

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุไทเทเนียม

ไทเทเนียมผลิตจากไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) โดยการเปลี่ยน TiO_2 ให้เป็น ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ (TiCl_4) และจะถูกเปลี่ยนไปเป็นโลหะไทเทเนียมอีกต่อไปโดยใช้โซเดียมหรือแมกนีเซียมเป็นตัวลดคลอไรด์ ไทเทเนียมที่ได้จะจับตัวกันเป็นก้อนมีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (Sponge) จะถูกนำไปหลอมเพื่อทำเป็นไทเทเนียมบริสุทธิ์หรือโลหะผสมต่อไปโดยกระบวนการหลอมแบบอาร์คในสุญญากาศ ไทเทเนียมมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนที่ดีมาก มีความแข็งแรงสูง และมีคุณสมบัติหลายอย่างดีมากที่อุณหภูมิสูง ความแข็งแรงอาจมีได้สูงถึง 200,000 psi ความหนาแน่น $4,505 \text{ g/cm}^3$ มีสมบัติทางกลที่ดีเยี่ยม ไทเทเนียมเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ TiO_2 ที่เป็นฟิล์มบางๆ ปกป้องผิวซึ่งทนการกัดกร่อนได้ดีมากจนถึงอุณหภูมิ 535°C หากอุณหภูมิสูงกว่านี้ ออกไซด์ฟิล์มจะถูกทำลายและอะตอมของคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน หรือไฮโดรเจน จะทำให้ไทเทเนียมเกิดการแตกร้าวขึ้นได้ เนื่องจากไทเทเนียมทนการกัดกร่อนได้ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์ที่ต้องเกี่ยวข้องกับสารเคมี อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับน้ำทะเล ชิ้นส่วนอวัยวะเทียมหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ที่ถูกฝังไว้ในร่างกายมนุษย์ เช่น ข้อต่อสะโพก [6]

2.2 การเคลือบฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง หมายถึง ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่มาจับรวมกันเป็นชั้นบางๆ โดยขนาดความหนาของฟิล์มที่จะระบุว่าเป็นฟิล์มบางนั้นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้มีวิธีระบุว่าฟิล์มมีความหนาเท่าใดจึงเรียกว่าฟิล์มบางโดยพิจารณาจากการใช้งานฟิล์มนั้นว่าใช้งานด้วยสมบัติด้านใด กล่าวคือถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิวก็จะเรียกฟิล์มนั้นว่าฟิล์มบาง (Thin film) แต่ถ้าใช้ฟิล์มนั้นด้วยสมบัติเชิงปริมาตรก็จะเรียกว่าฟิล์มหนา (Thick film) ซึ่งจะพบว่าฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็น ฟิล์มบาง หรือ ฟิล์มหนา ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ [7] พื้นฐานของขั้นตอนการเคลือบฟิล์มคือ ฟิล์มบางนั้นเป็นการเรียงตัว (Fabricated) โดยการตกเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบจากเป้าสารเคลือบ (Target) ในลักษณะของอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) โดยฟิล์มที่ได้จะบางมาก ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ฟิล์มในด้านต่างๆ มากมาย เช่น อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น สารกึ่งตัวนำ ฟิล์มตัวนำและฟิล์มตัวต้านทานหรืออุปกรณ์ทางแสง เช่น เลนส์ กระจกเลเซอร์ กระจกสะท้อนแสง [8]

กรรมวิธีพีวีดี (PVD = Physical Vapor Deposition) เป็นวิธีการแยกตัวทางฟิสิกส์จากเฟสของไอการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film) ในสุญญากาศ โดยพื้นฐานแล้ว การเคลือบฟิล์มบางคือ การเรียงตัวกันของอะตอมสารเคลือบบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นของสารเคลือบในลักษณะของฟิล์มบาง ซึ่งฟิล์มบางที่เกิดขึ้นนั้นจะบางมาก ซึ่งอาจอยู่ในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร นอกจากนี้ยังสามารถใช้การเคลือบฟิล์มบางในการเตรียมสารตัวอย่างสำหรับใช้ในการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุในรูปของฟิล์มบาง ซึ่งคุณสมบัติบางอย่างไม่สามารถวัดได้เมื่ออยู่ในสภาพเป็นก้อน เพราะฉะนั้นข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาวัสดุเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมโดยกระทำด้วยวิธีการทำเป็นไอในสุญญากาศ วิธีการอะตอมไมเซชัน (Atomization) จะมีการนำโลหะที่จะทำปฏิกิริยาแยกตัว (สภาพของแข็ง) และชิ้นงานให้ไปอยู่ในเตาพร้อมกัน เมื่อมีการทำให้โลหะกลายเป็นไอหรือการทำอะตอมไมเซชันแล้วอะตอมโลหะที่อยู่ในสุญญากาศจะแยกตัวมาเคลือบบนผิวชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550°C ส่วนการประกบด้วยไอออนนั้นจะให้ชิ้นงานเป็นแคโทด (cathode) และวัสดุที่จะเคลือบเป็นแอโนด (Anode) นอกจากนี้ยังจะให้ก๊าซปฏิกิริยา (Reaction gas) เหมือนกับกรรมวิธีซีวีดี (CVD = Chemical Vapor Deposition) เข้าไปแยกตัวในเตาเพื่อมาเคลือบผิวชิ้นงาน วัสดุที่ใช้เคลือบจะใช้ไทเทเนียมไนไตรด์เป็นส่วนใหญ่ [9] การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน ดังนี้คือ

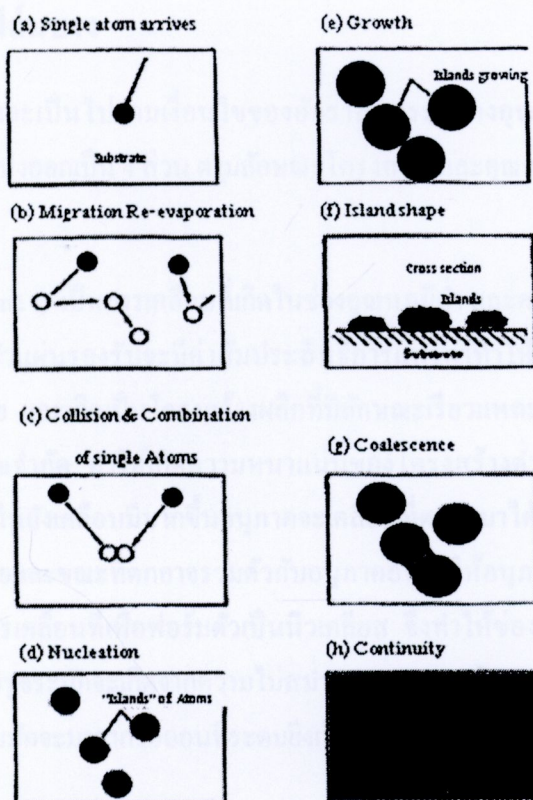
1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของของแข็งของเหลว ไอ หรือก๊าซ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบเกิดเป็นไอระเหยได้คือการให้ความร้อนหรือการระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง

2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมา

3. การควบแน่น (Deposition) เป็นการพอกพูนและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นฟิล์มบางบนวัสดุรองรับส่วนของการควบแน่นและพอกพูนของชั้นฟิล์มบางนั้น จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ [10]

2.3 การก่อเกิดฟิล์มบาง

สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (รูปที่ 2.1 (a)) โดยที่พลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption site) และจะทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (รูปที่ 2.1 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหยกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกัน เมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นกลุ่มอะตอม (รูปที่ 2.1 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมที่อยู่รวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอมหรือสี่อะตอม ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าสถานะการเกิดนิวเคลียส (รูปที่ 2.1 (d)) ทำให้ได้กลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้นโดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (รูปที่ 2.1 (e)) และ (รูปที่ 2.1 (f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งแต่ละกลุ่มชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (รูปที่ 2.1 (g)) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว การรวมกันเข้าเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 2.1 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04-0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบาง ขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะดูคล้ายเนินเขาและหุบเขา



รูปที่ 2.1 แสดงการก่อเกิดฟิล์มบาง [11]

เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสถานะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าอาจเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือกลุ่มของผลึกคู่หรือมากกว่านั้นซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะตกมาเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหลายผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านั้นตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy) ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพออะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลือกเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ และความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น นอกจากนี้การลดอัตรา การเคลื่อนที่ยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้นเพราะอะตอมมีเวลาในการโตมากพอ ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราการเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้นมี ข้อบกพร่องในเกรนน้อยลงและได้ฟิล์มที่มีความหนาพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ [11]

2.4 โครงสร้างของฟิล์มบาง

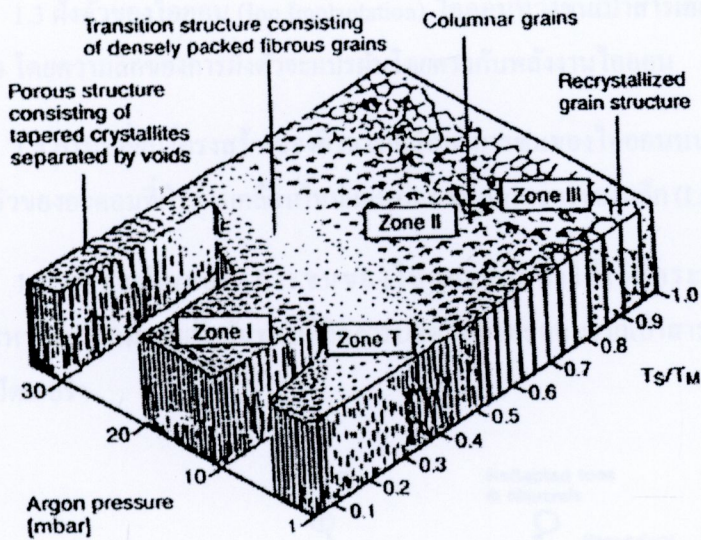
โครงสร้างของฟิล์มบางจะเป็นไปตามเงื่อนไขของอัตราส่วนระหว่างอุณหภูมิเคลือบกับอุณหภูมิหลอมเหลว (T/T_m) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ตามลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพ ดังรูปที่ 2.2

1. บริเวณ 1 (Zone I) เป็นการเคลือบที่เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันก๊าซขณะเคลือบมีค่าสูง อะตอมที่อยู่บนผิวแผ่นรองรับจะมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำทำให้เกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มเล็กๆ การกระจายตัว และเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยาวแหลมแบบ Tapers Crystallites จากนิวเคลียสที่มีปริมาณจำกัด ทำให้เกิดความหนาแน่นของโครงสร้างต่ำ เนื่องจากที่ความดันสูง ความหนาแน่นของก๊าซในถังเคลือบมีมากขึ้นอนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้นทำให้อนุภาคของผิวเคลือบตกลงมาได้น้อยและขณะที่ตกอาจรวมตัวกับอนุภาคอื่นทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องว่างระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่เกิดขึ้นผิวเคลือบที่ขรุขระมักจะเกิดจากความไม่สม่ำเสมอของการโตของนิวเคลียส โดยอุณหภูมิที่มีผลต่อการโตของฟิล์มมักจะมาจากไอออนที่ระดมยังเป็นส่วนใหญ่

