



หมึกพิมพ์ปลอดปลอมฐานสารยึดเซลลูโลสที่ตรวจสอบได้ด้วยแสงยูวีเอ

สุรัชชัย ชันแก้ว* และ อารีรัตน์ โพธิ์รัตนแสงชัย

สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 6494 4550 อีเมล: surachai@mutt.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.016

รับเมื่อ 8 พฤษภาคม 2563 แก้ไขเมื่อ 17 มิถุนายน 2563 ตอบรับเมื่อ 19 มิถุนายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 24 พฤษภาคม 2564

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

หมึกพิมพ์ที่ตรวจสอบได้นับเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีปลอดปลอมที่ช่วยในการยืนยันความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่อาจถูกปลอมแปลง โดยเฉพาะในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีราคาสูง เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ สามารถตรวจสอบได้ง่าย และสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคได้เป็นอย่างดี งานวิจัยเรื่องนี้ จึงมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาหมึกพิมพ์ปลอดปลอมฐานสารยึดเซลลูโลสที่ตรวจสอบได้ด้วยแสงยูวี ประกอบด้วยแอนทราควิโนน-2-ซัลโฟเนต (ATQ) เป็นสารให้สี กลีเซอรอล (G) เป็นสารให้อิเล็กตรอน ร่วมกับสารยึดฐานเซลลูโลสที่สกัดได้จากกากกล้วยน้ำว้า (CbB) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง โดยศึกษาความเข้มข้นของ TiO_2 ที่ต่างกัน 3 ระดับ คือ 25, 50 และ 100 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึด จากนั้นเตรียมเป็นหมึกพิมพ์ ทดสอบพิมพ์ และทดลองตรวจสอบด้วยแสง UVA ที่ความเข้ม 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ในสภาวะปลอดออกซิเจนพบว่า หมึกพิมพ์ทุกอัตราส่วนมีลักษณะเป็นเนื้อเดียว ไม่มีสี สามารถพิมพ์ลงบนวัสดุได้ดี เมื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงสีด้วยแสง UVA พบว่า หมึกพิมพ์จะค่อยๆ เปลี่ยนสีจากไม่มีสีไปเป็นสีเหลืองเข้ม โดยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงสีขึ้นอยู่กับปริมาณของ TiO_2 โดยตรง และจากการทดลองหมึกพิมพ์ที่มีปริมาณ TiO_2 เท่ากับ 100 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึด มีอัตราเร็วเริ่มต้น (k_{in}) สูงที่สุดคือ $0.9924 \Delta E \cdot \text{min}^{-1}$ มีค่าความแตกต่างสีรวมสูงสุด (ΔE_{max}) ที่ 35.85 และมีเวลาที่หมึกเปลี่ยนแปลงสีได้ 95% ของสีสมบูรณ์ (t_{95}) เป็น 3.97 ± 0.38 นาที ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า เกล็ดสีเหลืองของหมึกพิมพ์หลังการตรวจสอบสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นสีเขียวอ่อนและสีน้ำตาลแดงได้เมื่อได้รับสารละลายกรดและด่าง ตามลำดับ ทั้งนี้ หมึกพิมพ์ในงานวิจัยนี้ ยังสามารถผันสีกลับได้เมื่อได้รับแก๊สออกซิเจนจากการซึมผ่านวัสดุเคลือบ ทำให้สามารถผันสีกลับกลายเป็นไม่มีสี และตรวจสอบใหม่ได้หลายครั้ง

คำสำคัญ: หมึกพิมพ์ปลอดปลอม หมึกพิมพ์ที่ตรวจสอบได้ด้วยแสง สารยึดฐานเซลลูโลส สีย้อมรีดอกซ์ การพิมพ์กันการปลอมแปลง



UVA-monitored, Cellulose-based Binder Colorimetric Security Printing Ink

Surachai Khankaew* and Areerat Photirattanasangchai

Program of Digital Printing and Packaging Technology, Faculty of Mass Communication Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

*Corresponding Author, Tel. 08 6494 4550, E-mail: surachai@rmutt.ac.th

DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.05.016

Received 8 May 2020; Revised 17 June 2020; Accepted 19 June 2020; Published online: 24 May 2021

© 2021 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

The colorimetric-monitored ink approach is one of the security technologies which can be used to confirm the authenticity of products that may be counterfeited, especially a group of luxury and High-valued Products. (HVP). Due to a low production cost, it is easy to monitor and increase customer confidence. This research aims to develop cellulose-based security printing ink that could be monitored by UVA light. The ink consisted of anthraquinone-2-sulfonate (ATQ), glycerol (G), Cellulose-based Binder (CbB) extracted from banana stalk, and titanium dioxide (TiO_2). These were used as a colorant, a sacrificial electron donor, a binder and a light activator, respectively. The TiO_2 concentration was investigated in 3 levels which were 25, 50, and 100 pphr. The printing ink was prepared and tested for color transition monitored with UVA light (intensity of 2.5 mW.cm^{-2} and under O_2 -free condition). It was found that all types of ink were mixed homogeneously and colorlessly, and could properly print onto a substrate. When the color was exposed to test with the UVA light, the ink gradually changed from colorless to yellow, of which the color transition rate directly depended upon the TiO_2 concentration. The ink consisted of 100 pphr, TiO_2 appearing an initial rate (k_{in}) with a maximum total color difference (ΔE_{max}), and a time of 95% changed color (t_{95}) which was $0.9924 \Delta E.\text{min}^{-1}$, 35.85 and 3.97 ± 0.38 min, respectively. Moreover, the yellow color of the monitored ink after tested could change to light-green and red-brown shades when it was added with acid and base solution. However, this security ink could be recovered to its original color when it was exposed to oxygen and when it permeated through its protective layer material. It could, therefore, be re-monitored many times.

