



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ การวิเคราะห์กระบวนการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบเอฟดีเอ็ม
Analysis of Color Production Process of FDM Full-Color 3D Printer

ชื่อนิสิต นางสาวสิรภัทร ทิตาสิริมณีรดา เลขประจำตัว 6032640623
นางสาวปุณณดา วิเศษสิงห์ เลขประจำตัว 6032624623

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์
ปีการศึกษา 2563

การวิเคราะห์กระบวนการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบเอฟดีเอ็ม
Analysis of Color Production Process of FDM Full-Color 3D Printer

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
อ.ดร.จุฬพงษ์ พานิชเกรียงไกร

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม
ผศ.ดร. สุจิตรา สื่อประसार

จัดทำโดย

นางสาวสิรภัทร	ทิตาสิริมณีรดา	รหัสประจำตัวนิสิต 603 26406 23
นางสาวปุณณดา	วิเศษสิงห์	รหัสประจำตัวนิสิต 603 26246 23

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2563

หัวข้อวิจัย การวิเคราะห์กระบวนการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบเอฟดีเอ็ม

นิสิตผู้ดำเนินโครงการ นางสาวสิริภัทร ทิตาสิริมณีรดา

นางสาวปุณณดา วิเศษสิงห์

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ อ.ดร. จุฬพงษ์ พานิชเกรียงไกร

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ผศ.ดร. สุจิตรา สือประसार

ภาควิชาเทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยอมรับรายงานวิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาตรี

พิชญดา เกตุเมฆ

หัวหน้าภาควิชา

(รศ.ดร. พิชญดา เกตุเมฆ)

อ.ดร. จุฬพงษ์ พานิชเกรียงไกร

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(อ.ดร. จุฬพงษ์ พานิชเกรียงไกร)

ผศ.ดร. สุจิตรา สือประसार

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

(ผศ.ดร. สุจิตรา สือประसार)

ผู้ดำเนินงาน นางสาวสิรภัทร ทิตาสิริมนิรดา เลขประจำตัว 603 26406 23

นางสาวปณณดา วิเศษสิงห์ เลขประจำตัว 603 26246 23

ชื่อเรื่อง การวิเคราะห์กระบวนการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบเอฟดีเอ็ม

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ดร. จุฬพงษ์ พานิชเกรียงไกร

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ผศ.ดร. สุจิตรา สื่อประสาร

บทคัดย่อ: โครงการนี้วิเคราะห์ความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัตถุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาต่อสีที่พิมพ์ได้ โดยทำการทดลองสร้างแผ่นตัวอย่างสี 2 รูปแบบ ได้แก่ Texture และ Surface เพื่อเลือกรูปแบบในการพิมพ์ ซึ่งการทดลองเลือกพิมพ์รูปแบบพิมพ์พื้นผิวด้านบน (Surface) จากนั้นสร้างแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง กำหนดความหนาของสิ่งพิมพ์ต่างกัน 5 ขนาด คือ 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม. แต่ละช่องมีสีต่างกัน เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาต่อสีที่พิมพ์ได้ และทดสอบพิมพ์ 125 ช่อง ที่ความหนาเดียว โดยกำหนดความหนาสิ่งพิมพ์ที่ 4 มม. ซึ่งสีในแต่ละช่องได้จากการแบ่งสัญญาณของแม่สี RGB จาก 0 ถึง 255 ออกเป็น 5 ช่วงเท่า ๆ กัน ทำให้ได้จำนวนสี 125 สี ที่แตกต่างกัน วัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ของสิ่งพิมพ์แต่ละชั้นภายใต้สภาวะ $D65/2^\circ$ นำค่าสีที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง มาวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสีระหว่างสิ่งพิมพ์ทุกความหนากับต้นฉบับ (sRGB) และนำค่าสีที่วัดได้จากแผ่นตัวอย่างสี 125 สี มาวิเคราะห์การกระจายตัวของค่าสีระหว่างสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับ (sRGB) จากการทดลองพบว่า ความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อการพิมพ์สีของสิ่งพิมพ์ นอกจากนี้ขอบเขตสีที่หมึกพิมพ์ได้และสูตรการคำนวณสัดส่วนหมึกพิมพ์ของเครื่องพิมพ์มีผลต่อการพิมพ์สีของเครื่องพิมพ์

ภาควิชา เทคโนโลยีทางภาพและการพิมพ์

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนิสิตผู้ดำเนินงาน สิรภัทร ทิตาสิริมนิรดา

ปณณดา วิเศษสิงห์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [ลายมือ]

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม [ลายมือ]

Student Name Ms. Sirapat Thitasirimanirada ID No. 603 26406 23
Ms. Punnada Wisetsing ID No. 603 26246 23
Project title Analysis of Color Production Process of FDM Full-Color 3D Printer
Project Advisor Prof. Dr. Chulapong Panichkriangkrai
Project Co-advisor Assist. Prof. Dr. Suchitra Sueeprasan

Abstract: This project aims to analyze color production process of a 3D printer with 3D printing technology, together with inkjet color printing on the surface of objects. The effect of thickness on printed colors is also studied. Two patterns (Texture and Surface) of color charts were printed to determine the print format to be used in the experiments. The Surface pattern was selected. A 49-color chart was printed with 5 different thicknesses: 1, 2, 4, 8 and 16 mm, where each square had a different color. It was created to study the influence of thickness on printed colors. A test chart of 125 squares with the thickness of 4 mm was created. The colors in each square were generated by dividing the RGB values (from 0 to 255) into 5 equal intervals, and all possible combinations of these values resulted in a total of 125 different colors. The printed color charts were measured in terms of $L^*a^*b^*$ (D65/2°) values. The measured values were compared to the originals (converted from sRGB). The 49-color chart was used to analyze the effect of thickness. The distributions of 125 colors were compared between the prints (measured values) and the originals (converted from sRGB). It was found that thickness had no obvious effect on the printed colors. In addition, the color ranges generated by the printing inks and the calculations of the printing ink proportions affected the colors printed with the 3D printer.

Department of Imaging and Printing Technology
Academic year 2020

Student's signature ศิริภัทร ทิธาสิริมนิรัตน์

ปุนนดา วิเศษสิงห์

Advisor's signature [Signature]

Co-advisor's signature Suchitra Sueeprasan

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้จะไม่สามารถประสบความสำเร็จได้ หากไม่ได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อาจารย์ ดร. จุฬพงษ์ พาณิชกรไกร อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุจิตรา สื่อประสาน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษาที่มีประโยชน์ รวมทั้งคอยชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำโครงการ ทำให้โครงการวิจัยนี้ มีผลการทดลองที่ผ่านการคิดวิเคราะห์อย่างมีเหตุผล กราบขอขอบพระคุณอาจารย์ทั้งสองมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ปิยะรัตน์ ศิลปศุภกรวงศ์ นักวิจัยประจำ Kanagawa Institute of Technology (KAIT) ประเทศญี่ปุ่น ที่ให้ความกรุณาเอื้อเฟื้อเครื่องมือ คอยตอบข้อสงสัยต่าง ๆ และคอยสละเวลาสั่งพิมพ์แผ่นตัวอย่างสีทั้งหมดในโครงการ ตลอดจนดำเนินการส่งแผ่นตัวอย่างสีจากประเทศญี่ปุ่นมาถึงประเทศไทย ท่ามกลางสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส COVID-19 ที่ทำให้ผู้ดำเนินโครงการไม่สามารถเดินทางไปดำเนินการเองได้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ตลอดจนครอบครัว ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนในทุกการตัดสินใจตลอดมา จนทำให้โครงการนี้สำเร็จอย่างสมบูรณ์

สิริภัทร ทิตาสิริมณีรดา

ปุณณดา วิเศษสิงห์

20 พฤษภาคม 2564

สารบัญ

สารบัญเรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ	1
1.2 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ	1
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การพิมพ์ 3 มิติ	4
2.2 ระบบสี CIE L*a*b*	8
2.3 ค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab})	9
2.4 ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์	9
2.5 บทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
บทที่ 3 การทดลอง	
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	14
3.2 วิธีการดำเนินงาน	14
3.2.1 การหารูปแบบการพิมพ์แผ่นตัวอย่างสีที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง	14
3.2.2 การทดสอบผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อสีที่พิมพ์ได้	18
3.2.3 การทดสอบความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัสดุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	
4.1 ผลของรูปแบบการพิมพ์ที่ต่างกัน	23
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อสีที่พิมพ์ได้	23
4.3 ความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัสดุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ	36

สารบัญ (ต่อ)

สารบัญเรื่อง	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก ก ตารางค่าสี $L^* a^* b^*$ ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ที่มีรูปแบบการพิมพ์แตกต่างกัน	45
ภาคผนวก ข ตารางค่าสี $L^* a^* b^*$ ระหว่างสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับและระหว่างสิ่งพิมพ์ที่ความหนาต่างกัน	48
ภาคผนวก ค ตารางค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับและระหว่างสิ่งพิมพ์ที่ความหนาต่างกัน	60
ภาคผนวก ง ตารางค่าสี $L^* a^* b^*$ ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ จำนวน 124 สี	81
ภาคผนวก จ ตารางค่า L^* และ C^*_{ab} ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ จำนวน 124 สี	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

สารบัญตาราง	หน้า
ตารางที่ ข.28 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร	57
ตารางที่ ข.29 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร	57
ตารางที่ ข.30 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร	58
ตารางที่ ข.31 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร	58
ตารางที่ ข.32 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร	58
ตารางที่ ข.33 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร	59
ตารางที่ ข.34 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร	59
ตารางที่ ข.35 ค่าสี $L^* a^* b^*$ ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร	59
ตาราง ค.1 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	60
ตาราง ค.2 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีแดงระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	60
ตาราง ค.3 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	63
ตาราง ค.4 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	63
ตาราง ค.5 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	66
ตาราง ค.6 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีเขียวระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	66
ตาราง ค.7 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	69
ตาราง ค.8 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	69
ตาราง ค.9 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	72
ตาราง ค.10 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	72
ตาราง ค.11 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	75
ตาราง ค.12 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	75
ตาราง ค.13 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ	78
ตาราง ค.14 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีเทากระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน	78

สารบัญรูป

สารบัญรูป	หน้า
รูปที่ 2.1 กระบวนการทำงานของการพิมพ์ 3 มิติ	4
รูปที่ 2.2 Vat photopolymerization	5
รูปที่ 2.3 Material Jetting	5
รูปที่ 2.4 Binder Jetting	6
รูปที่ 2.5 Material Extrusion	6
รูปที่ 2.6 Powder Bed Fusion	7
รูปที่ 2.7 Sheet Lamination	7
รูปที่ 2.8 Directed Energy Deposition	8
รูปที่ 2.9 CIE L*a*b*	9
รูปที่ 2.10 การออกแบบก้อนสีทดสอบ	11
รูปที่ 3.1 แผ่นตัวอย่างสีที่สร้างเพื่อใช้ในการเลือกรูปแบบในการพิมพ์	15
รูปที่ 3.2 สร้างแผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Texture ด้วยโปรแกรม 3D Builder	15
รูปที่ 3.3 สร้างแผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder	16
รูปที่ 3.4 แผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Texture ที่ผ่านการวิเคราะห์สีในโปรแกรม XYZPrint	16
รูปที่ 3.5 แผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Surface ที่ผ่านการวิเคราะห์สีในโปรแกรม XYZPrint	17
รูปที่ 3.6 แผ่นตัวอย่างสีพิมพ์ด้วยรูปแบบ Texture และ แผ่นตัวอย่างสีพิมพ์ด้วยรูปแบบ Surface	17
รูปที่ 3.7 การวัดค่าสี L*a*b* ด้วยเครื่องวัดสี Spectrodensitometer ยี่ห้อ X-Rite รุ่น 500 series	18
รูปที่ 3.8 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator	19
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ ที่มีความหนาแตกต่างกัน ออกแบบด้วยโปรแกรม 3D Builder	19
รูปที่ 3.10 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่ผ่านการวิเคราะห์สีในโปรแกรม XYZPrint	20
รูปที่ 3.11 แผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator	21
รูปที่ 3.12 สร้างแผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง รูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder	21
รูปที่ 3.13 แผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ที่ผ่านการวิเคราะห์สีในโปรแกรม XYZPrint	22
รูปที่ 4.1 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่ความหนา 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม. ตามลำดับ	24
รูปที่ 4.2 กราฟค่า L* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	24
รูปที่ 4.3 กราฟค่า a* และ b* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	25
รูปที่ 4.4 กราฟค่า L* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	26
รูปที่ 4.5 กราฟค่า a* และ b* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	27
รูปที่ 4.6 กราฟค่า L* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	28
รูปที่ 4.7 กราฟค่า a* และ b* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	28

สารบัญรูป (ต่อ)

สารบัญรูป	หน้า
รูปที่ 4.8 กราฟค่า L^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	29
รูปที่ 4.9 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	30
รูปที่ 4.10 กราฟค่า L^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	31
รูปที่ 4.11 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	31
รูปที่ 4.12 กราฟค่า L^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	32
รูปที่ 4.13 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	33
รูปที่ 4.14 กราฟค่า L^* ของสีเทาระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	34
รูปที่ 4.15 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีเทาระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน	35
รูปที่ 4.16 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่ความหนา 4 มม. และแผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ที่ความหนา 4 มม.	37
รูปที่ 4.17 กราฟค่า L^* และ a^* ของต้นฉบับ จำนวน 124 สี	38
รูปที่ 4.18 กราฟค่า L^* และ a^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนาเดียวกัน จำนวน 124 สี	38
รูปที่ 4.19 กราฟค่า L^* และ b^* ของต้นฉบับ จำนวน 124 สี	39
รูปที่ 4.20 กราฟค่า L^* และ b^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนาเดียวกัน จำนวน 124 สี	39
รูปที่ 4.21 กราฟค่า a^* และ b^* ของต้นฉบับ จำนวน 124 สี	40
รูปที่ 4.22 กราฟค่า a^* และ b^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนาเดียวกัน จำนวน 124 สี	40
รูปที่ 4.23 กราฟค่า L^* และ C^*_{ab} ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ จำนวน 124 สี	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ (3D Printing) เริ่มมีบทบาทในการผลิตทั้งในส่วนของอุตสาหกรรม การแพทย์ และการใช้งานในชีวิตประจำวัน ทั้งนี้ส่วนที่กำลังเข้ามามีบทบาทมากยิ่งขึ้นคือ การใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น การสร้างหุ่นจำลองตุ๊กตา อาหารจำลองสำหรับวางหน้าร้าน โดยการพิมพ์ 3 มิติแบบ Fused Deposition Modeling (FDM) เป็นระบบที่เป็นที่นิยม

เครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีการใช้งานที่ง่ายไม่ซับซ้อน สามารถสร้างสรรค์งานพิมพ์ได้อย่างอิสระ ทำการออกแบบเติมสีให้กับงานพิมพ์ได้ตามต้องการ ทำให้งานพิมพ์ที่ได้มีความสมจริง และการขึ้นรูปสิ่งพิมพ์ด้วยเส้นพลาสติกนั้นยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงทนทานให้กับชิ้นงาน แต่สีของงานพิมพ์ 3 มิติที่ได้ยังไม่สามารถผลิตสีออกมาได้ตรงตามแบบที่ต้องการ ซึ่งสีเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น งานพิมพ์อาหารจำลองสำหรับวางหน้าร้าน ที่ต้องการงานพิมพ์ที่มีสีใกล้เคียงกับต้นฉบับมากที่สุด เพื่อเพิ่มแรงจูงใจในการเลือกซื้อสินค้าของผู้บริโภค หากสีของอาหารจำลองมีความแตกต่างจากต้นฉบับมาก อาจส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อสินค้านั้น อีกทั้งวัสดุพลาสติกที่ใช้เป็นวัสดุโปร่งแสง ส่งผลให้ค่าสีที่วัดได้จากเครื่องวัดสีคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง จึงอาจส่งผลต่อการออกแบบความหนาของเปลือกงานพิมพ์

โครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการพิมพ์สีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ยี่ห้อ XYZ printing รุ่น da Vinci Color mini เพื่อวิเคราะห์การผลิตสีของเครื่องพิมพ์ รวมถึงศึกษาผลต่อความคงที่ของสีจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ วิเคราะห์ผลจากค่าความแตกต่างสีระหว่างสีที่พิมพ์ได้ และสีจากไฟล์ต้นฉบับที่ใช้สิ่งพิมพ์ และระหว่างสีของสิ่งพิมพ์ที่มีความหนาต่างกัน โดยมุ่งหวังว่าข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพสีของวัตถุที่พิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM

1.2 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจในการเสนอโครงการ

จากข้อมูลทางสถิติด้านการใช้เทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติของ STATISTA ปี 2020 พบว่ามีการใช้งานระบบ FDM ในชีวิตประจำวันมากเป็นอันดับหนึ่ง [1] มีหลักการทำงาน คือ การหลอมเส้นพลาสติก (Filament) และปล่อยให้ไหลผ่านหัวพ่นขนาดเล็ก ซ้อนทับกันเป็นชั้น จนเป็นรูปทรงของชิ้นงาน แม้ถูกสร้างจากวัตถุหลอมเหลว แต่วัสดุสามารถแข็งตัวได้ทันทีที่ไหลผ่านหัวพ่น [2] ทำให้ได้งานพิมพ์ที่มีความแข็งแรงทนทาน แต่เดิมสีของงานพิมพ์ระบบ FDM ที่ผลิตได้เป็นสีของเส้นพลาสติก ส่วนการพิมพ์สีบนพื้นผิวเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่พัฒนาขึ้นโดยรวมการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตเข้ากับระบบการพิมพ์ 3 มิติ แต่กระบวนการพิมพ์สีนั้นยังไม่สามารถผลิตสีถูกต้องตามแบบที่ต้องการได้ ดังนั้นการศึกษาศักยภาพในการพิมพ์สีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ รวมถึงการศึกษาค้นคว้าความแตกต่างระหว่างสีสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับเป็นสิ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก ผลการศึกษา

เหล่านี้ทำให้ทราบถึงขอบเขตความสามารถของกระบวนการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อใช้ในการเพิ่มคุณภาพของสิ่งพิมพ์

นอกจากนั้นความหนาของวัตถุที่ผลิตจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากวัสดุพิมพ์ที่ใช้เป็นวัสดุโปร่งแสง ซึ่งแสงสามารถกระเจิงภายในเนื้อวัสดุได้ ดังนั้นหากสิ่งพิมพ์มีความหนาไม่เพียงพอสีของวัสดุรองหลังจะสามารถสะท้อนผ่านวัสดุพิมพ์ได้ ส่งผลให้ค่าสีที่วัดได้จากเครื่องวัดสีคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ข้อมูลผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของสี จึงมีความสำคัญที่จะช่วยลดปัญหาความแตกต่างของสีที่เกิดขึ้น เมื่อออกแบบสิ่งพิมพ์ที่มีความหนาของเปลือกแตกต่างกันได้ โดย Arikian และคณะ [3] ได้ศึกษาผลกระทบของความหนาและการรองหลังในการวัดการสะท้อน จากผลการศึกษาพบว่า ควรพิมพ์สิ่งพิมพ์ให้มีความหนามากกว่า 10 มิลลิเมตร ซึ่งจะมีความหนามากพอที่พื้นหลังจะไม่มีผลกระทบต่อการใช้การพิมพ์ให้บางลง แต่วัดสีบนพื้นหลังสีขาว

โครงการนี้ศึกษาความสามารถในการพิมพ์สีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ยี่ห้อ XYZ printing รุ่น da Vinci Color mini โดยการออกแบบและสร้างแผ่นตัวอย่างสีจากการแบ่งสัญญาณสี RGB แต่ละสัญญาณสีออกเป็นสัญญาณละ 5 ช่วง (0, 64, 128, 192, 255) สร้างสีต่างกันได้ทั้งหมด 125 สี รวมสีขาวและสีดำ กำหนดความหนาสิ่งพิมพ์ที่ 4 มม. และสร้างแผ่นตัวอย่างสีที่มีช่องสีเหลี่ยมจำนวน 49 ช่อง กำหนดความหนาแตกต่างกัน 5 ขนาด คือ 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม. แต่ละช่องของสิ่งพิมพ์มีสีต่างกัน นำสิ่งพิมพ์ที่ได้มาวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ และทำการวิเคราะห์การผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM

1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.3.1 เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อสีที่พิมพ์ได้
- 1.3.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัตถุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.4.1 สร้างแผ่นตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดลอง จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ยี่ห้อ XYZ printing รุ่น da Vinci Color mini ด้วยหมึกพิมพ์ 3 สี (CMY)
- 1.4.2 ออกแบบแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง โดยแต่ละช่องมีสีต่างกัน ซึ่งประกอบไปด้วย ส่วนที่ 1 สีที่ระดับความสว่างต่าง ๆ กัน ของสีแดง, สีเขียว, สีน้ำเงิน, สีไซแอน, สีมาเจนต้า และสีเหลือง โดยแต่ละสีประกอบไปด้วยสีหลัก สีที่เพิ่มระดับความสว่างและระดับความคล้ำ โดยการปรับสัญญาณสี RGB เพิ่มระดับให้สว่างขึ้น 3 ระดับ และลดระดับให้คล้ำลง 3 ระดับ (64,128,192) รวม 42 สี ส่วนที่ 2 สีขาวสีเทาและสีดำ โดยสีเทามีระดับที่ต่างกัน 5 ระดับ มีค่าสี RGB คือ (192,192,192), (160,160,160), (128,128,128), (86,86,86) และ (42,42,42) รวมได้ทั้งหมด 49 สี กำหนดความหนาของสิ่งพิมพ์ 5 ขนาด คือ 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม.

1.4.3 ออกแบบแผ่นตัวอย่างสี 125 ช่อง แต่ละช่องสีต่างกัน จากการแบ่งสัญญาณสี RGB แต่ละสัญญาณสีออกเป็นสัญญาณละ 5 ช่วง (0, 64, 128, 192, 255) สร้างสีได้ทั้งหมด 125 สี รวมสีขาวและสีดำ เนื่องจากในข้อ 1.4.2 ได้สร้างแผ่นตัวอย่างสี ประกอบไปด้วยสี 49 สี ซึ่งสีที่สร้างขึ้นมีสีซ้ำใน 125 สี อยู่ 46 สี ดังนั้นจึงสร้างแผ่นตัวอย่างสีเพิ่มจากสีที่เหลืออีก 79 สี กำหนดความหนาของสิ่งพิมพ์ 1 ขนาด คือ 4 มม.

1.4.4 วัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ของสิ่งพิมพ์ ภายใต้ภาวะการวัดแบบ D65/2° (illuminant/observer) สิ่งพิมพ์วางอยู่บนวัสดุรองหลังสีดำ (Black backing)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เรียนรู้การวิเคราะห์ข้อมูลความแตกต่างสี

1.5.2 ได้เรียนรู้การใช้โปรแกรม 3D Builder ออกแบบสิ่งพิมพ์ 3 มิติ

1.5.3 ได้ทราบความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัตถุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ทบนพื้นผิวของวัตถุ

บทที่ 2

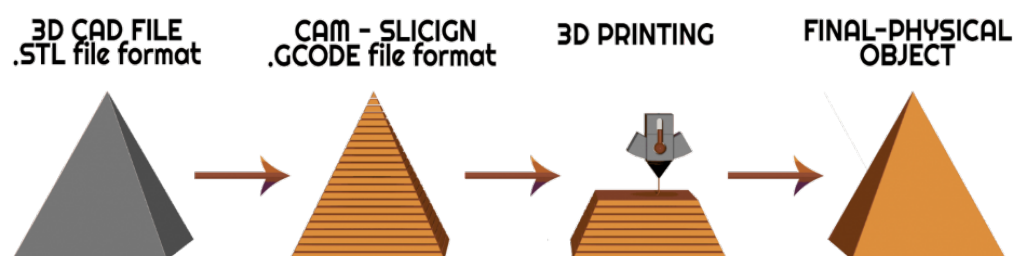
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การพิมพ์ 3 มิติ

การพิมพ์ 3 มิติ คือกระบวนการผลิตวัตถุ 3 มิติจากไฟล์ดิจิทัล การสร้างงานพิมพ์ 3 มิติ ทำได้โดยใช้กระบวนการเติมเนื้อวัสดุ เรียกว่า Additive processes ในกระบวนการเติมเนื้อวัสดุของวัตถุถูกสร้าง โดยวางชั้นของวัสดุซ้อนทับกันอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งวัตถุถูกสร้างขึ้นเป็นรูปร่าง ซึ่งการพิมพ์ 3 มิติ สามารถสร้างรูปทรงที่ซับซ้อนได้ โดยใช้วัสดุน้อยกว่าระบบผลิตแบบเก่า [4]

2.1.1 การทำงานของการพิมพ์ 3 มิติ

การพิมพ์ 3 มิติ เริ่มต้นด้วยการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ ที่เราต้องการในรูปแบบไฟล์ดิจิทัล วิธีที่นิยมมากที่สุด คือสร้างไฟล์ดิจิทัลด้วย Computer Aided Design (CAD) หรืออีกวิธี คือสร้างวัตถุ 3 มิติโดยใช้การสแกน 3 มิติ เพื่อสแกนวัตถุในโลกจริง และสร้างเป็นไฟล์ดิจิทัลที่สามารถนำไปใช้พิมพ์ 3 มิติได้ เมื่อทำการพิมพ์ชิ้นงาน โปรแกรมจะทำการแปลงไฟล์ดิจิทัลเป็นไฟล์สำหรับพิมพ์ โดยแบ่งส่วนของชิ้นงานออกเป็นชั้นแนวนอนบาง ๆ เพื่อให้เกิดการแบบพิมพ์ชั้นต่อชั้น จนเกิดเป็นวัตถุ 3 มิติ [5] แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการทำงานของการพิมพ์ 3 มิติ

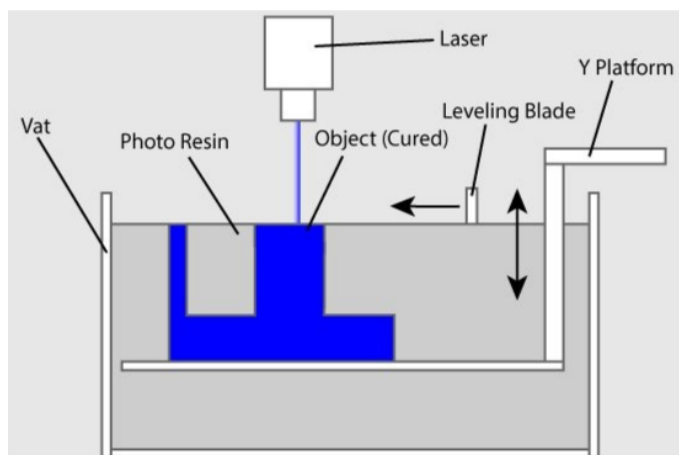
2.1.2 ประเภทของเทคโนโลยีการพิมพ์ 3 มิติ

สามารถแบ่งออกเป็น 7 ประเภท [4] ได้แก่

1) Vat Photopolymerization

เทคโนโลยีนี้ใช้วัสดุเรซิน ที่มีความไวต่อแสงในการเกิดเป็นพอลิเมอร์ นั่นคือ Stereolithography (SLA) ที่ถูกคิดค้นโดย Charles Hull ในปี 1986 โดยหลักการทำงานของ SLA คือ ใช้เรซินเหลวที่ไวต่อแสง UV จากเลเซอร์ ทำการสร้างชั้นของชิ้นงานเป็นชั้น ๆ ซึ่งในแต่ละชั้น เลเซอร์จะฉายแสง เพื่อให้เรซินเหลวแข็งตัว และเทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น Digital

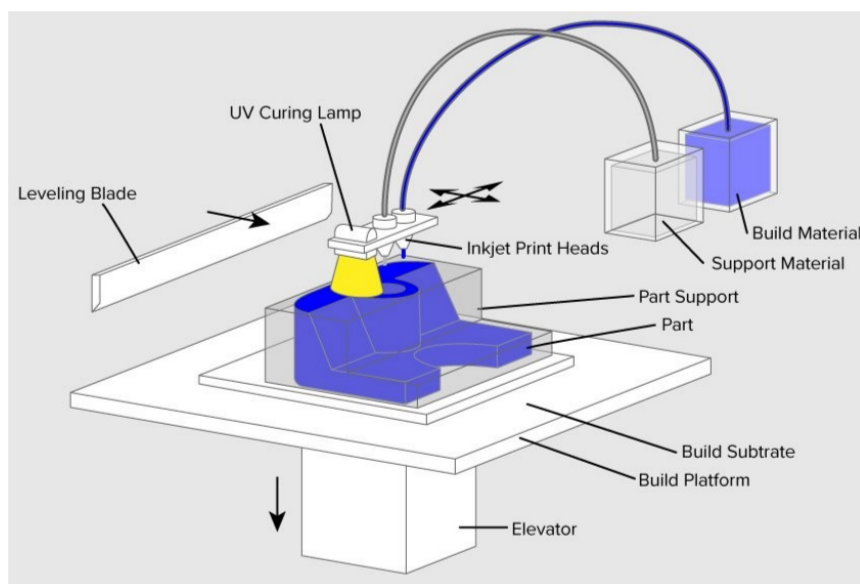
Light Processing (DLP) และ Continuous Liquid Interface Production (CLIP) ซึ่งมีหลักการการทำงานคล้ายกับ SLA แต่แตกต่างกันที่แหล่งแสงและวัสดุที่ใช้ โดยเปลี่ยนแหล่งแสงเป็นโคมไฟ Arc และหลอดไฟ LED ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเปลี่ยนชนิดของวัสดุที่ใช้ตามแหล่งแสง แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Vat photopolymerization

2) Material Jetting

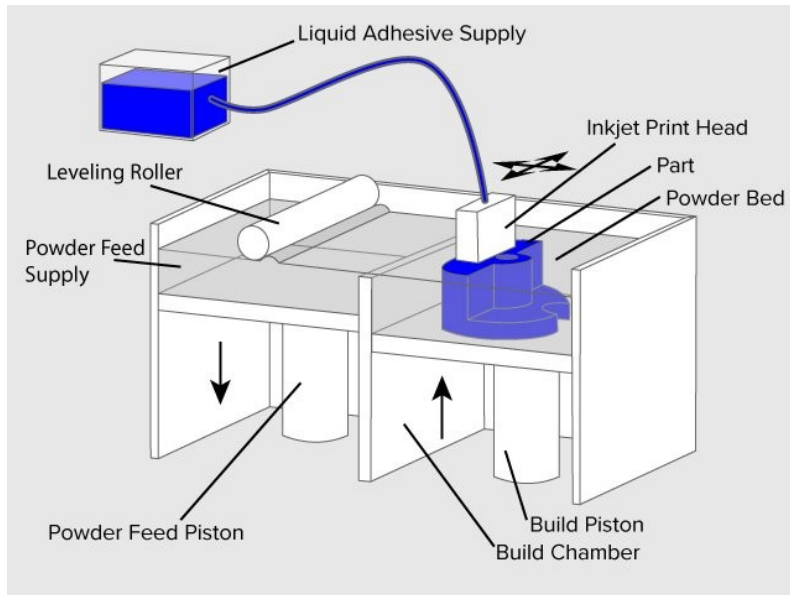
ในกระบวนการนี้ วัสดุที่ถูกพ่นออกมามีลักษณะเป็นหยดเล็ก ๆ ผ่านหัวพ่นขนาดเล็ก คล้ายกับการทำงานของเครื่องพิมพ์อิงค์เจ็ท แต่เป็นการพ่นชั้นต่อชั้น เพื่อสร้างฐานและฉายแสง UV เพื่อให้เกิดการแข็งตัววัสดุ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Material Jetting

