



การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานที่ถูกจับยึด
ด้วยตัวจับชิ้นงาน ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด

**Displacement evaluation of cutting positions on a fixtured workpiece
prior to machining**

กุลภัสร์ ทองแก้ว

Kullapat Thongkaew

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมและระบบ
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Industrial and Systems Engineering
Prince of Songkla University**

2553

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

(1)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานที่ถูก
 จับยึดด้วยตัวจับชิ้นงาน ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด

ผู้เขียน นางสาวกุลภัสร์ ทองแก้ว

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์) (รองศาสตราจารย์ สมชาย ชูโณม)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพรณ ไชยประพัทธ์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภิสพร มีมงคล)

.....กรรมการ
 (ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์)

บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้
 เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยตัวจับชิ้นงาน ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด
ผู้เขียน	นางสาวกุลภัสร์ ทองแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการและระบบ
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

ในกระบวนการผลิตที่ต้องอาศัยความเที่ยงตรงสูง (precision machining) เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ แม่พิมพ์ และคอมพิวเตอร์ ผลจากความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจก่อให้เกิดความเสียหายเป็นมูลค่าสูง ก่อนเริ่มกระบวนการผลิตชิ้นงานถูกจับยึดบนเครื่องจักรด้วยฟิกซ์เจอร์ ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการควบคุมคุณภาพของชิ้นงาน หากตำแหน่งชิ้นงานเบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็น ตำแหน่งการตัดก็จะผิดพลาดไปด้วย งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ โดยแบ่งการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือ 1. การประเมินในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน ซึ่งผู้วิจัยได้นำหลักการการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต (geometric transformation) มาทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจจับตำแหน่ง (position) และลักษณะการจัดวาง (orientation) ของชิ้นงานที่เบี่ยงเบนไปในขณะที่วางอยู่ในฟิกซ์เจอร์ และ 2. การประเมินในขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน ได้นำระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาทำการวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงานที่มีสาเหตุมาจากแรงในการจับยึด ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากงานวิจัยแสดงถึงลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานตามเส้นทางการเดินใบมีดที่ได้ออกแบบไว้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนที่ประเมินได้นี้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบตำแหน่งและทิศทางการตัดของใบมีดให้สอดคล้องกับความคลาดเคลื่อนนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำและเป็นแนวทางในการกำหนดระยะพิคัดเพื่อที่มีประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตต่อไป

Thesis Title Displacement evaluation of cutting positions on a fixtured workpiece prior to machining
Author Ms. Kullapat Thongkaew
Major Program Industrial and Systems Engineering
Academic Year 2010

ABSTRACT

Errors even of very small fraction in a precision manufacturing process could cause significant losses. Fixturing workpiece is an important procedure as it plays a crucial role in workpiece quality control. Whenever the actual workpiece position is displaced from its nominal position, machining errors are expected. This research aims to develop a mathematical approach to assess cutting deviation of a fixtured workpiece prior to machining. Geometric transformation was employed to capture rigid workpiece movements as results of locating errors. Local deformation exerted by clamping forces was subsequently analyzed by a finite element method. Displacement of surface coordinates on the workpiece as influenced by both locating and clamping errors is clearly shown. Without correction measures, quality of machined features would be impaired. Results from this research can be used to redesign cutting tool paths to accommodate such displacement and hence, increase feature accuracy. In addition, a more effective tolerancing system can also be established.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณยิ่งสำหรับ ผศ.ดร.สุภาพรชน ไชยประพัทธ์ และ ผศ.ดร.เจริญยุทธ เดชวายุกุล ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.สมชาย ชูโณม ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล และ ดร.จิรวรรณ คล้อยภยันต์ ผู้ให้คำปรึกษาและข้อคิดอันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยในการเขียนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่อนุเคราะห์ทุนศิษย์กัณฑ์ในการดำเนินงานวิจัยและทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายการเดินทางไปเสนอผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG530153S ที่ให้การสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ในการค้นคว้าทำวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้อนุเคราะห์ทุนสนับสนุนเพิ่มเติมในการดำเนินงานวิจัย พร้อมการให้คำแนะนำที่ดีในการศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับทำวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ศูนย์พัฒนาเทคโนโลยีการผลิต Production Technology Development Center (PT) สถาบันไทย เยอรมัน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือสำหรับทำวิจัยวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ แผนกช่างกลโรงงาน สถาบันพัฒนาฝีมือแรงงานภาค 12 สงขลา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือสำหรับทำวิจัยวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณความดีทั้งหมดจากการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้แต่คุณพ่อคุณแม่ ที่ให้การดูแลเลี้ยงดูเป็นอย่างดี ครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้และปลูกฝังคุณธรรม และเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาปริญญาโท มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

กุลภัสร์ ทองแก้ว

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการภาพประกอบ	(9)
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจสอบเอกสาร	6
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	10
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	11
2 ทฤษฎี	12
2.1 กระบวนการผลิตชิ้นงาน	12
2.2 GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing)	24
2.3 หลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต (geometric transformation)	30
2.4 ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz's contact theory)	32
2.5 ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)	36
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
3.1 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ในงานวิจัย	42
3.2 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการตัด	44
3.3 การสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองแบบ	62
3.4 การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด	66
4 ผลการวิจัย	69
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนายความคลาดเคลื่อน ของตำแหน่งการตัด	69

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การประยุกต์ใช้การทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบน ชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์โดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์	78
4.3 การชดเชยเส้นทางเดินไปมีด	85
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย	89
5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก ผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด	97
ภาคผนวก ข การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด โดยใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc	109
ภาคผนวก ค แบบของส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับงานวิจัย และการสร้างชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดแรงที่กระทำกับชิ้นงาน	117
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	123
ประวัติผู้เขียน	130

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์	2
3-1	คุณสมบัติของชิ้นงาน ตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึด	61
4-1	พิกัดของตัวกำหนดตำแหน่ง	70
4-2	พิกัดของตัวจับยึด และแรงที่กระทำกับชิ้นงาน	71
4-3	พิกัดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชิ้นงาน	79
4-4	พิกัดและแรงในการจับยึดชิ้นงาน	79
4-5	ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในแต่ละแนวแกน	82
4-6	ตัวอย่างการเขียน CNC code ของเส้นทางการเดินใบมีด	86

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
1-1	การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด	3
1-2	สาเหตุที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการผลิตชิ้นงาน	4
1-3	ปัจจัยจำเป็นที่ต้องคำนึงสำหรับการออกแบบฟิกซ์เจอร์	5
1-4	ลักษณะแบบจำลองระหว่างฟิกซ์เจอร์และชิ้นงาน	10
2-1	องค์ประกอบในการผลิตชิ้นงาน	13
2-2	ระดับความเป็นอิสระของชิ้นงาน	14
2-3	การกำหนดตำแหน่งระนาบ 1	15
2-4	การกำหนดตำแหน่งระนาบ 2	16
2-5	การกำหนดตำแหน่งระนาบ 3	16
2-6	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน	21
2-7	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่ง	22
2-8	แสดงลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานที่เกิดจากตัวจับยึด	23
2-9	การบอกขนาดของชิ้นงานโดยใช้ feature control frame	25
2-10	การแบ่งชนิดของการกำหนดลักษณะระยะระยะพิกัดเผื่อ	26
2-11	ค่าคลาดเคลื่อนและความหยابของผิวงานที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการผลิตชิ้นงาน	27
2-12	กการกำหนดช่วงความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน	28
2-13	การกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน	28
2-14	การพิจารณาความคลาดเคลื่อนการตั้งฉากกันของพื้นผิว	29
2-15	แสดงการพิจารณาความคลาดเคลื่อนการขนานกันของพื้นผิว	30
2-16	ลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุตามหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ที่มีแรงกระทำตามแนวแกน z	33
2-17	ลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุตามหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ที่มีแรงกระทำตามแนวแกน r	35

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2-18	ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ชิ้นส่วน	36
2-19	ลักษณะเอลิเมนต์ทรงหกหน้าและทรงสี่หน้า	37
2-20	ลักษณะเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับสอง	41
3-1	แผนภาพขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	43
3-2	ลักษณะชิ้นงานสำหรับงานวิจัย	44
3-3	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชิ้นงานในระนาบ primary secondary และ tertiary	46
3-4	การหาคำตอบโดยใช้วิธีนิวตัน-ราฟสัน	48
3-5	ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของชิ้นงานจากปัจจัยการกำหนดตำแหน่ง	50
3-6	ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากระบบพิกัดอ้างอิงของเครื่องจักร	51
3-7	ความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงาน	51
3-8	ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน	52
3-9	การสร้างแบบจำลองการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับฟิกส์เจอร์	54
3-10	การเปรียบเทียบผลการเสี้ยวรูปชิ้นงานตามแนวแกน Z	54
3-11	แบบจำลองลักษณะการจับยึดชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกส์เจอร์	56
3-12	ลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้นตามหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์	56
3-13	ช่วงระยะพิกัดเพื่อการสัมผัสระหว่างวัตถุ	58
3-14	แผนผังขั้นตอนการค้นหาการสัมผัสกันของเอลิเมนต์	59
3-15	แบบจำลอง ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกส์เจอร์ และลักษณะเอลิเมนต์ชิ้นงาน	60
3-16	แผนภูมิสรุptionขั้นตอนการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	62
3-17	ลักษณะชุดทดลองของการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกส์เจอร์	63
3-18	ลักษณะฐานฟิกส์เจอร์	63

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3-19	ลักษณะการกำหนดตำแหน่งของชุดฟิสิกส์เจอร์	64
3-20	ลักษณะการจับยึดของชุดฟิสิกส์เจอร์	65
3-21	ลักษณะชุดทดลองของการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิสิกส์เจอร์	65
3-22	ลักษณะชุดเซ็นเซอร์วัดแรง	66
3-23	เครื่อง CMM Prismo 5 และลักษณะการวัดชิ้นงาน	67
4-1	การสร้างระบบพิกัดของชุดทดลองและวัดตำแหน่งของตัวกำหนดตำแหน่ง	70
4-2	ลักษณะการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนพื้นผิวด้านบนชิ้นงาน	71
4-3	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ X-Y	72
4-4	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ Y-Z	73
4-5	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง X	74
4-6	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง Y	74
4-7	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง Z	75
4-8	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดเส้นทางในระนาบ Y-Z (กรณีทำการชดเชย)	77
4-9	เส้นทางที่ใช้ในการพิจารณาผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด	80
4-10	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ X-Y	81
4-11	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ Y-Z	81
4-12	ลักษณะความผิดพลาดของการตัดชิ้นงาน	82
4-13	การออกแบบตำแหน่งการตัดชิ้นงาน	83
4-14	การเบี่ยงเบนของพื้นผิวที่ถูกตัดเทียบกับกับระนาบอ้างอิง A	83
4-15	การเบี่ยงเบนของพื้นผิวที่ถูกตัดเทียบกับกับระนาบอ้างอิง B	84
4-16	การชดเชยเส้นทางเดินใบมีดช่วงระยะห่างต่างๆ ในระนาบ X-Y	86
4-17	การชดเชยเส้นทางเดินใบมีดช่วงระยะห่างต่างๆ ในระนาบ Y-Z	87
4-18	ความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานที่เกิดจากการกำหนดช่วงระยะห่างของตำแหน่งการตัดที่ไม่เหมาะสมในระนาบ Y-Z	88

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

a_i	ระยะการสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดกับชิ้นงานตามแนวแกน r เทียบกับจุดสัมผัสเริ่มต้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ($i = 1, 2, \dots$)
$[B]$	เมตริกซ์ที่แสดงระหว่างระบบพิกัดกับระบบของเอลิเมนต์ที่จุดต่อต่างๆ
$[D]$	เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเอลิเมนต์ (constitutive matrix)
D_p, D_e, D_t	ระยะห่างจากจุดอ้างอิงที่ถูกกำหนดในระนาบ primary secondary และ tertiary
D_{pe}, D_{se}, D_{te}	ระยะห่างจากจุดอ้างอิงที่แท้จริงในระนาบ Primary, Secondary และ Tertiary
d	เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบเลื่อน
d^i	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง ณ จุดสัมผัสต่างๆระหว่างฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงาน ($i = 1, 2, \dots$), ($j = x, y, z$)
$\{d\}$	เมตริกซ์ที่ไม่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูป (u, v, w)
$\{d_i\}$	เมตริกซ์ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ ($i = 1, 2, \dots$)
$\{d\}_{system}$	เมตริกซ์ความคลาดเคลื่อนของระบบชิ้นงาน
dx, dy, dz	ตำแหน่งของเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบเลื่อนตามแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ
E	ค่ายังมอดูลัสของเอลิเมนต์
E_i	ข้อมูลที่ได้จากการทำนายของตำแหน่งความคลาดเคลื่อนของเส้นทางที่เกิดขึ้นในระดับที่ i ($i = 1, 2, \dots$)
E, E'	ค่ายังมอดูลัสของวัตถุทรงกลมและวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบตามลำดับ
E_f, E_w	ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของฟิกซ์เจอร์และชิ้นงาน ตามลำดับ
F_j^i	แรงที่ฟิกซ์เจอร์กระทำกับชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสต่างๆ ($i = 1, 2, \dots$), ($j = x, y, z$)
$\{F\}_{system}$	เมตริกซ์แรงที่กระทำกับระบบชิ้นงาน
$\{f\}$	เมตริกซ์แรงของเอลิเมนต์
f_1, f_2, f_3	ฟังก์ชันตรวจสอบการหมุนหาทิศทางที่เหมาะสมที่ทำให้ \bar{n}_p มีทิศทางเดียวกับ \bar{n}_{pe} ในทิศทาง X, Y, Z ตามลำดับ
f_4, f_5, f_6	ฟังก์ชันตรวจสอบการหมุนหาทิศทางที่เหมาะสมที่ทำให้ \bar{n}_s มีทิศทางเดียวกับ \bar{n}_{se} ในทิศทาง X, Y, Z ตามลำดับ
$\{f_i\}$	เมตริกซ์แรงที่กระทำกับชิ้นงานในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ ($i = 1, 2, \dots$)
G, G'	ค่าโมดูลัสเฉือนของวัตถุทรงกลมและวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบตามลำดับ

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

G_f, G_w	ค่าโมดูลัสเฉือนของฟิกซ์เจอร์และชิ้นงาน ตามลำดับ
$[k]$	เมตริกซ์ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของเอลิเมนต์
k_j^i	ค่าคงที่ความยืดหยุ่น ณ จุดสัมผัสระหว่างฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงาน (workpiece – fixture contact stiffness) ($i = 1, 2, \dots$), ($j = x, y, z$)
$[k_{ij}]$	เมตริกซ์ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของคุณสมบัติชิ้นงาน ($i = 1, 2, \dots$), ($j = x, y, z$)
$[K]_{system}$	เมตริกซ์ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของคุณสมบัติระบบชิ้นงาน
\bar{L}'	ตำแหน่งของชิ้นงานหลังจากการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต
\bar{L}	ตำแหน่งของชิ้นงานที่สนใจ
N_i	ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ($i = 1, 2, \dots$)
$[N]$	รูปแบบฟังก์ชันเมตริกซ์ของเอลิเมนต์
\bar{n}_{ie}	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากระนาบ primary และ secondary จากการหมุนหาทิศทางที่เหมาะสม ($i = 1, 2, \dots$)
\bar{n}_i	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากระนาบ primary และ secondary ก่อนเริ่มหมุนหาทิศทางที่เหมาะสม ($i = 1, 2, \dots$)
$\bar{n}_{se}, \bar{n}_{ie}$	เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชิ้นงานที่กำหนดตำแหน่งผิดพลาดในระนาบ secondary และระนาบ tertiary ตามลำดับ
P_f	แรงกระทำตั้งฉากกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ
P_m	ความดันเฉลี่ยของการสัมผัส
\bar{P}'	ตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดเครื่องจักร ($x - y$)
\bar{P}	ตำแหน่งชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดเครื่องจักร ($x - y$)
P_{xy}	เมตริกซ์การฉายตำแหน่งการเจาะชิ้นงานลงบนระนาบ $x' - y'$ (orthogonal projection matrix)
P^i	แรงกระทำตั้งฉากกับชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ
Q^i	แรงกระทำแนวเส้นสัมผัสกับชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ
Q	แรงกระทำแนวเส้นสัมผัสระหว่างวัตถุสองชิ้น
R	รัศมีของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดชิ้นงาน
$R_1(\gamma, \beta, \alpha)$	เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบหมุน
$[R]$	เมตริกซ์การแปลงรูป (Homogeneous transformation matrix) ซึ่งมีตัวแปร $[\gamma, \beta, \alpha, dx, dy, dz]$

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

\bar{S}'	ตำแหน่งการเจาะชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดชิ้นงาน ($x' - y'$)
\bar{S}	ตำแหน่งการเจาะชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดชิ้นงาน ($x' - y'$)
\bar{S}'_2	ตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจริง
\bar{S}'_1	ตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านล่างของชิ้นงานจริง
\bar{T}	การเปลี่ยนแปลงแบบเลื่อนของชิ้นงาน
u_z, u_r	ระยะการเสียรูปในแต่ละจุดของวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ ตามแนวแกน z, r เทียบจุดสัมผัสที่ยังไม่มีการเสียรูป ตามลำดับ
(u, v, w)	จุดต่อที่ไม่ทราบค่าตามแนวแกน X Y และ Z
V	ปริมาตรของเอลิเมนต์
x_{ij}	ค่าระยะการเสียรูปตามแนวแกน z ($i = 1, 2, \dots$) , ($j = 1, 2$)
\bar{x}_j	ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดข้อมูลที่ทำให้การสุม ($j = 1, 2$)
δ_r	ระยะการเสียรูป ณ จุดสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้น
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์
{ σ }	เมตริกซ์ความเค้นของเอลิเมนต์
σ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละชุดข้อมูล
{ ϵ }	เมตริกซ์ความเครียดของเอลิเมนต์
v	ค่าอัตราส่วนปริมาตรของเอลิเมนต์
v, v'	ค่าอัตราส่วนปริมาตรของวัตถุทรงกลมและวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบตามลำดับ
v_f, v_w	ค่าอัตราส่วนปริมาตรของของฟลักซ์เจอร์และชิ้นงาน ตามลำดับ
γ, β, α	มุมของการเปลี่ยนแปลงทางแบบหมุนรอบแกน X, Y, Z ตามลำดับ
μ	ค่าเฉลี่ยของแต่ละชุดข้อมูล
Δ_n^i	ระยะการเสียรูป ณ จุดศูนย์กลางของการสัมผัสกันระหว่างวัตถุสองชิ้นตาม แนวแกน z เทียบจุดสัมผัสที่ยังไม่มีการเสียรูป
Δ_r^i	ระยะการเสียรูป ณ จุดศูนย์กลางของการสัมผัสกันระหว่างวัตถุสองชิ้นตาม แนวแกน r เทียบจุดสัมผัสที่ยังไม่มีการเสียรูป

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

อุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูงเป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนให้อุตสาหกรรมอื่นนำชิ้นส่วนความเที่ยงตรงสูงไปประกอบการผลิตขั้นต่อไป เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมสร้างเครื่องจักรกลสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ อุตสาหกรรมสร้างเครื่องมือและอุปกรณ์ทางการแพทย์ อุตสาหกรรมการผลิตนาฬิกา และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ฯลฯ การผลิตชิ้นงานให้มีความเที่ยงตรงนับวันจะมีความสำคัญมากขึ้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในยุคปัจจุบันเช่น เครื่องยนต์ คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร และอื่นๆ ล้วนผลิตด้วยเทคโนโลยียุคใหม่ที่ต้องอาศัยหลักความถูกต้อง (accuracy) และหลักความเที่ยงตรงสูง (precision) สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรมได้ศึกษาและจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูงขึ้นมาโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดทิศทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูงในระยะ 10 ปีข้างหน้า โดยได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีดังตารางที่ 1-1 แสดงตัวอย่างลำดับการพัฒนาเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมต่อเนื่องที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเห็นว่าในอนาคตส่วนของขนาดความแม่นยำจะมีค่าน้อยลงเรื่อยๆ ฉะนั้นผลจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตแม้เป็นเพียงส่วนน้อย แต่อาจก่อให้เกิดความเสียหายเป็นมูลค่าสูงทั้งในด้านการสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าอุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูงเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญในการเอื้อต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมหลักอื่นๆ ของประเทศ

ตารางที่ 1-1 การเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีของอุตสาหกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

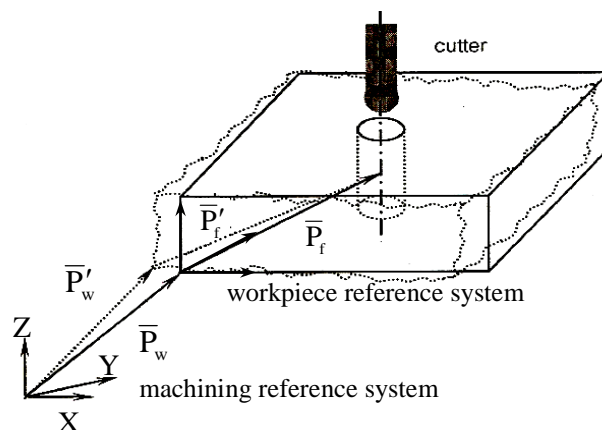
แผนการดำเนินการผลิต (ปี พ.ศ.) เทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลง	2541	2544	2547	2550	2553
ขนาดของความแม่นยำ (ไมโครเมตร)	0.25	0.18	0.13	0.10	0.07
ดีแรม (บิต)	256M	1G	4G	16G	64G
ไมโครโปรเซสเซอร์ (ทรานซิสเตอร์ / ซม ²)	7M	13M	25M	50M	90M

ที่มา : โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บทอุตสาหกรรมงานขั้นรูปความเที่ยงตรงสูง (2547)

ความผิดพลาด (errors) ในกระบวนการผลิต (manufacturing processes) เป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก ความผิดพลาดที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ควรถูกควบคุมให้มีขนาดน้อยที่สุด ความผิดพลาดในกระบวนการผลิตอาจเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกันเช่น ผู้ปฏิบัติงาน (operator) ขาดความรอบคอบในการทำงาน กระบวนการทำงาน (method) ที่ได้ถูกตั้งค่าให้ไม่เหมาะสมต่อการผลิตชิ้นงาน เครื่องจักรอุปกรณ์ (machine) ที่ไม่มีประสิทธิภาพหรือเสื่อมสภาพ หรือแม้แต่วัสดุชิ้นงาน (workpiece) ที่มีความผิดพลาดหรือมีขนาดไม่แน่นอนจากกระบวนการผลิตก่อนหน้า สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อการผลิตชิ้นงานทั้งสิ้น สำหรับความผิดพลาดอันเกิดจากผู้ปฏิบัติงานหรือกระบวนการทำงานสามารถแก้ไขได้โดยการอบรมพนักงานและสร้างกระบวนการทำงานที่เป็นระบบและมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น แต่ความผิดพลาดอันเกิดจากชิ้นงานและเครื่องจักรอุปกรณ์กลับเป็นสิ่งที่ป้องกันและแก้ไขได้ยากกว่า

โดยปกติแล้ว ก่อนที่จะเริ่มขั้นตอนการผลิต ชิ้นงานถูกจับยึดบนอุปกรณ์รองรับชิ้นงาน (workholder) หรืออีกชื่อหนึ่งคือฟิกซ์เจอร์ (fixture) ซึ่งประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่ง (locator) และตัวจับชิ้นงาน (clamp) เพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องและถูกจับยึดมั่นคงเพียงพอที่จะไม่สั่นไหวในระหว่างการผลิต จากนั้นเครื่องจักรหรือโบบีมิตจะถูกควบคุมให้ตัดชิ้นงานตามตำแหน่งที่โปรแกรมไว้ การประเมินความถูกต้องของตำแหน่งการตัดนั้นอ้างอิงกับระบบพิกัดของชิ้นงาน (workpiece reference system) แต่การควบคุมโบบีมิตให้เคลื่อนที่อ้างอิงกับระบบพิกัดของเครื่องจักร (machine reference system) ดังนั้นเมื่อไรก็ตามที่ชิ้นงานถูกจับยึดเบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็น ทำให้ตำแหน่งของชิ้นงานที่อ้างอิงกับระบบพิกัดของเครื่องจักรจาก \bar{P}_w กลายเป็น \bar{P}'_w (\bar{P}_w และ \bar{P}'_w คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของชิ้นงานที่ควรจะเป็นและผิดพลาด ตามลำดับ) ส่งผลให้ตำแหน่งการตัดผิดพลาดไป จาก \bar{P}_f กลายเป็น \bar{P}'_f (\bar{P}_f และ \bar{P}'_f คือ เวกเตอร์ตำแหน่งการตัดชิ้นงานที่ควรจะเป็นและผิดพลาด ตามลำดับ) ดังแสดงในรูปที่ 1-1

การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานนี้ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของขนาดและรูปทรงของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการตัด



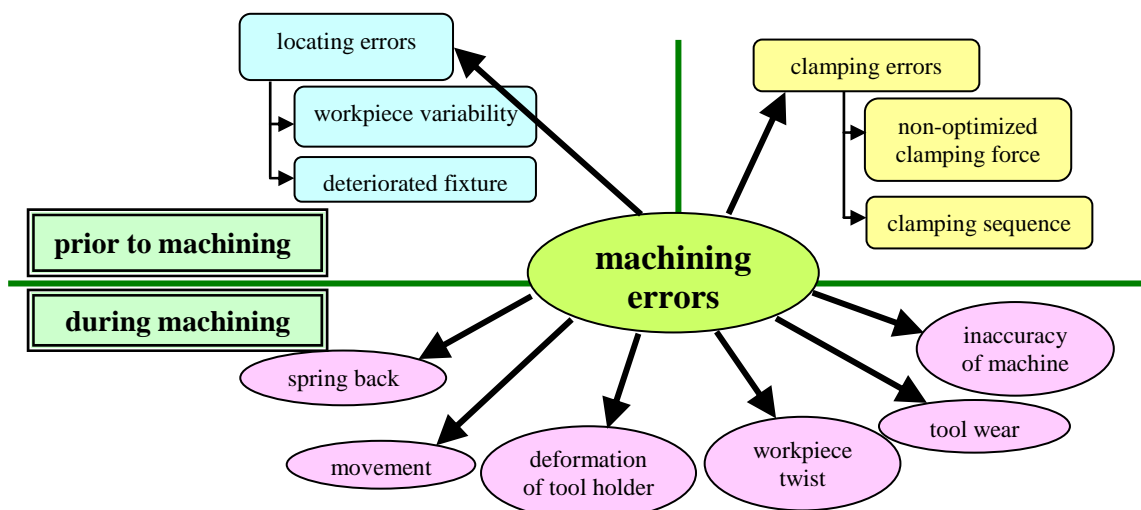
รูปที่ 1-1 การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

สาเหตุที่ทำให้ตำแหน่งชิ้นงานเบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็นมีดังนี้

1. ก่อนกระบวนการผลิต (prior to machining) ในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานเกิดจากหลายสาเหตุ ยกตัวอย่างเช่น ความไม่แน่นอนของชิ้นงาน การเสื่อมสภาพของฟิกซ์เจอร์ สำหรับในขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน สาเหตุหลักที่พบคือแรงในการจับยึดชิ้นงานไม่เหมาะสม ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปมากเกินไป (clamping deformation)

2. ขณะทำการผลิต (during machining) เกิดจากหลายสาเหตุ ยกตัวอย่างเช่น ความไม่แม่นยำของใบมีดตัด การเลื่อนตำแหน่งของชิ้นงานเมื่อถูกแรงกระทำของใบมีด และการเสียรูปของตัวจับยึดชิ้นงานเมื่อมีแรงจากใบมีดมากกระทำ เป็นต้น

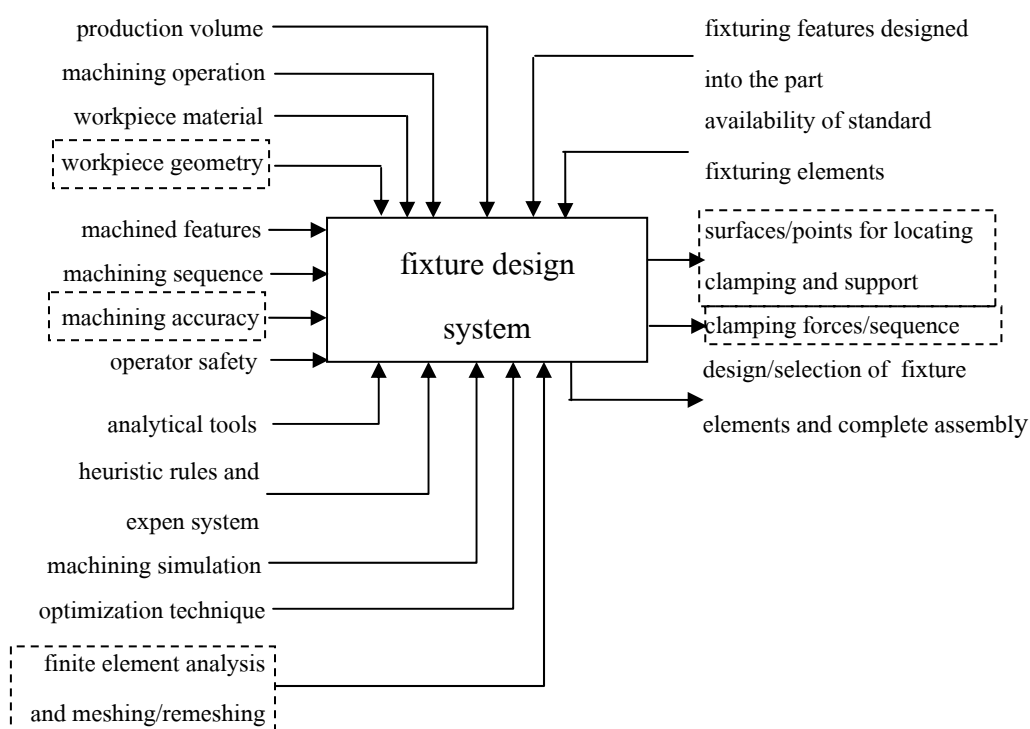
จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปสาเหตุที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการผลิตชิ้นงานทั้งก่อนผลิตและระหว่างการผลิตได้ดังรูปที่ 1-2



รูปที่ 1-2 สาเหตุที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการผลิตชิ้นงาน

สาเหตุที่เกิดขึ้นทั้งสองส่วนนี้มีความเกี่ยวเนื่องกันที่ส่งผลให้เกิดการเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงาน ซึ่งหากในส่วนก่อนกระบวนการผลิตมีความผิดพลาดโดยไม่มีการตรวจสอบ ส่งผลให้การเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานมีมากกว่าการเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานที่พิจารณาจากสาเหตุในส่วนขณะทำการผลิตเพียงอย่างเดียว และหากมีการตรวจสอบความผิดพลาดในส่วนก่อนกระบวนการผลิต สามารถนำข้อมูลความผิดพลาดนี้ไปปรับแก้ในส่วนขณะทำการผลิตเพื่อช่วยลดการเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานได้อีกด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่จับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด เพราะถ้าสามารถประเมินสาเหตุความผิดพลาดในภาพรวม (integration) ได้จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิต เพื่อลดความผิดพลาด ยกตัวอย่างงานวิจัยของ Sanchez และคณะ (2006) ซึ่งศึกษาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากการจับยึดชิ้นงานเพื่อประยุกต์ใช้กับชิ้นงานที่มีความยืดหยุ่นและน้ำหนักของตำแหน่งชิ้นงานที่ผิดพลาดไปชัดเจนและปรับปรุงโปรแกรมการผลิตชิ้นงานเพื่อสร้างเส้นทางการตัดชิ้นงานใหม่ (cutting tool path) DeMeter และ Hockenberger (1997) ได้ศึกษาดำเนินการของชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม (spherical tip) เพื่อนำไปกำหนดเส้นทางการตัดชิ้นงานและแรงในการจับยึดที่เหมาะสม Li และ Melkote (2001) ได้ศึกษาแรงในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมขณะตัดชิ้นงานเพื่อให้มีการเคลื่อนตำแหน่งของชิ้นงานน้อยที่สุด ซึ่งส่งผลให้ขั้นตอนในกระบวนการผลิตมีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้ผลจากการศึกษายังมีประโยชน์ในการกำหนดค่าระยะพิกัดเนื้อที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานและอุปกรณ์การจับยึดอีกด้วย เช่น Kang และคณะ (2003) ได้พัฒนาวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าระยะพิกัดเนื้อของฟิกซ์เจอร์ โดยกำหนดค่าระยะพิกัดเนื้อของตัวกำหนดตำแหน่งซึ่งอาศัยข้อมูล

ความต้องการค่าระยะพิกัดเผื่อของพื้นผิวที่ถูกตัด ซึ่งการวิเคราะห์ระยะพิกัดเผื่อนี้มีส่วนสำคัญในการช่วยออกแบบฟิกซ์เจอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Fixture Design, CAFD) และยังเป็นปัจจัยส่วนหนึ่งที่สำคัญในการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฟิกซ์เจอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 1-3 สิ่งเหล่านี้จะส่งผลดีต่อโรงงานที่ทำการผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูงทั้งในด้านของการลดจำนวนชิ้นงานเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตทำให้ลดต้นทุนในการจัดซื้อวัสดุ ลดเวลาที่เกิดจากการผลิตชิ้นงานเสีย และเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานได้อีกด้วย



รูปที่ 1-3 ปัจจัยจำเป็นที่ต้องคำนึงสำหรับการออกแบบฟิกซ์เจอร์
(Doof and Kusiak, 1994)

1.2 การตรวจสอบเอกสาร

ผู้วิจัยได้พบว่าม้งงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับความผิดพลาดในการผลิต ชิ้นงานที่เกิดขึ้นก่อนกระบวนการตัดหลายสาเหตุด้วยกัน โดยสามารถแบ่งตามสาเหตุของ ปัญหาได้ดังนี้

1.2.1 สาเหตุที่เกิดจากการกำหนดตำแหน่ง

สามารถสรุปสาเหตุที่เกิดจากการกำหนดตำแหน่งได้ 2 สาเหตุ คือ

1) สาเหตุที่เกิดจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน

โดยปกติแล้วชิ้นงานมักมีความไม่แน่นอน (variation) ทั้งในด้านของขนาดและ รูปทรง ซึ่งเป็นผลมาจากความผิดพลาดในกระบวนการผลิตที่ผ่านมา ดังนั้นในกระบวนการผลิต จึงได้มีการกำหนดระยะพิกัดเผื่อ (tolerance) หรือช่วงความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ เพื่อใช้เป็น กลไกในการควบคุมความไม่แน่นอนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิต หากความไม่แน่นอนนี้ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ชิ้นงานนั้นจะไม่ถือว่าเป็นของเสีย (defect) อย่างไรก็ตามเมื่อนำชิ้นงาน เหล่านี้ไปจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ ความไม่แน่นอนดังกล่าวจะมีผลทำให้ตำแหน่งการตัดของชิ้นงาน เปลี่ยนไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็นและก่อให้เกิดความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานที่ได้ถูก กำหนดไว้แล้ว ยกตัวอย่างเช่น Kang และคณะ (2003) ได้พัฒนาวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่า ระยะพิกัดเผื่อของฟิกซ์เจอร์ โดยกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อของตัวกำหนดตำแหน่งซึ่งอาศัยข้อมูล ความต้องการค่าระยะพิกัดเผื่อของพื้นผิวที่ถูกตัด การวิเคราะห์ระยะพิกัดเผื่อนี้มีส่วนสำคัญใน การช่วยออกแบบฟิกซ์เจอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Fixture Design, CAFD) เพื่อไปประยุกต์ใช้กับค่าระยะพิกัดเผื่อของชิ้นงาน ตัวกำหนดตำแหน่งที่ต้องการความ แม่นยำ Estrems และคณะ (2003) ศึกษาถึงสาเหตุที่ทำให้พื้นผิวของชิ้นงานที่ผ่านการตัดมีความ ไม่แน่นอน โดยสาเหตุส่วนหนึ่งเกิดจากชิ้นงานที่มีรูปร่างไม่สมมาตรส่งผลให้การกำหนด ตำแหน่งผิดพลาดและทำให้จับยึดชิ้นงานยากในขั้นตอนก่อนกระบวนการผลิต ส่งผลให้เมื่อขณะ ทำการผลิต ชิ้นงานมีการหมุนเปลี่ยนตำแหน่งและทำให้ชิ้นงานที่ผลิตมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น Chaiprapat และ Rujikietgumjorn (2006a, 2006b) ได้ศึกษาความไม่สม่ำเสมอของพื้น ผิวชิ้นงานที่ส่งผลให้การกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานผิดพลาดไปเมื่อวางบนฟิกซ์เจอร์ โดย นำเสนอระเบียบวิธีในการวิเคราะห์ผลกระทบของรูปแบบการกระจายของพื้นผิวที่มีต่อความ แม่นยำในการวางตำแหน่งของชิ้นงาน ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างการกระจายตัวของพื้นผิวแบบ ปกติ แบบเบต้า และแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าความไม่แน่นอนของตำแหน่ง ชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการกระจายของพื้นผิวชิ้นงานนั้น และนอกจากนี้ได้พัฒนา กระบวนการที่ใช้ในการคำนวณหาความไม่แน่นอนของตำแหน่งชิ้นงานที่ถูกวางบนฟิกซ์เจอร์

ภายใต้สมมุติฐานว่าชิ้นงานมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัส ซึ่งผลจากแบบจำลองทำให้สามารถนำไปใช้ในการกำหนดระยะพิกต์เจอร์ โดยในการวิเคราะห์ได้ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์พิจารณาพิกซ์เจอร์รูปแบบ 3-2-1 ใช้สมมุติฐานว่าชิ้นงานเป็นวัสดุแข็ง พื้นผิวชิ้นงานที่คลาดเคลื่อนวัดจากแกนอ้างอิงของตัวกำหนดตำแหน่ง และความผิดพลาดพิจารณาเป็นการแจกแจงแบบปกติ เป็นต้น

2) สาเหตุจากตัวกำหนดตำแหน่ง

สาเหตุนี้เกิดจากความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่งชิ้นงานที่เสื่อมสภาพ และถูกวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมดังนั้นเมื่อชิ้นงานถูกวางบนพิกซ์เจอร์ ส่งผลให้การกำหนดตำแหน่งชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่ควรจะเป็นมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น Cai และคณะ (1996, 1997) ใช้หลักการ N-2-1 ของตัวกำหนดตำแหน่งซึ่งเป็นวิธีสำหรับออกแบบพิกซ์เจอร์ที่เหมาะสม โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) หา N ดีที่สุดที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปน้อยสุดและได้เปรียบเทียบกับหลักการ 3-2-1 ที่ถูกยอมรับอย่างกว้างขวางสำหรับชิ้นงานวัสดุแข็ง และต่อมาได้พัฒนาโปรแกรมที่เรียกว่า RFix Design ที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะการจับยึดของพิกซ์เจอร์เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด Chaiprapat และ Rujikietgumjorn (2008) ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตซึ่งมีสาเหตุมาจากตัวกำหนดตำแหน่ง โดยจำลองชิ้นงานที่วางบนตัวกำหนดตำแหน่งแสดงเป็นแบบสองมิติในขั้นต้น และนำความสัมพันธ์ไปอธิบายได้จนถึงในกรณีสามมิติ ผลจากแบบจำลองนี้สรุปได้ว่าความเบี่ยงเบนของตำแหน่งชิ้นงานส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของผิวชิ้นงานที่ผ่านการตัดเป็นฟังก์ชันพาราโบลอยด์ นอกจากนี้ Zheng และ Chew (2010) ได้เสนอวิธีการหารูปแบบปิด (form-closure) ตำแหน่งของ 4/7 องค์ประกอบของพิกซ์เจอร์ (fixels) เพื่อพัฒนาความสามารถในการจับยึดของพิกซ์เจอร์ให้มีความเสถียรภาพ (immobilization) โดยขั้นแรกใช้ระเบียบวิธี Gilbert-Johnson-Keerthi และกระบวนการ Gram-Schmidt หาผลลัพท์ตำแหน่งองค์ประกอบของพิกซ์เจอร์ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่เป็นพื้นฐานของการบิดและขั้นต่อมาใช้วิธีการสับเปลี่ยนซึ่งพัฒนาปรับเปลี่ยนองค์ประกอบของพิกซ์เจอร์ให้เป็นรูปแบบปิดและเพิ่มความสามารถในการจับยึดของพิกซ์เจอร์ให้มีความเสถียรภาพ ผลจากการวิเคราะห์ที่มีค่าเท่ากับระยะห่างน้อยที่สุดของการบิดเริ่มต้นกับหลังปรับปรุง สิ่งนี้ช่วยในการตำแหน่งองค์ประกอบของพิกซ์เจอร์ที่เหมาะสมและเพิ่มคุณภาพการจับยึดของพิกซ์เจอร์ เป็นต้น

1.2.2 สาเหตุที่เกิดจากการจับยึด

สาเหตุนี้ส่วนใหญ่ที่พบคือความไม่เหมาะสมของแรงและตำแหน่งในการจับยึด เนื่องจากโดยปกติแล้วแรงของตัวจับยึดที่กระทำต่อชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป (deformation) ซึ่งการเสียรูปนี้จะส่งผลให้ตำแหน่งของชิ้นงานที่ถูกจับยึดเบี่ยงเบนไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็น ยกตัวอย่างเช่น DeMeter (1994, 1995) แสดงแบบจำลองเชิงเส้นสำหรับทำนายผลกระทบจากตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดชิ้นงานที่ส่งผลให้ชิ้นงานเคลื่อนตำแหน่ง ในขณะที่ทำการผลิตชิ้นงานโดยใช้ระเบียบวิธีการจัดหาแรงมาก-น้อย แต่วิธีนี้ไม่สามารถเอาไปใช้ได้จริงในการออกแบบฟิกซ์เจอร์ ต่อมาได้มีการนำข้อมูลนี้วิเคราะห์เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดชิ้นงานที่ทำการวัดอย่างละเอียด สรุปได้ว่าแรงตัวจับยึดที่กระทำกับชิ้นงานขณะทำการผลิตส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการนูนขึ้น และหลังจากนั้น DeMeter (2001) ได้ทำการแสดงแบบจำลองเชิงเส้นของแรงในการจับยึดชิ้นงาน (LCPL) พิจารณาเป็นการเสียรูปแบบสถิติระหว่างชิ้นงานและฟิกซ์เจอร์ที่ตอบสนองต่อการจับยึดชิ้นงานและการผลิต โดยในแบบจำลองเป็นการคำนวณหาแรงที่จำเป็นน้อยที่สุดในการจับยึดที่ไม่ทำให้เกิดการเสียรูปที่ตำแหน่งของตัวจับยึดโดยตลอดขณะทำการผลิต Mannan (1997) ได้ออกแบบแรงในการจับยึดชิ้นงานแต่ละจุดโดยทำให้เป็นฟิกซ์เจอร์อัตโนมัติเพื่อลดการเสียรูปของชิ้นงานขณะทำการผลิต โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวควบคุมแรงของตัวจับยึดชิ้นงาน Yeh และ Liou (1999) ได้สร้างแบบจำลองวิเคราะห์การจับยึดชิ้นงานที่จุดสัมผัสในขณะที่ทำการผลิตโดยวิธีการวิเคราะห์ของสปริงเอलिเมนต์และวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์บนพื้นฐานทฤษฎี Hertz เพื่อการออกแบบระบบฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงาน Li และ Melkote (2001) ได้เสนอวิธีใหม่สำหรับการหาแรงในการจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสม โดยคิดกรณีมีตัวจับยึดหลายตัวซึ่งเป็นระบบฟิกซ์เจอร์แบบ 3-2-1 ทำการพิจารณาในช่วงเวลาที่แรงของเครื่องจักรกระทำคงที่ บริเวณจุดสัมผัสเป็นแบบยึดหยุ่น และใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างจุดสัมผัสชิ้นงานและฟิกซ์เจอร์เพื่อออกแบบหาแรงที่เหมาะสมของตัวจับยึดชิ้นงาน Raghu และ Melkote (2003) ได้สร้างแบบจำลองและการทดลองเพื่อหาผลแสดงความแตกต่างของลำดับในการจับยึดชิ้นงานที่ส่งผลต่อการคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงาน ซึ่งสรุปผลการเปรียบเทียบสามารถทำนายการคลาดเคลื่อนและแรงที่ตอบสนองกลับของชิ้นงานได้ Satyanarayana และ Melkote (2004) ได้ใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์จุดสัมผัสระหว่างฟิกซ์เจอร์กับพื้นผิวด้านบนชิ้นงานที่ความหนาต่าง ๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าชิ้นงานที่หนาน้อยกว่า 35 มิลลิเมตรส่งผลให้เกิดการเสียรูปบริเวณพื้นผิวด้านล่างด้วย นอกจากนี้ Asante (2010) ได้ศึกษาผลกระทบของฟิกซ์เจอร์และการตัดที่ทำให้ชิ้นงานอยู่สภาวะคงที่ โดยใช้ปัจจัยสองอย่างในการวิเคราะห์ คือค่าสเกลาร์น้อยที่สุด (minimum eigenvalue) ของเมตริกซ์ความยืดหยุ่นฟิกซ์เจอร์

(fixture stiffness matrix) และค่าที่มากที่สุดของแรงตัด ซึ่งในส่วนของปัจจัยแรกได้คิดแรงที่ตัวจับยึดกระทำกับชิ้นงาน ผลจากการวิเคราะห์สามารถลดความคลาดเคลื่อนชิ้นงานได้

จากผลการสำรวจงานวิจัยข้างต้น แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการกำหนดตำแหน่งและจับยึดชิ้นงานนั้นมีหลายปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ความไม่แน่นอนของชิ้นงานที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิต ตัวกำหนดตำแหน่งของฟิกซ์เจอร์ที่เสื่อมคุณภาพหรือไม่แม่นยำ ลักษณะของแรงและตำแหน่งในการจับยึดชิ้นงาน แต่แท้จริงแล้วความผิดพลาดที่มีสาเหตุมาจากตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดนั้นมีโอกาสที่เกิดขึ้นน้อยมาก หรือหากเกิดความผิดพลาดเพราะสาเหตุนี้ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก็มักมีขนาดเล็กน้อยมาก เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่มีการควบคุมคุณภาพอย่างเข้มงวดและมีค่าระยะพิงก์ดที่แคบ ดังนั้นสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด คือ ความไม่แน่นอนของชิ้นงานและการเสียรูปของชิ้นงานเมื่อถูกจับยึดด้วยแรงไม่เหมาะสม และโดยส่วนใหญ่ผู้วิจัยจะทำการศึกษาเฉพาะกรณีใดกรณีหนึ่งของสาเหตุที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานเท่านั้น หรือหากมีการศึกษาสาเหตุของการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดก็จะได้ไม่มีการพิจารณาในส่วนของสาเหตุที่มาจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาลักษณะความคลาดเคลื่อน (displacement function) ของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานอันเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของชิ้นงานและการเสียรูปของชิ้นงานเนื่องจากลักษณะการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ เพื่อที่จะใช้ในการทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน จากข้อมูลเหล่านี้ผู้วิจัยจะพัฒนาฟังก์ชันแก้ไข (corrective function) เพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงเส้นทางเดินของใบมีดตัดเพื่อให้สามารถตัดชิ้นงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

