duplex) มาร์เทนซิติก (Martensitic) และกลุ่มเพิ่มความแข็งโดยวิธีการตกผลึก

ตระกูลออสเทนนิติก (Austenitic) โดยทั่วไปรู้จักกันในซีรีส์ 300 เป็นเกรดที่ใช้งานแพร่หลายมากที่สุดถึง 70 เปอร์เซ็นต์ มีคุณสมบัติที่แม่เหล็กดูดไม่ติด (non – magnetic) มีส่วนผสมของโครเมียม 16 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนอย่างมากที่สุด 0.15 เปอร์เซ็นต์ มีส่วนผสมของธาตุไนเกิล 8 เปอร์เซ็นต์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติในการทำการประกอบ (Fabrication) และเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เกรดที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายและนิยมเรียก 18/10 คือการที่มีส่วนผสมของโครเมียม 18 เปอร์เซ็นต์และไนเกิล 10 เปอร์เซ็นต์ มีคุณสมบัติ ได้แก่ ด้านทานการกัดกร่อนดีเยี่ยม และการใช้งานประกอบขึ้นรูป ที่เกี่ยวข้องกับความสะดวกและสุขอนามัยได้ดีเลิศ สะดวกในงานสร้าง ประกอบหรือขึ้นรูปทั่วไปได้ดีมาก ความแข็งแรงสูงสุดและมีความยืดหยุ่นสูง แม่เหล็กดูดไม่ติดอีกทั้งยังสามารถใช้งานที่อุณหภูมิเย็นจัดและร้อนจัดหรืออุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส หรืออาจสูงกว่านี้ เป็นสแตนเลสที่นำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์เครื่องครัว เครื่องใช้บนโต๊ะอาหาร เครื่องใช้ไฟฟ้า งานตกแต่ง

อาคาร งานสถาปัตยกรรม อุปกรณ์ในการผลิตเบียร์ หรือการผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มและอาหาร ที่มีสมบัติด้านทานที่เกี่ยวข้องกับความสะอาดและสุขศาสตร์อนามัย เช่น เครื่องมือในโรงพยาบาล เวชภัณฑ์ สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำติดลบ สำหรับถังเก็บก๊าซเหลว และสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ทำท่อแลกเปลี่ยนอุปกรณ์ความร้อน ทำอุปกรณ์ควบคุมหรือกำจัดมลภาวะ และวันพิช งานท่อ ถังเก็บ ภาชนะที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมและภาชนะ ความดันที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเหมืองแร่ การผลิตเนื้อเยื่อ กระดาษและกระดาษ อุปกรณ์ในตู้โดยสารรถไฟ รถเข็น อาหาร เป็นต้น

2.1.8.2. สแตนเลสประเภท 316L

ส่วนผสมจะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของสแตนเลส ซึ่งทำให้สแตนเลสชนิด 316L นี้ เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์โดยมีคุณสมบัติ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางเคมีของสแตนเลสประเภท 316L

ธาตุองค์ประกอบ	ปริมาณที่กำหนดตามมาตรฐาน ASTM A240 (%)
C (Carbon)	≤ 0.03
Mn (Manganese)	≤ 2.00
P (Phosphorus)	≤ 0.045
S (Sulfur)	≤ 0.03
Si (Silicon)	≤ 1.00
Ni (Nickel)	≤ 14.00
Cr (Chromium)	≤ 18.00
Mo (Molybdenum)	≤ 3.00

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางกลของสแตนเลสประเภท 316L

Tensile Strength (Mpa)	485
Yield Strength (Mpa)	170
Elongation HRB (%)	40

โดยเกรดของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ใช้ทำเครื่องมือผ่าตัด คือ ชนิด 316L จัดเป็นสแตนเลสเกรดออสเทนิติกที่มีส่วนผสมของโครเมียม 16% ถึง 18% และนิกเกิล 11% ถึง 14% และยังมีโมลิบดีนัมผสมอยู่อย่างน้อยที่สุด 2% ซึ่งจะทนการกัดกร่อนที่เป็นหลุม (Pitting Resistance) อีกทั้งยังสามารถทนต่อการกัดกร่อนแบบคลอไรด์ได้ดี บางครั้งจะเรียกเหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้ว่า “เกรดได้

น้ำนอกจากการผสมโครเมียมลงไปเพื่อทำให้เกิดคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อนแล้วยังมีธาตุที่ใส่ผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติอื่นๆอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปอาจจะติดมากับวัตถุดิบที่มีปริมาณน้อยมากจนสามารถควบคุมได้ยาก อีกทั้งอาจมีราคาสูงในกระบวนการแยกไม่คุ้มค่านอกจากส่งผลกระทบต่อสมบัติของเนื้อนั้นเอง ธาตุโดยทั่วไปที่ผสมอยู่ในเนื้อเหล็กกล้า เช่น

คาร์บอน (Carbon) โดยทั่วไปผสมในเนื้อเหล็กกล้าไม่เกิน 0.15% (ยกเว้นกลุ่มมาร์เทนซิติค) ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีคาร์บอนต่ำจะเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนตามขอบเกรน (Intergranular corrosion) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น และความสามารถในการเชื่อมด้วย ซึ่งโดยทั่วไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่ 2 ช่วง คือ 0.02% (น้อยกว่าเท่ากับ 0.03%) และ 0.07% (0.04-0.15)

โครเมียม (Chromium) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาพบรรยากาศทั่วไป โดยผสมในเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างน้อย 10.5% ซึ่งเหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโครเมียมอยู่ 2 ช่วง คือ 12% (10.5-14.0%) และ 17% (16.0-24.0%) แต่ถ้าผสมโครเมียมมากกว่า 30% จะส่งผลทำให้เหล็กเปราะ

นิกเกิล (Nickel) หรือนิกเกิล (Ni) ช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนแบบมูมอับในสารละลายกรด อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปเย็น และเพิ่มความสามารถในการเชื่อม โดยทั่วไปนิยมผสมนิกเกิลลงในเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับวัตถุดิบของเหล็ก) และ 9% (6.0-15.0%)

โมลิบดีนัม (Molybdenum) เสริมผลความต้านทานต่อการกัดกร่อนของโครเมียม โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบมูมอับ และช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในสภาพคลอไรด์ด้วย เหล็กกล้าไร้สนิมส่วนใหญ่ผสมโมลิบดีนัมอยู่ 2 ช่วง คือ 0% (ปริมาณเล็กน้อยติดมากับวัตถุดิบของเหล็ก) และ 2% (1.0-3.0%)

