

# อิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สที่มีต่ออัตราการตกสะสมของฟิล์มโลหะ ในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

## Effect of Discharge Power and Pressure on Deposition Rate of Metallic Films in DC Magnetron Sputtering System

กร พรหมสาขา ณ สกลนคร และ พิษณุ พูลเจริญศิลป์\*

Korn Promsakha na sakonnakorn and Phitsanu Poolcharuansin\*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University

Received : 11 February 2018

Accepted : 7 May 2018

Published online : 16 May 2018

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สที่มีต่ออัตราการตกสะสมของฟิล์มโลหะทองแดง อะลูมิเนียมและไทเทเนียมในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ด้วยเทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ กำหนดช่วงกำลังไฟฟ้าย่าน 10 ถึง 200 วัตต์ และช่วงความดันแก๊สอาร์กอนย่าน 5 ถึง 30 มิลลิทอร์ พบว่าอัตราการตกสะสมของทองแดงมีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมและไทเทเนียมตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการตกสะสมของฟิล์มโลหะมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้าและมีความสัมพันธ์แบบถดถอยกับความดันแก๊ส จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงปรากฏการณ์สปัตเตอริงบริเวณผิวเป้าเผยให้เห็นว่า ค่าสปัตเตอริงยิลด์ของวัสดุเป้าหมายมีอิทธิพลโดยตรงกับอัตราการตกสะสมของฟิล์มบาง ในขณะที่การพิจารณาฟลักซ์และพลังงานของไอออนที่ระดมชนผิวเป้าทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและอัตราการตกสะสมของฟิล์ม นอกจากนี้ การลดลงของอัตราการตกสะสมเมื่อเพิ่มความดันแก๊สสามารถอธิบายได้จากการชนกันระหว่างอะตอมโลหะที่หลุดจากผิวเป้าและอะตอมแก๊สอาร์กอนที่อยู่ระหว่างทาง

**คำสำคัญ :** อัตราการตกสะสม, ฟิล์มโลหะ, ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

\*Corresponding author. E-mail : phitsanu.p@msu.ac.th

## Abstract

The effect of discharge power and pressure on deposition rate of Cu, Al, and Ti films in dc magnetron sputtering has been investigated using the quartz crystal microbalance technique. The investigated range of the discharge power is 10-200 W, while the argon pressure is in the range of 5-30 mTorr. The measurements show that the deposition rate of Cu is higher than that of Al and Ti. Furthermore, the deposition rate tends to increase with discharge power but decreases with argon pressure. In order to interpret the results, a mathematical model has been proposed taking into account sputtering at the target surface and collisions in a gas phase. The calculations using the model agree well with the measurements. It is found that the sputtering yield of the target as well as the flux and energy of the sputtering particles are crucial to determine the deposition rate. Furthermore, the decrease of deposition rate as the pressure increases can be explained in terms of collisions between sputtered and gas particles.

**Keywords :** deposition rate, metallic films, dc magnetron sputtering

## บทนำ

สปีดเตอริงเป็นปรากฏการณ์เชิงพื้นผิวที่เกี่ยวข้องกับการระดมชนผิววัสดุด้วยอนุภาคพลังงานสูง การถ่ายโอนพลังงานและโมเมนตัมจากอนุภาคพลังงานสูง ทำให้อนุภาคบริเวณผิววัสดุเกิดการชนกันเองแบบลำดับขั้น (cascade collisions) นำไปสู่การปลดปล่อยอนุภาคออกจากผิววัสดุ ภายใต้หลักดังกล่าวสปีดเตอริงจึงถูกนำไปใช้เป็นวิธีกำเนิดไอของสารเคลือบในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง ในทางปฏิบัติไอออนบวกในพลาสมาของแก๊สเฉื่อย เช่นไอออนอาร์กอน ( $Ar^+$ ) ถูกนำมาใช้เป็นอนุภาคพลังงานสูงสำหรับการระดมชนผิววัสดุ (หรือเป้า) ดังนั้น อัตราการการปลดปล่อยอนุภาคที่ผิวเป้าและอัตราการตกสะสมของฟิล์มบนผิวชิ้นงานจึงขึ้นตรงกับจำนวนไอออน (Wasa, Kanno, & Kotera, 2012)

แมกนีตรอนสปีดเตอริงเป็นเทคนิคที่สามารถเพิ่มจำนวนไอออนในกระบวนการสปีดเตอริง โดยการใช้นาฬิกาแม่เหล็กกักขังอิเล็กตรอนพลังงานสูง ทำให้สามารถเพิ่มอัตราการแตกตัวของแก๊ส เพิ่มจำนวนไอออนในพลาสมา และเพิ่มอัตราการตกสะสมได้อย่างมีนัยสำคัญ ด้วยศักยภาพดังกล่าวเทคนิคแมกนีตรอนสปีดเตอริงจึงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและนำไปสู่การใช้งานในภาคอุตสาหกรรม เช่นการผลิตสารกึ่งตัวนำ การเคลือบแข็งบนวัสดุเชิงกล การเคลือบฟิล์มเชิงแสงบนทัศนอุปกรณ์ และการเคลือบฟิล์มบางสารแม่เหล็กบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูล เป็นต้น

อัตราการตกสะสมหรืออัตราการตกสะสมของฟิล์มบนผิวชิ้นงาน ไม่เพียงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญเชิงเศรษฐศาสตร์สำหรับกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Anders, 2010) แต่ยังส่งผลกับโครงสร้างและสมบัติบางด้านของฟิล์ม (Liu, Li, Tao, Luo, & He, 2002) ปัจจัยและเงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการเคลือบ ต่างส่งผลกระทบต่ออัตราการตกสะสม เช่น ความเข้มสนามแม่เหล็กที่ใช้กักขังอิเล็กตรอน (Furuya & Hirono, 1990) ศักย์ที่ใช้ไบแอสชิ้นงาน (Tanaka, Suzuki, & Kawabata, 1999) ตำแหน่งชิ้นงาน (Duygulu & Kodolbas, 2016) และพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟ รวมไปถึงความหนาแน่นของแก๊สอาร์กอน (Rahmane *et al.*, 2010) เป็นต้น นอกเหนือไปจากปัจจัยภายนอกเหล่านี้ “สปีดเตอริงยิลด์ (sputtering yield)” ยังเป็นปัจจัยภายในสำคัญที่มีผลโดยตรงต่ออัตราการตกสะสมของวัสดุเป้าแต่ละชนิด สปีดเตอริงยิลด์เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของการกำเนิดไอสารเคลือบ มีความสัมพันธ์กับสัดส่วนระหว่างฟลักซ์ของอนุภาคที่ปลดปล่อยออกจากผิวเป้า และฟลักซ์ของไอออนพลังงานสูงที่ใช้ระดมชนเป้า ดังนั้นการพิจารณา

