

# การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทอร์โมพลาสติกจากแป้งเป็นวัสดุประสาน ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ

## Feasibility Study by Use of Synthetic Polymer as Binders in Metal Injection Moulding

ภชนก จิตรเที่ยง<sup>1</sup> ปาติดา สัจจะบุตร<sup>1</sup> สุรศักดิ์ สุรนนท์ชัย<sup>1</sup> และอัญชลี มโนนกุล<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ. พหลโยธิน

ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

\*Corresponding author: โทร. 0-2470-9206 โทรสาร 0-2872-9080 E-mail: surasak.sur@kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้แป้งมันสำปะหลังเพื่อทดแทนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หนึ่งในวัสดุประสานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงโลหะ เพื่อลดการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ สร้างความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตทางการเกษตร โดยการนำแป้งมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการปรับปรุงเพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จากนั้นทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ได้ แล้วทำการผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง โดยปรับเปลี่ยนปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งในช่วง ร้อยละ 10 - 50 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำมาใช้เป็นวัสดุประสานในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานโลหะ ทำการตรวจสอบสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติกของแป้งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติ วิเคราะห์ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ รวมถึงความสามารถในการฉีดขึ้นรูปของเม็ดฉีดที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบในวัสดุประสาน โดยมีสูตรของวัสดุประสานที่ใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงล้วนในการอ้างอิง รวมทั้งวิเคราะห์สูตรการผสมที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ โดยมีปริมาณแป้ง

มากที่สุด พบว่าแป้งเมื่อได้รับการเติมกลีเซอรอลซึ่งเป็น พลาสติกไฮเซอรัลภายใต้อุณหภูมิและแรงเฉือนที่เหมาะสม จะทำให้แป้งมีสมบัติเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติก โดยยังปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งเพิ่มมากขึ้น ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมยังมีค่าน้อยลง ในขณะที่เม็ดฉีดที่ได้จากวัสดุประสานที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบในทุกสูตรสามารถทำการฉีดได้ อีกทั้งสูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีแป้งมากที่สุดที่สามารถทำการฉีดขึ้นรูปได้จากการทดลอง ได้แก่ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

**คำสำคัญ:** การศึกษาความเป็นไปได้ / เทอร์โมพลาสติก / แป้ง / วัสดุประสาน / การฉีดขึ้นรูปผงโลหะ

### Abstract

This research studied the utilization of tapioca starch to replace the high density polyethylene, which is one of materials used in injection moulding process. The objectives are to reduce the usage of synthesis polymers, to develop more environmental friendly binder and

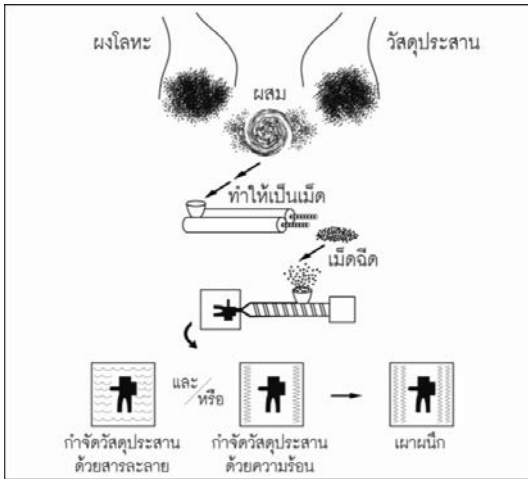
to increase the value of agricultural products. The tapioca starch was processed to become thermoplastic starch and varied the quantity of thermoplastic starch, which was obtained from tapioca starch in the range of 10 to 50 %wt. The thermoplastic starch was mixed with high density polyethylene. Subsequently, the mixtures were used as binder in the metal injection moulding process. The properties of thermoplastic starch, the melt flow index of binder mixture and the injection ability of feedstock that consists of thermoplastic starch were investigated. In addition, the binder made from 100 %wt. of high density polyethylene was used as a reference batch for this investigation. From the analysis of different mixing ratios for starch contents, it is found that after adding the glycerol as plasticizer into starch with suitable temperature and shear force, the starch transformed into thermoplastic and had the properties similar to thermoplastic. It was also found that as the quantity of thermoplastic starch increased; the melt flow index of the polymer mixture decreased. The experimental results show that all of prepared feedstock can be used for injection and the maximum content of thermoplastic starch that can be added to the binder mixture is 50 %wt.