2.1.8.3. การกัดกร่อนของผิว

การกัดกร่อนคือจากนิยามตามมาตรฐาน DIN EN ISO 8044 การกัดกร่อน (Corrosion) คือ ปฏิกิริยาระหว่างวัสดุโลหะกับสิ่งแวดล้อมซึ่งนำไปสู่การเสื่อมสภาพของวัสดุนั้นและยังผลให้ความสามารถในการทำหน้าที่ของวัสดุดังกล่าวเสียไป โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า แต่ทั้งนี้สามารถเป็นปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยาทางกายภาพของโลหะได้เช่นกัน

โดยทั่วไปการกัดกร่อนสามารถจำแนกออกเป็นหมวดหมู่ได้หลายลักษณะโดยใช้เกณฑ์ต่าง ๆ กัน เช่น จำแนกตามกลไก ตามลักษณะทางกายภาพ หรือตามตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกัดกร่อน

2.1.8.3.1. การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform corrosion)เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมแบบสม่ำเสมอ สามารถประยุกต์ใช้กฎ

ของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction) ในการคำนวณหาอัตราการกัดกร่อนในมิติต่างๆได้ เช่น มวลต่อพื้นที่ต่อเวลา ความลึกของการกัดกร่อนต่อเวลา

- 2.1.8.3.2.** การกัดกร่อนในบริเวณจำเพาะ (Localized corrosion)เกิดขึ้นเฉพาะในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง ไม่เกิดขึ้นทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุ ในบางกรณีอาจจะไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนแบบนี้ได้ด้วยตาเปล่า
- 2.1.8.3.3.** การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion)การกัดกร่อนแบบนี้เกิดจากการสัมผัสหรือเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าของโลหะตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่างกันและอยู่ในสารละลายที่นำไฟฟ้าได้ โลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันต่ำกว่ามีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าและเกิดการกัดกร่อนกับโลหะนั้นอย่างรุนแรงที่บริเวณรอยต่อของการสัมผัส นอกจากนี้ในบางกรณี แม้ว่าจะมีโลหะเพียงชนิดเดียวแต่ถ้าปลายทั้งสองด้านของโลหะนั้นอยู่ในสภาวะที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ต่างกัน ก็สามารถเอื้อให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิกได้
- 2.1.8.3.4.** การสูญเสียส่วนเจือ (Dealloying)ตัวอย่างที่คลาสสิกที่สุดของการกัดกร่อนแบบนี้คือการสูญเสียสังกะสีของทองเหลือง ซึ่งนอกจากจะทำให้ทองเหลืองมีสีแดงเข้มมากขึ้นตามสัดส่วนเชิงมวลของทองแดงที่เพิ่มขึ้นแล้ว ทองเหลืองยังจะสูญเสียความแข็งแรงด้วย เนื่องจากโครงสร้างโดยรวมจะมีความพรุนมากขึ้น
- 2.1.8.3.5.** การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion)การกัดกร่อนแบบนี้มักจะเกิดกับโลหะที่มีความสามารถในการสร้างชั้นป้องกันได้ (Passivation) หลุมที่เกิดขึ้นมีได้หลายลักษณะ เช่น หลุมแบบปากกว้าง หลุมแบบรูเข็ม หลุมแบบปากแคบแต่ด้านในกลวง ในเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีการประมาณค่าความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนแบบหลุม(Pitting Resistance Equivalent Number; PREN) เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกวัสดุได้ด้วย
- 2.1.8.3.6.** การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice corrosion)จะเกิดขึ้นในบริเวณที่การถ่ายเทของเหลวทำได้ไม่ดีนัก ด้านในและด้านนอกของซอกจะส่งผลให้การแพร่ของสารเคมีบางชนิด เช่น ออกซิเจน ทำได้ยาก ซึ่งจะทำให้ด้านในและด้านนอกมีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่ต่างกัน และนำไปสู่

การกัดกร่อนเฉพาะบริเวณด้านในชอก นอกจากนี้ค่า pH ด้านในชอก อาจลดลงได้ถึง 1 หรือ 0 ในขณะที่ค่า pH ด้านนอกคงที่ที่ 7

2.1.8.3.7. การกัดกร่อนร่วมกับการกัดเซาะ (Erosion corrosion)การกัดกร่อนของ โลหะที่ผิวหน้าจะมีอัตราสูงขึ้นเมื่อมีของไหลไหลผ่านด้วยความเร็วสูง และเกิดกระแสน้ำไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ถ้ามีอนุภาคของแข็งปะปนกับของไหล ก็จะทำให้ให้อัตราการกัดกร่อนมีค่าสูงมากขึ้นอีก

2.1.8.3.8. การกัดกร่อนจากการถูกรูด (Fretting corrosion)เกิดจากการสัมผัสกันของ พื้นผิวโดยที่มีแรงกระทำและมีการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าปกติ

2.1.8.3.9. การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular corrosion)เมื่อคาร์บอนที่ เจืออยู่ในเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถแพร่เข้าจับกับโครเมียม เกิดเป็น สารประกอบ เช่น Cr_2C_6 และตกตะกอนอยู่ที่ขอบเกรน บริเวณที่อยู่ ถัดไปจากขอบเกรนจะมีปริมาณโครเมียมลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ความ ด้านทานต่อการกัดกร่อนลดลงไปด้วย และเมื่อเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัส กับสารกัดกร่อน บริเวณข้างขอบเกรนจึงถูกกัดกร่อนเป็นอันดับแรกอย่าง จำเพาะเจาะจง

2.1.8.4. ความต้านทานการกัดกร่อน

โลหะทุกชนิดทั่วไปจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ เกิดเป็นฟิล์มออกไซด์บนผิว โลหะ หรือออกไซด์ ที่เกิดบนผิวเหล็กทั่วไป จะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และทำให้เกิดสภาพพื้นผิว เหล็กผุกร่อน ที่เราเรียกว่า เป็นสนิม แต่สแตนเลสมีโครเมียม (Cr) ผสมอยู่ 10.5เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ทำ ให้คุณสมบัติของฟิล์มออกไซด์บนพื้นผิวเปลี่ยนแปลงไป กลายเป็นฟิล์มปกป้องหรือพาสซีฟเลเยอร์ (Passive Layer) ที่เหมือนเกราะป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า พาสซีวิตี (Passivity) หรือฟิล์มปกป้องซึ่งจะมีขนาดบางมาก (สำหรับแผ่นสแตนเลสบางขนาด 1 มิลลิเมตร ฟิล์มหรือพาส ซีฟเลเยอร์นี้จะมีขนาดบางเทียบเท่ากับวาทะกระดาษ 1 แผ่น บนตึกสูง 20 ชั้น) และมองตาเปล่าไม่เห็น ฟิล์มนี้จะเกาะติดแน่น และทำหน้าที่ปกป้องสแตนเลส จากการกัดกร่อนทั้งมวล หากนำไปผลิตแปรรูป หรือใช้งานในสภาพเหมาะสม เมื่อเกิดมีการขีดข่วน ฟิล์มปกป้องนี้จะสร้างขึ้นใหม่ได้เองตลอดเวลา ความคงทนของพาสซีฟเลเยอร์ เป็นปัจจัยหลักของความต้านทานการกัดกร่อนของสแตนเลส นอกจากนี้ ยังขึ้นอยู่กับสภาพการกัดกร่อน อันได้แก่ ความรุนแรง ของปฏิกิริยาออกซิไดซ์ ความเป็น กรดปริมาณสารละลายคลอไรด์ และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มปริมาณ Crจะช่วยเพิ่มความ ต้านทานการกัดกร่อนของสแตนเลส การเติมนิเกิล (Ni) จะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน

โดยทั่วไป ให้ทนสภาวะกัดกร่อนรุนแรงได้ ส่วน โมลิบดีนัมจะช่วยเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนเฉพาะที่ เช่น การกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting Corrosion) ในทางปฏิบัติ สเตนเลสชนิดเฟอร์ริติก มีการใช้งานจำกัดในสภาพการกัดกร่อนปานกลางและในสภาพชนบท ทั้งชนิดเฟอร์ริติกและออสเทนนิติกสามารถใช้ทำ อุปกรณ์เครื่องใช้ในครัวเรือนได้ แต่เนื่องจากชนิดออสเทนนิติกสามารถทนการกัดกร่อนได้ดี และทำความสะอาดง่าย จึงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร และเครื่องดื่ม นอกจากนี้ชนิดออสเทนนิคยังทนการกัดกร่อนจากสารเคมีหลายประเภท ได้แก่ กรดอัลคาไลยด์ เป็นต้น ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมเคมี และกระบวนการผลิตต่าง ๆ

2.2. เอกสารและการทบทวนวรรณกรรม

การทำปราศจากเชื้อ (Sterilization) เป็นเทคนิควิธีการทำให้ผลิตภัณฑ์เป้าหมายเกิดความสะอาด โดยปริมาณของเชื้อจะขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์นั้นเป็นหลักตามมาตรฐาน (Van Doormmalen and Kopinga, 2008) สำหรับงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาอุปกรณ์ เครื่องมือทางการแพทย์ซึ่งใช้สำหรับการผ่าตัด จัดว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความใกล้ชิดกับผู้ป่วยมากจึงต้องการกระบวนการทำความสะอาดที่มีลักษณะจำเพาะเจาะจงโดยอุปกรณ์ที่เลือกเป็นด้ามมีดผ่าตัดซึ่งเป็นวัสดุที่มีการนำมาใช้ซ้ำ สามารถทนความร้อนได้ จัดอยู่ในชั้นอุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงสูง (Class II2a Invasive Device), (Holmes and Walker, 2014) ซึ่งตามมาตรฐานกำหนดให้ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียเป็นศูนย์ เนื่องจากอุปกรณ์มีการสัมผัสกับเนื้อเยื่อ หรือผ่านเข้าไปสัมผัสกับบาดแผลของผู้ป่วย ทำให้ต้องระมัดระวังและมีการวางแผนเพื่อการปราศจากเชื้ออย่างถูกวิธีเพราะภายหลังจากการทำปราศจากเชื้อแล้วจะต้องผ่านกระบวนการเก็บรักษาเพื่อให้คงประสิทธิภาพของการปลอดเชื้อไว้ด้วย ดังนั้น การเล็งเห็นถึงความสำคัญของตั้งแต่เริ่มทำการปราศจากเชื้อให้มีประสิทธิภาพในการปราศจากเชื้อสูงนั้น เลือกใช้กระบวนการปราศจากเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมา (Plasma) เพื่อความรวดเร็วในการใช้งานและมีการปราศจากเชื้อตามมาตรฐานที่กำหนด และยังเป็นกระบวนการที่สามารถทำได้ทั้งสภาวะสุญญากาศและที่บรรยากาศจากการศึกษางานวิจัยพบ ว่าเทคนิควิธีการในการเกิดพลาสมา คือ กระบวนการไอออไนซ์ (Ionization) การที่อิเล็กตรอน (Electron) จะเคลื่อนที่ชน (Collision) กับโมเลกุล (Molecule) หรืออะตอม (Atom) ของก๊าซโดยอาศัยคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency ; RF) หรือคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และกระบวนการเพิ่มระดับพลังงานอิเล็กตรอน (Excitation) ทำให้เกิดสภาวะไม่เสถียรในระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่จะเกิดสภาวะกระตุ้นและทำให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับไม่เสถียรจึงตกกลับสู่ภาคพื้น (Ground State) และคายพลังงานออกมาในรูปของค่าสีต่างๆตามก๊าซที่บรรจุลงในระบบ โดยก๊าซที่ใช้จะเป็นการที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารในภาชนะ (Chamber) เป็นก๊าซเฉื่อยได้แก่ อาร์กอน (Argon; Ar) ไนโตรเจนไดออกไซด์ (Nitrogen dioxide;

NO₂) และออกซิเจน (Oxygen; O₂) เป็นต้น ฉะนั้นในการเลือกใช้เทคนิคพลาสมาจึงเป็นวิธีการสำหรับการทำปราศจากเชื้อสำหรับอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยได้ทำการศึกษาข้อมูลงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องและจัดแบ่งหัวข้อที่ทำการศึกษาค้นคว้าเป็น ดังนี้

2.2.1. การทำปราศจากเชื้อ (Sterilization)

