



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การศึกษาการผลิตผงแปรแสงจากฟิล์มบางหลายชั้น”

สัญญาเลขที่ IUG5080013

โดย ดร.สมศักดิ์ แดงดีบ และคณะ

วันที่ 27 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2554

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การศึกษาการผลิตผงแปรแสงจากฟิล์มบางหลายชั้น”

ดร.สมศักดิ์ แดงดีบ และคณะ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

สนับสนุนโดย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

(Executive Summary)

การปลอมแปลงหรือการเลียนแบบผลิตภัณฑ์ เป็นการทำลายมูลค่าทางเศรษฐกิจของผลิตภัณฑ์อย่างสูงยิ่ง ในสิ่งพิมพ์เพื่อธุรกรรมการเงิน เช่น ธนบัตรปลอม บัตรเครดิตปลอม มูลค่าความเสียหายทางเศรษฐกิจมีค่าสูง ประเมินได้ระดับหลายพันล้านบาท นอกจากนี้อัตราและมูลค่าการทำธุรกรรมผ่านบัตรเครดิตได้ชะลอตัวลงอีกด้วย ทำให้ส่งผลกระทบต่อขยายตัวของบัตรเครดิตไปด้วย ขณะที่สิ่งพิมพ์เพื่อจำแนกบุคคล จัดเป็นเอกสารที่ต้องการความปลอดภัยระดับสูง แต่การใช้หนังสือเดินทางปลอม ผลกระทบโดยตรงอาจประเมินได้ยาก แต่ผลกระทบโดยอ้อมเมื่อนำไปใช้ในทางมิชอบ เช่น ความปลอดภัยในชีวิต และ ผลกระทบทางสังคม มูลค่าความเสียหายอาจสูงเกินจะประมาณ

การปลอมแปลงเป็นการทำซ้ำหรือดัดแปลงผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจสูง จากวัสดุที่มีคุณภาพต่ำกว่าและมูลค่าต่ำกว่า เช่น ในการคิดค้นยาใหม่ อาจจะต้องใช้เวลามากกว่า ๑๐ ปี และเงินทุนมากกว่า ๒.๕ แสนล้านเหรียญ แต่สำหรับการปลอมแปลง ใช้เวลาเพียง ๒ เดือนพร้อมใช้ทุนแค่ ๒๕๐,๐๐๐ เหรียญ และยังสามารถแข่งขันทางยอดขายได้อย่างสูสีอีกด้วย

อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์เพื่อความปลอดภัย ยกระดับการป้องกันการปลอมแปลง จึงมีบทบาทสำคัญ การผลิตเอกสารหรือผลิตภัณฑ์ ให้มีขีดความปลอดภัยที่สูงขึ้น ให้ยากต่อการปลอมแปลงมากขึ้น และให้สามารถแยกแยะเอกสารจริงหรือปลอมได้รวดเร็ว หากสามารถกระทำได้ด้วยตาเปล่า ไม่ต้องอาศัยเครื่องมือช่วย จึงถือเป็นสิ่งสำคัญ หมึกพิมพ์จัดได้เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากที่จะช่วยยกระดับความปลอดภัยนี้ หมึกพิมพ์บางอย่างหนึ่งที่ใช้ในปัจจุบันอาศัยสมบัติทางแสงของตัวหมึก ทำให้หมึกมีสมบัติแปรสีเมื่อเปลี่ยนมุมมอง (optical variable inks หรือ colour shift inks) ทำให้สามารถแยกแยะเอกสารจริงหรือปลอมออกจากกันได้โดยผู้ใช้ในทันที (overt) เพียงแค่เอียงเอกสาร เปลี่ยนมุมมองสะท้อนของแสง ทำให้สามารถจำแนกธนบัตรจริงหรือปลอมออกจากกันในทันที

โครงการวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นการพัฒนาหมึกพิมพ์ที่มีการแปรสีเมื่อเปลี่ยนมุมมอง โดยมีวัตถุประสงค์ใหญ่ ได้แก่ การพัฒนากระบวนการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นด้วยการสเปกโตรริง บนชิ้นงาน เช่นกระจกหรือพลาสติก ให้ชิ้นงานมีสมบัติเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนองศาการมอง การพัฒนากระบวนการลอกฟิล์มบางหลายชั้นออกจากวัสดุฐานรอง การพัฒนากระบวนการบดย่อยฟิล์มบางให้เป็นผงขนาด ๑๐๐ ไมครอนหรือมากกว่า โดยยังคงสมบัติแปรสีเมื่อเปลี่ยนองศาการมอง และรวมไปถึงศึกษาความเป็นไปได้หรือพัฒนากระบวนการแปรรูปผงฟิล์มบางที่ได้ให้เป็นองค์ประกอบของหมึกพิมพ์ ในการดำเนินงานได้ดำเนินการลุล่วงไปแล้วประมาณ ๖๕% เนื่องจากปัญหาเรื่องความไม่ต่อเนื่องในการดำเนินงานของโครงการ ในด้านบุคลากร และ ประสิทธิภาพของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ต่ำกว่าที่คาดการณ์ไว้ ทำให้ต้องยุติโครงการไว้ก่อน

บทคัดย่อ

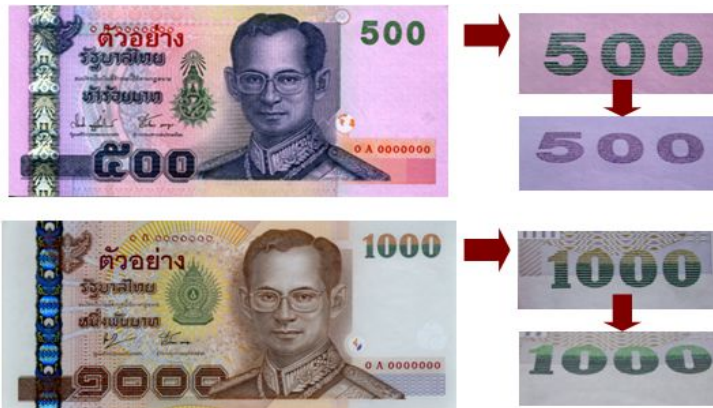
โครงการวิจัยนี้ ได้ทดลองศึกษาการพัฒนาเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นด้วยการสputtering เพื่อใช้เป็นหมึกพิมพ์ที่มีการแปรสีเมื่อเปลี่ยนมุมมอง กระบวนการดำเนินงานประกอบด้วยการออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนขนาด ๑ นิ้ว และชุดหน้าแปลนที่ใช้ประกอบ การทดสอบการทำงานในสุญญากาศของชุดหน้าแปลนและหัวแมกนีตรอน การทดลองเคลือบฟิล์มหลายชั้นที่มีความหนาเหมาะสมบนกระจกขนาด ๑ ตารางนิ้ว โดยมีเพียงชั้นฟิล์มบางออกไซด์หลากหลายชนิดเพียงอย่างเดียว และแบบมีชั้นโพลีเมอร์เป็นฟิล์มรองพื้นคั่นระหว่างชั้นออกไซด์ การประกอบและทดสอบชุดวัดแสงสีที่สามารถปรับเปลี่ยนมุมตกกระทบได้ การทดสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มหลายชั้นที่ได้ การพัฒนากระบวนการลอกฟิล์มทางแสงหลายชั้นออกจากกระจก การทดลองบดย่อยเกล็ดฟิล์มบางที่ได้ให้มีขนาดประมาณ ๑๐๐ ไมครอน เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผงฟิล์มบางให้เป็นส่วนประกอบในหมึกพิมพ์ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนสีเป็นแบบต่อเนื่อง สีปรากฏเหมือนสีเหลือบ จึงคาดว่าจะต้องทำการเพิ่มชั้นของการเคลือบให้มากขึ้น หรืออาจต้องเพิ่มเติมโครงสร้างที่มีลักษณะของเกรตติง เพื่อให้ได้การเปลี่ยนสีจากสีที่หนึ่งเป็นสีที่สองได้ดีขึ้น

Abstract

This project aims to develop sputtering process for multi-layered thin film to be used as optical variable inks. These processes include (i) design and construct one-inch magnetron sputtering head and its flange, (ii) test vacuum compatibility for the new head and flange. Next, multi-layer films of pre-designed thickness were coated on one square-inch glass; starting with only an oxide layer and with polymeric films as a buffer layer between the oxide layer and the substrate. This process should provide a convenient way to peel the metal oxide film. The resulting films were subjected to a ball-milling process to achieve fine powder of about 100-micron in diameter. The powders were then mixed with other composition as ink for printing. The finishing print was however not given a sudden change from the first color to the second when varying viewing angle; but rather continuously change in color, so-called iridescence. This has thus required a few sets of coating series or opened for embedding grating-like structure to enhance to the optically variable ink (OVI)

เนื้อหางานวิจัย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการนำประโยชน์ของฟิล์มบางที่ลดการสะท้อนของแสงมาเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับหลายชนิด เช่น แว่นตา แผงโซลาร์เซลล์ จอภาพแสดงผล รวมทั้งในเอกสารที่ต้องการความยากในการปลอมแปลง อันได้แก่ ธนบัตร บัตรเครดิต หรือหนังสือเดินทาง ฯลฯ ตัวอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นได้ เช่น การเปลี่ยนสีของธนบัตรเมื่อมองในมุมตกระทบที่เปลี่ยนแปลงไปดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การเปลี่ยนสีของธนบัตรไทยราคา 500 บาทและ 1000 บาท เมื่อมองในมุมตกระทบที่เปลี่ยนแปลงไป

จากรูปที่ 1 เมื่อสังเกตธนบัตรไทยราคา 500 บาทที่ตัวเลข 500 พบว่า เมื่อมองในแนวตั้งฉาก(หรือมุมตกระทบเป็น 0 องศา) จะเห็นสีของตัวเลข 500 เป็นสีเขียว แต่เมื่อทำการพลิกธนบัตรเพื่อมองในมุมอื่นไป (มุมตกระทบไม่เป็น 0 องศา) สีของตัวเลข 500 จะเปลี่ยนไปเป็นสีม่วง ซึ่งการเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่า การที่วัตถุแสดงสีต่างๆกันก็เพราะว่าคุณสมบัติการดูดกลืนและการสะท้อนของแสงสีของแต่ละวัตถุนั้นต่างกัน การที่เห็นวัตถุเป็นสีเขียวก็เนื่องมาจากวัตถุนั้นสะท้อนแสงสีเขียวออกมาให้ตาของผู้สังเกตเห็นในขณะที่แสงสีอื่นๆจะถูกวัตถุนั้นดูดกลืนไปหรือแสงสีอื่นๆนั้นเกิดการแทรกสอด การเปลี่ยนสีที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำได้ด้วยการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film) โดยอาศัยหลักการการเคลือบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสง (Anti-reflection (AR) Coating) ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการศึกษานี้คือ เพื่อที่จะออกแบบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสงเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนสีเมื่อมองในมุมตกระทบที่เปลี่ยนแปลงไป

