

การศึกษาพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาดชิ้นงาน วัสดุอะลูมิเนียม AA6063

A Study on the Effects of 3D Scanning Parameters on Dimensional Measurement Errors of Aluminum Alloy AA6063 Workpieces

ภุชณะ อ่วมนุสนธิ^{1*} ภาณุเดช แสงสีคำ¹ วรวิทย์ ปัญญาคำ¹ และ พิชัย จันทรมณี¹

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ 2 ถนนวงลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Kritsana Uamnusun^{1*} Panudet Saengseedam¹ Voravee Punyakum¹ and Pichai Janmanee¹

¹Rajamangala University of Technology Krungthep, 2 Nang Linchi Road, Thung Maha Mek, Sathon, Bangkok, 10120

*Corresponding author Email: kritsana.u@mail.rmutk.ac.th

(Received: June 4, 2026; Revise: June 24, 2026; Accepted: June 29, 2026)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 โดยทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องมือวัดแบบสัมผัส CMM Arm พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษได้แก่ Resolution 0.2, 0.6, 1 มิลลิเมตร และค่า Shutter 2, 5, 8 มิลลิวินาที ซึ่งถูกนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อนโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression Analysis) ผลการทดลองพบว่า ค่า Resolution มีผลต่อความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value เท่ากับ 0.010 โดยเมื่อเพิ่มค่า Resolution จะส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่า Shutter ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ p-value เท่ากับ 0.221 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการทดสอบ Lack-of-Fit ให้ค่า p-value เท่ากับ 0.764 แสดงให้เห็นว่าสมการถดถอยที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมและน่าเชื่อถือในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การสแกน และค่าความคลาดเคลื่อน ผลการวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโตยืนยันว่า Resolution เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความผิดพลาดของการสแกนสามมิติ ขณะที่ Shutter ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวจากข้อมูลการสแกนที่แสดงโครงข่ายตาข่ายซึ่งมีความหนาแน่นลดลงเมื่อค่า Resolution เพิ่มขึ้น ส่งผลให้การสร้างรูปทรงเรขาคณิตบริเวณมุม ขอบ และพื้นผิวโค้งเกิดความคลาดเคลื่อนจากชิ้นงานต้นแบบ การวิเคราะห์ Response Optimization พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมคือ Resolution เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 0.0099 มิลลิเมตร ผลการวิเคราะห์ Boxplot แสดงการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อนและพบค่าผิดปกติบางตำแหน่ง ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนของแสงที่กระเจิง สภาวะแวดล้อม และความหยาบผิวของวัสดุ ผลการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสแกนสามมิติชิ้นงานอะลูมิเนียม AA6063 เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวัดเชิงมิติ หรืองานด้านวิศวกรรมย้อนกลับได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การสแกนสามมิติ อะลูมิเนียมอัลลอยด์ AA6063 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ความละเอียด ชัตเตอร์

Abstract

This study aims to investigate the effects of three-dimensional (3D) scanning parameters on dimensional measurement errors of aluminum alloy AA6063 components, with results compared against a contact-type coordinate measuring machine (CMM) arm. The scanning parameters examined include resolution values of 0.2, 0.6, and 1.0 mm, and shutter time values of 2, 5, and 8 ms. The relationships

between these parameters and measurement error were analyzed using linear regression analysis. The experimental results demonstrate that resolution has a statistically significant effect on dimensional error ($p = 0.010$), with increasing resolution values leading to increased measurement errors. Conversely, shutter time shows no statistically significant influence on measurement error ($p = 0.221$) at a significance level of 0.05. The lack-of-fit test yields a p-value of 0.764, confirming that the developed regression model is adequate and reliable for describing the relationship between scanning parameters and measurement error. Pareto chart analysis confirms that resolution is the dominant factor affecting 3D scanning error, whereas shutter time does not exhibit a significant effect. These findings are consistent with surface reconstruction data showing that mesh density decreases as resolution increases, resulting in geometric inaccuracies at corners, edges, and curved surfaces relative to the reference geometry. Response optimization analysis identifies the optimal parameter combination as 0.2 mm resolution and 8 ms shutter time, yielding a minimum dimensional error of approximately 0.0099 mm. Boxplot analysis reveals the distribution of measurement errors and identifies several outliers, which may be attributed to light scattering effects, environmental conditions, and surface roughness of the aluminum material. The findings of this study provide practical guidelines for determining appropriate scanning parameters for 3D scanning of aluminum AA6063 components to enhance dimensional measurement accuracy and effectiveness in reverse engineering applications.

Keywords: 3D Scanning, Aluminum Alloy AA6063, Parameter Optimization, Resolution, Shutter

1. บทนำ

การวัดขนาดชิ้นงานในกระบวนการผลิตมีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพ และความแม่นยำของผลิตภัณฑ์ เครื่อง Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm) เป็นเครื่องมือที่ให้ความแม่นยำสูง และนิยมใช้ในการตรวจสอบขนาดชิ้นงาน แต่การใช้งาน CMM Arm มักใช้เวลานาน ต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ มีราคาสูง และมีข้อจำกัดด้านความยืดหยุ่น โดยงานวิจัยของ Ksenia Ostrowska และคณะ [1] ที่ศึกษาการเปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องวัดพิกัดแขนกลเสมือนจริงโดยใช้แบบจำลองทางมาตรวิทยาที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ เปรียบเทียบข้อดีแต่ละแบบจำลอง พร้อมทั้งเสนอวิธีการตรวจสอบที่มีความน่าเชื่อถือเพื่อรับรองความถูกต้องของแบบจำลองเสมือนสำหรับงานควบคุมคุณภาพด้วยการวัดพิกัด Adam Gaska และคณะ [2] ศึกษาวิธีการง่ายๆ สำหรับการประเมินความแม่นยำเฉพาะงานของเครื่องวัดพิกัดแขนข้อต่อ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการในงานวิจัยช่วยกำหนดความแม่นยำเฉพาะงานของ AACMM ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเพิ่มขีดความสามารถในการนำอุปกรณ์ไปใช้งานวัดที่หลากหลายมากขึ้น และ Yaowei Sun พร้อมคณะ [3] วิเคราะห์ข้อผิดพลาดของเครื่องวัดพิกัดด้วยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 องศาอิสระที่ยึดหัววัดไว้ ผลการทดลองพบว่า ความเร็วที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 2 มม./วินาที หัววัดควรตั้งฉากกับพื้นผิวมากที่สุด และมีข้อผิดพลาดสูงสุด 0.1979 มม. กรณีศึกษานี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำและนำไปประยุกต์ใช้ AACMM แบบอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมมากขึ้น ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการสแกนสามมิติ (3D Scanning) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น [4–5] เนื่องจากสามารถเก็บข้อมูลพื้นผิวของชิ้นงานได้รวดเร็ว สามารถวัดขนาดชิ้นงานผ่านโปรแกรมได้ และมีความครอบคลุม [6] แต่ความแม่นยำของการสแกนสามมิติขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่มีอยู่ในสองส่วนด้วยกัน คือ Resolution และ Shutter แต่ด้วยวัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตมีความหลากหลาย ซึ่งทำให้การตั้งค่าพารามิเตอร์มีความแตกต่างกันและไม่มีความแม่นยำ เมื่อนำไปวัดหาความผิดพลาดในกระบวนการผลิต

