



การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน เนื่องจากความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน The Analysis of Hole Drilling Inaccuracy Caused by Positional Displacement

กุลภัสร์ ทองแก้ว^{1*} สุภาพรรณ ไชยประพัทธ์² และ เจริญยุทธ เดชชวายุกุล³
Kunlapat Thongkaew^{1*} Supapan Chaiprapat² and Charoenyut Dechwayukul³

บทคัดย่อ

งานเจาะเป็นกระบวนการตัดชนิดหนึ่งในการผลิตชิ้นงานทั่วไป โดยชิ้นงานเจาะส่วนใหญ่นิยมนำไปใช้เพื่อการประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ตัวอย่างงานเจาะที่ต้องอาศัยความเที่ยงตรงสูง (High Precision Machining) ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ชิ้นส่วนนาฬิกา และชิ้นส่วนคอมพิวเตอรื ในการเจาะชิ้นงานหากเกิดความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจก่อให้เกิดความเสียหายเป็นมูลค่าสูงได้ โดยทั่วไปก่อนเริ่มกระบวนการเจาะ ชิ้นงานถูกจัดวางบนตัวรองรับชิ้นงานหรือฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ซึ่งประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่ง (Locator) และตัวจับชิ้นงาน (Clamp) เพื่อให้มั่นใจว่าก่อนเริ่มต้นกระบวนการเจาะชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องและถูกจับยึดมั่นคงเพียงพอที่จะไม่สั่นไถลในระหว่างกระบวนการ เมื่อไรก็ตามที่ชิ้นงานถูกกำหนดตำแหน่งเบี่ยงเบนไปจากเดิม จะส่งผลให้ตำแหน่งการเจาะผิดพลาดไปด้วย งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งที่สืบเนื่องมาจากความไม่ราบเรียบของพื้นผิวชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน

ทั้งในแง่ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางในการเจาะชิ้นงาน โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต (Geometric Transformation) มาทำการวิเคราะห์ตรวจสอบจับตำแหน่งและการจัดวางของชิ้นงานที่เบี่ยงเบนไปขณะถูกกำหนดตำแหน่ง ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางในการเจาะชิ้นงาน และใช้ข้อมูลนี้เป็นแนวทางในปรับเปลี่ยนตำแหน่งและทิศทางการเจาะของดอกสว่านให้เหมาะสม หรืออาจกำหนดระยะพิคัดเผื่อของชิ้นงานที่นำมาผลิต เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการผลิตต่อไป

คำสำคัญ: การกำหนดตำแหน่ง ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงาน ความคลาดเคลื่อนของการเจาะระยะพิคัดเผื่อ

Abstract

Drilling is a type of common machining process whereby target materials are brought to fit with others in an assembly process. Examples of workpieces

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
³ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
* Corresponding Author, Tel. 08-6698-6969, E-mail: kullapatt@hotmail.com

requiring high precision include automotive, timepiece and PC components. In these cases even a small error can produce costly damage. During the process, the workpiece is put into the fixture which contains a locator and clamps to ensure secured placement. The deviation of positional determination has a significant impact on location accuracy. The research aims to examine the impacts of dimensional inaccuracy determined from uneven surface of the targets, which results in positional and orientation displacement. Geometric transformation approach was analyzed to detect the position and variation of workpiece location through the fixture layout. The outcomes could be applied for predicting positional and directional deviation. Furthermore, the findings could serve as a guidance framework for improving drill bit position and tolerance determination in support of enhanced accuracy and effective productivity.

Keywords: Locating, Workpiece Displacement, Drilling Displacement, Tolerance

1. บทนำ

ถึงแม้กระบวนการเจาะเป็นกระบวนการผลิตขั้นพื้นฐาน แต่เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเจาะมักจะถูกส่งต่อไปยังกระบวนการประกอบ หากการเจาะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นแล้ว จะส่งผลให้เกิดความสูญเสียตามมา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมที่ต้องอาศัยความแม่นยำและเที่ยงตรงสูงในการผลิต เช่น อุตสาหกรรมรถยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ การบินและอวกาศ ผลจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตแม้เป็นเพียงส่วนน้อยแต่อาจก่อให้เกิดความเสียหายเป็นมูลค่าสูงทั้งในแง่ของเวลาและค่าใช้จ่าย สาเหตุของความผิดพลาดในการผลิตอาจมาจากหลายปัจจัยด้วยกันเช่น ผู้ปฏิบัติงาน (Operator) กระบวนการทำงาน (Method) เครื่องจักรอุปกรณ์

(Machine) และชิ้นงาน (Workpiece) สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงานทั้งสิ้น

โดยปกติแล้วจะพบว่าความผิดพลาดของการเจาะประกอบด้วยตำแหน่งและทิศทางการเจาะซึ่งมีสาเหตุมาจากทั้งในขั้นตอนก่อนและระหว่างกระบวนการเจาะ ในขั้นตอนก่อนเริ่มกระบวนการเจาะ ชิ้นงานถูกจัดวางบนฟิกซ์เจอร์ ซึ่งประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับชิ้นงาน เพื่อให้มั่นใจว่าก่อนเริ่มต้นกระบวนการเจาะชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ และถูกจับยึดอย่างมั่นคงเพียงพอที่จะไม่เกิดการสั่นไถลระหว่างการเจาะ ในกระบวนการเจาะนั้น ดอกสว่านจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่โดยอ้างอิงกับระบบพิกัดของเครื่องจักร (Machine Reference System) แต่การประเมินความถูกต้องของตำแหน่งการเจาะชิ้นงานนั้นถูกอ้างอิงกับระบบพิกัดของชิ้นงาน (Workpiece Reference System) ดังนั้นเมื่อไรก็ตามที่ตำแหน่งของชิ้นงานที่ถูกจับยึดเบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็น จะส่งผลให้ตำแหน่งการเจาะผิดพลาดไปด้วย สำหรับความผิดพลาดในระหว่างการเจาะเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุด้วยกันเช่น การสั่นของใบมีดและเครื่องจักร (Tool and Machine Vibration) การโค้งงอของใบมีด (Tool Deflection) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ความผิดพลาดในระหว่างการเจาะมักเป็นสิ่งที่แก้ไขได้ยาก และมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ยากต่อการทำนาย ปัจจุบันผู้ผลิตทำการแก้ไขความผิดพลาดนี้โดยวิธีการใช้เครื่องมือที่สามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง [1] เช่น มีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดชิ้นงานภายในเครื่องจักร และนำข้อมูลเหล่านี้ไปทำการชดเชยตำแหน่งการเจาะชิ้นงานของใบมีดเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการเจาะ แต่วิธีนี้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องมือที่มีราคาสูง งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาถึงความผิดพลาดในขั้นตอนก่อนกระบวนการเจาะ โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานซึ่งทำให้ชิ้นงานมีตำแหน่งเบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็น ฉะนั้นหากได้ทราบถึงรูปแบบความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากการกำหนดตำแหน่ง ผู้ปฏิบัติงานสามารถลดความผิดพลาดนี้ได้โดยการแก้ไขหรือชดเชย

ความผิดพลาดนั้น เพื่อให้ตำแหน่งและทิศทางการเจาะมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น