การรับรู้สีของมนุษย์ (Color perception)

การรับรู้สีเป็นกระบวนการทางจิตวิทยาที่มนุษย์ใช้ดวงตาของตนแยกแยะความแตกต่างของแต่ละสีด้วยการใช้สมบัติของสีดังต่อไปนี้ (1) ความเข้มของสี (hue) (2)การอิ่มตัวของสี(saturation) และ (3)ความสว่าง(brightness) เนื่องจากแต่ละความยาวคลื่นแสงจะมีสีที่สอดคล้องกันแบบหนึ่งต่อหนึ่ง แสดงว่าการรับรู้สีที่เกิดจากการรวมกันของแสงหลายความยาวคลื่นนั้นย่อมจะมีความซับซ้อนกว่า กล่าวคือการรับรู้สีแบบเดียวกันอาจเกิดขึ้นเมื่อความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ กันเกิดการผสมด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อที่จะบรรยายการรับรู้สีของมนุษย์ให้ตรงกันจึงได้มีการสร้างระบบเพื่อบรรยายสีขึ้นมาซึ่งมีหลายระบบ โดยระบบที่นิยมใช้และเป็นรากฐานของระบบสีอื่นๆที่ตามมาคือ ระบบปริภูมิสี CIE 1931 (CIE 1931 color space) ซึ่งบรรยายด้วย แผนภาพสี CIE 1931 (CIE 1931 chromaticity diagram)

Tristimulus value

เนื่องจากสีใดๆเกิดจากการรวมกันของสีปฐมภูมิ (Primary color) 3 สีคือสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ดังนั้นในทางหลักการจึงเป็นไปได้ที่จะบรรยายการรับรู้สีของมนุษย์ด้วยปริมาณที่เรียกว่า **Tristimulus value** ซึ่งบรรยายด้วยตัวเลข 3 ค่าคือ X, Y, Z ซึ่งอาจแสดงถึงปริมาณที่เมื่อรวมกันแล้วจะให้เกิดการรับรู้สีแบบหนึ่ง กล่าวคือมนุษย์จะไม่สามารถแยกความแตกต่างของสีด้วยตาของตนได้หากการรวมกันของความยาวคลื่นแสงนั้นก่อให้เกิด Tristimulus value แบบเดียวกัน ซึ่งในระบบปริภูมิสี CIE 1931 จะบรรยายสีที่รับรู้ได้จากการมองเห็นด้วยปริมาณที่เรียกว่า พิกัดสี (Chromaticity coordinate) x, y, z ซึ่งมีค่าเป็นไปตามสมการ

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

โดยที่ Tristimulus value จะแสดงถึงความเข้มของสีที่รับรู้ได้ ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$X = \int_0^\infty I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = \int_0^\infty I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = \int_0^\infty I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

โดยที่ $I(\lambda)$ คือ spectral power distribution (SPD) ของแสงที่มาจากวัตถุ

λ คือ ความยาวคลื่นแสงในหน่วยนาโนเมตร

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ คือ ฟังก์ชันการจับคู่สี (Color matching function) ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่บรรยายการรับรู้สีแก่ผู้สังเกตซึ่งถูก

กำหนดโดย CIE

ค่าพิกัดสี x, y, z ที่ได้จากการแปลง spectral power distribution ของแสงจากวัตถุนี้นำไปใช้ในการระบุสีที่สังเกตได้ในระบบปริภูมิสี CIE xyY

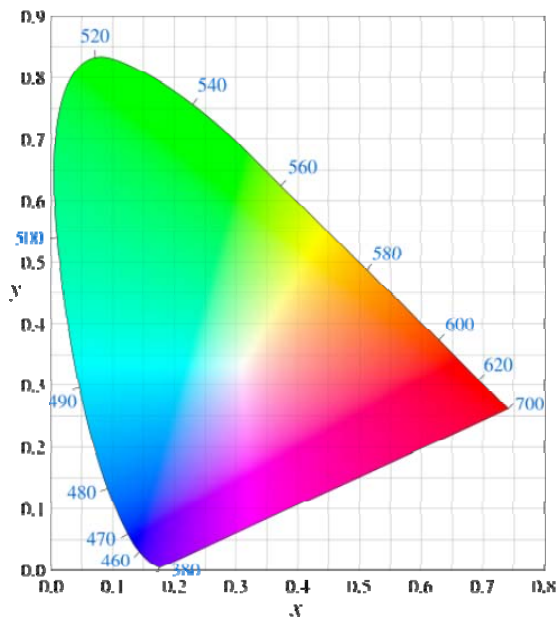
ระบบปริภูมิสี CIE xyY

เนื่องจากความแตกต่างของสีสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ส่วนคือ ความสว่าง(brightness) และสี(Chromaticity) กล่าวคือสีขาวเป็นสีที่สว่างในขณะที่สีเทาถือว่าเป็นสีที่มีความสว่างน้อยกว่าดังนั้นทั้งสีขาวและสีเทาต่างก็มีพิกัดสี x, y, z แบบเดียวกัน เพียงแต่มีความสว่างต่างกัน จากแนวคิดนี้จึงนำไปสู่การบรรยายสีด้วย ระบบปริภูมิสี CIE xyY ซึ่งบรรยาย

(1) ความสว่างของสี ด้วย tristimulus value Y ซึ่งเรียกว่า Brightness parameter

(2) ชนิดของสี ด้วยพิกัดสี x, y

กล่าวคือแต่ละสีจะถูกแทนด้วยจุดในแผนภาพสี (Chromaticity diagram) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่แสดงถึงการรับรู้สีที่เป็นไปได้ทั้งหมดของมนุษย์หรือผู้สังเกตโดยทั่วไปดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพสี CIE 1931 (CIE 1931 Chromaticity diagram)

(จาก http://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space)

การเคลือบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสง (Anti-reflection (AR) Coating)

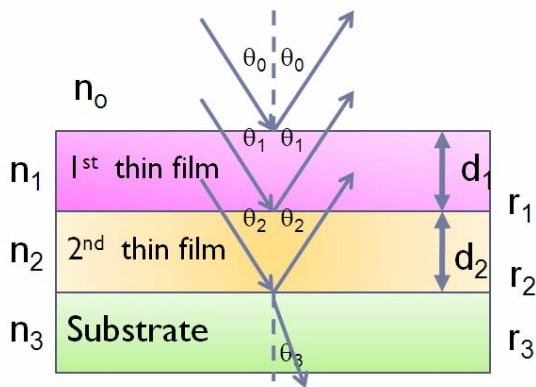
การเคลือบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสงเป็นกระบวนการเคลือบฟิล์มบางลงบนวัสดุต่างๆ โดยอาศัยหลักการแทรกสอดของแสงแบบหักล้างกัน ในที่นี้ฟิล์มบางหมายถึง วัสดุซึ่งมีขนาดของความกว้างและความยาวมีค่ามากกว่าความหนาของฟิล์มมากๆ และให้ฟิล์มบางมีสมบัติดังต่อไปนี้ (1) เป็นฉนวนไฟฟ้า (2) เป็นตัวกลางที่ไม่ดูดกลืนพลังงานแสง ($A = 0$) จึงทำให้ $R+T = 1$) โดยสมบัติทางแสงของฟิล์มบางจะเกิดจากการสะท้อนและการแทรกสอดของแสงที่สะท้อนจากฟิล์มบางแบบหักล้างกัน

การตกกระทบของแสงความยาวคลื่น λ ค่าเดียวที่มุมตกกระทบใด ๆ

พิจารณาแสงความยาวคลื่น λ ตกกระทบฟิล์มบาง 2 ชั้นที่เคลือบไว้บนวัสดุรองรับที่มีดัชนีหักเห n_3 ด้วยมุมตกกระทบ θ_0 ในตัวกลางซึ่งมีดัชนีหักเห n_0 โดยที่ฟิล์มบาง

ชั้นที่ 1 เป็นฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น n_1 ความหนาเป็น d_1

ชั้นที่ 2 เป็นฟิล์มบางที่มีค่าดัชนีหักเหเป็น n_2 ความหนาเป็น d_2 ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงการตกกระทบของแสงที่มีความยาวคลื่น λ ด้วยมุมตกกระทบ θ_0 บนฟิล์มบาง 2 ชั้นที่วางอยู่บนวัสดุรองรับที่มีดัชนีหักเห n_3

พบว่า สภาวะสะท้อน (Reflectance) R จะเป็นไปตามสูตรของครุก (Crook's formulas)

$$R = \frac{r_1 + r_2 e^{-i\delta_1} + r_3 e^{-i(\delta_1 + \delta_2)} + r_1 r_2 r_3 e^{-i\delta_2}}{1 + r_1 r_2 e^{-i\delta_1} + r_1 r_3 e^{-i(\delta_1 + \delta_2)} + r_2 r_3 e^{-i\delta_2}}$$

โดยที่ $r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}$ เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟรสเนล $\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda}(2n_i d_i \cos \theta_i)$ ผลต่างเฟส (Phase difference)

กรณีพิเศษ 1 การตกกระทบของแสงความยาวคลื่น λ ค่าเดียวในแนวตั้งฉาก

หากพิจารณาระยะที่สั้นของแสง (optical path difference) ในฟิล์มบางทั้งสองมีค่าเท่ากัน $x_1 = x_2 = \lambda/2$ จะได้ว่าสภาวะสะท้อน

R จะมีค่าเป็น $R = \left(\frac{n_1^2 n_3 - n_2^2 n_0}{n_1^2 n_3 + n_2^2 n_0} \right)^2$ เนื่องจากในที่นี้สนใจการเคลือบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสงแสดงว่าสภาพ

