

Article

การผลิตแม่เหล็กถาวรรูปร่างซับซ้อนด้วยกระบวนการ ผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ

Complex Near-net-shape Bonded Magnet Fabrication by Additive Manufacturing

ธนิดา เจริญสุข*

Thanida Charoensuk

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวัสดุเชิงฟังก์ชันและนาโนเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

Functional Materials and Nanotechnology Center of Excellence (FuNTech),
Walailak University, Thasala District, Nakhon Si Thammarat Province 80160

*Corresponding author E-mail: thanida.chrs@gmail.com

วันที่รับบทความ: 21 พฤษภาคม 2564, วันแก้ไขบทความ: 23 มิถุนายน 2564, วันตอบรับบทความ: 24 มิถุนายน 2564

Received: 21st May 2021, Revised: 23rd June 2021, Accepted: 24th June 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงโอกาสและความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งปัจจุบันได้รับความนิยมนำมาพัฒนาการใช้งานกันแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตต่าง ๆ สำหรับการนำมาใช้ในงานผลิตแม่เหล็กถาวรรูปร่างซับซ้อนที่ยากจะทำการผลิตได้ด้วยวิธีแบบทั่วไป โดยการลำดับเนื้อหากล่าวถึงการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุเปรียบเทียบกับการผลิตที่ใช้อยู่โดยทั่วไปในงานอุตสาหกรรม ที่มาและหลักการทำงานของเครื่องพิมพ์สามมิติชนิดต่าง ๆ ที่ได้รับความนิยม ศักยภาพ ความสามารถ โอกาส สาเหตุและความสำคัญในการพัฒนาใช้งานการพิมพ์สามมิติเพื่อการผลิตวัสดุแม่เหล็กถาวร รวมถึงการทำงานของนักวิจัยกลุ่มต่าง ๆ ที่สนใจในงานพัฒนาเทคโนโลยีนี้ ซึ่งในที่นี้พบว่าการผลิตแม่เหล็กผสมพอลิเมอร์ด้วยวิธี Big area additive manufacturing ทำให้สามารถผลิตแม่เหล็กผสมพอลิเมอร์ที่มีส่วนประกอบของอนุภาคแม่เหล็กในสัดส่วนสูงสุดส่งผลต่อการมีสมบัติแม่เหล็กสูงโดยที่ยังคงสมบัติเชิงกลเช่นเดียวกับแม่เหล็กที่ผลิตด้วยวิธีทั่วไปได้

คำสำคัญ: การผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ, การพิมพ์สามมิติ, แม่เหล็กถาวร, ค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด

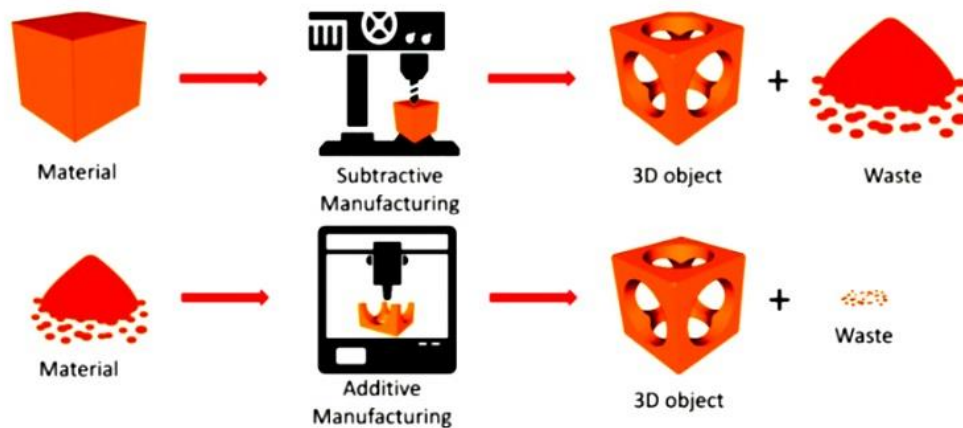
Abstract

This article aims to demonstrate the advantages and possibilities of developments in additive manufacturing technology, also known as 3D printing. The technology has been widely developed and used in a variety of manufacturing industries in the present, for producing complex near-net-shape permanent magnets that are difficult to obtain from conventional methods. In this article, the additive manufacturing is firstly compared to the common production used in industry. In addition to history and principles behind various types of successful 3D printers, the ability, capacities, opportunities, and importance of the development of 3D printing applications essential for permanent magnet manufacturing are elaborated. The works of various groups of researchers to advance this technology are also included. Based on these studies, the big area additive manufacturing is able to manufacture polymer-bonded magnets with the maximum proportion of magnetic particles, resulting in magnets with desirable magnetic properties and comparable mechanical qualities as magnets produced by the conventional approach.

Keywords: Additive manufacturing, 3D printing, Permanent magnet, Maximum energy product

บทนำ

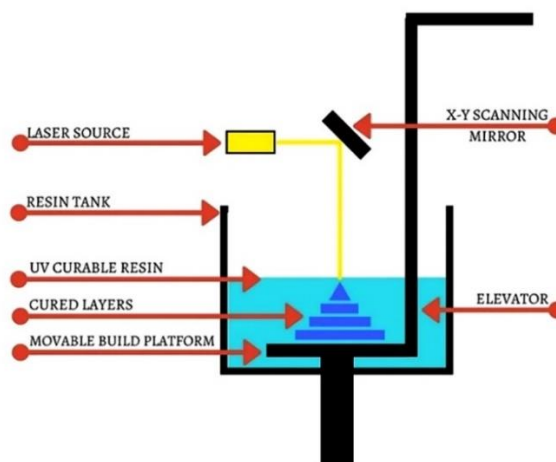
การผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing: AM) หรือนิยมเรียกกันว่า เทคโนโลยีการพิมพ์สามมิติ (3D printing) เดิมมักถูกใช้ในงานสร้างวัสดุต้นแบบ (Rapid prototyping) แต่ปัจจุบันได้มีการนำมาใช้งานการผลิตในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย ด้วยวิธีนี้มีข้อดีที่แตกต่างจากวิธีการผลิตขึ้นรูปวัสดุแบบทั่วไป ซึ่งหากไม่ใช้การผลิตแบบฉีดวัสดุเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) ก็มักจะเป็นการผลิตแบบลดเนื้อวัสดุ (Subtractive manufacturing) ที่เริ่มต้นจากวัตถุดิบหลักชิ้นใหญ่ นำมาผ่านกระบวนการตัด สกัด กลึง เจาะ หรือเจียรระไน โดยสามารถใช้เทคโนโลยีควบคุมการทำงานที่ต้องการความละเอียดสูงหรือซับซ้อนด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี (Computer Numerical Control: CNC) ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานปริมาณมากได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ แต่ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้ง (Wastes) เกิดขึ้นจำนวนมาก ในขณะที่การผลิตแบบ AM จะใช้กระบวนการที่ตรงกันข้าม โดยเป็นการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุเพิ่มไปทีละชั้น ๆ ในแนวนอน ควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรมสร้างแบบจำลองสามมิติ เช่น Computer-aided designs (CAD), AutoCAD, SOLIDWORKS หรือ Solid Edge และโปรแกรมในการแปลงไฟล์ที่เหมาะสมสำหรับการสั่งพิมพ์ เช่น Slic3r, MakerBot Print, Netfabb Standard หรือ MatterControl จนกระทั่งสำเร็จเป็นชิ้นงานตามต้องการ จึงทำให้สามารถผลิตวัสดุสามมิติรูปร่างต่าง ๆ รวมถึงวัสดุรูปร่างซับซ้อนและมีสมบัติเฉพาะเจาะจงให้สำเร็จได้โดยไม่เกิดวัสดุสูญเสียหรือเหลือทิ้งจึงไม่สิ้นเปลืองวัตถุดิบตั้งต้น การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการผลิตทั้งสองแบบนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive manufacturing) เปรียบเทียบกับการผลิตแบบลดเนื้อวัสดุ (Subtractive manufacturing); Copyright of ref. [1]

