

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีสะอาด

เทคโนโลยีสะอาด หมายถึง การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตหรือผลิตภัณฑ์ เพื่อให้การใช้วัตถุดิบ พลังงาน และทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้เปลี่ยนเป็นของเสียน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย จึงเป็นการลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด ทั้งนี้รวมถึงการเปลี่ยนวัตถุดิบ การใช้ซ้ำ และการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะช่วยอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนในการผลิตไปพร้อมกัน

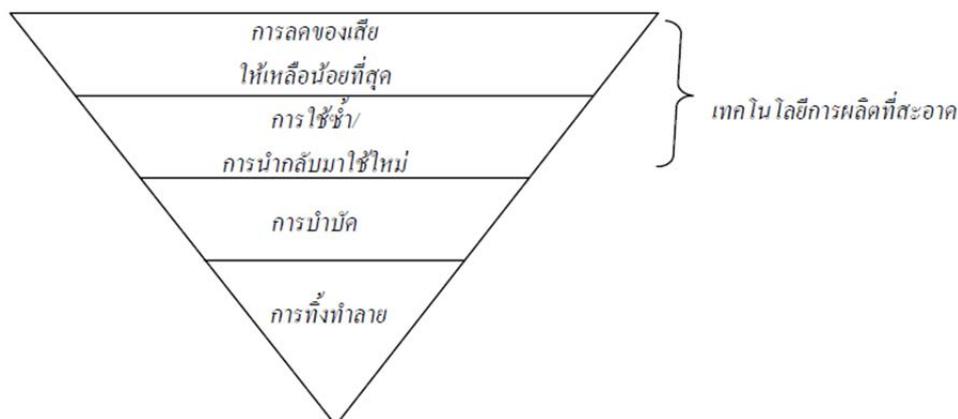
คำว่า “เทคโนโลยีสะอาด” (Clean Technology) เป็นคำที่มีนัยเดียวกับคำว่า

- การป้องกันมลพิษ (Pollution Prevention) คำจำกัดความที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดในสหรัฐอเมริกา
- การผลิตที่สะอาด (Cleaner Production) เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดในกระบวนการผลิต
- การลดของเสีย (Waste Minimization) เป็นส่วนหนึ่งของเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด
- การผลิตเพื่อสิ่งแวดล้อม (Green Productivity) คำจำกัดความที่ใช้สำหรับเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดประเทศญี่ปุ่น

คำจำกัดความนี้ เน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แหล่งกำเนิด โดยการคำนึงถึงมวลเข้าสู่กระบวนการผลิต (Inputs) มากกว่ามวลออกจากกระบวนการผลิต (Outputs) เพื่อหาวิธีที่จะเพิ่มผลิตผล ให้มีของเสีย หรือมีการปล่อยมลพิษน้อยลง การใช้มวลเข้า อันได้แก่ วัตถุดิบ พลังงาน ทรัพยากรธรรมชาติและทรัพยากรมนุษย์ ให้ได้ประโยชน์สูงสุดคือวิถีทางของเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด

หลักการจัดการสิ่งแวดล้อมโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด

หลักการของเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต การใช้ทรัพยากร และลดการเกิดมลพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม คือ การลดมลพิษที่แหล่งกำเนิดเพื่อจัดปัญหาการสูญเสียและการเกิดมลพิษที่ต้นตอและหากยังมีของเสียเกิดขึ้นต้องพยายามนำของเสียเหล่านั้นกลับมาใช้ซ้ำหรือนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้มีของเสียที่ต้องทำการบำบัดหรือฝังทิ้งเหลือน้อยที่สุด



ภาพที่ 2.1 ลำดับการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม

1.วิธีการของเทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด

1) การลดมลพิษที่แหล่งกำเนิด

ต้องมีการค้นหาแหล่งกำเนิดของเสียหรือมลพิษ และวิเคราะห์หาสาเหตุว่าของเสียหรือมลพิษเหล่านั้น เกิดอย่างไรการลดมลพิษสามารถทำได้โดย

1.1) การเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ (Product Reformulation) เป็นการปรับปรุงในรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ เพื่อหลีกเลี่ยงหรือลดการเกิดสารมลพิษ โดยพัฒนาการออกแบบให้มีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมน้อยที่ เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาดสุด เช่น ทำให้อยู่ในรูปสารละลายเข้มข้นเพื่อลดจำนวนบรรจุภัณฑ์หรือเปลี่ยนเป็นรูปสารละลายผง เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ยกเลิกหีบห่อที่ไม่จำเป็น

1.2) การเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิต (Process Change) สามารถดำเนินการได้ดังนี้

- การเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบ (Input Material Change) เป็นการเลือกใช้วัตถุดิบที่สะอาด หมายถึง คุณสมบัติของวัตถุดิบเองหรือสิ่งปนเปื้อนมากับวัตถุดิบ เช่น การยกเลิกหรือลดการใช้วัตถุดิบที่เป็นอันตรายหรือสารที่ก่อมลพิษสูง และถ้าหากเป็นสิ่งปนเปื้อนมากับวัตถุดิบ หากเป็นไปได้ควรมีการกำจัดออกตั้งแต่แหล่งที่มาก่อนที่จะขนเข้าสู่โรงงานเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิต

- การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี (Technology Improvement) โดยการปรับเปลี่ยนวิธีการ กลไกในกระบวนการผลิต หรือปรับปรุงอุปกรณ์ในสายการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือลดการสูญเสียเปลี่ยนการออกแบบใหม่ เพิ่มระบบอัตโนมัติเข้าช่วย ปรับปรุงข้อจำกัดในการปฏิบัติงานและการใช้เทคโนโลยีเป็นต้น

- การปรับปรุงกระบวนการดำเนินงาน (Operational Improvement) โดยการปรับปรุงการบริหารระบบการวางแผนและควบคุมการผลิต เพื่อเพิ่มศักยภาพของกระบวนการผลิตให้สามารถลดต้นทุนการผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมี

ประสิทธิผล เช่น มีกระบวนการทำงานและขั้นตอนการบำรุงรักษาที่ชัดเจน มีการบริหารการปฏิบัติงาน มีการฝึกอบรม มีวิธีปฏิบัติที่ถูกต้อง มีระบบการจัดเก็บในโกดัง ชั้นเก็บของ ใช้ระบบ First in – First out เพื่อลดการสูญเสียจากคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีการวางแผนซ่อมบำรุงเครื่องจักร อุปกรณ์หลักเลี้ยงการรวมของเสียต่างชนิดเข้าด้วยกัน

2) การใช้ซ้ำ (Reuse) หรือการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่าง ๆ อย่างเหมาะสม โดยอาศัยหลักการของเสียที่เกิดขึ้น จากจุดหนึ่งอาจสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในอีกจุดหนึ่งหรือแม้แต่กับจุดเดิม

- การใช้ซ้ำ (Reuse) เป็นการนำของเสียจากกระบวนการผลิตมาใช้ซ้ำ โดยนำกลับมาใช้ใหม่โดยตรงเพื่อใช้ในการผลิตเดิม หรือใช้กระบวนการอื่น เช่น การนำขวดที่ใช้แล้วมาล้างเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ การนำน้ำหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ การนำเศษผ้าจากการตัดเย็บไปใส่ที่นอนแทนนุ่น

- การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) เป็นการนำของเสียไปผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้อีกหรือ เป็นผลพลอยได้ที่มีมูลค่าเพิ่ม (Value Added by Product) เช่น การนำพลาสติกมาหลอมใหม่ ผลิตตะกั่วจากการหลอมแบตเตอรี่เก่า การนำน้ำนิ่งปลาในโรงงานผลิตปลาทุ่นากระป๋องมาทำซอสปรุงรส

ไส้กรอก

ไส้กรอก (sausage) เป็นคำที่มีจากภาษาละตินว่า Salsus หมายถึงการใส่เกลือหรือการเก็บรักษาเนื้อโดยใช้เกลือ เป็นการถนอมอาหารที่เก่าแก่ก่อนคริสตกาล แต่การทำไส้กรอกในปัจจุบันไม่ได้ใช้แต่เกลือเพียงอย่างเดียว แต่ได้นำวิธีการต่างๆของการถนอมอาหารมาประยุกต์เข้าด้วยกันหลายอย่างเช่น การใส่สารเคมีต่าง ๆ การใช้ความร้อน การทำแห้ง การรมควัน และการแช่เย็นหรือการแช่แข็งเข้าร่วมด้วย

ไส้กรอกเป็นอาหารที่เตรียมได้จากการบดเนื้อสัตว์กับเกลือ แล้วผสมเครื่องเทศเครื่องปรุง รสต่างๆแล้วบรรจุในถุงที่มีลักษณะกลมยาว เกิดเป็นไส้กรอกชนิดต่างๆ ตามวัตถุดิบที่ใช้ อย่างไรก็ตามมีผู้แบ่งชนิดของไส้กรอกไว้หลายระบบด้วยกันเช่น ธเนศ (2550) อ้างถึง Price and Schweigert (1977) แบ่งไส้กรอกออกเป็น 5 ชนิด

1) ไส้กรอกสด (Fresh Sausage) เป็นไส้กรอกประเภทเนื้อสด ส่วนใหญ่เป็นไส้กรอกหมูทำโดยการบดเนื้อผสมเครื่องปรุงบรรจุใส่ ซึ่งอาจเป็นไส้หมูหรือไส้แกะ เมื่อรับประทานจึงนำมาทำให้สุก ไส้กรอกประเภทนี้มักจะเสี้ง่ายถ้าเก็บรักษาไว้ไม่ดี ดังนั้นจึงต้องรับประทานตัวอย่างเช่น ไส้กรอกหมูสด

2) ไส้กรอกแห้งและกึ่งแห้ง (Dry and Semi-Dry Sausage) เป็นไส้กรอกที่ได้จากการหมักเนื้อ (Cured) บดบรรจุใส่แล้วทำให้แห้ง โดยการผึ่งแดดหรืออบในตู้อบ ซึ่งอาจรมควันก่อนทำแห้งหรือไม่รมควันเลยก็ได้ ตัวอย่างเช่น กุนเชียง (Chinese Sausage) และเมื่อจะนำมารับประทาน จะต้องทำให้สุกก่อน

3) ไส้กรอกต้ม (Cooked Sausage) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเนื้อที่ผ่านการหมัก หรือไม่หมักก็ได้ โดยการบดเนื้อผสมเครื่องปรุงรสบรรจุใส่แล้วต้มให้สุก ซึ่งอาจจะรมควันหรือไม่ก็ได้ ปกติ จะรับประทานได้เลยและรับประทานขณะเย็น ตัวอย่างเช่นไส้กรอกตับ (Liver Sausage)

4) ไส้กรอกต้มและรมควัน (Cooked Smoked Sausage) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักบด เนื้อผสมเครื่องปรุงรสบรรจุใส่แล้วต้มให้สุกนำไปรมควันเป็นเวลาหลายชั่วโมงแต่เมื่อต้มจะใช้เวลาสั้น อาจรับประทานขณะเย็นหรือบางที่ต้องนำมาทำให้ร้อนก่อนจะรับประทานตัวอย่างเช่น Vienna Frankfurters

5) ไส้กรอกรมควันแต่ไม่ต้ม (Uncooked Smoked Sausage) เป็นไส้กรอกที่อาจมีการหมักหรือไม่ก็ได้ วิธีการเช่นเดียวกับไส้กรอกต้ม แต่เมื่อรมควันแล้วจะไม่มีการต้ม เมื่อรับประทานจึงจะต้ม ได้แก่ Smoked Country-Style Pork Sausage

กระบวนการผลิตไส้กรอก

สำหรับกระบวนการผลิตไส้กรอกนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นกับชนิดของผลิตภัณฑ์ โดย Pearson (2005) และ ยาวลักษณ์ (2536) ได้อธิบายถึงขั้นตอนในกระบวนการผลิตไส้กรอกดังต่อไปนี้

1) การบด (Grinding) เนื้อที่หั่นเป็นชิ้นและไขมันจะถูกนำมาบดเพื่อช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวของเนื้อ เพื่อให้ง่ายต่อการสกัดโปรตีน การบดจะทำให้ได้เนื้อที่มีขนาดเล็ก โดยการผ่านรูตะแกรงประมาณ 1/8 นิ้ว ซึ่งขนาดรูของหน้าแวนเครื่องบดจะเป็นตัวบอกเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของหน้าแวนและความยาวของเนื้อที่บดก็จะขึ้นกับจำนวนของใบมีด

2) การผสม (Mixer) ไขมัน และเนื้อที่ผ่านการบดแล้วจะถูกนำมาผสมเพื่อช่วยในการกระจายตัวของเนื้อบดใน ขั้นตอนอาจมีการเติมเครื่องปรุงก็จะเป็นการทำให้เครื่องปรุงคลุกเคล้าเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน การผสมอาจใช้เครื่องปรุงผสมเข้าด้วยกันทั้งหมด หรือผสมเพียง 2-3 ชนิดเข้าด้วยกันก่อนนำไปทำอิมัลชัน เครื่องผสมใช้มากในการทำไส้กรอกชนิดเนื้อหยาบ นอกจากนี้ในขั้นตอนนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการ สกัดโปรตีน และการห่อหุ้มไขมันด้วยโปรตีนที่ละลายในเกลืออีกด้วย

3) การสับขนาด (Chopping) มีความจำเป็นในการทำอิมัลชันของไส้กรอกรมควันและไส้กรอกสุก ส่วนผสมของเนื้อต้องผ่านการสับละเอียดจนอยู่ในสภาพที่เป็นมวลเหนียว (emulsion) อิมัลชันในไส้กรอกเป็นอิมัลชันประเภทไขมันในน้ำ โดยมีเม็ดไขมันเป็นตัวกระจายส่วนน้ำเป็นตัวที่ถูกแทรก ปกติน้ำกับ ไขมันไม่รวมตัวกัน จึงต้องมีตัวช่วยในการรวมตัว (emulsifier) ซึ่งได้แก่ โปรตีนไมโอซินที่ละลายได้ ในเกลือ ทำหน้าที่ห่อหุ้มไขมันไว้ทำให้เกิดการผสมที่คงตัว สำหรับโปรตีนที่ทำหน้าที่นี้ได้จากการที่ เนื้อแดงถูกตัดด้วยใบมีดในเครื่องสับขนาดทำให้มีขนาดเล็กลง เมื่อเติมเกลือลงไปเกลือจะสามารถสกัดโปรตีนได้ และเมื่อผสมไขมันหรืออิมัลชันที่เตรียมไว้ลงไปเครื่องสับขนาด โปรตีนที่ละลายออกมาเข้าหุ้มเม็ดไขมันเอาไว้ การสับขนาดเมื่อนานขึ้นจะเกิดความร้อน เนื่องจากการเสียดสีของเนื้อ และเครื่องมือจะมีผลทำให้เม็ดไขมันแยกตัวไป จึงต้องเติมน้ำแข็งลงไปอย่างช้า ๆ และควบคุมอุณหภูมิให้เย็นตลอดเวลา

4) การทำอิมัลชัน (Emulsifying) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในโรงงานขนาดใหญ่ เพื่อทำให้เกิดอิมัลชัน โดยเครื่องจะบดผสม และ สับเข้าด้วยกันด้วยความเร็วสูง การเกิดอิมัลชันจะใช้เวลานาน มีความสม่ำเสมอ ใส่กรอกจะมี ลักษณะเนื้อตามต้องการโดยการปรับขนาดของรูตะแกรง และการเติมไขมันไม่ควรให้อุณหภูมิสูงเกิน 11 องศาเซลเซียส

5) การอัด (Stuffing) หลังจากที่ได้เนื้อที่ผ่านการบด ผสม หรือทำอิมัลชันแล้ว จึงนำมาบรรจุ และผูกไส้ (Casing) ซึ่งไส้มี 2 ชนิด คือ ไส้เทียม และไส้ธรรมชาติ โดยจะบรรจุเข้าเครื่องบรรจุไส้กรอก เพื่อให้เนื้อรวมตัวเข้าสู่แบบ (mold) หรือไส้ ซึ่งเครื่องที่ตีควมมีที่กำจัดอากาศขณะบรรจุ เพื่อให้ไส้กรอกมีเนื้อแน่นเครื่องผูกไส้มีหลายแบบทั้งชนิดใช้เชือกสำหรับไส้กรอกที่มีขนาดเล็ก และแบบคลิปลโลหะสำหรับปิดหรือมัดปลายไส้กรอกขนาดใหญ่