3) Binder Jetting

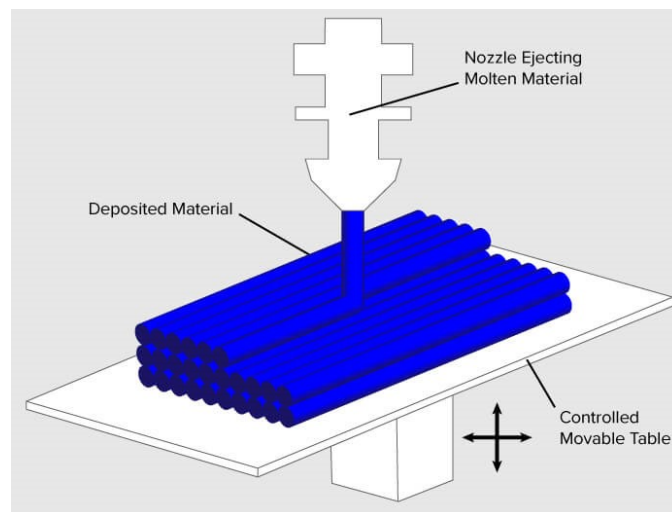
เทคโนโลยีนี้ใช้วัสดุร่วมกัน 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุผงและสารยึดเกาะแบบเหลว ในตัวสร้างชิ้นงาน วัสดุผงถูกพ่นลงมาเป็นชั้นอย่างเท่า ๆ กัน ส่วนสารยึดเกาะจะถูกพ่นผ่านหัวพ่น เพื่อยึดเกาะวัสดุผงเข้าด้วยกัน เกิดเป็นรูปทรงต่าง ๆ โดยหลังจากพิมพ์เสร็จ วัสดุผงที่เหลือสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Binder Jetting

4) Material Extrusion

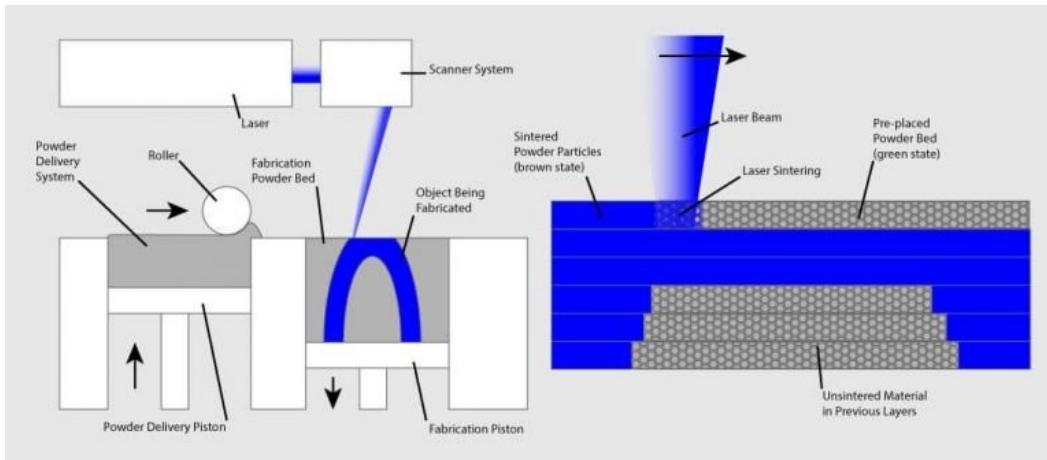
เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เพราะมีราคาถูก โดย FDM เป็นที่รู้จักมากที่สุด มีหลักการการทำงาน คือ มีการหลอมฟิลาเมนต์พลาสติก และปล่อยให้ไหลผ่านหัวพ่นขนาดเล็ก ซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ จนเป็นรูปทรงของวัตถุ แม้ว่าจะสร้างจากวัตถุหลอมเหลว แต่วัสดุสามารถแข็งตัวทันทีที่ไหลผ่านหัวพ่น แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Material Extrusion

5) Powder Bed Fusion

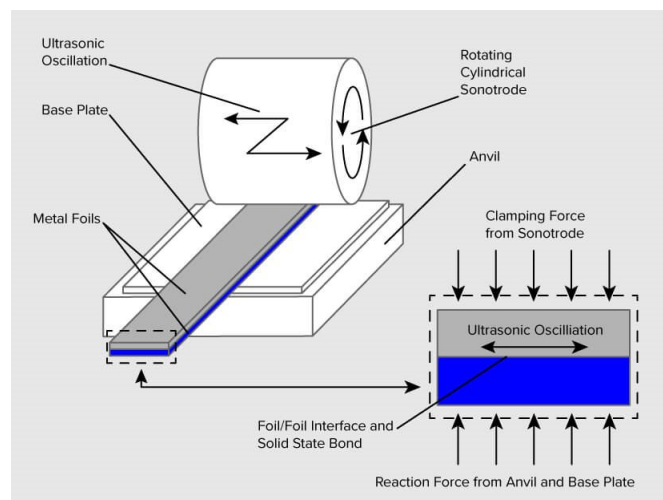
เป็นเทคโนโลยีที่ใช้วัสดุผงเกลี่ยเป็นชั้นบางเท่ากัน จากนั้นจะเกิดการเชื่อมกันเป็นชั้นเดียวกัน โดยกระบวนการหลอมด้วยความร้อนจากเลเซอร์ เรียกว่า Selective Laser Sintering (SLS) ส่วนการพ่นสารยึดเกาะผ่านหัวพ่น และเกิดปฏิกิริยาความร้อนขึ้น จนหลอมรวมเป็นชั้นเดียวกัน เรียกว่า Multi Jet Fusion (MJF) และการใช้วัสดุผงโลหะหลอมเป็นชั้นเดียวกันด้วยเลเซอร์ เรียกว่า Direct Metal Laser Sintered (DMLS) แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Powder Bed Fusion

6) Sheet Lamination

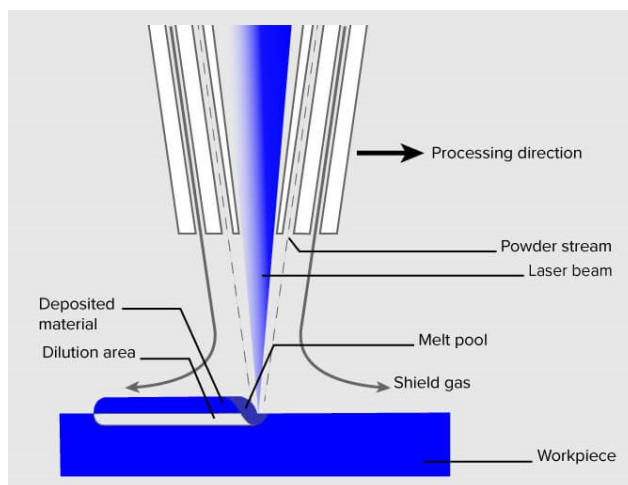
การเคลือบแผ่นเกี่ยวข้องกับแผ่นวัสดุที่ยึดเข้าด้วยกันด้วยแรงภายนอก แผ่นวัสดุสามารถเป็นโลหะ, กระจก หรือ พอลิเมอร์ โดยแผ่นโลหะ จะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยอัลตราโซนิก และใช้ลูกกลิ้ง CNC กลิ้งทับ เพื่อให้เกิดเป็นรูปทรงที่ต้องการ แผ่นกระจกสามารถใช้ได้เช่นกัน แต่จะถูกติดกันด้วยกาวเพิ่มการยึดติด และตัดเป็นรูปทรงด้วยใบมีด แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 Sheet Lamination

7) Directed Energy Deposition

กระบวนการนี้นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมโลหะ หรือการประยุกต์ใช้ในการผลิตที่รวดเร็ว เครื่องมือการพิมพ์ 3 มิติ มักติดกับแขนของหุ่นยนต์ที่ประกอบไปด้วยหัวพ่นผงโลหะ หรือลวดบนผิวหน้าและให้ความร้อน เพื่อหลอมกลายเป็นวัตถุ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 Directed Energy Deposition

2.2 ระบบสี CIE L*a*b*

ระบบสี L*a*b* เป็นระบบที่กำหนดขึ้นโดย Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ใช้อธิบายสีที่รับรู้ได้ เพื่อแก้ปัญหาค่าสีในระบบ CIE XYZ สามารถปรับปรุงการแสดงผลสีได้ ระบบสี L*a*b* รวมสีที่รับรู้ได้ทั้งหมดหมายความว่าขอบเขตสีเกินขอบเขตของ RGB และ CMYK คุณลักษณะที่สำคัญของแบบจำลอง L*a*b* เป็นระบบสีที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ หมายความว่า สีที่กำหนดจะเป็นอิสระกับอุปกรณ์ที่แสดงผล โดยระบบ CIE L*a*b* ประกอบไปด้วยแกน L* , แกน a* และแกน b* [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เมื่อ แกน L* แสดงความสว่างสี

L = 0 หมายถึง สีมีความมืดที่สุด

L = 100 หมายถึง สีมีความสว่างที่สุด

แกน a* แสดงความเป็นสีแดง - เขียว

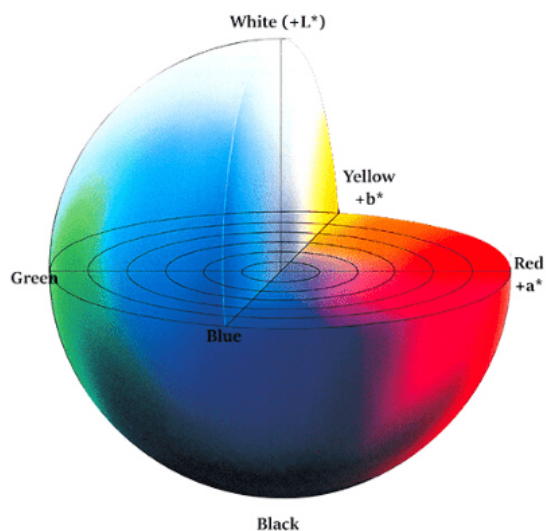
a* เป็น + แสดงความเป็นสีแดง

a* เป็น - แสดงความเป็นสีเขียว

แกน b* แสดงความเป็นสีเหลือง - น้ำเงิน

b* เป็น + แสดงความเป็นสีเหลือง

b* เป็น - แสดงความเป็นสีน้ำเงิน



รูปที่ 2.9 CIE L*a*b*

2.3 ค่าความแตกต่างสี (ΔE^*_{ab})

ΔE^*_{ab} คือ การวัดมาตรฐานกำหนดขึ้นโดยกำหนดขึ้นโดย Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ที่มีคุณสมบัติความแตกต่างของสี 2 สีที่ปรากฏ ΔE^*_{ab} มีสเกลตั้งแต่ 0 ถึง 100 โดย 0 เป็นความต่างสีที่น้อยที่สุด และ 100 เป็นความต่างสีที่มากที่สุด [7] มีสูตรการหาค่า ΔE^*_{ab} ดังนี้

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_2 - L^*_1)^2 + (a^*_2 - a^*_1)^2 + (b^*_2 - b^*_1)^2}$$

โดยนำค่า ΔE^*_{ab} ที่คำนวณได้ของสิ่งพิมพ์ มาเทียบค่าความแตกต่างสีที่ยอมรับได้ ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงช่วงมาตรฐานค่าความแตกต่างสีที่ยอมรับได้

ค่า ΔE^*_{ab}	ความหมาย
≤ 1.0	ตามนุษย์ไม่สามารถแยกความแตกต่าง
1 - 2	สามารถแยกความแตกต่างได้ โดยต้องสังเกตใกล้
2 - 10	สามารถแยกความแตกต่างได้
11 - 49	สีมีแนวโน้มไปทางสีตรงข้าม
100	สีตรงข้ามกัน

2.4 ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์

มีข้อกำหนดมากมาย เมื่อก้าวถึงการพิมพ์ 3 มิติ ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์เป็นหนึ่งในข้อกำหนดที่ต้องพบ ซึ่งมีความสำคัญมากในผลลัพธ์ของสิ่งพิมพ์ที่ได้ [8]

2.4.1 ความหมายของความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์

เปลือกสิ่งพิมพ์ คือผนังของสิ่งพิมพ์ที่ปรากฏอยู่ภายนอกของสิ่งพิมพ์ หรือเปลือกภายนอกของวัตถุ สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือจำนวนชั้นของเปลือกและความหนาของสิ่งพิมพ์ ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์ คือการรวมกันของความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์และจำนวนชั้นของผนัง โดยความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์ต่ำและจำนวนผนังมาก มีความใกล้เคียงกันกับ สิ่งพิมพ์ที่มีความหนาของเปลือกมากและจำนวนผนังน้อย

2.4.2 วิธีการคำนวณความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์

โดยทั่วไปความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์ มีค่าเป็นจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่น ตัวอย่างเช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพ่นมีขนาด 0.4 มม. ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์ที่สามารถเป็นได้ คือ 0.4 มม. ,0.8 มม., 1.2 มม. หรือ มากกว่านั้น

2.4.3 ค่าน้อยที่สุดและค่ามากที่สุดของความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์

ความหนาที่ไม่ค่อยเป็นที่ต้องการในการขนส่ง คือต่ำกว่า 1.5 มม. อ้างอิงจาก I.Materialise ผู้ส่งมอบสิ่งพิมพ์ 3 มิติ แบบกำหนดเองได้ ส่วนใหญ่มักจะเกิดความเสียหายขณะขนส่ง จึงมีข้อแนะนำว่า ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์ควรจะหนาอย่างน้อย 5 มม. ถ้าต้องการให้แข็งแรงและทนทาน ถ้าแบบจำลองมีส่วนที่เปราะบางและโครงสร้างบาง เช่น แขนขาของตุ๊กตา ความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์มีส่วนช่วยอย่างมาก ควรระวังหากความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์มากเกินไปก็อาจส่งผลเสีย มักเกิดกับการออกแบบที่มีรายละเอียดมาก และตำแหน่งของรายละเอียดที่พิมพ์ใกล้กันที่อาจมีส่วนที่ซ้อนทับกัน จึงควรออกแบบให้มีความเหมาะสม ถ้าต้องการให้สิ่งพิมพ์มีความยืดหยุ่น สิ่งพิมพ์ที่มีเปลือกหนาอาจไม่เหมาะสม เพราะจะทำให้สิ่งพิมพ์มีความแข็ง ซึ่ง Fictiv พบว่าที่ความหนา 0.8 มม. เป็นความหนาที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ และยิ่งความหนาของเปลือกสิ่งพิมพ์บางเท่าไร ยิ่งมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในกระบวนการผลิตมากขึ้นเท่านั้น

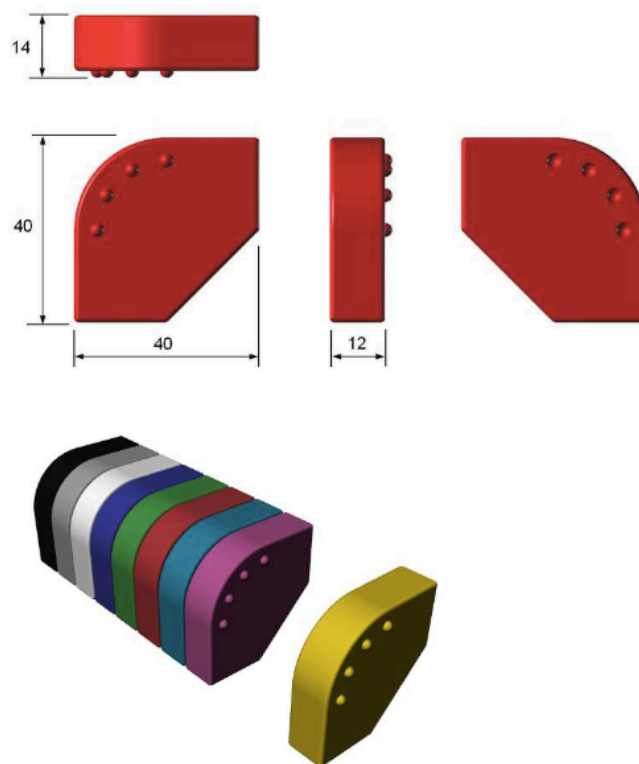
2.5 บทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยของ Walter, Huson, Parraman และ Stanić, 2009 [9] กล่าวว่า การตรวจสอบเชิงปริมาณเกี่ยวกับการผลิตสีในการพิมพ์ 3 มิติ สามารถบอกถึงการออกแบบใช้งานในชีวิตจริงได้ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ระบบการพิมพ์ 3 มิติ แบบการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (powder- binder) โดยการใช้เทคนิคการประเมินเปรียบเทียบ color output ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ZCorp 510 และ 650 ผ่านการผลิต และวัดก้อนสีที่ใช้ทดสอบ (colour test blocks) การตรวจสอบและเปรียบเทียบผลของสารแทรกซึม 2 ชนิด (paraffin wax และ cyanoacrylate) ที่ใช้กันทั่วไปเพื่อเพิ่ม output งานพิมพ์ 3 มิติ

โดยบริษัท Z-Corp ได้ให้ข้อมูลแนวปฏิบัติคุณภาพที่ดีที่สุด ซึ่งเกี่ยวกับวิธีการที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีจากระบบการพิมพ์ 3 มิติ แบบการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงว่า ควรรักษาความสะอาด และบำรุงรักษา

เครื่องพิมพ์ 3D ควรทำความสะอาดหัวพิมพ์และบริเวณเซ็นเซอร์ เพื่อให้แน่ใจว่าหัวพิมพ์อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม ควรดำเนินการตามขั้นตอนการจัดตำแหน่งอัตโนมัติซึ่งเข้าถึงผ่านซอฟต์แวร์การพิมพ์ 3 มิติ ผู้ใช้ควรตรวจสอบรูปแบบการทดสอบ ซึ่งพิมพ์เป็นส่วนหนึ่งของขั้นตอนการจัดตำแหน่งอัตโนมัติ เพื่อให้แน่ใจว่าหัวพิมพ์อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ภายในซอฟต์แวร์การพิมพ์ 3 มิติ ควรเลือกชนิดผงวัสดุและชนิดสารแทรกซึมที่ถูกต้อง นอกจากนี้ Z-Corp ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิธีที่ดีที่สุดในการจัดวางชิ้นส่วนที่จะทำการพิมพ์ และยังสามารถแนะนำให้สร้างส่วนสีดำไว้ด้านหน้าชิ้นส่วนที่จะสร้าง เพื่อลดเงาให้น้อยที่สุด และให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพดีที่สุด เมื่อสร้างชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติแล้ว ควรวางอยู่บนฐานสร้างเป็นเวลาอย่างน้อยหนึ่งชั่วโมงเพื่อให้แน่ใจว่าแห้งสนิท จากนั้นควรนำชิ้นส่วนออกจากเครื่องพิมพ์ แล้วนำผงวัสดุออกด้วยแปรงทาสี หรือด้วยการอัดอากาศในหน่วยกำจัดแป้ง ควรปล่อยให้ชิ้นส่วนแห้งเป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง ในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นต่ำ เพื่อให้ได้สีที่มีคุณภาพดีและสม่ำเสมอบนพื้นผิวของชิ้นส่วนงานพิมพ์ 3 มิติ

ในการออกแบบและผลิตก่อนสีทดสอบนั้น มีการจัดเตรียมตัวอย่าง 3 มิติที่เรียบง่าย ซึ่งจะช่วยให้สามารถประเมินสีของสิ่งพิมพ์ 3 มิติบนพื้นผิวที่แตกต่างกันได้ เช่น พื้นผิวแนวนอน แนวตั้ง แนวทแยง และโค้ง การออกแบบก่อนสีทดสอบแสดงในรูปที่ 1 แต่ละก้อนมีขนาด $40 \times 40 \times 14$ มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นครึ่งวงกลม มีส่วนเว้าและนูนขนาดเล็ก ใช้ในการเรียงซ้อนทับกัน ในโมเดล 3D CAD การตั้งระยะ 0.1 มม. ถูกระบุระหว่าง mating surfaces ของส่วนเว้าและนูน เพื่อให้มีความแปรปรวนของมิติในกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ และใช้สารแทรกซึม ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การออกแบบก่อนสีทดสอบ [9]

สีที่เลือกใช้สำหรับก้อนสีทดสอบ คือ 24 สีของ GretagMacbeth (X-Rite) หรือแผ่นชาร์ทสี ColourChecker Classic ที่เลือกใช้ชาร์ทสีนี้ เนื่องจากคาดว่าให้ช่วงสีและ grey tones ที่ดี และมักใช้เป็นมาตรฐานในด้านภาพสี โดยพิกัดสีที่ใช้สำหรับก้อนทดสอบคือ RGB 0, 0, 0 เมื่อทำการพิมพ์ก้อนสีทดสอบเสร็จให้นำไปวัดค่าสี โดยใช้ spectrophotometer ภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D50 และมุมมองของผู้สังเกตที่ 2° ทำการวัด 4 ด้านของแต่ละก้อน คือ ด้านบน, ด้านล่าง, ด้านข้าง และพื้นผิวโค้งที่มุม 45 องศา แล้วทำการหาผลต่างค่าความแตกต่างของสี ซึ่งสีที่วัด ได้แก่ Cyan, Magenta, Yellow, Neutral 6.5 และ black

จากการทดสอบพบว่า การผลิตสีที่ได้ทำการวิเคราะห์ คือความแตกต่างของสีระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกันบนก้อนสี เป็นสิ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากกลไกของการพิมพ์ 3 มิติ อาจเกิดความแตกต่างของลักษณะพื้นผิวและการผลิตสีได้ รวมถึงการผลิตสีบนพื้นผิวที่แตกต่างกันของก้อนลูกบาศก์ โดยผลการทดสอบเป็นไปตามที่คาดไว้ คือมีความแตกต่างที่มองเห็นได้ระหว่างพื้นผิวที่แตกต่างกันของงานพิมพ์ 3 มิติ ซึ่งขึ้นอยู่กับการวางตัวจำเพาะที่สัมพันธ์กับกลไกการพิมพ์ 3 มิติ ปัญหาของ banding หรือการปรากฏตัวของแถบที่มองเห็นได้บนพื้นผิวแนวตั้ง สามารถแก้ไขได้โดยการขัดวัสดุงานพิมพ์ 3 มิติอย่างระมัดระวัง ก่อนที่จะเกิด stair effect บนพื้นผิวที่ความโค้ง และจากการการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตสีในการพิมพ์ 3 มิติ ตามการวิเคราะห์สีพื้นฐานที่เลือกมาทดสอบ แสดงให้เห็นว่าการผลิตสีขึ้นอยู่กับตำแหน่งและการวางตัวของพื้นผิว รวมถึงประเภทของเครื่องพิมพ์ที่ใช้

จากงานวิจัยของ Arikan, Brunton, Tansale และ Urban, 2009 [10] ได้อธิบายกระบวนการจัดการสีของการพิมพ์ 3 มิติ และเน้นการวัดสีบนวัสดุพิมพ์โปร่งแสง เพื่อสร้าง ICC profiles กระบวนการจัดการสีของการพิมพ์ 3 มิติ สามารถดัดแปลงจากกระบวนการจัดการสีมาตรฐานของการพิมพ์ 2 มิติ ความแตกต่างหลักของการพิมพ์ 2 มิติ คือการกำหนดลักษณะสีของระบบการพิมพ์สำหรับการสร้าง ICC profiles ลักษณะเหล่านี้เป็นสิ่งจำเป็นในการสร้าง ICC profile ซึ่งถูกใช้โดย CMM (Color Management Module) เพื่อเปลี่ยนสีที่ถูกนำเข้ามาไปเป็นค่าโทน และความต้องการในการประมวลผลทางเรขาคณิต ซึ่งมีความสำคัญในขั้นตอนการทำ halftone สำหรับการพิมพ์ 2 มิติ บนวัสดุที่เป็นกระดาษ สามารถคาดเดาการสะท้อนสเปกตรัมจากบริเวณหมึกที่ครอบคลุมด้วยแสงและ Dot gain การเปลี่ยนแปลงรูปแบบเหล่านี้มีความจำเป็นอย่างมากต่อความถูกต้องของลักษณะกระบวนการพิมพ์ 3 มิติ กับวัสดุโปร่งแสง

ผลกระทบของความหนาและการรองหลังในการวัดการสะท้อน คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบ โดยใช้ช่องสีของ ColorChecker SG ขนาด 128 สี เป็นช่องสีเหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15x15 ตารางมิลลิเมตร ที่ความหนาของสิ่งพิมพ์อยู่ที่ 2 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ของวัสดุพิมพ์สีขาวโปร่งแสงสูง วางบนพื้นหลังสีดำและพื้นหลังสีขาว ทำการวัดสีโดยใช้เครื่อง Konica Minolta's CS1000A spectroradiometer ที่ 45/0 ผลที่ได้คือผลกระทบของพื้นหลังมีผลกับสิ่งพิมพ์ 2 มิลลิเมตร มากกว่า 10 มิลลิเมตร คณะผู้วิจัยแนะนำว่าควรพิมพ์สิ่งพิมพ์ให้มีความหนาพอที่พื้นหลังจะไม่มีผลกระทบต่อการวัดสี ในกรณีนี้ควรพิมพ์สิ่งพิมพ์ให้มีความหนา มากกว่า 10 มิลลิเมตร หรืออาจพิมพ์สิ่งพิมพ์ให้บางลง แต่วัดสีบนพื้นหลังสีขาว

จากงานวิจัยของ Liu et al., 2019 [11] ทางผู้วิจัยได้พยายามพัฒนาระบบการผลิตสีแบบ 3 มิติ โดยอาศัยเครื่องสแกนภายในช่องปากและการพิมพ์ 3 มิติ วิธีการจัดการสีทั่วไปได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่อง

สแกนภายในช่องปากและเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อสร้าง color profiles ที่ยอมให้มีการถ่ายโอนข้อมูลสีจากระบบสีที่อิงอุปกรณ์ไปยังระบบสีที่ไม่อิงอุปกรณ์ ในทางกลับกันการประเมินสีฟันและเหงือกในหลอดทดลองนั้นตรวจสอบความเป็นไปได้ และความถูกต้องของระบบสีนี้ในทางทันตกรรม

ซึ่งการพัฒนา color profile สำหรับเครื่องสแกนภายในช่องปาก profile นี้จะเชื่อมโยงค่าสี RGB ของภาพพื้นผิวของเครื่องสแกนกับค่า tristimulus CIE XYZ ที่ไม่ขึ้นกับอุปกรณ์ เพื่อจำลองข้อกำหนดในการใช้งานได้จริงของการบังแสงทางทันตกรรม ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็น neutral daylight และมีระยะห่างประมาณ 1.5 เมตร จึงทำการวัดค่าสีภายใต้แหล่งกำเนิดแสง D65 และมุมมองของผู้สังเกตที่ 2° ซึ่งเมื่อทำการทดสอบพบว่าระบบการผลิตสี 3 มิติ ไม่สามารถถ่ายโอนข้อมูลเฉดสีจากช่องปากของผู้ป่วยไปยังแบบจำลองทางทันตกรรมสำหรับการประดิษฐ์ชิ้นส่วนเทียมได้แม่นยำเพียงพอ และไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่น่าพึงพอใจในแง่ของความแตกต่างของสี ทางผู้วิจัยแนะนำว่าหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการผลิตสี 3 มิติ นอกจากการปรับปรุงความแม่นยำของฮาร์ดแวร์แล้ว การพัฒนา color profile ใหม่ที่มีความแม่นยำสูงขึ้นก็มีประโยชน์เช่นกัน การเพิ่มจำนวนตัวอย่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มเฉดสีฟันให้มากขึ้นอาจเป็นวิธีที่ดีที่สุด

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

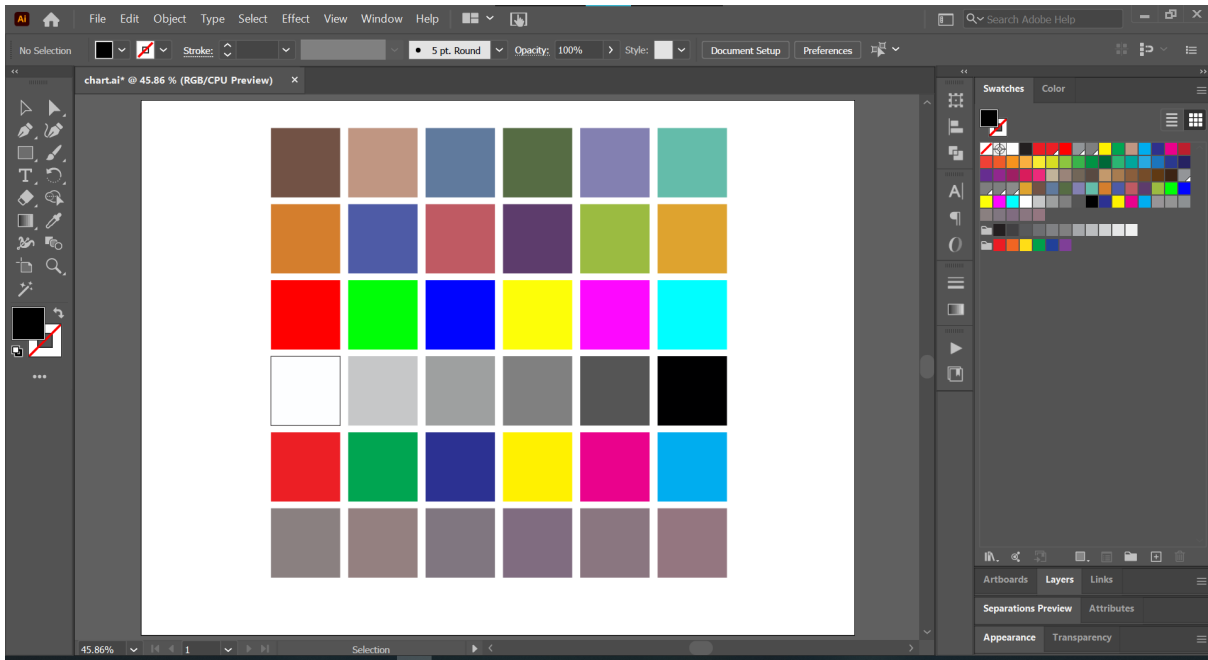
- 3.1.1 เครื่องพิมพ์ 3 มิติสีระบบ FDM ยี่ห้อ XYZprinting รุ่น da Vinci Color mini
- 3.1.2 ตลับหมึก รุ่น da Vinci Color mini Ink ชนิด 3in1 Ink Cartridge (CMY)
- 3.1.3 เส้นใยพลาสติก PLA
- 3.1.4 เครื่องวัดสี Spectrophotometer ยี่ห้อ GretagMacBeth รุ่น Spectrolino
- 3.1.5 เครื่องวัดสี Spectrodensitometer ยี่ห้อ X-Rite รุ่น 500 series
- 3.1.6 โปรแกรม XYZprint
- 3.1.7 โปรแกรม 3D Builder
- 3.1.8 โปรแกรม Adobe Illustrator
- 3.1.9 แผ่นรองตัวอย่างสีพิมพ์สีดำ
- 3.1.10 ตู้แสงมาตรฐาน สังกะสีภายใต้แสง D65