Zainal Mukhriz และคณะ [7] ศึกษาการวิเคราะห์ความแม่นยำของเครื่องสแกน 3 มิติบนวัตถุขนาดเล็ก โดยใช้เครื่องสแกน 3 มิติ GOM II ATOS Triple Scan ในการวัดขนาดของวัตถุขนาดเล็กที่ทำจากโลหะ โดยจะเปรียบเทียบการวัดแบบดิจิทัลจากเครื่องสแกน 3 มิติ กับการวัดโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ โดยพิจารณาชิ้นงานโลหะ 3 ชิ้นที่มีขนาดแตกต่างกันคือ เล็ก กลาง และใหญ่ ผลพบว่าค่าความคลาดเคลื่อน และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) มีความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันตามขนาดชิ้นงาน โดยชิ้นงานขนาดกลางมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด จึงชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการสอบเทียบ การเตรียมพื้นผิว และการควบคุมสภาพแวดล้อม ศักยภาพ และข้อจำกัดของเทคโนโลยีสแกน 3 มิติ สำหรับงานวิศวกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูง Dorota Kustrzycka และคณะ [8] ศึกษาการเปรียบเทียบความแม่นยำของภาพ 3 มิติที่ได้จากเครื่องสแกนประเภทต่างๆ พบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแม่นยำ ได้แก่ ประเภทวัสดุ ประสบการณ์ผู้ใช้งาน เทคนิคการสแกน โดยตรง และโดยอ้อม รวมถึงความสามารถในการทำซ้ำ การสแกนโดยตรงมีความสามารถในการทำซ้ำใกล้เคียงกับการสแกนโดยอ้อม เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานทันตกรรมดิจิทัล และด้วยอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เป็นโลหะที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมต่างๆ [9–11] เพราะสามารถขึ้นรูปได้ง่าย มีคุณสมบัติป้องกันการกัดกร่อน น้ำหนักเบา มีการนำความร้อนดี คงทนต่อสภาพแวดล้อมทั่วไป ไม่มีไม้มีรูพรุนขนาดใหญ่ มีความหนาแน่น มีโครงสร้างที่สม่ำเสมอ และมีพื้นผิวสวยเรียบด้าน มันวาวแบบโลหะด้านๆ มีค่าการสะท้อนแสงประมาณ 60–75% เมื่อเทียบกับกระจกเงา [12–13] คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสแกนวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาดชิ้นงานอะลูมิเนียม AA6063 โดยเปรียบเทียบกับผลการวัดจากเครื่อง CMM Arm

2. วิธีการดำเนินงาน

2.1 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการดำเนินงานวิจัย

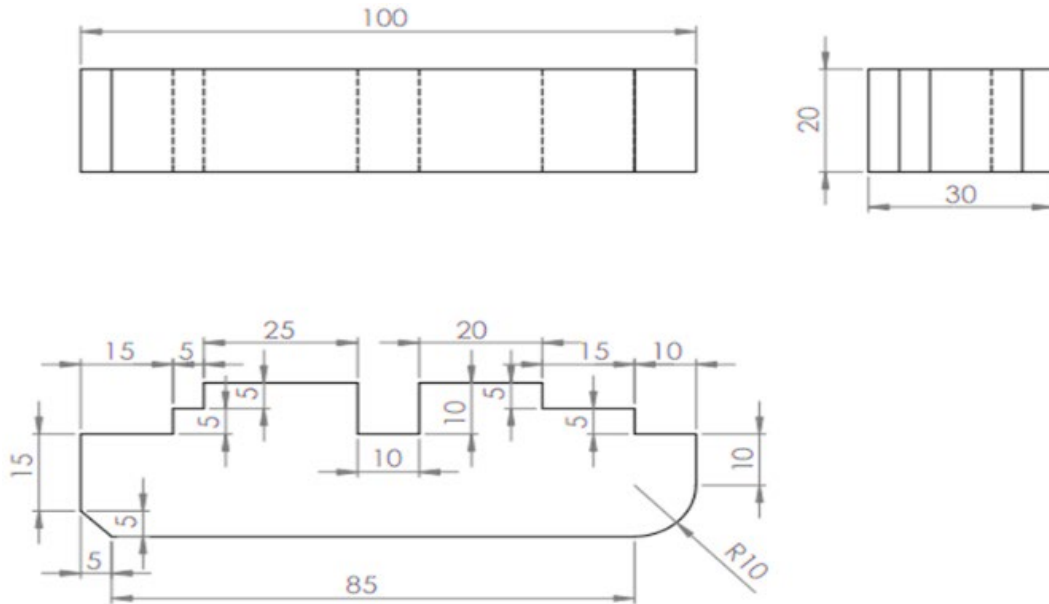
ผู้วิจัยศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานสแกนสามมิติรวมถึงวิธีการใช้งานเครื่องสแกนสามมิติ รุ่น HandySCAN 700 แปรนต์ CREAFORM จากประเทศแคนาดา ดังรูปที่ 1 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บภาพรายละเอียดจากวัตถุ โดยทำการสแกน หรือ เก็บข้อมูล และหลังจากนั้นจะถูกส่งจากเครื่องสแกนเนอร์เข้าไปสู่คอมพิวเตอร์ในลักษณะสามเหลี่ยม (Polygon) หลังจากนั้นแปลงข้อมูลเป็น Surface และนำข้อมูลไปสร้างเป็นชิ้นงาน โดยเครื่องจะยิงเลเซอร์ออกจากเครื่อง และรอเลเซอร์สะท้อนจากวัตถุกลับเข้าไปสแกนเนอร์ ซึ่งตัวเครื่องมีการตั้งค่าหลักอยู่ 2 พารามิเตอร์ คือ Resolution กับ Shutter



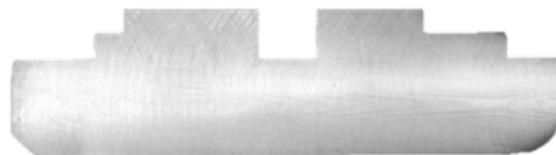
รูปที่ 1 เครื่องสแกนสามมิติ รุ่น HandySCAN 700