6) การรมควัน และการทำให้สุก (Smoking and Cooking) จะทำในตูรมควัน โดยในช่วงแรก อุณหภูมิ 80 - 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือทำให้อุณหภูมิภายในไส้กรอกประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส เวลา 30-50 นาทีและรมควันที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 นาที ภายหลังกการรมควันได้ที่แล้วต้องนำไปต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20-25 นาที เพื่อทำลายจุลินทรีย์บางส่วนที่เหลืออยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ไส้กรอกเน่าเสีย และทำให้ผิวนอกของไส้กรอกตึง เรียบ นำมารับประทานเพิ่มขึ้น

7) การทำให้เย็น (Cooling) เป็นการลดความร้อนที่สะสมภายในชิ้นไส้กรอก และทำให้เนื้อภายในหดตัวอย่างรวดเร็วช่วยให้การการลอกเปลือกง่ายน้ำที่ใช้แช่เย็นต้องเป็นน้ำสะอาด ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ และโลหะหนักเจือปน

8) การลอกไส้ และบรรจุ (Peeling and packing) ห้องที่บรรจุไส้กรอกควรเป็นห้องปรับอากาศ เพื่อควบคุมคุณภาพ และสุขอนามัย เมื่อไส้กรอกคายความร้อนจากการแช่เย็น แล้วนำ ขึ้นผึ่งสะเด็ดน้ำถ้าใช้ไส้ที่รับประทานไม่ได้จะนำเข้า เครื่องลอกไส้ (peeling machine) จากนั้นจึงทำการ ชั่งน้ำหนัก บรรจุถุงพลาสติกปิดผนึกแบบสุญญากาศ และเก็บรักษาในห้องเย็นเพื่อรอการจำหน่าย

อายุการเก็บรักษา และการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ไส้กรอก

อายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหาร หมายถึง ช่วงเวลาตั้งแต่ผลิตภัณฑ์นั้นได้ผลิตขึ้นมา โดยระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว ผลิตภัณฑ์ยังมีคุณภาพทางด้านคุณค่าทางอาหาร ด้านประสาทสัมผัส และความปลอดภัยด้านจุลินทรีย์ รวมถึงลักษณะปรากฏเป็นที่พอใจของผู้บริโภค จนถึงเวลาที่ผลิตภัณฑ์ ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค หรือไม่ปลอดภัยต่อการบริโภคภายใต้สภาวะการเก็บรักษาตามที่กำหนดไว้ นอกจากนี้อายุการเก็บมีบทบาทสำคัญทั้งสำหรับผู้ผลิต ผู้ค้าปลีก และผู้บริโภค มีประโยชน์ เพื่อให้ทราบถึงผลิตภัณฑ์ยังคงคุณภาพที่ดีตลอดช่วงเวลากการเก็บ ซึ่งการกำหนดอายุการเก็บส่วน ใหญ่จะขึ้นผู้ประกอบการดังนั้น การศึกษาอายุการเก็บจึงเป็นส่วนสำคัญของการพัฒนาผลิตภัณฑ์ อาหาร โดยทั่วไปผู้ผลิตจะพยายามกำหนดอายุการเก็บให้สอดคล้องกับค่าใช้จ่าย รูปแบบของการ จัดการ และการใช้ของผู้จัดจำหน่ายผู้ค้าปลีก และผู้บริโภคแต่อย่างไรก็ตามการระบุอายุการเก็บที่ ไม่เหมาะสม เช่น นานเกินไปก็อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ และผู้บริโภคอาจเกิด การไม่ยอมรับได้ (รุ่งนภา, 2550)

1) การเสื่อมเสียของไส้กรอกการเสื่อมเสียของอาหารที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์อาจเรียกว่า การเน่าเสีย (Spoilage) จุลินทรีย์ที่ทำให้เนื้อสัตว์เสื่อมเสีย (meat deterioration microorganism) การเสื่อมเสียของเนื้อเป็น ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นแบบต่อเนื่องเริ่มตั้งแต่การฆ่าและตัดแต่งซาก การเติมสารหมัก เครื่องเทศ สารป้องกันการเหม็นหืนแล้วตามด้วยการแปรรูปโดยใช้ความร้อน และการรมควัน การเสื่อมเสียจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ดังนั้นเนื้อที่นำมาใช้แปรรูปเพื่อทำผลิตภัณฑ์จึงไม่ควรมีสิ่งแสดงให้เห็นถึง ความเสื่อมเสียของรสชาติ และลักษณะปรากฏต่างๆเกิดขึ้น และเมื่อเนื้อผ่านการแปรรูปต้องพยายามลดขอบเขตปริมาณการเสื่อมเสียให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด ลักษณะการเสื่อมเสียของเนื้อสัตว์ และผลิตภัณฑ์แบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ ลักษณะการเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรสชาติ ซึ่งเกิดจากการเหม็นหืน การเหม็นเน่าการเกิดแก๊ส และรสเปรี้ยว และลักษณะการเสียเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏ เช่น การเกิดผิวหน้าเป็นเมือก การเกิดสีต่าง ๆ บนผิวหน้าของชิ้นเนื้อซึ่งเป็นลักษณะที่ไม่ต้องการในผลิตภัณฑ์อย่างไรก็ตามวิธีปฏิบัติและป้องกัน หรือยับยั้งการปนเปื้อนจุลินทรีย์ในเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์มีหลายวิธี เช่น การฉีดสารละลายน้ำเกลือในผลิตภัณฑ์แฮม เบคอน การไม่เก็บเนื้อสดที่จะนำไปหมักบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง ในการผลิตไส้กรอกสุกควรให้ความร้อนที่กึ่งกลางชิ้นเนื้อมีอุณหภูมิถึง 71.1 องศาเซลเซียส เป็นต้น (เยาวลักษณ์, 2536)

2) จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมเสียของไส้กรอกคือ แบคทีเรียแลคติก (Lactic acid bacteria) แบคทีเรียพวกนี้อยู่ตามผิวหน้าของเนื้อ ต้องการอากาศในการเจริญเติบโต (Facultative anaerobic bacteria) สามารถใช้น้ำตาลได้โดยการออกซิโดซ์ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ แต่ถ้ามีปริมาณออกซิเจนจำกัดหรือถ้ามีการออกซิโดซ์น้ำตาลไม่สมบูรณ์ ก็จะทำให้เกิดกรดอินทรีย์ขึ้นแบคทีเรียกลุ่มนี้ Streptococci, Lactobacilli, Leuconostocviridescens เป็นต้น

3) แบคทีเรียที่สร้างสารพิษขึ้นในอาหาร (foodborne intoxication) เช่น Staphylococcus aureus เป็นแบคทีเรียที่พบได้ตามผิวหนังของร่างกายมนุษย์ มีโอกาสก่อให้เกิดความเจ็บป่วยได้สามารถทำลายด้วยความร้อนปกติที่ใช้ให้ความร้อนเนื้อสัตว์ แต่ถ้าปริมาณเชื้อสูงกว่า 10^5 cfu/g จะสามารถสร้างสารพิษพวก enterotoxin ซึ่งสร้างขึ้นภายในเซลล์ และเมื่อผู้บริโภครับประทานอาหารที่มีเซลล์ของแบคทีเรียมากพอจะพบว่าภายใน 2-6 ชั่วโมงภายหลังได้รับสารพิษ ผู้ป่วยจะเกิดอาการบวมพองของผนังลำไส้และกระเพาะ สารพิษนี้สามารถทนความร้อนที่น้ำเดือดได้ นาน 60 นาที แต่ถ้าใช้อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ก็สามารถทำลายได้

4) แบคทีเรียที่ติดเชื้อจากอาหาร (foodborne infection) เช่น Salmonella เป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่พบได้ตามธรรมชาติ เชื้อนี้จะมีอัตราการเติบโตลดลงเมื่อ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญมากที่สุดจะอยู่ที่ 49.5 องศาเซลเซียส แบคทีเรียพวกนี้จะสามารถเจริญได้ในร่างกายผู้บริโภคและผลิตสารพิษ endotoxin ขึ้นภายในเซลล์ทำให้ผู้ติดเชื้อมีอาการวิงเวียน อาเจียน และท้องเสีย ระยะเวลาของการพักตัวหรือช่วงเวลาหลังรับเชื้อเข้าไปอาการออกมาจะกินเวลานานกว่า 6 ชั่วโมง

เนยแข็ง

เนยแข็งมอสซาเรลลาเป็นเนยแข็งที่มีต้นกำเนิดในประเทศอิตาลีมีเนื้อสัมผัสนุ่ม กลิ่นรสอ่อน สีขาวธรรมชาติจนถึงสีครีมสว่าง จัดอยู่ในกลุ่ม pasta-filata ซึ่งหมายถึง ความร้อนและการยืด เนยแข็งที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ Boccacini, Caciocavallo, Kashkaval, Ragusano และ String cheese เป็นต้น โดยมีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 45 – 60 โดยน้ำหนัก ปริมาณไขมันอยู่ในช่วงที่ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ส่วน pH อยู่ในช่วงระหว่าง 5.0 – 5.4 และปริมาณเกลืออยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 1.2 – 1.8 โดยน้ำหนัก สามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลานานกว่า 90 วัน ที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 1.7 – 5.6 องศาเซลเซียส และเก็บรักษาได้เป็นเวลานานกว่า 12 เดือน ที่อุณหภูมิ – 18 องศาเซลเซียส ในส่วนของคุณสมบัติหลังการอบที่ 232 องศาเซลเซียส หรือ 450 องศาฟาเรนไฮต์ เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดการละลายและยืดได้อย่างน้อยที่สุด 3 นิ้ว (Kindstedt, Caric and Milanovic, 2004; United States Department of Agriculture (USDA), 1980; 2001)

กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตเนยแข็งมอสซาเรลลานั้น เริ่มต้นจากการปรับมาตรฐานของน้ำนมดิบ ให้มีปริมาณไขมันอยู่ในช่วงร้อยละ 3.0 โดยน้ำหนัก แล้วทำการให้ความร้อนเพื่อลดจำนวนจุลินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้เนยแข็งใช้เวลาในการบ่มนานขึ้น ต้องใช้ปริมาณเกลือเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกลือตามธรรมชาติของน้ำนมดิบถูกทำลาย และมีผลทำให้การทำงานของเอนไซม์เรนเนทลดลง เนื่องจากเกลือแคลเซียมที่กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์จะตกตะกอนทำให้ได้เคิร์ดที่ไม่ดีและยากแก่การไล่ความชื้น เป็นต้น (Robinson and Wilbey, 1998) หลังจากนั้นเติมเกลือลงไป แล้วจึงเติมแคลเซียมคลอไรด์ ประมาณ 5 – 20 กรัม ต่อ น้ำนม 100 กิโลกรัม เป็นการกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการตกตะกอน แต่ถ้าใส่มากเกินไปจะทำให้แข็งเกินไป ทำการตัดได้ยากขึ้น แล้วเติมสารเคมีที่ให้สี โดยปกติสีของเนยแข็งจะมาจากไขมันในน้ำนม ซึ่งมีสีเหลืองอ่อนหรือเหลืองเข้มขึ้นอยู่กับฤดูกาล จึงมีการเติมสีเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีสม่ำเสมอ หลังจากนั้นจึงเติมเอนไซม์ ไคโมซิน (chymosin, EC 3.4.23.4) เพื่อตกตะกอนน้ำนม เมื่อได้ตะกอนมีลักษณะที่แน่น จะทำการตัดเคิร์ด จากนั้นทำการกวนเคิร์ด เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของก้อนเคิร์ด แล้วจึงทำการเพิ่มอุณหภูมิของเคิร์ดอยู่ในช่วงระหว่าง 40 – 45 องศาเซลเซียส เพื่อลดความชื้นในเคิร์ด เมื่อให้ความร้อนแก่เคิร์ด ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 20 – 30 นาที แล้วทำการแยกหางนมออก แล้วให้ความร้อนต่อเพื่อให้เคิร์ดปล่อยหางนมออกมาอีก เมื่อก้อนเคิร์ดมี pH อยู่ในช่วง 4.9 – 5.4 จึงนำไปใส่ในน้ำร้อนโดยดึงหรือรวดก้อนเคิร์ด ทำการรวดจนกว่าจะได้เนื้อที่เนียน เหนียวและไม่เป็นก้อน จึงนำไปขึ้นรูป ส่วนใหญ่พิมพ์จะเป็นทรงกระบอกสี่เหลี่ยมผืนผ้า แล้วจึงเก็บรักษาที่อุณหภูมิในช่วง 1.7 – 5.6 องศาเซลเซียส หรือ เก็บรักษาที่อุณหภูมิ – 18 องศาเซลเซียส (นรินทร์ ทองศิริ, 2531; อรพิน ชัยประสพ, 2544; Kosikowski and Mistry, 1997) 27

วิธีการปรับกรดโดยตรง (direct acidification)

วิธีการปรับกรดโดยตรง คือ การใช้กรดเติมลงไปใต้น้ำนมโดยตรง ซึ่ง Codex (The Codex Alimentarius Commission, 2004) แนะนำกรดที่สามารถนำมาใช้ในการปรับกรดได้โดยตรง ซึ่งได้แก่ กรดอะซิติก กรดซิตริก กรดแล็กติก (L-,D- และ DL-) กรดมาลิก (DL-) กรดฟอสฟอริก และ กรดไฮโดรคลอริก ในการทำให้เคซีนตกตะกอน โดยกรดแต่ละชนิดจะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน ซึ่งจากการศึกษาของ Keller, Olson and Richardson (1974) ที่ทำการผลิตเนยแข็งมอสซาเรลลาด้วยวิธีการปรับกรดโดยตรง โดยใช้ กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก กรดอะซิติก กรดมาลิก และ กรดซิตริก พบว่า ส่งผลกระทบต่อการสูญเสียปริมาณแคลเซียมในเนยแข็งที่ใช้กรดทุกชนิดในการทดลอง โดยที่กรดซิตริกมีผลให้เกิดการสูญเสียปริมาณแคลเซียมมากที่สุด และในเนยแข็งที่ทำการปรับกรดจนมีค่า pH ที่ต่ำทำให้เกิดการสูญเสียปริมาณแคลเซียมมากกว่าในเนยแข็งที่ทำการปรับกรดจนมีค่า pH ที่สูง โดยที่มีการสูญเสียปริมาณแคลเซียมมากกว่าร้อยละ 50 ของปริมาณแคลเซียมทั้งหมด

ในปี ค.ศ. 2000 Metzger, Barbano, Rudan and kindstedt และปี ค.ศ. 2001 Metzger et al. และ Metzger, Barbano, kindstedt and Guo ทำการทดลองโดยการใช้กรดกรดอะซิติก หรือ กรดซิตริก ในการผลิตเนยแข็งมอสซาเรลลาไขมันต่ำ (มีปริมาณไขมันไม่เกินร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก) โดยปรับจนมีค่า pH เท่ากับ 6.0 และ 5.8 โดยการใช้กรดแต่ละชนิด พบว่าองค์ประกอบทางเคมีจะมีความคล้ายคลึงกันโดยเทียบกับเนยแข็งที่ไม่ได้ปรับกรดโดยตรง ยกเว้นปริมาณแคลเซียม ซึ่งในเนยแข็งที่ใช้กรดอะซิติกในการปรับจนได้ค่า pH เท่ากับ 5.8 ส่งผลให้มีปริมาณแคลเซียมน้อยกว่าเนยแข็งที่ใช้กรดอะซิติกในการปรับจนได้ค่า pH เท่ากับ 6.0 ในส่วนของเนยแข็งที่ใช้กรดซิตริกในการผลิตนั้นมีปริมาณโปรตีนน้อยกว่าเนยแข็งที่ใช้กรดอะซิติกในการผลิต ในส่วนของปริมาณผลผลิตพบว่า เนยแข็งที่ผลิตจากกรดทั้ง 2 ชนิด มีปริมาณลดลงเมื่อเทียบเนยแข็งที่ไม่ได้ใช้วิธีการปรับกรดโดยตรง อีกทั้ง เนยแข็งที่ปรับจนมีค่า pH เท่ากับ 5.8 จะมีปริมาณผลผลิตน้อยกว่า pH เท่ากับ 6.0 และในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของเนยแข็งทั้งก่อนและหลังการอบ พบว่า ในเนยแข็งที่ใช้กรดซิตริกในการปรับจนได้ค่า pH เท่ากับ 5.8 จะมีคุณภาพด้อยมากที่สุด