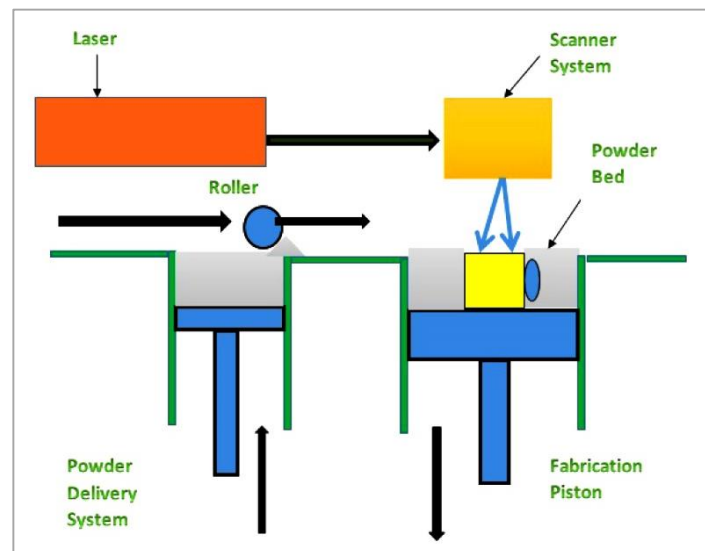
เครื่องพิมพ์สามมิติชนิดต่าง ๆ

Stereolithography (SLA) คือเครื่องพิมพ์สามมิติรุ่นแรก ถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย Chuck Hull ในปี ค.ศ.1986 (อย่างไรก็ตามมีการบันทึกว่าในปี ค.ศ. 1981 Hideo Kodama ชาวญี่ปุ่น เป็นคนแรกที่ค้นพบกระบวนการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุ โดยที่เขาได้ทำการสร้างวัตถุของแข็งจากการใช้แสงอัลตราไวโอเลตทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว ซึ่งก็คือหลักการทำงานของ SLA นั่นเอง [2]) และได้รับความนิยมใช้งานมาจนปัจจุบัน ทำงานโดยหลักการใช้แสงยูวีเลเซอร์ (UV laser) ทำให้เรซินเหลวไวแสง (Liquid resin photopolymer) เกิดปฏิกิริยาแข็งตัว (Curing) เป็นชั้น ๆ ด้วยลักษณะหลักการทำงานดังรูปที่ 2 จนกระทั่งเกิดเป็นชิ้นงานตามต้องการ ชิ้นงานที่ได้รับจะมีความเที่ยงตรง ความละเอียด และความเรียบเนียนของผิวสัมผัสสูง แต่ราคาต้นทุนเครื่องพิมพ์และวัสดุเรซินเหลวไวแสงค่อนข้างสูงเช่นกัน จึงมักเหมาะสำหรับการใช้งานในระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการความละเอียดชิ้นงานสูง เช่น งานชิ้นส่วนโมเดล งานทันตกรรม งานต้นแบบแม่พิมพ์ และงานเครื่องประดับ



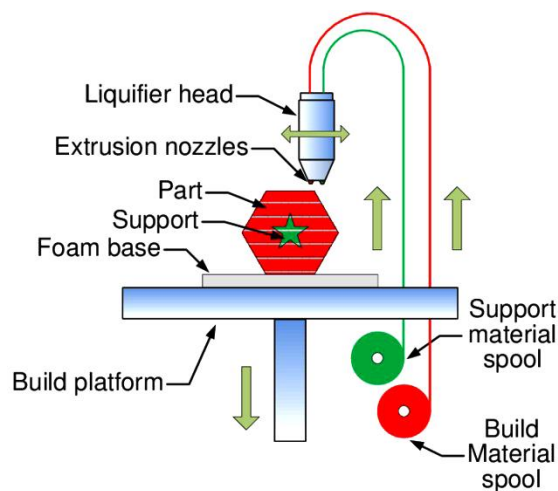
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่อง SLA; Copyright of ref. [3]

Selective laser sintering (SLS) เป็นเครื่องพิมพ์อีกรุ่นหนึ่งถูกสร้างขึ้นในช่วงเวลาไล่เลี่ยกันช่วงกลางปีทศวรรษ 1980s โดย Carl Robert Deckard ทำงานด้วยการใช้แสงเลเซอร์กำลังสูง ให้ความร้อนแก่ผงพลาสติก ละเอียดจนกระทั่งเกิดการเผาผนึก (Sintering) และเกิดรูปร่างเป็นชิ้น ๆ ต่อเนื่องจนเกิดเป็นชิ้นงาน ด้วยลักษณะหลักการทำงานดังรูปที่ 3 ตัวเครื่องพิมพ์มีราคาสูงหากต้นทุนวัสดุผงพลาสติกมีราคาไม่สูงมาก ที่นิยมใช้ทั่วไป คือ โพลีเอไมด์ (PA-11, PA-12) ซึ่งรู้จักกันในชื่อทางการค้าว่า ไนลอน (Nylon-11, Nylon-12) ด้วยมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี ราคาถูก ทั้งยังสามารถผสมวัสดุเติมแต่ง (Additives) เช่น เส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) แก้ว (Glass) หรือ อลูมิเนียม (Aluminium) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกล ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความแข็งแรง และมีความเที่ยงตรงสูงได้ จึงนิยมนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น งานผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์การบิน อุปกรณ์การแพทย์ อุปกรณ์การทหาร และเครื่องใช้ไฟฟ้า



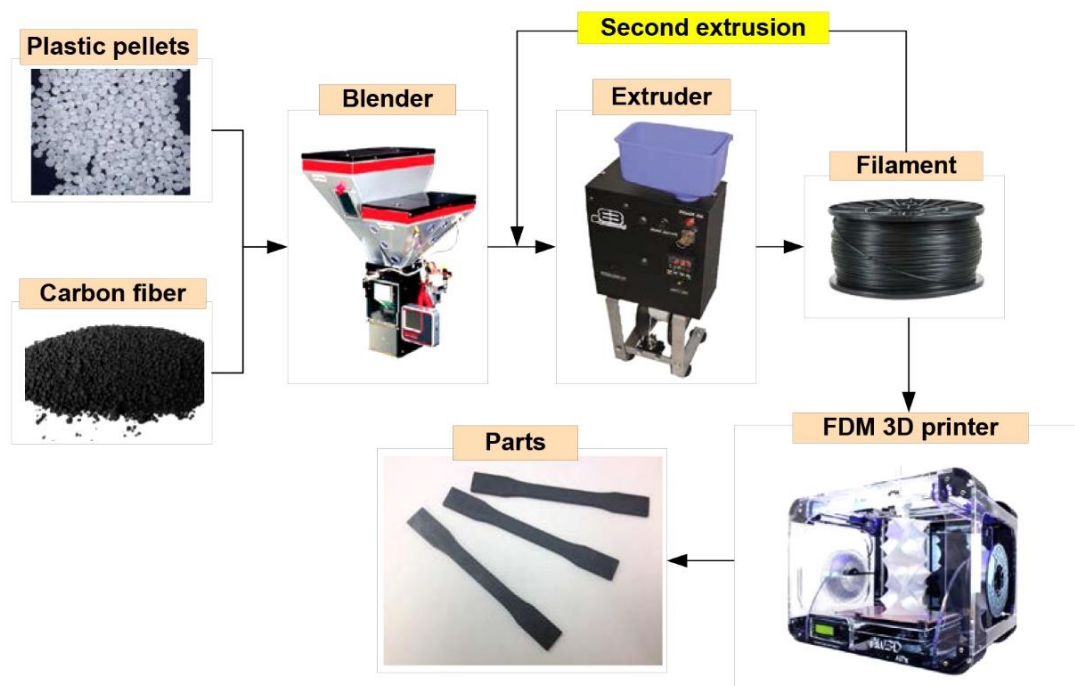
รูปที่ 3 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของ SLS; Copyright of ref. [4]