2.2 ชิ้นงานทดสอบ

ผู้วิจัยดำเนินการสร้างชิ้นงานทดสอบตามแบบดังรูปที่ 2 ด้วยเครื่องจักรกลอัตโนมัติควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) โดยใช้วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 ซึ่งออกแบบมาให้ชิ้นงานมีรู เพื่อควบคุมตัวแปร และมุ่งเน้นศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์พื้นผิวระนาบ ขอบ และส่วนโค้งภายนอกเป็นหลัก จึงดำเนินการสร้างโดยที่ชิ้นงานทดสอบไม่มีรู ดังรูปที่ 3 ดำเนินการสร้างด้วยเครื่องกัด Computer Numerical Control (CNC)



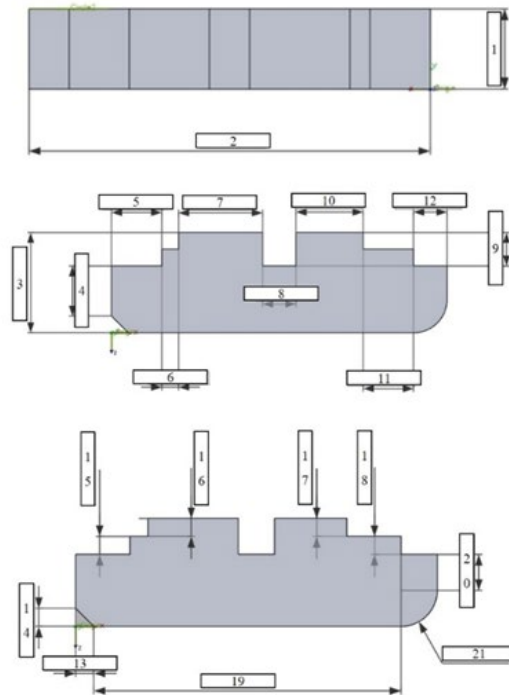
รูปที่ 2 แบบชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3 ชิ้นงานทดสอบอะลูมิเนียมเกรด AA6063

2.3 ออกแบบการทดสอบ

1) ผู้วิจัยออกแบบการเก็บข้อมูลด้วยการตรวจสอบขนาดชิ้นงานจำนวน 21 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 ใช้เครื่องมือ ในการตรวจสอบที่มีความแม่นยำคือ เครื่อง Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm) 6 แกน ในการตรวจวัดขนาด เพื่อใช้ค่าที่วัดได้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบผลของการสแกนสามมิติ โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องสแกนสามมิติที่แตกต่างกันในการทดสอบคือ Resolution 0.2, 0.6, 1 มิลลิเมตร และ Shutter 2, 5, 8 มิลลิวินาที เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องสแกนสามมิติการตั้งค่า Resolution อยู่ในช่วง 0.2–0.8 มิลลิเมตร และค่า Shutter อยู่ในช่วง 2–8 มิลลิวินาที เพื่อให้ครอบคลุมทั้งสภาวะการสแกนที่มีความหนาแน่นของจุดข้อมูลต่ำจนถึงสูง รวมถึงครอบคลุมช่วงเวลาการรับแสงที่เหมาะสมสำหรับพื้นผิวโลหะอะลูมิเนียม AA6063 [14–17] โดยทำงานร่วมกับโปรแกรม Geomagic Control X ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นำไฟล์สแกนเข้าสู่โปรแกรมแล้วนำผลการสแกนวัดขนาดกับไฟล์ CAD ที่วัดได้จากเครื่องมือวัด CMM Arm



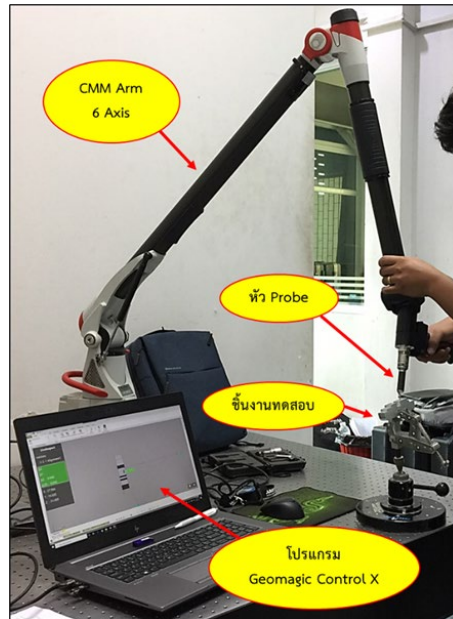
รูปที่ 4 ตำแหน่งทดสอบการวัดขนาดชิ้นงาน

2) การวิเคราะห์ทางสถิติ งานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ข้อมูลผลการทดลองวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab โดยการวิเคราะห์ เพื่อใช้ศึกษาผลของพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาด โดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression Analysis) ใส่ค่าการตอบสนอง (Responses) คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการสแกนแต่ละพารามิเตอร์เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดแบบสัมผัส CMM Arm ซึ่งคำนวณจากค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้จากการสแกนสามมิติและค่ามาตรฐานที่วัดได้จากเครื่อง CMM Arm เป็นไปดังสมการที่ 1 ตัวแปรพยากรณ์แบบต่อเนื่อง Continuous predictors ใส่ค่า Resolution และ Shutter ซึ่งแต่ละปัจจัยกำหนดไว้ 3 ระดับ ได้แก่ Resolution 0.2, 0.6 และ 1.0 มิลลิเมตร กับ Shutter 2, 5 และ 8 มิลลิวินาที จากตำแหน่งการวัดจำนวน 21 ตำแหน่ง เพื่อประเมินผลของปัจจัยหลัก และผลปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ค่า $\alpha = 0.05$ และวิเคราะห์ Response Optimization เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสามมิติวัดอะลูมิเนียมเกรด AA6063 นอกจากนี้ยังใช้แผนภูมิพาเรโต้ เพื่อแสดงแนวโน้มของผลกระทบจากปัจจัยต่างๆ ต่อค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดขนาด และใช้ Boxplot เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลว่ามีความน่าเชื่อถือหรือไม่

$$Error = Dimension_{CMM\ arm} - Dimension_{Scan\ 3D} \quad (1)$$

2.4 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานทดสอบด้วย Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm)