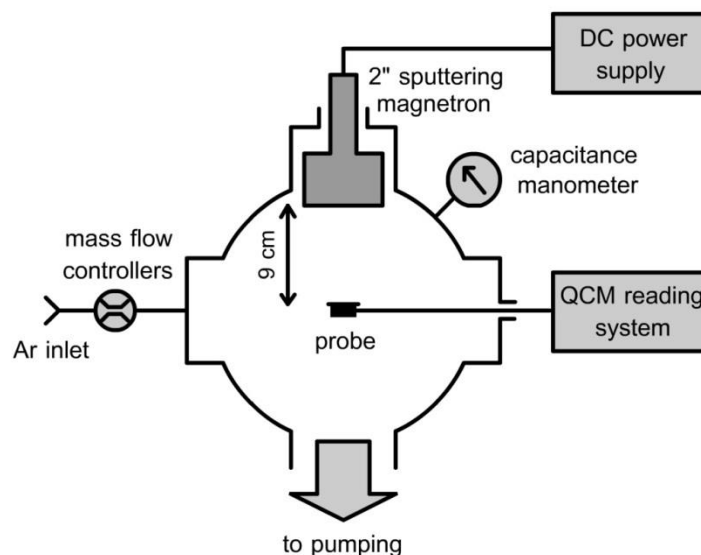
ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสมและปัจจัยข้างต้นสามารถนำไปสู่การกำหนดจุดการทำงานที่เหมาะสมของระบบเคลือบ และที่สำคัญอาจนำไปสู่การกำหนดโครงสร้างและสมบัติของฟิล์มได้

Ekpe, Bezuidenhout, & Dew (2005) ได้นำเสนอแบบจำลองการวิเคราะห์อัตราการตกสะสมของฟิล์มบางในระบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง ภายใต้การพิจารณาถึงพลังงานและการกระจายตัวของอนุภาคร่วมกับการพิจารณากลไกทางฟิสิกส์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ในแบบจำลองดังกล่าวได้อาศัยการพิจารณาค่าสเป็คเตอริงยึดจากทฤษฎีของ Yamamura (1981) ซึ่งแม้จะให้ผลลัพธ์ที่ตรงกับการทดลอง แต่ยังคงมีความซับซ้อนในการคำนวณเนื่องจากต้องพิจารณาพร้อมกับพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์อื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟังก์ชันแจกแจงพลังงานของไอออนที่ระดมชนเป้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์การเคลือบฟิล์มที่มีต่ออัตราการตกสะสมของฟิล์มทองแดงอะลูมิเนียม และไทเทเนียม โดยการวัดอัตราการตกสะสมด้วยเทคนิคควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์ และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พิจารณาการสเป็คเตอริงที่ผิวเป้าและการชนกันระหว่างอนุภาคแก๊ส ทั้งนี้โปรแกรม transport of ions in matter หรือ TRIM ซึ่งเป็นการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ (Ziegler & Biersack, 2013) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าสเป็คเตอริงยึดของวัสดุเป้าทั้งสามชนิด ผลการวิจัยนำไปสู่เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเคลือบเช่น กำลังไฟฟ้าและความดันแก๊ส ที่มีต่อค่าอัตราการตกสะสมของฟิล์มโลหะ

### วิธีดำเนินการวิจัย

การทดลองทั้งหมดดำเนินการภายใต้ระบบเคลือบฟิล์มระดับห้องปฏิบัติการตามไดอะแกรมในภาพที่ 1 ห้องเคลือบขนาด 15 ลิตร สามารถลดความดันได้ต่ำสุดระดับ  $10^{-6}$  ทอร์ จากการทำงานร่วมกันของปั๊มไอแพร์และปั๊มกลโรตารี แก๊สอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% ถูกนำส่งเข้าสู่ห้องเคลือบด้วยเครื่องควบคุม (GF40, Brook Instrument) ที่กำหนดอัตราไหลคงที่ 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที เป็นผลให้ความดันภายในห้องเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นมาที่ระดับประมาณ 5 มิลลิทอร์ ถึงแม้อัตราไหลของแก๊สอาร์กอนถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดการทดลอง แต่การปรับวาล์วปีกผีเสื้อที่ติดตั้งอยู่ระหว่างห้องเคลือบและปั๊มไอแพร์ทำให้สามารถปรับความดันให้อยู่ในย่าน 5 ถึง 30 มิลลิทอร์



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมของระบบดีซีแมกนีตรอนสเป็คเตอริง

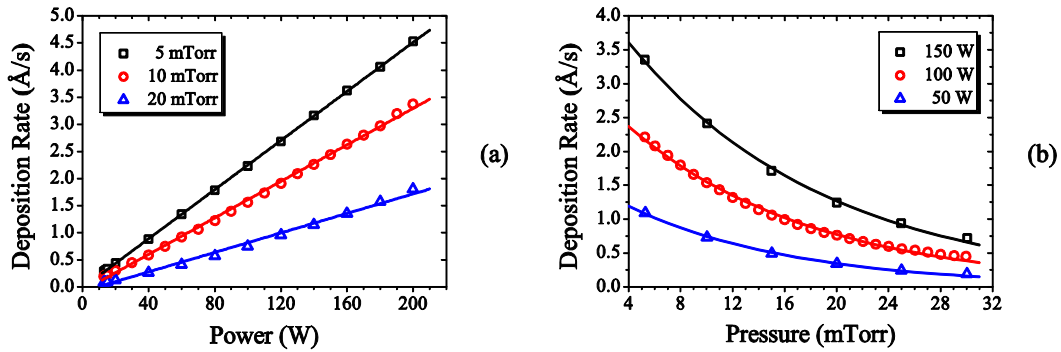
หัวแมงนี่ตรอนสปีดเตอร์ริง ที่ใช้ในงานวิจัย ถูกติดตั้งไว้ด้านบนของระบบเคลือบ และต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Pinnacle Plus, Advanced Energy) ซึ่งทำงานในโหมดกำกับกำลังไฟฟ้า ศักย์ไฟฟ้าย่าน -200 โวลต์ ถึง -500 โวลต์ ถูกจ่ายจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง เพื่อกำหนดกำลังไฟฟ้าในย่าน 10 ถึง 200 วัตต์ พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของหัวแมงนี่ตรอน ซึ่งประกอบด้วยศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า สามารถอ่านได้โดยตรงจากแผงวงจรแสดงผลของแหล่งจ่ายไฟ แผ่นไทเทเนียม ทองแดง และอะลูมิเนียม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 เซนติเมตร (2 นิ้ว) หนาประมาณ 6 มิลลิเมตร ความบริสุทธิ์ 99.995% (ยกเว้นทองแดงที่ไม่ทราบความบริสุทธิ์) ถูกเลือกใช้เป็นตัวสตูเป้าเนื่องจากมีค่าสปีดเตอร์ริงยิลด์ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์เป็นเทคนิคที่ใช้ตรวจวัดความหนาและอัตราการตกสะสมของฟิล์มบางในระหว่างกระบวนการเคลือบ โดยอาศัยหลักตรวจวัดความถี่สั่นพ้องของเซนเซอร์ควอตซ์ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามมวลรวมของสารเคลือบที่สะสมอยู่บนผิวเซนเซอร์ ข้อมูลความถี่ที่เปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับข้อมูลของสารเคลือบเช่น ความหนาแน่น สามารถนำไปสู่การคำนวณอัตราการตกสะสมของฟิล์มบาง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ระบบควอตซ์คริสตัลไมโครบาลานซ์รุ่น STM-2XM (Inficon) ที่สามารถตรวจวัดอัตราการตกสะสมของฟิล์มบางด้วยความละเอียดประมาณ 0.4 อังสตรอมต่อวินาที เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ของกระบวนการเคลือบที่มีต่ออัตราการตกสะสมของฟิล์มโลหะทั้งสามชนิด ตามภาพที่ 1 เซนเซอร์ควอตซ์ได้ถูกติดตั้งภายในห้องเคลือบ ห่างจากผิวเป้าประมาณ 9 เซนติเมตร ซึ่งปกติเป็นตำแหน่งของชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ ดังนั้น ข้อมูลที่อ่านได้จากเซนเซอร์จึงสามารถชี้ถึงอัตราการตกสะสมของฟิล์มบาง ณ ตำแหน่งดังกล่าวได้โดยตรง โดยงานวิจัยนี้ใช้ค่าอัตราการตกสะสมเฉลี่ยได้ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้งเพื่อใช้ศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สดังแสดงในผลการวิจัยด้านล่าง

### ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

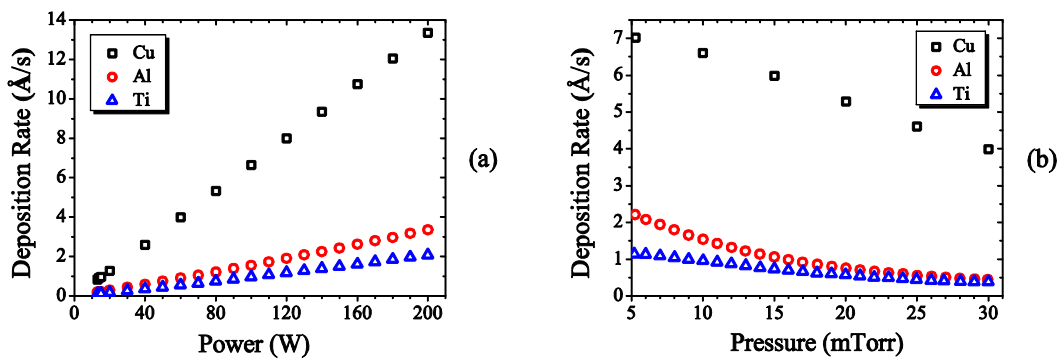
เริ่มต้นด้วยการใช้เป้าอะลูมิเนียมเพื่อศึกษาอิทธิพลของกำลังไฟฟ้า (แทนด้วย  $P_d$ ) และความดันแก๊ส (แทนด้วย  $p_{tot}$ ) ที่มีต่ออัตราการตกสะสมฟิล์ม ณ ตำแหน่งเซนเซอร์ควอตซ์ (แทนด้วย  $R_{sub}$ ) ภาพที่ 2(a) แสดงกราฟอัตราการตกสะสมของฟิล์มอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตาม ค่ากำลังไฟฟ้าย่าน 10-200 วัตต์ ณ ความดันแก๊สสามระดับ 5, 10, 20 มิลลิทอร์ และภาพที่ 2(b) แสดงอัตราการตกสะสมที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความดันแก๊สย่าน 5-30 มิลลิทอร์ ณ กำลังไฟฟ้าสามระดับ 50, 100, 150 วัตต์ ผลการทดลองที่แสดงในกราฟทั้งสองต่างสอดคล้องและสนับสนุนกัน

อัตราการตกสะสมของฟิล์มอะลูมิเนียมในภาพที่ 2(a) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวแมงนี่ตรอน ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสมและกำลังไฟฟ้าเป็นไปตามรูปแบบสมการเส้นตรง ( $R_{sub} \propto P_d$ ) เช่น ณ ความดัน 5 มิลลิทอร์ อัตราการตกสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเพิ่มคงที่ (ความชันของเส้นกราฟ) เท่ากับ 0.023 อังสตรอมต่อวินาทีต่อวัตต์ นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่า ความชันของเส้นกราฟในกรณีความดัน 5 มิลลิทอร์ มีค่าสูงกว่าความชันของเส้นกราฟในกรณีความดัน 10 และ 20 มิลลิทอร์ ตามลำดับ ทำให้สามารถตีความได้ว่า ถ้าใช้กำลังไฟฟ้าเดียวกัน ฟิล์มอะลูมิเนียมที่เคลือบ ณ ความดันต่ำ จะมีอัตราการตกสะสมสูงกว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบ ณ ความดันสูง ข้อสรุปดังกล่าวสอดคล้องกับกราฟในภาพที่ 2(b) ที่แสดงให้เห็นว่า อัตราการตกสะสมฟิล์มอะลูมิเนียมมีแนวโน้มถดถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียลตลอดย่านความดันที่กำหนด เมื่อพิจารณารูปแบบความสัมพันธ์  $R_{sub} \propto \exp(-Ap_{tot})$  และ  $A$  แทนค่าอัตราถดถอย พบว่า ในกรณีกำลังไฟฟ้า 50 วัตต์ อัตราถดถอยของกราฟมีค่า 0.077 ต่อ มิลลิทอร์ และลดลงตามลำดับเมื่อปรับกำลังไฟฟ้าเป็น 100 วัตต์ และ 150 วัตต์



ภาพที่ 2 ผลการวัดอัตราการตกสะสมฟิล์มอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงตาม (a) กำลังไฟฟ้า ณ ความดัน 5 10 20 มิลลิทอร์ และ (b) ความดันแก๊ส ณ กำลังไฟฟ้า 50 100 150 วัตต์