สาเหตุที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งมี 2 ประการด้วยกันคือ ตัวกำหนดตำแหน่งและลักษณะของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่าสาเหตุหลักคือความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวชิ้นงาน เนื่องจากความผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากตัวกำหนดตำแหน่งมักมีขนาดเล็กและมีโอกาสที่เกิดขึ้นน้อยมาก อีกทั้งอุปกรณ์เหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่มีการควบคุมคุณภาพอย่างเข้มงวดและมีค่าระยะพิทัดเผื่อที่แคบกว่าชิ้นงาน

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวางถึงความผิดพลาดของตำแหน่งการตัดหรือการเจาะ ยกตัวอย่างเช่น Estrems และคณะ [2] ศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการตัดมีความไม่แน่นอน โดยสาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตรส่งผลให้การกำหนดตำแหน่งผิดพลาดและทำให้เมื่อขณะทำการผลิต ชิ้นงานมีการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งและทำให้ชิ้นงานที่ถูกผลิตมีความไม่แน่นอน Wang [3] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ที่อธิบายผลกระทบของความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การกำหนดตำแหน่งในลักษณะที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ตำแหน่งต่าง ๆ บนชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ Cheraghi และคณะ [4] ได้ศึกษาผลกระทบของความแปรปรวนของการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน โดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์และการจำลองแบบในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนตำแหน่งรูเจาะ ผลการวิเคราะห์พบว่าความแปรปรวนในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานส่งผลอย่างมากต่อความคลาดเคลื่อนตำแหน่งรูเจาะ เป็นต้น

จากการสำรวจงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า ยังไม่มีงานวิจัยที่กล่าวถึงผลกระทบของความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวชิ้นงานต่อความผิดพลาดในการเจาะ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของ

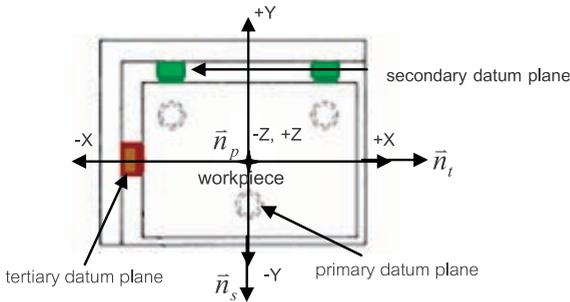
การเจาะบนชิ้นงานซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งที่สืบเนื่องมาจากความไม่ราบเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน โดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ซึ่งผลจากการประเมินสามารถนำไปใช้ นำไปชดเชยตำแหน่งการเจาะชิ้นงานของใบมีด หรือการกำหนดค่าระยะพิทัดเผื่อของผิวชิ้นงานที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถเจาะชิ้นงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น [5] นอกจากนี้ยังส่งผลดีต่อระบบการผลิตทั้งในด้านของการลดจำนวนชิ้นงานเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตทำให้ลดต้นทุนในการจัดซื้อวัสดุ ลดเวลาที่เกิดจากการผลิตชิ้นงานเสียได้อีกด้วย

2. กระบวนการเจาะชิ้นงาน

กระบวนการเจาะ (Drilling Process) เป็นกรรมวิธีการผลิตพื้นฐานของชิ้นงานทั่วไป เช่น เจาะรูร้อยสกรูสำหรับยึดแม่พิมพ์ เจาะรูทำเกลียว เจาะรูสำหรับปลดสลัก เป็นต้น โดยในงานเจาะนี้ใช้เครื่องมือกลที่เรียกว่า เครื่องเจาะ (Drilling Machines) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จับดอกสว่านให้หมุนเจียนกัดชิ้นงานออกตามขนาดที่ต้องการในการผลิตชิ้นงานให้มีความเที่ยงตรงสูง นอกจากจะต้องให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพของเครื่องเจาะแล้ว การกำหนดตำแหน่งและจับยึดชิ้นงานก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน

2.1 หลักการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน

การกำหนดตำแหน่งคือ การกำหนดให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องอยู่ในฟิกซ์เจอร์โดยใช้ตัวกำหนดตำแหน่ง ซึ่งการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานจะเป็นการสร้างระบบพิทัดชิ้นงานสำหรับกระบวนการผลิตในงานวิจัยนี้ได้เลือกทำการศึกษารูปทรงเหลี่ยมพื้นฐาน (Prismatic) ซึ่งเป็นรูปทรงชิ้นงานทั่วไป และวิธีการกำหนดตำแหน่งแบบ 3-2-1 เพื่อเหมาะกับการจับยึดชิ้นงานลักษณะนี้ โดยการกำหนดตำแหน่งแบบ 3-2-1 ประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่งทั้งหมด 6 ตัวสามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 9 ทิศทาง จากทั้งหมด 12

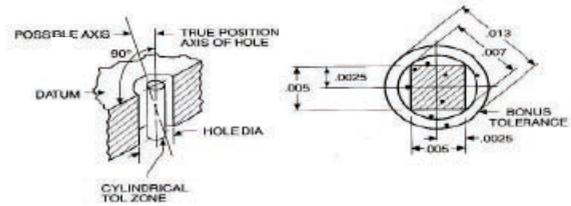


รูปที่ 1 ลักษณะการกำหนดตำแหน่งแบบ 3-2-1

ระดับความเป็นอิสระของชิ้นงาน โดยในการกำหนดตำแหน่งนั้น เริ่มต้นด้วยการวางชิ้นงานบนระนาบอ้างอิง Primary ซึ่งเป็นระนาบขนานกับระนาบ X-Y มีตัวกำหนดตำแหน่งอยู่ 3 ตัว สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 5 ทิศทาง และทำให้เกิดเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย \vec{n}_p กับระนาบอ้างอิง Primary ต่อจากนั้นทำการดันชิ้นงานให้ไปสัมผัสกับระนาบอ้างอิง Secondary ซึ่งเป็นระนาบขนานกับระนาบ Y-Z มีตัวกำหนดตำแหน่งอยู่ 2 ตัว สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 3 ทิศทาง และทำให้เกิดเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย \vec{n}_s กับระนาบอ้างอิง Secondary และสุดท้ายเลื่อนชิ้นงานไปสัมผัสกับระนาบอ้างอิง Tertiary ซึ่งเป็นระนาบขนานกับระนาบ X-Z มีตัวกำหนดตำแหน่งอยู่ 1 ตัว สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 1 ทิศทาง และทำให้เกิดเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย \vec{n}_t กับระนาบอ้างอิง Tertiary ดังรูปที่ 1

2.2 Geometric Dimensioning and Tolerancing

เนื่องจากความไม่แน่นอนในการผลิตชิ้นงานเป็นสิ่งที่ไม่หลีกเลี่ยงได้ยาก ฉะนั้นเพื่อเป็นการควบคุมความไม่แน่นอนนี้ จึงต้องมีมาตรฐานสำหรับการกำหนดระยะการผลิตที่เรียกว่า Geometric Dimensioning and Tolerancing หรือ GD&T ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลของสัญลักษณ์สำหรับแสดงคำอธิบายการเขียนแบบทางวิศวกรรมและการคำนวณสร้างแบบจำลองสามมิติสำหรับเป็นตัวแทนของรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการผลิต ซึ่ง



รูปที่ 2 ลักษณะการกำหนดค่าระยะพิงัดเพื่อของตำแหน่ง [6]