จะเห็นว่ากรดที่มีความเหมาะสมใช้ในการผลิตคือ กรดแล็กติก เนื่องจากเป็นกรดชนิดเดียวกันกับกรดที่ได้จากกลูต้าเชื้อ โดยจากการศึกษาของ Guinee, Feeney, Auty, and Fox (2002) ที่ผลิตเนยแข็งโดยใช้กรดแล็กติก และกลูโคโน-เดลตา-แล็กโทน (glucono-delta-lactone,GDL) ในการผลิต พบว่า ปริมาณแคลเซียมไม่มีความแตกต่างกันกับเนยแข็งที่ใช้กลูต้าเชื้อในการผลิต

สนามแม่เหล็ก

เป็นแร่หรือโลหะที่มีสมบัติดูดเหล็กได้ หินแมกเนเซียนเป็นวัตถุที่ดูดเหล็กได้ แม่เหล็กสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ นั่นคือมันสามารถส่งแรงดูดหรือแรงผลักออกไปรอบ ๆ ตัวมันได้ มีคุณสมบัติในการดูดและการผลักกันระหว่างแท่งแม่เหล็ก สนามแม่เหล็กสามารถแบ่งได้เป็นสนามแม่เหล็กที่มีขนาดคงที่ตลอดเวลา(Static Magnetic Field) จากแม่เหล็กถาวรหรือสนามแม่เหล็กโลก และสนามแม่เหล็กที่ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา(Electromagnetic Field) โดยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในขดลวดที่พันรอบเหล็ก แรงเหนี่ยวนำในขดลวดทำให้เหล็กนั้นกลายเป็นแม่เหล็กชั่วคราว และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆ เหล็กนั้น

แม่เหล็กถาวรมีหลายประเภทด้วยกัน สามารถแบ่งตามชนิดของวัสดุได้ 3 กลุ่ม ดังนี้ <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/1407-> (11 เมษายน 2558)

1) แม่เหล็กจากธาตุโลหะ(Metallic Element) ได้แก่ แม่เหล็กที่ทำเหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ รวมถึงแม่เหล็กที่มาจากธาตุโลหะในกลุ่มแรร์เอิร์ทบางชนิดที่อยู่ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ เช่น แกโดลิเนียม (gadolinium) ดิสโพรเซียม (dysprosium) เป็นต้น

2) แม่เหล็กจากวัสดุคอมโพสิต (Composite) แบ่งได้ 5 ประเภท คือ

2.1) แม่เหล็กเซรามิก (Ceramic) หรือแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (ferrite) เป็นแม่เหล็กคอมโพสิตที่ผลิตจากวัสดุผสมของเหล็กออกไซด์ (iron oxide) กับแบเรียมคาร์บอเนต (barium carbonate) หรือสตรอนเชียมคาร์บอเนต (strontium carbonate) แม่เหล็กเซรามิก ถูกพัฒนาออกมาในช่วงทศวรรษที่ 1960 ใช้กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน ผลิตภณณ์มีราคาถูก จึงเป็นส่วนประกอบในสินค้าหลายชนิด เช่น แผ่นแม่เหล็กติดตู้เย็น เป็นต้น แต่เปราะ (brittle) หักง่าย และมีความเข้มของสนามแม่เหล็กต่ำ

2.2) แม่เหล็กอัลนิโค (Alnico) ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี ค.ศ. 1931 เป็นแม่เหล็กที่มีอะลูมิเนียม นิกเกิล โคบอลต์ เป็นธาตุหลัก และมีธาตุอื่นๆ ผสมอยู่เล็กน้อยเพื่อปรับปรุงสมบัติของแม่เหล็ก ผลิตด้วยวิธีการหล่อ (casting) หรือการเผาผนึก (sintering) พบเป็นส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟฟ้า ลำโพงเสียง มีคุณสมบัติไม่เสถียรแม่เหล็กง่ายแม้ใช้ในสภาวะอุณหภูมิสูง และมีความแข็งแรงเชิงกลสูงกว่าแม่เหล็กเซรามิกแต่มีราคาแพง

2.3) แม่เหล็กทิโคนอล (Ticonal) พัฒนาขึ้นมาโดยบริษัท ฟิลิปส์ สำหรับใช้กับลำโพงเครื่องเสียง แม่เหล็กชนิดนี้มีไทเทเนียม โคบอลต์ นิกเกิล และอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบหลัก และมีเหล็กกับธาตุอื่นๆ ผสมอยู่เล็กน้อย

2.4) แม่เหล็กแบบฉีดเข้าแบบ (Injection molded) องค์ประกอบแม่เหล็กชนิดนี้มี 2 อย่างคือ 1.ผงเรซิน (โพลีเมอร์) ซึ่งเป็นตัวประสาน กับ 2.ผงแม่เหล็กจากวัสดุต่างๆ ดังนั้นความแรงของแม่เหล็กจึงขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ การผลิตแม่เหล็กจะขึ้นรูปด้วยการฉีดเข้าแบบ ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างซับซ้อนได้ โดยทั่วไปแม่เหล็กชนิดนี้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กในระดับต่ำถึงปานกลางและรับแรงกดหรือน้ำหนักได้น้อย

2.5) แม่เหล็กแบบดัดงอได้ (Flexible) แม่เหล็กชนิดนี้มีลักษณะเป็นแผ่น การผลิตใช้วิธีฉีดเข้าแบบ และใช้โพลิเมอร์ที่มีสมบัติดัดงอได้ เช่น ไวนิล (vinyl) เป็นตัวประสาน แม่เหล็กชนิดนี้มีราคาถูก แต่ความเข้มสนามแม่เหล็กต่ำ

3) แม่เหล็กจากธาตุแรร์เอิร์ท (Rare Earth) เป็นแม่เหล็กที่ผลิตจากโลหะผสมของธาตุแรร์เอิร์ท โดยมีการพัฒนาออกมาตั้งแต่ช่วงทศวรรษที่ 1970 - 1980 แม่เหล็กในกลุ่มนี้มีสมบัติหลายอย่างเหนือกว่าแม่เหล็กอัลนิโค และแม่เหล็กเซรามิก จึงเหมาะสำหรับอุปกรณ์ที่ต้องการสนามแม่เหล็กความเข้มสูง เช่น ฮาร์ดดิสต์คอมพิวเตอร์ รถไฟแม่เหล็กความเร็วสูง (mag-lev train) แม่เหล็กยกของ (magnet lifter) แต่มีราคาแพง ค่อนข้างเปราะหักง่าย และไม่ทนต่อการกัดกร่อน (จึงต้องชุบหรือเคลือบผิวเพิ่มเติมเพื่อให้ทนทานต่อแรงกระแทกระหว่างการขนส่ง) ปัจจุบันมีการผลิตแม่เหล็กกลุ่มธาตุแรร์เอิร์ทออกมา 2 ชนิดคือ แม่เหล็กซามาเรียมโคบอลต์ (Samarium-cobalt) และแม่เหล็กนีโอดีเมียม (Neodymium)

แม่เหล็กนีโอดีเมียม(NdFeB Magnet) เป็นแม่เหล็กถาวรในกลุ่ม Rare Earth Magnet ซึ่งมีความแรงของแม่เหล็กสูงสุด ส่วนประกอบหลักทำจาก นีโอดีเมียม(Neodymium) เหล็ก และโบรอน สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

- 1) Sintered NdFeB Magnet
- 2) Bonded NdFeB Magnet

สนามไฟฟ้า (electric field) คือปริมาณซึ่งใช้บรรยายการที่ประจุไฟฟ้าทำให้เกิดแรงกระทำกับอนุภาคมีประจุภายในบริเวณโดยรอบหน่วยของสนามไฟฟ้าคือ นิวตันต่อคูลอมบ์หรือโวลต์ต่อเมตร

ศักย์ไฟฟ้า (อังกฤษ: Electric Potential) ในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลาสสิก ศักย์ทางไฟฟ้า (ปริมาณสเกลาร์แสดงโดย Φ , Φ_E หรือ V และ ยังถูกเรียกว่า ศักย์สนามไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าสถิต) ที่จุดหนึ่งของที่ว่างคือปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่มีศักย์ภาพที่ที่ซึ่งมีประจุไฟฟ้ามารวมกันที่จุดนั้น

ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะหมายถึงความแตกต่างของจุดใด ๆ หรือวัตถุใด ๆ ที่มีศักย์ไฟฟ้าแตกต่างกันทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลตามกฎของโอห์ม

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า(Electromagnetic Field : EMF)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดทองแดงจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบๆเส้นลวดนั้น โดยลักษณะของเส้นแรงแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของเส้นลวดและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นด้วยหลักการนี้เรียกว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า วิธีการนี้ใช้ในการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีกำลังสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบและเส้นลวดทองแดง เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการพันลวดทองแดงจะเสริมอำนาจกันทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- 1) จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ หากพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำมากปริมาณสนามแม่เหล็กก็เกิดมาก
- 2) ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเส้นลวดตัวนำ หากกระแสไฟฟ้าผ่านมากสนามแม่เหล็กก็เกิดขึ้นมาก
- 3) ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน เช่น แกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแกนที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก(Ferromagnetic) หรือสารที่สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้ เช่น เหล็ก เพอร์ไรท์
- 4) ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า แกนที่มีขนาดใหญ่จะให้สนามแม่เหล็กมากกว่าแกนที่มีขนาดเล็ก

กฎแรงของลอเรนซ์

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก จะมีแรงทางแม่เหล็กกระทำต่ออนุภาคนั้นแรงกระทำนี้เรียกว่าแรงลอเรนซ์(Lorentz Force)

$$F = qv T$$

F	คือ	แรงที่กระทำบนประจุและทำให้ประจุเบี่ยงเบนได้ หน่วย นิวตัน
q	คือ	ประจุไฟฟ้าที่วิ่งผ่านสนามแม่เหล็ก หน่วย คูอมบ์
V	คือ	ความเร็วของประจุไฟฟ้า q วัตในหน่วยเมตรต่อวินาที
T	คือ	ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก วัตในหน่วยเทสลา

ในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีบริเวณไม่กว้างมากนัก ประจุไฟฟ้าที่เข้ามาในสนามแม่เหล็กจะถูกแรงกระทำเป็นส่วนโค้งของวงกลม โดยแรงกระทำมีทิศทางเปลี่ยนตลอดเวลา ความเร็วเปลี่ยนแต่อัตราเร็วคงเดิม เมื่อพ้นจากสนามแม่เหล็กแล้วประจุจะเดินทางเป็นเส้นตรงด้วยอัตราเร็วเท่ากับครั้งแรก

เทสลา(T) คือ หน่วยวัดความหนาแน่นของสนามแม่เหล็ก เท่ากับ จำนวนเส้นสนามแม่เหล็ก 1 เวเบอร์ต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร สามารถเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$T = \frac{Wb}{m^2}$$

$$Wb = \frac{J}{A}$$

$$J = N m$$

$$T = \frac{Nm}{A m^2}$$

$$T = \frac{N}{A m}$$

$$T = \frac{m}{A} \frac{kg}{sec^2} \frac{1}{m}$$

$$T = \frac{kg}{sec^2 A}$$

แกนกลางของแม่เหล็ก สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท

1) แม่เหล็กเฟอร์โร (Ferromagnetism) เป็นสภาพแม่เหล็กที่มีความแรงสูงสุด เกิดจากการเรียงของสปินของกลุ่มอิเล็กตรอนในชั้น d ที่ไม่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระ เช่น นิกเกิล เหล็กและโคบอลต์ และกลุ่ม rare earth เช่น ซามาเรียม

2) แม่เหล็กพารา (Paramagnetism) มีพฤติกรรมเทียบเคียงได้กับสภาพขั้วทางไฟฟ้า (Polarization) มีความแรงน้อยกว่าสภาพแม่เหล็กเฟอร์โร พฤติกรรมส่วนใหญ่อธิบายได้ด้วยทฤษฎีแบบฉบับ เกิดจากอันตรกิริยาของสนามแม่เหล็กกับไดโพลโมเมนต์ของอิเล็กตรอนชั้น s และ p ที่ไม่มีคู่ เช่น อลูมิเนียม ซึ่งมีอิเล็กตรอนในชั้น p เพียงตัวเดียวที่อยู่ในชั้นวาเลนซ์

3) แม่เหล็กไดอา (Diamagnetism) เกิดจากอันตรกิริยาของสนามแม่เหล็กกับไดโพลแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำในอะตอม มีความแรงน้อยกว่าสภาพแม่เหล็กเฟอร์โรมาก ๆ พฤติกรรมต่างจากสภาพขั้วทางไฟฟ้าอย่างสิ้นเชิง สภาพแม่เหล็กไดอาจำแนกจากความเป็นแม่เหล็ก (Magnetization) ที่มีทิศทางสวนกับทิศทางสนามแม่เหล็กภายนอก มักจะพบในสารที่มีอิเล็กตรอนครบคู่ในวงโคจร

สนามไฟฟ้า หมายถึง "บริเวณโดยรอบประจุไฟฟ้า ซึ่งประจุไฟฟ้าสามารถส่งอำนาจไปถึง" หรือ "บริเวณที่เมื่อนำประจุไฟฟ้าเข้าไปวางแล้วจะเกิดแรงกระทำบนประจุไฟฟ้านั้น" ตามจุดต่างๆในบริเวณสนามไฟฟ้า ย่อมมีความเข้มของสนามไฟฟ้าต่างกันจุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดที่อยู่ห่างไกลออกไปนอกจากนั้น ณ จุดต่างๆ ในบริเวณสนามไฟฟ้าย่อมจะปรากฏศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่าง ๆ กันด้วยซึ่งเป็นศักย์ไฟฟ้า ชนิดเดียวกันกับศักย์ไฟฟ้าอันเกิดจากประจุไฟฟ้าที่เป็นเจ้าของสนามไฟฟ้าจุดที่อยู่ใกล้ประจุไฟฟ้าจะมีศักย์สูงกว่าจุดที่อยู่ไกลออกไป

เส้นแรงไฟฟ้า เรากำหนดเพื่อความสะดวกในการศึกษาไม่มีปรากฏอยู่จริงโดยกำหนดเป็นหลักให้เข้าใจตรงกันว่า เมื่อวางประจุไฟฟ้าบวกอิสระลงในสนามไฟฟ้าถ้าประจุไฟฟ้าบวกอิสระนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปได้แนวทางที่ประจุไฟฟ้าบวกอิสระนี้จะเคลื่อนที่ไป กำหนดว่าเป็นเส้นแรงไฟฟ้า และทิศทางของเส้นสัมผัสซึ่งสัมผัสเส้นแรงไฟฟ้าที่จุดใด ๆ ก็คือทิศทางของสนามไฟฟ้า ณ จุดนั้น

คุณสมบัติของเส้นแรงไฟฟ้าคุณสมบัติเส้นแรงไฟฟ้า

- 1) เส้นแรงไฟฟ้าพุ่งออกจากประจุไฟฟ้าบวก และพุ่งเข้าสู่ประจุไฟฟ้าลบ
- 2) เส้นแรงไฟฟ้าแต่ละเส้นจะไม่ตัดกัน
- 3) เส้นแรงไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันไม่เสริมเป็นแนวเดียวกันแต่จะเบนแยกจากกันเป็นแต่ละแนว ส่วนเส้นแรงไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันจะเสริมเป็นแนวเดียวกัน
- 4) เส้นแรงไฟฟ้าที่พุ่งออกจากกันหรือพุ่งเข้าสู่ผิวของวัตถุย่อมตั้งได้ฉากกับผิวของวัตถุนั้น ๆ เสมอ
- 5) เส้นแรงไฟฟ้าจะไม่พุ่งผ่านวัตถุตัวนำเลย เส้นแรงไฟฟ้าจะสิ้นสุดอยู่เพียงบริเวณผิวของวัตถุตัวนำเท่านั้น
- 6) สำหรับวัตถุตัวนำรูปทรงกลมกลวงที่มีประจุไฟฟ้า และไม่มีวัตถุอื่นที่มีประจุไฟฟ้าบรรจุอยู่ภายในทรงกลมกลวงนั้นจะไม่มีเส้นแรงไฟฟ้าอยู่ภายในทรงกลมกลวงนั้นเลย เส้นแรงไฟฟ้าจะมีปรากฏสิ้นสุดอยู่เพียงผิวนอกของทรงกลมกลวงเท่านั้นโดยเส้นแรงไฟฟ้าจะมีแนวเข้าสู่จุดศูนย์กลางของทรงกลมกลวง และในกรณีนี้ภายในทรงกลมกลวงจะไม่มีสนามไฟฟ้า ไม่มีแรงกระทำไฟฟ้า กล่าวได้ว่าค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์