3.2 วิธีการดำเนินงาน

3.2.1 การหารูปแบบการพิมพ์แผ่นตัวอย่างสีที่เหมาะสมที่ใช้ในการทดลอง

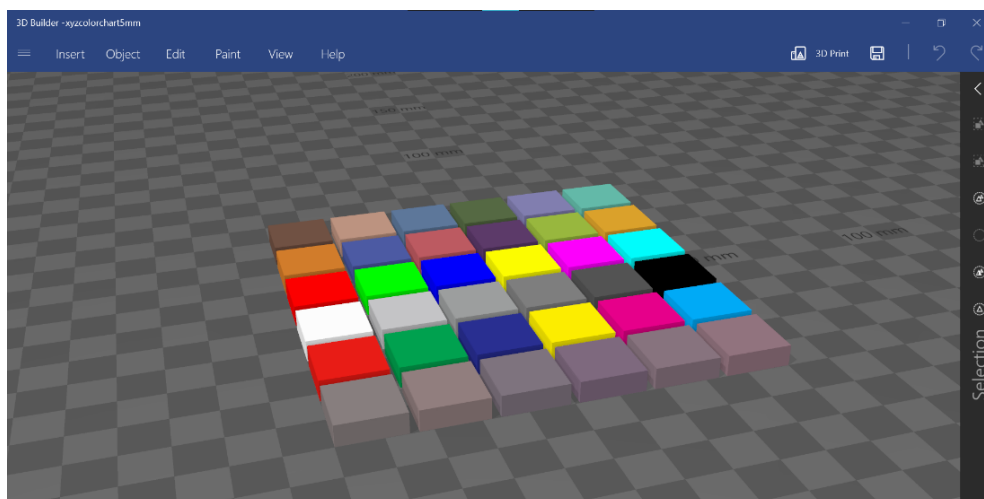
3.2.1.1 เลือกแผ่นตัวอย่างให้เหมาะสมกับการพิมพ์ 3 มิติ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Color Chart 24 สีของ GretagMacbeth (X-Rite) หรือที่รู้จักในชื่อ ColourChecker Classic และเพิ่มค่าสีที่แสดงในโหมด RGB ของ CMYK, RGB ที่มีความเข้มมากที่สุด และไล่ระดับสีขาว, สีเทาและสีดำ เพื่อสร้างแถบสี Gray balance จากนั้นทำการแปลงค่าสี CMYK และ RGB จากค่าสี CMYK เป็นค่า RGB และสร้าง Gray balance โดยการสร้างช่องสีเทากลาง (128,128,128) ขึ้นมาจำนวน 6 ช่อง ทำการเพิ่มและลดค่า RGB แต่ละช่องสัญญาณห่างกันเป็นจำนวนช่องละ 10 ค่า เพื่อดูแนวโน้มการพิมพ์สีเทาของเครื่องพิมพ์ ค่าสี RGB เป็นดังภาคผนวก ก. แสดงในตาราง ก.1

3.2.1.2 สร้างแผ่นตัวอย่างสีด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator ขนาด 110 มม. x 110 มม. ที่มีช่องสี่เหลี่ยมจำนวน 36 ช่อง ขนาดช่องละ 15 มม. x 15 มม. โดยแต่ละช่องมีสีต่างกัน กำหนดความหนาของสิ่งพิมพ์ที่ 2 มม. และมีระยะห่างระหว่างช่องอยู่ที่ 2 มม. (รูปที่ 3.1) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .png



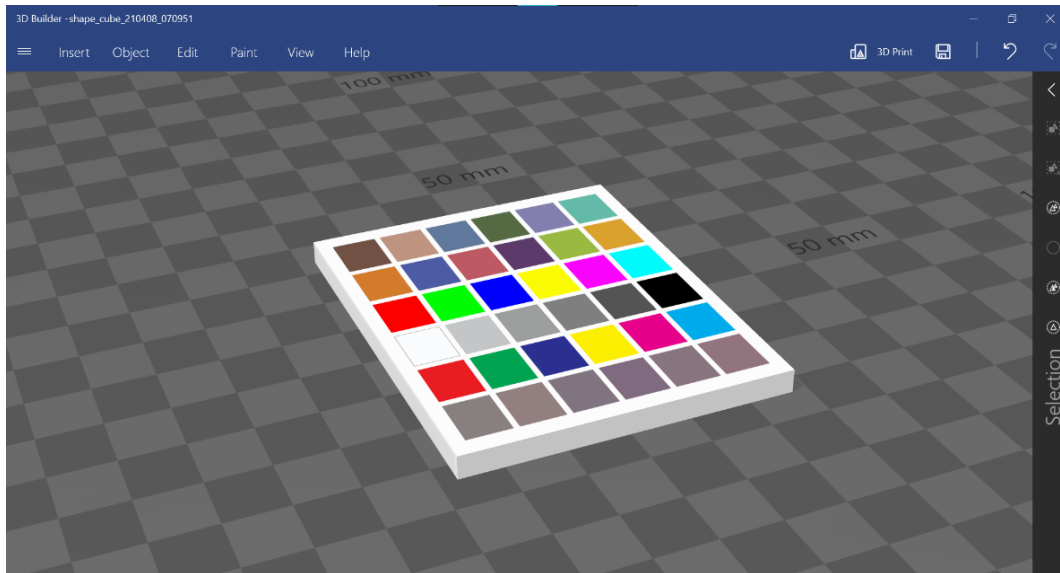
รูปที่ 3.1 แผ่นตัวอย่างสีที่สร้างเพื่อใช้ในการเลือกรูปแบบในการพิมพ์

3.2.1.3 สร้างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ รูปแบบ Texture ด้วยโปรแกรม 3D Builder โดยสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมจำนวน 36 ชิ้น วางรูปแบบ 6 x 6 แถว ระยะห่างแต่ละแถวของรูปทรงสี่เหลี่ยมอยู่ที่ 2 มม. ขนาดต่อชิ้นรูปทรงสี่เหลี่ยมคือ 15 มม. x 15 มม. กำหนดความหนาสิ่งพิมพ์ที่ 5 มม. จากนั้นทำการเปลี่ยนสีของรูปทรงสี่เหลี่ยมแต่ละชิ้น ดังแผ่นตัวอย่างสีในข้อ 3.2.1.2 (รูปที่ 3.2) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .obj



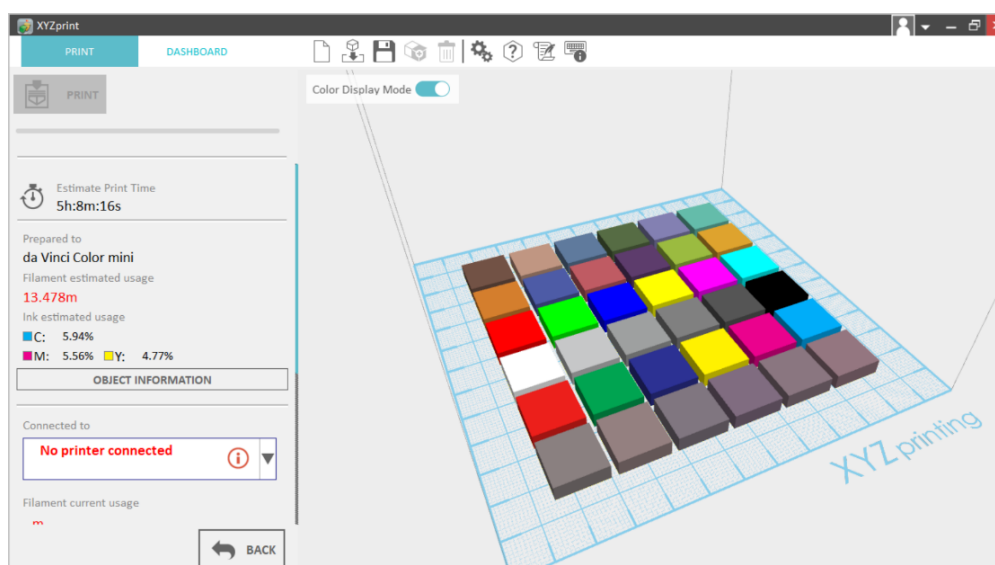
รูปที่ 3.2 สร้างแผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Texture ด้วยโปรแกรม 3D Builder

3.2.1.4 สร้างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ รูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder โดยสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 110 มม. x 110 มม. กำหนดความหนาสิ่งพิมพ์ที่ 5 มม. จากนั้นนำภาพแผ่นตัวอย่างสีในข้อ 3.2.1.2 มาวางบนผิวของโมเดล 3 มิติ (รูปที่ 3.3) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .obj

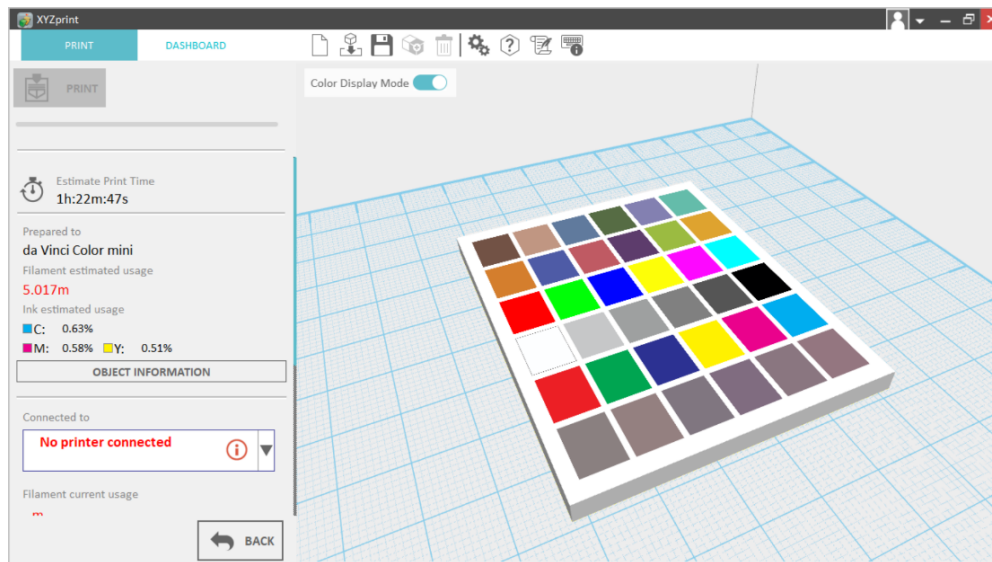


รูปที่ 3.3 สร้างแผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder

3.2.1.5 นำไฟล์ของสิ่งพิมพ์ 3 มิติ ในข้อ 3.2.1.3 และ 3.2.1.4 เข้าโปรแกรม XYZprint ซึ่งใช้พิมพ์สิ่งพิมพ์สำหรับเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ระบบ FDM ยี่ห้อ XYZprinting รุ่น da Vinci Color mini จากนั้นกด Prepare เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งพิมพ์ที่จะพิมพ์และคำนวณเวลาที่ใช้พิมพ์เบื้องต้น ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์การสร้างโมเดลเสร็จ สามารถกดสั่งพิมพ์สิ่งพิมพ์ได้ทันที

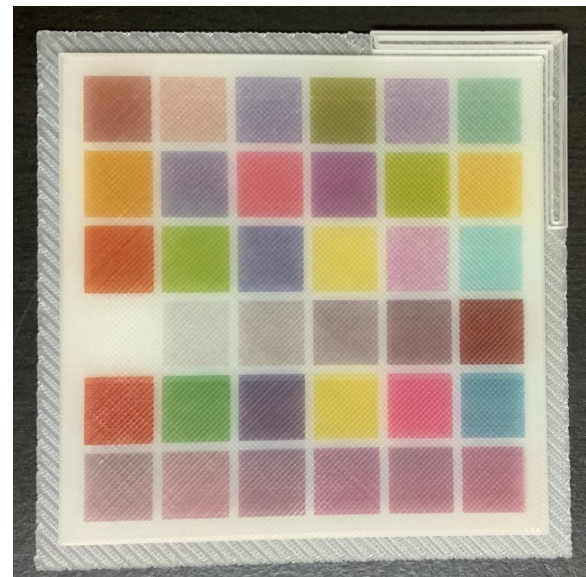


รูปที่ 3.4 แผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Texture ที่ผ่านการวิเคราะห์ในโปรแกรม XYZPrint



รูปที่ 3.5 แผ่นตัวอย่างสีรูปแบบ Surface ที่ผ่านการวิเคราะห์ในโปรแกรม XYZPrint

3.2.1.6 เมื่อพิมพ์แผ่นตัวอย่างสีเสร็จ นำแผ่นตัวอย่างสีที่ได้ทั้ง 2 รูปแบบ (รูปที่ 3.6) มาวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ของสีแต่ละช่อง ด้วยเครื่องวัดสี Spectrodensitometer ยี่ห้อ X-Rite รุ่น 500 series (รูปที่ 3.7) ภายใต้สภาวะ D65/2° (illuminant/observer) และบันทึกผล



รูปที่ 3.6 แผ่นตัวอย่างสีพิมพ์ด้วยรูปแบบ Texture (ซ้าย) และแผ่นตัวอย่างสีพิมพ์ด้วยรูปแบบ Surface (ขวา)



รูปที่ 3.7 การวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ด้วยเครื่องวัดสี Spectrodensitometer ยี่ห้อ X-Rite รุ่น 500 series

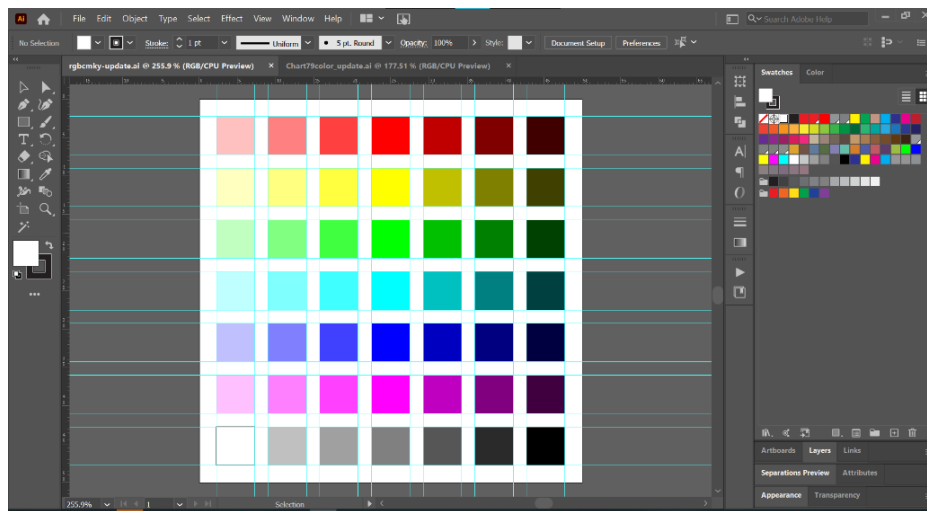
3.2.1.7 คำนวณค่าสี $L^*a^*b^*$ จากค่า RGB ของแผ่นตัวอย่างสีต้นฉบับ (sRGB)

3.2.1.8 เปรียบเทียบค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้จากทั้ง 2 รูปแบบกับค่า $L^*a^*b^*$ ของแผ่นตัวอย่างสีต้นฉบับ (sRGB) ดังภาคผนวก ก. เพื่อหารูปแบบที่สามารถพิมพ์ได้มีค่าสี $L^*a^*b^*$ ใกล้เคียงกับค่าสี $L^*a^*b^*$ ของแผ่นตัวอย่างสีต้นฉบับ

3.2.1.9 เมื่อเลือกรูปแบบการพิมพ์แล้ว ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อสีที่พิมพ์ได้ และความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัตถุ 3 มิติรวมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ

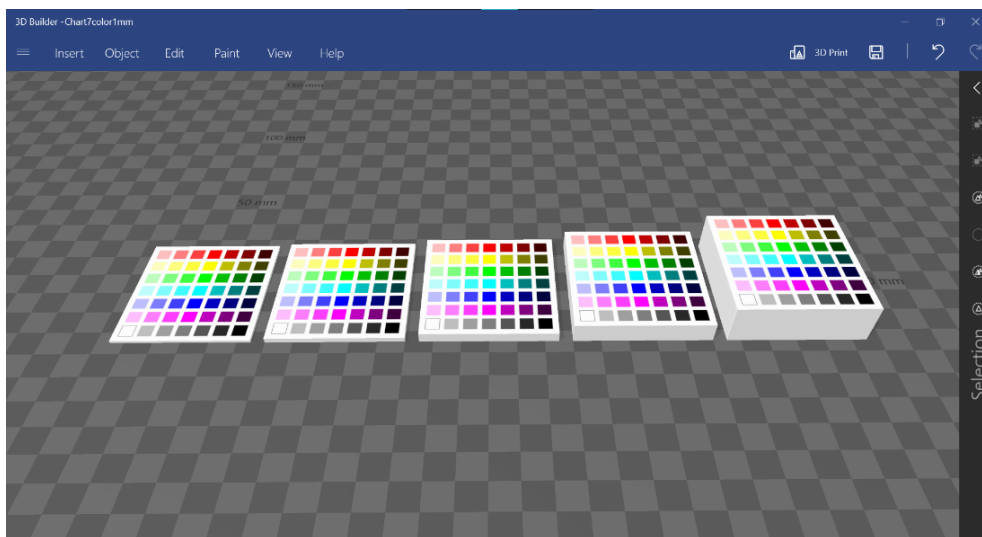
3.2.2 การทดสอบผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อสีที่พิมพ์ได้

3.2.2.1 จากขั้นตอน 3.2.1 รูปแบบการพิมพ์ที่เลือกนำมาใช้ในการทดลองขั้นต่อไปคือรูปแบบ Surface โดยออกแบบแผ่นตัวอย่างสีที่ประกอบด้วยสีทั้งหมด 6 สี ซึ่งประกอบด้วยสีแดง สีเหลือง สีเขียว สีไซแอน สีน้ำเงินและสีมาเจนต้า ลดหลั่นระดับจากระดับที่สว่างที่สุดไปจนถึงระดับที่คล้ำที่สุดสีละ 7 ระดับ และเพิ่มระดับความสว่างจากสีขาวจนถึงสีดำเป็นลำดับทั้งหมด 7 ระดับด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator การลดหลั่นระดับเกิดจากการแบ่งสัญญาณสี RGB แต่ละสัญญาณสีออกเป็นสัญญาณละ 5 ช่วง (0, 64, 128, 192, 255) เมื่อนำมาสร้างการลดหลั่นระดับสีของแต่ละสีสร้างได้ทั้งหมด 9 ระดับ รวมสีขาวและสีดำ เมื่อคัดสีขาวและสีดำออก แต่ละสีเหลือเพียง 7 ระดับ โดยกำหนดให้สิ่งพิมพ์มีขนาด 50 มม. x 50 มม. มีช่องสีเหลี่ยมจำนวน 49 ช่อง ขนาดช่องละ 5 มม. x 5 มม. แต่ละช่องมีสีต่างกัน และมีระยะห่างระหว่างช่องเท่ากับ 1.75 มม. (รูปที่ 3.8) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .png โดยค่าสี RGB ของแต่ละช่องแสดงดังภาคผนวก ข. ในตารางที่ ข.1, ข.6, ข.11, ข.16, ข.21, ข.26 และ ข.31



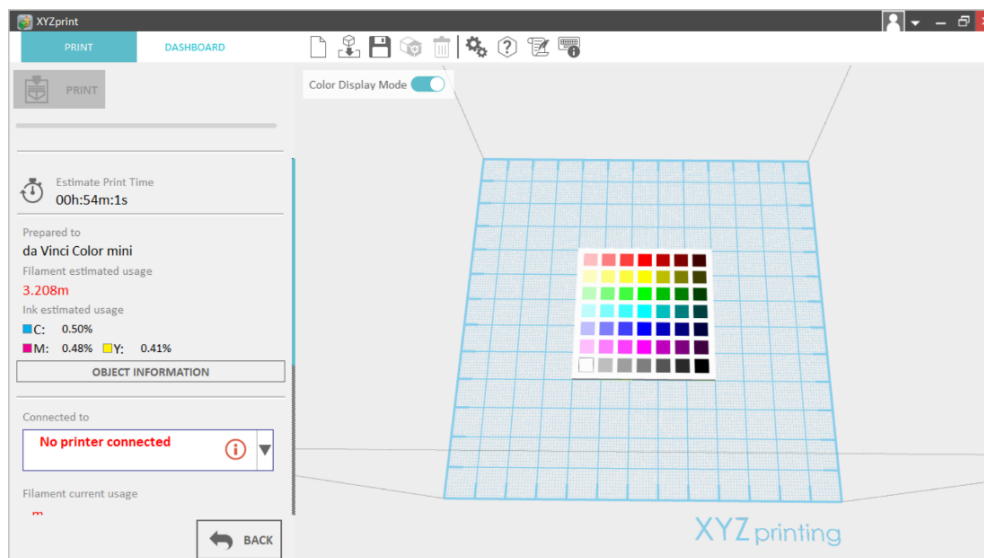
รูปที่ 3.8 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator

3.2.2.2 สร้างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ รูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder โดยสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 50 มม. x 50 มม. กำหนดความหนาสิ่งพิมพ์ที่ 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม. จากนั้นนำภาพแผ่นตัวอย่างสีในข้อ 3.2.2.1 มาวางบนผิวของตัวอย่างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ (รูปที่ 3.9) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .obj



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ ที่มีความหนาแตกต่างกัน ออกแบบด้วยโปรแกรม 3D Builder

3.2.2.3 นำไฟล์ของสิ่งพิมพ์ 3 มิติ ในข้อ 3.2.2.2 เข้าโปรแกรม XYZprint เพื่อสั่งพิมพ์ จากนั้นกด Prepare เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งพิมพ์ที่จะพิมพ์และคำนวณเวลาที่ใช้พิมพ์เบื้องต้น (รูปที่ 3.10) เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์การสร้างโมเดลเสร็จ สามารถกดสั่งพิมพ์สิ่งพิมพ์ได้ทันที



รูปที่ 3.10 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่ผ่านการวิเคราะห์ในโปรแกรม XYZPrint

3.2.2.4 วัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ของสีแต่ละช่อง ในแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ทุกความหนา ด้วยเครื่องวัดสี Spectrodensitometer ยี่ห้อ GretagMacBeth รุ่น Spectrolino ภายใต้สภาวะ D65/2° (illuminant/observer) บันทึกผล

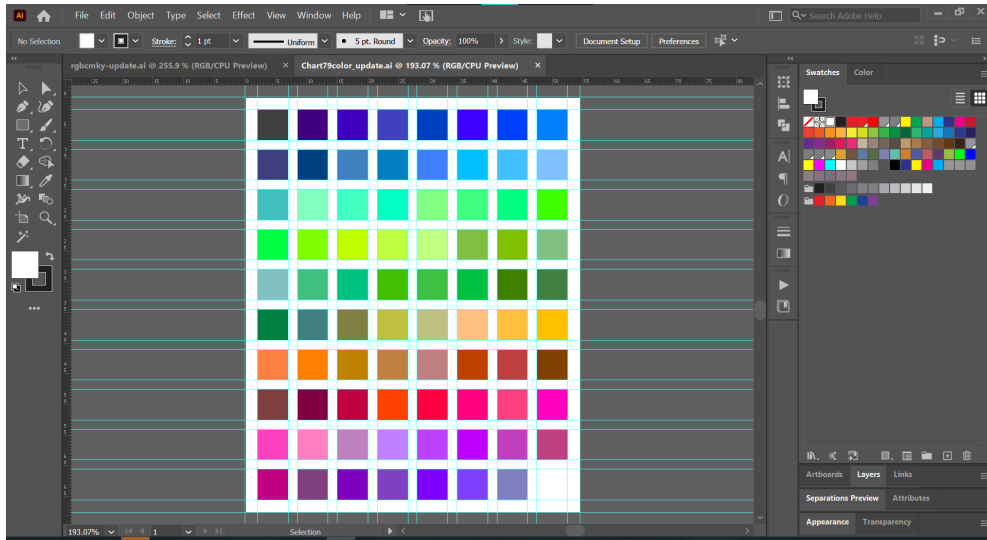
3.2.2.5 คำนวณค่าสี $L^*a^*b^*$ จากค่า RGB ของแผ่นตัวอย่างสีต้นฉบับ (sRGB) แสดงในภาคผนวก ข.

3.2.2.6 นำค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้ของสิ่งพิมพ์และสีต้นฉบับ มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าสีระหว่างสิ่งพิมพ์ทุกความหนากับต้นฉบับ

3.2.2.7 คำนวณค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับ และระหว่างสิ่งพิมพ์ที่มีความหนาต่างกัน ดังแสดงในภาคผนวก ค.

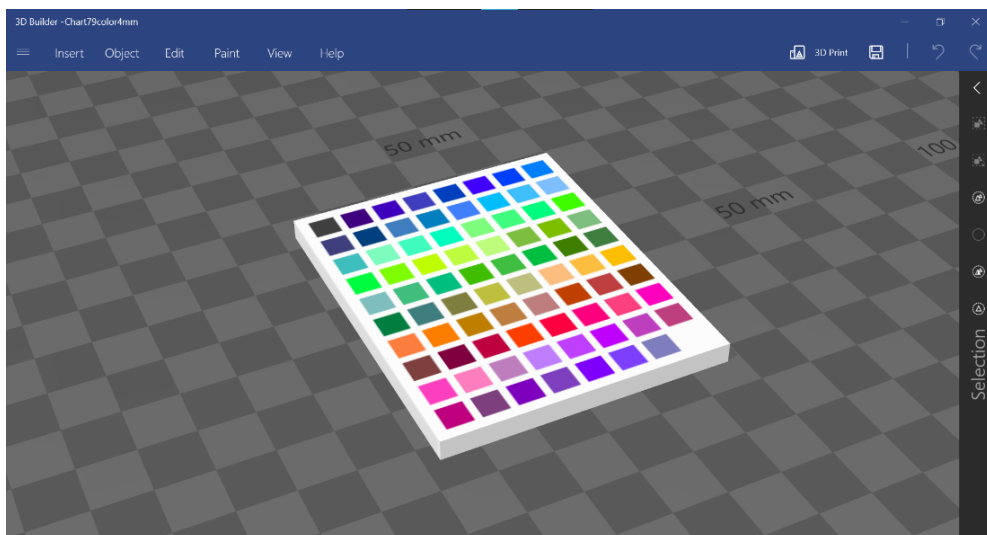
3.2.3 การทดสอบความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัตถุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงก์เจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ

3.2.3.1 ออกแบบแผ่นตัวอย่างสีเพิ่มด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator โดยสร้างสีจากการแบ่งสัญญาณสี RGB แต่ละสัญญาณสีออกเป็นสัญญาณละ 5 ช่วง (0, 64, 128, 192, 255) ซึ่งสร้างสีได้ทั้งหมด 125 สี รวมสีขาวและสีดำ เนื่องจากในข้อ 3.2.2 ได้สร้างแผ่นตัวอย่างสีที่มีช่องสีเหลี่ยมจำนวน 49 ช่อง ประกอบไปด้วยสี 49 สี ซึ่งสีที่สร้างขึ้นมีสีซ้ำใน 125 สี อยู่ 46 สี จึงต้องสร้างแผ่นตัวอย่างสีเพิ่ม ประกอบไปด้วยสีทั้งหมด 79 สี ค่าสีแสดงในภาคผนวก ง. โดยกำหนดให้ชิ้นงานมีขนาด 54.5 มม. x 67.5 มม. มีช่องสีเหลี่ยมจำนวน 79 ช่อง แต่ละช่องมีสีต่างกัน ขนาดช่องละ 5 มม. x 5 มม. และมีระยะห่างระหว่างช่องอยู่ที่ 1.5 มม. (รูปที่ 3.11) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .png



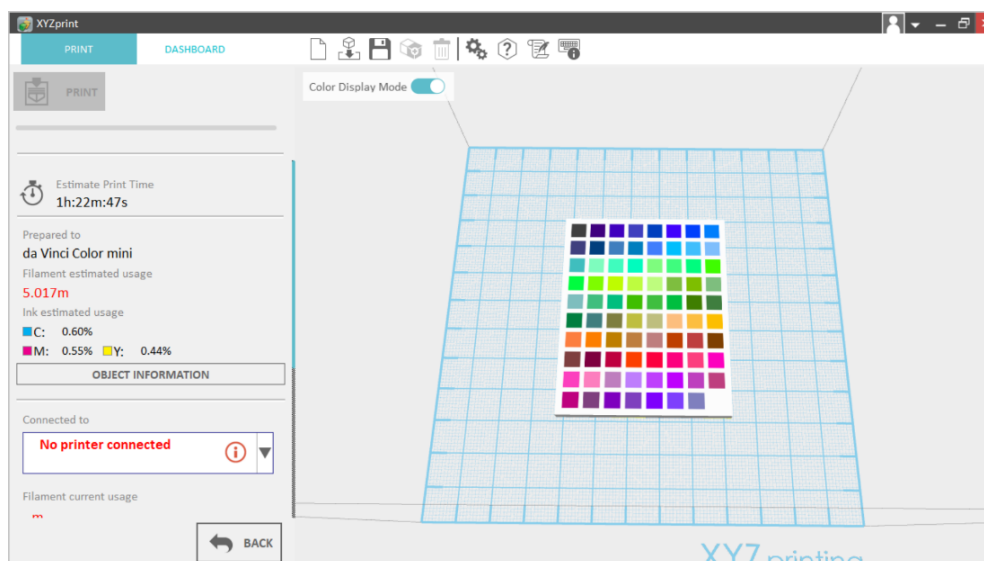
รูปที่ 3.11 แผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ออกแบบด้วยโปรแกรม Adobe Illustrator

3.2.3.2 สร้างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ รูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder โดยสร้างรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด 54.5 มม. x 67.5 มม. กำหนดความหนาสิ่งพิมพ์ที่ 4 มม. จากนั้นนำภาพแผ่นตัวอย่างสีในข้อ 3.2.3.1 มาวางบนผิวของตัวอย่างสิ่งพิมพ์ 3 มิติ (รูปที่ 3.12) และบันทึกไฟล์เป็นสกุล .obj



รูปที่ 3.12 สร้างแผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง รูปแบบ Surface ด้วยโปรแกรม 3D Builder

3.2.3.3 นำไฟล์ของสิ่งพิมพ์ 3 มิติ ในข้อ 3.2.3.2 เข้าโปรแกรม XYZprint เพื่อสั่งพิมพ์ จากนั้นกด Prepare เพื่อให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์โครงสร้างสิ่งพิมพ์ที่จะพิมพ์และคำนวณเวลาที่ใช้พิมพ์เบื้องต้น (รูปที่ 3.13) เมื่อโปรแกรมวิเคราะห์การสร้างโมเดลเสร็จ สามารถกดสั่งพิมพ์สิ่งพิมพ์ได้ทันที



รูปที่ 3.13 แผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ที่ผ่านการวิเคราะห์ในโปรแกรม XYZPrint

3.2.3.4 วัดค่าสี $L^*a^*b^*$ ของสีแต่ละช่อง ในแผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ด้วยเครื่องวัดสี Spectrodensitometer ยี่ห้อ GretagMacBeth รุ่น Spectrolino ภายใต้สภาวะ $D65/2^\circ$ (illuminant/observer) บันทึกผล

3.2.3.5 คำนวณค่าสี $L^*a^*b^*$ จากค่า RGB ของแผ่นตัวอย่างสีต้นฉบับ (sRGB) ดังแสดงในภาคผนวก ง.

