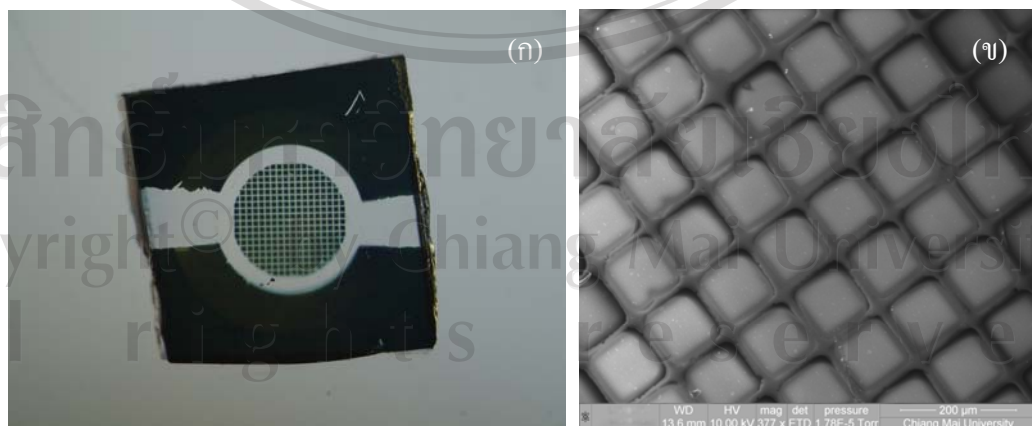


บทที่ 4 ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลจากการดำเนินงานวิจัยทั้งหมด ตามแผนการดำเนินการในรูป 3.12 โดยเริ่มจากการศึกษาการใช้เครื่องโฟกัสไอออน빔 ซึ่งประกอบด้วย การเตรียมเครื่อง FIB สำหรับการทดลอง การพอกผิวด้วยเทคนิค FIB-CVD และการตัดแต่งด้วยลำไอออน ขั้นตอนต่อมาได้เตรียมแผ่นรองรับ จากนั้นนำแผ่นรองรับมาศึกษาการเตรียมเงื่อนไขต่างๆ โดยกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าช่วง 10-30 kV และแปรค่ากระแสของลำไอออน 30-500 pA ซึ่งได้ผลการทดลอง จากการวิเคราะห์ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) และเครื่องกระจายพลังงานรังสีเอ็กซ์ (EDS) ในการหาเงื่อนไขของค่าศักย์ไฟฟ้า และค่ากระแสของลำไอออนที่เหมาะสม ขั้นตอนนำไปศึกษาผลของเวลากับเงื่อนไขของความหนา Z ของขั้วไฟฟ้าทองคำในระดับนาโน สุดท้ายได้นำเงื่อนไขที่เหมาะสมนำมาประยุกต์ทดลองใช้เป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพ และเซ็นเซอร์ ก๊าซซึ่งได้ผลตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 ผลการเตรียมแผ่นรองรับ



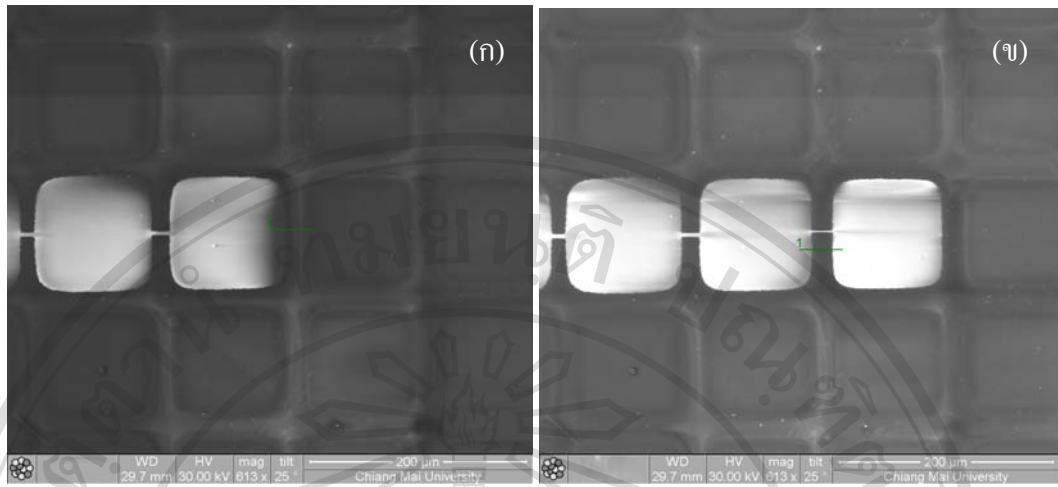
รูป 4.1 (ก) ภาพจากกล้องสเตอริโอไมโครสโคปของกระจกแผ่นรองรับถูกเคลือบด้วยทองคำ

(ข) ภาพขยายด้วย SEM ของแผ่นรองรับถูกเคลือบด้วยทองคำ

แผ่นรองรับเพื่อใช้ในการศึกษาเงื่อนไขการสร้าง เส้นฟิล์มบางของทองคำนาโน ถูกเตรียมขึ้นจากการนำแผ่นกระจกสไลด์ไปเคลือบผิวหน้าด้วยทองคำ โดยใช้เทคนิคสปัตเตอร์ ลักษณะของทองคำที่เคลือบอยู่ จะเป็นรูปทรงกลม ภายในเป็นช่องตารางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังรูป 4.1 (ก) ภาพจาก SEM แสดงให้เห็นว่า แต่ละช่องจะเคลือบด้วยทองคำหนาประมาณ 30-50 nm และแยกห่างออกจากกัน ประมาณ 20 μm ดังรูป 4.1 (ข)

4.2 ผลการเตรียมเส้นฟิล์มบางของทองคำระดับนาโน

ในขั้นแรกของการเตรียมแผ่นรองรับพื้นที่สี่เหลี่ยมทองคำที่ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการสปัตเตอร์โดยใช้หน้ากากทำให้แต่ละพื้นที่จะไม่เชื่อมต่อกัน จึงส่งผลให้แต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมไม่สามารถที่จะนำไฟฟ้าต่อกันได้ ลักษณะการนำไฟฟ้าของแผ่นรองรับสามารถตรวจสอบจาก SEM ได้ เนื่องจาก SEM จะไม่สามารถที่จะเห็นภาพของวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้า ดังนั้น หากเราไม่สามารถเห็นภาพของบริเวณใดได้ชัดเจนแสดงว่าบริเวณนั้นไม่นำไฟฟ้าหรือมีการนำไฟฟ้าต่ำ พื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีสีเทาในรูป 4.2(ก) เมื่อ ทำการเชื่อมทางเดินของอิเล็กตรอนด้วยเส้นฟิล์มบางของทองคำขามาจากขั้วไฟฟ้าที่ถูกเตรียมไว้แล้วจำนวน 2 บริเวณ จะสังเกตเห็นลักษณะการนำไฟฟ้าของพื้นที่สี่เหลี่ยมทองคำบนแผ่นรองรับเป็นสีขาวเพิ่มขึ้นเป็น 3 บริเวณ ดังแสดงในรูป 4.2(ข)



รูป 4.2 (ก) ลักษณะการนำไฟฟ้าของแต่ละพื้นที่สี่เหลี่ยมทองคำบนแผ่นรองรับ (ก่อน) และ

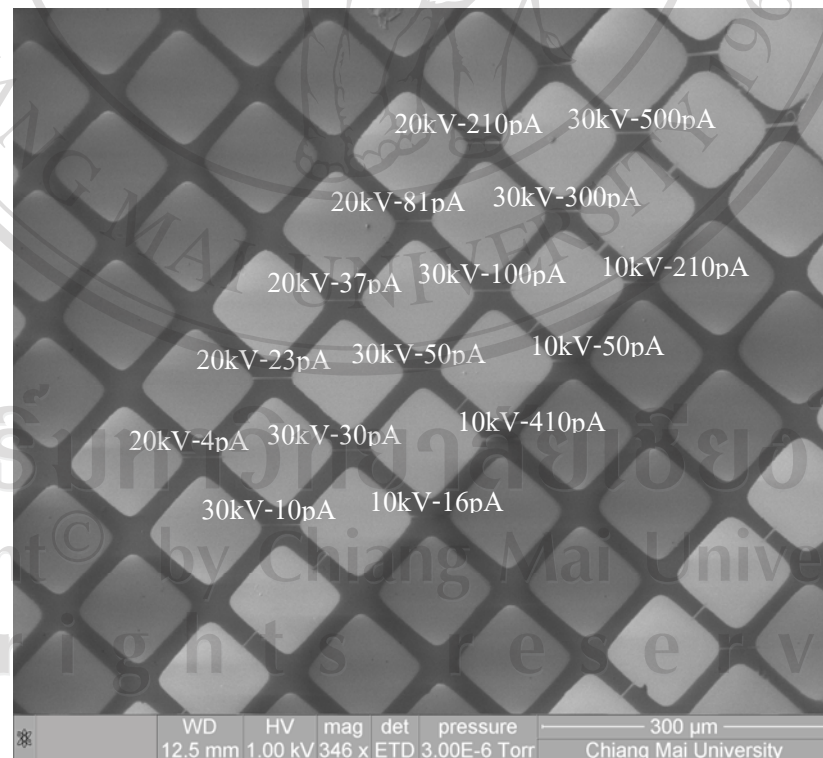
(ข) หลังจากทำการเชื่อมทางเดินของอิเล็คตรอนด้วยทองคำขาวด้วยเทคนิค FIB-CVD

4.2.1 ผลการสร้างเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวในแต่ละจุดระหว่างพื้นที่ทองคำ

ผลจากการพอกเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวเชื่อมระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสทองคำ ดังแสดงในรูป 4.3 และ 4.4 เพื่อจะได้สังเกตการนำไฟฟ้าที่ดี ในแต่ละเงื่อนไขการเตรียมที่ค่า ศักย์ไฟฟ้า และค่าขนาดของลำไอออนในย่านต่างๆ ซึ่งผลจากรูป 4.3 และจากรูป 4.4 ของโหมดภาพ FIB และ SEM จะสังเกตเห็นบริเวณที่นำไฟฟ้าได้ดีของพื้นที่ทองคำ ซึ่งจะถูกเชื่อมด้วยเส้นฟิล์ม บางนาโนของทองคำขาวได้ผลดังตาราง 4.1 ช่วงที่จะนำไฟฟ้าได้ดีต้องใช้ค่าลำไอออนที่มากกว่า 30 pA ขึ้นไป