Keywords: Security Ink, UVA-monitored Ink, Cellulose-based Binder, Redox Dye, Security Printing

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ มีวิวัฒนาการรวดเร็วไปอย่างรวดเร็วและมีบทบาทสำคัญในการใช้ชีวิตเป็นอย่างมาก เทคโนโลยีที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วนี้ยังส่งผลในทางลบคือ เกิดการใช้เทคโนโลยีในการปลอมแปลงผลิตภัณฑ์หรือสินค้าที่มีมูลค่าสูง โดยทำให้ปลอมได้ง่าย รวดเร็ว และเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น [1] ซึ่งนับเป็นผลเสียต่อผู้บริโภคทั้งในด้านของคุณภาพและความปลอดภัย รวมไปถึงความเชื่อมั่นและความจงรักภักดีต่อสินค้า (Brand Royalty) ในระยะยาวได้

เทคโนโลยีกันการปลอมแปลงหรือเทคโนโลยีปลอดภัยคือ เทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการติดตามไปกับผลิตภัณฑ์และสินค้านั้น ซึ่งมักอยู่ในรูปของฉลากหรือหมึกพิมพ์ โดยวัสดุเหล่านั้นสามารถตรวจสอบได้ด้วยวิธีการพิเศษเพื่อพิสูจน์อัตลักษณ์หรือลักษณะบางประการที่แอบแฝงอยู่ เพื่อแสดงให้เห็นถึงความเป็นผลิตภัณฑ์จริงหรือความสมบูรณ์ในคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นๆ [2] ปัจจุบันสามารถพบเจอได้ทั่วไปในผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า เช่น การเรืองแสงของเส้นใยขนาดเล็กในกระดาษธนบัตรไทย ตัวอักษรระดับไมโครเมตรที่ตรวจสอบได้ด้วยแว่นกำลังขยายสูงบนเช็คนาฬิกา และหมึกพิมพ์เปลี่ยนสีได้เมื่อเอียงส่องในมุมที่ต่างกัน [3]

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าวัสดุกันการปลอมแปลงที่ใช้ร่วมกับผลิตภัณฑ์และสินค้าต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมานั้น มักแสดงในรูปของหมึกพิมพ์ เนื่องจากสามารถพัฒนาได้ง่าย รวดเร็ว สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงกับผลิตภัณฑ์และสินค้าแทบทุกประเภท เทคโนโลยีหมึกพิมพ์ปลอดภัยในปัจจุบัน เช่น หมึกพิมพ์เปลี่ยนสีได้ด้วยอุณหภูมิ (Thermo-chromic Ink) หมึกพิมพ์เปลี่ยนสีได้ด้วยแก๊ส (Gas Indicator Ink) หมึกพิมพ์สีเรืองแสง (Fluorescence Ink) ที่มองเห็นภายใต้แสงยูวี และหมึกพิมพ์เปลี่ยนสีได้ด้วยการกระตุ้นด้วยแสง (Light-activated Ink)

Mills และ Wells [4] ได้พัฒนาหมึกพิมพ์ฐานน้ำที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงอัลตราไวโอเลตเอ (Ultraviolet A; UVA) ทำให้หมึกพิมพ์สามารถเปลี่ยนแปลงสีได้เมื่อตรวจสอบด้วยแสง UVA ที่พลังงานต่ำและภายใต้สภาวะปลอดภัยสอออกซิเจน โดยอาศัยหลักการที่สารกึ่งตัวนำ

(Semiconductor; SC) ที่มีช่วงแถบอิเล็กทรอนิกส์ (Electron Bandgap; E_{bg}) เท่ากับขอบเขตการดูดซับคลื่นแสง UVA จึงสามารถดูดซับพลังงานในช่วงคลื่นแสง UVA และทำให้เกิดการกระตุ้นระดับพลังงานภายใน SC ได้ ดังนั้น เมื่อหมึกพิมพ์ได้รับพลังงานแสง ($h\nu \geq E_{bg}$) ส่งผลให้ SC เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ (Valance Band; VB) ไปยังตำแหน่งแถบคอนดักทีฟ (Conductive Band) และเกิดหลุมอิเล็กทรอนิกส์ โดยกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าวทำหน้าที่รับและส่งอิเล็กตรอนจากสารให้อิเล็กตรอน (Sacrificial Electron Donor; SED) อย่างต่อเนื่องไปยังสีย้อม ส่งผลให้สีย้อมเปลี่ยนรูปจากรูปออกซิไดส์ (Oxidized Form; D_{ox}) ไปเป็นรูปรีดิวส์ (Reduced Form; D_{red}) และเกิดการเปลี่ยนแปลงสีปรากฏให้เห็นได้ โดยสีในรูป D_{red} ดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปกลับทันทีเมื่อหยุดการฉายแสง อย่างไรก็ตาม งานวิจัยดังกล่าว ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในงานเทคโนโลยีการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ (Intelligent Packaging Technology) และเป็นกรณีของหมึกพิมพ์เหลวฐานน้ำที่โดยมุ่งเน้นเพื่อการพิมพ์ด้วยการพิมพ์ที่เหมาะสม [5] เช่น เฟล็กโซกราฟี (Flexography) กราวิัวร์ (Gravure) หรืออิงค์เจท (Inkjet)

ที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านพยายามศึกษา และพัฒนาการใช้วัสดุที่สกัดจากธรรมชาติมาประยุกต์ใช้เป็นสารให้สี (Colorant) ในหมึกพิมพ์ที่เปลี่ยนสีได้ หรืออาจเรียกว่าตัวชี้วัด (Indicator) ในด้านเทคโนโลยีการบรรจุแบบอินเทลลิเจนท์ เช่น ตัวชี้วัดการเน่าเสียของอาหาร (Food Spoilage Indicator; FSI) [6] และตัวชี้วัดการสุกของผลไม้ (Ripeness Indicator; RI) [7] นอกจากนี้ยังพบว่า ไม่เคยมีผลงานใดที่ใช้สารสกัดได้จากธรรมชาติ โดยเฉพาะเยื่อจากต้นกล้วย (*Musa paradisiaca*) ที่เมื่อผ่านกระบวนการบดลดขนาดแล้ว จะมีความชื้นและหนืดสูง และสามารถยึดติดกับวัสดุฐานเซลลูโลสได้ดี (จากการทดลองเบื้องต้นในห้องปฏิบัติการ) มาประยุกต์ใช้ในรูปแบบของสารยึด (Binder) หรือสารสร้างฟิล์ม (Film Former) มาก่อน งานวิจัยเรื่องนี้ จึงมุ่งพัฒนาหมึกพิมพ์ปลอดภัยที่ใช้สีย้อมรีดอกซ์ร่วมกับสารกึ่งตัวนำ และสารให้อิเล็กตรอน เพื่อให้หมึกพิมพ์แสดงสีในลักษณะซ่อนเร้น (ไม่มีสีสิ้น) ในขณะที่ใช้งานปกติได้ และสามารถ