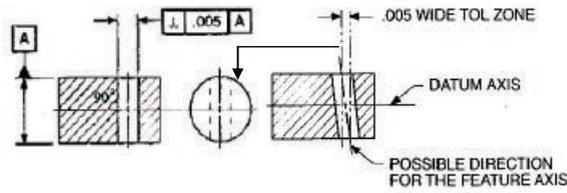
สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ Dimensioning เป็นการกำหนดเฉพาะขนาดชิ้นงานพื้นฐาน และส่วน Tolerancing เป็นการกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนของขนาดชิ้นงานที่ยอมรับ งานวิจัยนี้ได้นำมาตรฐาน GD&T บางส่วนมาพิจารณา โดยกล่าวถึง ANSI Y14.5M [6] ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้อย่างแพร่หลายในการควบคุมความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิต ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการควบคุมความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับการเจาะชิ้นงาน ดังนี้คือ

1. การกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อของตำแหน่ง (Positional Tolerance)

การกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อของตำแหน่ง คือ การกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิม ยกตัวอย่างเช่น ในการเจาะชิ้นงานจะมีการกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ (Cylindrical Tolerance Zone) ซึ่งพิจารณาจากเส้นของแกนเจาะรู ที่อาจเกิดขึ้นได้ (Possible Axis) โดยจุดศูนย์กลางของช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนถูกกำหนดจากเส้นแกนรูเจาะที่ออกแบบไว้ (True Position Axis of Hole) ดังรูปที่ 2 แสดงการกำหนดช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ ขนาด ± 0.007 mm

2. การกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อการตั้งฉากกับพื้นผิว (Perpendicularity Tolerance)

การกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อการตั้งฉากกับพื้นผิว คือการกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบอ้างอิง โดยระนาบและจุดศูนย์กลางระนาบของชิ้นงานจริงต้องตั้ง



รูปที่ 3 ลักษณะการกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อของการตั้งฉากกับพื้นผิว [6]

อยู่ระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบนั้น ยกตัวอย่างเช่น งานเจาะรูตั้งฉากกับชิ้นงานเทียบกับระนาบอ้างอิง A ที่กำหนดช่วงความคลาดเคลื่อน .005 ดังรูปที่ 3 แสดงทิศทางการเจาะชิ้นงานที่เป็นไปได้ (Possible Direction for the Feature Axis)

3. การกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อของความเรียบ (Flatness to Lrance)

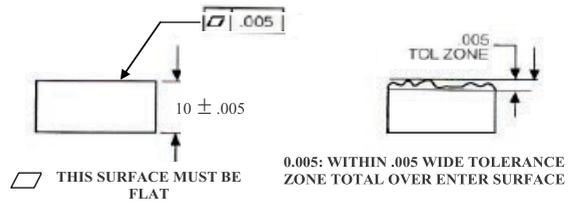
เนื่องจากการผลิตชิ้นงานจะมีความไม่แน่นอนของพื้นผิวเกิดขึ้นเสมอ (ความไม่แน่นอนของผิวงานคือความไม่สม่ำเสมอและความไม่ราบเรียบของผิวชิ้นงาน) ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการผลิตชิ้นงานซึ่งเมื่อนำชิ้นงานที่มีผิวไม่ราบเรียบไปวางบนฟิกซ์เจอร์ทำให้ชิ้นงานเกิดการเบี่ยงเบน ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการผลิตควรมีควบคุมความไม่แน่นอนนี้ โดยการกำหนดช่วงค่าระยะพิงัดเผื่อของความเรียบที่ยอมรับได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4

3. การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของการเจาะบนชิ้นงาน

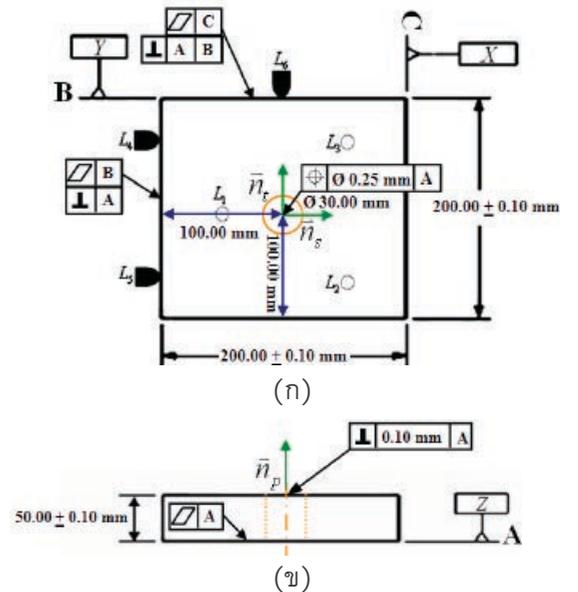
3.1 สมมติฐานและเงื่อนไข

งานวิจัยนี้ได้ทำการประเมินความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางของการเจาะอันเป็นผลสืบเนื่องมาจากความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งซึ่งมีสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังนี้

1. ความไม่ราบเรียบของชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง (Error) วัดจากระยะตั้งฉากเทียบจากระนาบอ้างอิง ณ จุดสัมผัสระหว่าง



รูปที่ 4 การกำหนดช่วงความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน [6]



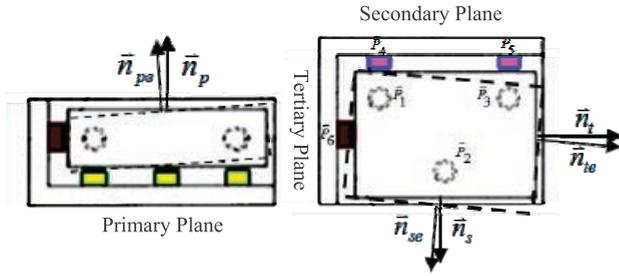
รูปที่ 5 ลักษณะการกำหนดตำแหน่งและการเจาะรูชิ้นงาน

ชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 5

2. ชิ้นงานมีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมพื้นฐาน (Prismatic)
3. การกำหนดตำแหน่งเป็นแบบ 3-2-1 มีการสัมผัสแบบจุดตามตำแหน่งต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 5

4. การเจาะรู ทำการเจาะทะลุผ่านชิ้นงานที่ตำแหน่ง $X=100$ mm และ $Y=100$ mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 mm ในทิศทางเดียวกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \vec{n}_p ดังรูปที่ 5

โดยในรูปที่ 5 ได้แสดงลักษณะลักษณะการกำหนดตำแหน่งและการเจาะรูชิ้นงาน ซึ่งรูป 5(ก) แสดงในมุมมองด้านบน และรูป 5(ข) แสดงในมุมมองด้านหน้า โดย L_1, \dots, L_6 คือ ตำแหน่งตัวกำหนดตำแหน่ง



รูปที่ 6 เวกเตอร์ตั้งฉากกับชิ้นงานในระนาบอ้างอิงต่าง ๆ กรณีเกิดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง

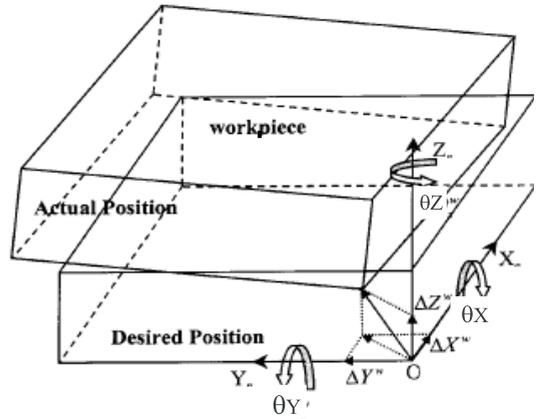
ในส่วนของการวิเคราะห์การเบี่ยงเบนของชิ้นงานซึ่งเกิดจากความไม่ราบเรียบของพื้นผิวชิ้นงานที่ถูกกำหนดตำแหน่ง ผู้วิจัยได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Chaiprapat และ Rujikietgumjorn [7] ซึ่งเป็นสมการที่อาศัยพื้นฐานของหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต (Geometric Transformation) และระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน เพื่อหาความสัมพันธ์ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานในระนาบต่าง ๆ ระหว่างกรณีที่มีและไม่มีผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งดังรูปที่ 6

ผลจากการวิเคราะห์สรุปได้ว่าการเบี่ยงเบนของชิ้นงานประกอบด้วยสองส่วนคือ

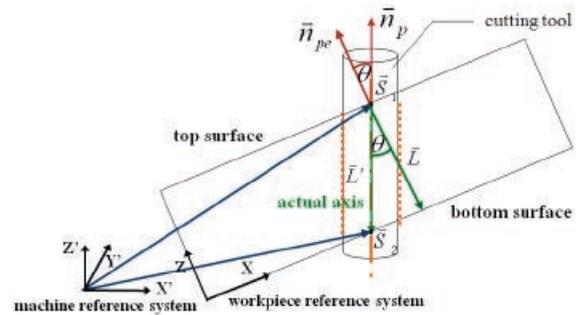
1. การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงาน สามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]$ (ΔX , ΔY และ ΔZ คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงานในแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ) และ
2. การเบี่ยงเบนของการจัดวางชิ้นงานที่ถูกกำหนดตำแหน่ง สามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $[\theta X \ \theta Y \ \theta Z]$ (θX , θY และ θZ คือความผิดพลาดของการจัดวางชิ้นงานเทียบกับแกน X, Y และ Z ตามลำดับ) ดังรูปที่ 7

3.2 การคำนวณความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน

หากนำชิ้นงานที่มีการกำหนดตำแหน่งที่ผิดพลาดเข้าสู่ขั้นตอนการเจาะชิ้นงาน โดยที่กำหนดให้เครื่องมือเจาะทำการเจาะ ณ ตำแหน่งและทิศทางที่ไม่ได้มีการ



รูปที่ 7 ลักษณะการเบี่ยงเบนของชิ้นงานจากความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน [8]



รูปที่ 8 ลักษณะการเจาะชิ้นงานโดยไม่มี การตรวจสอบการเบี่ยงเบนของชิ้นงาน

ขตเซยความผิดพลาดนั้น (ทิศทางเดียวกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \vec{n}_p) ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงานขึ้นได้ (\vec{S}_1, \vec{S}_2 คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะบนพื้นผิวด้านบนและด้านล่างตามลำดับ) ดังรูปที่ 8 ซึ่งแสดงถึงลักษณะการเจาะชิ้นงานโดยไม่มี การตรวจสอบการเบี่ยงเบนของชิ้นงาน ผู้วิจัยได้แบ่งการพิจารณาผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงานออกเป็นสองส่วน คือ

3.2.1 สมการความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน (Positional Deviation)

จากความผิดพลาดในการเจาะชิ้นงานที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยได้วิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง

การเจาะในส่วนพื้นผิวด้านบน \bar{P}_1 จากหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตดังสมการที่ (1) และตำแหน่งการเจาะในพื้นที่ผิวด้านล่างของชิ้นงาน \bar{P} โดยใช้ความสัมพันธ์ของมุมระหว่างเวกเตอร์สองตัว (\bar{n}_p และ \bar{n}_{pc}) และเวกเตอร์ของรูเจาะชิ้นงาน และดังสมการที่ (2) และรูปที่ 9

$$\bar{P}_1 = T(\bar{H}_1) \quad (1)$$

$$\bar{P}_2 = \bar{P}_1 + \bar{L}' \quad (2)$$

โดย $\bar{L}' = \bar{L} / \cos(\theta)$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\bar{n}_p \cdot \bar{n}_{pc}}{\|\bar{n}_p\| \|\bar{n}_{pc}\|} \right)$$

เมื่อ \bar{H}_1, \bar{H}_2 คือตำแหน่งรูเจาะพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างของชิ้นงานที่ควรจะเป็น

\bar{P}_1, \bar{P}_2 คือตำแหน่งรูเจาะที่มีความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างของชิ้นงาน

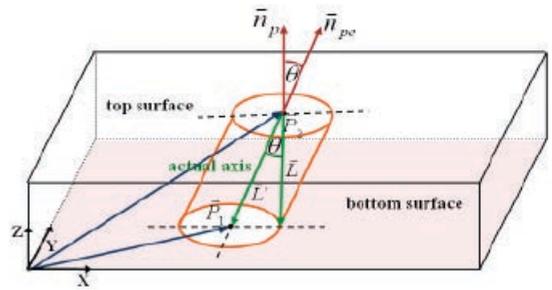
\bar{n}_p, \bar{n}_{pc} คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบ Primary กรณีไม่เกิดและเกิดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง

T คือเมทริกซ์การแปลงรูป (Homogeneous Transformation Matrix) ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z \ \theta X \ \theta Y \ \theta Z]$

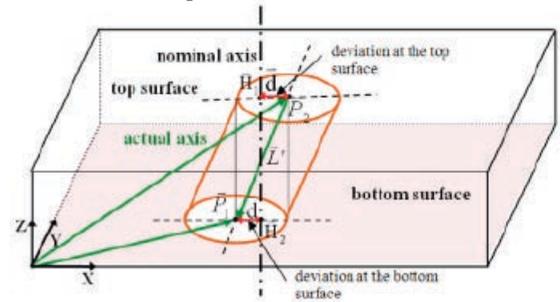
θ คือมุมระหว่าง \bar{n}_p และ \bar{n}_{pc}

\bar{L}, \bar{L}' คือเวกเตอร์ของรูเจาะชิ้นงานกรณีไม่เกิดและเกิดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง

ผลการวิเคราะห์ข้างต้นทำให้สามารถประเมินความผิดพลาดของตำแหน่งการเจาะในส่วนของพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างของชิ้นงานดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงถึงความผิดพลาดสัมบูรณ์ของตำแหน่งการเจาะในรูปของ $|d_i|$ ที่แสดงด้วยคาร์ตัสระยะห่างจากตำแหน่งการเจาะที่ควรจะเป็น (\bar{H}_1, \bar{H}_2) กับตำแหน่งการเจาะที่มีความคลาดเคลื่อน (\bar{P}_1, \bar{P}_2)



รูปที่ 9 ลักษณะการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะชิ้นงาน



รูปที่ 10 ลักษณะความผิดพลาดของตำแหน่งรูเจาะชิ้นงาน

สมการความผิดพลาดของตำแหน่งรูเจาะ

$$|d_i| = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \quad (3)$$

$$\text{โดย } \Delta X_i = |H_{ix} - P_{ix}|$$

$$\Delta Y_i = |H_{iy} - P_{iy}|$$

เมื่อ H_{ix}, P_{ix} คือตำแหน่งรูเจาะที่ควรจะเป็นและตำแหน่งรูเจาะที่มีความคลาดเคลื่อนในแนวแกน X