Fused filament fabrication (FFF) หรือเรียกว่า Fused deposition modeling (FDM) ได้รับการจดสิทธิบัตรว่าเป็นวิธีการผลิตแบบเติมเนื้อวัสดุแบบใหม่ในปี ค.ศ.1989 โดย Scott & Lisa Crump ในนามบริษัท Stratasys Ltd. [5,6] เป็นเครื่องพิมพ์ขึ้นรูปวัสดุพลาสติกสามมิติ ซึ่งเป็นที่รู้จักในนาม “Desktop 3D printers” และได้รับความนิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน ด้วยข้อดีที่ใช้งานได้ไม่ยากและมีราคาไม่สูงเมื่อเทียบกับเครื่องพิมพ์ชนิดอื่น ๆ วัสดุที่ใช้คือ เส้นพลาสติก (Plastic filaments) ซึ่งเป็นจำพวกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ก็มีให้เลือกใช้ได้หลายชนิดและมีราคาไม่แพง การใช้งานทำโดยให้ความร้อนผ่านหัวพิมพ์โลหะเพื่อหลอมเส้นพลาสติก แล้วฉีดไปตามตำแหน่งที่กำหนดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ออกแบบและควบคุมการพิมพ์ในแนวระนาบ (แกน x-y) และสร้างรูปร่างของชิ้นงานขึ้นมาเป็นชั้น ๆ ในแนวตั้ง (แกน z) หากแต่ลักษณะผิววัตถุมักจะมองเห็นเป็นชั้นของเส้นพลาสติก กระบวนการหลังพิมพ์จึงอาจต้องทำการตกแต่งผิวเพิ่มเติมด้วย ลักษณะการทำงานของเครื่องพิมพ์นี้แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของ FFF; Copyright of ref. [6]

การปรับปรุงหรือเพิ่มคุณสมบัติชิ้นงานของเครื่องพิมพ์ FFF ยังสามารถทำได้ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นพลาสติกก่อนการนำมาใช้งาน โดยทำการผสมวัสดุเติมแต่งกับเม็ดพลาสติกก่อนการรีดเป็นเส้น เพื่อให้ได้เป็นเส้นพลาสติกคอมโพสิต (Composites filament) ที่มีสมบัติพิเศษตามต้องการ แล้วจึงนำไปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับเครื่องพิมพ์ ตัวอย่างดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การปรับปรุงคุณสมบัติเส้นพลาสติกโดยการทำคอมโพสิตก่อนนำมาใช้งานใน FFF; Copyright of ref. [6]

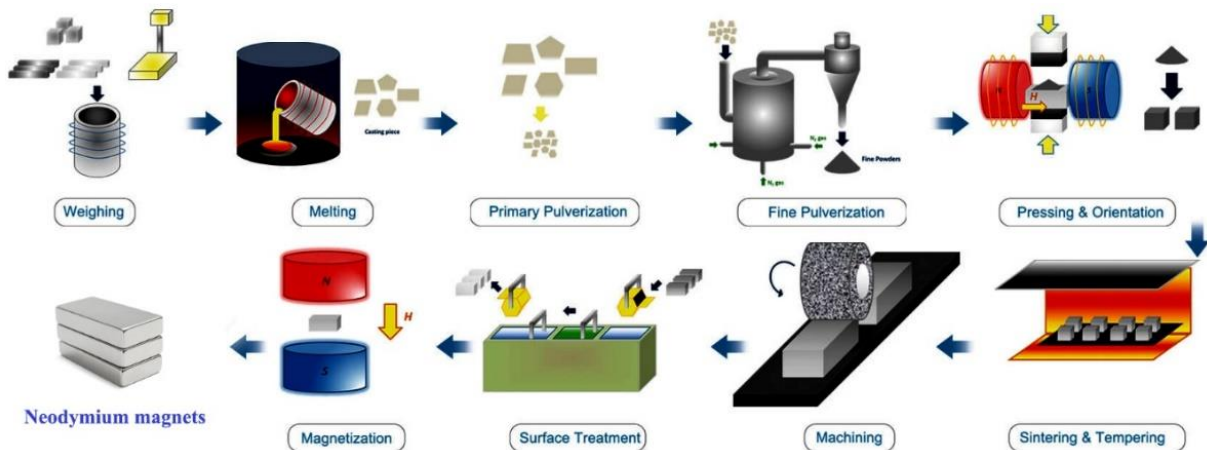
นอกจากเครื่องพิมพ์สามชนิดนี้ ยังมีเครื่องพิมพ์สามมิติชนิดอื่น ๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นตามวัตถุประสงค์ใช้งานต่าง ๆ เช่น Digital light processing (DLP), Selective laser melting (SLM), Laser engineered net shaping (LENS), Direct metal deposition (DMD), Laminated object manufacturing (LOM), Material jetting (MJ), Binder jetting (BJ), three-dimensional printing (3DP), และ Electron beam melting (EBM) [7-8] จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีเครื่องพิมพ์สามมิติ พบว่าปัจจุบันมีการรายงานความสำเร็จในการใช้งาน AM ในงานผลิตภัณฑ์อื่น ๆ นอกเหนือจากวัสดุพอลิเมอร์ เช่น โลหะ (Metallic materials) หรือโลหะผสม (Alloys) สำหรับใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และการบิน อุตสาหกรรมยาและการแพทย์ และเทคโนโลยีอื่น ๆ อีกหลากหลาย รวมถึงการพัฒนาใช้เพื่อการผลิตวัสดุแม่เหล็กถาวร [9-14] ซึ่งมีบทบาทสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาเทคโนโลยีขั้นสูงต่อไปข้างหน้า ด้วยพลังงานแม่เหล็กจัดเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

ความสำคัญแม่เหล็กถาวรและวิธีการผลิต

เทคโนโลยีด้านต่าง ๆ ในปัจจุบัน ทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ด้านการสื่อสาร การคมนาคม เครื่องอำนวยความสะดวกในอุตสาหกรรม เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การสร้างแหล่งกำเนิดพลังงาน การแปลงรูปพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้า เช่น กังหันลมผลิตไฟฟ้า มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ฯลฯ ล้วนใช้ประโยชน์จากหลักการทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) เป็นส่วนประกอบสำคัญ ดังนั้นการพัฒนาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีขั้นสูง (Advanced technology) จึงเชื่อมโยงกับความต้องการใช้งานแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติและรูปร่างซับซ้อนมีความจำเพาะเจาะจงมากขึ้น เช่น ความต้องการใช้งานอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโน การพัฒนาแม่เหล็กขนาดเล็กหากมีความแรงแม่เหล็กสูง และการพัฒนาวัสดุแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติจำเพาะเจาะจง หรือเรียกว่า วัสดุแม่เหล็กเชิงฟังก์ชัน (Functional magnetic material: FMM) [15] S. M. Abdelbasir and A. E. Shalan (2019) ได้ให้นิยามว่า FMM หมายความว่า กลุ่มของวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพสามารถตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กภายนอกและแสดงพฤติกรรมแม่เหล็กที่มีความแตกต่างจากแม่เหล็กทั่วไป อันเป็นผลกระทบจากอันตรกิริยาต่าง ๆ เช่น อันตรกิริยาระหว่างพื้นผิว/ผิวหน้าสัมผัส (Surface/interface effects) การถ่ายโอนประจุไฟฟ้า (Electronic charge transfer) และอันตรกิริยาแม่เหล็ก (Magnetic interaction) ของอนุภาคแม่เหล็กระดับนาโน ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติเฉพาะที่มีความพิเศษ จึงสามารถนำไปใช้ต่อยอดการพัฒนาเทคโนโลยีแห่งอนาคตที่เรียกกันว่า วัสดุอัจฉริยะ (Smart materials) [16] ซึ่งวัสดุเฉพาะเหล่านี้จะมีข้อจำกัดจากกรรมวิธีการผลิตแม่เหล็กถาวรแบบทั่วไป