ตรวจสอบได้ด้วยแสง UVA พลังงานต่ำ ร่วมกับการใช้สารยึดฐานเซลลูโลสที่สกัดได้จากกากกล้วยน้ำว้า เพื่อปรับความหนืดให้เหมาะสมกับระบบพิมพ์เชิงพาณิชย์บางประเภท และเป็นการสร้างความซับซ้อนในกระบวนการกันการปลอมแปลง จากการผสมผสานเทคโนโลยีทางวัสดุเชิงประกอบฐานเซลลูโลส (Cellulose-based, Composite Material) ซึ่งผลการศึกษา จะแสดงให้เห็นความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ปลอดปลอมและความเป็นไปได้ในการใช้เซลลูโลสจากธรรมชาติมาเป็นสารยึด รวมไปถึงเป็นแนวทางในการพัฒนาหมึกพิมพ์ปลอดปลอมที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ อันจะนำไปสู่การพัฒนาใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ และเกิดประสิทธิผลในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมเยื่อกากกล้วยน้ำว้า

นำกากกล้วยน้ำว้าสด (*Musa paradisiaca*) อายุประมาณ 6–12 เดือน ตัดส่วนที่เน่าเสียและขึ้นราออกให้หมด จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง หรือจนกระทั่งสะอาดทั่วถึง นำมาหั่นเป็นชิ้นสี่เหลี่ยม ก่อนนำไปอบด้วยตู้อบชนิดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 12–36 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นลดขนาดและกรองด้วยตะแกรงร่อน (Sieve) ขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อแยกเอาขนาดเล็กไปใช้ในการเตรียมเยื่อ ซึ่งเตรียมโดยประยุกต์วิธีการจาก Sibaly และ Jeetah [8] โดยการแช่ผงกากกล้วยต่อสารละลาย 10%wt, NaOH ในอัตราส่วน 1 : 10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อด้วยการอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำเยื่อที่ได้มาล้างทำความสะอาด ก่อนจะนำไปฟอกด้วยสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 4.0%wt เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และล้างให้สะอาดด้วยน้ำอีกครั้งเป็นลำดับสุดท้าย

2.2 การเตรียมสารยึดฐานเซลลูโลสจากเยื่อกากกล้วยน้ำว้า

ลดขนาดเยื่อกากกล้วยไมโครเซลลูโลสด้วยการปั่นเฉือน โดยการผสมกับน้ำกลั่นและลูกแก้วขนาด 2.0 มิลลิเมตร

ในอัตราส่วนเยื่อแห้ง 1 ส่วน ต่อน้ำกลั่น 15 ส่วน ต่อลูกแก้ว 50 ส่วนโดยน้ำหนัก จากนั้นนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบใบพัดสี่แฉก (4-bladed Stainless Steel Propeller Homogenizer, Yellow Line OST 20 Digital, German) ที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อครบเวลา นำมาปรับความข้นเหลวด้วยการเติมเมทิลเซลลูโลส (Methylcellulose, MC, Methocel®, Dow Chemical, USA) 10%wt ของปริมาณทั้งหมด ปั่นจนผสมต่อด้วยความเร็ว 80 รอบต่อนาที จนของผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (ประมาณ 30 นาที) จากนั้นนำออกมาปิดภาชนะด้วยแผ่นพาราฟิน และเก็บในตู้แช่เย็นเป็นเวลา 12–24 ชั่วโมง เพื่อลดฟองอากาศ ก่อนการใช้งาน จะได้สารยึดฐานเซลลูโลส (Cellulose-based Binder; CbB) ที่สามารถเก็บไว้ใช้งานได้ประมาณ 3 เดือน

2.3 การเตรียมหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

ในการศึกษาครั้งนี้ ได้พัฒนาหมึกพิมพ์โดยมีองค์ประกอบของหมึกพิมพ์ดังนี้ ใช้สารกึ่งตัวนำ (Semi-Conductor; SC) ชนิด Titanium(IV) Oxide (TiO_2 , Anatase) < 25 nm Particle Size, 99.7% Trace Metals Basis, Aldrich®, USA) ทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ร่วมกับสารให้อิเล็กตรอน (Sacrificial Electron Donor; SED), Glycerol ($C_3H_8O_3$), ACS Reagent \geq 99.5%, Sigma-Aldrich, USA) และสีย้อมรีดอกซ์ (Redox Dye) ที่เป็นอนุพันธ์ของแอนทราควิโนน (anthraquinone-2-sulfonate, ATQ, $C_{14}H_7NaO_5S$, 98%, Cas.No.131-80-8, Sigma-Aldrich, USA) และใช้สารยึดฐานเซลลูโลสจากกากกล้วยน้ำว้า (CbB) เป็นสารยึดในหมึกพิมพ์ โดยในการทดลองได้เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ TiO_2 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงสี ดังนี้

การเตรียมหมึกพิมพ์สามารถทำได้โดยผสม TiO_2 , G และ ATQ ตามสัดส่วนในตารางที่ 1 จากนั้นกวนผสมด้วยเครื่องกวนระบบแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 10 นาที ต่อด้วยการแช่ในอ่างอัลตราโซนิกส์ (500 W; Ultrasonic Bath) อีก 10 นาที เพื่อให้อนุภาคของ TiO_2 แยกตัวและลดขนาดลง เมื่อครบเวลาจึงเติมด้วย CbB ตามสัดส่วน และกวนต่อด้วยเครื่องกวนระบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความเร็วประมาณ 60–120 รอบต่อนาที

อีก 15 นาที โดยวิธีการดังกล่าว ดัดแปลงจากสุรชัย [9]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

องค์ประกอบ	Concentration (pphr)
(1) Redox Dye: Anthraquinone-2-sulfonate (ATQ)	25
(2) Semiconductor: Titanium Dioxide (TiO ₂)	25, 50, 100
(3) Sacrificial Electron Donor; Glycerol (G)	100
(4) Encapsulated Polymer; Cellulose-based binder (CbB)	100