การทำปราศจากเชื้อ หมายถึง กระบวนการที่ใช้สำหรับในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Microorganism) ด้วยวิธีการทางกายภาพหรือเคมี ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเน่าเสีย โดยทางการแพทย์นั้นถือว่าแบคทีเรียเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำงานของอวัยวะ และระดับความรุนแรงของอาการได้ การทำปราศจากเชื้อสามารถทำได้ตั้งแต่การทำลายเชื้อ (Disinfection) เพื่อการยับยั้งการเจริญของเชื้อแต่จะไม่ทำลายสปอร์ (Spore) หรือการทำปราศจากเชื้อซึ่งจะเป็นการกำจัดแบคทีเรียทุกรูปแบบรวมทั้งเซลล์ปกติ (Vegetative cell) ตามงานวิจัยของ (Rutala and Weber, 2013)(Wilson and Nayak, 2013) และ (MacFie, 2013) ซึ่งกระบวนการทำปราศจากเชื้อสามารถทำได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การใช้ลมร้อน (Dry Hot Air) ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงเหมาะสมกับ วัสดุที่มีความทนทาน วัสดุที่มีความหนาและซับซ้อนอาจใช้ระยะเวลาการปฏิบัติหน้าที่ได้ไม่เทียบเท่ากับการอบนึ่งฆ่าเชื้อ (Autoclaves) ซึ่งเป็นการอบด้วยไอน้ำร้อนทำให้สามารถนำไปใช้กับวัสดุที่มีลักษณะเฉพาะ หากเป็นวัสดุที่ไม่ทนความร้อน เช่น ยางอาจเกิดการเสื่อมคุณภาพเร็ว และวิธีการใช้เอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide; ETO) ต้องใช้ปริมาณเข้มข้นสูงเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีอาจก่อให้เกิดการระคายต่อผิวหนังหรือเยื่อเมือกและตาได้ และวิธีการใช้รังสี วิธีการเหล่านี้อาจก่อให้เกิดสารพิษสะสมเมื่อใช้เป็นระยะเวลานานรวมไปถึงการเกิดรังสีตกค้าง นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังมีการใช้พลาสมาเย็น โดยการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide Gas Plasma) เป็นวิธีที่สามารถทำได้แม้อุณหภูมิต่ำ ไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษแต่ต้องการภาชนะพิเศษสำหรับกระบวนการทำ จึงทำให้ค่าใช้จ่ายสำหรับกระบวนการนี้สูงตามไปด้วย ดังนั้น ในการเลือกใช้เทคนิคสำหรับการทำปราศจากเชื้อตามชนิดอุปกรณ์ถือเป็นหลักในการพิจารณาเพื่อให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ รวมถึงการลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลา เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงในการทำปราศจากเชื้อ

2.2.2. พลาสมา (Plasma)

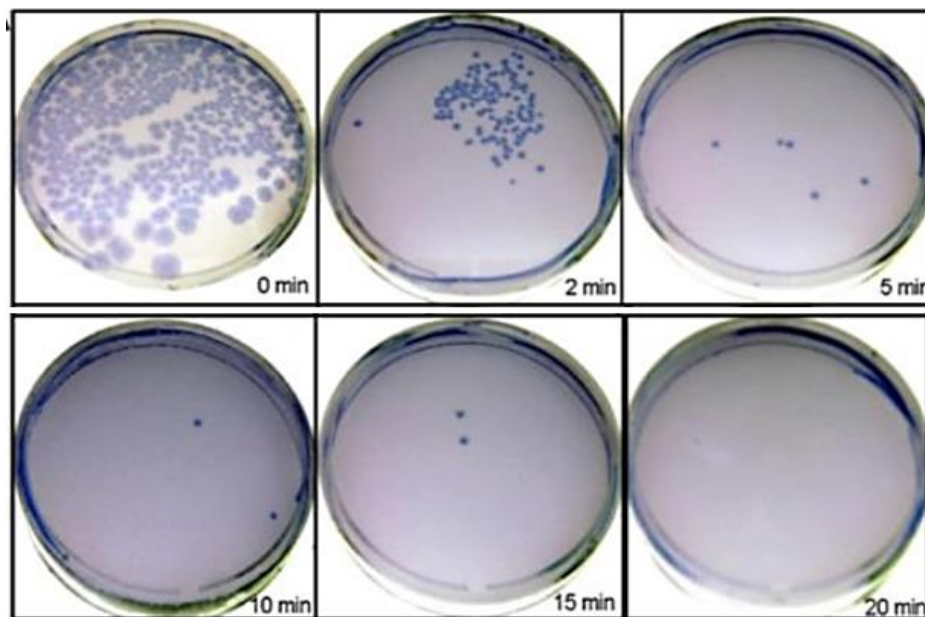
พลาสมา คือ สภาวะที่ก๊าซเกิดการแตกตัว ภายในประกอบไปด้วยอนุภาคที่มีประจุบวก และลบในสัดส่วนที่เท่ากันทำให้เกิดความเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อถูกกระตุ้นด้วยกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดกระแสไฟฟ้า (Electric Field) ภายในภาชนะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคมูลอิสระ ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในกระบวนการฆ่าเชื้อและการเกิดอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานสูงขึ้นเกิดสภาวะที่ไม่

เสถียร จึงกลับสู่สถานะเสถียรในขณะที่กลับจะคายพลังงานในรูปของพลังงานแสง (UV photons) กระบวนการเกิดพลาสมามีทั้งที่อุณหภูมิสูง (Thermal Plasma) ประมาณ 180,000 เคลวิน (K) (Fridman et al., 2006) ทำให้ได้พลังงานสูงจึงใช้ระยะเวลาสั้นในกระบวนการปราศจากเชื้อ แต่ก็อาจส่งผลกระทบกับผลิตภัณฑ์ที่มีความไวต่อความร้อนด้วย รวมไปถึงต้องใช้วัสดุที่มีคุณภาพสูง ค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ของเครื่องก็จะมากตาม ทั้งนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่ง (Moisan et al., 2001), (Chau et al., 1996), (Gilliland, 2009) ได้ทำการศึกษาและพบว่าพลาสมาสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำ (Non-Thermal Plasma; NTP) เช่นกัน โดยอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) (von Keudell et al., 2010) ทำให้สามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายมากขึ้น เช่น พวกพลาสติก อุตสาหกรรมอาหาร หรือในทางการแพทย์เพื่อการทำลายเซลล์มะเร็ง เป็นต้น แม้จะอุณหภูมิลดลงแต่พลาสมาชนิดนี้ยังคงคุณภาพในการทำปราศจากเชื้อได้เช่นกัน ตามงานวิจัยของ (Scholtz et al.) ที่สามารถยืนยันได้ว่าพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำยังเป็นที่ยอมรับและสามารถนำมาใช้งานได้จริงกับกระบวนการทำปราศจากเชื้อ