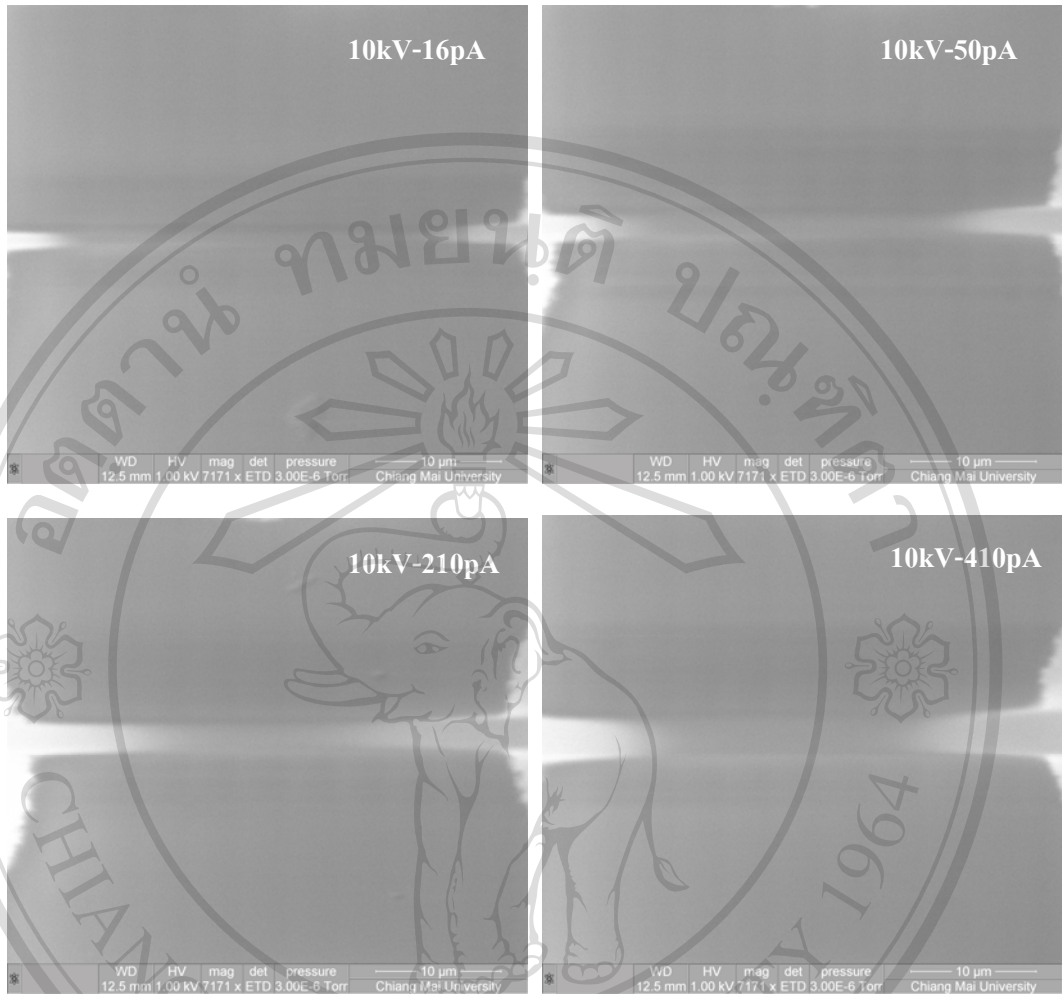
รูป 4.3 ภาพจาก FIB แสดงตำแหน่งเส้นฟิล์มบางนาโนทองคำขาวที่เชื่อมระหว่างพื้นที่ของทองคำ



รูป 4.3 ภาพจาก SEM แสดงตำแหน่งเส้นฟิล์มบางนาโนทองคำขาวที่เชื่อมระหว่างพื้นที่ของทองคำ

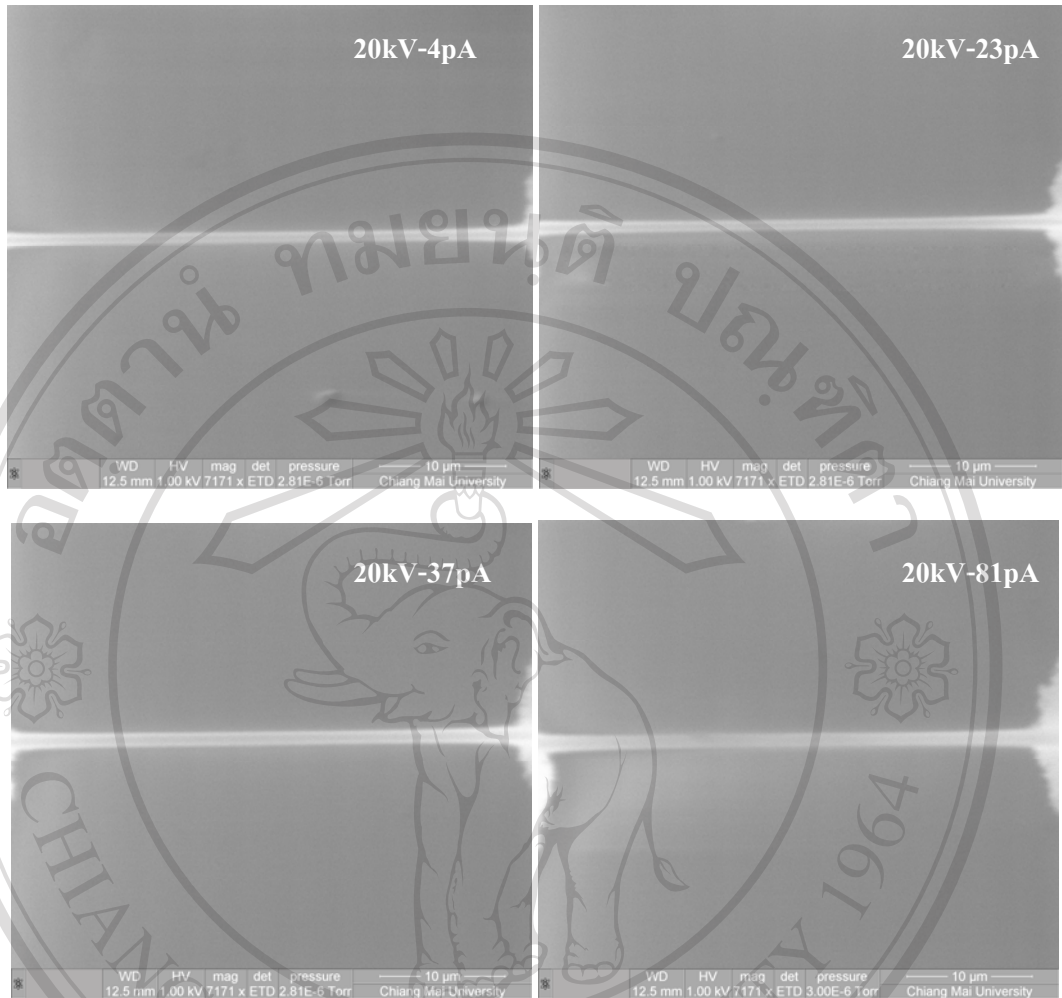
ตาราง 4.1 ผลการนำไฟฟ้าของพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ถูกเชื่อมด้วยเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาว
ที่เงื่อนไขต่างๆ

IB operation		Brightness/gray		Conductivity
Energy (kV)	Current (pA)	FIB	SEM	
10	16	gray	gray	poor
	50	gray	gray	poor
	210	gray	gray	poor
	410	gray	gray	poor
20	4	gray	bright	poor
	23	gray	gray	poor
	37	bright	bright	good
	80	gray	gray	poor
30	10	gray	bright	poor
	30	gray	bright	poor
	50	bright	bright	good
	100	bright	bright	good
	300	bright	bright	good
	500	bright	bright	good



รูป 4.5 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า 10 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 10-400 pA ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.6 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์

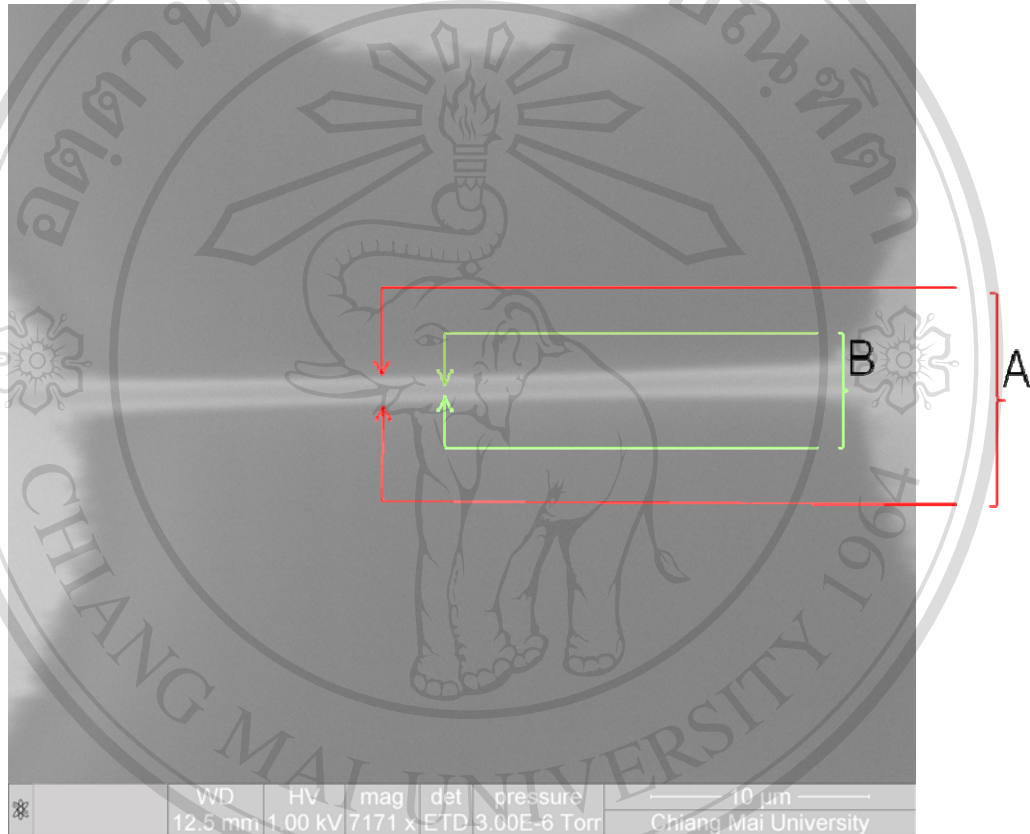
ไฟฟ้า 20 kV และแปรค่าขนาดของ ค่าไอออนในย่าน 4-90 pA ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



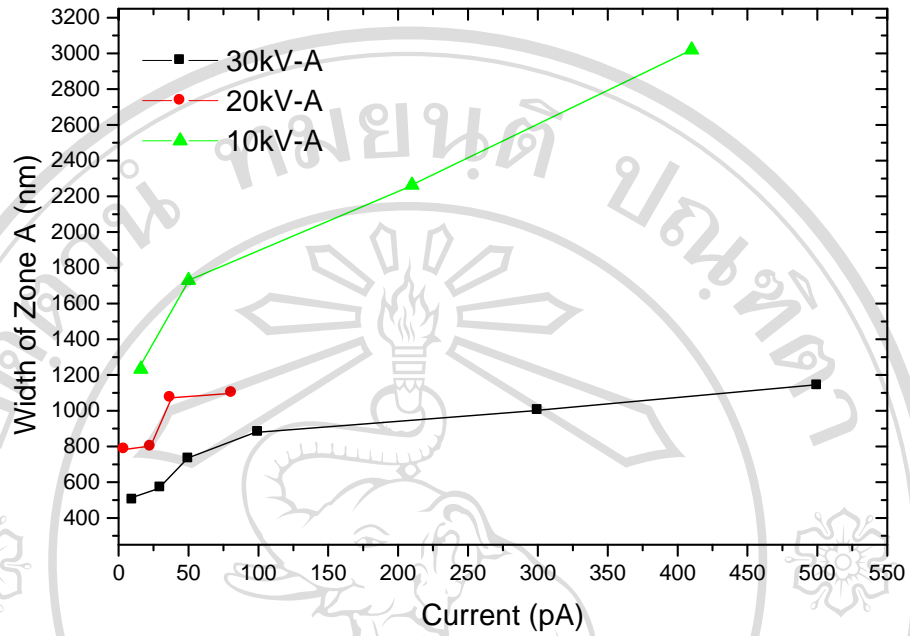
รูป 4.7 ภาพ SEM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วยค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 10-500 pA ตามลำดับ

จากรูป 4.5-4.7 จะเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาว ลักษณะตรงกลางของเส้นบางเส้นที่ใหญ่ในเส้นจะสังเกตเห็นบริเวณพื้นที่ A เป็นขนาดความกว้างของเส้นตรงขอบสีขาวด้านนอกสุด และพื้นที่ B เป็นขนาดความกว้างของเส้นตรงขอบสีเทาด้านใน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในรูปที่ 4.8