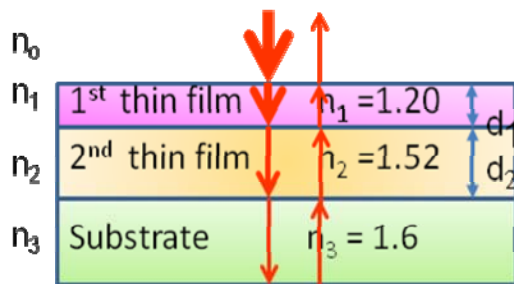
สะท้อนของแสงที่มีความยาวคลื่น λ ควรจะมีค่าเป็นศูนย์กล่าวคือ $R = 0$ เมื่อแทนในสมการข้างบนจะได้เงื่อนไขของการเลือกดัชนีหักเหของฟิล์มบางที่ใช้ในการเคลือบลงบนวัสดุรองรับดังสมการ $n_1^2 n_3 - n_2^2 n_0 = 0$ และจากเงื่อนไขของระยะที่สั้นของ

แสง $x_1 = x_2 = 2n_1 d_1 = 2n_2 d_2 = \frac{\lambda}{2}$ จะสามารถหาความหนาของฟิล์มบางที่ใช้ในการเคลือบเพื่อลดการสะท้อน

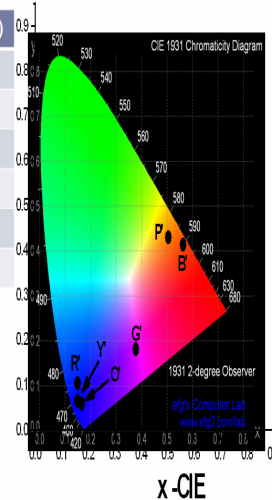
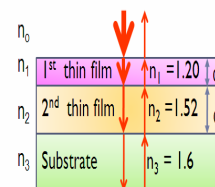
ของแสงที่มีความยาวคลื่น λ เป็น $d_1 = \frac{\lambda}{4n_1}$ และ $d_2 = \frac{\lambda}{4n_2}$

กรณีพิเศษ 2 การตกกระทบของแสงหลายความยาวคลื่นในแนวตั้งฉาก

โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้จะให้แสงที่มีหลายความยาวคลื่น (Polychromatic light) เช่น แสงขาว (White light) ดังนั้นเมื่อทำการฉายแสงขาวลงบนฟิล์มบางที่ลดการสะท้อนแสงสีหนึ่ง (หรือความยาวคลื่น λ ค่าหนึ่ง) แสงสีที่สะท้อนออกมาให้ผู้สังเกตเห็นจะกลายเป็นสีเติมเต็ม (Complementary color) ของแสงสีนั้นแทนดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5



Color	λ (nm)	d_1 (nm)	d_2 (nm)
Purple	400.00	83.33	65.88
Blue	458.15	95.45	75.45
Green	516.82	107.67	85.13
Yellow	570.00	118.75	93.88
Orange	590.00	122.92	97.17
Red	650.00	155.42	107.04



รูปที่ 4 แสดงการตกกระทบของแสงขาวในแนวตั้งฉากลงบนฟิล์มบางสองชั้น โดยเลือกค่าดัชนีหักเหเพื่อทำให้สภาพสะท้อนของแสงที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่งมีค่าเป็นศูนย์

รูปที่ 5 แสดงแสงสีที่เห็นจากฟิล์มบางในแนวตั้งฉากเมื่อฉายแสงขาวลงบนฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสงสีต่างๆในที่นี้ R' หมายถึง แสงสีเติมเต็มของแสงสีแดง R

ตารางที่ 1 แสดงความยาวคลื่นของแสงสีต่างๆ และความหนาของฟิล์มทั้งสองชั้นเพื่อลดการสะท้อนของแสงที่ความยาวคลื่นหรือแสงสีนั้น

Color	λ (nm)	d_1 (nm)	d_2 (nm)
Purple	400.00	83.33	65.88
Blue	458.15	95.45	75.45
Green	516.82	107.67	85.13
Yellow	570.00	118.75	93.88
Orange	590.00	122.92	97.17
Red	650.00	155.42	107.04

จากตารางที่ 1 และรูปจะสังเกตว่า ถ้าทำการฉายแสงขาว ลงในแนวตั้งฉาก (มุมตกกระทบเป็น 0 องศา) บนฟิล์มบางสองชั้นที่มีโครงสร้างดังในรูปที่ 4 ที่ลดการสะท้อนของแสงสีแดง (R) ความยาวคลื่น 650 nm จะสังเกตเห็นแสงสีที่สะท้อนออกมาเป็นสีฟ้าน้ำเงิน (R') รูปที่ 5 แสดงตำแหน่งของแสงสีฟ้าน้ำเงิน (R') ที่เห็นจากการสะท้อนจากฟิล์มที่ลดการสะท้อนของแสงสีแดง

กรณีพิเศษ 3 การตกกระทบของแสงหลายความยาวคลื่นที่มุมตกกระทบใดๆ

อย่างไรก็ตามการพิจารณาที่ผ่านมาเป็นการตกกระทบของแสงในแนวตั้งฉากเท่านั้น แต่พบว่าเมื่อพิจารณาการตกกระทบของแสงที่มุมตกกระทบใดๆ พบว่าระยะทัศนของแสงแต่ละความยาวคลื่นจะมีค่าเปลี่ยนไป จึงทำให้แสงบางความยาวคลื่นเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน ในขณะที่เดียวกันแสงความยาวคลื่นอื่นๆจะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและจากการที่

แต่ละความยาวคลื่นของแสงในย่านแสงที่มองเห็นได้ (visible light) จะมีสีที่สอดคล้องกันแบบหนึ่งต่อหนึ่งจึงทำให้แสงบางสีหายไปในขณะที่แสงสีอื่นๆจะสะท้อนเข้าสู่ตาของผู้สังเกต ทำให้ผู้สังเกตสามารถเห็นสีของวัตถุเปลี่ยนไปเมื่อมองในมุมตกกระทบที่เปลี่ยนแปลงไปได้

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้จะทำการออกแบบฟิล์มบางเพื่อลดการสะท้อนของแสงด้วยการใช้โปรแกรมดังต่อไปนี้

โปรแกรม

รายละเอียดการใช้งาน

โปรแกรม G-Solver เวอร์ชัน 5.2 สำหรับการคำนวณสภาพสะท้อน(Reflectance) R ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

โปรแกรมที่เขียนมาด้วยภาษาซี สำหรับคำนวณค่าฟังก์ชัน x, y, z และสีที่สังเกตได้

การรับรู้สีจากการออกแบบฟิล์มบาง

สำหรับสีที่เห็นได้จากการออกแบบฟิล์มบางจะได้จากผลการทำงานของโปรแกรม ซึ่งในที่นี้ได้ทำการดัดแปลงโปรแกรมที่คำนวณค่า tristimulus values X, Y, Z และค่า Chromaticity (x, y, z) (จาก <http://www.physics.sfasu.edu/astro/color.html>) โปรแกรมอยู่ในภาษาซี โดยให้สามารถรับค่าความเข้มแสง (intensity) แต่ละความยาวคลื่นที่ได้ จากการออกแบบฟิล์มบาง แทนเนื่องจากโปรแกรมเดิมจะใช้ความเข้มแสงที่ได้จากการแผ่รังสีของวัตถุดำ ซึ่งผลการทำงานของโปรแกรมที่ดัดแปลงนี้จะให้ค่า Chromaticity x, y, z และสีที่ได้จากการเห็น

การตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของโปรแกรม

เพื่อที่จะเชื่อมั่นในผลการทำงานของโปรแกรมที่ได้ดัดแปลงมาว่ามีความถูกต้องหรือไม่ ในที่นี้จึงทำการตรวจสอบโดยให้โปรแกรมคำนวณค่า Chromaticity x, y, z สำหรับแสงเอกรงค์หรือแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว (monochromatic light) เปรียบเทียบกับค่า CIE Standard Chromaticity x, y, z (ที่มาจาก http://www.biyye.net/v/cie_diagrams/index.htm) ที่ความยาวคลื่น 495, 520 และ 650 nm ตามลำดับ โดยผลของการเปรียบเทียบจะเป็นดังตารางที่ 2 ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้จากค่ามาตรฐานและจากการคำนวณมีค่าตรงกัน จึงเป็นการยืนยันผลที่ได้จากการทำงานของโปรแกรมที่ใช้

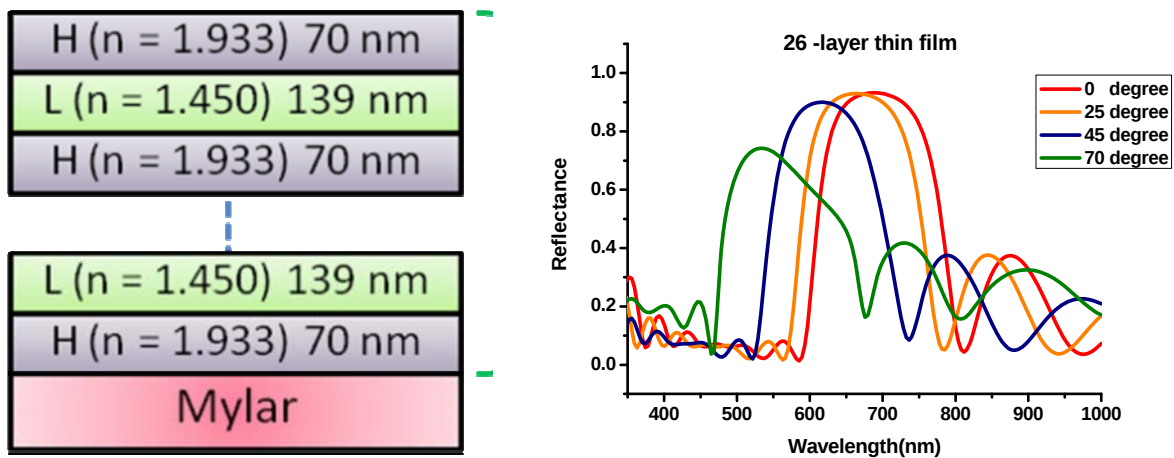
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบค่า CHROMATICITY X, Y, Z

Chromaticity Value	Wavelength(nm)					
	495		520		650	
	standard	calculation	standard	calculation	standard	calculation
x	0.023	0.023	0.074	0.074	0.726	0.726
y	0.413	0.413	0.834	0.834	0.274	0.274
z	0.564	0.564	0.092	0.092	0.000	0.000

ในการศึกษาวิจัยนี้จะทำการศึกษาฟิล์มบางที่สามารถลดการสะท้อนของแสงดังต่อไปนี้

2.1 ฟิล์มบาง 26 ชั้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่เห็นจากสีที่หนึ่งไปเป็นสีที่สอง