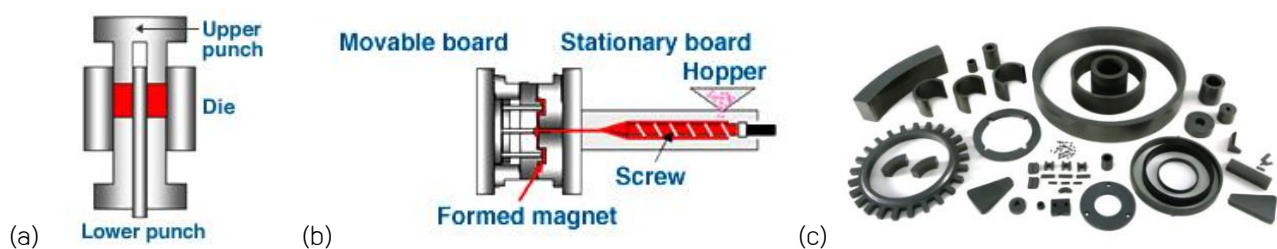
การผลิตแม่เหล็กถาวรที่ใช้อยู่ทั่วไปมากสุดในอุตสาหกรรม คือการขึ้นรูปโลหะด้วยกรรมวิธีผง (Powder metallurgy) กระบวนการเริ่มต้นจากการเตรียมโลหะสารตั้งต้นแม่เหล็กและส่วนผสมต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบผง (Powder production) และทำการผสม (Blending) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามความต้องการใช้งาน จากนั้นทำการอัด (Compaction) เข้าแม่พิมพ์ให้เป็นรูปร่าง โดยที่ความแข็งแรงสัมพันธ์กับความหนาแน่น ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องมือ วิธีการ และขนาดของแรงกดที่ใช้ แล้วทำการให้ความร้อน (Sintering) ด้วยอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดของโลหะสารตั้งต้น ภายใต้สภาวะสุญญากาศหรือการควบคุมบรรยากาศ เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อนั้ระหว่างอนุภาคสารโลหะผสม ตามด้วยกระบวนการสิ้นสุด (Finishing) เพื่อปรับแต่งชิ้นงานให้มีรูปร่างสมบูรณ์ตามต้องการ เช่น การขัดผิวเรียบ การหั่นบล็อก การตกแต่งรูปร่างหรือเหลี่ยมมุม การเคลือบผิว ฯลฯ แล้วทำการแมกไนไซ์ (Magnetizing) ภายใต้สนามแม่เหล็กความแรงสูง เพื่อเหนี่ยวนำและปรับทิศการจัดเรียงไดโพลโมเมนต์แม่เหล็ก (Magnetic dipole moments) ซึ่งส่งผลให้เกิดอำนาจแม่เหล็กในตัววัสดุแม่เหล็กถาวร กระบวนการผลิตโดยรวมแสดงดังรูปที่ 6 แม่เหล็กที่ผลิตโดยวิธีการนี้ ได้แก่

นีโอไดเมียม (NdFeB) ซามาเรียมโคบอลต์ (SmCo) อัลนิโค (Alnico) และแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ (Ferrite) ซึ่งล้วนเป็นแม่เหล็กรูปร่างไม่ซับซ้อนที่นิยมใช้งานอยู่ทั่วไป ซึ่งแม่เหล็กเหล่านี้มักถูกเรียกว่า Sintered magnet



รูปที่ 6 กระบวนการผลิตแม่เหล็กนีโอไดเมียมด้วย Powder metallurgy & sintering technique; Copyright of ref. [17]

นอกจากนี้ยังนิยมนำแม่เหล็กเฟสฮาร์ดที่มีส่วนประกอบหลักเป็นธาตุแรร์เอิร์ทซึ่งมีความแรงแม่เหล็กสูง เช่น NdFeB รวมถึงแม่เหล็กอื่น ๆ มาทำการผสมลงในเนื้อพอลิเมอร์เพื่อเตรียมการผลิตเป็น Polymer-bonded magnet โดยทำการผลิตขึ้นรูปเป็นวัสดุแม่เหล็กด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (Compression molding) ก็จะทำให้ได้ผลผลิตวัสดุแม่เหล็กที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำและความทนทาน มีราคาต้นทุนลดลง และยังสามารถผลิตเป็นวัสดุแม่เหล็กรูปร่างซับซ้อนมากขึ้นได้โดยวิธีการหลอมและฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding) แบบต่าง ๆ ตามความต้องการใช้งาน ลักษณะกระบวนการผลิต 2 รูปแบบนี้และตัวอย่างผลผลิตแสดงดังรูปที่ 7

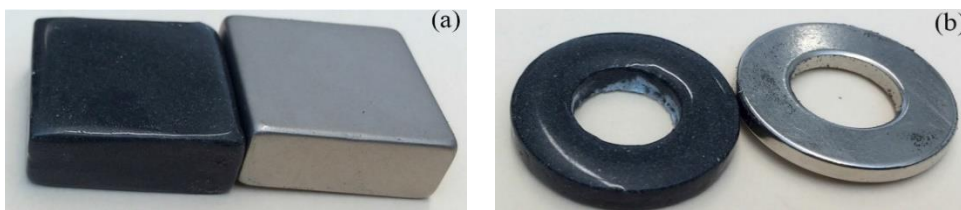


รูปที่ 7 กระบวนการขึ้นรูป Polymer-bonded magnet ด้วยวิธี (a) Compression molding; Copyright of ref. [18], (b) Injection molding; Copyright of ref. [18] และ (c) ผลิตภัณฑ์ Polymer-bonded magnet; Copyright of ref. [19]

การพัฒนาใช้ AM ในการผลิตแม่เหล็กถาวร

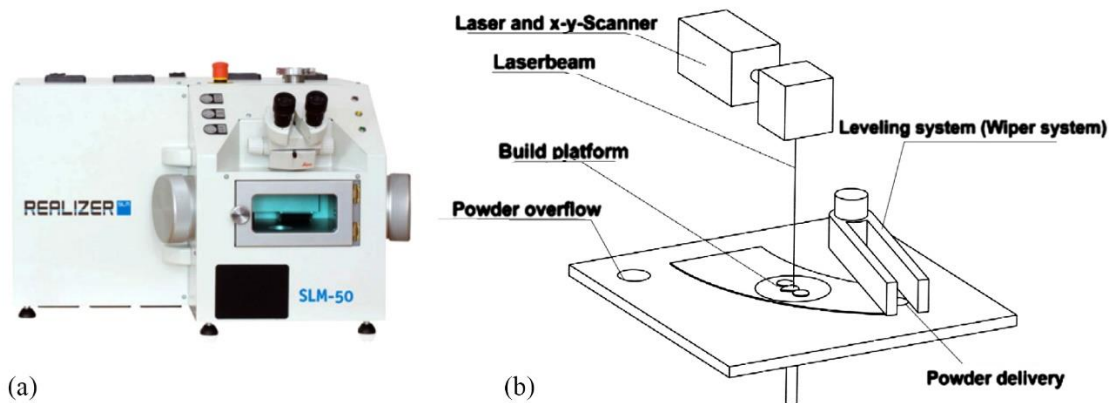
เพื่อการพัฒนาวิศวกรรมและเทคโนโลยีขั้นสูงในปัจจุบันและอนาคต อีกทั้งการใช้ AM เป็นโอกาสทางเลือกที่ดีสำหรับแม่เหล็กจากธาตุแรร์เอิร์ทซึ่งเป็นแร่ธาตุหายากและมีราคาแพง ที่ไม่ทำให้เกิดการสูญเสียวัตถุดิบให้กลายเป็นของเหลือทิ้งจำนวนมาก อีกทั้งประหยัดต้นทุนค่าแม่พิมพ์ (Mold) ในการใช้งานผลิตแม่เหล็กชนิด Polymer-

bonded magnet รูปร่างซับซ้อนอีกด้วย วิธีการผลิตแบบ AM จึงได้รับความสนใจอย่างมากในการศึกษาวิจัยประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตแม่เหล็กรูปแบบใหม่เพื่อให้อาจพัฒนา FMM ต่อไปได้ และเนื่องจากการผลิตแบบ AM สามารถทำได้หลายวิธีด้วยเครื่องพิมพ์ชนิดต่าง ๆ จึงมีการศึกษาวิจัยทดลองขึ้นรูปแม่เหล็กด้วยหลากหลายกระบวนการ เช่น การทดลองผลิตแม่เหล็ก $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ด้วยกระบวนการ Binder jetting ของ M. P. Paranthaman et al. (2016) ซึ่งใช้วัสดุตั้งต้นเป็นผงแม่เหล็ก $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคประมาณ $70\text{ }\mu\text{m}$ ขึ้นรูปวัสดุด้วยวิธีฉีด Binder ลงไปเชื่อมผงอนุภาคเข้าด้วยกันทีละชั้น ๆ จนเป็นรูปร่างตามกำหนดด้วยแบบจำลองจาก Computer-aided design (CAD) แล้วทำการอบ (Curing) ด้วยอุณหภูมิระหว่าง $100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4-6 h ได้ชิ้นงานซึ่งเรียกว่า “Green magnet” นำไปจุ่มแช่ในยูรีเทนเรซิน (Urethane resin) เพื่อให้แทรกซึมเข้าไปในรูพรุนของวัสดุช่วยเพิ่มความหนาแน่นและความแข็งแรงเชิงกล ได้ผลผลิตแม่เหล็กดังรูปที่ 8 มีค่าความหนาแน่น 3.47 g/cm^3 เป็นค่าประมาณ 46% ของ ค่าความหนาแน่นผลึกเดี่ยวของ NdFeB มีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (Intrinsic coercivity: H_c) 716.2 kA/m อยู่ในช่วงพิสัยของค่า H_c ของผงแม่เหล็กตั้งต้น ($692.3\text{--}748.0\text{ kA/m}$) ซึ่งแสดงถึงการคงสภาพของแม่เหล็กไว้ได้ในการผลิตขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ [20]