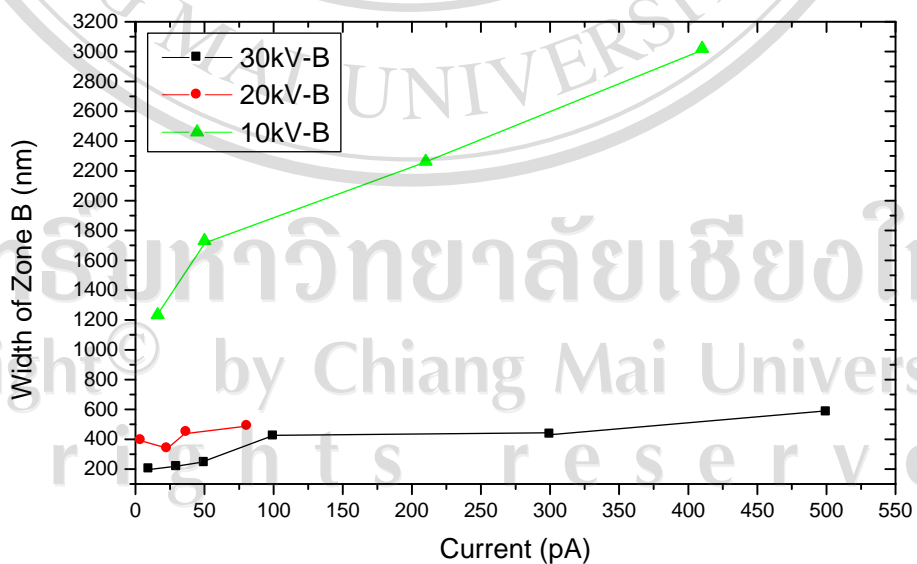


รูป 4.8 แสดงลักษณะของบริเวณพื้นที่ A และ B ของเงื่อนไข 30 kV-500 pA (ผลจาก SEM)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

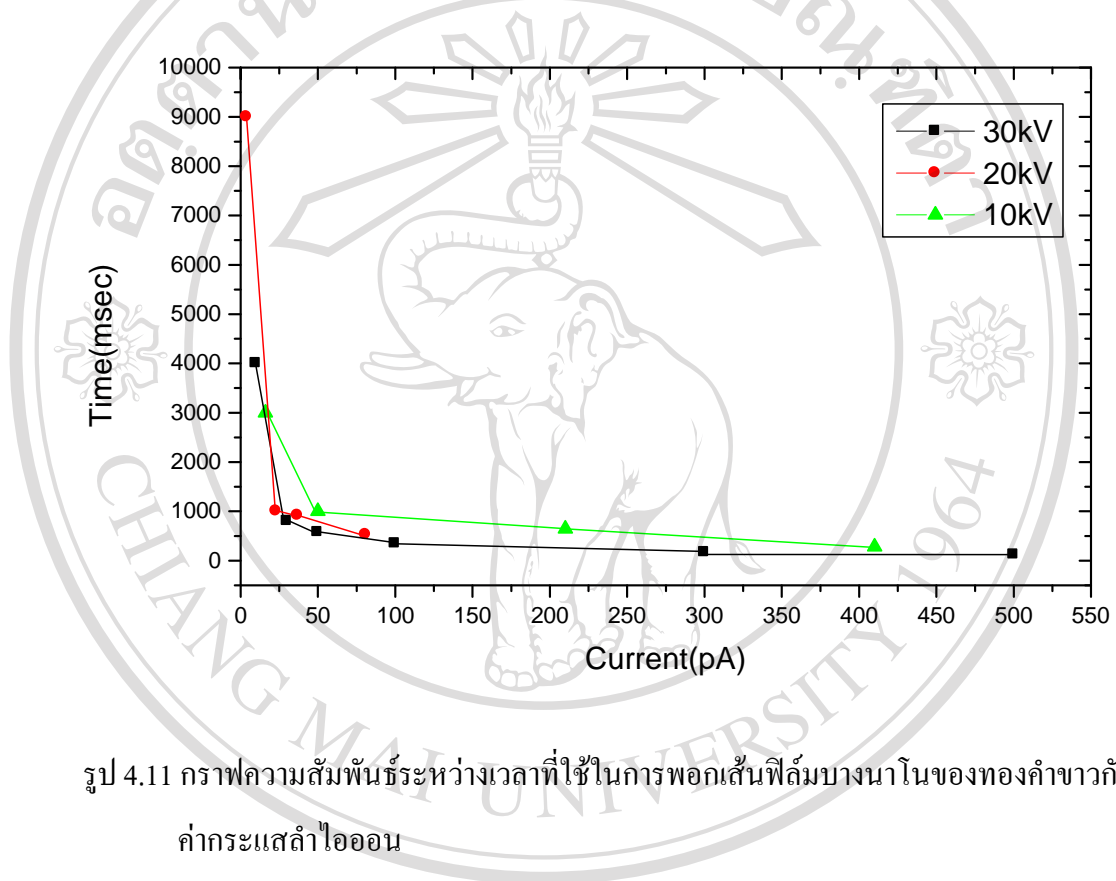


รูป 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่วัดขนาดจากขอบนอกบริเวณพื้นที่ (A) ของเส้นกับค่ากระแสของลำไอออนที่ใช้



รูป 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่วัดขนาดจากขอบใน(B) ของเส้นกับค่ากระแสของลำไอออนที่ใช้

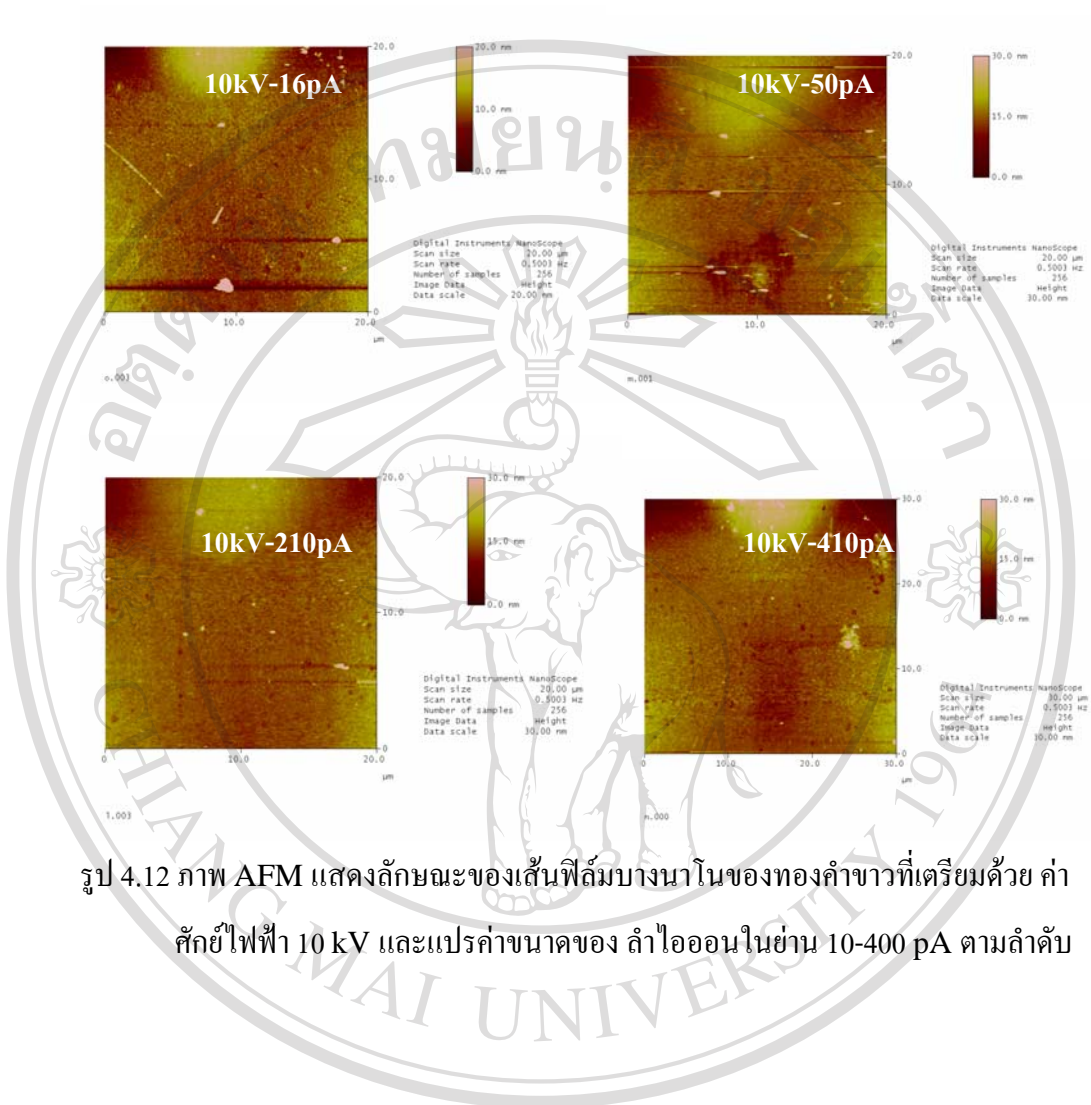
จากภาพ SEM จะสังเกตเห็นว่า ขนาดความกว้างของเส้นฟิล์มบางนาโนของ
 ทองคำขาวที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิค FIB-CVD จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้า จาก 30 –
 10 kV ตามลำดับ และเพิ่มค่ากระแสของลำไอออน จาก 4-500 pA ดังรูป 4.5-4.7 และรูป 4.8-
 4.10



รูป 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการพอกเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวกับ
 ค่ากระแสลำไอออน

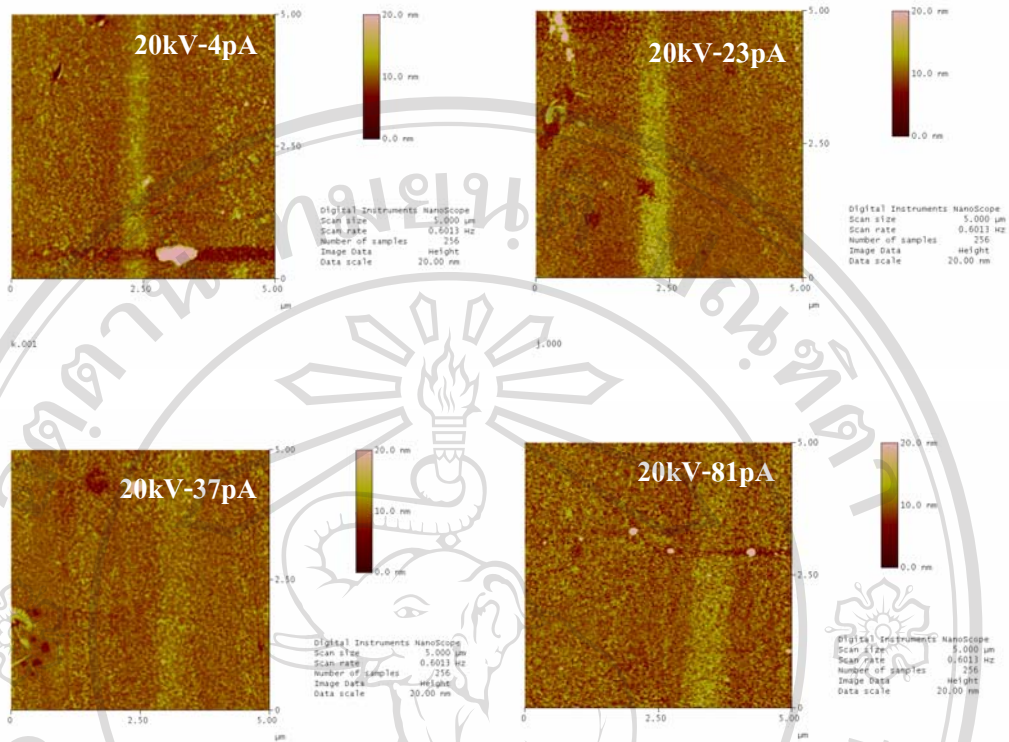
เวลาที่ใช้แปรผกผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ดังรูป 4.11 ซึ่งที่ 30 kV จะใช้เวลาในการพอกเส้น
 ฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวประมาณ 572 ms ที่ค่า $X = 250 \text{ nm}$, $Y = 50 \text{ }\mu\text{m}$ และ $Z = 10 \text{ nm}$