2.4 การพิมพ์หมึกพิมพ์ปลอดปลอมฐานเซลลูโลส

หมึกพิมพ์ปลอดปลอมในการศึกษานี้ เป็นหมึกพิมพ์ชั้นเหนียว (Paste Ink) ที่มีความหนืดและความเหนียวสูง (ประมาณ 1,000–10,000 มิลลิปาสคาลต่อวินาที [1]) โดยทั่วไปแล้วหมึกพิมพ์ลักษณะนี้เหมาะสำหรับการพิมพ์ด้วยระบบที่มีความเร็วในการพิมพ์ไม่สูงนักและมีระบบการพิมพ์ไม่ซับซ้อน เช่น การพิมพ์ออฟเซต (Offset Printing) เลเตอร์เพรสส์ (Letter Press Printing) และสกรีน (Screen Printing) อย่างไรก็ตาม หมึกพิมพ์ที่พัฒนาขึ้นยังอยู่ในระดับห้องทดลองในการวิจัยนี้จึงใช้วิธีการปฐพี ซึ่ง เป็นวิธีในการเทียบสีหมึกพิมพ์ตัวอย่างก่อนการใช้งาน โดยใช้วิธีการลาดปาดอย่างง่าย หรือ “Draw Down Test” ด้วยเครื่องลาดเคลือบที่กำหนดความหนาชั้นฟิล์มเมื่อเปียกได้ 4 ระดับ (4-side Film Applicator, ASTM D 823, BYK-Gardner, Germany) โดยควบคุมความหนาชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์เมื่อเปียกที่ 90 ไมโครเมตร ลงบนแผ่นกระจกสไลด์ จากนั้นทิ้งให้แห้งในอุณหภูมิห้อง เมื่อแห้งแล้วนำมาปิดเคลือบด้วยเทปกาวใส (3M Scotch®, Tear Tape 8626) เพื่อสร้างสภาวะปลอดแก๊สออกซิเจน เก็บในที่มืดและแห้งตลอดเวลาก่อนการใช้งาน

2.5 การวิเคราะห์ค่าสีและการดูดกลืนแสงสีของหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

เตรียมตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่ปาดเคลือบลงบนแผ่น

กระจก มาวางในตำแหน่งวางตัวอย่างของเครื่องวัดค่าสีและค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer, CM-3700A, Konica Minolta, Japan) จากนั้นวัดค่าสีในหมวด L, a และ b และค่าการดูดกลืนแสงในช่วงที่ตามองเห็น (Visible Light, 340–760 นาโนเมตร)

2.6 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ฐานเซลลูโลส

2.6.1 การตรวจสอบด้วยแสง โดยใช้ตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่เตรียมจากข้อ 2.4 นำมาฉายแสงภายใต้แสงอัลตราไวโอเลตเอ (Ultraviolet A, UVA, 2 × 8 W 368 nm Narrow Band Black-light Blue Tubes) ควบคุมความเข้มแสงที่ 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ทำการบันทึกค่าสีในโหมด L, a และ b ทั้งก่อน (L₁, a₁, b₁) และหลัง (L₂, a₂, b₂) จากฉายแสงทุกระยะ (5–30 วินาที) จนกว่าหมึกพิมพ์จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสีหรือจนกว่าค่าความแตกต่างสีของหมึกพิมพ์ (ΔE หรือ Total Color Difference; TCD) จะเข้าสู่ระยะคงที่ โดยค่าความแตกต่างสีของหมึกพิมพ์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) ต่อไปนี้

$$\Delta E \text{ or } TCD = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (1)$$

โดย L หมายถึง ค่าความสว่างสี a หมายถึง ค่าความเป็นสีแดง (+a) และความเป็นสีเขียว (-a) และ b หมายถึง ค่าความเป็นสีเหลือง (+b) และความเป็นสีน้ำเงิน (-b)

2.6.2 การตรวจสอบการเปลี่ยนสีกลับ ในกรณีหมึกพิมพ์ถูกตรวจสอบด้วยแสง UVA จนสีเปลี่ยนจากสีเริ่มต้นไปเป็นสีที่สองแล้ว ตามกลไกการทำงานของหมึกพิมพ์ชนิดใช้สารกึ่งตัวนำที่กระตุ้นได้ด้วยแสง (Photoactivated-based Ink) เมื่อหยุดการฉายแสง หมึกพิมพ์จะเปลี่ยนสีกลับด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) กับแก๊สออกซิเจน [10] ดังนั้น ในการทดลองนี้จึงตรวจสอบการเปลี่ยนสีกลับ โดยการปล่อยตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่ฉายแสง UVA แล้ว เปลี่ยนสีกลับภายใต้สภาวะห้องทดลอง (O₂ ~20.9%, 60%RH และ 25 องศาเซลเซียส) จากนั้นบันทึกผลค่าสี L, a, b และคำนวณ

ค่า ΔE ดังสมการที่ (1) และบันทึกเวลาที่ค่า $\Delta E \leq 2.0$ ซึ่งเป็นระดับที่ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างสีได้ด้วยตา [11]

2.7 การศึกษาผลของสารละลายกรด-ด่างต่อสีของหมึกพิมพ์

โดยทั่วไปสีย้อมมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงสีได้ในสถานะที่เป็นต่าง มากกว่าในสถานะที่เป็นกรด อันเนื่องมาจากจากการรับส่งคู่อิเล็กตรอน (Electron Pair) ในขณะที่เป็นสารละลายของสีย้อมนั้น [12] ในงานวิจัยนี้จึงพิสูจน์สมบัติของหมึกพิมพ์ปลอดปลอมที่มีปริมาณสารละลายกรดต่างกัน 2 ระดับ โดยการเติมสารละลาย 0.1 โมล HCl 300 และ 500 ไมโครลิตร ต่อหมึกพิมพ์ปริมาตร 12 มิลลิตร และด้วยสารละลายต่างต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.1 โมล NaOH 100, 300 และ 500 ไมโครลิตร ต่อหมึกพิมพ์ปริมาตร 12 มิลลิตร โดยเตรียมหมึกพิมพ์ตามขั้นตอนที่ 2.2 จากนั้นเติมสารละลายกรด-ด่างในปริมาณที่กำหนด และผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า 10-15 นาที

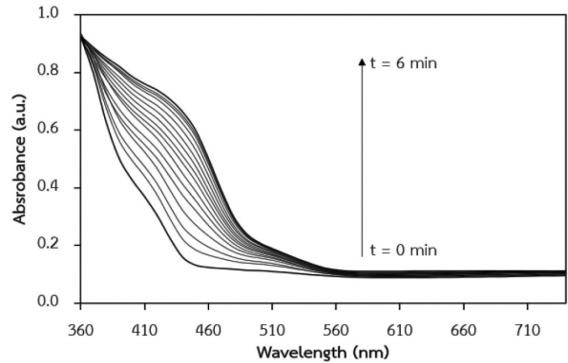
2.8 การวิเคราะห์สภาพผิวหน้าชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