H_{iy}, P_{iy} คือตำแหน่งรูเจาะที่ควรจะเป็นและตำแหน่งรูเจาะที่มีความคลาดเคลื่อนในแนวแกน Y

$i = 1, 2$ คือตำแหน่งรูเจาะในส่วนพื้นผิวด้านบนและด้านล่างตามลำดับ

และเมื่อนำค่าความผิดพลาดของรูเจาะมาพิจารณารูเจาะที่ผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดของกระบวนการผลิต ความผิดพลาดของตำแหน่งรูเจาะจะต้องมีน้อยกว่าหรือเท่ากับ ของค่าระยะพิถีพิถัน (Tol) ดังสมการ

$$|\bar{d}_i| \leq \left(\frac{\text{tol}}{2}\right) \quad (4)$$

3.2.2 สมการความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน (Orientation Deviation)

สำหรับความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการประเมินความคลาดเคลื่อนการตั้งฉากกับพื้นผิว (Perpendicularity Deviation) ซึ่งเป็นการวัดความตั้งฉากของแกนรูเจาะชิ้นงานเทียบกับระนาบอ้างอิง Primary โดยมีค่าเท่ากันระหว่างระหว่างตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานในระนาบ X-Y ดังรูปที่ 11 และสามารถสรุปเป็นสมการได้ คือ

$$t = \left| P_{1XY} - P_{2XY} \right| \quad (5)$$

โดย $\bar{P}_{1XY} = I(\bar{P}_1)$ และ $\bar{P}_{2XY} = I(\bar{P}_2)$

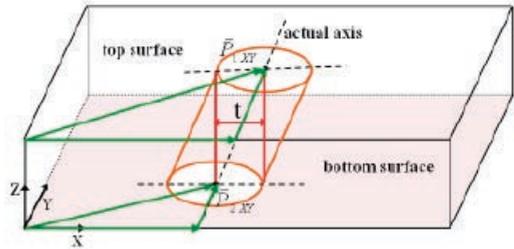
เมื่อ t คือค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของทิศทางการเจาะ $\bar{P}_{1XY}, \bar{P}_{2XY}$ คือความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านบนและด้านล่างของชิ้นงานในระนาบ X-Y

I คือเมทริกซ์การฉายตำแหน่งการเจาะชิ้นงานลงบนระนาบ X-Y (Orthogonal Projection Matrix)

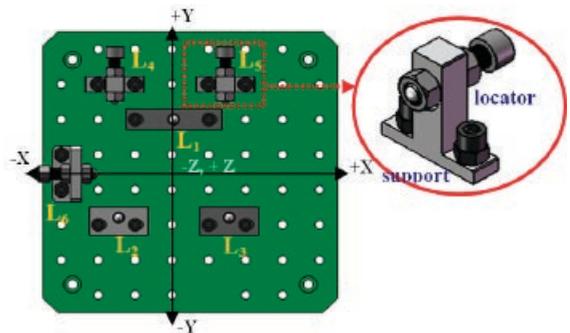
4. การตรวจสอบความถูกต้อง

4.1 การสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองแบบ

จากกระบวนการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของการเจาะบนชิ้นงานด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ โดยมีการออกแบบตามสมมติฐานในหัวข้อ 3.1 ซึ่งในการออกแบบการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานนั้น ผู้วิจัยได้ใช้สกรูแทนตัวกำหนดตำแหน่งเนื่องจากลำตัวของสกรูเป็นเกลียวทำให้สามารถปรับตำแหน่งของการกำหนดตำแหน่งและในส่วนของปลายของสกรูได้ออกแบบให้มีหัวเป็นทรงกลมเพื่อให้มี



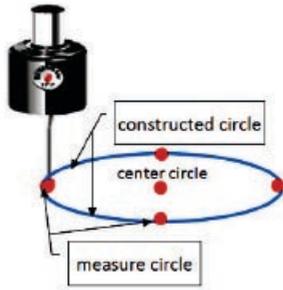
รูปที่ 11 ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน



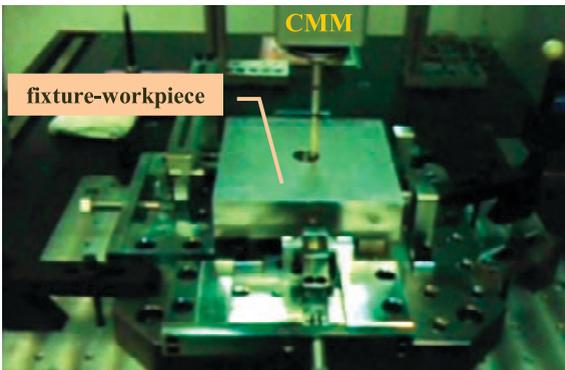
รูปที่ 12 ลักษณะการกำหนดตำแหน่งของชุดฟิกซ์เจอร์

การสัมผัสแบบจุด นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบชิ้นส่วนรองรับตัวกำหนดตำแหน่ง (Supports) ทั้ง 6 ตัว สำหรับติดตั้งบนฐานฟิกซ์เจอร์ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมตันและทำการเจาะรูหลายตำแหน่งที่เรียกว่า Modular Tooling Plate เพื่อให้เกิดการกำหนดตำแหน่งเป็นแบบลักษณะ 3-2-1 ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดตำแหน่งระนาบ 2 จะใช้ตัวกำหนดตำแหน่งตัวที่ 4 และ 5 (L4, L5) ยึดอยู่บนชิ้นส่วนรองรับเพื่อให้ตัวกำหนดวางอยู่บนระนาบ X-Z และสามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระในทิศทางคือ การหมุนรอบแกน +Z -Z และตามแกน +Y ดังแสดงในรูปที่ 12

ผู้วิจัยได้ทำการเลือกเครื่องมือสำหรับการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดโดยใช้เครื่องวัด 3 แกนหรือเรียกว่าเครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) ซึ่งเป็นเครื่องจักรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำการวัดโดยใช้หัวโพรบ (Probe Head) เป็นตัวเคลื่อนไปสัมผัสกับชิ้นงานตรงตำแหน่งที่ต้องการวัดและส่งสัญญาณกลับไปยังตัวควบคุม (Controller) ของเครื่องเพื่อทำการ



รูปที่ 13 วิธีการวัดและประเมินความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะจากเครื่อง CMM



รูปที่ 14 ลักษณะการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน

ประมวลผลออกมาเป็นตำแหน่งตามพิกัดของหัวโพรบ ในขณะที่แต่ละชิ้นงานได้อย่างแม่นยำและมีความละเอียดถึงระดับ $0.2 \mu\text{m}$ นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการกำหนดขั้นตอนการวัดเพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการประเมินด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีรายละเอียดคือ

1. สร้างระบบพิกัดอ้างอิงของชุดทดลอง โดยสร้างจากระนาบอ้างอิงของฐานฟิกซ์เจอร์
2. ติดตั้งตัวกำหนดตำแหน่งทั้ง 6 ตัว และปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ หลังจากนั้นวัดพิกัดของตัวกำหนดตำแหน่งทั้งหมด เทียบกับระบบพิกัดฐานฟิกซ์เจอร์ เพื่อทราบถึงความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง
3. วางชิ้นงานให้สัมผัสกับตัวกำหนดตำแหน่งทั้ง 6 ตัว หลังจากนั้นทำการวัดตำแหน่งและลักษณะการ