4.2.2 ผลจากการตรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)



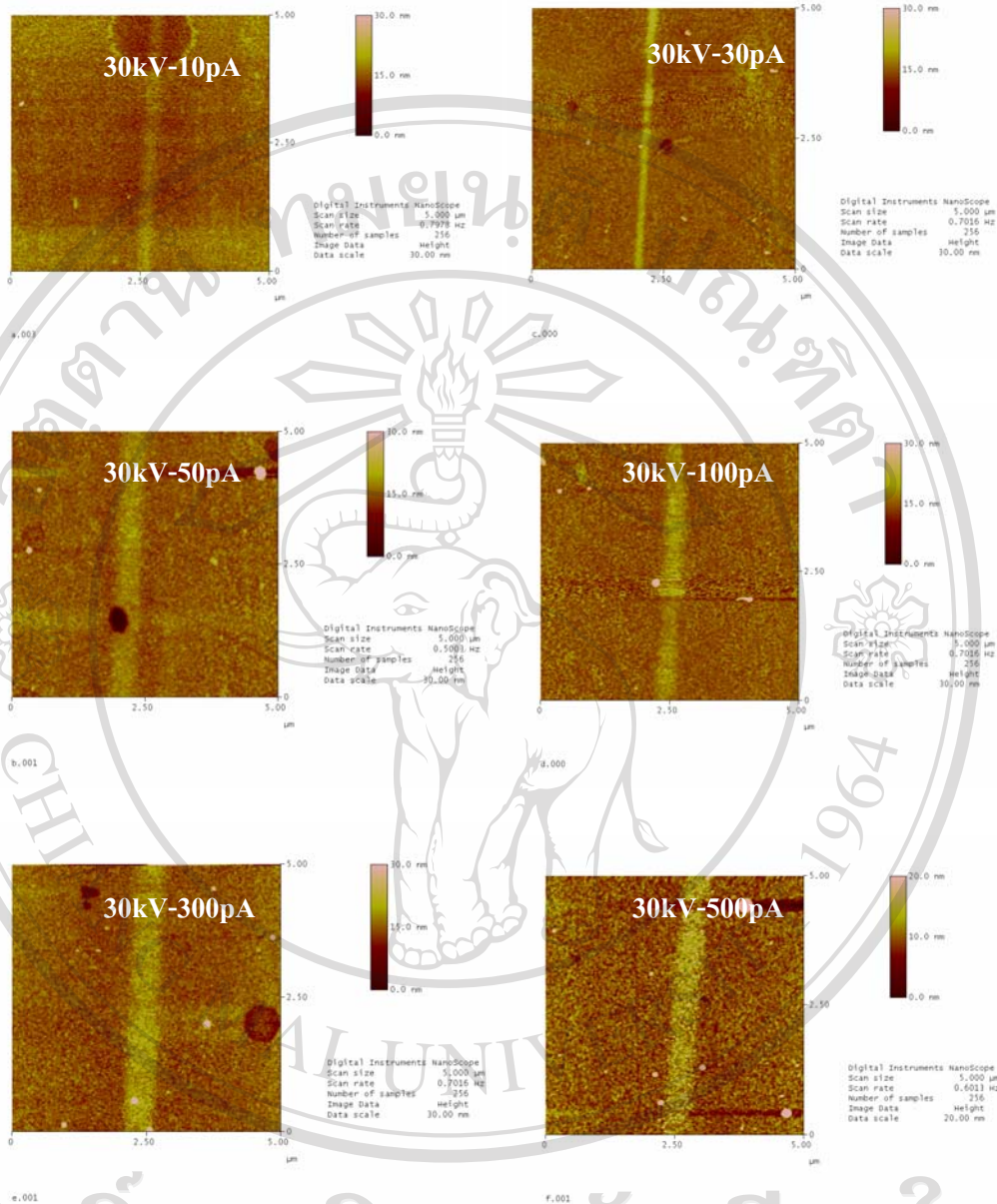
รูป 4.12 ภาพ AFM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้า 10 kV และแปรค่าขนาดของ ลำโออนในย่าน 10-400 pA ตามลำดับ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 4.13 ภาพ AFM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วย ค่าศักย์ไฟฟ้า 20 kV และแปรค่าขนาดของ ลำไอออนในย่าน 4-90 pA ตามลำดับ

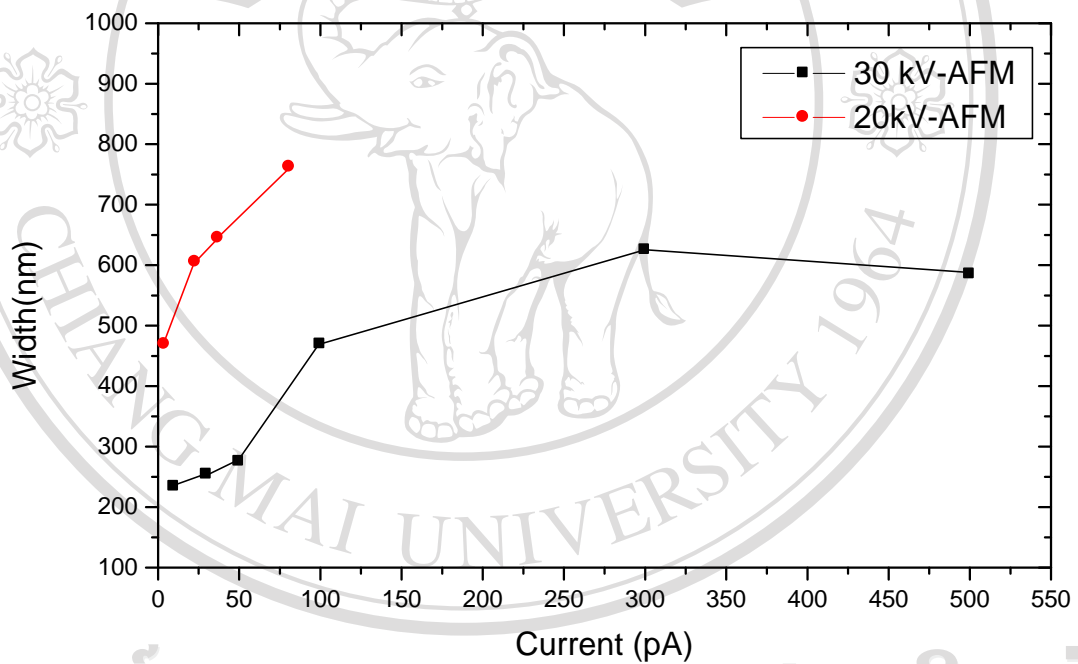
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved



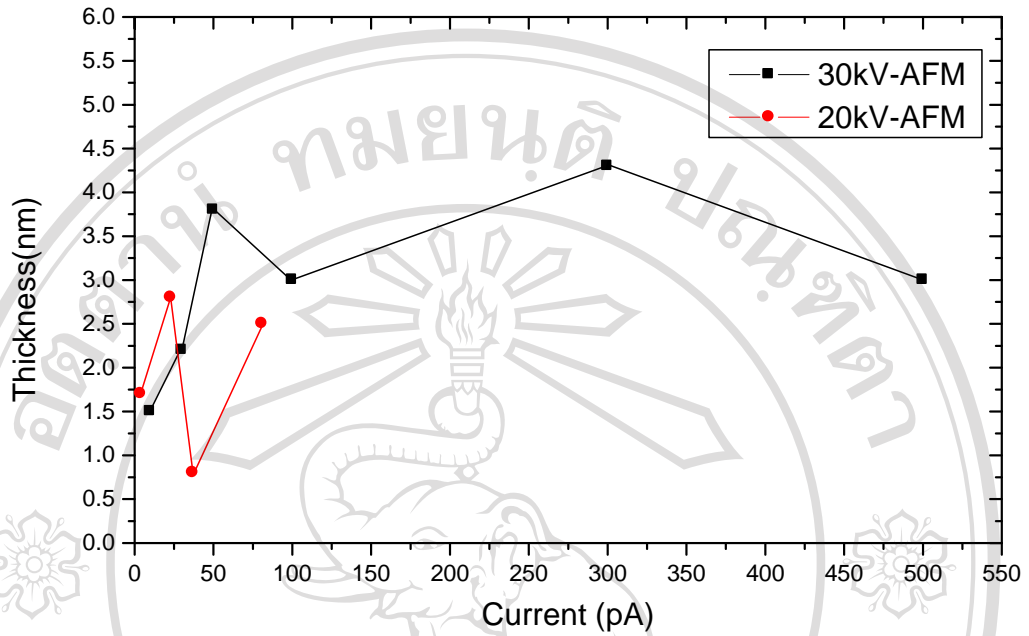
รูป 4.14 ภาพ AFM แสดงลักษณะของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่เตรียมด้วย

ค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV และแปรค่าขนาดของ ค่าไอออนในย่าน 10-50 pAตามลำดับ

จากผลการตรวจพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมไม่สามารถสังเกตเห็นเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 10 kV ของทุกค่ากระแส ดังรูป 4.12 และจะเริ่มสังเกตเห็นเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวได้ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 20 kV ค่ากระแสของลำไอออน 4-81 pA ลักษณะเส้นจะมีขนาดความกว้าง ประมาณ 400-800 nm ดังรูป 4.13 และช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV ของทุกค่ากระแส สามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจนและเห็นรายละเอียดบริเวณพื้นผิวตรงบริเวณเส้นทองคำขาวได้ ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งต่างจากผลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนขนาดของเส้นที่วัดได้จะมีค่าที่น้อยกว่าดังแสดงตามรูป 4.14 ตาราง 4.1 และรูป 4.15



รูป 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวกับค่ากระแส
ลำไอออน



รูป 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวกับค่ากระแสลำไอออน

ตาราง 4.2 เปรียบเทียบขนาดความกว้างแถบเส้นโลหะทองคำขาวที่วัดจาก SEM กับ AFM

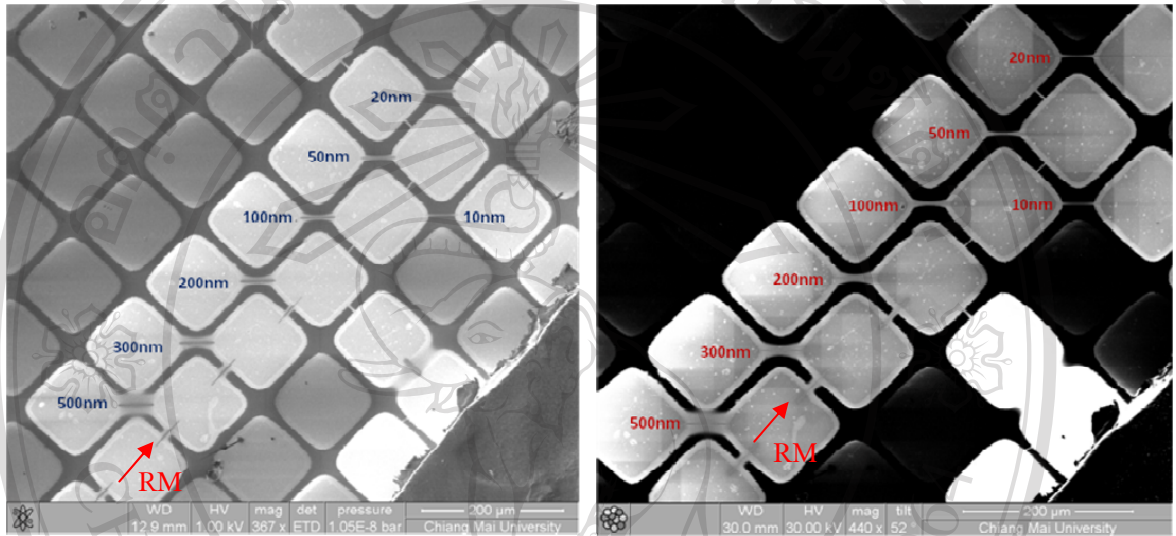
Current	SEM30kV(A) (nm)	SEM30kV(B) (nm)	AFM30kV (nm)
10	501	200	234
30	569	215	254
50	731	243	275
100	880	420	469
300	1002	433	625
500	1140	582	585