2. บริเวณ T (Zone T) เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับการเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์ เกิดในช่วงระหว่างบริเวณ 1 และบริเวณ 2 อะตอมที่อยู่บริเวณผิวรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น ค่า Surface Mobility ก็จะเพิ่มขึ้น และโครงสร้างในบริเวณ 1 ก็จะเข้าสู่บริเวณ T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว (Fibrous Grain) เต็มพื้นที่ และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงขึ้นจึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าเป็นเนื้อเดียวกันจนกลายเป็นคอลัมน์ต่อไปโดยปราศจากช่องว่างบริเวณที่ขอบ

3. บริเวณ 2 (Zone II) เกิดเป็นโครงสร้างคอลัมน์ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนและความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม (มีผลต่อ Surface Mobility ของอะตอม) และขนาดของคอลัมน์จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากการแพร่ที่บริเวณรอยต่อระหว่างขอบคอลัมน์

4. บริเวณ 3 (Zone III) การแพร่จะมีค่าสูง และส่งผลต่อโครงสร้างสุดท้าย โครงสร้างที่ได้จะเป็นเกรนที่มีด้านเท่ากันหมดขนาดของคอลัมน์จะมีขนาดใหญ่ และความหนาแน่นเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงอาจจะทำให้เกิดผลึกใหม่ (Recrystallization) เนื่องจากพลังงานสะสมของความเครียด ที่เกิดขึ้นตั้งแต่ตอนเคลือบ เกรนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนจากคอลัมน์เป็นผลึกเดี่ยว [14]



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างการเกิดฟิล์มในรูปแบบต่างๆ [14]

2.5 กระบวนการสปัตเตอริง

เมื่อผิวหน้าของวัสดุถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงจะทำให้เกิดการสึกกร่อนและมีอนุภาคที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นหลุดมา เนื่องจากการชนของอนุภาคพลังงานสูงกับอนุภาคที่ผิวหน้าปรากฏการณ์ที่อนุภาคผิวหน้าหลุดออกมานี้เรียกว่า สปัตเตอริง (Sputtering) ปัจจุบันมีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางเช่นการทำความสะอาดผิวหน้า (Surface Cleaning) การกัดเซาะ (Etching) สำหรับแนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับกระบวนการสปัตเตอริงอธิบายดังนี้

1. อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบเมื่อวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ดังรูปที่ 2.3

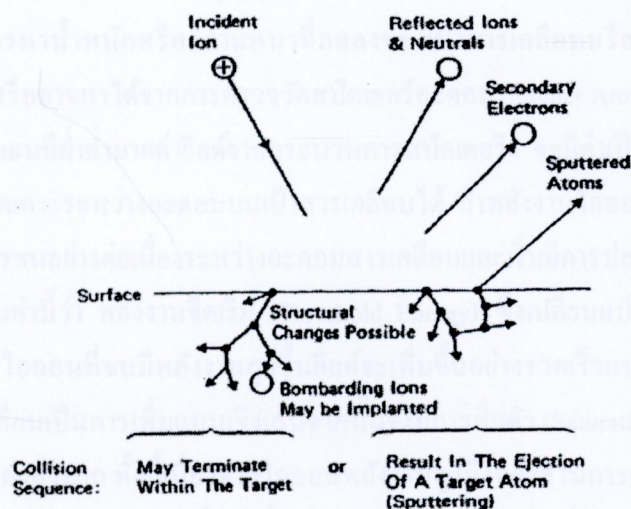
1.1 การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected Ion and Neutral) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ

1.2 การปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สอง (Secondary Electron Emission) จากการชนของไอออนอาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนชุดที่สองจากเป้าสารเคลือบถ้าไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ

1.3 ฟังตัวของไอออน (Ion Implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้นอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออน

1.4 การเปลี่ยนโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของผลึก (Lattice-Defect)

1.5 การสปัตเตอร์ การชนของไอออนอาจทำให้เกิดกระบวนการชนกันแบบต่อเนื่องระหว่างอะตอมของเป้าอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปัตเตอร์



รูปที่ 2.3 แสดงอันตรกิริยาระหว่างไอออนกับพื้นผิววัสดุ [11]

2. กระบวนการสปัตเตอร์เป็นกระบวนการที่อะตอมผิวหน้าของวัสดุถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง โดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิววัสดุดังกล่าว กระบวนการนี้อาจเป็นกลางทางไฟฟ้าหรือมีประจุก็ได้ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นในกระบวนการสปัตเตอร์ คือ

2.1 เป้าสารเคลือบ ทำหน้าที่เป็นเป้าให้อนุภาคพลังงานสูงวิ่งเข้าชนจนมีการปลดปล่อยอะตอมของสารเคลือบลงเคลือบบนวัสดุรองรับ

2.2 อนุภาคพลังงานสูง ซึ่งวิ่งชนเป้าสารเคลือบ แล้วทำให้อะตอมของเป้าสารเคลือบหลุดออกมา วิธีการที่นิยมคือการเร่งอนุภาคประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมระดับ

พลังงานไอออนตามต้องการ อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุชนิดหนึ่งที่ผลิตได้ง่ายและสามารถเร่งให้พลังงานสูงภายใต้สนามไฟฟ้า

2.3 การผลิตอนุภาคพลังงานสูง อนุภาคพลังงานสูงในระบบสปัตเตอริงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มตามต้องการ ทั้งนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออนที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง

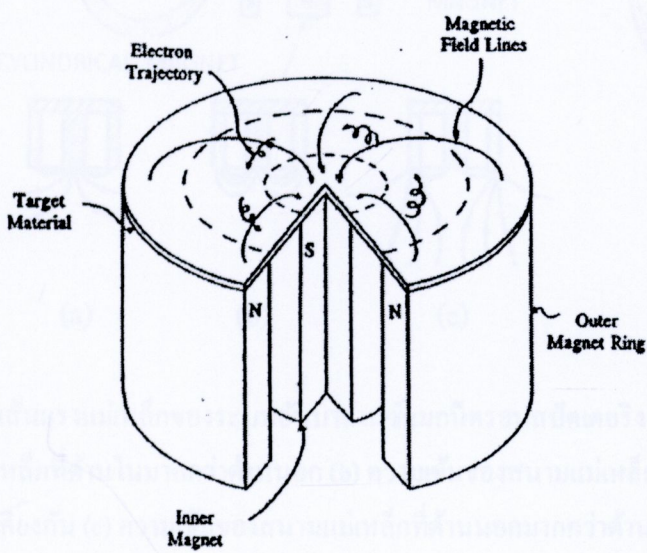
3. ค่าyield ของสปัตเตอริง (Sputtering Yield: S) คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณการหลุดของอะตอมเป่าสารเคลือบต่อปริมาณการชนของไอออน 1 อนุภาคมีหน่วยเป็น อะตอมต่อไอออน โดยการวัดค่าyield นี้ สามารถทำได้โดยการหาน้ำหนักหรือความหนาที่ลดลงของเป่าสารเคลือบหรือหาได้จากวัสดุทั้งหมดที่ถูกสปัตเตอริง หรืออาจหาได้จากการตรวจวัดสปัตเตอริงอะตอม (Sputter Atom) ขณะที่ยังพุ่งกระจาย เมื่อพลังงานไอออนมีค่าต่ำมากค่าyield จากกระบวนการสปัตเตอริง จะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากไม่สามารถเอาชนะแรงยึดเกาะระหว่างอะตอมบนเป่าสารเคลือบได้ ถ้าพลังงานไอออนสูงมากพอในการทำให้เกิดกระบวนการชนอย่างต่อเนื่องระหว่างอะตอมสารเคลือบและเริ่มมีการปลดปล่อยอะตอมสารเคลือบ เรียกพลังงานค่านี้ว่า พลังงานขีดเริ่ม (Threshold Energy) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไประหว่างการชนของอนุภาค เมื่อไอออนที่ชนมีพลังงานสูงขึ้นyield จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ในช่วงแรกและเปลี่ยนเป็นการเพิ่มแบบเชิงเส้นจากนั้นจึงมีการอิ่มตัว (Saturation) ของค่าyield เมื่อพลังงานไอออนมีค่าสูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากไอออนพลังงานสูงมีโอกาสในการฝังตัวบนผิวเป่าสารเคลือบสูงขึ้นyield ของสารเคลือบมีค่าคงที่ จากนั้นจะมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มพลังงานไอออนให้สูงมากขึ้น [12]

2.6 ระบบเคลือบผิวแบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

(DC magnetron sputtering)

อัตราการเกิดสปัตเตอริงนั้นจะขึ้นอยู่กับผลคูณระหว่างyield และปริมาณไอออนที่วิ่งชนเป่าสารเคลือบ ดังนั้นการเพิ่มอัตราการสปัตเตอริงนอกจากจะทำได้โดยการเพิ่มyield แล้วยังทำได้โดยการเพิ่มปริมาณไอออนที่วิ่งเข้าชนเป่าสารเคลือบ ซึ่งในระบบดีซีสปัตเตอริง ปกตินั้นทำได้เพียงการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด หรือเพิ่มความดันประมาณ 1.33×10^{-5} mbar นอกจากนี้ยังมีพบว่าในระบบ ดีซีสปัตเตอริง ยังมีข้อเสียเมื่อความดันสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณก๊าซที่แทรกตัวในฟิล์มบางที่ได้มีค่าสูงด้วย ต่อมามีการพัฒนาระบบใหม่เรียกว่า ระบบดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอริง ซึ่งเป็นการใช้สนามแม่เหล็กช่วย โดยจ่ายสนามแม่เหล็กให้มีทิศทางกับผิวหน้าเป่าสารเคลือบและมีทิศตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะช่วยเพิ่มระยะทางเดินของอิเล็กตรอนให้ยาวขึ้น โดยอำนาจของสนามแม่เหล็กจะทำให้อิเล็กตรอน

เคลื่อนที่เป็นทางโค้ง ดังรูปที่ 2.4 ทำให้การไอออไนซ์เนื่องจากการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอม ก๊าซเฉื่อยมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะทำให้อัตราการสputเตอร์สูงขึ้นด้วย

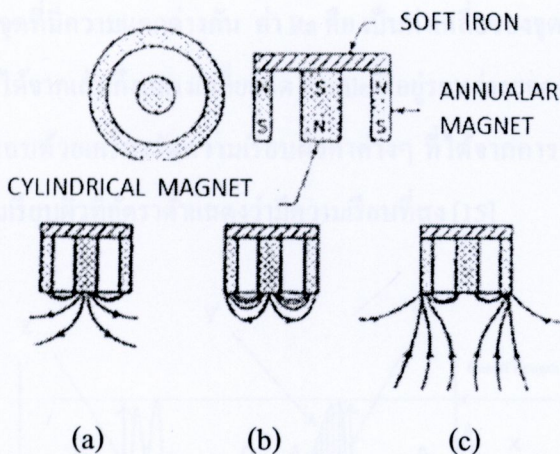


รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก [12]