3.2.3.6 นำค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้ของสิ่งพิมพ์และสีต้นฉบับ 79 สี รวมกับสีของสิ่งพิมพ์และต้นฉบับ 46 สี จากแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่มีความหนา 4 มม. รวมทั้งสิ้น 125 สี มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบการกระจายตัวของค่าสีระหว่างสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับทั้ง 125 สี

3.2.3.7 คำนวณค่า C^*_{ab} ของสิ่งพิมพ์และต้นฉบับ แล้วสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า L^* และ C^*_{ab} เพื่อสังเกตการกระจายตัวของความอิ่มตัวของสี (Chroma) ดังแสดงในภาคผนวก จ.

บทที่ 4

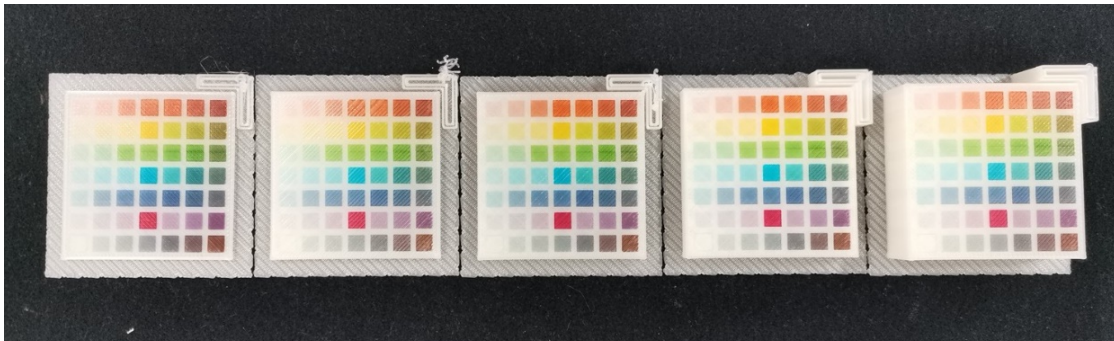
ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 ผลของรูปแบบการพิมพ์ที่ต่างกัน

จากการเปรียบเทียบค่าสีของรูปแบบการพิมพ์ระหว่างแบบ Texture กับแบบ Surface จากตารางที่ ก.1 และ ก.2 ในภาคผนวก ก. เมื่อสังเกตด้วยตา เห็นได้ว่าสิ่งพิมพ์ที่ได้จากการพิมพ์รูปแบบ Surface มีสีที่ใกล้เคียงกับสีของต้นฉบับมากกว่ารูปแบบ Texture และจากการเปรียบเทียบค่าสีต้นฉบับกับการพิมพ์รูปแบบ Texture ค่า ΔL^* มีค่าตั้งแต่ 5.60 – 58.31 ค่า Δa^* มีค่าตั้งแต่ 0.32 – 54.00 ค่า Δb^* มีค่าตั้งแต่ 0.3 – 66.09 ค่า ΔE^*_{ab} มีค่าตั้งแต่ 14.50 – 88.54 เมื่อเปรียบเทียบค่าสีต้นฉบับกับการพิมพ์รูปแบบ Surface ค่า ΔL^* มีค่าตั้งแต่ 3.79 – 58.08 ค่า Δa^* มีค่าตั้งแต่ 0.28 – 57.71 ค่า Δb^* มีค่าตั้งแต่ 5.60 – 58.31 ค่า ΔE^*_{ab} มีค่าตั้งแต่ 12.77 – 90.84 โดยค่า ΔE^*_{ab} ของรูปแบบ Texture มีค่ามากกว่าค่า ΔE^*_{ab} ของรูปแบบ Surface อยู่ 27 ค่า จากทั้งหมด 36 ค่า หมายความว่า รูปแบบ Surface มีค่าความแตกต่างสี เมื่อเปรียบเทียบกับต้นฉบับน้อยกว่ารูปแบบ Texture นอกจากนี้การพิมพ์ทั้ง 2 รูปแบบ ใช้ระยะเวลาในการพิมพ์ที่ความหนาเดียวกันต่างกันอยู่มาก โดยที่ความหนา 5 มม. รูปแบบ Texture ใช้ระยะเวลาในการพิมพ์ประมาณ 5 ชม. ส่วนรูปแบบ Surface ใช้ระยะเวลาในการพิมพ์ประมาณ 2 ชม. เห็นได้ว่าการพิมพ์รูปแบบ Surface ประหยัดเวลาในการพิมพ์มากกว่ารูปแบบ Texture และการพิมพ์รูปแบบ Surface มีการใช้ปริมาณหมึกพิมพ์น้อยกว่ารูปแบบ Texture เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะการพิมพ์รูปแบบ Texture เป็นการพิมพ์สีบนพื้นผิวของสิ่งพิมพ์ทั้งหมด 5 ด้าน คือ ด้านข้าง 4 ด้าน และด้านบน 1 ด้าน แต่การพิมพ์รูปแบบ Surface เป็นการพิมพ์เฉพาะพื้นผิวด้านบนของสิ่งพิมพ์เพียงด้านเดียว ทำให้ใช้ปริมาณหมึกพิมพ์น้อยกว่ารูปแบบ Texture ส่งผลให้รูปแบบ Surface เป็นรูปแบบที่ประหยัดหมึกพิมพ์มากกว่า สามารถทำการทดลองในตอนที่ 2 และตอนที่ 3 ได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนตลับหมึกระหว่างการพิมพ์ ดังนั้นรูปแบบ Surface จึงเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการพิมพ์แผ่นตัวอย่างสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ใช้ในการทดลอง เพราะค่าสีที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับไฟล์สีต้นฉบับ (sRGB) ใช้ระยะเวลาในการพิมพ์น้อย และมีการใช้ปริมาณหมึกพิมพ์น้อยกว่ารูปแบบ Texture

4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาของสิ่งพิมพ์ต่อสีที่พิมพ์ได้

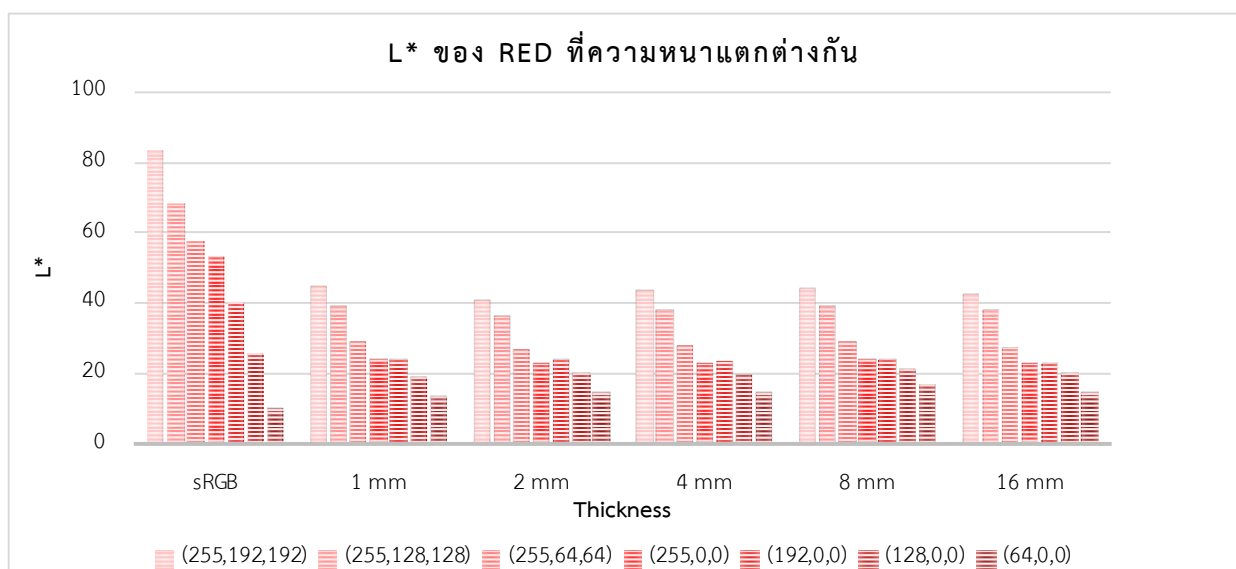
การทดลองนี้ได้สร้างแผ่นตัวอย่างสี และพิมพ์สิ่งพิมพ์ขนาด 50 มม. x 50 มม. ที่มีช่องสี่เหลี่ยมจำนวน 49 ช่อง แต่ละช่องมีสีต่างกันดังรูปที่ 4.1 จำนวน 5 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีความหนาแตกต่างกัน กำหนดให้ความหนาของสิ่งพิมพ์เป็น 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม. ตามลำดับ การเพิ่มขึ้นของความหนาเป็นจำนวนเท่าจะสามารถสังเกตแนวโน้มของผลการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่าการเพิ่มความหนาแบบคงที่ และสามารถลดจำนวนครั้งในการพิมพ์ในการทดสอบผลของความหนาต่อสีที่พิมพ์ได้



รูปที่ 4.1 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่ความหนา 1 มม., 2 มม., 4 มม., 8 มม. และ 16 มม. ตามลำดับ

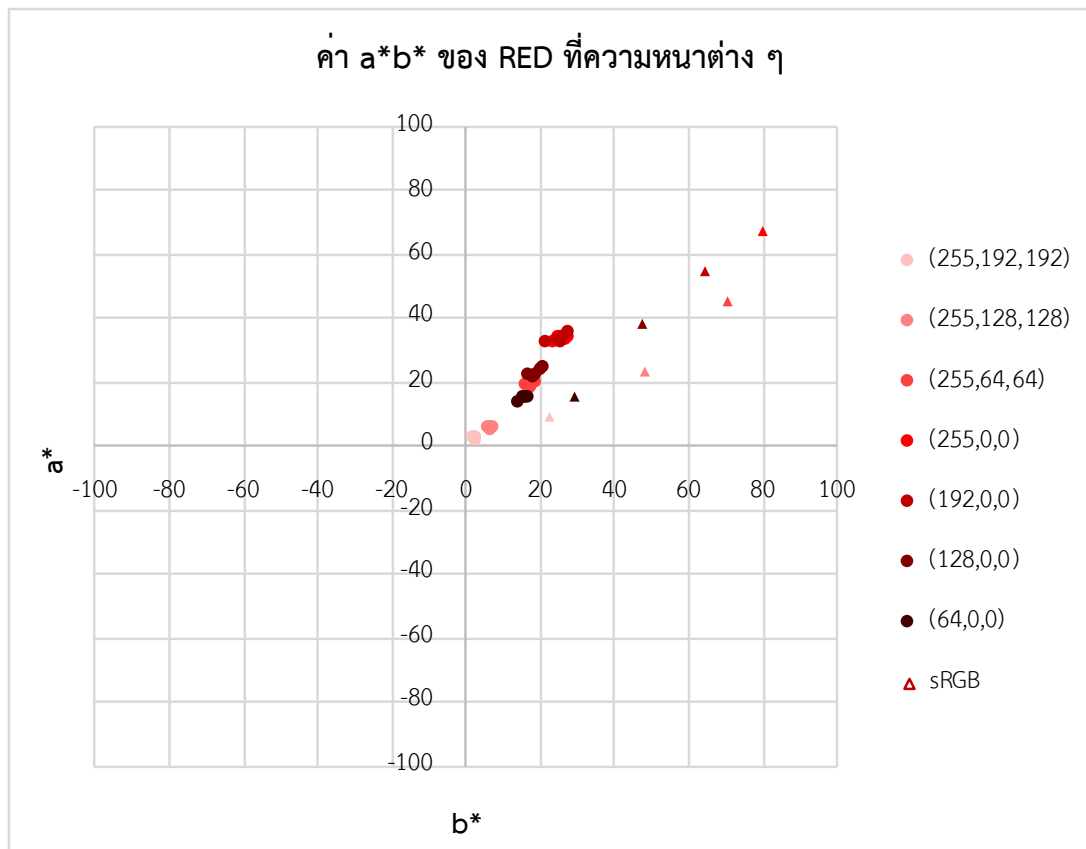
จากการวัดค่า L^* a^* b^* ของสีแต่ละช่องที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงแนวโน้มค่า L^* a^* b^* ของสีแดง (Red), เหลือง (Yellow), เขียว (Green), ไซแอน (Cyan), น้ำเงิน (Blue), มาเจนต้า (Magenta), และเทา (Grey) ผลค่าสีที่วัดได้ทั้งหมด แสดงในภาคผนวก ข.

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีแดง 7 ระดับ จากระดับสีแดงที่สว่างที่สุดจนถึงสีแดงที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับ เท่ากับ (255,192,192), (255,128,128), (255,64,64), (255,0,0), (192,0,0), (128,0,0) และ (64,0,0) ตามลำดับ พบว่า ค่า L^* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่พิมพ์ที่ความหนาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับสีมีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน และจะเห็นการลดหลั่นระดับของความสว่างเป็นลำดับสอดคล้องกับระดับความสว่างของสีต้นฉบับ โดยค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนา มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับเกือบทุกระดับ ยกเว้นสีแดงระดับที่คล้ำที่สุด (64,0,0) เนื่องจากหมึกพิมพ์ในการทดลองนี้มีเพียง 3 สี คือ สีไซแอน, มาเจนต้า และเหลือง แต่ไม่มีสีดำ การพิมพ์สีของหมึกพิมพ์ไม่ใช่การผสมสีแบบอุดมคติ ทำให้หมึกพิมพ์ไม่สามารถผลิตสีที่มีความคล้ำหรือสีดำในอุดมคติได้ ส่งผลให้ค่า L^* ที่วัดได้ของสีแดงที่ระดับคล้ำที่สุด มีค่าสูงกว่าต้นฉบับ



รูปที่ 4.2 กราฟค่า L^* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

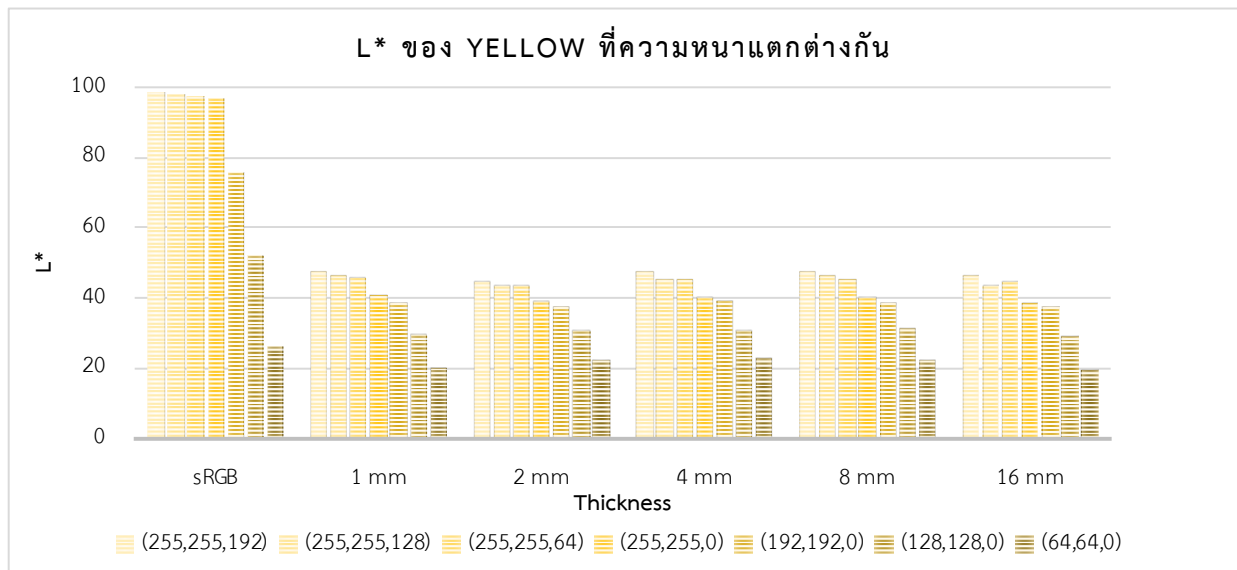
จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีแดงระดับต่าง ๆ พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน โดยมีระดับความอิมตัวของสีเรียงกันเป็นลำดับจากต่ำสุด (255,192,192) ไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 (255,0,0) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งสอดคล้องกับสีต้นฉบับ จากผลการวัดค่าสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ พบว่าค่าสีแดงที่ระดับที่ 4 และ 5 มีความใกล้เคียงกันมาก เมื่อเปรียบเทียบสีแดงระดับที่ 4 และ 5 ของทุกความหนา ค่า ΔL^* มีค่าตั้งแต่ 0 - 0.91 ค่า Δa^* มีค่าตั้งแต่ 1.13 - 2.24 ค่า Δb^* มีค่าตั้งแต่ 0.01 - 1.20 ค่า ΔE^*_{ab} มีค่าตั้งแต่ 1.48 - 2.54 ซึ่งค่าที่ได้ไม่สอดคล้องกับความแตกต่างของต้นฉบับ



รูปที่ 4.3 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

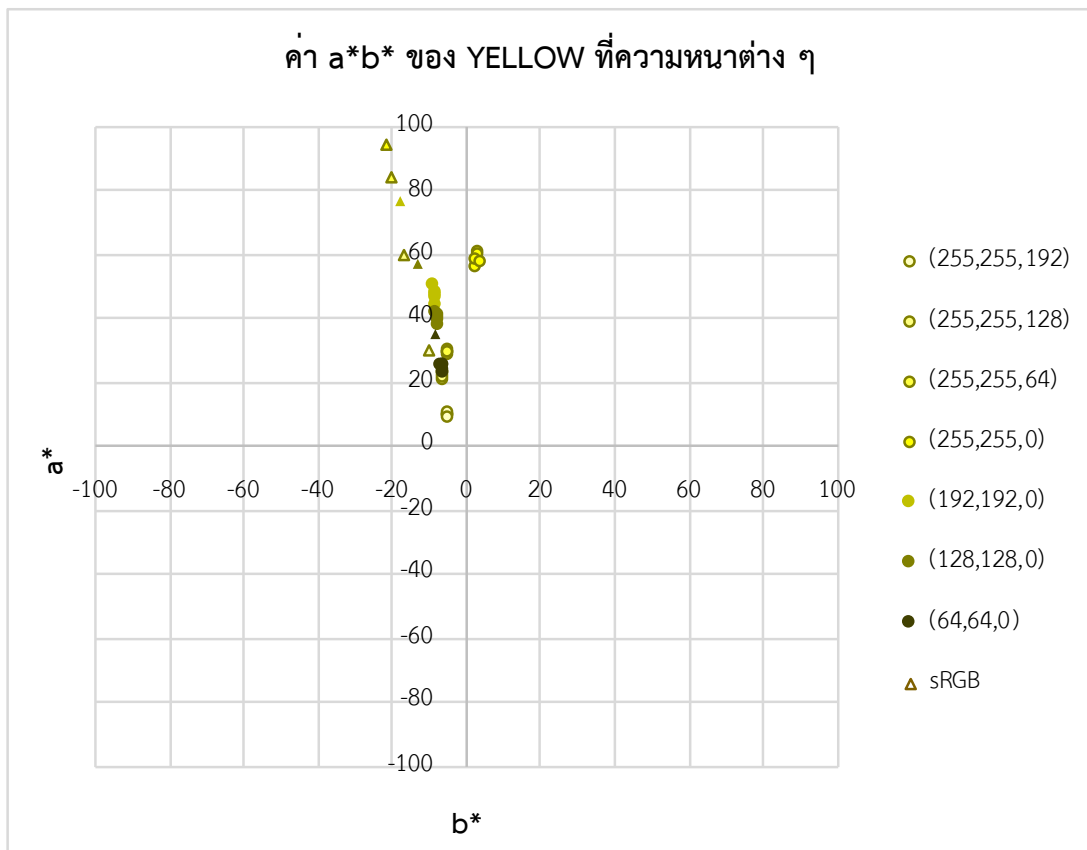
ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีเหลือง 7 ระดับ จากระดับสีเหลืองที่สว่างที่สุดไปจนถึงสีเหลืองที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับเท่ากับ (255,255,192), (255,255,128), (255,255,64), (255,255,0), (192,192,0), (128,128,0) และ (64,64,0) ตามลำดับ พบว่า ค่า L^* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่พิมพ์ที่ความหนาต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อพิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แต่ละระดับมีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน โดยเรียงระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ โดยค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนามีค่าต่ำกว่าต้นฉบับทุกระดับ และค่า L^* ของระดับที่ 1 (255,255,192) ถึง 3 (255,255,64) ของทุกความหนามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากสีเหลืองเป็น

สีที่อ่อนที่สุด จึงทำให้การลดทอนน้ำหนักสีของสีเหลืองมีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปสิ่งพิมพ์ 3 มิติ เป็นวัสดุโปร่งแสง แสงจึงส่องผ่านสีเหลืองไปถึงพื้นหลังได้มากกว่าสีอื่น สีที่วัดได้จึงเป็นผลของสีพื้นหลังมากกว่า ค่า L^* ที่วัดได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน



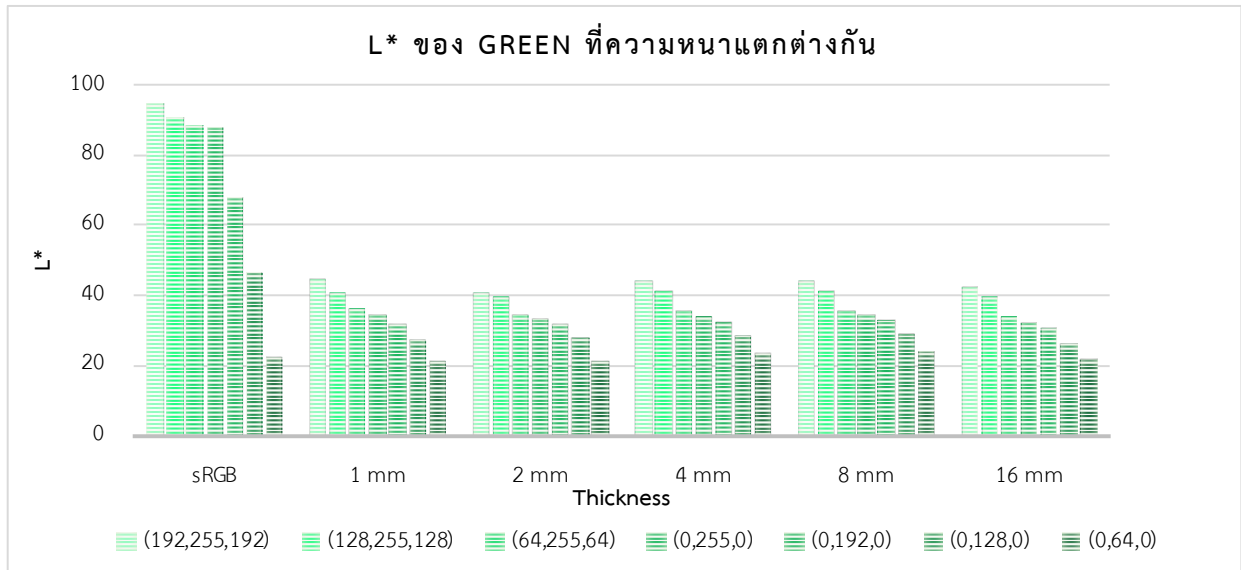
รูปที่ 4.4 กราฟค่า L^* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แต่ละระดับมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน โดยมีการเรียงระดับความอิ่มตัวของสีจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 (255,255,0) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งสอดคล้องกับสีต้นฉบับ โดยสีเหลืองที่ระดับที่ 4 มีสีสัน (hue) แตกต่างจากแนวโน้มของสีเหลืองที่ระดับอื่น ๆ อย่างชัดเจน



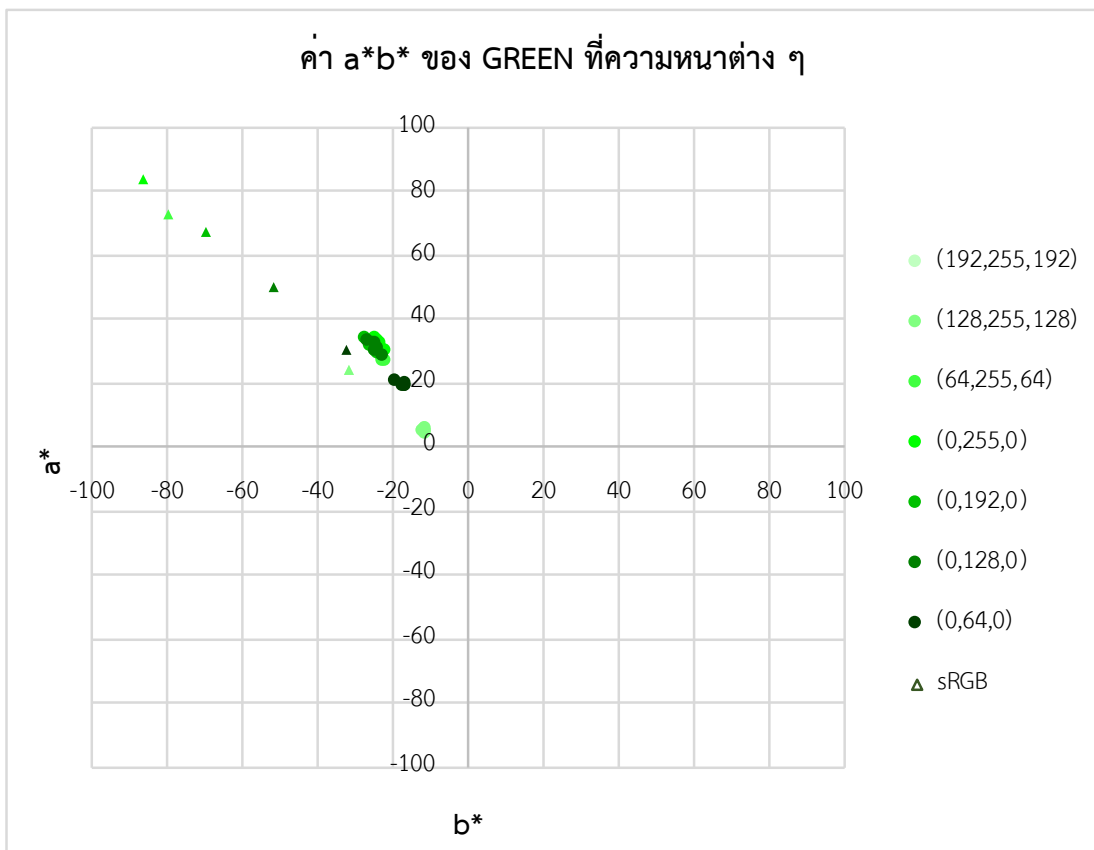
รูปที่ 4.5 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีเขี้ยว 7 ระดับ จากระดับสีเขี้ยวที่สว่างที่สุดไปจนถึงสีเขี้ยวที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับเท่ากับ (192,255,192), (128,255,128), (64,255,64), (0,255,0), (0,192,0), (0,128,0) และ (0,64,0) ตามลำดับ ผลการวัดค่า L^* ของสีเขี้ยวระดับต่าง ๆ ที่พิมพ์ที่ความหนาต่าง ๆ แสดงรูปที่ 4.6 พบว่า ที่ความหนาแตกต่างกัน ค่า L^* ที่วัดได้ของแต่ละระดับสีมีค่าไม่แตกต่างกัน และมีการเรียงระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ ค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร, 2 มิลลิเมตร และ 16 มิลลิเมตร มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับทุกระดับ แต่ค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร และ 8 มิลลิเมตร มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับเกือบทุกระดับ ยกเว้นสีเขี้ยวระดับที่คล้ำที่สุด (0,64,0)



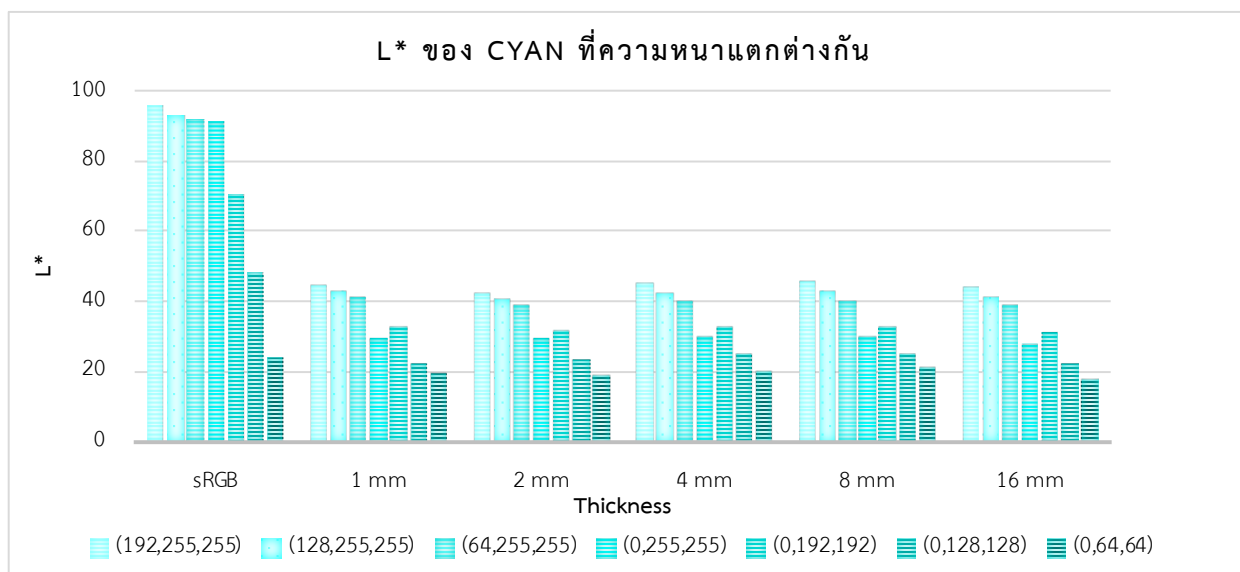
รูปที่ 4.6 กราฟค่า L* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ที่ความหนาแตกต่างกัน สีเขียวแต่ละระดับมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน และมีการเรียงระดับความอิ่มตัวของสีจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 (0,255,0) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นไปตามสีต้นฉบับ



