

## แบบจำลองของการตัดแบบตั้งฉากและแบบเฉียงและการวิเคราะห์ของปัจจัยกรรมวิธี Finite Element Simulations of Orthogonal and Oblique Cutting Processes and Analysis of Process Parameters

ณัฐพล สุกสว่าง<sup>1</sup> และ จีรชัย สุภาสุทธากุล<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>ศูนย์ปฏิบัติการทาง CAD/CAM/CAE, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี วิทยาเขตกำแพงแสน, ตำบลกำแพงแสน  
อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

\*ติดต่อ: fengjcs@kmutt.ac.th, (034) 351897 ต่อ 7205

### บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือเพื่อจะนำเสนอเทคนิคเพื่อจะสร้างแบบจำลองของการตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉียงด้วยซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์และเพื่อจะศึกษาผลของปัจจัยกรรมวิธีของการตัดทั้งสองแบบ ปัจจัยกรรมวิธีที่ถูกศึกษาคือมุมคายและรัศมีคมตัด ในงานวิจัยนี้ ชิ้นงาน AISI 4340 ถูกใช้

ในการสร้างแบบจำลองของการตัด ทฤษฎีของการเปลี่ยนรูปถาวรและทฤษฎีของความเสียหายของ Johnson และ Cook ถูกใช้และถูกพิจารณาและวิธีของการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ถูกอธิบาย ในการศึกษาปัจจัยกรรมวิธีของการตัด ได้แก่ มุมคาย -10, 0, และ 10 องศา และรัศมีคมตัด 0, 0.1, และ 0.2 มิลลิเมตร แรงตัดและความต้านทานการฉีกเพื่อจะพิจารณาว่าค่าหรือขนาดใดผลิตแรงตัดที่ต่ำที่สุด ในงานวิจัย ปัจจัยกรรมวิธีที่ถูกกำหนดให้คงที่คืออัตราเร็วของการตัดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที และระยะลึกของการตัดเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร

งานวิจัยพบว่า การกำหนดค่าของพารามิเตอร์ของวัสดุชิ้นงานมีผลต่อความเสียหายของเอลิเมนต์ของวัสดุชิ้นงาน ในส่วนของการศึกษาปัจจัยกรรมวิธี สำหรับทั้งการตัดแบบตั้งฉากและแบบเฉียง มุมคายที่เป็นบวกผลิตแรงตัดที่ต่ำที่สุด และแรงตัดลดลงเมื่อรัศมีคมตัดลดลง เมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างการตัดแบบตั้งฉากและแบบเฉียง ปัจจัยกรรมวิธีที่เหมือนกัน การตัดแบบเฉียงผลิตแรงตัดที่ต่ำกว่าการตัดแบบตั้งฉาก การพิจารณาปัจจัยกรรมวิธีเหล่านี้จะช่วยเลือกเครื่องมือตัดอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถลดพลังงานที่ถูกใช้ซึ่งเป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานลดลง

**คำหลัก:** การตัดแบบตั้งฉาก, การตัดแบบเฉียง, มุมคาย, รัศมีคมตัด, ทฤษฎีของความเสียหาย

### Abstract

The objective of the work is to present some techniques to create simulations of orthogonal and oblique cutting operations by using the commercial finite element method software, and to study process parameters of both cutting operations. The studied parameters are the rake angles and nose radius.

To make the cutting simulations successfully, the theories of plasticity and failure proposed by Johnson and Cook are used and considered significantly. In addition, the method of defining parameters of the cutting condition is described. In this work, the rake angles of -10, 0, and 10 and the nose radii of 0,

## CST-53

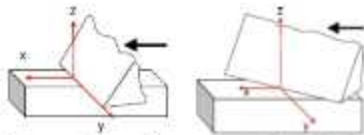
0.1, and 0.2 millimeters are studied and the minimum values of the cutting force and the stresses are analyzed. The cutting speed of 5 meters per second and the depth of cut of 0.5 millimeters are fixed.

The work found that the material parameters have an effect on the failure of the elements while the workpiece is being cut. For the study on the process parameters, the positive rake angle produces the minimum cutting force and the cutting force is lower with the smaller nose radius. When the orthogonal and oblique cutting operations are compared each other, the force generated from the oblique cutting is lower than the force generated from the orthogonal cutting. These information indicate that the proper process parameters help reduce the energy in the cutting or save the production expense.

**Keywords:** Orthogonal Cutting, Oblique Cutting, Rake Angle, Nose Radius, Theory of Failure

### 1. บทนำ

กรรมวิธีตัดสามารถถูกแบ่งออกเป็นหลายประเภท เช่น การกลึง, การกัด, และการเจาะ เป็นต้น แต่ละกรรมวิธีใช้เครื่องมือตัดที่แตกต่างกัน แต่สิ่งที่เหมือนกันคือการใช้หลักการของการตัดเฉือน การตัดเฉือนชิ้นงานถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือการตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉียงดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้ การตัดเฉือนอาจถูกแบ่งออกเป็นการตัดแบบจุดเดียวและการตัดแบบหลายจุด



รูปที่ 1 การตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉียง [1]