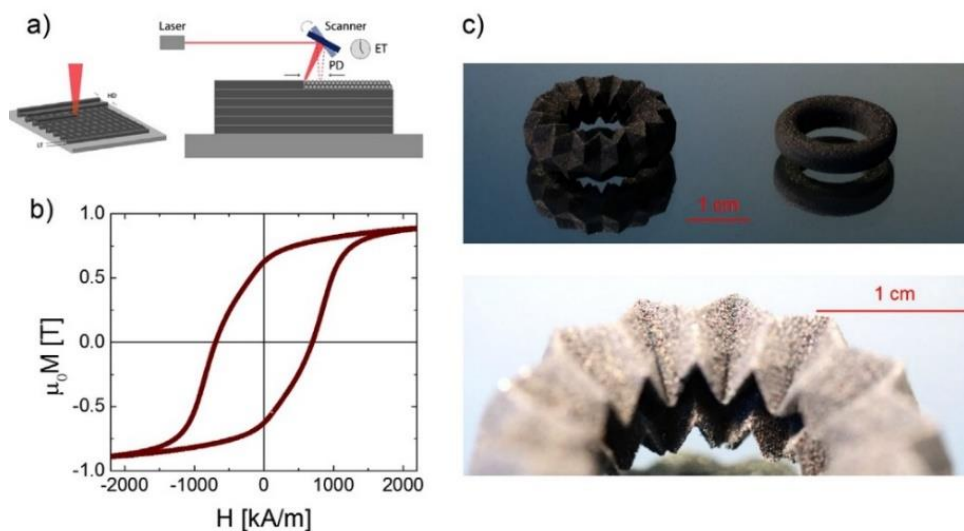


รูปที่ 8 แม่เหล็ก NdFeB ผลิตโดยวิธี AM ด้วย Binder jetting (สีดำ) (a) ทรงสี่เหลี่ยม และ (b) ทรงโดนัท เปรียบเทียบกับแม่เหล็กเคลือบนิเกิลที่จำหน่ายในท้องตลาดทั่วไป; Copyright of ref. [20]

J. Jaćimović et al. (2017) ใช้ SLM (Model Realizer SLM 50) ซึ่งเป็นเครื่องพิมพ์สามมิติสำหรับวัสดุโลหะ ลักษณะเครื่องพิมพ์และกระบวนการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 9 [21] ทดลองทำการผลิตแม่เหล็ก NdFeB รูปร่างซับซ้อน ลักษณะดังรูปที่ 10(c) โดยใช้ผงอนุภาคแม่เหล็ก $\text{Nd}_{7.5}\text{Pr}_{0.7}\text{Zr}_{2.6}\text{Ti}_{2.5}\text{Co}_{2.5}\text{Fe}_{75}\text{B}_{8.8}$ (ชื่อทางการค้าคือ MQP-S) ซึ่งมีส่วนประกอบของธาตุแร่เอิร์ท Nd และ Pr 19% โดยน้ำหนัก เป็นวัตถุดิบตั้งต้นออกแบบรูปร่างต้นแบบด้วย CAD software และสั่งการพิมพ์ขึ้นรูปด้วย Sliced software ด้วยลักษณะการทำงานของเครื่องพิมพ์แสดงดังรูปที่ 10(a) โดยลำแสงเลเซอร์พลังงานสูงทำให้เกิดการหลอมละลายของผงโลหะเป็นชั้น ๆ จนได้ผลผลิตแม่เหล็กรูปร่างตามต้นแบบลักษณะดังรูปที่ 10(c) อย่างไรก็ตามการผลิตขึ้นรูปแม่เหล็กด้วยวิธีนี้ต้องทำการควบคุมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ค่อนข้างละเอียด ทั้งการโฟกัส ความเร็วลำแสงเลเซอร์ พลังงานเวลาและการเคลื่อนที่ในแนวระนาบที่ใช้ในการฉายลำเลเซอร์บนผงอนุภาค การควบคุมความหนาของการเติมชั้นผงอนุภาคโลหะ รวมถึงความเร็วในการแข็งตัวเป็นรูปร่าง ล้วนส่งผลต่อค่าสมบัติแม่เหล็ก ซึ่งพบว่าการลดค่าความหนาของการเติมชั้นผงอนุภาคโลหะจาก $100\text{ }\mu\text{m}$ เป็น $20\text{ }\mu\text{m}$ สามารถทำให้ค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด $(BH)_{\text{max}}$ เพิ่มขึ้นจาก 15 kJ/m^3 เป็น 45 kJ/m^3 ได้ เมื่อควบคุมพารามิเตอร์อื่นเป็นเช่นเดียวกัน บ่งชี้ชัดเจนถึงความสัมพันธ์ของกระบวนการหลอมและการเย็นตัว การเปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวแล้วเปลี่ยนเป็นสถานะของแข็งของผงอนุภาค มีความเกี่ยวข้องและสำคัญกับโครงสร้างระดับไมโครและส่งผลต่อคุณสมบัติแม่เหล็ก อย่างไรก็ตามพบว่าค่าสมบัติแม่เหล็กดีที่สุดที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ คือ $H_c = 695\text{ kA/m}$, $B_r = 0.59\text{ T}$ และ $(BH)_{\text{max}} = 45\text{ kJ/m}^3$ ซึ่งยังคงต้องมีการพัฒนาต่อเพื่อให้ได้ค่าแม่เหล็กสูงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน [22]

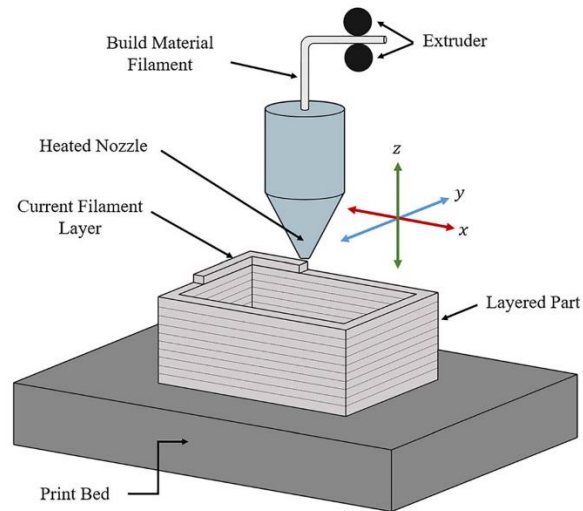


รูปที่ 9 (a) ภาพแสดงเครื่องพิมพ์ SLM และ (b) แผนภาพแสดงลักษณะกระบวนการทำงานของเครื่องพิมพ์ SLM; Copyright of ref. [21]



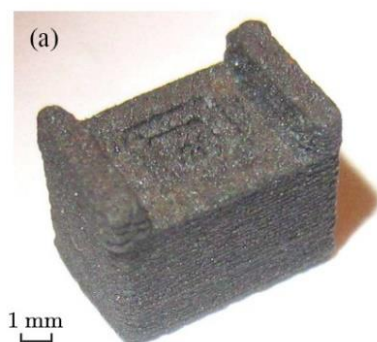
รูปที่ 10 (a) ลักษณะการทำงานของ SLM, (b) วงฮิสเตอร์ซิสแสดงสมบัติแม่เหล็กถาวร และ (c) ผลผลิตแม่เหล็ก NdFeB ที่ได้จากการทดลอง; Copyright of ref. [22]

การพิมพ์วัสดุสามมิติด้วย Extrusion-based AM เป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมใช้งานค่อนข้างมาก ด้วยเครื่องพิมพ์ชนิดนี้ในระดับขนาดเล็ก (Small-scale) มีราคาไม่สูงจึงสามารถเข้าถึงได้ง่าย ลักษณะกระบวนการทำงานแสดงดังรูปที่ 11 เริ่มจากเส้นใยเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic filament) ถูกส่งผ่านหัวรีด (Extruder) และให้ความร้อนเพื่อทำการหลอม แล้วส่งผ่านหัวฉีดทำการพิมพ์ขึ้นรูปในระนาบสองมิติก่อนจะเติมเนื้อเป็นชั้น ๆ จนได้เป็นรูปร่างสามมิติตามแบบที่กำหนด [23] ซึ่งคือหลักการพิมพ์แบบ Fused deposition modeling (FDM) หรือ Fused filament fabrication (FFF) ดังกล่าวในข้างต้นนั่นเอง