**Keywords:** Feasibility Study / Starch / Binders / Thermoplastic / Metal Injection Moulding

## 1. บทนำ

ปัจจุบันกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผงกำลังเข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรม ด้วยความสามารถในการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและมีรูปร่างซับซ้อนได้ดี เช่น ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์และทันตกรรม ส่วนประกอบของปืน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และชิ้นส่วนรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีข้อได้เปรียบกระบวนการอื่นที่สำคัญคือ สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมากในต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธีผลิตวิธีอื่น มีเศษเหลือทิ้งน้อยเนื่องจากไม่มีกระบวนการสูญเสียเนื้อวัสดุ เช่น การกลึง การไส การเจาะ หรือการเจียใน ช่วยลดขั้นตอนการผลิตได้มากโดยเฉพาะชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูง สมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ผลิตได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะนี้ยังเทียบเท่าหรือดีกว่าชิ้นงานที่ผลิตด้วยการหล่อหรือขึ้นรูปด้วยแรงกล และเหมาะกับวัสดุที่มีจุดหลอมเหลวสูง เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม ไททานเนียม ทังสเตนอัลลอย และเหล็กกล้า เป็นต้น [1]

กระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะผง เป็นวิธีการขึ้นรูปชิ้นงานซึ่งประยุกต์และพัฒนามาจากกระบวนการฉีดพลาสติก และการขึ้นรูปโลหะผง โดยใช้เทคโนโลยีฉีดพลาสติกสำหรับการฉีดขึ้นรูป และเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานฉีดด้วยวิธีทางโลหะผงวิทยา ซึ่งมีกระบวนการ 4 ขั้นตอนหลักดังรูปที่ 1 ได้แก่ ขั้นตอนการเตรียมเม็ดฉีด (Feedstock), การฉีดขึ้นรูป (Injection moulding), การกำจัดวัสดุประสาน (Debinding) และกระบวนการเผาผนึก (Sintering)



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตขึ้นรูปโหลหะผง

ในกระบวนการผลิตขึ้นรูปโหลหะผงโดยทั่วไปนั้น จะใช้ปริมาณวัสดุประสานมากถึงร้อยละ 35 โดย ปริมาตร วัสดุประสานที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้แก่ แวกซ์พอลิเมอร์ (Wax-polymers) ออย-แวกซ์ พอลิ เมอร์ (Oil-wax polymers) โพลีอะซีทัล (Polyacetal) และวอเตอร์พอลิเมอร์ (Water-polymer) [2] วัสดุ ประสานเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากน้ำมันดิบ (Crude oil) และ ก๊าซธรรมชาติ (Natural gas) ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้ แล้วหมดสิ้นไป ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ในระยะเวลาอัน สั้นได้ อีกทั้งในกระบวนการผลิต และทำลาย หรือย่อย สลายพอลิเมอร์สังเคราะห์เหล่านี้ยังส่งผลกระทบต่อ สิ่งแวดล้อมทำให้เกิดมลพิษในหลายด้านไม่ว่าจะเป็น มลพิษทางน้ำ ทางดิน หรือทางอากาศ โดยเฉพาะ อย่างยิ่งสภาวะโลกร้อนที่ส่งผลกระทบต่อชีวิตและ ทรัพยากรสินของประชากรมนุษย์ในหลายประเทศทั่วโลก เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวการนำพอลิเมอร์ธรรมชาติ มาใช้จึงเป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ พอลิเมอร์ธรรม ชาติที่ได้รับความสนใจสูงที่สุดคือ พอลิเมอร์จากพืช เพราะพืชเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่มาก สามารถปลูกขึ้น

ทดแทนได้ง่ายและมีราคาถูก พอลิเมอร์จากพืชที่ สำคัญมี 2 ประเภทคือ เซลลูโลส (Cellulose) และแป้ง (Starch) โดยทั้งเซลลูโลสและแป้งต่างเป็นพอลิแซค คาไรด์ (Polysaccharide) ที่มีมอนอเมอร์เหมือนกัน คือกลูโคส (Glucose) แต่มีการเชื่อมต่อ (Linkage) ที่ แตกต่างกัน ทำให้โครงสร้างของโมเลกุลต่างกันด้วย เซลลูโลสจะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างค่อนข้างเป็น เส้นตรงทำให้โมเลกุลจัดเรียงตัวชิดกันได้มาก เซลลูโลสจึงมีสมบัติที่แข็งแรงซึ่งไม่นิยมนำมาขึ้นรูป เป็นผลิตภัณฑ์ ส่วนแป้งจะมีโมเลกุลที่มีโครงสร้างขด กันเป็นเกลียว (Helix) ซึ่งมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง โมเลกุลน้อยกว่าในเซลลูโลส โดยโมเลกุลจะรวมกันอยู่ ในลักษณะเป็นเม็ด (Granules) ดังนั้น แป้งจึงมีความ เป็นไปได้ที่จะนำมาผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์เพื่อใช้ทดแทนพอลิเมอร์สังเคราะห์ [3]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีอยู่ในหลาย ส่วนของพืช เช่น เมล็ด หัว ราก พืชที่มีแป้งในปริมาณ มากได้แก่ ข้าว มันฝรั่ง มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าว สาลี หรือพวกธัญพืชนั่นเอง ซึ่งผลผลิตเหล่านี้มี ปริมาณค่อนข้างมากทำให้ผลผลิตเหล่านี้มีราคาถูก การนำผลผลิตเหล่านี้มาใช้ประโยชน์นอกเหนือจาก การแปรรูปเป็นอาหาร จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแป้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งมันสำปะหลังซึ่งประเทศไทย เป็นผู้ผลิตและส่งออกรายใหญ่ที่สุดของโลก ดังนั้นการ นำแป้งมันสำปะหลังไปผ่านกระบวนการปรับปรุง เพื่อให้ได้แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Starch, TPS) แล้วนำมาใช้เป็นวัสดุ ประสานในการผลิตขึ้นรูป จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เพราะเป็นการนำวัตถุดิบที่มีราคาถูก หาได้ง่าย ภายในประเทศ และสามารถสร้างขึ้นมาใหม่ได้โดยไม่