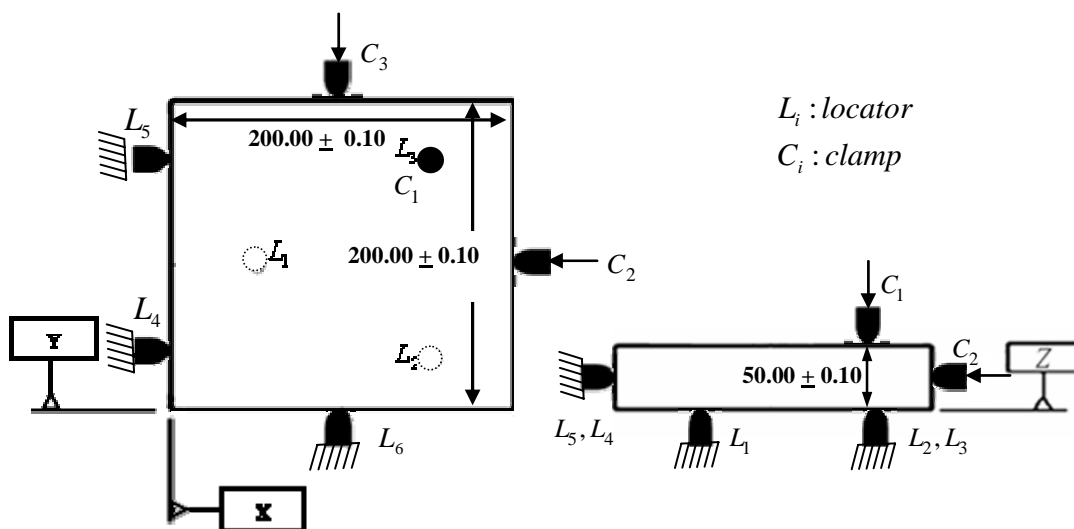
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ฟิกซ์เจอร์มีรูปแบบการกำหนดตำแหน่งเป็นแบบ 3-2-1 โดยตัวกำหนดตำแหน่งมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งมีตำแหน่งการสัมผัสกับชิ้นงานรวมทั้งหมด 6 จุด และตัวจับยึดมีลักษณะเป็นทรงกลมซึ่งมีตำแหน่งจับยึดชิ้นงานรวมทั้งหมด 3 จุด
- 2) ชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์มีรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- 5) ฟิกซ์เจอร์และชิ้นงานเป็นวัสดุโลหะ โดยคุณสมบัติทางวัสดุของฟิกซ์เจอร์มีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน

ในรูปที่ 1-4 ได้แสดงลักษณะในการจำลองแบบฟิกซ์เจอร์และชิ้นงาน โดย L_1, \dots, L_6 คือ ตำแหน่งตัวกำหนดตำแหน่งของฟิกซ์เจอร์ และ C_1, \dots, C_3 คือ ตำแหน่งตัวจับยึดของฟิกซ์เจอร์



รูปที่ 1-4 ลักษณะแบบจำลองระหว่างฟิกซ์เจอร์และชิ้นงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด
- 2) ช่วยให้สามารถทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดก่อนทำการผลิต
- 3) ช่วยในการออกแบบตำแหน่งและทิศทางการตัดของใบมีดได้เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแม่นยำ และเป็นแนวทางในการกำหนดระยะพิกัดเผื่อ

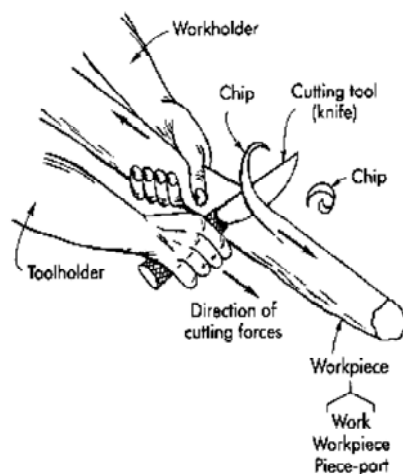
บทที่ 2

ทฤษฎี

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการผลิตชิ้นงาน สาเหตุที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงาน หลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต (geometric transformation) ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz's contact theory) และระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ได้ถูกประมวลไว้และนำเสนอโดยสรุปในบทนี้

2.1 กระบวนการผลิตชิ้นงาน

ก่อนเริ่มขั้นตอนการผลิต ชิ้นงานถูกจัดวางบนตัวรองรับชิ้นงานหรือฟิกซ์เจอร์ซึ่งประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่ง และตัวจับชิ้นงานเพื่อให้มั่นใจว่าชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง และถูกจับยึดมั่นคงเพียงพอที่จะไม่เลื่อนไถลในระหว่างการผลิต หลังจากนั้นเครื่องจักรหรือใบมีดจะถูกควบคุมให้ตัดชิ้นงานตามตำแหน่งที่โปรแกรมไว้ โดยในการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งการตัดนั้นอ้างอิงกับระบบพิกัดของชิ้นงาน แต่การควบคุมใบมีดตัดให้เคลื่อนที่นั้นถูกอ้างอิงกับระบบพิกัดของเครื่องจักร และเมื่อทำการผลิตชิ้นงานเสร็จ จะมีการตรวจสอบความถูกต้องในแง่ของขนาด รูปร่างของชิ้นงาน และส่งไปยังกระบวนการต่อไป นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียด และต้องการความเที่ยงตรงสูง เครื่องมือกลที่นำมาใช้ก็ต้องมีสมรรถนะสูง โครงสร้างและส่วนประกอบที่เป็นชิ้นส่วนหลักต่างๆ ต้องมีเสถียรภาพ ในการผลิตชิ้นงานสามารถแบ่งองค์ประกอบหลักได้ คือ 1. ชิ้นงาน 2. ตัวรองรับชิ้นงานหรือฟิกซ์เจอร์ 3. เครื่องมือกลคมตัด (cutting tool) และ 4. การควบคุมการตัด (direction of cutting force) ดังแสดงในรูปที่ 2-1 โดยอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้ คือ



รูปที่ 2-1 องค์ประกอบในการผลิตชิ้นงาน
(Nasseri, 2007)

2.1.1 องค์ประกอบในการผลิตชิ้นงาน

2.1.1.1 ชิ้นงาน

ชิ้นงานคือ วัตถุดิบที่นำมาใช้ผลิต ชิ้นงานมีหลายรูปแบบและผลิตจากวัสดุหลายชนิด สามารถแบ่งได้เป็น วัสดุโลหะกลุ่มเหล็ก วัสดุนอกโลหะกลุ่มเหล็ก วัสดุโลหะ วัสดุผสม เป็นต้น สิ่งนี้เป็นปัจจัยที่ต้องให้ความสำคัญต่อการเลือกกระบวนการผลิต เพราะหากมีการเลือกกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสมต่อรูปแบบและวัสดุของชิ้นงาน ทำให้เกิดการผลิตชิ้นงานที่ไม่ตรงความต้องการและมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้นได้ และหากนำชิ้นงานที่มีความไม่แน่นอนดังกล่าวนี้ไปผลิตในกระบวนการถัดไปโดยไม่มีการตรวจสอบความถูกต้อง ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการผลิตชิ้นงานเพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.1.1.2 ตัวรองรับชิ้นงานหรือฟิกซ์เจอร์

ฟิกซ์เจอร์ คือ อุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงานให้ติดแน่นอยู่กับโครงสร้างลำตัวของฟิกซ์เจอร์ เพื่อให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการสั่นไถลระหว่างกระบวนการผลิต ฟิกซ์เจอร์จะประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึด โดยมีวัตถุประสงค์ คือ

1) กำหนดตำแหน่ง (position) เป็นการกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานที่จะทำให้ทราบแน่นอนว่าตำแหน่งการตัดอยู่ที่ตำแหน่งไหน เพื่อการที่จะสามารถนำเครื่องมือตัดมาทำการตัดเซยตำแหน่งการตัดได้ตรงตามที่กำหนดไว้

2) รองรับ (support) เป็นการรองรับแรงต่างๆ โดยเฉพาะแรงตัดที่เข้ามากระทำบนชิ้นงานโดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดหรือโก่งงอได้

3) ยึดจับ (clamp) เป็นการยึดชิ้นงานไว้ไม่ให้สั่นคลอนหรือเคลื่อนตำแหน่งไปจากจุดที่กำหนดไว้ในขณะทำการตัดชิ้นงาน

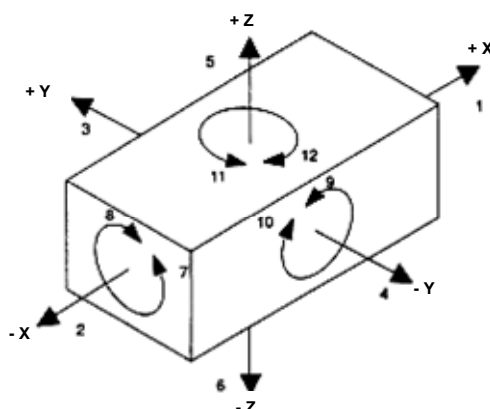
ในการใช้งานฟิกส์เจอร์เพื่อการกำหนดตำแหน่ง การรองรับ และการจับยึดชิ้นงานนั้นต้องคำนึงถึงลักษณะของชิ้นงานและกรรมวิธีการผลิตควบคู่ไปด้วย โดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งลักษณะการใช้งานของฟิกส์เจอร์ได้เป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

1) การกำหนดตำแหน่งและการรองรับชิ้นงาน

ในการผลิตชิ้นงานให้มีความแม่นยำ ชั้นแรกชิ้นงานต้องถูกวางไว้ในตำแหน่งที่ถูกต้องอยู่ในฟิกส์เจอร์ โดยฟิกส์เจอร์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบฟิกส์อ้างอิงสำหรับกระบวนการตัด ซึ่งกฎเบื้องต้นสำหรับการกำหนดตำแหน่งมีดังนี้ คือ

1.1) ผิวสัมผัสสำหรับการกำหนดตำแหน่ง ตัวกำหนดตำแหน่งและตัวรองรับ ควรจะให้สัมผัสกับชิ้นงานในแนวตั้งฉากกันตรงส่วนที่ได้รับการตกแต่งมาแล้วเสมอ เพื่อป้องกันการบิดตัวของชิ้นงานขณะทำการผลิตและรับประกันคุณสมบัติเกี่ยวกับความสามารถในการใช้งานซ้ำๆ กันไปตลอด (repeatability) ตัวกำหนดตำแหน่งแต่ละตัวควรมีระยะห่างจากกันมากที่สุดเท่าที่จะห่างกันได้ เนื่องจากหากมีการสัมผัสชิ้นงานบริเวณใกล้เคียงชิ้นงานมากขึ้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งที่น้อยลง (Chaiprapat and Rujikietgumjorn, 2008) และควรติดตั้งตัวกำหนดตำแหน่งในที่สุดที่สามารถหลีกเลี่ยงเศษโลหะที่จะเข้าไปติดอยู่ได้

1.2) ระดับความเป็นอิสระ (degree of freedom) เป็นการกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของชิ้นงานที่ต้องการจะนำมากำหนดตำแหน่ง ซึ่งโดยปกติแล้วชิ้นงานทั่วไปจะมีความเป็นอิสระต่อการเคลื่อนที่ทั้งหมด 12 ทิศทาง ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ระดับความเป็นอิสระของชิ้นงาน

(Nasseri, 2007)

หลักการระดับความเป็นอิสระที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งและรองรับชิ้นงานจะแปรผันกับรูปทรงชิ้นงาน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

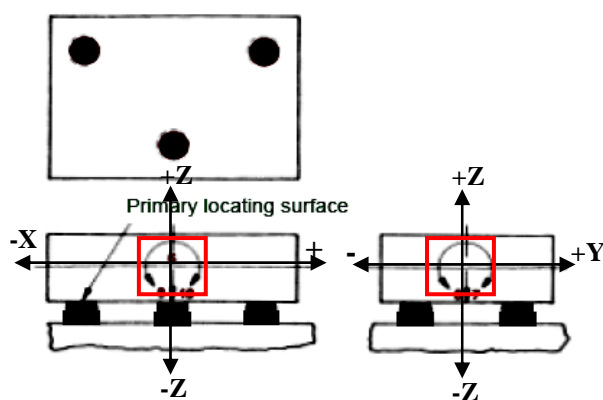
การกำหนดตำแหน่งแบบ 3-2-1 สำหรับชิ้นงานรูปทรงทั่วไป (prismatic workpieces)

การกำหนดตำแหน่งแบบ 3-1-1 สำหรับชิ้นงานรูปทรงกระบอกตั้ง (vertically rotational workpieces)

การกำหนดตำแหน่งแบบ 2-2-1 สำหรับชิ้นงานรูปทรงกระบอกนอน (horizontally rotational workpieces)

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากรณีชิ้นงานรูปทรงทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษารายละเอียดเฉพาะการกำหนดตำแหน่งแบบ 3-2-1 ซึ่งเป็นการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานทั่วไป มีตัวกำหนดตำแหน่งทั้งหมด 6 ตัว สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 9 ทิศทางจาก 3 ระนาบ คือ

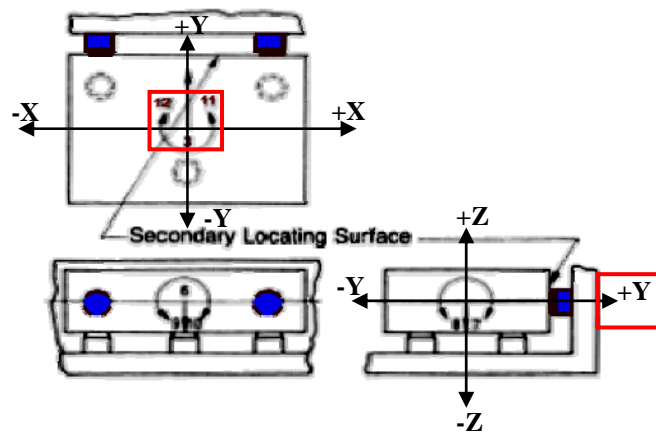
- การกำหนดตำแหน่งระนาบ 1 (primary plane) มีตัวกำหนดตำแหน่ง 3 ตัว วางอยู่บนระนาบ X-Y ซึ่งอยู่ใต้ชิ้นงาน ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับชิ้นงาน สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 5 ทิศทางคือ การหมุนรอบแกน +X -X +Y -Y และตามแกน -Z ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 การกำหนดตำแหน่งระนาบ 1

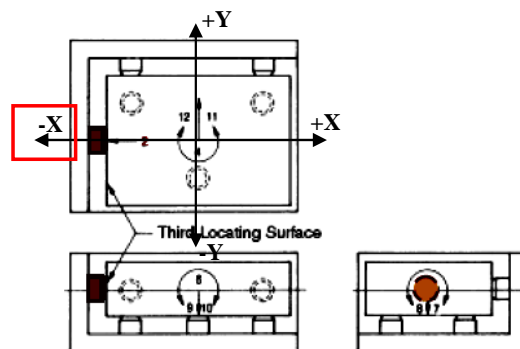
(Nasseri, 2007)

- การกำหนดตำแหน่งระนาบ 2 (secondary plane) มีตัวกำหนดตำแหน่ง 2 ตัว วางอยู่บนระนาบ X-Z สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 3 ทิศทางคือ การหมุนรอบแกน +Z -Z และตามแกน +Y ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 การกำหนดตำแหน่งระนาบ 2
(Nasseri, 2007)

- การกำหนดตำแหน่งระนาบ 3 (tertiary plane) มีตัวกำหนดตำแหน่ง 1 ตัววางอยู่บนระนาบ Y-Z สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 1 ทิศทางคือ ตามแกน -X ดังรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 การกำหนดตำแหน่งระนาบ 3
ที่มา : Nasseri (2007)

1.3) ค่าผิดพลาดที่ยอมรับให้ใช้ได้ เมื่อทำการออกแบบฟิกซ์เจอร์ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงค่าความผิดพลาดของชิ้นงานที่ยอมรับได้ด้วย ซึ่งตามกฎหมายต่างๆ ไปค่าความผิดพลาดของฟิกซ์เจอร์นี้ จะต้องมีค่าระหว่าง 20-50% (Wattanuchariya, 2007) ของค่าความผิดพลาดที่ยอมรับให้ใช้ได้ของชิ้นงาน

1.4) การป้องกันการใส่งานผิด การป้องกันไม่ให้ใส่งานผิดข้างหรือผิดตำแหน่งนี้เป็นสิ่งที่นักออกแบบเครื่องมือจะต้องหาวิธีเพื่อให้แน่ใจว่า เมื่อใส่ชิ้นงานเข้าไปในฟิกซ์เจอร์แล้ว ชิ้นงานจะต้องวางอย่างพอเหมาะและอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ

1.5) ตัวกำหนดตำแหน่งที่ซ้ำซ้อน การใช้ตัวกำหนดตำแหน่งที่ซ้ำซ้อนกันควรที่จะต้องหลีกเลี่ยงให้มากที่สุดซึ่งนอกจากจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงขึ้นมากแล้วยังทำให้ความเที่ยงตรงลดน้อยลงไปด้วย

2) การยึดจับชิ้นงาน

ชิ้นงานจะต้องถูกยึดจับให้ติดแน่นอยู่กับฟิกซ์เจอร์ในตำแหน่งที่ต้องการอย่างเที่ยงตรง และสามารถต่อต้านแรงที่เกิดจากการตัดของเครื่องมือตัดที่กระทำต่อชิ้นงานเป็นอย่างดี ฉะนั้นตัวยึดจับชิ้นงานจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงที่เกิดจากการตัดได้ แต่จะต้องไม่มากพอที่จะทำให้แรงในการยึดจับนั้นส่งผลเสียต่อชิ้นงานได้ สามารถสรุปกฎเบื้องต้นสำหรับการยึดจับชิ้นงานได้ดังนี้ คือ

2.1) ตำแหน่งของตัวจับยึดชิ้นงาน ตำแหน่งของตัวจับยึดจะต้องสัมผัสกับชิ้นงานตรงจุดที่ชิ้นงานมีความแข็งแรงที่สุดเสมอ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงที่เกิดจากการยึดจับนั้นไปทำให้ชิ้นงานเกิดการแอ่นตัวหรือเสียหาย และหากชิ้นงานเกิดการแอ่นตัวจากการจับยึดตัวกำหนดตำแหน่งจะต้องทำการรองรับชิ้นงาน ณ บริเวณแอ่นตัวของชิ้นงานนั้นด้วย

2.2) แรงจากเครื่องมือกลคมตัด แรงที่เกิดจากการตัดชิ้นงานของเครื่องมือกลคมตัดจะถูกต่อต้านจากชิ้นงานที่ถูกตัด ดังนั้นเพื่อที่จะยึดจับชิ้นงานที่ถูกตัดให้ถูกต้อง ผู้ที่ออกแบบฟิกซ์เจอร์จึงจำเป็นต้องรู้ว่าเครื่องมือกลคมตัดคืออะไร ลักษณะของการตัดเป็นอย่างไร มีทิศทางในการตัดอย่างไร และจะต้องสามารถใช้แรงที่เกิดจากการตัดมาเป็นประโยชน์ได้อีกด้วย เพื่อสามารถลดการจับยึดชิ้นงานบางตำแหน่ง ยกตัวอย่างเช่นหากต้องการเจาะรูชิ้นงานเพียงอย่างเดียวควรมีการจับยึดชิ้นงานเฉพาะด้านข้างเท่านั้น

2.3) แรงในการจับยึดชิ้นงาน แรงในการจับยึดชิ้นงานเป็นแรงที่จำเป็นต้องมีสำหรับยึดจับชิ้นงานให้อยู่หนึ่งตรงตำแหน่งที่กำหนดไว้ ซึ่งในระหว่างที่เครื่องมือกลคมตัดกำลังทำงานชิ้นงานจะมีการสั่นสะเทือนเนื่องจากถูกแรงภายนอกมากระทำ แรงในการจับยึดชิ้นงานจะต้องไม่ลดลงหรือทำให้ชิ้นงานหลุดออกจากตัวจับยึดในขณะที่ทำการผลิต

2.1.1.3 เครื่องมือกลคมตัด

เครื่องมือกลคมตัด คืออุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการแต่งผิวชิ้นงานให้ได้ขนาดตามต้องการ ชิ้นงานที่ต้องผ่านการผลิตมาด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นการหล่อ การทุบขึ้นรูปงานแปรรูปร้อน หรืองานแปรรูปเย็นก็ตาม ขั้นตอนสุดท้ายต้องนำไปแต่งผิวให้ได้ขนาดด้วย

เครื่องมือ กลคมตัดก่อนเสมอ แล้วจึงนำไปประกอบเป็นเครื่องจักรต่อไป มีดคมตัด (cutting tools) ที่ใช้กับเครื่องมือกลคมตัดแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันอยู่มากทั้งในแง่ของจำนวนคมตัดที่ใช้ (cutting edges) รวมทั้งลักษณะที่มีดคมตัดและชิ้นงานเคลื่อนที่สัมพันธ์ซึ่งกันและกัน นอกจากนี้เครื่องมือกลคมตัดยังสามารถแบ่งได้หลายชนิด ยกตัวอย่างเช่น เครื่องมือกลคมตัดบางชนิด ชิ้นงานจะติดตั้งอยู่กับที่บนโต๊ะงานตลอดเวลาในขณะที่มีดคมตัดเป็นตัวเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน เครื่องมือกลคมตัดประเภทนี้ได้แก่ เครื่องเจาะ เครื่องคว้านรู เครื่องตัด และเครื่องไสชนิดมีดเคลื่อนที่ เป็นต้น และเครื่องมือกลคมตัดบางชนิดจะติดตั้งไปมีดอยู่กับที่ อาศัยชิ้นงานเป็นตัวเคลื่อนที่เข้าหา มีด เครื่องมือกลจำพวกนี้ได้แก่ เครื่องไสชนิดชิ้นงานเคลื่อนที่ เครื่องกลึง และเครื่องคว้านรูบางชนิด เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ เพื่อสามารถนำไปชดเชยเส้นทางเดินใบมีด โดยผู้วิจัยจะทำการศึกษารณีเครื่องมือกลคมตัดเฉพาะเครื่องตัดและเครื่องเจาะ ซึ่งสามารถอธิบายกรรมวิธีการผลิตได้ คือ

1) งานตัด (machining) งานตัดเป็นกรรมวิธีการผลิตนิยมใช้ในการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ เพราะสามารถทำการผลิตชิ้นงานได้หลากหลายและมีคุณภาพมากกว่ากรรมวิธีผลิตอื่น เนื่องจากงานตัดใช้ใบมีดในการตัดชิ้นงาน อีกทั้งตัวเครื่องมือกลคมตัดยังมีการพัฒนาให้สามารถป้อนระยะการตัดที่ละเอียด จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีความถูกต้องมากกว่ากรรมวิธีการผลิตแบบอื่น นอกจากนี้ตัวใบมีดยังมีคมที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามลักษณะของการใช้งาน ตลอดจนมีอุปกรณ์ช่วยที่หลากหลายทำให้สามารถทำงานได้อย่างกว้างขวางมากกว่ากรรมวิธีการผลิตแบบอื่น โดยหลักการทำงานของงานตัดจะใช้การหมุนของตัวมีดตัด (cutter) ซึ่งติดอยู่บนเพลลาหมุน และถูกขับเคลื่อนให้เกิดการตัดเฉือนด้วยเพลลา (spindle) ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ คือ

- 1) ขนาดความโตของมีดตัด (size of milling cutters)
- 2) ชนิดของมีดตัด (type of milling cutters)
- 3) รูปร่างของมีดตัด (shape of milling cutters)
- 4) ชนิดของวัสดุงาน (type of materials)
- 5) ความเร็วที่ใช้ในการป้อนกัตและความเร็วของเพลลา (feed and speed of spindle)
- 6) อุปกรณ์ช่วยจับและอุปกรณ์ช่วยงานพิเศษต่างๆ

ในการทำงานของเครื่องตัด (milling operation) ผู้ผลิตจะออกแบบมาให้เหมาะสมกับความต้องการของการใช้งาน โดยยึดถือความสะดวกในการทำงานและประโยชน์การใช้งานเป็นหลัก ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของเครื่องตัด ตามลักษณะรูปร่างและการใช้งานได้ คือ

- 1) เครื่องตัดงานผิวเรียบ (plain milling machine)
- 2) เครื่องตัดงานผิวตั้งฉาก (vertical milling machine)
- 3) เครื่องตัดงานเอนกประสงค์ (universal milling machine)
- 4) เครื่องตัดงานเฉพาะ (special milling machine)

2) งานเจาะ (drilling) งานเจาะเป็นกรรมวิธีการผลิตพื้นฐานของชิ้นงานทั่วไป โดยส่วนใหญ่งานเจาะจะไม่ต้องการความละเอียดมาก เช่น เจาะรูระบบหล่อเย็น เจาะรูร้อยสกรู สำหรับยึดแม่พิมพ์ เจาะรูทำเกลียว เจาะรูสำหรับปลดสลัก และสลักดินกลับ สำหรับงานเจาะที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงสามารถใช้เจาะรูใส่ปอกนำและเพลานำเพื่อเจาะให้ได้รูตามที่ต้องการ ในงานเจาะนี้ใช้เครื่องมือกลที่เรียกว่า เครื่องเจาะ (drilling machines) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จับดอกสว่านให้หมุนเฉือนกัดชิ้นงานออกตามขนาดที่ต้องการชนิดของเครื่องเจาะ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องเจาะตั้งโต๊ะ (bench – model sensitive drilling machine) เป็นเครื่องเจาะขนาดเล็ก เครื่องเจาะรัศมี (radial drilling machine) เป็นเครื่องเจาะรูที่มีขนาดใหญ่กว่าเครื่องเจาะตั้งพื้น โดยที่หัวจับดอกสว่านจะเลื่อนไป-มาบนแขนเจาะ (arm) จึงสามารถเจาะชิ้นงานได้ทุกตำแหน่ง เป็นต้น ในการเจาะชิ้นงานของเครื่องจักรแต่ละแบบมีหลักการคล้ายกัน ซึ่งสามารถแบ่งลำดับขั้นการเจาะได้ คือ

- 1) เลือกดอกสว่าน โดยดอกสว่านแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ดอกสว่านแบบก้านเรียว (taper shank) และดอกสว่านก้านตรง (parallel shank)
- 2) เลือกเครื่องเจาะ โดยดอกสว่านแบบก้านเรียวมักใช้กับเครื่องเจาะขนาดใหญ่ เช่น เครื่องเจาะรัศมี ส่วนดอกสว่านแบบก้านตรงมักใช้กับเครื่องเจาะขนาดเล็ก เช่น เครื่องเจาะตั้งโต๊ะ
- 3) จับดอกสว่านให้แน่น โดยก้านจับของดอกสว่านนี้จะทำหน้าที่จับยึดเข้ากับอุปกรณ์การจับของเครื่องเจาะ เช่น พวกหัวจับ (drill chuck) สำหรับสว่านก้านตรง และปลอกจับเรียว (taper sleeve) สำหรับสว่านก้านเรียว
- 4) จับชิ้นงานบนโต๊ะงานให้แน่นด้วยฟิกซ์เจอร์
- 5) ตั้งปลายดอกสว่านให้ตรงศูนย์กลางที่ดอกนำศูนย์เอาไว้

6) ตั้งความเร็วรอบของแกนเจาะ อัตราป้อนการเจาะอัตโนมัติ การผลิตชิ้นงานให้มีความถูกต้องสูง จะให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพของเครื่องเจาะ และการจับยึดชิ้นงานของฟิกส์เจอร์ด้วย

2.1.1.4 การควบคุมการตัด

การควบคุมการตัดหรือเส้นทางการเดินใบมีด (tool path) เป็นการควบคุมตำแหน่งและทิศทางการตัดของใบมีดให้ตรงตำแหน่งที่ต้องการโดยเลือกชนิดของใบมีด และอัตราการตัดชิ้นงานให้เหมาะสมกับวัสดุและรูปร่างของชิ้นงาน ในการตัดชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูงจะต้องให้ความสำคัญกับตำแหน่งและทิศทางการตัดของใบมีด ฉะนั้นจะต้องมีการกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อของตำแหน่งการตัด (positional tolerance) และค่าระยะพิกัดเผื่อของทิศทางการตัด (orientational tolerance) เพื่อให้ชิ้นงานที่ถูกตัดมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ปัจจุบันได้มีเครื่องจักรสำหรับเพิ่มความแม่นยำของเส้นทางการเดินใบมีด เช่นเครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC : Computer Numerical Control) เป็นเครื่องจักรที่มีการทำงานอัตโนมัติ โดยมีการกำหนดตำแหน่งการตัดของชิ้นงานในรูปแบบ NC code และนอกจากนี้ยังมี CAM (Computer Aided Manufacturing) ซึ่งซอฟต์แวร์ที่ช่วยในการคำนวณสร้างเส้นทางการเดินของเครื่องมือตัด และสร้างรหัสตัวเลข ตัวอักษร (NC-code) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักร CNC

จากการศึกษาองค์ประกอบของการผลิตชิ้นงาน สิ่งเหล่านี้เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในการผลิตชิ้นงานทั้งสิ้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสาเหตุที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด เพราะหากประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดได้ จะทำให้สามารถชดเชยเส้นทางการเดินใบมีดเพื่อช่วยลดความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานได้อีกด้วย โดยปัจจัยที่ส่งผลนี้คือ ปัจจัยที่เกิดจากชิ้นงานที่นำมาผลิตและฟิกส์เจอร์ที่จับยึดชิ้นงานนั้น ทางผู้วิจัยได้สำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสามารถสรุปสาเหตุที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัดได้คือ

2.1.2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

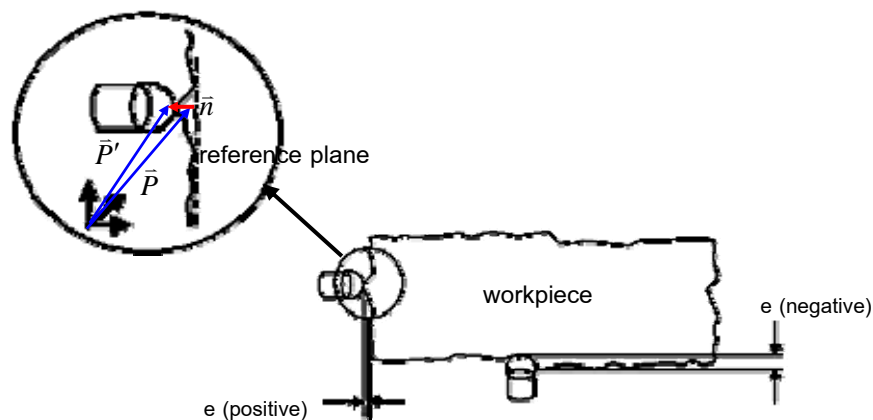
จากการสำรวจเอกสาร พบว่ามีผู้วิจัยส่วนน้อยที่ทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานในขั้นตอนก่อนกระบวนการผลิตที่มาจากสาเหตุตำแหน่งของชิ้นงานที่ถูกกำหนดไว้เปลี่ยนแปลงไปอันเป็นผลมาจากความไม่แน่นอนของชิ้นงานและสาเหตุการเสียรูปของชิ้นงานเนื่องจากลักษณะการจับยึดของฟิกส์เจอร์ ซึ่งสามารถแบ่งความผิดพลาดออกเป็น 2 ส่วนได้ดังนี้

2.1.2.1 ความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง

จากการตรวจสอบเอกสารในหัวข้อ 1.2.1 พบว่าความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งเกิดจากสาเหตุ ความไม่แน่นอนของชิ้นงาน และความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่งจากการเสื่อมสภาพ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้ คือ

1) สาเหตุที่เกิดจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน

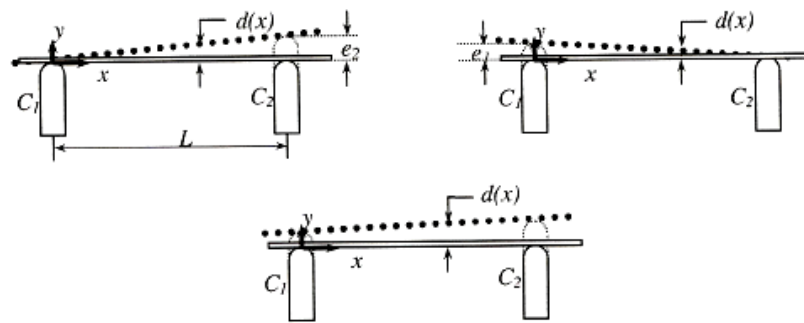
ความไม่แน่นอนของชิ้นงาน คือ ความหยابผิวของชิ้นงานซึ่งอยู่ในช่วงค่าระยะพิคตเฟื่อที่กำหนด และจากวิธีการผลิตของเครื่องกลคมตัดแต่ละชนิดส่งผลให้เกิดความหยابผิวชิ้นงานที่แตกต่างกัน (Stout et al., 1990) ความไม่แน่นอนของชิ้นงานนี้ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งได้ โดยเมื่อชิ้นงานที่มีความไม่แน่นอนนี้ไปสัมผัสกับตัวกำหนดตำแหน่งทำให้ตำแหน่งชิ้นงานคลาดเคลื่อนไป (Chaiprapat and Rujikietgumjorn, 2006b) ดังรูปที่ 2-6 แสดงความไม่แน่นอนของชิ้นงาน (e) ซึ่งมีทั้งทิศทางบวกและลบเมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิงในรูปของเวกเตอร์ \vec{n} (\vec{n} คือเวกเตอร์ตั้งฉากซึ่งมีระยะทางจากระนาบอ้างอิงถึงจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง) ส่งผลให้ตำแหน่งจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งเปลี่ยนจาก \vec{P} เป็น \vec{P}' (\vec{P} คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่ควรจะเป็น และ \vec{P}' คือเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่เกิดจากความไม่ราบเรียบ)



รูปที่ 2-6 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน
(Chaiprapat and Rujikietgumjorn, 2006b)

2) สาเหตุที่เกิดจากตัวกำหนดตำแหน่ง

สาเหตุที่เกิดจากตัวกำหนดตำแหน่ง เกิดจากความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่งที่มีการเชื่อมสภาพ หรือวางตัวกำหนดตำแหน่งในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมหากชิ้นงานที่ทำการกำหนดตำแหน่งนั้นมีพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งได้ (Chaiprapat and Rujikietgumjorn, 2008) ดังรูปที่ 2-7 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากความบกพร่องของตัวกำหนดในรูป dx (C_1 และ C_2 คือตัวกำหนดตำแหน่งที่ 1 และ 2 ตามลำดับ L คือ ระยะห่างระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งที่ 1 และ 2 e_1 ความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่ง C_1 และ e_2 ความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่ง C_2)



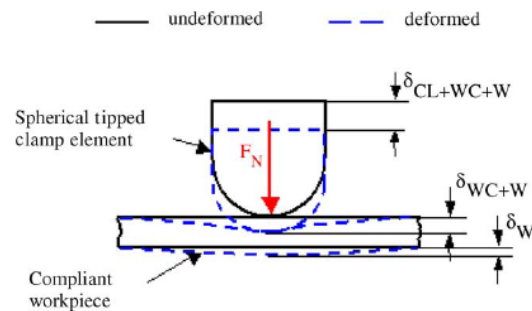
รูปที่ 2-7 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดจากความบกพร่องของตัวกำหนดตำแหน่ง

(Chaiprapat and Rujikietgumjorn, 2008)

จากการศึกษาความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง สามารถสรุปได้ว่า ความผิดพลาดในขั้นตอนนี้เกิดจากสาเหตุความไม่แน่นอนของชิ้นงานเป็นสาเหตุหลัก เนื่องจากการกำหนดค่าระยะพิกต์เฟื่อของชิ้นงานมีช่วงกว้างกว่าค่าระยะพิกต์เฟื่อของตัวกำหนดตำแหน่ง และหากชิ้นงานนี้ไปสัมผัสกับตัวกำหนดตำแหน่งที่มีการเชื่อมสภาพส่งผลให้ความผิดพลาดเพิ่มขึ้นได้อีก นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์ความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง งานวิจัยส่วนใหญ่จะพิจารณาชิ้นงานมีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) ส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง จะมีลักษณะการเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานแบบการเคลื่อนตำแหน่งชิ้นงานไปทุกส่วนในทิศทางเดียวกัน และสรุปอยู่ในรูปหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต โดยอ้างอิงจาก Zied (1991) ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.3

2.1.2.2 ความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึด

ในการจับชิ้นงานด้วยตัวจับยึด ตำแหน่งของตัวจับยึดต้องไม่กีดขวางทางเดินของใบมีดและเอื้อให้มีความสะดวกในการนำชิ้นงานเข้าออก แรงของตัวจับยึดที่ใช้ในการกดไม่ควรน้อยเกินไปจนชิ้นงานเลื่อนไถลได้เมื่อโดนแรงตัด และไม่ควรมากเกินไปจนเกินความจำเป็นจากการตรวจสอบเอกสารในหัวข้อ 1.2.2 พบว่าโดยปกติแล้วแรงของตัวจับยึดที่กระทำต่อชิ้นงานจะทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป ดังแสดงในรูปที่ 2-8 เมื่อ δ_{WC} คือระยะการเสียรูปของชิ้นงานที่จุดสัมผัส δ_W คือระยะการเสียรูปของชิ้นงานด้านล่าง (กรณีที่ใช้จับยึดชิ้นงานแผ่นบาง) δ_{CL} คือระยะของการจับยึด การเสียรูปนี้เมื่อนำไปวิเคราะห์ทั้งระบบของการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ ซึ่งมีการพิจารณาสาเหตุจากลำดับและตำแหน่งในการจับยึดประกอบด้วย ส่งผลให้ตำแหน่งของชิ้นงานคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งที่ควรจะเป็นทั้งในรูปของการเลื่อนและการหมุนแต่กรณีการหมุนจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการเลื่อน และหากตัวจับยึดชิ้นงานวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้การจับยึดชิ้นงานไม่แน่นพอ ส่งผลให้เมื่อระหว่างการผลิตชิ้นงานอาจมีการบิดหรือเคลื่อนตำแหน่งเพิ่มขึ้นได้อีก



รูปที่ 2-8 แสดงลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานที่เกิดจากตัวจับยึด

(Satyanarayana and Melkote, 2004)

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน งานวิจัยส่วนใหญ่นิยมใช้ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์และระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อคำนวณหาการเสียรูปของชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ ซึ่งผู้วิจัยได้อธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.4 และ 2.5

2.2 GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing)

เนื่องจากความไม่แน่นอนในการผลิตชิ้นงานเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก ฉะนั้น เพื่อเป็นการควบคุมความไม่แน่นอนนี้ จึงต้องมีมาตรฐานสำหรับการกำหนดระยะการผลิตที่ เรียกว่า GD&T

GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) คือ มาตรฐานสากลของ สัญลักษณ์สำหรับแสดงคำอธิบายการเขียนแบบทางวิศวกรรมและการคำนวณสร้างแบบจำลอง สามมิติสำหรับเป็นตัวแทนของรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการผลิต GD&T ถูกใช้กำหนดลักษณะส่วน ต่าง ๆ ของชิ้นงานจนถึงกำหนดค่าความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ของรูปร่างชิ้นงานนั้น GD&T สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ Dimensioning เป็นการกำหนดเฉพาะขนาดชิ้นงานพื้นฐาน ส่วน Tolerancing เป็นการกำหนดค่าระยะพิสัยเพื่อซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนของขนาดชิ้นงาน ที่ยอมรับ การใช้ GD&T มีส่วนช่วยในการผลิตชิ้นงาน เพราะทำให้แน่ใจว่าชิ้นงานที่ผลิต สามารถนำไปใช้ในกระบวนการต่อไปและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการแก้ไขหรือกำจัดชิ้นงาน เสีย (defect) อีกด้วย GD&T สามารถระบุหรือกำหนดค่าระยะพิสัยของส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน ได้หลายวิธีตั้งแต่ ขนาด (size) ตำแหน่ง (location) รูปแบบของชิ้นส่วน (form) รวมไปถึง ทิศทาง (orientation) งานวิจัยนี้ได้นำมามาตรฐาน GD&T บางส่วนมาพิจารณา โดยกล่าวถึง ANSI Y14.5M (Foster, 1994) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ใช้อย่างแพร่หลายในการควบคุมความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิตและมีรายละเอียดดังนี้ คือ

2.2.1 การกำหนดขนาดชิ้นงาน (Dimensioning)

การกำหนดขนาดชิ้นงานเป็นการบอกส่วนประกอบต่างๆ ของชิ้นส่วน (feature) เช่น พื้นผิว (surface) รู (hole) ร่อง (slot) เป็นต้น ซึ่งในการบอกส่วนประกอบต่างๆ ของชิ้นส่วนนั้นสามารถบอกได้หลายลักษณะ ยกตัวอย่างเช่น

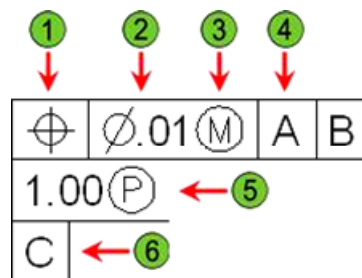
1) feature of size คือการบอกขนาดของ ทรงกลม หรือระยะทางระหว่าง สองพื้นผิวที่ขนานกัน และในการบอกขนาดของ feature of size มี 2 แบบคือ internal และ external

2) actual local size เป็นค่าขนาดของชิ้นงานตามระยะต่างๆ

3) maximum material condition (MMC) คือเงื่อนไขที่ feature of size จะ มีปริมาณของเนื้อวัสดุเหลือมากที่สุด ซึ่ง MMC ของ external feature of size คือขนาดที่ใหญ่ ที่สุดตามขอบเขตที่กำหนด ส่วน MMC ของ internal feature of size คือขนาดที่เล็กที่สุดตาม ขอบเขตที่กำหนด

4) least material condition (LMC) คือเงื่อนไขที่ feature of size จะมีปริมาณของเนื้อวัสดุเหลือน้อยที่สุด ซึ่ง LMC ของ external feature of size คือขนาดที่เล็กที่สุดตามขอบเขตที่กำหนด ส่วน LMC ของ internal feature of size คือขนาดที่ใหญ่ที่สุดตามขอบเขตที่กำหนด

นอกจากนี้ในการบอกขนาดชิ้นงานจะใช้ feature control frame ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 6 ส่วน คือ 1. ลักษณะเชิงเรขาคณิต (geometric characteristic) 2. ลักษณะรูปแบบและค่าระยะพิกัดเผื่อของขนาด (form and tolerance zone size) 3. เงื่อนไขวัสดุ (material condition) 4. จุดอ้างอิง (datum references) 5. ช่วงค่าระยะพิกัดเผื่อ (projected tolerance zone) และ 6. จุดอ้างอิงเฉพาะ (datum identifier) ดังรูปที่ 2-9 ซึ่งแสดงตัวอย่างการบอกขนาดของชิ้นงานโดยใช้ feature control frame



รูปที่ 2-9 การบอกขนาดของชิ้นงานโดยใช้ feature control frame
(Foster, 1994)

2.2.2 การกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อ (tolerancing)

ค่าระยะพิกัดเผื่อ คือค่าความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานที่ยอมรับได้จากขนาดปกติ (nominal size) การกำหนดค่าพิกัดความเผื่อแบบดั้งเดิม (conventional tolerancing) จะคิดจากความแตกต่างของช่วงระหว่างขนาดจำกัดโตสุด (maximum limit of size) และขนาดจำกัดเล็กสุด (minimum limit of size) ของการขึ้นรูป แต่สำหรับค่าพิกัดความเผื่อในปัจจุบันจะนำความผันแปรทางด้านเรขาคณิต (geometric variation) เข้ามาร่วมด้วย ในการผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง การกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อของชิ้นงานเป็นส่วนที่สำคัญมาก หากชิ้นงานที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตมีค่าระยะพิกัดเผื่อที่กว้างซึ่งง่ายต่อการผลิตและค่าใช้จ่ายต่ำ นั้นหมายความว่าชิ้นงานในรุ่นการผลิตนั้นจะมีความไม่แน่นอนสูงซึ่งอาจจะก่อให้เกิดปัญหาในกระบวนการถัดไป เช่น ประกอบชิ้นงานไม่ได้ หรือเกิดความผิดพลาดในการติดตั้งเพื่อการผลิตในขั้นตอนต่อไป เป็นต้น ดังนั้นในการกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อ ควรต้องคำนึงถึงความเหมาะสมกับการใช้งาน (function) ความสามารถในการผลิต (manufacturability) และค่าใช้จ่าย

การกำหนดระยะพิกัดเผื่อมีหลายลักษณะและสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดหลักตามชนิดของชิ้นส่วนดังรูปที่ 2-10 ได้ดังนี้

1) ชนิดชิ้นส่วนเฉพาะโดยไม่เกี่ยวข้องกับจุดอ้างอิง (individual) จะมีการกำหนดระยะพิกัดเผื่อในส่วนชนิดของรูปแบบ (form) ประกอบด้วยลักษณะ ความเรียบ (flatness) ความตรง (straightness) ความกลม (circularity) และความเป็นทรงกระบอก (cylindricity)

2) ชนิดชิ้นส่วนเฉพาะหรือเกี่ยวข้องกับจุดอ้างอิง (individual or related) จะมีการกำหนดระยะพิกัดเผื่อในส่วนชนิดของรูปโครงสร้าง (profile) ประกอบด้วยลักษณะ โครงสร้างของเส้น (profile of a line) และโครงสร้างของพื้นผิว (profile of a surface)

3) ชนิดชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับจุดอ้างอิง (related) จะมีการกำหนดระยะพิกัดเผื่อเป็น 3 ส่วน คือ 3.1) ชนิดของทิศทาง (orientation) ประกอบด้วยลักษณะ ความตั้งฉาก (perpendicularity) ความเป็นมุม (angularity) และความขนาน (parallelism) 3.2) ชนิดของตำแหน่ง (location) ประกอบด้วยลักษณะ พิกัดของตำแหน่ง (position) และความสวมกันของจุดศูนย์กลางวงกลม (concentricity) และ 3.3) ชนิดของการหนีจากจุดอ้างอิง (runout) ประกอบด้วยลักษณะ การหนีศูนย์กลางของวงกลม (circular runout) และการหนีแนวระนาบ (total runout)