สำหรับฟิล์มบางนี้จะอ้างอิงมาจากผลงานทางวิชาการของ Dobrowolski ซึ่งได้เสนอการออกแบบฟิล์มบางที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีแดงไปเป็นสีเขียว (เมื่อเริ่มต้นมองด้วยมุมตกกระทบ 0 องศาไปจนถึง 70 องศา) ด้วยการใช้วัสดุรองรับ (Substrate) เป็นฟิล์มไมลาร์ (Mylar) และทำการเคลือบฟิล์มบาง 26 ชั้นที่มีรูปแบบการเคลือบฟิล์มดังรูปที่ 6 สภาพสะท้อน R ที่มุมตกกระทบบางค่า และสีที่สังเกตได้ที่มุมตกกระทบต่างๆดังรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ตามลำดับ



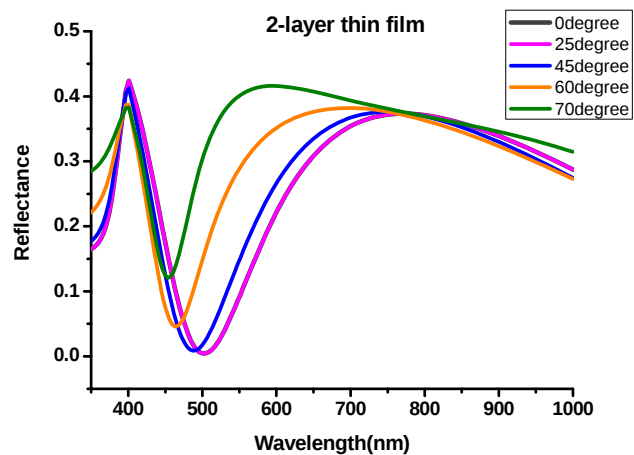
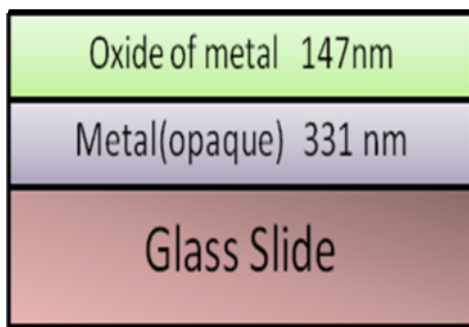
รูปที่ 6 แสดงการออกแบบฟิล์มบาง 26 ชั้น รูปที่ 7 แสดงสภาพสะท้อน R ที่มุมตกกระทบบางค่าของฟิล์มบาง 26 ชั้น



รูปที่ 8 แสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์มบาง 26 ชั้น

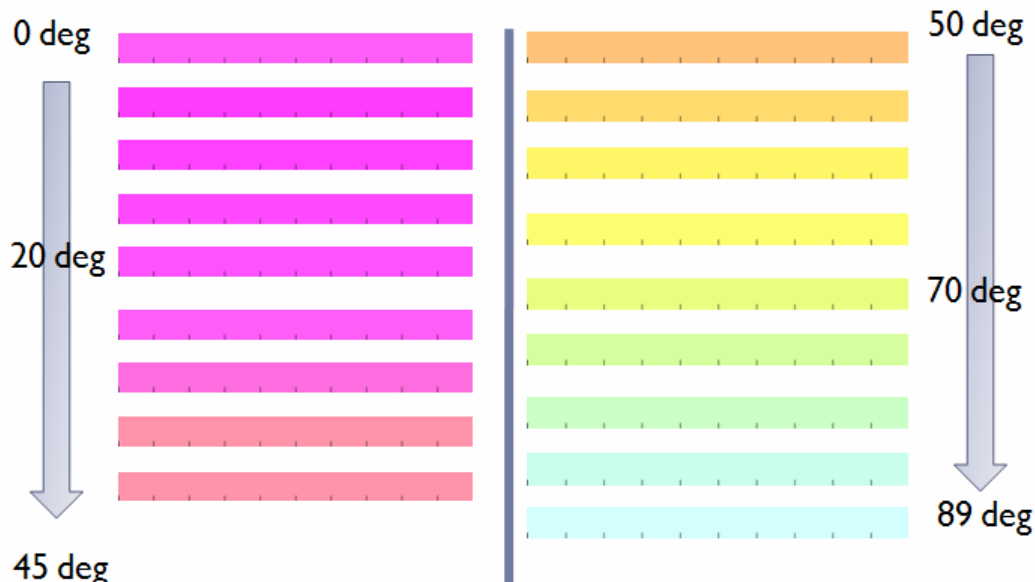
2.2 फिल्मบาง 2 ชั้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่เห็นจากสีม่วงไปเป็นสีเขียว

สำหรับฟิล์มบางนี้จะทำการออกแบบเพื่อที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสีที่เห็นจากสีม่วงไปเป็นสีเขียวด้วยการใช้วัสดุรองรับเป็นกระจกใส ในขณะที่จะมีฟิล์มบางของโลหะเป็นชั้นที่ 1 เคลือบลงบนวัสดุรองรับและฟิล์มบางชั้นที่ 2 ที่เคลือบถัดมาจะเป็นออกไซด์ของโลหะ โดยมีรูปแบบการเคลือบฟิล์ม สภาพสะท้อน R ที่มุมตกกระทบบางค่า และสีที่สังเกตได้ที่มุมตกกระทบต่างๆดังรูปตามลำดับ อย่างไรก็ตามจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพสะท้อนกับความยาวคลื่นของแสงดังรูปที่ 9 รูปที่ 10 และ รูปที่ 11 จะเห็นได้ว่าสภาพสะท้อนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจนในกรณีของฟิล์มบาง 26 ชั้นดังที่ได้กล่าวไป กล่าวคือมีการเปลี่ยนสีไปอย่างไม่ชัดเจนมากนัก



รูปที่ 9 การออกแบบฟิล์มบาง 2 ชั้น

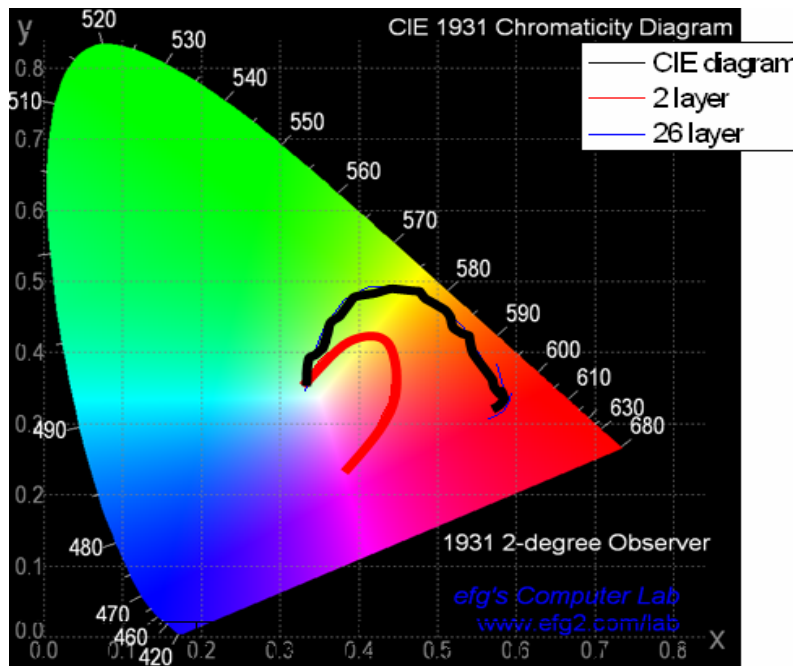
รูปที่ 10 สภาพสะท้อน R จากฟิล์มบาง 2 ชั้นที่มุมตกกระทบบางค่า



รูปที่ 11 แสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์มบาง 2 ชั้น

2.3 การเปลี่ยนตำแหน่งสีในระบบปริภูมิสี CIE 1931

รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนสีของฟิล์มบางทั้ง 2 แบบในระบบปริภูมิสี CIE 1931 ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการเปลี่ยนสีที่จะสังเกตได้



รูปที่ 12 แสดงการเปลี่ยนสีในระบบปริภูมิสี CIE 1931 ของฟิล์มบางหลายชั้นและฟิล์มบางสองชั้นโดยเส้นสีแดงแสดงถึง ฟิล์มบาง 2 ชั้น ในขณะที่เส้นสีน้ำเงินแสดงถึง ฟิล์มบาง 26 ชั้น

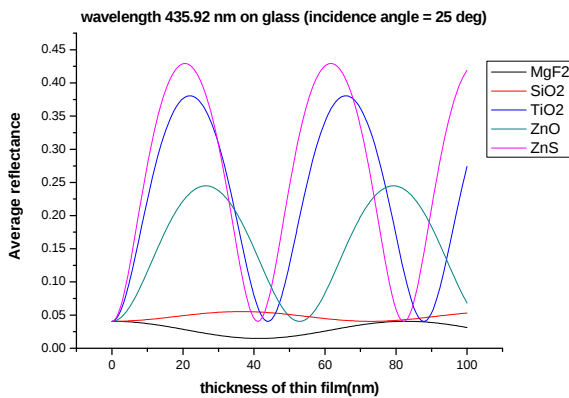
2.4 การพัฒนาชุดหัวแมกนีตรอนขนาด 1 นิ้ว



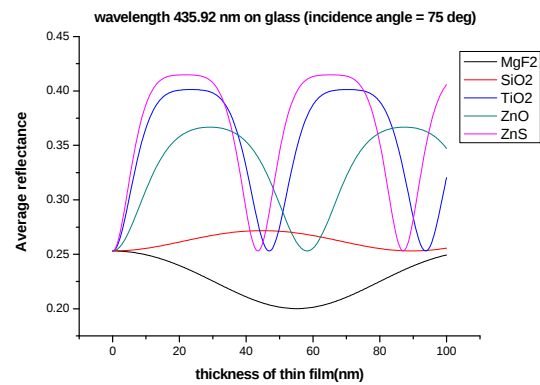
รูปที่ 13 องค์ประกอบของหัวแมกนีตรอนขนาดหนึ่งนิ้วที่สร้างขึ้น