ทำลายสิ่งแวดลอมมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่ใช้แล้วหมดไปซึ่งมีปริมาณลดลงและราคาสูงขึ้น นอกจากนี้แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกยังสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่ง

โดยธรรมชาติของแป้ง เมื่อได้รับความร้อน แป้งจะเกิดการสลายตัวก่อนที่จะเกิดการหลอม [4] ซึ่งเป็นสมบัติที่จำกัดต่อการนำไปใช้เป็นวัสดุประสานในการฉีดขึ้นรูป งานวิจัยในอดีต [5, 6, 7] ศึกษาการใช้เทอร์โมพลาสติกจากแป้งเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้ แต่ไม่มีงานวิจัยเกี่ยวกับการนำแป้งมาใช้เป็นวัสดุประสานของกระบวนการฉีดขึ้นรูปโลหะ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษากระบวนการปรับปรุงแป้งให้มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จากนั้นนำเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ได้ผสมเข้ากับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง แล้วทำหน้าที่เป็นวัสดุประสานที่ช่วยยึดผงโลหะให้คงรูปอยู่ได้ (Backbone binder) จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการเตรียมเม็ดฉีดและฉีดขึ้นรูปตามลำดับ โดยได้ทำการวิเคราะห์ถึงสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติกของแป้งที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงสมบัติ วิเคราะห์ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ รวมถึงความสามารถในการฉีดขึ้นรูปของเม็ดฉีดที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบในวัสดุประสานและสูตรการผสมที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้โดยมีปริมาณแป้งมากที่สุด

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินการทดลอง

### 2.1 วัตถุดิบ

ผงโลหะที่ใช้ในการทดลอง คือ ผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L ซึ่งผลิตด้วยวิธีการพ่นด้วยน้ำ (Water Atomization) มีสมบัติดังตารางที่ 1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง ความหนาแน่น 0.958 กรัม/ลบ.ซม. แป้ง

มันสำปะหลัง ที่บรรจุขายตามท้องตลาด โดยนำมาอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พาราฟินแวกซ์ ความหนาแน่น 0.923 กรัม/ลบ.ซม. พอลิเอทิลีนกราฟมาลิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MAH) ถูกใช้เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ที่มีความหนาแน่น 0.915 กรัม/ลบ.ซม. กรดสเตียริก ความหนาแน่น 0.923 กรัม/ลบ.ซม. และกลีเซอรอล ความหนาแน่น 1.26 กรัม/ลบ.ซม.

ตารางที่ 1 สมบัติของผงเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316L

Stainless steel powder	SUS316L powder
Supplier	ATMIX Corp., Japan
Grade	PF-20F
Particle shape	Irregular
Mean particle size	10.18 $\mu\text{m}$
Pycnometer density	7.82 g/cm <sup>3</sup>
Tap density	4.58 g/cm <sup>3</sup>
ส่วนผสมทางเคมี (% โดยมวล)	
C	0.024
Si	0.81
Mn	0.83
P	0.014
Ni	12.46
Cr	16.50
Mo	2.12
Cu	0.03
S	0.0007
O (ppm)	3,400

ตารางที่ 2 อัตราส่วนที่ใช้ในการผสมแป้งและกลีเซอรอล

สูตร	แป้งมันสำปะหลัง (% โดยน้ำหนัก)	กลีเซอรอล (% โดยน้ำหนัก)
TF 15	85	15
TF 25	75	25
TF 30	70	30
TF 40	60	40

## 2.2 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

ผสมแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการกำจัดความชื้นแล้วกับกลีเซอรอลตามสูตรดังตารางที่ 2 ด้วยเครื่องผสมสำหรับเครื่องครัว ทำการปั่นส่วนผสมให้มีความเข้ากัน คือมีความละเอียด ไม่จับตัวเป็นก้อนของแป้งและกลีเซอรอล จากนั้นนำแป้งผสมกลีเซอรอลที่ได้ใส่ลงไปเครื่องผสม (Moriyama Company Model: DS1-5MHB-E) ทำการผสมโดยใช้อุณหภูมิ 160°C ความเร็วรอบของสกรู 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาทีได้เป็นเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

## 2.3 ทดสอบสมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติกโดยการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot Press)

นำเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ได้มาบดด้วยเครื่องบด ได้เป็นเม็ดเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง แล้วใส่ลงบนแม่พิมพ์แผ่นล่าง โดยเกลี่ยเม็ดพลาสติกให้เต็มแม่พิมพ์ แล้วจึงปิดประกบด้วยแม่พิมพ์แผ่นบน นำแม่พิมพ์ที่ปิดประกบแล้วใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูปร้อน ทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้อุณหภูมิ ดังนี้

ขั้นที่ 1 อุณหภูมิ 160°C ความดัน 0 ปอนด์ เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นที่ 2 อุณหภูมิ 160°C ความดัน 25,000 ปอนด์ เป็นเวลา 3 นาที

ขั้นที่ 3 อุณหภูมิ 160°C ความดัน 35,000 ปอนด์ เป็นเวลา 2 นาที

## 2.4 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

นำเทอร์โมพลาสติกจากแป้งสูตร TF40 มาผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงในอัตราส่วนดังตารางที่ 3 โดยสูตร TPS 0 จะมีปริมาณพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง 100 % โดยน้ำหนัก และถูกใช้เป็นสูตรอ้างอิงในการเปรียบเทียบสมบัติต่างๆ กับสูตรอื่น

และเพิ่มพอลิเอทิลีนกราฟมาลิกแอนไฮไดรด์ (Polyethylene grafted Maleic anhydride) เป็นสารเพิ่มความเข้ากันได้ร้อยละ 20 ของปริมาณแป้ง ผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกันด้วยเครื่องผสม ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วรอบของสกรู 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ได้เป็นพอลิเมอร์ผสม

## 2.5 ตรวจสอบค่าดัชนีการไหล

การทดสอบค่าดัชนีการไหลของพลาสติกตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM D1238 ทำโดยการหลอมพลาสติก ณ อุณหภูมิหลอมในกระบอกโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 มิลลิเมตร ยาว 162 มิลลิเมตร ควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอที่ 150°C จากนั้นใช้น้ำหนัก 2.16 กิโลกรัม กดแกนกระบอกดันให้พลาสติกหลอมผ่านดาวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.09 มิลลิเมตร ยาว 8 มิลลิเมตร จากนั้นตัดเส้นพลาสติกที่ออกจากดาวยตามเวลาที่กำหนด ประมาณ 3 ครั้ง แล้วชั่งน้ำหนักเส้นพลาสติกเมื่อเย็นตัวแล้วคำนวณค่าดัชนีการไหล (เฉลี่ย) โดยมีหน่วยเป็น กรัม/10 นาที

## 2.6 เตรียมเม็ดฉีด

ในกระบวนการเตรียมเม็ดฉีด จะเตรียมโดยนำผงโลหะผสมกับวัสดุประสานโดยมีอัตราส่วนของผงโลหะต่อวัสดุประสานร้อยละ 65:35 โดยปริมาตร ทำการเตรียมเม็ดฉีดโดยมีวัสดุประสานที่ใช้แตกต่างกันตามตารางที่ 4 โดยใช้พอลิเมอร์ผสมในสูตร TPS 50 – TPS 0 ทำการผสมด้วยเครื่องผสม โดยใช้ อุณหภูมิในการผสม 140 – 150°C ที่ความเร็วรอบของสกรู 60 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เม็ดฉีดที่ได้จะถูกนำมาบดด้วยเครื่องบด (Daiko Seiki co., LTD: DASR-20) สำหรับการฉีดขึ้นรูปต่อไป

ตารางที่ 3 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูงและเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

สูตร	พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (% โดยน้ำหนัก)	เทอร์โมพลาสติกจากแป้ง (% โดยน้ำหนัก)
TPS 100	0	100
TPS 60	40	60
TPS 50	50	50
TPS 40	60	40
TPS 30	70	30
TPS 20	80	20
TPS 10	90	10
TPS 0	100	0

ตารางที่ 4 อัตราส่วนของวัสดุประสานที่ใช้

วัสดุประสาน	ปริมาณ (% โดยน้ำหนัก)
พอลิเมอร์ผสม	25
พาราฟินแวกซ์	70
กรดสเตียริก	5

## 2.7 ตรวจสอบความสามารถในการฉีดขึ้นรูป

เม็ดฉีดที่ได้จากกระบวนการเตรียมเม็ดฉีดใน ทุกสูตรจะถูกนำมาศึกษาถึงความสามารถในการฉีดขึ้นรูป จากลักษณะของเม็ดฉีดที่ไหลผ่านหัวฉีดขณะทำการฉีดด้วยเครื่องฉีด (Nigata MD50S-IV) โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบกับลักษณะการไหลของเม็ดฉีดที่ได้จากวัสดุประสานที่ไม่มีแป้งเป็นส่วนประกอบที่ใช้เป็นสูตรอ้างอิง

## 3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

### 3.1 สมบัติความเป็นเทอร์โมพลาสติก

จากสมบัติของเทอร์โมพลาสติก ที่เมื่อได้รับความร้อนจะสามารถอ่อนตัวและหลอมเหลว เมื่อเย็นตัวลงจะแข็ง หากนำไปให้ความร้อนอีกครั้ง พลาสติกจะสามารถอ่อนตัวและหลอมเหลวได้เช่นเดิม จึงทำ