ภาพที่ 3(a) แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสมและกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเป้าทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม ณ ความดันแก๊สอาร์กอน 10 มิลลิทอร์ จากกราฟเห็นได้ชัดว่า ทองแดงมีอัตราการตกสะสมที่สูงกว่าอะลูมิเนียมและไทเทเนียมตลอดช่วงกำลังไฟฟ้าที่กำหนด เช่น ณ กำลังไฟฟ้า 200 W อัตราการตกสะสมของฟิล์มทองแดงมีค่าประมาณ 13.36 อังสตรอมต่อวินาที ในขณะที่ฟิล์มอะลูมิเนียมและไทเทเนียมมีอัตราการตกสะสมเท่ากับ 3.37 และ 2.07 อังสตรอมต่อวินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเห็นได้ว่าการเพิ่มกำลังไฟฟ้าให้กับหัวแมกนีตรอนส่งผลให้ค่าอัตราการตกสะสมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในทุกกรณี สำหรับทองแดง อัตราการตกสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าในอัตรา 0.067 อังสตรอมต่อวินาทีต่อวัตต์ สูงกว่าในกรณีอะลูมิเนียม 4 เท่า (0.017 อังสตรอมต่อวินาทีต่อวัตต์) และในกรณีไทเทเนียม 6 เท่า (0.011 อังสตรอมต่อวินาทีต่อวัตต์)



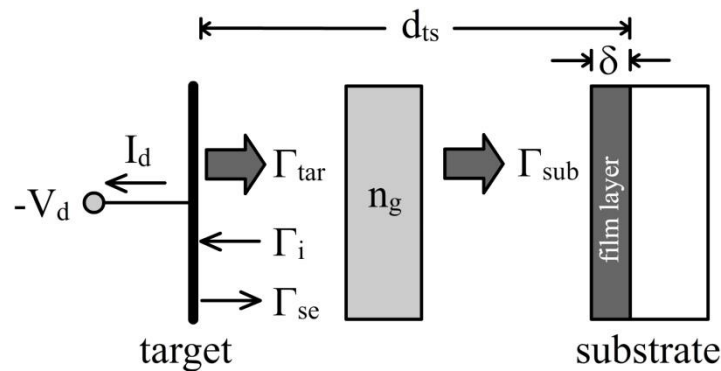
ภาพที่ 3 (a) อัตราการตกสะสมที่วัดได้จากการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้เป้าทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม ณ ความดันของแก๊สอาร์กอน 10 มิลลิทอร์ และ (b) อัตราการตกสะสมที่วัดได้จากการเปลี่ยนความดันแก๊สอาร์กอน ระหว่างเคลือบฟิล์มทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม ณ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์

ภาพที่ 3(b) แสดงผลการตรวจวัดอัตราการตกสะสมที่เปลี่ยนแปลงตามความดันแก๊ส โดยใช้กำลังไฟฟ้าคงที่ 100 วัตต์กับเป้าทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม กราฟความสัมพันธ์ในภาพที่ 3(b) แสดงให้เห็นว่า ณ กำลังไฟฟ้าค่าเดียวกัน ทองแดงยังคงมีอัตราการตกสะสมสูงสุดตลอดช่วงความดันแก๊สที่กำหนดระหว่าง 5 และ 30 มิลลิทอร์ ข้อสรุปดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 3(a) นั้นหมายความว่าภายใต้กำลังไฟฟ้าและความดันแก๊ส

เดียวกัน อัตราการตกสะสมขึ้นตรงกับชนิดของวัสดุเป้า นอกจากนี้ยังพบว่า อัตราการตกสะสมของเป้าแต่ละชนิดยังคงมีแนวโน้มถดถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเพิ่มความดันแก๊สอาร์กอน โดยเป้าแต่ละชนิดมีอัตราถดถอยที่แตกต่างกัน

ผลการทดลองข้างต้นแสดงถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้า ความดันแก๊สอาร์กอน และชนิดวัสดุเป้า ที่มีต่ออัตราการตกสะสมของฟิล์มบาง ณ ตำแหน่งเซนเซอร์ควอตซ์ ความสัมพันธ์ของปริมาณดังกล่าวสามารถอธิบายได้จากการพิจารณาปริมาณฟลักซ์ของอนุภาคที่หลุดออกจากผิวเป้าภายใต้กระบวนการสปัตเตอริง และกระบวนการชนกับอนุภาคแก๊สที่อยู่บนเส้นทางจากหัวแมงนีตรอนถึงเซนเซอร์ควอตซ์ ตามแบบจำลอง ดังนี้

พิจารณาไดอะแกรมแบบจำลองการเคลือบฟิล์มภายใต้กระบวนการสปัตเตอริงตามภาพที่ 4 ศักย์ลบขนาด  $V_d$  ที่ป้อนให้กับเป้าโลหะ ทำให้ไอออนของแก๊สอาร์กอนเคลื่อนที่ระดมชนเป้าด้วยปริมาณฟลักซ์ไอออนอาร์กอน  $\Gamma_i$  โดยไอออนเหล่านี้มีพลังงานจลน์  $\epsilon_i = q_i V_d$  เมื่อ  $q_i$  คือประจุเฉลี่ยของไอออนอาร์กอน การระดมชนด้วยไอออนพลังงานสูงก่อให้เกิดการปลดปล่อยฟลักซ์อิเล็กตรอนลำดับสอง  $\Gamma_{se}$  ภายใต้กลไกการเหนี่ยวนำด้วยพลังงานศักย์ของไอออน (Lieberman & Lichtenberg, 2005) พร้อม ๆ กับเกิดการปลดปล่อยฟลักซ์โลหะ  $\Gamma_{tar}$  ภายใต้กลไกสปัตเตอริง ทางหนึ่งผลรวมของ  $\Gamma_{se}$  และ  $\Gamma_i$  เกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้า  $I_d$  ที่วัดจากแหล่งจ่ายไฟ อีกทางหนึ่ง  $\Gamma_{tar}$  เคลื่อนตัวออกไปผ่านกลุ่มแก๊สอาร์กอนความหนาแน่น  $n_g$  เกิดการชนกันระหว่างอะตอมแก๊สตามเส้นทางระยะ  $d_{ts}$  ทำให้เหลือฟลักซ์โลหะปริมาณ  $\Gamma_{sub}$  ตกกระทบผิวชิ้นงานเกิดเป็นชั้นฟิล์มหนา  $\delta$  ภายในระยะเวลา  $t$  แบบจำลองในภาพที่ 4 จะนำไปสู่การเชื่อมโยงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสมของชั้นฟิล์มที่วัดได้จากการทดลองและปริมาณที่เกี่ยวข้องกับกลไกทางฟิสิกส์ตามที่กล่าวมา