จุดสะเทินในสนามไฟฟ้า หมายถึง จุดในสนามไฟฟ้าซึ่งมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าเป็นศูนย์ทั้งนี้เนื่องมาจาก ณ จุดนั้นอาจปรากฏมีสนามไฟฟ้าอย่างน้อยที่สุดสองสนามมีความเข้มของสนามไฟฟ้าเท่ากันแต่ทิศทางตรงข้ามอำนาจไฟฟ้าจึงหักล้างกันหมด หรือหาก ณ จุดนั้นมีสนามไฟฟ้ามากกว่าสองสนามแต่ค่าความเข้มและทิศทางของสนามไฟฟ้าเหล่านั้นอยู่ในลักษณะที่อำนาจไฟฟ้าหักล้างกันหมดจุดนั้นเป็นจุดสะเทินได้ ในกรณีซึ่งมีสนามไฟฟ้าสองสนามซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าสองประจุวางใกล้กันจุดสะเทินที่เกิดขึ้นจะอยู่ในแนวเส้นตรงที่ลากผ่านประจุไฟฟ้าทั้งสองนั้นมีหลักเกณฑ์ดังนี้

(ก) ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองเป็นประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันตำแหน่งจุดสะเทินจะอยู่ระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสอง ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าเท่ากัน จุดสะเทินจะอยู่ที่ตรงกึ่งกลางระยะถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าไม่เท่ากัน จุดสะเทินจะอยู่ใกล้กับประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณไฟฟ้าน้อยกว่า

(ข) ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองเป็นประจุไฟฟ้าต่างชนิดกัน กรณีนี้ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าเท่ากันจะไม่มีจุดสะเทินเกิดขึ้น ถ้าประจุไฟฟ้าทั้งสองมีปริมาณไฟฟ้าไม่เท่ากัน จะเกิดจุดสะเทินอยู่นอกระยะระหว่างประจุไฟฟ้าทั้งสองโดยอยู่ใกล้กับประจุไฟฟ้าที่มีปริมาณไฟฟ้าน้อยกว่า

ปัจจัยที่มีผลต่อพัลส์สนามไฟฟ้า

เทคนิคพัลส์สนามไฟฟ้าแรงสูง เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพทางพลังงาน เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ โดยเฉพาะในกระบวนการแบบต่อเนื่อง โดยปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพัลส์สนามไฟฟ้า มีดังนี้

1) ความเข้มสนามไฟฟ้า มีผลกับเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเซลล์ รวมถึงการหมุนของเซลล์เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เมื่อเซลล์มีขนาดลดลงจะต้องการความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงขึ้น ถ้าเซลล์มีรูปร่างที่ต่างกันจำเป็นต้องใช้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น [13] การเพิ่มความเข้มสนามไฟฟ้าเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ ขึ้นอยู่กับค่า Dielectric Strength (ค่าความคงทนไดอิเล็กทริก) ของอาหาร (Ho & Mittal, 2000) และมีขอบเขตอยู่ในช่วง 60 - 80 kV/cm นอกจากนี้ความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน การใช้สนามไฟฟ้าที่สูงมากจะเกิดการทำลายเซลล์ แต่ก็มีข้อเสียคือเกิดประกายไฟฟ้าจากกระแสไฟฟ้าอากาศเกิดขึ้น เกิดสนิมที่ขั้วอิเล็กโทรด และอาจเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีที่ไม่ต้องการได้

2) เวลาในการผ่านสนามไฟฟ้าการเพิ่มเวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า ทำให้ความกว้างของพัลส์และจำนวนของพัลส์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการผ่านสนามไฟฟ้า จะมีผลต่อการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น (Heinz, et al., 2000)

3) อุณหภูมิของกระบวนการ อุณหภูมิมีผลต่อความเสถียรของเชื้อจุลินทรีย์คือที่อุณหภูมิต่ำหนึ่งในส่วนประกอบของเซลล์เมมเบรนที่เรียกว่า Phospholipids นั้นจะมีลักษณะคล้ายเจล เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นผลึกของของเหลวซึ่งจะมีความเสถียรน้อยกว่า Dunn & Pearlman(1987) พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจาก 40°C เป็น 50°C สามารถยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ *S. dublin* ในน้ำนมเพิ่มขึ้นและJayaram (2000) สามารถยับยั้งจุลินทรีย์ *L. brevis* เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิของกระบวนการสูงขึ้น (จาก 24°C เป็น60°C) และเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ Phospholipids

4) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ผันกลับกับความต้านทาน มีหน่วยเป็นซีเมนต่อเมตร (S/m) การนำไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอาหารและไฮโดรพลาสมิม เยื่อหุ้มเซลล์จะอ่อนแอลงเมื่อความเข้มข้นของประจุสูงขึ้นและเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง แต่ Hülshager, et al.(1981) และ Vega-Mercado, et al.(1996) พบว่าประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นที่ค่าความเข้มข้นและค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ

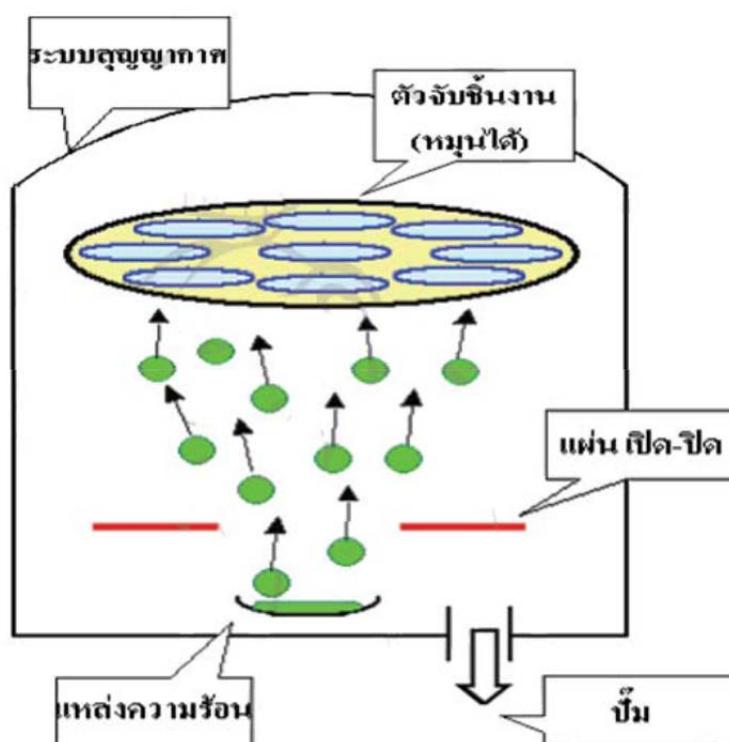
5) ผลของฟองอากาศฟองอากาศและอนุภาคฟองอากาศจะเกิดที่ความเข้มสนามไฟฟ้าสูง ในการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ที่ความเข้มสนามไฟฟ้า 30 - 50 kV/cm ไม่ควรมีอากาศในอาหาร เนื่องจากเมื่อมีการไหลของกระแสภายในช่องแคบจะเกิดฟองอากาศ และที่บริเวณผิวของฟองอากาศความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลง ความเข้มสนามไฟฟ้าในบริเวณที่ผ่านสนามไฟฟ้าลดลง ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ก็ลดลงไปด้วย(Stefan, 2006)

6) คุณสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์(Sale & Hamilton, 1967) พบว่า เซลล์ยีสต์จะไวต่อสนามไฟฟ้ามากกว่าแบคทีเรีย(Hülsher, et al., 1981) อธิบายว่าจุลินทรีย์ที่ต่างชนิดกันมีส่วนประกอบของเมมเบรนที่ต่างกัน ดังนั้นความต้านทานจึงต่างกันจุลินทรีย์แกรมบวกจะมีความไวต่อสนามไฟฟ้าน้อยกว่าแต่ไม่ได้มีการตรวจสอบถึงระยะของการเจริญที่ต่างกัน

กระบวนการเทคนิควิธีในการทำฟิล์มบาง

การเคลือบฟิล์มบางอาศัยหลักการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับแล้วพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางซึ่งเกิดขึ้นภายใต้สภาวะสุญญากาศหรือสภาวะต่าง ๆ ที่ทำการสร้างขึ้น โดยจะขอยกตัวอย่างดังนี้

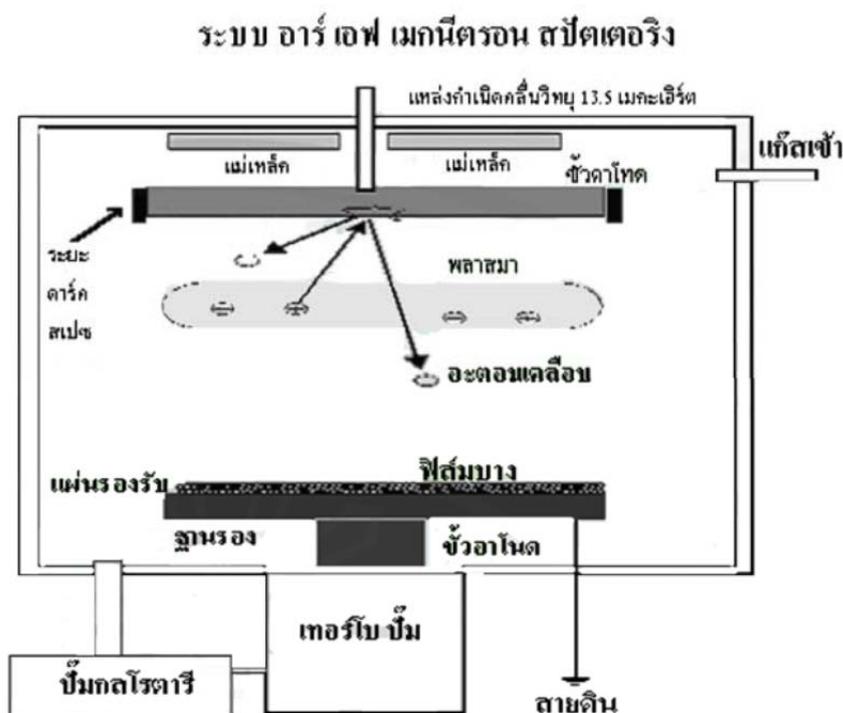
1) การทำฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหย เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยซึ่งเกิดขึ้นในสุญญากาศโดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ ซึ่งสารเคลือบนี้จะฟุ้งไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูน โตเป็นชั้นฟิล์มบางต่อไป ดังภาพที่ 2.2 ข้อเสียของการเคลือบวิธีนี้ คือ แรงยึดติดระหว่างสารเคลือบและวัสดุรองรับจะไม่สูง นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้อาจมีการปนเปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ



ภาพที่ 2.2 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

2) การทำฟิล์มบางด้วยเทคนิคโกลวดิสชาร์จ (Glow Discharge Technique)

เป็นกระบวนการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลื่อนด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมสารเคลือบจากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งชนวัสดุรองรับ และมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบาง ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอริง

ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

เทคนิคโกลวดิสชาร์จประกอบด้วย 3 กระบวนการดังนี้

- 1) กระบวนการก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge Process)
- 2) กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)
- 3) การสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง (DC Sputtering)

โดยมีรายละเอียดในหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการก๊าซดิสชาร์จ (Gas Discharge Process) ภายใต้ความดันบรรยากาศต่ำ ๆ ประมาณ 75 มิลลิทอร์ ก๊าซจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกกับอิเล็กตรอน เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วที่วางห่างกันอิเล็กตรอนจะถูกขัดขวางด้วยสนามไฟฟ้า วิ่งเข้าหาขั้วบวก ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง แต่กระแสที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำมาก ถ้าความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่ำกว่าแรงดันไฟฟ้าทะลาย (Break down voltage) เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้า ระหว่างขั้วไฟฟ้าจนถึงแรงดันไฟฟ้าทะลาย จะเกิดปรากฏการณ์ดังนี้

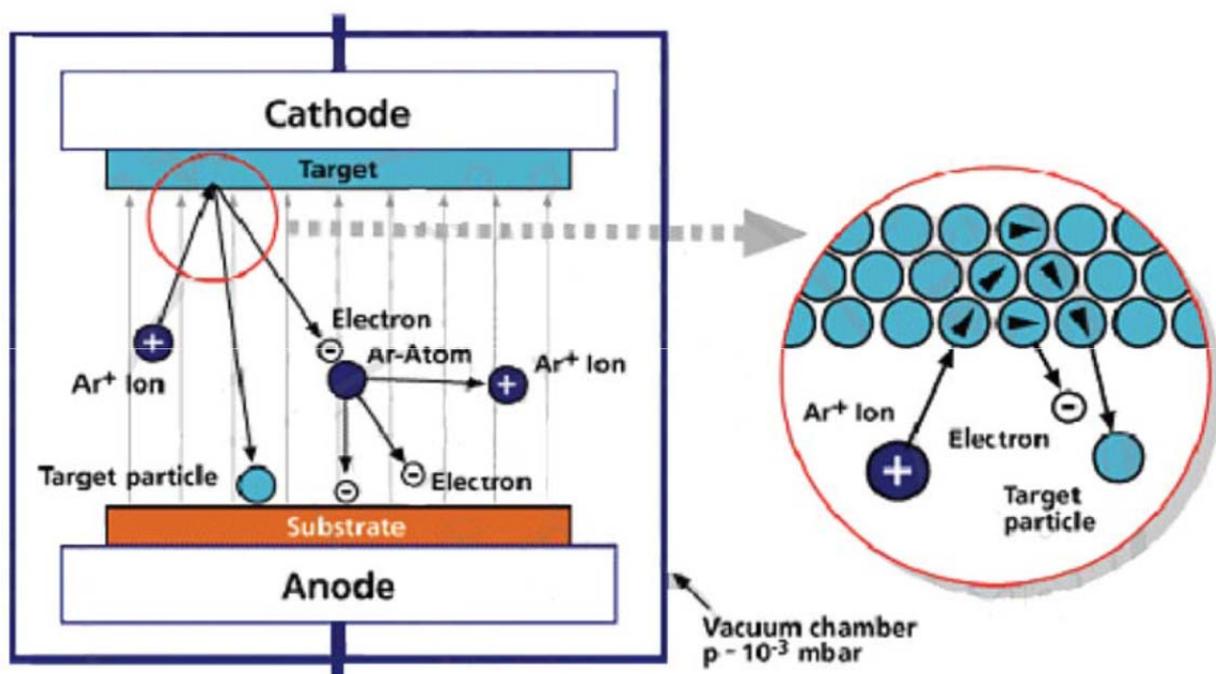
1.1 สนามไฟฟ้าที่แรงดันหลาย จะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงมากพอที่จะไอออไนซ์ (Ionize) โมเลกุลของก๊าซ เมื่อเกิดการชนกันทำให้อิเล็กตรอนมีจำนวนเพิ่มมากขึ้นและเร่งเข้าสู่ขั้วบวก ส่วนอนุภาคไอออนจากอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซจะวิ่งเข้าสู่ขั้วลบ

1.2 อนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนขั้วลบ จะทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองออกมาและถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วบวก ทำให้เกิดการไอออไนซ์โมเลกุลของก๊าซอย่างต่อเนื่องและรักษาภาวะโกลดิสซาร์จไว้ได้ พร้อมกันนี้อะตอมของขั้วลบที่ถูกชน จะหลุดออกมาและฟุ้งกระจายในบรรยากาศต่ำ ๆ ซึ่งพร้อมที่จะเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า ตกลงบนแผ่นรองรับ อะตอมที่หลุดออกมาส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า

1.3 หลังการชนกันระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับอิเล็กตรอนจนเกิดการไอออไนซ์เซชันไอออนที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ช้ากว่าอิเล็กตรอนมาก ทำให้บริเวณใกล้ขั้วบวกมี โพลสทิฟสเปซชาร์จ (Positive space charge) เกิดขึ้นสูง ส่วนอิเล็กตรอนถูกกวาดด้วยสนามไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วบวกอย่างรวดเร็ว การเกิดโพลสทิฟ สเปซชาร์จ ใกล้ขั้วลบ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ขั้วลบมีค่าสูงขึ้น คักดาไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้เกือบทั้งหมด พ้นจากบริเวณนี้ สนามไฟฟ้ามีค่าต่ำ หลังการไอออไนซ์อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานไปมาก และไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวมันเองได้ภายใต้สนามไฟฟ้าต่ำนี้ ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงไม่มีพลังงานสูงพอ ที่จะไอออไนซ์ก๊าซในการชนครั้งต่อไปโอกาสที่เป็นไปได้คือ ผลจากการชนจะทำให้เกิดก๊าซในสถานะกระตุ้น (Excited state) เป็นส่วนใหญ่