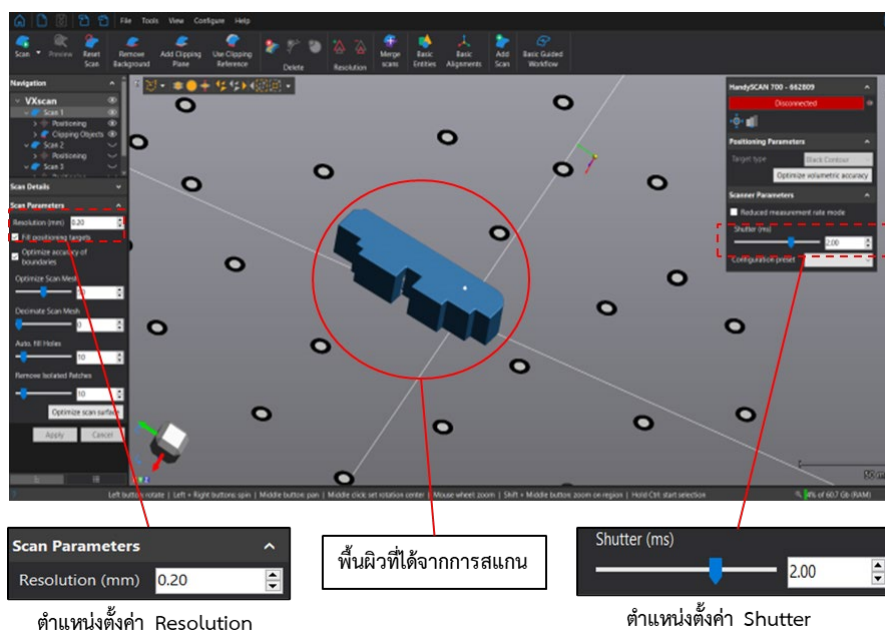
ในการตรวจสอบขนาดลำดับแรกเพื่อหาค่ามาตรฐานที่ใช้ในการอ้างอิงขนาดชิ้นงานเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานสแกนสามมิติที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างกัน โดยใช้เครื่อง Coordinate Measuring Machine Arm (CMM Arm) แบบ 6 แกน โดยตัวเครื่องวัดประเภทนี้ สามารถวัดขนาดชิ้นงานได้อย่างละเอียด และครอบคลุมวัดชิ้นงานได้รอบด้าน มีความละเอียดของเครื่องอยู่ที่ 0.001 มิลลิเมตร มีความแม่นยำสูง และเป็นเครื่องมือวัดที่มีความน่าเชื่อถือ ใช้ระบบแบบสัมผัส (Touch probe) ทำให้มีความแม่นยำที่สูง โดยทำการวัดขนาดตามแบบงาน 21 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3 และทำงานร่วมกับโปรแกรม Geomagic Control X ซึ่งเป็นโปรแกรมใช้ตรวจสอบด้านขนาดโดยเฉพาะ ทำงานภายใต้ห้องปฏิบัติการวัด ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานทดสอบด้วย CMM Arm

2.5 ตรวจสอบขนาดชิ้นงานทดสอบด้วยการสแกนสามมิติ

การสแกนสามมิติในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้เครื่องสแกนสามมิติรุ่น HandySCAN700 ทำงานร่วมกับโปรแกรม VXelements ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการสแกน 3 มิติ เพื่อเก็บข้อมูลในรูปแบบตาข่าย (Mesh) โดยกำหนดการตั้งพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันคือ Resolution 0.2, 0.6 และ 1.0 มิลลิเมตร กับ Shutter 2, 5 และ 8 มิลลิวินาที ดังรูปที่ 6 โดยมีค่าคงที่ คือ Optimize Scan Mesh 50 เปอร์เซ็นต์, Auto Fill Holes 10 เปอร์เซ็นต์ และ Remove Isolated Patches 10 เปอร์เซ็นต์ ทำการสแกนชิ้นงานครบทุกด้านหลังจากนั้นนำไฟล์ STL ที่ได้จากพารสแกนเข้าสู่โปรแกรม Geomagic Control X เพื่อวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนเมื่อเปรียบเทียบกับ CAD ไฟล์ที่ได้จากการวัด CMM arm โดยทำการวัดทั้งหมด 21 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4 หน้าที่ 5



รูปที่ 6 การตั้งพารามิเตอร์ Resolution กับ Shutter

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการทดสอบวัดขนาด CMM Arm

ผลการทดสอบการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบที่ผลิตด้วยวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 ด้วยเครื่องมือวัดแบบสัมผัส 6 แกน (Coordinate Measuring Machine: CMM Arm) ได้ดำเนินการวัดจำนวนทั้งหมด 21 ตำแหน่งบนชิ้นงาน โดยผลการวัดรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 ค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง CMM Arm ในการศึกษาถูกกำหนดให้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิง (Reference Value) สำหรับใช้ในการเปรียบเทียบและประเมินความถูกต้องของผลการวัดจากกระบวนการสแกนสามมิติที่พารามิเตอร์ต่างกันในช่วงตอนถัดไปของการวิจัย

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบวัดขนาดชิ้นงานทดสอบ อะลูมิเนียมเกรด AA6063 ด้วยเครื่อง CMM Arm

ผลการทดสอบวัดขนาด CMM Arm	
Position	Dimension Drawing (mm)
Linear Dim.1	19.972
Linear Dim.2	99.86
Linear Dim.3	29.954
Linear Dim.4	15.05
Linear Dim.5	14.991
Linear Dim.6	5.001
Linear Dim.7	24.836
Linear Dim.8	10.133
Linear Dim.9	10.004
Linear Dim.10	19.873
Linear Dim.11	14.957
Linear Dim.12	10.018
Linear Dim.13	4.899
Linear Dim.14	4.895
Linear Dim.15	5.006
Linear Dim.16	5
Linear Dim.17	4.989
Linear Dim.18	5.008
Linear Dim.19	85.079
Linear Dim.20	10.04
Radial Dim.1	R 9.821

3.2 ผลการทดสอบสแกนสามมิติ

ผลการทดสอบการวัดขนาดชิ้นงานทดสอบที่ผลิตด้วยวัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 ด้วยเครื่องมือวัดแบบสแกนสามมิติที่พารามิเตอร์ต่างกัน 2 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ได้แก่ Resolution 0.2, 0.6 และ 1.0 กับ Shutter 2, 5 และ 8 มิลลิวินาที ทดสอบวัดค่าทั้งหมด 21 ตำแหน่ง และนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดขนาด CMM Arm พบว่า Resolution 0.2 Shutter 2 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.05 มิลลิเมตร, Resolution 0.2 Shutter 5 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.092 มิลลิเมตร, Resolution 0.2 Shutter 8 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.081 มิลลิเมตร, Resolution 0.6 Shutter 2 มีค่าเฉลี่ย

ความคลาดเคลื่อน 0.179 มิลลิเมตร, Resolution 0.6 Shutter 5 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.115 มิลลิเมตร, Resolution 0.6 Shutter 8 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.133 มิลลิเมตร, Resolution 1 Shutter 2 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.454 มิลลิเมตร, Resolution 1 Shutter 5 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.253 มิลลิเมตร, Resolution 1 Shutter 8 มีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 0.316 มิลลิเมตร รายละเอียดข้อมูลการทดสอบเป็นไปดังตารางที่ 2 ถึง 4

ตารางที่ 2 ผลการสแกนสามมิติ Resolution 0.2 วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เปรียบเทียบกับผล CMM Arm