ภาพที่ 4 ไดอะแกรมแบบจำลองการเคลือบฟิล์มภายใต้กระบวนการสปัตเตอริง

อัตราการตกสะสม ณ ผิวชิ้นงาน  $R_{sub}$  หมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนา ( $\delta$ ) ของฟิล์มที่ตกสะสมบนผิวชิ้นงานต่อช่วงระยะเวลาการเคลือบ ( $t$ ) เขียนเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ตามสมการ (1)

$$R_{sub} = \frac{\delta}{t} \tag{1}$$

ถ้ากำหนดให้ ชั้นฟิล์มมีความหนาแน่นของเนื้อฟิล์ม  $\rho_f$  ก่อตัวบนผิวชิ้นงานพื้นที่ A ดังนั้น

$$\rho_f = \frac{Nm}{A\delta} \tag{2}$$

เมื่อ N เป็นจำนวนอะตอมโลหะในเนื้อฟิล์ม และ m คือมวลอะตอมของฟิล์ม

สมการ (1) และ (2) ทำให้สามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสม มวลอะตอมของฟิล์ม และความหนาแน่นของชั้นฟิล์ม จำนวนอะตอมสารเคลือบที่ตกสะสมบนผิวชิ้นงานต่อพื้นที่ต่อเวลาหมายถึง ฟลักซ์ของสารเคลือบ แทนด้วย  $\Gamma_{sub}$  ดังนั้น  $R_{sub}$  จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับ  $\Gamma_{sub}$  ตามสมการ (3)

$$R_{sub} = \frac{Nm}{At\rho_f} = \frac{m}{\rho_f} \Gamma_{sub} \quad (3)$$

จากแบบจำลองภาพที่ 4 ฟลักซ์ของสารเคลือบ  $\Gamma_{sub}$  เป็นผลลัพธ์ที่เกิดจากการพิจารณาฟลักซ์  $\Gamma_{tar}$  ซึ่งมีต้นกำเนิดจากผิวเป้าภายใต้กระบวนการสเปคโตรริง เคลื่อนที่ชนกลุ่มแก๊สอาร์กอนที่มีความหนาแน่น  $n_g$  เป็นระยะทาง  $d_{ts}$  ดังนั้น  $\Gamma_{sub}$  จึงมีความสัมพันธ์กับ  $\Gamma_{tar}$  ภายใต้กระบวนการชนกันแบบกระเจิงระหว่างอะตอมโลหะและอะตอมอาร์กอน ตามสมการ (4) (Lieberman & Lichtenberg, 2005)

$$\Gamma_{sub} = \Gamma_{tar} \exp(-\sigma n_g d_{ts}) \quad (4)$$

เมื่อ  $\sigma$  คือภาคตัดขวางการชน (collision cross section) ของการชนแบบกระเจิงระหว่างอะตอมโลหะรัศมี  $r_m$  และอะตอมอาร์กอนรัศมี  $r_g$  ตามสมการ (5) (Lieberman & Lichtenberg, 2005)

$$\sigma = \pi(r_m + r_g)^2 \quad (5)$$

พิจารณาแก๊สอาร์กอนเป็นแก๊สอุดมคติ ดังนั้นความหนาแน่น  $n_g$  และความดัน  $p_{tot}$  ของแก๊สอาร์กอนอุณหภูมิ  $T$  จึงเป็นไปตามสมการ (6)

$$p_{tot} = n_g k_B T \quad (6)$$

แทน (6) ใน (4) และ (3) ตามลำดับจะได้สมการ (7)

$$R_{sub} = \frac{m}{\rho_f} \Gamma_{tar} \exp\left(-\frac{\sigma d_{ts}}{k_B T} p_{tot}\right) \quad (7)$$

สังเกตจากสมการ (7) อัตราการตกสะสม  $R_{sub}$  สัมพันธ์กับความดันแก๊ส  $p_{tot}$  ผ่านพจน์เอกซ์โพเนนเชียล รูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแนวโน้มถดถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียลของกราฟในภาพที่ 2 และ 3 นอกจากนี้ ถ้ากำหนดให้ความดันแก๊ส  $p_{tot}$  มีค่าคงที่ จะพบว่าอัตราการตกสะสม  $R_{sub}$  มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับปริมาณฟลักซ์  $\Gamma_{tar}$  ที่มีจุดกำเนิดจากผิวเป้าภายใต้กลไกสเปคโตรริง

จากไดอะแกรมในภาพที่ 4 การระดมชนผิวเข้าจากฟลักซ์ไอออน  $\Gamma_i$  ไม่เพียงทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนลำดับสอง  $\Gamma_{se}$  แต่ยังทำให้เกิดการปลดปล่อยฟลักซ์โลหะ  $\Gamma_{lar}$  ออกจากผิวเข้าพื้นที่  $A_t$  ปริมาณทั้งสองมีความเชื่อมโยงกับปริมาณทางไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟทั้งกระแสไฟฟ้า  $I_d$  และศักย์ไฟฟ้า  $V_d$  ซึ่งสามารถแบ่งพิจารณาในรายละเอียดได้ดังนี้  
กระแสไฟฟ้า  $I_d$  เป็นผลรวมของฟลักซ์ไอออน  $\Gamma_i$  และฟลักซ์อิเล็กตรอนลำดับสอง  $\Gamma_{se}$  ตามสมการ (8)

$$\frac{I_d}{A_t} = q_i \Gamma_i - q_e \Gamma_{se} \tag{8}$$

ถ้ากำหนดให้ไอออนของอาร์กอนมีสถานะประจุ +1 เช่น  $Ar^+$  นั่นคือ  $q_i = +q$  และ  $q_e = -q$  เมื่อ  $q$  คือค่าประจุไฟฟ้าพื้นฐานเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์ และพิจารณาปริมาณ  $\Gamma_{se}$  ด้วยเทอมของค่าyield  $\gamma_{se} = \Gamma_{se} / \Gamma_i$  ดังนั้น

$$I_d = (1 + \gamma_{se}) A_t q \Gamma_i \tag{9}$$

ค่าyield  $\gamma_{se}$  เป็นสมบัติเฉพาะที่ขึ้นกับสภาวะผิวของวัสดุ ซึ่งมีค่าในย่าน 0.05 – 0.20 สำหรับผิวโลหะ (Depla, Li, Mahieu, & Gryse, 2008) ค่าyield  $\gamma_{se}$  เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่ปลดปล่อยออกจากผิวเข้า อิเล็กตรอนเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งยวดในกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนของแก๊สอาร์กอน ซึ่งไอออนที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่เกิดจากความลาดชันของศักย์ไฟฟ้า  $V_d$  บริเวณหน้าวัสดุเป้า ทำให้ไอออนย้อนกลับมาเป็นอนุภาคพลังงานสูงระดมชนผิวเป้าเป็นวัฏจักรอย่างต่อเนื่อง

จากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น นอกเหนือไปจากฟลักซ์อิเล็กตรอน ฟลักซ์ไอออน  $\Gamma_i$  ยังทำให้เกิดการปลดปล่อยฟลักซ์โลหะ  $\Gamma_{lar}$  ซึ่งมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่  $\Gamma_{lar} = Y \Gamma_i$  เมื่อ  $Y$  คือค่าสปีดเตอริงยิลด์ ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะที่ขึ้นหลายปัจจัยแต่ปัจจัยที่มีความสำคัญในอันดับต้น ๆ คือ ค่าพลังงานของไอออน  $\epsilon_i$  ที่ระดมชนผิวเป้า

ค่าสปีดเตอริงยิลด์ของโลหะอาจคำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Yamamura, 1981) หรือจากการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีมอนติคาร์โล ที่ใช้จำลองอันตรกิริยาระหว่างไอออนและวัสดุออสซิลูชัน (Biersack & Haggmark, 1980) สำหรับไอออนในกระบวนการเคลือบฟิล์มที่มีพลังงานย่าน 200 ถึง 1000 อิเล็กตรอนโวลต์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสปีดเตอริงยิลด์และพลังงานไอออนมีรูปแบบเป็นไปตามฟังก์ชันอโลมาทริก (Gudmundsson & Hecimovic, 2017)

$$Y = a \epsilon_i^b \tag{10}$$

เมื่อ  $a$  และ  $b$  เป็นพารามิเตอร์ของฟังก์ชัน ค่าพลังงานจลน์  $\epsilon_i$  ของ  $Ar^+$  ที่พุ่งชนเป้าสาร สัมพันธ์กับศักย์ไฟฟ้า  $V_d$  ตามสมการ

$$\epsilon_i = q V_d \tag{11}$$

เมื่อแทนสมการที่พิจารณาข้างต้น ลงในสมการ (7) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการตกสะสมและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเคลือบฟิล์มดังนี้

$$R_{sub} = \frac{m}{\rho_f} a (q V_d)^b \frac{I_d}{q A_t (1 + \gamma_{se})} \exp\left(-\frac{\sigma d_{ts}}{k_B T} p_{tot}\right) \tag{12}$$



แม้สมการ (12) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของอัตราการตกสะสมและพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า นั่นคือศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า แต่กราฟผลการทดลองในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 เป็นความสัมพันธ์ที่แสดงในเทอมของกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับรูปสมการด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งสาม

เป็นที่ทราบดีว่า ในระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง กระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้หัวแมกนีตรอนสัมพันธ์กันตามสมการ (13) (Helmersson, Lattemann, Bohlmark, Ehiasarian, & Gudmundsson, 2006)

$$I_d \propto V_d^k \tag{13}$$

เมื่อพิจารณาในรูปสมการของกำลังไฟฟ้า  $P_d = I_d V_d$  และจัดรูปใหม่เพื่อทำให้ได้สมการศักย์ไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของกำลังไฟฟ้า

$$V_d = A P_d^B \tag{14}$$

โดยค่า A และ B เป็นค่าพารามิเตอร์ของสมการ ดังนั้นจัดรูปสมการ (12) ใหม่

$$R_{sub} = \frac{m}{\rho_f} a q^{b-1} A^{b-1} \frac{P_d^{1+B(b-1)}}{A_t(1+\gamma_{se})} \exp\left(-\frac{\sigma d_{ts}}{k_B T} p_{tot}\right) \tag{15}$$

สมการ (15) ซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการพิจารณาตามแบบจำลองในภาพที่ 4 จะถูกนำมาใช้คำนวณหาค่าอัตราการตกสะสมของฟิล์มทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียมภายใต้เงื่อนไขในย่านเดียวกันกับการทดลอง พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณสรุปในตารางที่ 1 ดังล่างดังนี้

**ตารางที่ 1** ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณตามสมการ (15)

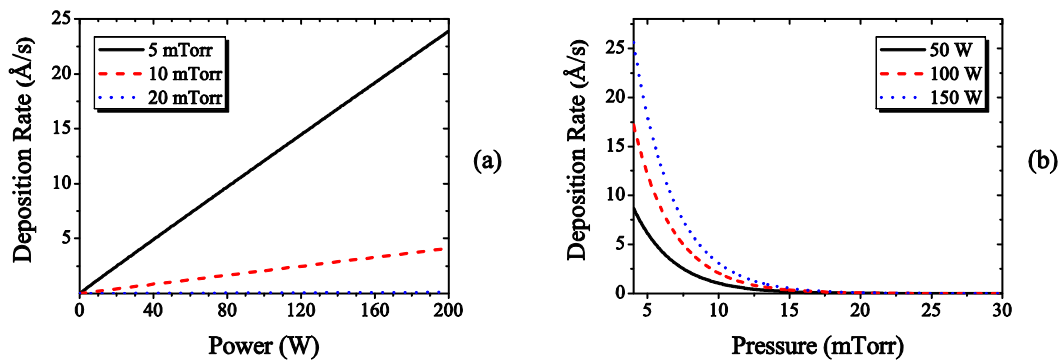
Elements	m	$\rho_f$	a	b	A	B	$\gamma_{se}$	$\frac{\sigma d_{ts}}{k_B T}$
	(kg)	(kg m <sup>-3</sup> )	(eV) <sup>b</sup>	-	V W <sup>B</sup>	-	-	m <sup>3</sup> J <sup>-1</sup>
Cu	1.055x10 <sup>-25</sup>	8,940	0.009	0.878	235.337	0.142	0.082	2.918
Al	4.480x10 <sup>-26</sup>	2,712	0.004	0.843	235.225	0.109	0.091	2.641
Ti	7.954x10 <sup>-26</sup>	4,500	0.009	0.692	187.900	0.129	0.114	3.061

**หมายเหตุ**

- ใช้ความหนาแน่นของโลหะบริสุทธิ์ แทนความหนาแน่นของชั้นฟิล์ม  $\rho_f$
- พารามิเตอร์ a และ b ของสมการ (10) หาได้จากการฟิตข้อมูลค่าสปีดเตอริงยิลด์ ที่คำนวณได้จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TRIM (Ziegler & Biersack, 2013)
- พารามิเตอร์ A และ B ของสมการ (14) หาได้จากการฟิตข้อมูล  $V_d$  และ  $P_d$  ที่วัดได้จากการทดลอง
- กำหนดให้ไอออนอาร์กอนมีสถานะประจุ +1 นั่นคือ  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  คููลอมบ์
- กำหนดอุณหภูมิแก๊สอาร์กอนเป็นอุณหภูมิห้อง นั่นคือ  $T = 298$  K
- สำหรับเป้าเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิวเป้า  $A_t \sim 1.9 \times 10^{-3}$  ตารางเมตร
- ใช้ข้อมูลใน (Slater, 1964) พิจารณารัศมีอะตอมโลหะและรัศมีอะตอมอาร์กอนสำหรับคำนวณหาพื้นที่ภาคตัดขวางการชนแบบกระเจิง  $\sigma$