2.5 การประเมินความหนาและชนิดของวัสดุ ที่จะนำมาเคลือบเป็นชั้นฟิล์มบาง

รูปที่ 14 เป็นค่าการสะท้อนของแสงที่ความคลื่นจำเพาะ 436 nm ที่สะท้อนจากชั้นฟิล์มที่เคลือบอยู่บนกระจก ตามความหนาของชั้นฟิล์ม และคำนวณอิทธิพลของมุมตกกระทบกับความเข้มของแสงที่สะท้อน ในการคำนวณ จะคิดจากฟิล์มชั้นเดียวจากวัสดุเช่น MgF_2 SiO_2 TiO_2 ZnO และ ZnS ค่าการสะท้อนของแสงในกราฟในรูปที่ 14 เกิดจากการคำนวณว่า ฟิล์มเหล่านี้เคลือบบนกระจก และวางอยู่ในอากาศ กราฟนี้จะช่วยในการเลือกความหนาและชนิดของฟิล์มที่เหมาะสม



(ก)

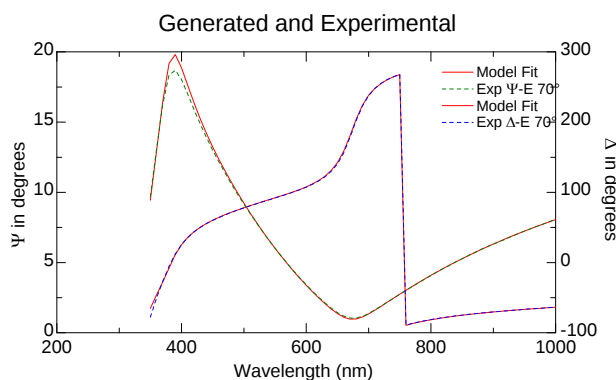


(ข)

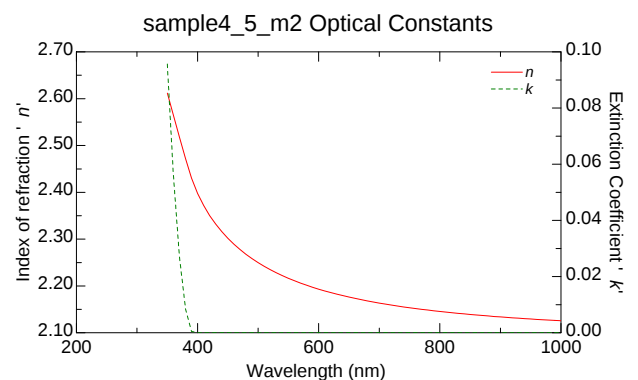
รูปที่ 14 ค่าการสะท้อนของแสงความยาวคลื่น 436 nm เมื่อตกกระทบกับฟิล์มหลาย ๆ ชนิดที่เคลือบบนกระจกด้วยความหนาต่าง ๆ กันที่มุมตกกระทบเท่ากับ 25 องศา และ (ข) 75 องศา

2.6 การวัดความหนาและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางที่เคลือบได้

เมื่อเลือกความหนาและชนิดของฟิล์มได้แล้ว วัสดุทำฟิล์มจะถูกนำมาเคลือบด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริง และฟิล์มที่ได้จะถูกนำไปวัดความหนาของฟิล์มและสมบัติทางแสงของชั้นฟิล์มบางโดยเทคนิค ellipsometry ผลการวัด แสดงไว้ในรูปที่ 15 หนึ่งวิธีการนี้เป็นการวัดความหนาหลังจากการเคลือบฟิล์มเสร็จสิ้นลงแล้ว



(ก)



(ข)

2	srough	0.822 nm
1	sample4_5_m2	84.553 nm
0	nk slide	1 mm

(ค)

รูปที่ 15 ค่า Ψ และ Δ จากเทคนิคการวัดแบบ

ELLIPSOMETRY และจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง และ (ข) สมบัติทางแสง ดัชนีหักเห (n) และ EXTINCTION COEFFICIENT (k) ของฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ เมื่อใช้ที่แสงสีต่างความยาวคลื่นเข้ามาตกกระทบ (ค) โครงสร้างหรือแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

2.7 การเคลือบฟิล์มบาง

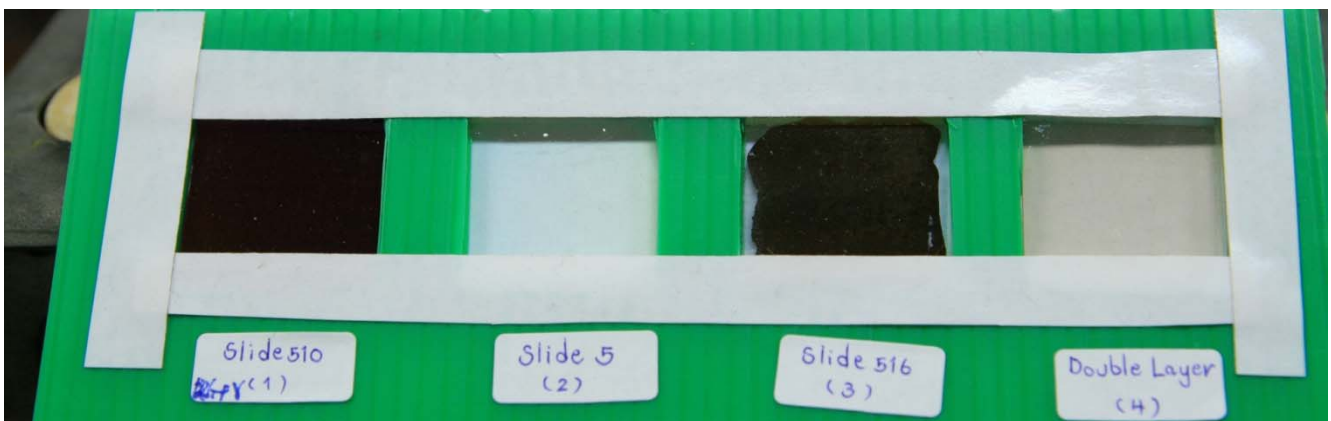
ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการเคลือบฟิล์มบาง 2 ชั้น ลงบนวัสดุรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering) โดยที่

ชั้นที่ 1 ทำการเคลือบฟิล์มโลหะ ด้วยกำลัง 60 W ที่ความดัน 3.0×10^{-2} mbar เป็นเวลา 90 นาที

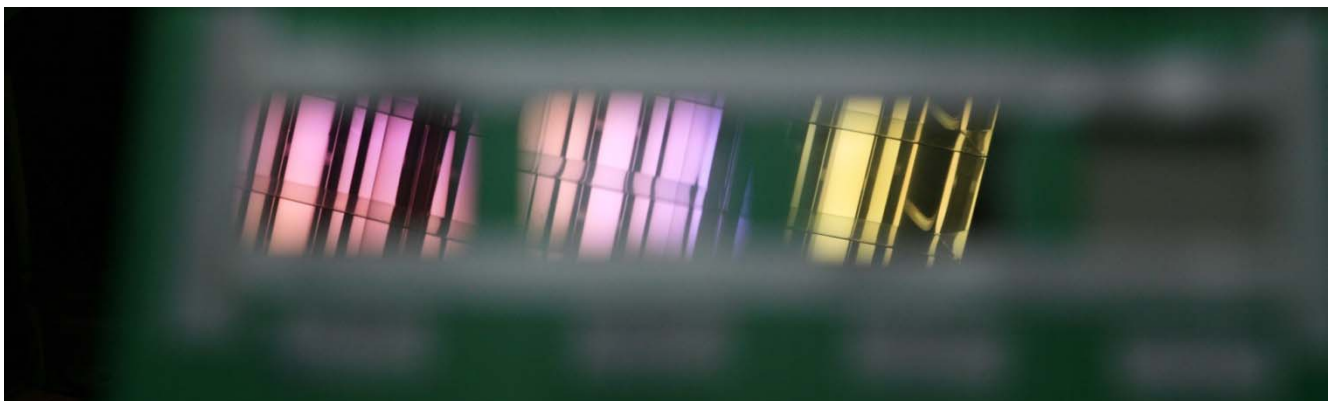
ชั้นที่ 2 ทำการเคลือบฟิล์มออกไซด์โลหะ ด้วยกำลัง 60 W ที่ความดัน 3.0×10^{-2} mbar เป็นเวลา 34 นาที

2.8 การทดสอบการสะท้อนของฟิล์มในสภาพแสงทั่วไป

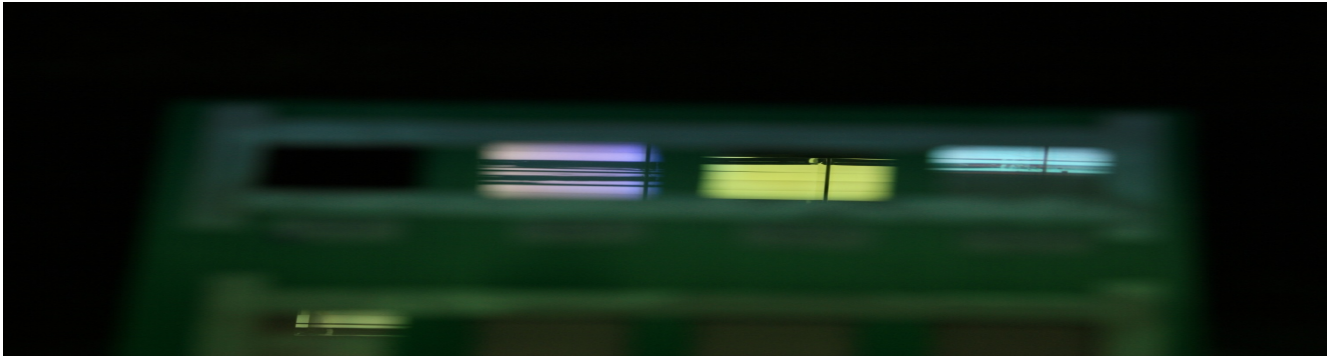
เมื่อนำฟิล์มที่ได้มาทดสอบการสะท้อนของแสงในสภาพแวดล้อมทั่ว ๆ ไป จะให้ผลดังแสดงในรูปที่ 16



(ก)



(ข)