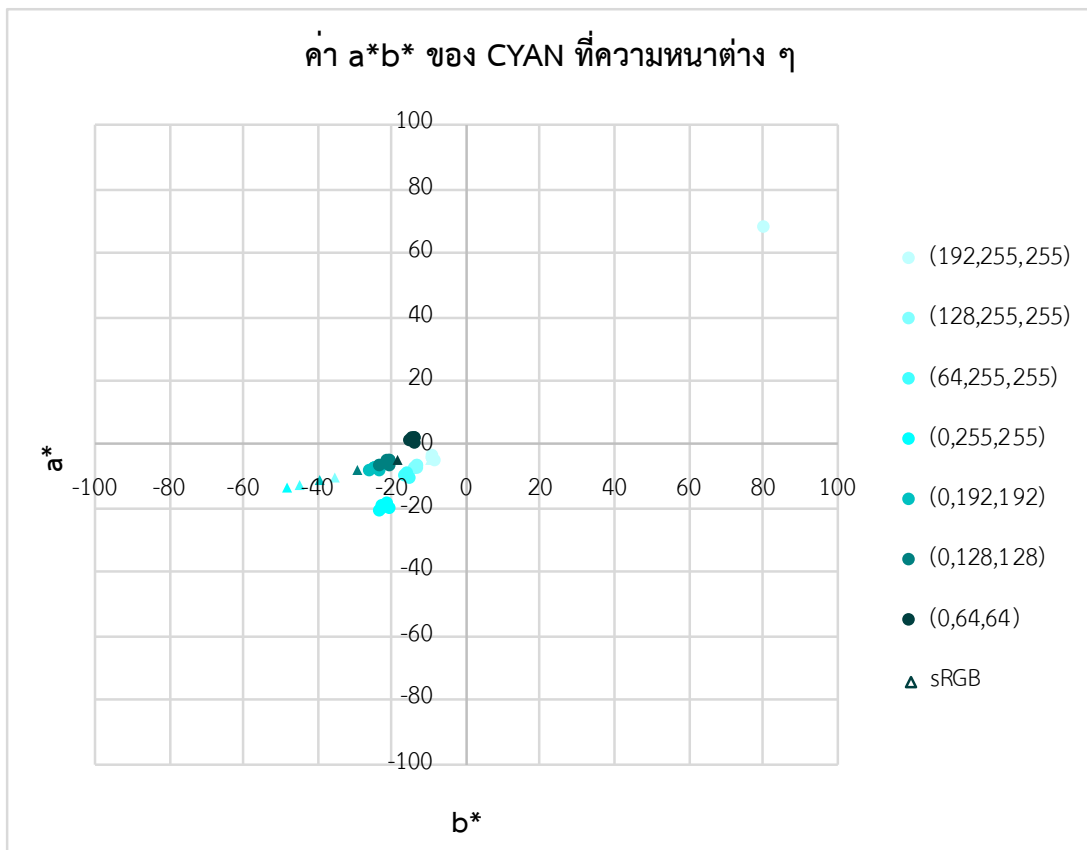
รูปที่ 4.7 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีไซแอน 7 ระดับ จากระดับสีไซแอนที่สว่างที่สุด ไปจนถึงสีไซแอนที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับเท่ากับ (192,255,255), (128,255,255), (64,255,255), (0,255,255), (0,192,192), (0,128,128) และ (0,64,64) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แต่ละระดับสีมีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน และเรียงระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ ค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนา มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับทุกระดับ แต่ค่า L^* ของสีไซแอนระดับที่ 4 (0,255,255) มีค่าน้อยกว่าระดับที่ 5 (0,192,192) เนื่องจากสีไซแอนเป็น 1 ในแม่สีของหมึกพิมพ์ การพิมพ์สีไซแอนในระดับที่ 4 ควรเป็นการพิมพ์สีไซแอนเพียงสีเดียว เพิ่มระดับการปล่อยหมึกจากน้อยไปมาก ส่วนสีไซแอนในระดับที่ 5 เริ่มมีการผสมหมึกสีอื่น ๆ เพื่อให้ได้ระดับสีที่คล้ำขึ้น ดังนั้นค่า L^* ที่วัดได้ของสีไซแอนที่ระดับที่ 4 มีค่าน้อยกว่าระดับที่ 5 ไม่เป็นไปตามต้นฉบับ อาจเกิดจากการคำนวณสัดส่วนการปล่อยหมึกพิมพ์ ส่งผลให้มีปัญหาการพิมพ์ไล่ระดับสีไม่คงที่



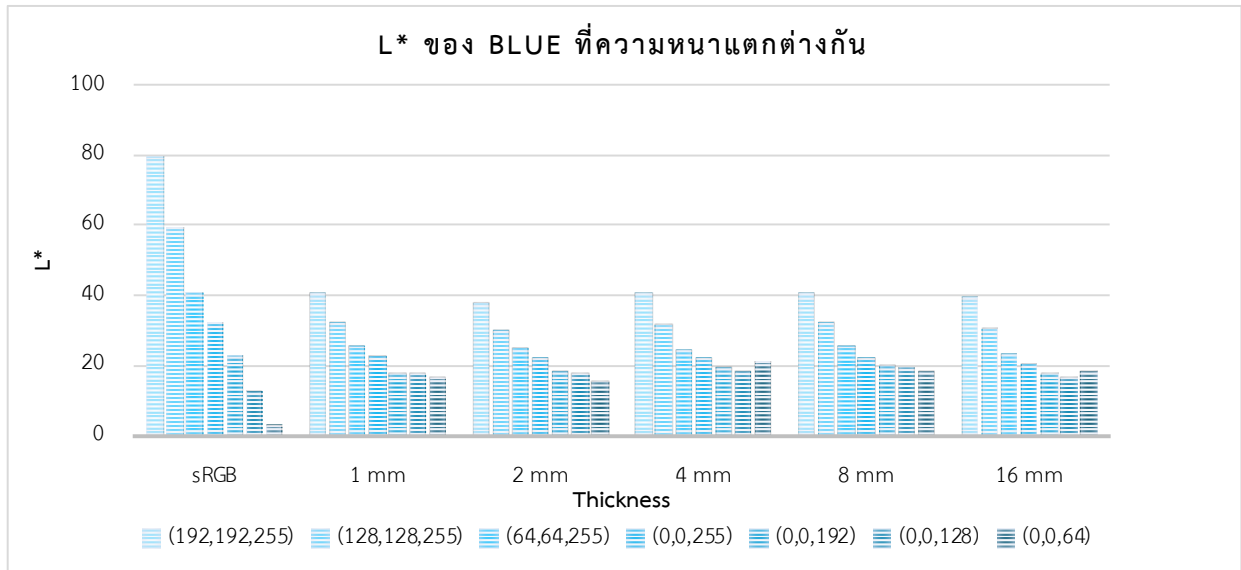
รูปที่ 4.8 กราฟค่า L^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน โดยมีการเรียงระดับความอิ่มตัวของสีจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 (0,255,255) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งสอดคล้องกับสีต้นฉบับ โดยสีไซแอนที่ระดับที่ 4 มีสีสัน (hue) ต่างจากแนวโน้มของสีเหลืองที่ระดับอื่น ๆ อย่างชัดเจน



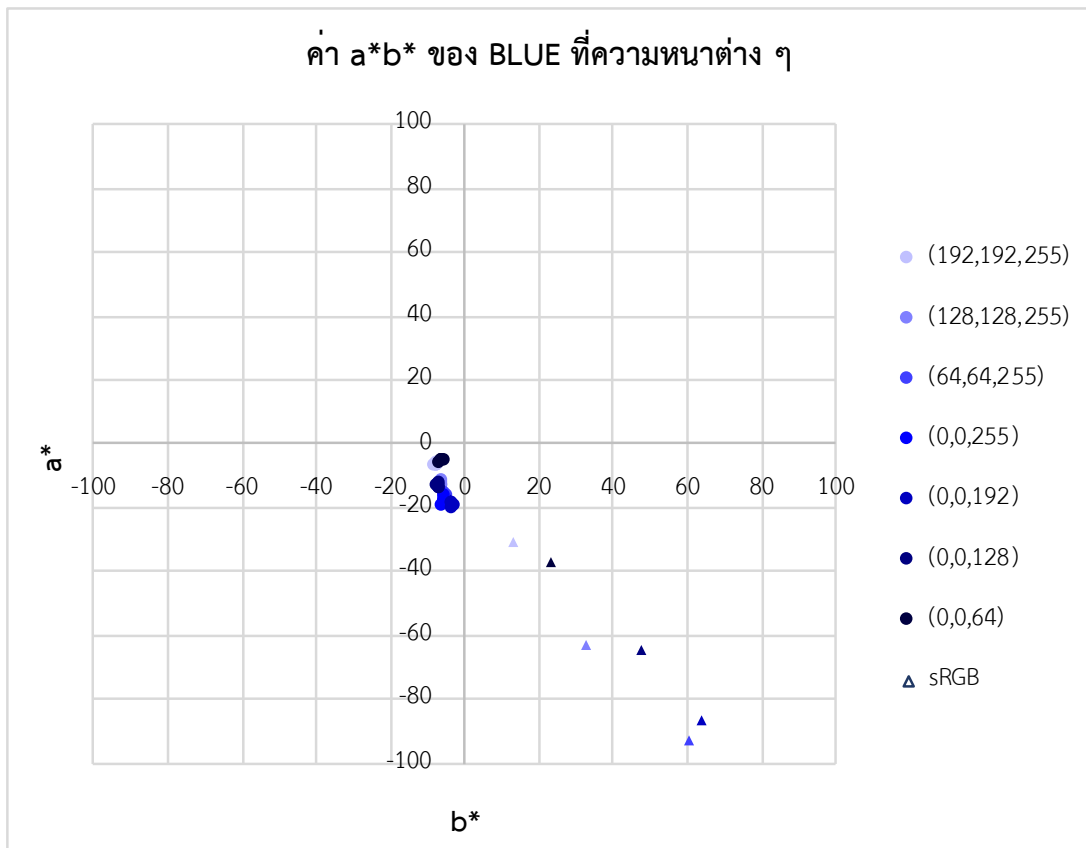
รูปที่ 4.9 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีน้ำเงิน 7 ระดับ จากระดับสีน้ำเงินที่สว่างที่สุด ไปจนถึงสีน้ำเงินที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับเท่ากับ (192,192,255), (128,128,255), (64,64,255), (0,0,255), (0,0,192), (0,0,128) และ (0,0,64) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับสีมีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน และมีการเรียงระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ ค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนา มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับเกือบทุกระดับ ยกเว้นสีน้ำเงิน 2 ระดับที่คล้ำที่สุด คือ (0,0,128) และ (0,0,64) เหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะหมึกพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีเพียง 3 สี คือ สีไซแอน, มาเจนต้า และเหลือง แต่ไม่มีสีดำ การพิมพ์สีของหมึกพิมพ์ไม่ใช้การผสมสีแบบอุดมคติ ทำให้หมึกพิมพ์ไม่สามารถผลิตสีที่มีความคล้ำหรือสีดำในอุดมคติได้ ส่งผลให้ค่า L^* ที่วัดได้ของสีน้ำเงินที่ระดับคล้ำที่สุด 2 ระดับ มีค่าสูงกว่าต้นฉบับ



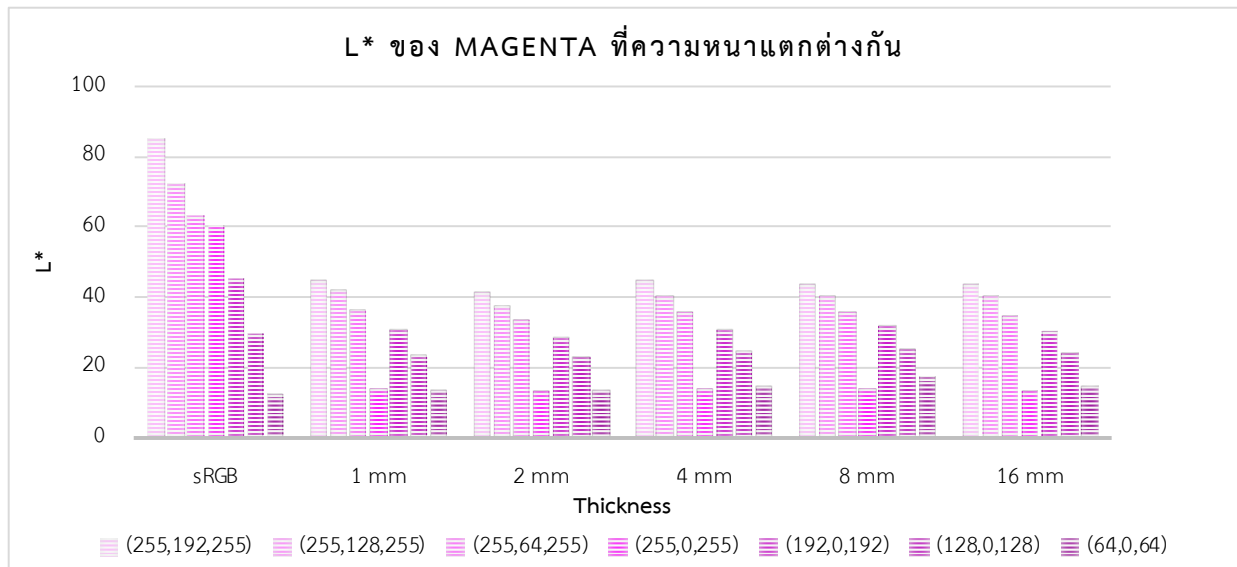
รูปที่ 4.10 กราฟค่า L* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน และมีการเรียงระดับความอิ่มตัวสีจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 5 (0,0,192) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งไม่เป็นไปตามสีต้นฉบับ



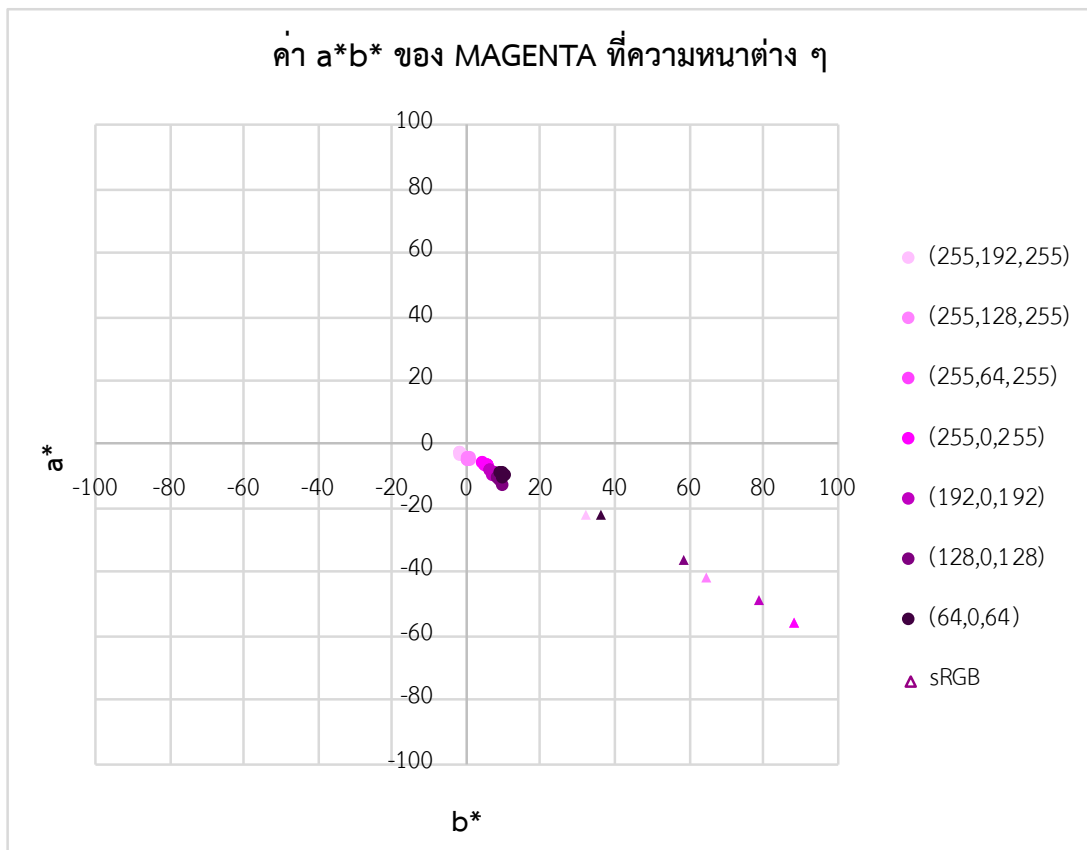
รูปที่ 4.11 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีมาเจนต้า 7 ระดับ จากระดับสีมาเจนต้าที่สว่างที่สุด ไปจนถึงสีมาเจนต้าที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับเท่ากับ (255,192,255), (255,128,255), (255,64,255), (255,0,255), (192,0,192), (128,0,128) และ (64,0,64) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แต่ระดับสีมีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน และเรียงระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ ค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนา มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับเกือบทุกระดับ ยกเว้นสีมาเจนต้าระดับที่คล้ำที่สุด (64,0,64) และที่ระดับที่ 4 (255,0,255) ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนา มีค่า L^* ต่ำที่สุด จากการสังเกตสีมาเจนต้าที่ระดับสีต่าง ๆ พบว่า สีมาเจนต้าที่ระดับที่ 4 (255,0,255) มีสีเข้มที่สุด อาจเกิดจากการผสมสีของหมึกที่ไม่ได้เกิดจากการพิมพ์หมึกสีมาเจนต้าเพียงสีเดียว อาจเป็นเพราะมีการผสมสัดส่วนของหมึกสีอื่น ๆ กับสีมาเจนต้าน้อยกว่าระดับอื่น จึงทำให้สีมาเจนต้าที่พิมพ์ได้มีความเข้มกว่าสีระดับอื่น ส่งผลให้มีปัญหาการพิมพ์ไล่ระดับสีไม่คงที่ และหมึกพิมพ์ที่ใช้นี้มีเพียง 3 สี คือ สีไซแอน, มาเจนต้า และเหลือง แต่ไม่มีสีดำ ทำให้หมึกพิมพ์ไม่สามารถผลิตสีที่มีความคล้ำหรือสีดำในอุดมคติได้ ส่งผลให้ค่า L^* ที่วัดได้ของสีมาเจนต้าที่ระดับคล้ำที่สุด มีค่าสูงกว่าต้นฉบับ



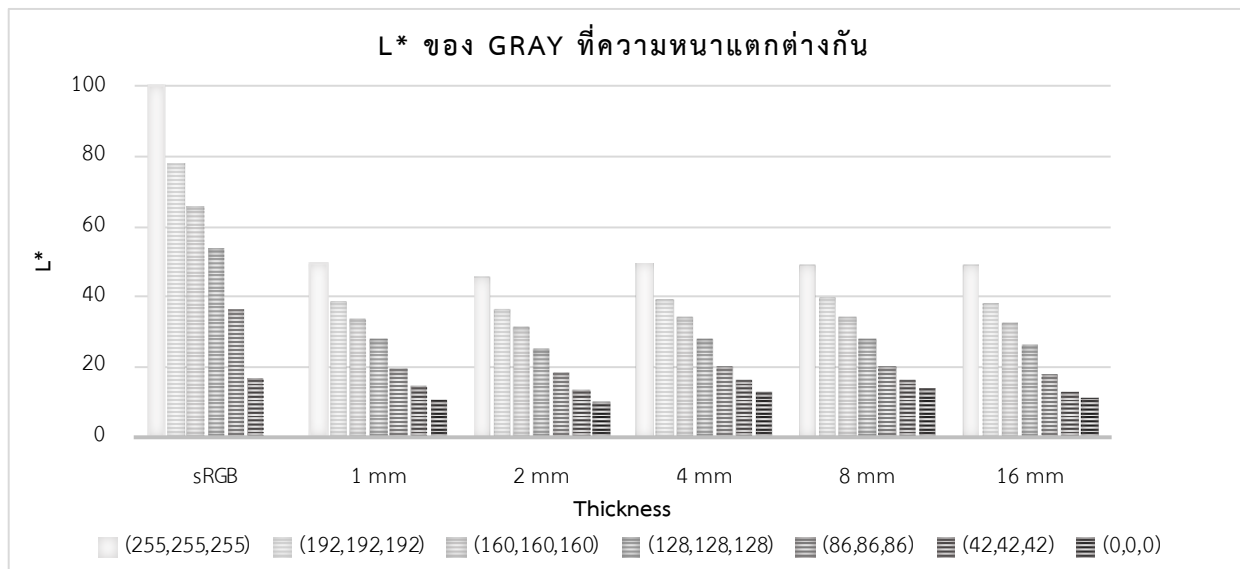
รูปที่ 4.12 กราฟค่า L^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ระดับสีมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน และมีการเรียงระดับความเข้มตัวของสีจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 (255,0,255) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นไปตามสีต้นฉบับ



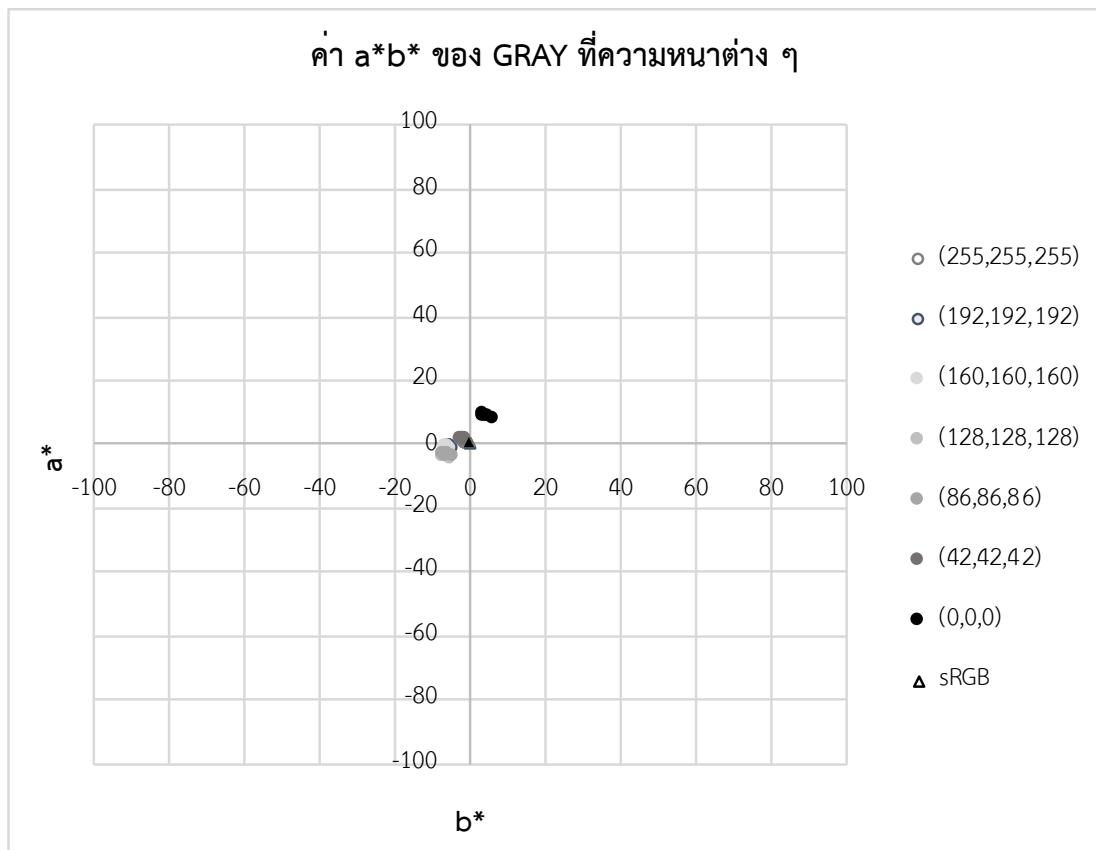
รูปที่ 4.13 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีเทา 7 ระดับ จากระดับสีเทาที่สว่างที่สุด ไปจนถึงสีเทาที่คล้ำที่สุด มีค่าสี RGB ต้นฉบับเท่ากับ (255,255,255), (192,192,192), (160,160,160), (128,128,128), (86,86,86), (42,42,42) และ (0,0,0) ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับสี มีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน และเรียงระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ ค่า L^* ของสิ่งพิมพ์ทุกความหนา มีค่าต่ำกว่าต้นฉบับเกือบทุกระดับ ยกเว้นสีดำ (0,0,0) เนื่องจากหมึกพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีเพียง 3 สี คือ สีไซแอน, สีมาเจนต้า และสีเหลือง แต่ไม่มีสีดำ การพิมพ์สีของหมึกพิมพ์ไม่ใช้การผสมสีแบบอุดมคติ ทำให้การพิมพ์สีเทาเกิดจากการผสมสีระหว่างหมึกพิมพ์ทั้ง 3 สีในระดับต่าง ๆ หมึกพิมพ์จึงไม่สามารถผลิตสีที่มีความคล้ำหรือสีดำในอุดมคติได้ ส่งผลให้ค่า L^* ที่วัดได้ของสีดำมีค่าสูงกว่าต้นฉบับ



รูปที่ 4.14 กราฟค่า L* ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

จากผลการวัดค่า a^*b^* ของสีเทากระดับต่าง ๆ พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับมีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน และมีการเรียงระดับความอิ่มตัวของสีจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 (128,128,128) ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นไปตามลำดับ และจากผลการวัดค่าสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ พบว่าค่าสีเทาที่พิมพ์ได้มีสีที่ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน และเมื่อสังเกตด้วยตา สีเทาที่ระดับที่ 6 และ 7 ติดเฉดสีแดง ส่วนสีเทาที่ระดับอื่น ติดเฉดสีน้ำเงิน เนื่องจากหมึกพิมพ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ไม่มีสีดำ ทำให้หมึกพิมพ์ไม่สามารถผลิตสีดำในอุดมคติได้ ส่งผลให้สีดำ (0,0,0) ของสิ่งพิมพ์ที่ได้ ไม่ใช่สีดำจริง มีการติดเฉดสีต่าง ๆ



รูปที่ 4.15 กราฟค่า a^* และ b^* ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนาแตกต่างกัน

ผลการวัดค่าสีจากต้นฉบับสีต่าง ๆ 7 สีละ 7 ระดับ เรียงระดับจากสีสว่างที่สุดไปจนถึงสีที่คล้ำที่สุด จากรูปที่ 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10, 4.12 และ 4.14 แสดงค่า L^* ของสีแดง, สีเหลือง, สีเขียว, สีไซแอน, สีนํ้าเงิน, สีมาเจนต้า และสีเทาที่ระดับต่าง ๆ ที่พิมพ์ที่ความหนาต่าง ๆ พบว่า เมื่อพิมพ์ที่ความหนาที่แตกต่างกัน แต่ละระดับสีมีค่า L^* ที่วัดได้ไม่แตกต่างกัน โดยที่สีแดง, สีเขียว, สีนํ้าเงิน, สีเหลือง และสีเทา ไล่ระดับตามระดับสีตามความสว่างของสีต้นฉบับ แต่สีไซแอนและสีมาเจนต้ามักลดหลั่นระดับสีที่ต่างออกไป แสดงให้เห็นว่าความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อความสว่างของสีที่เครื่องพิมพ์สามารถพิมพ์ได้ นอกจากนี้ ค่า L^* ของสีต่าง ๆ ที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์มีแนวโน้มที่คล้ายกัน โดยค่า L^* ของระดับสีที่มีสีคล้ำที่สุด มีค่ามากกว่าต้นฉบับ และจากค่า L^* ของสีเขียวที่มีความแตกต่างกันในบางความหนา แสดงให้เห็นว่าเครื่องพิมพ์ไม่สามารถผลิตสีที่มีความคล้ำมาก ๆ ได้คงที่ เนื่องจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติรุ่น da Vinci Color mini ประกอบไปด้วยหมึกพิมพ์เพียง 3 สี คือ สีไซแอน, สีมาเจนต้า และสีเหลือง (CMY) แต่ไม่มีสีดำ (K) จึงมีข้อจำกัดในการพิมพ์สีคล้ำและสีดำ โดยเส้นพลาสติกที่ใช้ขึ้นรูปสิ่งพิมพ์ 3 มิติ เป็นวัสดุโปร่งแสง เมื่อพิมพ์หมึกพิมพ์ลงบนวัสดุแล้ว จึงมีสมบัติความทึบแสงต่ำ ส่งผลให้สีของสิ่งพิมพ์ที่ได้ไม่เข้มเท่ากับต้นฉบับ ทำให้ไม่สามารถพิมพ์สีที่มีความคล้ำมาก ๆ และสีดำ ในอุดมคติได้

จากรูปที่ 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11, 4.13 และ 4.15 แสดงค่า a^*b^* ของสีแดง, สีเหลือง, สีเขียว, สีไซแอน, สีนํ้าเงิน, สีมาเจนต้า และสีเทากระดับต่าง ๆ ที่พิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน เมื่อวัดค่าสีของสิ่งพิมพ์