2.7 ระบบเคลือบผิวแบบอานบาลานซ์แมกนีตรอนสputเตอร์ริง

(Unbalance magnetron sputtering)

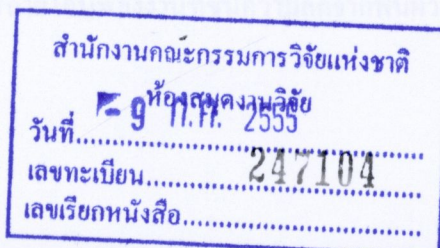
การติดตั้งแม่เหล็กที่คาโทดของระบบสputเตอร์ริงปกติ หากทำให้ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กด้านใด ด้านหนึ่งมากหรือน้อยกว่าอีกด้านหนึ่งแล้วสนามแม่เหล็กที่คาโทดมีลักษณะ ไม่สมมาตรทำให้ปริมาณ ไอออนที่วิ่งเข้าชนหรือระดมยิงวัสดุรองรับนั้นมีปริมาณมากกว่าปกติ ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของฟิล์ม บางที่เคลือบได้โดยตรง การจัดแม่เหล็กของระบบนี้อาจแบ่งเป็น 3 แบบ ดังรูปที่ 2.5



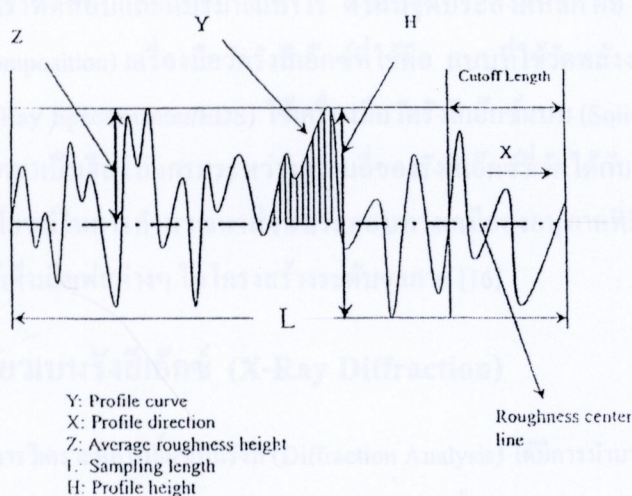
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะเส้นแรงแม่เหล็กของระบบอันบาลานซ์แมกนีตรอนสปัตเตอร์ (a) ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ด้านในมากกว่าด้านนอก (b) ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ด้านในและด้านนอกใกล้เคียงกัน (c) ความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ด้านนอกมากกว่าด้านใน [13]

2.8 ความเรียบผิว

รูปแบบโดยทั่วไปของผิว มีคำศัพท์ทางเทคนิคหลายคำเกี่ยวกับพื้นผิวที่ควรรู้จัก (Surface) หมายถึง ส่วนนอกสุดของวัตถุ (Body) ที่จะสัมผัสกับอากาศ (Space) หรือสัมผัสเกี่ยวข้องกับวัตถุอื่นพื้นผิวของวัตถุส่วนมากจะมีลักษณะเป็นเหมือนเกลียวคลื่น (Wavelength) ขาวผสมกับระลอกคลื่นที่มีความยาวคลื่นสั้น ความยาวคลื่น (Waviness) หมายถึง เกลียวคลื่นที่มีช่วงคลื่นยาว ความเป็นคลื่นส่วนมากจะมีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (Sine wave) จึงอาจจะแสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่นและโดยค่าความยาวคลื่น ความเรียบผิว (Roughness) หมายถึง ระลอกคลื่นที่มีช่วงคลื่นสั้น ความขรุขระอาจจะแสดงได้โดยขนาด (Amplitude) ของคลื่นและโดยค่าความยาวคลื่น เส้นขอบ (Profile) เป็นเส้นแสดงพื้นที่ผิวเมื่อถูกตัดตามแนวขวาง รอยมลทิน (Flaw) หมายถึง รอยที่เกิดขึ้นอย่างไม่มีทิศทางแน่นอน มีจำนวนน้อยและจะไม่นำมาพิจารณาในการคำนวณหรือในการวัดค่าความเรียบ การวัดความเรียบผิว (Surface Roughness) เป็นการวัดโดยใช้เครื่อง Profile Meter เพื่อช่วยในการบันทึกผิวซึ่งให้ความละเอียดสูงมาก ในการวัดจะใช้ปลายของเข็มวัดลากไปบนชิ้นงานในแนวเส้นตรง จากนั้นเครื่องจะบันทึกผลออกมาเป็นกราฟแสดงความเรียบเป็นไมครอน โดยค่าของความเรียบผิว ของผิวชิ้นงาน หรือวัสดุที่ทำการทดสอบด้วยเครื่อง Profile Meter เครื่องจะทำการคำนวณค่าตัวแปรต่างๆ เช่นค่า Ra ซึ่งเป็นค่าที่หัวเข็มได้ลากผ่านผิวชิ้นงาน โดยในแต่ละค่าที่เครื่องทำการคำนวณจะเป็นการวิเคราะห์ค่า



ความเรียบผิวในแต่ละจุดที่มีความแตกต่างกัน ค่า Ra คือ เป็นค่าเฉลี่ยของจุดที่เชื่อมลากผ่านระยะที่จุดของยอด Profile แต่จะได้จากเส้นกึ่งกลางเฉลี่ยยอด Profile ที่อยู่ระหว่างยอดสูงสุดและจุดกึ่งกลาง ดังรูปที่ 2.6 ในการทดสอบด้วยเครื่องวัดความเรียบผิวค่าต่างๆ ที่ได้จากการวัดหรือจากการทดสอบค่าที่ได้จากการวัดความเรียบผิวที่อัตราค่าแสดงว่ามีความเรียบที่สูง [15]



รูปที่ 2.6 แสดงเส้นขอบของพื้นผิวและความเรียบ [15]

2.9 การวัดความหนาของผิวเคลือบ โครงสร้างจุลภาค และส่วนผสมทางเคมี

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ดูโครงสร้างจุลภาคของวัตถุที่เป็นของแข็ง เนื่องจากสามารถให้ภาพความละเอียดสูง มีกำลังขยายถึง 50,000 เท่า จึงให้ค่าการวัดที่ค่อนข้างละเอียดและแน่นอนโดยการประมวลผลด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งให้ความสะดวกและมีความเชื่อมั่นของผลการวิเคราะห์สูง ระบบภาพของ SEM เกิดจากกระบวนการควบคุมการสแกนลำอิเล็กตรอนที่มีขนาดเล็กมาก ให้เคลื่อนที่บนระนาบ X-Y ของพื้นผิวชิ้นงานตัวอย่างจะทำให้เกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอิเล็กตรอนจากลำอิเล็กตรอนกับอะตอมของธาตุชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งสัญญาณอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับ (Detect) และเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณภาพด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ แล้วส่งผ่านสัญญาณให้กับระบบแสดงภาพบนจอแคโทด สัญญาณอิเล็กตรอนเกิดขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ถูกยิงออกมาจากแหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอนความดันไฟฟ้าสูง (High Voltage) และเมื่อลำอิเล็กตรอนปฐมภูมินี้ตกกระทบผิวของชิ้นงานตัวอย่างลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) จะทำอันตรกิริยา (Interaction) กับอะตอมธาตุของชิ้นงานตัวอย่าง ผลจากการถ่ายโอนพลังงานที่ขึ้นความลึกจากพื้นผิว

ที่ระดับต่างๆ กันทำให้เกิดการปลดปล่อยอนุภาค รวมทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะของชิ้นงานตัวอย่างนั้นๆ ซึ่งอนุภาคและคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกรวมกันว่า “สัญญาณอิเล็กทรอนิกส์” ในปัจจุบันนี้ SEM ส่วนใหญ่จะติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีเอ็กซ์ เครื่องมือนี้ใช้วัดความยาวคลื่นและความเข้มของรังสีเอ็กซ์ลักษณะเฉพาะ (Characteristic X-Ray) ที่ชิ้นงานปล่อยออกมาหลังจากที่ลำอิเล็กตรอนตกกระทบด้วยวิธีที่เราสามารถทราบว่ามีธาตุอะไรบ้างอยู่ในพื้นที่ที่เราทดสอบและมีปริมาณเท่าไร ดังนั้นจุดประสงค์หลัก คือ หาส่วนประกอบทางเคมี (Chemical Composition) เครื่องมือวัดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้คือ แบบที่ใช้วัดพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy-Dispersive X-Ray Spectrometer/EDS) ใช้เครื่องมือวัดรังสีเอ็กซ์แบบ (Solid State Detector) ข้อมูลที่ได้จะแสดงออกมาเป็นฮิสโทแกรมระหว่างความถี่ของรังสีเอ็กซ์ที่วัดได้กับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ โดยสรุป มีประโยชน์ในการคำนวณหาส่วนประกอบทางเคมีของอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับไมครอน และแสดงให้เห็นถึงเฟสต่างๆ ในโครงสร้างระดับจุลภาค [16]

2.10 เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction)

ในเกือบทุกกรณีที่เทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Analysis) ได้มีการนำมาใช้เพื่อการแยกแยะโครงสร้างของผลึกเดี่ยว การวิเคราะห์อาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของตัวอย่างกับของมาตรฐาน เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จะอาศัยลำรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Beam) ที่มีค่าความยาวคลื่นเป็น λ จากแหล่งกำเนิดพุ่งชนกับผลึกเดี่ยวเกิดการเลี้ยวเบนขึ้น ความเข้มของลำรังสีที่เลี้ยวเบนออกมานั้นจะถูกเก็บบันทึกในรูปของฟังก์ชันของมุมการเลี้ยวเบน (Diffracted Angel, θ) โดยความเข้มของสัญญาณ (Intensity) จะมีค่าไม่เป็นศูนย์ถ้ามุมของการเลี้ยวเบนเป็นไปตาม Bragg's Law

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่น

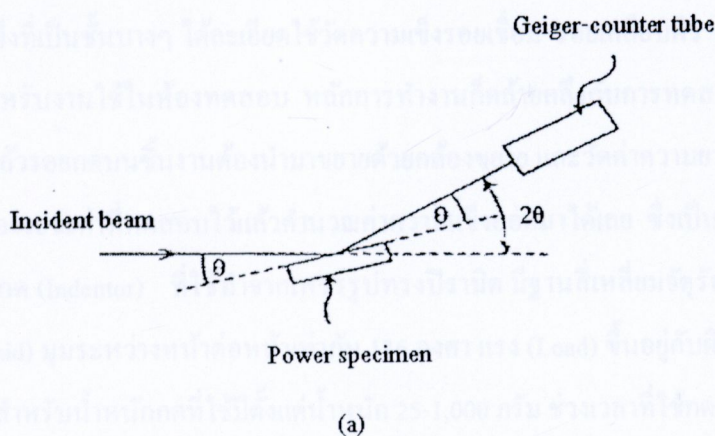
$2d \sin \theta$ คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของแลตทิซ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์