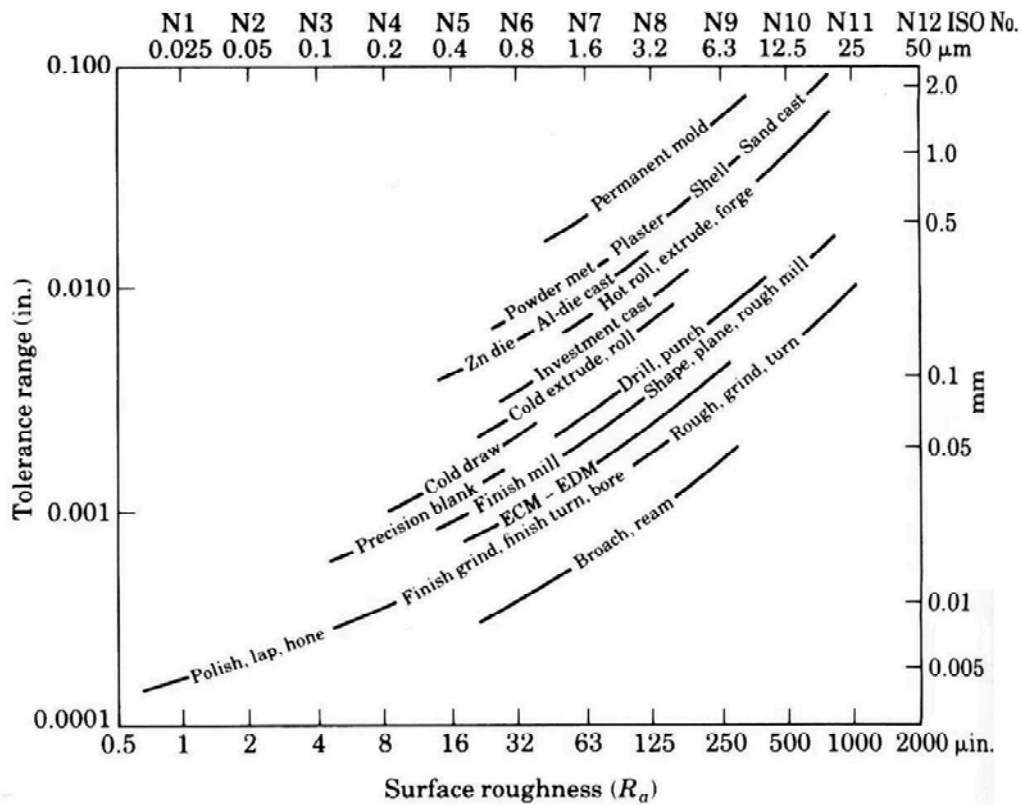
Type of feature	Type of tolerance	Characteristic	Symbol
Individual (no datum reference)	Form	Flatness	
		Straightness	
		Circularity (roundness)	
		Cylindricity	
Individual or related	Profile	Profile of a line	
		Profile of a surface	
Related (datum reference required)	Orientation	Perpendicularity	
		Angularity	
		Parallelism	
	Location	Position	
		Concentricity	
	Runout	Circular runout	
		Total runout	

รูปที่ 2-10 การแบ่งชนิดของการกำหนดลักษณะระยะพิกัดเผื่อ
(Kalpakjian, 1992)

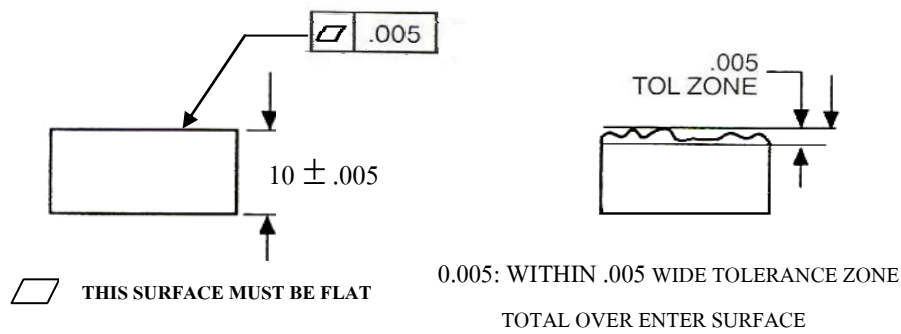
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อบางลักษณะที่นำไปใช้สำหรับวิเคราะห์ในงานวิจัย ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.2.2.1 การกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อของความเรียบ (flatness tolerance)

เนื่องจากการผลิตชิ้นงานจะมีความหยابผิวเกิดขึ้นเสมอ (ความหยابของผิวงาน คือความไม่สม่ำเสมอและความไม่ราบเรียบของผิวชิ้นงาน) ขึ้นอยู่กับกระบวนการในการผลิตชิ้นงาน ดังรูปที่ 2-11 ซึ่ง และเมื่อนำชิ้นงานที่มีผิวไม่ราบเรียบไปวางบนฟิกซ์เจอร์ ทำให้ชิ้นงานเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการผลิตควรมีควบคุมความหยابผิวโดยการกำหนดช่วงค่าระยะพิกัดเผื่อของความเรียบซึ่งเป็นการวัดความไม่ราบเรียบของผิวที่สนใจดังรูปที่ 2-12



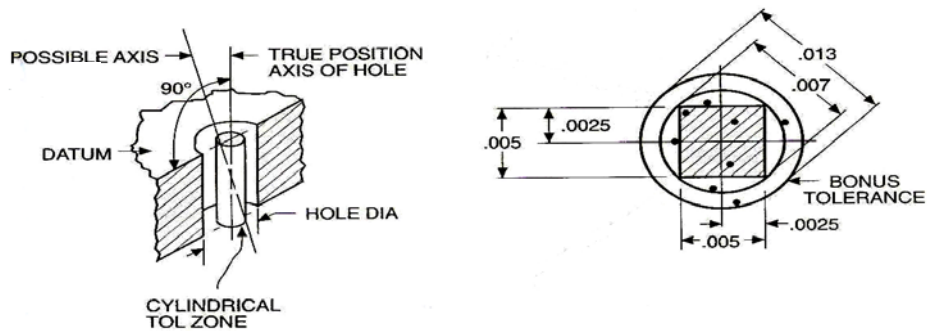
รูปที่ 2-11 ค่าคลาดเคลื่อนและความหยابของผิวงานที่ขึ้นอยู่กับลักษณะการผลิตชิ้นงาน (Kalpakjian, 1992)



รูปที่ 2-12 การกำหนดช่วงความเรียบของพื้นผิวชิ้นงาน
(Foster, 1994)

2.2.2.2 การกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อของตำแหน่ง (position tolerance)

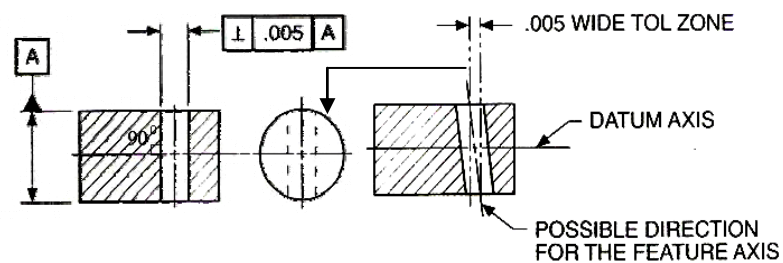
การกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อของตำแหน่ง คือ การกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเดิม ยกตัวอย่างเช่น ในการเจาะชิ้นงาน จะมีการกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ (cylindrical tolerance zone) ซึ่งพิจารณาจากเส้นของแกนเจาะรู ที่อาจเกิดขึ้นได้ (possible axis) โดยจุดศูนย์กลางของช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนถูกกำหนดจากเส้นแกนรูเจาะที่ออกแบบไว้ (true position axis of hole) ดังรูปที่ 2-13 แสดงการกำหนดช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ ขนาด ± 0.003 มิลลิเมตร



รูปที่ 2-13 การกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน
(Foster, 1994)

2.2.2.3 การกำหนดค่าระยะพิงัดเพื่อการตั้งฉากของพื้นผิว (perpendicularity tolerance)

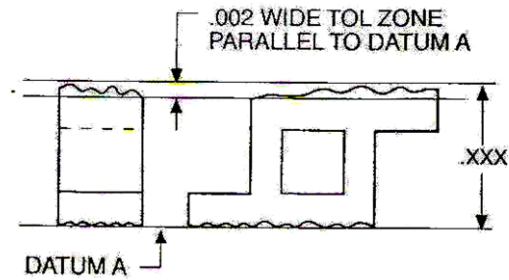
การกำหนดค่าระยะพิงัดเพื่อการตั้งฉากกันของพื้นผิว คือการกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบอ้างอิง โดยระนาบและจุดศูนย์กลางระนาบของชิ้นงานจริงต้องตั้งอยู่ระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบนั้น ยกตัวอย่างเช่น งานเจาะรูตั้งฉากกับชิ้นงานเทียบกับระนาบอ้างอิง A ที่กำหนดช่วงความคลาดเคลื่อน .005 ดังรูปที่ 2-14 แสดงทิศทางการเจาะชิ้นงานที่เป็นไปได้ (possible direction for the feature axis)



รูปที่ 2-14 การพิจารณาความคลาดเคลื่อนการตั้งฉากกันของพื้นผิว
(Foster, 1994)

2.2.2.4 การกำหนดค่าระยะพิงัดเพื่อการขนานกันของพื้นผิว (parallelism tolerance)

การกำหนดค่าระยะพิงัดเพื่อการขนานกันของพื้นผิว คือ การกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนระยะห่างของความขนานของพื้นผิว ศูนย์กลางของระนาบเทียบกับระนาบหรือแกนอ้างอิง เช่น ระยะห่างของความขนานพิจารณาจากช่วงระยะห่างระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบที่วางห่างกับระนาบอ้างอิง ซึ่งระนาบหรือจุดศูนย์กลางระนาบของชิ้นงานจริงต้องตั้งอยู่ระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบนั้นด้วย ดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 แสดงการพิจารณาความคลาดเคลื่อนการขนานกันของพื้นผิว
ที่มา: Foster (1994)

2.3 หลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต (geometric transformation)

จากหัวข้อ 2.1.2.1 ผู้วิจัยสนใจที่จะทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด จากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนของชิ้นงานและตัวกำหนดตำแหน่งที่มีความบกพร่อง โดยใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ซึ่งอ้างอิงจาก Zied (1991) และได้นำเอาสมการความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในรูปแบบทั่วไป โดยสมการนี้เป็นสมการที่คิดมาจากหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงของวัตถุจากลักษณะเดิมเป็นลักษณะใหม่ และประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงพื้นฐานต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงแบบหมุน (rotation transformation) การเปลี่ยนแปลงแบบเลื่อน (translation transformation) การเปลี่ยนแปลงแบบย่อหรือขยาย (scaling transformation) เป็นต้น เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจที่จะทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ฉะนั้นผู้วิจัยจะอธิบายเฉพาะการเปลี่ยนแปลงแบบเลื่อนและแบบหมุนโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงแบบหมุน (rotation transformation) คือการหมุนวัตถุรอบระบบพิกัด X Y และ Z จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้นำหลักการเปลี่ยนแปลงแบบหมุนกรณี 3 มิติ ดังแสดงในสมการ (2.1)

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\alpha)\cos(\gamma) - \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & -\cos(\beta)\sin(\gamma) \\ \sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta)\cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ

R_1 : เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบหมุน

γ, β, α : มุมของการเปลี่ยนแปลงทางแบบหมุนรอบแกน X, Y, Z ตามลำดับ

2. การเปลี่ยนแปลงแบบเลื่อน (translation transformation) คือการเลื่อนตำแหน่งวัตถุเป็นแนวเส้นตรงตามแนวแกน X Y และ Z จากตำแหน่งเดิมไปยังตำแหน่งใหม่ ซึ่งผู้วิจัยได้นำหลักการเปลี่ยนแปลงแบบเลื่อนกรณี 3 มิติ ดังแสดงในสมการ (2.2)

$$d = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

เมื่อ d : เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบเลื่อน

dx, dy, dz : ตำแหน่งของเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบเลื่อนตามแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ

จากการเปลี่ยนแปลงแบบหมุนและแบบเลื่อนสามารถนำมาจัดกลุ่มรวมกันให้ได้เป็นเมตริกซ์การแปลงรูป (Homogeneous transformation matrix) ดังสมการ (2.3)

$$L' = [R]L \quad (2.3)$$

โดย

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_1] & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\beta) & dx \\ \sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\alpha)\cos(\gamma) - \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & -\cos(\beta)\sin(\gamma) & dy \\ \sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta)\cos(\gamma) & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อ L' : ตำแหน่งของวัตถุหลังจากการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต

L : ตำแหน่งเดิมของวัตถุ

$[R]$: เมตริกซ์การแปลงรูป (homogeneous transformation matrix) ซึ่งมีตัวแปร $(dx, dy, dz, \gamma, \beta, \alpha)$

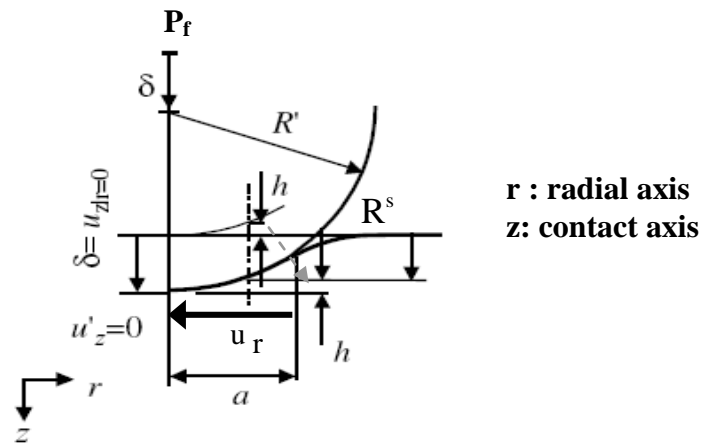
จากหัวข้อ 2.1.2.2 ผู้วิจัยสนใจที่จะทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงาน จากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึด ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่เหมาะสมของแรงและตำแหน่งในการจับยึด จากการตรวจสอบเอกสารพบว่าในการศึกษาสาเหตุที่เกิดขึ้นตอนการจับยึดชิ้นงาน ผู้วิจัยส่วนใหญ่ได้ทำการวิเคราะห์โดยการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์บนพื้นฐานทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ และระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีรายละเอียด คือ

2.4 ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ (Hertz's contact theory)

ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์เป็นทฤษฎีที่ใช้สำหรับพิจารณาการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้น แบ่งออกเป็นการพิจารณาหลายชนิดด้วยกัน เช่น พิจารณาการสัมผัสกันของวัตถุทรงกลมสองชิ้นสัมผัสกัน วัตถุทรงกลมกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ วัตถุที่สัมผัสกันเกิดการลื่นไถลหรือไม่ เป็นต้น ทางผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ เพื่อมาใช้ในการอธิบายถึงการการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ ดังนั้นจึงทำการศึกษาเฉพาะการสัมผัสกันของวัตถุทรงกลมกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ ซึ่งวัตถุทรงกลม (ฟิกซ์เจอร์) เป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งมากกว่าวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ (ชิ้นงาน) งานวิจัยนี้พิจารณาแรงที่กระทำกับวัตถุสองชนิดที่สัมผัสกัน โดยแบ่งเป็นสองส่วน คือ

2.4.1 แรงกระทำกับวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกันในแนวตั้งฉาก (normal load)

การพิจารณาแรงกระทำกับวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกันในแนวตั้งฉาก ผู้วิจัยสามารถอธิบายลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้นซึ่งเป็นกรณีวัตถุทรงกลมสัมผัสกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบโดยมีแรงกระทำในแนวแกน z ทำให้เกิดการเสียรูปตามแนวแกน z คือ u_z และเสียรูปตามแนวแกน r คือ u_r (แกน z คือแนวความลึกของการสัมผัส แกน r คือ แนวรัศมีของการสัมผัส) ดังแสดงในรูปที่ 2-16 และสามารถอธิบายเป็นสมการอ้างอิงจาก Fischer-Cripps (2007) โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ



รูปที่ 2-16 ลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุตามหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์
ที่มีแรงกระทำตามแนวแกน z
(Fischer-Cripps, 2007)

สมการระยะการเสี้ยวรูปตามแนวแกน z (u_z) กรณี $r < a$

$$u_z = \frac{1}{E^*} \frac{\pi}{4a} \frac{3}{2} P_m (2a^2 - r^2) \quad (2.4)$$

สมการระยะการเสี้ยวรูปตามแนวแกน z (u_z) กรณี $r > a$

$$u_z = \frac{1}{E^*} \frac{3}{2} P_m \frac{1}{2a} \left[(2a^2 - r^2) \sin^{-1} \frac{a}{r} + r^2 \frac{a}{r} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

สมการระยะการเสี้ยวรูปตามแนวแกน z ณ จุดสัมผัสระหว่างวัตถุ (δ_z)

$$\delta_z^3 = \left(\frac{3}{4E^*} \right)^2 \frac{P^2}{R} \quad (2.6)$$

สมการระยะการเสียรูปตามแนวแกน r (u_r) กรณี $r < a$

$$u_r = -\left(\frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{3E} + \frac{(1-2\nu')(1-\nu')}{3E'}\right) \frac{a^2}{r} \frac{3}{2} P_m \left[1 - \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^{\frac{3}{2}}\right] \quad (2.7)$$

สมการระยะการเสียรูปตามแนวแกน r (u_r) กรณี $r > a$

$$u_r = -\left(\frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{3E} + \frac{(1-2\nu')(1-\nu')}{3E'}\right) \frac{a^2}{r} \frac{3}{2} P_m \quad (2.8)$$

$$\text{โดย } \frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu'^2)}{E'}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R^s}$$

$$a = \left(\frac{3P_f R}{4E^*}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$P_m = \frac{P_f}{\pi a^2} = \left[\frac{4E^*}{3\pi}\right] \frac{a}{R}$$

เมื่อ P_f : แรงกระทำตั้งฉากกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ

P_m : ความดันเฉลี่ยของการสัมผัส

a : ระยะการสัมผัสระหว่างวัตถุทรงกลมกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบตามแนวแกน r เทียบกับจุดสัมผัสเริ่มต้น

R : รัศมีเส้นโค้งความสัมพันธ์ของรัศมีวัตถุทรงกลม (R') กับรัศมีวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ ($R^s = \infty$)

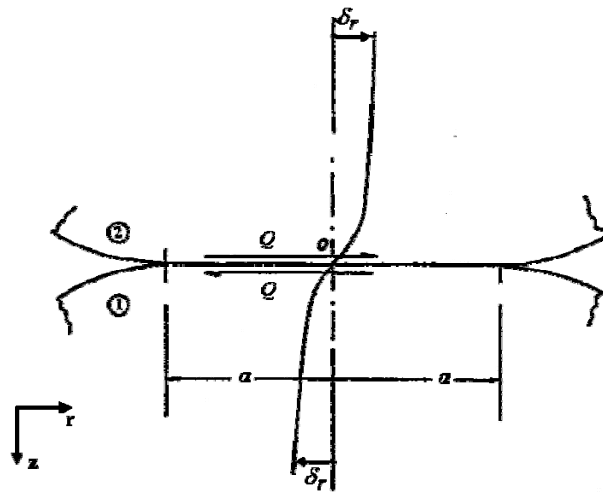
u_z, u_r : ระยะการเสียรูปในแต่ละจุดของวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ ตามแนวแกน z, r เทียบจุดสัมผัสที่ยังไม่มีการเสียรูป ตามลำดับ

E, E' : ค่ายังมอดูลัสของวัตถุทรงกลมและวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบตามลำดับ

ν, ν' : ค่าอัตราส่วนปัวซองของวัตถุทรงกลมและวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบตามลำดับ

2.4.2 แรงกระทำกับวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกันในแนวเส้นสัมผัส (tangential load)

การพิจารณาแรงกระทำกับวัตถุสองชนิดที่สัมผัสกันในแนวเส้นสัมผัส ผู้ทำวิจัยสามารถอธิบายลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุสองชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2-18 ซึ่งเป็นกรณีวัตถุทรงกลมสัมผัสกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบโดยมีแรงกระทำในแนวแกน r (แกน r คือ แกนที่สัมผัสกับวัตถุที่มีพื้นผิวเป็นระนาบ) และไม่มีการลื่นไถล (no slip) ระหว่างวัตถุสองชนิดนี้ สามารถอธิบายเป็นสมการโดยอ้างอิงจาก Johnson (1985) มีรายละเอียดดังนี้ คือ



รูปที่ 2-17 ลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุตามหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ที่มีแรงกระทำตามแนวแกน r

(Johnson, 1985)

สมการระยะการเสียรูปตามแนวแกน r ณ จุดสัมผัสระหว่างวัตถุ (δ_r)

$$\delta_r = \frac{Q}{8a} \left(\frac{2-\nu}{G} + \frac{2-\nu'}{G'} \right) \quad , Q < \mu P \quad (2.9)$$

เมื่อ Q : แรงกระทำแนวเส้นสัมผัสระหว่างวัตถุสองชิ้น

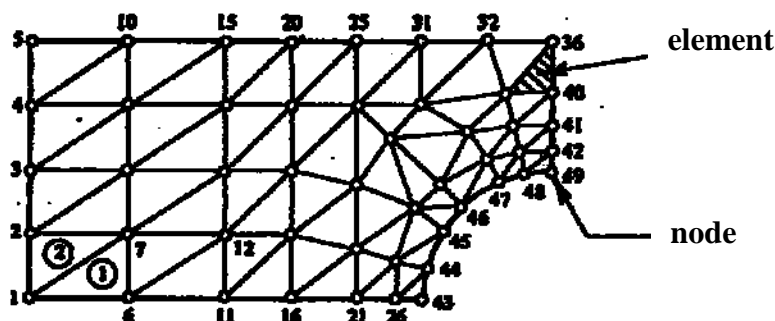
δ_r : ระยะการเสียรูป ณ จุดสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้น

G_1, G_2 : ค่าโมดูลัสเฉือนของวัตถุชิ้นที่ 1 และวัตถุชิ้นที่ 2 ตามลำดับ

μ : สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างวัตถุสองชิ้น

2.5 ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์หรือการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหาจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ อย่างต่อเนื่องตามรูปลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วนเรียกว่าเอลิเมนต์ (element) หลังจากนั้นจะทำการวิเคราะห์แต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นผลเฉลยที่จุดต่อ (node) ของแต่ละเอลิเมนต์นำมารวมเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-18 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ชิ้นส่วน

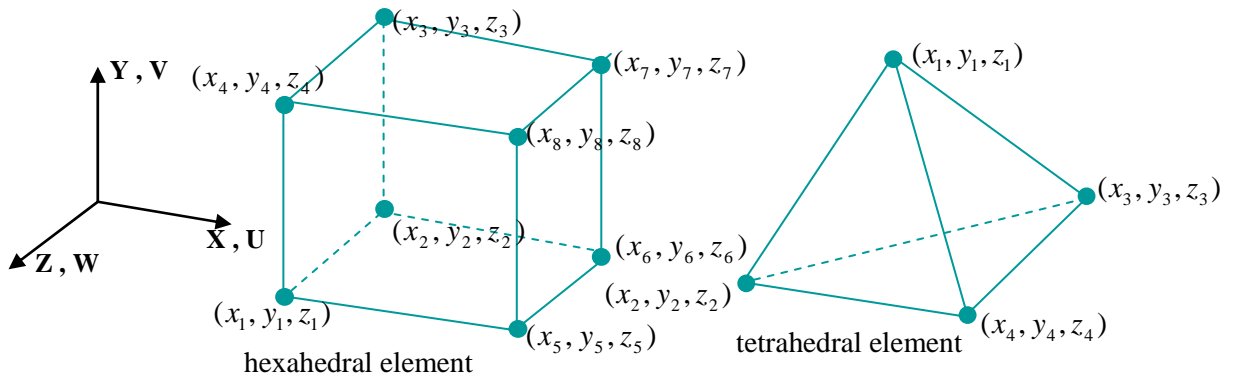
(Sadd, 2005)

ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนหลักทั้งหมด 6 ขั้นตอนซึ่งอ้างอิงจาก Logan (2007) ผู้วิจัยจะทำการอธิบายให้สอดคล้องกับงานวิจัย คือ การหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจากสาเหตุความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 การเลือกเอลิเมนต์

การแบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยควรเลือกลักษณะของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ทำการวิเคราะห์ โดยทั่วไปแล้วลักษณะของเอลิเมนต์มีทั้งในรูปแบบของ 2 มิติและ 3 มิติ ซึ่งในส่วนของลักษณะเอลิเมนต์แบบ 3 มิติ แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะด้วยกันคือ 1. เอลิเมนต์ทรงลูกบาศก์หกหน้า (hexahedral element) และ 2. เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral element) ดังรูปที่ 2-19 โดยแต่ละเอลิเมนต์จะเทียบพิกัดกับแกนที่เป็นระบบพิกัดของทั้งระบบคือระบบพิกัด X,Y,Z และระบบพิกัดของแต่ละเอลิเมนต์ คือ ระบบพิกัด U,V,W เนื่องจากงานวิจัยได้ศึกษาลักษณะการจับยึดของฟลักเจอร์โดยตัวกำหนดและตัวจับยึดมีรูปแบบเป็นทรง

กลม ดังนั้นในการจำลองแบบชิ้นงานจึงแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า เพื่อง่ายต่อการแบ่งเอลิเมนต์และเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์



รูปที่ 2-19 ลักษณะเอลิเมนต์ทรงหกหน้าและทรงสี่หน้า

(Logan, 2007)

ลักษณะของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าจะมีจุดต่อของเอลิเมนต์อยู่ 4 จุดต่อ และในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ประกอบไปด้วย 3 องศาอิสระ ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งเอลิเมนต์จะมีทั้งหมด 12 องศาอิสระของเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถสรุปให้อยู่ในรูปเมตริกซ์การกระจัด ($\{d\}$) ได้ดังสมการคือ

$$\{d\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \\ w_4 \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

2.5.2 การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์

การเลือกฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับลักษณะของเอลิเมนต์ที่เลือก ดังนั้นผู้วิจัยได้อธิบายฟังก์ชันประมาณภายในเอลิเมนต์เป็นแบบเส้นตรง (linear displacement function) ดังสมการ (2.11) เนื่องจากลักษณะชิ้นงานที่วิเคราะห์มีลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิต

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z \\
 v(x, y, z) &= a_5 + a_6x + a_7y + a_8z \\
 w(x, y, z) &= a_9 + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}z
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

โดย $a_i, i = 1, 12$ เป็นค่าคงที่ที่หาได้จากเงื่อนไขของจุดต่อทั้งสี่ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดทั้งระบบที่ทราบค่ากับระบบพิกัดของแต่ละเอลิเมนต์ที่ไม่ทราบค่า ซึ่งหลังจากการหาค่าคงที่ได้แล้วนั้นสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชัน (shape function) ของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าของจุดต่อที่ไม่ทราบค่า ดังสมการ

$$\begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} = [N] \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \tag{2.12}$$

$$\text{โดย } N_i = \frac{(\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y + \delta_i z)}{6V}$$

$$6V = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

2.5.3 การสร้างสมการของเอลิเมนต์

การสร้างสมการเอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับลักษณะของเอลิเมนต์และปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง (elasticity problem) ปัญหาเกี่ยวกับอุณหภูมิและความร้อน (thermal problem) ปัญหาของไหล (fluid problem) เป็นต้น ดังนั้นผู้วิจัยได้อธิบายสมการของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าและการวิเคราะห์เกี่ยวกับปัญหาความยืดหยุ่นในของแข็ง ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการของเอลิเมนต์ (element equation) ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & \cdots & k_{34} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{41} & k_{42} & \cdots & k_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_4 \end{Bmatrix} \tag{2.13}$$

โดย $[k]$ ของเอลิเมนต์หาได้จาก $[k] = [B]^T [D][B]V$
เมื่อ

$$[B] = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4] , \quad B_i = \begin{bmatrix} N_{i,x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{i,y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{i,z} \\ N_{i,y} & N_{i,x} & 0 \\ 0 & N_{i,z} & N_{i,y} \\ N_{i,z} & 0 & N_{i,x} \end{bmatrix}$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \\ \text{Symmetry} & & & & & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

2.5.4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน

เมื่อนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน ทำให้เกิดระบบสมการพร้อมกัน (system of simultaneous equation) ซึ่งก็คือสมการตัวแทนของระบบ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\{F\}_{system} = [K]_{system} \{d\}_{system} \quad (2.14)$$

2.5.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) คือการกำหนดเงื่อนไขลักษณะสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์หาคำตอบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของ $\{F\}_{system}$ และ $[K]_{system}$ ลงในสมการ (2.14) แล้วทำการแก้สมการนั้นเพื่อหาค่า $\{d\}_{system}$

2.5.6 การตีความผลลัพธ์

การตีความผลลัพธ์ คือ การนำผลจากการวิเคราะห์ประมวลหาคำตอบของปัญหาที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการทราบค่า $\{d\}_{system}$ และนอกจากนี้หากต้องนำค่า $\{d\}_{system}$ ไปหาค่าอื่นๆที่ต้องการทราบต่อไปได้ เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัดตั้ง

สมการ และความเครียดกับความเค้น สามารถหาความสัมพันธ์ได้ตั้งสมการ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับ

$$\{\varepsilon\} = [B]\{d\} \quad (2.15)$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}$$

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.16)$$

เมื่อ $\{d\}$: เมตริกซ์ที่ไม่ทราบค่าความคลาดเคลื่อนของเอลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูป (u, v, w)

(u, v, w) : จุดต่อที่ไม่ทราบค่าตามแนวแกน X Y และ Z

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

$[B]$: เมตริกซ์ที่แสดงระหว่างระบบพิกัดกับระบบของเอลิเมนต์ที่จุดต่อต่างๆ

V : ปริมาตรของเอลิเมนต์

N_i : ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

$[N]$: รูปแบบฟังก์ชันเมตริกซ์ของเอลิเมนต์

$\{f\}$: เมตริกซ์แรงของเอลิเมนต์

$[k]$: เมตริกซ์ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของเอลิเมนต์

$\{\sigma\}$: เมตริกซ์ความเค้นของเอลิเมนต์

$[D]$: เมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเอลิเมนต์

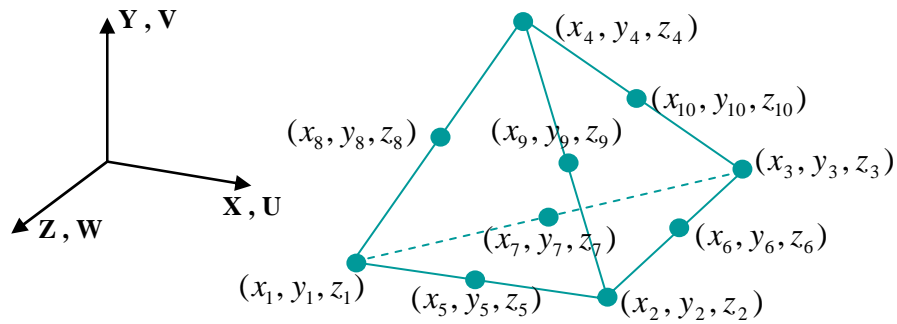
(constitutive matrix)

$\{\varepsilon\}$: เมตริกซ์ความเครียดของเอลิเมนต์

E : ค่ายังมอดูลัสของเอลิเมนต์

ν : ค่าอัตราส่วนปัวซองของเอลิเมนต์

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังวิธีข้างต้น สามารถเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และลดเวลาในการวิเคราะห์ชิ้นงานโดยเพิ่มจุดต่อที่ด้านต่างๆ ของเอลิเมนต์ทำให้จุดต่อจาก 4 จุดต่อเป็น 10 จุดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2-20 ซึ่งเรียกว่าเอลิเมนต์อันดับสอง (quadratic element)



รูปที่ 2-20 ลักษณะเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าอันดับสอง

(Logan, 2007)

บทที่ 3

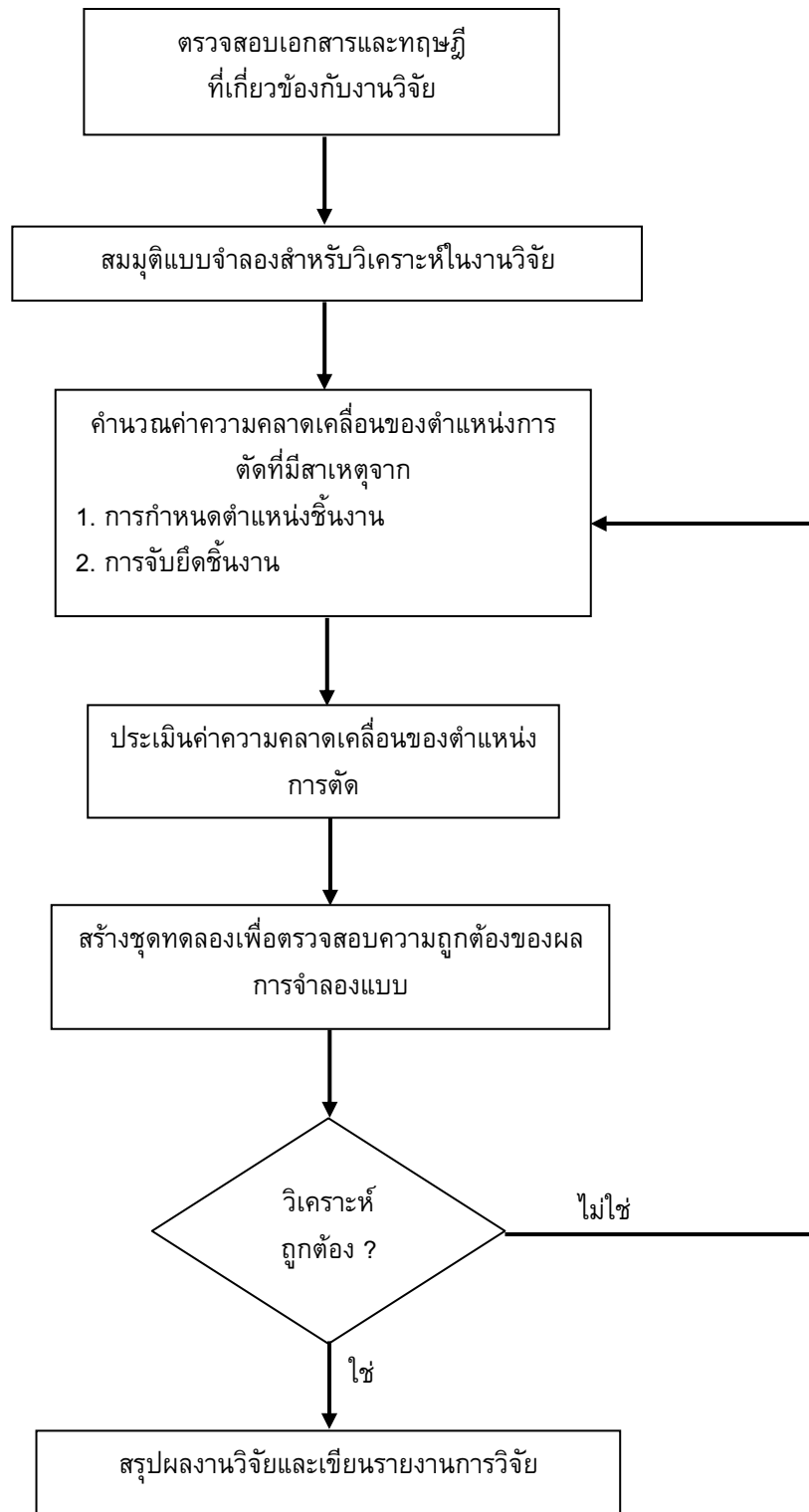
วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากการศึกษาข้อมูลข้างต้น ผู้ทำวิจัยสนใจที่ทำการศึกษาลักษณะความคลาดเคลื่อน (displacement function) ของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานอันเป็นผลมาจากทั้งการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานที่ผิดพลาดและการเสียรูปของชิ้นงานเนื่องจากลักษณะการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับทำนายลักษณะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน และนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการปรับปรุงเส้นทางเดินของใบมีดตัดเพื่อให้สามารถตัดชิ้นงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถสรุปวิธีการดำเนินงานตามแผนภาพ (flow chart) ได้ดังรูปที่ 3-1 โดยในส่วนของ การตรวจสอบเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ผู้วิจัยได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 1 และ 2 ดังนั้นในบทที่ 3 นี้ผู้วิจัยจะอธิบายในส่วนของ การพัฒนาแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ชิ้นงานวิจัย การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เป็นผลจากการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงาน และการสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองแบบ

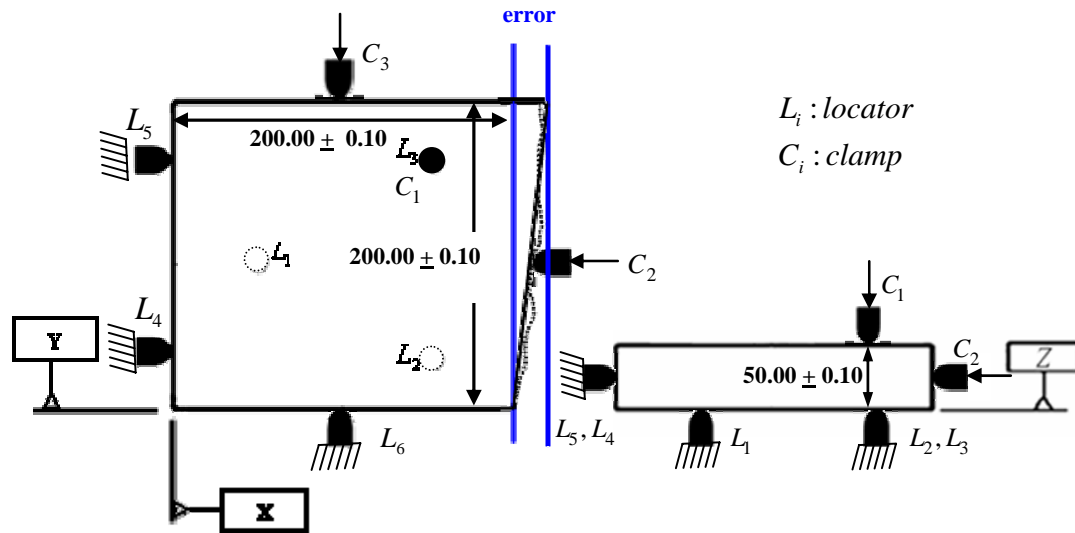
3.1 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับวิเคราะห์ชิ้นงานวิจัย

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด ซึ่งมีสมมติฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ

- ความไม่แน่นอนของผิวชิ้นงาน วัดจากระยะตั้งฉากเทียบจากระนาบอ้างอิง ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง (ค่า error) ดังแสดงในรูปที่ 3-2
- ชิ้นงานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 200.00 x 200.00 x 50.00 มิลลิเมตร
- การกำหนดตำแหน่งเป็นแบบ 3-2-1 มีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดรัศมี 6 มิลลิเมตร และมีการสัมผัสแบบจุดตามตำแหน่งต่างๆ จำนวน 6 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3-2
- การจับยึดมีลักษณะเป็นทรงกลมขนาดรัศมี 6 มิลลิเมตร และมีการสัมผัสแบบจุดซึ่งตามตำแหน่งต่างๆ จำนวน 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-1 แผนภาพขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย



รูปที่ 3-2 ลักษณะชิ้นงานสำหรับงานวิจัย

3.2 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการตัด

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

3.2.1 การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน

การวิเคราะห์คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด อ้างอิงจากงานวิจัยของ Chaiprapat และ Rujikietgumjorn (2006b) ซึ่งได้นำสมการความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในรูปแบบทั่วไป ซึ่งเป็นสมการที่อาศัยพื้นฐานของหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต ประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงแบบหมุนและการเปลี่ยนแปลงแบบเลื่อน โดยในการวิเคราะห์ด้วยหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตนั้น ชิ้นงานที่พิจารณาจะต้องถูกสมมุติให้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างในระหว่างการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต)

ในการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยใช้ทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ที่ตั้งฉากกับระนาบชั้นงานหลักทั้งสามระนาบในการติดตามการเปลี่ยนแปลงความคลาดเคลื่อนของชั้นงาน ซึ่งสามารถอธิบายวิธีการได้ดังนี้

3.2.1.1 การคำนวณหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบชั้นงาน

1) กรณีไม่มีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งในการคำนวณหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบหลักของชั้นงานเมื่อสัมผัสกับระนาบอ้างอิง primary (\bar{n}_p) ระนาบอ้างอิง secondary (\bar{n}_s) และระนาบอ้างอิง tertiary (\bar{n}_t) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.1)

$$\begin{aligned}\bar{n}_p &= \bar{P}_{31} \times \bar{P}_{21} \\ \bar{n}_s &= \bar{P}_{54} \times \bar{n}_p \\ \bar{n}_t &= \bar{n}_p \times \bar{n}_s\end{aligned}\quad (3.1)$$

โดย $\bar{P}_{21} = \bar{P}_2 - \bar{P}_1$

$$\bar{P}_{31} = \bar{P}_3 - \bar{P}_1$$

$$\bar{P}_{54} = \bar{P}_5 - \bar{P}_4$$

เมื่อ $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3$: เวกเตอร์ ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

\bar{P}_4, \bar{P}_5 : เวกเตอร์ ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

2) กรณีมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง ทำให้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยเปลี่ยนจาก \bar{n}_p เป็น \bar{n}_{pe} ในระนาบอ้างอิง primary \bar{n}_s เป็น \bar{n}_{se} ในระนาบอ้างอิง secondary และ \bar{n}_t เป็น \bar{n}_{te} ในระนาบอ้างอิง tertiary ตามลำดับ โดยวิธีการคำนวณใช้วิธีเดียวกับข้อ 1) ดังแสดงในสมการ (3.2)

$$\begin{aligned}\bar{n}_{pe} &= \bar{P}_{31e} \times \bar{P}_{21e} \\ \bar{n}_{se} &= \bar{P}_{54e} \times \bar{n}_{pe} \\ \bar{n}_{te} &= \bar{n}_{pe} \times \bar{n}_{se}\end{aligned}\quad (3.2)$$

โดย $\bar{P}_{21e} = \bar{P}_{2e} - \bar{P}_{1e}$

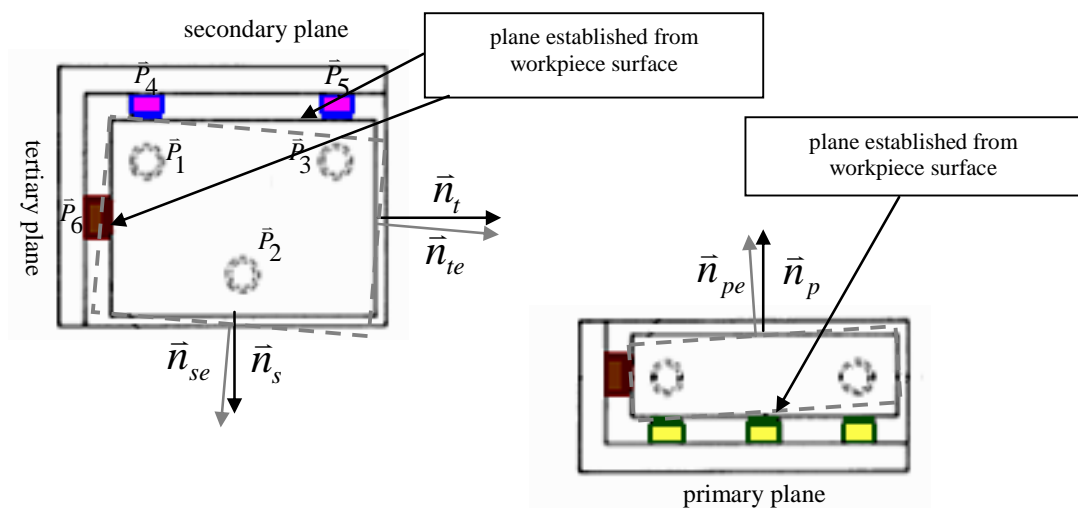
$$\bar{P}_{31e} = \bar{P}_{3e} - \bar{P}_{1e}$$

$$\bar{P}_{54e} = \bar{P}_{5e} - \bar{P}_{4e}$$

เมื่อ $\bar{P}_{1e}, \bar{P}_{2e}, \bar{P}_{3e}$: เวกเตอร์กรณีที่มีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ตามลำดับ

$\bar{P}_{4e}, \bar{P}_{5e}$: เวกเตอร์กรณีที่มีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

ด้วยวิธีการข้างต้นทำให้ทราบทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชิ้นงานในระนาบต่างๆ ทั้งกรณีที่มีและไม่มี ความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชิ้นงานในระนาบ primary secondary และ tertiary

จากการทราบถึงวิธีคำนวณหาเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชิ้นงานในระนาบต่างๆ ทั้งกรณีที่มีและไม่มี ความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งดังหัวข้อ 3.2.1.1 แต่การคำนวณลักษณะนี้ไม่สามารถบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างกรณีที่มีและไม่มี ความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตซึ่งอธิบายในหัวข้อ 2.3 มาใช้ในการหาทิศทางและระยะการเคลื่อนตัวของชิ้นงานเมื่อมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง โดยมีวิธีการดังนี้

3.2.1.2 การหาทิศทาง การเคลื่อนตัวของชั้นงานเมื่อมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง

ในการหาทิศทาง การเคลื่อนตัวของชั้นงาน ผู้วิจัยได้ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงแบบหมุน ดังสมการ (3.3) มาใช้ในการคำนวณหามุมของชั้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปรอบแกน X Y และ Z เพื่อที่จะทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ ระหว่างกรณีที่มีและไม่มี ความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง (แทนลักษณะทิศทาง การเคลื่อนตัวของชั้นงาน) โดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตันกราฟสันเป็นตัวตรวจสอบว่าเวกเตอร์กรณีที่ไม่มีความผิดพลาดมีทิศทางเดียวกับกรณีที่มีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งหรือไม่ ซึ่งมีเงื่อนไขตามฟังก์ชันดังสมการ (3.4)

$$\bar{n}_{ie} = R_1(\gamma, \beta, \alpha)\bar{n}_i \quad (3.3)$$

โดย

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & -\sin(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha)\cos(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\alpha)\cos(\gamma) - \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) & -\cos(\beta)\sin(\gamma) \\ \sin(\alpha)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\alpha)\sin(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) & \cos(\beta)\cos(\gamma) \end{bmatrix}$$

$$\text{และ} \quad \begin{array}{ll} f_1 : \bar{n}_{xp} - \bar{n}_{xpe} & f_4 : \bar{n}_{xs} - \bar{n}_{xse} \\ f_2 : \bar{n}_{yp} - \bar{n}_{ype} & f_5 : \bar{n}_{ys} - \bar{n}_{yse} \\ f_3 : \bar{n}_{zp} - \bar{n}_{zpe} & f_6 : \bar{n}_{zs} - \bar{n}_{zse} \end{array} \quad (3.4)$$

เมื่อ \bar{n}_{ie} : เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากระนาบ primary และ secondary ที่เกิดจากการหมุนหาทิศทางที่เหมาะสม

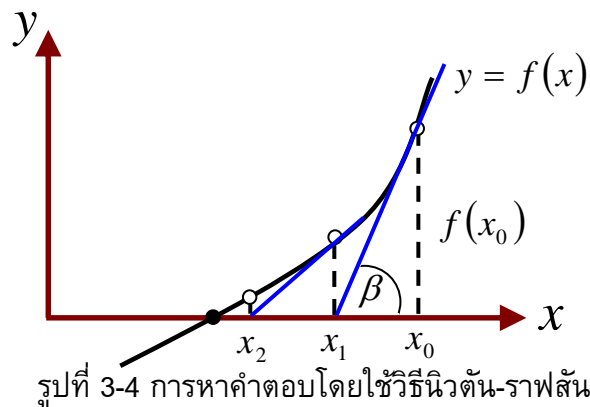
\bar{n}_i : เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากระนาบ primary และ secondary ก่อนเริ่มหมุนหาทิศทางที่เหมาะสม

$R_1(\gamma, \beta, \alpha)$: เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตแบบหมุน

f_1, f_2, f_3 : ฟังก์ชันตรวจสอบการหมุนหาทิศทางที่เหมาะสมที่ทำให้ \bar{n}_p มีทิศทางเดียวกับ \bar{n}_{pe} ในทิศทาง X Y และ Z ตามลำดับ

f_4, f_5, f_6 : ฟังก์ชันตรวจสอบการหมุนหาทิศทางที่เหมาะสมที่ทำให้ \bar{n}_s มีทิศทางเดียวกับ \bar{n}_{se} ในทิศทาง X Y และ Z ตามลำดับ

จากการใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสันเป็นตัวตรวจสอบว่าเวกเตอร์กรณีที่ไม่มี ความผิดพลาดมีทิศทางเดียวกับกรณีที่มีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับ ตัวกำหนดตำแหน่งนั้น ผู้วิจัยสามารถอธิบายรายละเอียดของระเบียบวิธีนี้ได้คือ ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson method) เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการประมาณคำตอบ ของสมการพีชคณิต การประมาณค่าของฟังก์ชันโดยพหุนาม และการประมาณค่าอินทิกรัลโดย ใช้วิธีการทำซ้ำ (iteration method) ซึ่งเป็นวิธีที่เริ่มจากการเดาค่าเริ่มต้นคือ x_0 จากนั้นคำนวณ ที่ละขั้นเพื่อหาค่าประมาณของคำตอบที่ยังไม่รู้ค่า x_1, x_2, \dots วิธีนิวตัน-ราฟสันนี้เป็นวิธีหนึ่ง สำหรับแก้สมการ $f(x)=0$ โดยมีข้อสมมติว่า f มีอนุพันธ์ f' ที่ต่อเนื่อง วิธีนี้นิยมใช้กันมาก เพราะไม่ยุ่งยากและมีอัตราการลู่เข้าสูง แนวคิดของวิธีนี้คือการประมาณกราฟของ f โดยเส้น สัมผัสที่เหมาะสมเริ่มจากจุด $(x_0, f(x_0))$ บนกราฟของ f ลากเส้นสัมผัสกราฟที่จุดนี้ ตัดแกน x ที่จุด x_1 ต่อไปลากเส้นสัมผัสกราฟที่จุด $(x_1, f(x_1))$ ตัดแกน x ที่จุด x_2 ดังรูปที่ 3-4 ทำซ้ำ เช่นนี้ไปเรื่อยๆ จะได้ลำดับของจุดตัดแกน x คือ x_1, x_2, \dots ซึ่งสามารถสรุปเป็นสูตรการทำซ้ำได้ ตามสมการ (3.5)



$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad , n = 1, 2, \dots \quad (3.5)$$

$$\text{โดย } f'(x_0) = \tan \beta = \frac{f(x_0)}{x_0 - x_1}$$

3.2.1.3 การคำนวณหาระยะการเคลื่อนตัวของชั้นงานเมื่อมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง

เมื่อสามารถหาทิศทาง (มุม) ที่เปลี่ยนแปลงไปของชั้นงานแล้ว สามารถวิเคราะห์ระยะการเคลื่อนตัวของชั้นงาน ได้จากสมการ

$$\bar{T} = \bar{n}_{pe}\Delta D_p + \bar{n}_{se}\Delta D_s + \bar{n}_{te}\Delta D_t \quad (3.6)$$

โดย $\Delta D_p = D_{pe} - D_p$

$$\Delta D_s = D_{se} - D_s$$

$$\Delta D_t = D_{te} - D_t$$

$$\bar{n}_{pe} \cdot \bar{P}_{1e} - D_{pe} = 0$$

$$\bar{n}_{se} \cdot \bar{P}_{4e} - D_{se} = 0$$

$$\bar{n}_{te} \cdot \bar{P}_{6e} - D_{te} = 0$$

เมื่อ D_p, D_e, D_t : ระยะห่างจากจุดอ้างอิงที่ถูกกำหนดในระนาบ primary, secondary และ tertiary

D_{pe}, D_{se}, D_{te} : ระยะห่างจากจุดอ้างอิงที่แท้จริงในระนาบ primary, secondary และ tertiary

3.2.1.4 การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดหลังจากวางชั้นงานลงบนฟิสิกซ์เจอร์

จากวิธีการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถประเมินค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดหลังจากวางลงบนฟิสิกซ์เจอร์เมื่อมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชั้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง โดยการทราบค่า $(\gamma, \beta, \alpha, dx, dy, dz)$ จากหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตดังแสดงในรูปที่ 3-5 และสามารถสรุปสมการได้ คือ

$$\bar{L}' = R_1(\gamma, \beta, \alpha)\bar{L} + \bar{T} \quad (3.7)$$

เมื่อ \bar{L}' : ตำแหน่งของการตัดหลังจากการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิต

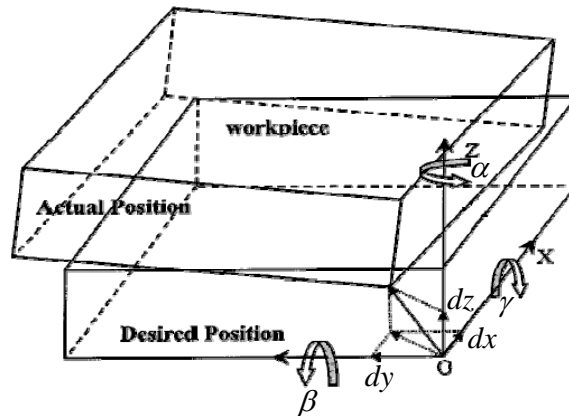
\bar{L} : ตำแหน่งของการตัดเมื่อไม่มีความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่ง

dx, dy, dz : ความผิดพลาดของตำแหน่งชั้นงานในแนวแกน X Y และ Z ตามลำดับ

γ, β, α : ความผิดพลาดของการจัดวางชั้นงานเทียบกับแกน X Y และ Z ตามลำดับ

จากสมการ (3.7) สามารถเขียนในรูปหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตได้คือ

$$\bar{L}' = [R](\gamma, \beta, \alpha, dx, dy, dz)\bar{L} \quad (3.8)$$

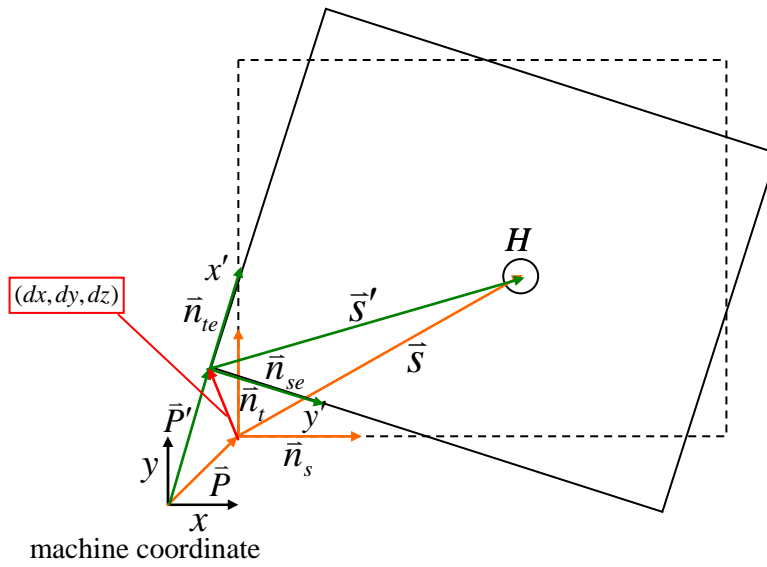


รูปที่ 3-5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตของชิ้นงานจากปัจจัยการกำหนดตำแหน่ง

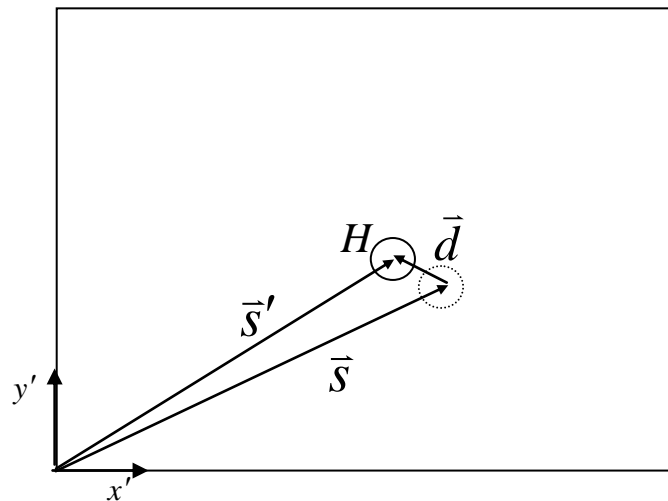
3.2.1.5 สมการผลกระทบความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

จากการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งในหัวข้อ 3.2.1 ผู้วิจัยยังได้นำเอาวิธีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดมาประยุกต์ใช้ในส่วนของผลกระทบความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงาน โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ

1) ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน (positional deviation) ได้ทำการพิจารณาเฉพาะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะในส่วนพื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน โดยรูปที่ 3-6 แสดงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากระบบพิกัดอ้างอิงของเครื่องจักร $(x - y)$ ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะ ณ ตำแหน่ง H ดังรูปที่ 3-7



รูปที่ 3-6 ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากระบบพิกัดอ้างอิงของเครื่องจักร



รูปที่ 3-7 ความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงาน

จากรูป 3-7 สามารถสรุปสมการความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะได้ คือ

$$|\vec{d}| = |\vec{S}' - \vec{S}| \tag{3.9}$$

โดย $\vec{S}' = [R](\vec{S})$

เมื่อ $[R]$: เมตริกซ์การเปลี่ยนตำแหน่งซึ่งมีตัวแปร $(dx, dy, dz, \gamma, \beta, \alpha)$

\vec{S}' : ตำแหน่งการเจาะชิ้นงานที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดชิ้นงาน $(x' - y')$

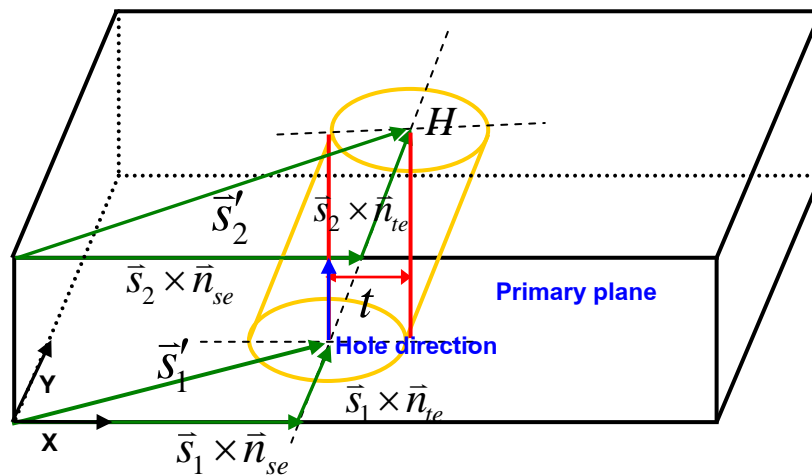
\vec{S} : ตำแหน่งการเจาะชิ้นงานที่ต้องการ ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดชิ้นงาน $(x' - y')$

\bar{P}' : ตำแหน่งชั้นงานที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดเครื่องจักร ($x-y$)

\bar{P} : ตำแหน่งชั้นงานที่ต้องการ ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดเครื่องจักร ($x-y$)

$\bar{n}_{se}, \bar{n}_{te}$: เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชั้นงานที่กำหนดตำแหน่งผิดพลาดในระนาบ secondary และระนาบ tertiary ตามลำดับ

2) ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชั้นงาน (orientation deviation) ได้ทำการพิจารณาเฉพาะช่วงระยะความคลาดเคลื่อนการตั้งฉากกับพื้นผิว ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งการเจาะพื้นผิวชั้นงานด้านบนและด้านล่างโดยอ้างอิงกับระนาบ primary ดังรูปที่ 3-8 และสามารถสรุปเป็นสมการได้ คือ



รูปที่ 3-8 ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชั้นงาน

สมการความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชั้นงาน

$$t = |P_{xy}(\bar{S}'_2) - \bar{S}'_1| \quad (3.10)$$

โดย $P_{xy} = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 000 \end{bmatrix}$

เมื่อ \bar{S}'_2 : ตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านบนของชั้นงานจริง

\bar{S}'_1 : ตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านล่างของชั้นงานจริง

P_{xy} : เมตริกซ์การฉายตำแหน่งการเจาะชั้นงานลงบนระนาบ $x'-y'$ (orthogonal projection matrix)

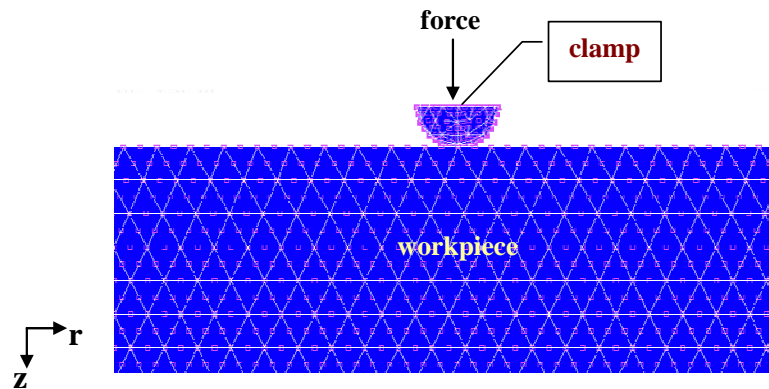
นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์ผลกระทบความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงาน ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ที่ภาคผนวก ง

3.2.2. การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน

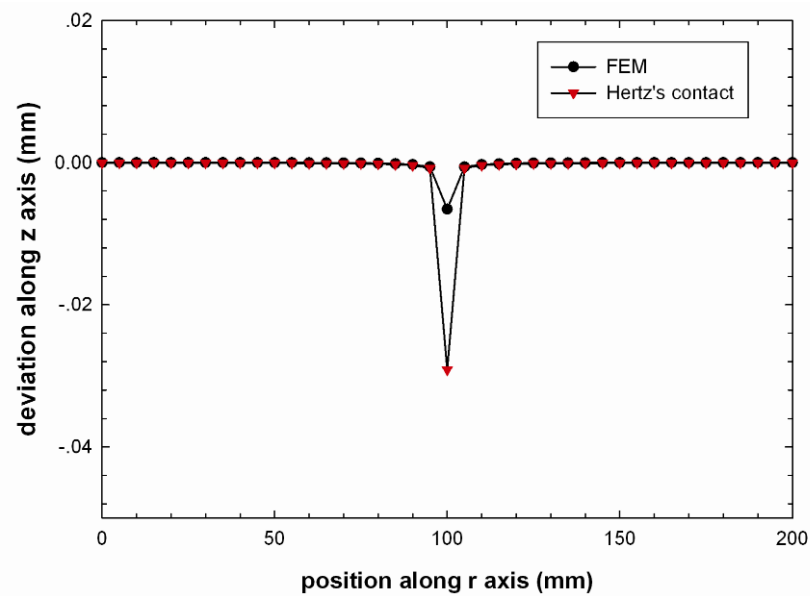
ในการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน ซึ่งมีสาเหตุมาจากแรงของตัวจับยึด ผู้วิจัยได้ใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์หรือการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิตที่เกิดจากการแบ่งชิ้นงานที่ถูกวิเคราะห์ออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ หรือที่เรียกว่าเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ต่างๆ เหล่านี้จะมีการประมาณฟังก์ชันภายในเอลิเมนต์ เช่น คุณสมบัติของวัสดุ ลักษณะการเสียรูป เป็นต้น ซึ่งผลการวิเคราะห์นั้นจะแสดงอยู่ที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์ และเมื่อนำมารวมเข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ ดังแสดงในหัวข้อ 2.5 ความถูกต้องแม่นยำของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับ การแบ่งเอลิเมนต์และการกำหนดเงื่อนไขลักษณะงานที่วิเคราะห์ว่ามีความสอดคล้องกับสภาวะความเป็นจริงมากน้อยเพียงใด ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

3.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบ

ดังนั้นผู้วิจัยทำการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบด้วยโปรแกรม MSC Marc ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถจำลองลักษณะชิ้นงานและทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีเงื่อนไขการวิเคราะห์ คือ 1) พิจารณาลักษณะการจับยึดชิ้นงานกรณีหนึ่งจุดสัมผัส (single contact) 2) ลักษณะของชิ้นงานเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 200.00 x 200.00 x 50.00 มิลลิเมตร 3) ลักษณะของตัวจับยึดเป็นรูปทรงกลมขนาดรัศมี 6 มิลลิเมตร และ 4) การจับยึดชิ้นงาน มีลักษณะการสัมผัสแบบจุดโดยแรงกระทำตั้งฉากกับชิ้นงานขนาด 950 นิวตันในรูปของแรงดันคงที่ (constant pressure) ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์การจับยึดชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3-9 โดยการแบ่งเอลิเมนต์ชิ้นงานและตัวกำหนดตำแหน่งออกเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ (tetrahedral element) ซึ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานมีขนาดด้านละ 5 มิลลิเมตร และผลการวิเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ตามหัวข้อ 2.4 โดยพิจารณาเฉพาะการเสียรูปของชิ้นงานตามแนวแกน Z เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-9 การสร้างแบบจำลองการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์



รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบผลการเสียรูปชิ้นงานตามแนวแกน z

จากรูปที่ 3-10 พบว่าแนวโน้มของข้อมูลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมและข้อมูลจากการใช้ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ มีลักษณะที่สอดคล้องกัน คือ เมื่อพิจารณาการเสียรูป ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวจับยึดพบว่ามีค่าการเสียรูปสูงสุด เมื่อพิจารณาในบริเวณที่ห่างออกมาจากจุดสัมผัส ค่าการเสียรูปมีค่าลดลงในบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดสัมผัสมากขึ้น ซึ่งมีค่าความแตกต่างของการเสียรูปในแนวแกน Z ระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองแบบและการใช้ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0006 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0005 (ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการจำลองแบบและการใช้ทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ ณ จุดสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.0226 มิลลิเมตร) จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของการเสียรูปในแนวแกน Z สามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้ในการประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาหลักขณะการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ได้

3.2.2.2 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบด้วยโปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc ในหัวข้อ 3.2.2.1 ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมนี้ในการวิเคราะห์ตามขั้นตอนดังหัวข้อที่ 2.5 โดยแบ่งชิ้นส่วนตามลักษณะดังรูปที่ 3-2 ออกเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์แต่ละเอลิเมนต์ โดยผลเฉลยที่ได้รับ (ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด) จะมาจากการรวมผลเฉลยที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นผลเฉลยของระบบ ซึ่งสามารถอธิบายการวิเคราะห์หรือออกเป็น 2 ส่วนได้คือ

1) การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ ผู้วิจัยได้กำหนดแรงของตัวจับยึดที่กระทำกับชิ้นงาน (F_j^i) และค่าคงที่ความยืดหยุ่น ณ จุดสัมผัสระหว่างฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงาน (k_j^i) เพื่อหาการเสียรูปของชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ (d_j^i) โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 3.11 และดังแสดงในรูปที่ 3-11 โดยอ้างอิงจากงานวิจัย ของ Li และ Melkote (2001)

$$\begin{Bmatrix} F_X^i \\ F_Y^i \\ F_Z^i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_X^i & 0 & 0 \\ 0 & k_Y^i & 0 \\ 0 & 0 & k_Z^i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_X^i \\ d_Y^i \\ d_Z^i \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

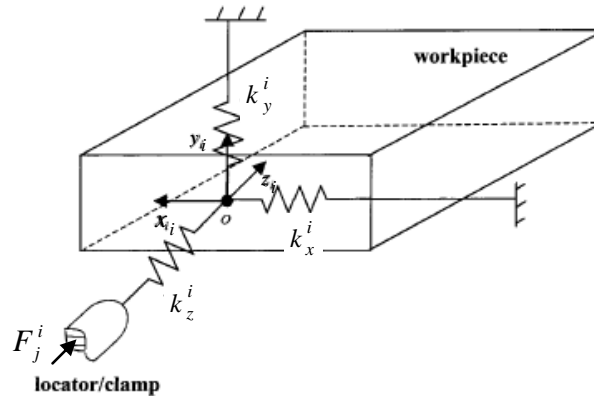
เมื่อ F_j^i : แรงที่ฟิกซ์เจอร์กระทำกับชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสต่างๆ

k_j^i : ค่าคงที่ความยืดหยุ่น ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ (workpiece – fixture contact stiffness)

d_j^i : การเสียรูปของชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์

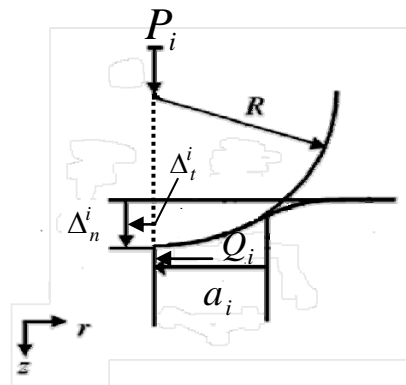
i : ตำแหน่ง ณ จุดสัมผัสต่างๆ ระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์

j : แกน X Y และ Z ตามลำดับ



รูปที่ 3-11 แบบจำลองลักษณะการจับยึดชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์
(Li and Melkote, 2001)

โดยค่า k_j^i ได้จากการนำหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์ มาประยุกต์ใช้ โดยเป็นการนำสมการการเสีรูป ณ จุดสัมผัสระหว่างวัตถุสองชิ้นทั้งในแนวตั้งฉาก (ตามหัวข้อ 2.4.1) และแนวเส้นสัมผัส (ตามหัวข้อ 2.4.2) ดังแสดงในรูปที่ 3-12 มาจัดเป็นสมการเพื่อหาค่า k_j^i ดังสมการ (3.14) และ (3.15) ซึ่งมีรายละเอียด คือ



รูปที่ 3-12 ลักษณะการสัมผัสกันของวัตถุสองชิ้นตามหลักทฤษฎีความเค้นสัมผัสของเฮิร์ตซ์
(ดัดแปลงจาก Fischer-Cripps, 2007)

สมการระยะการเสีรูป ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดกับชิ้นงานในแนวตั้งฉาก (Δ_n^i)

$$\Delta_n^i = \left(\frac{9(P^i)^2}{16R(E^*)^2} \right)^{1/3} \quad (3.12)$$

$$\text{โดย } \frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_w^2}{E_w} + \frac{1-\nu_f^2}{E_f}$$

สมการการเสียรูป ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดกับ
ชิ้นงานในแนวเส้นสัมผัส (Δ_i^i)

$$\Delta_i^i = \frac{Q^i}{8a_i} \left(\frac{2-\nu_f}{G_f} + \frac{2-\nu_w}{G_w} \right) \quad (3.13)$$

$$\text{โดย } a_i = \left(\frac{3P^i R_i}{4} \left(\frac{1-\nu_f}{E_f} + \frac{1-\nu_w}{E_w} \right) \right)^{1/3}$$

เมื่อ P^i : แรงกระทำตั้งฉากกับชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ

Q^i : แรงกระทำแนวเส้นสัมผัสกับชิ้นงาน ณ ตำแหน่งต่างๆ

R : รัศมีของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดชิ้นงาน

a_i : ระยะการสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดกับชิ้นงานตามแนวแกน r
เทียบกับจุดสัมผัสเริ่มต้น ณ ตำแหน่งต่างๆ

Δ_n^i, Δ_i^i : ระยะการเสียรูป ณ จุดศูนย์กลางของการสัมผัสกันระหว่างวัตถุสองชิ้นตาม
แนวแกน z และแนวแกน r เทียบจุดสัมผัสที่ยังไม่มีการเสียรูป

E_f, E_w : ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของฟลักซ์เจอร์และชิ้นงาน ตามลำดับ

G_f, G_w : ค่าโมดูลัสเฉือนของฟลักซ์เจอร์และชิ้นงาน ตามลำดับ

ν_f, ν_w : ค่าอัตราส่วนปัวซองของฟลักซ์เจอร์และชิ้นงาน ตามลำดับ

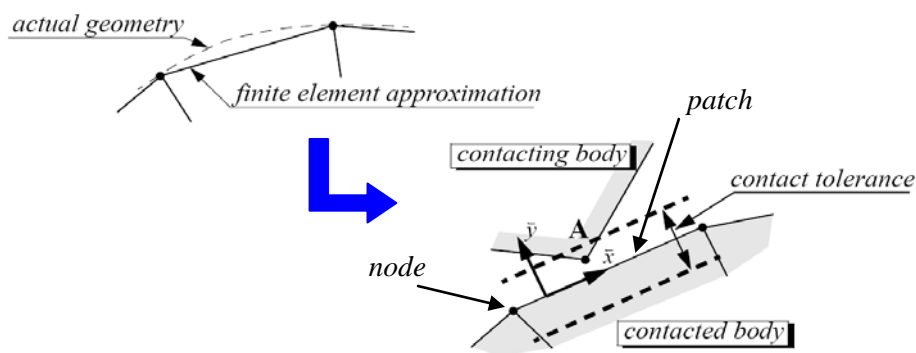
จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปค่าคงที่ความยืดหยุ่น
(contact stiffness) ได้ดังนี้ คือ

$$k_z^i = 8.82 \left(\frac{16R_i(E^*)^2}{9} \right)^{1/3} \quad (3.14)$$

$$k_x^i = k_y^i = \frac{4}{E^*} \left(\frac{2-\nu_f}{G_f} + \frac{2-\nu_w}{G_w} \right)^{-1} k_z^i \quad (3.15)$$

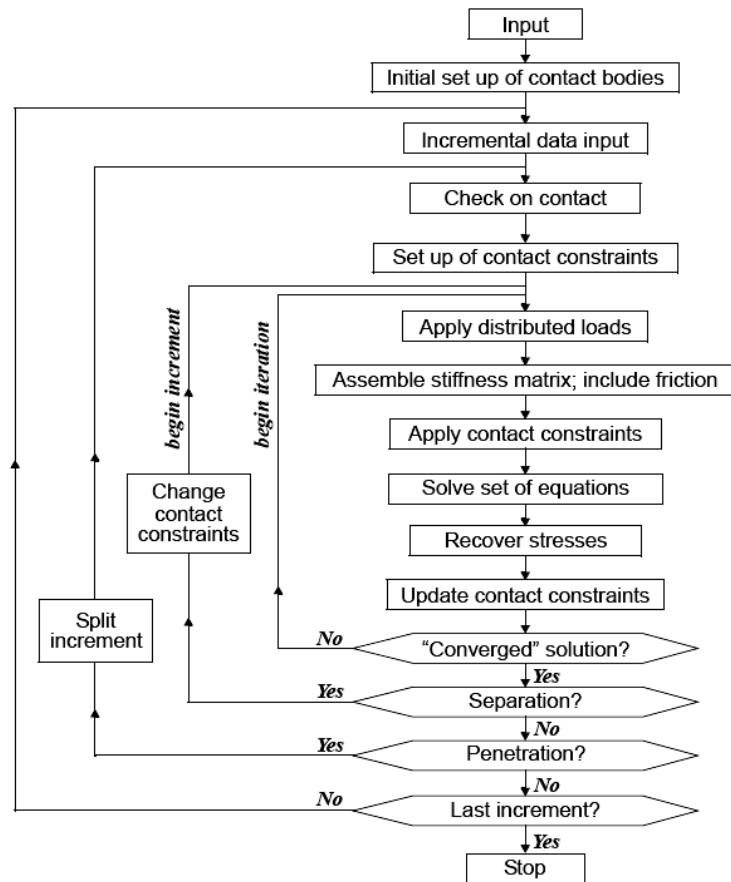
โดยค่า 8.82 เป็นค่าคงที่จากการใช้วิธีการจัดรูปเป็นสมการเส้นตรง (least-
squares fit) จากสมการที่ (3.12) โดยมีแรง P^i กระทำอยู่ในช่วง 0 ถึง 1000 นิวตัน

นอกจากนี้ในการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ เมื่อมีแรงจับยึดเพิ่มมากขึ้นทำให้บริเวณพื้นผิวรอบ ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์มีการสัมผัสกันและเกิดการเสียรูป ดังนั้นในการวิเคราะห์ของโปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc ต้องมีการตรวจสอบการสัมผัสกันของวัตถุ (MSC Marc, 1999) ในการตรวจสอบการสัมผัสจะมีช่วงระยะพิกัดเพื่อการสัมผัส (contact tolerance) เพื่อตรวจสอบว่าจุดต่อ และพื้นผิวระหว่างจุดต่อ (patch) ของวัตถุที่สัมผัสกันนั้นอยู่ในช่วงหรือไม่ ดังแสดงในรูปที่ 3-13 และเนื่องจากระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้หลักการประมาณ ดังนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์โปรแกรมจึงใช้วิธีการประมาณผิวสัมผัสด้วยการสมการเส้นโค้งอิสระ NURBS (Non-Uniform Rational B- Spline) สร้างเส้นโค้งจากจุด ซึ่งจะช่วยให้การสัมผัสของพื้นผิวระหว่างจุดต่อมีความถูกต้องมากขึ้น โดยสามารถสรุปวิธีการวิเคราะห์ตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3-14 ซึ่งในการวิเคราะห์การสัมผัสกันของวัตถุจะเริ่มต้นโดยวิเคราะห์การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการสัมผัส (Initial set up of contact bodies) หลังจากนั้นก็จะมีการเพิ่มข้อมูลที่ใส่เข้าไป เช่น แรง หรือตำแหน่งชิ้นงาน เป็นต้น และในขณะนั้นโปรแกรมก็จะมีการตรวจสอบว่าข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มีการลู่เข้าหรือไม่ วัตถุสัมผัสกันหรือไม่ เป็นต้น ซึ่งหากข้อมูลมีการลู่เข้าและชิ้นงานสัมผัสกัน โปรแกรมก็จะหยุดการวิเคราะห์



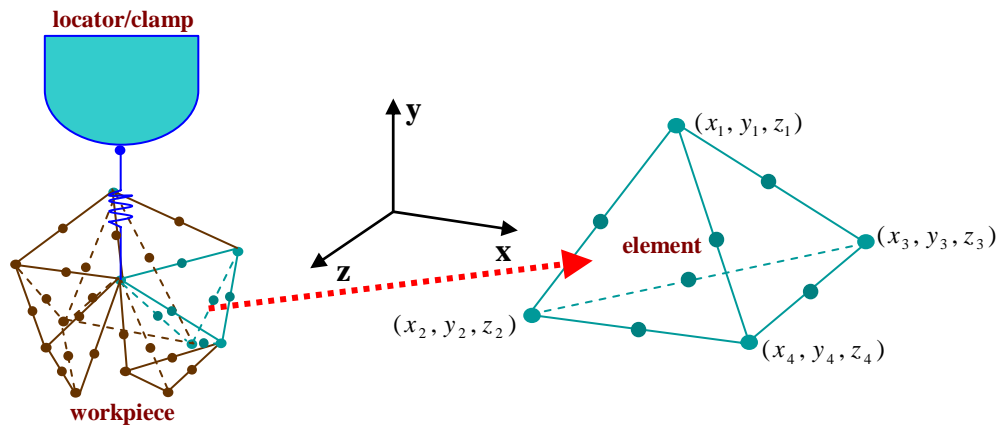
รูปที่ 3-13 ช่วงระยะพิกัดเพื่อการสัมผัสระหว่างวัตถุ

(MSC Marc, 1999)



รูปที่ 3-14 แผนผังขั้นตอนการค้นหาคำสมดุลกันของเอลิเมนต์
(MSC Marc, 1999)

2) การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวชิ้นงาน จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 1) ทำให้ทราบถึงความผิดพลาดของชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ และสามารถนำข้อมูลนี้ไปวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานได้เนื่องจาก ณ จุดสัมผัสของชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์นั้นเป็นส่วนหนึ่งของเอลิเมนต์ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3-15



รูปที่ 3-15 แบบจำลอง ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ และลักษณะเอลิเมนต์ชิ้นงาน

โดยในการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดนั้น ผู้วิจัยได้แบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ ดังรูปที่ 3-14 ซึ่งสามารถนำไปหาการเสียรูปของชิ้นงานในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ จากสมการของเอลิเมนต์ ซึ่งอ้างอิงจาก Logan (2007) ได้ดังนี้ คือ

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ f_{10} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{110} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{210} \\ k_{31} & k_{32} & \cdots & k_{310} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{101} & k_{102} & \cdots & k_{1010} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_{10} \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

เมื่อ $\{d_k\}$: เมตริกซ์การเสียรูปของชิ้นงานในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์
 $\{f_k\}$: เมตริกซ์แรงที่กระทำกับชิ้นงานในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์
 $[k_{kl}]$: เมตริกซ์ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของคุณสมบัติชิ้นงาน
 k, l : จุดต่อของเอลิเมนต์ $k = 1, \dots, 10, l = 1, \dots, 10$

และเมื่อนำสมการแต่ละเอลิเมนต์ของชิ้นงานที่ได้มาประกอบกัน ทำให้เกิดระบบสมการชิ้นงาน (system of simultaneous equations) ซึ่งก็คือสมการตัวแทนของระบบ โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ คือ

$$\{F\}_{system} = [K]_{system} \{d\}_{system} \quad (3.17)$$

เมื่อ $\{d\}_{system}$: เมตริกซ์ความคลาดเคลื่อนของระบบชิ้นงาน

$\{F\}_{system}$: เมตริกซ์แรงที่กระทำกับระบบชิ้นงาน

$[K]_{system}$: เมตริกซ์ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของคุณสมบัติระบบชิ้นงาน

3.2.2.3 การจำลองลักษณะระบบการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc จำลองระบบการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ โดยได้ทำการแบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 จุดต่อ และกำหนดคุณสมบัติตัวอย่างของชิ้นงาน ตัวกำหนดตำแหน่ง และตัวจับยึด ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 คุณสมบัติของชิ้นงาน ตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึด

คุณสมบัติ	ชิ้นงาน	ตัวกำหนดตำแหน่ง	ตัวจับยึด
วัสดุ (material)	อะลูมิเนียม Al 6061-T6	เหล็ก AISI 1144	เหล็ก AISI 1144
โมดูลัสของความยืดหยุ่น (Elastic modulus)	70 GPa	201 GPa	201 GPa
อัตราส่วนปัวซอง (Poisson ratio)	0.334	0.292	0.292
ความหนาแน่นมวล (mass density)	$2700 \frac{kg}{m^3}$	$7900 \frac{kg}{m^3}$	$7900 \frac{kg}{m^3}$
รูปทรง (geometry)	ทรงสี่เหลี่ยมตัน (prismatic block) ขนาด 200 x 200 x 50 มิลลิเมตร	ครึ่งทรงกลม (spherical tip) ขนาดรัศมี 6 มิลลิเมตร	ครึ่งทรงกลม (spherical tip) ขนาดรัศมี 6 มิลลิเมตร

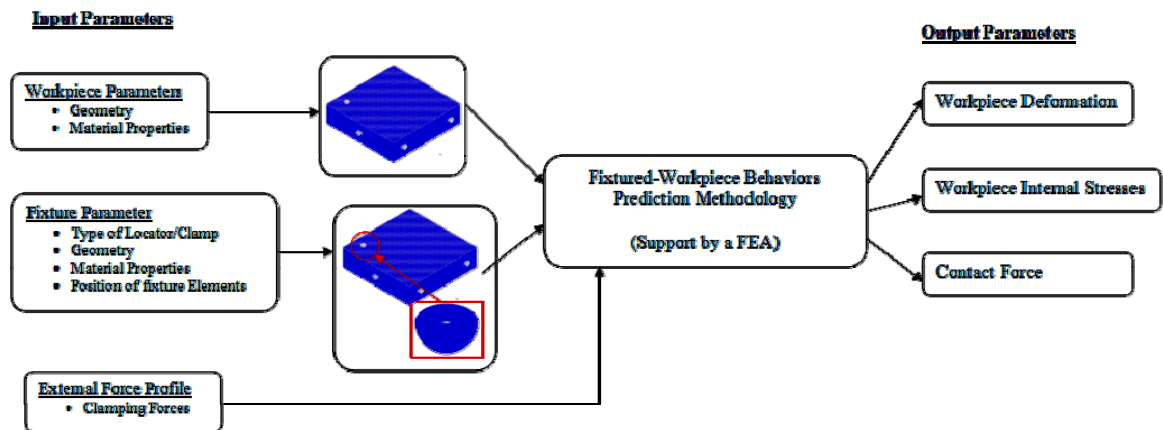
นอกจากนี้ผู้วิจัยได้กำหนดเงื่อนไขการจับยึดชิ้นงานให้อยู่ในสภาวะสถิต (static) ซึ่งสามารถแบ่งรายละเอียดดังนี้ คือ

1) การกำหนดเงื่อนไขของตัวกำหนดตำแหน่ง ได้กำหนดให้ตัวกำหนดตำแหน่งถูกยึดอยู่กับที่ (fixed displacement) โดยมีการกำหนดตำแหน่งของฟิกซ์เจอร์เป็นแบบ 3-2-1 ดังแสดงในรูปที่ 3-2

2) การกำหนดเงื่อนไขของตัวจับยึดชิ้นงาน ได้กำหนดให้มีการจับยึดชิ้นงาน 3 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3-2 โดยแรงที่กระทำกับชิ้นงานจะอยู่ในรูปของแรงดันคงที่ (constant pressure)

3) การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ ได้กำหนดให้ในแต่ละจุดที่ชิ้นงานสัมผัสตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดชิ้นงานมีการสัมผัสแบบแตะกันอยู่ (touching) โดยมีสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (μ) ระหว่างจุดสัมผัสของวัสดุหลักกับอะลูมิเนียมมีค่าเท่า 0.39 (Xie et al., 2000)

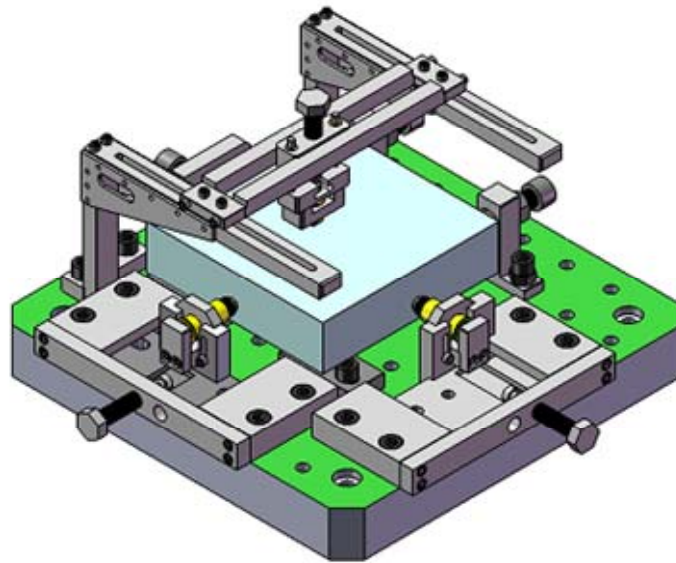
จากการจำลองลักษณะการจับยึดชิ้นงานบนฟิกซ์เจอร์ สามารถสรุปเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3-16 (สามารถดูรายละเอียดการกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงานที่ถูกจับยึดบนฟิกซ์เจอร์ได้ในภาคผนวก ข)



รูปที่ 3-16 แผนภูมิสรุปขั้นตอนการจำลองแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

3.3 การสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองแบบ

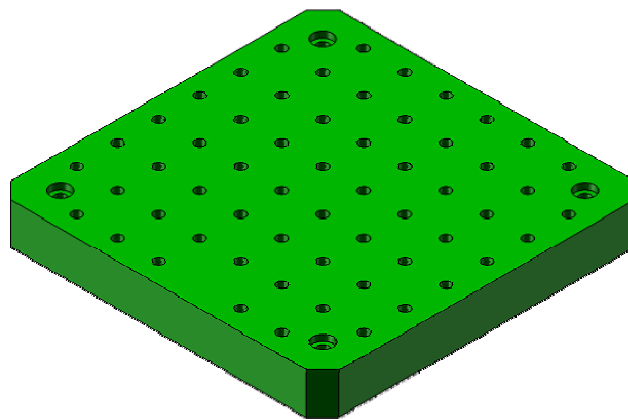
เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัดที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดโดยการจำลองแบบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้สร้างชุดทดลองดังแสดงในรูปที่ 3-17 เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัด ซึ่งในการออกแบบชุดทดลองนั้นผู้วิจัยได้กำหนดตามสมมติฐานเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1 และสามารถอธิบายรายละเอียดส่วนประกอบของชุดทดลองได้ดังนี้คือ



รูปที่ 3-17 ลักษณะชุดทดลองของการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์

3.3.1 ฐานฟิกซ์เจอร์

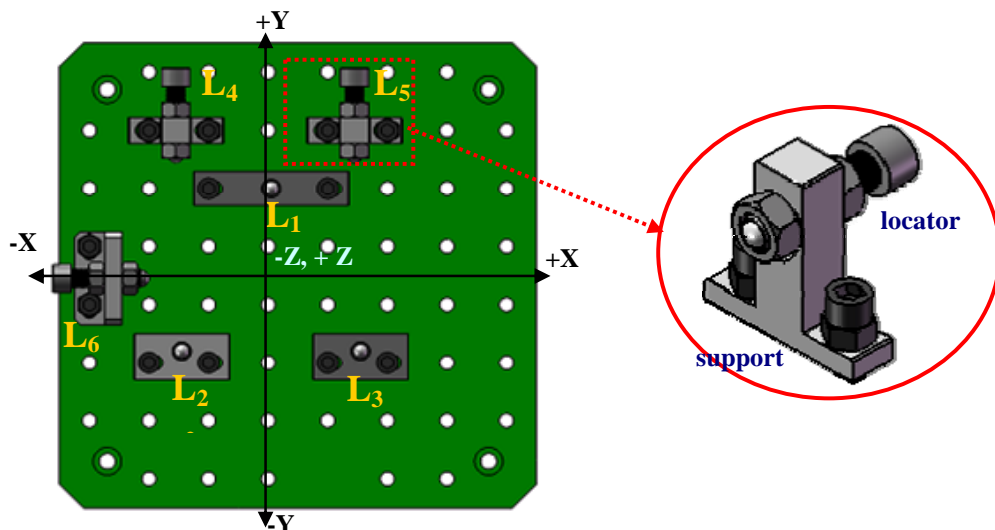
ผู้วิจัยได้ออกแบบฐานฟิกซ์เจอร์ โดยมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมตันและทำการเจาะรูหลายตำแหน่งที่เรียกว่า modular tooling plate ดังแสดงในรูปที่ 3-18 เพื่อให้ระบบฟิกซ์เจอร์สามารถที่จะทำการจับยึดชิ้นงานได้หลายขนาดและหลายรูปแบบ (modular fixturing) โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดที่นำมาประกอบบนฐานนี้



รูปที่ 3-18 ลักษณะฐานฟิกซ์เจอร์

3.3.2 การออกแบบการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน

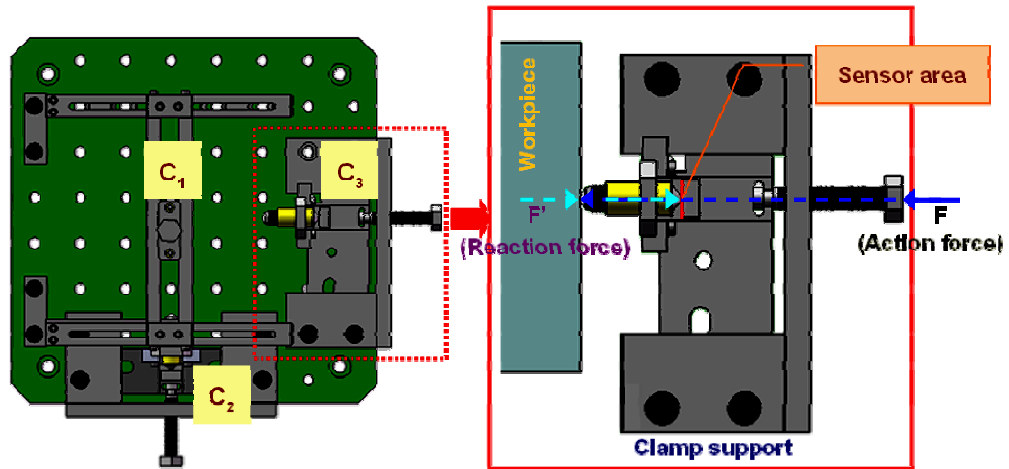
ในการออกแบบการกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน ผู้วิจัยได้ใช้สกรูแทนตัวกำหนดตำแหน่งเนื่องจากลำตัวของสกรูเป็นเกลียวทำให้สามารถปรับตำแหน่งของการกำหนดตำแหน่ง และในส่วปลายของสกรูได้ออกแบบให้มีหัวเป็นทรงกลมเพื่อให้เกิดการสัมผัสแบบจุด นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบชิ้นส่วนรองรับตัวกำหนดตำแหน่ง (supports) ทั้ง 6 ตัว เพื่อให้เกิดการกำหนดตำแหน่งเป็นแบบลักษณะ 3-2-1 ดังแสดงในรูปที่ 3-19 ยกตัวอย่างเช่น การกำหนดตำแหน่งระนาบ 2 จะใช้ตัวกำหนดตำแหน่งตัวที่ 4 และ 5 (L_4, L_5) ยึดอยู่บนชิ้นส่วนรองรับเพื่อให้ตัวกำหนดวางอยู่บนระนาบ X-Z และสามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระในทิศทางคือ การหมุนรอบแกน +Z -Z และตามแกน +Y ซึ่งในการออกแบบนี้ได้ยึดตามหลักการกำหนดตำแหน่งในหัวข้อ 2.1.1.2



รูปที่ 3-19 ลักษณะการกำหนดตำแหน่งของชุดฟิกซ์เจอร์

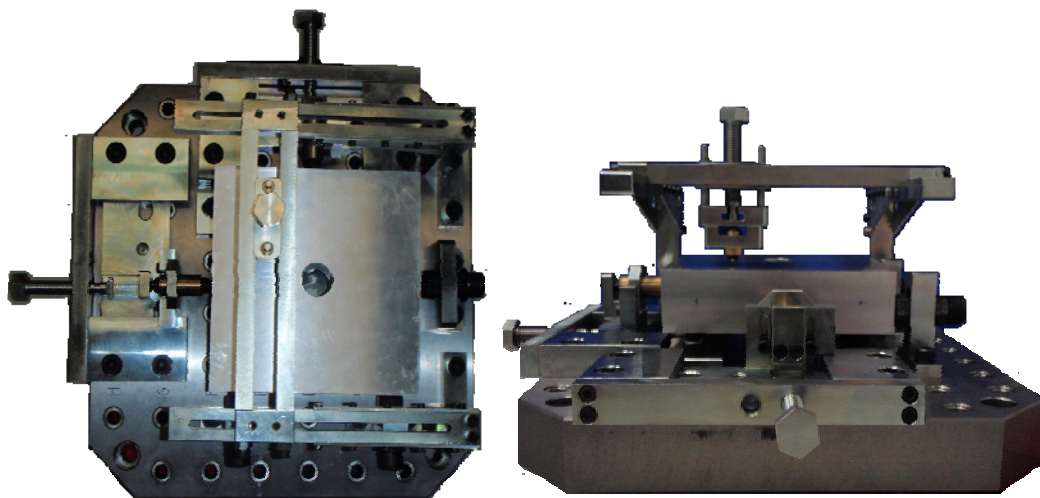
3.3.3 การออกแบบการจับยึดชิ้นงาน

ในการจับยึดชิ้นงานนั้น ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีตัวจับยึดชิ้นงาน 3 ตัว ตามตำแหน่งต่างๆ โดยชุดตัวจับยึดชิ้นงานถูกออกแบบให้มีการสัมผัสเป็นแบบจุด สามารถใส่แรงและวัดแรงที่จับยึดชิ้นงานได้ดังแสดงในรูปที่ 3-20 ซึ่งในการใส่แรงจับยึดชิ้นงานนั้น ผู้วิจัยได้ใช้ประแจทอร์คดันตัวจับยึดให้ชนกับชิ้นงานส่งผลให้เกิดแรงกระทำกับชิ้นงาน