จัดวางของชิ้นงาน ($\Delta X \Delta Y \Delta Z \theta X \theta Y \theta Z$) และวัดตำแหน่งรูเจาะ โดยในการวัดตำแหน่งรูเจาะจะต้องนำหัวโพรบของเครื่อง CMM ไปแตะในพื้นที่ผิวด้านข้างของรูเจาะอย่างน้อยสามตำแหน่ง หลังจากนั้นเครื่อง CMM ก็จะทำการประเมินออกมาเป็นขนาดและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของรูเจาะดังรูปที่ 13 และ 14

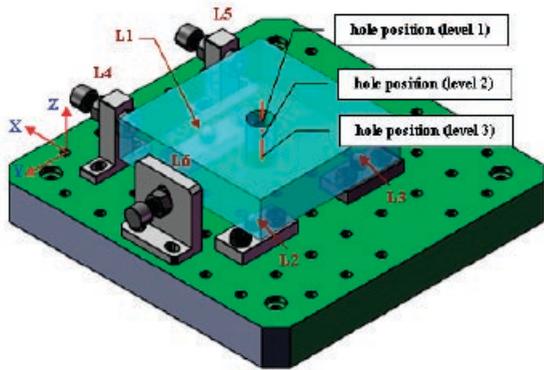
4. ทำการวัดซ้ำในแต่ละครั้งของการทดลองเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากกระบวนการวัด และ
5. นำข้อมูลการวัดที่ได้จากเครื่อง CMM ไปเปรียบเทียบผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการประเมินด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์วิเคราะห์และสรุปผล

4.2 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของเจาะชิ้นงาน

จากการสร้างชุดทดลองและกำหนดขั้นตอนการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการทดลองของลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะอันเป็นผลมาจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนาย ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะ

ในการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้ทำตามขั้นตอนการวัดตามหัวข้อ 4.1 โดยผู้วิจัยได้สร้างระบบพิกัดบนตัวฐานฟิกซ์เจอร์ดังรูปที่ 15 (บริเวณด้านบนซ้ายของรูปภาพ) และทำการวัดพิกัดของตัวกำหนดตำแหน่งเทียบกับระบบพิกัด เมื่อทำการวัดพิกัดของตัวกำหนดตำแหน่งเรียบร้อยแล้วผู้วิจัยได้ทำการวางชิ้นงานและวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ ซึ่งแบ่งการวัดออกเป็นสามระดับดังรูปที่ 15 เพื่อสามารถนำข้อมูลนี้ไปตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะ นอกจากนี้ในการวัดผู้วิจัยได้ทำการวัดซ้ำสามครั้งเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากกระบวนการวัด



รูปที่ 15 ลักษณะการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะ

2. การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะ

ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลจากการวัดที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อน ณ จุดสัมผัสคือ $e_1 = 0.5546$ mm $e_2 = 0.9861$ mm $e_3 = -0.7704$ mm $e_4 = 1.1392$ mm $e_5 = -1.1391$ mm $e_6 = 1.978$ mm (ข้อมูลจากการทดลองที่นำมาวิเคราะห์เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำกรวัดซ้ำ 3 ครั้ง) ไปคำนวณหาข้อมูลการเบี่ยงเบนของตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงานจากงานวิจัยของ Chaiprapat และ Rujikietgumjorn [7] และสามารถคำนวณค่าการเบี่ยงเบนได้คือ หลังจากนั้นนำข้อมูลนี้ไปตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะโดยใช้สมการที่ (1) เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะพบว่าผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง ทำให้มีการเบี่ยงเบนของชิ้นงานทั้งในรูปแบบเลื่อนและหมุนเกิดขึ้น [7] และส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะดังในตารางที่ 1 ซึ่งเป็นการแสดงข้อมูลตำแหน่งรูเจาะที่ได้จากการทดลองและการทำนายในแต่ละแนวแกนของแต่ละระดับการวัดผลจากการวัดพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะใน

แต่ละระดับการวัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 1 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ระดับต่างๆ

Level	Hole Position (mm)			
	Data	X	Y	Z
Level 1	Nominal	-176.0025	-98.0822	79.7566
	Experiment	-176.1607	-98.3378	79.2829
	Analytic	-176.1663	-98.3597	79.2867
	Error (abs)	0.0056	0.0219	0.0038
Level 2	Nominal	-176.0025	-98.0822	60.7566
	Experiment	-176.1042	-98.1464	60.9717
	Analytic	-176.1083	-98.1743	60.9657
	Error (abs)	0.0041	0.0279	0.0060
Level 3	Nominal	-176.0025	-98.0822	36.7566
	Experiment	-176.0285	-97.8886	36.4491
	Analytic	-176.0322	-97.9203	36.4507
	Error (abs)	0.0037	0.0317	0.0016
Average		0.0045	0.0272	0.0038

จากข้อมูลตารางที่ 1 ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของขนาดในการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะทั้งสามระดับ ซึ่งผลของขนาดค่าความแตกต่างสัมบูรณ์ของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะทั้งสามระดับที่ได้จากการทดลองและการทำนายในแนวแกน X มีค่าเฉลี่ย (Average) เท่ากับ 0.0045 mm ในแนวแกน Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0272 mm และในแนวแกน Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0038 mm ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้งสามแนวแกนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0278 mm เมื่อนำค่านี้ไปพิจารณากับค่าระยะพิกัดเผื่อของตำแหน่งรูเจาะดังรูปที่ 4 คือ 0.125 mm (เป็นค่าครึ่งหนึ่งของ 0.25 mm) พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนคิดเป็น 22.24% ของค่าระยะพิกัดเผื่อซึ่งยอมรับได้ ฉะนั้นสรุปได้ว่าการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของการเจาะบนชิ้นงานในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะในกระบวนการผลิตจริงได้

5. การประยุกต์ใช้การทำนายความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน

จากการตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะเป็นผลมาจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งก่อนกระบวนการตัดตามหัวข้อ 4.2 พบว่าการทำนายด้วยการจำลองแบบสามารถใช้แทนการทดลองได้ ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้การทำนายความคลาดเคลื่อนของเจาะชิ้นงาน ผู้วิจัยได้กำหนดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ 2 โดยทำการพิจารณาความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการเจาะที่ $X=100.00$ $Y=100.00$ และ $Z=50.00$ mm ซึ่งมีการกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.25 mm และกำหนดค่าระยะพิงัดเผื่อที่ยอมรับได้ของการตั้งฉากกับระนาบอ้างอิง Primary เท่ากับ 0.15 mm (ดังรูปที่ 5) สามารถแบ่งการวิเคราะห์หรือออกเป็นสองส่วน คือ การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะชิ้นงาน

ตารางที่ 2 ตำแหน่งความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชิ้นงาน

Plane	Locators	Position at the Contact Points of Fixture-workpiec (mm)		
		X	Y	Z
Primary	1	30.0000	100.0000	-0.0198
	2	170.0000	30.0000	0.0403
	3	170.0000	170.0000	-0.0822
Secondary	4	0.0000	30.0112	25.0000
	5	0.0000	169.9394	25.0000
Tertiary	6	99.9619	0.0000	25.0000