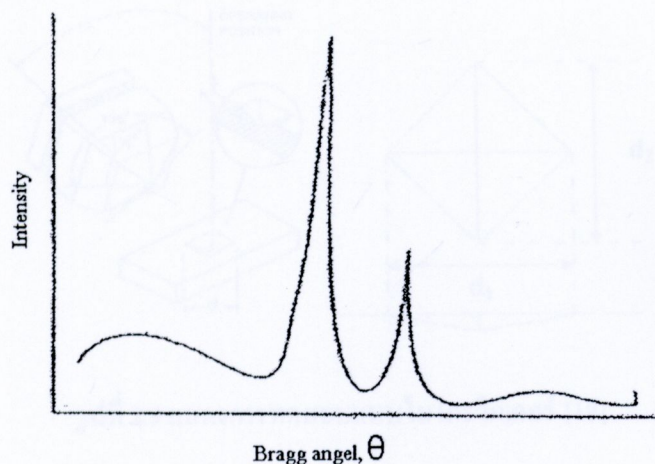
$$a = d \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

ธาตุหรือสารประกอบทั่วไปจะประกอบไปด้วยอะตอมที่จัดเรียงตัวในแลตทิซ (Lattice) โดยมีรูปทรงและระยะห่างเหมือนกัน และมีหน่วยเซลล์ (Unit Cell) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดที่บอกถึงโครงสร้างผลึกของธาตุหรือสารประกอบนั้นๆ เมื่อลำรังสีเอกซ์ที่มีความถี่ค่าหนึ่งชนกับอะตอม อิเล็กตรอนที่กระทำกับอิเล็กตรอนในอะตอมทำให้อิเล็กตรอนสั่นด้วยความถี่เท่ากับของรังสีเอกซ์ และปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาในทุกทิศทางโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ ถ้าการเลี้ยวเบนเกิดกับอะตอมในผลึกที่เรียงห่างกันเป็นระยะเท่าๆ กัน รังสีที่ปลดปล่อยออกมาจะเกิดการแทรกสอดกันซึ่งมีทั้งการแทรกสอดแบบเสริมและแบบหักล้าง สัญญาณจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมได้เมื่อตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน การสะท้อนของรังสีเอกซ์จะเกิดจากอะตอมในระนาบต่างๆ ที่ขนานกันและห่างเท่าๆ กัน X-Ray Diffractometer เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าความเข้มของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนจากผลึกโดยมีอุปกรณ์ทาง อิเล็กทรอนิกส์ประกอบอยู่เช่น Geiger Counter tube หรือ Ionization Chamber ดังรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าทั้งชิ้นงานและ Geiger Counter tube จะเคลื่อนที่ โดย Geiger Counter tube เคลื่อนที่เร็วกว่าเป็น 2 เท่าเสมอ ทำให้อุปกรณ์ตรวจจับรังสีนี้อยู่ในมุมที่เหมาะสมสำหรับการสะท้อนรังสีตามกฎของ Bragg สัญญาณที่ตรวจจับได้จะแสดงออกมาในรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสี (Diffraction Pattern) ดังรูปที่ 2.8 ความเข้มของสัญญาณขึ้นอยู่กับหลายแฟกเตอร์ด้วยกันเช่น โครงสร้างของวัสดุ ปริมาตรของวัสดุที่แผ่รังสี รูปทรงของการหักเห และการวางชิ้นงาน เป็นต้น [17]



รูปที่ 2.7 แสดง X-Ray Diffractometer [17]

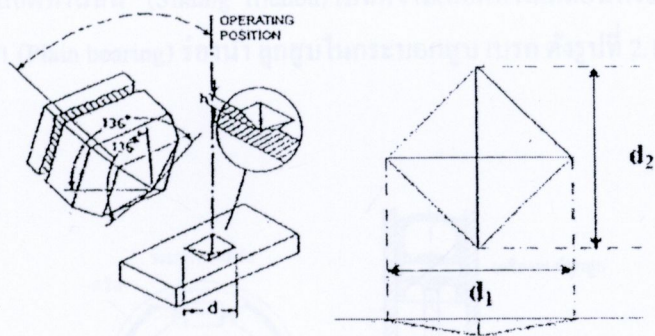


(b)

รูปที่ 2.8 แสดง Intensity Peak ที่แสดงถึงระนาบผลึกของวัสดุในตำแหน่งที่มีการสะท้อนรังสี [17]

2.11 ความแข็งแรงแบบไมโครวิกเกอร์

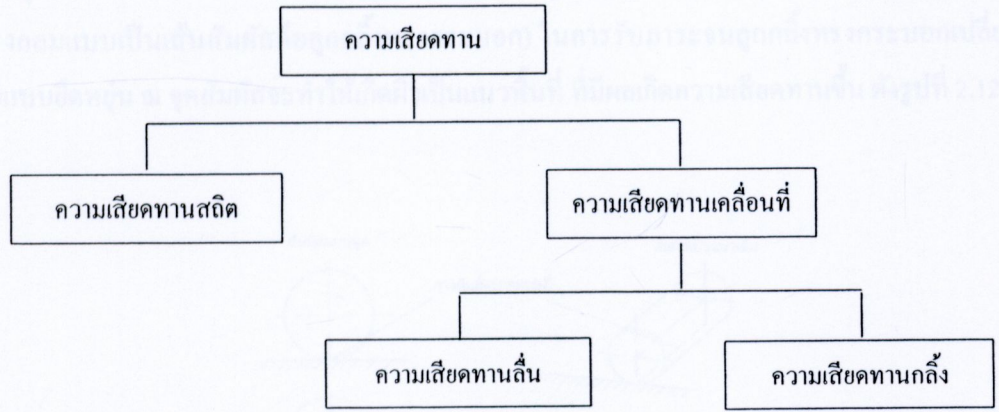
การทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์สามารถทดสอบกับโลหะที่ชุบผิวแข็ง เช่น พกชุบไนไตรด์ สามารถวัดความลึกผิวแข็งที่เป็นชั้นบางๆ ได้ละเอียดใช้วัดความแข็งรอยเชื่อม รอยเคลือบผิว ตลอดจนแร่ธาตุต่างๆ เหมาะสำหรับงานใช้ในห้องทดสอบ หลักการทำงานก็คล้ายคลึงกับการทดสอบแบบวิกเกอร์ คือเมื่อทดสอบแล้วรอยกดบนชิ้นงานต้องนำมาขยายด้วยกล้องขยาย และวัดค่าความยาวของเส้นทแยงทั้งสองด้าน เครื่องจะค่าที่ทดสอบไว้แล้วคำนวณค่าความแข็งออกมาได้เลย ซึ่งเป็นการสะดวกและรวดเร็วมาก หัวกด (Indenter) ที่ใช้ทำจากเพชรรูปทรงปิรามิด มีฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square Base Diamond Pyramid) มุมระหว่างหน้าต่อหน้าเท่ากับ 136 องศา แรง (Load) ขึ้นอยู่กับผิวของโลหะที่จะทำการทดสอบ สำหรับน้ำหนักกดที่ใช้มีตั้งแต่ 1 กรัม ถึง 1,000 กรัม ช่วงเวลาที่ใช้กดสามารถเลือกได้ตั้งแต่ 5 ถึง 45 วินาที จะเห็นได้ว่าเครื่องทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ สามารถใช้งานได้อย่างสะดวกและแม่นยำ ดังรูปที่ 2.9 [18]



รูปที่ 2.9 แสดงการทดสอบแบบไมโครวิกเกอร์ [18]

2.12 ความเสียดทาน

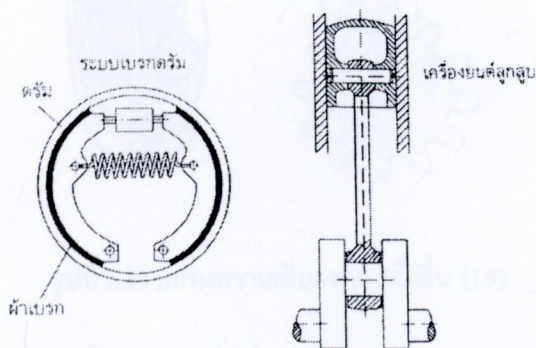
แรงเสียดทาน คือ แรงที่ต้านทานการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการเสียดสีระหว่างผิววัตถุที่มีการเคลื่อนที่มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ สามารถแบ่งประเภทเป็นความเสียดทานเคลื่อนที่และความเสียดทานสถิตดังแผนภูมิ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงแผนภูมิประเภทของความเสียดทาน [19]

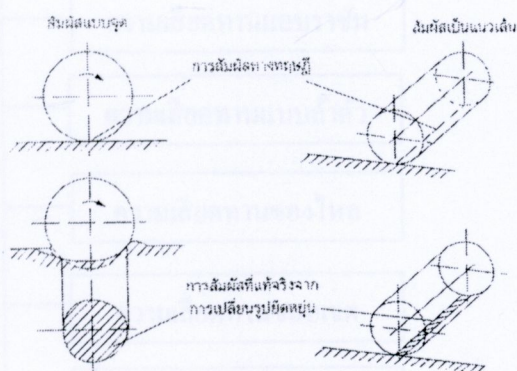
1. ความเสียดทานเคลื่อนที่ (Dynamic friction) เป็นความเสียดทานจากการเคลื่อนที่ของวัตถุ แข่งบนพื้นผิววัตถุอื่น
2. ความเสียดทานสถิต (Static friction) เป็นความเสียดทานที่เกิดจากการเลื่อนวัตถุจากสภาวะนิ่งให้เคลื่อนที่ต้านทานผิวรองรับ

3. ความเสียดทานลื่น (Sliding friction) เป็นความเสียดทานเคลื่อนที่ระหว่างวัตถุที่ลื่น เช่น แบริ่งแบบธรรมดา (Plain bearing) ร่องนำ ลูกสูบในระบบสูบ เบรก ดังรูปที่ 2.11



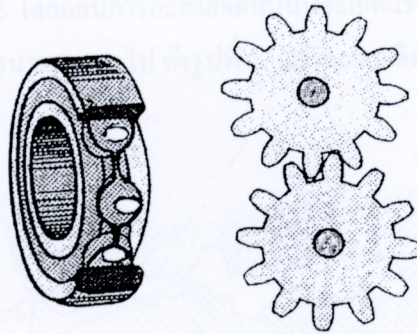
รูปที่ 2.11 แสดงความเสียดทานลื่น [19]