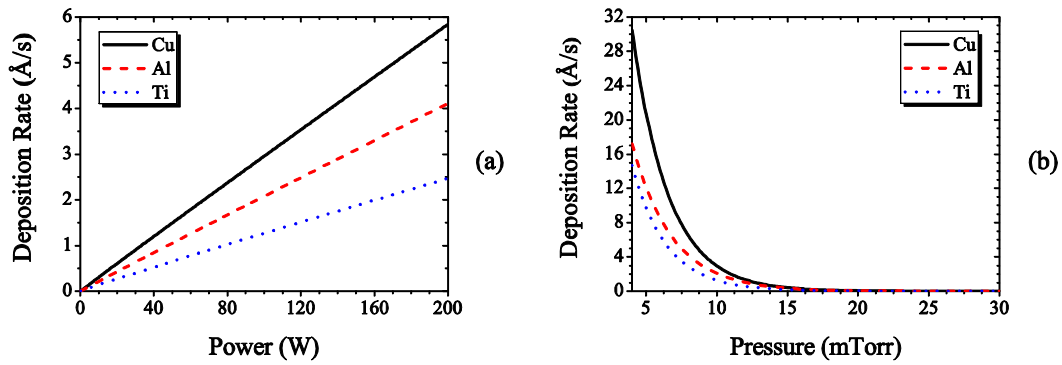
ภาพที่ 5 และภาพที่ 6 แสดงกราฟอัตราการตกสะสมฟิล์มที่ได้จากการคำนวณตามสมการ (15) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกับการทดลอง ผลการคำนวณมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 2 และภาพที่ 3 สามารถสรุปเป็นประเด็นสำคัญดังนี้

(1) ค่าอัตราการตกสะสมที่คำนวณได้ตามกราฟในภาพที่ 5(a) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามกำลังไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังนี้ การเพิ่มกำลังไฟฟ้าหมายถึงการเพิ่มกระแสไฟฟ้าและการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าให้กับหัวแมกนีตรอน ทางหนึ่งกระแสไฟฟ้าที่สูงขึ้นส่งผลโดยตรงกับการเพิ่มฟลักซ์ไอออนของอาร์กอน (จำนวนไอออนที่ระดมชนผิวเป้าต่อพื้นที่ต่อเวลา) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่เพิ่มอัตราการปลดปล่อยอนุภาคโลหะจากผิวเป้าตามสมการ (9) อีกทางหนึ่งการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าทำให้พลังงานของไอออนอาร์กอนเพิ่มขึ้นตามสมการ (11) และทำให้สปีดเตอริงยิลด์มีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการ (10) ดังนั้นกำลังไฟฟ้าจึงส่งผลต่อทั้งปริมาณและพลังงานของไอออนสำหรับใช้ในกระบวนการสปีดเตอริงเพื่อผลิตฟลักซ์โลหะที่ผิวเป้าและเกิดฟิล์มบนชิ้นงานด้วยอัตราการตกสะสม  $R_{sub}$  เมื่อพิจารณาสมการ (15) พบว่าอัตราการตกสะสมไม่ได้แปรผันตรงอย่างสมบูรณ์กับกำลังไฟฟ้า แต่มีความสัมพันธ์ในลักษณะที่  $R_{sub} \propto P_d^{1+B(b-1)}$  พิจารณาค่ายกกำลัง  $1+B(b-1)$  ของฟิล์มโลหะทั้งสามพบว่ามีค่าระหว่าง 0.96-0.98 ซึ่งใกล้เคียง 1 ดังนั้น จึงอาจประมาณได้ว่า  $R_{sub} \propto P_d$  ซึ่งสอดคล้องกับข้อสรุปจากผลการทดลองในภาพที่ 2(a) และภาพที่ 3(a)



ภาพที่ 5 ผลการคำนวณอัตราการตกสะสมที่เปลี่ยนแปลงตาม (a) กำลังไฟฟ้า และ (b) ความดันแก๊ส สำหรับอะลูมิเนียม

(2) ค่าอัตราการตกสะสมที่คำนวณได้ตามกราฟในภาพที่ 5(b) มีแนวโน้มถดถอยแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามความดันแก๊สสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่ออะตอมโลหะหลุดออกมาจากผิวเป้า จะเกิดการชนกับอะตอมแก๊สอาร์กอนระหว่างเส้นทางที่เคลื่อนที่ การชนกับอะตอมแก๊สทำให้อะตอมโลหะเปลี่ยนทิศการเคลื่อนที่หรือกระเจิงไปจากทิศทางเดิม ซึ่งลดโอกาสการตกสะสมเป็นฟิล์มบางบนชิ้นงาน การลดลงของอะตอมโลหะเนื่องจากการชนกับอะตอมแก๊สเป็นไปตามสมการ (4) เห็นได้ว่าการเพิ่มค่าความหนาแน่นของแก๊สอาร์กอน  $n_0$  ซึ่งมีความหมายเดียวกับการเพิ่มความความดัน  $p_{tot}$  ทำให้ฟลักซ์โลหะ  $\Gamma_{sub}$  ที่ไปถึงชิ้นงานมีค่าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล สอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 2(b) และภาพที่ 3(b) นอกจากนี้การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเป็นการเพิ่มค่า  $\Gamma_{tar}$  ซึ่งเป็นแอมพลิจูดของเทอมเอกซ์โพเนนเชียลในสมการ (4) ดังนั้นเส้นกราฟอัตราการตกสะสมในภาพที่ 5(b) จึงยกตัวขึ้นตามกำลังไฟฟ้า สอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ 2(b)



ภาพที่ 6 ผลการคำนวณอัตราการตกสะสมที่เปลี่ยนแปลงตาม (a) กำลังไฟฟ้า ณ ความดัน 10 มิลลิทอร์ และ (b) ความดันแก๊ส ณ กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ สำหรับเป้าทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม

(3) ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน อัตราการตกสะสมที่คำนวณได้ของฟิล์มทองแดง (แสดงในภาพที่ 6) มีค่าสูงกว่า อะลูมิเนียม และไทเทเนียมตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายจากปัจจัยหลักสองส่วนคือ ปริมาณฟลักซ์โลหะตั้งต้นที่ปลดปล่อยจากผิวเป้า (พิจารณาจากสเปคตรัมอิเล็กตรอน) และปริมาณฟลักซ์โลหะที่เหลือมาถึงชิ้นงาน (พิจารณาจากโอกาสการชนกับแก๊สระหว่างทาง) เมื่อพิจารณาพารามิเตอร์ a และ b ในตารางที่ 1 ทองแดงมีค่าสเปคตรัมอิเล็กตรอนสูงกว่า อะลูมิเนียมและไทเทเนียมอย่างมีนัยสำคัญ จึงเป็นสาเหตุให้อัตราการตกสะสมฟิล์มทองแดงมีค่าสูงกว่าธาตุที่เหลือ แม้ อะลูมิเนียมจะมีผลสเปคตรัมอิเล็กตรอนใกล้เคียงกับไทเทเนียม แต่เนื่องอะตอมอะลูมิเนียมมีขนาดเล็กกว่าไทเทเนียม จึงส่งผลให้ออกโอกาสการชนระหว่างอะลูมิเนียมและแก๊สอาร์กอนมีค่าน้อยกว่ากรณีไทเทเนียมตามสมการ (5) ดังนั้นอัตราการตกสะสมฟิล์มอะลูมิเนียมจึงมีค่าสูงกว่าไทเทเนียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองทั้งในภาพที่ 6(a) และภาพที่ 6(b)

แม้ผลการคำนวณข้างต้นจะมีความสอดคล้องกับผลการทดลองในภาพที่ (2) และภาพที่ (3) ในลักษณะเชิงเปรียบเทียบ แต่เมื่อพิจารณาถึงค่าสมบรูณ์ของอัตราการตกสะสมพบว่า ค่าที่คำนวณจากสมการ (15) ยังมีความแตกต่างไปจากค่าที่วัดได้จากการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากยังขาดการพิจารณากลไกทางฟิสิกส์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง เช่น การแพร่ของกลุ่มอะตอมโลหะในพลาสมา การแจกแจงพลังงานของฟลักซ์โลหะ และการกระจายตัวแบบโคชานันท์ของอนุภาคโลหะที่ปลดปล่อยออกจากผิวเป้า เป็นต้น การพิจารณาปัจจัยและกลไกทางฟิสิกส์ดังกล่าวจะเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยทำให้เกิดความเข้าใจเชิงลึกในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางเทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง นำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขการเคลือบที่เหมาะสม

### สรุปผลการวิจัย

ได้ดำเนินการศึกษาถึงอิทธิพลของกำลังไฟฟ้าและความดันแก๊สที่มีต่ออัตราการตกสะสมฟิล์มทองแดง อะลูมิเนียม และไทเทเนียม ในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ด้วยวิธีการวัดอัตราการตกสะสมฟิล์มจากเซนเซอร์ควอตซ์ และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการวัดและผลการคำนวณมีความสอดคล้องกัน และเกิดข้อสรุปไปทางเดียวกัน อัตราการตกสะสมมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับกำลังไฟฟ้า และมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความดันแก๊ส ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้จากการพิจารณาพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ที่คำนึงถึงกลไกสเปคตรัมอิเล็กตรอนผิวเป้า เช่น ค่าสเปคตรัมอิเล็กตรอน และกลไกการชนกับอนุภาคแก๊สระหว่างทาง เช่นค่าพื้นที่ตัดขวางการชนแบบกระเจิงระหว่างอนุภาคเป้าและอะตอมแก๊สอาร์กอน แต่ถึงอย่างไรก็ตามกลไกฟิสิกส์อื่นๆ เช่น การกระจายตัวและการแพร่ของอนุภาคโลหะควรได้รับการพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความสมบรูณ์ของแบบจำลอง

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนิสิตบัณฑิตศึกษา งบประมาณรายได้ ประจำปี 2561 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และขอขอบคุณศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยีบูรณาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยและเครื่องมือวิจัยบางส่วนสำหรับการพัฒนาระบบเคลือบฟิล์มบาง เทคนิคแมกนีตรอนสปัตเตอริง

## เอกสารอ้างอิง

- Anders, A. (2010). Deposition rates of high power impulse magnetron sputtering: Physics and economics. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 28, 783-790.
- Biersack, J., & Haggmark, L. (1980). A Monte Carlo computer program for the transport of energetic ions in amorphous targets. *Nuclear Instruments and Methods*, 174, 257-269.
- Depla, D., Li, X., Mahieu, S., & Gryse, R. (2008). Determination of the effective electron emission yields of compound materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41, 202003.
- Duygulu, N., & Kodolbas, A. O. (2016). Investigation of DTS effect on r.f. magnetron sputtered ZnO thin films. *Cryst. Res. Technol.*, 51, 189-196.
- Ekpe, S., Bezuidenhout, L., & Dew, S. (2005). Deposition rate model of magnetron sputtered particles. *Thin Solid Films*, 474, 330-336.
- Furuya, A., & Hirono, S. (1990). Target magnetic field effects on deposition rate in rf magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 68, 304-310.
- Gudmundsson, J., & Hecimovic, A. (2017). Foundations of DC plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*, 26, 123001.
- Helmersson, U., Lattemann, M., Bohlmark, J., Ehasarian, A., & Gudmundsson, J. (2006). Ionized physical vapor deposition (IPVD): A review of technology and applications. *Thin Solid Films*, 513, 1 - 24.
- Lieberman, M., & Lichtenberg, A. (2005). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Liu, X., Li, Y., Tao, B., Luo, A., & He, S. (2002). The effect of deposition rate on the microstructure of YBCO thin films prepared by inverted cylindrical magnetron sputtering. *Physica C: Superconductivity*, 371, 133-138.
- Rahmane, S., Djouadi, M., Aida, M., Barreau, N., Abdallah, B., & Hadj Zoubir, N. (2010). Power and pressure effects upon magnetron sputtered aluminum doped ZnO films properties. *Thin Solid Films*, 519, 5-10.
- Slater, J. (1964). Atomic Radii in Crystals. *The Journal of Chemical Physics*, 41, 3199-3204.
- Tanaka, T., Suzuki, M., & Kawabata, K. (1999). Effect of DC bias on the deposition rate using RF-DC coupled magnetron sputtering for Mg thin films. *Thin Solid Films*, 343-344, 57-59.
- Wasa, K., Kanno, I., & Kotera, H. (2012). *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-materials and MEMS*. William Andrew.

Yamamura, Y. (1981). Contribution of anisotropic velocity distribution of recoil atoms to sputtering yields and angular distributions of sputtered atoms. *Radiation Effects*, 55, 49-55.

Ziegler, F., & Biersack, J. (2013). *Monte Carlo code SRIM2013*. Retrieved 2016, from <http://srim.org>.