5.1 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ (Position Deviation) ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาในส่วนพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างของชิ้นงาน ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะได้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ

plane	Hole Position (mm)			d _i	
	Nominal	X	Y		Z
Top Plane	Nominal	100.0000	100.0000	50.0000	
	Actual	99.8019	99.8782	50.1494	
	Error (Absolute)	0.1981	0.1218	0.1494	0.2325
Bottom Plane	Nominal	100.0000	100.0000	0.0000	
	Actual	100.0890	100.0441	0.1505	
	Error (Absolute)	0.0890	0.0441	0.1505	0.0993

จากตารางที่ 3 พบว่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะของชิ้นงานในส่วนพื้นผิวด้านบนและพื้นผิวด้านล่างมีค่าต่างกันทั้งในแนวแกน X Y และ Z ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งการเจาะในรูปของ |d_i| ซึ่งเป็นค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะในส่วนพื้นผิวด้านบนมีค่าเท่ากับ 0.2325 mm และในส่วนพื้นผิวด้านล่างมีค่าเท่ากับ 0.0993 mm ซึ่งเมื่อวิเคราะห์เชื่อมโยงกับค่าระยะพิงัดเผื่อของรูเจาะที่ยอมรับได้ดังรูปที่ 5 และสมการที่ 4 โดยมีค่าเท่ากับ 0.125 mm พบว่าค่าความผิดพลาดของรูเจาะชิ้นงานด้านบนมีค่าเกินกว่าค่าระยะพิงัดเผื่อที่ยอมรับได้คิดเป็น 86% จากค่าระยะพิงัดเผื่อ ผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งทุกจุดจะมีค่าน้อยกว่าช่วงค่าระยะพิงัดเผื่อของความเรียบผิวชิ้นงาน (ข้อมูลในตารางที่ 3) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1 mm ดังรูปที่ 5 ก็ยังส่งผลให้มีค่าความผิดพลาดของการเจาะชิ้นงานได้ดังตัวอย่างในตารางที่ 3 เช่น ในระนาบ Primary ค่าความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีค่าน้อย แต่ค่าความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดที่ 3 มีค่ามาก ทำให้ความผิดพลาดในระนาบ Primary นี้มีการหมุนและทำให้เกิดความผิดพลาดในการเจาะชิ้นงานเพิ่มขึ้นนั้นในการเจาะชิ้นงานหากไม่มีการตรวจสอบความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับ

ชิ้นงานอาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งรูเจาะและมีความผิดพลาดในการเจาะชิ้นงานเกิดขึ้น ดังงานวิจัยของ Cheraghi และคณะ [4] ที่ทำการศึกษาผลกระทบของความแปรปรวนในการกำหนดตำแหน่งลักษณะ 3-2-1 พบว่าความแปรปรวนในการกำหนดตำแหน่งมีผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ

5.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะ

5.2.1 ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะ

ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะ ผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่ประเมินกับค่าระยะพิทักต์เพื่อที่ยอมรับได้ของการตั้งฉากกับพื้นผิวระนาบ X-Y (ระนาบอ้างอิง A) ดังรูปที่ 5 ผลการวิเคราะห์พบว่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ของทิศทางการเจาะในรูปของ t (ดังสมการที่ 5) มีค่าเท่ากับ 0.1212 mm (ข้อมูลจากตารางที่ 4) ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระยะพิทักต์เพื่อที่ยอมรับได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.10 mm ฉะนั้นหากนำชิ้นงานที่มีความไม่ราบเรียบของพื้นผิวไปจับยึดเพื่อทำการเจาะ ส่งผลให้มีความผิดพลาดเกิดขึ้น นอกจากนี้หากนำชิ้นงานที่ถูกเจาะไปประกอบกับชิ้นงานอื่นอาจไม่สามารถประกอบชิ้นงานเข้าด้วยกันได้

จากการทำนายความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน พบว่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะมีค่าน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ เนื่องจากการเจาะชิ้นงานเป็นการตั้งฉากกับพื้นผิวระนาบ X-Y ฉะนั้นความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะจะขึ้นอยู่กับความเบี่ยงเบนในระนาบ Primary เท่านั้น [9] และในผลจากการประเมินยังพบว่าการเบี่ยงเบนของชิ้นงานในแนวแกน Z มีค่าน้อย (โดย $\theta_X = 0.0033$ $\theta_Y = -0.0057$ และ $\theta_Z = 0.0009$ rad) ดังนั้นหากมีการเจาะรูแบบทะลุผ่านชิ้นงาน ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะก็จะไม่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนต่อตำแหน่งรูเจาะด้านล่างมากนัก แต่หากมีการเจาะรูไม่ทะลุผ่านชิ้นงาน ระยะห่างระหว่างการกำหนดตำแหน่งรูเจาะเริ่มต้นและสุดท้าย (ΔZ) อาจส่งผลต่อความลึกของรูเจาะที่มีขนาดไม่เป็นไปตามที่ต้องการเนื่องจาก

ชิ้นงานมีการเบี่ยงเบน ซึ่งสิ่งนี้เป็นสิ่งที่ควรคำนึงถึงอีกประการหนึ่งด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4 ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะที่ความลึกต่างๆ กัน

Thickness (mm)	Hole Position Displacement (mm)			Difference (Absolute)
	Axis	Top Plane	Bottom Plane	
10	X	100.0316	100.0890	0.0529
	Y	100.0109	100.0441	0.0332
	Perpendicularity Deviation (t)			0.0197
20	X	99.9742	100.0890	0.1148
	Y	99.9777	100.0441	0.0664
	Perpendicularity Deviation (t)			0.0484
30	X	99.9168	100.0890	0.1722
	Y	99.9446	100.0441	0.0975
	Perpendicularity Deviation (t)			0.0747
40	X	99.8593	100.0890	0.2297
	Y	99.9114	100.0441	0.1327
	Perpendicularity Deviation (t)			0.0970
50	X	99.8019	100.0890	0.2871
	Y	99.8782	100.0441	0.1659
	Perpendicularity Deviation (t)			0.1212

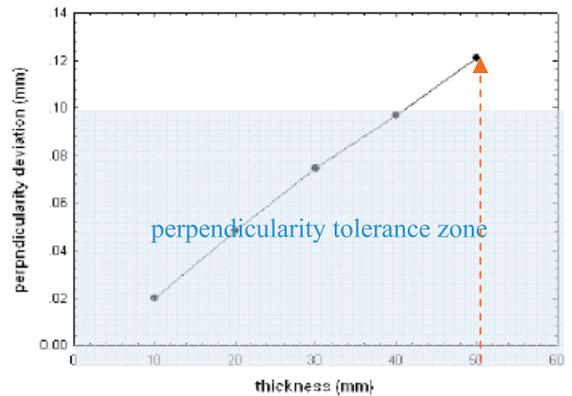
นอกจากนี้หากต้องการลดความผิดพลาดที่เกิดจากการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน มีงานวิจัยหลายชิ้นงานที่ทำการศึกษาลักษณะการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น Jiang และ Cheraghi [10] ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาการระยะพิทักต์เพื่อของรูปทรงที่เหมาะสมที่ทำให้การเบี่ยงเบนของตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงานน้อยที่สุด โดยใช้จุดศูนย์กลางของรูเจาะทั้งพื้นผิวด้านบนและด้านล่างเป็นตัวชี้วัด Wang [3] ได้ศึกษาผลกระทบของความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งที่ส่งผลต่อการเจาะชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ พบว่าหากมีความแปรปรวนในการกำหนดตำแหน่งลักษณะการกระจายตัวของความคลาดเคลื่อนตำแหน่งรูเจาะ ณ ตำแหน่งต่างๆ มีลักษณะและทิศทางที่ไม่เหมือนกัน ฉะนั้นในการกำหนดช่วงค่าระยะพิทักต์เพื่อของการเจาะรูเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการผลิต จะต้อง