1.4 อนุภาคเมื่อรวมตัวกับอิเล็กตรอนแล้วจะเป็นกลางทางไฟฟ้าและกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) หรือการตกจากสถานะกระตุ้นของอะตอมสู่สถานะพื้น จะมีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความถี่แสง ทำให้บริเวณนั้นเกิดการเรืองแสงหรือที่เรียกว่า โกลดิสซาร์จ ส่วนการรวมกันของไอออนกับอิเล็กตรอนจะคายพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และเกิดได้ยากกว่ามากทำให้บริเวณนั้นมีมืด (Dark space region) ซึ่งเป็นบริเวณระหว่างขั้วลบบกับโพลสทิฟสเปซชาร์จที่ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงนิยมใช้ก๊าซอาร์กอน เนื่องจากเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งมี Atomic mass สูงปานกลาง และไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ต้องการเตรียมเป็นแผ่นฟิล์มในระหว่างการสปัตเตอริง ราคาไม่แพงและหาง่าย

2) กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process) เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของเป้าเม็ตสาร (Target) หลุดออกมา เนื่องจากการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง ในระหว่างการชนหรือกระทบกันจะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ถูกชนและอะตอมใกล้เคียง การที่อะตอมบริเวณผิวหน้าของสารสามารถเคลื่อนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของสารนั้นได้จะต้องมีพลังงานเพียงพอที่จะชนะแรงยึดเหนี่ยวทางเคมีกับอะตอมใกล้เคียง และเป็นพลังงานจลน์ให้กับอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวสาร



ภาพที่ 2.4 กระบวนการสปัตเตอริงภายในแชมเบอร์
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

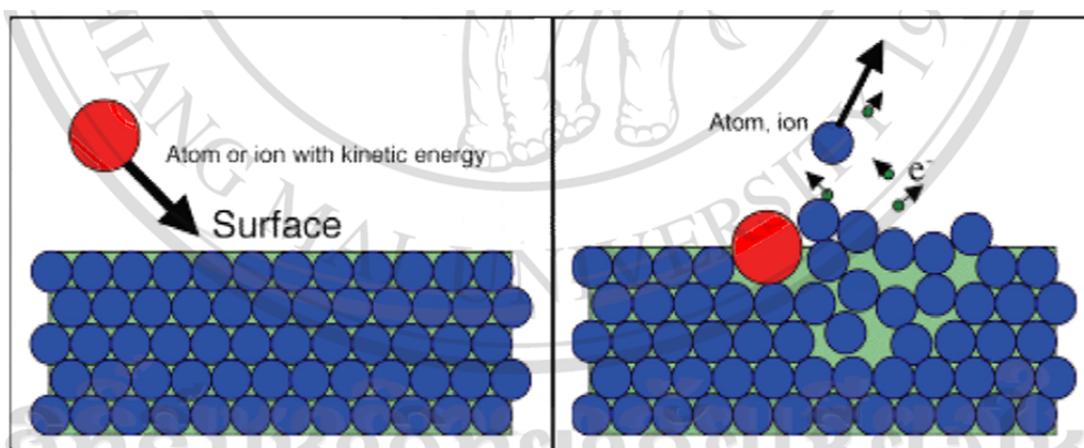
เนื่องจากเคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า อะตอมที่หลุดออกมาจะมีสถานะเป็นไอออนหรือบางครั้งการชนของอนุภาคพลังงานสูง อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าก็ได้ ดังนั้นในการสปัตเตอริงจำเป็นต้องมีกระบวนการดังนี้ คือ

2.1) มีเป้าหมาย (Target) เพื่อให้อนุภาคพลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงบนแผ่นรองรับ (Substrate)

2.2) อนุภาคพลังงานสูงที่สามารถเคลื่อนที่เข้าชนเป้าหมาย จะเกิดการถ่ายเทพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหมาย ได้อย่างมีประสิทธิภาพและที่สำคัญอนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีใด ๆ กับเป้าหมาย อนุภาคอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุลบเป็นอนุภาคที่ง่ายต่อการผลิตและสามารถเร่งให้เกิดพลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้าได้ง่าย แต่ว่ามวลของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหมาย ซึ่งทำให้การถ่ายเทพลังงานและการถ่ายเทโมเมนตัมระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่ถูกชน เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพตามทฤษฎีทางฟิสิกส์การถ่ายเทพลังงานโมเมนตัม จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อมวลของอนุภาคที่ชนและอนุภาคที่ถูกชนมีค่าเท่ากัน ดังนั้น จำเป็นต้องเลือกอะตอมและสามารถเร่งอนุภาคไอออนของอะตอมนั้นในสนามไฟฟ้าได้ ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้อะตอมของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน เป็นต้น ซึ่งทำให้อัตราการหลุดของอะตอมที่ผิวหน้าของเป้าหมายสูงเพียงพอตามที่ต้องการ

2.3) อนุภาคพลังงานสูงนี้ต้องถูกผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องตามความต้องการ ซึ่งสามารถผลิตอนุภาคพลังงานสูง ได้จากกระบวนการ

ก๊าซดิสชาร์จ (Gas discharge process) เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าของเป่าเม็ดสาร ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวหน้าของเป่าเม็ดสาร และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ภายหลังการชนสามารถอธิบายได้ง่าย ๆ ด้วยการชนกันของลูกบิลเลียด โดยการยิงลูกบิลเลียดลูกหนึ่ง เข้าไปชนกับกลุ่มของลูกบิลเลียดที่วางอยู่กับที่ ภายหลังการชนจะเกิดการกระเจิงของลูกบิลเลียดไปใน ทิศทางต่าง ๆ กัน บางลูกสะท้อนกลับออกมา นั่นคือ การหลุดออกมาของอะตอมที่ผิวหน้าของเป่า เม็ดสาร แต่ในกระบวนการสเปตเตอร์จริง ๆ นั้น พลังงานระหว่างการชนกันของอะตอมแตกต่างกัน ไปจากพลังงานระหว่างการชนของลูกบิลเลียด ภาพที่ 2.5 เป็นรูปแบบการชนของลูกบิลเลียดซึ่งเป็นการยกตัวอย่างให้เข้าใจ ถึงกลไกของการสเปตเตอร์เท่านั้น



ภาพที่ 2.5 การชนกันของอะตอมในลักษณะของลูกบิลเลียด

ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

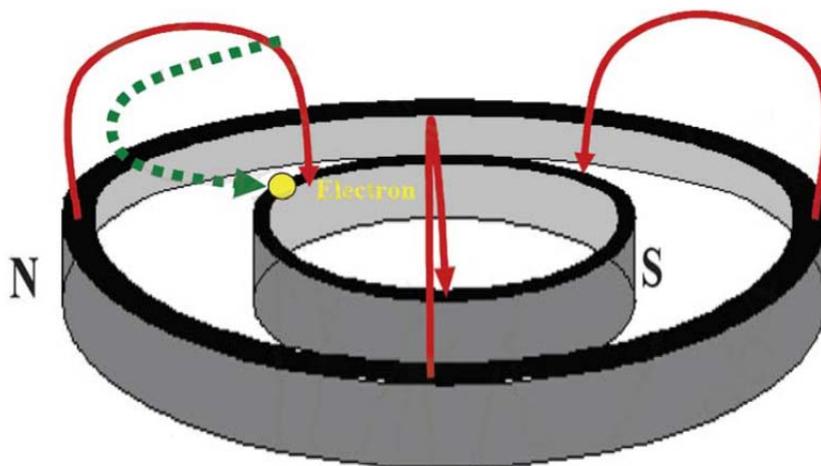
เมื่อไอออนพลังงานสูงวิ่งเข้าชนผิวหน้าเป่าสารเคลือบ ปฏิกริยาระหว่างอนุภาคไอออนที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวหน้าของเป่าเม็ดสารเกิดขึ้นดังนี้

1. ไอออนอาจจะสะท้อนกลับจากผิวหน้าของเป่าเม็ดสาร ซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป่าเม็ดสาร
2. การชนกันของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary electron) ออกจากเป่าเม็ดสาร เมื่อไอออนมีพลังงานสูงมากพอ
3. ไอออนอาจฝังตัวลงในผิวของเป่าเม็ดสาร (Ion implantation) ซึ่งระดับความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานของไอออน
4. การชนของไอออนบนผิวเป่าเม็ดสาร ทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวของเป่าเม็ดสารใหม่ และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice) เรียกการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผิวหน้านี้ว่า Altered surface layers
5. การชนกันของไอออน อาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่อง ระหว่างอะตอมของเป่าเม็ดสาร ทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป่าเม็ดสาร ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสเปตเตอร์

3) การสปัตเตอริงแบบ ดีซี สปัตเตอริง (DC Sputtering)

ระบบ ดีซี สปัตเตอริง ใช้กับเป้าเม็ดสาร(Target) ที่เป็นตัวนำไฟฟ้าวางไว้ที่ขั้วคาโทดและแผ่นรองรับวางไว้ที่ขั้วแอโนด โดยปกติระยะระหว่างคาโทดและแอโนดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 4 - 10 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้การสูญเสียอะตอมสารเคลือบออกสู่ด้านข้างหรือผนังของแชมเบอร์มีค่าต่ำ ระยะ Dark space ในระบบ โดยทั่วไปจะมีค่าระหว่าง 1 - 4 เซนติเมตร โดยตำแหน่งของแอโนดอยู่ในบริเวณ Negative glow อุปกรณ์ ทำงานอยู่ในช่วง Abnormal glow discharge ก๊าซที่ใช้ในระบบ นิยมใช้ก๊าซเฉื่อย ซึ่งให้ค่าอิเล็กตรอนสูงและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคลือบ มีราคาถูกกว่าก๊าซเฉื่อยอื่น ๆ ในขณะการเกิดกระบวนโกลว์ดีสชาร์จที่ความดันของก๊าซค่าหนึ่ง กระบวนการไอออนไนเซชันจะรักษา สภาพโกลว์ดีสชาร์จไว้ ตรวจจับที่ระยะ Dark space ไม่มากกว่าระยะทางระหว่างคาโทดกับแอโนด เมื่อความดันของก๊าซลดลงหรือแรงดันไฟฟ้า ระหว่างอิเล็กโทรดมีค่าสูงขึ้น ระยะปลดการชนของ อิเล็กตรอนจะสูงขึ้น ทำให้ระยะ Dark space ขยายตัวออก และแหล่งผลิตไอออนในระบบมีปริมาณ น้อย กระแสลดลงและอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงมีปริมาณไอออนและกระแสไฟฟ้าในระบบที่ความดันก๊าซ ต่ำกว่า 10^{-2} ทอร์ ระยะ Dark space ยาวกว่าระยะระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและกระแสลดลงสู่ศูนย์ กระบวนการผลิตไอออนสิ้นสุดและไม่มีอะตอมหลุดออกจากเป้าเม็ดสารเนื่องจากการสปัตเตอริงขณะ ความดันก๊าซสูงขึ้น ระยะ Dark space หดสั้นลง บริเวณการผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้า ที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้น และกระบวนการสปัตเตอริงเกิดขึ้นในอัตราสูงขึ้นตามความดันก๊าซ

อัตราการเกิดสปัตเตอริง ขึ้นกับอัตราการวิ่งชนเป้าเม็ดสารของอนุภาคไอออน ดังนั้นถ้า สามารถเพิ่มอัตราการสร้างอนุภาคไอออน ก็สามารถเพิ่มอัตราการเกิดสปัตเตอริงได้ วิธีหนึ่งที่นิยมกัน คือ แมกนีตรอน สปัตเตอริง หมายถึง การเพิ่มปริมาณไอออน โดยการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของ อนุภาคที่มีประจุ เนื่องจากแรงลอเรนซ์ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียว หรือเป็นวงกลม เมื่อการ เคลื่อนที่ของอนุภาคทำมุมกับสนามแม่เหล็ก ทำให้โอกาสที่อนุภาคที่มีประจุเหล่านี้จะไปชนกับ อนุภาคอื่น ๆ มีมากขึ้น ทำให้ปริมาณมากเพียงพอกับความต้องการ นอกจากนั้นสนามแม่เหล็กก็ สามารถกักอิเล็กตรอนและอนุภาคที่มีประจุไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ออกไป แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุในสนามแม่เหล็ก

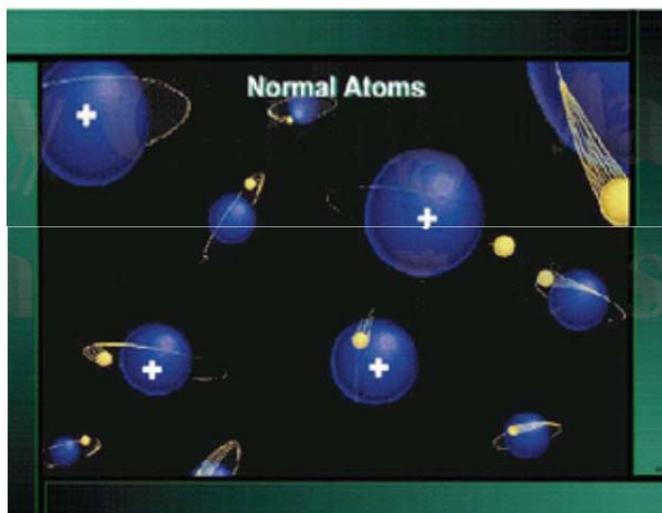
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

ระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้สนามแม่เหล็กในการเพิ่มปริมาณไอออนนั้น ถ้าสนามแม่เหล็กมีทิศทางขนานสนามไฟฟ้าเรียกว่า Longitudinal field จะทำให้ประสิทธิภาพของการเพิ่มปริมาณไอออนไม่สูงมากนัก แต่สามารถรักษาความสม่ำเสมอของฟิล์มไว้ได้ดี ในกรณีที่สนามแม่เหล็กตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า เรียกว่า Transverse filed เป็นกระบวนการเพิ่มปริมาณไอออนที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการวางทิศทางของสนามแม่เหล็กขนานกับสนามไฟฟ้า สำหรับการเตรียมแผ่นฟิล์มบางโดยวิธีการสปัตเตอร์ สามารถเตรียมได้ทั้งสารที่เป็นโลหะและอโลหะ ไม่ว่าจะมียุคหลอมเหลวสูงหรือต่ำ โดยอาศัยการดิซชาร์จไฟฟ้าของก๊าซเฉื่อยภายใต้ความดันต่ำระหว่าง $10^{-3} - 10^{-1}$ ทอร์ ให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงภายใต้ความต่างศักย์ระหว่าง 400 - 10,000 โวลต์ เข้าชนเป้าสารเคลือบ (Target) ซึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง อะตอมของสารเคลือบจะหลุดออกมาด้วยพลังงานเฉลี่ยค่อนข้างสูงระหว่าง 10 ถึง 100 อิเล็กตรอนโวลต์/อะตอม ฟุ้งกระจายในสภาพอะตอมเดี่ยว โดยอะตอมของสารเคลือบที่หลุดออกมาส่วนหนึ่งจะเคลื่อนย้ายที่ภายใต้สนามไฟฟ้าลงไปเคลือบบนแผ่นรองรับในลักษณะของแผ่นฟิล์ม ทำให้การยึดเกาะมีความคงทนสูง ไม่หลุดล่อนออกได้ง่ายในกรณีที่ ต้องเตรียมสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า ในลักษณะแผ่นฟิล์มจะใช้วิธี DC sputtering แต่ถ้าเป็นฉนวนไฟฟ้าจะใช้วิธี RF sputtering (Radio frequency sputtering) สำหรับความถี่ที่ใช้ในการสปัตเตอร์แบบ RF sputtering จะใช้ความถี่ 13.56, 27.12 และ 40.68 MHz ตามข้อตกลงของ International Agreement for Unlimited Radiation ซึ่งเป็นความถี่ที่ให้อัตราการ ionization สูงและไม่รบกวนต่อสัญญาณของระบบโทรคมนาคม

การทำฟิล์มบางโดยใช้หลักการอาร์ค (Arc spray technique)