4. ความเสียดทานกลิ้งยืดหยุ่น (Elastic rolling friction) เป็นความเสียดทานเคลื่อนที่ชนิดหนึ่งที่วัตถุกลิ้งเข้าด้วยกัน โดยการสัมผัสกันนั้นเป็นลักษณะรูปร่างจุดหรือเป็นแนว (แบบจุดสัมผัส คือลูกทรงกลมแบบเป็นเส้นสัมผัสคือลูกกลิ้งทรงกระบอก) ในการรับภาระจนลูกกลิ้งทรงกระบอกเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่น ณ จุดสัมผัสจะทำให้เกิดผิวเป็นแนวพื้นที่ ที่มีผลเกิดความเสียดทานขึ้น ดังรูปที่ 2.12



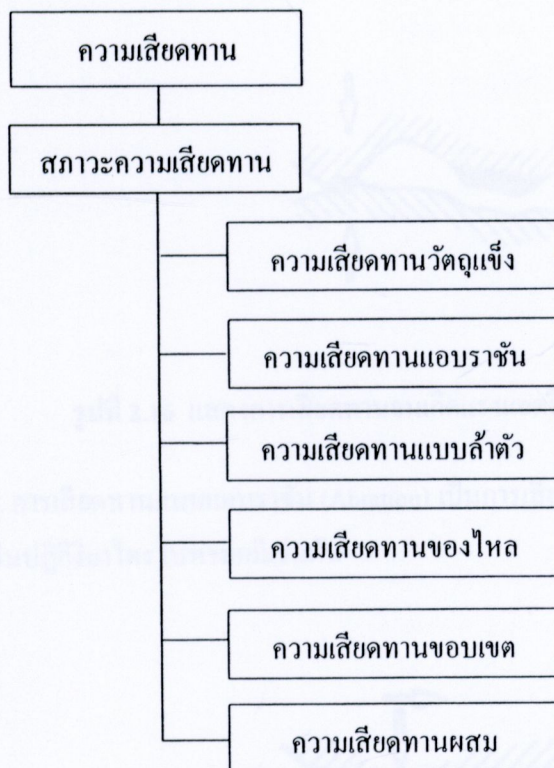
รูปที่ 2.12 แสดงความเสียดทานกลิ้งยืดหยุ่น [19]

5. ความเสียดทานกลิ้งลื่น (Rolling friction with kinetic sliding) เป็นกรณีพิเศษของความเสียดทานกลิ้งยืดหยุ่น โดยเกิดความเสียดทานลื่นขึ้นด้วยในเวลาเดียวกัน เช่น แบริ่งลูกกลิ้ง การจับหมุนของเฟืองต่อเฟือง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงความเสียหายกลิ้งลื่น [19]

สถานะแรงเสียดทานในปัจจุบันนี้มีวัสดุหล่อลื่นที่สามารถสร้างสถานะความเสียหายต่างๆ ในบริเวณที่มีการเสียดทานได้ดังรูปที่ 2.14



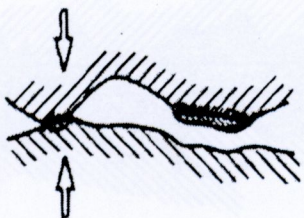
รูปที่ 2.14 แสดงสถานะความเสียหาย [19]

1. ความเสียหายวัตถุแข็ง (Solid friction) หรือความเสียหายแห้ง เป็นความเสียหายระหว่างวัตถุแข็งทั้งสอง โดยที่ไม่มีวัสดุหล่อลื่นระหว่างผิวทั้งสอง เช่น เบรก คลัตช์ วัตถุทั้งสองจะ

สัมผัสกัน ซึ่งหากเป็นโลหะชนิดเดียวกันแล้วก็สามารถทำให้ปลายผิวความหยาบละลายติดกัน ลักษณะจุลภาคได้ ดังรูปที่ 2.15 โดยก่อนการละลายติดกันนั้นจะเกิดแรงแอตทรีชันเกิดขึ้นก่อน และเมื่อเคลื่อนที่ต่อไปก็จะเกิดการเหินหลุดออกไป ดังรูปที่ 2. แล้วละลายติดหักออกไป ซึ่งจัดเป็นปฏิกิริยา ไตร โบทางเคมีประเภทหนึ่ง

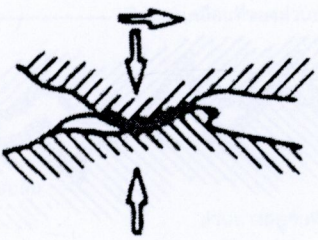


รูปที่ 2.15 แสดงความเสียหายวัตถุแข็ง [19]



รูปที่ 2.16 แสดงการเสียหายจนเกิดแรงแอตทรีชัน (Adhesion) [19]

2. การเสียหายแบบแอบราชัน (Abrasion) เป็นการเสียหายแข็ง จนเกิดการปาดผิว ดังรูปที่ 2.17 จัดเป็นปฏิกิริยาไตร โบทางเคมีเช่นกัน



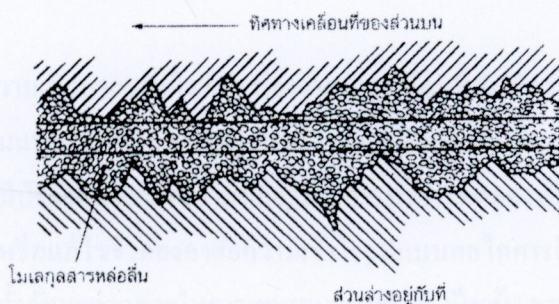
รูปที่ 2.17 แสดงการเสียหายแบบแอบราชันเกิดการปาดผิวจุลภาค [19]

3. การเสียดทานแบบล้าตัว (Fatigue) เป็นการเสียดทานแห่ง โดยอาศัยการสะสมของพลังงานจากการเสียดทานระหว่างชิ้นผิวจุลภาคพร้อมกับอาศัยเวลาและความถี่จนแตกหักบนผิวจุลภาค ดังรูปที่ 2.18 จัดเป็นปฏิกิริยาไตร โบทางเคมีเช่นกัน



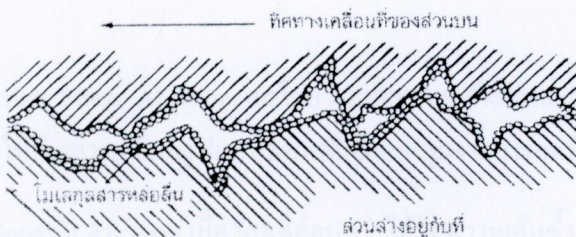
รูปที่ 2.18 แสดงการเสียดทานล้าตัว [19]

4. ความเสียดทานของไหล (Fluid friction) เป็นการเสียดทานที่ผิวทั้งสองของวัตถุแข็งที่มีชั้นฟิล์มสารหล่อลื่นเหลวเคลือบปกปิดไว้อยู่มาก ซึ่งจะทำให้วัตถุทั้งสองไม่มีโอกาสสัมผัสกัน ดังรูปที่ 2.19



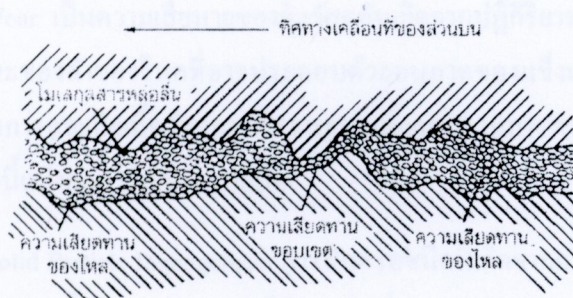
รูปที่ 2.19 แสดงความเสียดทานของไหล [19]

5. ความเสียดทานขอบเขต (Boundary friction) เป็นความเสียดทานที่ผิวทั้งสองของวัตถุ มีสารหล่อลื่นเหลวเคลือบติดเพียงบางบาง ในขณะที่ทำงานปลายผิวความหยาบจะไม่ละลายติดกัน ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงความเสียดทานขอบเขต [19]

6. ความเสียดทานผสม (Mixed friction) เป็นสภาวะความเสียดทานที่มีความเสียดทานขอบเขตและความเสียดทานของไหลเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ตำแหน่งผิวบางส่วนขาดฟิล์มหล่อลื่น ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงความเสียดทานผสม [19]

2.13 การสึกหรอ

การสึกหรอหมายถึง ความเสียหายของผิววัสดุเนื่องจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างผิวสัมผัส ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปหรือการสูญเสียเนื้อบริเวณผิวสัมผัสนั้น พฤติกรรมการสึกหรอมีความซับซ้อนเนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้องกับการทำการทดลองหรือวิเคราะห์กลไกการสึกหรอเพื่อหาวิธีป้องกันหรือแก้ไขจึงต้องอาศัยความเข้าใจรูปแบบกลไกการสึกหรอและอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งลักษณะเฉพาะในการทดสอบแบบต่างๆ เป็นต้น การสึกหรอสามารถแบ่งได้หลายชนิดเช่น

1. Abrasion คือ กลุ่มการสึกหรอที่เกี่ยวข้องกับการตัดหรือฉีกของผิววัสดุ โดยวัสดุที่แข็งหรือมีขอบคมมักทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าสึกหรอ ชนิดของการสึกหรอในกลุ่มนี้ประกอบด้วย

1.1 Low Stress Abrasion อนุภาคที่แข็งและคมที่ผิว (Abradant) ไหลหรือขูดผิวชิ้นงานออกไปโดยน้ำหนักที่กระทำในแนวตั้งฉากกับผิวสัมผัสไม่มากนัก เช่น การขัดผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทราย

1.2 High Stress Abrasion กลไกความเสียหายคล้ายกับ Low Stress Abrasion แต่ความเค้นมีค่าสูงจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติกและหลุมจากการกดที่ผิวสัมผัส

1.3 Gouging Abrasion เนื้อวัสดุที่อ่อนกว่าได้รับความเค้นซ้ำๆ จากวัสดุผิวแข็งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลาสติกและเกิดการเสียดสีเนื้อวัสดุขึ้น เช่น การกระแทกซ้ำๆ ของก้อนหินบนแผ่นโลหะ การกระแทกที่แหลมลับบริเวณต่อกันทำให้เกิดการแตกออกของขอบหลุมขึ้น

1.4 Polishing Wear การสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการถูซึ่งวัสดุที่สึกหรอไม่ปรากฏรอยขีดข่วน แตกหักหรือการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก เช่น การสึกหรอของราวบันไดจากการสัมผัสด้วยมือ ผู้คนกลไกการสึกหรอแต่ละชนิดได้ถูกแสดง ดังรูปที่ 2.22

2. Erosive Wear เป็นความเสียหายของผิววัสดุอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างผิวของแข็งและของไหลหรือการปะทะของลำของไหลที่อาจประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและของไหลอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นการสูญเสียเนื้อวัสดุอาจมีสาเหตุจากทั้งกระบวนการทางเคมีและทางกลพร้อมกัน การสึกหรอในกลุ่มนี้แบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ

2.1 Solid Particle Impingement การสึกหรอชนิดนี้เกิดจากการชนของอนุภาคขนาดเล็กอย่างต่อเนื่อง แต่ครั้งของการชนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและหลุมขนาดเล็ก รวมทั้งเกิดการหลุดออกทีละน้อยของผิวสัมผัส