การทดสอบโดยการอัดขึ้นรูปร้อน เพื่อที่จะหลอมเหลว เม็ดเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง ดังรูปที่ 2 แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 3 แสดงถึงชิ้นงานพลาสติกที่ผ่านการขึ้นรูปจากเม็ดเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง จะเห็นได้ว่าเทอร์โมพลาสติกจากแป้งสามารถที่จะหลอมเหลวและขึ้นรูปเป็นชิ้นงานได้ เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ทั่วไป อีกทั้งเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวอีกครั้ง ตามสมบัติของเทอร์โมพลาสติก ดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการนำแป้งมาผ่านกระบวนการดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้



รูปที่ 2 เม็ดเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง



รูปที่ 3 เทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 4 ความอ่อนตัวของเทอร์โมพลาสติกจากแป้งหลังจาก  
ได้รับความร้อน

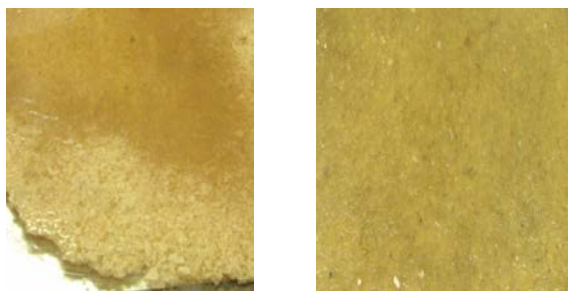
ทั้งนี้เนื่องจากแป้งในธรรมชาติโมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกทิน มีการจัดเรียงตัวกัน โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีคุณสมบัติในการหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติคุณสมบัติในการหลอมตัวของเม็ดแป้งจะสูงกว่าคุณสมบัติในการสลายตัว ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือแป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัว [8] ในขณะที่การเติมกลีเซอรอลเข้าไปเพื่อเป็นพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) จะช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจน ระหว่างโมเลกุลถูกทำลาย ทำให้โมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินเป็นอิสระมากขึ้น จึงสามารถนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบอื่นๆ ได้ ซึ่งเป็นสมบัติที่คล้ายกับเทอร์โมพลาสติก [9]

ปริมาณกลีเซอรอลที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการไหลของเม็ดพลาสติกที่หลอมเหลวขณะถูกขึ้นรูป โดยหากเม็ดพลาสติกหลอมมีความสามารถในการไหลสูงจะสามารถไหลได้ทั่วแม่พิมพ์ และได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์เต็มแม่พิมพ์ ในทางกลับกันหากเม็ดพลาสติกหลอมมีความสามารถในการไหลที่ต่ำจะไม่

สามารถไหลได้ทั่วแม่พิมพ์ ชิ้นงานที่ได้ไม่สมบูรณ์เต็มแม่พิมพ์ รูปที่ 5 (ก) แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มีปริมาณกลีเซอรอลประกอบอยู่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาทำการอัดขึ้นรูปร้อนภายใต้ภาวะทดสอบ ไม่สามารถหลอมเหลวและไหลได้ทั่วแม่พิมพ์ ทำให้ชิ้นงานที่ได้ไม่สมบูรณ์ ในขณะที่เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 25, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พลาสติกหลอมจะมีความสามารถในการไหลเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ จากรูปที่ 5 (ข) แสดงให้เห็นว่าเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มีปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก สามารถหลอมและไหลได้ทั่วแม่พิมพ์ และได้ชิ้นงานที่มีความสมบูรณ์เต็มแม่พิมพ์ ทั้งนี้เนื่องมาจากหน้าที่ของกลีเซอรอลในการเป็นพลาสติกไซเซอร์จึงช่วยในการลดจุดหลอมของแป้ง และทำให้เกิดการไหลของพอลิเมอร์ [10] ดังนั้นหากเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งโดยมีปริมาณกลีเซอรอลผสมอยู่มาก พลาสติกที่ได้จะมีความสามารถในการไหลเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงนำเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มีปริมาณของกลีเซอรอลร้อยละ 40 โดยปริมาตร มาใช้ในกระบวนการเตรียมเม็ดฉีดต่อไป

การเกิดเทอร์โมพลาสติกจากแป้งปริมาณของพลาสติกไซเซอร์ที่สามารถเติมลงไปเพื่อให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก จะขึ้นอยู่กับจุดอิมิตัวของแป้งที่สามารถดูดซับพลาสติกไซเซอร์ได้ โดยจุดอิมิตัวนี้จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์องค์ประกอบของแป้ง และความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน ซึ่งโดยธรรมชาติของแป้งแล้วจะสามารถเติมพลาสติกไซเซอร์ลงไปได้ในอัตราส่วนของแป้งต่อพลาสติกไซเซอร์ ประมาณร้อยละ 0 - 52.6