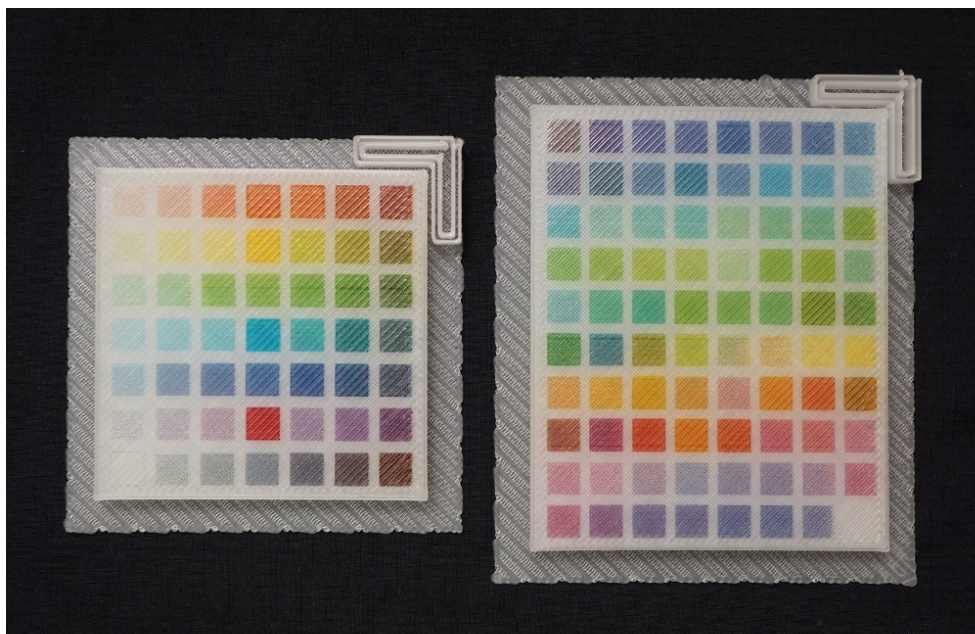
แต่ละระดับทุกความหนา มีค่าสี a^*b^* ที่วัดได้จากงานพิมพ์ไม่แตกต่างกัน โดยมีการเรียงระดับความอึมตัวของสี จากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 4 ก่อนลดลงเรื่อย ๆ ซึ่งเป็นไปตามสีต้นฉบับ ยกเว้นสีน้ำเงินที่มีการเรียงลำดับจากต่ำสุดไปสูงสุดที่ระดับที่ 5 ก่อนลดลงเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นว่าความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อสีสันและความอึมตัวของสีที่เครื่องพิมพ์สามารถพิมพ์ได้ จากการวิเคราะห์ผลของค่า $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์ที่ความหนาแตกต่างกัน และการคำนวณค่า ΔE^*_{ab} ของแต่ละสี เทียบกับสีนั้นที่ความหนาอื่น ๆ พบว่า มีค่าความแตกต่างสีมากที่สุดเท่ากับ 6.66 ในสีแดงระหว่างความหนา 1 มม. กับ 2 มม. และมีค่าความแตกต่างสีน้อยที่สุดเท่ากับ 0.11 ในสีมาเจนต้าระหว่างความหนา 1 มม. กับ 4 มม. โดยค่าความแตกต่างสีของทุกสีส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 1-4 เนื่องจากการทดลองนี้ใช้ร่องหลังสีดำในการวัดสีเพียงอย่างเดียว หากเปลี่ยนสีของวัสดุร่องหลัง อาจทำให้ค่าสีที่วัดได้แตกต่างออกไป จึงสามารถสรุปได้ว่า ความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อการพิมพ์สีของสิ่งพิมพ์

จากการวิเคราะห์ผลค่าสี $L^*a^*b^*$ ของแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง พบว่าความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อการพิมพ์สีสิ่งพิมพ์แต่ละระดับทั้ง 7 สี แต่มีปัญหาการพิมพ์สีไม่สม่ำเสมอของบางสี และยังพบปัญหาความไม่คงที่ของการผสมสีหมึกในการพิมพ์สีเทา อาจเป็นผลมาจากขอบเขตความสามารถในการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์และจำนวนสีของหมึกพิมพ์ โดยเครื่องพิมพ์ 3 มิติรุ่น da Vinci Color mini มีหมึกพิมพ์เพียง 3 สี (CMY) แต่เครื่องพิมพ์ทั่วไปมีหมึกพิมพ์ 4 สี (CMYK) จึงมีการคำนวณการแปลงค่าสีจาก RGB มาเป็น CMY ที่แตกต่างกัน ซึ่งมีผลต่อปริมาณหมึกที่ปล่อยขณะพิมพ์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงสร้างแผ่นตัวอย่างสีเพิ่มให้ครอบคลุมการผสมสีที่สัดส่วนต่าง ๆ รวมทั้งสิ้น 125 สี เพื่อศึกษาแนวโน้มของสีอื่น ๆ เพิ่มเติม

4.3 ความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ด้วยเทคโนโลยีการพิมพ์วัตถุ 3 มิติ ร่วมกับการพิมพ์สีระบบอิงกเจ็ตบนพื้นผิวของวัตถุ

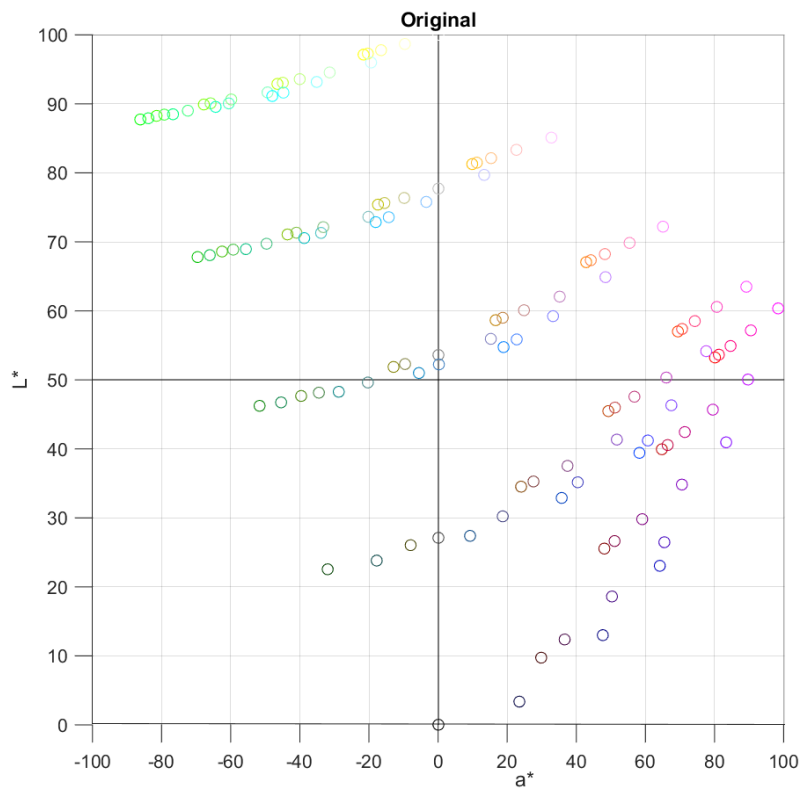
จากการวิเคราะห์ผลค่าสี $L^* a^* b^*$ ของแผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ดังแสดงในข้อ 4.2 พบว่า ความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อการพิมพ์สีสิ่งพิมพ์แต่ละระดับทั้ง 7 สี แต่มีปัญหาการพิมพ์สีระดับสีไม่คงที่ระดับที่ 4 เห็นได้จากค่า L^* ในสีมาเจนต้า ที่มีค่าต่ำที่สุดทุกความหนา สีไซแอน ที่มีค่าต่ำกว่าระดับที่ 5 และสีเหลือง ที่มีความใกล้เคียงกันในระดับที่ 1-3 นอกจากนี้ยังพบปัญหาความไม่คงที่ของการผสมสีหมึกในการพิมพ์สีเทา ด้วยเหตุนี้การทดลองในหัวข้อนี้จึงใช้สีตัวอย่างจำนวน 125 สี จากการแบ่งสี RGB แต่ละสัญญาณสี (0-255) เป็น 5 ส่วน ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาได้พิมพ์ไปแล้ว 49 สี มีสีที่ซ้ำกันใน 125 สี อยู่จำนวน 46 สี จึงต้องสร้างแผ่นตัวอย่างสีที่มีช่องสีเหลี่ยมจำนวน 79 ช่องเพิ่ม เพื่อทำการศึกษาแนวโน้มของสีอื่น ๆ เพิ่มเติม และกำหนดความหนาที่ความหนาเดียว คือ 4 มม. เนื่องจากผลการทดลองที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อการพิมพ์สี หากมีการเปลี่ยนสีของช่องสีและสีของร่องหลังเป็นสีอื่น ที่ความหนา 1 มม. หรือ 2 มม. อาจบางเกินไป ส่งผลให้สีของพื้นหลังมีอิทธิพลต่อค่าที่สีที่วัดได้ ส่วนที่ความหนา 8 มม. หรือ 16 มม. อาจหนาเกินไป ส่งผลให้ใช้ระยะในการเวลาพิมพ์นานและสิ้นเปลืองเส้นพลาสติกจำนวนมาก

แผ่นตัวอย่างในการทดลองนี้มีขนาด 54.5 มม. x 67.5 มม. ที่มีช่องสี่เหลี่ยมจำนวน 79 ช่อง แต่ละช่องมีสีต่างกัันดังรูปที่ 4.16 จำนวน 1 ชั้น กำหนดให้ความหนาของสิ่งพิมพ์เป็น 4 มม.

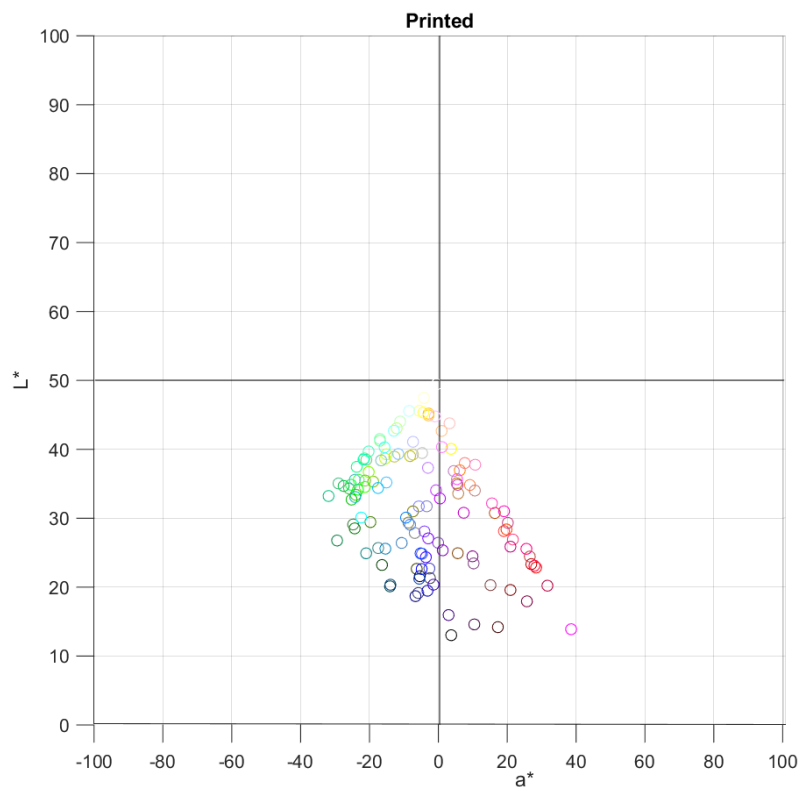


รูปที่ 4.16 แผ่นตัวอย่างสี 49 ช่อง ที่ความหนา 4 มม.(ซ้าย) และแผ่นตัวอย่างสี 79 ช่อง ที่ความหนา 4 มม. (ขวา)

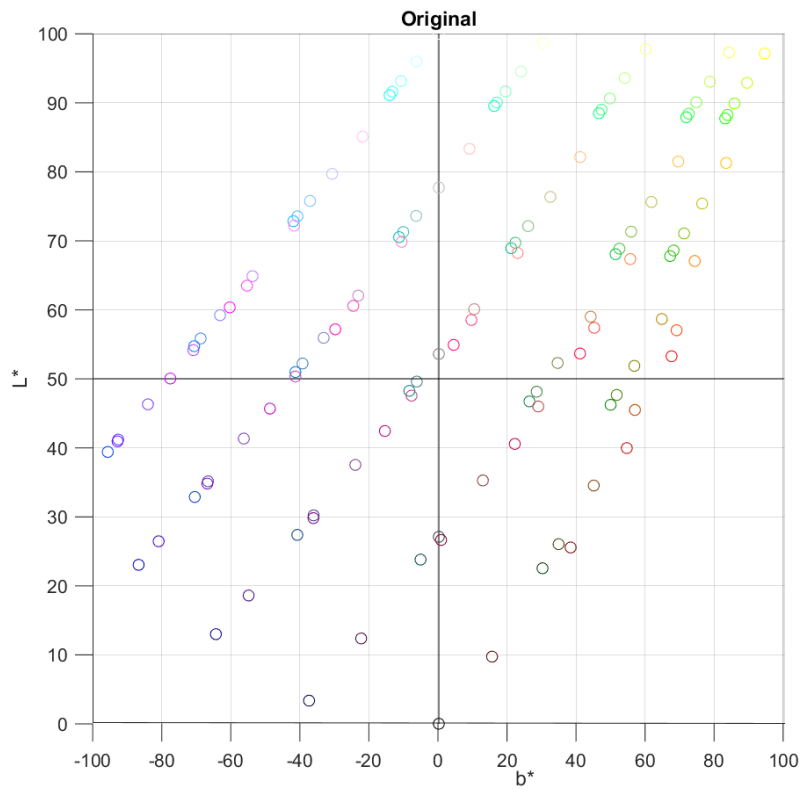
จากการวัดค่าสีต้นฉบับและค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้ของสิ่งพิมพ์จำนวน 124 สี เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการสร้างสีของแผ่นตัวอย่างสี 79 สี มีช่องสีซ้ำกับตัวอย่างสี 49 ช่อง จำนวน 1 ช่อง ส่งผลให้มีข้อมูลที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เหลือเพียง 124 สี โดยสามารถนำค่าสีที่วัดได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ เพื่อสังเกตการกระจายตัวของสีต้นฉบับเทียบกับสีที่เครื่องพิมพ์พิมพ์ได้ ดังรูปที่ 4.17-4.22



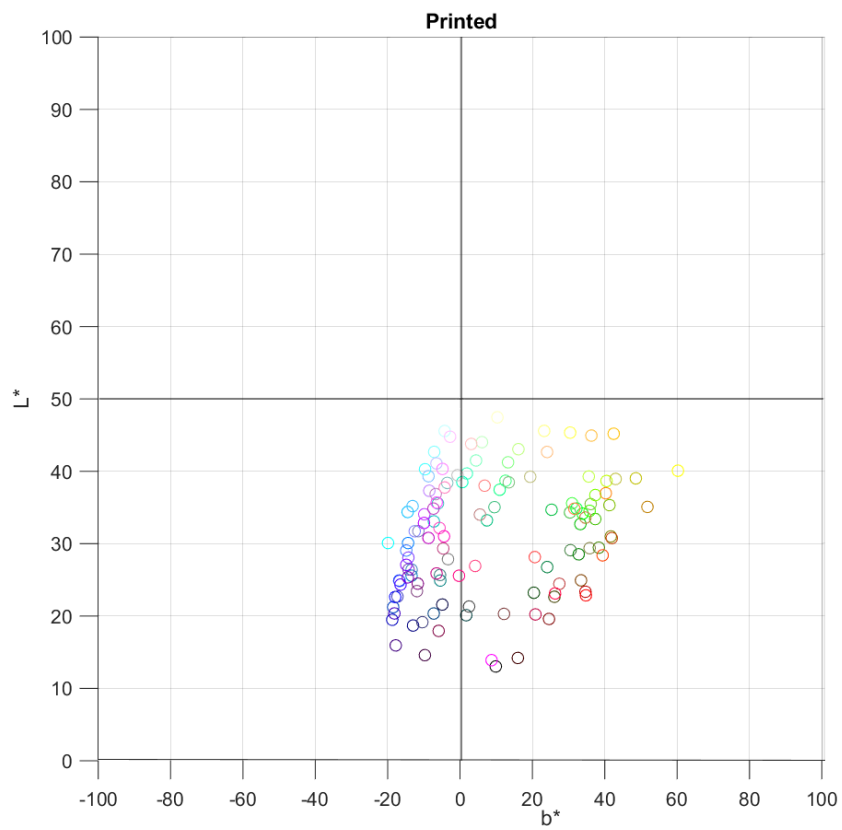
รูปที่ 4.17 กราฟค่า L^* และ a^* ของต้นฉบับ จำนวน 124 สี



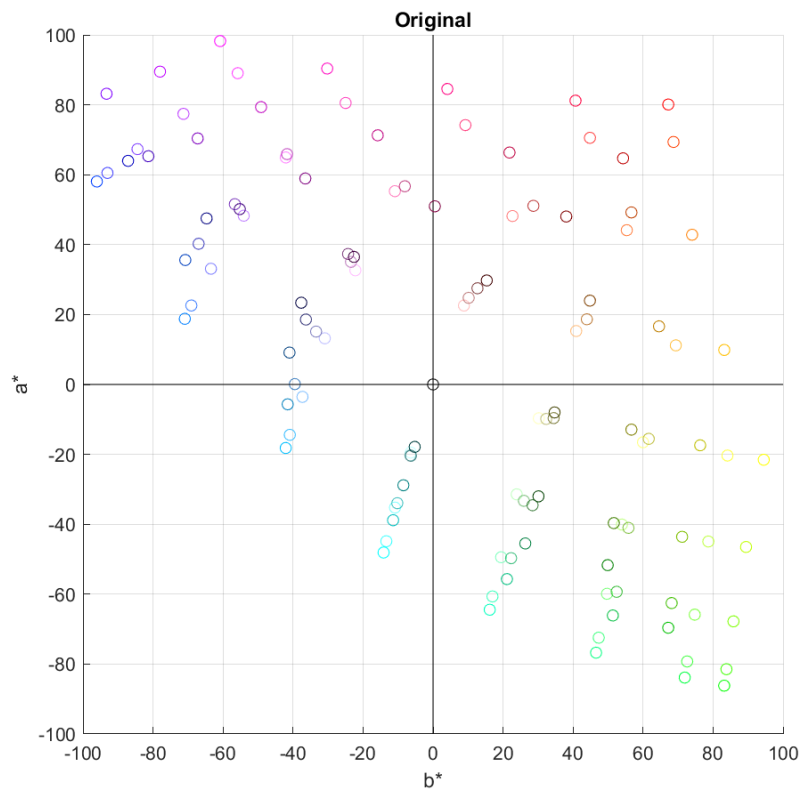
รูปที่ 4.18 กราฟค่า L^* และ a^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนาเดียวกัน จำนวน 124 สี



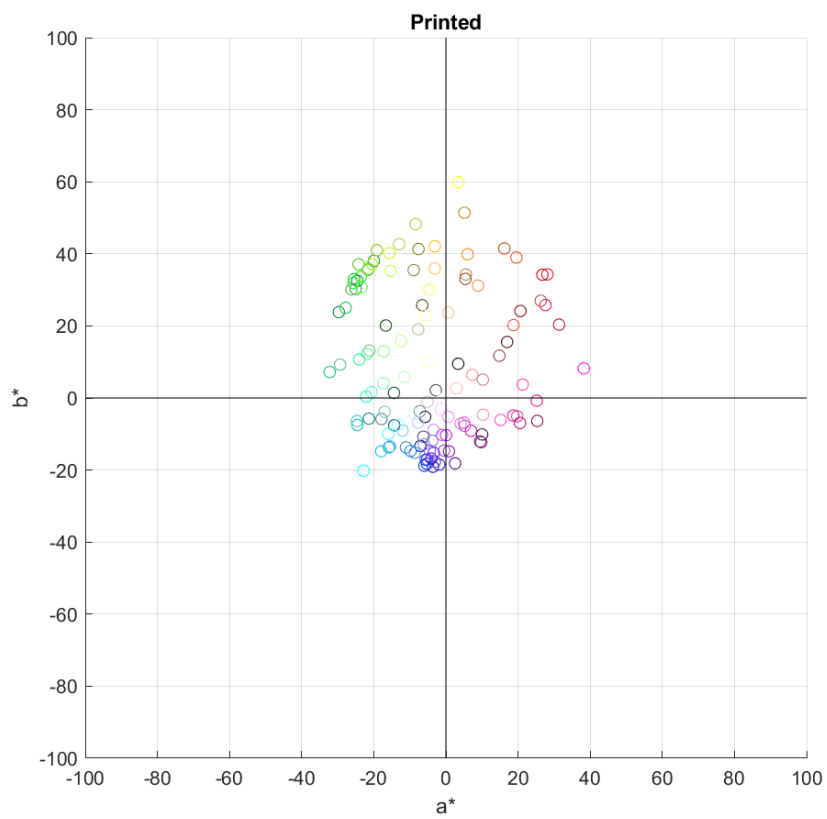
รูปที่ 4.19 กราฟค่า L^* และ b^* ของต้นฉบับ จำนวน 124 สี



รูปที่ 4.20 กราฟค่า L^* และ b^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนาเดียวกัน จำนวน 124 สี

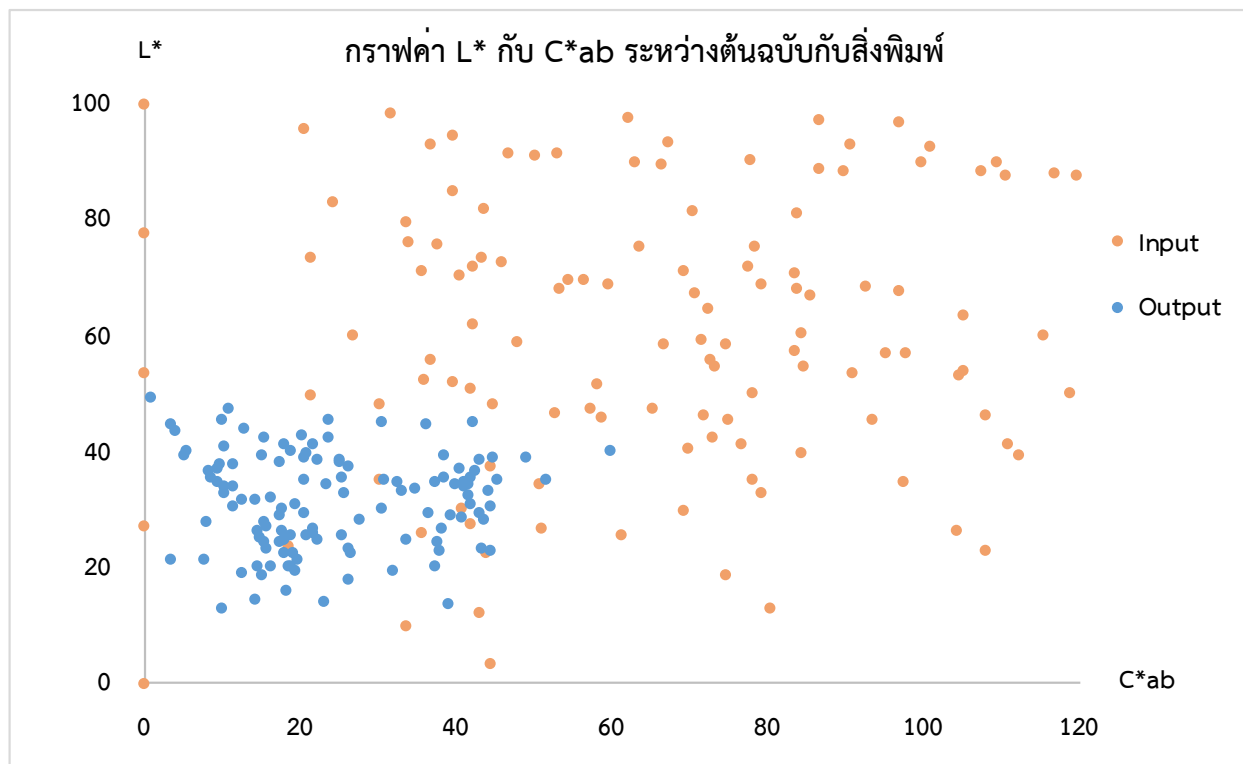


รูปที่ 4.21 กราฟค่า a^* และ b^* ของต้นฉบับ จำนวน 124 สี



รูปที่ 4.22 กราฟค่า a^* และ b^* ของสิ่งพิมพ์ที่ความหนาเดียวกัน จำนวน 124 สี

จากการค่าสีต้นฉบับและค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้ของสิ่งพิมพ์จำนวน 124 สี และคำนวณค่า C^* สามารถนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง L^* กับ C^*_{ab} แสดงการกระจายตัวของค่าสีดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟค่า L^* และ C^* ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ จำนวน 124 สี

จากผลค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์ 79 สี เมื่อนำข้อมูลมารวมกับสิ่งพิมพ์ 46 สี ในตอนที่ 4.2 รวมทั้งสิ้นเป็น 125 สี แต่เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการออกแบบ ทำให้มีข้อมูลซ้ำอยู่ 1 ข้อมูล จึงมีข้อมูลที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ 124 สี จากรูปที่ 4.18, 4.20 และ 4.22 แสดงการกระจายตัวของค่าสีที่พิมพ์ได้ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และรูปที่ 4.17, 4.19 และ 4.21 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของค่า $L^*a^*b^*$ จากค่าสี RGB ต้นฉบับที่แสดงออกบนหน้าจอ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.21 กับ 4.22 ซึ่งแสดงค่า a^* และ b^* ของต้นฉบับและสิ่งพิมพ์ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสีสันและความอิ่มสีของสิ่งพิมพ์มีขอบเขตที่เล็กกว่าต้นฉบับและสังเกตการกระจายตัวของค่าความอิ่มตัวสี จากรูปที่ 4.23 ที่แสดงให้เห็นว่าขอบเขตสีที่ผลิตได้จากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีขอบเขตที่เล็กกว่า และมีการเกาะกลุ่มกันมากกว่าการกระจายตัวของค่าสีต้นฉบับ อาจเป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ ขอบเขตสีที่หมึกพิมพ์ยี่ห้อนี้สามารถผลิตได้และสูตรคำนวณสัดส่วนการผสมหมึกของเครื่องพิมพ์ โดยปัจจัยแรกถูกจำกัดจากการที่เครื่องพิมพ์อาศัยการผลิตสีของหมึกพิมพ์จำนวน 3 สีคือ สีไซแอน, สีมาเจนต้า และสีเหลือง ส่งผลให้หมึกพิมพ์มีขอบเขตความสามารถในการผลิตสีต่ำกว่าระบบพิมพ์ทั่วไปที่ใช้หมึกพิมพ์แม่สีจำนวน 4 สี สังเกตได้จากตอนที่ 4.2 การลดหลั่นลำดับสีที่พิมพ์ได้ไม่คงที่ เช่น สีแดง, สีเขียว และสีน้ำเงิน ที่ระดับสีที่ 4-6 มีความใกล้เคียงกันมาก เมื่อเทียบกับค่า $L^*a^*b^*$ ของค่า RGB ต้นฉบับที่มีการลดหลั่นแต่ละระดับอย่างคงที่ นอกจากนี้ในสีไซแอน, สีมาเจนต้า และสีเหลืองที่พิมพ์ได้มีค่าสี RGB คือ (0,255,255),

(255,0,255) และ (255,255,0) ตามลำดับ มีค่าที่แตกต่างอย่างชัดเจนนั้นกับสีระดับอื่น ๆ มีผลมาจากค่าสี RGB ของช่องสัญญาณสี มีค่าเท่ากับ 255 ซึ่งเป็นค่ามากที่สุดที่สามารถแสดงสีออกมาได้ โดยค่าสี RGB เหล่านี้มักใช้ในการพิมพ์ตรวจสอบการผลิตสีของเครื่องพิมพ์ ทำให้หมึกพิมพ์มีการผลิตสีได้ชัดเจนมากที่สุด ปัจจัยที่สอง คือ สูตรคำนวณสัดส่วนการผสมหมึกของเครื่องพิมพ์ เนื่องจากในการพิมพ์สีของเครื่องพิมพ์ ประกอบไปด้วยหมึกพิมพ์เพียง 3 สี (CMY) ส่งผลให้การผลิตสีที่นอกเหนือจาก 3 สีนี้ เกิดจากการผสมหมึกสีต่าง ๆ ในสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน ซึ่งการคำนวณเหล่านี้เกิดขึ้นจากสูตรคำนวณที่บริษัทผลิตเครื่องพิมพ์นั้น ๆ ออกแบบมา จากตอนที่ 4.2 พบปัญหาในการพิมพ์สีที่คล้ำมาก ๆ และสีดำในอุดมคติไม่ได้ เพราะไม่มีหมึกพิมพ์สีดำ ทำให้เครื่องพิมพ์ใช้สูตรการคำนวณการปล่อยหมึกพิมพ์มาผสมชดเชยส่วนของหมึกพิมพ์สีดำ เพื่อให้สีที่พิมพ์ออกมามีความใกล้เคียงกับค่าสีต้นฉบับมากที่สุด จากสีเทาที่พิมพ์ได้ มีความอมน้ำเงินในช่วงระดับสีที่ 2 - 5 และอมแดงในช่วงระดับสีที่ 6 - 7 เห็นได้ว่าสีที่พิมพ์ได้ไม่ไปในทิศทางเดียวกัน อาจเกิดจากการคำนวณสัดส่วนของปริมาณหมึกเพื่อชดเชยสี จึงสามารถสรุปได้ว่า ขอบเขตสีที่ผลิตได้ของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีขนาดเล็กกว่าขอบเขตการแสดงผลของต้นฉบับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การพิมพ์รูปแบบ Surface เป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการพิมพ์แผ่นตัวอย่างสีที่ใช้ในการทดลองนี้
2. ความหนาไม่มีผลชัดเจนต่อการพิมพ์สีของสิ่งพิมพ์
3. ขอบเขตความสามารถในการผลิตสีของเครื่องพิมพ์และหมึกพิมพ์ที่ใช้ รวมถึงสูตรการคำนวณสัดส่วนหมึกพิมพ์ของเครื่องพิมพ์มีผลต่อการพิมพ์สีของสิ่งพิมพ์
4. การผลิตสีของเครื่องพิมพ์และหมึกพิมพ์ที่ใช้ยังมีความบกพร่องในการผลิตสมดุสีเท่าให้ตรงตามต้นฉบับ
5. การเปลี่ยนแปลงของความสว่างของสีที่ระดับต่าง ๆ สอดคล้องกับค่าสีต้นฉบับ แต่มีค่าต่ำกว่าค่าจากต้นฉบับ
6. ขอบเขตสีที่ผลิตได้จากเครื่องพิมพ์และชุดหมึกพิมพ์ที่ใช้แคบกว่าขอบเขตสีของต้นฉบับที่แสดงในสภาวะ $D65/2^\circ$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรพิมพ์ตัวอย่างสีในช่วงอื่น ๆ เพิ่มเติม เพื่อคาดเดาแนวโน้มค่าสีที่ต้องการพิมพ์
2. ควรวัดค่าสี $L^*a^*b^*$ โดยเปลี่ยนสีของวัสดุรองหลังจากสีดำ (Black backing) เป็นสีขาว (White backing) เพื่อศึกษาอิทธิพลของความหนาที่มีผลต่อค่าสีที่วัดได้เพิ่มเติม
3. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนสีของเส้นพลาสติกที่ใช้เป็นสีอื่น เพื่อศึกษาอิทธิพลของสีของเส้นพลาสติกที่มีผลต่อค่าสี $L^*a^*b^*$ ที่วัดได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Aboushama M., Beyerlein S., “Evaluation of Continuous Fiber Reinforcement Desktop 3D Printers Desktop 3D Printers Overview”, Technische Hochschule Ingolstadt, July 2020.
- [2] 3DPrinting.com, “What is 3D Printing?”, แหล่งข้อมูล: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม 2563.
- [3] Arikan, C.A., Brunton, A., Tanksale, T.M., and Urban, P., “Color-Managed 3D-Printing with highly Translucent Printing Materials”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, March 2015.
- [4] 3DPrinting.com, “What is 3D Printing?”, แหล่งข้อมูล: <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม 2563.
- [5] My 3D Concepts, LLC., “HOW 3D PRINTING WORKS?”, แหล่งข้อมูล: <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works/>. สืบค้นเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม 2563.
- [6] Psychology Wiki, “Lab color space”, แหล่งข้อมูล: https://psychology.wikia.org/wiki/Lab_color_space. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563.
- [7] ViewSonic, “What is Delta E? And Why Is It Important for Color Accuracy?”, แหล่งข้อมูล: <https://www.viewsonic.com/library/creative-work/what-is-delta-e-and-why-is-it-important-for-color-accuracy/>. สืบค้นเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน 2563.
- [8] Michael Dwamena, “How to Get the Perfect Shell Thickness Setting – 3D Printing”, แหล่งข้อมูล: <https://3dprinterly.com/how-to-get-the-perfect-shell-thickness-setting-3d-printing/>. สืบค้นเมื่อวันที่ 5 พฤศจิกายน 2563.
- [9] Walter, P., Huson, D., Parraman, C., Stanić, M., 3D Printing in Colour: Technical Evaluation and Creative Applications, Impact 6 International Printmaking Conference, September 2009.
- [10] Arikan, C.A., Brunton, A., Tanksale, T.M., and Urban, P., “Color-Managed 3D-Printing with highly Translucent Printing Materials”, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, March 2015.
- [11] Liu, Y., Zhang, R., Ye, H., Wang, S., Wang, K.P., Liu, Y., and Zhou, Y., “The development of a 3D colour reproduction system of digital impressions with an intraoral scanner and a 3D printer: a preliminary study”, Scientific Reports 9, 2019.