2.2.2.1. ประสิทธิภาพของพลาสมาในกระบวนการทำปราศจากเชื้อ

กระบวนการสร้างพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาเย็น (Cold Plasma) สามารถทำได้ทั้งในสถานะที่เป็นสุญญากาศ และบรรยากาศโดยประสิทธิภาพที่ได้มีความใกล้เคียงกัน (Bayliss et al., 2012) พลาสมาที่อุณหภูมิต่ำหรือพลาสมาเย็นนั้นจะทำงานอาศัยพลังงานในการกระตุ้นเพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระเข้าชนกับจากโมเลกุลของก๊าซเฉื่อยที่บรรจุเข้าไป โดยอาศัยแหล่งกำเนิดในการสร้างพลังงานกระตุ้น ได้แก่ คลื่นไมโครเวฟ และคลื่นความถี่วิทยุ (Kang et al., 2003) ซึ่งการทำงานลักษณะนี้ทำให้สามารถมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียได้ด้วยแม้จะมีอุณหภูมิต่ำก็ตามการทำงานของพลาสมาเย็นในการกำจัดแบคทีเรียหรือไวรัสจากพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ใช้ก๊าซเฉื่อยในการทำปฏิกิริยา (Maeda et al., 2003) ได้แก่ ออกซิเจนที่แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Activated Oxygen) ซึ่งอนุมูลอิสระที่ได้จากการทำพลาสมาตัวเองจะเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Bonds; C-H) ที่ผนังเซลล์ของแบคทีเรีย เมื่อวิเคราะห์แล้วพบว่า การฆ่าเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมาสามารถฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่บริเวณผิวได้ ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน อีกทั้งยังมีความยืดหยุ่นต่อการประยุกต์ใช้ในพื้นผิวชิ้นงานที่มีความซับซ้อนมากขึ้น (Kitazaki et al., 2014) ได้แก่ วัสดุทางทันตกรรม และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น เมื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงประสิทธิภาพของพลาสมาที่ความดันบรรยากาศ แสดงให้เห็นว่า ผลของก๊าซพลาสมา (Plasma Gas) ที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric gas plasmas; AGP) ด้วย เพื่อใช้ในการหยุดการทำงานของเชื้อ *Escherichia coli* (*E. coli*) ในวุ้นเลี้ยงเชื้อ (Nutrient Agar) ซึ่งพลาสมามีผลต่ออัตราการเจริญของเชื้อจริงโดยจะทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของน้ำในแบคทีเรียกับอิเล็กตรอน (Electron) ในพลาสมาทำให้มีผลต่อการเจริญของเชื้อ

แบคทีเรีย (Chau et al., 1996),(Kostov et al.,2010) ดังรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นว่าพลาสมามีประสิทธิภาพโดยตรงต่อการเจริญของเชื้อแบคทีเรีย แม้ว่าพลาสมาจะมีความสามารถในการกำจัดเชื้อแบคทีเรียแต่ก็ในเฉพาะพื้นผิวของชิ้นงานเท่านั้น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อน เช่น ลักษณะของท่อ พลาสมาที่ใช้ก็อาจมีประสิทธิภาพที่ไม่เพียงพอจึงต้องการการควบคุมปริมาณความหนาแน่นของพลาสมา หรือการใช้ระยะเวลาในกระบวนการเพิ่มขึ้น (Miao and Yun, 2011)



รูปที่ 2.10 จำนวนเชื้อ *Escherichia coli* หลังการทำพลาสมาที่ระยะเวลา 0 2 5 10 15 และ 20 นาที (Kostov et al.,2010)

เนื่องจากเทคนิคพลาสมาจะใช้ในการทำให้ปราศจากเชื้อด้วยการที่อนุภาคที่เป็นอิสระ ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยากับเชื้อแบคทีเรียที่ผิวของผลิตภัณฑ์เป้าหมาย โดยอนุภาคจะวิ่งเข้าชนแบบสุ่ม (Randomized) กับเซลล์ (Cell) ของเชื้อแบคทีเรียทำให้ไม่สามารถเจริญและตายลงในที่สุด ดังนั้นจึงต้องมีการปรับค่าเพื่อให้เกิดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการทำปราศจากเชื้อให้มีประสิทธิภาพสูง

2.2.2.2. เทคนิคพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จ (Dielectric Barrier Discharge; DBD)

ในกระบวนการทำพลาสมาแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จจะเป็นพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำและสามารถจุดพลาสมาได้ในสภาพบรรยากาศ โดยเทคนิคพลาสมาชนิดนี้สามารถใช้ในกระบวนการปราศจากเชื้อด้วยการเลือกใช้ก๊าซ และการกำหนดค่าพลังงานที่ใช้สำหรับการดีสชาร์จ เพื่อให้ได้พลาสมาที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการทำปราศจากเชื้อได้ตามต้องการ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้น

ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการเลือกใช้ก๊าซ และระดับของพลังงานรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจากเชื้อ โดยอาศัยเทคนิคพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จเพื่อช่วยในการศึกษา โดยมีตารางแนวโน้มของงานวิจัยที่ศึกษาดังตารางที่ 2.3 และ 2.4

2.2.2.2.1. ก๊าซที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาจากเชื้อด้วยพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

ชนิดของก๊าซที่เลือกใช้ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการทำปฏิกิริยาจากเชื้อ โดยได้แบ่งกลุ่มของก๊าซที่เลือกใช้เป็นการศึกษาก๊าซผสมและก๊าซบริสุทธิ์ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้ระหว่างก๊าซบริสุทธิ์และก๊าซผสม

นักวิจัย (ปีที่พิมพ์)	ก๊าซบริสุทธิ์				ก๊าซผสม		
	Ar	O ₂	N ₂	Cl ₂	O ₂ /Ar	Cl ₂ /Ar	O ₂ / N ₂
(Heuer et al., 2015)		✓	✓				
(Nanbu, Mitsui, & Kondo, 2000)					✓		
(Okazaki, 1988)					✓		
(Bogaerts, 2009)					✓		
(Lee & Lieberman, 1995)					✓		
(Kim et al., 2015)	✓				✓		
(Rød et al., 2012)					✓		
(Colagar et al., 2010)		✓					
(Boscariol et al., 2008)		✓					
(Liu, Chen, Yang, & Zhou, 2008)		✓					
(Moisan et al., 2001)		✓					
(Kostov et al., 2010)		✓					

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้ระหว่างก๊าซบริสุทธิ์และก๊าซผสม(ต่อ)

นักวิจัย (ปีที่พิมพ์)	ก๊าซบริสุทธิ์				ก๊าซผสม		
	Ar	O ₂	N ₂	Cl ₂	O ₂ /Ar	Cl ₂ /Ar	O ₂ / N ₂
(Moisan et al., 2001)		✓					
(Yang, Chen, Gao, & Guo, 2009)	✓						
(Hsu et al., 2006)	✓			✓	✓		