รูปที่ 3-20 ลักษณะการจับยึดของชุดฟิซเซอร์

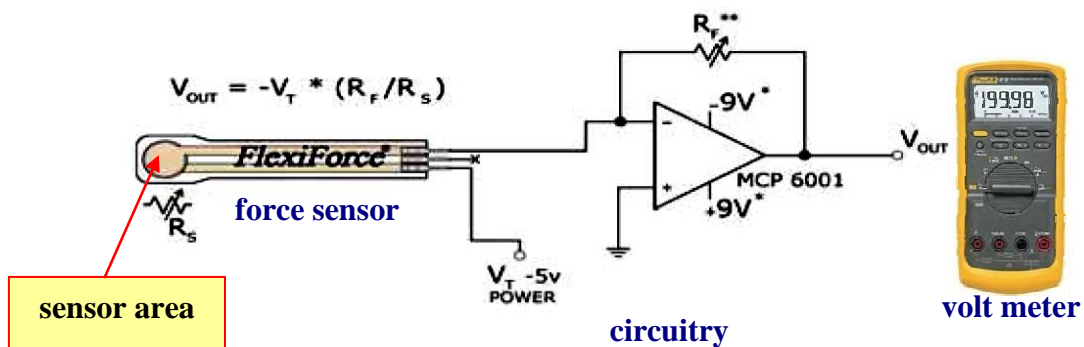
จากการออกแบบชุดทดลองตามหัวข้อที่ 3.3.1 และ 3.3.2 สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดโดยการจำลองแบบ ผู้วิจัยได้ทำการสั่งซื้อชิ้นส่วนของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดที่มีการระบุค่าระยะพิงกต์เผื่อที่ชัดเจน และสั่งทำชิ้นงานและชิ้นส่วนประกอบชุดฟิซเซอร์ โดยมีการกำหนดค่าระยะพิงกต์เผื่อที่ชัดเจนเพื่อควบคุมความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทดลอง ซึ่งสามารถประกอบเป็นลักษณะการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิซเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 3-21 นอกจากนี้ในการสั่งทำชิ้นงานสำหรับใช้ในการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้กำหนดชิ้นงานให้มีความหนา 50 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันการโค้งงอ (bending) ของชิ้นงาน เนื่องจากการตรวจสอบเอกสารพบว่า ชิ้นงานที่มีความหนาน้อยกว่า 30 มิลลิเมตร มีโอกาสที่จะเกิดการโค้งงอสูงเมื่อถูกแรงกระทำ (Satyanarayana and Melkote, 2004)



รูปที่ 3-21 ลักษณะชุดทดลองของการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิซเซอร์

3.3.4 การออกแบบชุดเซ็นเซอร์วัดแรง

เนื่องจากการจับยึดชิ้นงานต้องมีการควบคุมขนาดของแรงที่กระทำกับชิ้นงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบชุดเซ็นเซอร์วัดแรง (load sensor) โดยติดบนชิ้นส่วนของชุดตัวจับยึดชิ้นงาน เพราะเมื่อมีการใส่แรงกระทำกับชิ้นงานของตัวจับยึด ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวจับยึดจะมากกระทำกับเซ็นเซอร์เพื่อวัดแรง ดังแสดงในรูปที่ 3-20 ชุดเซ็นเซอร์นี้เป็นอุปกรณ์วัดแรงที่ประกอบด้วยชุดวงจรร และโวลต์มิเตอร์ (volt meter) สำหรับทำการวัด ซึ่งอ้างอิงจาก flexiforce sensor user manual (Texscan, 2009) ดังแสดงในรูปที่ 3-22 มีหลักการทำงานแบบตัวต้านทานคือ เมื่อมีแรงมากระทำ กับแผ่น flexiforce บริเวณที่มีการติดตั้งตัวตรวจสอบ (sensor area) ชุดเซ็นเซอร์นี้จะทำการแปลงแรงเป็นออกมาแรงดันไฟฟ้า (volt)



รูปที่ 3-22 ลักษณะชุดเซ็นเซอร์วัดแรง

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างชุดเซ็นเซอร์ตามลักษณะวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3-22 และก่อนที่จะนำชุดเซ็นเซอร์วัดแรงนี้มาใช้งานได้นั้น ได้ทำการสอบเทียบชุดเซ็นเซอร์กับเครื่องสำหรับการทดสอบแบบไดนามิกและความล้า (general purpose fatigue testing machine) ซึ่งสามารถดูรายละเอียดได้ที่ภาคผนวก ค

3.4 การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

นอกจากการสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองแบบ ดังแสดงในหัวข้อที่ 3.3 แล้ว ผู้วิจัยจะต้องมีการกำหนดวิธีการทดลองสำหรับวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด และมีการพิจารณาในส่วนของการควบคุมความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ คือ

3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

ในการเลือกเครื่องมือสำหรับการวัด ผู้วิจัยได้พิจารณาจากระยะการเสียรูปของชิ้นงานที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึด เนื่องจากความผิดพลาดในส่วนนี้มีค่าน้อยกว่าความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง และจากการตรวจสอบเอกสารที่ผ่านมาพบว่าระยะการเสียรูปของชิ้นงานที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึดมีค่าอยู่ในช่วง 5-6 ไมโครเมตร (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติของชิ้นงานและฟิกซ์เจอร์ และแรงที่ใช้ในการจับยึด) ผู้วิจัยได้ใช้ เครื่องวัด 3 แกนหรือเรียกว่าเครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) ซึ่งเป็นเครื่องจักรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสามารถในการวัดขนาดของชิ้นงานได้อย่างแม่นยำ เครื่องมือวัดนี้ทำงานร่วมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยหน้าจอของคอมพิวเตอร์เป็นหน่วยแสดงผลเพื่อทำการสั่งงานและคอมพิวเตอร์จะรับผลข้อมูลตัวเลขที่ได้จากการวัดจากเครื่อง CMM กลับมาแสดงอีกครั้งบนหน้าจอตั้งแสดงในรูปที่ 3-23 เครื่อง CMM ทำการวัดโดยใช้หัวโพรบ (probe head) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดทับทิมกลมเป็นตัวเคลื่อนไปสัมผัสกับชิ้นงานตรงตำแหน่งที่ต้องการวัด เมื่อหัวโพรบสัมผัสกับชิ้นงานแล้วจะส่งสัญญาณกลับไปยังตัวควบคุม (controller) ของเครื่องเพื่อทำการประมวลผลออกมาเป็นตำแหน่งตามพิกัดของหัวโพรบในขณะที่แตะชิ้นงาน จากนั้นค่านี้จะถูกส่งออกมาแสดงผลที่หน้าจอของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยเครื่อง CMM ที่ใช้สำหรับวัดชิ้นงานนั้นผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง CMM Prismo 5 จากสถาบันไทย-เยอรมันที่มีความละเอียดถึงระดับ 0.2 ไมโครเมตร เพื่อให้สามารถตรวจจับการเสียรูปของชิ้นงานได้



รูปที่ 3-23 เครื่อง CMM Prismo 5 และลักษณะการวัดชิ้นงาน

3.4.2 ขั้นตอนสำหรับการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

สำหรับขั้นตอนการวัดเพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบ มีดังนี้

- 1) สร้างระบบพิกัดอ้างอิงของชุดทดลอง โดยสร้างจากระนาบอ้างอิงของฐานฟิกซ์เจอร์
 - 2) ติดตั้งตัวกำหนดตำแหน่งทั้ง 6 ตัว และปรับให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ หลังจากนั้นวัดพิกัดของตัวกำหนดตำแหน่งทั้งหมด เทียบกับระบบพิกัดฐานฟิกซ์เจอร์
 - 3) วางชิ้นงานให้สัมผัสกับตัวกำหนดตำแหน่งทั้ง 6 ตัว หลังจากนั้นทำการวัดตำแหน่งและลักษณะการจัดวางของชิ้นงาน และวัดตำแหน่งการตัดบนพื้นผิวด้านบนชิ้นงาน (การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง)
 - 4) ติดตั้งตัวจับยึดทั้ง 3 ตัวโดยไม่ต้องใส่แรงในการจับยึดชิ้นงานและทำการวัดพิกัดของตัวจับยึดทั้ง 3 ตัว
 - 5) ใส่แรงที่กระทำกับชิ้นงานของตัวจับยึดแต่ละตัว หลังจากนั้นทำการวัดตำแหน่งการตัดบนพื้นผิวด้านบนชิ้นงาน (การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด)
 - 6) ทำการวัดซ้ำในแต่ละครั้งของการทดลองเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากกระบวนการวัด
 - 7) นำข้อมูลการวัดที่ได้จากเครื่อง CMM ไปเปรียบเทียบผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการจำลองแบบ วิเคราะห์และสรุปผล
- นอกจากนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการตรวจจับการเลื่อนตำแหน่งของจุดสัมผัส เนื่องจากในการจำลองแบบการจับยึดมีสมมติฐานว่า ตำแหน่งของจุดสัมผัสระหว่างฟิกซ์เจอร์และชิ้นงานจะไม่เปลี่ยนแปลง

บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดอันเป็นผลมาจากการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานที่ผิดพลาดและการเสียรูปของชิ้นงานเนื่องจากลักษณะการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ และการสร้างชุดทดลองรวมถึงกำหนดขั้นตอนการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทำนาย ดังแสดงในบทที่ 3 ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาผลการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด โดยก่อนอื่นจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนายเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง หลังจากนั้นจึงทำการประเมินผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทำนายด้วยการจำลองแบบ และนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการปรับปรุงเส้นทางเดินของใบมีดตัดเพื่อให้สามารถตัดชิ้นงานได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

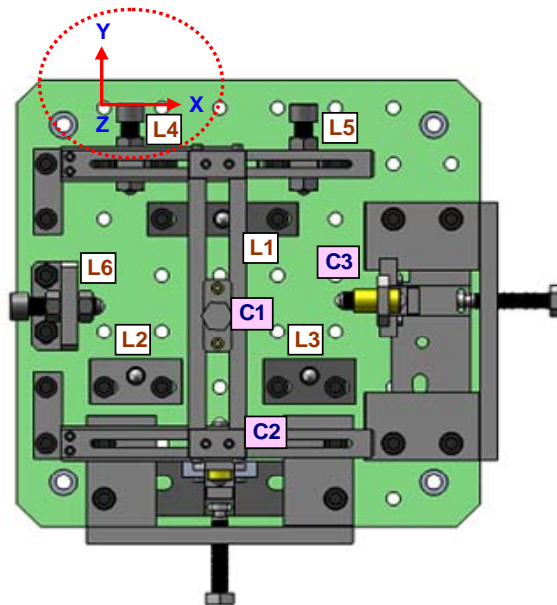
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

จากการสร้างชุดทดลองและกำหนดขั้นตอนการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการทดลองของลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดอันเป็นผลมาจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนาย ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

4.1.1 การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

ในการทดลองนั้น ผู้วิจัยได้ทำตามขั้นตอนการวัดตามหัวข้อ 3.4 ซึ่งใช้เครื่อง CMM ในการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด และสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังนี้ คือ

1. การสร้างระบบพิกัดอ้างอิงของชุดทดลอง ผู้วิจัยได้สร้างระบบพิกัดบนตัวฐานฟิกซ์เจอร์ดังแสดงในรูปที่ 4-1 (บริเวณด้านบนซ้ายของรูปภาพ)



รูปที่ 4-1 การสร้างระบบพิกัดของชุดทดลองและวัดตำแหน่งของตัวกำหนดตำแหน่ง

2. การวัดพิกัดของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดชิ้นงาน ผู้วิจัยได้วัดพิกัดของตัวกำหนดตำแหน่งและตัวจับยึดเทียบกับระบบพิกัดของชุดทดลองดังรูปที่ 4-1 นอกจากนี้ยังได้ทำการวัดแรงที่กระทำกับชิ้นงานโดยชุดเซ็นเซอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2

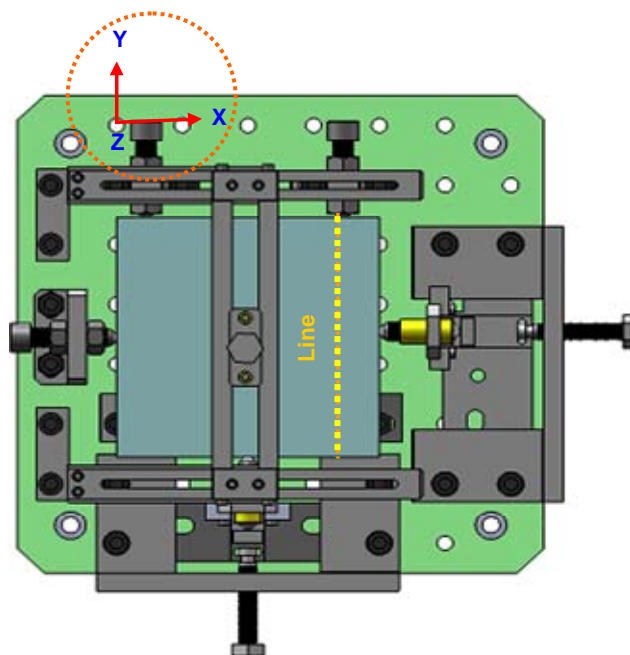
ตารางที่ 4-1 พิกัดของตัวกำหนดตำแหน่ง

ระนาบ อ้างอิง	ตัวกำหนด ตำแหน่ง	พิกัด โดยกำหนดให้มีความผิดพลาด ณ จุด สัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชิ้นงาน (มิลลิเมตร)		
		X	Y	Z
primary plane	1	97.6913	-100.0324	33.3060
	2	27.8222	-240.6769	33.7063
	3	177.9168	-240.7095	31.9538
secondary plane	4	21.6863	-77.4823	49.1062
	5	172.9622	-75.2575	48.9244
tertiary plane	6	-0.8820	-175.4906	54.5693

ตารางที่ 4-2 พิกัดของตัวจับยึด และแรงที่กระทำกับชิ้นงาน

ตัวจับยึด ชิ้นงาน	พิกัดในการจับยึดชิ้นงาน (มิลลิเมตร)			แรงในการจับยึดชิ้นงาน (นิวตัน)
	X	Y	Z	
1	128.9198	-234.5510	81.0677	900
2	99.6538	-275.8817	62.7891	770
3	-199.3159	-173.8601	58.8032	750

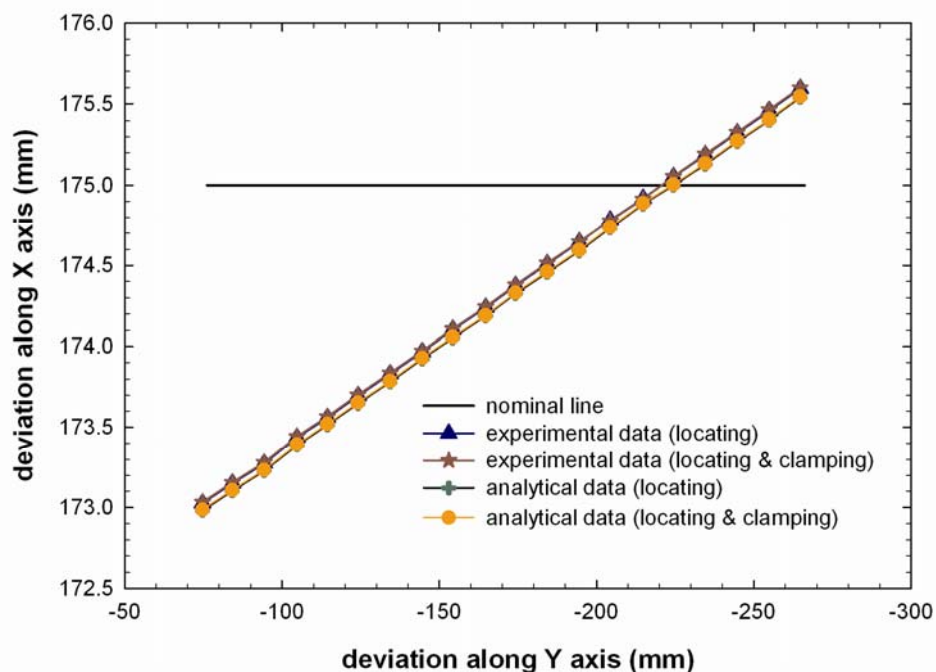
3. การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้วัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งผิวด้านบนชิ้นงานจากการทดลองตามเส้นทางดังแสดงในรูปที่ 4-2 โดยวัดจำนวน 20 ตำแหน่งขนานกับแกน Y ห่างจุดละ 10 มิลลิเมตร ที่ X เท่ากับ 175 มิลลิเมตร (เทียบจากระบบพิกัดอ้างอิง ซึ่งอยู่บริเวณด้านบนซ้ายของรูปภาพ)



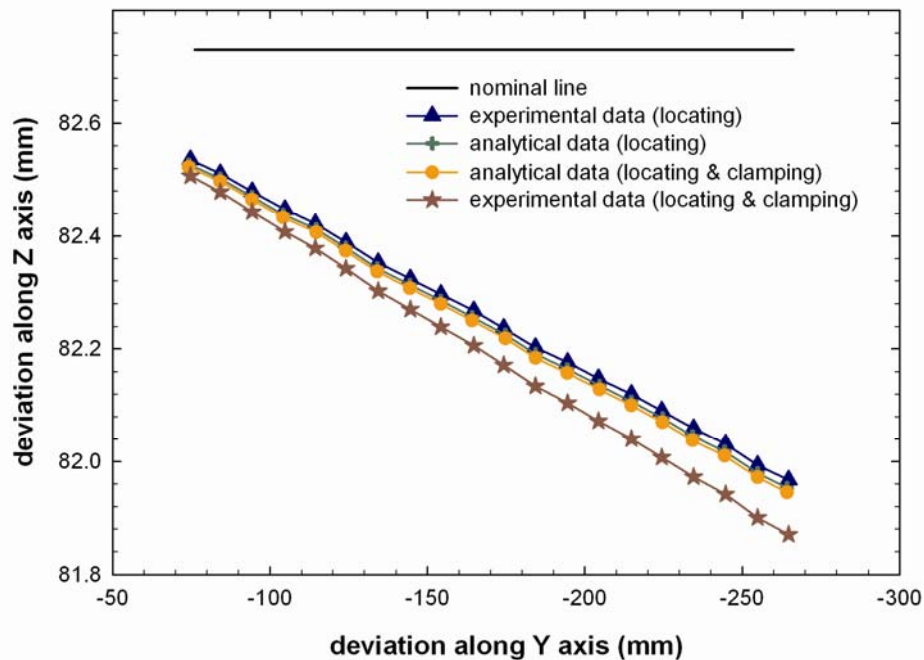
รูปที่ 4-2 ลักษณะการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนพื้นผิวด้านบนชิ้นงาน

4.1.2 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลจากการวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองไปตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดโดยการจำลองแบบ ซึ่งจากการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดชิ้นงานจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด ตามเส้นทางดังรูปที่ 4-2 พบว่าผลที่ได้จากการทดลองและการจำลองแบบมีแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่ง ทำให้มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดทั้งในรูปแบบเลื่อนและหมุนเกิดขึ้น และเมื่อจับยึดชิ้นงานโดยการใส่แรง ทำให้ชิ้นงานมีการเสียรูป ณ จุดสัมผัสและบริเวณรอบข้างระหว่างชิ้นงานกับตัวจับยึด อีกทั้งยังส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดแบบเลื่อนและหมุนด้วยเช่นกันแต่มีปริมาณน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนกำหนดตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4-3 พิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในระนาบ X-Y และรูปที่ 4-4 พิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในระนาบ Y-Z

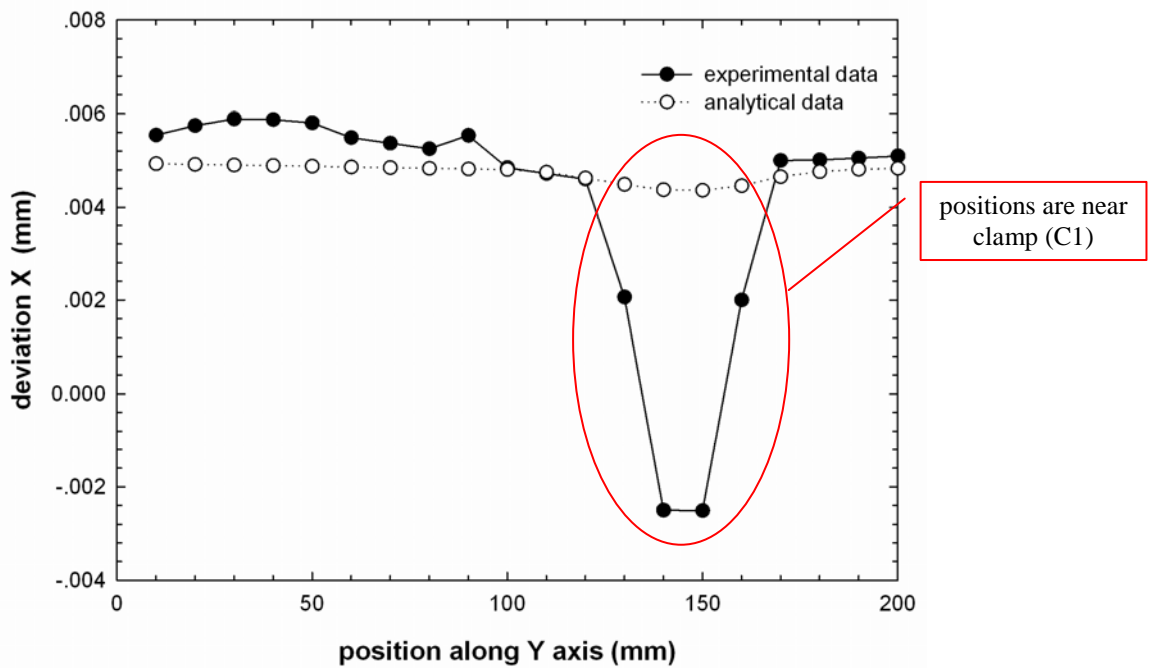


รูปที่ 4-3 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ X-Y

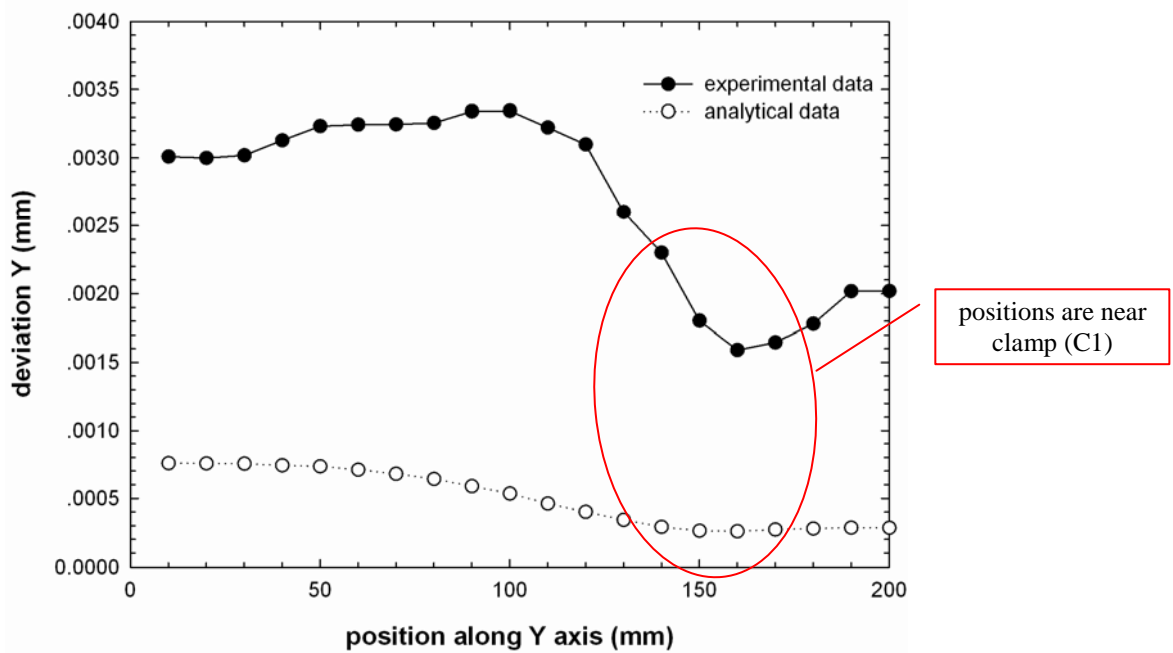


รูปที่ 4-4 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ Y-Z

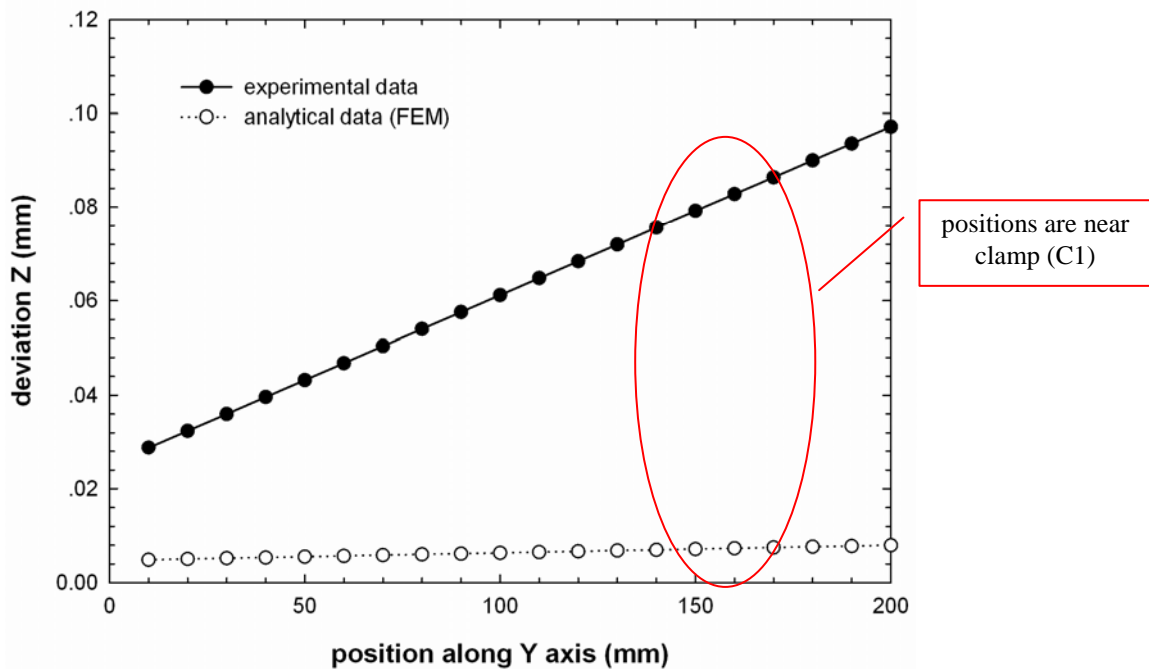
จากรูปที่ 4-3 และ 4-4 แนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง การตัด ในระนาบ X-Y พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามแนวแกน X มีค่าลดลง เมื่อ พิกัดตามแนวแกน Y เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมาจากการกำหนด ตำแหน่งที่ผิดพลาดเป็นส่วนใหญ่ และในส่วนของระนาบ Y-Z พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของ ตำแหน่งการตัดตามแนวแกน Z มีค่าเพิ่ม เมื่อพิกัดตามแนวแกน Y เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดมาจากการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด และ เพื่อให้เห็นความชัดเจนของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากสาเหตุการจับ ยึด จึงได้แสดงข้อมูลเฉพาะค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดขึ้นจากสาเหตุการจับ ยึดในทิศทาง X Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 4-5 พิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด จากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง X รูปที่ 4-6 พิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจาก สาเหตุการจับยึดในทิศทาง Y ตามลำดับ และรูปที่ 4-7 พิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง การตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง Z



รูปที่ 4-5 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง X



รูปที่ 4-6 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง Y



รูปที่ 4-7 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึดในทิศทาง Z

จากกราฟแสดงผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลอง และการทำนายในแต่ละทิศทาง พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายมีแนวโน้มเดียวกัน ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของขนาดในการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนาย โดยนำจำนวนข้อมูลมาอย่างละ 20 ข้อมูล (ข้อมูลจากการทดลองการทดลองที่นำมาวิเคราะห์เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำกรวัดซ้ำ 3 ครั้ง) และทำการวิเคราะห์ทางสถิติซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ

1. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการกำหนดตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ขนาดค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง X มีค่าเฉลี่ย (average) เท่ากับ 0.0194 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error :SE) เท่ากับ 0.0009 ขนาดค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทางในทิศทาง Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0494 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0012 และขนาดค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0112 และมีค่าความ

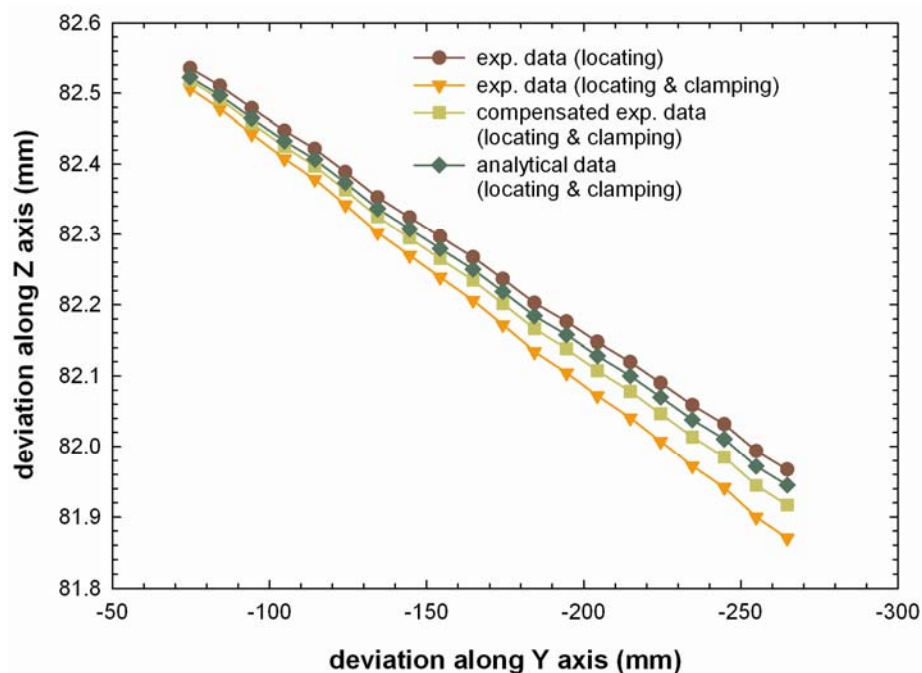
คลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0004 ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0542 มิลลิเมตร

2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึด ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ขนาดค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง X มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0013 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0004 ขนาดค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0022 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0001 และขนาดค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0566 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0045 ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0566 มิลลิเมตร

เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจาก 2 สาเหตุมารวมกัน ทำให้ขนาดค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง X มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0188 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0011 ขนาดค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0472 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0013 และขนาดค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0454 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0041 ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0681 มิลลิเมตร (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของการวัดพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยวิเคราะห์ทางสถิติได้ที่ภาคผนวก ก)

จะเห็นได้ว่าความแตกต่างในส่วนการจับยึดของค่าความแตกต่างของพิสัยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z มีค่าแตกต่างกันมากกว่าค่าในทิศทางอื่น ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนในการทดลอง ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบชิ้นงานโดยละเอียดพบว่ามีการเลื่อนตำแหน่งของชิ้นงาน ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งในระนาบ primary ดังนั้นจึงได้กำหนดให้มีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากการทดลองโดยการวัดความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานเมื่อถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ และนำมาชดเชยกับความคลาดเคลื่อนพื้นผิวด้านบนชิ้นงาน ซึ่งผลจากการชดเชยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4-8 ซึ่งเป็นการพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในระนาบ Y-Z

และเมื่อทำการชดเชยแล้วนั้น สามารถลดความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองและการทำนายของค่าพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z ในส่วนการจับยึด จากเดิมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0566 มิลลิเมตร เป็น 0.0163 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0017 ซึ่งลดลงจากค่าเฉลี่ยเดิมคิดเป็น 71 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้มีค่าความแตกต่างระหว่างการทดลองและการทำนายของค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z จาก 2 สาเหตุจากเดิมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0454 มิลลิเมตร เป็น 0.0394 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0004 ซึ่งลดลงจากค่าเฉลี่ยเดิมคิดเป็น 13 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0643 มิลลิเมตร (ดูรายละเอียดวิธีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากการทดลองได้ที่ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4-8 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดเส้นทางในระนาบ Y-Z (กรณีทำการชดเชย)

จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างระหว่างการจำลองแบบกับการทดลองของความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง X Y และ Z ซึ่งเกิดจากความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งของขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและแรงในการจับยึดชิ้นงานของขั้นตอนการจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการจำลองแบบไปทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดแทนการทดลองและทำการชดเชยเส้นทางเดิน

ใบมีดได้ โดยความต้องการค่าระยะพิกต์เผื่อของชิ้นงานที่ต้องการหลังจากทำการผลิตในแต่ละทิศทางต้องไม่น้อยกว่า 0.05 มิลลิเมตร (ทั้งนี้อาจต้องพิจารณาถึงตำแหน่งและระนาบในการตัดชิ้นงานด้วย) แต่ถ้าพิจารณาถึงภาพความคลาดเคลื่อนรวมทั้ง 3 ทิศทาง ความต้องการค่าระยะพิกต์เผื่อของชิ้นงานที่ต้องการหลังจากทำการผลิตต้องไม่น้อยกว่า 0.0643 มิลลิเมตร นอกจากนี้สามารถนำแบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้ในการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ซึ่งเกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและขั้นตอนการจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ในลักษณะอื่นได้อีกด้วย

4.2 การประยุกต์ใช้การทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์โดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์

4.2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

จากการตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดอันเป็นผลมาจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดตามหัวข้อ 4.1.2 และพบว่าการทำนายด้วยการจำลองแบบสามารถใช้แทนการทดลองได้ ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในการตัดชิ้นงาน โดยผู้วิจัยได้มีการสมมุติลักษณะการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดคือ 1. สมมุติความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชิ้นงานทั้ง 6 จุด ยกตัวอย่างเช่น หาก ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งตัวที่ 1 ซึ่งอยู่ในระนาบอ้างอิง primary มีความผิดพลาดเกิดขึ้นในแนวตั้งฉากซึ่งเป็นทิศทางตามแนวแกน Z เท่ากับ 0.03 มิลลิเมตร ฉะนั้นพิกต์ของตัวกำหนดตำแหน่งนี้จะต้องเปลี่ยนแปลงไปเป็นดังแสดงในตารางที่ 4-3 2. สมมุติตำแหน่งและแรงในการจับยึดชิ้นงานของตัวจับยึด ดังแสดงในตารางที่ 4-4 โดยในการวิเคราะห์ผู้ทำวิจัยจะทำการวิเคราะห์ความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งก่อน และจากนั้นก็ทำการวิเคราะห์ในขั้นตอนการจับยึดโดยนำข้อมูลการเบี่ยงเบนของชิ้นงานในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งมาใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองชิ้นงานและตำแหน่งของตัวกำหนดตำแหน่ง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทำให้สามารถหาลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ซึ่งเกิดจากสาเหตุความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดได้

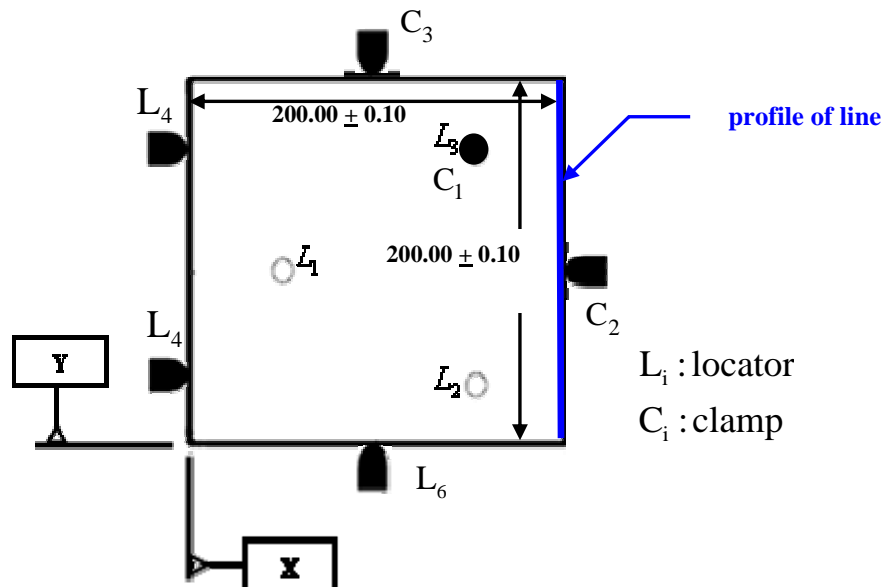
ตารางที่ 4-3 พิกัดความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชั้นงาน

ระนาบอ้างอิง	ตัวกำหนดตำแหน่ง	พิกัด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชั้นงาน (มิลลิเมตร)			พิกัด กรณีมีความผิดพลาด ณ จุดสัมผัสระหว่างตัวกำหนดตำแหน่งกับชั้นงาน (มิลลิเมตร)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
primary plane	1	30.00	100.00	0.00	30.00	100.00	<u>0.03</u>
	2	170.00	30.00	0.00	170.00	30.00	<u>0.05</u>
	3	170.00	170.00	0.00	170.00	170.00	<u>0.09</u>
secondary plane	4	0.00	30.00	25.00	0.00	<u>30.10</u>	25.00
	5	0.00	170.00	25.00	0.00	<u>170.04</u>	25.00
tertiary plane	6	100.00	0.00	25.00	<u>100.07</u>	0.00	25.00

ตารางที่ 4-4 พิกัดและแรงในการจับยึดชั้นงาน

ตัวจับยึดชั้นงาน	พิกัดในการจับยึดชั้นงาน (มิลลิเมตร)			แรงในการจับยึดชั้นงาน (นิวตัน)	ทิศทางในการจับยึดชั้นงาน
	X	Y	Z		
1	170.00	170.00	50.00	800	(0,0,-1)
2	200.00	100.00	25.00	450	(-1,0,0)
3	100.00	200.00	25.00	300	(0,-1,0)

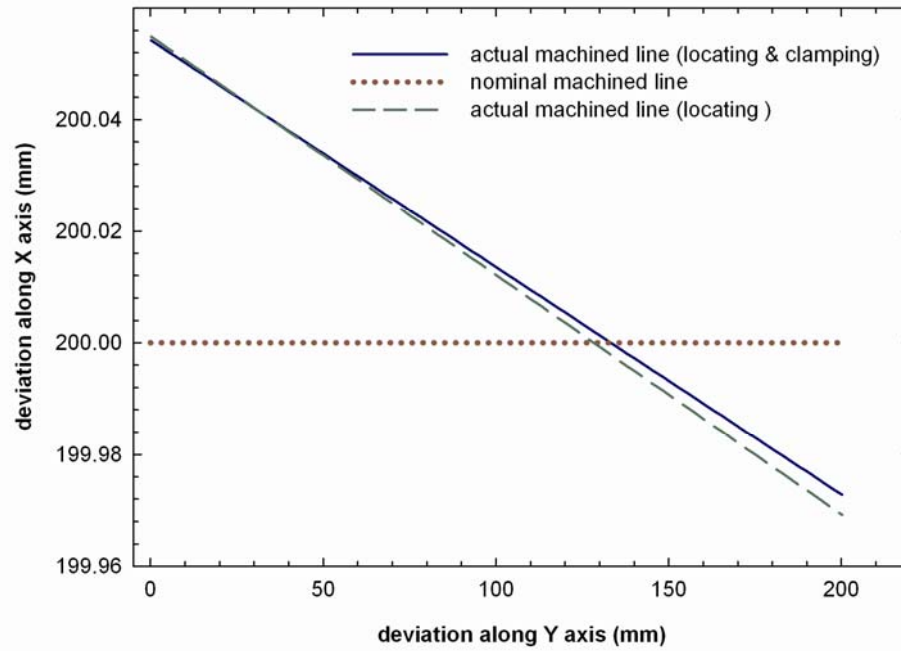
ผู้วิจัยได้แสดงตัวอย่างผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนพื้นผิวด้านบนของชั้นงานตามเส้นทาง (profile of line) ซึ่งเป็นบริเวณด้านข้างของชั้นงานเพื่อแสดงลักษณะการเบี่ยงเบนของชั้นงานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4-9 เส้นทางที่ทำการพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนพื้นผิวด้านบนของชั้นงาน (ดูรายละเอียดผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางได้ที่ภาคผนวก ก)



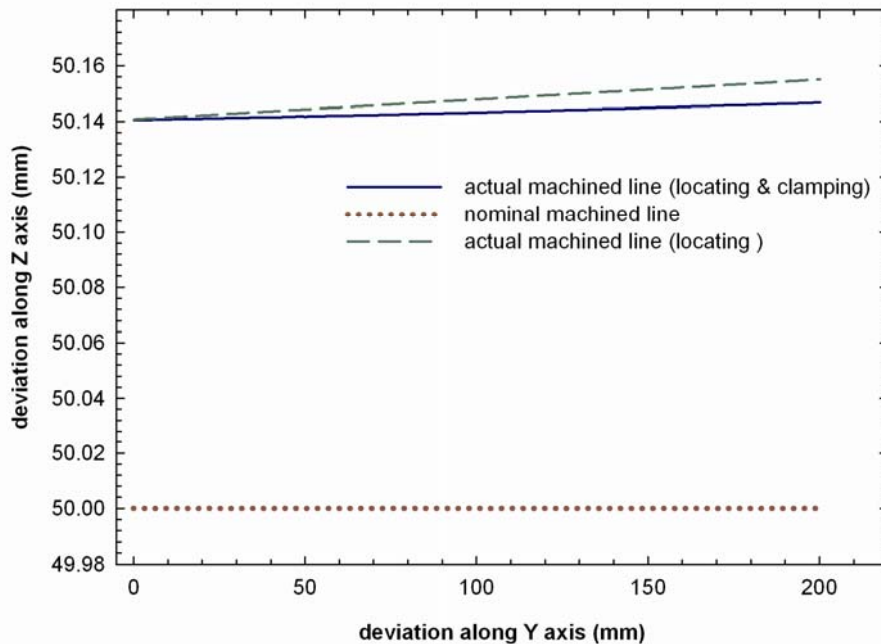
รูปที่ 4-9 เส้นทางที่ใช้ในการพิจารณาผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

จากรูปที่ 4-9 ผู้วิจัยได้พิจารณาผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด (ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์นำมาอย่างละ 41 ข้อมูล) โดยเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ควรจะเป็น ซึ่งมีสาเหตุจากความผิดพลาดที่เกิดในการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ ดังรูปที่ 4-10 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ X-Y รูปที่ 4-11 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ Y-Z และตารางที่ 4-5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในรูปของค่าเฉลี่ยและค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานตามทิศทาง X Y และ Z ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากสาเหตุการกำหนดตำแหน่งมากกว่าการจับยึดชิ้นงานถึง 98 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในระนาบ X-Y พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากการจับยึดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระนาบ Y-Z เนื่องจากแรงในการจับยึดของตัวจับยึดที่ 1 จะกระทำกับชิ้นงานตามแนวแกน Z ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าแกน X และ Y ทำให้ชิ้นงานมีการเสียรูปในค่า Z มากกว่าค่า X และ Y ดังงานวิจัยของ Satyanarayana และ Melkote (2004) วิเคราะห์ผลของแรงจับยึด ณ จุดสัมผัสระหว่างฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงาน โดยใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการพิจารณาถึงปัจจัยความหนาของชิ้นงานที่ส่งผลต่อการเสียรูปของชิ้นงาน พบว่าเมื่อชิ้นงานมีความหนามากจะมีการเสียรูป ณ จุดสัมผัสน้อยกว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า นอกจากนี้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 35 มิลลิเมตรส่งผลให้พื้นผิวด้านล่างของชิ้นงานมีการเสียรูปตามไปด้วย ฉะนั้นหากนำลักษณะการจับยึดชิ้นงานนี้ไป

ผลิตในกระบวนการที่ต้องการความแม่นยำสูง โดยไม่มีการชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 4-12



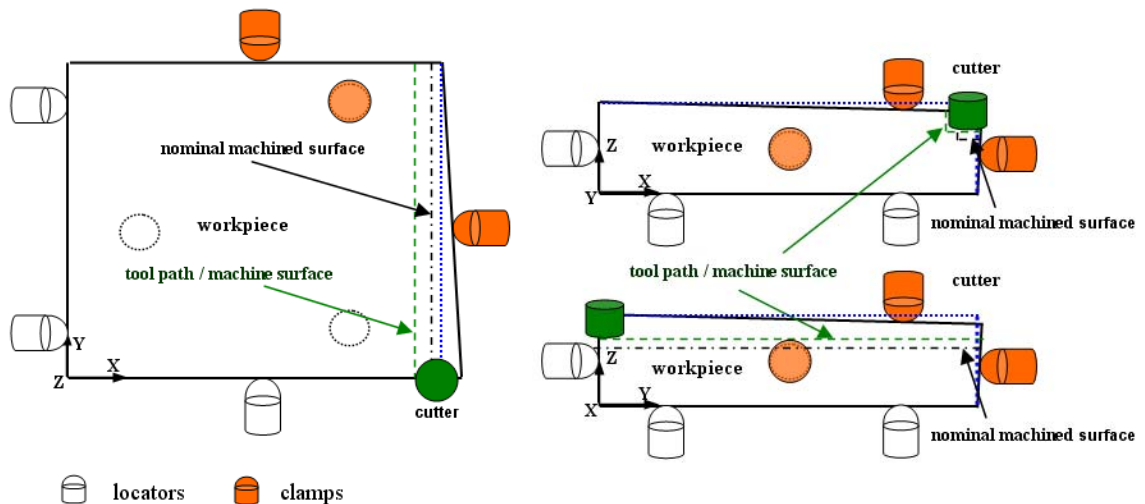
รูปที่ 4-10 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ X-Y



รูปที่ 4-11 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในระนาบ Y-Z

ตารางที่ 4-5 ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในแต่ละแนวแกน

แกน	ค่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมด		ค่าความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุการกำหนดตำแหน่ง		ค่าความคลาดเคลื่อนจากสาเหตุการจับยึด	
	average	SE	average	SE	average	SE
X	0.0228	0.0017	0.0233	0.0017	0.0015	0.0014
Y	0.1915	0.0008	0.1923	0.0000	-0.0005	0.0002
Z	0.1434	0.0002	0.1479	0.0005	-0.0045	0.0003
Absolute	0.2403	-	0.2437	-	-0.0048	-