ภาคผนวก ก

ตารางค่าสี L* a* b* ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ที่มีรูปแบบการพิมพ์แตกต่างกัน

ตาราง ก.1 ค่าสี L* a* b* ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์รูปแบบ Texture

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์ รูปแบบ Texture		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(115,82,68)	38.02	11.80	13.66	21.97	7.33	8.26
(194,150,130)	65.67	13.67	16.90	33.27	2.68	4.05
(98,122,157)	50.63	0.37	-21.60	26.97	0.71	-5.88
(87,108,67)	43.00	-15.88	20.45	24.52	-5.46	14.63
(133,128,177)	55.68	12.76	-25.17	28.67	3.52	-5.68
(103,189,170)	70.99	-30.64	1.54	32.15	-9.55	1.71
(214,126,44)	61.14	28.10	56.13	30.29	3.24	24.23
(80,91,166)	41.12	17.41	-41.19	25.04	1.51	-5.46
(193,90,99)	51.33	42.10	14.88	25.69	17.30	4.16
(94,60,108)	30.97	22.37	-22.12	21.44	10.56	-6.56
(157,188,64)	72.14	-23.91	56.35	31.48	-9.38	23.69
(224,163,46)	71.56	16.08	65.03	35.46	-1.51	21.68
(175,54,60)	41.93	49.97	25.87	21.71	15.57	20.51
(70,148,73)	55.07	-37.26	31.74	31.20	-12.06	22.02
(56,61,150)	29.60	20.48	-50.67	24.00	0.70	-8.23
(231,199,31)	81.18	0.82	77.09	38.72	-4.23	20.86
(187,86,149)	51.32	46.93	-14.68	32.35	7.44	-4.20
(8,133,161)	50.72	-23.32	-24.02	36.20	-9.57	-2.36
(243,243,242)	95.82	-0.13	0.48	45.82	-0.89	0.45
(200,200,200)	80.06	0.00	0.00	38.78	-1.06	-0.24
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	33.09	-1.00	0.14
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	28.11	1.17	-0.64
(85,85,85)	36.15	0.00	0.00	22.09	3.54	-0.21
(52,52,52)	21.70	0.00	0.00	15.16	11.28	7.72

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์ รูปแบบ Texture		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(237,31,37)	51.77	73.59	53.40	20.27	19.70	18.31
(0,165,81)	59.41	-52.21	32.62	28.07	-17.82	16.62
(44,49,146)	25.27	24.47	-55.30	16.34	2.95	-6.78
(255,248,0)	95.81	-12.58	92.15	37.50	-4.09	26.06
(234,2,140)	51.77	79.72	-7.60	24.36	25.72	-2.58
(0,173,239)	65.90	-20.17	-44.17	26.91	-8.66	-7.17
(138,128,128)	54.49	3.92	1.44	25.41	2.73	-0.90
(148,128,128)	55.45	7.90	2.97	26.37	5.08	-0.88
(128,118,128)	50.80	5.43	-4.04	23.28	5.11	-3.87
(128,108,128)	49.15	14.90	-6.32	24.18	9.37	-5.36
(138,118,128)	51.78	9.37	-2.47	23.43	7.87	-3.56
(148,118,128)	52.82	13.34	-0.81	23.63	9.86	-3.16

ตาราง ก.2 ค่าสี L* a* b* ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์รูปแบบ Surface

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์ รูปแบบ Surface		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(115,82,68)	38.02	11.80	13.66	27.01	5.42	8.34
(194,150,130)	65.67	13.67	16.90	35.20	2.19	3.30
(98,122,157)	50.63	0.37	-21.60	30.37	1.07	-5.16
(87,108,67)	43.00	-15.88	20.45	28.42	-5.86	15.02
(133,128,177)	55.68	12.76	-25.17	31.86	3.32	-5.18
(103,189,170)	70.99	-30.64	1.54	34.54	-7.97	1.86
(214,126,44)	61.14	28.10	56.13	31.81	2.50	24.58
(80,91,166)	41.12	17.41	-41.19	28.69	1.31	-4.53
(193,90,99)	51.33	42.10	14.88	28.48	14.05	3.19
(94,60,108)	30.97	22.37	-22.12	25.24	9.62	-5.89
(157,188,64)	72.14	-23.91	56.35	32.99	-8.95	25.03

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์ รูปแบบ Surface		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(224,163,46)	71.56	16.08	65.03	37.56	-2.15	18.50
(175,54,60)	41.93	49.97	25.87	22.49	15.69	24.03
(70,148,73)	55.07	-37.26	31.74	32.56	-11.43	22.18
(56,61,150)	29.60	20.48	-50.67	25.81	1.07	-7.27
(231,199,31)	81.18	0.82	77.09	32.89	-2.96	40.50
(187,86,149)	51.32	46.93	-14.68	16.96	36.74	2.99
(8,133,161)	50.72	-23.32	-24.02	29.54	-16.15	-5.51
(243,243,242)	95.82	-0.13	0.48	45.07	-0.77	0.11
(200,200,200)	80.06	0.00	0.00	37.63	-0.57	-0.89
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	33.96	-0.82	0.43
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	30.68	0.28	-0.32
(85,85,85)	36.15	0.00	0.00	23.83	3.34	-0.16
(52,52,52)	21.70	0.00	0.00	17.37	11.10	8.24
(237,31,37)	51.77	73.59	53.40	19.05	20.51	23.97
(0,165,81)	59.41	-52.21	32.62	25.76	-18.26	17.91
(44,49,146)	25.27	24.47	-55.30	16.17	2.37	-6.30
(255,248,0)	95.81	-12.58	92.15	37.73	-4.71	22.75
(234,2,140)	51.77	79.72	-7.60	25.99	22.01	-4.24
(0,173,239)	65.90	-20.17	-44.17	28.48	-7.58	-6.21
(138,128,128)	54.49	3.92	1.44	26.69	3.33	-0.17
(148,128,128)	55.45	7.90	2.97	27.43	5.18	-0.61
(128,118,128)	50.80	5.43	-4.04	24.50	6.55	-3.43
(128,108,128)	49.15	14.90	-6.32	24.17	10.49	-5.44
(138,118,128)	51.78	9.37	-2.47	25.99	8.21	-3.23
(148,118,128)	52.82	13.34	-0.81	26.58	9.10	-3.42

ภาคผนวก ข

ตารางค่าสี L* a* b* ระหว่างสิ่งพิมพ์กับต้นฉบับและระหว่างสิ่งพิมพ์ที่ความหนาต่างกัน

ตารางที่ ข.1 ค่าสี L* a* b* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
255,192,192	83.32	22.58	8.83	44.79	2.79	2.79
255,128,128	68.21	48.19	22.70	38.99	6.98	6.30
255,64,64	57.37	70.55	44.82	28.94	18.23	20.95
255,0,0	53.24	80.09	67.20	23.90	25.37	34.65
192,0,0	39.93	64.70	54.29	23.90	27.61	35.85
128,0,0	25.54	48.05	38.06	18.67	21.08	24.91
64,0,0	9.72	29.75	15.35	13.53	16.54	15.61

ตารางที่ ข.2 ค่าสี L* a* b* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
255,192,192	83.32	22.58	8.83	40.80	2.19	2.77
255,128,128	68.21	48.19	22.70	36.38	6.30	6.21
255,64,64	57.37	70.55	44.82	26.76	16.51	19.21
255,0,0	53.24	80.09	67.20	23.01	23.64	32.59
192,0,0	39.93	64.70	54.29	23.92	21.79	32.60
128,0,0	25.54	48.05	38.06	20.13	17.17	22.49
64,0,0	9.72	29.75	15.35	14.58	14.05	14.11

ตารางที่ ข.3 ค่าสี L* a* b* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
255,192,192	83.32	22.58	8.83	43.76	2.88	2.71
255,128,128	68.21	48.19	22.70	37.99	7.33	6.40
255,64,64	57.37	70.55	44.82	28.12	18.75	20.23
255,0,0	53.24	80.09	67.20	22.83	28.15	34.31
192,0,0	39.93	64.70	54.29	23.33	26.76	34.20
128,0,0	25.54	48.05	38.06	19.57	20.66	24.14
64,0,0	9.72	29.75	15.35	14.18	16.98	15.55

ตารางที่ ข.4 ค่าสี L* a* b* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
255,192,192	83.32	22.58	8.83	44.39	2.58	2.53
255,128,128	68.21	48.19	22.70	38.88	6.92	6.33
255,64,64	57.37	70.55	44.82	29.11	17.57	18.59
255,0,0	53.24	80.09	67.20	23.85	26.07	34.42
192,0,0	39.93	64.70	54.29	24.08	24.94	33.42
128,0,0	25.54	48.05	38.06	21.13	18.34	21.80
64,0,0	9.72	29.75	15.35	16.61	15.56	15.45

ตารางที่ ข.5 ค่าสี L* a* b* ของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
255,192,192	83.32	22.58	8.83	42.68	2.66	1.99
255,128,128	68.21	48.19	22.70	37.80	6.76	5.69
255,64,64	57.37	70.55	44.82	27.54	17.52	18.85
255,0,0	53.24	80.09	67.20	22.73	27.06	33.80
192,0,0	39.93	64.70	54.29	22.63	25.57	32.93
128,0,0	25.54	48.05	38.06	19.92	18.78	22.81
64,0,0	9.72	29.75	15.35	14.49	16.09	15.22

ตารางที่ ข.6 ค่าสี L* a* b* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(255,255,192)	98.66	-9.68	30.21	47.61	-4.52	9.38
(255,255,128)	97.77	-16.54	59.98	46.46	-5.85	22.18
(255,255,64)	97.29	-20.34	84.11	45.97	-4.89	29.26
(255,255,0)	97.14	-21.55	94.48	40.58	3.56	60.68
(192,192,0)	75.39	-17.41	76.32	38.83	-8.70	51.15
(128,128,0)	51.87	-12.93	56.67	29.40	-8.03	41.97
(64,64,0)	26.03	-8.01	34.72	20.31	-7.24	26.00

ตารางที่ ข.7 ค่าสี L* a* b* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(255,255,192)	98.66	-9.68	30.21	44.84	-4.69	9.89
(255,255,128)	97.77	-16.54	59.98	43.87	-5.82	20.79
(255,255,64)	97.29	-20.34	84.11	43.76	-4.78	28.20
(255,255,0)	97.14	-21.55	94.48	38.96	2.63	55.77
(192,192,0)	75.39	-17.41	76.32	37.45	-8.22	44.90
(128,128,0)	51.87	-12.93	56.67	30.86	-7.49	38.29
(64,64,0)	26.03	-8.01	34.72	22.61	-6.36	23.53

ตารางที่ ข.8 ค่าสี L* a* b* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
(255,255,192)	98.66	-9.68	30.21	47.44	-4.55	9.97
(255,255,128)	97.77	-16.54	59.98	45.57	-5.80	22.91
(255,255,64)	97.29	-20.34	84.11	45.33	-4.59	30.08
(255,255,0)	97.14	-21.55	94.48	40.06	3.53	59.85
(192,192,0)	75.39	-17.41	76.32	39.01	-8.41	48.25
(128,128,0)	51.87	-12.93	56.67	30.98	-7.61	41.33
(64,64,0)	26.03	-8.01	34.72	22.64	-6.56	25.74

ตารางที่ ข.9 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,192)	98.66	-9.68	30.21	47.63	-4.82	10.31
(255,255,128)	97.77	-16.54	59.98	46.22	-5.95	23.09
(255,255,64)	97.29	-20.34	84.11	45.24	-4.73	29.42
(255,255,0)	97.14	-21.55	94.48	40.54	3.11	58.57
(192,192,0)	75.39	-17.41	76.32	38.66	-8.48	47.20
(128,128,0)	51.87	-12.93	56.67	31.21	-7.90	40.96
(64,64,0)	26.03	-8.01	34.72	22.58	-6.43	25.96

ตารางที่ ข.10 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,192)	98.66	-9.68	30.21	46.29	-4.47	9.10
(255,255,128)	97.77	-16.54	59.98	43.61	-6.01	21.25
(255,255,64)	97.29	-20.34	84.11	44.83	-4.60	29.17
(255,255,0)	97.14	-21.55	94.48	38.85	3.93	57.69
(192,192,0)	75.39	-17.41	76.32	37.35	-7.99	48.11
(128,128,0)	51.87	-12.93	56.67	29.19	-7.50	39.63
(64,64,0)	26.03	-8.01	34.72	19.53	-6.08	24.41

ตารางที่ ข.11 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,192)	94.54	-31.45	23.90	44.64	-11.37	5.17
(128,255,128)	90.63	-59.89	49.70	41.06	-17.31	12.01
(64,255,64)	88.44	-79.25	72.60	36.17	-24.20	30.17
(0,255,0)	87.73	-86.18	83.18	34.44	-24.36	34.30
(0,192,0)	67.80	-69.62	67.19	31.95	-27.46	34.32
(0,128,0)	46.23	-51.70	49.90	27.54	-26.38	33.27
(0,64,0)	22.54	-32.02	30.12	20.98	-19.05	21.36

ตารางที่ ข.12 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,192)	94.54	-31.45	23.90	40.90	-10.92	5.22
(128,255,128)	90.63	-59.89	49.70	39.71	-15.77	11.34
(64,255,64)	88.44	-79.25	72.60	34.77	-22.10	27.53
(0,255,0)	87.73	-86.18	83.18	33.59	-22.06	30.80
(0,192,0)	67.80	-69.62	67.19	32.02	-23.62	30.01
(0,128,0)	46.23	-51.70	49.90	27.68	-22.66	29.04
(0,64,0)	22.54	-32.02	30.12	20.95	-16.41	19.66

ตารางที่ ข.13 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,192)	94.54	-31.45	23.90	44.01	-11.45	5.74
(128,255,128)	90.63	-59.89	49.70	41.23	-17.28	12.97
(64,255,64)	88.44	-79.25	72.60	35.56	-23.40	30.69
(0,255,0)	87.73	-86.18	83.18	34.13	-23.59	33.60
(0,192,0)	67.80	-69.62	67.19	32.70	-25.45	32.99
(0,128,0)	46.23	-51.70	49.90	28.51	-24.55	32.51
(0,64,0)	22.54	-32.02	30.12	23.20	-16.66	20.10

ตารางที่ ข.14 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,192)	94.54	-31.45	23.90	44.03	-11.79	5.64
(128,255,128)	90.63	-59.89	49.70	41.62	-17.56	12.83
(64,255,64)	88.44	-79.25	72.60	35.99	-22.29	27.65
(0,255,0)	87.73	-86.18	83.18	34.50	-23.07	33.04
(0,192,0)	67.80	-69.62	67.19	33.11	-25.20	32.81
(0,128,0)	46.23	-51.70	49.90	28.86	-23.85	31.43
(0,64,0)	22.54	-32.02	30.12	24.26	-16.51	19.83

ตารางที่ ข.15 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,192)	94.54	-31.45	23.90	42.62	-11.01	4.30
(128,255,128)	90.63	-59.89	49.70	39.74	-17.10	11.74
(64,255,64)	88.44	-79.25	72.60	33.87	-22.75	27.96
(0,255,0)	87.73	-86.18	83.18	32.28	-23.06	31.81
(0,192,0)	67.80	-69.62	67.19	30.73	-25.57	31.74
(0,128,0)	46.23	-51.70	49.90	26.53	-24.49	30.81
(0,64,0)	22.54	-32.02	30.12	21.66	-17.26	19.66

ตารางที่ ข.16 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,255)	95.97	-19.49	-6.38	44.94	-9.20	-4.93
(128,255,255)	93.16	-35.23	-10.87	43.24	-13.82	-8.07
(64,255,255)	91.61	-44.86	-13.34	41.17	-16.43	-10.21
(0,255,255)	91.11	-48.09	-14.13	29.68	-22.92	-21.25
(0,192,192)	70.53	-38.84	-11.42	33.19	-26.01	-8.55
(0,128,128)	48.25	-28.85	-8.48	22.50	-23.12	-7.05
(0,64,64)	23.79	-17.86	-5.25	19.51	-15.34	0.91

ตารางที่ ข.17 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,255)	95.97	-19.49	-6.38	42.33	-8.76	-4.12
(128,255,255)	93.16	-35.23	-10.87	40.89	-13.10	-7.09
(64,255,255)	91.61	-44.86	-13.34	39.34	-15.62	-9.30
(0,255,255)	91.11	-48.09	-14.13	29.77	-21.40	-18.61
(0,192,192)	70.53	-38.84	-11.42	31.70	-23.31	-7.26
(0,128,128)	48.25	-28.85	-8.48	23.23	-20.33	-5.33
(0,64,64)	23.79	-17.86	-5.25	19.07	-13.57	1.32

ตารางที่ ข.18 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,255)	95.97	-19.49	-6.38	45.55	-8.89	-4.59
(128,255,255)	93.16	-35.23	-10.87	42.67	-13.32	-7.47
(64,255,255)	91.61	-44.86	-13.34	40.27	-16.02	-9.98
(0,255,255)	91.11	-48.09	-14.13	30.08	-22.84	-20.19
(0,192,192)	70.53	-38.84	-11.42	33.06	-24.57	-7.51
(0,128,128)	48.25	-28.85	-8.48	24.89	-21.36	-5.76
(0,64,64)	23.79	-17.86	-5.25	20.10	-14.41	1.41

ตารางที่ ข.19 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,255)	95.97	-19.49	-6.38	45.65	-8.76	-4.81
(128,255,255)	93.16	-35.23	-10.87	43.25	-13.49	-7.71
(64,255,255)	91.61	-44.86	-13.34	40.29	-15.58	-10.01
(0,255,255)	91.11	-48.09	-14.13	30.22	-22.45	-20.03
(0,192,192)	70.53	-38.84	-11.42	33.00	-24.81	-7.53
(0,128,128)	48.25	-28.85	-8.48	25.28	-20.63	-5.44
(0,64,64)	23.79	-17.86	-5.25	21.12	-13.71	1.24

ตารางที่ ข.20 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,255,255)	95.97	-19.49	-6.38	44.42	-8.65	-5.45
(128,255,255)	93.16	-35.23	-10.87	41.34	-12.87	-8.23
(64,255,255)	91.61	-44.86	-13.34	38.91	-15.09	-10.66
(0,255,255)	91.11	-48.09	-14.13	27.67	-20.54	-20.73
(0,192,192)	70.53	-38.84	-11.42	31.17	-23.38	-8.85
(0,128,128)	48.25	-28.85	-8.48	22.34	-20.33	-6.74
(0,64,64)	23.79	-17.86	-5.25	17.70	-13.90	0.16

ตารางที่ ข.21 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,192,255)	79.68	13.20	-30.93	41.09	-7.59	-7.24
(128,128,255)	59.20	33.10	-63.46	32.58	-5.89	-13.30
(64,64,255)	41.18	60.51	-93.03	25.85	-5.17	-17.73
(0,0,255)	32.30	79.19	-107.86	22.71	-5.66	-19.42
(0,0,192)	23.01	63.97	-87.13	18.20	-3.10	-20.69
(0,0,128)	12.97	47.50	-64.70	17.76	-6.95	-14.51
(0,0,64)	3.34	23.38	-37.65	16.97	-6.43	-5.94

ตารางที่ ข.22 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,192,255)	79.68	13.20	-30.93	38.14	-7.51	-6.32
(128,128,255)	59.20	33.10	-63.46	30.11	-5.83	-11.93
(64,64,255)	41.18	60.51	-93.03	25.01	-5.27	-15.68
(0,0,255)	32.30	79.19	-107.86	22.52	-5.22	-16.80
(0,0,192)	23.01	63.97	-87.13	18.51	-3.45	-17.79
(0,0,128)	12.97	47.50	-64.70	17.83	-6.76	-12.59
(0,0,64)	3.34	23.38	-37.65	15.85	-5.85	-5.16

ตารางที่ ข.23 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,192,255)	79.68	13.20	-30.93	41.07	-7.75	-6.86
(128,128,255)	59.20	33.10	-63.46	31.70	-6.09	-12.88
(64,64,255)	41.18	60.51	-93.03	24.83	-5.19	-17.07
(0,0,255)	32.30	79.19	-107.86	22.61	-5.28	-18.28
(0,0,192)	23.01	63.97	-87.13	19.46	-3.59	-19.09
(0,0,128)	12.97	47.50	-64.70	18.67	-7.07	-13.34
(0,0,64)	3.34	23.38	-37.65	21.57	-5.77	-5.26

ตารางที่ ข.24 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,192,255)	79.68	13.20	-30.93	41.11	-7.49	-7.06
(128,128,255)	59.20	33.10	-63.46	32.29	-5.82	-13.09
(64,64,255)	41.18	60.51	-93.03	25.71	-4.95	-16.82
(0,0,255)	32.30	79.19	-107.86	22.32	-5.32	-18.66
(0,0,192)	23.01	63.97	-87.13	20.19	-3.30	-18.68
(0,0,128)	12.97	47.50	-64.70	19.85	-6.63	-13.05
(0,0,64)	3.34	23.38	-37.65	18.45	-6.06	-5.20

ตารางที่ ข.25 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(192,192,255)	79.68	13.20	-30.93	39.79	-7.23	-7.47
(128,128,255)	59.20	33.10	-63.46	30.71	-5.77	-13.46
(64,64,255)	41.18	60.51	-93.03	23.31	-4.72	-17.42
(0,0,255)	32.30	79.19	-107.86	20.85	-4.91	-18.89
(0,0,192)	23.01	63.97	-87.13	17.80	-2.79	-19.58
(0,0,128)	12.97	47.50	-64.70	16.82	-6.60	-14.53
(0,0,64)	3.34	23.38	-37.65	18.29	-5.06	-5.92

ตารางที่ ข.26 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,192,255)	85.09	32.67	-22.20	44.69	-1.41	-3.04
(255,128,255)	72.18	64.94	-42.08	42.11	0.55	-5.24
(255,64,255)	63.47	89.04	-55.81	36.48	5.18	-7.11
(255,0,255)	60.32	98.23	-60.82	13.75	38.82	9.29
(192,0,192)	45.65	79.35	-49.13	30.56	7.05	-10.03
(128,0,128)	29.78	58.93	-36.49	23.46	9.82	-13.65
(64,0,64)	12.35	36.49	-22.60	13.50	10.26	-10.77

ตารางที่ ข.27 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีมาตรฐานระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,192,255)	85.09	32.67	-22.20	41.28	-1.53	-2.86
(255,128,255)	72.18	64.94	-42.08	37.83	0.37	-5.06
(255,64,255)	63.47	89.04	-55.81	33.53	4.71	-6.64
(255,0,255)	60.32	98.23	-60.82	13.52	35.57	5.94
(192,0,192)	45.65	79.35	-49.13	28.64	6.56	-8.86
(128,0,128)	29.78	58.93	-36.49	22.91	8.61	-11.27
(64,0,64)	12.35	36.49	-22.60	13.24	9.69	-9.69

ตารางที่ ข.28 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีมาตรฐานระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,192,255)	85.09	32.67	-22.20	44.76	-1.36	-3.12
(255,128,255)	72.18	64.94	-42.08	40.31	0.65	-5.23
(255,64,255)	63.47	89.04	-55.81	35.65	5.03	-6.85
(255,0,255)	60.32	98.23	-60.82	13.88	38.22	8.21
(192,0,192)	45.65	79.35	-49.13	30.77	6.96	-9.12
(128,0,128)	29.78	58.93	-36.49	24.45	9.50	-12.08
(64,0,64)	12.35	36.49	-22.60	14.57	10.04	-10.13

ตารางที่ ข.29 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีมาตรฐานระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,192,255)	85.09	32.67	-22.20	43.92	-1.31	-3.61
(255,128,255)	72.18	64.94	-42.08	40.37	0.85	-5.65
(255,64,255)	63.47	89.04	-55.81	35.89	5.63	-7.25
(255,0,255)	60.32	98.23	-60.82	14.20	38.10	8.06
(192,0,192)	45.65	79.35	-49.13	31.79	6.67	-8.75
(128,0,128)	29.78	58.93	-36.49	25.14	8.33	-11.17
(64,0,64)	12.35	36.49	-22.60	17.40	9.13	-9.65

ตารางที่ ข.30 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีมาเจนต้าระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,192,255)	85.09	32.67	-22.20	43.80	-1.10	-3.72
(255,128,255)	72.18	64.94	-42.08	40.11	1.10	-5.01
(255,64,255)	63.47	89.04	-55.81	34.51	5.71	-7.23
(255,0,255)	60.32	98.23	-60.82	13.24	37.71	8.63
(192,0,192)	45.65	79.35	-49.13	30.31	7.76	-9.08
(128,0,128)	29.78	58.93	-36.49	23.83	9.39	-11.56
(64,0,64)	12.35	36.49	-22.60	14.54	10.61	-9.99

ตารางที่ ข.31 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 1 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,255)	100.00	0.00	0.00	49.51	-1.09	-0.18
(192,192,192)	77.70	0.00	0.00	38.87	-4.87	-1.44
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	33.53	-6.32	-1.53
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	27.79	-6.94	-4.35
(86,86,86)	36.57	0.00	0.00	19.36	-6.20	-3.77
(42,42,42)	17.06	0.00	0.00	14.83	-1.13	1.00
(0,0,0)	0.00	0.00	0.00	10.87	4.88	8.55

ตารางที่ ข.32 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเทากระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 2 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,255)	100.00	0.00	0.00	45.50	-1.23	0.02
(192,192,192)	77.70	0.00	0.00	36.37	-4.84	-0.86
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	31.27	-6.11	-0.97
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	25.21	-6.45	-3.71
(86,86,86)	36.57	0.00	0.00	18.45	-5.80	-2.80
(42,42,42)	17.06	0.00	0.00	13.56	-1.32	1.35
(0,0,0)	0.00	0.00	0.00	10.28	4.30	8.27

ตารางที่ ข.33 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเทาระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 4 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,255)	100.00	0.00	0.00	49.40	-0.91	-0.25
(192,192,192)	77.70	0.00	0.00	39.44	-5.10	-1.04
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	34.17	-6.58	-0.67
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	27.84	-7.23	-3.68
(86,86,86)	36.57	0.00	0.00	20.22	-6.88	-2.84
(42,42,42)	17.06	0.00	0.00	16.09	-2.17	1.69
(0,0,0)	0.00	0.00	0.00	13.01	3.41	9.49

ตารางที่ ข.34 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเทาระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 8 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,255)	100.00	0.00	0.00	48.80	-0.89	-0.64
(192,192,192)	77.70	0.00	0.00	40.03	-5.20	-1.13
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	34.26	-6.79	-0.92
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	27.94	-7.03	-3.88
(86,86,86)	36.57	0.00	0.00	20.37	-6.20	-2.93
(42,42,42)	17.06	0.00	0.00	16.28	-1.91	1.35
(0,0,0)	0.00	0.00	0.00	13.81	3.41	8.23

ตารางที่ ข.35 ค่าสี L^* a^* b^* ของสีเทาระดับต่าง ๆ ที่ความหนา 16 มิลลิเมตร

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
(255,255,255)	100.00	0.00	0.00	48.88	-0.94	-0.71
(192,192,192)	77.70	0.00	0.00	37.98	-4.13	-2.22
(160,160,160)	65.87	0.00	0.00	32.50	-5.34	-2.00
(128,128,128)	53.59	0.00	0.00	26.11	-5.41	-5.14
(86,86,86)	36.57	0.00	0.00	17.86	-4.20	-4.16
(42,42,42)	17.06	0.00	0.00	12.67	0.23	0.32
(0,0,0)	0.00	0.00	0.00	11.17	6.29	8.04

ภาคผนวก ค

ตารางค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับและระหว่างสีพิมพ์ที่ความหนาต่างกัน

ตาราง ค.1 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีแดงระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
255,192,192	43.74	47.55	44.62	44.22	45.78
255,128,128	53.11	55.14	53.38	53.22	54.13
255,64,64	64.16	67.18	64.38	65.53	66.16
255,0,0	70.11	72.80	68.59	69.69	69.71
192,0,0	44.42	50.68	46.03	47.62	47.83
128,0,0	30.79	35.01	31.30	34.16	33.48
64,0,0	13.75	16.49	13.53	15.77	14.47

ตาราง ค.2 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีแดงระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งต้น	ความหนาเปรียบเทียบ	
255,192,192	1	2	4.03
		4	1.04
		8	0.52
		16	2.26
	2	4	3.04
		8	3.62
		16	2.08
	4	8	0.73
		16	1.32
	8	16	1.80

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
255,128,128	1	2	2.70	
		4	1.06	
		8	0.13	
		16	1.36	
	2	4	1.92	
		8	2.58	
		16	1.59	
	4	8	0.98	
		16	0.92	
	8	16	1.26	
	255,64,64	1	2	3.27
			4	1.21
8			2.45	
16			2.62	
2		4	2.81	
		8	2.65	
		16	1.32	
4		8	2.25	
		16	1.93	
8		16	1.59	
255,0,0		1	2	2.83
			4	2.99
	8		0.73	
	16		2.22	
	2	4	4.83	
		8	3.16	
		16	3.64	
	4	8	2.32	
		16	1.21	
	8	16	1.62	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
192,0,0	1	2	6.66	
		4	1.94	
		8	3.61	
		16	3.78	
	2	4	5.25	
		8	3.26	
		16	4.00	
	4	8	2.11	
		16	1.88	
	8	16	1.66	
	128,0,0	1	2	4.82
			4	1.26
8			4.82	
16			3.35	
2		4	3.90	
		8	1.68	
		16	1.66	
4		8	3.65	
		16	2.33	
8		16	1.63	
64,0,0		1	2	3.09
			4	0.79
	8		3.23	
	16		1.13	
	2	4	3.29	
		8	2.86	
		16	2.33	
	4	8	2.81	
		16	0.99	
	8	16	2.19	