(Chanson et al., 2012)						✓	
(O'Connor et al., 2014)	✓				✓		

จากตารางที่ 2.3 การเลือกชนิดของก๊าซเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำปราศจากเชื้อ โดยแนวโน้มของก๊าซที่เลือกใช้จะเลือกใช้ก๊าซบริสุทธิ์เป็นก๊าซ O_2 เป็นส่วนมากและก๊าซผสมเป็นก๊าซ O_2/Ar ที่มีอัตราผสมออกซิเจนต่ำที่อัตราการไหล 5-10 SCCM (Standard Cubic Centimeters per Minute) ทำให้มีผลต่อการเจริญกับเชื้อแบคทีเรียโดยไปสร้างความเสียหายกับชั้นเพปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ในเซลล์ (Uhm et al., 2007) (Nanbu, Mitsui, & Kondo, 2000) (Okazaki, 1988) (Bogaerts, 2009) (Lee & Lieberman, 1995) และ (Kim et al., 2015) นอกจากนี้ประสิทธิภาพของก๊าซ Ar มีผลต่อเชื้อแบคทีเรียที่ใช้ในการทดลองคือ *E.coli* และเชื้อได้ดีกว่า O_2 (Lu, Patil, Keener, Cullen, & Bourke, 2014) และยังมีการสิ้นเปลืองพลังงานที่ต่ำกว่าเนื่องจากก๊าซ Ar ใช้พลังงานในการสร้างพลาสมาที่ต่ำกว่า O_2 ดังนั้น แม้ว่าปริมาณของก๊าซ O_2 จะมีการนำมาใช้มากกว่า Ar แต่ด้วยข้อจำกัดทางการวิจัยการเลือกใช้ก๊าซที่ให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันในการทำปราศจากเชื้อ (Moreau, Orange, & Feuilloley, 2008) (Akitsu, Ohkawa, Tsuji, Kimura, & Kogoma, 2005) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ดีกว่าสำหรับเงื่อนไขการทำปราศจากเชื้อบนด้ามมีดผ่าตัดสำหรับการวิจัยนี้

ดังนั้น การใช้ก๊าซอาร์กอนและอาร์กอนผสมออกซิเจนสำหรับพลาสมาในงานวิจัยช่วยให้เกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนอิสระ (Reactive Oxygen Species; ROS) กับแบคทีเรียที่ใช้ทดสอบ จะทำการผสมก๊าซออกซิเจนเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำลายพันธะของผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2.2.2.2. พลังงานไฟฟ้าเพื่อการทำปราศจากเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ

ตารางที่ 2.4 ตารางเปรียบเทียบการทำปราศจากเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จที่ระดับพลังงานต่างๆ

นักวิจัย (ปีที่พิมพ์)	เชื้อที่ศึกษา	ระยะเวลาที่ใช้	พลังงานไฟฟ้า
(Kostov et al., 2010)	<i>Staphylococcus aureus</i> <i>Escherichia coli</i>	20 นาที	แรงดันไฟฟ้า 20 kV ความถี่ 60 Hz

(Choi et al., 2006)	<i>Escherichia coli</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1 นาที	แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) 11-18 kV ความถี่ 1 KHz
(Miao and Yun, 2011)	<i>Escherichia coli</i>	5 นาที	ไฟฟ้ากระแสสลับ(AC) 100 Hz
(Yang, Chen, Gao, & Guo, 2009)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	30 วินาที มีเชื้อลดลง จำนวนลง	RF 40 W
(Colagar, Sohbatzadeh, Mirzanejad, & Omran, 2010)	<i>Streptococcus pyogenes</i>	15 นาที	แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ (AC) มากกว่า 5400 V ความถี่ 50 Hz
(Colagar, Sohbatzadeh, Mirzanejad, & Omran, 2010)	<i>Streptococcus pyogenes</i>	15 นาที	แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ (AC) มากกว่า 5400 V ความถี่ 50 Hz
(Rezaei, Shokri, & Sharifian, 2016)	<i>Escherichia coli</i>	30 วินาที มี จำนวนเชื้อ ลดลง 51.5% จากจำนวน เชื้อเริ่มต้น	แรงดันไฟฟ้า กระแสสลับ (AC) มากกว่า 15–31 kV ความถี่ 50 Hz

ตารางที่ 2.4 ตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพจากการทำปฏิกิริยาจากเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ (ต่อ)

นักวิจัย (ปีที่พิมพ์)	เชื้อที่ศึกษา	ระยะเวลาที่ใช้	การดัดแปร
(Eto et al., 2008)	<i>Geobacillus stearothermophilus</i>	4.5 นาที	แรงดันไฟฟ้า 5 kV ความถี่ระหว่าง 0.3 - 4 kHz

(Fridman et al., 2007)	<i>Streptococcus dysgalactiae</i> <i>Staphylococcus aureus</i> และยีสต์	-	แรงดันไฟฟ้า 35 kV ความถี่ 12 kHz
(Laroussi & Leipold, 2004)	<i>Bacillus</i> spores	10 – 20 นาที	แรงดันไฟฟ้า 20 kV ความถี่ 2.2 kHz
(Helmke et al., 2011)	<i>Staphylococcus epidermidis</i>	60 วินาที	แรงดันไฟฟ้า 20 kV ความถี่ 550 Hz
(Joshi et al., 2011)	<i>Escherichia coli</i>	60 วินาที	แรงดันไฟฟ้า 15 kV ความถี่ 500 Hz
(Lu et al., 2014)	<i>Escherichia coli</i> <i>Listeria monocytogenes</i>	30 วินาที	แรงดันไฟฟ้า 70 kV ความถี่ 50 Hz

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำปราศจากเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิคพลาสมาไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดิสชาร์จ พบว่า แรงดันไฟฟ้า และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการมีความผันแปรตามพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ โดยนักวิจัยบางกลุ่มจะใช้พลังงานสูงและระยะเวลาด้านเพื่อทำให้จำนวนของเชื้อลดลงและปราศจากเชื้อโดยใช้ระยะเวลาไม่ถึง 1 นาที (Helmke et al., 2011) (Joshi et al., 2011) และ (Lu et al., 2014) ที่นักวิจัยได้เลือกมาศึกษาซึ่งงานวิจัยที่มีการใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงจะให้ประสิทธิภาพของการทำปราศจากเชื้อที่สูงตาม นอกจากนี้การเลือกวัสดุทดสอบก็มีผลต่อการกำหนดระดับพลังงานไฟฟ้าเพราะหากทำการทดลองกับกลุ่มของวัสดุที่มีความทนทานที่ผิวได้ดี โดยที่ไม่เกิดผลกระทบต่อพื้นผิวแบบที่สังเกตได้ เช่น วัสดุจำพวกโพลีเมอร์ (Rezaei, Shokri, & Sharifian, 2016) ก็จะสามารถเลือกการกำหนดพลังงานที่สูงเพื่อใช้ในกระบวนการได้ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยทำการทดสอบกับด้ามมีดผ่าตัดซึ่งเป็นวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในทางการแพทย์การปนเปื้อนของเชื้อจึงถือเป็นความเสี่ยงที่สามารถส่งผลกระทบต่อผู้ป่วยได้ความคาดหมายของจำนวนเชื้อแบคทีเรียที่ศึกษาตามตามมาตรฐานจึงเป็น 0 CFU เนื่อง ดังนั้น การศึกษางานวิจัยนี้ช่วยในการวิเคราะห์เพื่อศึกษาถึงข้อจำกัดของพลังงานสำหรับการดิสชาร์จพลาสมาสำหรับเครื่องทดสอบที่ใช้ ซึ่งอาศัยคลื่นความถี่วิทยุเป็นพลังงาน การศึกษาจึงเป็นแนวโน้มให้สามารถเลือกพลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อกระบวนการทำปราศจากเชื้อโดยใช้ระยะเวลาที่ต่ำที่สุดได้โดยไม่ส่งผลกระทบข้างเคียงต่อด้ามมีดผ่าตัด

