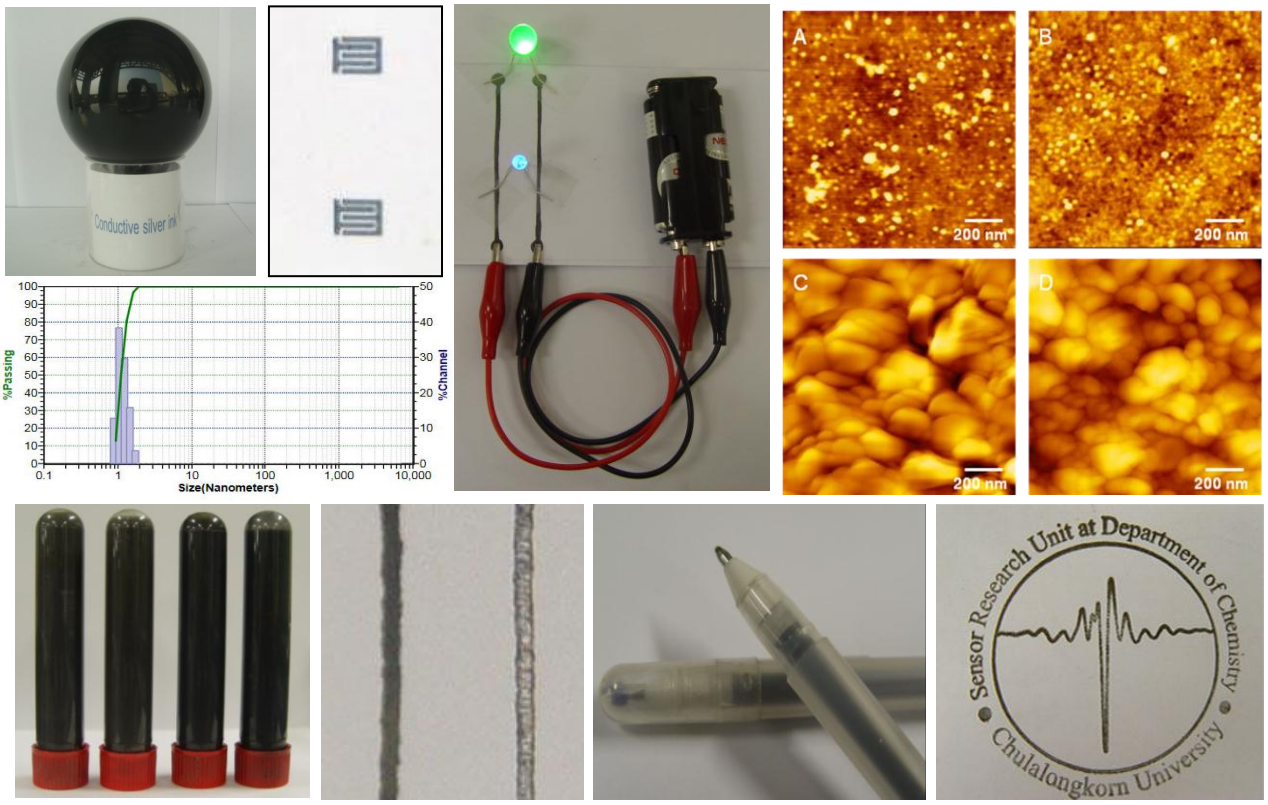
รายงานการวิจัย

การพัฒนาต้นแบบเชิงพาณิชย์ของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน

(Development of Commercial Prototype of Conductive Ink Made of Silver Nanoparticles)



นายชุติพันธ์ เลิศวชิรไพบูลย์

รองศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์

รองศาสตราจารย์ ชูชาติ ธรรมเจริญ

นางสาวชุติภรณ์ เลิศวชิไพบูลย์

ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยประเภทโครงการสร้างมูลค่าและคุณค่าเพิ่มแก่งานวิจัยและสิ่งประดิษฐ์
ที่มีเป้าหมายในการนำผลสำเร็จพัฒนาแปลงเป็นนวัตกรรมเชิงพาณิชย์
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
ประจำปีงบประมาณ 2552

ชื่อโครงการวิจัย **การพัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน**

คณะผู้วิจัย นายชุติพันธ์ เลิศวชิรไพบูลย์ นายสนอง เอกสิทธิ์ นายชูชาติ ธรรมเจริญ และนางสาวชุติภรณ์ เลิศวชิรไพบูลย์

ทุนอุดหนุนการวิจัยประเภท โครงการ 2-V Research Program
ประจำปีงบประมาณ 2552

บทคัดย่อ

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประสบความสำเร็จในการพัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์ทดแทนการนำเข้า นอกจากนั้นยังเป็นการกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาสินค้าใหม่ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีของคนไทยส่งผลให้ผู้ผลิตมีโอกาสเข้าถึงวัตถุดิบที่มีคุณภาพ ราคาถูก และสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติให้ตรงกับความต้องการของผู้ประกอบการได้

ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจำนวน 7 ต้นแบบ มีดังต่อไปนี้

1. ผงอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรไปผสมเป็นหมึกนำไฟฟ้า
2. อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรความเข้มข้นสูงเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า
3. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรเพื่อพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ drop-on-demand
4. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ
5. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่พิมพ์ด้วยวิธีสกรีน
6. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าแบบปากกา
7. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ silver paste

จากผลสำเร็จในการพัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน ได้มีบริษัทเอกชนของไทย นำไปใช้ทำวงจรอิเล็กทรอนิค และอยู่ในช่วงพัฒนาผลิตภัณฑ์เพื่อให้นำไปใช้ได้จริงผ่านกระบวนการส่งเสริมให้เกิดการใช้ผลผลิตจากการวิจัยและสิ่งประดิษฐ์

คำสำคัญ หมึกนำไฟฟ้า อนุภาคระดับนาโนของเงิน

Research Project **Development of Commercial Prototype of Conductive silver ink**

Research Team Chutiparn Lertvachirapaiboon, Sanong Ekgasit, Chuchaat Thammacharoen, Chutiporn Lertvachirapaiboon,

Type of Funding 2-V Research Program, 2009

Abstract

The Sensor Research Unit (SRU), Department of Chemistry, Faculty of Science, Chulalongkorn University has successfully developed a prototype of conductive ink made of silver nanoparticles. The conductive ink can be the commercial products for replacement of imported nanotechnology products. Since the nanoparticles have been made in Thailand, the cost is relatively low with the quality is as well as imported products. The prosperities of the conductive ink can be fine tuned and modify to fit the requirement of Thai industry. The accessibility to low cost with high quality raw materials would promote the development on novel products from Thailand.

The 7 commercial prototypes of conductive silver ink are

1. The silver powder for use as conductive silver ink
2. The high concentration silver nanoparticles for use as conductive silver ink
3. The prototype of conductive silver ink for drop-on-demand printing
4. The prototype of conductive silver ink for stamp printing
5. The prototype of conductive silver ink for screen print printing
6. The conductive silver pen
7. The prototype of silver paste

Due to the successful researches, Thai companies try to develop printing circuit board and Co-operatively research with us through the marketing process.

Keywords: Conductive ink, Silver nanoparticles

สรุปรายงานการวิจัย

คณะนักวิจัยประสบความสำเร็จในการพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์จำนวน 7 ต้นแบบ ดังต่อไปนี้

1. ผงอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรไปผสมเป็นหมึกนำไฟฟ้า
2. อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรความเข้มข้นสูงเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า
3. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ drop - on-demand
4. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ
5. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พิมพ์ด้วยวิธีสกรีน
6. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแบบปากกา สำหรับซ่อมแซมหรือเขียนวงจรไฟฟ้า
7. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ silver paste สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า

การถ่ายทอดเทคโนโลยีเป็นไปตามกระบวนการส่งเสริมให้เกิดการใช้ผลิตภัณฑ์ (marketing) จากการวิจัยและสิ่งประดิษฐ์ โดยการประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อต่าง ๆ ซึ่งได้รับผลตอบรับที่ดีจากผู้ประกอบการชาวไทย ผลจากการประชาสัมพันธ์คือ มีผู้ประกอบการที่สนใจได้นำหนึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินไปใช้เพื่อพิมพ์วงจรรับสัญญาณวิทยุ (RFID tag) ด้วยเทคนิค drop-on-demand ผลจากการทดลองเบื้องต้น คือวงจรรับสัญญาณที่พิมพ์ด้วยหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พัฒนาขึ้นโดยคณะผู้วิจัย มีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับผลิตภัณฑ์ที่ทางผู้ประกอบการซื้อตัวอย่างมาจากต่างประเทศ และมีความเป็นไปได้สูงที่ผู้ประกอบการจะทดสอบขยายกำลังการผลิตเพื่อดูความคุ้มทุนและทดสอบในส่วนของการควบคุมคุณภาพในการผลิตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ภายใต้โครงการ 2-V Research Program ประจำปี 2552 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่สละเวลาและตั้งใจอ่านรายงานผลการวิจัยโดยละเอียด พร้อมกับให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อคณะนักวิจัยในการปรับปรุงโครงการวิจัย ออกแบบและวางแผนการวิจัยที่มีประสิทธิภาพ รวมไปถึงแนวทางการนำเสนอผลการวิจัยและการวิจัยต่อเนื่อง ก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดแก่ผู้ที่สนใจที่จะนำผลการวิจัยไปศึกษาต่อยอด และ/หรือ เพื่อประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์

คณะนักวิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และ บุคลากรของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย การที่คณะนักวิจัยได้มีโอกาสทำวิจัยในโครงการที่มีศักยภาพเช่นนี้นับว่าเป็นประโยชน์อย่างมากต่อคณะนักวิจัยและทีมงาน ซึ่งนอกจากจะได้ความรู้และประสบการณ์จากการวิจัย การปรับเปลี่ยนทิศทางการวิจัยให้เหมาะสมกับการใช้งานจากการที่ได้พูดคุยและได้รับคำแนะนำจากภาคการผลิต คณะนักวิจัยยังได้มีโอกาสในการสร้างและพัฒนาบุคลากรรุ่นใหม่ด้านนาโนเทคโนโลยีอีกด้วย บุคลากรรุ่นใหม่นี้จะเป็นกำลังสำคัญของการพัฒนานาโนเทคโนโลยีของประเทศในอนาคต