ตาราง ค.3 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
(255,255,192)	55.38	57.74	55.31	54.99	56.70
(255,255,128)	64.63	67.50	64.93	64.27	67.41
(255,255,64)	76.69	78.96	76.60	77.10	77.58
(255,255,0)	70.51	73.94	71.32	71.43	73.49
(192,192,0)	45.24	50.11	46.83	47.72	48.29
(128,128,0)	27.30	28.44	26.46	26.44	28.89
(64,64,0)	10.46	11.82	9.71	9.55	12.35

ตาราง ค.4 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีเหลืองระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งต้น	ความหนาเปรียบเทียบ	
255,255,192	1	2	2.82
		4	0.61
		8	0.98
		16	1.35
	2	4	2.61
		8	2.82
		16	1.67
	4	8	0.47
		16	1.44
	8	16	1.84

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
255,255,128	1	2	2.94	
		4	1.15	
		8	0.94	
		16	3.00	
	2	4	2.71	
		8	3.29	
		16	0.57	
	4	8	0.70	
		16	2.57	
	8	16	3.20	
	255,255,64	1	2	2.45
			4	1.08
8			0.77	
16			1.18	
2		4	2.45	
		8	1.91	
		16	1.45	
4		8	0.68	
		16	1.03	
8		16	0.49	
255,255,0		1	2	5.25
			4	0.98
	8		2.16	
	16		3.47	
	2	4	4.32	
		8	3.24	
		16	2.32	
	4	8	1.43	
		16	2.50	
	8	16	2.07	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
192,192,0	1	2	6.41	
		4	2.92	
		8	3.96	
		16	3.45	
	2	4	3.70	
		8	2.61	
		16	3.22	
	4	8	1.11	
		16	1.72	
	8	16	1.67	
	128,128,0	1	2	4.00
			4	1.76
8			2.08	
16			2.41	
2		4	3.05	
		8	2.72	
		16	2.15	
4		8	0.53	
		16	2.48	
8		16	2.46	
64,64,0		1	2	3.49
			4	2.44
	8		2.41	
	16		2.12	
	2	4	2.22	
		8	2.43	
		16	3.22	
	4	8	0.27	
		16	3.42	
	8	16	3.44	

ตาราง ค.5 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีเขียวระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
(192,255,192)	56.96	60.40	57.30	57.20	59.15
(128,255,128)	75.44	77.54	74.87	74.52	76.57
(64,255,64)	86.97	90.43	87.59	89.54	90.35
(0,255,0)	95.14	98.93	96.17	96.59	98.48
(0,192,0)	64.37	69.13	65.98	66.02	67.61
(0,128,0)	35.60	40.29	36.79	37.67	38.64
(0,64,0)	15.74	18.87	18.35	18.69	18.11

ตาราง ค.6 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีเขียวระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ	
192,255,192	1	2	3.77
		4	0.86
		8	0.88
		16	2.23
	2	4	3.20
		8	3.28
		16	1.95
	4	8	0.36
		16	2.05
	8	16	2.10

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
128,255,128	1	2	2.15	
		4	0.97	
		8	1.03	
		16	1.37	
	2	4	2.69	
		8	3.02	
		16	1.38	
	4	8	0.50	
		16	1.94	
	8	16	2.23	
	64,255,64	1	2	3.65
			4	1.13
8			3.17	
16			3.50	
2		4	3.51	
		8	1.24	
		16	1.19	
4		8	3.27	
		16	3.27	
8		16	2.19	
0,255,0		1	2	4.28
			4	1.08
	8		1.80	
	16		3.54	
	2	4	3.24	
		8	2.63	
		16	1.94	
	4	8	0.85	
		16	2.63	
	8	16	2.54	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
0,192,0	1	2	5.77	
		4	2.53	
		8	2.95	
		16	3.42	
	2	4	3.56	
		8	3.39	
		16	2.91	
	4	8	0.51	
		16	2.33	
	8	16	2.63	
	0,128,0	1	2	5.64
			4	2.21
8			3.39	
16			3.26	
2		4	4.04	
		8	2.92	
		16	2.80	
4		8	1.33	
		16	2.61	
8		16	2.49	
0,64,0		1	2	3.14
			4	3.49
	8		4.42	
	16		2.56	
	2	4	2.31	
		8	3.32	
		16	1.11	
	4	8	1.10	
		16	1.71	
	8	16	2.71	

ตาราง ค.7 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
(192,255,255)	52.08	54.75	51.55	51.48	52.69
(128,255,255)	54.39	56.89	55.15	54.53	56.50
(64,255,255)	57.99	60.03	58.99	59.19	60.59
(0,255,255)	66.77	67.05	66.33	66.34	69.48
(0,192,192)	39.59	42.03	40.29	40.26	42.37
(0,128,128)	26.42	26.62	24.68	24.59	27.33
(0,64,64)	7.92	9.16	8.36	8.15	9.06

ตาราง ค.8 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีไซแอนระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งต้น	ความหนาเปรียบเทียบ	
192,255,255	1	2	2.77
		4	0.77
		8	0.85
		16	0.92
	2	4	3.26
		8	3.39
		16	2.48
	4	8	0.27
		16	1.45
	8	16	1.40

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
128,255,255	1	2	2.65	
		4	0.97	
		8	0.50	
		16	2.13	
	2	4	1.83	
		8	2.47	
		16	1.25	
	4	8	0.65	
		16	1.60	
	8	16	2.08	
	64,255,255	1	2	2.20
			4	1.02
8			1.24	
16			2.67	
2		4	1.22	
		8	1.18	
		16	1.52	
4		8	0.45	
		16	1.78	
8		16	1.60	
0,255,255		1	2	3.05
			4	1.13
	8		1.42	
	16		3.16	
	2	4	2.16	
		8	1.82	
		16	3.11	
	4	8	0.44	
		16	3.37	
	8	16	3.26	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
0,192,192	1	2	3.34	
		4	1.77	
		8	1.58	
		16	3.33	
	2	4	1.88	
		8	2.01	
		16	1.68	
	4	8	0.25	
		16	2.61	
	8	16	2.67	
	0,128,128	1	2	3.36
			4	3.24
8			4.07	
16			2.81	
2		4	2.00	
		8	2.08	
		16	1.67	
4		8	0.89	
		16	2.92	
8		16	3.23	
0,64,64		1	2	1.87
			4	1.21
	8		2.32	
	16		2.44	
	2	4	1.33	
		8	2.06	
		16	1.83	
	4	8	1.25	
		16	2.75	
	8	16	3.60	

ตาราง ค.9 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
(192,192,255)	49.83	52.54	50.09	49.86	50.59
(128,128,255)	68.89	70.83	69.65	69.11	69.45
(64,64,255)	101.09	102.82	101.75	101.65	101.44
(0,0,255)	122.94	124.55	123.51	123.28	122.96
(0,0,192)	94.53	96.82	95.95	96.01	95.12
(0,0,128)	74.21	75.38	75.15	75.14	73.89
(0,0,64)	45.60	45.46	47.24	46.34	45.15

ตาราง ค.10 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีน้ำเงินระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งต้น	ความหนาเปรียบเทียบ	
192,192,255	1	2	3.09
		4	0.41
		8	0.21
		16	1.36
	2	4	2.99
		8	3.06
		16	2.03
	4	8	0.32
		16	1.51
	8	16	1.41

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
128,128,255	1	2	2.82	
		4	1.00	
		8	0.36	
		16	1.88	
	2	4	1.86	
		8	2.47	
		16	1.64	
	4	8	0.69	
		16	1.19	
	8	16	1.63	
	64,64,255	1	2	2.22
			4	1.22
8			0.95	
16			2.60	
2		4	1.41	
		8	1.38	
		16	2.50	
4		8	0.95	
		16	1.63	
8		16	2.49	
0,0,255		1	2	2.66
			4	1.21
	8		0.92	
	16		2.08	
	2	4	1.48	
		8	1.87	
		16	2.69	
	4	8	0.48	
		16	1.90	
	8	16	1.55	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
0,0,192	1	2	2.94	
		4	2.10	
		8	2.84	
		16	1.22	
	2	4	1.62	
		8	1.91	
		16	2.03	
	4	8	0.88	
		16	1.91	
	8	16	2.60	
	0,0,128	1	2	1.93
			4	1.49
8			2.57	
16			1.00	
2		4	1.17	
		8	2.07	
		16	2.19	
4		8	1.29	
		16	2.25	
8		16	3.37	
0,0,64		1	2	1.49
			4	4.70
	8		1.70	
	16		1.91	
	2	4	5.72	
		8	2.61	
		16	2.68	
	4	8	3.13	
		16	3.42	
	8	16	1.24	

ตาราง ค.11 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีมาตรฐานระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
(255,192,255)	56.22	58.84	56.11	56.53	56.45
(255,128,255)	80.05	81.98	80.67	80.29	80.49
(255,64,255)	100.66	102.11	101.14	100.38	100.72
(255,0,255)	103.02	102.83	102.58	102.41	103.46
(192,0,192)	83.57	84.91	84.04	84.30	83.46
(128,0,128)	54.54	56.71	55.39	56.78	55.78
(64,0,64)	28.80	29.77	29.33	30.69	28.88

ตาราง ค.12 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีมาตรฐานระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งต้น	ความหนาเปรียบเทียบ	
255,192,255	1	2	3.42
		4	0.11
		8	0.97
		16	1.16
	2	4	3.49
		8	2.75
		16	2.70
	4	8	0.98
		16	1.16
	8	16	0.26

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
255,128,255	1	2	4.29	
		4	1.80	
		8	1.81	
		16	2.08	
	2	4	2.50	
		8	2.66	
		16	2.40	
	4	8	0.47	
		16	0.54	
	8	16	0.74	
	255,64,255	1	2	3.02
			4	0.88
8			0.75	
16			2.04	
2		4	2.16	
		8	2.61	
		16	1.52	
4		8	0.76	
		16	1.38	
8		16	1.38	
255,0,255		1	2	4.68
			4	1.25
	8		1.50	
	16		1.39	
	2	4	3.51	
		8	3.37	
		16	3.45	
	4	8	0.38	
		16	0.92	
	8	16	1.19	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
192,0,192	1	2	2.31	
		4	0.94	
		8	1.82	
		16	1.22	
	2	4	2.19	
		8	3.16	
		16	2.07	
	4	8	1.13	
		16	0.92	
	8	16	1.87	
	128,0,128	1	2	2.72
			4	1.88
8			3.35	
16			2.16	
2		4	1.96	
		8	2.25	
		16	1.24	
4		8	1.64	
		16	0.82	
8		16	1.73	
64,0,64		1	2	1.25
			4	1.27
	8		4.21	
	16		1.35	
	2	4	1.44	
		8	4.19	
		16	1.62	
	4	8	3.01	
		16	0.59	
	8	16	3.24	

ตาราง ค.13 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์กับต้นฉบับของสีเทาระดับต่าง ๆ ที่ความหนาต่าง ๆ

ค่าสี RGB	ค่า ΔE^*_{ab}				
	ความหนา 1 มม.	ความหนา 2 มม.	ความหนา 4 มม.	ความหนา 8 มม.	ความหนา 16 มม.
(255,255,255)	50.51	54.52	50.61	51.21	51.13
(192,192,192)	39.16	41.62	38.61	38.04	40.00
(160,160,160)	32.99	35.15	32.39	32.34	33.85
(128,128,128)	27.07	29.34	27.00	26.88	28.47
(86,86,86)	18.67	19.24	17.97	17.60	19.62
(42,42,42)	2.69	3.98	2.92	2.46	4.41
(0,0,0)	14.66	13.87	16.46	16.43	15.13

ตาราง ค.14 ค่า ΔE^*_{ab} ระหว่างสีพิมพ์สีเทาระดับต่าง ๆ ที่มีความหนาต่างกัน

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}
	ความหนาดั้งต้น	ความหนาเปรียบเทียบ	
255,255,255	1	2	4.02
		4	0.22
		8	0.86
		16	0.83
	2	4	3.93
		8	3.39
		16	3.47
	4	8	0.71
		16	0.69
	8	16	0.12

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
192,192,192	1	2	2.57	
		4	0.74	
		8	1.25	
		16	1.39	
	2	4	3.09	
		8	3.69	
		16	2.23	
	4	8	0.61	
		16	2.11	
	8	16	2.56	
	160,160,160	1	2	2.34
			4	1.10
8			1.07	
16			1.49	
2		4	2.95	
		8	3.07	
		16	1.78	
4		8	0.34	
		16	2.46	
8		16	2.52	
128,128,128		1	2	2.70
			4	0.73
	8		0.50	
	16		2.40	
	2	4	2.74	
		8	2.79	
		16	1.98	
	4	8	0.30	
		16	2.90	
	8	16	2.74	

ค่าสี RGB	ความหนาสิ่งพิมพ์ (มม.)		ค่า ΔE^*_{ab}	
	ความหนาดั้งเดิม	ความหนาเปรียบเทียบ		
86,86,86	1	2	1.39	
		4	1.43	
		8	1.31	
		16	2.53	
	2	4	2.07	
		8	1.97	
		16	2.18	
	4	8	0.70	
		16	3.80	
	8	16	3.43	
	42,42,42	1	2	1.33
			4	1.78
8			1.68	
16			2.63	
2		4	2.69	
		8	2.78	
		16	2.06	
4		8	0.47	
		16	4.40	
8		16	4.31	
0,0,0		1	2	0.87
			4	2.77
	8		3.30	
	16		1.53	
	2	4	3.13	
		8	3.65	
		16	2.19	
	4	8	1.49	
		16	3.71	
	8	16	3.91	

ภาคผนวก ง

ตารางค่าสี L* a* b* ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ จำนวน 124 สี

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
0,0,0	0.00	0.00	0.00	13.01	3.41	9.49
0,0,64	3.34	23.38	-37.65	21.57	-5.77	-5.26
0,0,128	12.97	47.50	-64.70	18.67	-7.07	-13.34
0,0,192	23.01	63.97	-87.13	19.46	-3.59	-19.09
0,0,255	32.30	79.19	-107.86	22.61	-5.28	-18.28
0,64,0	22.54	-32.02	30.12	23.20	-16.66	20.10
0,64,64	23.79	-17.86	-5.25	20.10	-14.41	1.41
0,64,128	27.37	9.11	-41.01	20.33	-14.32	-7.59
0,64,192	32.86	35.59	-70.79	21.21	-5.97	-18.83
0,64,255	39.38	58.06	-96.05	24.89	-5.60	-17.17
0,128,0	46.23	-51.70	49.90	28.51	-24.55	32.51
0,128,64	46.72	-45.50	26.36	26.75	-29.69	23.83
0,128,128	48.25	-28.85	-8.48	24.89	-21.36	-5.76
0,128,192	50.97	-5.68	-41.53	25.56	-15.81	-13.72
0,128,255	54.71	18.78	-70.92	30.07	-9.81	-14.70
0,192,0	67.80	-69.62	67.19	32.70	-25.45	32.99
0,192,64	68.07	-66.10	51.36	34.67	-27.78	25.03
0,192,128	68.94	-55.69	21.11	33.21	-32.24	7.19
0,192,192	70.53	-38.84	-11.42	33.06	-24.57	-7.51
0,192,255	72.84	-18.18	-42.09	34.36	-17.95	-14.78
0,255,0	87.73	-86.18	83.18	34.13	-23.59	33.60
0,255,64	87.91	-83.87	71.91	34.85	-25.63	31.91
0,255,128	88.48	-76.75	46.57	37.44	-24.04	10.68
0,255,192	89.54	-64.45	16.19	38.49	-22.11	0.34
0,255,255	91.11	-48.09	-14.13	30.08	-22.84	-20.19
64,0,0	9.72	29.75	15.35	14.18	16.98	15.55

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
64,0,64	12.35	36.49	-22.60	14.57	10.04	-10.13
64,0,128	18.58	50.15	-55.22	15.92	2.54	-18.15
64,0,192	26.43	65.30	-81.34	20.34	-1.86	-18.51
64,0,255	34.62	80.01	-103.93	24.32	-4.06	-16.82
64,64,0	26.03	-8.01	34.72	22.64	-6.56	25.74
64,64,64	27.09	0.00	0.00	21.29	-2.80	2.14
64,64,128	30.19	18.57	-36.32	19.13	-6.25	-10.76
64,64,192	35.13	40.24	-66.97	22.67	-3.05	-17.67
64,64,255	41.18	60.51	-93.03	24.83	-5.19	-17.07
64,128,0	47.66	-39.67	51.64	29.43	-19.96	38.06
64,128,64	48.13	-34.56	28.43	29.08	-25.00	30.26
64,128,128	49.60	-20.42	-6.33	25.66	-17.87	-5.84
64,128,192	52.21	0.10	-39.49	26.39	-11.07	-13.72
64,128,255	55.83	22.59	-69.06	29.03	-8.64	-15.21
64,192,0	68.60	-62.55	68.17	33.39	-24.23	37.09
64,192,64	68.86	-59.32	52.46	34.30	-26.17	30.12
64,192,128	69.71	-49.71	22.30	35.03	-29.33	9.26
64,192,192	71.28	-33.98	-10.21	35.55	-24.67	-6.39
64,192,255	73.55	-14.42	-40.92	35.17	-15.50	-13.43
64,255,0	88.26	-81.46	83.82	34.52	-21.58	35.53
64,255,64	88.44	-79.25	72.60	35.56	-23.40	30.69
64,255,128	89.00	-72.45	47.33	38.68	-21.83	12.28
64,255,192	90.05	-60.65	16.98	39.68	-20.62	1.60
64,255,255	91.61	-44.86	-13.34	40.27	-16.02	-9.98
128,0,0	25.54	48.05	38.06	19.57	20.66	24.14
128,0,64	26.62	50.97	0.51	17.92	25.33	-6.38
128,0,128	29.78	58.93	-36.49	24.45	9.50	-12.08
128,0,192	34.79	70.38	-67.25	25.33	0.85	-14.80
128,0,255	40.91	83.17	-93.29	27.05	-3.37	-15.23
128,64,0	34.51	23.97	44.81	24.91	5.40	33.05

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
128,64,64	35.26	27.52	12.69	20.27	14.82	11.72
128,64,128	37.51	37.33	-24.28	23.42	9.83	-12.32
128,64,192	41.31	51.57	-56.63	26.42	-0.49	-14.61
128,64,255	46.28	67.32	-84.44	28.06	-4.46	-14.63
128,128,0	51.87	-12.93	56.67	30.98	-7.61	41.33
128,128,64	52.28	-9.63	34.45	29.36	-8.94	35.48
128,128,128	53.59	0.00	0.00	27.84	-7.23	-3.68
128,128,192	55.92	15.13	-33.41	31.71	-3.79	-11.87
128,128,255	59.20	33.10	-63.46	31.70	-6.09	-12.88
128,192,0	71.07	-43.59	71.16	35.31	-19.15	40.99
128,192,64	71.32	-41.04	55.82	35.46	-21.49	35.83
128,192,128	72.13	-33.30	25.96	38.46	-21.24	13.17
128,192,192	73.61	-20.28	-6.50	38.38	-17.00	-3.85
128,192,255	75.76	-3.56	-37.31	39.30	-12.04	-9.05
128,255,0	89.91	-67.79	85.82	36.70	-20.47	37.10
128,255,64	90.08	-65.86	74.76	-	-	-
128,255,128	90.63	-59.89	49.70	41.23	-17.28	12.97
128,255,192	91.64	-49.43	19.44	41.48	-17.35	4.12
128,255,255	93.16	-35.23	-10.87	42.67	-13.32	-7.47
192,0,0	39.93	64.70	54.29	23.33	26.76	34.20
192,0,64	40.54	66.35	21.84	20.20	31.38	20.35
192,0,128	42.41	71.28	-15.81	25.86	20.54	-6.94
192,0,192	45.65	79.35	-49.13	30.77	6.96	-9.12
192,0,255	50.01	89.49	-78.00	32.84	0.07	-10.34
192,64,0	45.47	49.21	56.68	30.75	16.19	41.51
192,64,64	45.97	51.09	28.67	24.43	26.29	26.98
192,64,128	47.54	56.70	-8.06	29.31	19.79	-5.09
192,64,192	50.31	65.90	-41.72	34.82	5.20	-7.75
192,64,255	54.13	77.41	-71.31	34.04	-1.07	-10.25
192,128,0	58.65	16.62	64.56	35.06	5.15	51.41

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
192,128,64	58.99	18.65	43.94	33.58	5.53	34.27
192,128,128	60.07	24.77	10.17	34.00	10.26	5.09
192,128,192	62.04	35.06	-23.44	36.83	4.09	-7.12
192,128,255	64.86	48.28	-54.10	37.29	-3.42	-8.86
192,192,0	75.39	-17.41	76.32	39.01	-8.41	48.25
192,192,64	75.62	-15.56	61.62	38.93	-12.97	42.68
192,192,128	76.35	-9.87	32.33	39.23	-7.70	19.06
192,192,192	77.70	0.00	0.00	39.44	-5.10	-1.04
192,192,255	79.68	13.20	-30.93	41.07	-7.75	-6.86
192,255,0	92.89	-46.50	89.42	38.64	-15.69	40.18
192,255,64	93.06	-44.94	78.65	39.26	-15.32	35.26
192,255,128	93.57	-40.09	53.97	43.04	-12.42	15.81
192,255,192	94.54	-31.45	23.90	44.01	-11.45	5.74
192,255,255	95.97	-19.49	-6.38	45.55	-8.89	-4.59
255,0,0	53.24	80.09	67.20	22.83	28.15	34.31
255,0,64	53.64	81.18	40.70	23.10	27.62	25.79
255,0,128	54.89	84.53	4.08	25.54	25.20	-0.76
255,0,192	57.15	90.37	-30.24	30.99	18.70	-4.87
255,0,255	60.32	98.23	-60.82	13.88	38.22	8.21
255,64,0	57.01	69.37	68.70	28.37	19.56	38.97
255,64,64	57.37	70.55	44.82	28.12	18.75	20.23
255,64,128	58.50	74.19	9.24	26.90	21.29	3.73
255,64,192	60.55	80.52	-24.98	32.14	15.18	-6.10
255,64,255	63.47	89.04	-55.81	35.65	5.03	-6.85
255,128,0	67.05	42.83	74.02	36.95	6.01	39.90
255,128,64	67.33	44.14	55.35	34.81	8.90	31.19
255,128,128	68.21	48.19	22.70	37.99	7.33	6.40
255,128,192	69.83	55.29	-10.91	37.74	10.31	-4.66
255,128,255	72.18	64.94	-42.08	40.31	0.65	-5.23
255,192,0	81.27	9.87	83.20	45.17	-3.06	42.11

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ			สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์		
	L*	a*	b*	L*	a*	b*
255,192,64	81.47	11.18	69.36	44.92	-3.10	35.94
255,192,128	82.12	15.28	40.90	42.65	0.66	23.69
255,192,192	83.32	22.58	8.83	43.76	2.88	2.71
255,192,255	85.09	32.67	-22.20	44.76	-1.36	-3.12
255,255,0	97.14	-21.55	94.48	40.06	3.53	59.85
255,255,64	97.29	-20.34	84.11	45.33	-4.59	30.08
255,255,128	97.77	-16.54	59.98	45.57	-5.80	22.91
255,255,192	98.66	-9.68	30.21	47.44	-4.55	9.97
255,255,255	100.00	0.00	0.00	49.40	-0.91	-0.25

ภาคผนวก จ

ตารางค่า L^* และ C^*_{ab} ระหว่างต้นฉบับกับสิ่งพิมพ์ จำนวน 124 สี

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ		สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์	
	L^*	C^*_{ab}	L^*	C^*_{ab}
0,0,0	0.00	0.00	13.01	10.08
0,0,64	3.34	44.32	21.57	7.80
0,0,128	12.97	80.27	18.67	15.09
0,0,192	23.01	108.09	19.46	19.42
0,0,255	32.30	133.81	22.61	19.02
0,64,0	22.54	43.95	23.20	26.11
0,64,64	23.79	18.62	20.10	14.47
0,64,128	27.37	42.01	20.33	16.21
0,64,192	32.86	79.23	21.21	19.75
0,64,255	39.38	112.23	24.89	18.06
0,128,0	46.23	71.85	28.51	40.74
0,128,64	46.72	52.58	26.75	38.06
0,128,128	48.25	30.07	24.89	22.12
0,128,192	50.97	41.92	25.56	20.93
0,128,255	54.71	73.36	30.07	17.67
0,192,0	67.80	96.75	32.70	41.66
0,192,64	68.07	83.71	34.67	37.39
0,192,128	68.94	59.55	33.21	33.03
0,192,192	70.53	40.49	33.06	25.69
0,192,255	72.84	45.85	34.36	23.25
0,255,0	87.73	119.78	34.13	41.05
0,255,64	87.91	110.47	34.85	40.93
0,255,128	88.48	89.78	37.44	26.30
0,255,192	89.54	66.45	38.49	22.11
0,255,255	91.11	50.12	30.08	30.48
64,0,0	9.72	33.48	14.18	23.02

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ		สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์	
	L*	C* _{ab}	L*	C* _{ab}
64,0,64	12.35	42.92	14.57	14.26
64,0,128	18.58	74.60	15.92	18.33
64,0,192	26.43	104.30	20.34	18.60
64,0,255	34.62	131.16	24.32	17.30
64,64,0	26.03	35.63	22.64	26.56
64,64,64	27.09	0.00	21.29	3.52
64,64,128	30.19	40.79	19.13	12.44
64,64,192	35.13	78.13	22.67	17.93
64,64,255	41.18	110.98	24.83	17.84
64,128,0	47.66	65.12	29.43	42.97
64,128,64	48.13	44.75	29.08	39.25
64,128,128	49.60	21.38	25.66	18.80
64,128,192	52.21	39.49	26.39	17.63
64,128,255	55.83	72.66	29.03	17.49
64,192,0	68.60	92.51	33.39	44.30
64,192,64	68.86	79.19	34.30	39.90
64,192,128	69.71	54.48	35.03	30.76
64,192,192	71.28	35.48	35.55	25.48
64,192,255	73.55	43.39	35.17	20.51
64,255,0	88.26	116.88	34.52	41.57
64,255,64	88.44	107.48	35.56	38.59
64,255,128	89.00	86.54	38.68	25.04
64,255,192	90.05	62.98	39.68	20.68
64,255,255	91.61	46.80	40.27	18.87
128,0,0	25.54	61.29	19.57	31.77
128,0,64	26.62	50.97	17.92	26.12
128,0,128	29.78	69.31	24.45	15.37
128,0,192	34.79	97.35	25.33	14.82
128,0,255	40.91	124.98	27.05	15.59
128,64,0	34.51	50.82	24.91	33.48

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ		สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์	
	L*	C* _{ab}	L*	C* _{ab}
128,64,64	35.26	30.30	20.27	18.89
128,64,128	37.51	44.53	23.42	15.75
128,64,192	41.31	76.59	26.42	14.61
128,64,255	46.28	107.99	28.06	15.29
128,128,0	51.87	58.13	30.98	42.02
128,128,64	52.28	35.77	29.36	36.59
128,128,128	53.59	0.00	27.84	8.11
128,128,192	55.92	36.67	31.71	12.46
128,128,255	59.20	71.57	31.70	14.24
128,192,0	71.07	83.45	35.31	45.24
128,192,64	71.32	69.28	35.46	41.78
128,192,128	72.13	42.22	38.46	24.99
128,192,192	73.61	21.30	38.38	17.43
128,192,255	75.76	37.48	39.30	15.06
128,255,0	89.91	109.36	36.70	42.37
128,255,64	90.08	99.63	-	-
128,255,128	90.63	77.83	41.23	21.60
128,255,192	91.64	53.12	41.48	17.83
128,255,255	93.16	36.87	42.67	15.26
192,0,0	39.93	84.46	23.33	43.42
192,0,64	40.54	69.85	20.20	37.40
192,0,128	42.41	73.01	25.86	21.68
192,0,192	45.65	93.33	30.77	11.47
192,0,255	50.01	118.71	32.84	10.34
192,64,0	45.47	75.07	30.75	44.55
192,64,64	45.97	58.59	24.43	37.67
192,64,128	47.54	57.27	29.31	20.43
192,64,192	50.31	77.99	34.82	9.33
192,64,255	54.13	105.25	34.04	10.31
192,128,0	58.65	66.66	35.06	51.67

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ		สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์	
	L*	C* _{ab}	L*	C* _{ab}
192,128,64	58.99	47.73	33.58	34.71
192,128,128	60.07	26.78	34.00	11.45
192,128,192	62.04	42.18	36.83	8.21
192,128,255	64.86	72.51	37.29	9.49
192,192,0	75.39	78.28	39.01	48.98
192,192,64	75.62	63.56	38.93	44.60
192,192,128	76.35	33.80	39.23	20.55
192,192,192	77.70	0.00	39.44	5.20
192,192,255	79.68	33.63	41.07	10.35
192,255,0	92.89	100.79	38.64	43.13
192,255,64	93.06	90.58	39.26	38.44
192,255,128	93.57	67.23	43.04	20.11
192,255,192	94.54	39.50	44.01	12.81
192,255,255	95.97	20.51	45.55	10.00
255,0,0	53.24	104.55	22.83	44.37
255,0,64	53.64	90.81	23.10	37.79
255,0,128	54.89	84.63	25.54	25.21
255,0,192	57.15	95.30	30.99	19.32
255,0,255	60.32	115.54	13.88	39.09
255,64,0	57.01	97.63	28.37	43.60
255,64,64	57.37	83.58	28.12	27.58
255,64,128	58.50	74.76	26.90	21.61
255,64,192	60.55	84.31	32.14	16.36
255,64,255	63.47	105.09	35.65	8.50
255,128,0	67.05	85.51	36.95	40.34
255,128,64	67.33	70.79	34.81	32.43
255,128,128	68.21	53.27	37.99	9.72
255,128,192	69.83	56.36	37.74	11.31
255,128,255	72.18	77.38	40.31	5.27
255,192,0	81.27	83.78	45.17	42.22

ค่าสี RGB	สีต้นฉบับ		สีที่วัดได้จากสิ่งพิมพ์	
	L*	C* _{ab}	L*	C* _{ab}
255,192,64	81.47	70.25	44.92	36.07
255,192,128	82.12	43.66	42.65	23.70
255,192,192	83.32	24.24	43.76	3.95
255,192,255	85.09	39.49	44.76	3.40
255,255,0	97.14	96.91	40.06	59.95
255,255,64	97.29	86.53	45.33	30.42
255,255,128	97.77	62.22	45.57	23.63
255,255,192	98.66	31.73	47.44	10.96
255,255,255	100.00	0.00	49.40	0.94