เปรียบเทียบค่าความกว้างของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่วัดจาก SEM มีขนาดประมาณ 2 เท่า ในพื้นที่ A ของค่าที่วัดได้จาก AFM เนื่องจาก AFM จะทำการวัดบริเวณที่มีการนำไฟฟ้าอย่างเด่นชัดเท่านั้น ในขณะที่ SEM จะทำการแสดงผลของบริเวณที่สามารถนำไฟฟ้าได้ทั้งหมด ซึ่งในสถานการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ เป็นไปได้ว่า เกิดการพอกของโลหะ Pt เป็นชั้นบางๆตามขอบข้างของบริเวณ A โดยการพอกของโลหะ Pt เป็นชั้นบางๆ นี้อาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากการพอกซ้ำของลำไอออนกับ Pt (Jun-ya Igaki และคณะ ค.ศ. 2006)⁽⁸⁾ นอกจากนี้ ระยะห่างระหว่างผิวชั้นงานกับหัวตรวจจับอิเล็กทรอนิกส์อาจมีผลต่อความแตกต่างในการวัดด้วย โดยที่เครื่อง AFM จะมีระยะของหัวตรวจจับสัญญาณชิดกับพื้นผิวโดยตรงจึงมีความละเอียดกว่า และแม่นยำสูงกว่า ในการบอกขนาดของเส้น และสามารถแยกชัดได้ถ้าพื้นผิวเริ่มมีความต่างของระดับสูงต่ำ

ขนาดความกว้างของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวมีขนาดเล็กสุดประมาณ 230 nm ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV ค่ากระแสลำไอออน 50 pA และจะมีขนาดกว้างขึ้นเมื่อลดค่าศักย์ไฟฟ้าลงหรือเพิ่มกระแสลำไอออนขึ้นดังรูป 4.15 -4.16 ความหนาของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาว จะเห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจนในค่าศักย์ไฟฟ้า 30 kV ความหนาจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อให้ค่ากระแสลำไอออนเพิ่มขึ้น แล้วค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมจะนำมาใช้สร้างขั้วไฟฟ้าอยู่ที่ 300 pA มีพื้นที่มากถึงประมาณ 660 nm สำหรับการเชื่อมพื้นที่แผ่นทองคำต่อกันให้หน้าไฟฟ้าได้ ซึ่งมีความหนาประมาณ 4 nm และ 50 pA มีความกว้างน้อยประมาณ 275 nm เหมาะสำหรับการสร้างเป็นเส้นของขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีความหนาประมาณ 4 nm ดังรูป 4.16 แต่จากรูปภาพพื้นผิวของแผ่นรองรับระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมของทองคำ จะมีเม็ดของทองคำ การปนเปื้อนอยู่ในระดับหนึ่ง หรือความไม่เรียบของพื้นผิวของแผ่นรองรับเอง ในการเตรียมขั้วไฟฟ้าจึงควรเพิ่มความหนาของเส้นทองคำขาว เพื่อเพิ่มปริมาณของเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวให้มากกว่า การปนเปื้อนอยู่ในระดับหนึ่ง หรือความไม่เรียบของพื้นผิวของแผ่นรองรับเอง และลดการถูกทำลายผิวของเส้นด้วยลำไอออนจากการเตรียมขั้วไฟฟ้าโดยใช้ ลำไอออนบีมในการตัดแต่งด้วย

4.2.3 ผลของเงื่อนไขค่าเวลาที่สัมพันธ์กับค่า Z

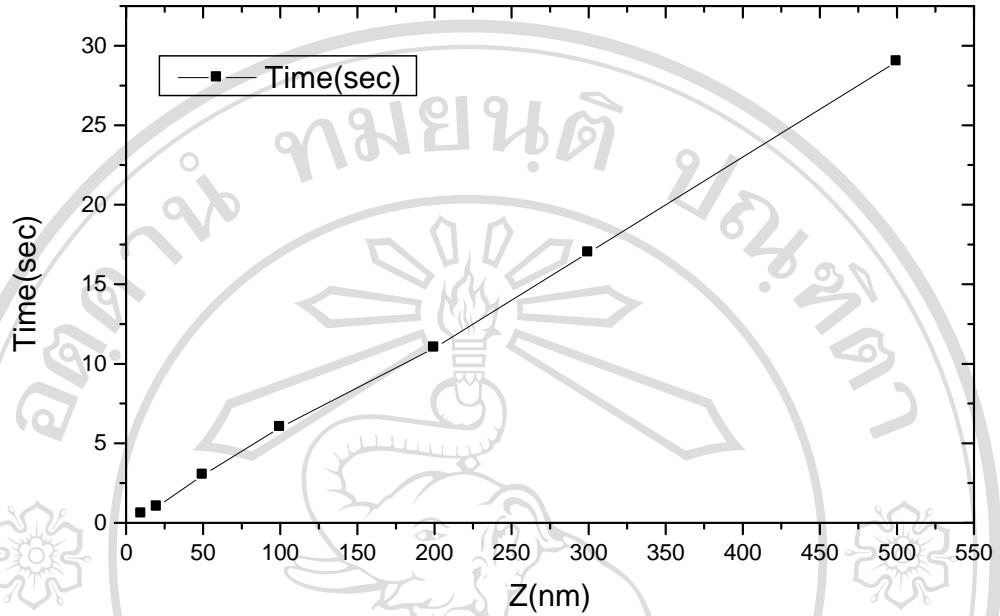
เมื่อได้เงื่อนไขศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม 30 kV ค่ากระแส 50 pA แล้วได้แปลค่าความหนา Z จะทำให้เวลาเปลี่ยนไป เพื่อศึกษาผลของเวลาต่อลักษณะของเส้นฟิล์มบางของทองคำขาวที่เงื่อนไขดังกล่าว ดังแสดงในรูป 4.17



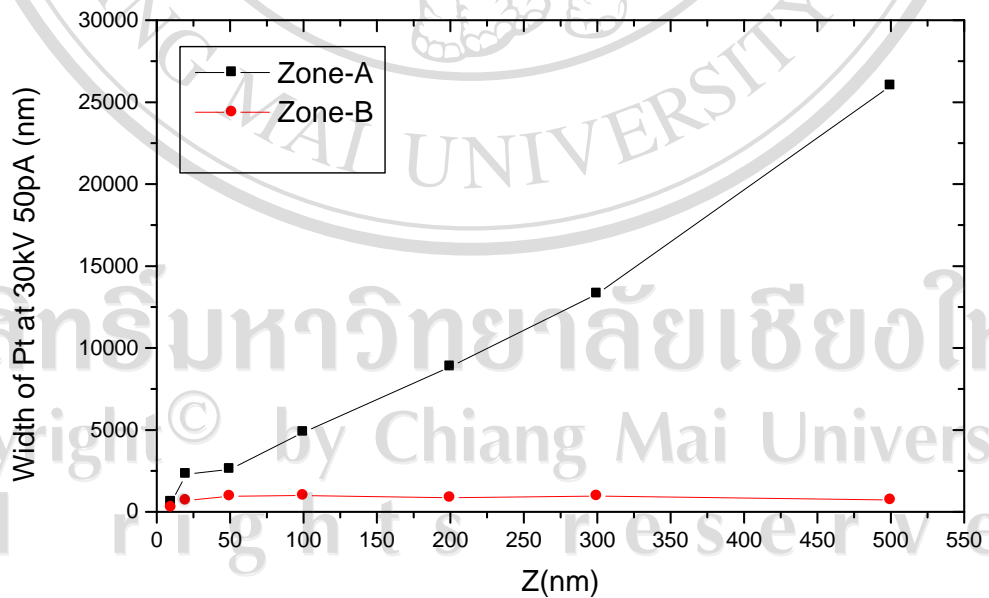
รูป 4.17 (ก) แสดง ภาพจาก SEM บริเวณของเงื่อนไขความหนา Z

(ข) ภาพจาก FIB ที่ 30 kV, 50 pA บริเวณของเงื่อนไขความหนา Z

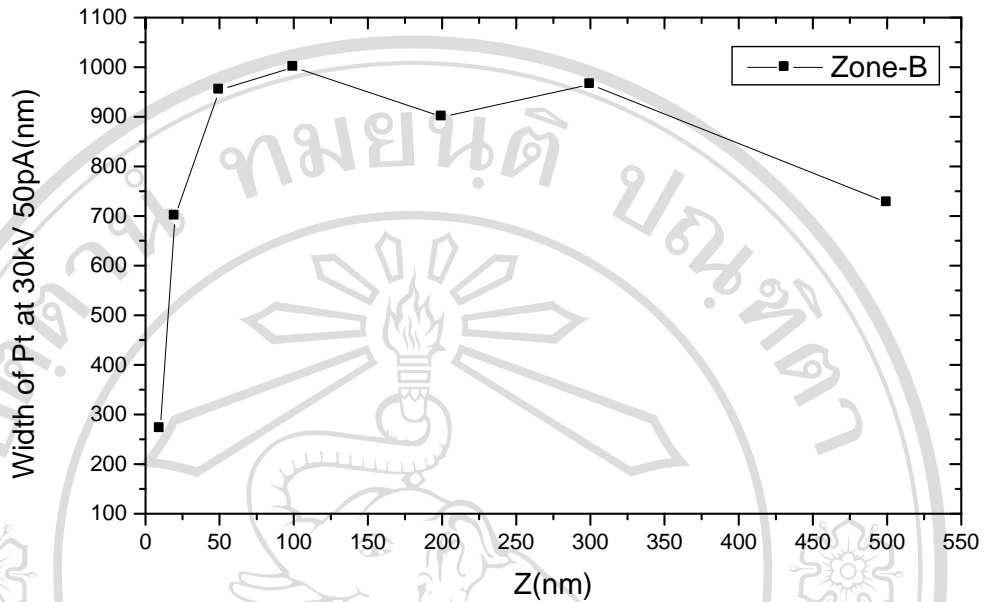
จากรูป 4.17 มีแถว RM เป็นแถวนำไฟฟ้าหลัก จะสังเกตเห็นบริเวณพื้นที่นำไฟฟ้าสว่างกว่าพื้นที่ซึ่งไม่นำไฟฟ้าซึ่งยังไม่ได้เชื่อมด้วย Pt สามารถสังเกตเห็นขนาดความกว้างของเส้นฟิล์มบางในบริเวณ A ตั้งแต่เงื่อนไข ความหนา 10-500 nm มีลักษณะใหญ่ขึ้นเมื่อค่าความหนา Z เพิ่มขึ้น



รูป 4.18 แสดงผลของเวลาที่มีความสัมพันธ์กับความหนา Z ที่ 30 kV, 50 pA



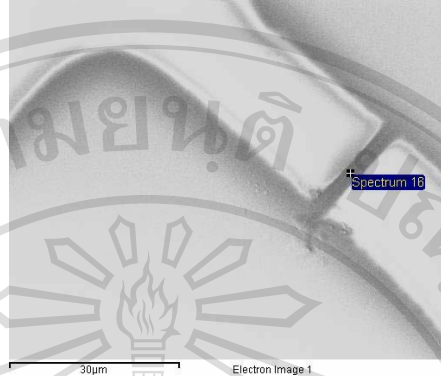
รูป 4.19 แสดงผลความกว้าง A และ B มีความสัมพันธ์กับความหนา Z ที่ 30 kV, 50 pA