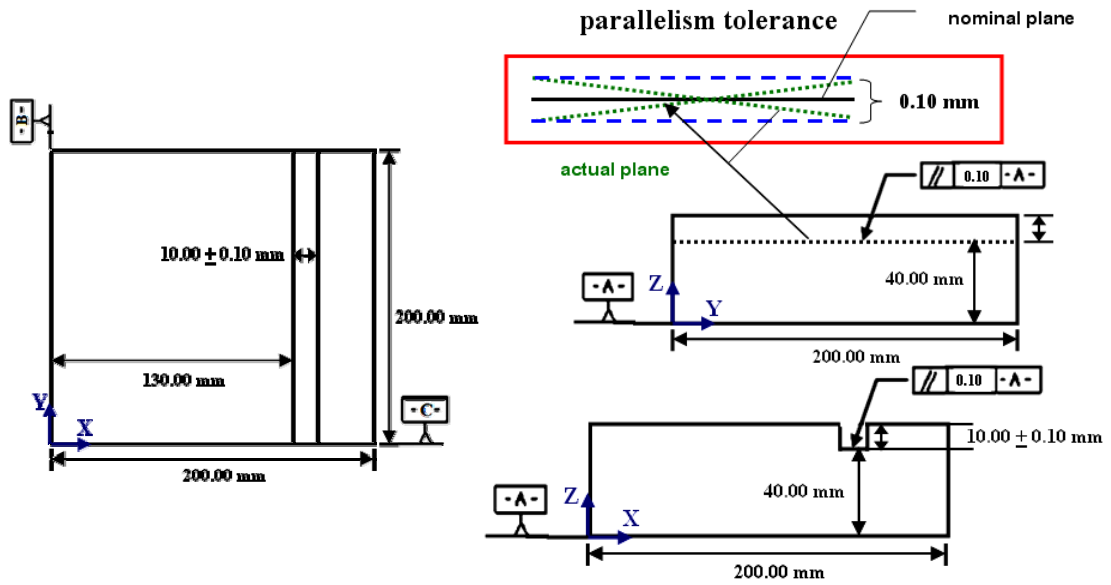


รูปที่ 4-12 ลักษณะความผิดพลาดของการตัดชิ้นงาน

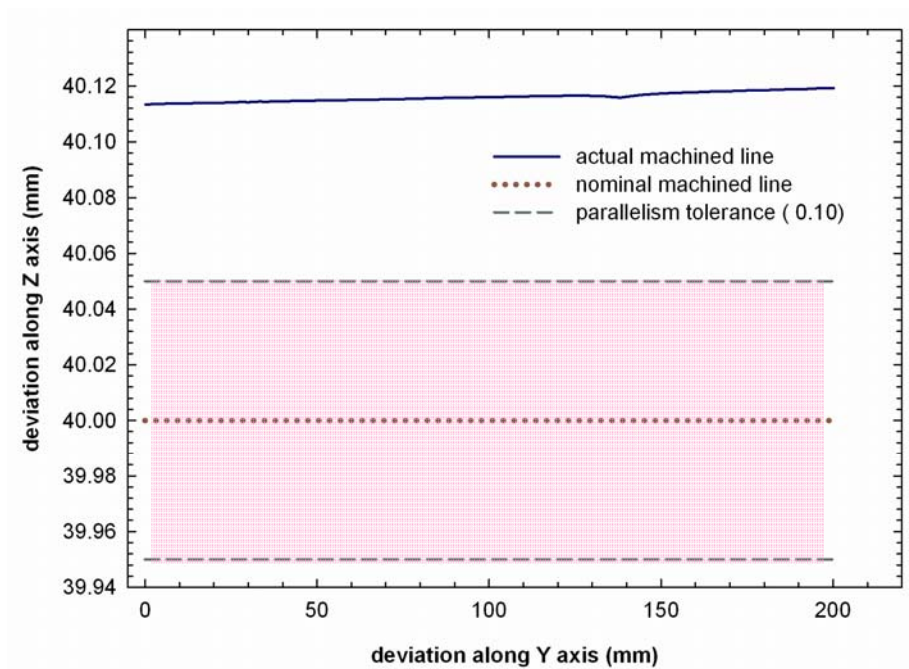
4.2.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัด

ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดพื้นผิวที่จะทำการตัดบนชิ้นงานตัวอย่างตามรายละเอียดในรูปที่ 4-13 พื้นผิวดังกล่าวถูกควบคุมให้มีความคลาดเคลื่อนแบบการขนานกันของพื้นผิว (parallelism deviation) เปรียบเทียบกับกับระนาบอ้างอิง A (ระนาบ X-Y) และระนาบอ้างอิง B (ระนาบ Y-Z) อยู่ในช่วงขอบเขต 0.10 มิลลิเมตร เมื่อชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนตามหัวข้อ 4.2.1 ไข่มืดไม่สามารถตัดชิ้นงาน ณ ตำแหน่งที่ถูกต้องได้ ส่งผลให้พื้นผิวที่ถูกควบคุมมีลักษณะเบี่ยงเบนออกไปจากพื้นผิวอุดมคติ (nominal plane) ดังแสดงในรูปที่ 4-14 การเบี่ยงเบนของ

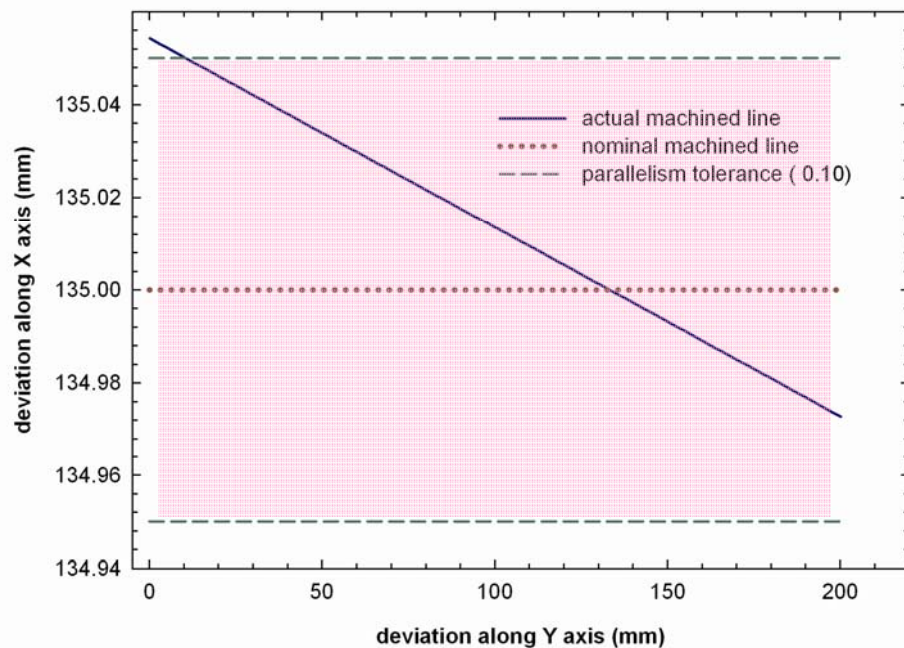
พื้นผิวที่ถูกตัดเทียบกับกับระนาบอ้างอิง A และรูปที่ 4-15 การเบี่ยงเบนของพื้นผิวที่ถูกตัดเทียบกับกับระนาบอ้างอิง B



รูปที่ 4-13 การออกแบบตำแหน่งการตัดชิ้นงาน



รูปที่ 4-14 การเบี่ยงเบนของพื้นผิวที่ถูกตัดเทียบกับกับระนาบอ้างอิง A



รูปที่ 4-15 การเบี่ยงเบนของพื้นผิวที่ถูกตัดเทียบกับกับระนาบอ้างอิง B

และจากรูปที่ 4-14 และ 4-15 เมื่อพิจารณาการเบี่ยงเบนของพื้นผิวที่ถูกตัดกับ ช่วงขอบเขตความคลาดเคลื่อนการขนานกันของระนาบอ้างอิง A (deviation along Z axis) จากการคำนวณพบว่ามีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดเท่ากับ 0.1161 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0016 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดไม่อยู่ในช่วงค่าระยะพิสัยของช่วงความคลาดเคลื่อนการขนานกันเกือบทั้งหมด และเมื่อพิจารณาในระนาบอ้างอิง B (deviation along X axis) พบว่ามีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดเท่ากับ 0.0228 และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0152 ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดส่วนใหญ่อยู่ในช่วงค่าระยะพิสัยของช่วงความคลาดเคลื่อนการขนานกัน ดังนั้นสรุปได้ว่าหากมีการผลิตชิ้นงานโดยไม่ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากสาเหตุการกำหนดตำแหน่งและจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ลักษณะนี้ และยังทำการกำหนดลักษณะการผลิตแบบเดิม ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผลิตออกมามีความผิดพลาด และหากชิ้นงานนั้นนำไปประกอบกับชิ้นส่วนอื่น ชิ้นงานนั้นไม่สามารถนำไปใช้งานในกระบวนการถัดไปได้ ถึงแม้ในส่วนของความคลาดเคลื่อนที่พิจารณากับระนาบอ้างอิง B จะอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ฉะนั้นหากต้องการให้การผลิตชิ้นงานสามารถนำไปใช้งานและอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ผู้ปฏิบัติงานควรให้ความสำคัญกับความผิดพลาดของการ

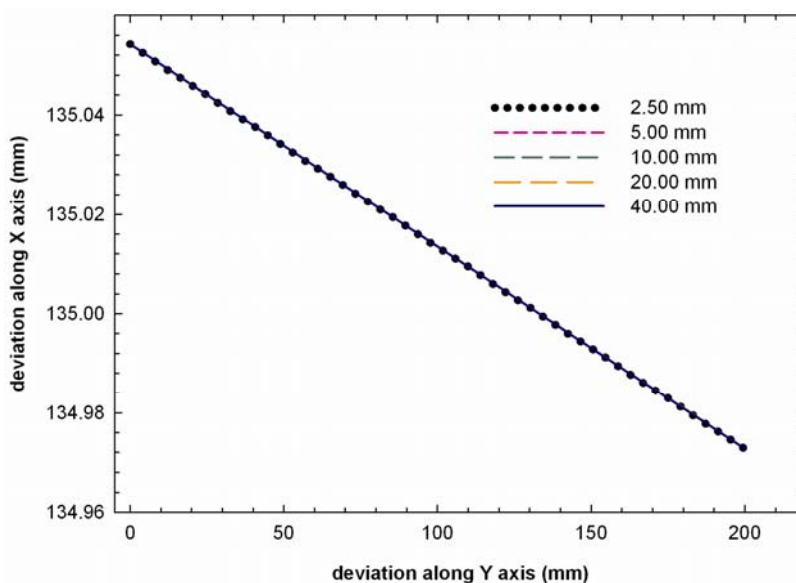
กำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงาน (ดูรายละเอียดการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดได้ที่ภาคผนวก ก)

4.3 การชดเชยเส้นทางเดินใบมีด

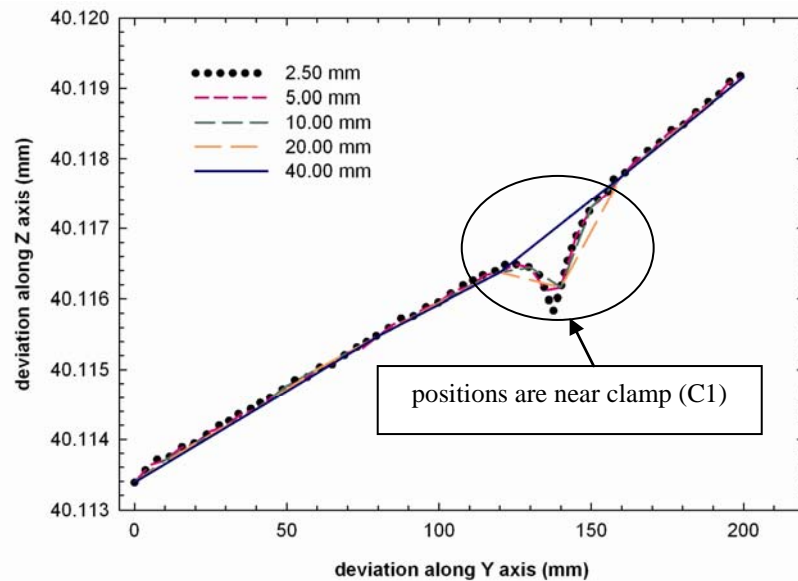
จากหัวข้อ 4.2.2 หากต้องการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนกระบวนการผลิต โดยไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ ฉะนั้นจะต้องมีการชดเชยเส้นทางเดินใบมีดเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการผลิตชิ้นงาน ซึ่งผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการชดเชยเส้นทางเดินใบมีดโดยใช้ข้อมูลของการทำนายซึ่งเป็นการกำหนดเส้นทางเดินใบที่จุดเริ่มต้นและจุดปลายเท่านั้น โดยมีการชดเชยในส่วนเริ่มต้นของการเดินใบมีด จากพิกัด $X = 135.00$ $Y = 0.00$ และ $Z = 40.00$ มิลลิเมตร ให้เปลี่ยนเป็นตำแหน่ง $X = 135.05$ $Y = 0.17$ และ $Z = 40.11$ มิลลิเมตร และในที่สุดท้ายของการเดินใบมีด จากพิกัด $X = 135.00$ $Y = 200.00$ และ $Z = 40.00$ ให้เปลี่ยนเป็นตำแหน่ง $X = 134.97$ $Y = 200.17$ และ $Z = 40.12$ มิลลิเมตร ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ CNC code โดยใบมีด (T1) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ได้ดังตารางที่ 4-6 ซึ่งแสดงตัวอย่างของการเขียน CNC code นอกจากนี้ หากต้องการให้การผลิตชิ้นงานมีความแม่นยำมากขึ้นอาจกำหนดเส้นทางการเดินใบมีดเป็นช่วงย่อยๆ ได้ โดยรูปที่ 4-16 การชดเชยเส้นทางเดินใบมีดช่วงระยะห่างต่างๆ ในระนาบ X-Y และรูปที่ 4-17 การชดเชยเส้นทางเดินใบมีดช่วงระยะห่างต่างๆ ในระนาบ Y-Z (ช่วงระยะห่างของตำแหน่งการตัดแต่ละจุดมีช่วงระยะห่างตั้งแต่ 2.50 มิลลิเมตร 5.00 มิลลิเมตร จนถึง 40.00)

ตารางที่ 4-6 ตัวอย่างการเขียน CNC code ของเส้นทางการเดินไปมีด

tool path (uncompensated)	tool path (compensated)
N001 G90 G94 G71 G17 G40	N001 G90 G94 G71 G17 G40
N002 T1 M6	N002 T1 M6
N003 S1000 M3	N003 S1000 M3
N004 G00 Z30.00	N004 G00 Z30
N005 G01 X135.00 Y0.00	N005 G01 X135.05 Y0.17
N006 G01 Z-1.00 F100 M8	N006 G01 Z-0.99 F100 M8
N007 G01 X135.00 Y200.00	N007 G01 X134.97 Y200.17
N008 G01 Z-2.00	N008 G01 Z-1.98
N009 G01 X135.00 Y0.00	N009 G01 X135.05 Y0.17
N010 G01 Z-3.00	N010 G01 Z-2.99
N011 G01 X135.00 Y200.00	N011 G01 X134.97 Y200.17
N012 G01 Z-4.00	N012 G01 Z-3.98
N013 G01 X135.00 Y0.00	N013 G01 X135.05 Y0.17
N014 G01 Z-5.00	N014 G01 Z-4.99
N015 G01 X135.00 Y200.00	N015 G01 X134.97 Y200.17
N016 G01 Z-6.00	N016 G01 Z-5.98
N017 G01 X135 Y0	N017 G01 X135.05 Y0.17
N018 G01 Z-7.00	N018 G01 Z-6.99
N019 G01 X135.00 Y200.00	N019 G01 X134.97 Y200.17
N020 G01 Z-8.00	N020 G01 Z-7.98
N021 G01 X135.00 Y0.00	N021 G01 X135.05 Y0.17
N022 G01 Z-9.00	N022 G01 Z-8.99
N023 G01 X135.00 Y200.00	N023 G01 X134.97 Y200.17
N024 G01 Z-10.00	N024 G01 Z-9.98
N025 G01 X135.00 Y0.00	N025 G01 X135.05 Y0.17
N026 G0 Z100 M5	N026 G0 Z100 M5
N027 M30	N027 M30

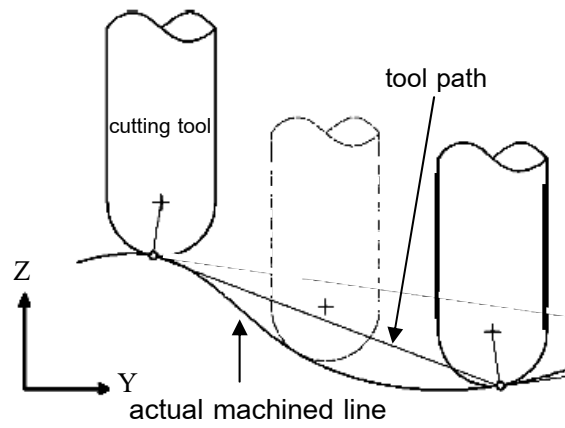


รูปที่ 4-16 การชดเชยเส้นทางการเดินไปมีดช่วงระยะห่างต่างๆ ในระนาบ X-Y



รูปที่ 4-17 การชดเชยเส้นทางเดินใบมีดช่วงระยะห่างต่างๆ ในระนาบ Y-Z

จากรูปที่ 4-16 และ 4-17 พบว่าหากมีการชดเชยเส้นทางเดินใบมีดในระนาบ X-Y ที่มีการกำหนดช่วงของตำแหน่งการตัดในระยะห่างที่แตกต่างกัน ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจะมีค่าไม่แตกต่างกันเนื่องจากความเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจะอยู่ในรูปแบบเลื่อนและหมุนซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น แต่หากมีการชดเชยใบมีดในระนาบ Y-Z ที่มีการกำหนดช่วงของตำแหน่งการตัดในระยะห่างที่แตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะบริเวณตำแหน่งใกล้กับตัวจับยึดชิ้นงาน (ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดมีรูปแบบเป็นเส้นโค้งที่เกิดจากการเสียรูปของการจับยึดชิ้นงาน) เนื่องจากลักษณะการตัดในแต่ละช่วงของตำแหน่งการตัดเป็นแบบการตัดในรูปแบบเชิงเส้น (piecewise linear NC tool path) ยกตัวอย่างเช่น หากมีการกำหนดช่วงระยะห่างของตำแหน่งการตัดเท่ากับ 40.00 มิลลิเมตร ทำให้การตัดบริเวณตัวจับยึดเป็นแนวเส้นตรงที่ไม่สอดคล้องกับความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ดังลักษณะตามรูปที่ 4-18 ทำให้เมื่อทำการตัดชิ้นงานเสร็จแล้วก็ยังพบความผิดพลาดในการตัดชิ้นงาน ฉะนั้นควรกำหนดการชดเชยเส้นทางเดินใบมีดให้เหมาะสมสำหรับการนำชิ้นงานที่ถูกผลิตไปใช้ในกระบวนการถัดไป เช่น อาจมีการกำหนดช่วงระยะห่างของตำแหน่งการตัดให้กว้างในบริเวณอื่นและเมื่อเข้าใกล้บริเวณตัวจับยึดก็ค่อยทำการลดระยะห่างที่แคบลง เพราะถ้าหากมีการกำหนดช่วงระยะห่างที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้เมื่อทำการผลิตเสร็จและนำชิ้นงานออกจากฟิกซ์เจอร์ ส่งผลให้ชิ้นงานบริเวณตัวจับยึดนั้นมีการคืนตัวและทำให้เกิดความผิดพลาดได้



รูปที่ 4-18 ความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานที่เกิดจากการกำหนดช่วงระหว่าง
ของตำแหน่งการตัดที่ไม่เหมาะสมในระนาบ Y-Z

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงถึงลักษณะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานตามเส้นทางการเดินใบมีดที่ได้ออกแบบไว้ และสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลสำหรับการนำไปชดเชยเส้นทางการเดินใบมีด การกำหนดลักษณะการจัดวางของชิ้นงานบนเครื่องจักรการออกแบบฟิกซ์เจอร์ และการกำหนดค่าระยะพิกัดเผื่อที่เหมาะสมของชิ้นงานที่นำมาผลิตเพื่อช่วยลดความผิดพลาดของตำแหน่งการตัดและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต

5.1 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

จากวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด และวิธีการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดนั้นจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ ทำให้ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลที่เป็นเหตุผลทางทฤษฎีและเงื่อนไขข้อจำกัดในการปฏิบัติงานมาสังเคราะห์และพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ซึ่งสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้เป็นประเด็นต่างๆ ดังนี้

5.1.1 การทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

การทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ สามารถแบ่งสาเหตุออกได้เป็น 1.สาเหตุที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง ซึ่งประกอบด้วยความผิดพลาดที่เกิดจากความไม่แน่นอนของชิ้นงาน ในการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ใช้กระบวนการทางคณิตศาสตร์ซึ่งอาศัยพื้นฐานของหลักการเปลี่ยนแปลงทางเรขาคณิตสำหรับทำนายโดยใช้โปรแกรม Matlab ซึ่งผลจากการทำนายพบว่า

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจะมีลักษณะการเคลื่อนตำแหน่งไปทุกส่วนในทิศทางเดียวกันโดยแบ่งเป็นความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดแบบเลื่อนซึ่งถูกแสดงด้วยเวกเตอร์ (dx, dy, dz) และความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดแบบหมุนซึ่งถูกแสดงด้วยเวกเตอร์ (γ, β, α) 2. สาเหตุที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึด ซึ่งเกิดจากแรงและตำแหน่งในการจับยึดของตัวจับยึดชิ้นงาน ในการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนนี้ ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc โดยนำผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง มาใช้เป็นข้อมูลเริ่มต้นในการสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ ซึ่งผลจากการทำนายส่งผลให้ชิ้นงานมีการเสียรูปบริเวณ ณ จุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ และทำให้ตำแหน่งการตัดมีความคลาดเคลื่อนในรูปแบบเลื่อนและหมุนเช่นเดียวกับสาเหตุแรกแต่มีปริมาณน้อยกว่า (ผลจากการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ในส่วนของตัวชิ้นงานและตัวฟิกซ์เจอร์ เป็นวัสดุโลหะ โดยคุณสมบัติทางวัสดุของฟิกซ์เจอร์มีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นงาน) ซึ่งจากการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจาก 2 สาเหตุ สามารถหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดรวมทั้งหมดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดได้ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดส่วนใหญ่จะเกิดจากสาเหตุการกำหนดตำแหน่งมากกว่าการจับยึดชิ้นงานไม่น้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ (ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดความไม่แน่นอนของชิ้นงานและแรงในการจับยึดของฟิกซ์เจอร์)

5.1.2 การทำนายความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัด

การทำนายความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดผู้วิจัยได้นำผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด มาทำนายความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดโดยพิจารณาความคลาดเคลื่อนแบบการขนานกันของพื้นผิว (parallelism deviation) ซึ่งผลจากการทำนายสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น (linear) แต่หากทำการตัดชิ้นงานบริเวณตัวจับยึด จะต้องมีการพิจารณาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบริเวณตัวจับยึดนั้นเพิ่มเติมด้วย เนื่องจากแรงในการจับยึดชิ้นงานส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดเป็นรูปแบบไม่เชิงเส้น (non-linear) ซึ่งหากในการทำนายนั้นพบว่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดมีปริมาณมากกว่าช่วงค่าระยะพิคัดเผื่อ ทำให้เมื่อใช้ลักษณะการจับยึดชิ้นงานนี้ไปผลิต โดยไม่มีการชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของการตัดชิ้นงานขึ้นได้

5.1.3 การชดเชยเส้นทางเดินใบมีด

การชดเชยเส้นทางเดินใบมีดเป็นการลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนกระบวนการผลิตโดยไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ โดยในการชดเชยเส้นทางเดินใบมีดจะประเมินจากความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ซึ่งผลของการตัดชิ้นงานจะมีความถูกต้องมากเพียงใดนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการกำหนดเส้นทางชดเชยการเดินใบมีดว่ามีการกำหนดช่วงระยะห่างต่าง ๆ ของตำแหน่งการเดินใบมีดมากน้อยเพียงใด ซึ่งถ้าหากมีการกำหนดช่วงระยะห่างของตำแหน่งที่แคบก็จะเพิ่มความถูกต้องในการตัดมากยิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัย

จากการผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานก่อนกระบวนการตัด โดยคำนึงถึงผลกระทบของความไม่แน่นอนของชิ้นงานและกระบวนการจับยึดของฟิกซ์เจอร์ และการนำผลที่ได้จากการทำนายไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง สามารถสรุปเป็นข้อเสนอแนะในการพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดต่อไปดังนี้

- 1) ในส่วนของการสร้างชุดทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบ หากมีการใช้เครื่องมือในการควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานและเครื่องมือในการวัดที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงนั้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดให้มีความแม่นยำมากขึ้น
- 2) สามารถพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์นี้สำหรับทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด สำหรับชิ้นงานและการจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ในลักษณะอื่นนอกเหนือจากที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา
- 3) สามารถพัฒนากระบวนการทางคณิตศาสตร์นี้สำหรับหาตำแหน่งและแรงของตัวจับยึดชิ้นงานที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตชิ้นงาน

นอกจากนี้ สาเหตุที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดยังพบในส่วนของขณะทำการผลิต (ดังรูปที่ 1-2) ฉะนั้นหากนำข้อมูลผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขั้นตอนก่อนกระบวนการตัดที่ได้วิเคราะห์แล้วนั้น ไปปรับปรุงแก้ไขร่วมกับผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในขณะทำการตัดจะสามารถเพิ่มความแม่นยำในการผลิตชิ้นงานได้มากยิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2547, "โครงการศึกษาการจัดทำแผนแม่บท อุตสาหกรรมงานขึ้นรูปความเที่ยงตรงสูง", หน้า 21.
- Chaiprapat, S. and Rujikietgumjorn, S., 2006a, "A method to analyze effects of surface variational model on positional geometric variability", *Songklanakarın Journal Science Technology*, Vol. 28(1), pp. 169-179.
- Chaiprapat, S. and Rujikietgumjorn, S., 2006b, "Resultant geometric variation of a fixtured workpiece Part I: a simulation ", *Songklanakarın Journal Science Technology*, Vol. 28, pp. 181-190.
- Chaiprapat, S. and Rujikietgumjorn, S., 2008, "Modeling of positional variability of a fixtured workpiece due to locating errors", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, pp. 724-731.
- Cai, W., Hu, S.J. and Yuan, J.X., 1996, "Deformable sheet metal fixturing: Principles algorithms and simulations", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 118(3), pp. 318-324.
- Cai, W., Hu, S.J. and Yuan, J.X., 1997, "A variational method of robust fixture configuration design for 3-D Workpieces", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp. 593-602.
- DeMeter, E.C., 1994, "Max-min load criteria as a measure of machining fixture performance", *Journal of engineering for industry*, Vol. 116, pp. 500-507.
- Doof, R.C. and Kusiak, A., 1994, "Handbook of design, manufacturing and automation", John Wiley & Sons, USA, pp. 172-173
- DeMeter, E.C., 1995, "Min-max load model for optimizing machining fixture performance", *Journal of engineering for industry*, Vol. 117(2), pp. 186-193.
- DeMeter, E.C. and Hockenberger, M.J., 1997, "The application of tool path compensation for the reduction of clamping induced geometric errors", *International Journal of Production Research*, Vol. 35, pp. 3415-3432.
- DeMeter, E.C., 2001, "A model to predict minimum required clamp pre-loads in light of fixture-workpiece compliance", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp. 1031-1054.

- Estrems, M., Sanchez, H.T. and Faura, F., 2003, "Influence of fixtures on dimensional accuracy in machining processes", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 384-390.
- Fischer-Cripps, A.C., 2007, "Introduction to contact mechanics", Springer, 2nd Edition, USA, pp. 101-105.
- Foster, L.W., 1994, "GEO-METRICS III", Addison-Wesley, USA, pp. 38-75.
- Johnson, K.L., 1985, "Contact mechanics", Cambridge university press, pp. 84-104
- Kalpakjian, S., 1992, "Manufacturing process for engineering materials", Addison-Wesley. 2nd Edition, pp. 205.
- Kang, Y., Rong, Y. and Yang, J.C., 2003, "Computer-aided fixture design verification part 2. tolerance analysis", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 21, pp. 836–841.
- Li, B. and Melkote, S.N., 2001, "Fixture clamping force optimisation and its Impact on workpiece location accuracy", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, pp. 104-113.
- Logan, D. L., 2007, "A first course in the finite element method", Thomson, 4th Edition USA, pp. 490-509.
- Mannan, M.A., 1997, "A force-controlled clamping element for intelligent fixturing", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 46, pp. 265-268.
- MSC Marc, 1999, "MSC.Marc Introductory Course", MSC.Software Corporation, USA, pp.89-116.
- Nasseri, S., 2008, "Workholding principles", [online]. Available at <http://www.spsu.edu/met/snasseri/tooldesign/workholding-1-321method.pps>, Accessed 20 December 2008
- Raghu, A. and Melkote, S.N., 2003, "Analysis of the effects of fixture clamping sequence on part location errors", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 373-382.
- Sadd, M.H., 2005, "Introduction to finite element methods", [online]. Available at <http://mcise.uri.edu/sadd/mce565/FEM%20Lecture.ppt>, Accessed 15 December 2008

- Sanchez, H.T., Estrems, M. and Faura, F., 2006, "Analysis and compensation of positional and deformation error using integrated fixturing analysis in flexible machining parts", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 29, pp. 239-252.
- Satyanarayana, S. and Melkote, S.N., 2004, "Finite element modeling of fixture–workpiece contacts: single contact modeling and experimental verification", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 903-913.
- Texscan, 2009 "flexiforce sensor user manual", [online]. Available at <http://www.tekscan.com/pdfs/FlexiforceUserManual.pdf>, Accessed 7 June 2009
- Wattanuchariya, W., 2008, "Workholding device", [online]. Available at [http://www.ie.cmu.edu/wattnuchariya/tool engineering/workholding-device.pps](http://www.ie.cmu.edu/wattnuchariya/tool%20engineering/workholding-device.pps), Accessed 20 December 2008
- Wang, Y., Chen, X. and Gindy, N., 2006, "Surface error decomposition for fixture development", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 31, pp. 948-956.
- Xie, W., DeMeter, E.C. and Trethewey, M.W., 2000, "An experimental evaluation of coefficients of static friction of common workpiece–fixture element pairs", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.40, pp. 467-488.
- Yeh, J.H. and Liou, F.W., 1999, "Contact condition modelling for machining fixture setup processes", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 787-803.
- Zeid, I., 1991, "CAD/CAM theory and practice", McGraw-Hill, Singapore, pp.481-508
- Zheng, Y. and Chew, C.-M., 2010, "A geometric approach to automated fixture layout design", *Computer-Aided Design*, Vol. 42(3), pp. 202-212.

ภาคผนวก ก
ผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

1. การตรวจสอบความถูกต้องของผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

1.1 การตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลจากการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองไปตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายที่ได้จากการจำลองแบบ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของข้อมูลการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการตัดในทิศทาง X Y และ Z ที่ได้จากการทดลองและการทำนายด้วยวิธีทางสถิติซึ่งประกอบด้วยการคำนวณค่าเฉลี่ย (average: AVG.) (magnitude difference data) จากสมการ (ก.1) และการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error :SE) จากสมการ (ก.2) ของขนาดค่าความแตกต่างการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการตัดในทิศทาง X Y และ Z โดยนำจำนวนข้อมูลมาอย่างละ 20 ข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ (ข้อมูลจากการทดลองการทดลองที่นำมาวิเคราะห์เป็นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำ การวัดซ้ำ 3 ครั้ง) ซึ่งสามารถสรุปผลการตรวจสอบความถูกต้องของการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดได้เป็น 3 ส่วนคือ 1. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ ก-1 2. แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึดติดตั้งแสดงในตารางที่ ก-2 และ 3. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดติดตั้งแสดงในตารางที่ ก-3

สมการคำนวณค่าเฉลี่ย

$$\bar{X} = \frac{\sum X}{N} \quad (\text{ก.1})$$

สมการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{N}} \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ $\sum X$: ผลรวมทั้งหมดของค่าความแตกต่างของการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ได้จากการทำนายและการทดลองในแต่ละชุดข้อมูล

SD : ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแตกต่างของการวัดพิกัดความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่ได้จากการทำนายและการทดลอง

N : จำนวนชุดข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์ ($N = 20$)

ตารางที่ ก-1 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง

Locating procedure																
Order	Nominal position (mm)			Deviation position (mm)						Difference (Experimental & Analytical)			Difference (Experimental & Analytical)			
	X	Y	Z	Experimental data			Analytical data			Direction data (mm)			Magnitude data (mm)			
				X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	175.0000	-76.1584	82.7300	173.0272	-74.7247	82.5357	173.0112	-74.6787	82.5274	-1.6000E-02	4.6000E-02	-8.2571E-03	1.6000E-02	4.6000E-02	8.2571E-03	
2	175.0000	-86.1584	82.7300	173.1512	-84.1962	82.5108	173.1342	-84.1492	82.5022	-1.7000E-02	4.7000E-02	-8.5667E-03	1.7000E-02	4.7000E-02	8.5667E-03	
3	175.0000	-96.1584	82.7300	173.2751	-94.3413	82.4790	173.2591	-94.2953	82.4701	-1.6000E-02	4.6000E-02	-8.8762E-03	1.6000E-02	4.6000E-02	8.8762E-03	
4	175.0000	-106.1584	82.7300	173.4376	-104.7623	82.4474	173.4196	-104.7143	82.4382	-1.8000E-02	4.8000E-02	-9.1857E-03	1.8000E-02	4.8000E-02	9.1857E-03	
5	175.0000	-116.1584	82.7300	173.5616	-114.4144	82.4218	173.5472	-114.3700	82.4123	-1.4400E-02	4.4400E-02	-9.4952E-03	1.4400E-02	4.4400E-02	9.4952E-03	
6	175.0000	-126.1584	82.7300	173.6971	-124.1227	82.3891	173.6798	-124.0755	82.3793	-1.7220E-02	4.7220E-02	-9.8048E-03	1.7220E-02	4.7220E-02	9.8048E-03	
7	175.0000	-136.1584	82.7300	173.8326	-134.3624	82.3529	173.8127	-134.3126	82.3428	-1.9840E-02	4.9840E-02	-1.0114E-02	1.9840E-02	4.9840E-02	1.0114E-02	
8	175.0000	-146.1584	82.7300	173.9681	-144.5580	82.3241	173.9551	-144.5150	82.3137	-1.2960E-02	4.2960E-02	-1.0424E-02	1.2960E-02	4.2960E-02	1.0424E-02	
9	175.0000	-156.1584	82.7300	174.1036	-154.2859	82.2966	174.0837	-154.2360	82.2859	-1.9880E-02	4.9880E-02	-1.0733E-02	1.9880E-02	4.9880E-02	1.0733E-02	
10	175.0000	-166.1584	82.7300	174.2391	-164.7297	82.2676	174.2174	-164.6780	82.2566	-2.1700E-02	5.1700E-02	-1.1043E-02	2.1700E-02	5.1700E-02	1.1043E-02	
11	175.0000	-176.1584	82.7300	174.3746	-174.2427	82.2365	174.3565	-174.1946	82.2251	-1.8120E-02	4.8120E-02	-1.1352E-02	1.8120E-02	4.8120E-02	1.1352E-02	
12	175.0000	-186.1584	82.7300	174.5101	-184.3029	82.2026	174.4864	-184.2493	82.1909	-2.3640E-02	5.3640E-02	-1.1662E-02	2.3640E-02	5.3640E-02	1.1662E-02	
13	175.0000	-196.1584	82.7300	174.6456	-194.5215	82.1764	174.6208	-194.4667	82.1644	-2.4760E-02	5.4760E-02	-1.1971E-02	2.4760E-02	5.4760E-02	1.1971E-02	
14	175.0000	-206.1584	82.7300	174.7811	-204.2916	82.1477	174.7635	-204.2440	82.1354	-1.7580E-02	4.7580E-02	-1.2281E-02	1.7580E-02	4.7580E-02	1.2281E-02	
15	175.0000	-216.1584	82.7300	174.9166	-214.7821	82.1199	174.9019	-214.7474	82.1073	-1.4700E-02	3.4700E-02	-1.2590E-02	1.4700E-02	3.4700E-02	1.2590E-02	
16	175.0000	-226.1584	82.7300	175.0521	-224.4319	82.0903	175.0299	-224.3797	82.0774	-2.2220E-02	5.2220E-02	-1.2900E-02	2.2220E-02	5.2220E-02	1.2900E-02	
17	175.0000	-236.1584	82.7300	175.1876	-234.5362	82.0589	175.1594	-234.4780	82.0457	-2.8240E-02	5.8240E-02	-1.3210E-02	2.8240E-02	5.8240E-02	1.3210E-02	
18	175.0000	-246.1584	82.7300	175.3231	-244.7053	82.0317	175.3000	-244.6521	82.0182	-2.3160E-02	5.3160E-02	-1.3519E-02	2.3160E-02	5.3160E-02	1.3519E-02	
19	175.0000	-256.1584	82.7300	175.4586	-254.8757	81.9936	175.4404	-254.8175	81.9798	-1.8180E-02	5.8180E-02	-1.3829E-02	1.8180E-02	5.8180E-02	1.3829E-02	
20	175.0000	-266.1584	82.7300	175.5941	-264.7075	81.9673	175.5702	-264.6536	81.9532	-2.3900E-02	5.3900E-02	-1.4138E-02	2.3900E-02	5.3900E-02	1.4138E-02	
										AVG	-1.9375E-02	4.9375E-02	-1.1198E-02	1.9375E-02	4.9375E-02	1.1198E-02
										SE	8.9368E-04	1.2281E-03	4.0946E-04	8.9368E-04	1.2281E-03	4.0946E-04

ตารางที่ ก-2 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการจับยึด

Clamping error													
Order	Deviation position (mm)						Difference (Experimental & Analytical)			Difference (Experimental & Analytical)			
	Experimental data			Analytical data			Direction data (mm)			Magnitude data (mm)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	5.5433E-03	3.0100E-03	2.8800E-02	4.9300E-03	7.5700E-04	4.8910E-03	-6.1330E-04	-2.2530E-03	-2.3909E-02	6.13E-04	2.25E-03	2.39E-02	
2	5.7450E-03	3.0000E-03	3.2400E-02	4.9160E-03	7.5600E-04	5.0605E-03	-8.2900E-04	-2.2440E-03	-2.7340E-02	8.29E-04	2.24E-03	2.73E-02	
3	5.8880E-03	3.0200E-03	3.6000E-02	4.9020E-03	7.5390E-04	5.2165E-03	-9.8600E-04	-2.2661E-03	-3.0783E-02	9.86E-04	2.27E-03	3.08E-02	
4	5.8740E-03	3.1300E-03	3.9600E-02	4.8880E-03	7.4150E-04	5.3815E-03	-9.8600E-04	-2.3885E-03	-3.4219E-02	9.86E-04	2.39E-03	3.42E-02	
5	5.8040E-03	3.2340E-03	4.3200E-02	4.8740E-03	7.3400E-04	5.5442E-03	-9.3000E-04	-2.5000E-03	-3.7656E-02	9.30E-04	2.50E-03	3.77E-02	
6	5.4870E-03	3.2451E-03	4.6800E-02	4.8600E-03	7.1000E-04	5.7070E-03	-6.2700E-04	-2.5351E-03	-4.1093E-02	6.27E-04	2.54E-03	4.11E-02	
7	5.3700E-03	3.2480E-03	5.0400E-02	4.8460E-03	6.7900E-04	5.8697E-03	-5.2400E-04	-2.5690E-03	-4.4530E-02	5.24E-04	2.57E-03	4.45E-02	
8	5.2500E-03	3.2582E-03	5.4000E-02	4.8320E-03	6.4150E-04	6.0324E-03	-4.1800E-04	-2.6167E-03	-4.7968E-02	4.18E-04	2.62E-03	4.80E-02	
9	5.5370E-03	3.3420E-03	5.7600E-02	4.8180E-03	5.8870E-04	6.1952E-03	-7.1900E-04	-2.7533E-03	-5.1405E-02	7.19E-04	2.75E-03	5.14E-02	
10	4.8450E-03	3.3462E-03	6.1200E-02	4.8040E-03	5.3500E-04	6.3579E-03	-4.1000E-05	-2.8112E-03	-5.4842E-02	4.10E-05	2.81E-03	5.48E-02	
11	4.7200E-03	3.2242E-03	6.4800E-02	4.7500E-03	4.6100E-04	6.5207E-03	3.0000E-05	-2.7632E-03	-5.8279E-02	3.00E-05	2.76E-03	5.83E-02	
12	4.6000E-03	3.1000E-03	6.8400E-02	4.6200E-03	4.0000E-04	6.6834E-03	2.0000E-05	-2.7000E-03	-6.1717E-02	2.00E-05	2.70E-03	6.17E-02	
13	2.0600E-03	2.6010E-03	7.2000E-02	4.4870E-03	3.4200E-04	6.8462E-03	2.4270E-03	-2.2590E-03	-6.5154E-02	2.43E-03	2.26E-03	6.52E-02	
14	-2.5000E-03	2.3000E-03	7.5600E-02	4.3700E-03	2.9100E-04	7.0089E-03	6.8700E-03	-2.0090E-03	-6.8591E-02	6.87E-03	2.01E-03	6.86E-02	
15	-2.5090E-03	1.8019E-03	7.9200E-02	4.3600E-03	2.6300E-04	7.1716E-03	6.8690E-03	-1.5389E-03	-7.2028E-02	6.87E-03	1.54E-03	7.20E-02	
16	2.0000E-03	1.5900E-03	8.2800E-02	4.4600E-03	2.5800E-04	7.3344E-03	2.4600E-03	-1.3320E-03	-7.5466E-02	2.46E-03	1.33E-03	7.55E-02	
17	5.0000E-03	1.6450E-03	8.6400E-02	4.6510E-03	2.7100E-04	7.4971E-03	-3.4900E-04	-1.3740E-03	-7.8903E-02	3.49E-04	1.37E-03	7.89E-02	
18	5.0150E-03	1.7800E-03	9.0000E-02	4.7600E-03	2.7800E-04	7.6599E-03	-2.5500E-04	-1.5020E-03	-8.2340E-02	2.55E-04	1.50E-03	8.23E-02	
19	5.0500E-03	2.0184E-03	9.3600E-02	4.8100E-03	2.8500E-04	7.8226E-03	-2.4000E-04	-1.7334E-03	-8.5777E-02	2.40E-04	1.73E-03	8.58E-02	
20	5.0950E-03	2.0196E-03	9.7200E-02	4.8300E-03	2.8400E-04	7.9853E-03	-2.6500E-04	-1.7356E-03	-8.9215E-02	2.65E-04	1.74E-03	8.92E-02	
							AVG	5.4469E-04	-2.1942E-03	-5.6561E-02	1.3229E-03	2.1942E-03	5.6561E-02
							SE	5.2800E-04	1.1046E-04	4.5471E-03	4.4976E-04	1.1046E-04	4.5471E-03

ตารางที่ ก-3 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด

Locating & clamping procedure

Order	Nominal position (mm)			Deviation position (mm)						Difference (Experimental & Analytical)			Difference (Experimental & Analytical)			
	X	Y	Z	Experimental data			Analytical data			Direction data (mm)			Magnitude data (mm)			
				X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	175.0000	-76.1584	82.7300	173.0328	-74.7217	82.5069	173.0162	-74.6779	82.5226	-1.6613E-02	4.3747E-02	1.5652E-02	1.6613E-02	4.3747E-02	1.5652E-02	
2	175.0000	-86.1584	82.7300	173.1569	-84.1932	82.4784	173.1391	-84.1484	82.4972	-1.7829E-02	4.4756E-02	1.8773E-02	1.7829E-02	4.4756E-02	1.8773E-02	
3	175.0000	-96.1584	82.7300	173.2810	-94.3383	82.4430	173.2640	-94.2945	82.4649	-1.6986E-02	4.3734E-02	2.1907E-02	1.6986E-02	4.3734E-02	2.1907E-02	
4	175.0000	-106.1584	82.7300	173.4435	-104.7592	82.4078	173.4245	-104.7136	82.4328	-1.8986E-02	4.5612E-02	2.5033E-02	1.8986E-02	4.5612E-02	2.5033E-02	
5	175.0000	-116.1584	82.7300	173.5674	-114.4112	82.3786	173.5520	-114.3693	82.4068	-1.5330E-02	4.1900E-02	2.8161E-02	1.5330E-02	4.1900E-02	2.8161E-02	
6	175.0000	-126.1584	82.7300	173.7025	-124.1195	82.3423	173.6847	-124.0748	82.3736	-1.7847E-02	4.4685E-02	3.1288E-02	1.7847E-02	4.4685E-02	3.1288E-02	
7	175.0000	-136.1584	82.7300	173.8379	-134.3592	82.3025	173.8176	-134.3119	82.3369	-2.0364E-02	4.7271E-02	3.4416E-02	2.0364E-02	4.7271E-02	3.4416E-02	
8	175.0000	-146.1584	82.7300	173.9733	-144.5547	82.2701	173.9599	-144.5144	82.3076	-1.3378E-02	4.0343E-02	3.7544E-02	1.3378E-02	4.0343E-02	3.7544E-02	
9	175.0000	-156.1584	82.7300	174.1091	-154.2826	82.2390	174.0885	-154.2354	82.2797	-2.0599E-02	4.7127E-02	4.0671E-02	2.0599E-02	4.7127E-02	4.0671E-02	
10	175.0000	-166.1584	82.7300	174.2439	-164.7264	82.2064	174.2222	-164.6775	82.2502	-2.1741E-02	4.8889E-02	4.3799E-02	2.1741E-02	4.8889E-02	4.3799E-02	
11	175.0000	-176.1584	82.7300	174.3793	-174.2395	82.1717	174.3612	-174.1941	82.2186	-1.8090E-02	4.5357E-02	4.6927E-02	1.8090E-02	4.5357E-02	4.6927E-02	
12	175.0000	-186.1584	82.7300	174.5147	-184.2998	82.1342	174.4911	-184.2489	82.1843	-2.3620E-02	5.0940E-02	5.0055E-02	2.3620E-02	5.0940E-02	5.0055E-02	
13	175.0000	-196.1584	82.7300	174.6477	-194.5189	82.1044	174.6253	-194.4664	82.1576	-2.2333E-02	5.2501E-02	5.3182E-02	2.2333E-02	5.2501E-02	5.3182E-02	
14	175.0000	-206.1584	82.7300	174.7786	-204.2893	82.0721	174.7679	-204.2437	82.1284	-1.0710E-02	4.5571E-02	5.6310E-02	1.0710E-02	4.5571E-02	5.6310E-02	
15	175.0000	-216.1584	82.7300	174.9141	-214.7803	82.0407	174.9063	-214.7471	82.1001	-7.8310E-03	3.3161E-02	5.9438E-02	7.8310E-03	3.3161E-02	5.9438E-02	
16	175.0000	-226.1584	82.7300	175.0541	-224.4303	82.0075	175.0343	-224.3794	82.0701	-1.9760E-02	5.0888E-02	6.2566E-02	1.9760E-02	5.0888E-02	6.2566E-02	
17	175.0000	-236.1584	82.7300	175.1926	-234.5346	81.9725	175.1640	-234.4777	82.0382	-2.8589E-02	5.6866E-02	6.5693E-02	2.8589E-02	5.6866E-02	6.5693E-02	
18	175.0000	-246.1584	82.7300	175.3281	-244.7035	81.9417	175.3047	-244.6519	82.0105	-2.3415E-02	5.1658E-02	6.8821E-02	2.3415E-02	5.1658E-02	6.8821E-02	
19	175.0000	-256.1584	82.7300	175.4637	-254.8737	81.9000	175.4453	-254.8172	81.9719	-1.8420E-02	5.6447E-02	7.1949E-02	1.8420E-02	5.6447E-02	7.1949E-02	
20	175.0000	-266.1584	82.7300	175.5992	-264.7055	81.8701	175.5751	-264.6533	81.9452	-2.4165E-02	5.2164E-02	7.5077E-02	2.4165E-02	5.2164E-02	7.5077E-02	
										AVG	-1.8830E-02	4.7181E-02	4.5363E-02	1.8830E-02	4.7181E-02	4.5363E-02
										SE	1.0695E-03	1.2555E-03	4.1376E-03	1.0695E-03	1.2555E-03	4.1376E-03