คณะผู้วิจัย

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทคัดย่อ (ไทย)	i
บทคัดย่อ (อังกฤษ)	ii
สรุปรายงานการวิจัย	iii
กิตติกรรมประกาศ	iv
สารบัญเรื่อง	v
สารบัญรูป	vi
สารบัญตาราง	vii
สรุปผลการวิจัย	1
1. ชื่อโครงการวิจัย	1
2. คณะผู้วิจัย	1
3. ระยะเวลาการทำวิจัย	1
4. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
5. ความสำคัญและที่มา	2
6. วิธีดำเนินการวิจัย	11
7. ผลการวิจัย/ ข้อค้นพบ	12
7.1 บทนำ	12
7.2 วิธีการทดลอง	15
7.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	16
7.4 สรุป	19
8. ผลการดำเนินงานตามแผนการดำเนินการวิจัยที่ได้เสนอไว้กับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการ	20
9. การเผยแพร่ และการใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย	22
10. ข้อเสนอแนะ	27
11. ภาคผนวก	28
เอกสารแนบที่ 1: ข้อมูลเปรียบเทียบคุณสมบัติ และราคาของผลิตภัณฑ์หมึกนำไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์กับหมึกนำไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้นโดยหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้	
เอกสารแนบที่ 2: ผลงานวิจัยหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่นำเสนอในที่ประชุมทางวิชาการ งานนิทรรศการ และการสาธิตการใช้งาน	

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 A คือ ต้นแบบอนุภาคเงินแบบผงสำหรับผสมเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า, B คือ ต้นแบบ silver paste สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า, C คือ ต้นแบบปากกานำไฟฟ้า (conductive pen), D คือ หมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ (stamp printing), E คือ หมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยวิธีการสกีน (screen printing), F คือ หมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ชนิด drop-on-demand 12

รูปที่ 2 A คือ ต้นหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินพร้อมใช้, B คือ เส้นที่ถูกเขียนจากหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้กระดาษเป็นวัสดุรองรับ หลังจากขัดผิวหน้าด้วยโลหะผิวเรียบจะเห็นความแววววาวคล้ายโลหะเงิน, C คือ วงจรไฟฟ้าจากหมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยเทคนิค screen print 13

รูปที่ 3 แสดงวิธีการ purified อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร และติดตามการลดลงของบอเรตไอออน และ ไนเตรตไอออนด้วย FT-IR microspectroscopy 16

รูปที่ 4 TEM images ชองอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่นำมาใช้ในการทำหมึกนำไฟฟ้า 16

รูปที่ 5 AFM images แสดงขนาดของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินก่อน (A) และหลัง (B) การซินเทอร์ 17

รูปที่ 6 SEM images แสดงขนาดของอนุภาคระดับเงินหลังซินเทอร์แล้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ (A) อุณหภูมิห้อง (B)100 ^{o}C และ (C) 200 ^{o}C 17

รูปที่ 7 AFM images แสดงขนาดของอนุภาคเงิน และค่าความต้านทางเชิงพื้นผิวของฟิล์มเงินที่สถาวะต่าง ๆ 17

รูปที่ 8 หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand 22

รูปที่ 9 เครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand model-PH-41 MicroFab TECHNOLOGIES.Inc ใช้สำหรับพิมพ์หมึกลงบนวัสดุรองรับ สามารถนำมาประยุกต์ใช้พิมพ์หมึกนำไฟฟ้าได้ 25

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่ผลิตได้จากหน่วยปฏบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ 14
ตารางที่ 2 แสดงผลการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานวิจัย 20

สรุปผลการวิจัย
สำนักงานคณะกรรมวิจัยแห่งชาติ

1. **ชื่อผลงานประดิษฐ์คิดค้น**

ภาษาไทย การพัฒนาต้นแบบเชิงพาณิชย์ของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน

ภาษาอังกฤษ Development of Commercial Prototype of Conductive Ink Made of Silver Nanoparticles

2. **คณะผู้วิจัย**

2.1 นายชุติพันธ์ เลิศวชิรไพบูลย์

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0-2218-7585 โทรสาร 0-218-7585

E-mail: l_chutiparn@hotmail.com, Website: www.sru.research.chula.ac.th

2.2 นางสาวชุติภรณ์ เลิศวชิรไพบูลย์

ภาควิชาการจัดการ คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: p_alana@hotmail.com, Website: www.sru.research.chula.ac.th

2.3 รองศาสตราจารย์ ดร.สนอง เอกสิทธิ์

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0-2218-7585 โทรสาร 0-2254-1309

E-mail: sanong.e@chula.ac.th, Website: www.sru.research.chula.ac.th

2.4 รองศาสตราจารย์ ชูชาติ ธรรมเจริญ

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

254 ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 0-2218-7585 โทรสาร 0-2254-1309

E-mail: chuchaat.t@chula.ac.th, Website: www.sru.research.chula.ac.th

3. **ระยะเวลาทำการวิจัย** 1 ปี (วันที่ 18 กันยายน 2552 ถึง วันที่ 17 กันยายน 2553)

เริ่มทำการวิจัยเมื่อ 18 กันยายน 2552

4. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. พัฒนาต้นแบบอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูงเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน
2. สร้างและพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการพิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ (stamp printing) หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการพิมพ์ด้วยวิธีการสกรีน พริ้นติ้ง (screen printing) หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand และปากกานำไฟฟ้า (conductive pen)
3. แสดงต้นแบบผลิตภัณฑ์ให้กับผู้ประกอบการ บุคคลทั่วไป หรือผู้ที่สนใจ เพื่อกระตุ้นให้มีการนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์

5. ความสำคัญและที่มา

หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเป็นบทประยุกต์หนึ่งซึ่งได้จากการ แปรรูปอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง คุณสมบัติดีเด่นอย่างหนึ่งของโลหะเงิน คือ เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี หากความเข้มข้นของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินสูงพอ อนุภาคเงินจะสัมผัสกันและแสดงสมบัตินำไฟฟ้าหลังจากแห้งบนวัสดุรองรับ หรือหลังจากทำให้สารเคมีที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพ (stabilizer) ของอนุภาคเงินสลายตัว วิธีการสังเคราะห์หมึกนำไฟฟ้าสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการทางกล (physical method) และวิธีการทางเคมี (chemical method) การสังเคราะห์อนุภาคเงินด้วยวิธีการทางกล คือ การย่อยให้โลหะเงินให้อยู่ในระดับไมโครเมตร แล้วทำให้โลหะเงินกระจายตัวอยู่ในตัวกลาง (dispersing agent) ซึ่งข้อเสียของเทคนิคนี้ต้องใช้ปริมาณโลหะเงินสูง (40-60 % โดยน้ำหนัก) เมื่อนาโนเทคโนโลยีเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้น การสังเคราะห์อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการทางเคมีจึงสามารถนำมาพัฒนาต่อเพื่อสังเคราะห์หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน (conductive silver ink) ด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งข้อดีคือการใช้ปริมาณโลหะเงินน้อย (10-30 % โดยน้ำหนัก) อย่างไรก็ตามเพื่อให้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแสดงสมบัติการนำไฟฟ้าต้องมีการให้ความร้อน หรือการฉายแสงอัลตราไวโอเลต เพื่อให้อนุภาคเงินซินเทอร์กันถึงจะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีข้อจำกัดเรื่องการเลือกใช้วัสดุรองรับ ที่ไม่สลายตัวเมื่อได้รับความร้อน

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่แสดงสมบัตินำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อน หรือ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่สามารถซินเทอร์ได้ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อให้ใช้ได้กับวัสดุรองรับที่มีความหลากหลายมากขึ้น เช่น ฟิล์มบางพอลิเมอร์ กระดาษ เป็นต้น

หนึกนำไฟฟ้าที่มีขายในเชิงพาณิชย์ทั้งหมดเป็นผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ ซึ่งแนวโน้มของประเทศไทยเริ่มมีการลงทุนในเรื่องของการพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้ วงจรรับสัญญาณวิทยุ ที่ใช้กับเครื่อง Radio Frequency IDentification (RF-ID) โดยการใช้หมึกนำไฟฟ้าพิมพ์วงจรผ่านเครื่องพิมพ์แบบ

อิงค์เจท หรือการ screen printing หรือการพิมพ์แบบ stamp printing ซึ่งสามารถทำได้รวดเร็ว และมีต้นทุนในการผลิตต่อชิ้นต่ำ จึงเริ่มมีการนำเข้าหมึกนำไฟฟ้าจากต่างประเทศเข้ามามากขึ้น ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงมีความคิดที่จะประดิษฐ์หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินขึ้น เพื่อทดแทนการนำเข้า และเพื่อรองรับความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

ลักษณะของผลงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคเงินนั้นมีทั้งที่อยู่ในขั้นกำลังวิจัย และเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขายในเชิงพาณิชย์แล้ว ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. Silver conductive pen TEC 2502-N (**บริษัทผู้ผลิต** Techspray)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	45-55 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	- n-butylacetate - polymer
ขนาดของอนุภาค (size)	10-15 ไมโครเมตร
สี	เทา
curing temperature/curing time	- 150 องศาเซลเซียส / 5 นาที - อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) / 30 นาที
ปริมาณ	4.89 มิลลิลิตร
การประยุกต์ใช้	ซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	US$18.29 / 1 แท่ง
ข้อจำกัด และปัญหา	- ใช้เวลานานในการ curing - มีโลหะเงินเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก

2. Silver Paint (**บริษัทผู้ผลิต** M.E.TAYLOR ENGINEERING, INC,)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	18-50 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	- water - ethyl alcohol
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร
สี	น้ำตาล
sintering temperature/sintering time	-
ปริมาณ	15 กรัม
การประยุกต์ใช้	- ซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า - ใช้ยึดติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผงวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	US$18.00 - US$38.90 / 1 ขวด (ราคาขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะเงิน)
ข้อจำกัด และปัญหา	ต้องให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคเงินซินเทอร์กัน