การวิเคราะห์ผิวหน้าชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์เพื่อศึกษาลักษณะปรากฏของหมึกพิมพ์ที่อาจมีผลมาจากสารยึดฐานเซลลูโลส (CbB) โดยการเตรียมตัวอย่างหมึกพิมพ์บนแผ่นกระจกปิดสไลด์ด้วยการเคลือบทองคำที่ความหนา 30 Å จากนั้นวิเคราะห์ด้วยเครื่องกราดอิเล็กตรอนกำลังขยายสูง (Scanning Electron Microscope, SEM, JEOL®, JSM 7800F, Japan) ที่ความถี่ 15 กิโลโวลต์

3. ผลการทดลอง

3.1 ค่าสีและการดูดกลืนแสงสีและการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

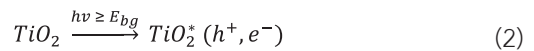
หมึกพิมพ์ปลอดปลอมที่ตรวจสอบได้ด้วยแสง UVA ฐานสารยึดนาโนเซลลูโลสที่พัฒนาขึ้นอยู่ในรูปไม่มีสี (Dox) หรือรูปออกไซด์ โดยจะพบว่า ค่าการดูดกลืนแสง (Light Absorbance; Abs) ของหมึกพิมพ์ก่อนการฉายแสงไม่แสดงตำแหน่งนัยสำคัญใดๆ ในขณะที่หมึกพิมพ์ได้รับการกระตุ้นด้วยแสง UVA ที่ความเข้มแสง 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 1 การดูดกลืนแสงของหมึกพิมพ์ปลอดปลอมที่ถูกตรวจสอบด้วยแสง UVA (2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

ภายใต้สภาวะปลอดแก๊สออกซิเจน ค่าการดูดกลืนแสงจะปรากฏขึ้นและแสดงจุดเปรียบต่างสูงสุด (ΔAbs) ณ ตำแหน่ง 440 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงแถบความยาวคลื่นแสงสีม่วงน้ำเงิน [13] ที่วัสดุสีเหลืองสามารถดูดกลืนได้ในขณะเดียวกันหมึกพิมพ์จะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงสีจากไม่มีสีเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ผลแสดงดังรูปที่ 1

จากผลดังกล่าว สามารถอธิบายตามหลักการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (TiO_2) สารให้อิเล็กตรอน (G) และสารให้สี (ATQ) และได้ดังสมการต่อไปนี้



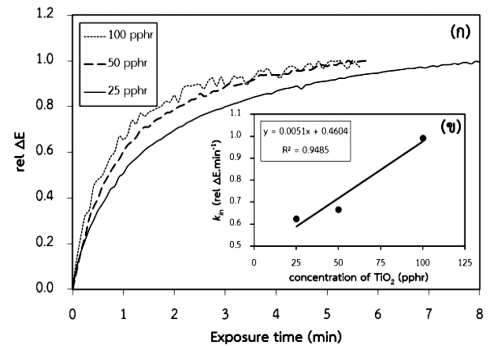
จากสมการที่ (2)-(4) จะเห็นได้ชัดเจนว่า หมึกพิมพ์ปลอดปลอมที่พัฒนาขึ้นนี้ จะสามารถตรวจสอบได้เมื่ออยู่ภายใต้แสง UVA เท่านั้น โดยจะแสดงลักษณะเป็นสีเหลืองเมื่อ ATQ_{ox} ให้อิเล็กตรอนอย่างสมบูรณ์ในสภาวะปลอดแก๊สออกซิเจนและเปลี่ยนรูปเป็น ATQ_{red} ดังสมการที่ (4) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [4], [10] โดยได้อธิบายว่า กลไก

จะเกิดขึ้นได้ต้องมีองค์ประกอบครบถ้วนเท่านั้น ดังนั้น ในการใช้งานเริ่มต้นหมึกพิมพ์จะไม่ปรากฏสีใดๆ เสมือนอยู่ในลักษณะที่ซ่อนเร้นจากผู้บริโภคทั่วไป แต่จะสามารถตรวจสอบและประเมินคุณภาพความแท้จริงของสินค้าได้ เมื่อใช้แสง UVA ซึ่งควรเป็นผู้ที่มีความรู้หรือมีความเกี่ยวข้องโดยตรง นอกจากนั้น กลไกยังสามารถดำเนินซ้ำได้หลายครั้งโดยอิเล็กตรอนจากสารให้อิเล็กตรอนในปริมาณที่ต่ำมากๆ อย่างไรก็ตาม การใช้งานไม่จำเป็นต้องพิมพ์ลวดลายที่มีขนาดใหญ่ อาจเป็นเพียงสัญลักษณ์ขนาดเล็กและรับรู้เพียงกลุ่มผู้ที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

3.2 ผลของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่อเวลาในการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

จากการทดลองตรวจสอบหมึกพิมพ์ปลอดปลอมด้วยแสง UVA ที่ความเข้มแสง 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะปลอดแก๊สออกซิเจนและบันทึกการเปลี่ยนแปลงสีอย่างต่อเนื่องพบว่า ค่าความแตกต่างสี ΔE หรือ TCD มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงแรก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองอย่างรวดเร็วของหมึกพิมพ์ต่อแสง UVA ทั้งนี้ เกิดจากช่วงแถบอิเล็กตรอนของ TiO_2 (Anatase) ที่มีค่าเท่ากับ 3.24 อิเล็กตรอนโวลต์ หรือมีขอบเขตการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 387 นาโนเมตร ซึ่งหมายถึงความยาวคลื่นแสงที่ใกล้เคียงหรือต่ำกว่า จะสามารถกระตุ้นการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายใน TiO_2 ได้ [4] ส่งผลให้หมึกพิมพ์ตอบสนองและเกิดการเปลี่ยนแปลงสีอย่างรวดเร็ว

นอกจากนั้นยังพบว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และเข้าสู่ระยะคงที่อย่างช้าๆ เมื่อพิจารณาอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงสีเริ่มต้น (k_m) จะพบว่า หมึกพิมพ์มีอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงสีเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารกึ่งตัวนำ สอดคล้องกับงานวิจัยของสุรัชย์และคณะ [5] อธิบายกลไกการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์เหลวฐานน้ำชนิดใช้สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงและสีย้อม RBBR (Remazol Brilliant Blue R) ว่า ความเข้มข้นของสารกึ่งตัวนำและสารให้อิเล็กตรอนส่งผลต่อความเร็วในการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ที่ใช้ความเข้มข้นของสารให้สีคงที่ ผลแสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 2