2.2 Cavitation กรณีเกิดจากของแข็งสัมผัสของเหลวที่มีฟองอากาศปะปนอยู่ เมื่อฟองอากาศแตกออกใกล้ผิวของแข็งทำให้ของเหลวบริเวณใกล้เคียงเข้ามาเติมช่องว่างนั้นอย่างรวดเร็ว การเคลื่อนที่ของของเหลวอย่างรวดเร็วนี้ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันจนทำให้ผิวของแข็งเปลี่ยนรูปและหลุดออก

2.3 Slurry Erosion อนุภาคในของไหลเคลื่อนที่ปะทะกับวัสดุ เช่น การสึกหรอของท่อส่งน้ำที่มีเม็ดทรายปะปนภายในน้ำ

2.4 Fluid Impingement Erosion การสึกหรอชนิดนี้เกิดจากของเหลวพุ่งกระทบของแข็ง หรือฉีดของเหลวกระทบผิวหน้าของแข็ง การสึกหรอลักษณะนี้แตกต่างกับการสึกหรอชนิด Slurry Erosion ที่ไม่มีอนุภาคของแข็งปะปนในของเหลวกลไกการสึกหรอแต่ละชนิดได้ถูกแสดง ดังรูปที่ 2.23

3. Adhesive Wear เนื่องจากความจริงที่ว่าไม่มีผิววัสดุใดที่มีความเรียบสมบูรณ์แบบ เมื่อผิวสัมผัสถูกแรงกระทำจึงมีบางส่วนของผิวเท่านั้นที่รับแรง ซึ่งหากได้รับแรงมากพอจะมีความเค้นสูงมากและจะเกิดการเชื่อมติดกันของผิวที่สัมผัส เมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันของผิวสัมผัสบริเวณที่ถูกเชื่อมต่อนั้นจะไถลออก ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของวัสดุชิ้นใดชิ้นหนึ่งหรือทั้งสองชิ้น การสึกหรอในกลุ่มนี้แบ่งได้เป็น 5 รูปแบบ คือ

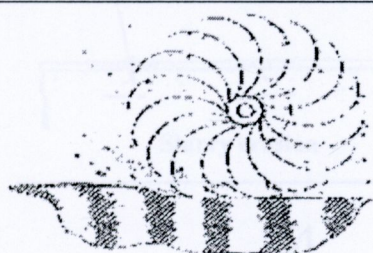
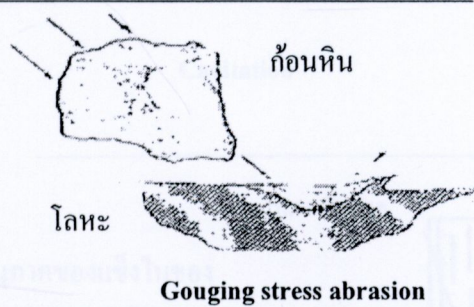
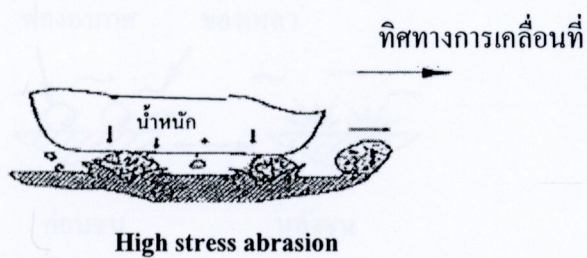
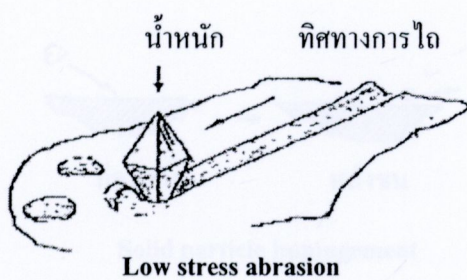
3.1 Fretting Wear ผิวสัมผัสบางส่วนที่รับความเค้นสูงพอจะเกิดการเชื่อมติดกัน แต่การสึกหรอชนิดนี้ผิวสัมผัสเคลื่อนที่สัมพัทธ์กลับไปกลับมา ทำให้บริเวณข้างรอยเชื่อมที่ติดกันแตกหักออกกลายเป็นเศษการสึกหรอ ดังนั้นการเชื่อมติดและการแตกหักจึงเกิดขึ้นสลับกัน

3.2 Adhesive Wear ลักษณะการสึกหรอนี้เกิดจากการเชื่อมติดระหว่างผิวสัมผัส 2 ผิว ส่งผลให้เนื้อวัสดุหลุดออกไปติดกับวัสดุอีกชิ้นหรือหลุดออกไปทั้งสองส่วนของผิวสัมผัส

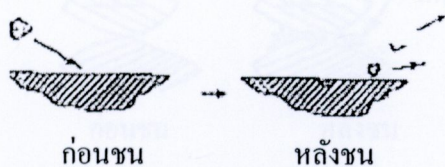
3.3 Seizure กรณีนี้เป็นการเชื่อมติดของเนื้อวัสดุทำให้หยุดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่าง 2 ผิวสัมผัส ในที่นี้ถือว่าเป็นรูปแบบหนึ่งของการสึกหรอ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนรูปของผิวสัมผัสแม้จะไม่เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุ

3.4 Galling เมื่อของแข็ง 2 ชนิดเคลื่อนที่ไถผ่านไป เกิดความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่สัมผัส โดยไม่เกิดการเชื่อมติดร่วมด้วย

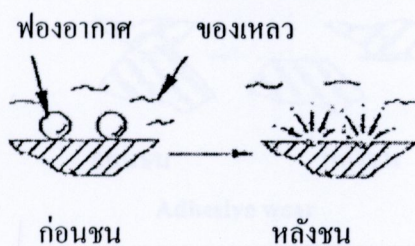
3.5 Oxidative Wear การเคลื่อนที่ในลักษณะไถผ่านของสองผิวสัมผัสที่มีแผ่นฟิล์มออกไซด์ปกคลุมการเคลื่อนที่ขัดสีกันส่งผลให้ฟิล์มออกไซด์หลุดออก ผิวที่ถูกเปิดออก จึงเกิดออกไซด์ซ้ำ การหลุดออกและการเกิดออกไซด์ซ้ำๆ นี้เองทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อวัสดุขึ้น กลไกการสึกหรอแต่ละชนิดได้ถูกแสดง ดังรูปที่ 2.24 [20]



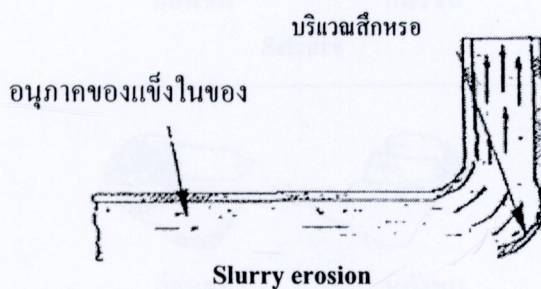
รูปที่ 2.22 แสดงการสึกหรอในกลุ่ม Abrasion [21]



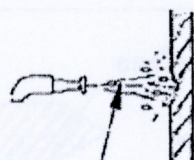
Solid particle impingement



Cavitation



Slurry erosion



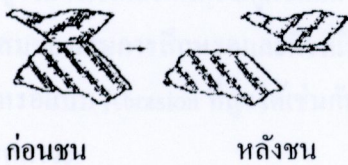
ลำของไหล

Fluid impingement erosion

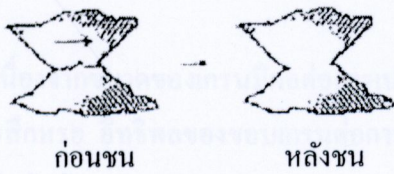
รูปที่ 2.23 แสดงการสึกหรอในกลุ่ม Erosive Wear [21]



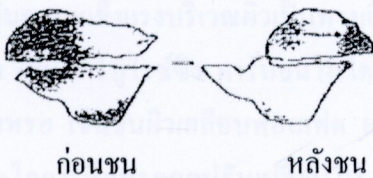
Fretting wear



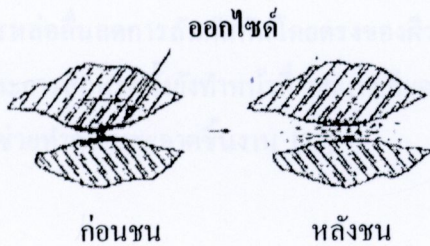
Adhesive wear



Seizure



Galling



Oxidative wear

รูปที่ 2.24 แสดงแบบการสึกหรอในกลุ่ม Adhesive Wear [21]

ตัวแปรที่มีผลต่อการสึกหรอเนื่องจากวัสดุ

ก. ชนิดวัสดุ ปริมาณการสึกหรอขึ้นอยู่กับชนิดของคู่ผิวสัมผัส ถ้าคู่ผิวสัมผัสเป็นผิวต่างชนิดกันผิววัสดุที่แข็งแรงกว่าจะมีปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า กรณีต้องการรักษาชิ้นส่วนสำคัญที่ต้องใช้ เป็นผิวสัมผัสวัสดุที่อ่อนกว่าจึงมักถูกเลือกให้เป็นคู่ผิวสัมผัส

ข. ความหยาบของผิว ผิวหยาบมากจะทำให้ปริมาณการสึกหรอของคู่ผิวสัมผัสสูงเนื่องจากผิวที่หยาบมีค่าความเค้นที่ Asperity สูงในขณะเดียวกันกรณีผิวสัมผัสมีความเรียบมากบริเวณผิวสัมผัสจะขาดร่อง (Valleys) ในการสะสมของเศษการสึกหรอและผิวที่เรียบจะมีค่า Molecular Interaction Force สูง เป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอแบบ Abrasion ที่สูงได้เช่นกัน ดังนั้นจึงต้องกำหนดความหยาบผิวที่เหมาะสมในการใช้งานแต่ละสถานะ

ค. ความแข็ง ในสภาวะตัวแปรต่างๆ กองที่ เหตุที่ชิ้นงานด้านทานการสึกหรอได้ดีขึ้น เมื่อความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากวัสดุที่แข็งจะมีการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกที่ต่ำกว่า จึงทำให้เกิดปริมาณการสึกหรอที่ต่ำกว่า

ง. ขนาดของเกรน เนื่องจากขนาดของเกรนมีผลต่อการเปลี่ยนรูปพลาสติก ขนาดของเกรนจึงมีผลกระทบต่อปริมาณการสึกหรอ อิทธิพลของขอบเกรนต่อการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะต่ำเมื่อขนาดของเกรนโตกว่าพื้นที่ผิวสัมผัสของความหยาบ (Asperity) ดังนั้นขนาดของเกรนที่โตจะทำให้ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอไม่ดี