จากตารางที่ (ก-1) (ก-2) และ (ก-3) ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้คือ

1. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการกำหนดตำแหน่ง ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ขนาดค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง X มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0194 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0009 ในทิศทาง Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0494 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0012 และในทิศทาง Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0112 และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0004 ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0542 มิลลิเมตร (ขนาดค่าความแตกต่างรวมสามารถหาได้จากสมการ $\sqrt{(\bar{X}^2 + \bar{Y}^2 + \bar{Z}^2)}$)

2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสาเหตุการจับยึด ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ขนาดค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง X มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0013 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0004 ในทิศทาง Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0022 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0001 และในทิศทาง Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0566 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0045 ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0566 มิลลิเมตร

และเมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจาก 2 สาเหตุมารวมกันทำให้ขนาดค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง X มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0188 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0011 ในทิศทาง Y มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0472 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0013 และในทิศทาง Z มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0454 มิลลิเมตร และมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเท่ากับ 0.0041 ส่งผลให้เกิดขนาดค่าความแตกต่างรวมทั้ง 3 ทิศทางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.0681 มิลลิเมตร

1.2 การชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากการทดลอง

เนื่องจากการตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองแบบ พบว่าผลค่าความแตกต่างของพิกัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ได้จากการทดลองและการทำนายในทิศทาง Z จากสาเหตุการจับยึด มีค่าแตกต่างที่มากกว่าในทิศทาง X และ Y ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนในการทดลองและเงื่อนไขในของแบบจำลอง ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงมี

การตรวจสอบความไม่แน่นอนของการทดลองและทำการชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากการทดลองโดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การตรวจสอบความไม่แน่นอนของการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความไม่แน่นอนของการทดลองโดยมีการวัดซ้ำในแต่ละครั้งของการทดลองเพื่อป้องกันความผิดพลาดจากกระบวนการวัด การตรวจจับการเลื่อนตำแหน่งของจุดสัมผัส โดยการวัดความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานเมื่อถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์และนำมาชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากการทดลอง

2) การชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z

ผู้วิจัยได้ทำการชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z ในส่วนขั้นตอนการจับยึดโดยการนำวิธีการหาสมการของระนาบ และการเปลี่ยนแปลงแบบหมุนโดยมีขั้นตอนคือ

2.1) คำนวณหาสมการพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานด้วยสมการ (ก.3) และเวกเตอร์ตั้งฉากกับพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งด้วยสมการ (ก.4) และมีลักษณะดังรูปที่ ก-1 และสามารถหาสมการของพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานได้คือ $-0.0018X + 0.0030Y - 0.9999Z = 31.6623$ และเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานได้คือ $[-0.0018 \quad 0.0030 \quad -0.9999]$

2.2) ทำการหมุนเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานด้วยสมการ (2.1) โดยมุมที่ใช้ในการหมุนนั้นมีค่า $\theta X = -90.55$ $\theta Y = 89.97$ $\theta Z = -179.43$ ซึ่งมาจากการวัดพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานในขั้นตอนการจับยึด ทำให้มีเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานใหม่คือ $[-0.0012 \quad 0.0030 \quad -0.9999]$ และสมการพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานใหม่คือ $-0.0012X + 0.0030Y - 0.9999Z = 31.5496$

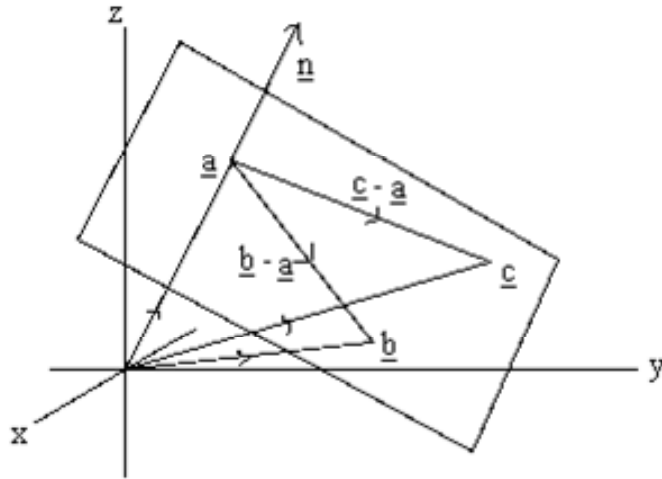
2.4) คำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดจากสมการพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานในทิศทาง Z ในส่วนของขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและขั้นตอนการจับยึด และหาค่าความแตกต่างของความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการตัดดังแสดงในตารางที่ ก-4 เพื่อนำค่าความแตกต่างนี้ไปชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในส่วนชิ้นงานด้านบน ซึ่งเกิดในส่วนขั้นตอนการจับยึด และสามารถสรุปได้ดังตารางที่ ก-5 ซึ่งแสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z กรณีทำการชดเชยความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวด้านล่างชิ้นงานในส่วนขั้นตอนการจับยึด

สมการระนาบ (standard equation of a plane)

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (\text{ก.3})$$

เวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบ

$$\vec{n} = \langle a, b, c \rangle \quad (ก.4)$$



รูปที่ ก-1 ลักษณะเวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบ

ตารางที่ ก-4 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในทิศทาง Z จากสมการผิว
ด้านล่างซึ่งงานในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและในขั้นตอนการจับยึด

Order	Deviation position along z axis (mm) in bottom plane		
	Locating	Locating & clamping	Difference (locating & clamping)
1	32.4740	32.4626	1.1376E-02
2	32.4444	32.4312	1.3237E-02
3	32.4149	32.3998	1.5098E-02
4	32.3854	32.3684	1.6959E-02
5	32.3558	32.3370	1.8820E-02
6	32.3263	32.3056	2.0681E-02
7	32.2968	32.2742	2.2542E-02
8	32.2672	32.2428	2.4403E-02
9	32.2377	32.2114	2.6264E-02
10	32.2081	32.1800	2.8125E-02
11	32.1786	32.1486	2.9986E-02
12	32.1491	32.1172	3.1848E-02
13	32.1195	32.0858	3.3709E-02
14	32.0900	32.0544	3.5570E-02
15	32.0604	32.0230	3.7431E-02
16	32.0309	31.9916	3.9292E-02
17	32.0014	31.9602	4.1153E-02
18	31.9718	31.9288	4.3014E-02
19	31.9423	31.8974	4.4875E-02
20	31.9128	31.8660	4.6736E-02

ตารางที่ ก-5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนพื้นผิวชิ้นงานในทิศทาง Z จาก
การชดเชยความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดในส่วนพื้นผิวชิ้นงานด้านล่าง

Order	Nominal position (mm)	Deviation position along z axis (mm)		Difference (Experimental & Analytical)	Difference (Experimental & Analytical)
		Experimental	Analytical	Direction data (mm)	Magnitude data (mm)
1	82.7300	82.5183	82.5226	4.2756E-03	4.2756E-03
2	82.7300	82.4916	82.4972	5.5357E-03	5.5357E-03
3	82.7300	82.4581	82.4649	6.8091E-03	6.8091E-03
4	82.7300	82.4248	82.4328	8.0735E-03	8.0735E-03
5	82.7300	82.3974	82.4068	9.3402E-03	9.3402E-03
6	82.7300	82.3630	82.3736	1.0607E-02	1.0607E-02
7	82.7300	82.3250	82.3369	1.1874E-02	1.1874E-02
8	82.7300	82.2945	82.3076	1.3140E-02	1.3140E-02
9	82.7300	82.2653	82.2797	1.4407E-02	1.4407E-02
10	82.7300	82.2345	82.2502	1.5674E-02	1.5674E-02
11	82.7300	82.2017	82.2186	1.6940E-02	1.6940E-02
12	82.7300	82.1660	82.1843	1.8207E-02	1.8207E-02
13	82.7300	82.1381	82.1576	1.9474E-02	1.9474E-02
14	82.7300	82.1077	82.1284	2.0741E-02	2.0741E-02
15	82.7300	82.0781	82.1001	2.2007E-02	2.2007E-02
16	82.7300	82.0468	82.0701	2.3274E-02	2.3274E-02
17	82.7300	82.0137	82.0382	2.4541E-02	2.4541E-02
18	82.7300	81.9847	82.0105	2.5807E-02	2.5807E-02
19	82.7300	81.9449	81.9719	2.7074E-02	2.7074E-02
20	82.7300	81.9168	81.9452	2.8341E-02	2.8341E-02
			AVG	1.6307E-02	1.6307E-02
			SE	1.6757E-03	1.6757E-03

2. การประยุกต์ใช้การทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดบนชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์โดยกระบวนการทางคณิตศาสตร์

2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด

จากการตรวจสอบความถูกต้อง และพบว่าการทำนายด้วยการจำลองแบบสามารถใช้แทนการทดลองได้ ผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่ส่งผลกระทบต่อความผิดพลาดในการตัดชิ้นงาน (แสดงในหัวข้อ 4.2.1) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนตำแหน่งการตัดตามเส้นทางในทิศทาง X Y และ Z (แสดงในรูปที่ 4-9) ด้วยวิธีทางสถิติซึ่งประกอบด้วยการคำนวณหาค่าเฉลี่ย จากสมการ (ก.1) และการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error :SE) จากสมการ (ก.2) โดยนำจำนวนข้อมูลมาอย่างละ 41 ข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดได้เป็น 2 ส่วนคือ 1. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งดังแสดงในตารางที่ ก-6 2. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึดดังแสดงในตารางที่ ก-6

ตารางที่ ก-5 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางที่เกิดจากความผิดพลาด
ในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่ง

Locating procedure													
Order	Actual machined line (mm)			Nominal machined line (mm)			Difference (nominal & actual) Direction data (mm)			Difference (nominal & actual) Magnitude data (mm)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
1	200.0549	0.1932	50.1408	200.0000	0.0000	50.0000	0.0549	0.1932	0.1408	0.0549	0.1932	0.1408	
2	200.0527	5.1932	50.1411	200.0000	5.0000	50.0000	0.0527	0.1932	0.1411	0.0527	0.1932	0.1411	
3	200.0506	10.1932	50.1415	200.0000	10.0000	50.0000	0.0506	0.1932	0.1415	0.0506	0.1932	0.1415	
4	200.0485	15.1932	50.1418	200.0000	15.0000	50.0000	0.0485	0.1932	0.1418	0.0485	0.1932	0.1418	
5	200.0463	20.1932	50.1422	200.0000	20.0000	50.0000	0.0463	0.1932	0.1422	0.0463	0.1932	0.1422	
6	200.0442	25.1932	50.1425	200.0000	25.0000	50.0000	0.0442	0.1932	0.1425	0.0442	0.1932	0.1425	
7	200.0420	30.1932	50.1429	200.0000	30.0000	50.0000	0.0420	0.1932	0.1429	0.0420	0.1932	0.1429	
8	200.0399	35.1932	50.1433	200.0000	35.0000	50.0000	0.0399	0.1932	0.1433	0.0399	0.1932	0.1433	
9	200.0377	40.1932	50.1436	200.0000	40.0000	50.0000	0.0377	0.1932	0.1436	0.0377	0.1932	0.1436	
10	200.0356	45.1932	50.1440	200.0000	45.0000	50.0000	0.0356	0.1932	0.1440	0.0356	0.1932	0.1440	
11	200.0335	50.1932	50.1443	200.0000	50.0000	50.0000	0.0335	0.1932	0.1443	0.0335	0.1932	0.1443	
12	200.0313	55.1932	50.1447	200.0000	55.0000	50.0000	0.0313	0.1932	0.1447	0.0313	0.1932	0.1447	
13	200.0292	60.1932	50.1450	200.0000	60.0000	50.0000	0.0292	0.1932	0.1450	0.0292	0.1932	0.1450	
14	200.0270	65.1932	50.1454	200.0000	65.0000	50.0000	0.0270	0.1932	0.1454	0.0270	0.1932	0.1454	
15	200.0249	70.1932	50.1457	200.0000	70.0000	50.0000	0.0249	0.1932	0.1457	0.0249	0.1932	0.1457	
16	200.0227	75.1932	50.1461	200.0000	75.0000	50.0000	0.0227	0.1932	0.1461	0.0227	0.1932	0.1461	
17	200.0206	80.1932	50.1465	200.0000	80.0000	50.0000	0.0206	0.1932	0.1465	0.0206	0.1932	0.1465	
18	200.0185	85.1932	50.1468	200.0000	85.0000	50.0000	0.0185	0.1932	0.1468	0.0185	0.1932	0.1468	
19	200.0163	90.1932	50.1472	200.0000	90.0000	50.0000	0.0163	0.1932	0.1472	0.0163	0.1932	0.1472	
20	200.0142	95.1932	50.1475	200.0000	95.0000	50.0000	0.0142	0.1932	0.1475	0.0142	0.1932	0.1475	
21	200.0120	100.1932	50.1479	200.0000	100.0000	50.0000	0.0120	0.1932	0.1479	0.0120	0.1932	0.1479	
22	200.0099	105.1932	50.1482	200.0000	105.0000	50.0000	0.0099	0.1932	0.1482	0.0099	0.1932	0.1482	
23	200.0077	110.1932	50.1486	200.0000	110.0000	50.0000	0.0077	0.1932	0.1486	0.0077	0.1932	0.1486	
24	200.0056	115.1932	50.1490	200.0000	115.0000	50.0000	0.0056	0.1932	0.1490	0.0056	0.1932	0.1490	
25	200.0035	120.1932	50.1493	200.0000	120.0000	50.0000	0.0035	0.1932	0.1493	0.0035	0.1932	0.1493	
26	200.0013	125.1932	50.1497	200.0000	125.0000	50.0000	0.0013	0.1932	0.1497	0.0013	0.1932	0.1497	
27	199.9992	130.1932	50.1500	200.0000	130.0000	50.0000	-0.0008	0.1932	0.1500	0.0008	0.1932	0.1500	
28	199.9970	135.1932	50.1504	200.0000	135.0000	50.0000	-0.0030	0.1932	0.1504	0.0030	0.1932	0.1504	
29	199.9949	140.1932	50.1507	200.0000	140.0000	50.0000	-0.0051	0.1932	0.1507	0.0051	0.1932	0.1507	
30	199.9927	145.1932	50.1511	200.0000	145.0000	50.0000	-0.0073	0.1932	0.1511	0.0073	0.1932	0.1511	
31	199.9906	150.1932	50.1514	200.0000	150.0000	50.0000	-0.0094	0.1932	0.1514	0.0094	0.1932	0.1514	
32	199.9885	155.1932	50.1518	200.0000	155.0000	50.0000	-0.0115	0.1932	0.1518	0.0115	0.1932	0.1518	
33	199.9863	160.1932	50.1522	200.0000	160.0000	50.0000	-0.0137	0.1932	0.1522	0.0137	0.1932	0.1522	
34	199.9842	165.1932	50.1525	200.0000	165.0000	50.0000	-0.0158	0.1932	0.1525	0.0158	0.1932	0.1525	
35	199.9820	170.1932	50.1529	200.0000	170.0000	50.0000	-0.0180	0.1932	0.1529	0.0180	0.1932	0.1529	
36	199.9799	175.1932	50.1532	200.0000	175.0000	50.0000	-0.0201	0.1932	0.1532	0.0201	0.1932	0.1532	
37	199.9777	180.1932	50.1536	200.0000	180.0000	50.0000	-0.0223	0.1932	0.1536	0.0223	0.1932	0.1536	
38	199.9756	185.1932	50.1539	200.0000	185.0000	50.0000	-0.0244	0.1932	0.1539	0.0244	0.1932	0.1539	
39	199.9735	190.1932	50.1543	200.0000	190.0000	50.0000	-0.0265	0.1932	0.1543	0.0265	0.1932	0.1543	
40	199.9713	195.1932	50.1547	200.0000	195.0000	50.0000	-0.0287	0.1932	0.1547	0.0287	0.1932	0.1547	
41	199.9692	200.1932	50.1550	200.0000	200.0000	50.0000	-0.0308	0.1932	0.1550	0.0308	0.1932	0.1550	
							AVG	0.01192	0.19320	0.14790	0.02333	0.19320	0.14790
							SE	0.00280	0.00000	0.00047	0.00168	0.00000	0.00047

ตารางที่ ก-6 แสดงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดตามเส้นทางที่เกิดจากความผิดพลาด
ในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด

Locating & Clamping procedure

Order	Actual machined line (mm)			Nominal machined line (mm)			Difference (nominal & actual) Direction data (mm)			Difference (nominal & actual) Magnitude data (mm)			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
	1	200.0542	0.1927	50.1406	200.0000	0.0000	50.0000	0.0542	0.1927	0.1406	0.0542	0.1927	0.1406
2	200.0521	5.1927	50.1406	200.0000	5.0000	50.0000	0.0521	0.1927	0.1406	0.0521	0.1927	0.1406	
3	200.0501	10.1927	50.1408	200.0000	10.0000	50.0000	0.0501	0.1927	0.1408	0.0501	0.1927	0.1408	
4	200.0482	15.1927	50.1409	200.0000	15.0000	50.0000	0.0482	0.1927	0.1409	0.0482	0.1927	0.1409	
5	200.0461	20.1927	50.1410	200.0000	20.0000	50.0000	0.0461	0.1927	0.1410	0.0461	0.1927	0.1410	
6	200.0441	25.1927	50.1411	200.0000	25.0000	50.0000	0.0441	0.1927	0.1411	0.0441	0.1927	0.1411	
7	200.0420	30.1927	50.1413	200.0000	30.0000	50.0000	0.0420	0.1927	0.1413	0.0420	0.1927	0.1413	
8	200.0400	35.1927	50.1415	200.0000	35.0000	50.0000	0.0400	0.1927	0.1415	0.0400	0.1927	0.1415	
9	200.0379	40.1927	50.1415	200.0000	40.0000	50.0000	0.0379	0.1927	0.1415	0.0379	0.1927	0.1415	
10	200.0359	45.1927	50.1417	200.0000	45.0000	50.0000	0.0359	0.1927	0.1417	0.0359	0.1927	0.1417	
11	200.0339	50.1927	50.1418	200.0000	50.0000	50.0000	0.0339	0.1927	0.1418	0.0339	0.1927	0.1418	
12	200.0318	55.1927	50.1419	200.0000	55.0000	50.0000	0.0318	0.1927	0.1419	0.0318	0.1927	0.1419	
13	200.0298	60.1927	50.1420	200.0000	60.0000	50.0000	0.0298	0.1927	0.1420	0.0298	0.1927	0.1420	
14	200.0277	65.1927	50.1422	200.0000	65.0000	50.0000	0.0277	0.1927	0.1422	0.0277	0.1927	0.1422	
15	200.0257	70.1927	50.1423	200.0000	70.0000	50.0000	0.0257	0.1927	0.1423	0.0257	0.1927	0.1423	
16	200.0236	75.1927	50.1424	200.0000	75.0000	50.0000	0.0236	0.1927	0.1424	0.0236	0.1927	0.1424	
17	200.0216	80.1927	50.1426	200.0000	80.0000	50.0000	0.0216	0.1927	0.1426	0.0216	0.1927	0.1426	
18	200.0196	85.1927	50.1427	200.0000	85.0000	50.0000	0.0196	0.1927	0.1427	0.0196	0.1927	0.1427	
19	200.0175	90.1927	50.1429	200.0000	90.0000	50.0000	0.0175	0.1927	0.1429	0.0175	0.1927	0.1429	
20	200.0155	95.1927	50.1430	200.0000	95.0000	50.0000	0.0155	0.1927	0.1430	0.0155	0.1927	0.1430	
21	200.0134	100.1927	50.1432	200.0000	100.0000	50.0000	0.0134	0.1927	0.1432	0.0134	0.1927	0.1432	
22	200.0115	105.1927	50.1433	200.0000	105.0000	50.0000	0.0115	0.1927	0.1433	0.0115	0.1927	0.1433	
23	200.0094	110.1927	50.1435	200.0000	110.0000	50.0000	0.0094	0.1927	0.1435	0.0094	0.1927	0.1435	
24	200.0074	115.1927	50.1437	200.0000	115.0000	50.0000	0.0074	0.1927	0.1437	0.0074	0.1927	0.1437	
25	200.0054	120.1927	50.1438	200.0000	120.0000	50.0000	0.0054	0.1927	0.1438	0.0054	0.1927	0.1438	
26	200.0033	125.1927	50.1440	200.0000	125.0000	50.0000	0.0033	0.1927	0.1440	0.0033	0.1927	0.1440	
27	200.0013	130.1927	50.1441	200.0000	130.0000	50.0000	0.0013	0.1927	0.1441	0.0013	0.1927	0.1441	
28	199.9992	135.1927	50.1443	200.0000	135.0000	50.0000	-0.0008	0.1927	0.1443	0.0008	0.1927	0.1443	
29	199.9972	140.1926	50.1444	200.0000	140.0000	50.0000	-0.0028	0.1926	0.1444	0.0028	0.1926	0.1444	
30	199.9951	145.1926	50.1447	200.0000	145.0000	50.0000	-0.0049	0.1926	0.1447	0.0049	0.1926	0.1447	
31	199.9931	150.1926	50.1448	200.0000	150.0000	50.0000	-0.0069	0.1926	0.1448	0.0069	0.1926	0.1448	
32	199.9911	155.1926	50.1450	200.0000	155.0000	50.0000	-0.0089	0.1926	0.1450	0.0089	0.1926	0.1450	
33	199.9890	160.1926	50.1453	200.0000	160.0000	50.0000	-0.0110	0.1926	0.1453	0.0110	0.1926	0.1453	
34	199.9870	165.1926	50.1454	200.0000	165.0000	50.0000	-0.0130	0.1926	0.1454	0.0130	0.1926	0.1454	
35	199.9850	170.1926	50.1456	200.0000	170.0000	50.0000	-0.0150	0.1926	0.1456	0.0150	0.1926	0.1456	
36	199.9830	175.1926	50.1458	200.0000	175.0000	50.0000	-0.0170	0.1926	0.1458	0.0170	0.1926	0.1458	
37	199.9809	180.1926	50.1460	200.0000	180.0000	50.0000	-0.0191	0.1926	0.1460	0.0191	0.1926	0.1460	
38	199.9789	185.1926	50.1461	200.0000	185.0000	50.0000	-0.0211	0.1926	0.1461	0.0211	0.1926	0.1461	
39	199.9769	190.1926	50.1463	200.0000	190.0000	50.0000	-0.0231	0.1926	0.1463	0.0231	0.1926	0.1463	
40	199.9748	195.1926	50.1466	200.0000	195.0000	50.0000	-0.0252	0.1926	0.1466	0.0252	0.1926	0.1466	
41	199.9728	200.1926	50.1467	200.0000	200.0000	50.0000	-0.0272	0.1467	0.1467	0.0272	0.1467	0.1467	
							AVG	0.0134	0.1915	0.1434	0.0228	0.1915	0.1434
							SE	0.0027	0.0008	0.0002	0.0017	0.0008	0.0002

2.2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัด

จากการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดพื้นผิวที่จะทำการตัดบนชิ้นงานตัวอย่างตามรายละเอียดในรูปที่ 4-13 เพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัด (แสดงในหัวข้อ 4.2.2) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนแบบการขนานกันของพื้นผิว เปรียบเทียบกับกับระนาบอ้างอิง A (ระนาบ X-Y) และระนาบอ้างอิง B (ระนาบ Y-Z) อยู่ในช่วงขอบเขต 0.10 มิลลิเมตร (แสดงในรูปที่ 4-13) ด้วยวิธีทางสถิติซึ่งประกอบด้วยการคำนวณหาค่าเฉลี่ย จากสมการ (ก.1) และการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation :SD) จากสมการ (ก.5) โดยนำจำนวนข้อมูลมาอย่างละ 41 ข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ ซึ่งสามารถสรุปผลการทำนายความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดตามเส้นทางเดินใบมีดดังแสดงในตารางที่ ก-7

สมการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} \quad (\text{ก.5})$$

เมื่อ X_i : ข้อมูลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด ($i = 1, 2, 3, \dots, N$)

\bar{X} : ค่าเฉลี่ยของข้อมูลทั้งหมด

N : จำนวนชุดข้อมูลที่ทำกรวิเคราะห์ ($N = 41$)

ตารางที่ ก-7 แสดงความคลาดเคลื่อนของพื้นผิวที่ถูกตัดตามเส้นทางเดินไปมิตที่เกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการกำหนดตำแหน่งและการจับยึด

Tool path

Actual machined line (mm)			Nominal machined line (mm)			Difference (nominal & actual) Direction data (mm)			Difference (nominal & actual) Magnitude data (mm)		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
135.0542	0.1663	40.1134	135.0000	0.0000	40.0000	0.0542	0.1663	0.1134	0.0542	0.1663	0.1134
135.0522	5.1663	40.1136	135.0000	5.0000	40.0000	0.0522	0.1663	0.1136	0.0522	0.1663	0.1136
135.0501	10.1663	40.1137	135.0000	10.0000	40.0000	0.0501	0.1663	0.1137	0.0501	0.1663	0.1137
135.0481	15.1663	40.1139	135.0000	15.0000	40.0000	0.0481	0.1663	0.1139	0.0481	0.1663	0.1139
135.0460	20.1663	40.1139	135.0000	20.0000	40.0000	0.0460	0.1663	0.1139	0.0460	0.1663	0.1139
135.0441	25.1663	40.1141	135.0000	25.0000	40.0000	0.0441	0.1663	0.1141	0.0441	0.1663	0.1141
135.0420	30.1663	40.1142	135.0000	30.0000	40.0000	0.0420	0.1663	0.1142	0.0420	0.1663	0.1142
135.0400	35.1663	40.1144	135.0000	35.0000	40.0000	0.0400	0.1663	0.1144	0.0400	0.1663	0.1144
135.0380	40.1663	40.1144	135.0000	40.0000	40.0000	0.0380	0.1663	0.1144	0.0380	0.1663	0.1144
135.0359	45.1663	40.1146	135.0000	45.0000	40.0000	0.0359	0.1663	0.1146	0.0359	0.1663	0.1146
135.0339	50.1663	40.1148	135.0000	50.0000	40.0000	0.0339	0.1663	0.1148	0.0339	0.1663	0.1148
135.0318	55.1663	40.1148	135.0000	55.0000	40.0000	0.0318	0.1663	0.1148	0.0318	0.1663	0.1148
135.0298	60.1663	40.1150	135.0000	60.0000	40.0000	0.0298	0.1663	0.1150	0.0298	0.1663	0.1150
135.0277	65.1663	40.1151	135.0000	65.0000	40.0000	0.0277	0.1663	0.1151	0.0277	0.1663	0.1151
135.0257	70.1663	40.1152	135.0000	70.0000	40.0000	0.0257	0.1663	0.1152	0.0257	0.1663	0.1152
135.0237	75.1663	40.1153	135.0000	75.0000	40.0000	0.0237	0.1663	0.1153	0.0237	0.1663	0.1153
135.0216	80.1663	40.1155	135.0000	80.0000	40.0000	0.0216	0.1663	0.1155	0.0216	0.1663	0.1155
135.0196	85.1663	40.1156	135.0000	85.0000	40.0000	0.0196	0.1663	0.1156	0.0196	0.1663	0.1156
135.0175	90.1663	40.1157	135.0000	90.0000	40.0000	0.0175	0.1663	0.1157	0.0175	0.1663	0.1157
135.0155	95.1663	40.1159	135.0000	95.0000	40.0000	0.0155	0.1663	0.1159	0.0155	0.1663	0.1159
135.0134	100.1663	40.1159	135.0000	100.0000	40.0000	0.0134	0.1663	0.1159	0.0134	0.1663	0.1159
135.0115	105.1663	40.1161	135.0000	105.0000	40.0000	0.0115	0.1663	0.1161	0.0115	0.1663	0.1161
135.0095	110.1663	40.1162	135.0000	110.0000	40.0000	0.0095	0.1663	0.1162	0.0095	0.1663	0.1162
135.0074	115.1663	40.1163	135.0000	115.0000	40.0000	0.0074	0.1663	0.1163	0.0074	0.1663	0.1163
135.0054	120.1663	40.1164	135.0000	120.0000	40.0000	0.0054	0.1663	0.1164	0.0054	0.1663	0.1164
135.0033	125.1663	40.1165	135.0000	125.0000	40.0000	0.0033	0.1663	0.1165	0.0033	0.1663	0.1165
135.0013	130.1662	40.1164	135.0000	130.0000	40.0000	0.0013	0.1662	0.1164	0.0013	0.1662	0.1164
134.9992	135.1662	40.1161	135.0000	135.0000	40.0000	-0.0008	0.1662	0.1161	0.0008	0.1662	0.1161
134.9972	140.1663	40.1162	135.0000	140.0000	40.0000	-0.0028	0.1663	0.1162	0.0028	0.1663	0.1162
134.9952	145.1663	40.1169	135.0000	145.0000	40.0000	-0.0048	0.1663	0.1169	0.0048	0.1663	0.1169
134.9931	150.1663	40.1173	135.0000	150.0000	40.0000	-0.0069	0.1663	0.1173	0.0069	0.1663	0.1173
134.9911	155.1663	40.1175	135.0000	155.0000	40.0000	-0.0089	0.1663	0.1175	0.0089	0.1663	0.1175
134.9890	160.1663	40.1177	135.0000	160.0000	40.0000	-0.0110	0.1663	0.1177	0.0110	0.1663	0.1177
134.9870	165.1663	40.1180	135.0000	165.0000	40.0000	-0.0130	0.1663	0.1180	0.0130	0.1663	0.1180
134.9849	170.1663	40.1181	135.0000	170.0000	40.0000	-0.0151	0.1663	0.1181	0.0151	0.1663	0.1181
134.9829	175.1663	40.1184	135.0000	175.0000	40.0000	-0.0171	0.1663	0.1184	0.0171	0.1663	0.1184
134.9810	180.1663	40.1185	135.0000	180.0000	40.0000	-0.0190	0.1663	0.1185	0.0190	0.1663	0.1185
134.9789	185.1663	40.1187	135.0000	185.0000	40.0000	-0.0211	0.1663	0.1187	0.0211	0.1663	0.1187
134.9769	190.1663	40.1188	135.0000	190.0000	40.0000	-0.0231	0.1663	0.1188	0.0231	0.1663	0.1188
134.9748	195.1662	40.1191	135.0000	195.0000	40.0000	-0.0252	0.1662	0.1191	0.0252	0.1662	0.1191
134.9728	200.1663	40.1192	135.0000	200.0000	40.0000	-0.0272	0.1662	0.1192	0.0272	0.1662	0.1192
AVG						0.01339	0.16627	0.11605	0.02279	0.16627	0.11605
SD						0.02396	0.00002	0.00162	0.01515	0.00002	0.00162

ภาคผนวก ข

การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด
โดยใช้โปรแกรมทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ **MSC Marc**

1. การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัดที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการจับยึดชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC Marc

ผู้วิจัยได้สร้างโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการจับยึดชิ้นงาน โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีลักษณะงานวิเคราะห์เป็นการศึกษาการเสีรูปร่างของชิ้นงาน (workpiec) ซึ่งเกิดจากการสัมผัสกันระหว่างที่งานกับฟิกซ์เจอร์ (fixture) โดยมีแรงกระทำตรงตำแหน่งตัวจับยึด (clamp)

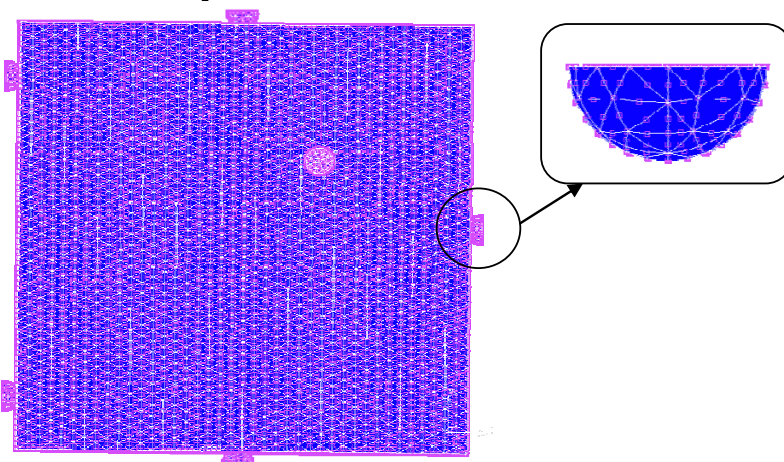
และสามารถแบ่งขั้นตอนการคำนวณได้ดังนี้ คือ

ขั้นตอนที่ 1. mesh generation

เป็นการสร้างแบบจำลองลักษณะการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ซึ่งสามารถแบ่งส่วนประกอบของการสร้างแบบจำลองออกเป็น

ชิ้นงาน สร้างชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมตัน ขนาด 200 x 200 x 50 มิลลิเมตร แบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral) โดยแต่ละเอลิเมนต์ของชิ้นงานมีขนาดประมาณ 5 x 5 x 5 ลูกบาศก์มิลลิเมตรและมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 123,508 เอลิเมนต์

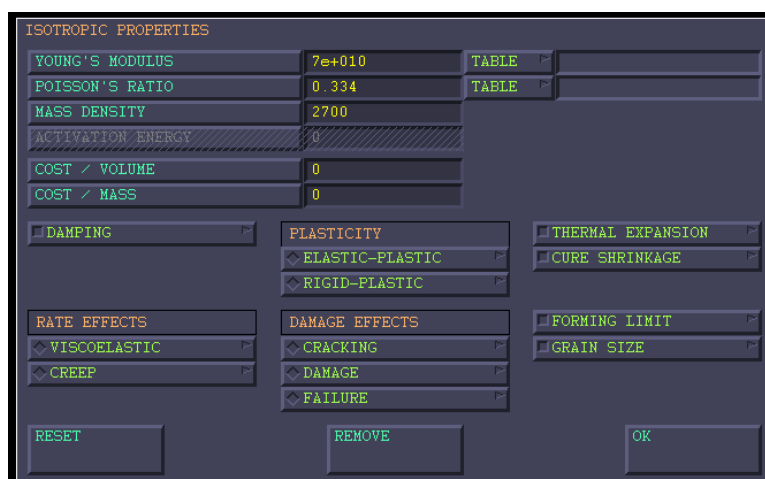
ฟิกซ์เจอร์ สร้างฟิกซ์เจอร์มีลักษณะเป็นทรงกลม ขนาดรัศมี 5 มิลลิเมตร สร้างครึ่งทรงกลม สร้างทั้งหมด 9 ชิ้นส่วนสัมผัสกับชิ้นงานในตำแหน่งต่างๆ ดังตาราง โดยแบ่งเป็นตัวกำหนดตำแหน่งชิ้นงาน 6 ตำแหน่ง และตัวจับยึดชิ้นงาน 3 ตำแหน่ง แบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (tetrahedral) โดยแต่ละเอลิเมนต์ของชิ้นงานมีขนาดประมาณ 1 x 1 x 1 ลูกบาศก์มิลลิเมตรและมีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 2,115 (1 ตัวกำหนดตำแหน่งหรือตัวจับยึดมีเอลิเมนต์เท่ากับ 235 เอลิเมนต์) ดังรูปที่ ข-1



รูปที่ ข-1 แบบจำลองลักษณะการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์โดยการแบ่งเอลิเมนต์

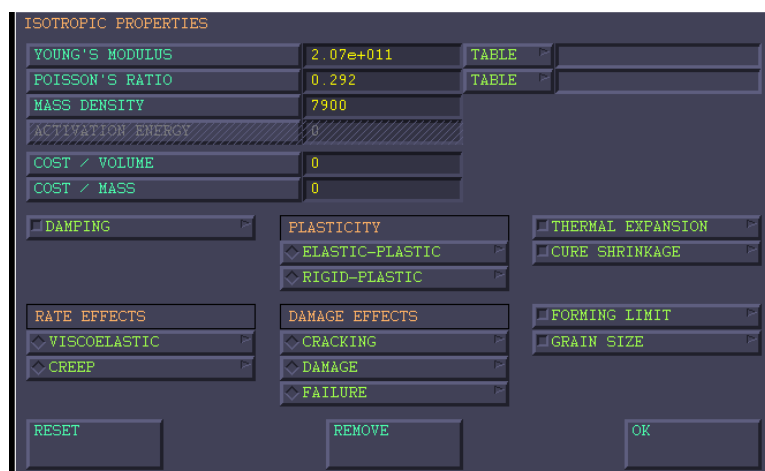
ขั้นตอนที่ 2. material properties

เป็นการกำหนดคุณสมบัติของชิ้นงานและฟิกซ์เจอร์ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นชิ้นงาน เลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียม AI 6061-T6 โดยมีการกำหนดสมบัติทางกลเป็นชนิด isotropic ซึ่งมีค่างมอดูลัส (young's modulus) เท่ากับ 70 GPa อัตราส่วนปัวซอง (poisson ratio) เท่ากับ 0.334 และค่าความหนาแน่นของวัสดุ (mass density) เท่ากับ 2700 kg / m³ ดังรูปที่ ข-2



รูปที่ ข-2 การกำหนดคุณสมบัติชิ้นงาน

ฟิกซ์เจอร์ เลือกใช้วัสดุเหล็ก AISI 1144 โดยมีการกำหนดสมบัติทางกลเป็นชนิด isotropic ซึ่งมีค่างมอดูลัส (young's modulus) เท่ากับ 207 GPa อัตราส่วนปัวซอง (poisson ratio) เท่ากับ 0.292 และค่าความหนาแน่นของวัสดุ (mass density) เท่ากับ 7900 kg / m³ ดังรูปที่ ข-3



รูปที่ ข-3 การกำหนดคุณสมบัติตัวจับยึด

ขั้นตอนที่ 3. geometric properties

เป็นการกำหนดคุณสมบัติทางเรขาคณิตของชิ้นงานและฟิกซ์เจอร์ซึ่งมีสมบัติเป็นของแข็งและลักษณะของเอลิเมนต์เป็นแบบสามมิติ (solid) ดังรูป ข-4



รูปที่ ข-4 การกำหนดคุณสมบัติทางเรขาคณิตของชิ้นงานและฟิกซ์เจอร์

ขั้นตอนที่ 4. contact

เป็นการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ โดยขั้นแรกจะต้องมีการสร้างไฟล์สำหรับชิ้นส่วนที่ทำการสัมผัส (contact bodies) ได้แก่ชิ้นงาน ตัวกำหนดตำแหน่ง และตัวจับยึดชิ้นงาน ซึ่งมีการกำหนดเป็นสมบัติการเสีรูปร่าง (deformable) ดังรูป ข-5



รูปที่ ข-5 การสร้างไฟล์และสมบัติงานที่ใช้สัมผัส

หลังจากนั้นกำหนดลักษณะการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ในตารางการสัมผัส (contact table) โดยกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานกับฟิกซ์เจอร์ที่สัมผัสกันเป็นแบบการแตะกัน (touching) และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.3 ดังรูป ข-6

CONTACT TABLE PROPERTIES			SECOND						
FIRST	BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3	4	5	6	7
	1 workpiece	deformable	T	T	T	T	T	T	T
	2 clamp1	deformable	T						
	3 clamp2	deformable	T						
	4 clamp3	deformable	T						
	5 primary	deformable	T						
	6 secondary	deformable	T						
	7 tertiary	deformable	T						

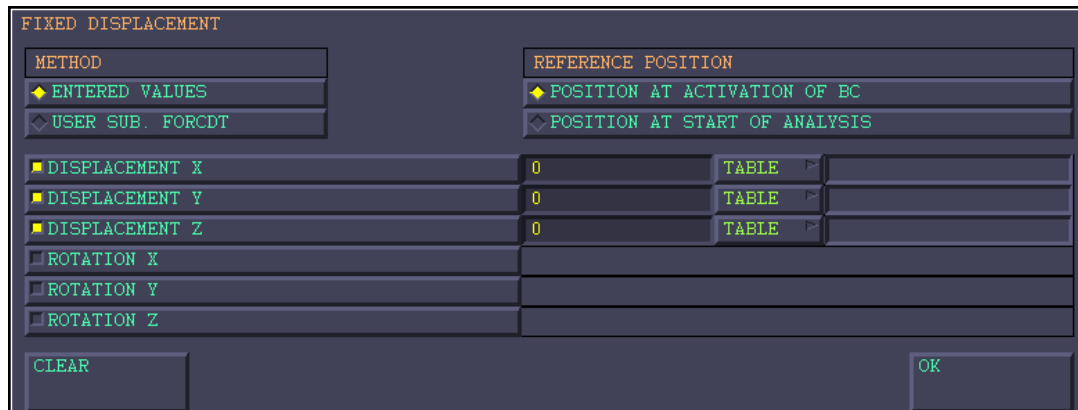
CONTACT TABLE ENTRY PROPERTIES	
FIRST BODY	workpiece deformable
SECOND BODY	clamp1 deformable
CONTACT TYPE	TOUCHING
CONTACT DETECTION METHOD	AUTOMATIC
MODES IN CONTACT	RETAIN GAPS OVERLAPS
SHELL TO SHELL CONTACT	CARRY MOMENT
AT INITIAL CONTACT	PROJECT STRESS-FREE
AT SHARP CORNERS	DELAY SLIDE OFF
AUTOMATIC TOLERANCE	SET 0
DISTANCE TOLERANCE	0
BIAS FACTOR	0
NEAR CONTACT	DISTANCE 0
MECHANICAL PROPERTIES	
SEPARATION THRESHOLD	0
INTERFERENCE CLOSURE	0
FRICTION COEFFICIENT	0.3 TABLE
FRICTION STRESS LIMIT	1e+020 TABLE
HARD-SOFT RATIO	2
RESET	OK

รูปที่ ข-6 การกำหนดความสัมพันธ์ของการสัมผัสกันระหว่างฟิกซ์เจอร์กับชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 5. Boundary Conditions

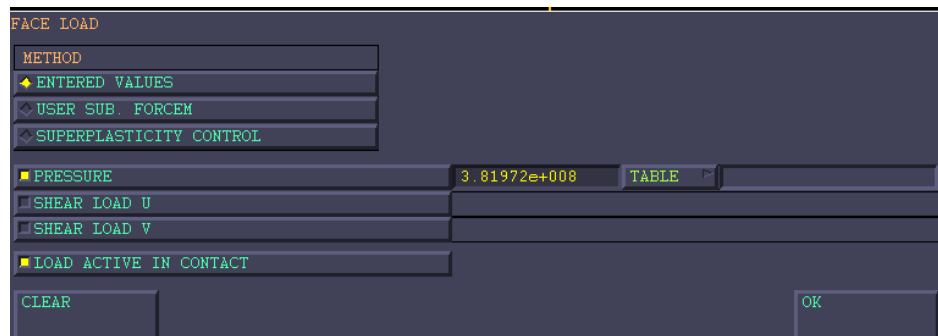
เป็นการกำหนดเงื่อนไขลักษณะการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ โดยแบ่งการกำหนดเงื่อนไขเป็น

ตัวกำหนดตำแหน่ง กำหนดเงื่อนไขให้ตัวกำหนดตำแหน่งอยู่กับที่ โดยเลือก fixture displacement และ displacement x y และ z เท่ากับศูนย์ซึ่งเปรียบเสมือนการยึดตัวกำหนดตำแหน่งให้อยู่กับที่ ดังรูป ข-7



รูปที่ ข-7 การกำหนดเงื่อนไขของตัวกำหนดตำแหน่ง

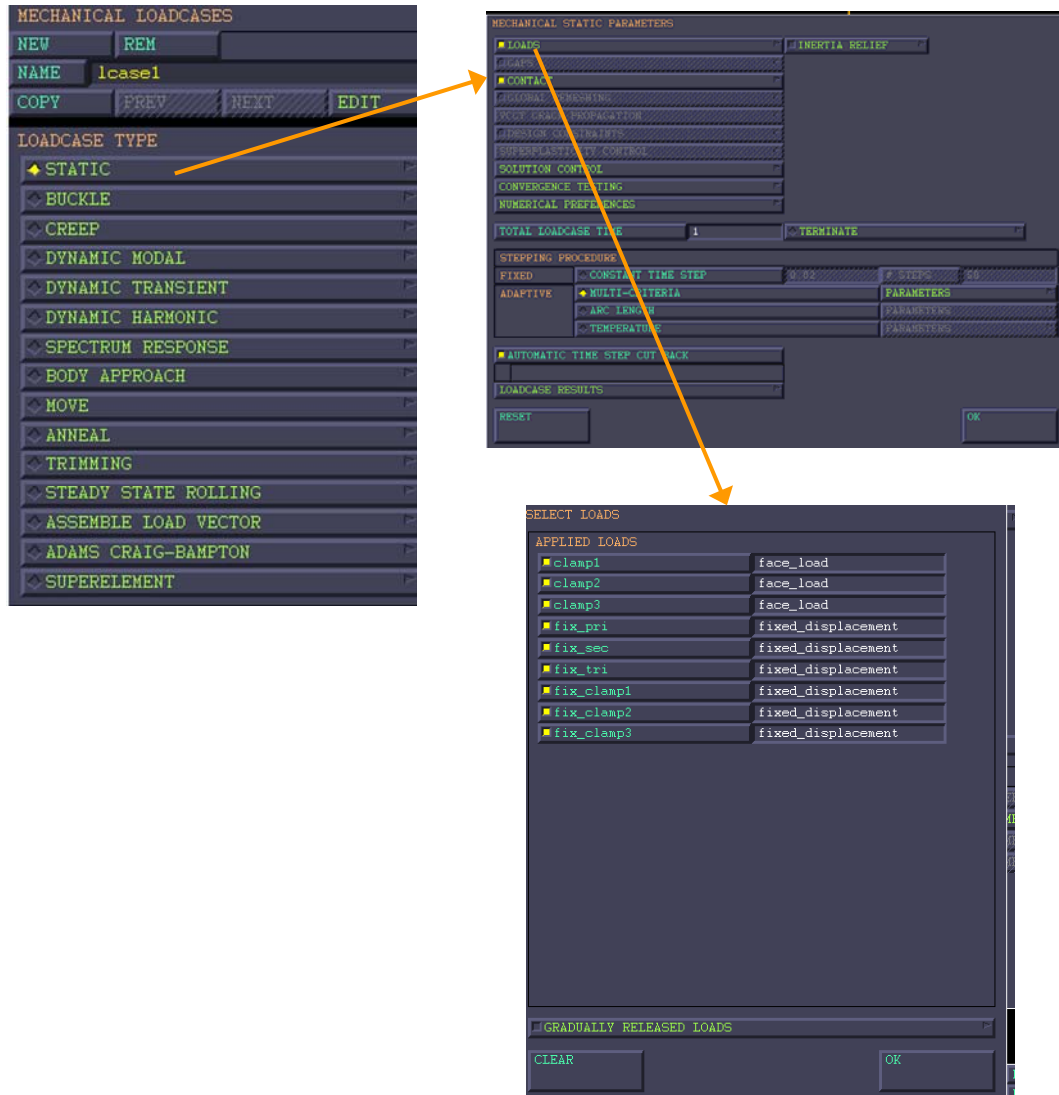
ตัวจับยึด กำหนดเงื่อนไขให้มีแรงดันกระทำ ซึ่งแรงที่กระทำของตัวจับยึดแต่ละตัวจะมีแรงและทิศทางตั้งฉากกับชิ้นงาน ยกตัวอย่างเช่นตัวจับยึดตัวที่ 1 กระทำในแนวแกน z ฉะนั้นจะต้องกำหนดทิศทาง x และ y ให้อยู่กับที่ดังรูป ข-8