โดยน้ำหนัก ซึ่งหากมีปริมาณพลาสติกไซเซอร้มากกว่าจุดอิ่มตัวนี้ จะทำให้เกิดรวมตัวเป็นก้อนของแข็งกับพลาสติกไซเซอร้ม [11] และจากการทดลองพบว่า การเติมกลีเซอรอลเพื่อเป็นพลาสติกไซเซอร้มในแป้งร้อยละ 40 โดยน้ำหนักเป็นปริมาณกลีเซอรอลมากที่สุดที่สามารถเติมลงในแป้งที่ใช้ในการทดลองนี้ได้ จึงไม่ทำการเติมกลีเซอรอลมากกว่านี้

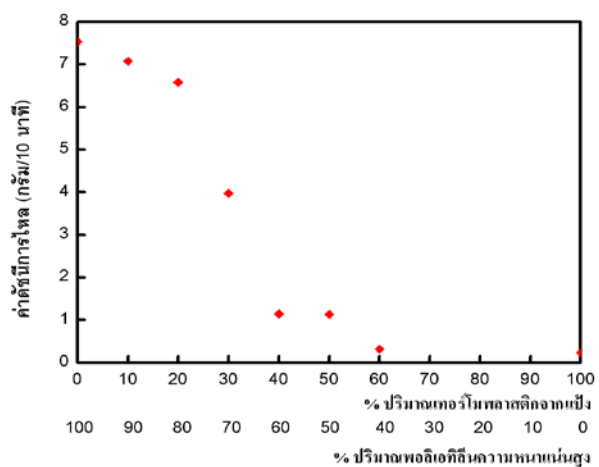


(ก) (ข)  
รูปที่ 5 เทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน  
(ก) ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก  
(ข) ปริมาณกลีเซอรอลร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

### 3.2 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม

ค่าดัชนีการไหลเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการไหลของพลาสติกหลอม ณ อุณหภูมิหนึ่ง โดยใช้น้ำหนักคงที่ การมีค่าดัชนีการไหลน้อยแสดงให้เห็นว่ามีความหนืดสูง ซึ่งการมีความหนืดสูงจะทำให้การขึ้นรูปเป็นชิ้นงานมีความยากลำบาก ในขณะที่การมีค่าความหนืดที่ต่ำจะทำให้วัสดุประสานแยกตัวออกจากผนังโลหะ [12] ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง เปรียบเทียบกับค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและเทอร์โมพลาสติก

จากแป้ง โดยมีผลการทดลองดังรูปที่ 6 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีการไหลและปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง โดยจากรูปชี้ให้เห็นว่าค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงมากและมีความแตกต่างกันมากถึงร้อยละ 96.86 และพบว่าค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งเพิ่มมากขึ้น และมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อเติมเทอร์โมพลาสติกจากแป้งร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมที่เติมปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มากถึงร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าดัชนีการไหลลดลงอย่างมาก และมีค่าใกล้เคียงกับค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมเป็นการนำเอาพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีค่าดัชนีการไหลที่สูงมาผสมกับ เทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มีค่าดัชนีการไหลที่ต่ำกว่า ดังนั้นในพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มีค่าดัชนีการไหลต่ำมากขึ้นยิ่งทำให้ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 6 ค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม



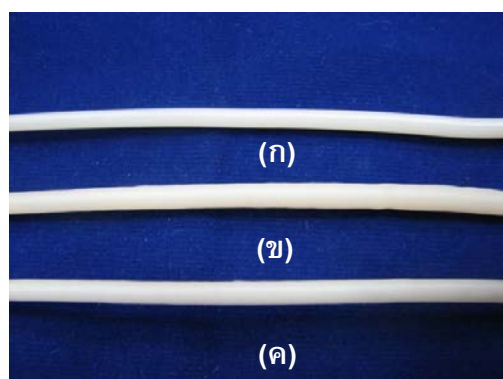
ดังนั้นในกระบวนการเตรียมเม็ดฉีดจึงไม่ทำการเตรียมเม็ดฉีดจากวัสดุประสานที่มีเทอร์โมพลาสติกจากแป้งและ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง ร้อยละ 60 โดยน้ำหนักประกอบอยู่ เนื่องจากค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมมีค่าที่ต่ำมากใกล้เคียงค่าดัชนีการไหลของเทอร์โมพลาสติกจากแป้ง