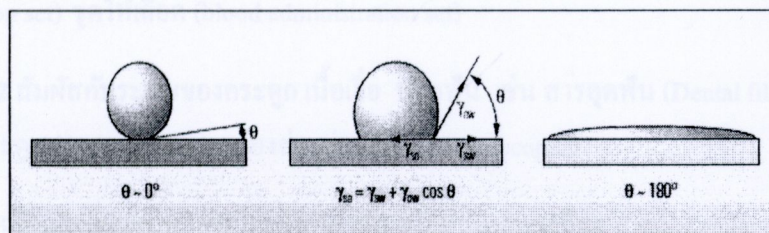
จ. ผิวเคลือบ การเพิ่มความแข็งแรงบริเวณผิวเป็นทางเลือกหนึ่งในการพัฒนาความสามารถในความต้านทานการสึกหรอ เช่น คาร์บูไรซ์ซิง คาร์บอนไนไตรดิง เป็นต้น อีกวิธีหนึ่งคือการสร้างผิวเคลือบเพื่อป้องกันการสึกหรอ เช่น ชั้นผิวเคลือบฟอสเฟต ออกไซด์ สี หรือผิวเคลือบอื่นๆ ผิวเคลือบเหล่านี้จะส่งผลให้กลไกการสึกหรอถูกปรับเปลี่ยนไป ดังนั้นคุณสมบัติของผิวเคลือบจึงมีอิทธิพลต่อปริมาณการสึกหรอ

ฉ. สารหล่อลื่น สารหล่อลื่นลดการสัมผัสกันโดยตรงของผิวชิ้นงาน โดยคันผิวสัมผัสด้วยฟิล์มของสารหล่อลื่น ทำให้ละการสึกหรอทั้งยังทำหน้าที่ ลดแรงเสียดทาน ระบายความร้อน ลดการกัดกร่อน การกระแทก และช่วยทำความสะอาดชิ้นงาน [22]

2.14 Wettability

Wetting คือความสามารถของของเหลวในการรักษาน้ำสัมผัสกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลโดยระดับชั้นของ Wetting ขึ้นกับสมดุลแรงระหว่างแอดฮีชัน (Adhesion) และ (Cohesion) Wetting มีความสำคัญในการยึดติดกันของวัสดุ 2 ชิ้น แรงยกตัว (หรือ capillary effect) ก็เป็นผลมาจาก Wetting และแรงพื้นผิวที่กำหนด Wetting รูปร่างของหยดของเหลวบนพื้นผิว

ของแข็งจะมีรูปร่างเป็นรูปทรงหยดน้ำค้าง ดังรูปที่ 2.25 มุมสัมผัสเป็นมุมระหว่างระนาบของปฏิสัมพันธ์ของของเหลว-ก๊าซกับระนาบของปฏิสัมพันธ์ของเหลว-ของแข็ง มุมสัมผัสนี้เป็นผลมาจากสมดุลระหว่างแรงแอดฮีชันกับแรงโคฮีชัน



รูปที่ 2.25 แสดงแสดงมุมสัมผัส (Contact angle) [23]

มุมสัมผัสนี้จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวจะกระจายตัวในพื้นที่ผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลว มุมสัมผัสที่น้อยกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ความสามารถในการกระจายตัวหรือ wetting ของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก มุมสัมผัสที่มากกว่า 90° โดยทั่วไปจะหมายถึง ความสามารถในการกระจายตัวหรือ wetting ของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดีและของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำ ค้าง สำหรับกรณีถ้าของเหลวนั้นเป็นน้ำ พื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวด (Super hydrophobic) จะให้มุมสัมผัสที่มากกว่า 150° ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมาก [24]

2.15 การทดสอบทางชีวภาพ

การจำแนกประเภทของวัสดุอุปกรณ์การแพทย์ พิจารณาจากบริเวณที่มีการสัมผัสและระยะเวลาในการสัมผัสกับร่างกาย ซึ่งจะสามารถจำแนกได้ดังนี้

แบบที่ 1 จำแนกตามบริเวณที่มีการสัมผัสกับร่างกาย แบ่งได้ 3 ประเภท

1.1 ประเภทที่สัมผัสกับผิวร่างกาย (Surface-contacting devices) แบ่งได้ 3 ชนิด

1.1.1 สัมผัสกับผิวหนัง เช่น แผ่นวัสดุสำหรับแปะต่างๆ เทปสำหรับยึดอิเล็กโทรด

1.1.2 สัมผัสกับส่วนที่เป็นเยื่อเมือกของร่างกาย (Mucosal membrane) โดยทั้งหมดหรือมีบางส่วนของวัสดุที่ต้องสัมผัสกับส่วนที่เป็นเยื่อเมือกของร่างกาย เช่น คอนแทกเลนส์

1.1.3 สัมผัสกับส่วนที่เป็นบาดแผล เช่น วัสดุตกแต่งแผล (Wound dressing)

1.2 ประเภทที่สัมผัสภายนอกร่างกาย (External communicating devices) แบ่งได้ 3 ชนิด

1.2.1 สัมผัสกับเลือดโดยทางอ้อม เช่น ชุดให้สารละลายทางหลอดเลือด (Solution administration set) ชุดให้เลือด (blood administration set)

1.2.2 สัมผัสกับระบบของกระดูก เนื้อเยื่อ หรือฟัน เช่น สารอุดฟัน (Dental filling materials) กล้องส่องกระดูก (Arthroscopes) กล้องส่องช่องท้อง (Laparoscopes)

1.2.3 สัมผัสกับระบบไหลเวียนโลหิต เช่น สายสวนหลอดเลือด (Intravascular catheters)

1.3 วัสดุฝังใน (Implant devices) เป็นวัสดุอุปกรณ์ที่ต้องผ่าตัดใส่เข้าไปในร่างกาย แบ่งได้ 2 ชนิด

1.3.1 สัมผัสกับส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อกระดูก เช่น ข้อต่อสะโพกเทียม (Artificial hip joint) และ อุปกรณ์ยึดตรึงกระดูกภายใน (Internal fixator)

1.3.2 สัมผัสกับเลือด โดยมีวัตถุประสงค์ของการทำงานเพื่อสัมผัสกับเลือดโดยตรง เช่น ลิ้นหัวใจเทียม (Heart valves)

การทดสอบความเป็นพิษ (In vitro Cytotoxicity Testing) การทดสอบความเป็นพิษเป็นวิธีการทดสอบที่ดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการ (In vitro) ซึ่งจัดเป็นวิธีการทดสอบเบื้องต้น (screening test) ที่จำเป็นสำหรับวัสดุอุปกรณ์การแพทย์ทุกประเภทต้องผ่านการทดสอบก่อนจะดำเนินการในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และค่าใช้จ่าย ไม่สูงมาก วิธีการทดสอบมีหลายวิธีเช่น

วิธี Test on Extracts เป็นการทดสอบเพื่อประเมินการตอบสนองของเซลล์เพาะเลี้ยงต่อสิ่งที่สกัดได้จากตัวอย่างที่ทดสอบ โดยการประเมินผลจากการถูกทำลายของเซลล์ วิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ทุกประเภท

วิธี Agar overlay เป็นการทดสอบความเป็นพิษของตัวอย่าง โดยการทดสอบตัวอย่างกับเซลล์ที่เพาะเลี้ยงในอาหารแข็ง (Agar media) และประเมินความเป็นพิษของตัวอย่างต่อเซลล์ โดยพิจารณาการถูกทำลายของเซลล์ในอาหารแข็ง วิธีนี้เหมาะกับวัสดุอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่อยู่ในรูปของเหลว

วิธีอื่นๆ เช่น MTT assay

คุณสมบัติสำคัญที่ได้รับความสนใจและเป็นที่ต้องการสำหรับวัสดุที่ใช้ในข้อเทียมได้แก่ ความเข้ากันได้ทางชีวภาพขององค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ยังมีความทนทานที่ดีต่อการกัดกร่อนเมื่ออยู่ในร่างกายมนุษย์ ความแข็งแรงที่เพียงพอต่อการรับน้ำหนักของข้อ ค่าโมดูลัสที่ต่ำเพื่อลดการสลายตัวของกระดูก และความทนทานสูงต่อการเกิดอนุภาคจากการขัดสี การศึกษาวิจัยพฤติกรรมทางชีววิทยาของธาตุที่เป็นโลหะส่วนหนึ่งพบว่า การเกิดปฏิกิริยาของโลหะฝังในที่เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อ มีสาเหตุจากการปลดปล่อยไอออนโลหะของวัสดุซึ่งขึ้นกับอัตราการกัดกร่อนและการละลายของสารที่หลุดออกมาโดยการศึกษาวิจัย การกัดกร่อนแบบ *In vivo* พบว่าธาตุโลหะที่เป็นพิษรุนแรงต่อเซลล์และเนื้อเยื่อได้แก่ วานาเดียม (V) นิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) [25]

2.16 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลกระทบของคาร์บอนบนการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์คาร์บอนไนไตรด์โดยวิธีอีพอกซีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริงเพื่อให้สามารถยึดอายุการใช้งานของเครื่องมือ การเคลือบผิวเป็นการเพิ่มความต้านทานต่อการสึกหรอและการสึกกร่อน การเคลือบผิวโดยวิธีการตกตะกอนของไอสารที่ได้มาโดยวิธีการทางฟิสิกส์หรือวิธีการตกตะกอนของไอสารที่ได้มาโดยวิธีการทางเคมี เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของไทเทเนียมไนไตรด์ อะลูมิเนียมไดออกไซด์ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการใช้งานร่วมกับอะลูมิเนียมนี้ยังทำให้เกิดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่สูง ในระบบการเคลือบผิว ดังนั้นจึงมีการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนเข้าไปในไทเทเนียมไนไตรด์ ถูกจัดว่าเป็นวิธีการที่ให้ประโยชน์ ซึ่งจะทำให้การต้านทานการสึกหรอมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนผสมของปริมาณของคาร์บอนในระดับต่างๆกัน จะให้โครงสร้างผลึก และคุณสมบัติประจำตัวแตกต่างกันไป ในการใช้ก๊าซมีเทน มีผลทำให้ความแข็งแรงของการเคลือบเพิ่มขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจในอิทธิพลของปริมาณของคาร์บอนที่มีผลต่อโครงสร้าง ในการศึกษารุ่นนี้ได้มีการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์คาร์บอนไนไตรด์โดยวิธีอีพอกซีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง ด้วยส่วนประกอบปริมาณคาร์บอนต่างๆ ได้มีการพบว่าปริมาณของคาร์บอนมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคอย่างมาก การเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของโครงสร้างจุลภาค ถูกพบว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของคาร์บอน โครงสร้างจุลภาคของการเคลือบผิวจะเปลี่ยนแปลงจาก NaCl type crystalline structure เป็น crystalline+amorphous nanocomposite structure แล้วจะเปลี่ยนต่อไปจนเข้าใกล้ amorphous structure ดังนั้นในการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์คาร์บอนไนไตรด์ จะมีความแข็งแรงสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2443 HV 25g ผิวเคลือบที่ได้จะให้ typical nanocomposite structure ที่ระดับ ปริมาณของคาร์บอน ที่ 26.69 % และจะสังเกตเห็นการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

structure แล้วจะเปลี่ยนต่อไปจนเข้าใกล้ amorphous structure ดังนั้นในการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ จะให้ความแข็งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2443 HV 25g ผิวเคลือบที่ได้จะให้ typical nanocomposite structure ที่ระดับ ปริมาณของคาร์บอน ที่ 26.69 % และจะสังเกตเห็นการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการเคลือบ TiAlCN อย่างเห็นได้ชัด จาก 0.18-0.19 เมื่อปริมาณของคาร์บอนเข้าถึง 26.69 % และเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณของคาร์บอน จะเกิดผลกระทบน้อยต่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่ถูกลดลงเรื่อยๆต่อไป [3]