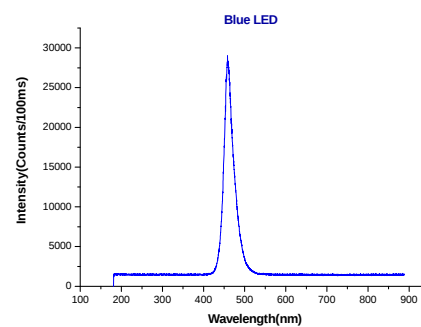
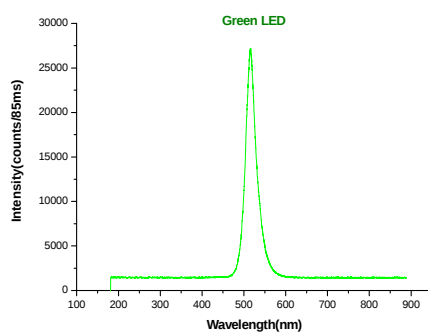
(ค)

รูปที่ 16 ภาพถ่ายของแสงที่สะท้อนฟิล์มจากที่เคลือบแบบชั้นเดียว (slide 510, slide 5, และ slide 516) และสองชั้น (double layer) (ก) ในสภาพแสงทั่วไป (ข) และ (ค) จากแหล่งกำเนิดแสง (โคมไฟเพดาน) จะเห็นผลการสะท้อนที่ให้แสงสีที่ต่างกัน

2.9 การทดสอบสภาพสะท้อนของฟิล์ม

จากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ได้ไปวัดสภาพสะท้อนที่มุมตกกระทบต่างๆ โดยใช้

1.แหล่งกำเนิดแสง เป็นหลอด LED สีน้ำเงินและสีเขียวซึ่งมีความเข้มสูงสุดและค่า FWHM (Full width at half maximum) แสดงดังในรูปที่ 17 และตารางที่ 3

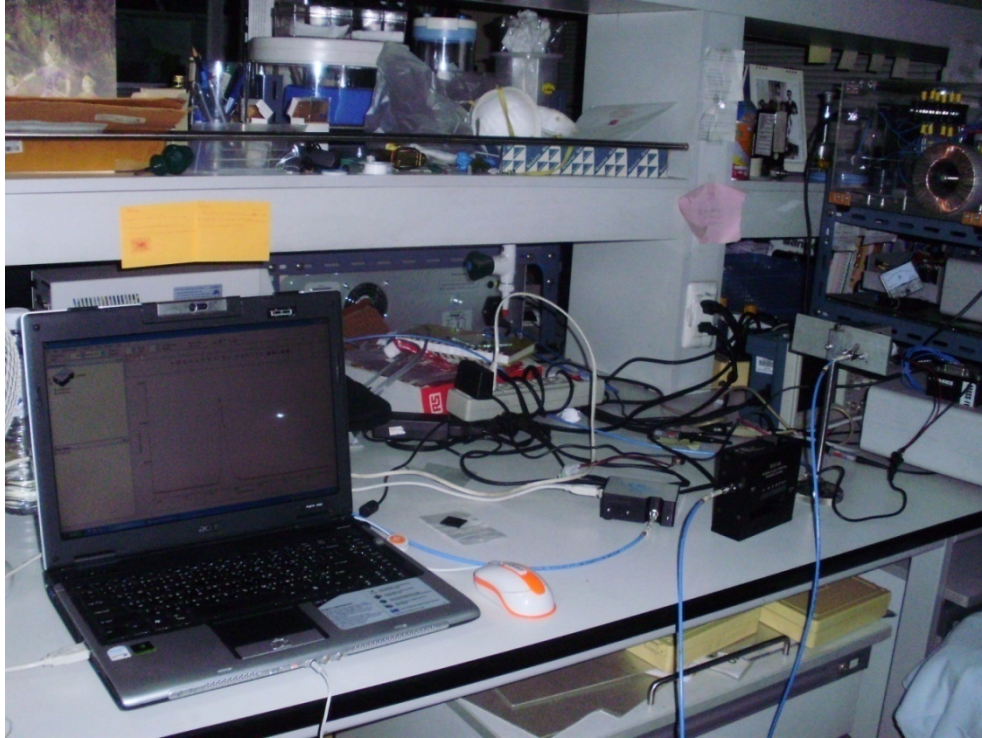


รูปที่ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสง LED สีเขียว (ที่ Integration time 100 ms) และสีน้ำเงิน (ที่ Integration time 85 ms)

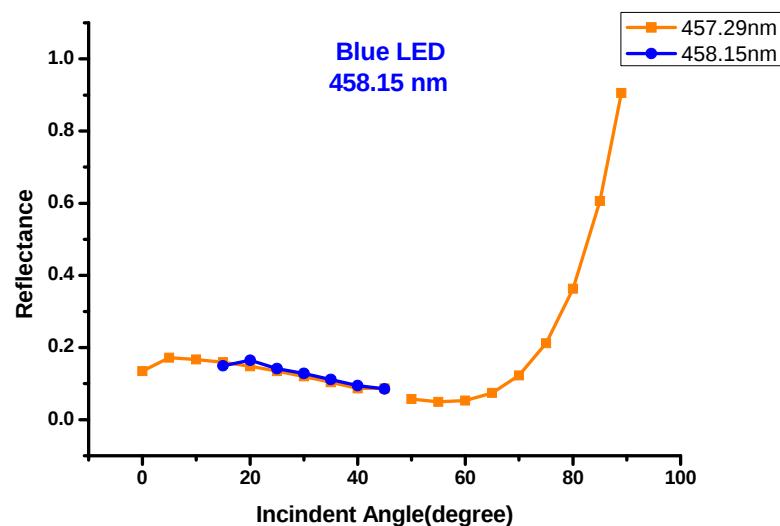
ตารางที่ 3 แสดงความเข้มสูงสุดและค่า FWHM (Full width at half maximum) ของแหล่งกำเนิดแสง LED สีเขียว (ที่ Integration time 100 ms) และสีน้ำเงิน (ที่ Integration time 85 ms)

Color	Maximum Intensity at wavelength	FWHM(nm)
Blue	458.15 nm	26.26
Green	516.82 nm	28.96

2. การวัดสภาพสะท้อนด้วยการใช้ Spectrometer (USB4000-UV-VIS) ที่มุมตกกระทบต่างๆตั้งแต่ 15-45 องศาด้วยการใช้ อุปกรณ์ Variable Angle Reflection Sampling System (RSS-VA) และใช้ฟิล์มของเงิน (Silver) เป็นฟิล์มมาตรฐานในการเปรียบเทียบสภาพสะท้อน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงการจัดอุปกรณ์ในการตรวจสอบผลจากการออกแบบฟิล์มบาง 2 ชั้น

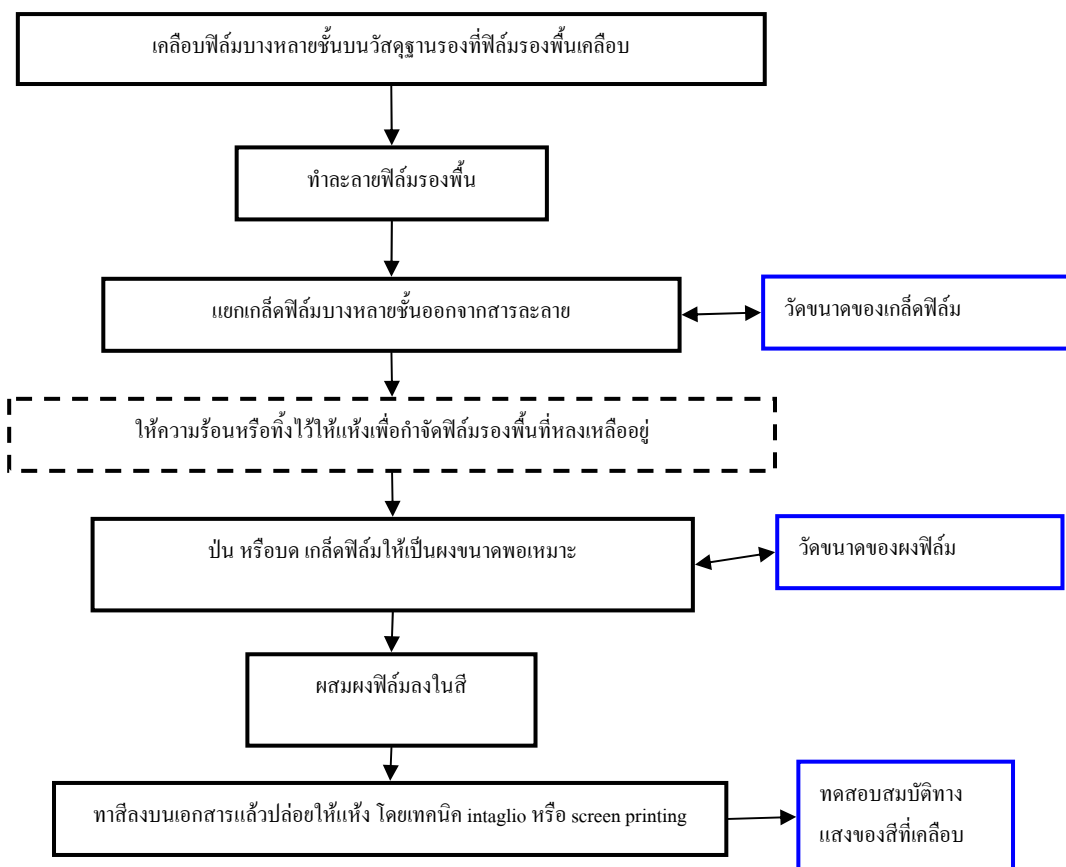


รูปที่ 19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพสะท้อน R กับมุมตกกระทบที่ความยาวคลื่น 458.15 nm (LED สีน้ำเงิน) เส้นสีส้ม แสดงถึง ผลที่ได้จากการคำนวณหรือออกแบบ (Simulation) ในขณะที่เส้นสีน้ำเงิน แสดงถึงผลที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 19 พบว่าสภาพสะท้อน R ที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับผลการคำนวณหรือออกแบบ (Simulation) แต่ผลที่ได้ทั้งสองจะใกล้เคียงกันมากขึ้น ถ้าสามารถควบคุมอัตราการเคลือบฟิล์มบางและเวลาที่ใช้เคลือบ ทำให้ได้ฟิล์มบางที่เคลือบที่มีความหนาเดียวกันกับฟิล์มบางที่ได้ออกแบบไว้