3. CircuitWorks Conductive Pen (**บริษัทผู้ผลิต** TECHNI-TOOL®)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	35-65 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	- propylene glycol Methyl ether acetate - ethylene glycol monobutyl ether acetate - n-Butyl Acetate - acrylic Resin
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคเงินระดับไมโครเมตร
สี	เทา
curing temperature/curing time	อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) / 5-10 นาที
ปริมาณ	8.5 กรัม
การประยุกต์ใช้	ซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	US$23.20 / 1 แท่ง
ข้อจำกัด และปัญหา	มีโลหะเงินเป็นองค์ในปริมาณมาก

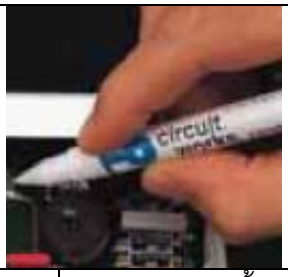
4. Chemicals Silver Conductive Pen (**บริษัทผู้ผลิต** NCIX)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	-
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	-
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคเงินระดับไมโครเมตร
สี	-
curing temperature/curing time	-
ปริมาณ	-
การประยุกต์ใช้	ซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	US$14.29 / 1 แท่ง
ข้อจำกัด และปัญหา	-

5. E82-05 Silver Conductive Ink (**บริษัทผู้ผลิต** SCREENTEC)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	-
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	vinyl-based
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคระดับไมโครเมตร
สี	เทา
curing temperature/curing time	-
ปริมาณ	1 กิโลกรัม
การประยุกต์ใช้	- ซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า - ใช้ยึดติดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ากับแผงวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	-
ข้อจำกัด และปัญหา	-

6. Conductive Marker (**บริษัทผู้ผลิต** Block EMF)

	
ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	50-60 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	- 2-butanone - xylenes - toluene - ethyl acetate หรือ Butyl acetate - 1-methoxy-2-propanol acetate - n-butyl alcohol - 2-propanol - glycol ether ester
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคเงินระดับไมโครเมตร
สี	เทา
curing temperature/curing time	- 150 องศาเซลเซียส / 5 นาที - อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) / 45 นาที
ปริมาณ	8.5 กรัม
การประยุกต์ใช้	ซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	US$19.95 / 1 แท่ง
ข้อจำกัด และปัญหา	- ใช้เวลานานในการ curing - มีโลหะเงินเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก

7. NINK/Ag (**บริษัทผู้ผลิต** ABC NanoTech Co., Ltd.)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	20 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	แอลกอฮอร์ หรือ น้ำ
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร
สี	ดำ
sintering temperature/sintering time	350-580 องศาเซลเซียส / 30 นาที
ปริมาณ	-
การประยุกต์ใช้	พิมพ์วงจรไฟฟ้าผ่านเครื่องพิมพ์อิงค์เจท
ราคา (List Price)*	-
ข้อจำกัด และปัญหา	ต้องให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคเงินซินเทอร์กัน

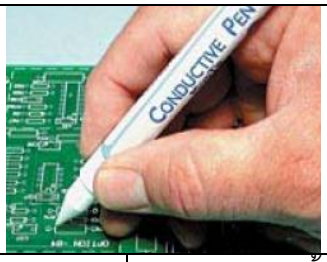
8. Silver Inks (**บริษัทผู้ผลิต** O-BASF)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	54-78 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	-
ขนาดของอนุภาค (size)	อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร
สี	น้ำตาล
curing temperature/curing time	- 150 $^{\circ}$C / 15 นาที - 600-700 $^{\circ}$C / 3 นาที
ปริมาณ	2-3 กิโลกรัม
การประยุกต์ใช้	พิมพ์วงจรไฟฟ้าผ่านเครื่องพิมพ์อิงค์เจท
ราคา (List Price)*	-
ข้อจำกัด และปัญหา	ต้องให้ความร้อนเพื่อให้อนุภาคเงินซินเทอร์กัน

9. PELCO® Colloidal Silver Paste, Conductive (**บริษัทผู้ผลิต** Ted Pella Inc.)

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	80 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	- arcosolve - toluene - D-Limonene - ethanol - ethyl Acetate
ขนาดของอนุภาค (size)	0.4-1.0 ไมโครเมตร
สี	เทา
curing temperature/curing time	- 150 องศาเซลเซียส / 30 นาที - อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) / 16-20 ชั่วโมง
ปริมาณ	25 กรัม
การประยุกต์ใช้	ใช้ในการเตรียมตัวอย่างกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
ราคา (List Price)*	US$41.00 / 1 ขวด
ข้อจำกัด และปัญหา	มีโลหะเงินเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก

10. Silver Conductive Pens (**บริษัทผู้ผลิต** Ted Pella Inc.)

	
ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	35-68 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ (solvent, binder)	- propylene glycol methyl ether acetate - ethylene glycol methyl ether acetate - ethylene glycol monobutyl ether acetate - n-Butyl Acetate - acrylic resin
ขนาดของอนุภาค (size)	- 10-15 ไมโครเมตร
สี	-
curing temperature/curing time	อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) / 30 นาที
ปริมาณ	-
การประยุกต์ใช้	ซ้อมแซมวงจรไฟฟ้า
ราคา (List Price)*	US$25.95- US$39.65 / 1 แท่ง (ราคาขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะเงิน)
ข้อจำกัด และปัญหา	- ใช้เวลานานในการ curing - มีโลหะเงินเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก

* ราคา (List Price) เป็นราคาของอุปกรณ์ที่ยังไม่รวมค่าขนส่ง ภาษี ค่าประกัน และค่าใช้จ่ายอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในเชิงการค้าเมื่อมีการสั่งสินค้าเข้ามาในประเทศไทย

นอกจากนี้ยังมีเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ตลอดจนการนำหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรดังต่อไปนี้

Beyoug-Hwan Ryu และคณะ (2005) สังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหมึกสำหรับเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท (Ink-Jet printing) โดยปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้เกลือซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO3) เป็นสารตั้งต้น โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) เป็นตัวรีดิวซ์ และใช้เกลือของพอลีอะคิลิกแอมโมเนียม (Polyacrylic ammonium salt) น้ำหนักโมเลกุล 15,000 ในการรักษาเสถียรภาพของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน เงื่อนไขของการสังเคราะห์คือ ใช้โซเดียมโบโรไฮไดร์ความเข้มข้น 0.5 mM และใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลเวอร์ไนเตรตต่อเกลือของพอลีอะคิลิกแอมโมเนียม

อยู่ในช่วง 0.1-1.0 เท่า อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่สังเคราะห์ได้มีความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก และมีขนาดของอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 10–20 นาโนเมตร

Marko Pudas และคณะ (2005) ใช้อนุภาคเงินซึ่งมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ โดยมีอนุภาคเงินอยู่ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก เพื่อนำไปใช้ในการพิมพ์ด้วยวิธีประทับ (Stamp printing) บนวัสดุรองรับที่สามารถโค้งงอได้ เช่น พอลิเมอร์ฟิล์มของ Poly(ethylene terephthalate) (PET) และกระดาษ หลังจากผ่านการพิมพ์ด้วยวิธีประทับ แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70–120 องศาเซลเซียส พอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ยึดเกาะอนุภาคเงินจะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอนุภาคเงินที่อยู่ชิดติดกัน เป็นผลให้เกิดการนำไฟฟ้า และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทำ RFID tag antennas และ intelligent packages บนวัสดุรองรับที่โค้งงอได้

Dongjo Kim และคณะ (2006) สังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินโดยใช้เกลือของซิลเวอร์ไนเตรตเป็นสารตั้งต้น ไดเอทิลีนไกลคอล (Diethylene glycol) เป็นตัวรีดิวซ์ และพอลีไวนิลไพโรลิโดล(Polyvinyl pyrrolidone (PVP)) เป็นสารช่วยให้เสถียร สังเคราะห์โดยผ่านกระบวนการ Reflux หลังจากทำปฏิกิริยาสมบูรณ์ทำการแยกอนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้ออกจากสารละลายโดยการ Centrifuge ล้างอนุภาคเงินด้วยเอทานอล อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่สังเคราะห์ได้มีความเข้มข้นร้อยละ 10–30 โดยน้ำหนัก และมีขนาดของอนุภาคประมาณ 20 นาโนเมตร อนุภาคเงินที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์อิงเจ็ท แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100–300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที อนุภาคเงินที่ถูกพิมพ์ลงบนวัสดุรองรับจะมีความแวววาวคล้ายโลหะเงิน

Luke M. Davis และ David W. Thompson (2007) สามารถสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินโดยใช้ Dimethylacetamide (DMAc) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นตัวรีดิวซ์จากนั้นเติมเกลือของซิลเวอร์ไนเตรตน้ำหนัก 1.1430 กรัม ละลายด้วย DMAc 5 มิลลิลิตรโดยใช้ syringe pump ใช้เวลาในการฉีดสารละลาย 5 นาที พร้อมทั้งกวนผสมโดยใช้ stirrer ได้สารละลายสีเหลือง ให้ความร้อนต่อเป็นเวลา 75 นาที สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองกลายเป็นสารเนื้อผสมสีเขียวเข้มและสีเทา เติมสารละลาย DMAc จนมีปริมาตร 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ 1 คืน จะเกิดตะกอนสีดำตกตะกอนอยู่ที่ก้นภาชนะ และมีสีของสารละลายเป็นสีเหลือง ทำการแยกตะกอน และล้างตะกอนด้วยเอทานอล และอะซิโตน อย่างละ 25 มิลลิลิตร ตามลำดับ จะได้อนุภาคเงินขนาด 10–500 นาโนเมตร และอนุภาคเงินระดับนาโนสามารถซินเทอร์ได้ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ข้อเสียหรือข้อบกพร่องของผลงานอื่น ๆ ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน

1. ราคาแพง ต้องนำเข้าจากต่างประเทศทั้งหมด และเมื่อซื้อมาแล้วต้องใช้ตามที่ผู้ขายกำหนดไม่สามารถปรับปรุงคุณภาพให้ตรงกับความต้องการได้
2. หนึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินส่วนใหญ่ต้องใช้ความร้อนสูงเพื่อทำให้สารช่วยในเสถียรสลายตัว และทำให้อนุภาคเงินซินเทอร์รวมกัน ถึงจะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุรองที่สลายตัวได้ง่ายหากได้รับความร้อน เช่น กระดาษ หรือฟิล์มบางพอลิเมอร์
3. หมึกนำไฟฟ้าที่พัฒนาจากอนุภาคระดับไมโครเมตรของเงินต้องใช้ปริมาณโลหะเงินมาก เพื่อให้อนุภาคเงินสัมผัสกันทั้งหมดหลังทิ้งให้แห้งบนวัสดุรองรับถึงจะแสดงสมบัติการนำไฟฟ้า อีกทั้งกระบวนการผลิตอนุภาคเงินระดับไมโครเมตรต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง ราคาแพง

6. วิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการ	ผู้รับผิดชอบ
1.ศึกษาหาข้อมูลเกี่ยวกับหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในเชิงพาณิชย์ สำรวจความต้องการผู้ประกอบการ	ชุติพันธ์/ชุติภรณ์
2.พัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน	ชุติพันธ์
3.วิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคโดยใช้ Transmission Electron Microscope, Scanning electron microscope และ Atomic Force Microscope	ชุติพันธ์
4.วิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวโดยใช้ Four-Point-Probe Measurement	ชุติพันธ์
5.พัฒนาวิธีการผลิตหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโน ให้สามารถผลิตได้ในปริมาณมาก	ชุติพันธ์
6.เขียนรายงานความก้าวหน้า สรุปผลการวิจัยเพื่อตีพิมพ์และเผยแพร่ผ่าน Website ของหน่วยวิจัย และตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ	ชุติพันธ์
7.เผยแพร่ผลการวิจัย เช่น จัดแสดงนิทรรศการ การสาธิตการทำงานของหมึกนำไฟฟ้า การเข้าร่วมงานการประชุมทางวิชาการระดับชาติ และระดับนานาชาติ	ชุติพันธ์

สถานที่ทำการวิจัย

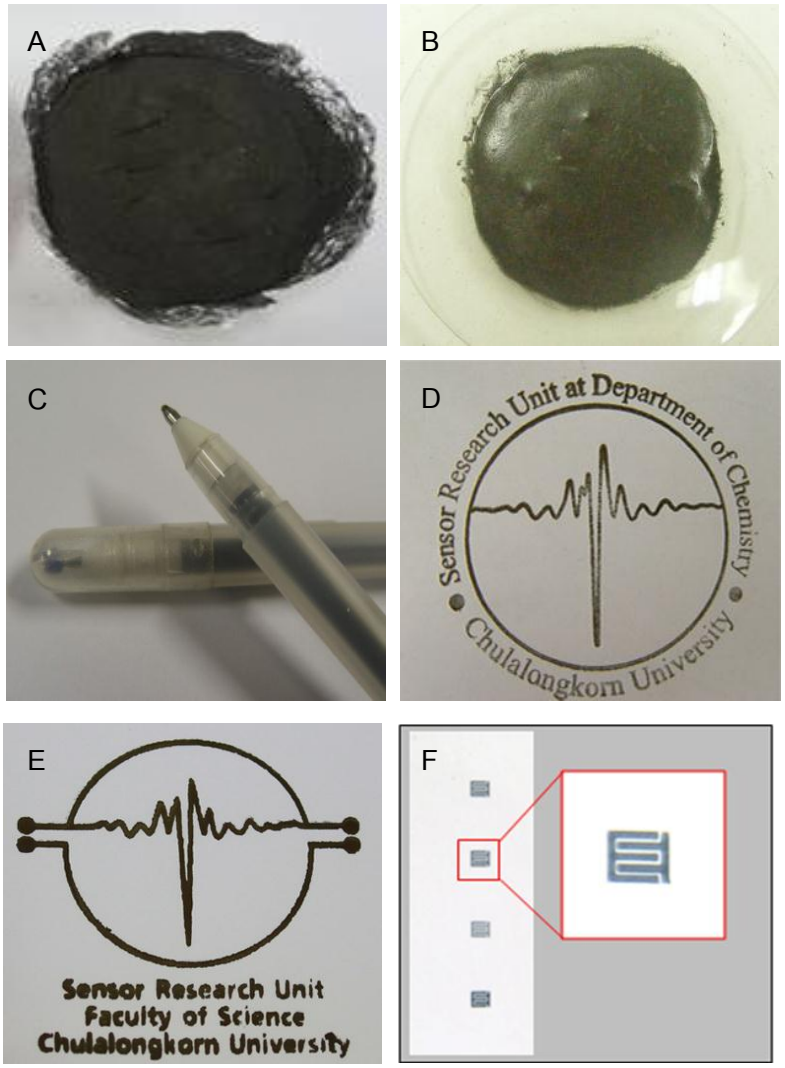
หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ (Sensor Research Unit)

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

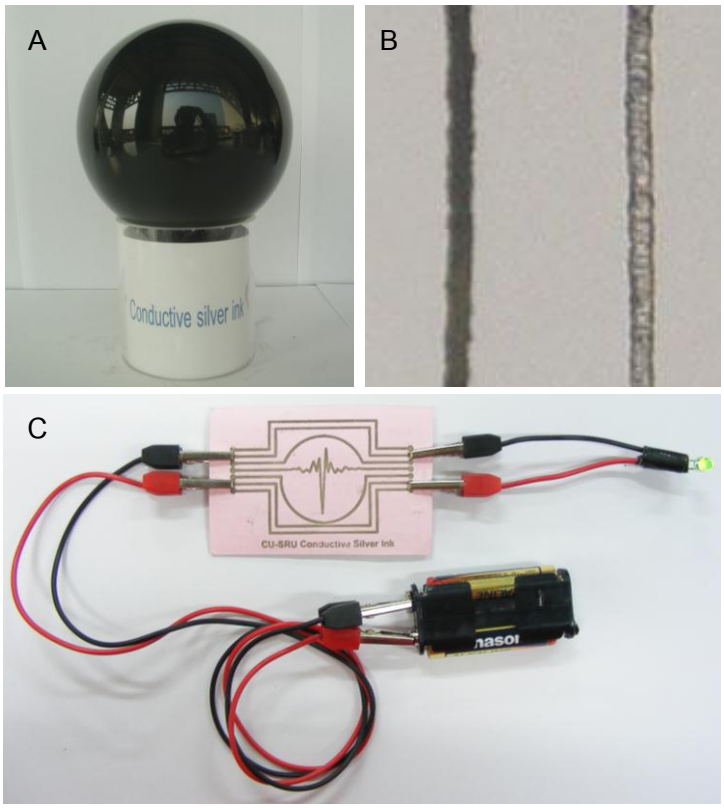
7. ผลการวิจัย / ข้อค้นพบ

7.1 บทนำ

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ได้พัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่ใช้สำหรับการพิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ (stamp printing) หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการพิมพ์ด้วยวิธีการสกรีน พริ้นติ้ง (screen printing) หมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand และปากกานำไฟฟ้า (conductive pen) เพื่อทดแทนการนำเข้า และรองรับความต้องการของภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 1 A คือ ต้นแบบอนุภาคเงินแบบผงสำหรับผสมเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า, B คือ ต้นแบบ silver paste สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า, C คือ ต้นแบบปากกานำไฟฟ้า (conductive pen), D คือ หมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ (stamp printing), E คือ หมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยวิธีการสกีน (screen printing), F คือ หมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ชนิด drop-on-demand



รูปที่ 2 A คือ ต้นหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินพร้อมใช้, B คือ เส้นที่ถูกเขียนจากหมึกนำไฟฟ้าโดยใช้กระดาษเป็นวัสดุรองรับ หลังจากขัดผิวหน้าด้วยโลหะผิวเรียบจะเห็นความแวววาวคล้ายโลหะเงิน, C คือ วงจรไฟฟ้าจากหมึกนำไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยเทคนิค screen print

ต้นทุนการผลิต

CU-SRU Conductive Silver Ink น้ำหนัก 100 กรัม (ใช้ silver nitrate 158 กรัม) ผลิตจากขั้นตอนการผลิตซิลเวอร์ไนเทตร

ค่าโลหะเงิน (กิโลกรัมละ 17,000 บาท)	1,700 บาท
ค่าสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา	200 บาท
รวม	**1,900 บาท**

ซิลเวอร์ไนเทรตที่มีขายในเชิงพาณิชย์ (Merck) 100 กรัม ราคา 3,450 บาท ต้องใช้ซิลเวอร์ไนเทรต 158 กรัม คิดเป็นเงิน 5,450 บาท

ซิลเวอร์ไนเทรตที่สังเคราะห์ได้มีต้นทุนต่ำกว่าซิลเวอร์ไนเทตรที่มีขายในเชิงพาณิชย์ 2.9 เท่า

เกลือซิลเวอร์ไนเตรต (สังเคราะห์จาก โลหะเงิน)	1,900 บาท
ตัวรีดิวซ์	1,200 บาท
Stabilizer และสารเคมี อื่น ๆ	500 บาท
รวม	**3,600 บาท**

ราคาหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน 1 กรัม ราคา 36 บาท

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่ผลิตได้จากหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้

ปริมาณโลหะเงิน (silver content)	30 % โดยน้ำหนัก
องค์ประกอบอื่น ๆ	น้ำ
ขนาดของอนุภาค (size)	0.8-2 นาโนเมตร
สี	ดำ
sintering temperature/sintering time	150 องศาเซลเซียส / 1-2 นาที อุณหภูมิห้อง (30-35 องศาเซลเซียส)/10-15 นาที
ค่าความต้านทาน	0.618 Ω/mil^2
ปริมาณ	สามารถผลิตได้ตามความต้องการของผู้ซื้อ
การประยุกต์ใช้	- ใช้ในการเขียน หรือซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า - ใช้ผลิตวงจรไฟฟ้า หรือวงจรรับสัญญาณในปริมาณมากได้โดยผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop on demand หรือพิมพ์ด้วยวิธีการ screen print - เคลือบพื้นผิวที่ต้องการป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย - ใช้ในการประดิษฐ์หรือซ่อมแซม (metal adhesive) เครื่องประดับเงินที่เสียหายเนื่องจากการแตกหัก - ใช้เขียน หรือตกแต่งวัสดุต่าง ๆ เพื่อให้เกิดลายเส้น หรือลวดลายที่เป็นสีเงิน
ราคา (List Price)*	36 บาท/1กรัม (ราคาคิดเฉพาะค่าสารเคมี)

คิดเฉพาะค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคเงินระดับนาเมตร ราคาของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่สังเคราะห์ได้ราคาถูกกว่าหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในเชิงพาณิชย์ประมาณ 2.9 เท่า นอกจากราคาที่ถูกกว่าหมึกนำไฟฟ้าที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ คณะผู้วิจัยยังสามารถนำหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้แล้ว และหมึกนำไฟฟ้าที่เป็นของเสียจากการทดลอง หรือการขยายกำลังการผลิต กลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยวิธีการทางเคมี เป็นการลดปริมาณของเสีย และลดต้นทุนการผลิตได้อีกทางหนึ่ง

คุณสมบัติเด่น ของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พัฒนาขึ้นจาก หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้

1. ราคาถูกเมื่อเทียบกับหมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในเชิงพาณิชย์
2. สามารถพัฒนาเพื่อใช้กับวัสดุรองรับที่มีความหลากหลาย รวมทั้งวัสดุที่สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิสูง เช่น ฟิล์มบางพอลิเมอร์ และกระดาษ
3. มีปริมาณอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพียง 30% โดยน้ำหนัก แต่มีความสามารถในการนำไฟฟ้ามากพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์
4. สามารถปรับปรุงให้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้นโดยการให้ความร้อน หรือฉายแสงอัลตราไวโอเลต
5. กระบวนการผลิตรองรับการผลิตในปริมาณมาก เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์
6. 100 % TECHNOLOGY MADE IN THAILAND

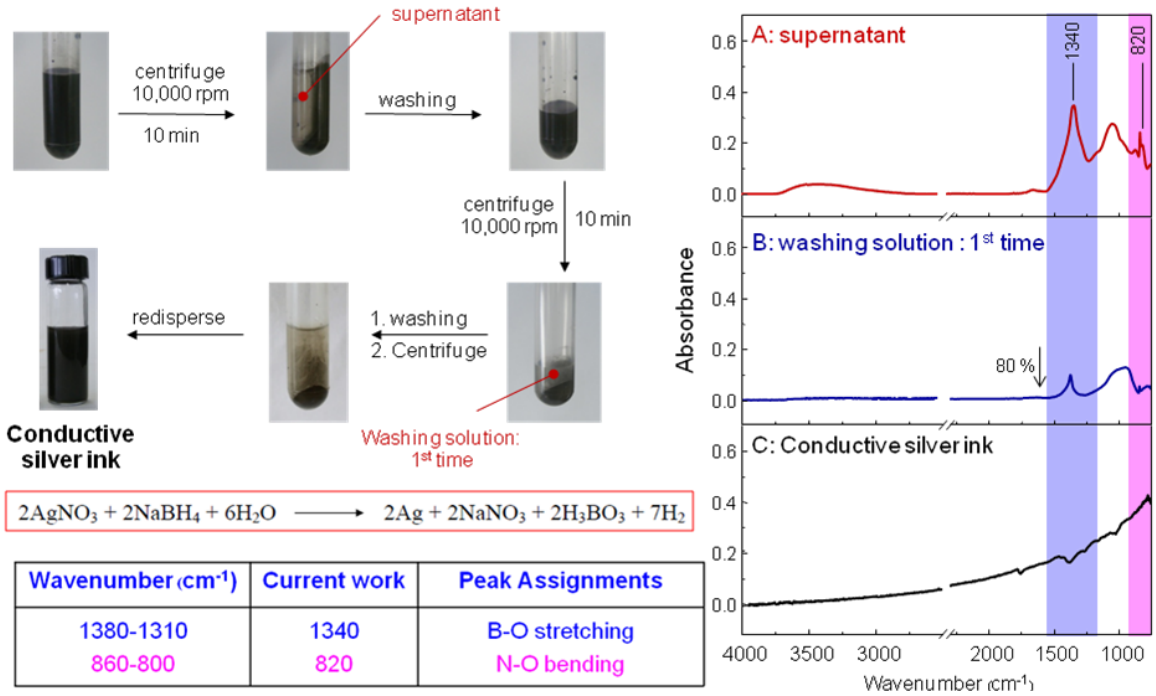
7.2 วิธีการทดลอง

หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินได้จากแปรรูปคอลลอยด์น้ำของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน เนื่องจากการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินด้วยวิธีการทางเคมี นอกจากจะได้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน ยังส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่น ๆ คือ โซเดียมไอออน (Na^+) ไนเตรตไอออน (NO_3^-) และ บอเรตไอออน (BH_4^-) ซึ่งเมื่ออนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแห้งบนวัสดุรองรับแล้ว ไอออนเหล่านี้จะกลายเป็นเกลือ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการนำไฟฟ้าต่ำลง นอกจานั้นเกลือที่เกิดขึ้นเหล่านี้ยังสามารถดูดซับความชื้นได้ดี ซึ่งจะส่งผลให้วงจรไฟฟ้ามีอายุการใช้งานสั้นหรือเกิดการลัดลงจรได้

$$2AgNO_3 + 2NaBH_4 + 6H_2O \longrightarrow 2Ag + 2NaNO_3 + 2H_3BO_3 + 7H_2$$

คณะนักวิจัยจึงได้มีการพัฒนาวิธีการทำความสะอาด (purified) อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อให้สามารถนำมาใช้เป็นหมึกนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากไอออนต่าง ๆ สามารถละลายได้ดีในน้ำ ดังนั้นจึงสามารถใช้เพียงน้ำกลั่นธรรมดา เพื่อทำความสะอาดอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน โดย centrifuge อนุภาคระดับนาโนเมตรให้ตกตะกอน แล้วเทสารละลายทิ้ง ไอออนส่วนใหญ่จะอยู่ในสารละลายที่ทิ้งไป หลังจากนั้นล้างอนุภาคเงินด้วยน้ำกลั่น 2 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าสามารถกำจัดไอออนต่าง ๆ ได้หมด ติดตามปริมาณไอออนต่าง ๆ ที่ลดลงโดย FT-IR microspectroscopy วิเคราะห์ขนาดของอนุภาคโดย Transmission Electron Microscope, Scanning electron microscope และ Atomic Force Microscope ศึกษาการซินเทอร์โดย Atomic Force Microscope และหาค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวโดย Four-Point-Probe Measurement

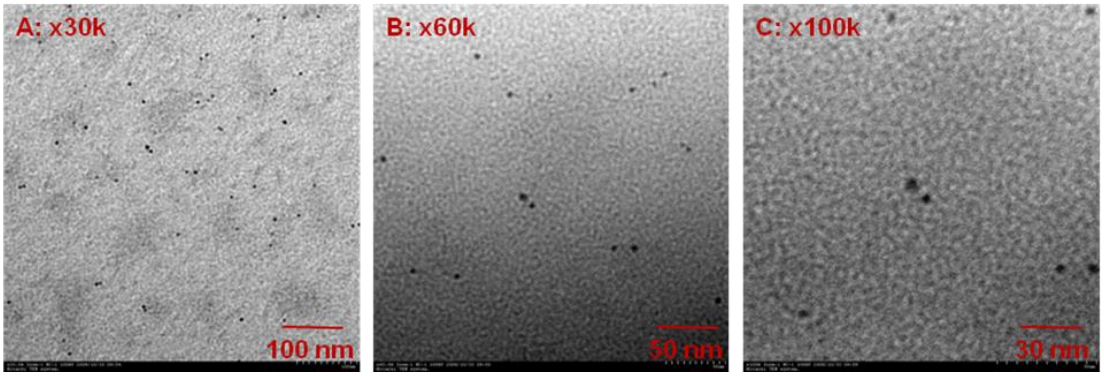
7.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง



$$2AgNO_3 + 2NaBH_4 + 6H_2O \longrightarrow 2Ag + 2NaNO_3 + 2H_3BO_3 + 7H_2$$

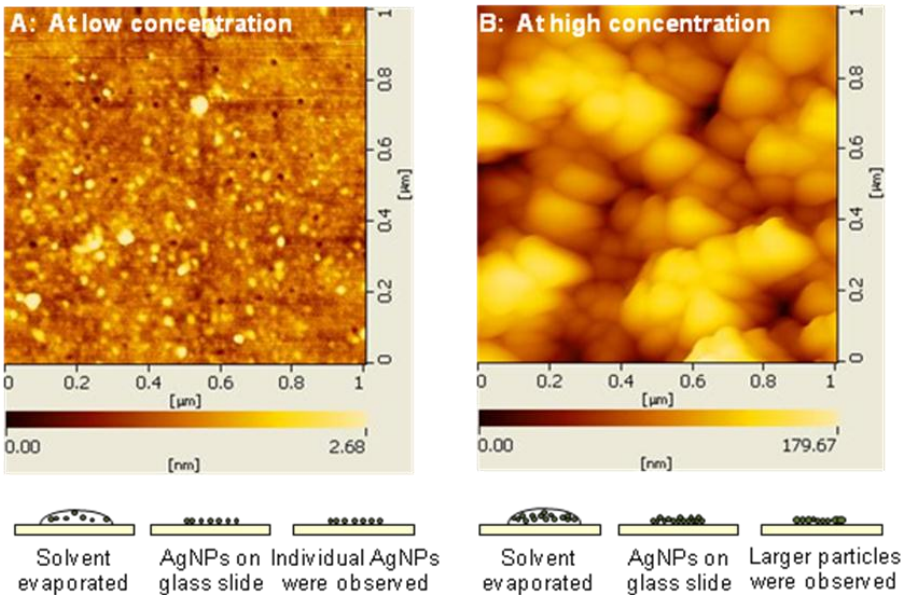
Wavenumber (cm^{-1})	Current work	Peak Assignments
1380-1310	1340	B-O stretching
860-800	820	N-O bending

รูปที่ 3 แสดงวิธีการ purified อนุภาคเงินระดับนาโนเมตร และติดตามการลดลงของ บอเรตไอออน และไนเตรตไอออนด้วย FT-IR microspectroscopy

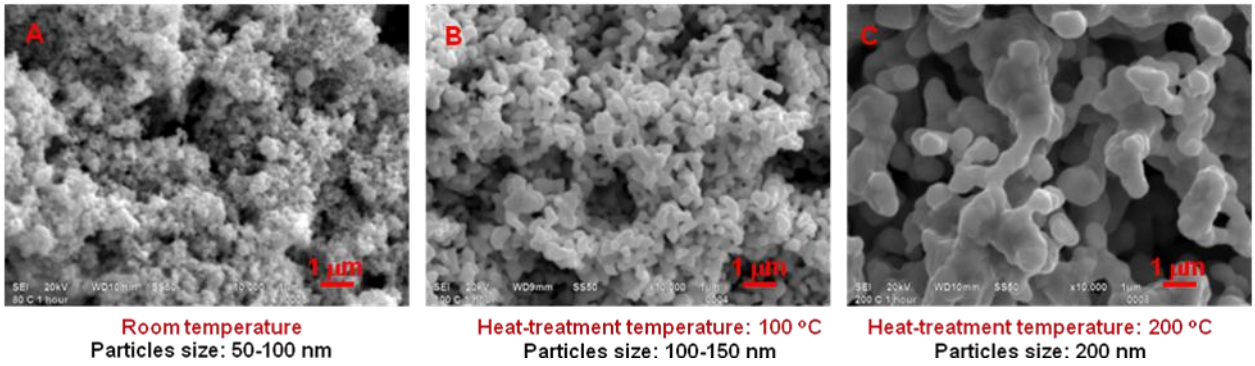


รูปที่ 4 TEM images ของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่นำมาใช้ในการทำหมึกนำไฟฟ้า

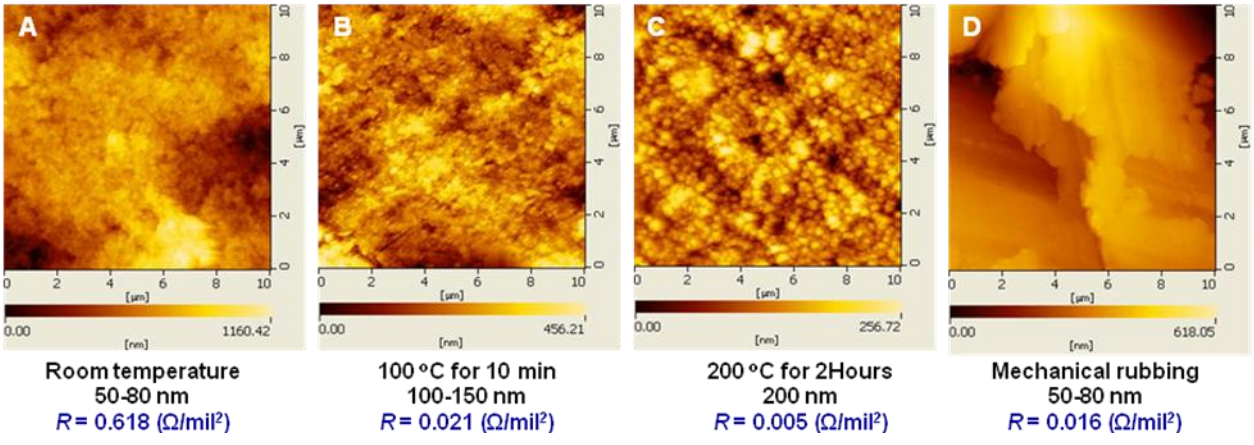
หลังจากทำความสะอาดอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแล้ว นำไปวิเคราะห์หาขนาดด้วยกล้องจุลทรรศอิเล็กตรอนแล้วส่องผ่าน (transmission electron microscope) พบว่าอนุภาคเงินมีขนาดประมาณ 5 นาโนเมตรดังรูปที่ 4



รูปที่ 5 AFM images แสดงขนาดของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินก่อน (A) และหลัง (B) การซินเทอร์



รูปที่ 6 SEM images แสดงขนาดของอนุภาคระดับเงินหลังซินเทอร์แล้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ (A) อุณหภูมิห้อง (B)100 °C และ (C) 200 °C



รูปที่ 7 AFM images แสดงขนาดของอนุภาคเงิน และค่าความต้านทานเชิงพื้นผิวของฟิล์มเงินที่สภาวะต่าง ๆ

โดยหลักการแล้วต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าทั้ง 7 ต้นแบบมีการกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกัน แต่จะแตกต่างกันที่ตัวกลางที่อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินกระจายตัวอยู่ และ post process ที่ทำให้หมึกนำไฟฟ้ามีคุณสมบัติตามต้องการ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำหมึกนำไฟฟ้าไปใช้เพื่อการพิมพ์ในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป

7.3.1 ผงอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร

ผู้ประกอบการสามารถนำไปผสมกับตัวกลาง ที่ผู้ประกอบการใช้อยู่แล้ว ว่าสามารถกระจายตัวและมีเสถียรภาพที่ดีหรือเปล่า เนื่องจากผงของอนุภาคเงินระดับนาโนเมตร เป็นผงของเงินบริสุทธิ์ที่ไม่มีการปกป้องพื้นผิวของเงิน โดยสังเคราะห์จากเกลือของเงิน และสารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์ในอัตราส่วนที่เหมาะสม และทำให้เป็นผงทันที เพื่อไม่ให้อนุภาคเงินเกิดปฏิกิริยาต่อ ดังนั้นผู้ประกอบการสามารถนำผงอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินค่อย ๆ โหลดลงไปในตัวกลาง กวนผสมด้วยใช้เครื่อง homogenizer ก็สามารถทำเป็นหมึกนำไฟฟ้าได้

7.3.2 อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรความเข้มข้นสูงเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า

หลังจากการสังเคราะห์ และ purify อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแล้ว ทำให้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินกระจายตัวกลับไปในสารละลาย 0.1 % w/v ของกรดซิตริก (citric acid) เพื่อให้อนุภาคเงินสามารถรักษาเสถียรภาพได้นาน

7.3.3 ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรเพื่อพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ drop-on-demand

หลังจากการสังเคราะห์และ purify แล้วทำให้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินกระจายตัวกลับไปในน้ำ เนื่องจากการพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าเพื่อใช้กับเครื่องพิมพ์ drop-on-demand นี้ต้องการให้หมึกมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี อย่างไรก็ตามหมึกนำไฟฟ้าสามารถกระจายตัวในน้ำกลั่นได้ประมาณ 1 สัปดาห์ หลังจากนั้นอนุภาคระดับนาโนเมตรจะเกิดการ aggregation และปรากฏเป็นตะกอนลงมาที่ก้นภาชนะ อย่างไรก็ตามสามารถทำให้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินกระจายตัวใหม่ได้อีก โดยการ ultrasonic

7.3.4 ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ

หลังจากการสังเคราะห์ และ purify หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแล้ว กรณีที่วัสดุรองเป็นวัสดุจำพวก hydrophilic จะนำหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินผสมกับ 10 % w/v methyl cellulose เพียงเล็กน้อย เพื่อปรับความหนืดให้พอเหมาะกับการพิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ นอกจากนั้น methyl cellulose ยังช่วยในการรักษาเสถียรภาพของหมึกนำไฟฟ้าได้อีกด้วย แต่หากวัสดุรองรับเป็นจำพวก hydrophobic จะผสมหมึกนำไฟฟ้ากับ acrylic resin และใช้ ethyl acetate เป็น solvent

7.3.5 ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พิมพ์ด้วยวิธีสกรีน

นำหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน มาผสมกับ 10 % w/v methyl cellulose เพียงเล็กน้อย เพื่อให้มีความหนืดที่เหมาะสมกับการพิมพ์แบบสกรีน อย่างไรก็ตามวัสดุรองต้องเป็น hydrophilic เพื่อให้หมึกสามารถกระจายตัวไปบนวัสดุรองรับตามแบบของ block screen ได้

7.3.6 ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแบบปากกา สำหรับซ่อมแซม หรือเขียนวงจรไฟฟ้า

นำหนึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินบรรจุในปากกาแทนน้ำหมึกปากกาได้ทันที หรือปรับปรุงความหนืดโดยผสมกับ acrylic resin และ/หรือ glycol ether ester และ/หรือ methyl cellulose โดยมี ethyl acetate หรือ butyl acetate เป็น solvent โดยปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดความหนืดของหมึกคือลักษณะของหัวปากกา

7.3.7 ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ silver paste สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า

นำผงของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินมาทำให้กระจายตัวใน polyurethane โดยมีเมทิลเอทิลคีโตนและอะซิโตน เป็น solvent อย่างไรก็ตามการโหลดผงของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินลงไปใน polyurethane เลยไม่สามารถทำได้ เนื่องจากอนุภาคเงินจะเกาะกันเป็นก้อน ดังนั้นควรทำให้ผงของอนุภาคเงินกระจายตัวในเมทิลเอทิลคีโตนก่อนแล้วจึงค่อย ๆ โหลด polyurethane หลังจากได้ silver paste แล้วควรเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดมิดชิด เมื่อต้องการใช้งาน สามารถนำมาป้ายบริเวณที่ต้องการและหลังจากที่ solvent ระเหย polyurethane จะแข็งตัวและยึดติดอยู่กับวัสดรองรับ

7.4 สรุป

คณะนักวิจัยประสบความสำเร็จในการพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์จำนวน 7 ต้นแบบ ดังต่อไปนี้

1. ผงอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรไปผสมเป็นหมึกนำไฟฟ้า
2. อนุภาคเงินระดับนาโนเมตรความเข้มข้นสูงเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า
3. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ drop-on-demand
4. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ
5. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่พิมพ์ด้วยวิธีสกรีน
6. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินแบบปากกา สำหรับซ่อมแซมหรือเขียนวงจรไฟฟ้า
7. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ silver paste สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า

8. ผลการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานวิจัยที่ได้เสนอไว้กับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการ

ตารางที่ 2 แสดงผลการดำเนินงานตามแผนการดำเนินงานวิจัย

เดือน	แผนการดำเนินงาน	งานวิจัยที่ได้ดำเนินการ	สรุป
1-2	ศึกษาผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ ในเรื่องขององค์ประกอบ ความเข้มข้น และราคาสินค้า	- รวบรวม และสรุปข้อมูลผลิตภัณฑ์หมึกนำไฟฟ้าที่มีขายในเชิงพาณิชย์ (รายละเอียดดังเอกสารแนบที่ 1) - แลกเปลี่ยนความคิดเห็นกับผู้ประกอบการในด้านราคา ลักษณะของหมึกนำไฟฟ้าและลักษณะของการนำหมึกนำไฟฟ้าไปใช้	การดำเนินงานเป็นไปตามแผนการวิจัย
1-2	พัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน	- พัฒนาวิธีการผลิตหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินจำนวน 7 ต้นแบบ (1) ผงอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อนำไปผสมเป็นหมึกนำไฟฟ้า (2) อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูงเพื่อใช้ทำหมึกนำไฟฟ้า (3) ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ drop-on-demand (4) ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่พิมพ์ด้วยวิธีการพิมพ์ประทับ (stamp printing) (5) ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่พิมพ์ด้วยวิธีสกรีน พริ้นติ้ง (screen printing) (6) ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ปากกากนำไฟฟ้า (conductive pen)สำหรับซ่อมแซม หรือเขียนวงจรไฟฟ้า (7) ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ silver paste สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า	การดำเนินงานเป็นไปตามแผนการวิจัย
1-3	วิเคราะห์ขนาดรูปร่างของอนุภาคโดยใช้ Transmission Electron Microscope, Scanning Electron Microscope และ Atomic Force Microscope	- วิเคราะห์ขนาด และรูปร่างของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy, Scanning Electron Microscopy และ Atomic force microscopy	การดำเนินงานเป็นไปตามแผนการวิจัย

	วิเคราะห์ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวด้วย Four-point-probe measurement	- วิเคราะห์ค่าความต้านไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินบนวัสดุรองรับด้วย Four-point-probe measurement	
1- 5	เขียนรายงานความก้าวหน้า สรุปผลการวิจัยเพื่อตีพิมพ์ และเผยแพร่ผ่าน Website ของหน่วยวิจัย และตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการ	- สรุปผลการวิจัย เตรียมเอกสาร และต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่พัฒนาขึ้นเพื่อเผยแพร่ในนิทรรศการ การประชุมวิชาการ และสื่อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (1) การนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 Thailand Research Expo 2009 (2) งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ChinaNANO 2009 (3) งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 5th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress (5th MPSGC) (4) งานเปิดโลกบัณฑิตศึกษา 2552 (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) (5) งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ Pure and Applied Chemistry Conference 2010 (PACCON 2010) (6) งานวันนักประดิษฐ์ประจำปี 2553 (7) The Science Forum 2010 (8) The 1st National research symposium on petroleum, petrochemicals, and advanced materials (รายละเอียดดังเอกสารแนบที่ 2)	การดำเนินงานเป็นไปตามแผนการวิจัย
1-5	เผยแพร่ผลงานด้วยการสาธิตการทำงานของหมึกนำไฟฟ้า	- สาธิตการทำงานของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินในงานนิทรรศการต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ (1) งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ The 5th Mathematics and Physical Sciences Graduate Congress (2) งานวันนักประดิษฐ์ ประจำปี 2553	การดำเนินงานเป็นไปตามแผนการวิจัย

9. การเผยแพร่ และการใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย

การถ่ายทอดเทคโนโลยีเป็นไปตามกระบวนการส่งเสริมให้เกิดการใช้ผลผลิต (marketing) จากการวิจัยและสิ่งประดิษฐ์ โดยการโฆษณาประชาสัมพันธ์ผ่านสื่อต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การจัดแสดงภายในงาน Thailand Research Expo 2009 ซึ่งได้รับผลตอบรับที่ดีจากผู้ประกอบการชาวไทย โดยบริษัทเอกชนเข้ามาขอคำปรึกษา และมีความประสงค์ที่จะนำหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินใช้พิมพ์เป็นวงจรรับสัญญาณวิทยุ โดยได้มีการทดลองนำหมึกนำไฟฟ้าพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand ดังภาพ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการรับสัญญาณวิทยุ

รูปที่ 8 หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand

การทดลองเบื้องต้นคือ สามารถพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand ได้ การควบคุมขนาดของหยดมีประสิทธิภาพเทียบเท่าผลิตภัณฑ์ที่ทางบริษัทซื้อมาจากต่างประเทศ ในส่วนของความสามารถในการยึดติดกับวัสดุรองรับหมึกนำไฟฟ้าที่ได้พัฒนาขึ้นนั้นมีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุรองรับได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามวงจรที่ถูกพิมพ์ออกมานั้นยังอยู่ในขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพการรับสัญญาณวิทยุ และพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะพัฒณาผลิตภัณฑ์โดยต้องมีการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติม โดยคณะนักวิจัยจะได้พัฒนาโครงการวิจัยเพื่อขอรับทุนสนับสนุนต่อยอดผลงานวิจัยเพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป บริษัทที่ได้เข้ามาติดต่อ เพื่อสอบถามข้อมูลเกี่ยวกับหมึกนำไฟฟ้าที่ทางคณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น คือ บริษัท ดิจิตอล สตาร์ จำกัด (127 ชั้น 1 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400) โทรศัพท์ 0-2640-9246-8 บริษัทคนไทยทำธุรกิจทางการพิมพ์ ต้องการหาช่องทางการตลาดใหม่ ซึ่งเกี่ยวกับการพิมพ์แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิก เนื่องจากทางบริษัทมีความรู้ความชำนาญในเรื่องของเทคโนโลยีการพิมพ์เป็นอย่างดี จึงได้มีการพูดคุยแลกเปลี่ยนความรู้ในส่วนของความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกแบบแผ่นบางโดยพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์

โดยกระบวนการถ่ายทอดหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรจากหน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ให้กับผู้ประกอบการ ได้ดำเนินการตามผังงานดังต่อไปนี้

1. พัฒนาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง ปริมาณมาก

↓

2. แปรรูปอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง เป็นหมึกนำไฟฟ้า

↓

รูปที่ 9 ผังการดำเนินงาน และการถ่ายทอดหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรให้กับผู้ประกอบการ

1. พัฒนาวิธีการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง ปริมาณมาก

หน่วยปฏิบัติการวิจัยอุปกรณ์รับรู้ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประสบความสำเร็จเรื่องการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง ปริมาณมาก รองรับความต้องการของภาคอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นเทคโนเลยีหลักในการพัฒนาหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงิน

2. แปรรูปอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง เป็นหมึกนำไฟฟ้า

บทประยุกต์อย่างหนึ่งของอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินคือ หมึกนำไฟฟ้า ซึ่งต่างประเทศสามารถพัฒนาให้ใช้งานได้จริง และเริ่มขายเป็นสินค้าเชิงพาณิชย์ คณะผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะพัฒนาอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูงให้เป็นหมึกนำไฟฟ้า เพื่อรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมที่ต้องใช้หมึกนำไฟฟ้าเป็นวัตถุดิบ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตวงจรแบบแผ่นบาง วงจรแบบแผ่นบาง อุตสาหกรรมผลิตวงจรรับสัญญาณวิทยุ (RFID tag) เป็นต้น

3. ปรับปรุงสมบัติของหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินให้มีเสถียรสูง มีค่าความต้านต่ำ

อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูงต้องมีสารเคมีที่ใช้ในการรักษาเสถียรภาพของอนุภาคเงินผสมอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้นอนุภาคเงินระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นสูง โดยทั่วไปจะไม่แสดงสมบัตินำไฟฟ้า เพราะเมื่ออนุภาคเงินแห้งบนวัสดุรองรับแล้วสารเคมีที่ช่วยรักษาเสถียรภาพจะขัดขวางไม่ให้อนุภาคเงินมาสัมผัสกัน เป็นผลให้ฟิล์มของเงินไม่แสดงสมบัติในการนำไฟฟ้า จึงต้องมีกรรมวิธี และมีการปรับปรุงสูตร เพื่อให้อนุภาคเงินยังคงรักษาเสถียรภาพอยู่ได้โดยไม่ตกตะกอนเมื่ออยู่ในรูปแบบของของเหลว และอนุภาคเงินต้องสัมผัสกันเมื่อแห้งบนวัสดุรองรับ เพื่อให้ฟิล์มเงินสามารถแสดงสมบัตินำไฟฟ้าได้

4. ได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าที่นำไปใช้เป็น ปากกานำไฟฟ้า (conductive pen) และหมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรที่ใช้สำหรับพิมพ์ด้วยวิธีการประทับ (stamp printing)

หมึกนำไฟฟ้าที่สังเคราะห์ได้สามารถใช้เป็นใส่ปากกา เพื่อทำเป็นปากกานำไฟฟ้าได้ทันที ต้นแบบปากกานำไฟฟ้าสามารถใช้เขียนวงจรไฟฟ้า หรือซ่อมแซมวงจรไฟฟ้าได้ นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยได้มีการปรับปรุงสูตรเพิ่มเติมเพื่อให้หมึกนำไฟฟ้าใช้ได้กับกระบวนการพิมพ์ที่มีความหลากหลายมากขึ้น ซึ่งต้นแบบต่อมาที่คณะผู้วิจัยสามารถพัฒนาได้คือ หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเพื่อใช้สำหรับการพิมพ์ด้วยวิธีการประทับ (stamp printing)

5. แสดงผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้า ต้นแบบปากกานำไฟฟ้า และวงจรไฟฟ้าที่พิมพ์ด้วยการพิมพ์ประทับ ผ่านงานนิทรรศการและงานประชุมวิชาการต่าง ๆ

หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่ทางผู้วิจัยสามารถสังเคราะห์ได้นั้น เริ่มมีการพัฒนามาตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2551 จึงได้มีการจัดแสดงนิทรรศการ และได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการต่าง ๆ เช่น งาน Thailand Research Expo 2009 (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาต, วช.) งานจุฬาวิชาการ (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) งานวันนักประดิษฐ์ ประจำปี 2553 (สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาต, วช.) นำมาซึ่งการติดต่อขอมาเยี่ยมชมห้องทดลอง นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยเองยังได้ให้ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้ากับผู้ประกอบการเพื่อนำไปทดลองใช้

6. ผู้ประกอบการแสดงความสนใจที่จะนำผลิตภัณฑ์ไปทดลองใช้

ผู้ประกอบที่ให้ความสนใจมีทั้งในส่วนของ บริษัททางด้านเทคโนโลยีการพิมพ์ บริษัทเอกชนรายย่อยที่ผลิตหมึก (ink) และผู้ประกอบการใหม่ที่ต้องการลงทุนทางด้านพิมพ์วงจร อิเล็กทรอนิค โดยช่องทางหลักที่ทำให้หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินเข้าถึงกลุ่มผู้ประกอบการคือ งาน Thailand Research Expo 2009

7. พัฒนาวิธีการผลิตหมึกนำไฟฟ้า ให้สามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก

การทดสอบพิมพ์วงจรอิเล็กทรอนิคแต่ละครั้ง จำเป็นที่จะต้องใช้หมึกนำไฟฟ้าในปริมาณเนื่องจากต้องมีส่วนที่สูญเสียไปกับการทดลองพิมพ์ การปรับอัตราการไหล การปรับขนาดของหยด ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาวิธีการผลิตหมึกนำไฟฟ้าให้ได้ในปริมาณมากโดยที่ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของหมึกนำไฟฟ้า จึงต้องมีการพัฒนาวิธีการผลิตเพื่อให้ได้หมึกนำไฟฟ้าที่เพียงพอต่อไปนำไปทดลองใช้

8. ได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand และต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าแบบผง (silver powder)

การพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าบนวัสดุรองรับ เทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การพิมพ์แบบ drop-on-demand คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าที่ใช้สำหรับพิมพ์ผ่านเครื่องพิมพ์ drop-on-demand และสามารถขยายกำลังการผลิตได้มากขึ้น

9. บริษัททดลองพิมพ์ต้นแบบหมึกนำไฟฟ้าผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand

รูปที่ 9 เครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand model PH-41 MicroFab TECHNOLOGIES.Inc ใช้สำหรับพิมพ์หมึกลงบนวัสดุรองรับ สามารถนำมาประยุกต์ใช้พิมพ์หมึกนำไฟฟ้าได้

วงจรที่สร้างขึ้นมานั้นสามารถสั่งพิมพ์ได้จากเครื่องคอมพิวเตอร์ในลักษณะเดียวกับการพิมพ์หมึกพิมพ์ทั่วไป โดยเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand นี้จะสามารถควบคุมขนาดของหยดได้ในระดับไมโครลิตร และสามารถควบคุมความต่อเนื่องของหยด เพื่อสร้างเป็นลวดลายต่าง ๆ บนวัสดุรองรับได้ ซึ่งในกรณีที่เป็นหมึกนำไฟฟ้าก็สามารถสร้างแผ่นวงจรไฟฟ้า หรือวงจรรับสัญญาณได้เช่นกัน จากการทดลองเบื้องต้น คือ สามารถพิมพ์หมึกนำไฟฟ้าผ่านเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand โดยสามารถควบคุมขนาดของหยด และความต่อเนื่องของหยดได้ และวงจรที่พิมพ์ออกมานั้นมีค่าความต้านทานเท่ากับ 0.51 Ω ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้เป็นวงจรรับสัญญาณวิทยุ อย่างไรก็ตามผู้วิจัยทดลองใช้ผลิตภัณฑ์หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินภายใต้ชื่อทางการค้า FLYGON® พบว่าหมึกนำไฟฟ้าต้องใช้เวลาในการให้สารละลายระเหยนาน (ผลิตภัณฑ์แนะนำให้ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C) และยึดติดกับวัสดุรองรับได้ไม่ดีนัก แต่อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานไฟฟ้าที่วัดมีค่าเท่ากับ 0.10 Ω การที่หมึกนำไฟฟ้าของ FLYGON® มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีกว่านั้น เนื่องจากมีปริมาณอนุภาคเงินอยู่มาก อย่างไรก็ตามคณะผู้วิจัย และผู้ประกอบการเองมีความเห็นที่ตรงกันคือ หมึกนำไฟฟ้าที่คณะผู้วิจัยได้คิดค้นขึ้นนั้น สามารถนำมาใช้ผลิตเป็นวงจรรับรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพดีอยู่แล้ว ไม่จำเป็นต้องนำเข้าผลิตภัณฑ์จากต่างประเทศ

10. ปรับปรุงคุณสมบัติหมึกนำไฟฟ้าให้มีค่าความต้านต่ำลง และสามารถยึดติดกับวัสดุรองรับได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามจากการสอบถามผู้ประกอบการ การพิมพ์ด้วยวิธี drop-on-demand ลงบนวัสดุรองรับนั้นต้องพิมพ์ซ้ำหลายครั้งเพื่อให้วงจรที่พิมพ์ออกมานั้นนำไฟฟ้าได้ คณะนักวิจัยจึงพยายามพัฒนาสูตรเพื่อให้หมึกนำไฟฟ้ามีความต้านทานที่ต่ำลงอีก โดยการลดความเข้มข้นของ stabilizer ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ไม่นำไฟฟ้า และได้มีการปรับปรุงวิธีในการผสม เพื่อทำให้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินกระจายตัวอยู่ในตัวกลางได้ดี และไม่ตกตะกอน แต่ผลที่ตามมาคือ shelf life ของหมึกนำไฟฟ้าสั้นลง คืออนุภาคเกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้เร็วขึ้น อย่างไรก็ตาม หากทางผู้ประกอบการสั่งไปแล้วใช้ทันทีหรือ เก็บไว้ไม่เกินหนึ่งอาทิตย์ หมึกนำไฟฟ้ายังสามารถกระจายตัวได้ดีอยู่

อย่างไรก็ตามคณะนักวิจัยยังคงพัฒนาหนึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินให้มี shelf life ที่นานขึ้น เพื่อให้มีความเหมาะสมกับการนำไปใช้จริงมากยิ่งขึ้น และอีกตัวแปรหนึ่งที่คณะนักวิจัยให้ความสำคัญเป็นอย่างมากคือ ความสามารถในการขยายกำลังการผลิต โดยวิธีการสังเคราะห์หมึกนำไฟฟ้าจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินที่คณะนักวิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้น คณะนักวิจัยได้มีการทดลองขยายกำลังการผลิตควบคู่กันได้ด้วยเสมอ

นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยได้มีการเผยแพร่ผลงานวิจัยผ่านทางการประชุมวิชาการระดับชาติ และนานาชาติ ตลอดจนมีการนำเสนอผลงานผ่านนิทรรศการต่าง ๆ ดังเอกสารแนบที่ 2

การใช้ประโยชน์จากผลงานวิจัย

- ใช้สำหรับซ่อมแซมวงจรไฟฟ้า
- ใช้ในการสร้างวงจรไฟฟ้าด้วยวิธีการเขียน พิมพ์ด้วยวิธีการประทับ พิมพ์ด้วยวิธีการสกรีน และพิพม์ด้วยเครื่องพิมพ์แบบ drop-on-demand
- สามารถพัฒนาให้ผลิตวงจรไฟฟ้า หรือวงจรรับสัญญาณในปริมาณมากได้โดยผ่านเครื่องแบบ drop on demand หรือเครื่องพิมพ์ชนิดอิงค์เจ็ท
- เนื่องจากอนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินมีความสามารถในการป้องกันการเจริญเติมโตของเชื้อแบคทีเรีย ดังนั้นจึงสามารถให้อนุภาคระดับนาโนเมตรของเงินความเข้มข้นต่ำเคลือบพื้นผิวที่ต้องการด้วยวิธีการสเปย์ (spay coat) หรือด้วยวิธีการจุ่ม (dip coat) แล้วให้ความร้อนหรือฉายแสงอัลตราไวโอเลต เพื่อให้อนุภาคเงินติดกับวัสดุรองรับ และทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติในการป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย
- ใช้ในการประดิษฐ์หรือซ่อมแซม (metal adhesive) เครื่องประดับเงินที่เสียหายเนื่องจากการแตกหักเพียงเล็กน้อย เนื่องจากหมึกนำไฟฟ้าสามารถพัฒนาให้มีคุณสมบัติเป็นสารยึดติด จากนั้นนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 300-600 องศาเซลเซียส เพื่อให้อนุภาคเงินซินเทอร์ และหลอมเชื่อมกับผิวของโลหะเงินที่มีอยู่เดิม
- ใช้เป็นสี (paint) เพื่อเขียนลวดลายต่าง ๆ เนื่องจากเมื่อหมึกนำไฟฟ้าแห้งบนวัสดุรองรับแล้วจะมีความเงางามเหมือนโลหะเงิน

10. ข้อเสนอแนะ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการที่มุ่งพัฒนาวัสดุนาโนด้วยเทคโนโลยีพันธุ์ไทย เพื่อให้คนไทยได้ประโยชน์จากการใช้เทคโนโลยีราคาถูกของคนไทยเอง ถึงแม้ต้นแบบผลิตภัณฑ์จะอยู่ในช่วงการพัฒนาร่วมกับผู้ประกอบการ แต่จากผลการทดลองดังที่รายงาน ผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพเทียบเท่า และราคาถูกกว่าผลิตภัณฑ์ที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ นอกจากนั้นผู้ประกอบการเองยังสามารถพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ได้ โดยการพัฒนาผลิตภัณฑ์รวมกับคณะผู้วิจัย ซึ่งจะเป็นการต่อยอดงานวิจัยเพื่อให้นำไปใช้ให้เกิดประโยชน์เชิงพาณิชย์อย่างแท้จริง

(ลายเซ็น) .....

(นายชุติพันธ์ เลิศวชิรไพบูลย์)

หัวหน้าโครงการวิจัย

24 มิถุนายน 2553

ภาคผนวก