รูปที่ ข-8 การกำหนดเงื่อนไขของตัวจับยึดชิ้นงานตัวที่ 1

ขั้นตอนที่ 6. load cases mechanical / static และ jobs new / mechanical

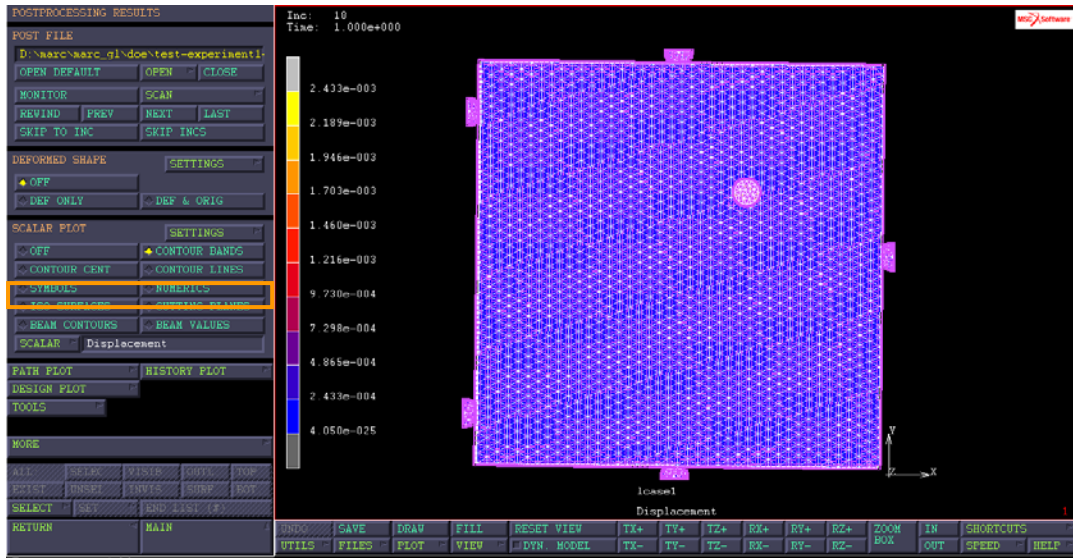
เป็นการกำหนดลักษณะการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งเป็นวิเคราะห์ที่อยู่ในสถานะสถิต เลือกเงื่อนไขที่ให้สอดคล้องกับการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์ และเลือกการวิเคราะห์เป็นแบบสามมิติ ดังรูป ข-9



รูปที่ ข-9 การกำหนดลักษณะการวิเคราะห์ชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 7. results

จากการวิเคราะห์ สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ชิ้นงานได้ตามที่ได้กำหนดเงื่อนไขโดยสามารถเลือกชนิดของผลที่แสดงได้ตาม scalar และผลที่ออกมาสารทเก็บค่าแต่ละจุดได้ ดังรูปที่ ข-10 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานที่ทำการจับยึดอยู่ในรูปของ contour

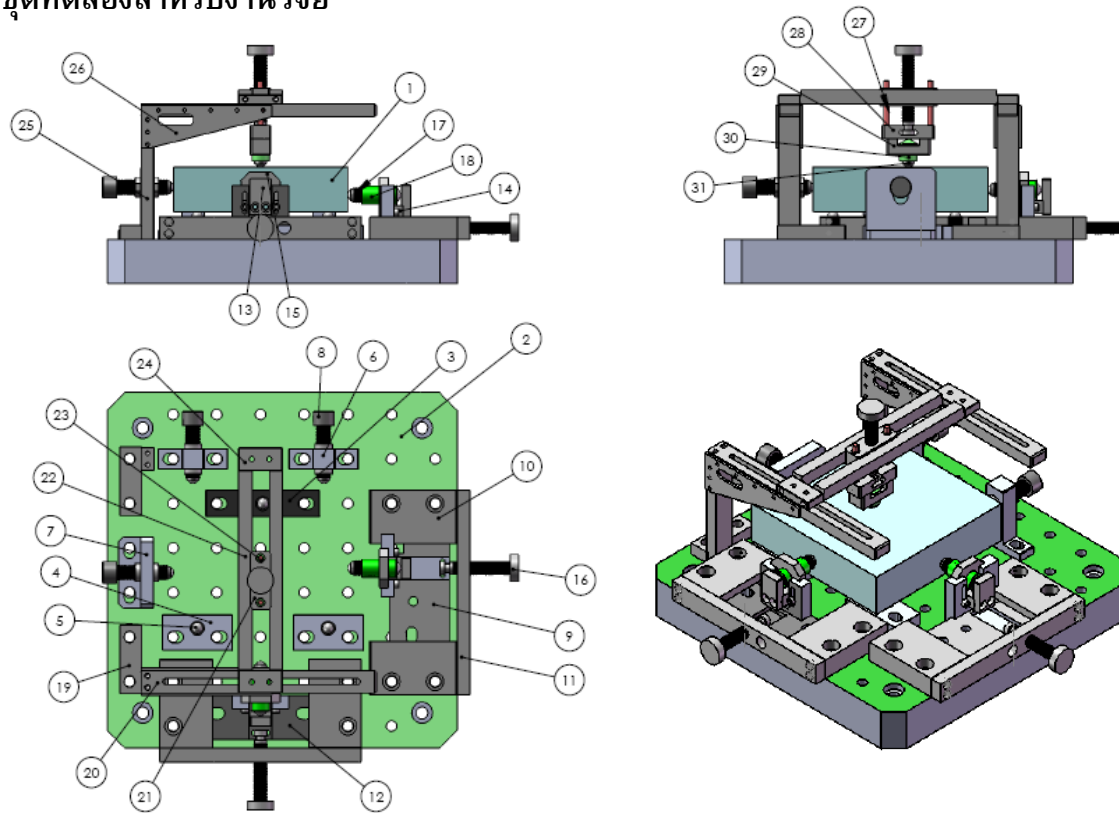


รูปที่ ข-10 ผลการวิเคราะห์ชิ้นงาน

ภาคผนวก ค

แบบของส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับงานวิจัย
และการสร้างชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดแรงที่กระทำกับชิ้นงาน

1. แบบของส่วนประกอบชุดทดลองสำหรับงานวิจัย



รูปที่ ค-1 แบบของส่วนประกอบชุดทดลองการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์

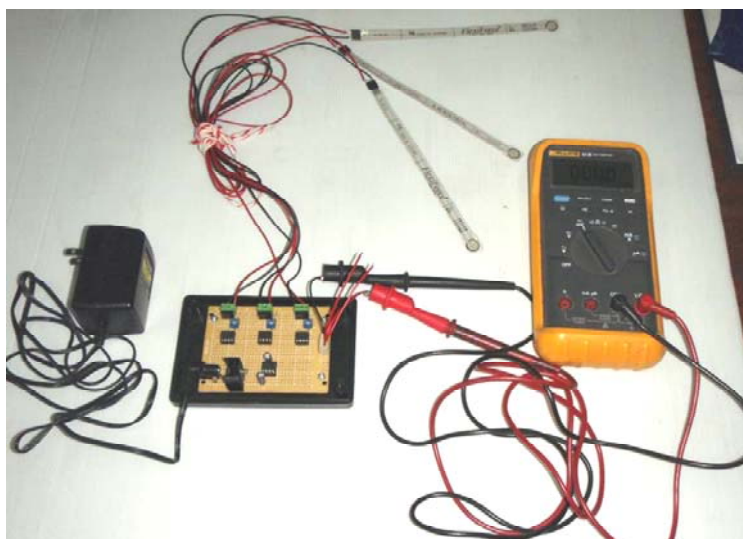
ITEM NO	DESCRIPTION	PART NUMBER	QUANTITY
1	WORKPIECE	ALUMINIUM	1
2	BASE PLATE	M/C BASE PLATE ; BPO5-50400-0400-12	1
3	BASE SUPPORT-PIN1	DRAWING DESIGN 1	1
4	BASE SUPPORT-PIN2,3	DRAWING DESIGN 2	2
5	PIN SCREW-LOCATOR1,2,3	SWIVEL CLAMPING SCREW :PT16A-1625	3
6	BASE SUPPORT-PIN4,5	DRAWING DESIGN 3	2
7	BASE SUPPORT-PIN6	DRAWING DESIGN 4	1
8	PIN SCREW-LOCATOR4,5,6	SWIVEL SHOULDER CLAMPING SCREW :PT17A-1665	3
9	BASE SUPPORT-CLMP1,3	DRAWING DESIGN 5	1
10	SLIDE_A	DRAWING DESIGN 6	4
11	SLIDE_B	DRAWING DESIGN 7	2
12	BASE SUPPORT-CLMP2	DRAWING DESIGN 8	1
13	SUB_SENSOR_A	DRAWING DESIGN 9	2
14	SUB_SENSOR_B	DRAWING DESIGN 10	2
15	SLIDE_C	DRAWING DESIGN 11	2
16	ADJUST	DRAWING DESIGN 12	3
17	PIN SCREW-CLAMP2,3	SWIVEL SHOULDER CLAMPING SCREW :PT17A-1665	2
18	BUSH_D20	DRAWING DESIGN 13	2
19	STAN_A	DRAWING DESIGN 14	2
20	STAN_C	DRAWING DESIGN 15	2
21	TOP_PLATE_C	DRAWING DESIGN 16	1
22	TOP_PLATE_B	DRAWING DESIGN 17	2
23	BUSH_D10	DRAWING DESIGN 18	2
24	TOP_PLATE_A	DRAWING DESIGN 19	2
25	STAN_B	DRAWING DESIGN 20	2
26	RIB	DRAWING DESIGN 21	4
27	SHAFT	DRAWING DESIGN 22	2
28	TOP_PLATE_D	DRAWING DESIGN 23	1
29	TOP_PLATE_E	DRAWING DESIGN 24	1
30	BUSH_D16	DRAWING DESIGN 25	1
31	PIN SCREW-CLAMP1	SWIVEL CLAMPING SCREW :PT16A-1635	1

รูปที่ ค-2 ตารางแสดงรายละเอียดของส่วนประกอบชุดทดลองการจับยึดชิ้นงานด้วยฟิกซ์เจอร์

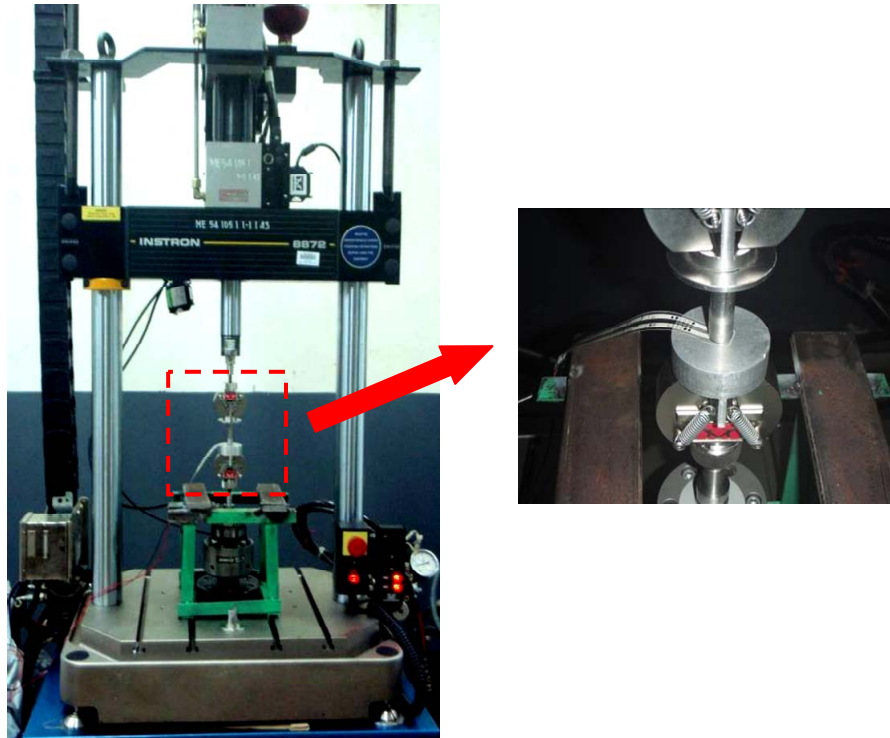
2. การสร้างชุดเซ็นเซอร์สำหรับวัดแรงที่กระทำกับชิ้นงาน

ในการออกแบบชุดเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานตามลักษณะวงจรตามหัวข้อ 3.3.4 ดังแสดงในรูปที่ 3-21 นั้นผู้วิจัยได้สร้างชุดเซ็นเซอร์ดังแสดงในรูปที่ ค-3 นอกจากนี้ก่อนที่ผู้วิจัยจะนำชุดเซ็นเซอร์วัดแรงนี้มาใช้งานนั้น ผู้วิจัยจะต้องทำการสอบเทียบชุดเซ็นเซอร์กับเครื่องสำหรับการทดสอบแบบไดนามิกและความล้า (general purpose fatigue testing machine) ดังแสดงในรูปที่ ค-4 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซ็นเซอร์กับแรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จากโวลต์มิเตอร์ ซึ่งมีวิธีการคือ 1. นำตัวเซ็นเซอร์วางบนแท่นของโหลดเซลล์ (load cell) ซึ่งมีหน้าที่อ่านแรงที่กระทำกับเซ็นเซอร์ 2. ติดยึดอุปกรณ์ต้องการทดลองบนตัวเซ็นเซอร์เข้ากับเครื่องทดสอบ 3. ใส่แรงที่กระทำกับเซ็นเซอร์

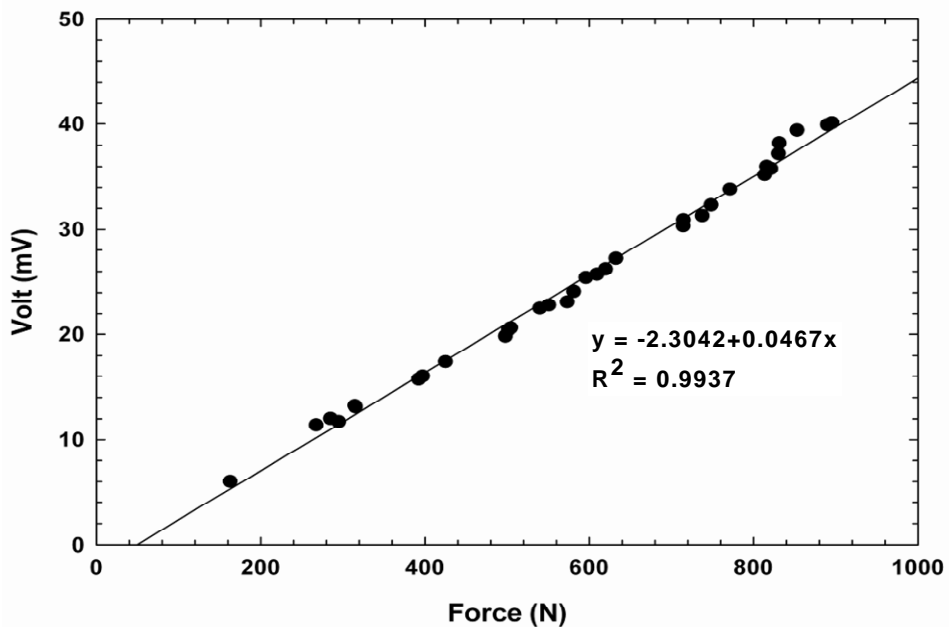
เป็นแบบแรงอัด (compression load) 4. จุดบันทึกข้อมูลของแรงที่อ่านค่าได้จากเครื่องทดสอบ และแรงดันไฟฟ้าที่อ่านค่าได้จากโวลต์มิเตอร์ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบน เซ็นเซอร์กับแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์แต่ละตัว ผลจากการสอบเทียบชุดเซ็นเซอร์และตัว สามารถแสดงสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซ็นเซอร์กับแรงดันไฟฟ้าอยู่ในรูปของ ความสัมพันธ์เชิงเส้น โดยค่าในแนวแกน X คือค่าแรงกระทำกับเซ็นเซอร์ที่อ่านค่าได้จากเครื่อง ทดสอบแบบไดนามิกและความล้มและค่าในแนวแกน Y คือค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่อ่านได้จาก โวลต์มิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ค-5 เซ็นเซอร์สำหรับควบคุมแรงของตัวจับยึดตัวที่ 1 มีสมการ ความสัมพันธ์ $Y = -2.3042 + 0.0467X$ รูปที่ ค-6 เซ็นเซอร์สำหรับควบคุมแรงของตัวจับยึดตัว ที่ 2 มีสมการความสัมพันธ์ $Y = -5.8010 + 0.0692X$ และรูปที่ ค-7 เซ็นเซอร์สำหรับควบคุมแรง ของตัวจับยึดตัวที่ 3 มีสมการความสัมพันธ์ $Y = -2.4645 + 0.0446X$



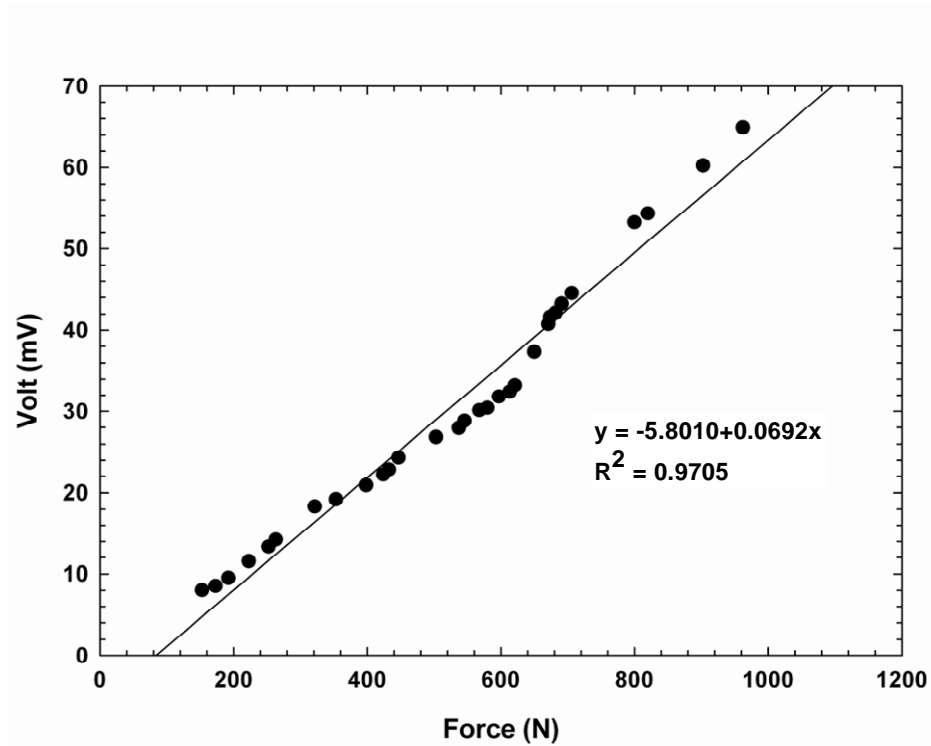
รูปที่ ค-3 ลักษณะชุดเซ็นเซอร์วัดแรงที่ทำการสร้าง



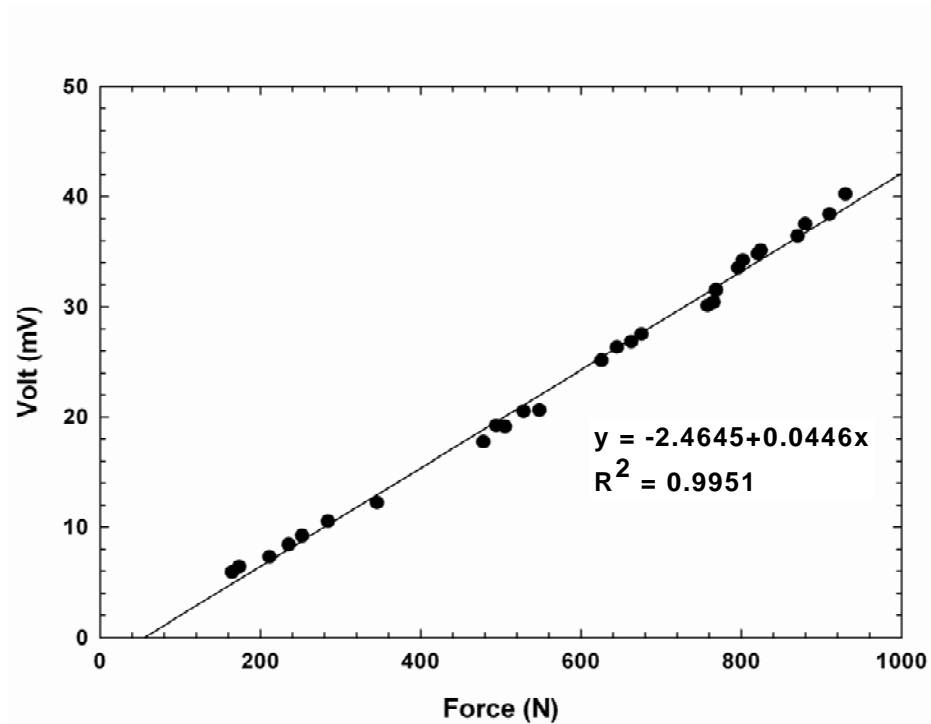
รูปที่ ค-4 เครื่องสำหรับการทดสอบแบบไดนามิกและความล้า
(general purpose fatigue testing machine)



รูปที่ ค-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซ็นเซอร์
กับแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ค-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซ็นเซอร์
กับแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวที่ 2



รูปที่ ค-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนเซ็นเซอร์
กับแรงดันไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตัวที่ 3

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์

**การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของการตัดที่เป็นผลจาก
ความผิดพลาดของการจับยึดชิ้นงานในขั้นตอนก่อนกระบวนการผลิต**
**Determination of machined features geometrical deviation as a result of
workpiece locating errors prior to machining**

กุลภัทร์ ทองแก้ว^{1*} สุภาพรณ ไชยประพัทธ์¹ และเจริญยุทธ เดชชวยกุล²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

E-mail: kullapatt@hotmail.com*

บทคัดย่อ

ในขั้นตอนก่อนเริ่มกระบวนการผลิต ชิ้นงานถูกจัดวางบนตัวรองรับชิ้นงานหรือฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ซึ่งประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่ง (Locator) และตัวจับชิ้นงาน (Clamp) เพื่อให้มันเฝ้าก่อนเริ่มต้นกระบวนการผลิต ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง และถูกจับยึดมั่นคงเพียงพอที่จะไม่สั่นไหวในระหว่างการผลิต เมื่อไรก็ตามที่ชิ้นงานที่ถูกจัดวางบนฟิกซ์เจอร์เกิดการเบี่ยงเบน จะส่งผลให้ตำแหน่งการตัดผิดพลาดไปด้วย ความผิดพลาดของการตัดชิ้นงานมีสองลักษณะคือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด (Positional deviation) และความคลาดเคลื่อนของทิศทางการตัด (Orientation deviation) สาเหตุของความผิดพลาดในการตัดชิ้นงานอาจเกิดได้จากหลายปัจจัยด้วยกันเช่น การทำงานของผู้ปฏิบัติงาน การเสื่อมสภาพของเครื่องจักร อุปกรณ์ต่าง ๆ หรือแม้แต่ลักษณะชิ้นงานเอง เป็นต้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่ง และการจัดวางชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนในการตัดชิ้นงาน ทั้งความคลาดเคลื่อนในแง่ของตำแหน่งและทิศทางในการตัดชิ้นงาน โดยใช้กระบวนการเจาะเป็นกรณีศึกษา ด้วยการใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ทำนายความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางในการ

เจาะชิ้นงาน ปรับเปลี่ยนตำแหน่ง และทิศทางการตัดของใบมีดได้เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแม่นยำ และเป็นแนวทางในการกำหนดระยะพิทัดเผื่อชิ้นงานในกระบวนการผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

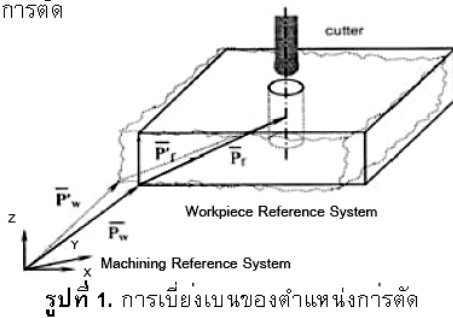
คำสำคัญ ความเบี่ยงเบนตำแหน่งชิ้นงาน (Workpiece displacement); ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการตัด (Positional deviation); ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการตัด (Orientation deviation)

1. บทนำ

ถึงแม้ว่าการผลิตชิ้นงานในอุตสาหกรรมหลัก เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ หรืออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์จะใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ที่มีความถูกต้องและความเที่ยงตรงสูง แต่ความผิดพลาดในกระบวนการผลิตยังเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก สาเหตุของความผิดพลาดอาจมาจากหลายปัจจัยด้วยกันเช่น ผู้ปฏิบัติงาน (Operator) กระบวนการทำงาน (Method) เครื่องจักรอุปกรณ์ (Machine) และชิ้นงาน (Workpiece) สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นปัญหาที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานทั้งสิ้น

ในขั้นตอนก่อนเริ่มกระบวนการผลิต ชิ้นงานถูกจัดวางบนตัวรองรับชิ้นงานหรือฟิกซ์เจอร์ (Fixture) ซึ่งประกอบด้วยตัวกำหนดตำแหน่ง (Locator) และตัวจับ

ชิ้นงาน (Clamp) เพื่อให้มั่นใจว่าก่อนเริ่มต้นกระบวนการผลิตชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง และถูกจับยึดอย่างมั่นคงเพียงพอที่จะไม่เกิดการสั่นไหวในระหว่างการผลิต ในขณะที่การประเมินความถูกต้องของตำแหน่งการเจาะ ชิ้นงานถูกกระทำอ้างอิงกับระบบพิกัดของชิ้นงาน (Workpiece Reference System) แต่การควบคุมใบมีดให้เคลื่อนที่นั้นจะอ้างอิงกับระบบพิกัดของเครื่องจักร (Machine Reference System) ดังนั้นเมื่อไรก็ตามที่ตำแหน่งของชิ้นงานที่ถูกจับยึดเบี่ยงเบนไปจากที่ควรจะเป็น จะส่งผลให้ตำแหน่งการตัดผิดพลาดไปด้วย ดังรูปที่ 1 ความผิดพลาด (Locating Errors) นี้ส่งผลกระทบต่อทั้งความถูกต้องของขนาดและรูปร่างฟีกเจอร์ (Feature) ที่ทำการตัด



รูปที่ 1. การเบี่ยงเบนของตำแหน่งการตัด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนในการตัดชิ้นงาน โดยใช้กระบวนการเจาะเป็นกรณีศึกษา หากสามารถประเมินผลกระทบที่ส่งผลต่อตำแหน่งการเจาะชิ้นงานได้ จะเป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตเพื่อลดความผิดพลาด [1,2] นอกจากนี้ผลจากการศึกษายังมีประโยชน์ใช้ในการกำหนดค่าระยะพิสัยเพื่อที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานและอุปกรณ์การจับยึดอีกด้วย [3] สิ่งเหล่านี้จะส่งผลต่อโรงงานที่ทำการผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูง ทั้งในด้านของการลดจำนวนชิ้นงานเสียที่เกิดขึ้นจากการผลิตทำให้ลดต้นทุนในการจัดซื้อวัสดุ ลดเวลาที่เกิดจากการผลิตชิ้นงานเสีย และเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานได้อีกด้วย

2. กระบวนการเจาะชิ้นงาน

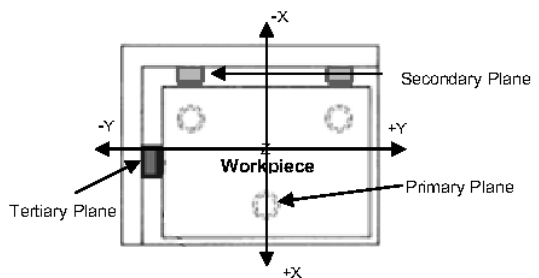
งานเจาะ (Drilling) เป็นวิธีการเจาะรูบนชิ้นงาน โดยใช้เครื่องมือกลหรือเครื่องจักรกลที่เรียกว่า เครื่องเจาะ

(Drilling Machine) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จับดอกสว่านหมุน เจียนกัดชิ้นงานออกตามขนาดที่ต้องการ ในการผลิตชิ้นงานให้มีความถูกต้องสูง นอกจากจะต้องให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพของเครื่องเจาะแล้ว การกำหนดตำแหน่งและจับยึดชิ้นงานด้วยฟีกเจอร์ก็มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน

2.1 หลักการทำงานของฟีกเจอร์

ฟีกเจอร์ คือ อุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการจับยึดชิ้นงาน โดยจับชิ้นงานให้ติดแน่นอยู่กับโครงสร้างลำตัวฟีกเจอร์เพื่อทำให้ชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการและไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการสั่นไหวระหว่างกระบวนการผลิต ฟีกเจอร์จะประกอบด้วย ตัวกำหนดตำแหน่ง (Locators) และตัวจับยึด (Clamp)

ตัวอย่างในงานวิจัยนี้เป็นชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมตัน (Prismatic) ดังนั้นจึงเลือกวิธีการกำหนดตำแหน่งแบบ 3-2-1 ซึ่งมีตัวกำหนดตำแหน่งทั้งหมด 6 ตัว สามารถจำกัดระดับความเป็นอิสระได้ 9 ทิศทาง โดยในการวางชิ้นงานบนฟีกเจอร์นั้น เริ่มต้นด้วยการวางชิ้นงานบน Primary Datum Plane ซึ่งมีตัวกำหนดอยู่ 3 ตำแหน่ง สามารถจำกัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงานได้ 5 ทิศทาง ต่อจากนั้น จะต้องทำการดันชิ้นงานให้ไปสัมผัสกับ Secondary Datum Plane ซึ่งเป็นระนาบขนานกับระนาบอ้างอิง Y-Z มีตัวกำหนดอยู่ 2 ตำแหน่งสามารถจำกัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงานได้ 3 ทิศทาง และสุดท้ายเลื่อนชิ้นงานไปสัมผัสกับ Tertiary Datum Plane ซึ่งเป็นระนาบขนานกับระนาบอ้างอิง X-Z มีตัวกำหนดอยู่ 1 ตำแหน่งสามารถจำกัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงานได้ 1 ทิศทาง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. ลักษณะของฟีกเจอร์แบบ 3-2-1 โดยตัวกำหนดตำแหน่งเป็นแบบจุด

2.2 ความคลาดเคลื่อนของการเจาะ

เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงานเป็น

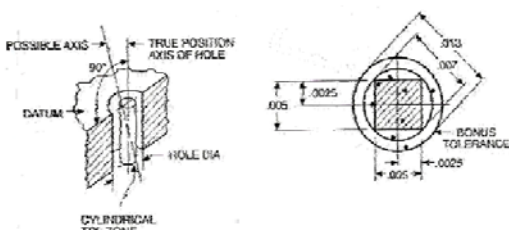
สิ่งที่หลีกเลี่ยงได้ยาก ฉะนั้นเพื่อเป็นการควบคุมความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน จึงต้องมีการกำหนดระยะพิคัดเผื่อ (Tolerancing) ของรูเจาะ ซึ่งมาตรฐานที่ใช้อย่างแพร่หลายในการควบคุมความคลาดเคลื่อนในกระบวนการผลิต คือ ANSI Y14.5M Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T)

GD&T คือ สัญลักษณ์แสดงค่าอธิบายสำหรับการเขียนแบบทางวิศวกรรมและการคำนวณสร้างแบบจำลองสามมิติสำหรับเป็นตัวแทนของรูปร่างชิ้นงานที่ต้องการผลิต GD&T ถูกใช้กำหนดลักษณะส่วนต่างๆ ของชิ้นงาน จนถึงกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของรูปร่างชิ้นงานนั้น GD&T สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ Dimensioning เป็นการกำหนดเฉพาะขนาดชิ้นงานพื้นฐาน ส่วน Tolerancing เป็นการกำหนดเฉพาะค่าความคลาดเคลื่อนของขนาดชิ้นงานที่ยอมรับ การใช้ GD&T มีส่วนช่วยในการผลิตชิ้นงาน เพราะทำให้แน่ใจว่าชิ้นงานที่ผลิตสามารถนำไปใช้ในกระบวนการต่อไปและช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการผลิตชิ้นงานเสียอีกด้วย

ความคลาดเคลื่อนในการเจาะสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะคือ

2.2.1 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง (Positional deviation)

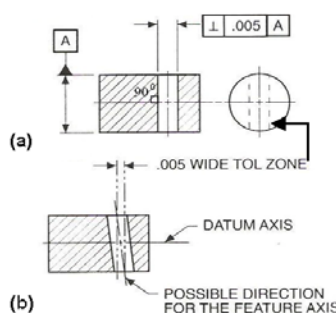
Positional deviation คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน ส่วนใหญ่แล้วในการเจาะชิ้นงานจะมีการกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ (Cylindrical tolerance zone) ซึ่งพิจารณาจากเส้นของแกนเจาะรู ที่อาจเกิดขึ้นได้ (Possible axis) โดยจุดศูนย์กลางของช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนถูกกำหนดจากเส้นแกนรูเจาะที่ออกแบบไว้ (True position axis of hole) ดังรูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการกำหนดช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ (Positional tolerance) ขนาด ± 0.003 มิลลิเมตร



รูปที่ 3. การพิจารณาช่วงความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน [4]

2.2.2 Orientation deviation

Orientation deviation คือ ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน ส่วนใหญ่แล้วในการเจาะชิ้นงานมีการกำหนดช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะที่ยอมรับได้ (Orientation tolerance) ซึ่งหมายถึงการพิจารณาพื้นผิว องค์กรประกอบ และขนาดของชิ้นงานที่สัมพันธ์กับข้อมูลที่อ้างอิง งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงานแนวตั้งฉาก ดังนั้นจึงทำการศึกษาเฉพาะการพิจารณาช่วงความคลาดเคลื่อนของการตั้งฉากของพื้นผิว (Perpendicularity tolerance) ซึ่งเป็นการพิจารณาเกี่ยวกับช่วงระยะห่างระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบที่ตั้งฉากกับระนาบอ้างอิง ซึ่งระนาบและจุดศูนย์กลางระนาบของชิ้นงานจริงต้องตั้งอยู่ระหว่างระนาบขนานกันสองระนาบนั้นด้วย ยกตัวอย่างงานเจาะรูตั้งฉากกับชิ้นงานเทียบกับระนาบอ้างอิง A ที่กำหนดช่วงความคลาดเคลื่อน 0.005 ดังรูปที่ 5 (a) และรูปที่ 4 (b) แสดงทิศทางการเจาะชิ้นงานที่เป็นไปได้ (Possible direction for the feature axis)



รูปที่ 4. การพิจารณาความคลาดเคลื่อนของการตั้งฉากของพื้นผิว [5]

3.การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3.1 สมมติฐานและเงื่อนไข

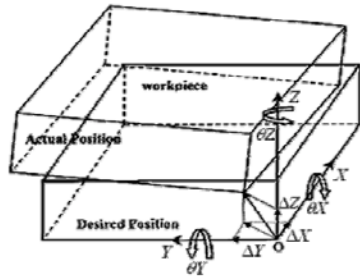
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะชิ้นงาน โดยตั้งสมมติฐาน ชิ้นงานเป็นวัสดุแข็ง ลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยมตัน ขนาด 200 x 200 x 50 มิลลิเมตร

- ความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์สามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]$

โดยที่ ΔX ΔY และ ΔZ คือ ความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงานในแนวแกน X Y และ Z ตามลำดับ

- ความผิดพลาดของการจัดวางชิ้นงานสามารถแสดงได้ด้วยเวกเตอร์ $[OX \ OY \ OZ]$ โดยที่ OX OY และ OZ คือความผิดพลาดของการจัดวางชิ้นงานเทียบกับแกน X Y และ Z ตามลำดับ

วิธีการวิเคราะห์หาความผิดพลาดของตำแหน่งและความผิดพลาดของการจัดวางชิ้นงานที่เกิดจากความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Chaiprapat และ Rujikietgumjorn [5] โดยแสดงลักษณะความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานดังรูปที่ 5

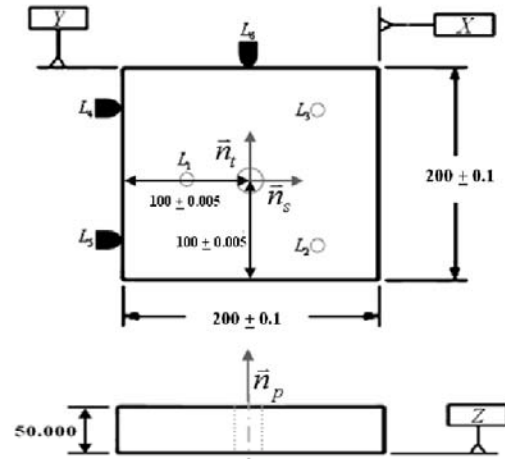


รูปที่ 5. แสดงความผิดพลาดของตำแหน่งและความผิดพลาดของการจัดวางชิ้นงาน

จากหลักการของฟิกซ์เจอร์ในหัวข้อ 2.1 การกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานบนฟิกซ์เจอร์ใช้ระบบระนาบอ้างอิงตั้งฉาก (Orthogonal planes) 3 ระนาบดังนี้

- ระนาบอ้างอิง Primary (ระนาบ X - Y) เมื่อนำชิ้นงานมาวางบนระนาบนี้ทำให้เกิดเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย \vec{n}_p
- ระนาบอ้างอิง Secondary (ระนาบ Y - Z) เมื่อเลื่อนชิ้นงานไปสัมผัสบนระนาบนี้ทำให้เกิดเวกเตอร์ตั้งฉากหนึ่งหน่วย \vec{n}_s
- ระนาบอ้างอิง Tertiary (ระนาบ X - Z) เมื่อเลื่อนชิ้นงานไปสัมผัสบนระนาบนี้ทำให้เกิดเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \vec{n}_t ตั้งฉากอยู่

การเจาะรูชิ้นงานมีลักษณะเป็นทรงกระบอกเจาะทะลุชิ้นงานที่ตำแหน่ง (x, y) ในทิศทางเดียวกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย \vec{n}_p โดยในรูปที่ 6 แสดงลักษณะการกำหนดตำแหน่งและการเจาะรูชิ้นงาน



รูปที่ 6. ลักษณะการกำหนดตำแหน่งและการเจาะรูชิ้นงาน

3.2 สมการผลกระทบความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะรูชิ้นงาน

จากข้อมูลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งชิ้นงานหลังวางลงบนฟิกซ์เจอร์ ผลกระทบความผิดพลาดในการกำหนดตำแหน่งชิ้นงานต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะรูชิ้นงานได้ถูกแบ่งพิจารณาออกเป็นสองส่วน คือ

- ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะรูชิ้นงาน (Positional deviation) ได้ทำการพิจารณาเฉพาะความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะในส่วนพื้นผิวด้านบนของชิ้นงาน โดยรูปที่ 7 (a) แสดงการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของชิ้นงานจากระบบพิกัดอ้างอิงของเครื่องจักร ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการเจาะ ณ ตำแหน่ง H ดังรูปที่ 7 (b)

เมื่อ

\vec{S}, \vec{S}' : ตำแหน่งการเจาะชิ้นงานที่ต้องการและเกิดขึ้นจริง ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดชิ้นงาน $(x' - y')$ ตามลำดับ

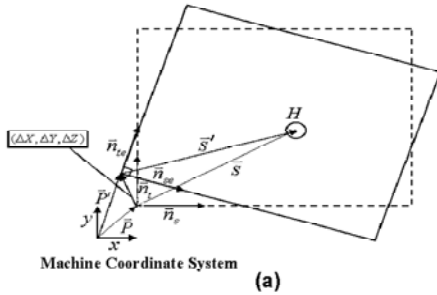
\vec{P}, \vec{P}' : ตำแหน่งชิ้นงานที่ต้องการและเกิดขึ้นจริง ซึ่งอ้างอิงจากระบบพิกัดเครื่องจักร $(x - y)$ ตามลำดับ

$\vec{n}_{sc}, \vec{n}_{te}$: เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับชิ้นงานที่กำหนดตำแหน่งผิดพลาดในระนาบ Secondary และระนาบ Tertiary ตามลำดับ

และสามารถสรุปเป็นสมการความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ (\vec{d}) ได้ คือ

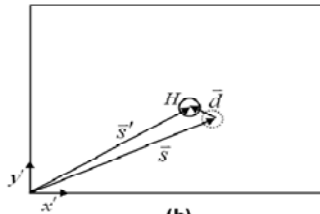
$$|\vec{d}| = |\vec{S}' - \vec{S}| \quad (1)$$

โดย $\vec{S}' = T(\vec{S})$ เมื่อ T : เมตริกซ์การแปลงรูป (Homogeneous transformation matrix) ซึ่งมีตัวแปร $[\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z \ \theta X \ \theta Y \ \theta Z]$



Machine Coordinate System

(a)



(b)

รูปที่ 7. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะชิ้นงาน

- ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน (Orientation deviation) ได้ทำการพิจารณาเฉพาะช่วงระยะความคลาดเคลื่อนการตั้งฉากกับพื้นผิว (Perpendicularity tolerance) ซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างตำแหน่งการเจาะพื้นผิวชิ้นงานด้านบนและด้านล่างโดยเทียบกับระนาบ Primary ดังรูปที่ 8 และสามารถสรุปเป็นสมการ (t) ได้ คือ

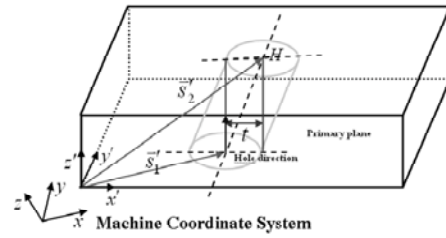
$$t = |P_{xy}(\vec{S}'_2) - \vec{S}'_1| \quad (2)$$

$$\text{โดย } P_{xy} = \begin{bmatrix} 100 \\ 010 \\ 000 \end{bmatrix}$$

เมื่อ

\vec{S}'_1, \vec{S}'_2 : ตำแหน่งการเจาะพื้นผิวด้านล่างและพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจริง ตามลำดับ

P_{xy} : เมตริกซ์การฉายตำแหน่งการเจาะชิ้นงานลงบนระนาบ $x' - y'$ (Orthogonal projection matrix)



Machine Coordinate System

รูปที่ 8. ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะชิ้นงาน

4. ผลการวิเคราะห์

4.1 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน

เมื่อชิ้นงานมีเวกเตอร์ความผิดพลาดของตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงาน $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \theta X, \theta Y, \theta Z)$ เป็นดังตัวอย่างในตารางที่ 1 (a) และ 1 (b) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 (a) แสดงเวกเตอร์ความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงาน

Sample	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
1	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0800	0.0600	0.0500
3	0.0060	0.0026	0.0875
4	-0.0268	0.0927	0.0546
5	0.0936	0.0714	0.0000
6	0.0453	0.1299	0.0590

ตารางที่ 1 (b) แสดงเวกเตอร์ความผิดพลาดของการจัดวางชิ้นงาน

Sample	θX (degree)	θY (degree)	θZ (degree)
1	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000214	-0.000500	0.000250
4	0.000000	-0.000357	-0.000036
5	0.000214	0.000000	0.000000
6	0.000571	-0.000500	-0.000036

จากข้อมูลความผิดพลาดดังในตารางที่ 1 พบว่าหากค่าความผิดพลาดของจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งในแต่ละระนาบมีค่าเท่ากัน ส่งผลให้มีเฉพาะความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงาน แต่ถ้าในแต่ละระนาบนั้นมีความผิดพลาดไม่เท่ากัน จะทำให้เกิดทั้งความผิดพลาดของตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงาน

นอกจากนี้หากผลต่างระหว่างจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับตัวกำหนดตำแหน่งในแต่ละระนาบมาก ส่งผลให้ค่าผิดพลาดของตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงานมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย จากข้อมูลในตารางที่ 1 ยังสามารถนำไปวิเคราะห์ผลความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงานซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ 1. ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะ $|d|$ จากสมการ (1) และ 2. ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะ t จากสมการ (2) เป็นดังผลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงาน

Sample	$ d $ (mm)	t (mm)
1	0.00000	0.00000
2	0.01584	0.00637
3	0.00573	0.00317
4	0.00915	0.01133
5	0.00788	0.01136
6	0.01912	0.01645

จากผลความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและทิศทางการเจาะในตารางที่ 2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะขึ้นอยู่กับความผิดพลาดของตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงาน แต่ความคลาดเคลื่อนของทิศทางการเจาะขึ้นอยู่กับการจัดวางชิ้นงานเท่านั้น นอกจากนี้หากมีการกำหนดช่วงพื้นที่ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการเจาะที่ยอมรับได้ (Positional tolerance) คือ ± 0.005 มิลลิเมตร และกำหนดช่วงความคลาดเคลื่อนการตั้งฉากกับชิ้นงานเทียบกับระนาบ Primary (Perpendicularity tolerance) คือ 0.01 จะพบว่าบางค่าความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงานมีค่าเกินช่วงความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ทั้งสองกรณี ฉะนั้นหากต้องการให้การเจาะชิ้นงานอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ผู้ปฏิบัติงานควรให้ความสำคัญกับความผิดพลาดของการกำหนดตำแหน่งและลักษณะการจัดวางของชิ้นงานบนเครื่องจักร

5. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการประมาณความคลาดเคลื่อนของการเจาะชิ้นงานได้ทั้งในแง่ของตำแหน่งและทิศทางโดยอาศัยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็น

ข้อมูลในการกำหนดลักษณะการจัดวางของชิ้นงานบนเครื่องจักร การออกแบบฟิกซ์เจอร์ และการกำหนดค่าระยะพิคัดเผื่อที่เหมาะสมของชิ้นงานที่นำมาผลิตเพื่อช่วยลดความผิดพลาดของตำแหน่งชิ้นงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต สำหรับงานวิจัยในอนาคตจะเป็นการเปรียบเทียบผลจากการทดลองวัดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจริงกับผลความคลาดเคลื่อนที่วิเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไปแล้วข้างต้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, Y.M. 2002. Tolerance analysis for fixture layout design. *Assembly Automation*, 22:153-162.
- [2] Sanchez, H.T. Estrems, M. and Faura, F. 2006. Analysis and compensation of positional and deformation errors using integrated fixturing analysis in flexible machining parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29: 239-252.
- [3] Kang, Y. Rong, Y. and Yang, J.C. 2003. Computer-aided fixture design verification. part 2. tolerance analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21: 836-841.
- [4] Foster, L.W. 1994. *GEO-METRICS III*. Addison-Wesley: Massachusetts.
- [5] Chaiprapat, S. and Rujikietgumjom, S. 2006. Resultant geometric variation of a fixtured workpiece part I: a simulation. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 28: 181-190.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาวกุลภัสร์ ทองแก้ว	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5110120070	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

1. ทุนศิษย์กัณฑ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
2. ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สัญญาเลขที่ ENG530153S

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

กุลภัสร์ ทองแก้ว, สุภาพรพรรณ ไชยประพัทธ์ และเจริญยุทธ เดชวายุกุล, 2552, “การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตของการเจาะบนชิ้นงานที่ถูกจับยึดด้วยฟิกซ์เจอร์ในขั้นตอนก่อนกระบวนการผลิต”, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม, ขอนแก่น, ประเทศไทย, 21-22 ต.ค. 2552, หน้า 1190-1195.