รูปที่ 11 แผนภาพแสดงลักษณะการทำงานของ Extrusion-based AM; Copyright of ref. [23]

การทดลองผลิตแม่เหล็กแบบ Extrusion-based AM จึงเริ่มต้นกระบวนการจากการผสมผงอนุภาคแม่เหล็กและวัสดุเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แล้วทำการดึงขึ้นรูปเป็นเส้นใยพลาสติกคอมโพสิตซึ่งมีอนุภาคแม่เหล็กฝังตัวอยู่ภายใน ก่อนจะนำไปเป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการพิมพ์สามมิติเป็นรูปร่างตามต้องการ ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ C. Huber et al. (2016) ทำการผสมผงอนุภาค NdFeB (Neofer® 25/60p) ลงในเนื้อพลาสติกพอลิเอไมด์ (PA11) แล้วดึงขึ้นรูปเป็นเส้นใย ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (Twin-screw extruder) ได้เส้นใยคอมโพสิตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 ± 0.1 mm ที่มีการจัดเรียงเกรน NdFeB ภายในแบบสุ่ม มีสมบัติแม่เหล็กไอโซโทรปิก (Isotropic magnetic properties) แล้วนำมาพิมพ์ขึ้นรูปด้วยขนาดความหนาของแต่ละชั้นเท่ากับ 1 mm ภายใต้อิทธิพลของ Stray magnetic field จนได้เป็นแท่งแม่เหล็กขนาด ยาว $\times$ กว้าง $\times$ สูง เท่ากับ 7 mm $\times$ 5 mm $\times$ 5.5 mm ลักษณะดังรูปที่ 12(a) มีค่าความหนาแน่นและสมบัติแม่เหล็กดังค่าในตารางแสดงในรูปที่ 12(b) [24]

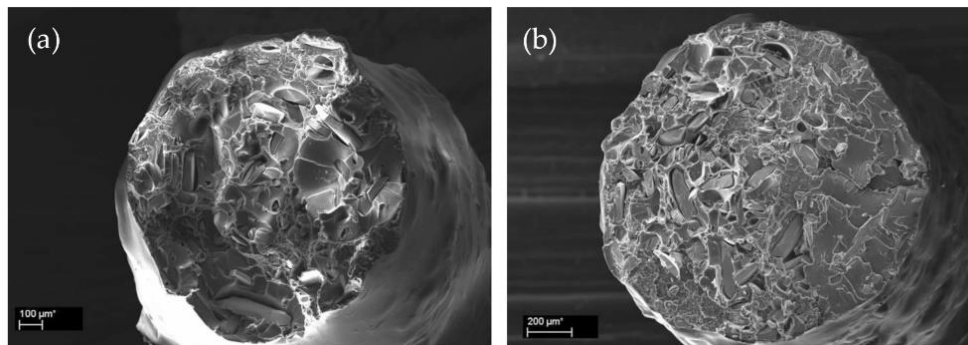


(b)

Procedure	ρ (g/cm ³)	B_r (mT)	H_{cj} (kA/m)
Datasheet	4.35	400	630
3D print	3.57	310	740
Inj. mold	4.35	387	771

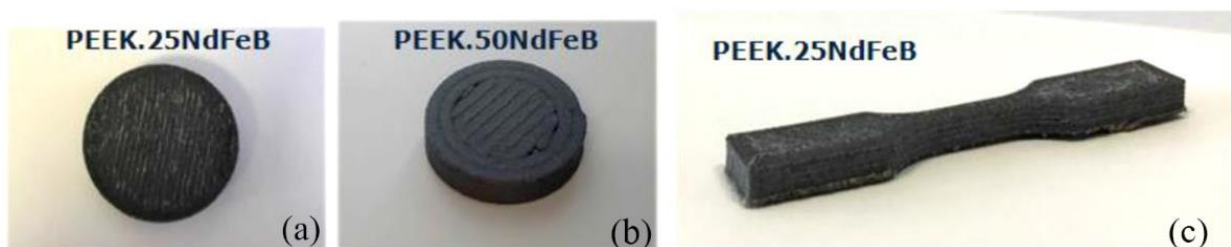
รูปที่ 12 (a) ลักษณะแท่งแม่เหล็กที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ และ (b) ตารางแสดงค่าความหนาแน่นและสมบัติแม่เหล็กของแท่งแม่เหล็กจากการพิมพ์สามมิตินี้เปรียบเทียบกับข้อมูลพื้นฐานของ NdFeB (Neofer® 25/60p) และแม่เหล็กแบบเดียวกันที่ผลิตโดยวิธีการฉีดขึ้นรูป; Copyright of ref. [24]

ด้วยแนวทางเดียวกัน การวิจัยของ L. Pigliaru et al. (2020) ทดลองผสม NdFeB อัตราส่วน 25, 50 และ 75 wt% กับ Polyetheretherketone (PEEK) แล้วดึงขึ้นรูปเป็นเส้นใยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 ± 0.05 mm ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูแบบเดี่ยว (Single-screw extruder) ซึ่งพบว่าการผสม NdFeB ในอัตราส่วน 75 wt% นั้นไม่สามารถทำการขึ้นรูปเส้นใยได้ ส่วนการใช้ NdFeB ในอัตราส่วนผสม 25 wt% และ 50 wt% สามารถทำการดึงขึ้นรูปได้เป็นเส้นใยซึ่งมีอนุภาคแม่เหล็กฝังตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ลักษณะดังรูปที่ 11 [25]



รูปที่ 11 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงลักษณะโครงสร้างของเส้นใยคอมโพสิต PEEK กับ (a) 25 wt% NdFeB และ (b) 50 wt% NdFeB; Copyright of ref. [25]

เมื่อนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นทำการพิมพ์ขึ้นรูป สิ่งงานผ่าน CAD มายัง SIMPLIFY 3D software ควบคุมการพิมพ์วัสดุทีละชั้นในแนวนอน จนได้เป็นแม่เหล็กทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21 mm สูง 5 mm (รูปที่ 12) พบว่าการหลอมเส้นใยเพื่อส่งไปพิมพ์ผ่านหัวฉีด (Nozzle) สำหรับเส้นใยที่มีปริมาณการคอมโพสิตมากกว่าจะมีความหนืดสูงตามมาด้วย ในขั้นตอนการพิมพ์จึงต้องเพิ่มขนาดหัวฉีดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง การทดสอบความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) พบว่า ตัวอย่างที่พิมพ์จากเส้นใยคอมโพสิต 25 wt% NdFeB มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ $80 (\pm 5)$ MPa สามารถทนแรงดึงได้จนมีลักษณะแบบ Dogbone ก่อนถึงจุดขาด ดังรูปที่ 12 ส่วนตัวอย่างที่พิมพ์จากเส้นใยคอมโพสิต 50 wt% NdFeB มีค่าความทนต่อแรงดึงเท่ากับ $75 (\pm 3)$ MPa และขาดเสียก่อนจะดึงได้ลักษณะแบบเดียวกันนี้ [25]

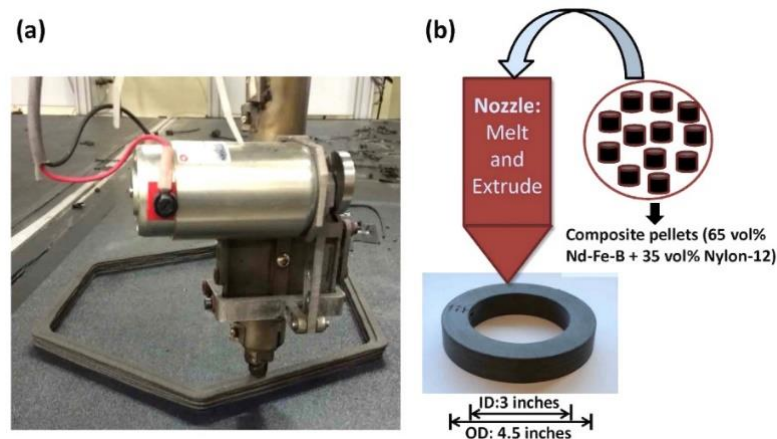


รูปที่ 12 ภาพถ่ายตัวอย่างแม่เหล็กทรงกระบอกที่พิมพ์ได้จากเส้นใยคอมโพสิตที่ผสม (a) 25 wt% NdFeB, (b) 50 wt% NdFeB และ (c) ตัวอย่างจากการทดสอบความทนต่อแรงดึงของแม่เหล็กพิมพ์จากเส้นใยคอมโพสิต 25 wt% NdFeB; Copyright of ref. [25]