คำนึงถึงตำแหน่งที่จะทำการเจาะชิ้นงานด้วย โดยในการกำหนดค่าความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชิ้นงานนั้น ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความผิดพลาดของชิ้นงานที่ยอมรับได้ด้วย ซึ่งตามกฎทั่วไป ค่าความผิดพลาดของฟลักซ์เจอร์จะต้องมีค่าระหว่าง 20-50% ของค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของชิ้นงานที่ถูกผลิต [11] และความถูกต้องแม่นยำของการตัดชิ้นงานจะต้องสูงกว่า 20-35% ของค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของชิ้นงานที่ถูกผลิต [5]

5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะกับความลึกในการเจาะ

จากการประเมินความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะพบว่าปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะคือความลึกในการเจาะชิ้นงาน ฉะนั้นผู้วิจัยจึงได้นำสมการที่ (5) มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะต่อความลึกของรูที่เจาะ โดยสมมุติค่าความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่เกิดจากความไม่แน่นอนของพื้นผิวชิ้นงานดังแสดงในตารางที่ 4 และทำการพิจารณาความลึกของการเจาะเป็น 5 ช่วง คือ 10.00 20.00 30.00 40.00 และ 50.00 mm ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะต่อความลึกของการเจาะสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของรูที่เจาะเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 16 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วรูที่มีความลึกมาก กว่าจะถูกกำหนดให้มีระยะพิทัดเผื่อที่กว้างกว่ารูที่มีความลึกน้อยกว่า เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Cheraghi และคณะ [4] ทำการทดลองและวิเคราะห์ปัจจัยของความหนาของชิ้นงานที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนตำแหน่งชิ้นงานโดยมีผลกระทบในรูปแบบบวกคือ หากพื้นผิวของระนาบ Primary มีความผิดพลาดเพิ่มขึ้น ความหนาของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการผลิตสูงขึ้นเช่นกัน

และเมื่อนำความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงานในรูปของการตั้งฉากกับพื้นผิวระนาบ X-Y ใน



รูปที่ 16 ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะกับความหนาของชิ้นงาน

แต่ละความหนาของชิ้นงาน (ชิ้นงานเจาะทะลุ) ซึ่งเปรียบเสมือนกับความลึกในการเจาะชิ้นงาน ไปพิจารณากับระยะพิทัดเผื่อที่ยอมรับได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.10 mm พบว่าความหนาของชิ้นงานที่ 10 20 30 และ 40 mm อยู่ในช่วงค่าระยะพิทัดเผื่อ แต่ความหนาของชิ้นงานที่ 50 mm มีค่าเกินช่วงค่าระยะพิทัดเผื่อดังตารางที่ 5 ซึ่งโดยปกติแล้วในการกำหนดค่าระยะพิทัดเผื่อจะต้องพิจารณาปัจจัยซึ่งประกอบ 3 อย่างคือ 1) ลักษณะการใช้งานของชิ้นงานที่ถูกผลิต เช่น การผลิตชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำในการผลิตสูง ฉะนั้นค่าระยะพิทัดเผื่อก็จะแคบ 2) การเกิดความผิดพลาดจากเครื่องจักรและผู้ปฏิบัติงาน และ 3) ลักษณะทางเรขาคณิตของชิ้นงาน เช่น ชิ้นงานมีรูปทรงไม่สมมาตรทำการจับยึดชิ้นงานยาก หรือชิ้นงานมีขนาดใหญ่ทำให้การผลิตมีความผิดพลาดมากกว่าขนาดเล็กก็จะต้องกำหนดค่าระยะพิทัดเผื่อที่กว้างขึ้น ฉะนั้นในการกำหนดค่าระยะพิทัดเผื่อของรูเจาะปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ด้วย

6. สรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของการเจาะบนชิ้นงานเนื่องจากความผิดพลาดในการกำหนด



ตำแหน่งชิ้นงานที่สืบเนื่องมาจากความไม่ราบเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน ในขั้นตอนก่อนกระบวนการเจาะ โดยจากการศึกษาได้สมมุติให้การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง สามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]$ และการเบี่ยงเบนของการจัดวางชิ้นงานสามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $[\theta X \ \theta Y \ \theta Z]$ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะจะมีลักษณะการเคลื่อนตำแหน่งไปทุกส่วนในทิศทางเดียวกัน จากลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะนี้ ผู้วิจัยสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของการเจาะได้ทั้งในส่วน of ตำแหน่งและทิศทางในการเจาะชิ้นงาน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์พบว่า หากมีการเบี่ยงเบนของชิ้นงานทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งการเจาะชิ้นงานในส่วนพื้นผิวด้านบนและล่างที่แตกต่างกัน นอกจากนี้หากมีการกำหนดทิศทางในการเจาะตั้งฉากกับระนาบใด การเบี่ยงเบนของระนาบนั้นก็จะเป็นสาเหตุหลักที่ส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งและทิศทางการเจาะของดอกสว่าน หรือกำหนดระยะพิงกัดเผื่อของชิ้นงานที่นำมาผลิตให้เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในการผลิตต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG530153S ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] V. Srivatsan, R. Katz, and D. Dutta, "Fixtureless sensor standoff control for high-precision dimensional inspection of freeform part," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 129, pp.172-179, 2007.

[2] M. Estrems, H.T. Sanchez, and F. Faura, "Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 384-390, 2003.

[3] Y.M. Wang, "Tolerance analysis for fixture layout design," *Assembly Automation*, vol. 22, pp. 153-162, 2002.

[4] S.H. Cheraghi, W. Liu, and G. Weheba, "An examination of the effect of variation in datum target on part acceptance," *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, vol. 45, pp. 1037-1046, 2005,

[5] Y. Kang, Y. Rong, and J.C. Yang, "Computer-aided fixture design verification part 2. tolerance analysis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 836-841, 2003,

[6] L.W. Foster, *GEO-METRICS III*, USA: Addison-Wesley, 1994, p. 38-75.

[7] S. Chaiprapat and S. Rujikietgumjorn, "Resultant geometric variation of a fixtured workpiece Part I: a simulation, Songklanakarin," *Journal Science Technology*, vol. 28, pp. 181-190, 2006b,

[8] B. Li and S.N. Melkote, "Fixture clamping force optimisation and its Impact on workpiece location accuracy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, pp. 104-113, 2001.

[9] S. Chaiprapat and S. Rujikietgumjorn, "Modeling of positional variability of a fixtured workpiece due to locating errors," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, pp. 724-731, 2007.

[10] G. Jiang and S.H. Cheraghi, "Evaluation of



3-D feature relating positional error,” *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, vol. 25, pp.284-292, 2001.

[11] W. Wattanuchariya, “Workholding device,” (20 December 2008) [online]. Available: <http://www.ic.cmu.edu/wattnuchariya/toolengineering/workholding-device.pps>