Position	Dimension CMM Arm (mm)	Resolution 0.2 mm					
		Shutter 2 ms		Shutter 5 ms		Shutter 8 ms	
		Dimension	Scan Errors	Dimension	Scan Errors	Dimension	Scan Errors
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Linear Dim.1	19.972	20.168	0.196	20.247	0.275	20.164	0.192
Linear Dim.2	99.86	99.901	0.041	99.916	0.056	99.918	0.058
Linear Dim.3	29.954	29.964	0.01	29.972	0.018	30.003	0.049
Linear Dim.4	15.05	15.048	0.002	15.034	0.016	15.031	0.019
Linear Dim.5	14.991	15.143	0.152	15.137	0.146	15.17	0.179
Linear Dim.6	5.001	5.094	0.093	5.071	0.07	5.036	0.035
Linear Dim.7	24.836	24.808	0.028	24.834	0.002	24.859	0.023
Linear Dim.8	10.133	10.093	0.04	10.086	0.047	10.083	0.05
Linear Dim.9	10.004	10.018	0.014	10.018	0.014	10.027	0.023
Linear Dim.10	19.873	19.88	0.007	19.863	0.01	19.9	0.027
Linear Dim.11	14.957	15.006	0.049	15.09	0.133	15.014	0.057
Linear Dim.12	10.018	10.066	0.048	10.199	0.181	10.12	0.102
Linear Dim.13	4.899	4.871	0.028	4.898	0.001	4.853	0.046
Linear Dim.14	4.895	4.882	0.013	4.892	0.003	4.882	0.013
Linear Dim.15	5.006	4.96	0.046	4.938	0.068	4.84	0.166
Linear Dim.16	5	5.007	0.007	5.005	0.005	5.004	0.004
Linear Dim.17	4.989	4.998	0.009	5	0.011	5.008	0.019
Linear Dim.18	5.008	5.013	0.005	5.012	0.004	5.016	0.008
Linear Dim.19	85.079	84.931	0.148	84.539	0.54	84.783	0.296
Linear Dim.20	10.04	9.987	0.053	9.895	0.145	9.911	0.129
Radial Dim.21	R 9.821	R 9.878	0.057	R 10.005	0.184	R 10.021	0.2
Sum Errors			1.046		1.929		1.695
Average Errors			0.05		0.092		0.081

ตารางที่ 3 ผลการสแกนสามมิติ Resolution 0.6 วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เปรียบเทียบกับผล CMM Arm

Position	Dimension CMM Arm (mm)	Resolution 0.6 mm					
		Shutter 2 ms		Shutter 5 ms		Shutter 8 ms	
		Dimension	Errors	Dimension	Errors	Dimension	Errors
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Linear Dim.1	19.972	20.692	0.72	20.461	0.489	20.554	0.582
Linear Dim.2	99.86	99.896	0.036	99.902	0.042	99.923	0.063
Linear Dim.3	29.954	29.963	0.009	29.996	0.042	29.961	0.007
Linear Dim.4	15.05	15.065	0.015	15.091	0.041	15.059	0.009
Linear Dim.5	14.991	15.39	0.399	15.076	0.085	15.175	0.184
Linear Dim.6	5.001	5.278	0.277	5.017	0.016	5.069	0.068
Linear Dim.7	24.836	24.681	0.155	24.872	0.036	24.843	0.007
Linear Dim.8	10.133	10.08	0.053	10.078	0.055	10.075	0.058
Linear Dim.9	10.004	10.019	0.015	10.021	0.017	10.019	0.015
Linear Dim.10	19.873	19.899	0.026	19.892	0.019	19.865	0.008
Linear Dim.11	14.957	15.159	0.202	15.131	0.174	15.163	0.206
Linear Dim.12	10.018	10.344	0.326	10.279	0.261	10.33	0.312
Linear Dim.13	4.899	4.883	0.016	4.874	0.025	4.823	0.076
Linear Dim.14	4.895	4.88	0.015	4.883	0.012	4.827	0.068
Linear Dim.15	5.006	4.862	0.144	4.996	0.01	5.03	0.024
Linear Dim.16	5	5.01	0.01	5.023	0.023	5.023	0.023
Linear Dim.17	4.989	4.995	0.006	5.005	0.016	4.995	0.006
Linear Dim.18	5.008	5.012	0.004	5.004	0.004	5.019	0.011
Linear Dim.19	85.079	84.02	1.059	84.21	0.869	84.143	0.936
Linear Dim.20	10.04	9.899	0.141	9.97	0.07	9.975	0.065
Radial Dim.21	R 9.821	R 9.957	0.136	R 9.926	0.105	R 9.880	0.059
Sum Errors			3.764		2.411		2.787
Average Errors			0.179		0.115		0.133

ตารางที่ 4 ผลการสแกนสามมิติ Resolution 1 วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AA6063 เปรียบเทียบกับผล CMM Arm

Position	Dimension CMM Arm (mm)	Resolution 1 mm					
		Shutter 2 ms		Shutter 5 ms		Shutter 8 ms	
		Dimension	Errors	Dimension	Errors	Dimension	Errors
		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Linear Dim.1	19.972	21.011	1.039	21.063	1.091	21.089	1.117
Linear Dim.2	99.86	99.891	0.031	99.907	0.047	99.897	0.037
Linear Dim.3	29.954	29.962	0.008	29.968	0.014	29.958	0.004
Linear Dim.4	15.05	15.046	0.004	15.023	0.027	14.969	0.081
Linear Dim.5	14.991	15.238	0.247	15.794	0.803	14.722	0.269
Linear Dim.6	5.001	4.984	0.017	5.279	0.278	4.978	0.023
Linear Dim.7	24.836	24.906	0.07	24.685	0.151	24.904	0.068
Linear Dim.8	10.133	10.038	0.095	10.06	0.073	10.092	0.041
Linear Dim.9	10.004	10.011	0.007	10.023	0.019	10.016	0.012
Linear Dim.10	19.873	19.849	0.024	19.851	0.022	19.809	0.064
Linear Dim.11	14.957	15.581	0.624	15.396	0.439	15.152	0.195
Linear Dim.12	10.018	11.334	1.316	10.491	0.473	10.261	0.243
Linear Dim.13	4.899	4.88	0.019	4.852	0.047	4.86	0.039
Linear Dim.14	4.895	4.851	0.044	4.914	0.019	4.909	0.014
Linear Dim.15	5.006	4.988	0.018	4.866	0.14	4.711	0.295
Linear Dim.16	5	5.05	0.05	5.015	0.015	5.026	0.026
Linear Dim.17	4.989	4.982	0.007	5	0.011	5.002	0.013
Linear Dim.18	5.008	5.016	0.008	4.989	0.019	5.002	0.006
Linear Dim.19	85.079	79.454	5.625	83.576	1.503	84.28	0.799
Linear Dim.20	10.04	9.908	0.132	9.995	0.045	9.979	0.061
Radial Dim.21	R 9.821	R 9.977	0.156	R 9.898	0.077	R 9.886	0.065
Sum Errors			9.541		5.313		3.472
Average Errors			0.454		0.253		0.316