จากการต้องมีส่วนผสมพอลิเมอร์ของ Polymer-bonded magnet ทำให้ค่าผลผลิตพลังงานสูงสุดของแม่เหล็กถูกจำกัดด้วยปริมาณสัดส่วนระหว่างผงแม่เหล็กและพอลิเมอร์ ซึ่งยังส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลอีกด้วย การทำให้แม่เหล็กมีสมบัติแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic magnetic properties) เพื่อเพิ่มค่าสมบัติแม่เหล็กจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์ [26,27]

Big area additive manufacturing (BAAM) เป็นรูปแบบของการพัฒนาต่อยอดกระบวนการผลิตแบบ AM ซึ่งโดยทั่วไปมักจะเป็นการผลิตในระดับสเกลขนาดเล็ก (Small-scale) ให้เป็นการผลิตในระดับสเกลขนาดใหญ่ (Large-scale) เพื่อความสามารถใช้งานที่เหมาะสมกับงานผลิตระดับอุตสาหกรรม โดยพัฒนาจากหลักการของ FDM ที่เริ่มต้นจากการหลอมเส้นใยพลาสติกหรือคอมโพสิตแล้วส่งไปพิมพ์ผ่านหัวฉีด เป็นการเริ่มต้นจากการป้อนวัตถุดิบซึ่งเป็นก้อนพอลิเมอร์หรือคอมโพสิต และให้ความร้อนจนเกิดการหลอมแล้วส่งตรงต่อยังหัวฉีดเพื่อทำการพิมพ์ขึ้นรูปร่างตามการออกแบบ ซึ่งความแตกต่างของรูปแบบการใช้วัตถุดิบเริ่มต้นนี้เองที่ทำให้ BAAM สามารถก้าวข้ามข้อจำกัดของการเตรียมวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิต Polymer-bonded magnet อีกทั้งยังได้คุณสมบัติทางกายภาพที่ดีกว่าการผลิตในระดับสเกลเล็กด้วย AM แบบทั่วไป [28]

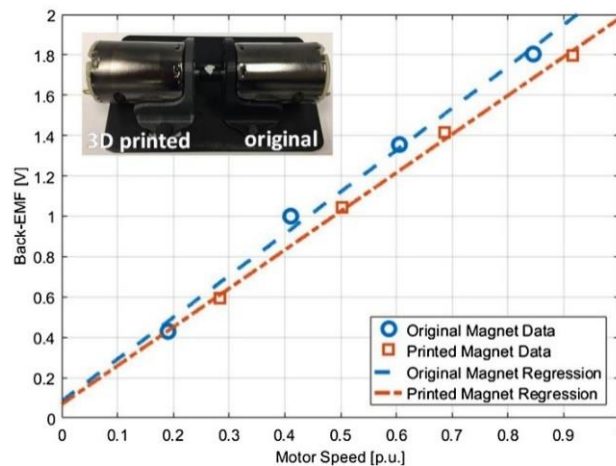
L. Li et al. (2016) รายงานความสำเร็จในการใช้วิธีการ BAAM ผลิตแม่เหล็กโดยเริ่มต้นจากการหลอมก้อนแม่เหล็กพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer-bonding composite) ที่มีส่วนประกอบของ 65 vol% NdFeB และ 35 vol% Nylon-12 แล้วส่งพิมพ์ผ่านการควบคุมด้วย Software ขึ้นรูปร่างแบบเติมเนื้อทีละชั้น ลักษณะดังรูปที่ 13 ซึ่งตัวอย่างแม่เหล็กที่พิมพ์ได้มีค่าความหนาแน่น 4.8 g/cm^3 มีค่า $H_{ci} = 688.4 \text{ kA/m}$ ค่า $B_r = 0.51 \text{ T}$ และค่า $(BH)_{\max} = 43.49 \text{ kJ/m}^3$ (5.47 MGOe) ซึ่งเป็นสมบัติแม่เหล็กที่เทียบเท่าหรืออาจเหนือกว่าแม่เหล็กที่มีส่วนประกอบวัตถุดิบตั้งต้นเช่นเดียวกันซึ่งผลิตด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ อีกทั้งยังมีผลการทดสอบสมบัติเชิงกลที่สามารถเทียบเท่ากันได้อีกด้วย [29]



รูปที่ 13 (a) ภาพถ่ายการทำงานของเครื่องพิมพ์ BAAM และ (b) แผนภาพแสดงกระบวนการหลอมวัตถุดิบตั้งต้นแล้วส่งผ่านหัวฉีดออกมาพิมพ์เป็นผลผลิตแม่เหล็กรูปวงแหวน; Copyright of ref. [29]

จากความสำเร็จเบื้องต้นในการผลิตแม่เหล็กผสมพอลิเมอร์ด้วยการพิมพ์ผ่าน BAAM จึงมีการพัฒนาการวิจัยต่อมาของ L. Li et al. (2018) ซึ่งทำการเพิ่มค่าส่วนผสมของ NdFeB ได้มากถึง 70 vol% และพบว่าสามารถผลิตได้แม่เหล็กที่มีค่า $(BH)_{\max}$ มากสุดเท่ากับ 7.25 MGOe ซึ่งได้นำไปทดลองใช้งานในการทำมอเตอร์

ไฟฟ้ากระแสตรงต้นแบบจากแม่เหล็กที่พิมพ์ได้มา และทำการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานเปรียบเทียบกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทั่วไป พบว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่ากันไม่มากนัก ดังแสดงในรูปที่ 14 [30]



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแม่เหล็กที่ผลิตจากการพิมพ์สามมิติด้วย BAAM และแม่เหล็กที่ผลิตด้วยวิธีการทั่วไป; Copyright of ref. [30]