รูปที่ 2 ค่าสัมบูรณ์ของความแตกต่างสีรวมของหมึกพิมพ์ (rel. ΔE) (n) และค่าอัตราเร็วเริ่มต้นของความแตกต่างสีรวม (k_m) ของหมึกพิมพ์ที่มีสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่างกัน (ข)

ตารางที่ 2 สรุปผลการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ที่ใช้สารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงต่างกัน

ผล		ความเข้มข้นของสารเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (TiO_2) (pphr)		
		25	50	100
ค่าสีและค่าความแตกต่างสูงสุด	L^*	78.40	86.80	87.27
	a^*	-4.36	-9.55	-6.85
	b^*	40.43	40.43	43.33
	ΔE_{\max}	32.48 ± 0.07	34.85 ± 0.06	35.85 ± 0.48
t_{95} (นาทิจ)	6.00 ± 0.20	4.42 ± 0.47	3.97 ± 0.38	
k_m ($\Delta E \cdot \text{min}^{-1}$)	0.6237	0.6658	0.9924	
R^2	0.9019	0.9056	0.9017	

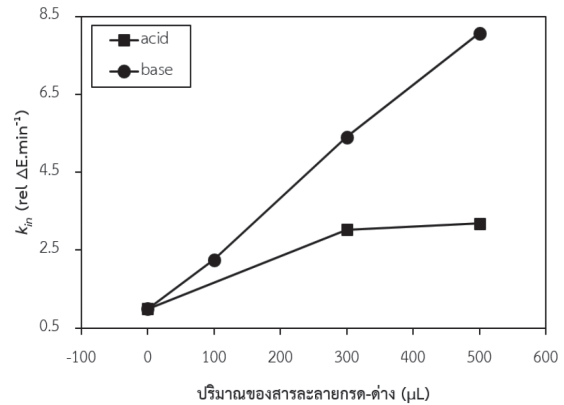
นอกจากนั้น เมื่อพิจารณาค่า ΔE_{\max} ของหมึกพิมพ์ (ตารางที่ 2) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารกึ่งตัวนำทั้งสามระดับ ยังพบว่า มีค่าสูงจนสามารถแยกแยะความแตกต่างจากสีตั้งต้นได้อย่างชัดเจน อ้างอิงจากการประเมินค่า ΔE [11] ในขณะที่เมื่อพิจารณาเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ไปแล้ว 95% (t_{95}) จะพบว่า มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องขึ้นอยู่กับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของสารกึ่งตัวนำ สอดคล้องกับค่า k_m ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้านี้



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์และเฉดสีของหมึกพิมพ์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับสารละลายกรด-ด่าง (ตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่ประกอบด้วย $\text{ATQ}/\text{TiO}_2/\text{G}/\text{CbB} = 25/100/100/100$ ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารย้อม)

3.3 ผลของสารละลายกรด-ด่างต่อสีที่ปรากฏของหมึกพิมพ์ปลอดภัย

จากผลข้อที่ 3.1 ได้อธิบายถึงหมึกพิมพ์ปลอดภัยปลอดภัย ในงานวิจัยนี้ จะมีลักษณะไม่มีสีในขณะเริ่มต้น และจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสีเหลืองเมื่อถูกตรวจสอบด้วยแสง UVA อย่างไรก็ตาม สีเหลืองเป็นสีกลุ่มสว่างที่มองเห็นได้ยาก งานวิจัยนี้จึงศึกษาและพัฒนาเฉดสีต่างๆ ด้วยการผสมสารละลายกรด-ด่าง ซึ่งพบว่า เมื่อหมึกพิมพ์ถูกผสมด้วยสารละลายกรด-ด่างแล้ว หมึกพิมพ์มีลักษณะคงเดิม คือยังคงมีความหนืดสูงและมีสีขาวขุ่น มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์ (จากการสังเกตด้วยตาเปล่า) และสามารถพิมพ์เคลือบลงบนแผ่นกระดาษและทำแห้งได้เช่นเดียวกับหมึกพิมพ์ก่อนการปรับ อย่างไรก็ตาม หลังจากหมึกพิมพ์ถูกตรวจสอบด้วยการฉายแสง UVA ที่ความเข้มแสง 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตาราง



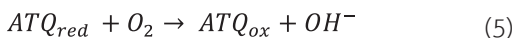
รูปที่ 4 อัตราเร็วเริ่มต้น (k_{in}) ของหมึกพิมพ์ที่ถูกผสมด้วยสารละลายกรด 0.1M HCl และสารละลายด่าง 0.1M NaOH ในปริมาณต่างกัน

เซนติเมตร ภายใต้สภาวะปลอดภัยออกซิเจน พบว่า หมึกพิมพ์ที่ได้รับสารละลายกรดค่อยๆ เปลี่ยนแปลงสีจากไม่มีสีไปเป็นสีเขียวอ่อน (Light Green) อย่างช้าๆ ในขณะที่หมึกพิมพ์ที่ได้รับสารละลายด่าง จะค่อยๆ เปลี่ยนสีไปเป็นสีแดงอมน้ำตาล (Red-brown) ดังรูปที่ 3 ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Galagan และ Su [14] ซึ่งพัฒนาหมึกพิมพ์จางหายได้ (Fadable Ink) สำหรับการพิมพ์ระบบสกรีน โดยใช้สีย้อมโซเดียมแอนทราควิโนน เบตา ซัลโฟเนต (Sodium Anthraquinone β -sulfonate) และปรับลดรูปสีย้อม (D_{red}) ก่อนด้วยสารละลายด่างจนได้หมึกพิมพ์ที่มีสีแดงเข้ม จากนั้นเมื่อใช้งานสีสันของหมึกพิมพ์จะค่อยๆ จางหายไปจนกลายเป็นสีน้ำตาลอ่อน (Beige)