2.10 แผนงานสำหรับการเคลือบฟิล์มบางในสเกลที่ใหญ่ขึ้น

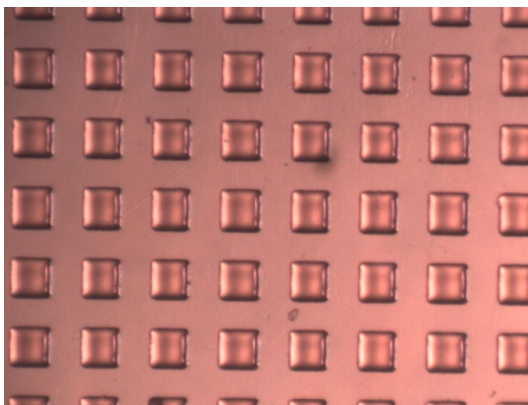
เมื่อได้ฟิล์มบางหลายชั้นที่มีสมบัติตามต้องการแล้ว จึงขยายการทดลองเคลือบฟิล์มที่ได้บนวัสดุฐานรองที่มีฟิล์มรองพื้น หนึ่งเพื่อให้เอื้อต่อการประยุกต์จริง จำต้องเลียงวัสดุฐานรองในขั้นตอนนี้ ไม่ใช่กระจกอีกต่อไป ถ้าเป็นโพลิเมอร์หรือพลาสติกหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีความเรียบและพรุน ที่สามารถละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาต่อเนื้อฟิล์ม เมื่อการเคลือบสิ้นสุดลง การทำละลายฟิล์มรองพื้นออก ทำให้สามารถลอกฟิล์มทั้งหมดออกจากวัสดุฐานรองได้ ถ้าเกิดฟิล์มออกจากฟิล์มรองพื้นหรือวัสดุฐานรองได้ ในกระบวนการนี้จะมีการวัดขนาดของเกล็ดฟิล์มที่ได้ ก่อนนำไปผ่านกระบวนการปั่น หรือบดย่อยให้ได้ผงฟิล์มที่มีขนาดเล็กลง ขนาดของผงฟิล์มที่ได้จะถูกวัดขนาดอีกครั้ง ผงฟิล์มที่ได้จะต้องมีสัดส่วนกว้างยาวที่เหมาะสมเพื่อรักษาสภาพการเรียงตัวของชั้นฟิล์มให้เหมือนกันทั้งในขณะที่อยู่บนวัสดุฐานรองและ อยู่ในสภาพผงฟิล์มผสมในหมึก เมื่อได้ผงฟิล์มที่มีขนาดพอเหมาะแล้วจึงนำมาผสมร่วมกับสีและสารยึดติด แล้วนำไปประยุกต์ใช้ทาบนเอกสารหรือสิ่งพิมพ์เพื่อความปลอดภัย และทดสอบสมบัติการแปรสี ทั้งตรวจสอบการแปรสีด้วยตาเปล่า หรือโดยละเอียดโดยใช้เครื่องมือวัดสมบัติทางแสงช่วย ขั้นตอนการดำเนินงานได้แสดงดังในรูปที่ 20 จากนั้นจึงหาข้อสรุปของกระบวนการทั้งหมด เพื่อเลือกกระบวนการที่ดีที่สุดที่จะใช้ขยายสู่ขั้นตอนการผลิตให้มีความสูงชัน เพื่อรองรับการผลิตหมึกแปรแสงในระดับที่ใหญ่ขึ้นต่อไป



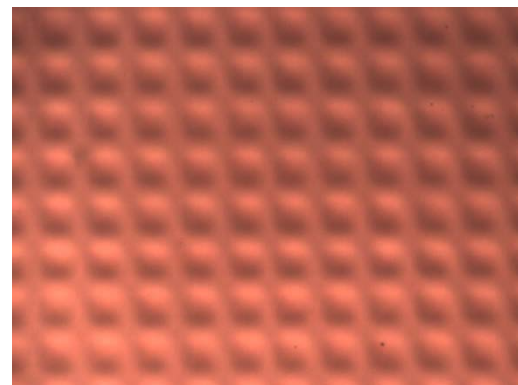
รูปที่ 20 ขั้นตอนของกระบวนการผลิตผงหมึกแปรแสง

2.11 ฟิล์มรองพื้นพอลิเมอร์

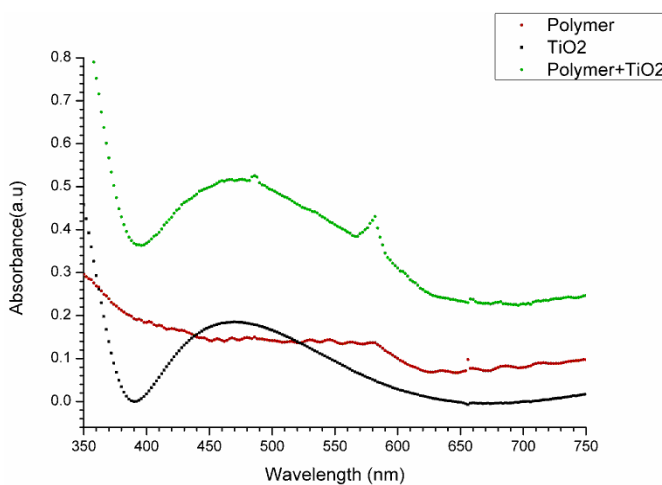
หนึ่งในโครงการที่นำเสนอตั้งแต่ ได้เสนอให้ใช้ฟิล์มรองพื้นพอลิเมอร์ที่เป็นชั้นฟิล์มบางก่อนการเคลือบชั้นฟิล์มบางทางแสง ซึ่งฟิล์มรองพื้นจะถูกลอกออกด้วยกระบวนการทางเคมีเมื่อสิ้นสุดการเคลือบฟิล์มทั้งหมด ทำให้เหลือแต่ชั้นฟิล์มบางทางแสง ก่อนที่ฟิล์มบางทางแสงจะถูกนำไปปั่นหรือสับและบดให้มีขนาดที่ต้องการ อย่างไรก็ตามในขั้นตอนนี้การปั่นหรือสับและบด อาจประสบกับปัญหาที่ฟิล์มที่ได้จะมีขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ จึงได้พัฒนาการขึ้นรูป (pattern) ฟิล์มรองพื้นพอลิเมอร์ ให้มีขนาดที่ต้องการตั้งแต่ต้น เพื่อหลีกเลี่ยงขั้นตอนการปั่นหรือสับและบด และในภาพรวมเพื่อลดขั้นตอนการทำงานลง รูปที่ 21 แสดงรูปถ่ายฟิล์มบางของพอลิเมอร์หลังจากการขึ้นรูปเป็นช่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสความกว้าง 50 μm ก่อนและหลังการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ และการดูดกลืนแสง จะพบว่า แสงช่วงความยาวคลื่น 470 nm ถูกดูดกลืนเพิ่มขึ้น



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 21 (ก) แสดงฟิล์มพอลิเมอร์และลายแบบขนาด 50 ไมครอนก่อน และ(ข) หลังการเคลือบทับด้วยฟิล์มของไทเทเนียมไดออกไซด์ และ (ค) ค่าการดูดกลืนแสงเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์ ก่อน(polymer - เส้นสีแดง) และหลังการเคลือบฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์ทับ (polymer + TiO₂)

ภาคผนวก

กิจกรรมที่ได้เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

ได้นำฟิล์มบางแบบแรก(สองชั้น) ที่ผลิตได้ ไปปรับขนาดให้เหมาะกับการนำไปผสมเป็นสี ก่อนที่จะนำไปเป็นรงควัตถุผสมกับตัวทำละลายและสารยึดติด เพื่อเคลือบบนกระดาษ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของสีเมื่อเปลี่ยนมุมการมอง ที่บริษัท จันวาณิชย์ ซีเคียวริตี้ พรินท์ติ้ง จำกัด พบว่าการเปลี่ยนสีเป็นแบบต่อเนื่อง (เส้นสีแดงในรูปที่ 12) สีปรากฏเหมือนสีเหลือง จึงจำเป็นต้องทำการเพิ่มชั้นของการเคลือบมากขึ้น หรืออาจต้องเพิ่มเติมโครงสร้างที่มีลักษณะของเกรตติง เพื่อให้ใกล้เคียงโดยตรงจากสีที่หนึ่งเป็นสีที่สอง (หรือเส้นสีดำในรูปเดียวกัน)

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ และกิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ตัวอักษรสีเขียว หมายถึงกิจกรรมที่มีการดำเนินงานของโครงการไม่น้อยกว่า 80%

ตัวอักษรสีเหลือง หมายถึงมีการดำเนินงานของโครงการไม่น้อยกว่า 30%

ตัวอักษรสีแดง หมายถึงมีการดำเนินงานของโครงการน้อยกว่า 30%

วัตถุประสงค์	แผนการดำเนินงาน	การดำเนินการที่ผ่านมา	ดัชนีชี้วัด
๑. พัฒนาระบบการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้น ด้วยการสเป็คเตอร์ริง ที่ให้ฟิล์มแต่ละชั้นมีความหนาไม่เกิน ๔๐๐ นาโนเมตร และความผิดพลาดทางความหนาไม่เกิน ๑๐ นาโนเมตร และทดลองผลิตการเคลือบฟิล์มบางหลายชั้นบนชิ้นงาน เช่น กระฉกหรือพลาสติก ให้ชิ้นงานมีสมบัติเปลี่ยนสีเมื่อเปลี่ยนองศาการมอง	๑.๑ ออกแบบและสร้างชุดหน้าแปลนที่รองรับ	สำเร็จตามที่วางแผนงานไว้	หน้าแปลนและหัวแมกนีตรอนจำนวน ๓ หัว
	๑.๒ ออกแบบและสร้างหัวแมกนีตรอนขนาด ๑ นิ้ว จำนวน ๓ หัว	สำเร็จการสร้างหัวแมกนีตรอนขนาด ๑ นิ้ว จำนวน ๑ หัว	
	๑.๓ ทดสอบการทำงานในสุญญากาศของชุดหน้าแปลนและหัววัดแมกนีตรอนทั้งหมด	ดำเนินการทดสอบสำเร็จ	ชุดหน้าแปลนและหัวแมกนีตรอนที่ประกอบกับระบบสุญญากาศที่ทำงานได้
	๑.๔ ติดตั้งและทดสอบการทำงานของชุดวัดความหนาของฟิล์มขณะเคลือบ	ไม่ได้ดำเนินการตามแผน เพราะ ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง พื้นฐานของชุดเคลือบฟิล์มอย่างมาก การแก้ไข เลือกใช้การวัดฟิล์มนอกชุดเคลือบ (offline) เมื่อการเคลือบสิ้นสุดลงแทน	ชุดวัดความหนาของฟิล์ม
	๑.๕ ทดลองเคลือบฟิล์มหลายชั้นที่มีความหนาเหมาะสมบนกระฉกขนาด ๑ ตารางนิ้ว โดยใช้ระบบสเป็คเตอร์ริงแบบเป่าเดียวที่มีอยู่แล้ว	ได้ดำเนินการตามแผนที่วางไว้	กระฉกขนาด ๑ ตารางนิ้ว ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางหลายชั้น
	๑.๖ เคลือบฟิล์มหลายชั้น ด้วยกระบวนการสเป็คเตอร์ริงแบบหลายเป่าที่ทำขึ้นบนกระฉก ๑.๖.๑ โดยมีเพียงชั้นของฟิล์มบางออกไซด์หลากหลายชนิดเพียงอย่างเดียว ๑.๖.๒ โดยมีชั้นโพลีเมอร์คั่นระหว่างชั้นออกไซด์	ดำเนินการตามแผนที่วางไว้แต่ใช้ชุดอุปกรณ์ในข้อ ๑.๕ แทน	กระฉกขนาด ๑ ตารางนิ้ว ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางออกไซด์หลายชั้นและที่เคลือบด้วยฟิล์มบางออกไซด์และโพลีเมอร์สลับชั้นกัน
	๑.๗ ประกอบและทดสอบชุดวัดแสงสีที่สามารถปรับเปลี่ยนมุมตกกระทบได้	ดำเนินการตามแผนที่วางไว้สำเร็จ	ชุดวัดแสงสีที่สามารถปรับเปลี่ยนมุมตกกระทบได้
	๑.๘ ทดสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มหลายชั้นที่ได้	ดำเนินการตามแผนที่วางไว้สำเร็จ	กระฉกที่เคลือบด้วยฟิล์มบางออกไซด์หลายชั้นที่มีการวิเคราะห์สมบัติแล้ว
	๑.๙ ประกอบและทดสอบชุดอุปกรณ์ทางแสง	ไม่ได้ดำเนินการ	ชุดวัดความเข้ม ความเครียดของ