บทสรุปโอกาสและความสำเร็จของ AM กับการผลิตแม่เหล็กถาวร

จากผลงานวิจัยศึกษาการพิมพ์ขึ้นรูปแม่เหล็กโดยเทคนิคและเครื่องพิมพ์สามมิติชนิดต่าง ๆ ได้บ่งชี้แนวทางการพัฒนาใช้เทคนิค AM ในการผลิตแม่เหล็กถาวรผสมพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานได้จริง และความสำเร็จของทีมวิจัยที่มีการใช้ BAAM ผลิตแม่เหล็กที่มีสมบัติเทียบเคียงได้กับแม่เหล็กที่มีการผลิตด้วยวิธีแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ด้วยสามารถเติมส่วนผสมของแม่เหล็กลงในพอลิเมอร์ได้ในปริมาณสูงซึ่งทำให้ได้ผลผลิตวัสดุแม่เหล็กที่มีสมบัติแม่เหล็กสูงตามไปด้วย ในขณะที่ยังคงสมบัติเชิงกลเช่นเดียวกับแม่เหล็กที่ผลิตด้วยวิธีทั่วไปได้ มีข้อดีคือการผลิตด้วย AM นี้ไม่ทำให้เกิดของเสียหรือวัสดุเหลือทิ้ง ต้นทุนวัตถุดิบจึงลดลง ด้วยการควบคุมการสร้างรูปร่างผ่านโปรแกรม ทำให้ก้าวข้ามขีดจำกัดการผลิตแม่เหล็กแบบหล่อขึ้นรูปสำหรับใช้งานแบบจำเพาะ และไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายลงทุนกับการทำแม่พิมพ์ต้นแบบ อีกทั้งยังสามารถใช้ในการรีไซเคิลแม่เหล็กถาวรเพื่อนำกลับมาใช้งานได้ใหม่อีกด้วย หากมีข้อด้อยที่กระบวนการผลิตใช้เวลานาน สามารถผลิตได้ช้ากว่าและปริมาณน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการผลิตแบบเดิม จึงยังเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความจำเพาะอย่างวัสดุแม่เหล็กเชิงฟังก์ชันเพื่อใช้งานการพัฒนาความก้าวหน้าของเทคโนโลยีขั้นสูงมากกว่าการผลิตแม่เหล็กแบบทั่ว ๆ ไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณแหล่งทุนวิจัย ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ ที่ให้การสนับสนุนโครงการวิจัย สัญญาทุนเลขที่ ThEP-60-PIP_WU3 ภายใต้โปรแกรมวิจัยนวัตกรรมทางฟิสิกส์สำหรับอุตสาหกรรมเพื่อความยั่งยืนเชิงแม่เหล็ก และสัญญาทุนเลขที่ ThEP-63-PIP_WU3 ภายใต้โปรแกรมวิจัยนวัตกรรมของระบบเพื่อความยั่งยืนด้วยแม่เหล็ก ซึ่งทำให้มีโอกาสทำการศึกษาวิจัย และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และรองศาสตราจารย์ ดร.ชิตณรงค์ ศิริสถิตย์กุล สำนักวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ ซึ่งคอยให้คำชี้แนะและช่วยเหลือการตรวจสอบปรับปรุงต้นฉบับจนสำเร็จเป็นบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “Additive manufacturing (3D printing)”, from <https://www.appicadthai.com/articles/additive-manufacturing>.
- [2] “The history of 3d printer: From rapid prototyping to additive fabrication”, from <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>.
- [3] “Stereolithography/SLA 3D printing–simply explained”, from <https://all3dp.com/2/stereolithography-3d-printing-simply-explained/>.
- [4] “How selective laser sintering works?”, from <https://manufactur3dmag.com/how-selective-laser-sintering-works/>.
- [5] P. Dudek, “FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements”, Archives of Metallurgy and Materials, 58, 1415-1418 (2013).
- [6] F. Ning, W. Cong, J. Wei, S. Wang and M. Zhang, “Additive manufacturing of CFRP composites using fused deposition modeling: Effects of carbon fiber content and length”, Proceedings of the ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2015), Charlotte, North Carolina, USA, 2015, 9436.
- [7] สมบุญ สหสิทธิวัฒน์, “การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ: ฝันที่เป็นจริง”, วารสารเทคโนโลยีวัสดุ, 85, 29-36 (2560).
- [8] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D printing and customized additive manufacturing”, Chemical Reviews, 117, 10212-10290 (2017).
- [9] L. Li, B. Post, V. Kunc, A. M. Elliott and M. P. Paranthaman, “Additive manufacturing of near-net-shape bonded-magnet: Prospects and challenges”, Scripta Materialia, 135, 100-104 (2017).
- [10] R. Brito-Pereira, C. Ribeiro, N. Peřinka, S. Lanceros-Mendez and P. Martins, “Reconfigurable 3D-printable magnets with improved maximum energy product”, Journal of Materials Chemistry C, DOI:10.1039/C9TC06072C (2020).
- [11] C. Huber, C. Abert, F. Bruckner, M. Groenefeld, O. Muthsam, S. Schuschnigg, K. Sirak, R. Thanhoffer, I. Teliban, C. Vogler, R. Windl and D. Suess, “3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer”, Applied Physics Letters, 109, 162401 (2016).
- [12] R. Domingo-Roca, J. C. Jackson and J. F. C. Windmill, “3D-printing polymer-based permanent magnets”, Materials and Design, 153, 120-128 (2018).
- [13] N. Urban, A. Meyer, V. Keller and J. Franke, “Contribution of additive manufacturing of rare earth material to the increase in performance and resource efficiency of permanent magnets”, Applied Mechanics and Materials, 882, 135-141 (2018).
- [14] I. A. Radulov, V. V. Popov Jr, A. Koptyug, F. Maccari, A. Kovalevsky, S. Essel, J. Gassmann, K. P. Skokov and M. Bamberger, “Production of net-shape Mn-Al permanent magnets by electron beam melting”, Additive Manufacturing, 30, 100787 (2019).
- [15] E. A. Périgo, J. Jacimovic, F. G. Ferré and L. M. Scherf, “Additive manufacturing of magnetic materials”, Additive Manufacturing, 30, 100870 (2019).
- [16] S. M. Abdelbasir and A. E. Shalan, “Intriguing properties and applications of functional magnetic materials”, Functional Materials, IntechOpen, DOI:10.5772/intechopen.81386 (2019).
- [17] “Sintered neodymium magnets”, from <https://www.sdmmagnetic.com/sintered-neodymium-magnets/#>.

- [18] “Isotropic polymer bonded Nd-Fe-B magnets (NEOQUENCH-P)”, from http://www.daido-electronics.co.jp/english/product/neoquench_p/.
- [19] “Plastic bonded neodymium magnets”, from <https://www.buntingeurope.com/magnets/plastic-bonded-neodymium-magnets/>.
- [20] M. P. Paranthaman, C. S. Shafer, A. M. Elliott, D. H. Siddel, M. A. McGuire, R. M. Springfield, J. Martin, R. Fredette and J. Ormerod, “Binder jetting: A novel NdFeB bonded magnet fabrication process”, The Minerals, Metals & Materials Society, 68, 1978-1982 (2016).
- [21] A. Gebhardt, F.-M. Schmidt and J.-S. Hötter, “Additive manufacturing by selective laser melting The Realizer Desktop machine and its application for the dental industry”, Physics Procedia, 5, 543-549 (2010).
- [22] J. Jaćimović, F. Binda, L. G. Herrmann, F. Greuter, J. Genta, M. Calvo, T. Tomše and R. A. Simon, “Net shape 3D printed NdFeB permanent magnet”, Advanced Engineering Materials, 1700098 (2017).
- [23] J. Shah, B. Snider, T. Clarke, S. Kozutsky, M. Lacki and A. Hosseini, “Large-scale 3D printers for additive manufacturing: Design considerations and challenges”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104, 3679-3693 (2019).
- [24] C. Huber, C. Abert, F. Bruckner, M. Groenefeld, O. Muthsam, S. Schuschnigg, K. Sirak, R. Thanhoffer, I. Teliban, C. Vogler, R. Windl and D. Suess, “3D print of polymer bonded rare-earth magnets, and 3D magnetic field scanning with an end-user 3D printer”, Applied Physics Letters, 109, 162401 (2016).
- [25] L. Pigliaru, M. Rinaldi, L. Ciccacci, A. Norman, T. Rohr, T. Ghidini and F. Nanni, “3D printing of high performance polymer-bonded PEEK-NdFeB magnetic composite materials”, Function Composite Materials, 1, 4 (2020).
- [26] A. Sarkar, M. A. Somashekara, M. P. Paranthaman, M. Kramer, C. Haase and I. C. Nlebedim, “Functionalizing magnet additive manufacturing with in-situ magnetic field source”, Additive Manufacturing, 34, 101289 (2020).
- [27] K. Sonnleitner, C. Huber, I. Teliban, S. Kobe, B. Saje, D. Kagerbauer, M. Reissner, C. Lengauer, M. Groenefeld and D. Suess, “3D printing of polymer-bonded anisotropic magnets in an external magnetic field and by a modified production process”, Applied Physics Letters, 116, 092403 (2020).
- [28] A. Roschli, K. T. Gaul, A. M. Boulger, B. K. Post, P. C. Chessier, L. J. Love, F. Blue and M. Borish, “Designing for big area additive manufacturing”, Additive Manufacturing, 25, 275-285 (2019).
- [29] L. Li, A. Tirado, I. C. Nlebedim, O. Rios, B. Post, V. Kunc, R. R. Lowden, E. Lara-Curzio, R. Fredeete, J. Ormerod, T. A. Lograsso and M. P. Paranthaman, “Big area additive manufacturing of high performance bonded NdFeB magnets”, Scientific Reports, 6, 36212 (2016).
- [30] L. Li, K. Jones, B. Sales, J. L. Pries, I. C. Nlebedim, K. Jin, H. Bei, B. K. Post, M. S. Kesler, O. Rios, V. Kunc, R. Fredette, J. Ormerod, A. Williams, T. A. Lograsso and M. P. Paranthaman, “Fabrication of highly dense isotropic Nd-Fe-B nylon bonded magnets via extrusion-based additive manufacturing”, Additive Manufacturing, 21, 495-500 (2018).