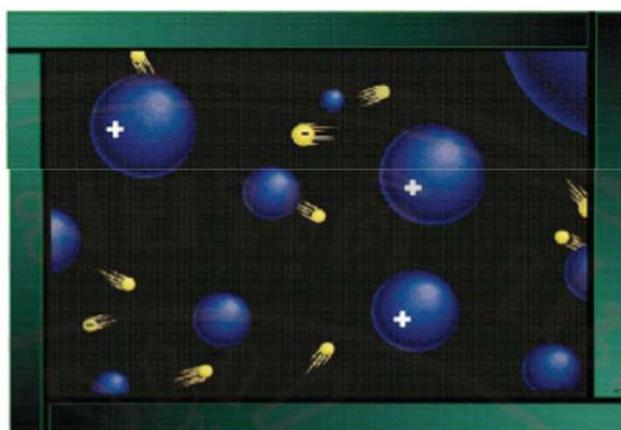
เป็นเทคนิคการทำให้เกิดฟิล์มบางโดยใช้หลักการอาร์ค (Arc) ลวดโลหะด้วยศักย์ไฟฟ้าแรงดันสูง เพื่อให้ไอเล็กตรอนที่อยู่บริเวณปลายเส้นลวดโลหะถูกกระตุ้นและชนกับโมเลกุลของอากาศบริเวณปลายเส้นลวดโลหะจนทำให้โมเลกุลของอากาศแตกตัวกลายเป็นไอออนบวกและลบดังภาพที่ 2.11 และ 2.12

Normal atoms are charge neutral



ภาพที่ 2.7 อะตอมของอากาศในสภาวะปกติ

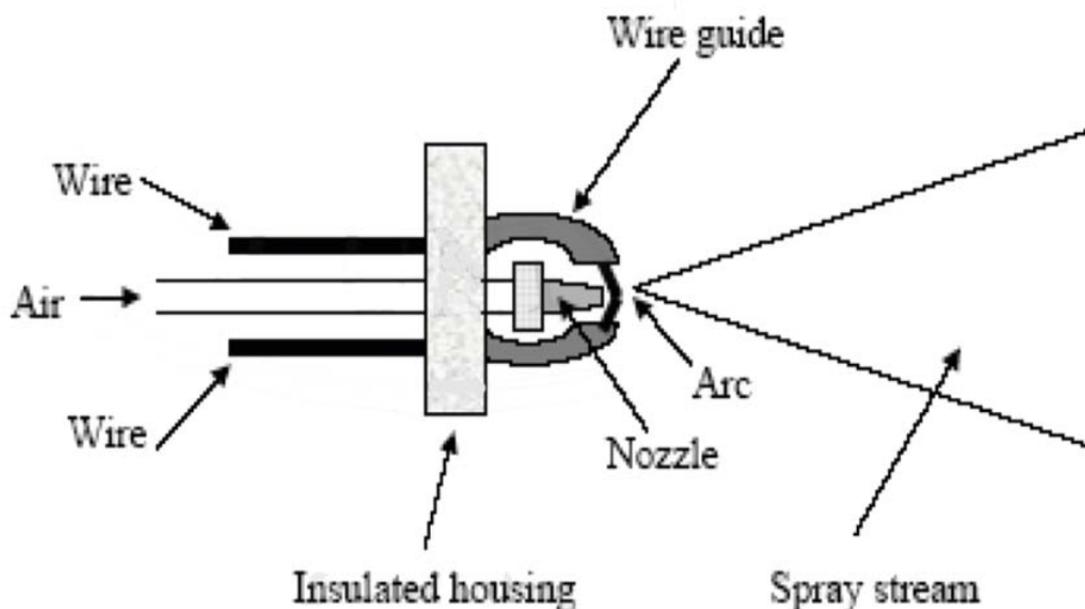
Add some thermal energy
 electrons acquire enough energy to escape from atomic
 binding forces => ions & electrons



ภาพที่ 2.8 อะตอมของอากาศเมื่อได้รับพลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม
 ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

เมื่ออะตอมเกิดการแตกตัว ไอออนบวกจะวิ่งชนปลายเส้นลวดด้านแคโทด ในขณะที่ไอออนลบจะวิ่งชนบริเวณปลายเส้นลวดโลหะด้านแอโนด จนทำให้เกิดความร้อนมากพอที่จะทำให้ก้อนอนุภาคเล็ก ๆ บริเวณปลายลวดโลหะหลุดออกมาในปริมาณมาก จากภาพที่ 2.9 จะมีที่อากาศ

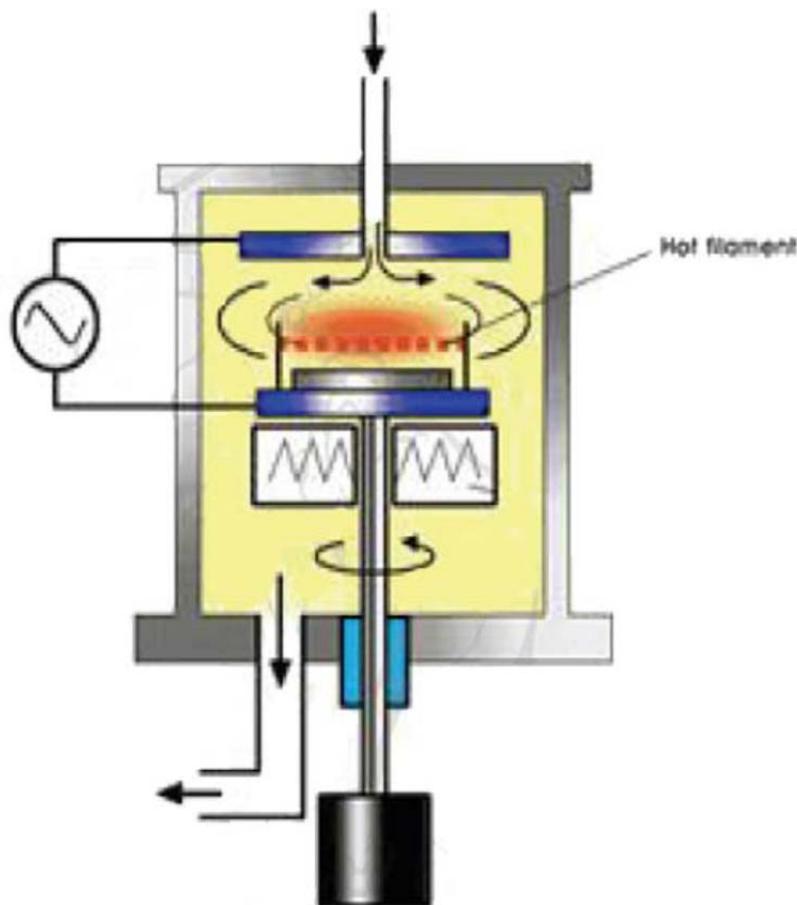
สำหรับพ่นอนุภาคที่หลุด ให้เกาะติดกับ substrate ในลักษณะของฟิล์มบาง โดยเทคนิคนี้จะช่วยให้อนุภาคที่ถูกพ่นเกาะติดแน่นขึ้น



ภาพที่ 2.9 เทคนิคของ Two-wire arc spray gun
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

การทำฟิล์มบางวิธีการตกไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition, CVD) วิธีการตกสะสมไอสารเคมี เป็นวิธีที่ให้ความร้อนไปยังแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่หน้าที่เป็นแหล่ง กำเนิดคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้คือ มีเทน (CH_4) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C_2H_2) เป็นต้น ส่วนแหล่งความร้อนที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของแก๊สให้แตกเป็นอะตอมของคาร์บอนนั้นนิยมใช้พลาสมาหรือขดลวดความร้อน การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้สามารถควบคุมโดยอัตราการไหลของ ก๊าซและความร้อนที่ให้ไปได้ ทั้งนี้วิธีการนี้ต้องทำภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น

เทคนิคการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition) โดยให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้เกิดแก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เป็นต้น แตกตัวและตกบนฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และแก้ว ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา
ที่มา : Chapman Brain, C. (1980).

วิธีการพื้นที่การตอบสนอง(Response Surface Methodology ; RSM) (กัญจรัฐดี บุญมี, 2553)

ปัจจุบันมีความสนใจในการออกแบบเพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนองและประเมินความเหมาะสมในสถานะของการทดลอง การออกแบบที่เรียกว่า Response Surface Design (RSD) และการวิเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาค่าตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งนำมาสู่การพบพื้นที่การตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด การตอบสนองที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะ คือ การตอบสนองที่มากที่สุด (Maximum) หรือการตอบสนองน้อยที่สุด (Minimum) ขึ้นอยู่กับการทดลอง วิธีการของพื้นที่การตอบสนองประกอบด้วยกลุ่มของเทคนิคที่ใช้การศึกษาจากค่าการตอบสนอง(Response Variable) ที่วัดได้ 1 หรือ 2 ค่า เช่น ผลผลิต ดัชนีค่าสี และความหนืด กับตัวแปรที่ใช้ทดลอง(Input variables) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้น (ไพโรจน์ วิริยจारी, 2544)

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ และการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบกราฟสามมิติ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent variable) 2 ตัว อยู่ในแนวระนาบ (แกน x และแกน y) กับตัวแปรตามอยู่ในแนวแกนตั้ง (แกน z) เรียกว่า RSM โดยระดับการวัดของตัวแปรต้องอยู่ในระดับ Interval scale หรือ Ratio scale จึงจะนำเสนอแบบ RSM ได้ โดยมีการเทคนิคการฉายภาพแบบ Top view ให้เป็น Contour plot หรือ Surface plot โดยสามารถเขียนรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระดังสมการที่ 1

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k) \quad (1)$$

โดย Y คือ ตัวแปรตอบสนอง

$\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k$ คือ ตัวแปรอิสระธรรมชาติ (Natural independent variable หรือ Actual factor) k ตัว

เพื่อความสะดวกในการคำนวณและการแปลผลการวิเคราะห์โดยทั่วไปในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองนิยมแปลงค่า (Transformation) ตัวแปรอิสระธรรมชาติในอยู่ในรูปรหัสที่ไม่มีหน่วย เรียกว่า ตัวแปรอิสระรหัส (Coded variable หรือ Code factor) โดยตัวแปรอิสระรหัส (x_1, x_2, \dots, x_k) อาจมีค่าเป็น -1, 0 และ 1 โดยการแปลงค่าสามารถทำได้ดังนี้

$$X_i = \frac{\xi_i - \bar{X}_i}{\text{Mid-Range}} \quad \text{โดย } i = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

โดย

$$\bar{X}_i = \frac{\max(\xi_i) + \min(\xi_i)}{2} \quad (3)$$

$$\text{Min-Range} = \frac{\max(\xi_i) - \min(\xi_i)}{2} \quad (4)$$

Max (ξ_i) คือ ค่ามากที่สุดของตัวแปรอิสระธรรมชาติที่ i

Min (ξ_i) คือ ค่าน้อยที่สุดของตัวแปรอิสระธรรมชาติที่ i

เนื่องจากไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระ ในทางปฏิบัติจึงนิยมประมาณความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ในตัวแบบโพลีโนเมียลดังนี้

1) ตัวแบบโพลีโนเมียลอันดับหนึ่ง (First order polynomial model)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \epsilon \quad (5)$$

- 2) ตัวแบบโพลีโนเมียลอันดับหนึ่งที่มีอิตรกิริยา (First order polynomial with interaction model)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij} + \epsilon \quad (6)$$

- 3) ตัวแบบโพลีโนเมียลอันดับสอง (Second order polynomial model)

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_{ij} + \epsilon \quad (7)$$

โดย

Y คือ ตัวแปรตอบสนอง

X_i, X_i^2 และ X_{ij} คือ ตัวแปรอิสระ

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

β_0 คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยที่เป็นค่าคงที่ของสมการ

β_i ($i = 1, 2, \dots, k$) คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของเทอม X_i

β_{ii} ($i = 1, 2, \dots, k$) คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของเทอม X_{ii}

β_{ij} ($i = 1, 2, \dots, k-1$ และ $j = 1, 2, \dots, k$) คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของเทอม X_{ij}

ϵ คือ ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

จะเห็นได้ว่าตัวแบบเริ่มต้นที่ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระมีลักษณะคล้ายกับตัวแบบที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) การวิเคราะห์การถดถอยเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการทำนาย หรือ ประมาณค่าตัวแปรตาม สามารถจำแนกได้ 2 แบบ คือ การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย (Simple regression analysis) และการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุ (Multiple regression analysis)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวตอบสนองทำโดยการสร้างฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนองที่แสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยเปลี่ยนแปลง ทำให้สามารถหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสม (Optimum level) ที่ให้ผลตอบสนองตามต้องการอาจจะเป็นค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด หรือค่าตามที่ต้องการ

1) การออกแบบ Composite designs

ปัญหาจากการเกิดข้อเสียเนื่องจากไม่สามารถหมุนการออกแบบ 3^n Factorial designs จะทำให้จำนวนสิ่งทดลองค่อนข้างมากในจุดของการออกแบบและจะต้องทำการทดลองค่อนข้างมากเช่นกันเพื่อจะลดจำนวนสิ่งทดลองในการออกแบบ อาจจะเริ่มจากตัวอย่าง 2^n Factorial designs และเพิ่มจุดของการออกแบบเพิ่มเติมอย่างเพียงพอให้สามารถสร้างรูปแบบหุ่นลำดับสองได้ การ

ออกแบบนี้ไม่เพียงแต่จะมีจุดที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับ 3 ระดับของ Factorial designs แต่ยังไม่สามารถถูกแสดงในขั้นตอนตัวอย่างขั้นตอน 2^n Factorial designs อาจจะใช้เพื่อการสร้างหุ่นลำดับที่หนึ่งโดยการทำให้เข้าเพื่อบรรลุถึงจุดใกล้ Stationary point สำหรับการตอบสนองที่เหมาะสมเพื่อให้ใกล้จุด Stationary point ได้ถูกกำหนดขึ้น การเพิ่มจุด $2n+1$ สามารถเพิ่มการออกแบบ 2^n Factorial designs เพื่อสร้างรูปแบบหุ่นลำดับที่สองให้สอดคล้องกับข้อมูลเพื่อค้นหาการตอบสนองที่เหมาะสม ถ้า $n=3$ จะทำการออกแบบ 2^n Factorial designs $+(2n+1)$ มีทั้งหมด 15 สิ่งทดลอง ในการออกแบบ Composite designs เปรียบเทียบกับ 3^n จะมีทั้งหมด 27 สิ่งทดลอง ในการออกแบบ 3 ระดับของ 3^n Factorial designs

ในการออกแบบ 2^n จุดของ 2 ระดับ Factorial designs การเพิ่มจุดพิเศษ $(2n+1)$ เพื่อให้จุดหนึ่งของการเพิ่มเป็นจุดกึ่งกลาง และจุดที่เหลือ $2n$ เป็นจุดห่าง α จากจุดกึ่งกลางการกระจายจะเท่าๆกันในคู่บนแกน n ของการออกแบบ สำหรับ $n=3$ การแสดงสามมิติของ 3 คอลัมน์ของค่าคงที่ที่แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 2.1 จุดร่วมของ 3 ปัจจัยในการออกแบบ Composite designs กับคอลัมน์ของค่าคงที่ (การออกแบบเมตริก)

จุดของการออกแบบ I	ค่าคงที่ β_0	ตัวแปรเชิงปริมาณ			
		X_{1i}	X_{2i}	X_{3i}	
1	1	-1	-1	-1	8 จุดของ 2^n Factorial designs
2	1	1	-1	-1	
3	1	-1	1	-1	
4	1	1	1	-1	
5	1	-1	-1	1	
6	1	1	-1	1	
7	1	-1	1	1	
8	1	1	1	1	
9	1	0	0	0	จุดกึ่งกลาง
10	1	$-\alpha$	0	0	6 จุดที่มีระยะห่าง α จากจุดกึ่งกลาง
11	1	α	0	0	
12	1	0	$-\alpha$	0	
13	1	0	α	0	
14	1	0	0	$-\alpha$	
15	1	0	0	α	

ที่มา : ไทโรจน์ วิริยจारी (2544)

2) Composite designs จาก Fractional Factorial

ในการออกแบบ Composite designs จุดของการออกแบบการทดลองจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อ n ถูกเพิ่ม ดังนั้นการออกแบบ Composite designs ที่ต้องการคือ 2^n Factorial designs ที่ถูกแทนด้วย Fractional ที่ทำซ้ำของ 2^n เพื่อเป็นไปตามจุดมุ่งหมายของ Composite designs การทำ Fractional replications ควรจะถูกออกแบบเพื่อให้เกิดการประมาณค่าทั้งหมดของผลเชิงเส้นตรงและผลเชิงเส้นโค้ง และผลของปฏิกริยาสัมพันธ์บางส่วนในรูปแบบหุ่นลำดับที่สอง เพื่อให้บรรลุความสำเร็จนี้การทำ Fractional replication จะต้องไม่มี Main effect ถูก Confound กับค่าเฉลี่ยจากการออกแบบ Fractional replication composite designs