นอกจากนี้การทดสอบค่าดัชนีการไหลสามารถแสดงถึงความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม จากลักษณะผิวของพอลิเมอร์ผสมที่ไหลออกจากหัวฉีดเนื่องจากหากพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ดีเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่พอลิเมอร์หลอมไหลออกจากหัวฉีดจะเกิดแรงเสียดทานระหว่างหัวฉีดกับพอลิเมอร์หลอมที่มีขนาดเท่ากันตลอด ทำให้ลักษณะผิวของพอลิเมอร์หลอมที่ไหลออกจากหัวฉีดมีความเรียบไม่ขรุขระ ในทางกลับกันหากพอลิเมอร์ผสมไม่เข้ากัน ความแตกต่างระหว่างส่วนผสมทั้งสองที่ประกอบอยู่จะส่งผลต่อค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างหัวฉีดกับพอลิเมอร์หลอมที่ไหลผ่านหัวฉีดไม่เท่ากัน ทำให้ผิวของชิ้นงานที่ได้ไม่เรียบ ดังรูปที่ 7 เส้นพลาสติกที่ไหลออกจากหัวฉีดมีลักษณะปรากฏ ผิวเรียบ สีขาว ทึบแสง แสดงให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความเข้ากันอีกประการหนึ่งที่ช่วยยืนยันความเข้ากันของพอลิเมอร์ผสม คือน้ำหนักของเส้นพอลิเมอร์ผสมที่ไหลผ่านหัวฉีด ตามเวลาที่กำหนด หากพอลิเมอร์ผสมมีความเข้ากันได้ น้ำหนักของพลาสติกผสมที่ไหลผ่านหัวฉีดจะมีความสม่ำเสมอ แต่ถ้าพอลิเมอร์ผสมไม่เข้ากัน พลาสติกผสมที่ไหลผ่านหัวฉีดจะไหลไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้น้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่ไหลออกมาตามเวลาที่กำหนดไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะวัดค่า

ดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ได้ รูปที่ 6 แสดงถึงค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่วัดได้และมีค่าความเบี่ยงเบนที่น้อยมาก ซึ่งให้เห็นว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความเข้ากันได้ดี

### 3.3 ความสามารถในการฉีดขึ้นรูป

วัสดุประสานที่ให้ความแข็งแรงกับชิ้นงาน มีหน้าที่ในการยึดเกาะผงวัสดุและวัสดุประสานอื่นเข้าด้วยกัน ป้องกันการแยกตัวออกจากกันของส่วนผสมทั้งหมด [13] ดังนั้นจึงเป็นตัวกำหนดความสามารถในการฉีดขึ้นรูปของเม็ดฉีด ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับเม็ดฉีดนั้นสามารถตรวจสอบได้จากลักษณะการไหลของเม็ดฉีดระหว่างการไหลผ่านหัวฉีด โดยเม็ดฉีดที่ไหลผ่านหัวฉีดต้องไหลอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถไหลเข้าไปเติมเต็มแม่พิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์ในขณะที่ทำการฉีดขึ้นรูป ลดปัญหาความเสียหายของชิ้นงานที่เกิดจากอากาศแทรกตัวอยู่ภายใน หรือการไหลเข้าของวัสดุไม่เต็มพิมพ์ นอกจากนี้เม็ดฉีดที่ไหลผ่านหัวฉีดต้องมียลักษณะคล้ายยาสีฟัน คือ มีลักษณะผิวเรียบ เข้ากันได้ดี ไม่เกิดการแยกชั้นกันระหว่างผงวัสดุและวัสดุประสาน อันจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานที่ได้ภายหลังกระบวนการฉีดขึ้นรูป



รูปที่ 7 เส้นพลาสติกที่ไหลออกจากหัวฉีด  
(ก) TPS 50, (ข) TPS 40, (ค) TPS 30

จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะดังกล่าว ระหว่างเม็ดฉีดสูตร TPS 0 ที่ใช้เป็นสูตรอ้างอิงกับเม็ดฉีดสูตรอื่นที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบของวัสดุประสานที่ใช้พบว่า ลักษณะเม็ดฉีดที่ไหลผ่านหัวฉีดในทุกสูตรมีความคล้ายคลึงกันและคล้ายคลึงกับลักษณะเม็ดฉีดที่ไหลผ่านหัวฉีดของสูตรอ้างอิง คือ สามารถไหลได้อย่างต่อเนื่อง มีลักษณะผิวเรียบ ไม่ลอก ส่วนผสมต่างๆ สามารถเข้ากันได้ดี ไม่ปรากฏการแยกชั้นของแต่ละส่วนผสม แสดงให้เห็นว่าเม็ดฉีดที่ได้จากการใช้วัสดุประสานที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบในทุกสูตรสามารถฉีดขึ้นรูปได้ ดังรูปที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากแป้งที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมพลาสติกไซเซออร์ภายใต้ความร้อนและแรงเฉือนที่เหมาะสมแล้วนั้น จะทำให้แป้งมีสมบัติเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติก ดังผลการทดสอบที่ได้ออกมาแล้ว ด้วยเหตุนี้การนำแป้งมาใช้เป็นวัสดุประสานในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงโลหะ จะได้เม็ดฉีดที่สามารถนำไปฉีดขึ้นรูปได้เช่นเดียวกับการใช้วัสดุประสานจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ โดยสูตรการผสมที่มีปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมากที่สุดที่สามารถฉีดขึ้นรูปได้ ได้แก่ พอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