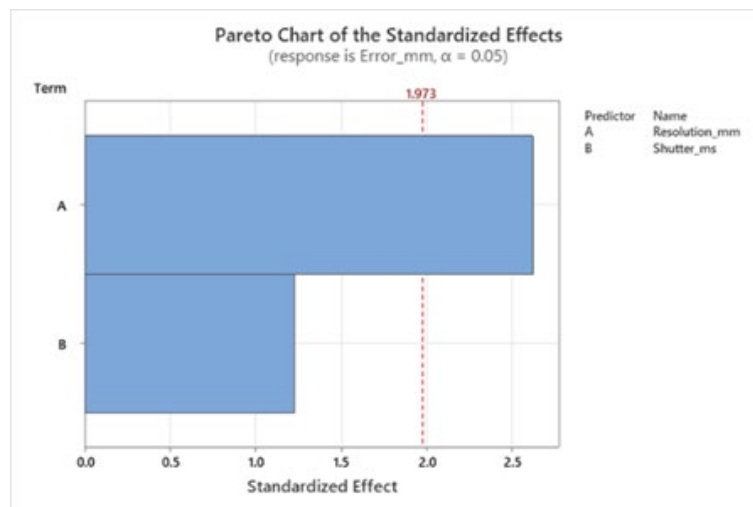
3.3 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบวิเคราะห์ผลการทดสอบผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม Minitab โดยเลือกใช้เครื่องมือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Regression Analysis) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับพารามิเตอร์การสแกนดังสมการที่ 2 จากค่าสัมประสิทธิ์จะพบว่า Resolution ของการสแกนมีค่าสัมประสิทธิ์เป็นบวก แสดงว่าการเพิ่มค่า Resolution มากขึ้นส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มอย่างชัดเจน และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ p-value เท่ากับ 0.010 ในขณะที่ค่า Shutter มีค่า p-value เท่ากับ 0.221 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความคลาดเคลื่อนการสแกนสามมิติ และผล Lack-of-Fit ให้ค่า p-value เท่ากับ 0.764 ซึ่งค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าสมการเชิงคณิตศาสตร์ (Math Equation Model) มีความน่าเชื่อถือเหมาะสมต่อการเปรียบเทียบกับค่าวัดจริงต่อการเกิดความผิดพลาดจากค่าวัด ดังตารางที่ 5

$$\text{Error} = 0.0911 + 0.271 \text{ Resolution} - 0.0169 \text{ Shutter} \quad (2)$$

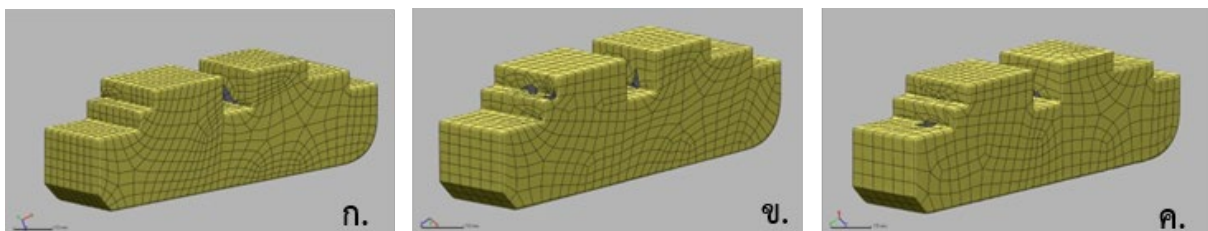
ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	1.8048	0.9024	4.18	0.017
Resolution	1	1.4801	1.4801	6.86	0.010
Shutter	1	0.3248	0.3248	1.51	0.221
Error	186	40.1287	0.2157		
Lack-of-Fit	6	0.7319	0.1220	0.56	0.764
Pure Error	180	39.3969	0.2189		
Total	188	41.9335			

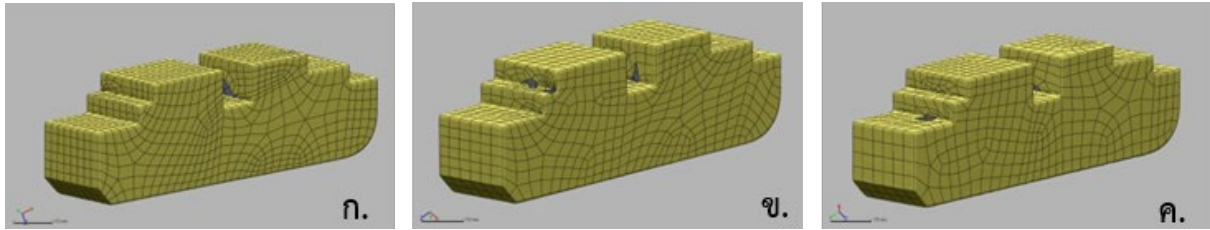


รูปที่ 7 แผนภูมิพาร์โรว์ที่มีผลกระทบต่อการสแกนสามมิติ

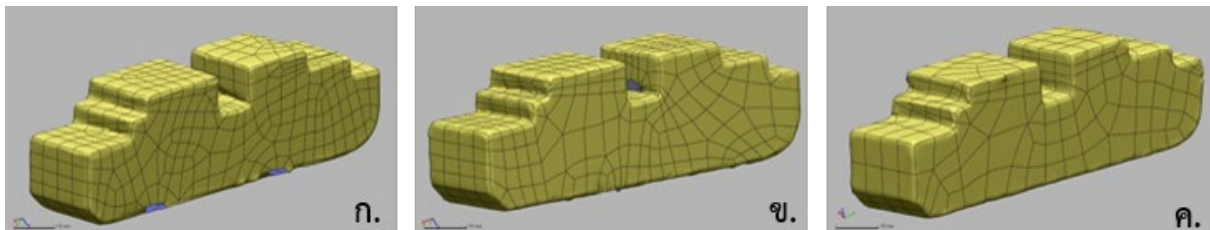
จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าการตั้งค่าพารามิเตอร์ Resolution (A) มีผลต่อค่า Error ในการสแกนสามมิติ เนื่องจากแท่งกราฟ (Bar) เกินกว่าเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวตั้ง ที่มีค่า 1.973 ในขณะที่พารามิเตอร์ Shutter (B) ไม่มีผลต่อค่า Error เนื่องจากแท่งกราฟ (Bar) ไม่เกินกว่าเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวตั้ง ที่มีค่า 1.973 ซึ่งสอดคล้องกันกับผลลัพธ์เชิงสถิติ ANOVA และยังสามารถสอดคล้องกับพื้นผิวที่ได้จากการสแกนสามมิติที่อยู่ในรูปแบบ Surface Fire พื้นผิวของชิ้นงานที่ได้จากการสแกนสามมิติแสดงในลักษณะโครงข่ายตาข่าย (mesh) ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยลงตามค่า Resolution ที่เพิ่มขึ้นของการสแกน โดยความหนาแน่นของตาข่ายน้อยลงส่งผลให้รูปทรงเรขาคณิตบริเวณมุม ขอบ และพื้นผิวโค้ง ไม่ได้ผลตามตัวอย่างต้นแบบการสแกน ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก CMM Arm ดังรูปที่ 8 ถึง 10