3) การจัดการออกแบบ Composite design ใน Blocks

เพื่อให้เกิดความเที่ยงตรงมากขึ้น และด้วยเหตุผลในทางปฏิบัติการออกแบบจะถูกจัดการในลักษณะ Block ซึ่งขนาดจะน้อยกว่าจำนวนของจุดการออกแบบการทดลอง การออกแบบ Composite design สามารถทำได้ง่ายในลักษณะที่เรียกว่า Orthogonal blocking arrangement การจัดการบล็อกคอกโรกอนอล จะทำเพื่อสัมพันธ์ของรูปแบบหุ่นการตอบสนองให้เป็นอิสระต่อบล็อกที่แตกต่างกัน การออกแบบ Composite designs ประกอบด้วย n_c จุดที่จุดยอดของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ซึ่งตรงกับการออกแบบ 2^n Factorial หรือ Fraction ที่เหมาะสมของมัน นอกจากนี้ยังประกอบด้วยจุดบนแกน $2n$ และจุดกึ่งกลาง 1 จุด ที่ทำซ้ำ n_0 ครั้ง ชุดของการออกแบบหุ่นลำดับที่หนึ่ง ชุดดังกล่าวทั้งสองของการออกแบบ Composite designs จะถูกกำหนดในบล็อกที่แตกต่างกัน จุดกึ่งกลางจะถูกทำซ้ำในแต่ละบล็อกย่อยเท่าที่จำเป็นเพื่อให้บล็อกเป็น Orthogonal ให้ n_{c0} และ n_{a0} แทนจำนวนซ้ำของจุดกึ่งกลางที่กำหนดในส่วนของสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และส่วนบนแกน ตามลำดับ ดังนั้นการออกแบบ Orthogonal blocking ของการออกแบบ Composite designs จึงเป็นไปตามที่ประสงค์

4) ขั้นตอนการทำ RSM

4.1) การเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม

ขั้นตอนการทำและการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะทำได้ง่ายขึ้น ถ้าผู้วิจัยเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสม เช่น แผนการทดลองแบบ Central composite design (CCD), Box Behnken design เป็นต้น

เนื่องจากไม่ทราบรูปแบบความสัมพันธ์ที่แท้จริงโดยทั่วไปนิยมประมาณรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระด้วยโพลีโนเมียลอันดับสองโดยนิยมใช้แผนการทดลองแบบ CCD ซึ่งมีลักษณะตัวอย่างเป็นทรงกลม (Sphere) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน (Box and Wilson, 1951) คือ

1) แฟคทอเรียล (Factorial points; n_f)

ประกอบด้วยส่วนแฟคทอเรียลพอยท์ที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ คือ -1 (แทนระดับต่ำ) และ $+1$ (แทนระดับสูง) โดย $n_f = 2^k$ แฟคทอเรียลพอยท์นั้นถูกนำไปใช้ในการประมาณค่า β_i และ β_{ij} เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$(X_1, X_2, \dots, X_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1) \quad (8)$$

2) สตาร์พอยท์หรือแอกเซียลพอยท์ (Star หรือ Axial point; n_s)
ประกอบด้วยข้อมูลที่มีตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางด้วยระยะทางที่เท่ากัน คือ ระยะ α โดย $n_s = 2k$ สตาร์พอยท์นั้นถูกนำไปใช้ในการประมาณค่า β_{ii} เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ดังนี้

$$(\pm \alpha, 0, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, \pm \alpha) \quad (9)$$

3) จุดศูนย์กลาง (Center points; n_c)
เป็นส่วนที่ใช้เพื่อช่วยสำหรับการทดสอบความเหมาะสมที่จุดศูนย์กลางเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ดังนี้

$$(X_1, X_2, \dots, X_k) = (0, 0, \dots, 0) \quad (10)$$

ดังนั้นจำนวนการทดลอง (Design size; N) ของแผนการทดลองแบบ CCD คือ $n_f + n_s + n_c$ หรือเท่ากับ $2^k + 2k + n_c$

ตารางที่ 2.2 แนวทางในการเลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมจากจุดประสงค์ของการทดลอง

จำนวนปัจจัย	จุดประสงค์การทดลอง		
	การเปรียบเทียบแต่ละปัจจัย	การคัดกรองปัจจัยที่ศึกษา	การสร้างพื้นผิวตอบสนองเพื่ออธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษากับตัวแปรตาม
1	1-factor completely randomized design	-	-
2-4	Randomized block design	Full factorial, Fractional factorial	Central composite design, Box-Behnken
5 หรือ มากกว่า	Randomized block design	Fractional factorial, Plackett- Burman	Screen first

ที่มา: Myers and Montgomery (2002)

4.2) การสร้างตัวแบบด้วยวิธีวิเคราะห์ความถดถอย

การวิเคราะห์แบบถดถอยเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองประเภทที่ศึกษา คือ ตัวแปรตามนิยมใช้สัญลักษณ์ Y และตัวแปรอิสระนิยมใช้สัญลักษณ์ X โดยมุ่งเน้น

ที่จะพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยค่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient) การหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยจะทำได้หลังจากที่ได้สร้าง หรือกำหนดตัวแบบความสัมพันธ์ของสมการ ในแผนการทดลองแบบ RSM มีตัวแบบอยู่ 4 ตัวแบบ คือ Linear model, Linear+ Interaction model, Linear + Square model และ Full quadratic model

1) วิธีการพิจารณาความเหมาะสมของสมการ

การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ RSM ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม และตัวแปรอิสระมีอยู่ 4 ตัวแบบ ดังที่ได้กล่าวมา ดังนั้นการนำตัวแบบใดมาใช้ อธิบายความสัมพันธ์จะต้องมีหลักการในการเลือกสมการที่มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error; SE) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) มีหลักการดังนี้

- พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานมีค่าน้อยแสดงว่าสมการที่นำมาใช้มีความเหมาะสมค่อนข้างมาก ในกรณีที่ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ค่าเท่ากับศูนย์แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมดีมาก

- พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจคำนวณได้จากสมการที่ 12 มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 สมการที่ดีควรจะได้สัมประสิทธิ์การตัดสินใจเข้าใกล้ 1 หรือเท่ากับ 1 แสดงว่า ตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี ค่า R^2 (adj) คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้วใช้ประกอบการพิจารณาเมื่อข้อมูลมีจำนวนน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$R^2 = 1 - \frac{(SS_{\text{residual}})}{(SS_{\text{model}} - SS_{\text{residual}})} \quad (11)$$

โดย

SS residual คือ ผลบวกกำลังสองของ residual error

SS model คือ ผลบวกกำลังสองของแบบจำลอง regression

$$R^2 \text{ (adj)} = 1 - \frac{(n-1)}{(n-k-1)} \times (1 - R^2) \quad (12)$$

โดย

n คือ จำนวนการทดลอง

k คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ในแบบจำลอง

2) วิธีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β_i)

เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่นำมาใช้ในสมการสามารถนำมาพยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมีการทดสอบ 2 ลักษณะดังนี้

- การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อม ๆ กันโดยกำหนดสมมติฐานทางสถิติดังนี้

$$H_0 : \beta_i = \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \text{ หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F-test หรือค่า p value ก็ได้โดยผู้ทดสอบจะต้องกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) มาก่อน ถ้า p value มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญจะตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 คือ ตัวแปรอิสระทุกตัวในสมการไม่สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้ แต่ถ้า p value มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญจะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (ยอมรับสมมติฐาน H_1) แสดงว่ามีตัวแปรอิสระในแบบจำลองอย่างน้อย 1 ตัว สามารถใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้

- การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระแต่ละตัวโดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$$H_0 : \beta_i = 0 \text{ หรือตัวแปรอิสระที่ } i \text{ ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

$$H_1 : \beta_i \neq 0 \text{ หรือตัวแปรอิสระที่ } i \text{ มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม}$$

สถิติที่ใช้ทดสอบคือ t-test หรือค่า p value ก็ได้โดยผู้ทดสอบกำหนดระดับนัยสำคัญถ้า p value ของตัวแปรที่ i มีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญจะตัดสินใจยอมรับสมมติฐาน H_0 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม แต่ถ้า p value ของตัวแปรที่ i มีค่าต่ำกว่าระดับนัยสำคัญจะตัดสินใจปฏิเสธสมมติฐาน H_0 (ยอมรับสมมติฐาน H_1) แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

4.3 การสร้าง Surface plot หรือ Contour plot จากสมการ

การสร้าง Surface plot หรือ Contour plot เพื่อศึกษารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับตัวแปรอิสระเพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอิสระตัวต่อตัวแปรตามในช่วงที่ทำการศึกษาเพื่อแนวโน้มและอธิบายผลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวต่อตัวแปรตาม

4.4 การตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสม (Optimization)

การตรวจสอบจุดหรือช่วงที่เหมาะสมเพื่อหาเงื่อนไขของปัจจัยต่าง ๆ ในระบบที่ทำให้ได้ค่าของตัวแปรตอบสนองที่ดีที่สุดตามที่ผู้ทดลองต้องการ

4.5 การพิสูจน์สมการตัวแบบที่สร้างได้

โดยการใช้จุดที่อยู่ในบริเวณช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรอิสระเพื่อนำไปทำการทดลองอีกครั้งแล้ววัดค่าตัวแปรตามเพื่อตรวจสอบกับตัวแปรตามที่ได้จากสมการว่ามีความ

ใกล้เคียงกันหรือไม่ หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการเปรียบเทียบค่าสังเกตที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายผลที่เหมาะสม) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอยที่ไม่เหมาะสมให้เริ่มต้นทดลองใหม่เพื่อให้ได้ข้อมูลมาสร้างสมการใหม่ที่เหมาะสม

5) วิธีการพื้นผิวตอบสนองโดยโปรแกรม

Design-Expert, Mimi TAB เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่เป็นที่สนใจของนักวิจัยผลที่ตามมาคือ นักวิจัยสามารถที่จะหาสูตร หรือสภาวะที่เหมาะสมจากความสัมพันธ์เหล่านั้นได้ เมื่อพิจารณาตัวแปรที่สนใจเหล่านั้นพร้อมๆกันโดยความรู้พื้นฐานที่ต้องใช้คือ การวางแผนการทดลอง การวิเคราะห์สมการถดถอย และความรู้ในการใช้โปรแกรมที่สร้าง Contour plot เช่น STATISTICA หรือไม่ได้เพราะโปรแกรม Design -Expert เองก็สามารถสร้าง Contour plot ได้เหมือนกันแต่ไม่ค่อยสวยงาม สามารถสรุปขั้นตอนการทำ RSM จากโปรแกรมได้ดังนี้

5.1 เลือกแผนการทดลองที่เหมาะสมที่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้าง Contour plot

แผนการทดลองที่เหมาะสมที่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้าง Contour plot สำหรับแผนการทดลองที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่สนใจเหล่านั้นพร้อมๆกัน เช่น แผนการทดลอง Box-Behnken (Box & Behnken, 1960) และ CCD เป็นต้น

5.2 สร้างสมการ Regression ที่ดีที่สุดโดย

1) การวิเคราะห์ความเหมาะสมของสมการ

ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแปรตามด้วยตัวแปรอิสระอาศัยสมการ 4 ตัวแบบ คือ Linear model, Linear + interaction model, Full quadratic model และ Cubic model ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

$$Y = \text{Full quadratic model} + \sum_{i=1}^k \beta_{iii} X_i^3 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ijj} X_i^2 X_j + \beta_{ijk} X_{ijk} + \epsilon \quad (13)$$

โดย

Y คือ ตัวแปรตอบสนอง

X_i^3 , $X_i^2 X_j$ และ X_{ijk} คือ ตัวแปรอิสระ

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

β_{iii} ($i = 1, 2, \dots, k$) คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของเทอม X_i^3

β_{ijj} ($i = 1, 2, \dots, k$ และ $j = 1, 2, \dots, k$) คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของเทอม $X_i^2 X_j$

β_{ijk} คือ สัมประสิทธิ์การถดถอยของเทอม X_{ijk}

ϵ คือ ค่าคลาดเคลื่อนสุ่ม

พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้วเพื่อเลือกสมการที่เหมาะสม

2) การวิเคราะห์หัยสำคัญของสมการ

การวิเคราะห์หัยสำคัญของสมการ คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการที่เหมาะสมจาก 1) เป็นการวิเคราะห์หัยสำคัญจากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมกัน โดยพิจารณาผลรวมกำลังสองทั้งหมด (SS_T : Total sum of squares) มีค่าเท่ากับผลบวกระหว่างผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบ (SS_R : Sum of squares due to regression) กับผลรวมกำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อนจากส่วนตกค้าง (SS_E : Sum of squares due to residual error)

$$SS_T = SS_R + SS_E \quad (14)$$

สถิติที่ใช้ทดสอบสมมติฐาน คือ F value (ตารางที่ 2.2) โดยเปรียบเทียบ F value ที่คำนวณกับ F value จากตาราง แล้วพิจารณาว่าตกบริเวณวิกฤตหรือไม่ กรณีปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามนำไปใช้ในตัวแบบได้ หรือ พิจารณาค่า P value ถ้ามีค่าน้อยกว่าระดับหัยสำคัญที่กำหนด สรุปได้ว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อย 1 ตัว ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตามนำไปใช้ในตัวแบบได้ (Myers & Montgomery, 2002)

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแบบเพื่อคำนวณหาค่าสถิติ F value โดย $k =$ จำนวนสัมประสิทธิ์ และ $n =$ จำนวนการทดลอง

Sources of variation	Sum of squares	DF	Mean square	F value
Regression	SS_R	k	MS_R	MS_R/MS_E
Residual Error	SS_E	$n-k-1$	MS_E	
Total	SS_T	$n-1$		

ที่มา : Myers & Montgomery (2002)

3) การวิเคราะห์หัยสำคัญของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระ

การทดสอบหัยสำคัญของอิทธิพลของตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตาม โดยพิจารณาค่า 95% CI Low และ 95% CL High ร่วมกันถ้าเป็นช่วงที่ครอบคลุม 0 และค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแต่ละตัวแปรอิสระมีค่าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ i ไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม เมื่อวิเคราะห์ค่าทางสถิติเพื่อสมการ Regression ที่ดีที่สุด หลังจากนั้นจะวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอิสระต่อตัวแปรตาม โดยการสร้าง Contour plot และ Surface plot พร้อมทั้งหาสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

5.3 การสร้าง Contour plot และ Surface plot จากสมการที่หามาได้

การแสดงผลผิวตอบสนองในรูปของกราฟ Contour plot และ Surface plot เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวต่อตัวแปรตามในช่วงที่ทำการศึกษาเพื่อดูแนวโน้มและอธิบายผลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวต่อตัวแปรตาม

5.4 การหาสถานะที่เหมาะสม

การตรวจสอบความถูกต้อง (Verification) และการหาสถานะที่เหมาะสมทางสถิติ โดยโปรแกรม เป็นการนำ Desirability functions มาใช้ในการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม (Myers and Montgomery, 2002) มีสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ Desirability function, ค่าเป้าหมาย (T_i), ค่าขอบล่าง (Low limit) และขอบเขตบน (High limit) ของตัวแปรตอบสนองและตัวแปรอิสระและค่า Weight (wt) สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) Desirability function

ค่า Desirability function เป็นการคิดผลการตอบสนองที่พิจารณาเพียงตัวแปรเดียว หรือหลายตัวแปรพร้อมกัน (Multiple response method) เขียนแทนรูป D มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 โดยเลือกสถานะ (Solution) ที่มีค่า D มากที่สุดเป็นสถานะที่เหมาะสม สูตรการคำนวณค่า D แสดงดังสมการ 15

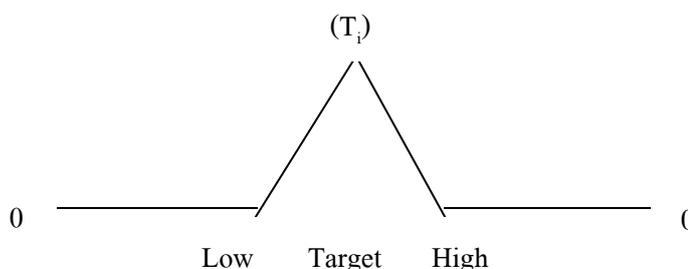
$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times \dots \times d_n)^{1/n} \quad (15)$$