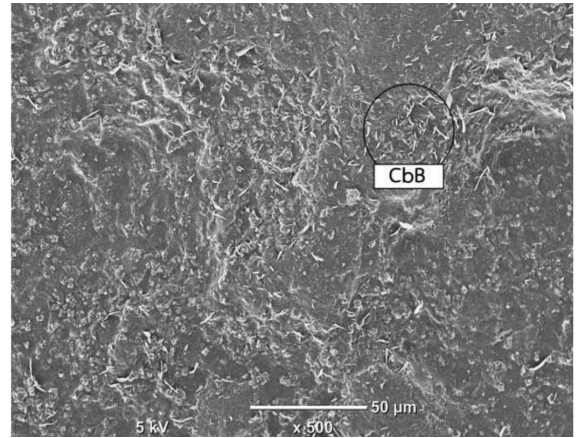
นอกจากหมึกพิมพ์ในงานวิจัยนี้จะสามารถเปลี่ยนเฉดสีได้เมื่อได้รับสารละลายกรด-ด่างแล้ว จากผลค่าการเปลี่ยนแปลงสีรวม (TCD) ยังพบว่า อัตราเร็วเริ่มต้นของค่าสัมบูรณ์การเปลี่ยนแปลงสีรวม (k_{in}) ของหมึกพิมพ์ที่ได้รับกรด-ด่างมีค่าเพิ่มขึ้นแปรผันตามปริมาณของสารละลายกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงในหมึกพิมพ์ชนิดที่ได้รับการผสมด้วยสารละลายด่าง และมีค่าสูงกว่าหมึกพิมพ์ที่ได้รับการผสมด้วยสารละลายกรด ผลดังรูปที่ 4

3.4 การเปลี่ยนสีกลับของหมึกพิมพ์

หมึกพิมพ์ปลอดปลอมที่พัฒนาขึ้นสามารถผันสีกลับได้ (Color Recovery) โดยการเปลี่ยนรูปจากรูปรีดิวส์ (D_{red} Form) ผันกลับมาเป็นรูปออกซิไดส์ (D_{ox} Form) จากการทดลองพบว่า หมึกพิมพ์ที่ประกอบด้วย ATQ/TiO₂/G/CbB เท่ากับ 25/100/100/100 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึด และตรวจสอบด้วยแสง UVA ที่ความเข้มแสง 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เปลี่ยนสีจนสมบูรณ์ แล้ว (ΔE_{max}) หมึกพิมพ์จะสามารถเปลี่ยนสีจากสีเหลืองกลับมาเป็นไม่มีสี หรือ $\Delta E \leq 2.00$ หน่วย [11] ได้อีกครั้งภายในเวลาเฉลี่ย 48.58 ± 5.27 นาที (48 นาที 35 วินาที) ภายใต้สภาวะห้องทดลอง ($O_2 \sim 20.9\%$, 60 %RH และ 25 องศาเซลเซียส) ซึ่งแสดงถึงความแตกต่างสีน้อยมาก โดยผลเป็นไปตามหลักการผันสีกลับของหมึกพิมพ์ชนิดที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่ง Mills และ Wells [4] ได้อธิบายว่า สียอมที่อยู่ในรูป D_{red} จะคงตัวในสภาวะที่ปลอดแก๊สออกซิเจนเท่านั้น ดังนั้น เมื่อหยุดการตรวจสอบหมึกพิมพ์ด้วยแสง UVA หมึกพิมพ์คงตัวในระยะสั้นมาก และเมื่อมีแก๊สออกซิเจนเข้าไปสัมผัส หมึกพิมพ์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) กับโมเลกุลของออกซิเจน และเปลี่ยนรูปจากรูป D_{red} ไปเป็น D_{ox} อีกครั้ง นอกจากนี้ งานวิจัยของ Mills และ Hazafy [10] ยังได้อธิบายกลไกดังกล่าว และสามารถปรับใช้กับกลไกของหมึกพิมพ์ปลอดปลอมชนิดนี้ได้ดังสมการที่ (5)



นอกจากนั้น Lewrie และคณะ [15] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของสียอมรีดิวส์และพบว่า อัตราเร็วในการผันสีกลับของหมึกพิมพ์ขึ้นกับความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจนโดยตรง ดังนั้น หมึกพิมพ์จึงสามารถควบคุมเวลาในการผันสีกลับได้ด้วยการใช้วัสดุปิดผนึกที่มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate; OTR) แตกต่างกันได้ เช่น พลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เป็นเส้นตรง (Low Density Polyethylene; LDPE) เป็นวัสดุที่มีค่า OTR สูง



รูปที่ 5 ลักษณะสภาพผิวหน้าชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ขณะแห้ง (ตัวอย่างหมึกพิมพ์ที่ประกอบด้วย ATQ/TiO₂/G/CbB = 25/100/100/100 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึด)

(~ 6500–8500 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อวัน) หากนำมาใช้เป็นวัสดุเคลือบหมึกพิมพ์จะสามารถยอมให้แก๊สออกซิเจนผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยากับหมึกพิมพ์ได้ง่าย และทำให้ใช้เวลาในการผันสีกลับเร็วกว่าการใช้ฟิล์มพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Poly-Ethylene; HDPE) ที่มีค่า OTR ต่ำกว่า (~1600-2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อวัน) [9]

3.5 ลักษณะของผิวหน้าชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ปลอดปลอม

ผลการวิเคราะห์ลักษณะผิวหน้าของชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ปลอดปลอมฐานสารยึดนาโนเซลลูโลสขณะแห้งด้วย SEM พบว่า เมื่อตรวจสอบที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์มีผิวขรุขระอย่างเห็นได้ชัด ความขรุขระที่พบประกอบด้วยผลึกขนาดเล็กปรากฏโดยทั่ว ซึ่งอาจเกิดจากผลึก TiO₂ ที่มีขนาดระดับไมโครเมตรกระจายโดยทั่ว นอกจากนั้นยังสังเกตเห็นโครงสร้างผลึกบางชนิดมีลักษณะเรียวยาวที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากเยื่อกากกล้วยที่ถูกบดลดขนาดลงและผสมในหมึกพิมพ์เพื่อทำหน้าที่เป็นสารยึด (CbB)

จากรูปที่ 5 ยังพบว่า CbB ที่นำมาใช้มีแนวโน้มเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกับองค์ประกอบอื่นๆ ของหมึกพิมพ์ชนิดนี้



ในลักษณะของวัสดุเชิงประกอบฐานเซลลูโลส อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ศึกษาขนาดและเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย (CbB) อันอาจมีผลต่อการนำมาใช้งานรวมถึงสมบัติด้านความแข็งแรงเชิงโครงสร้างของชั้นฟิล์มหมึกพิมพ์ จากข้อสังเกต จึงมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาและศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อการพัฒนาที่สมบูรณ์ในอนาคตต่อไป

4. สรุป

หมึกพิมพ์ในงานวิจัยเรื่องนี้ได้พัฒนาหมึกพิมพ์ชนิดไม่มีสีที่สามารถตรวจสอบได้เมื่อได้รับแสง UVA และใช้สารยึดเซลลูโลสที่สกัดได้จากธรรมชาติ เพื่อการใช้งานในลักษณะของหมึกพิมพ์ปลอดภัยที่ตรวจสอบได้ด้วยแสง UVA สำหรับสิ่งพิมพ์มีมูลค่า โดยหมึกพิมพ์ดังกล่าวประกอบด้วยสีย้อมรีดอกซ์ (ATQ) ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง UVA (TiO_2) สารให้อิเล็กตรอน (G) และสารยึดฐานเซลลูโลสที่สกัดได้จากเยื่อจากต้นกล้วยน้ำว้า (CbB) และจากผลหมึกพิมพ์ปลอดภัยที่มีส่วนประกอบของ CbB มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันสมบูรณ์และไม่มีสีในขณะเริ่มต้น และสามารถเปลี่ยนสีเป็นสีเหลืองได้เมื่อตรวจสอบด้วยแสง UVA ที่ความเข้มแสง 2.5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะปลอดภัยโดยอัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงสีของหมึกพิมพ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของ TiO_2 โดยตรง ซึ่งในผลงานวิจัยนี้ที่ 100 ส่วนต่อหนึ่งร้อยส่วนสารยึดนั้นแสดงผลได้ดีที่สุด นอกจากนั้นยังพบว่า เติมน้ำของหมึกพิมพ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อเติมสารละลายกรด-ด่างในขณะเตรียม เพื่อการประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ ทั้งนี้ หมึกพิมพ์ที่ถูกต้องตรวจสอบแล้ว (มีสีเหลือง) จะสามารถผันสีกลับมาเป็นสีเดิม (ไม่มีสี) ได้อีกครั้งด้วยแก๊สออกซิเจน ผลของงานวิจัยเรื่องนี้ นับเป็นนวัตกรรมทางการพิมพ์และบรรจุภัณฑ์ที่สามารถสร้างความน่าเชื่อถือในด้านคุณภาพและความปลอดภัยให้แก่ผู้บริโภค รวมถึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในอนาคตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัย ประจำปี 2562 ประเภททุนพัฒนานวัตกรรม

และสิ่งประดิษฐ์ (สัญญาเลขที่ DRF 04046202) มทร.ธัญบุรี และงบประมาณรายได้ คณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มทร.ธัญบุรี ประจำปี 2563 ทั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์นวัตกรรมออกแบบและสื่อคอนเวอร์เจนท์ ศูนย์วิจัยสี สาขาวิชาเทคโนโลยีการพิมพ์ดิจิทัลและบรรจุภัณฑ์ และคณะเทคโนโลยีสื่อสารมวลชน มทร.ธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนวัสดุเครื่องมือ และเอื้อเฟื้อสถานที่ตลอดการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. M. Meruga, W. M. Cross, P. S. May, Q. Luu, G. A. Crawford, and J. J. Kellar, "Security printing of covert quick response codes using upcon-verting nanoparticle inks," *Nanotechnology*, vol. 23, no. 39, pp. 395201–395212, 2012 (in Thai).
- [2] T. Sribang and P. Sinloima, "The study of disappearing ink efficiency on paper different of thickness," *Suan Dusit Graduate School Academic Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 56–70, 2017 (in Thai).
- [3] Bank of Thailand. (2015). Counterfeit Banknote Suppression, Bangkok, Thailand. [Online]. Available: <https://www.bot.or.th/English/Banknotes/Pages/counterfeit.aspx>
- [4] A. Mills and N. Wells, "Reductive photo-catalysis and smart inks," *Chemical Society Reviews*, vol. 44, pp. 2849–2864, 2015.
- [5] S. Khankaew, A. Mills, D. Yusufu, N. Wells, S. Hodgen, W. Boonsupthip, and P. Suppakul, "Multi-functional anthraquinone-based sensors: UV, O_2 and time," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 238, pp. 76–82, 2017.
- [6] S. Mohammadalinejad, H. Almasi, and M. Moradi, "Immobilization of *Echium amoenum* anthocyanins into bacterial cellulose film: A novel colorimetric pH indicator for freshness/

- spoilage monitoring of shrimp,” *Food Control*, vol. 113, In press, 2020.
- [7] A. Niponsak, N. Laohakunjit, O. Kerdchoe-chuen, P. Wongsawadee, and A. Uthairatanakij, “Novel ripeness label based on starch/chitosan incorporated with pH dye for indicating eating quality of fresh-cut durian,” *Food Control*, vol. 107, In press, 2020.
- [8] S. Sibaly and P. Jeetah, “Production of paper from pineapple leaves,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 5, pp. 5978–5986, 2017.
- [9] S. Khankaew, “Nanocrystalline TiO₂, anthraquinone-based, UVA-activated, colorimetric oxygen indicator and printing applications,” Ph.D. dissertation, Department of Packaging and Materials, Faculty of Agro-industrial, Kasetsart University, 2017 (in Thai).
- [10] A. Mills and D. Hazafy, “A solvent-based intelligent ink for oxygen,” *Analyst*, vol. 133, no. 2, pp. 213–218, 2008.
- [11] Technical Introduction (2019, December). Delta E ≤ 2 Colour Accuracy, UK. [Online]. Available: https://www.viewsonic.com/uk/products/lcd/pdf/ti_delta_E.pdf
- [12] S. Khankaew, W. Boonsupthip, C. Pechyen, and P. Suppakul, “Screening of naturally-derived pH dyes from plant extract powders as colorimetric bio-indicator and possible application in intelligent packaging,” in *Proceeding of the 26th IAPRI Symposium on Packaging*, 2013, pp. 422–431.
- [13] M. Rakić and G. Pichler, “Comparison of visible and infrared spectrum of light sources,” *Optics Communications*, vol. 284, no. 121, pp. 2881–2885, 2011.
- [14] Y. Galagan and W.-F. Su, “Fadable ink for time-temperature control of food freshness,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 144, pp. 49–55, 2010.
- [15] K. Lawrie, A. Mills, and D. Hazafy “Simple inkjet-printed, UV-activated oxygen indicator,” *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 176, pp. 1154–1159, 2013.