รูป 4.20 แสดงผลความกว้างของบริเวณ B มีความสัมพันธ์กับความหนา Z ที่ 30 kV, 50 pA

จากรูป 4.18 เมื่อแปรค่าเงื่อนไขความหนา Z 10 -500 nm สามารถสังเกตเห็นความหนาที่มีผลต่อเวลา โดยที่ เวลาเพิ่มขึ้น ความหนา Z เพิ่มขึ้น และค่าความหนา Z มีผลต่อขนาดความกว้างในบริเวณ A ซึ่งขนาดความกว้างของบริเวณ A เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เพราะเมื่อเพิ่มค่าความหนา Z จะทำให้ระยะเวลาในการพอกนานขึ้น และเพียงพอที่จะทำให้เกิดการพอกผิวซ้ำบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง ก่อให้เกิดการเลอะของทองคำขาว ซึ่งในรูป 4.19 ขนาดความกว้างของฟิล์มบางของทองคำขาวอยู่ในช่วง 250-1000 nm

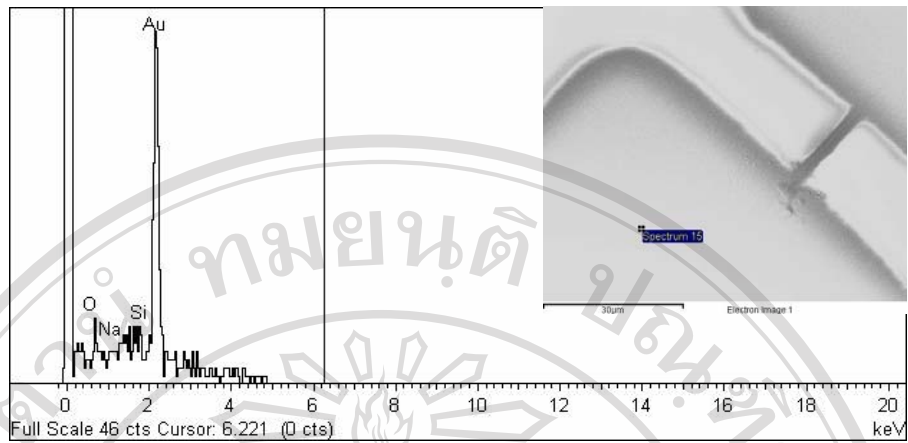
4.2.4 ผลจากการตรวจเครื่องสเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDS)



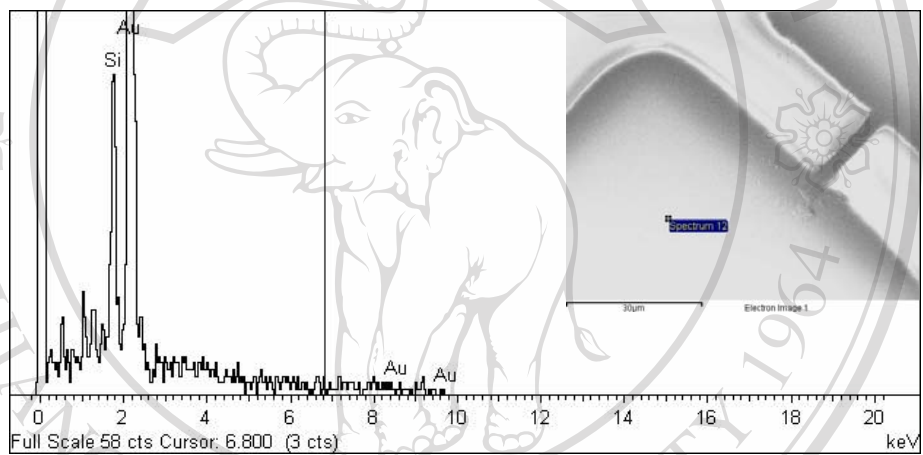
รูป 4.21 ตำแหน่งบริเวณเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวที่ถูกวิเคราะห์ด้วย EDS การวิเคราะห์แบบจุด ของตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 30kV และแปรค่าขนาดของลำไอออนในย่าน 50pA

ตาราง 4.3 แสดงค่าของ Atomic % บริเวณเส้นฟิล์มบางนาโนของทองคำขาวของตัวอย่างที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 30kV และค่ากระแสไฟฟ้าที่ 50 pA โดยแปรค่าศักย์ไฟฟ้าของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนค่าต่างๆ

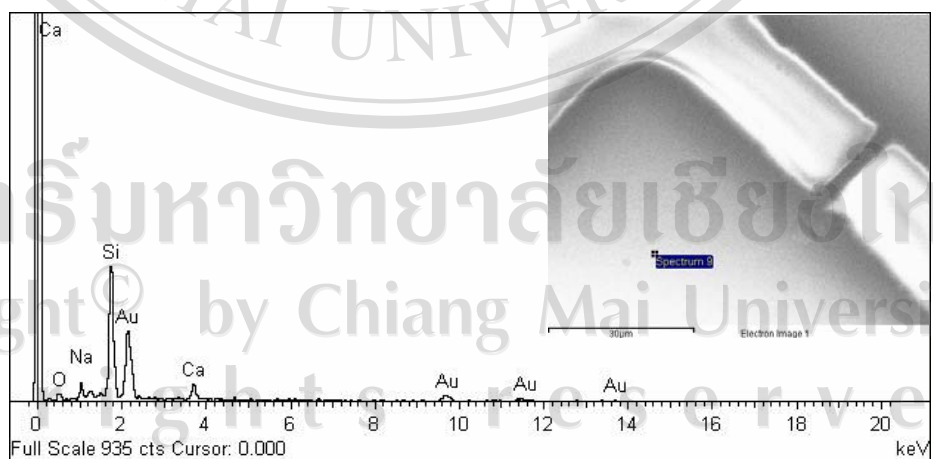
ค่า ศักย์ไฟฟ้า (kV)	Atomic%	
	Si	Pt จุด
5	20	0.48
10	23.84	ไม่พบ
20	23.53	ไม่พบ
30	23	ไม่พบ



5 kV

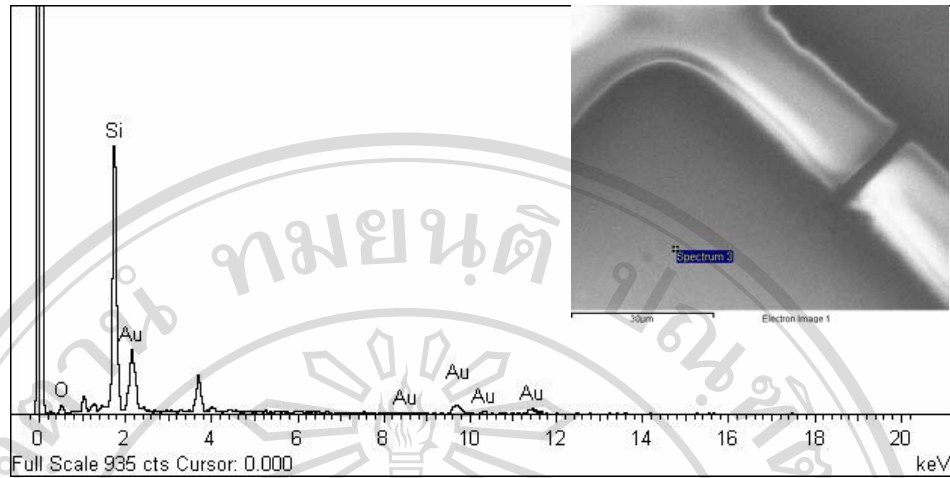


10 kV



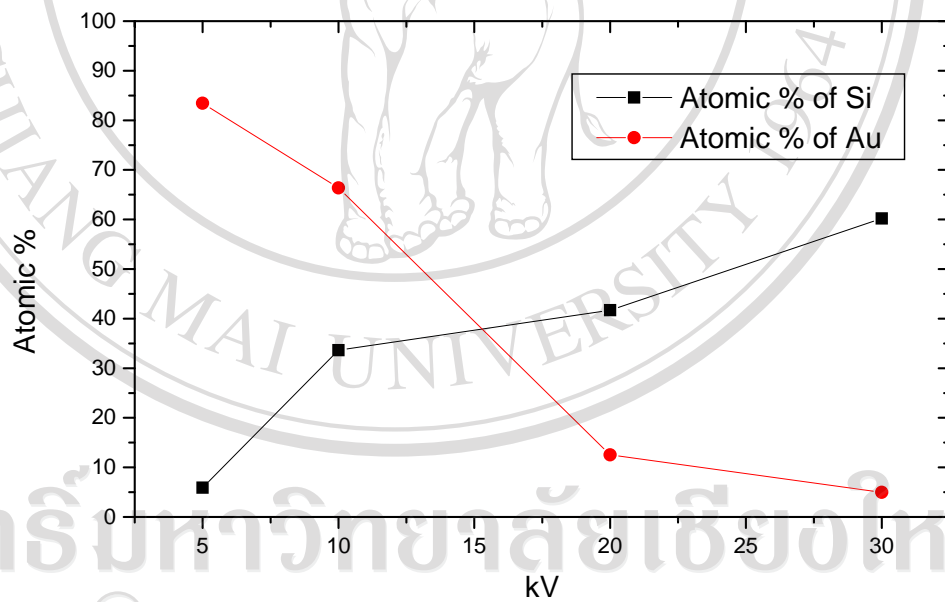
20 kV

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



30 kV

รูป 4.22 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วย EDS บริเวณแผ่นทองคำที่เคลือบบนแผ่นรองรับกระจก



รูป 4.23 แสดงค่า Atomic% ของทองคำที่ถูกเคลือบบนแผ่นรองรับ และซิลิกอนที่เป็นองค์ประกอบของแผ่นกระจกรองรับ

จากผลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรสโกปีแบบกระจาย (EDS) ด้วยพลังงานต่ำพบว่าสามารถตรวจวัด ทองคำขาว(Pt) ที่ 5 kV ประมาณ 0.4-0.8 Atomic% ซึ่งไม่ชัดเจนเนื่องจากผลการวัดความหนาของ AFM พบว่า ทองคำขาวที่พอกบนแผ่นรองรับระหว่างพื้นที่ของ

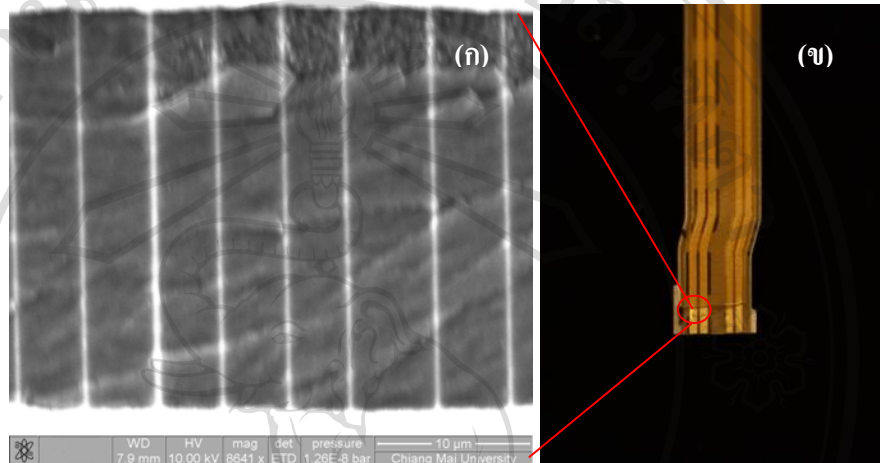
ทองคำ มีความหนาแน่นน้อยกว่าระยะทะลุของลำอิเล็กตรอนซึ่ง ไม่ต่ำกว่า 10 nm⁽⁸⁾ ทำให้เมื่อวิเคราะห์ บริเวณที่พอกด้วย Pt จึงได้ผลของสัญญาณจากบริเวณที่ลึกลงไป ซึ่งบริเวณนั้นสัดส่วนระหว่าง ปริมาณของทองคำขาวต่ำกว่าปริมาณ Si จากแผ่นรองรับมาก ทำให้สัญญาณของทองคำขาวมี ปริมาณน้อยกว่าที่หัวตรวจวัดพลังงาน X-ray ได้สอบเทียบไว้ จึงไม่แสดงปริมาณออกมาได้อย่าง ชัดเจนดังผลการวัดในรูป 4.21 - 4.22 ผลของระยะของอิเล็กตรอนที่ทะลุเข้าไปในผิววัสดุลึกลงกว่า ความหนาของทองคำขาวที่หนาประมาณ 5 nm สามารถอธิบายได้จากการสังเกตผลการวิเคราะห์จุด บนพื้นที่สี่เหลี่ยมทองคำที่ค่าพลังงานต่างๆ ดังรูป 4.23 ได้ผลดังกราฟ ปริมาณ Atomic% ของ ทองคำจะลดลงเมื่อให้ค่าพลังงานเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามปริมาณ Atomic% ของซิลิกอนที่เป็น องค์ประกอบของแผ่นรองรับ เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ลึกกว่า 40 nm ถัดจาก แผ่นทองคำที่เคลือบอยู่ ชั้นบน จึงจะสังเกตได้ว่าค่าพลังงานของอิเล็กตรอนที่มากขึ้นจะสามารถตรวจวัดปริมาณของ Atomic% ได้ในชั้นลึกจากพื้นผิวลงไป