2.2.3. การประยุกต์ใช้เทคนิคพลาสมา

จากเทคนิคพลาสมาซึ่งมีความหลากหลายเหมาะกับการนำมาใช้งานได้กว้างขึ้นนั้น ทำให้เทคนิคพลาสมากับการทำปราศจากเชื้อเป็นที่นิยมด้วย ดังสามารถศึกษาได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

2.2.3.1. การเปรียบเทียบเทคนิคพลาสมา กับเทคนิคอื่น

เมื่อทำการเปรียบเทียบเทคนิคพลาสมาเข้ากับเทคนิคในการทำปราศจากเชื้ออื่นแล้วพบว่าพลาสมาเย็นนี้มีความสามารถในการทำปราศจากเชื้อกับผลิตภัณฑ์เป้าหมายโดยตรง และยังส่งผลต่อกระบวนการในทางอ้อมอีกด้วยซึ่งในกระบวนการทำปราศจากเชื้อมีการพัฒนาต่อเนื่องและมีเทคนิคหลากหลายที่ได้รับการพัฒนาโดยนักวิจัย ซึ่งเทคนิคพลาสมาที่อุณหภูมิต่ำสามารถช่วยลดปริมาณของเชื้อแบคทีเรียซึ่งเป็นสาเหตุของความเสียหายในการเกิดโรคได้ และยังส่งผลต่อต้นทุนในกระบวนการด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับเทคนิคการทำปราศจากเชื้ออื่น คือ วิธีการใช้เอทิลีนออกไซด์ การใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde; CH_2O) เมื่อเทียบค่าใช้จ่ายต่อหน่วยแล้วเทคนิคพลาสมาให้ต้นทุนต่ำที่สุด (Alfa et al., 1996) (Adler et al., 1998) ทำให้มีงานวิจัยศึกษาและทำการวิเคราะห์ เพื่อพัฒนาให้เทคนิคพลาสมาสามารถใช้ในการทำปราศจากเชื้อได้โดยไม่ก่อให้เกิดการสิ้นเปลืองทรัพยากรและยังคงประสิทธิภาพได้ดี เมื่อเทียบกับเทคนิคการทำปราศจากเชื้ออื่นด้วย (Fernández, A. & Thompson, 2012)

นอกจากการทำปราศจากเชื้อแล้วเทคนิคพลาสมาสามารถใช้ในการถนอมอาหาร (Shimizu et al., 2014) การใช้สำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติก รวมไปถึงการทำลายเซลล์มะเร็งก่อโรคได้อีกด้วย ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีอื่นแล้วพลาสมาสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน และยังให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการได้อีกด้วย (Heise et al., 2004) (Heuer et al., 2015)

ดังนั้น เทคนิคพลาสมาสำหรับกระบวนการทำปราศจากเชื้อจึงเป็นเทคนิคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงสำหรับการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียก่อโรคเพื่อช่วยในการลดความเสี่ยงของการเกิดโรค ใช้ระยะเวลาสั้น สามารถทำได้แม้วัสดุมีความหลากหลาย อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพได้ดีหรือดีกว่าเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีในการทำปราศจากเชื้อในปัจจุบัน

2.2.3.2. การประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์

พลาสมาเย็นมีการนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์หลากหลาย ทั้งผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ (Baier et al., 2014) เช่น ผลิตภัณฑ์นมซึ่งโดยส่วนมากจะพบเชื้อแบคทีเรียจำพวก *Escherichia coli* *Listeria monocytogenes* และ *Salmonella Typhimurium* เมื่อใช้พลาสมาที่อุณหภูมิต่ำแบบไดอิเล็กทริกแบริเออร์ดีสชาร์จสามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย ทั้งทางการแพทย์ การปรับปรุงผลิตผล

ทางการเกษตร ไม่ว่าจะใช้กับผลิตภัณฑ์โดยตรงหรือรวมไปถึงการนำไปใช้กับบรรจุภัณฑ์ หรือจะใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอก็ได้เช่นกัน

พลาสมาเย็นซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการทางการแพทย์ ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อใช้ในการทำความสะอาดอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆทางการแพทย์ซึ่งต้องการความปลอดภัยเพื่อลดความเสี่ยงซึ่งก่อให้เกิดโรคจากความไม่สะอาดของอุปกรณ์หรือเรียกว่า Iatrogenic (Whittaker et al., 2004) เนื่องจากการทำปราศจากเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมาเย็นสามารถทำได้รวดเร็ว เพราะไม่ต้องใช้เวลาสำหรับเตรียมอุณหภูมิก่อนการทำปราศจากเชื้อ ทำให้มีความสะดวกรวดเร็วในกระบวนการ ตัวอย่างในการใช้งานทางการแพทย์ (O' Connor et al., 2014) เช่น การนำพลาสมาไปใช้กับอุปกรณ์ทางทันตกรรม โดยใช้ในการทำความสะอาดอุปกรณ์ หรือการใช้พลาสมาเพื่อการทำปราศจากเชื้อกับอุปกรณ์ทางคลินิก เป็นต้น