การวิเคราะห์ และ คุณสมบัติทางกล ของการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์บนเหล็ก SKD 11 โดยวิธีอาร์ค โอออน เพลตติ้ง การศึกษาการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ บนเหล็ก SKD 11 โดยวิธีอาร์ค โอออน เพลตติ้งโดยใช้เป้า ไทเทเนียมออกไซด์ จากการทดลองพบว่า การเพิ่มปริมาณของคาร์บอน ทำให้ได้จากการเพิ่มอัตราส่วนของแก๊สมีเทนกับไนโตรเจน ซึ่งจะส่งผลทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าปริมาณของคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นเกินไป จะทำให้อะตอมของคาร์บอนไปแทนที่อะตอมของไนโตรเจน เพราะว่าอะตอมของคาร์บอนมีเวเลนซ์น้อยกว่าอะตอมของไนโตรเจน จึงส่งผลทำให้ความแข็งลดลง เช่นที่ปริมาณคาร์บอน 0.48 ปริมาณไนโตรเจน 0.52 จะให้ความแข็งสูงสุดมีค่าเท่ากับ 41 จิกะปาสคาล แต่ถ้าเพิ่มปริมาณคาร์บอน 0.67 ปริมาณไนโตรเจน 0.33 ความแข็งจะลดลงมีค่าเท่ากับ 35 จิกะปาสคาล ส่วนในเรื่องสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จะแปรผันตามปริมาณของคาร์บอน จะมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.8–0.38 จะพบสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำที่สุดที่ 0.38 ที่ปริมาณคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 1 และจากการทดลองก็พบว่าปริมาณของคาร์บอนมีผลต่อการสึกหรอด้วยเช่นกัน พบว่าการสึกหรอเกิดขึ้นน้อยที่สุดในกรณีที่มีปริมาณคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 1 [4]

ผลกระทบของไนโตรเจนบนคาร์บอนที่ต่ำของการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์บนเหล็ก การเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์ ด้วยส่วนประกอบของปริมาณไนโตรเจน ในระดับต่างๆกัน โดยวิธีอาร์คโอออนเพลตติ้ง เมื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจน ให้มากขึ้นแล้วสัดส่วนของ ออกไซด์ไทเทเนียม และ ปริมาณไนโตรเจน ของการเคลือบจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย พบว่า hexagonal AlN Phase จะตกผลึกภายใต้ปริมาณไนโตรเจนที่ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ และ จะช่วยให้การจัดเรียงตัวของเกรนละเอียดขึ้น จะเกิดเป็นผลต่อมาในรูปแบบ denser multiphase ส่วนในกรณีที่มีปริมาณไนโตรเจนที่ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่ จะแสดงออกเป็น porous structure (โครงสร้างที่เป็นรู) ส่งผลให้ความแข็งแรงของการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมออกไซด์บนเหล็กลดลง ผลจากการทดลองพบว่า ปริมาณไนโตรเจน จะมีผลมากต่อส่วนประกอบโครงสร้างและคุณสมบัติ

ของการเคลือบผิวการเพิ่มขึ้นของปริมาณไนโตรเจน เป็นผลทำให้มีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วน อลูมิเนียม ต่อไทเทเนียม และไนโตรเจน แต่อัตราการเคลือบผิวก็จะลดลง มีการพบว่า โครงสร้างผลึกของการเคลือบจะเปลี่ยนแปลงจาก fcc ไทเทเนียมไนไตรด์ เมื่อไนโตรเจนมีปริมาณ 1-4 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อหน้าที่ ไปเป็น TiN+hcp AlN Multiphase structure เมื่อไนโตรเจนมีปริมาณ 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร ต่อหน้าที่ การเคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ เมื่อไนโตรเจนมีปริมาณ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อหน้าที่ และจะแสดงออกมาเป็น porous columnar microstructure ซึ่งเป็นผลทำให้ความ แข็งมีค่าเท่ากับ 1,750 HV อย่างไรก็ตามเกรนจะละเอียดขึ้น จะถูกพบในขณะที่มีปริมาณของ ไนโตรเจนถูกเพิ่มขึ้นจาก 2-8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อหน้าที่ ส่งผลทำให้โครงสร้างของไทเทเนียม อลูมิเนียมไนไตรด์เกิดการปรับปรุงของเกรน และที่ปริมาณไนโตรเจนมีปริมาณ 8 ลูกบาศก์ เซนติเมตรต่อหน้าที่ ความแข็งมีค่าเท่ากับ 3,080 HV [5]

ผลกระทบความเรียบผิวของไทเทเนียมอัลลอย (Ti-6Al-4V) ที่มีผลต่อการตอบสนองของไขกระดูก และการดูดซับของโปรตีน ผลกระทบความเรียบผิวของไทเทเนียมอัลลอย (Ti-6Al-4V) ที่มีผลต่อการ ตอบสนองของไขกระดูกและการดูดซับของโปรตีนทั้งในระยะสั้นและระยะยาวได้จากการศึกษา ความเรียบผิวที่มีค่า Ra ดังนี้ 0.320 ไมครอนที่กระดาศทรายเบอร์ 1,200 0.490 ไมครอนที่กระดาศ ทรายเบอร์ 600 และ 0.874 ไมครอน ที่กระดาศทรายเบอร์ 180 ซึ่งผลจากการทดลองในเรื่องการ ตอบสนองของไขกระดูกภายใต้การทดลองที่มีการอบในหลายๆช่วงเวลา การยึดเกาะของเซลล์ พบว่า ความเรียบของผิวมีผลต่อการยึดเกาะของจำนวนของเซลล์ไขกระดูก ที่ความเรียบผิว 0.874 ไมครอน จำนวนการยึดเกาะของเซลล์พบมากที่สุด การเจริญเติบโตของเซลล์ พบว่าความเรียบของผิวมี ผลกระทบน้อยมากต่อเซลล์ไขกระดูก แต่อย่างไรก็ตามที่ความเรียบผิว 0.874 ไมครอน เซลล์ไข กระดูกจะเจริญเติบโตได้ดีที่สุด การแบ่งตัวของเซลล์ พบว่าความเรียบของผิวมีผลต่อการแบ่งตัวของ เซลล์ไขกระดูก ที่ความเรียบผิว 0.874 ไมครอน การแบ่งตัวของเซลล์ไขกระดูกพบมากที่สุดส่วนใน เรื่องของการดูดซับโปรตีนแอลบูมินและไฟโบรเนคติน ถูกทดสอบโดยการเอ็กซเรย์โดยใช้เทคนิค เอ็กซพีเอสและการฉายรังสี พบว่าทั้งสอง 2 วิธีดังกล่าวให้ผลการทดลองที่คล้ายคลึงกันดังนี้ การดูด ชับโปรตีนแอลบูมิน พบว่าความเรียบของผิวมีผลต่อการดูดซับโปรตีนแอลบูมิน ที่ความเรียบผิว 0.320 ไมครอน จะสามารถดูดซับโปรตีนแอลบูมินได้ดีที่สุดการดูดซับโปรตีนไฟโบรเนคติน พบว่า ความเรียบของผิวมีผลต่อการดูดซับโปรตีนไฟโบรเนคติน ที่ความเรียบผิว 0.874 ไมครอน จะสามารถดูดซับโปรตีนไฟโบรเนคตินได้ดีที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความเรียบผิวของไทเทเนียมอัลลอย มีผลต่อการยึดเกาะของเซลล์ การเจริญเติบโตของเซลล์ การแบ่งตัวของเซลล์ การดูดซับ โปรตีน แอลบูมินและไฟโบรเนคติน [26]

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการเพิ่มปริมาณของคาร์บอนด้วยวิธีการใช้ก๊าซมีเทน เข้าไปในไทเทเนียมอัลลอยด์ด้วยวิธีการเคลือบผิวแบบต่างๆพบว่าด้วยวิธีการใช้ก๊าซมีเทน สามารถเพิ่มความแข็งแรง ลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และทำให้การต้านทานการสึกหรอดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามปริมาณคาร์บอนที่เติมลงไปก็ต้องมีปริมาณที่เหมาะสม เพราะถ้ามีมากเกินไปจะทำให้อะตอมของคาร์บอนไปแทนที่อะตอมของไนโตรเจน ซึ่งจะส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลง ส่วนปริมาณไนโตรเจนจะมีอิทธิพลทำให้การจัดเรียงตัวของเกรนละเอียด ถ้ามีปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้โครงสร้างที่ได้มีลักษณะเป็นรู ส่งผลทำให้ความแข็งแรงลดลงและความเรียบผิวมีผลต่อการยึดเกาะของเซลล์ การเจริญเติบโตของเซลล์ การแบ่งตัวของเซลล์ การดูดซับโปรตีน แอลบูมินและไฟโบรเนคติน

3.1 การเตรียมชิ้นงาน

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้วัสดุ (อะลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061-T6) โดยตัดเป็นแท่งได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ขนาด 1 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1 จากนั้นนำแท่งตัวอย่างและ 25 ชิ้น มาทำความสะอาดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ให้ได้ความเรียบผิวโดยค่า Ra < 0.1 (Ra)



รูปที่ 3.1 ขนาดของแท่งตัวอย่างชิ้นงาน

3.2 การป้อนปฏิกิริยาเคมีด้วยวิธีไอทางกายภาพ

การเคลือบผิวชิ้นงานด้วยวิธีไอทางกายภาพ มี 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การทำความสะอาดชิ้นงาน (Pre-treatment) การเคลือบผิว (Coating) และ การอบแห้ง (Curing) ดังรูปที่ 3.2 ของ ศ.ดร.วิฑูรย์ สิทธิราษฎร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) ซึ่งได้กล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานว่า ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานคือการทำความสะอาดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 600, 800, 1,000 และ 1,200 ตามลำดับ ให้ได้ความเรียบผิวโดยค่า Ra < 0.1 (Ra) จากนั้นนำชิ้นงานไปทำความสะอาดด้วยอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Cleaning) ด้วยน้ำยาทำความสะอาด (Cleaning Solution) ที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำชิ้นงานไปอบแห้งในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้ชิ้นงานแห้งสนิทและปราศจากความชื้นก่อนนำชิ้นงานไปเคลือบผิวด้วยวิธีไอทางกายภาพ