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

4.3 ผลการประยุกต์ใช้ขั้วไฟฟ้าทองคำขาวเตรียมด้วยโฟกัสไอออนบีม เป็นเซ็นเซอร์

4.3.1 ผลการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพ

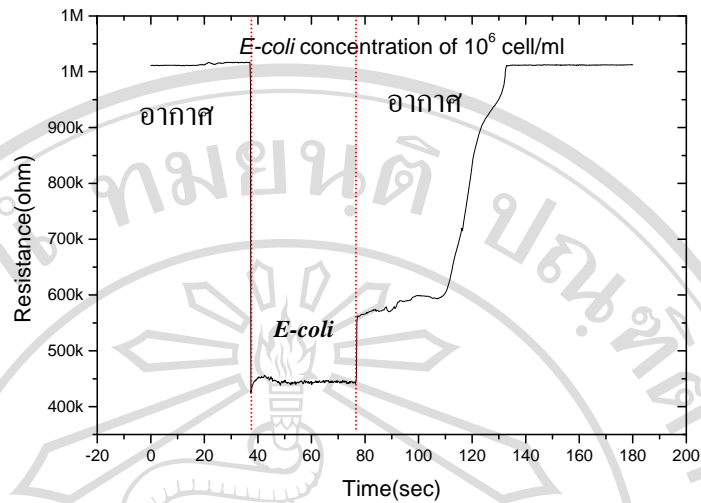
1. ผลการเตรียมเซ็นเซอร์ชีวภาพสำหรับตรวจวัดความหนาแน่นของจำนวน *E-Coli*



รูป 4.24 (ก) ภาพจาก SEM แสดงขั้วไฟฟ้าทองคำขาวแบบแบบอินเตอร์ดิจิตอล

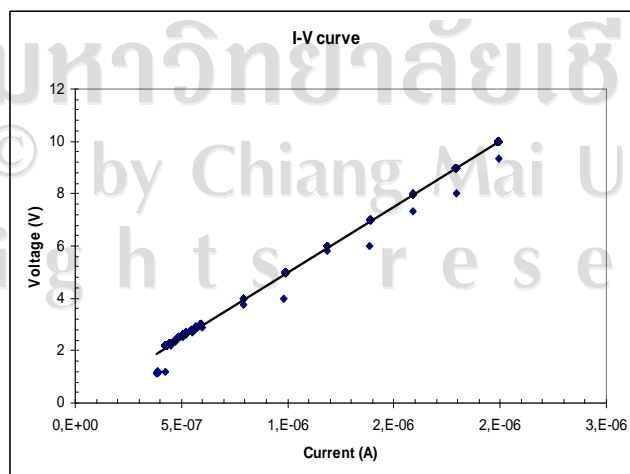
(ข) สายแพร่นำมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับเตรียมเซ็นเซอร์ *E-Coli*

จากผลการเตรียมขั้วไฟฟ้าทองคำ/ทองคำขาว จะสังเกตเห็นลักษณะของปลายของหัววัดเซ็นเซอร์สำหรับจุ่มทดสอบกับเชื้อแบคทีเรีย *E-Coli* ที่อัตราความเข้มข้นต่างๆ นั้น จะมีทองคำขาวมีลักษณะเป็นเส้นขนาด 100 nm วางเรียงสลับกันในลักษณะแบบ Interdigital โดยแต่ละเส้นอยู่ห่างกันประมาณ 5 nm และเส้นของทองคำขาวต่างๆนั้น จะวางตัวอยู่ระหว่างขั้วทองคำซึ่งเคลือบอยู่บนโพลีเมอร์ ทำให้พื้นที่สำหรับการตรวจวัด มีขนาดประมาณ $350 \mu\text{m}^2$ และจำนวนเส้นของทองคำขาวจะมีจำนวนเส้นทั้งหมดประมาณ 50 เส้น ดังรูป 4.24



รูป 4.25 ตัวอย่างความเปลี่ยนแปลงของหัววัดเซ็นเซอร์ในอากาศและในความเข้มข้นของ *E-Coli* 10^6 cfu/ml

จากรูป 4.24 จะสังเกตเห็นว่า ค่าความต้านทานของหัววัดเซ็นเซอร์ก่อนจุ่มในเชื้อ *E-Coli* นั้นจะมีค่าคงที่ มีค่าประมาณ $1\text{ M}\Omega$ และเมื่อนำหัววัดเซ็นเซอร์ไปจุ่มในสารละลายแบคทีเรีย *E-Coli* พบว่าค่าความต้านทานของหัววัดจะลดลง กล่าวคือ จะมีค่าความต้านทานประมาณ $500\text{ k}\Omega$ โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของหัววัด จากอากาศกับสารละลาย *E-Coli* ในเวลาการตอบสนองของแต่ละครั้งจะใช้เวลาประมาณน้อยกว่า 5 วินาที แล้วเมื่อเอาหัววัดเซ็นเซอร์ออกจากสารละลายแบคทีเรียและทำความสะอาดแล้ว ค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ก็จะกลับคืนสู่ค่าเดิม ซึ่งใช้เวลาที่ใช้ในการวัดแต่ละครั้งตัวอย่างจะอยู่ประมาณไม่ต่ำกว่า 1 นาที จากรูป 4.25

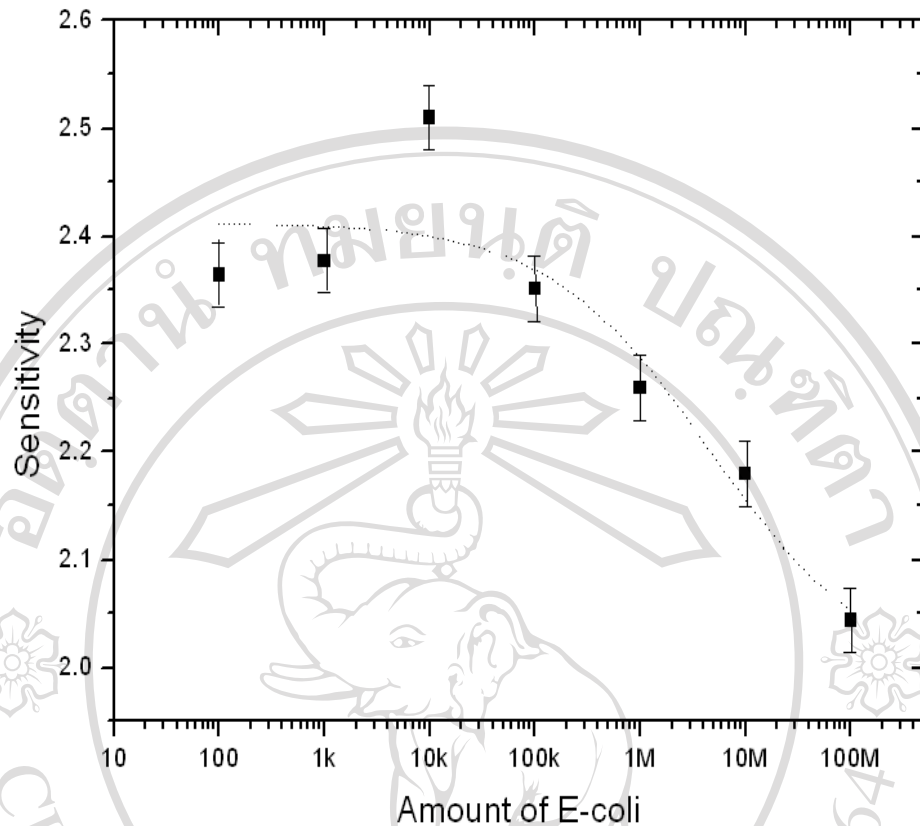


รูป 4.26 ผลค่า I-V Curve ของเซ็นเซอร์ชีวภาพ

2. ผลการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ชีวภาพตรวจวัดความหนาแน่นของจำนวน *E-Coli*

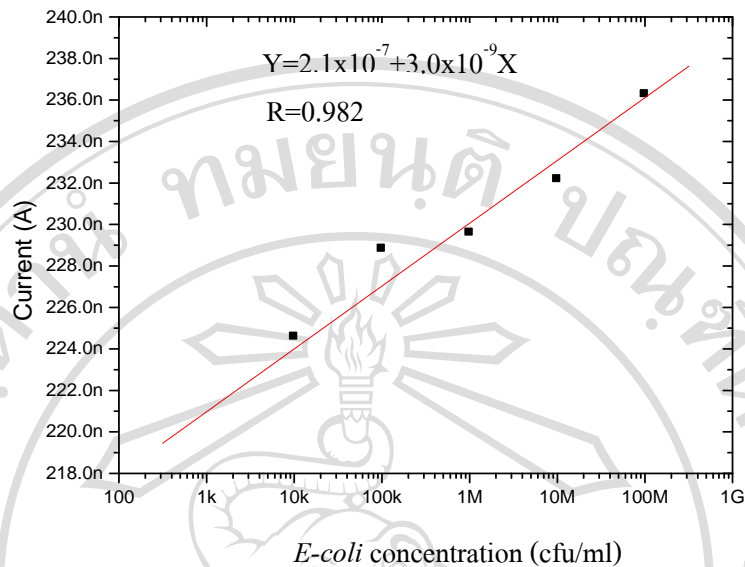
การประยุกต์ใช้โดยการตรวจวัดจุลชีพของหัวตรวจวัดขั้วไฟฟ้าทองคำขาวบนแผ่นรองรับ สัญญาณไฟฟ้าโดยรวมของเซลล์จุลชีพ กับวัตถุที่เคลือบผิวไว้ โดยเฉพาะเส้นขั้วไฟฟ้าฟิล์มบาง ในงานนี้เครื่องเซ็นเซอร์ถูกทดสอบกับ *E-Coli* ที่มีช่วงค่าความหนาแน่น 10^3 - 10^8 cell/ml ที่อุณหภูมิห้อง โดยค่าการตอบสนองของเซ็นเซอร์เป็นค่า Sensitivity ($S=R_a / R_c$) เมื่อ R_a คือ ค่าความต้านทานเฉลี่ยของเซ็นเซอร์ในอากาศ และ R_c คือค่าความต้านทานเฉลี่ยของเซ็นเซอร์ใน *E-Coli*

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานของเซ็นเซอร์ เมื่อมันถูกจุ่มลงในสารละลาย ตัวอย่าง *E-Coli* ที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ จะได้ผลดังรูป 3 สังเกตเห็นว่าค่า sensitivity จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ค่าความเข้มข้นของ *E-Coli* ที่ 10^4 cell/ml แล้วลดลงอีกครั้งที่ค่าความเข้มข้นของ *E-Coli* เพิ่มขึ้นค่า sensitivity ตามรูป 4.25 จากผลในตารางแสดงให้เห็นถึงขั้วไฟฟ้า นาโนทองคำ เซ็นเซอร์สามารถตรวจวัด จุลชีพในช่วงค่าความหนาแน่นที่กว้าง ได้รับความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า และค่าความเข้มข้นของ *E-Coli* จากสมบัตินี้การตอบสนองที่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้น ของ *E-Coli*