#### 4. สรุปผลการดำเนินการวิจัย

1. แป้งมันสำปะหลัง สามารถปรับปรุงสมบัติให้เป็นเทอร์โมพลาสติกได้โดยการเติมพลาสติกไซเซออร์คือ กลีเซอรอล ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสมและได้รับแรงเฉือนอย่างเพียงพอ จะทำให้แป้งสามารถหลอมและไหลได้เช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติก

2. ปริมาณกลีเซอรอลที่ประกอบอยู่ในเทอร์โมพลาสติกจากแป้งมีผลอย่างมากต่อความสามารถในการหลอมและไหลได้ของแป้ง โดยปริมาณกลีเซอรอลยิ่งมากความสามารถในการหลอมและไหลได้ของแป้งยิ่งมากตามไปด้วย

3. ปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่ผสมอยู่ใน พอลิเมอร์ผสมมีผลอย่างมากต่อค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสม โดยยิ่งปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งเพิ่มมากขึ้นค่าดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมที่ได้ยิ่งมีค่าต่ำลง

4. เม็ดฉีดที่มีเทอร์โมพลาสติกจากแป้งเป็นองค์ประกอบสามารถฉีดขึ้นรูปได้ โดยปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งที่มากที่สุดที่สามารถนำมาเตรียมเป็นเม็ดฉีด แล้วทำการฉีดขึ้นรูปได้ คือ สูตรพอลิเมอร์ผสมที่มีปริมาณเทอร์โมพลาสติกจากแป้งร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียน ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ฝ่ายอุตสาหกรรม โครงการโครงการอุตสาหกรรมสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี ประจำปีการศึกษา 2551 ที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งห้องปฏิบัติการฉีดขึ้นรูปโลหะผง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ ในการทำวิจัย



(ก)



(ข)

รูปที่ 8 ลักษณะเม็ดฉีดที่ไหลผ่านหัวฉีด

(ก) TPS 0, (ข) TPS 30

### เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Castro a, S. Merino, B. Levenfeld , A. Várez b, and J.M. Torralba, 2003, "Mechanical properties and pitting corrosion behaviour of 316L stainless steel parts obtained by a modified metal injection moulding process", Journal of materials Processing Technology, Vol. 143-144, pp. 397-402.
- [2] Animesh Bose, Isamu Otsuta, Takafumi Yoshida, and Hisataka Toyoshima, 2008, "Faster

sintering and lower costs with ultra-fine MIM powders", Metal Powder Report, Vol. 63, pp. 25-30.

[3] Kanjana Uthaichay, Kosin Hachawee, Narain Arsaipanit, Natthaporn Surapat, Wanchai Lerdwijitjarud, and Amnard Sittatrakul, 2005, "Preparation and testing of Thermoplastic Starch", 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree University of Technology, 18 – 20 October.

[4] Wang Ning, Yu Jiugao, Ma Xiaofri, and Wu Ying, 2006, "The influence of citric acid on properties of thermoplastic starch/linear low-density polyethylene blends", Carbohydrate Polymer, Vol. 67, pp. 446-453.

[5] Wang Shujun, Yu Jiugao, and Yu Jinglin, 2005, "Preparation and characterization of compatible thermoplastic starch/polyethylene blends", Polymer Degradation and Stability, Vol. 87, pp. 395-401.

[6] D. Bikiaris, J. Prinos, K. Koutsopoulos, N. Vouroutzis, E. Pavlidou, and N. Frangi, 1998, "LDPE/plasticized starch blends containing PE-g-MA copolymer as compatibilizer", Polymer Degradation and Stability, Vol. 59, pp. 287 -291.

[7] Chi-Yuan Huang, Ming-Lih Roan, Mei-Chuan Kuo, and Wan-Ling Lu, 2005, "Effect of compatibiliser on the biodegradation and mechanical properties of high-content starch/low-density polyethylene blends",

Polymer Degradation and Stability, Vol.90, pp. 95-105

[8] กล้าณรงค์ ศรีรอด, เทคโนโลยีของแป้ง, พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

[9] Jean-Marie Raquez, Yogaraj Nabar, Madhusudhan Srinivasan Boo-Young Shin, Ramani Narayan and Philippe Dubois, 2008, "Maleated thermoplastic starch by reactive extrusion", Carbohydrate Polymer, Vol. 74, pp. 159-169.

[10] สุภาณี หิรัญธนกิจจากุลม, 2538, ความรู้เกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ ตอนที่ 10, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุขกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข.

[11] L. Godbillot, P. Dole, C. Joly, B. Roge and M. Mathlouthi, 2006, "Analysis of water binding in starch plasticized films", Food Chemistry, Vol. 96, pp. 380 – 386

[12] LI Yi-min, LIU Xiang-quan, LUO Feng-hua, and WE Jian-ling, 2006, "Effects of surfactant on properties of MIM feedstock", Nonferrous Met. Soc., Vol. 17, pp. 1-8.

[13] Ming-Shyan Huang, Hung-Chuan Hsu, 2009, "Effect of backbone polymer on properties of 316L stainless steel MIM compact", Journal of materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 5527 – 5535.