โดย

D คือ ค่า Desirability functions เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองหลายตัวแปรพร้อมกัน n ตัว
 d_i คือ ค่า Desirability functions เมื่อพิจารณาผลการตอบสนองเพียงตัวแปรเดียว

2) ค่าเป้าหมาย

เนื่องจากวัตถุประสงค์ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตจะต้องมีการกำหนดค่าเป้าหมายที่ผู้วิจัยต้องการ เพื่อให้ได้ค่าตอบสนองที่สถานะที่เหมาะสมมีค่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่กำหนดมากที่สุดต้องกำหนดแบบ Is target โปรแกรมจะคำนวณสถานะที่เหมาะสมโดยค่า d_i พิจารณาได้เป็น 4 กรณี ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ค่า Desirability functions เมื่อเลือกค่าเป้าหมาย Is target
 ที่มา : Myers & Montgomery (2002)

หมายเหตุ	T_i คือ ค่าเป้าหมาย
	Low คือ ขอบเขตล่าง
	High คือ ขอบเขตบน
	$d_i = 0$ เมื่อ Y_i มีค่า \leq ขอบเขตล่าง
	$0 \leq d_i \leq 1$ เมื่อ Y_i มีค่าอยู่ระหว่างขอบเขตล่างกับค่าเป้าหมาย
	$1 \geq d_i \geq 0$ เมื่อ Y_i มีค่าอยู่ระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าขอบเขตบน
	$d_i = 0$ เมื่อ Y_i มีค่า \geq ขอบเขตล่าง

3) ค่าขอบล่างและขอบเขตบนของค่าตัวแปรตอบสนองและตัวแปรอิสระ

เนื่องจากการหาสถานะที่เหมาะสมมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่า Y_i เข้าใกล้ค่าเป้าหมายมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าขอบเขตล่าง และขอบเขตบนของตัวแปรตอบสนองและตัวแปรอิสระที่เราสนใจเพื่อใช้เป็นเงื่อนไข (Constraints) ในการพิจารณาสถานะที่เหมาะสม

4) ค่า Weight (wt)

ค่า Weight เป็นตัวกำหนดรูปแบบของ Desirability functions เพื่อหาสถานะที่เหมาะสมในการผลิตโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-10 นิยมกำหนดให้เป็น 1

สรุปได้ว่าการหาสถานะที่เหมาะสมต้องกำหนดเงื่อนไขในการพิจารณา คือ ค่าเป้าหมาย ค่าขอบเขตล่างและขอบเขตบนของค่าตัวแปรตอบสนองและตัวแปรอิสระและค่า Weight ก่อน หลังจากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลโดยเลือกสถานะที่ค่า Desirability functions เข้าใกล้ 1 มากที่สุด เป็นสถานะที่เหมาะสม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อิสรา อีระวัฒน์สกุล และ เรืออากาศเอกเทพนิมิต สิทธิศักดิ์ (2552) จากการตรวจประเมินเบื้องต้น พบว่า ทรัพยากรที่มีสัมประสิทธิ์ของปริมาณการใช้งานสูงในการผลิตลูกชิ้นมาจากน้ำและน้ำมัน จากการประเมินละเอียด พบว่า ในโรงงานปัจจุบันมีการใช้น้ำมันสำหรับหม้อต้มไอน้ำเพื่อสร้างเป็นพลังงานความร้อนที่ใช้ในกระบวนการผลิตลูกชิ้น สำหรับกระบวนการนี้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนมาก จึงมีกระบวนการ ปรับปรุงด้วยการหุ้มฉนวนหม้อต้ม ตลอดจนอุดรอยรั่วไหลของท่อส่งไอน้ำทำให้สามารถประหยัดการใช้น้ำมันได้ถึง 63.08 ลิตรต่อปีและมีระยะเวลาคืนทุน 1.5 เดือน ส่วนประเด็นน้ำได้มีกระบวนการปรับปรุงด้วยการใช้ปืนฉีดน้ำแรงดันสูง ที่สามารถควบคุมการเปิดปิดได้และกำหนดปริมาณน้ำในการต้มให้มีมาตรฐาน พบว่า สามารถประหยัดการใช้น้ำได้ถึง 650 ลูกบาศก์เมตรต่อปีและมีระยะเวลาคืนทุน 4.2 เดือน ในส่วนการปรับปรุงกระบวนการให้สอดคล้องกับระบบจีเอ็มพีนั้นแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่การฝึกอบรม พนักงาน การปรับปรุงโครงสร้างสถานประกอบการ และการพัฒนาระบบเอกสารหลังดำเนินการ พนักงานมีความรู้ความเข้าใจในหลักการจีเอ็มพีเพิ่มขึ้น แต่โรงงานยังไม่มีความพร้อมในการปรับปรุงโครงสร้างอาคาร เนื่องจากสถานะ

เศรษฐกิจไม่เอื้ออำนวยในปัจจุบัน และมีการทำเอกสารและบันทึกผลการปฏิบัติงานต่าง ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับหลักการจีเอ็มพี

Chen, et al., 2015 ได้นำข้าวกล้องไปปรับพลาสมาความดันต่ำที่กำลัง 1-3 kV เป็นเวลา 10 นาที ทำให้เพิ่มอัตราการเจริญของข้าวงอก ความยาวของกล้าไม้และอัตราการดูดซับน้ำ โดยที่ 3 kV จะให้ผลที่ดีที่สุด ในข้าวกล้องงอกการทำงานของแอลฟาอะไมเลสจะสูงกว่ากลุ่มควบคุม พลาสมาความดันต่ำจะเพิ่มปริมาณ GABA จาก 19 เป็น 28 mg/100 g และอัตราการต้านอนุมูลอิสระ

Gadri, R.B., et al. 2000 เทคนิค One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma(OAUGDP) ได้ถูกนำมาใช้ในการฆ่าเชื้อและลดการปนเปื้อนที่พื้นผิว เทคนิค OAUGDP เป็นพลาสมาที่ไม่เกิดความร้อน ไฟฟ้ากระแสตรงในอากาศและร่วมกับก๊าซอื่นที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิห้อง และนำชิ้นงานไปปรับกับพลาสมาโดยตรง เป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ต้นทุนต่ำและสามารถสั่งงานออนไลน์ได้กับชิ้นงานที่เป็น 3 มิติ และพื้นผิวที่หลากหลายโดยสามารถนำมาใช้งานกับชิ้นงานที่มีขนาดมากกว่า 20 เซนติเมตร

Table 1
Results of the OAUGDP on a variety of microorganisms

Microorganisms (Concentration)	Surface ^a	Exposure time	Log reduction of cells	D values ^b
Gram negative bacteria				
<i>E. coli</i> K12 (8×10^6)	polypropylene	24 s	≥ 5	D ₁ = 6 s D ₂ = 2 s
<i>E. coli</i> K12 (2×10^3)	glass	70 s	≥ 2	D ₁ = 33 s D ₂ = 7 s
<i>E. coli</i> O157:H7 (9×10^3)	glass	76 s	≥ 2	D ₁ = 36 s D ₂ = 11 s
<i>E. coli</i> K12 (8×10^7)	agar	300 s	≥ 7	D ₁ = 70 s D ₂ = 26 s
<i>P. aeruginosa</i> (2×10^7)	polypropylene	30 s	≥ 6	ND ^c
Gram positive bacteria				
<i>S. aureus</i> (1×10^7)	polypropylene	22 s	≥ 6	D ₁ = 7 s D ₂ = 2 s
<i>Deinococcus radiodurans</i> (1×10^7)	glass	45 s	≥ 2	D ₁ = 5 s D ₂ = 4 s
<i>Bacillus subtilis</i> (1.5×10^4)	glass	60 s	≥ 3	D ₁ = 13 s D ₂ = 10 s
<i>Bacillus stearothermophilus</i> endospores (1×10^6)	nitrocellulose	5.5 min	≥ 5	ND
<i>Bacillus pumilus</i> spores (1×10^6)	paper	2.4 min	≥ 4	D ₁ = 1.8 min D ₂ = 12 s
<i>Bacillus subtilis niger</i> spores (1×10^6)	paper	4 min	≥ 4	D ₁ = 5.5 min D ₂ = 12 s
Yeast				
<i>S. cerevisiae</i> (1.5×10^6)	glass	4.3 min	≥ 5	D ₁ = 3 min D ₂ = 30 s
<i>C. albicans</i> (1.5×10^6)	glass	2.3 min	≥ 5	D ₁ = 2.1 min D ₂ = 30 s
Viruses				
Bacteriophage Phi X 174 (1×10^8)	lyophilized	9 min	≥ 6	ND

^aPolypropylene was used to simulate microorganisms deposited on porous surfaces and glass were representative of non-porous surfaces.

^bD value is described as the time necessary to reduce the population of cells one log or 90%. These values were determined from plots of the number of survivors versus time.

^cNot determined.

Grzegorzewski, et al.,(2011) การฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ด้วย non-thermal plasma เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับ แต่ผลข้างเคียงที่มีต่อความเสื่อมคุณค่าทางอาหารยังไม่ปรากฏเด่นชัด จึงได้ศึกษาถึง Atmospheric pressure plasma jet ในเนื้อแกะ เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของฟีนอลิก ปริมาณฟลาโวนอยด์ไม่ได้เกิดจาก photo – thermodesorption และ Diosmetin ของเนื้อแกะในกะหล่ำเพิ่มขึ้น ความเสื่อมของกรดฟีนอลิก พลาสมาจะส่งผลต่อปฏิกิริยารีดักชันของกะหล่ำในเนื้อแกะ ขณะที่ความเข้มข้นของโมโนฟีนอลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในเวลาเดียวกัน การใช้ Plasma และ UV จะส่งผลต่อการเสื่อมสลายของผนังเซลล์ เวลาเป็นปัจจัยที่ขึ้นกับลักษณะของพื้นผิวเนื้อแกะโดยใช้ Scanning electron microscope

Gurul, et al.,(2012) ได้ศึกษาการใช้ Low Temperature Plasma ในการฆ่าเชื้อ E.coli ในนมดิบที่ปริมาณไขมันแตกต่างกัน ผลของเวลาในกระบวนการที่ไฟฟ้ากระแสสลับ 9 kV ใน Whole milk , semi Skimmed และ Skimmed milk พลาสมาถูกใส่เข้ามาที่เวลา 0 , 3 , 6 , 9 ,12 , 15 และ 20 นาที สามารถลดปริมาณ E.coli ได้ร้อยละ 54 ที่เวลา 3 นาทีเป็นต้นไป ปริมาณแบคทีเรียก่อนเข้าพลาสมา 7.78 Log CFU/ml ลดลงเหลือ 3.63 Log CFU/ml หลังจากเวลา 20 นาที LPT ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง pH และค่าสีของนมดิบ

Kim et al., 2015 Corona Discharge Plasma Jet(CDPJ) ถูกนำมาใช้เพื่อลดการปนเปื้อนบนพื้นผิวอาหารแห้งและอาหารพร้อมบริโภค (Ready-to-eat)จากการปนเปื้อน aerobic bacteria, รา และเชื้อจุลินทรีย์จากทะเลบนพื้นผิวอาหารย่อยแห้ง Corona Discharge Plasma Jet(CDPJ) ที่ 20 kV DC ความถี่ 58 kHz. เวลาการฉายที่ 20 นาที สามารถลดเชื้อจุลินทรีย์ได้มากกว่า 2log ร้อยละ 99 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าสีของผลิตภัณฑ์ ปริมาณฟีนอลิกรวมและการต่อต้านอนุมูลอิสระ (DPPH radical scavenging activity) รวมทั้งรสชาติทางประสาทสัมผัส แต่สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้

Kittiya,et al.,(2013) ได้ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานของ Cold Atmospheric Plasma เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของ *Aspergillus flavus* บนอาหารเลี้ยงเชื้อและขนมขบเคี้ยวชนิดแห้งจากข้าวกล้อง ผลของการใช้อาร์กอนต่อการเจริญของเชื้อ *A.flavus* ที่กำลัง 20 - 40 Watt เป็นเวลา 5,15 และ 25 นาที ด้วยวิธีการตอบสนองของพื้นผิวแบบ CCF (Central composite face-centered design) พบว่า ที่กำลังของพลาสมาที่ 40 watt เวลา 25 นาทีสามารถยับยั้งการเจริญของ *A.flavous* ได้ดีที่สุด ส่วนขนมขบเคี้ยวชนิดแห้งจากข้าวกล้องกำลังของพลาสมาที่ 40 watt เวลา 20 นาที สามารถป้องกันการเจริญของ *A.flavous* เป็นเวลามากกว่า 20 วันภายใต้สภาวะการเก็บที่ 25°C และร้อยละ 100RH

Puligundla, et al. (2015) Low Pressure Air Plasma(LPAP) ถูกใช้ยับยั้งผลของการปนเปื้อนบนพื้นผิวของอาหารศึกษาด้านจุลนาศาสตร์และลักษณะทางเคมีกายภาพ และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของ kimbab(rice rocked in laver) สภาวะของ LPAPที่ความดัน 133.3 Pa ความหนาแน่นของพลังงาน 54.1 mW/cm³ ซึ่ง LPAP สามารถลด aerobic bacteria 1 log cycle ที่เวลา 20 นาที เป็นไปตามแบบจำลอง Singh-Heldman หรือ pseudo-first-order kinetics ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสี ปริมาณฟีนอลิกรวม และ DPPH รวมทั้งลักษณะทางประสาทสัมผัสของ kimbab

Sara, et al. (2015) ได้ศึกษาศึกษาคุณภาพของ Cold Atmospheric Pressure Plasma (CAPP) ต่อวัตถุติดอาหารแห้งที่มีลักษณะผง โดย CAPP จะส่งผลต่อโปรตีนและคุณลักษณะเชิงหน้าที่ของแป้ง การทดลองนี้จะใช้แยกโปรตีนแล้วต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำและไขมันในแป้งด้วยวิธีอัตรการเพิ่มขึ้นร้อยละ 113 และร้อยละ 116 ตามลำดับ แป้งที่ผ่าน CAPP ประสิทธิภาพการละลายจะเพิ่มขึ้นร้อยละ 191 การตรวจสอบโปรตีนทริปโตฟานด้วย Fluorescence จะเพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่น 328 nm แต่จะลดลงที่ 355 nm แสดงให้เห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโปรตีน

Sarangapaniet al.,(2015) ศึกษาผลของ Low pressure cold plasma ต่อองค์ประกอบในอาหาร การทำอาหาร และลักษณะของเนื้อสัมผัสของข้าวหนึ่งเป็นเวลาและกำลังไฟฟ้าต่าง ๆ ข้าวหนึ่งที่ผ่านกระบวนการพลาสมาแล้วจะสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นและลดเวลาในการทำอาหารถึง 8 นาที ลักษณะเนื้อสัมผัสจะถูกลดความแข็ง ความเหนียวลง เมื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าและเวลามากขึ้น ลักษณะพื้นผิวข้าวหนึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่พื้นผิวและมุมสัมผัส

Rodet et al., (2012) มีการศึกษาการนำ CAPP ไปลดการปนเปื้อนเชื้อ *Listeria innocua* ในผลิตภัณฑ์เนื้อ(bresaola)พร้อมบริโกล โดยตัวอย่างที่ถูกปนเปื้อนในถุง LLDPE สภาวะ ออกซิเจน ร้อยละ 30 และอาร์กอนร้อยละ 70 จะถูกนำมาเข้า CAPP ที่ 15.5 , 31 และ 62 วัตต์ เป็นเวลา 2-60 วินาที ผลการทดลอง พบว่า สามารถลด *L.innocua* ได้จาก 0.8 ± 0.4 เป็น 1.6 ± 0.5 log cfu/g โดยไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากเวลา และกำลังไฟ ขณะที่การทรีตที่ 15.5 และ 62 Watt เวลา 20 วินาที จะเพิ่มการลดลงของ *L.innocua* ความเข้มข้นของ TBARS จะเพิ่มขึ้นกับการเพิ่มของกำลังไฟและเวลาการเก็บจะมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับตัวควบคุมหลังจากการเก็บ 1 - 14 วัน ที่อุณหภูมิ 5°C คุณลักษณะทางประสาทสัมผัสจะลดลง เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีผิว สีแดงจะเกิดการสูญเสียร้อยละ 40 ในวันแรกของการเก็บรักษาและเกิดการสูญเสียสีแดงร้อยละ 70 ในวันที่ 14 ของการเก็บรักษา

กรอบแนวคิดในการวิจัย