รูป 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า sensitivity ของเซ็นเซอร์ กับค่าความหนาแน่นของ *E-Coli*

จากผลการคำนวณการตอบสนองต่อ *E-Coli* ซึ่ง ได้จากอัตราส่วนระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของหัววัดเซ็นเซอร์ในอากาศ กับ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในสารละลาย *E-Coli* ที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้ผลดังรูป 4.27 จะสังเกตเห็นว่า ค่าการตอบสนองมีค่ามากที่สุดที่ ประมาณ 2.5 และต่ำสุดประมาณ 2.05 โดยลักษณะของกราฟ ค่าการตอบสนองจะเพิ่มขึ้น แล้วมีค่าสูงขึ้นไปประมาณ 2.5 ตรงกับจำนวน *E-Coli* 10^4 CFU/mL จากนั้นค่าการตอบสนองจะลดลงจนมีค่าเท่ากับประมาณ 2.05 ตรงกับจำนวน *E-Coli* 10^8 CFU/mL ค่าการตอบสนองจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของ *E-Coli* มากขึ้น ดังนั้นในช่วงที่หัววัดเซ็นเซอร์สามารถที่จะวัดได้คือช่วงความเข้มข้นของ *E-Coli* ตั้งแต่ 10^4 - 10^8 CFU/ml ซึ่งจะเห็นความสัมพันธ์ได้ชัดเจนจากรูป 4.28 เป็นช่วงที่เซ็นเซอร์ชีวภาพนี้สามารถตรวจวัดแล้วบอกความเข้มข้นของ *E-Coli* ได้อย่างชัดเจน



รูป 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าของหัววัดเซ็นเซอร์ในสารละลาย

E-Coli กับความเข้มข้นของสารละลาย *E-Coli* ในช่วง 10^4 - 10^8 CFU/ml

เมื่อทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า จะสังเกตได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าของหัววัดเซ็นเซอร์ในสารละลาย *E-Coli* ตั้งแต่ค่ากระแสประมาณ 224 nA ไปจนถึง 236 nA กระแสไฟฟ้าของหัววัดเซ็นเซอร์ในสารละลาย *E-Coli* จะมากขึ้นเมื่อจำนวนของ *E-Coli* มากขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความหนาแน่นของ *E-Coli* ในสารละลาย เป็นลักษณะเส้นตรงดังสมการในรูป 4.28 และมีค่า $R = 0.982$ ที่สามารถบอกค่าความหนาแน่นของ *E-Coli* ได้แตกต่างกัน ในช่วงความหนาแน่นของ *E-Coli* ในสารละลาย ที่ 10^4 - 10^8 CFU/ml

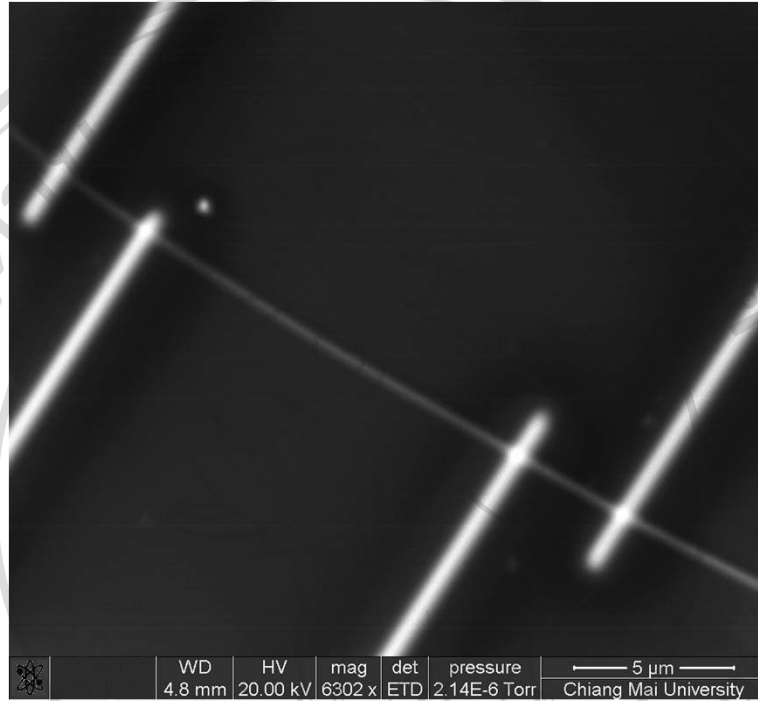
4.3.2 เปรียบเทียบผลของเซ็นเซอร์ชีวภาพ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ ดังตาราง 4.4 พบว่าช่วงของจำนวน *E-Coli* ที่ใช้ตรวจวัดในงานวิจัยนี้สามารถตรวจวัดช่วงจำนวนของ *E-Coli* มากกว่าของผู้วิจัยอื่นๆ ซึ่งช่วงที่คณะผู้วิจัยของ Lu สามารถตรวจวัดได้จำนวนน้อยที่สุดถึง 4-31 cell โดยขั้วไฟฟ้าจากวัสดุทองคำภายใน 3 นาที จะสังเกตเห็นว่าขั้วไฟฟ้าที่คณะผู้วิจัยใช้ได้แก่ ขั้วทองคำ Indium tin oxide ทองคำขาว และอนุภาคนาโนของทองคำขาว ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าของทองคำขาว ซึ่งใช้เวลาในการตรวจวัดจำนวน *E-Coli* ได้เร็วกว่างานวิจัยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าของทองคำ และ Indium tin oxide แต่ยังช้ากว่า งานวิจัยที่ใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอนุภาคนาโนของทองคำขาว

ตาราง 4.4 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองเซ็นเซอร์ชีวภาพ กับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ

ผู้วิจัย (ปีที่ตีพิมพ์)	จำนวนของ <i>E-Coli</i>	วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า	เวลาที่ใช้
Y. C. Lu และคณะ(2008) ⁽¹⁹⁾	4-31 cell	Au	3 นาที
M. Varshney และคณะ (2007) ⁽²⁶⁾	10^4 - 10^5 CFU/ml	Au	35 นาที
H. Tang และคณะ(2006) ⁽²⁷⁾	10^3 - 10^7 CFU/ml	Indium tin oxide electrode	3 ชั่วโมง
Q. Yang และคณะ (2009) ⁽²⁸⁾	10^1 - 10^6 CFU/ml	Pt-nanoparticle	น้อยกว่า 50 วินาที
งานวิจัยนี้	10^4 - 10^8 CFU/ml	Pt	1 นาที

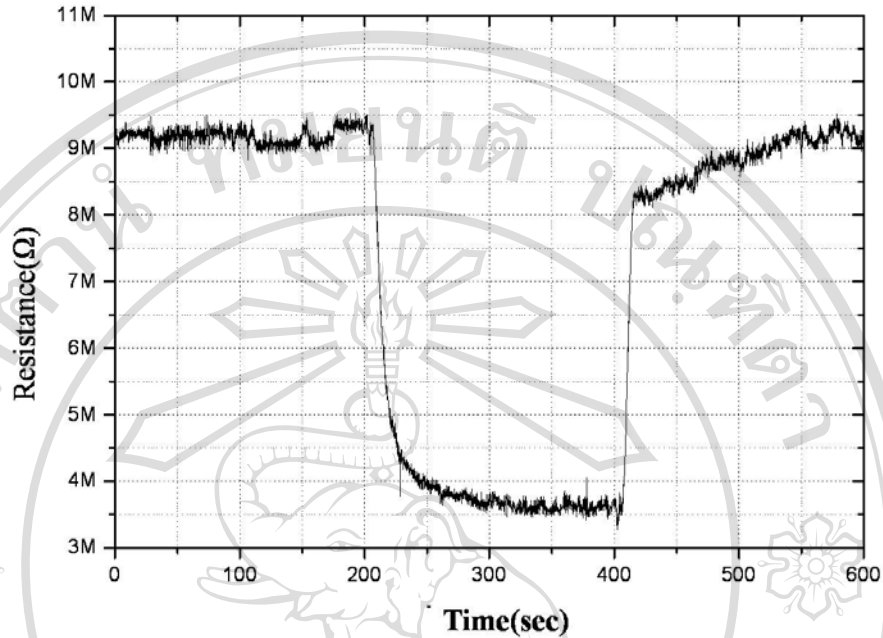
4.3.3 ผลการประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ก๊าซ



รูป 4.29 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้าสำหรับประยุกต์ทำเป็นเซ็นเซอร์ก๊าซแบบ 4 ขั้วไฟฟ้า

จากรูป SEM การติดขั้วไฟฟ้าทองคำแบบต่างๆ ของ สองขั้วไฟฟ้า จำนวนสี่เส้น บนเส้น SnO₂ นาโน โดยใช้เทคนิค FIB-CVD เส้นของ SnO₂ มีขนาดความกว้าง ประมาณ 90 nm ความยาวประมาณ 17 μm ระหว่างสองขั้วไฟฟ้า โดยใช้เวลาในการเตรียมประมาณ 30 วินาที ใน

รูป 4.29



รูป 4.30 ผลการทดสอบเซ็นเซอร์ก๊าซกับไอเอทานอล ความเข้มข้น 1000 ppm

หัววัดเซ็นเซอร์ถูกทดสอบสมบัติการตอบสนองต่อก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้น 1000 ppm ที่อุณหภูมิสูง 27°C พบว่าที่ มีการตอบสนองต่อก๊าซที่ 27°C ที่อุณหภูมิห้อง แสดงดังรูป 4.30 มีค่า sensitivity เท่ากับ 2.5 ค่าเวลาการตอบสนอง ประมาณ 40 วินาที และเวลาการคืนตัวอยู่ที่ 15 วินาที

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

4.3.4 เปรียบเทียบผลของเซ็นเซอร์ก๊าซ

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ ดังตาราง 4.5 พบว่างานวิจัยนี้ต่างจากงานวิจัยของคณะผู้วิจัยคือ ใช้เส้นดีบุกนาโนเพียงเส้นเดียวสร้างเป็นเซ็นเซอร์ก๊าซ โดยไม่ต้องมี Heater เพื่อทำให้เซ็นเซอร์ร้อน ซึ่งทำให้เซ็นเซอร์ในงานวิจัยนี้มีสมบัติที่เด่นคืออุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบก๊าซที่ต่ำซึ่งจะทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ และจะส่งผลให้เซ็นเซอร์ก๊าซมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเซ็นเซอร์ก๊าซของคณะผู้วิจัยอื่นซึ่งจะต้องมี Heater เพื่อใช้งานที่ อุณหภูมิสูงจึงจะทำงานได้ดี เมื่อทดสอบกับก๊าซเอทานอลที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกัน ในส่วนของค่า Sensitivity นั้นของงานวิจัยนี้แม้ว่า ต่ำกว่างานวิจัยของคณะผู้วิจัยอื่นๆ เล็กน้อยแต่ เนื่องจากไม่มี Heater และเป็น Single nanowire จึงมีขนาดที่เล็กกลงมากและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิห้องได้ โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมใดๆ

ตาราง 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการทดลองเซ็นเซอร์ก๊าซ กับผลการทดลองของคณะนักวิจัยอื่นๆ

ผลงานของ	SnO ₂	อุณหภูมิที่ใช้	ชนิดของก๊าซ	ppm	Sensitivity
Y. Zhang และคณะ (2008) ⁽²⁹⁾	nanofiber	400 °C	C ₂ H ₅ OH	1000	14
N.V. Hieu. และคณะ (2008) ⁽³⁰⁾	NWs	400 °C	C ₂ H ₅ OH	800	3
B.Wang และคณะ (2009) ⁽³¹⁾	NWs	300 °C	Hydrogen	1000	3.25
งานวิจัยนี้	SNW	27 °C	C ₂ H ₅ OH	1000	2.5

*NWs = nanowires , SNW = Single nanowire