รูปที่ 8 ก. Resolution 0.2 Shutter 2, ข. Resolution 0.2 Shutter 5, ค. Resolution 0.2 Shutter 8

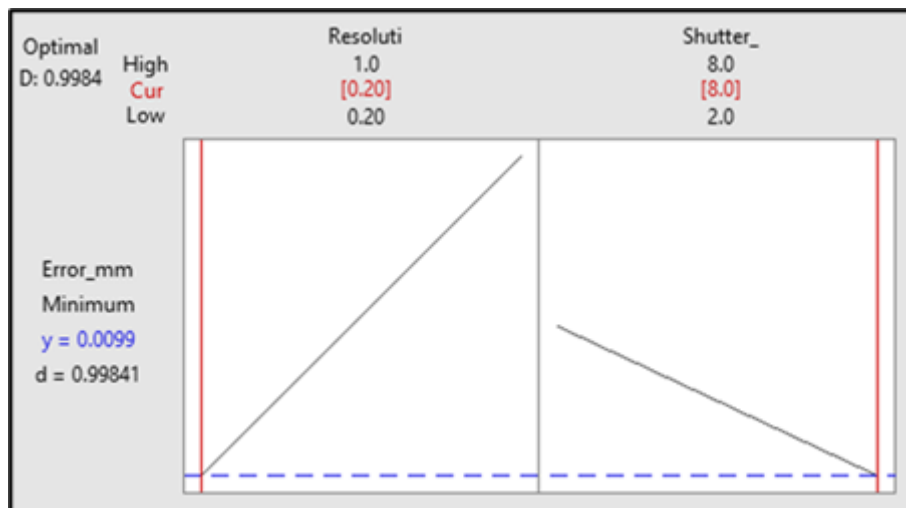


รูปที่ 9 ก. Resolution 0.6 Shutter 2, ข. Resolution 0.6 Shutter 5, ค. Resolution 0.6 Shutter 8

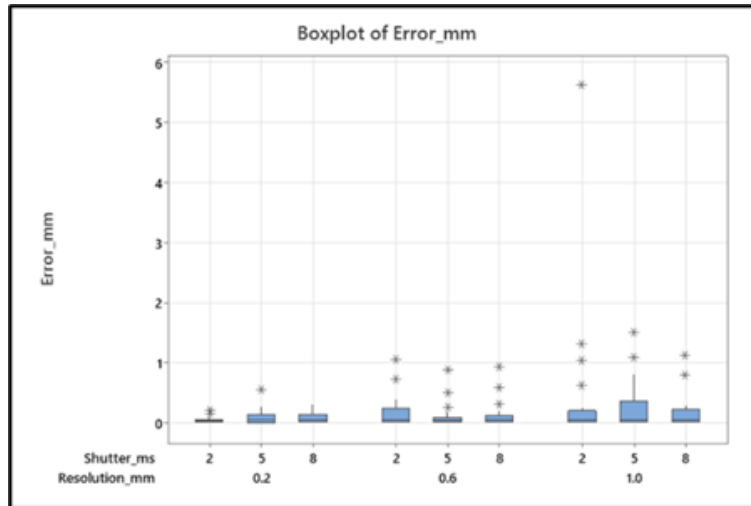


รูปที่ 10 ก. Resolution 1 Shutter 2, ข. Resolution 1 Shutter 5, ค. Resolution 1 Shutter 8

การวิเคราะห์ Response Optimization เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด และเหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติอะลูมิเนียมเกรด AA6063 พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ Resolution เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter เท่ากับ 8 มิลลิวินาที ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่คาดการณ์ต่ำมาก ความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.0099 มิลลิเมตร และมีค่าพึงพอใจ (Desirability) สูงถึง 0.998 แสดงถึงประสิทธิภาพของการเลือกใช้พารามิเตอร์ Resolution 0.2 และ Shutter 8 ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 Response Optimization: Error_mm



รูปที่ 12 Boxplot ของค่าความคลาดเคลื่อนการสแกนสามมิติ

4. อภิปรายผล

การสแกนสามมิติเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับความนิยมอย่างมากในการใช้งานด้านมาตรวิทยา (Metrology) และวิศวกรรมย้อนกลับ เนื่องจากสามารถสร้างข้อมูล Point Cloud ที่มีรายละเอียดสูงสำหรับการวิเคราะห์รูปทรง และขนาดของชิ้นงาน จากการวิเคราะห์ด้วย Response Optimization การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการสแกนสามมิติอะลูมิเนียมเกรด AA6063 พบว่าพารามิเตอร์ที่ให้ความคลาดเคลื่อนต่ำสุด คือ Resolution 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter 8 มิลลิวินาที ซึ่งแนวโน้มจะเห็นได้ว่าเมื่อ Resolution สูงขึ้นส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นตาม แต่ Shutter ยิ่งต่ำลงส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zainal Mukhriz และคณะ ที่พบว่า การสแกนสามมิติมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำ และต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ เช่น การเตรียมผิว การตั้งค่า และสภาพแวดล้อม เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ใกล้เคียงกับค่าที่วัดด้วยเครื่องมือวัดแบบเดิม นอกจากนี้ Kustrzycka และคณะ แสดงให้เห็นว่าความถูกต้องของสแกนขึ้นอยู่กับเทคนิคการสแกน การตั้งค่าการสแกน และชนิดของพื้นผิวของชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาในการนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดกับ CMM Arm ซึ่งจากงานวิจัย Adam Gąska และคณะ จะพบได้ว่าการใช้เครื่องมือวัดประเภท CMM นั้นมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการอ้างอิง และเปรียบเทียบผลกับเครื่องมือวัดอื่นได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสอดคล้องกับแผนภูมิพาเรโต

5. สรุป

ผลของการศึกษาพารามิเตอร์การสแกนสามมิติต่อความคลาดเคลื่อนการวัดขนาดชิ้นงานวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 เปรียบเทียบกับเครื่องวัดพิทช์แบบสัมผัส CMM Arm สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น และการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) พบว่าค่าความละเอียดของการสแกน (Resolution) มีผลต่อความคลาดเคลื่อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.010$) ในขณะที่ค่าเวลาการเปิดรับแสง (Shutter) ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p = 0.221$)