การใช้เทคนิคพลาสมาเย็นกับผลิตภัณฑ์อาหารสดโดยตรง เช่น การนำพลาสมา (Critzler et al., 2007) ลงบนผิวของแอปเปิ้ล ซึ่งพบเชื้อแบคทีเรียต่างๆ ได้แก่ *Escherichia coli*, *Salmonella* และ *Listeria monocytogenes* โดยให้พลังงานไฟฟ้าในระบบ 9 kV และความถี่ 6 kHz ในการจุดพลาสมา ใช้เวลาในการยิงพลาสมาลงบนผิวของแอปเปิ้ลเป็นเวลา 30 วินาที 1 นาที และ 2 นาที ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเชื้อแบคทีเรียต่างๆลดน้อยลงภายหลังการทดสอบยิงพลาสมาลงบนผิว จากการเปรียบเทียบภายหลังการเพาะเชื้อเป็นเวลา 48 ชั่วโมงนั่นเอง จึงเป็นผลให้มีการพัฒนางานวิจัยเพื่อยืนยันผลการทดลองข้างต้นที่ได้ดั่งงานวิจัยของ (Bermúdez-Aguirre et al., 2013) ซึ่งทำการทดลองใช้เทคนิคพลาสมาเย็นที่ความดันบรรยากาศ ด้วยการเพาะเชื้อ *Escherichia coli* ในผักกาด แครอท และมะเขือเทศ ที่ระดับ 10^6 และ 10^7 CFU/g ซึ่งจะใช้กำลังไฟฟ้าในการจุดพลาสมาด้วยก๊าซอาร์กอน จาก 3.95 kV จนถึง 12.83 kV (60 Hz) ด้วยเวลา 30 วินาที จนถึง 10 นาที โดยการประเมินปริมาณเชื้อแบคทีเรียและการตรวจวัดค่าสี (Hunter's Color Parameters; L^* , a^* , b^*) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscopy) พบอัตราการเจริญของเชื้อแบคทีเรียลดลง ทำให้จำนวนแบคทีเรียลดลงง่ายขึ้น โดยเฉพาะเมื่อกำลังไฟฟ้าและเวลาในการทรีตเมนต์เพิ่มขึ้นจะให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ดีขึ้น ซึ่งในการฆ่าเชื้อของผักกาดและมะเขือเทศจะง่ายกว่าในแครอท ซึ่งทั้งนี้อาจเนื่องจากพื้นผิว และค่าสีซึ่งให้ผลไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีงานวิจัยอื่นๆที่สามารถทำการฆ่าเชื้อที่ผิวที่มีลักษณะขรุขระและซับซ้อนได้เช่นเดียวกัน การใช้พลาสมากับผลิตภัณฑ์มีประสิทธิภาพโดยตรงกับผลิตภัณฑ์สดเพื่อใช้ในการทำปราศจากเชื้อที่ผิวของผลิตภัณฑ์ อาศัยการยับยั้งการเจริญของเชื้อที่บริเวณผิว เพื่อยืดอายุในการเก็บของผลิตภัณฑ์สดเพิ่มขึ้น

นอกจากพลาสมาจะสามารถนำมาใช้กับผลิตภัณฑ์โดยตรงแล้วการประยุกต์ใช้เทคนิคพลาสมากับวัสดุบรรจุภัณฑ์ที่มีหลากหลาย (Pankaj et al., 2014) เช่น การใช้พลาสมาเพื่อการทำปราศจากบนบรรจุภัณฑ์อาหาร คือ ฟรอยด์ PET (Polyethylene terephthalate foils) โดยทำการพ่น

สปอร์ของเชื้อ *B.subtilis* และ *A.niger* (*Aspergillus niger*) ลงบนฟรอยด์ และนำไปทำให้ปราศจากเชื้อด้วยเทคนิคพลาสมาพบว่า มีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อทั้งสองชนิดได้ซึ่งจะต้องเลือกก๊าซในการพลาสมา รวมถึงการตั้งค่าต่างๆให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ จากงานวิจัยดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนางานวิจัยทางด้านพลาสมาอย่างต่อเนื่อง (Heise et al., 2004) หรือการใช้พลาสมากับบรรจุภัณฑ์พลาสติกสำหรับเนื้อสด ด้วยการทำพลาสมาลงบนผิวของบรรจุภัณฑ์เป็นระยะเวลา 10 นาที เป็นต้น เทคนิคพลาสมาจึงสามารถใช้กับวัสดุได้หลากหลายโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับวัสดุด้วย (Jayasena et al., 2015)

ดังนั้น เทคนิคพลาสมาจึงถือว่าเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้สำหรับกระบวนการฆ่าเชื้อทั้งด้านอุตสาหกรรมอาหาร หรือรวมไปถึงกระบวนการทำปราศจากเชื้อในคลินิกทางการแพทย์ ซึ่งทั้งนี้ในการทำพลาสมาแบบ DBD เป็นพลาสมาซึ่งสามารถสร้างได้โดยไม่ต้องอาศัยการสร้างสภาวะที่สูญญากาศซึ่งมีความซับซ้อน และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในด้านอุปกรณ์พิเศษต่างๆ ด้วย แต่ทั้งนี้การจุพลาสมาและสามารถปราศจากเชื้อเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงก็จำเป็นต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดด้วย

2.2.4. การออกแบบการทดลอง

2.2.4.1. การศึกษาผลกระทบและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษากระบวนการทำพลาสมาจะมีการปรับตั้งค่าต่างๆเพื่อให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่เลือกใช้มากที่สุด ในการศึกษาโดยการกำหนดปัจจัยเพื่อทำการศึกษา ให้ปัจจัยที่ควบคุมได้แก่ กำลังไฟฟ้า ระยะเวลาในการ ความดันที่ใช้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kim et al. , 2014) ซึ่งอธิบายไว้ในเบื้องต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Miao and Yun, 2011) และงานวิจัยของ (Baier et al., 2014)

ในการศึกษาเอกสารงานวิจัยที่มีในการทำพลาสมาเพื่อการปราศจากเชื้อเพื่อวิเคราะห์ได้ว่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ระยะเวลาห่างของการวางผลิตภัณฑ์เป้าหมายกับตำแหน่งที่เกิดพลาสมา หรือระยะระหว่างขั้วแอโนดของการเกิดพลาสมา กับผลิตภัณฑ์ (Gauge Range) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำปราศจากเชื้อ ระยะเวลาในกระบวนการ (Treatment Time) ซึ่งใช้เวลาไม่เกิน 1 นาที โดยที่ยังทำให้เกิดการปราศจากเชื้อได้ กำลังไฟฟ้า (Voltage) และชนิดของก๊าซระหว่างก๊าซบริสุทธิ์และก๊าซผสม

2.2.4.2. วิธีการออกแบบการทดลอง

กระบวนการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) ที่มีการศึกษาปัจจัยเป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง (+) และระดับต่ำ (-) ร่วมกับการออกแบบการทดลองแบบ

พื้นผิวและส่วนผสมกลาง โดยการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ซึ่งผลในการทดลองเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง มีสถานะการทำการทดลองที่เหมาะสม และยังเป็น การลดความแปรปรวนในการทดลอง เพื่อให้ได้ผลตอบที่ถูกต้องและมีความแม่นยำในการทดลองด้วย การควบคุมการทดลอง ซึ่งจะใช้หลักในการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ร่วมกับหลักการออกแบบการทดลองวิธีพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เพื่อศึกษาถึงผลตอบที่ดีที่สุด (พุ่มกระจำ , 2552) (ฟองเขียว , 2555) (ม้วน ไม้ , 2553)

การเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน (Fractional Factorial Design) ถือวิธีการวางแผนการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่มีข้อจำกัดในด้านทรัพยากร แต่ทั้งนี้ต้องมีการวิเคราะห์ผลของค่าพารามิเตอร์จากปัจจัยที่มีนัยสำคัญอย่างถี่ถ้วนเพื่อหาสมการผลตอบที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการ



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved