



## รายงานการวิจัยเรื่อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ระบบพิมพ์สามมิติ  
(Parameter of  $\text{TiO}_2$  printing on the electrode plate by 3D printing system)

นางสาว นภสร ตันวรเศรษฐ์

นางสาว สุนิษา พฤกษ์มาศ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)

1

are the senior project authors' files submitted through the faculty.



รายงานการวิจัยเรื่อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ระบบพิมพ์สามมิติ  
(Parameter of  $\text{TiO}_2$  printing on the electrode plate by 3D printing system)

นางสาว นภสร ตันวรเศรษฐี

นางสาว สุนิษา พฤกษมาศ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์

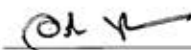
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2561

หัวข้อโครงการ	ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป $\text{TiO}_2$ บนแผ่นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ระบบพิมพ์สามมิติ
โดย	นางสาว นกสร ตันวรเศรษฐี นางสาว สุนิษา พฤษมาศ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	รศ.ดร. อรัญ หาญสืบสาย

---

วันที่ส่ง..... 23/5/62...

วันที่อนุมัติ..... 23/5/62...



อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ  
(รศ.ดร. อรัญ หาญสืบสาย)



**Research Student**      Napasorn Tanvarasethee      ID No. 5832620523  
   Sunisa Prucksamas      ID No. 5832645223

**Project title**      Parameters of 3D printing system affecting TiO<sub>2</sub> fabrication on the electrode plate

**Project Advisor**      Associated Professor Dr. Aran Hansuebsai

**Abstract**

This study is aimed to find parameters of 3D printing system affecting TiO<sub>2</sub> fabrication on the electrode plate by configuring 3 factors including distance between nozzle and electrode plate, air pressure, printing speed and nozzle size. We used the 3D printer - Liquid Deposition Modeling (LDM) type. Experiment was done by multilayers printing from 1 to 4 layers to analyze the attributes of fabricated TiO<sub>2</sub>. Setting these parameters was necessary to achieve the TiO<sub>2</sub> layers with satisfied consistent smoothness, less brittleness and highest thickness. Results showed that the proper printing conditions should be set at nozzle size 0.21 mm., printing speed 20 mm. per min., the distance between nozzle and electrode plate 0.02 μm and air pressure 3 kg / cm<sup>2</sup>.

Department of Imaging and Printing Technology  
Faculty of Science  
Academic year 2018

Student's signature Napasorn Tanvarasethee  
Student's signature Sunisa Prucksamas  
Main advisor's signature Aran Hansuebsai



## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีหากขาดบุคคลดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อรัญ หาญสืบสาย อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงานซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำโครงการวิจัย อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทางด้านภาพถ่ายและการพิมพ์ ช่วยสั่งสอนและให้คำแนะนำตลอดการศึกษา

ขอขอบคุณ Assistant Professor Kazuhiro Manseki ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาตลอดการทำโครงการวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่น

ขอขอบคุณ คุณนวพร เหล่าวัฒนธรรม และบริษัท วินเนอร์โปรดักส์ไทย ที่ให้ความรู้และข้อมูลเกี่ยวกับเครื่องพิมพ์สามมิติ

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

นภสร ตันวรเศรษฐี

ศุภนิษา พฤกษมาศ

ผู้วิจัย

## สารบัญ

บทคัดย่อ.....	4
Abstract.....	5
กิตติกรรมประกาศ .....	7
บทที่ 1 .....	9
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ (Theme and background).....	9
1.2 วัตถุประสงค์ (Objective).....	10
1.3 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study).....	10
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ .....	11
บทที่ 2 .....	12
2.1 ทฤษฎี .....	12
2.1.1 3D Printing Technology .....	12
2.1.2 DSSC (Dry-Sensitized-Solar Cell).....	15
2.1.3 TiO <sub>2</sub> (Titanium dioxide).....	17
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (1).....	17
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (2).....	21
บทที่ 3 .....	23
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 วัสดุอุปกรณ์.....	23
3.2 ขั้นตอนการสร้างรูปทรงต้นแบบ .....	23
3.3 ขั้นตอนการตั้งค่าเครื่องพิมพ์สามมิติ.....	24
3.4 ขั้นตอนการเตรียมสาร .....	28
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	29
4.1 ผลการทดลอง.....	29
ผลการทดลองหา condition ที่จะศึกษา.....	29
ผลการทดลองก่อนนำไปอบแห้ง .....	30
ผลการทดลองหลังนำไปอบแห้ง.....	31
ผลการทดลองวัดด้วยเครื่อง SEM .....	33
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	37
บทที่ 5 .....	38
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	38
บรรณานุกรม.....	41



# บทที่ 1

## บทนำ

### (INTRODUCTION)

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ (Theme and background)

เทคนิคใช้ในการขึ้นรูปของเครื่องพิมพ์สามมิติ มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีตัวอย่างเช่น Sterero lithograpghy (SLA) เป็นการขึ้นรูปโดยการยิงเลเซอร์ไปบนของเหลว เพื่อให้ของเหลวในแต่ละชั้นแข็งตัว อีกเทคนิคที่นิยมกันมากคือ Fused Deposition Modeling (FDM) ใช้วัสดุเป็นพวก Thermal plastic ส่งผ่านไปยังหัวจ่าย ซึ่งจะหลอมให้พลาสติกละลายก่อน แต่การศึกษาเบื้องต้นจากการฝึกงานพบว่า ระบบ FDM มีความสามารถในการพิมพ์  $TiO_2$  ได้ไม่ดีเท่า ระบบ LDM ที่เป็นการใช้วัสดุที่เป็นของเหลวเช่นกัน แต่ใช้แรงดันหรือลม ในการควบคุมปริมาณของเหลวที่ปล่อยออกมา โดยเปลี่ยนจากหัวฉีดเป็นหัวเข็มแทน สามารถขึ้นรูปให้ชั้นบางได้ ในกระบวนการผลิตเซลล์สุริยะในปัจจุบันส่วนใหญ่จะใช้การพิมพ์แบบสกรีน ซึ่งการพิมพ์แบบสกรีนนั้นมีข้อจำกัดอยู่ที่ ไม่สามารถขึ้นรูปให้บางได้ และกระบวนการผลิตยังต้องมีกระบวนการเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นฐานรอง (substrate) ซึ่งได้แก่ แผ่นซิลิกอน (Silicon) ทำให้ต้นทุนการผลิตเซลล์สุริยะต่อหน่วยพื้นที่มีราคาแพง อีกปัญหาหนึ่ง คือ ถ้าทำไม่สามารถขึ้นรูปเซลล์สุริยะให้บางได้ จะส่งผลกระทบต่อ น้ำหนัก ทำให้บ้านที่ต้องการจะติดตั้งแผงเซลล์สุริยะบนหลังคา ต้องเสียค่าใช้จ่าย ในการเตรียมโครงสร้างหลังคาให้สามารถรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น (ดร. อติสร เตือนตรานนท์, 2013: online ) และซิลิกอนก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่วนเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสง มีขั้นตอนการผลิตง่ายและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยในการผลิตเซลล์สุริยะชนิดสียอมไวแสงในปัจจุบันนั้น มีการใช้  $TiO_2$  และ dyes ในการเคลือบลงบนแผ่นซั้วอิเล็กโทรด ไททาเนียมไดออกไซด์ มีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก และสียอมไวแสงนั้นมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้มากในหลายช่วงความยาวคลื่น มีความเสถียร และยึดเกาะบนผิวของอนุภาคโลหะออกไซด์ได้ดี

ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide:  $TiO_2$ ) เป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียม ที่ถูกนำมาใช้มากในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ เนื่องจากมีความเสถียรสูง ไม่เป็นพิษ และราคาถูก มีชื่อทางการค้า คือ ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titaniumdioxide) ไททานิกแอนไฮไดรด์ (Titanic anhydride) และไททาเนีย (Titania)

ชนิดไททาเนียมไดออกไซด์ แบ่งตามโครงสร้างของผลึก ได้แก่

1. รูไทล์ (rutile) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบมากที่สุด ในธรรมชาติ มีความคงทน และเสถียรต่อการเปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิที่สูง

2. อนาเทส (anatase) มีโครงสร้างผลึกแบบเทตระโกนัล (tetragonal) เป็นชนิดที่พบในธรรมชาติปานกลาง หากให้ความร้อนสูงกว่า 915 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

3. บรูคไคท์ (brookite) มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เป็นชนิดที่พบได้น้อยในธรรมชาติ มีความเสถียรต่ออุณหภูมิต่ำ หากได้รับความร้อนมากกว่า 750 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนโครงสร้างผลึกเป็นแบบรูไทล์

ปัจจุบันไททาเนียมไดออกไซด์ที่นิยมนำมาใช้ประโยชน์มากมักใช้ในรูปของผลึกแบบรูไทล์ (rutile) ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ซึ่งพบมากในธรรมชาติ ส่วนชนิดอนาเทส (anatase) นิยมใช้ในกระบวนการใช้แสงขึ้นสูง การนำมาใช้ประโยชน์เกี่ยวข้องกับด้านต่าง ๆ

จากความเป็นมา และความสำคัญของปัญหาข้างต้น จะเห็นถึงความสำคัญของเซลล์สุริยะชนิดสีขมัวแสงว่าช่วยแก้ไขปัญหาด้านเรื่องต้นทุน และการพิมพ์สามมิติช่วยในเรื่องกระบวนการผลิตที่รวดเร็วและง่ายขึ้น แต่ในการใช้เครื่องพิมพ์แบบสามมิตินั้นก็มีปัจจัยหลายอย่างในการผลิตทั้งขนาดหัวฉีด ชนิดของเครื่องพิมพ์ ความหนาในการพิมพ์ เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงให้ความสำคัญเพื่อศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป  $TiO_2$  บนแผ่นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ระบบพิมพ์สามมิติ

## 1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการพิมพ์ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป  $TiO_2$  บนแผ่นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้ระบบพิมพ์สามมิติและเพื่อหาสภาพการพิมพ์ที่เหมาะสม ได้ชั้นและความหนาของ  $TiO_2$  ที่สม่ำเสมอและสามารถนำไฟฟ้าได้ดี

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา (Scope of study)

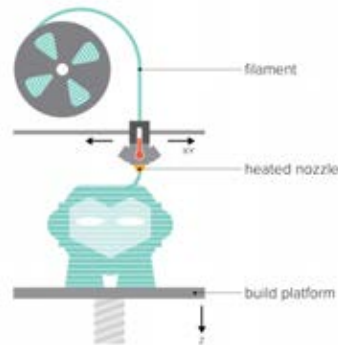
ทำการศึกษาค่า parameter ที่ใช้ในการพิมพ์  $TiO_2$  เพื่อให้ได้รูปร่างและประสิทธิภาพที่ดีที่สุดด้วยระบบการพิมพ์สามมิติ

#### 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รู้ค่า parameter ที่ใช้ในการพิมพ์ TiO<sub>2</sub> ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดและสามารถนำไปต่อยอดเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของโซลาเซลล์ที่พิมพ์สามมิติได้

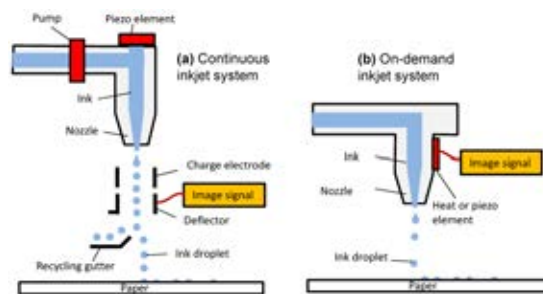


FDM(Fuse Deposition Modeling ): เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การฉีดเส้นพลาสติกหรือโลหะ โดยที่จะให้ความร้อนแก่เส้นพลาสติกให้พลาสติกละลายแล้วฉีดลงบนฐาน ซึ่งเส้นพลาสติกนั้นจะแห้งตัวเร็วมากเมื่อเจอลมหรืออากาศ วัสดุที่ใช้จะเป็นพวก thermoplastic



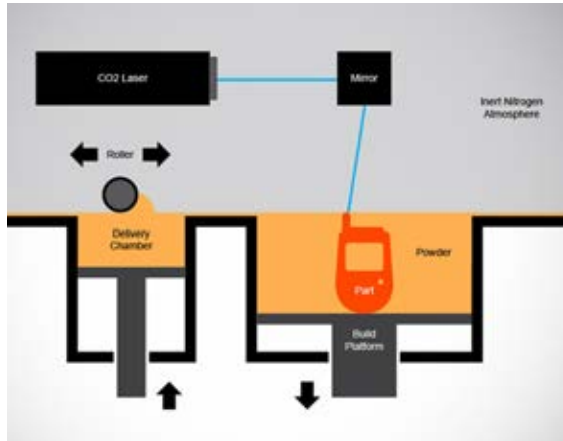
รูป 2.2 แผนภาพการพิมพ์ระบบ FDM (ที่มา : <https://www.3dlink.nl/wp-content,2561>)

Jet Printer system: เป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการงานเหมือนกับเครื่องพิมพ์ ink let แต่เป็นสามมิติ



รูป 2.3 แผนภาพการพิมพ์ระบบ Jet Printer system (ที่มา : <https://res.mdpi.com/micromachines,2561>)

SLS (Selective Laser Sintering): เป็นเทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการหลอมหรือเผาวัสดุด้วยแสงเลเซอร์ วัสดุที่ใช้จะเป็นผง หลักการทำงานจะคล้าย ๆ กับ SLA



รูป 2.4 แผนภาพการพิมพ์ระบบ SLS (ที่มา : <http://www.iotasigma.co.uk>,2561)

LDM (Liquid Deposition Modeling): เป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการพิมพ์ของเหลว โดยที่ระบบจะคล้าย ๆ กับ FDM แต่จะใช้ความดันและลมในการควบคุมปริมาณของเหลวที่จะฉีดออกมา



รูป 2.5 รูปหัวพิมพ์ของการพิมพ์ระบบ LDM (ที่มา : <https://www.personalfab.it>,2561)

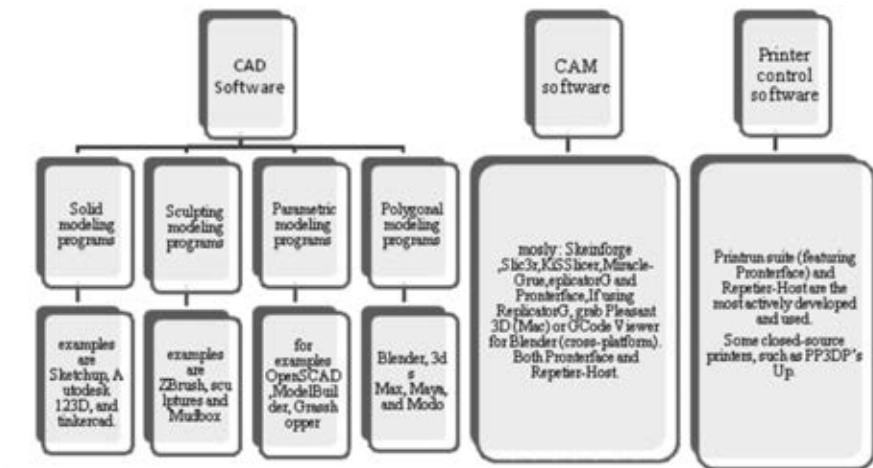
#### ขั้นตอนการสร้างแบบสามมิติ

ขั้นตอนแรกจะต้องมีแบบที่จะสร้างขึ้นมาก่อนซึ่งเราจะสร้างขึ้นมาด้วย Software เมื่อสร้างขึ้นมาเสร็จแล้ว เซฟไฟล์ที่จะใช้พิมพ์เป็นไฟล์ stl นำไฟล์นั้นไปเข้าโปรแกรม Slicer เพื่อที่จะ Slice เป็นชั้น ๆ 2 มิติ จำนวนชั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดที่เรากำหนด เพื่อที่จะพิมพ์งานซ้อนทับกันจนเกิดเป็นรูปร่างสามมิติขึ้นมาหลังจากนั้นก็เอาไปพิมพ์ที่เครื่องพิมพ์สามมิติจนได้โมเดลสามมิติขึ้นมา

## Software ที่ใช้ในการสร้างแบบ

ในการสร้างโมเดลสามมิติขึ้นมาจะต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการสร้างแบบขึ้นมาซึ่งมีหลัก ๆ 3 ประเภท ได้แก่ computer

aided design (CAD) , the computer-aided manufacturing (CAM) และ the printer control software



### 2.1.2 DSSC (Dry-Sensitized-Solar Cell)

DSSC หรือเรียกว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดย้อมสารไวแสง ที่เรารู้จักกันในชื่อ Solar cell เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่ง DSSC นั้นเมื่อแสงเข้ามากระทบสีย้อมไวแสงที่เคลือบเอาไว้ สีย้อมจะถูกกระตุ้นไปที่ Excited State และส่งกระแสไฟฟ้าขั้วลบผ่าน  $\text{TiO}_2$  ที่เคลือบ Dyes อยู่ เคลื่อนไปยังขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าด้านที่รับแสงจะให้กระแสขั้วลบ เมื่อผ่านวงจรไฟฟ้าก็จะส่งอิเล็กตรอนผ่าน Electrolyte กลับสู่ Dyes และเกิดซ้ำ

ในปัจจุบันนี้นักวิจัยสามารถทำให้มีประสิทธิภาพได้มากที่สุดเพียงแค่ 12% เท่านั้นแต่ยังมีการพัฒนาต่อเพื่อให้สามารถผลิต solar cell ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

#### กระบวนการของ DSSC

- 1 โพรตอนถูกดูดซับโดยสารไวแสง RU complex ซึ่งอยู่บน  $\text{TiO}_2$
- 2 Photosensitizer ถูกกระตุ้นจาก Ground state ไปยัง Excited state อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นแล้วจะถูกส่งไปยัง conduction band ของขั้วไฟฟ้า  $\text{TiO}_2$  ซึ่งส่งผลให้เกิดการ Oxidation ของ Photosensitizer

- 3 Electron ที่ถูกส่งไป conduction band ของ  $\text{TiO}_2$  ถูกส่งต่อระหว่าง  $\text{TiO}_2$  nanoparticles โดยการแพร่ผ่าน back contact (TCO) และสุดท้ายอิเล็กตรอนก็วิ่งไปสู่อีกขั้วหนึ่งโดยผ่านวงจรไฟฟ้า
- 4 Photosensitizer ที่ถูก oxidize ( $\text{S}^+$ ) รับอิเล็กตรอนจาก  $\text{I}^-$  ซึ่งนำไปสู่การสลายตัวของ ground state  $2\text{I}^-$  และ  $2\text{I}^-$  ซึ่งถูก oxidize ไปเป็น  $\text{I}_2$  ไปเป็น  $\text{I}^-$  และ oxidize ไปเป็น  $3\text{I}^-$
- 5 ตัวกลางในการ oxidized ซึ่งคือ  $\text{I}_3^-$  แพร่ไปสู่อีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งและถูก reduce ให้กลายเป็น  $\text{I}^-$

ประสิทธิภาพของ DSSC ขึ้นอยู่กับ 4 ระดับชั้นพลังงานขององค์ประกอบต่อไปนี้ LUMO HOMO ของ photosensitizer พลังงานศักย์เคมีรวมสำหรับอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้า  $\text{TiO}_2$  และความต่างศักย์ของตัวกลาง ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ) ใน electrolyte

#### ประสิทธิภาพของ DSSC

ถึงแม้ว่า dyes จะมีการดูดซึม photon ในอิเล็กตรอนอิสระใน  $\text{TiO}_2$  แต่มีเพียงแค่ photon เท่านั้นที่สามารถดูดซึมโดย dye ในการสร้างกระแสไฟฟ้าที่สูงที่สุด อัตราการดูดซึมของ photon ขึ้นอยู่กับการดูดกลืนสเปกตรัมของ sensitizer ของชั้น  $\text{TiO}_2$  และบนการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ การเหลื่อมล้ำระหว่างสองสเปกตรัมเป็นตัวกำหนดกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ทำได้ โดยทั่วไปแล้ว dye molecule จะดูดซึมได้ไม่ดีในช่วงสีแดงเมื่อเทียบกับซิลิกอน ซึ่งหมายความว่าไม่เพียงไม่ photon ของแสงอาทิตย์ที่จะสามารถนำมาใช้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งถ้าจะให้เปรียบเทียบ กับ silicon-based solar cell ที่ใช้กันในสมัยก่อนที่ได้พลังงาน  $35 \text{ mA/cm}^2$  DSSC นั้นได้พลังงาน  $20 \text{ mA/cm}^2$  ซึ่งมีค่านี้น้อยกว่า

#### ข้อดีของ DSSC

ข้อดีที่เด่นที่สุดคือมีรูปร่างที่บางและแข็งแรง ทนทานกว่าเมื่อเทียบกับ silicon-base solar cell ไม่จำเป็นต้องรับแสงโดยตรงจากแสงอาทิตย์โดยตรง แต่สามารถใช้ตอนมีเมฆ หรือใช้ในอาคาร บ้านเรือนได้ด้วย สามารถใช้ได้ในทุกสภาพอากาศ แต่จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อมีอุณหภูมิสูง

#### ข้อเสียของ DSSC

ข้อเสียหลัก ๆ คือ DSSC นั้นใช้ liquid electrolyze ซึ่งอุณหภูมิมีผลต่อความเสถียรของ electron หากอุณหภูมิสูงอาจทำให้เกิดการขยายตัว แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไปก็อาจทำให้เกิดการแข็งตัว ข้อเสีย



ต่อมาคือ dye catalyst และแก้วหรือพลาสติกที่จะนำมาใช้นั้นมีราคาแพง และข้อเสียที่สำคัญอีกอย่างคือมี VOC หรือ volatile organic compounds ซึ่งมีผลต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม

### 2.1.3 TiO<sub>2</sub> (Titanium dioxide)

Titanium dioxide หรือที่รู้จักกันกันในชื่อ **titanium(IV) oxide** และ **titania** ซึ่งเป็นการเกิดขึ้นตามธรรมชาติโดยเป็น oxide ของ titanium ซึ่งมีสูตรคือ TiO<sub>2</sub> โดยถูกจำแนกได้เป็น rutile anatase และ ilmenite ซึ่งถูกใช้ในหลายวัตถุประสงค์เช่น ส่วนผสมในครีมกันแดด สีทา และสีผสมอาหาร

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (1)

ศึกษา TiO<sub>2</sub> Electrode ที่มีโครงสร้างแตกต่างกันบน Dye-Sensitized Solar Cell

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคำการใช้โครงสร้างขั้วไฟฟ้าของ TiO<sub>2</sub> ที่แตกต่างกันในการสร้าง Dye-Sensitized Solar Cell โครงสร้างที่ต่างกันที่เราศึกษานั้นจะประกอบไปด้วย 1.การสังเคราะห์ nano-particles ของ TiO<sub>2</sub> และขั้วไฟฟ้าของ TiO<sub>2</sub> film โดยใช้วิธี sol-gel และ spin-coating 2.การสร้างฟิล์มขั้วไฟฟ้าของ TiO<sub>2</sub> โดย RF-Sputtering 3. การสร้างแท่งไฟฟ้าของ TiO<sub>2</sub> โดยใช้ photo lithography การเลี้ยวเบนของรังสี X-ray แสดงให้เราเห็นว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ดีที่สุดของแผ่นฟิล์ม TiO<sub>2</sub> คือ 500 องศาเซลเซียส และโครงสร้างแบบ anatase จะดีที่สุดและได้ขนาดอนุภาคที่เล็กที่สุด (8-10 nm) การทดลอง

ในการวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎี sol-gel ,RF sputtering และ photolithography ในการเตรียม TiO<sub>2</sub> electrodes ที่แตกต่างกันและศึกษาอิทธิพลของความสัมพัทธ์ของ dye-sensitized solar cells

#### วิธี Spin-coating

Nano- TiO<sub>2</sub> electrode สามารถเตรียมได้จาก Ti (OC<sub>4</sub>H<sub>9</sub>) และ C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH เป็นสารตั้งต้นโดยใช้ sol-gel เติมน้ำละลาย HCL เพื่อควบคุมปฏิกิริยา hydrolysis วัตถุประสงค์ของการเติมน้ำเพื่อเร่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยา ตัวอย่างถูกอบในอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีในอากาศ นี่เป็นการเตรียม Nano- TiO<sub>2</sub> electrode บน แก้วนำไฟฟ้าของ ITO

#### วิธี RF Sputtering

เตรียม  $\text{TiO}_2$  โดยใช้ Ti เป็นเป้าหมายในการ RF Sputtering และยึดแก้วนำไฟฟ้าเข้ากับเทปกาวที่ทนความร้อน เราจะเอาอากาศออก  $5 \times 10^{-6}$  torr จนกระทั่งเป็นสุญญากาศแล้วพ่นพลาสติกมาลงไป นำฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ไปอบที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที นี่คือการเตรียมฟิล์มนำไฟฟ้าของ  $\text{TiO}_2$

วิธีทำแท่งนำไฟฟ้าของ  $\text{TiO}_2$  โดย photo lithography

ขั้นแรกเราจะล้างแผ่นฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  ด้วย acetone ตัวอย่างจะถูกอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงนำมาเคลือบด้วย negative photo-resister จนมีความหนาประมาณ  $4 \mu\text{m}$  เราจะใส่ photo mask เพื่อฉายแสงและอบเป็นเวลา 5 นาทีแล้วหยิบตัวอย่างออกมาเพื่อนำมาพัฒนา เราจะใช้การกัดเพื่อกำจัดฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  และใช้ acetone เพื่อกำจัด photo-resister บนฟิล์ม  $\text{TiO}_2$  นี่เป็นการเตรียม  $\text{TiO}_2$  electrode

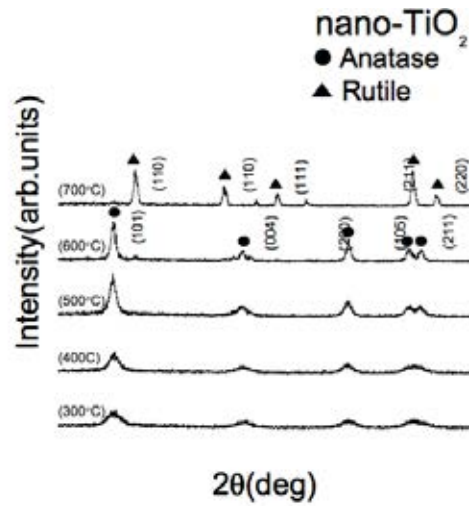
การประกอบ dye-sensitized solar cell

ชั้นของ  $\text{TiO}_2$  electrode layer จะถูกรักษาด้วย TCPP dye, (Tetrakis (4-carboxyphenyl) porphyrin) โดยการแช่ electrode ในสารละลาย ethanolic  $3 \times 10^{-4}$  M เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง electrode นั้นคือ Pt film โดยการระเหยด้วยรังสีอิเล็กตรอนบนกระจก ITO electrode  $\text{I}/\text{I}_3$  ประกอบด้วยส่วนผสมของ ไอโอดีน และ  $\text{I}_2$  ใน acetonitrile และสุดท้ายเราจะใส่ ITO /  $\text{TiO}_2$  (ลึย้อม) / [0.5M KI, 0.05M  $\text{I}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{CN}$ ] / Pt / ITO เพื่อให้ DSSC สมบูรณ์

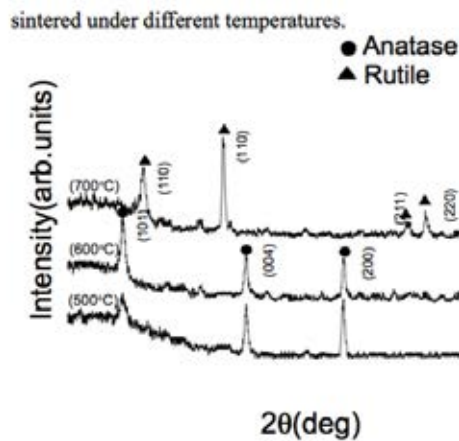
การวัดลักษณะของ photo electrode

การวัดลักษณะของรูปอิเล็กทรอนิกส์ เราได้ตรวจสอบโครงสร้าง electrode  $\text{TiO}_2$  ที่แตกต่างกันโดยวิธีการ diffraction ของรังสีเอ็กซ์, UV / Vis spectrophotometer, การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าในปัจจุบัน ได้ศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาของพื้นผิวของ photolithography โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าในปัจจุบันของตัวอย่างถูกวัดโดยเครื่องวัดแหล่งกำเนิด Keithley 2400 และกำหนดโดยใช้แสงแดดจำลองที่ความเข้มแสงสีขาวเท่ากับ  $25 \text{ mW} / \text{cm}^2$  ตัวอย่างทั้งหมดได้รับการส่องสว่างด้วยหลอด 150W ผ่านการจำลองด้วยแสงอาทิตย์ (Newport Oriel Instruments)

ผลการทดลอง

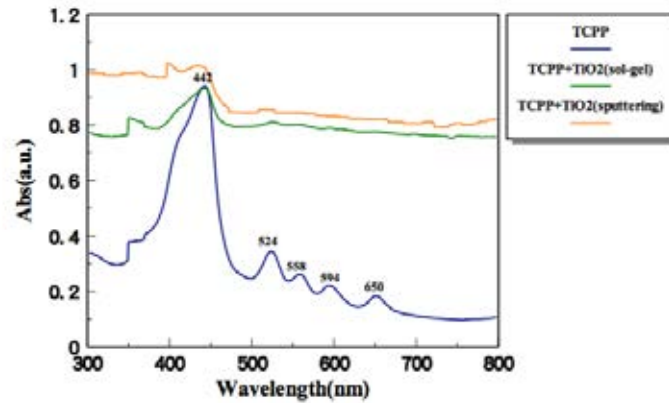


**Fig. 1** คือรูปแบบการเลี้ยวเบนของ XRD ที่ฟิล์ม nano-TiO<sub>2</sub> เผาภายใต้อุณหภูมิที่ต่างกัน เราสามารถหาค่าความเข้มของทิศทางที่เป็นผลึกได้ภายใต้อุณหภูมิกการเผาที่แตกต่างกัน เมื่ออุณหภูมิในการเผาอยู่ที่ 300 องศาเซลเซียสจะสามารถพบ anatase phase ของ nano-TiO<sub>2</sub> ได้ เมื่ออุณหภูมิในการเผาใหม่ที่ 600 องศาเซลเซียสจะพบ anatase phase ของ nano-TiO<sub>2</sub> ที่ดีที่สุด และเมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นจน 700 องศาเซลเซียส nano-TiO<sub>2</sub> จะเริ่มเปลี่ยนเป็น rutile phase แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเผาไหม้ที่ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งอนุภาคจะมีขนาดประมาณ 8-10 nm

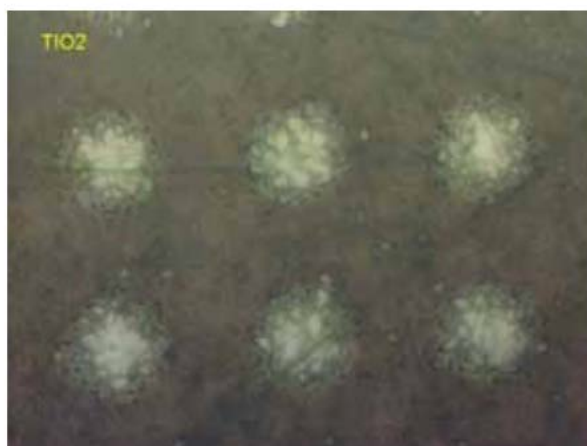


**Fig. 2** คือรูปแบบ XRD-diffraction ที่ฟิล์ม TiO<sub>2</sub> เตรียมโดย RF sputtering ที่ผ่านการอบภายใต้ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน จากรูปที่เราสามารถหาได้ก่อนที่ฟิล์มนี้จะไม่ผ่านการดัดแปลงในรูป amorphous ในขณะที่อุณหภูมิกการอบไปถึง 500 องศาเซลเซียสเราอาจค้นพบว่าทิศทางของ anatase เกิดการ crystalized ขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิกการเผาให้เป็น 600 องศาเซลเซียสจะได้เฟส anatase ที่ดีที่สุด

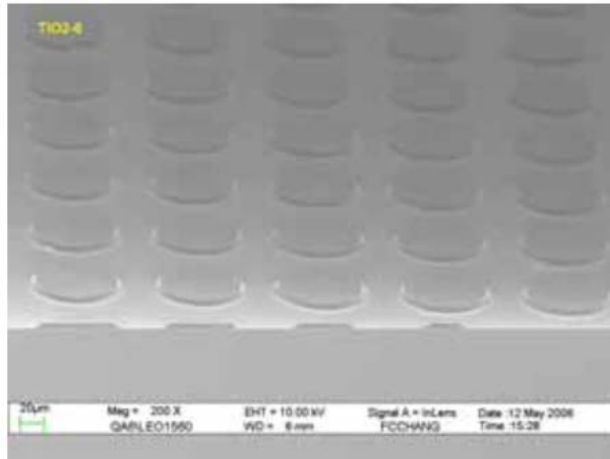
ของ TiO<sub>2</sub> ถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิการเผาขึ้นเป็น 700 oC फिल्म TiO<sub>2</sub> จะเปลี่ยนเป็นเฟส rutile ผลที่ได้นี้คล้ายกับที่สังเกตได้จากฟิล์ม nano-TiO<sub>2</sub>



**Fig. 3** เป็นสเปกตรัมการดูดซับของสารละลาย TCP และ TCP บนพื้นผิว TiO<sub>2</sub> พบว่ามีการดูดกลืนหลายจุดสำหรับ TCP ที่ 428 nm สำหรับ B band และที่ 512, 546, 588 และ 644 nm สำหรับ Q band ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่รายงาน เราสามารถหาค่าสเปกตรัมการดูดซึมของ electrode TCP / TiO<sub>2</sub> จาก 400 นาโนเมตรถึง 700 นาโนเมตรได้ค่าเกือบคงที่และชัดกว่า TCP ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าขั้วไฟฟ้า TiO<sub>2</sub> ของ dye-sensitized solar cell สามารถช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงที่มองเห็นได้ (400 นาโนเมตร ~ 700 นาโนเมตร)



**Fig. 4** เป็นภาพ SEM ของฟิล์ม TiO<sub>2</sub> หลังการพิมพ์ ในภาพเราสามารถหาการกระจายและขนาดของแต่ละลูกโมที่มีขนาดประมาณ 20 μm



**Fig. 5** เป็นมุมมองด้านบนของ SEM หลังจากการกัด แม้ว่าโครงสร้างอาจไม่ดีเท่าที่เราคาดไว้ แต่ก็ยังได้โครงสร้างที่เราต้องการ

	Voc(V)	Isc(mA)	FF%	η%
TCPP+nano-TiO <sub>2</sub> film by sol-gel	0.176	0.87	41	0.248
TCPP+TiO <sub>2</sub> film by sputtering	0.426	1.83	53	1.652
TCPP+rod TiO <sub>2</sub> film	0.441	1.91	55	1.952

**Table 1** เป็นพารามิเตอร์ของลักษณะแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของขั้วไฟฟ้า TiO<sub>2</sub> ที่ทำด้วยวิธี sol-gel วิธี sputter และ photolithography พบว่าประสิทธิภาพของ electrode rod TiO<sub>2</sub> มีค่าสูงกว่าโลหะอื่น ๆ อาจเป็นเพราะแท่ง TiO<sub>2</sub> มีการส่งผ่านแสงที่ดีกว่าและมีพื้นที่สัมผัสขนาดใหญ่กว่าและมีสีข้อมทำให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (2)

#### Particle Size Effects of TiO<sub>2</sub> Layers on the Solar Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells

ประสิทธิภาพของโซลาร์เซลล์ DSSCS ที่มีขนาด TiO<sub>2</sub> ขนาดต่างกันและจำนวนชั้นของ TiO<sub>2</sub> ที่ต่างกัน มีผลต่างกันดังนี้

สำหรับ TiO<sub>2</sub> ชั้นเดียว DSSCs ที่ขนาดอนุภาคใหญ่กว่ามีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าซึ่งประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าของ TiO<sub>2</sub> ที่ขนาดใหญ่งผลทำให้เกิดการกระเจิงแสงหลังและการดูดกลืนของสีข้อมที่น้อย

นอกจากนี้ความหนาของชั้น  $\text{TiO}_2$  ที่เหมาะสมสำหรับให้ประสิทธิภาพสูงสุดขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  สำหรับ  $\text{TiO}_2$  ที่มีสองชั้น 2DSSCs ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าที่ชั้นบนเล็กกว่าที่ชั้นล่างสามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าเพราะว่าเกิดการกระเจิงแสงหลังที่สูงกว่าและมีพื้นที่ผิวมากกว่าตามลำดับผลของการทดลองบ่งชี้ว่าการเลือกขนาดของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ที่ชั้นล่างสำคัญกว่าชั้นบนในการทำให้เกิดประสิทธิภาพที่สูงที่สุดสำหรับ  $\text{TiO}_2$  ที่มี ชั้น 3DSSCs ที่มีขนาดอนุภาค  $\text{TiO}_2$  ใหญ่ที่ชั้นบนสุดและมีขนาดเล็กในชั้นล่างสุดก็สามารถให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าซึ่งชั้นกลางขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ชั้นบนและชั้นล่างและการผสมขนาดอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  ที่แตกต่างกันในชั้นกลางเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด

Table 2 the parameters of charge transfer resistance in triple-layer structures by EIS measurements.

Triple layers (nm)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_1$ ( $\Omega$ )	$R_2$ ( $\Omega$ )
200/100/10/FTO	13.28	14.65	12.01
400/100/10/FTO	18.77	15.76	11.71
400/200/10/FTO	14.64	13.03	10.01

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์

##### 3.1.1 สารเคมี

- TiO<sub>2</sub> ชนิด PST-18NR
- แอลกอฮอล์

##### 3.1.2 โปรแกรม

- Simplify3D
- netfabb Basic 7.3

##### 3.1.3 คอมพิวเตอร์

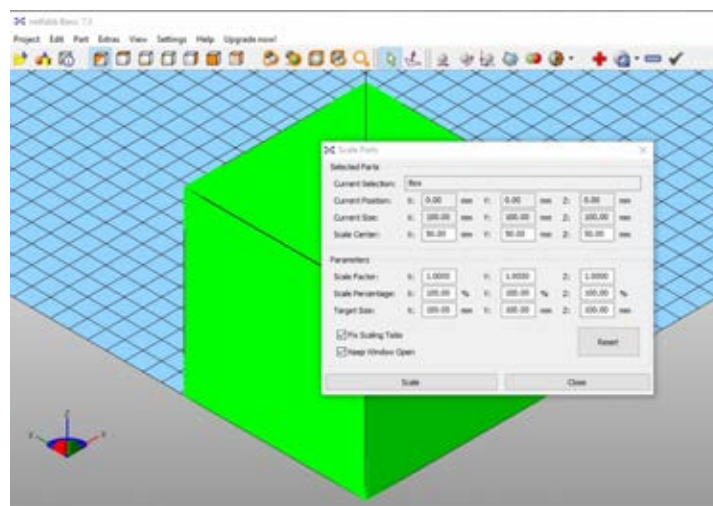
##### 3.1.4 เครื่องพิมพ์สามมิติ แบบ LDM

##### 3.1.5 เครื่องอบแห้ง

##### 3.1.6 เครื่อง conditioning mixer

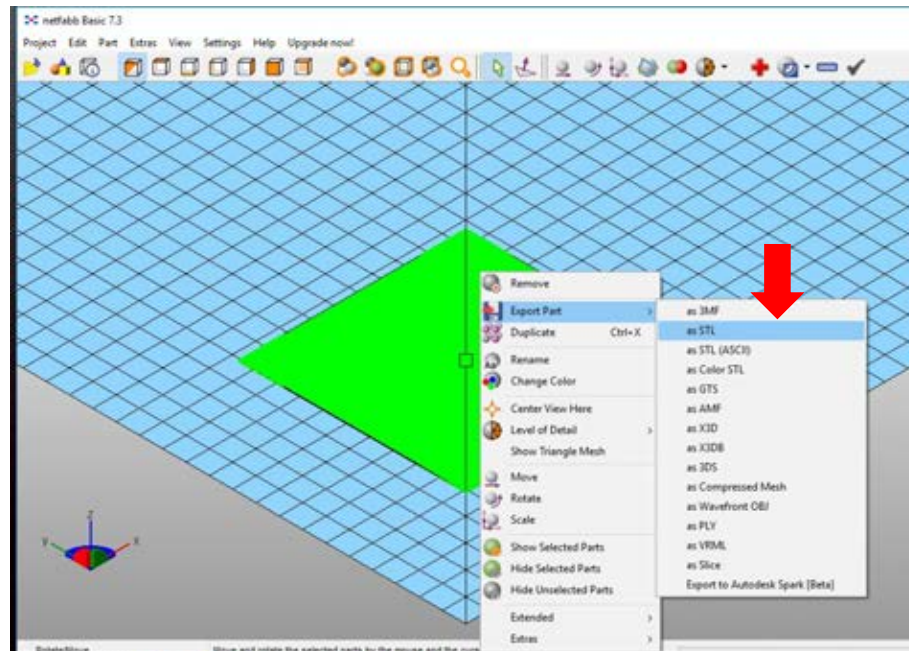
#### 3.2 ขั้นตอนการสร้างรูปทรงต้นแบบ

3.2.1 เข้าโปรแกรม netfabb Basic 7.3 เพื่อสร้างรูปทรงที่จะนำมาทำรูป โดยผู้วิจัยเลือกใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร และปรับความหนา ให้เหลือเพียง 0.0025 เซนติเมตร



รูปที่ 3.1 ภาพหน้าต่างโปรแกรมในการตั้งค่าสเกลรูปทรงต้นแบบ

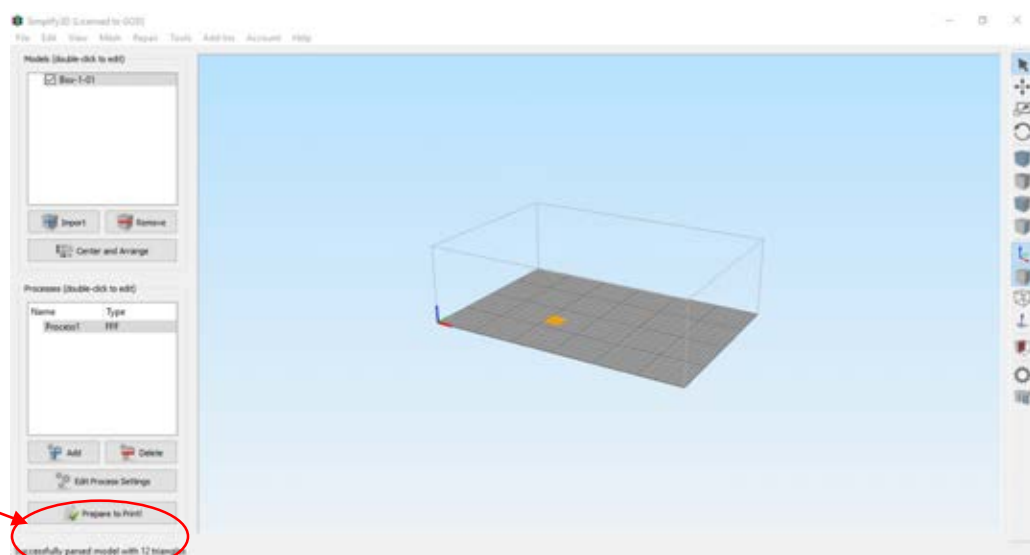
### 3.2.2 ทำการบันทึกไฟล์ เป็นไฟล์นามสกุล .STL



รูปที่ 3.2 ภาพหน้าต่างโปรแกรมการบันทึกไฟล์

### 3.3 ขั้นตอนการตั้งค่าเครื่องพิมพ์สามมิติ

#### 3.3.1 เข้าโปรแกรม Simplify3D



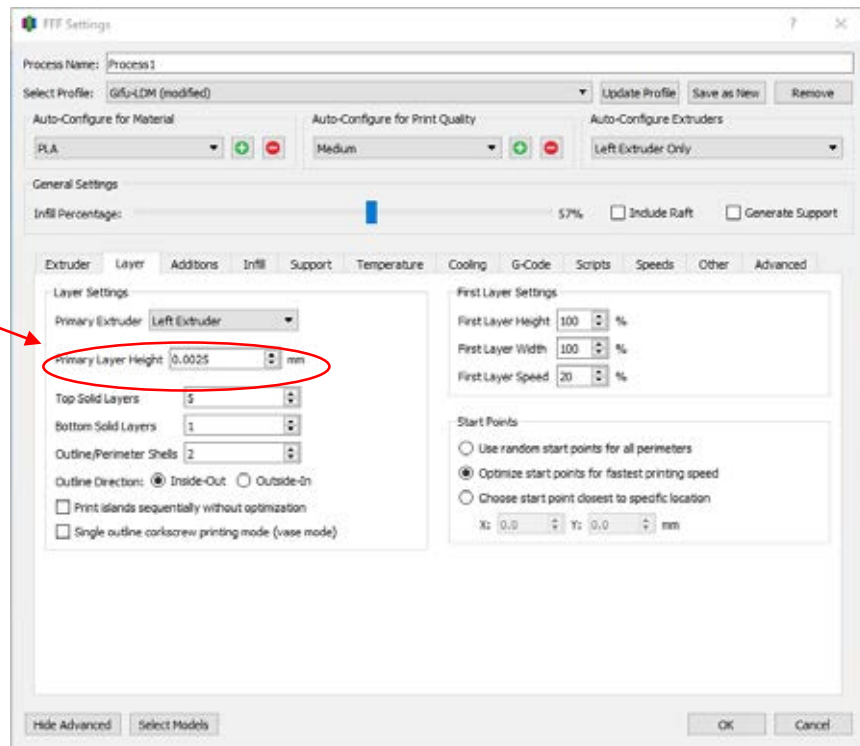
3.3.2

รูปที่ 3.3 ภาพหน้าต่างโปรแกรม Simplify3D



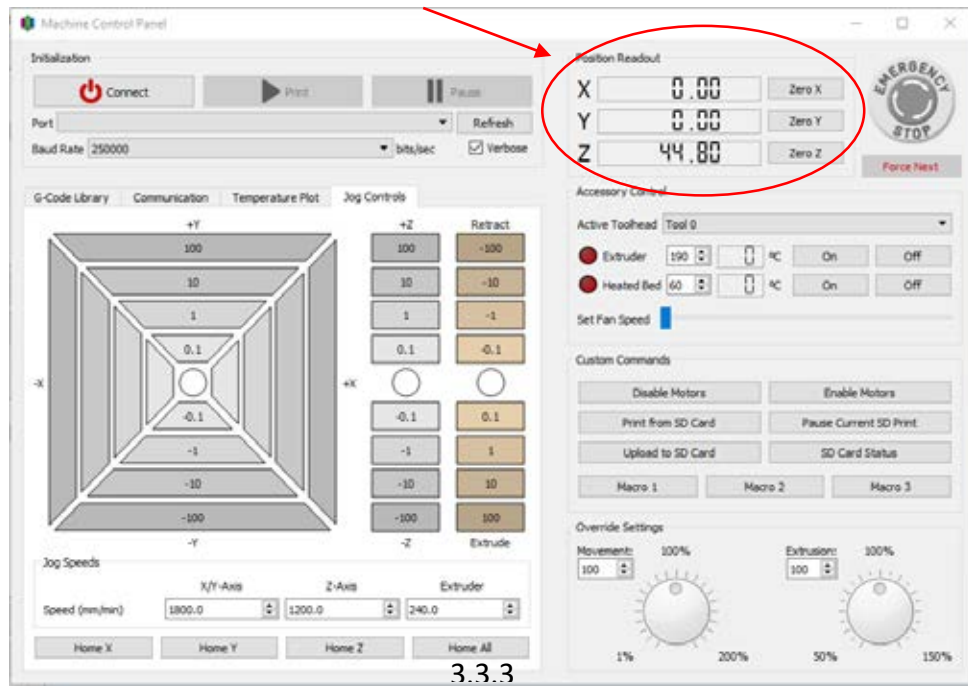
3.3.2 กดไปที่ Edit Process setting แล้วไปที่layer เพื่อกำหนด Primary Layer ให้เท่ากับ 0.0025 mm.

3.3.2



รูปที่ 3.4 ภาพหน้าต่าง Edit Process setting

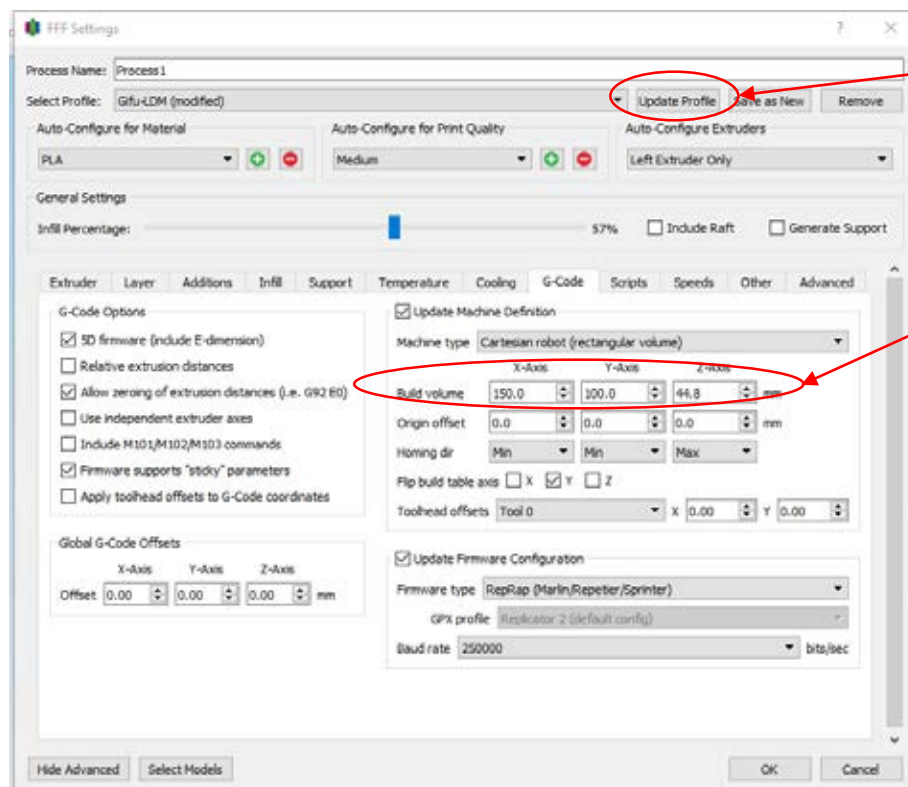
3.3.3 จากนั้นกด Ctrl+P เพื่อเปิดหน้าต่าง Machine Control Panel เพื่อปรับระยะหัวฉีดในแนวแกน x,y และ z แต่แกนที่สำคัญที่สุดคือ แกน z คือระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับ substrate โดยเมื่อกดปุ่มเพื่อเลื่อนระยะ แล้วบันทึกค่าไว้



3.3.3

รูปที่ 3.5 ภาพหน้าต่าง Machine Control Panel

3.3.4 นำค่าที่จัดไว้ นำมาใส่ในส่วนของ Build volume ในส่วนของ G-code ในหน้าต่าง Edit Process setting



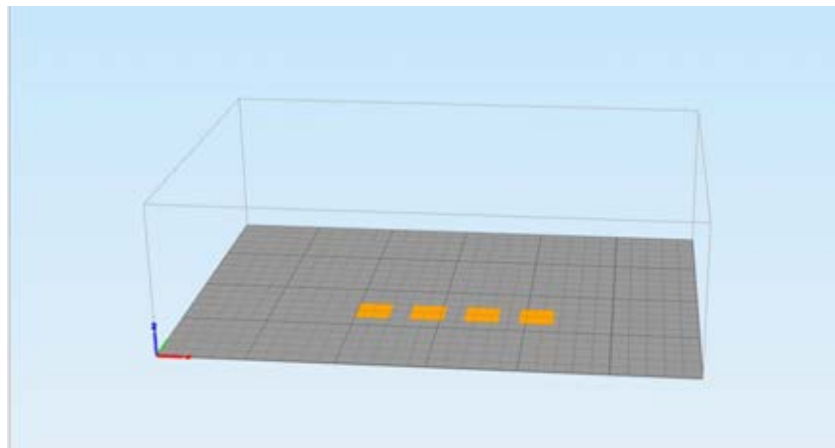
3.3.5

3.3.4

รูปที่ 3.6 ภาพหน้าต่าง Edit Process setting ในส่วนของการตั้งค่า G-Code

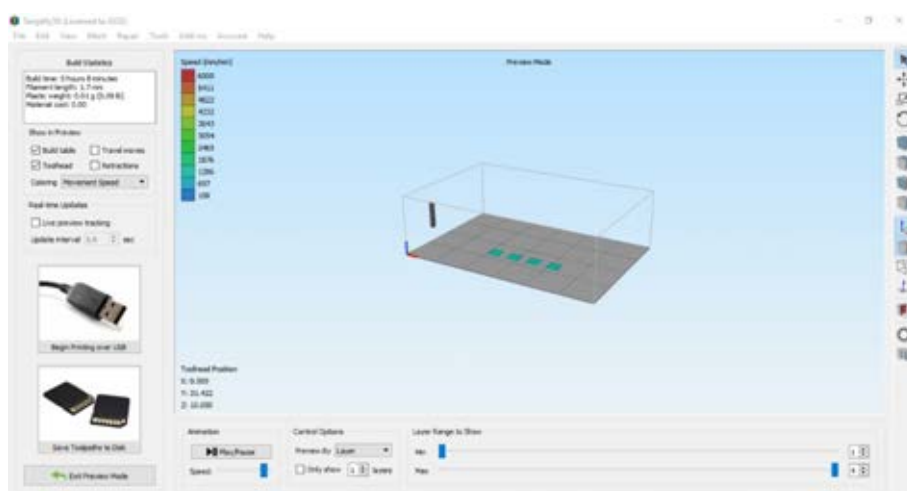
3.3.5 จากนั้นบันทึกการตั้งค่าด้วยการกด update profile แล้วกด ok

3.3.6 นำรูปทรงต้นแบบมาเรียงในโปรแกรม Simplify3D โดยเรียงเป็นสี่รูป โดยเรียงจาก 1 layer ไปจนถึง 4 layers ดังรูป



รูปที่ 3.7 ภาพการเรียงรูปทรงต้นแบบ

3.3.7 จากนั้นกดปุ่ม Prepare to Print เพื่อดูภาพจำลองก่อนการก่อรูป และกด save ลง SD card โดยกดที่ Save Toolpaths to Disk



รูปที่ 3.8 ภาพหน้าต่างจำลองการก่อรูป

### 3.4 ขั้นตอนการเตรียมสาร

3.4.1 นำ  $\text{TiO}_2$  ชนิด PST-18NR มาเจือจางด้วยแอลกอฮอล์ โดยใช้  $\text{TiO}_2$  1.0 g และแอลกอฮอล์ 0.1 g หรืออัตราส่วน 10:1 ตามลำดับ ทำการผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยใช้เครื่อง conditioning mixer

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 นำกระจกนำไฟฟ้าที่ใช้เป็นฐานรองพิมพ์มาวัดด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ เพื่อหาว่าด้านไหนมีสารเคลือบ FTO (Fluorine doped Tin Oxide) แล้วนำด้านที่มีสารเคลือบ FTO เป็นด้านที่ใช้ในการพิมพ์ วางในตำแหน่งที่ใช้ในการพิมพ์

3.5.2 นำ SD card ที่เซฟไฟล์รูปแบบการก่อรูป มาใส่ในเครื่องพิมพ์สามมิติ

3.5.3 ทำการทดลองโดยการสุ่มกำหนดค่าเริ่มต้นในการพิมพ์ โดยกำหนดค่าความดันลมให้มีค่าเท่ากับ  $4 \text{ kg/cm}^2$  ขนาดหัวจ่าย ใช้ขนาด 0.21mm. (สี่ใส) ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุด และค่าความเร็วในการพิมพ์ ให้มีค่าเท่ากับ 20 มิลลิเมตรต่ออนาที และเริ่มการพิมพ์

3.5.4 ตรวจสอบชิ้นงานที่ได้ว่าสภาพสมบูรณ์หรือไม่ หากไม่สมบูรณ์ให้บันทึกค่าตัวแปรแล้วทำการทดลองซ้ำ โดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรทั้ง 3 ตัวแปร เพื่อหา condition ที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้

3.5.5 เมื่อเสร็จสิ้นการพิมพ์ นำไปทำให้แห้งโดยการอบ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

3.5.6 นำชิ้นงานที่สมบูรณ์ไปวัดความหนา, ความเรียบของผิวหน้า และความเป็นเนื้อเดียวกัน ด้วยเครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) บันทึกผล และวิเคราะห์ผล

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

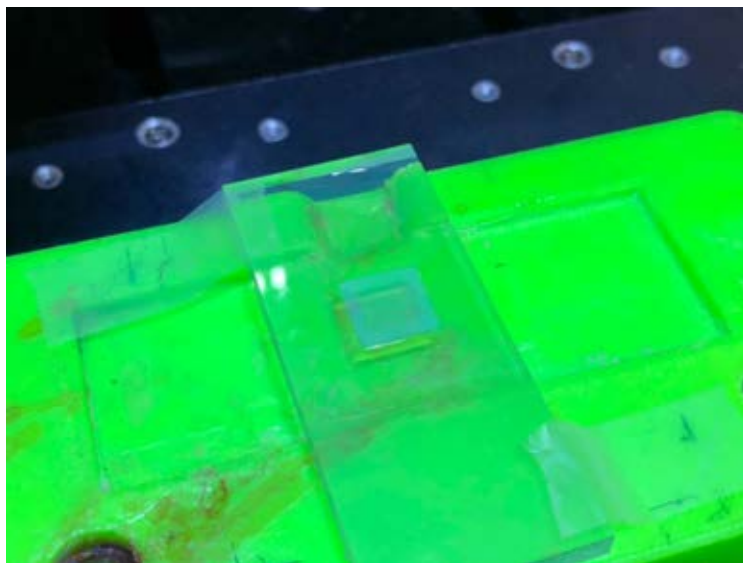
#### 4.1 ผลการทดลอง

ผลการทดลองหา condition ที่จะศึกษา

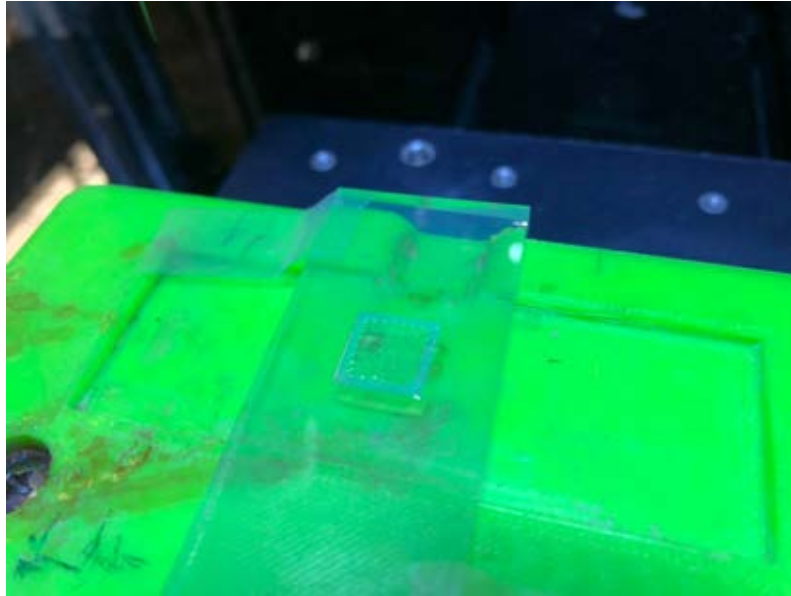
จากการทดลองฉีดด้วยหัวฉีดสีแดง(0.25 mm.) และโดยควบคุมความเร็ว พบว่า ที่ความเร็วสูงจะขึ้นรูปได้บ้าง จากนั้นควบคุมความดัน พบว่า ความดันลมที่  $5 \text{ kg/cm}^2$  ไม่สามารถใช้ความเร็วที่เท่ากับ ความดันลมที่ 3 และ  $4 \text{ kg/cm}^2$  ได้ เนื่องจากเมื่อฉีดสารออกมา มีความหนาที่หนาจนเกินไป ส่งผลให้ เกิดการล้น ทำให้ไม่สวย จึงต้องปรับความเร็วให้สูงขึ้นเพื่อให้ฉีดสารแล้วบางลง

จากการทดลองฉีดด้วยหัวฉีดสีส้ม(0.34 mm.) และใช้ค่าความดันและความเร็ว เช่นเดียวกับหัวฉีดสีแดง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้ เนื่องจากเมื่อใช้ความเร็วที่ต่ำกว่า 100 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้ขึ้นรูปได้ไม่ดี เนื่องจากปริมาณสารออกมามากจนเกินไป

จากการทดลองฉีดด้วยหัวฉีดสีใส(0.21 mm.) และใช้ค่าความดันและความเร็ว เช่นเดียวกับหัวฉีดสีแดง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วได้เช่นเดียวกับหัวฉีดสีส้ม เนื่องจากเมื่อใช้ความเร็วที่สูงกว่า 20 มิลลิเมตรต่อนาที ทำให้เส้นของสารที่ฉีดออกมานั้นเกิดการขาดสาย



รูปที่ 4.1 ภาพการฉีดที่สมบูรณ์



รูปที่ 4.2 ภาพการฉีดที่ไม่สมบูรณ์ มีความขาดสาย

ผลการทดลองก่อนนำไปอบแห้ง

ขนาดหัวพิมพ์ 0.21

ความเร็วที่พิมพ์ 40 mm/s หนาจนเกินไป ไม่เป็นรูป

ความเร็วที่พิมพ์ 30 mm/s หนาจนเกินไป ไม่เป็นรูป

ความเร็วที่พิมพ์ 20 mm/s

ที่ความดันลม 5  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ที่ความดันลม 4  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ที่ความดันลม 3  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ขนาดหัวพิมพ์ 0.25

ความเร็วที่พิมพ์ 80 mm/s

ที่ความดันลม 5  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ความเร็วที่พิมพ์ 50 mm/s

ที่ความดันลม 4  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ที่ความดันลม 3  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ความเร็วที่พิมพ์ 40 mm/s

ที่ความดันลม 3  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ความเร็วที่พิมพ์ 30 mm/s

ที่ความดันลม 3  $\text{km}/\text{cm}^2$  เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ขนาดหัวพิมพ์ 0.34

ความเร็วที่พิมพ์ 100 mm/s

ที่ความดันลม 2  $\text{km/cm}^2$

เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ที่ความดันลม 3  $\text{km/cm}^2$

เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

ที่ความดันลม 4  $\text{km/cm}^2$

เป็นรูปทรงสวยทั้ง 1-4 layer

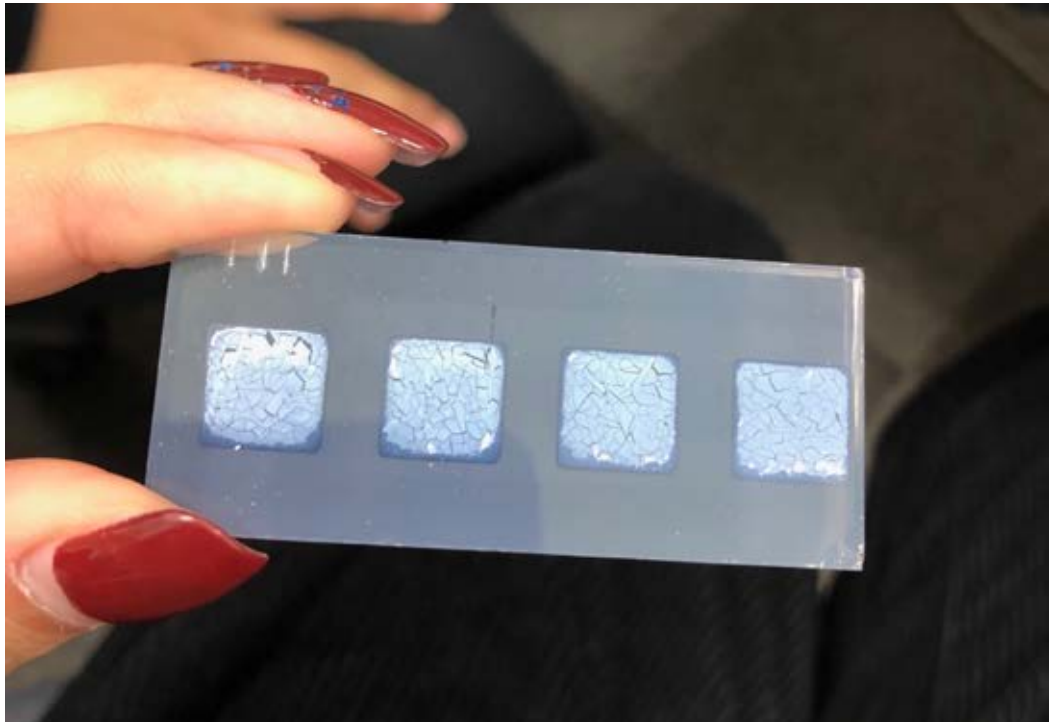
ความเร็วที่พิมพ์ 80 mm/s

หนาจนเกินไป ไม่เป็นรูป

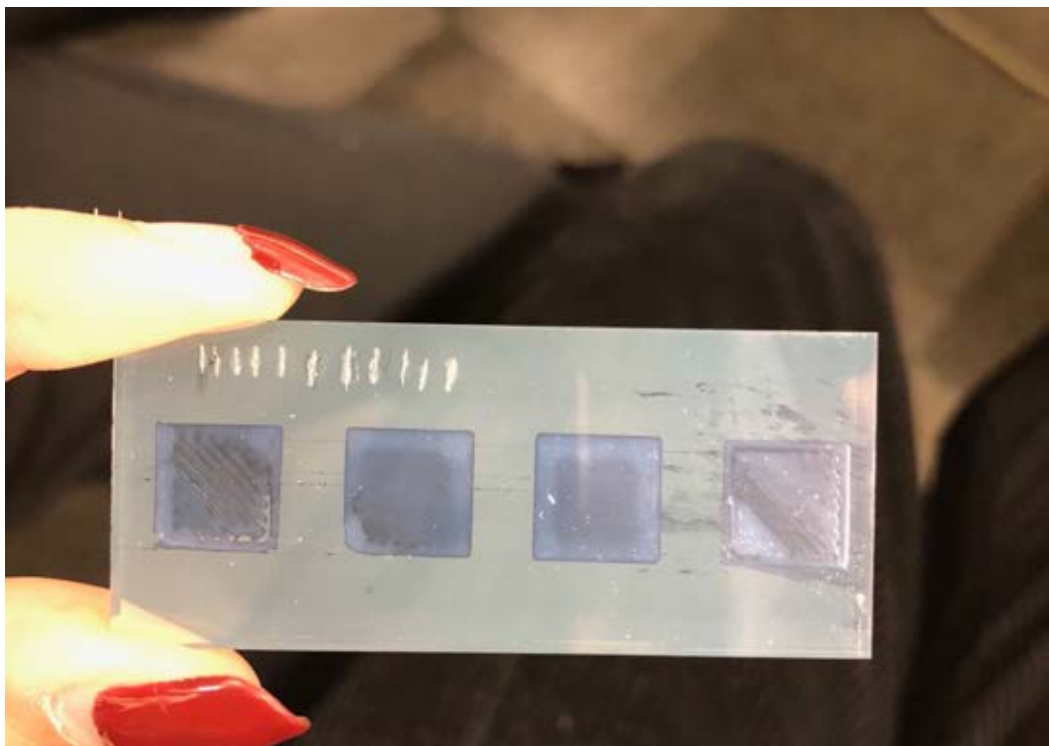
ผลการทดลองหลังนำไปอบแห้ง

ตารางที่ 4.1 แสดงผลหลังการอบแห้ง

ลำดับ	ความเร็ว(%)	ความดันลม ( $\text{km/cm}^2$ )	ระยะห่าง( $\mu\text{m}$ )	Norzzle size(mm) สีของหัวพิมพ์	หลังอบ
1	30	3	0.02	0.25 / สีแดง	Crack
2	40	3	0.02	0.25 / สีแดง	Crack
3	50	3	0.02	0.25 / สีแดง	Crack
4	50	4	0.02	0.25 / สีแดง	Crack
5	80	5	0.02	0.25 / สีแดง	Crack
6	100	3	0.02	0.34 / สีส้ม	Crack
7	100	2	0.02	0.34 / สีส้ม	Crack
8	100	4	0.02	0.34 / สีส้ม	Crack
9	20	5	0.02	0.21 / สีใส	Crackบางส่วน
10	20	4	0.02	0.21 / สีใส	Crackบางส่วน
11	20	3	0.02	0.21 / สีใส	ไม่Crackเลย



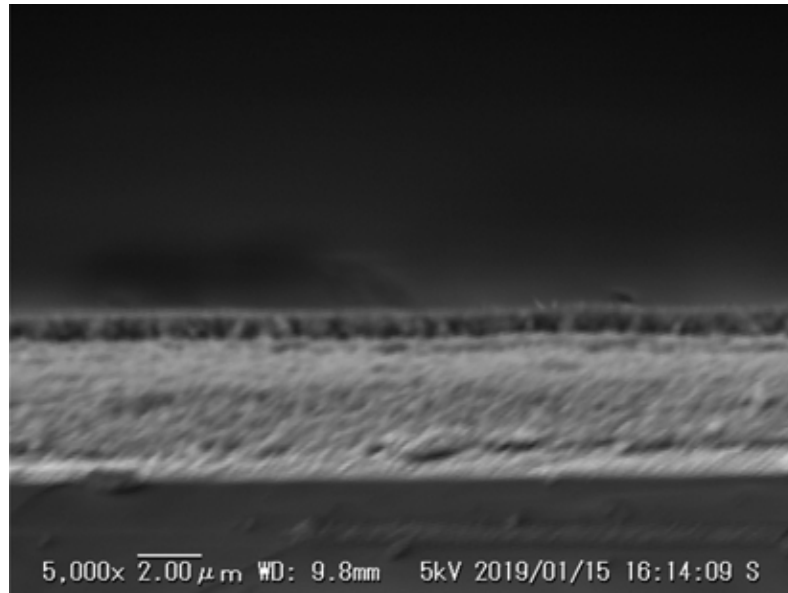
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างที่แสดงถึงการ crack



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างที่แสดงถึงการไม่ crack



ผลการทดลองวัดด้วยเครื่อง SEM

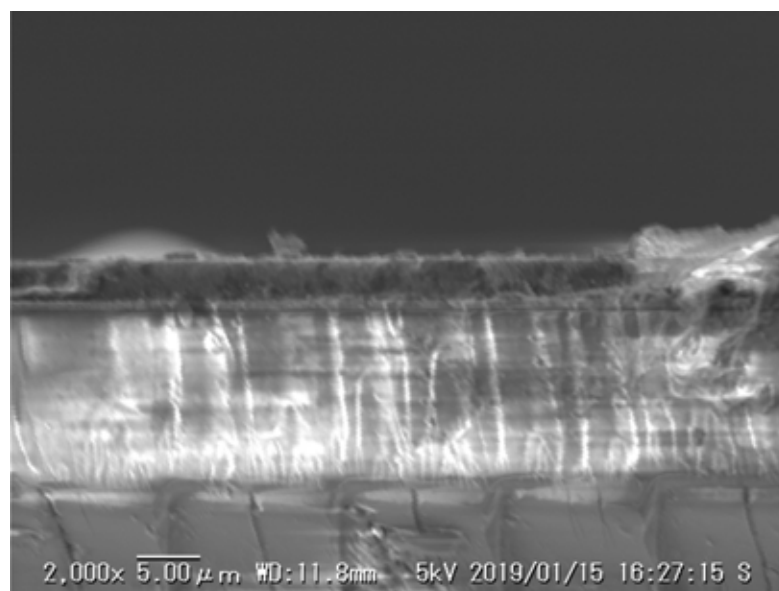


รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม  $4 \text{ kg/cm}^2$  ระยะห่าง 0.02 micron norzle size 0.21 mm. (สีใส) โดยพิมพ์ 1 layer

ความหนา :  $5.50 \text{ micrometers}$

ความเรียบผิว : เรียบ

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : เป็นเนื้อเดียวกัน

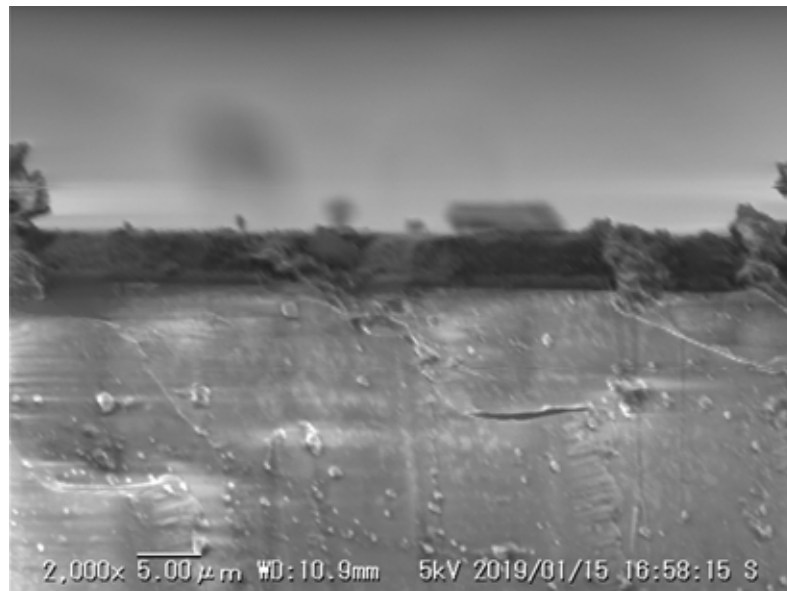


รูปที่ 4.6 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม 5 kg/cm<sup>2</sup> ระยะห่าง 0.02 micron norzle 0.21 mm. (สีใส) โดยพิมพ์ 1 layer

ความหนา : 4.57  $\mu\text{m}$

ความเรียบผิว : ไม่เรียบ

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : เป็นเนื้อเดียวกัน

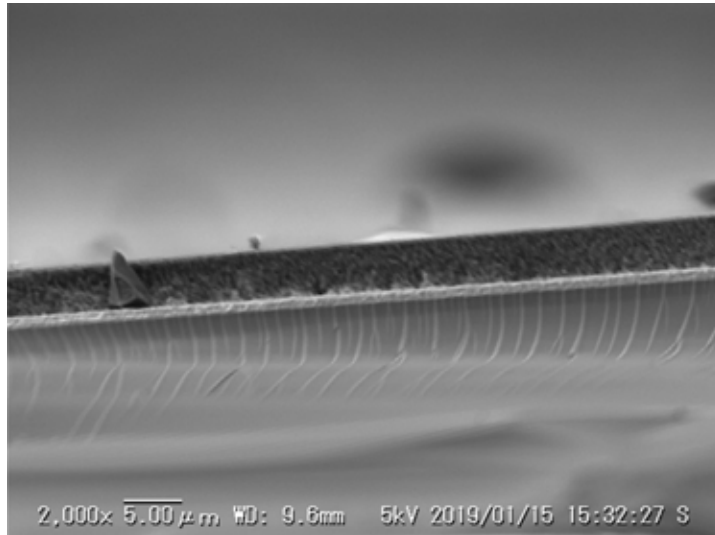


รูปที่ 4.7 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม 5 kg/cm<sup>2</sup> ระยะห่าง 0.02 micron norzle 0.21 mm. (สีใส) โดยพิมพ์ 2 layer

ความหนา : 5.96  $\mu\text{m}$

ความเรียบผิว : ไม่เรียบ

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน

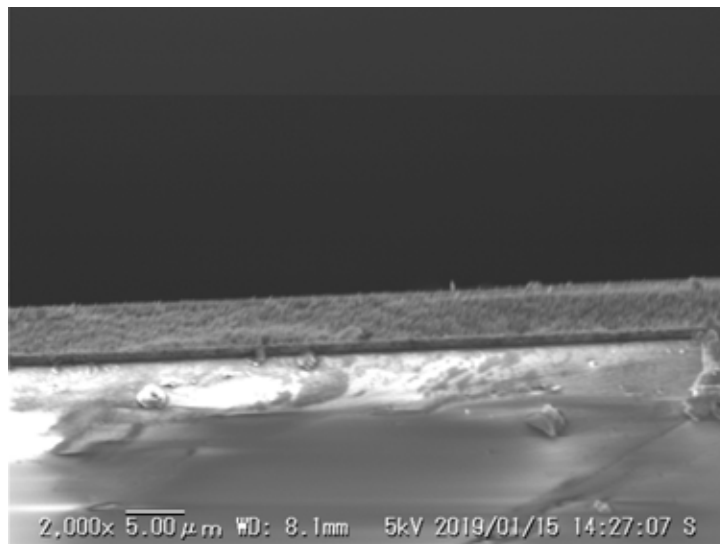


รูปที่ 4.8 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม 3 kg/cm<sup>2</sup> ระยะห่าง 0.02 micron norzle 0.21 mm.) สีไอ (โดยพิมพ์ 1 layer

ความหนา : 4.23 μm

ความเรียบผิว : เรียบมาก

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : เป็นเนื้อเดียวกัน

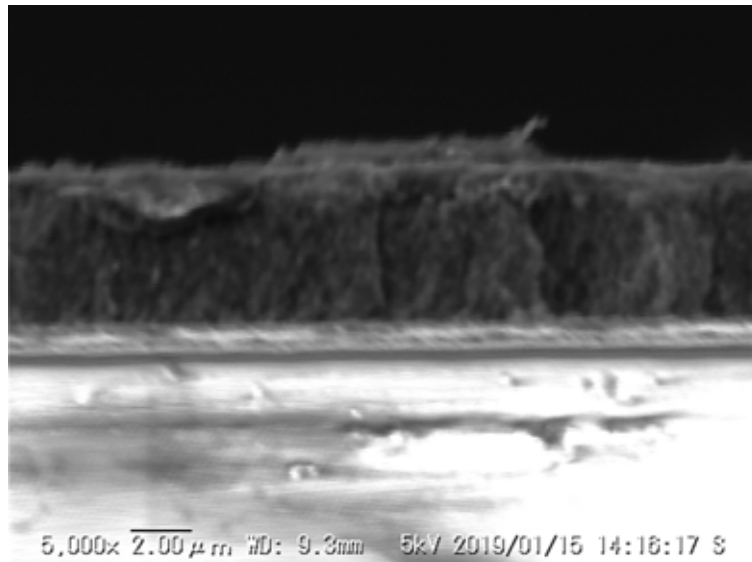


รูปที่ 4.9 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม 3 kg/cm<sup>2</sup> ระยะห่าง 0.02 micron norzle 0.21 mm.) สีไอ (โดยพิมพ์ 2 layer

ความหนา : 4.46 μm

ความเรียบผิว : เรียบ

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : เป็นเนื้อเดียวกัน

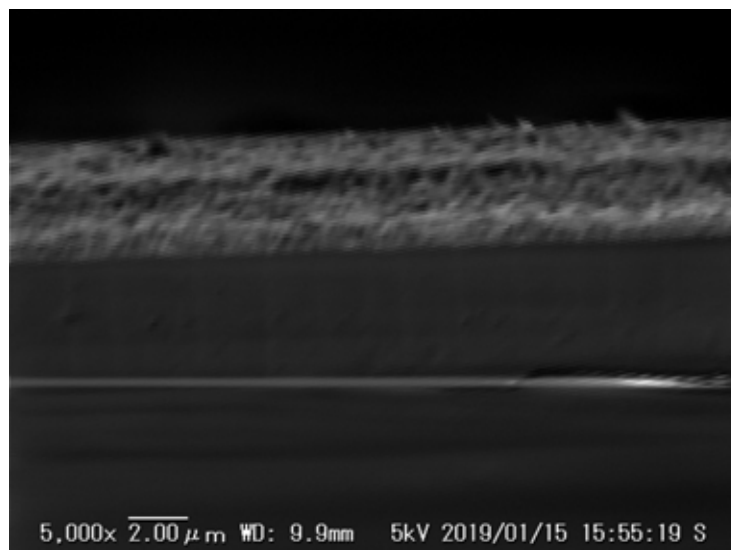


รูปที่ 4.10 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม 5 kg/cm<sup>2</sup> ระยะห่าง 0.02 micron norzle 0.21 mm. )สีใส( โดยพิมพ์ 3 layer

ความหนา : 5.26 μm

ความเรียบผิว : ไม่เรียบ

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : ค่อนข้างเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 4.11 ภาพ SEM ที่ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ความดันลม 5 kg/cm<sup>2</sup> ระยะห่าง 0.02 micron norzle 0.21 mm. )สีใส( โดยพิมพ์ 4 layer

ความหนา : 4.23  $\mu\text{m}$

ความเรียบผิว : ไม่เรียบ

ความเป็นเนื้อเดียวกัน : ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เห็นแยกเป็นชั้น

#### 4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการวัด SEM พบว่า การใช้ ขนาดหัวฉีด 0.21 mm. ที่ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะห่าง 0.02  $\mu\text{m}$  ถัดด้วยความดันลม 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$  นั้นพิมพ์ได้สูงสุดเพียง 1 ชั้น แต่ที่ความดันลมที่ 4  $\text{kg}/\text{cm}^2$  พิมพ์ได้สูงสุด 2 ชั้น และความดันลมที่ 3  $\text{kg}/\text{cm}^2$  นั้นสามารถพิมพ์ได้ถึง 4 ชั้น แต่ชั้นงานที่พิมพ์ได้ 4 ชั้นนั้น ผิวขรุขระ เกิดการแยกชั้น และมีความหนา 4.23  $\mu\text{m}$  ซึ่งต่ำกว่าพิมพ์ 3 ชั้น ซึ่งไม่ เป็นไปตามทฤษฎี เกิดจากชั้นที่พิมพ์มีความหนาเกินทำให้หัวฉีดนั้นชูดกับสาร ทำให้สารที่อยู่บน กระจกมีความหนาที่หายไป ส่วนชั้นงานที่พิมพ์ 3 ชั้นนั้น มีผิวที่ขรุขระ แต่ไม่เกิดการแยกชั้น และ มีความหนา 5.26  $\mu\text{m}$  ส่วนชั้นงานที่พิมพ์ 1 และ 2 ชั้นนั้น มีความเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกัน เพียงแต่ พิมพ์ชั้นเดียวจะมีความเรียบมากกว่า และมีความหนา 4.23 และ 4.46 ตามลำดับ ชั้นงานพิมพ์ที่ ความดันลม 4  $\text{kg}/\text{cm}^2$  และพิมพ์ 1 ชั้น มีผิวขรุขระ แต่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความหนา 4.57  $\mu\text{m}$  ส่วนชั้นที่พิมพ์ 2 ชั้น มีผิวขรุขระ แต่มีความเป็นเนื้อเดียวกันเช่นกัน และมีความหนา 5.96  $\mu\text{m}$  ส่วนที่ความดันลม 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$  นั้น มีผิวที่เรียบ มีความเป็นเนื้อเดียว และมีความหนา 5.50  $\mu\text{m}$  เมื่อ เทียบที่การพิมพ์ 1 ชั้น จะเห็นว่า พิมพ์โดยใช้ความดันลม 3  $\text{kg}/\text{cm}^2$  มีความเรียบมากที่สุด และพบว่า ยิ่งความดันลมสูง ยิ่งฉีดได้หนา

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

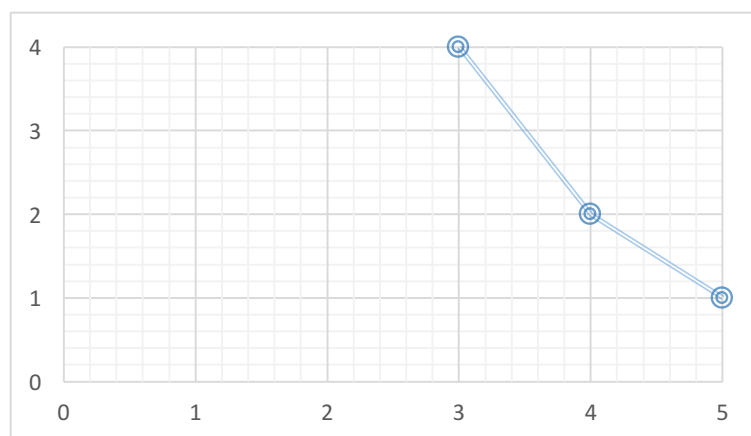
รายงานฉบับนี้ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นซัลโฟนาทอโรด โดยใช้ระบบพิมพ์สามมิติ เพื่อที่จะสามารถนำไปพัฒนาต่อไปเป็นแผงโซลาเซลล์ในงานต่อ ๆ ไป โดยที่มีการสุมค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อทดลองหาค่าที่ใช้ในการพิมพ์แล้วเกิดรูปร่างและประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

ผลการทดลองพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการก่อรูป  $\text{TiO}_2$  บนแผ่นซัลโฟนาทอโรด มี 3 ปัจจัยหลักได้แก่ 1. ความดันลมที่ใช้ในการฉีดสาร 2. ความเร็วที่ใช้ในการพิมพ์ 3. ขนาดหัวฉีด ซึ่งทั้งสามปัจจัยนี้ในการพิมพ์จะต้องมีความสอดคล้องกัน หากขนาดหัวพิมพ์ใหญ่ สารนั้นจะสามารถไหลออกมาได้มากทำให้ต้องควบคุมความดันให้ต่ำเพื่อให้สารไม่ไหลออกมามากจนเกินไป และความเร็วในการพิมพ์ต้องสูง ไม่อย่างนั้นสารจะกองกันเป็นก้อน และหากหัวพิมพ์ขนาดเล็ก สารนั้นจะต้องใช้แรงดันมากในการดันให้สารออกมาดังนั้นความดันลมจะต้องมีค่าสูงเพื่อที่จะดันสารออกมา ความเร็วที่พิมพ์ก็ต้องช้า เพราะหากพิมพ์เร็วจนเกินไปจะทำให้สารออกมาไม่ทัน เส้นที่พิมพ์จะเกิดการขาด จากผลการทดลองก่อนนำไปอบพบว่าขนาดหัวพิมพ์ทุกขนาดสามารถพิมพ์ได้ด้วยเงื่อนไขตัวแปรที่เหมาะสม แต่หลังจากการอบพบว่าขนาดหัวพิมพ์ที่เหมาะสมได้แก่หัวพิมพ์ไซขนาด 0.21 mm เนื่องจาก หัวพิมพ์สีส้มและสีแดงนั้นหลังจากที่นำไปอบแล้วเกิดการ crack ทุกอัน

จากการที่ได้ทดลองพบว่าความเร็วที่เหมาะสมในการพิมพ์สารจากหัวฉีด 0.21 mm ที่เหมาะสมที่สุดนั้นคือ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที และ พบว่า การใช้ ขนาดหัวฉีด 0.21 mm. ที่ความเร็ว 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะห่าง 0.02  $\mu\text{m}$  ฉีดด้วยความดันลม 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$  นั้นพิมพ์ได้สูงสุดเพียง 1 ชั้น แต่ที่ความดันลมที่ 4  $\text{kg}/\text{cm}^2$  พิมพ์ได้สูงสุด 2 ชั้น และความดันลมที่ 3  $\text{kg}/\text{cm}^2$  นั้นสามารถพิมพ์ได้ถึง 4 ชั้น ดังกราฟที่ 5.1 แต่ชั้นงานที่พิมพ์ได้ 4 ชั้นนั้น ผิวขรุขระ เกิดการแยกชั้น และมีความหนา 4.23  $\mu\text{m}$  ซึ่งต่ำกว่าพิมพ์ 3 ชั้น ซึ่งไม่เป็นไปตามทฤษฎี เกิดจากชั้นที่พิมพ์มีความหนาเกินทำให้หัวฉีดนั้นติดกับสาร ทำให้สารที่อยู่บนกระจกมีความหนาที่หายไป ส่วนชั้นงานที่พิมพ์ 3 ชั้นนั้น มีผิวที่ขรุขระ

แต่ไม่เกิดการแยกชั้น และมีความหนา  $5.26 \mu\text{m}$  ส่วนชั้นงานที่พิมพ์ 1 และ 2 ชั้นนั้น มีความเรียบ และเป็นเนื้อเดียวกัน เพียงแต่พิมพ์ชั้นเดียวจะมีความเรียบมากกว่า และมีความหนา 4.23 และ 4.46 ตามลำดับ ชั้นงานพิมพ์ที่ความดันลม  $4 \text{ kg/cm}^2$  และพิมพ์ 1 ชั้น มีผิวขรุขระ แต่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความหนา  $4.57 \mu\text{m}$  ส่วนชั้นที่พิมพ์ 2 ชั้น มีผิวขรุขระ แต่มีความเป็นเนื้อเดียวกันเช่นกัน และมีความหนา  $5.96 \mu\text{m}$  ส่วนที่ความดันลม  $5 \text{ kg/cm}^2$  นั้น มีผิวที่เรียบ มีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีความหนา  $5.50 \mu\text{m}$  เมื่อเทียบที่การพิมพ์ 1 ชั้น จะเห็นว่า จากกราฟที่ 5.1 ค่าความดันลมที่เหมาะสมที่สุดในการพิมพ์ด้วยหัวขนาด  $0.21 \text{ mm}$  ที่ความเร็วในการพิมพ์  $20 \text{ mm/s}$  คือ  $3 \text{ kg/cm}^2$  ซึ่งมีความเรียบมากที่สุด และจากกราฟที่ 5.2 พบว่ายิ่งใช้ความดันลมสูง สารที่จะได้จะมีความหนามากขึ้น

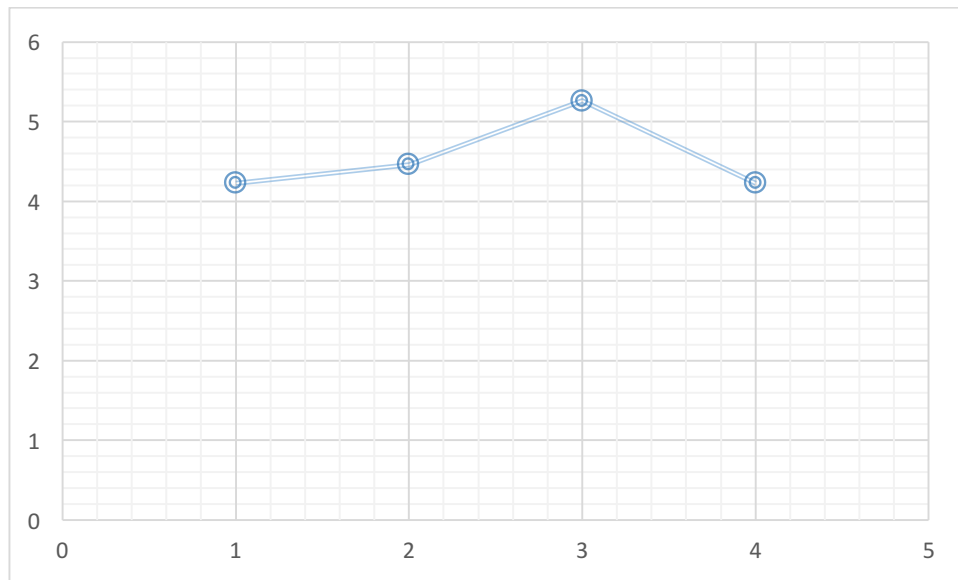
จำนวนชั้นที่พิมพ์ได้



ความดันลมที่ใช้

กราฟ 5.1 แสดงจำนวนชั้นที่พิมพ์ได้ที่ความเร็วในการพิมพ์ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที ขนาดหัวพิมพ์ 0.21

ความหนา ( $\mu\text{m}$ )



จำนวนชั้นที่พิมพ์

กราฟ 5.2 แสดงความหนาของ  $\text{TiO}_2$  ตามจำนวนชั้นที่พิมพ์ตามเงื่อนไขขนาดหัวพิมพ์ 0.21 mm ความเร็วในการ

พิมพ์ 20 mm/s และความดันลม  $3 \text{ km/cm}^2$



## บรรณานุกรม

- [1] B. O'Regan, D.T. Schwartz, S.M. Zakeeruddin, M. Grätzel, *Adv. Mater.* 12 (2000) 1263.
- [2] B. O'Regan, D.T. Schwartz, *J. Appl. Phys.* 80 (1996) 4749.
- [3] Q.B. Meng, K. Takahashi, X.T. Zhang, I. Sutanto, T.N. Rao, O. Sato, A. Fujishima, H. Watanabe, T. Nakamori, M. Uragami, *Langmuir* 19 (2003) 3572.
- [4] M. Grätzel, *Chem. Lett.* 34 (1) (2005) 8–13.
- [5] J.M. Kroon, N.J. Bakker, H.J.P. Smit, P. Liska, K.R. Thampi, M. Grätzel, A. Hinsch, S. Hore, J.R. Durrant, E. Palomares, H. Pettersson, T. Gruszecski, J. Walter, K. Skupien, G. Tulloch, Report ECN-RX-04-057, 2004.
- [6] C.J. Barbe, F. Arendse, P. Comte, M. Jirousek, F. Lenzmann, V. Shklover, *J. Am. Ceram. Soc.* 80 (1997) 3157.
- [7] Z. Wang, C. Huang, Y. Huang, Y. Hou, P. Xie, B. Zhang, H. Cheng, *Chem. Mater.* 13 (2001) 678.
- [8] R.A. Caruso, M. Antonietti, M. Giersig, H.P. Hentze, J. Jia, *Chem. Mater.* 13 (2001) 1114.
- [9] M. Grätzel, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 8 (2000) 171.
- [10] A. Zaban, S.G. Chen, S. Chappel, B.A. Gregg, *Chem. Commun.* (2000) 2231–2232.
- [11] B. O'Regan, M. Grätzel, *Nature* 353 (1991) 737.
- [12] A. Hagfeldt, M. Grätzel, *Acc. Chem. Res.* 33 (2000) 269–277.
- [13] M.K. Nazeeruddin, A. Kay, I. Rodicio, R. Humphry-Baker, E. Muller, P. Liska, N. Vlachopoulos, M. Grätzel, *J. Am. Chem. Soc.* 115 (1993) 6382.
- [14] A. Fillinger, B.A. Parkinson, *J. Electrochem. Soc.* 146 (1999) 4559.
- [15] M.M. Gomez, J. Lu, E. Olsson, A. Hagfeldt, C.G. Granqvist, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 64 (2000) 385.
- [16] M. Gouterman, *J. Chem. Phys.* 30 (1959) 1139.
- [17] Bob Hayward, David Moschella, Jon Schreiber, Simon Wardley, Howard Smith, “3D printing and the future of manufacturing” CSE, the rise of 3D printing.
- [18] Chris Anderson, *Makers: The new industrial revolution* (New York: Crown Business, 2012), p. 210.
- [19] Joan Horvath, *Mastering 3D printing technology.*