5.2 ผลการทดสอบ Lack-of-Fit ให้ค่า p -value เท่ากับ 0.764 แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสม และสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์การสแกนกับค่าความคลาดเคลื่อนได้อย่างน่าเชื่อถือ

5.3 ผลการวิเคราะห์แผนภูมิพาเรโตสามารถยืนยันว่าพารามิเตอร์ Resolution เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของการสแกนสามมิติ ขณะที่ Shutter ไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญภายในช่วงการทดลองที่กำหนด

5.4 การวิเคราะห์พื้นผิวจากแบบจำลองสามมิติพบว่า Resolution ส่งผลต่อความหนาแน่นของโครงข่ายตาข่าย (Mesh) ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการถ่ายทอดรายละเอียดของรูปทรงเรขาคณิต โดยเฉพาะบริเวณมุม ขอบ และพื้นผิวโค้งของชิ้นงาน

5.5 การวิเคราะห์ Response Optimization พบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด คือ Resolution 0.2 มิลลิเมตร และ Shutter 8 มิลลิวินาที ซึ่งให้ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดประมาณ 0.0099 มิลลิเมตร เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในการสแกนชิ้นงานอะลูมิเนียม AA6063

5.6 การกระจายตัวของข้อมูลจาก Boxplot พบค่าผิดปกติบางตำแหน่ง ซึ่งอาจเกิดจากการสะท้อนและการกระเจิงของแสงบนพื้นผิวอะลูมิเนียม รวมถึงผลของความหยาบผิวที่ส่งผลต่อการตรวจจับแสงของระบบ Structured Light ซึ่งวัสดุอะลูมิเนียม AA6063 มีคุณสมบัติสะท้อนแสงค่อนข้างสูง อาจทำให้เกิดปรากฏการณ์แสงกระเจิง และการสะท้อนแบบผสมเมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบบนพื้นผิวอะลูมิเนียม บางส่วนจะสะท้อนเข้าสู่เซนเซอร์โดยตรง ขณะที่บางส่วนจะกระเจิงไปหลายทิศทาง ทำให้ตำแหน่งของลวดลายแสงที่กล้องตรวจจับได้ไม่ตรงกับตำแหน่งจริงบนพื้นผิว

ทั้งนี้ ผลการวิจัยสามารถประยุกต์ใช้ได้กับระบบสแกนสามมิติที่ใช้หลักการ Structured Light หรือเลเซอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน และเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ไม่มีการพ่นสารลดการสะท้อนบนพื้นผิว

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบคุณคณาจารย์ชาววิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนเครื่องมือ สถานที่ การทำวิจัย และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้ข้อมูล และคำปรึกษาจนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงลงได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Ostrowska, A. Gąska, R. Kupiec, K. Gromczak, P. Wojakowski, and J. Śladek, "Comparison of Accuracy of Virtual Articulated Arm Coordinate Measuring Machine Based on Different Metrological Models," *Measurement*, vol. 129, pp. 320–332, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.10.024.
- [2] A. Gąska, P. Gąska, W. Harmatys, M. Gruza, and J. Śladek, "Simple Method for Articulated Arm Coordinate Measuring Machines Task-Specific Accuracy Assessment," *Measurement: Sensors*, vol. 18, p. 100158, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100158.
- [3] Y. Sun, L. Lu, F. Wu, S. Xiao, J. Sha, and L. Zhang, "Error Analysis of a Coordinate Measuring Machine with a 6-DOF Industrial Robot Holding the Probe," *Actuators*, vol. 12, no. 4, p. 173, Apr. 2023, doi: 10.3390/act12040173.
- [4] Allied Market Research, "3D Scanning Market Statistics and Industry Forecast," Allied Market Research, n.d. [Online]. Available: <https://www.alliedmarketresearch.com/3d-scanning-market> (accessed Jan. 24, 2026).
- [5] Grand View Research, "Asia Pacific 3D Scanning Market Size & Outlook, 2025–2030," Grand View Research, n.d. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/3d-scanning-market/asia-pacific> (accessed Jan. 24, 2026).

- [6] T. Usupan and P. Prempraneerach, “Performance Enhancement Mechanism of Laser Scanner for 3D Surface Reconstruction,” *Frontiers in Engineering Innovation Research*, vol. 16, no. 2, pp. 23–35, 2018.
- [7] Z. Mukhriz, M. Mukhsin, and I. A. Ishak, “Accuracy Analysis of a 3D Scanner on Small Dimension Object,” *Progress in Engineering Application and Technology*, vol. 6, no. 1, pp. 814–824, 2025, doi: 10.30880/peat.2025.06.01.087.
- [8] D. Kustrzycka, T. Marschang, M. Mikulewicz, and W. Grzebieluch, “Comparison of the Accuracy of 3D Images Obtained from Different Types of Scanners,” *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2020, Article ID 8854204, 2020, doi: 10.1155/2020/8854204.
- [9] The Aluminum Association, *International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys*, Arlington, VA, USA: The Aluminum Association, 2018.
- [10] AZoM, “Aluminium 6063 – Specifications, Properties, Classifications and Classes,” AZoM, Sep. 12, 2013. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2812> (accessed Jan. 24, 2026).
- [11] J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1993, pp. 351–416.
- [12] Aluminium Shop Online, “Knowledge Guide for Aluminium Grade 6063–T5 (Aluminium 6063–T5),” [aluminiumshop.net](https://www.aluminiumshop.net), n.d. [Online]. Available: <https://www.aluminiumshop.net/article-detail.html?id=1> (accessed Jun. 21, 2026) (in Thai).
- [13] ASM International Handbook Committee, *ASM Handbook, Volume 5: Surface Engineering*, Materials Park, OH, USA: ASM International, 1994.
- [14] E. R. Eiriksson, J. Wilm, D. B. Pedersen, and H. Aanæs, “Precision and Accuracy Parameters in Structured Light 3–D Scanning,” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL–5/W8, pp. 7–15, 2016.
- [15] T. T. No, S. C. Feng, and J. D. Summers, “Structured Light Scanning Artifact–Based Performance Study,” *Manufacturing Letters*, vol. 35, pp. 873–882, 2023.
- [16] M. E. Polo, A. Cuartero, and A. M. Felicísimo, “Study of Uncertainty and Repeatability in Structured–Light 3D Scanners,” *Sensors*, vol. 19, no. 21, pp. 1–18, 2019.
- [17] R. Leach, S. Giusca, S. Haitjema, and P. Evans, “Mapping and Correcting the Distortion of Structured Light Scanners,” *Precision Engineering*, vol. 72, pp. 543–555, 2021.