	เพื่อวัดสมบัติความเค้น ความเครียดของฟิล์ม		ฟิล์ม
	๑.๑๐ ทดสอบสมบัติความเค้น ความเครียดของฟิล์ม	ไม่ได้ดำเนินการ	
๒. พัฒนาระบวนการลอกฟิล์มบางหลายชั้นออกจากวัสดุฐานรอง	๒.๑ ทดลองเคลือบกระจกด้วยฟิล์มรองพื้นด้วยกระบวนการปั่นเคลือบ	สำเร็จตามที่วางแผนไว้	
	๒.๒ เคลือบกระจกที่มีฟิล์มรองพื้นด้วยฟิล์มทางแสงหลายชั้น	สำเร็จตามที่วางแผนไว้	
	๒.๓ ทดลองและปรับปรุงกระบวนการลอกฟิล์มทางแสงหลายชั้นออกจากกระจก	สำเร็จตามที่วางแผนไว้	กรรมวิธีการลอกฟิล์ม
	๒.๔ ทดสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มหลายชั้นที่ได้	สำเร็จตามที่วางแผนไว้	เงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเตรียมฟิล์มที่มีสมบัติทางแสงตามต้องการ
	๒.๕ ทดสอบสมบัติความเค้น ความเครียดของฟิล์ม	ไม่ได้ดำเนินการ	เงื่อนไขการเตรียมฟิล์มที่มีความเค้น ความเครียดต่ำ
๓. พัฒนาระบวนการบดขยี้ฟิล์มบางให้เป็นผงขนาด ๑๐๐ ไมครอนหรือมากกว่า โดยยังคงสมบัติแปรสีเมื่อเปลี่ยนองศาการมอง	๓.๑ ทดลองการแปรรูป หรือบดขยี้เกล็ดฟิล์มบางที่ได้ให้มีขนาดประมาณ ๑๐๐ ไมครอน	สำเร็จตามที่วางแผนไว้	ผงฟิล์มบาง
	๓.๒ หาข้อสรุปเรื่องกรรมวิธีการผลิตผงฟิล์มบางที่เหมาะสม	ดำเนินการตามที่วางแผนไว้	กรรมวิธีการผลิตผงฟิล์มบางที่เหมาะสม
๔ ศึกษาความเป็นไปได้หรือพัฒนาระบวนการแปรรูปผงฟิล์มบางที่ได้ให้เป็นองค์ประกอบของหมึกพิมพ์	๔.๑ ทดลองและปรับปรุงกระบวนการแปรรูปผงฟิล์มบางให้มีขนาดเหมาะสมกับการนำมาเป็นส่วนประกอบในหมึกพิมพ์	สำเร็จตามที่วางแผนไว้ ประมาณ ๕๐%	กรรมวิธีการบดขยี้ผงฟิล์มบางที่เหมาะสม

การดำเนินการในภาพรวมไม่น้อยกว่า ๖๕%

ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

แม้โครงการนี้ มีโจทย์จากอุตสาหกรรมและมีความพยายามที่จะตอบโจทย์นี้ด้วยความจริงจัง และได้ก้าวหน้ามาแล้วเกินกว่า ๖๐% นั้น แต่ในภาพรวม โครงการได้ประสบกับปัญหาที่ยากจะควบคุมและทำให้ไม่สามารถดำเนินงานได้บรรลุวัตถุประสงค์เต็มตามที่ได้วางไว้แต่ต้น โดยมีประเด็นปัญหาที่สำคัญที่แยกออกได้เป็นสามด้านเรียงตามความสำคัญ ได้ดังนี้

1. ด้านบุคลากร นักศึกษาช่วยวิจัย และผู้ช่วยนักวิจัย

ตามธรรมชาติของโครงการนี้เป็นโครงการที่มุ่งเน้น และดำเนินการโดยมหาวิทยาลัย และให้ความสำคัญกับการศึกษา และวิจัยเพื่อการสร้างกำลังคนระดับปริญญาตรีและ/หรือโทและ/หรือเอก ผนวกกับโจทย์ที่ต้องใช้ความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์และทัศนศาสตร์ มากพอสมควร ทำให้ต้องใช้นักศึกษาที่ผ่านการฝึกฝนมาแล้วระดับหนึ่ง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นนักศึกษาในปีสุดท้ายของการเรียน มาเป็นกำลังหลัก ซึ่งอาจแตกต่างจากโจทย์อื่น ๆ แต่โจทย์ในโครงการนี้ ที่ใช้เวลาในการวิจัยมากกว่าหนึ่งปี นักศึกษาถึงวาระจบการศึกษาก่อนการสิ้นสุด ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องในการดำเนินงาน

การจ้างผู้ช่วยนักวิจัย เป็นทางออกในการแก้ปัญหาทางหนึ่ง แต่ก็ประสบกับปัญหาด้านอื่นเข้ามาแทน ได้แก่ความไม่แน่นอน ในการจ้างงาน และไม่ทราบอนาคตที่แน่ชัดว่าเมื่อจบโครงการแล้วจะสามารถร่วมงานต่อกับทางบริษัทที่ร่วมวิจัยได้เลยหรือไม่ ทำให้ได้ผู้ช่วยวิจัยที่มาร่วมงานได้ระยะเวลานานหนึ่ง (ประมาณ หกเดือน) และได้สิ้นสุดการร่วมงานเมื่อได้งานที่แน่นอนกว่าและมีความมั่นคงกว่า ในระยะยาว

การเปิดเผยข้อมูลด้านการทำวิจัย ถูกจำกัดเป็นอีกปัญหาหนึ่งในการกระจายข้อมูล ในวงกว้าง ผลกระทบที่นักวิจัยประสบคือการส่งผ่านข้อมูลและส่งผ่านงานจากผู้ร่วมงานคนแรกสุดคนใหม่ ไม่สามารถทำได้สะดวกนัก เนื่องจากต้องระมัดระวังถึงข้อมูลที่จะถูกกระจายออกไป

ปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจึงเป็นปัญหาที่ผู้วิจัย ไม่ได้คาดการณ์ไว้ รับรู้และจัดการกับปัญหาได้ค่อนข้างช้า จึงเริ่มเป็นปัญหาสะสมช่วงกลางของโครงการ

2. ด้านความร่วมมือกับทางบริษัท

แม้ในการดำเนินโครงการนี้จะได้รับความร่วมมือจากทางบริษัทในระดับที่ระดับหนึ่ง สามารถส่งมอบฟิล์มแผ่นให้กับบริษัทดำเนินการทดสอบ ซึ่งบริษัทได้ดำเนินการทดสอบดังปรากฏในกิจกรรมที่ได้เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์ แต่การชะงักงันและความไม่ต่อเนื่องของงานทำให้ความร่วมมือกับทางบริษัท เป็นไปยากขึ้นเป็นลำดับ

3. ด้านประสิทธิภาพของเครื่องมือ

เป็นสิ่งที่ได้ปรากฏแก่ผู้วิจัยก่อนการเสนอขอโครงการนี้ และได้กำหนดร่างไว้ในแผนงานสำหรับการทำฟิล์มที่มีความคลาดเคลื่อนทางความหนาไม่เกิน 10 นาโนเมตร เครื่องมือและครุภัณฑ์ที่มีในห้องปฏิบัติการซึ่งมีหัวแมกนีตรอนขนาดสองนิ้ว นั้น แม้สามารถให้ความละเอียดได้ในระดับที่ต้องการได้ แต่ครอบคลุมพื้นที่ที่จำกัด นอกเลยพื้นที่ที่จำกัดนี้ออกไป ความหนาของฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงไป ส่วนหัวแมกนีตรอนขนาดหนึ่งนิ้วที่ได้สร้างประกอบขึ้นมาใหม่ มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม ทำให้พื้นที่ยังจำกัดลงกว่าเดิม แม้จะได้คาดการณ์ไว้แต่ต้นแล้ว แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นนั้นมากกว่าที่คาดการณ์ไว้

รายงานการเงิน

สรุปรายจ่ายแยกตามหมวด

หมวด (ตามสัญญา)	รวมรายจ่ายสะสม (บาท)
1.ค่าตอบแทน	420,000.00
2.ค่าจ้าง	107,607.00
3.ค่าวัสดุ	85,676.74
4.ค่าใช้สอย	48,462.00
5. ค่าเดินทางในประเทศ	0.00
6. ค่าเดินทางต่างประเทศ	0.00
7.ค่าครุภัณฑ์	0.00
รวมทั้งสิ้น	661,745.74