โดยทั่วไป การตัดแบบตั้งฉากซึ่งเป็นพื้นฐานของการตัดเฉือนได้ถูกศึกษา จำนวนมากของงานวิจัยได้ศึกษาความเค้น, ความเครียด, ความร้อน, และการก่อตัวของเศษที่เกิดขึ้นขณะตัดเฉือนรวมถึงปัจจัยกรรมวิธี งานของ Morten และ Torben [2] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ของการตัดโดยใช้แบบจำลองแบบ Lagrangian และได้ให้ข้อสรุปว่าโครงสร้างของเอลิเมนต์ (Element Mesh) ที่ละเอียดของชิ้นงานทำให้การสั้นของกาวฟของผลลัพธ์ลดลง, การเพิ่มขึ้นของค่าของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานไม่มีผลอย่างชัดเจนต่อค่า

ของแรง, และการลดลงของค่าที่เกี่ยวกับเกณฑ์ของความเสียหายจะทำให้ค่าของแรงลดลง งานของ Duan และคณะ [3], งานของ Satyanarayana และคณะ [4], และงานของ Eyub [5] ใช้หลักการของการตัดแบบตั้งฉากในการจำลองแบบของการกลึงโดยศึกษาอัตราเร็วของการตัด, มุมคาย, การกระจายตัวของความเครียด, และแรงที่เกิดขึ้น

มีจำนวนเล็กน้อยของงานวิจัยที่สร้างรูปแบบเชิงวิเคราะห์และแบบจำลอง [6] ดังนั้นงานวิจัยนี้ศึกษาการสร้างแบบจำลองของทั้งการตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉียงรวมถึงการวิเคราะห์ผลของปัจจัยกรรมวิธี ได้แก่ มุมคายและรัศมีคมตัด ต่อแรงตัด ในการเริ่มต้น งานวิจัยนี้ดำเนินการตามงานของ Zouhar และ Piska [7] เพื่อแสดงให้เห็นว่าวิธีของการสร้างแบบจำลองรวมถึงการกำหนดพฤติกรรมของวัสดุในงานวิจัยมีความเหมาะสมต่อการแตกหักของเอลิเมนต์ขณะตัด

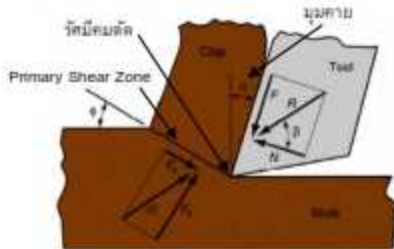
นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของมุมคายและรัศมีคมตัดในการตัดทั้งแบบตั้งฉากและแบบเฉียงต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

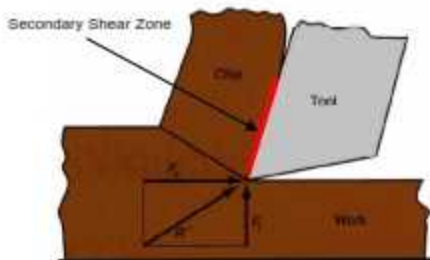
เมื่อพิจารณาหลักของการตัด แรงที่กระทำบนเศษถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือแรงเสียดทาน  $F_t$ , แรงตั้งฉากกับแรงเสียดทาน  $N$ , แรงเฉือน  $F_s$ , และแรงตั้งฉากกับการเฉือน  $F_n$  ดังแสดงในรูปที่ 2

## CST-53

อย่างไรก็ตาม แรงทั้ง 4 ดังกล่าวไม่สามารถถูกวัดค่าออกมาโดยตรง ในการทดลองและแบบจำลอง แรงที่กระทำบนเครื่องมือตัดและสามารถถูกวัดค่าได้มี 2 แรงคือ แรงตัด  $F_c$  และแรงดัน  $F_t$  ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แรงที่กระทำบนเศษในการตัดแบบตั้งฉาก [8]



รูปที่ 3 แรงที่กระทำบนเครื่องมือที่สามารถถูกวัด [8]

### 2.1 วิธีในการสร้างแบบจำลองของการตัดโลหะ

วิธีในการสร้างแบบจำลองของการตัดโลหะที่ถูกใช้มี 3 วิธี คือ Lagrangian, Eulerian, และ Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) [9]

ในวิธี Lagrangian โคจรดาข่ายเอลิเมนต์ถูกกำหนดไปยังชิ้นงานและการไหลตัวที่ไม่ถูกบังคับของเนื้อวัสดุถูกพิจารณา วิธีนี้ส่วนใหญ่ถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองของการตัดเนื่องด้วยความสามารถที่จะทราบรูปทรงของเศษจากสภาวะเริ่มต้นของการตัดไปสู่สภาวะสม่ำเสมอ (Steady State) ของการตัดรูปทรงของเศษมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยกรรมของการตัด, การเปลี่ยนรูปถาวร, และสมบัติของวัสดุชิ้นงาน ดังนั้น ขอบเขตและรูปร่างของเศษไม่ต้องถูกทราบมา

ก่อน ในวิธีนี้ เกณฑ์ของการแยกตัวของเศษต้องถูกกำหนด ซึ่งจะถูกระบุขนาดต่อไป

ในวิธี Eulerian โคจรดาข่ายเอลิเมนต์ถูกกำหนดไปยังแหล่งที่ถูกควบคุมและเนื้อวัสดุไหลผ่านแหล่งนั้น ซึ่งเป็นการกำจัดการบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์ขณะที่มีการตัด ข้อเสียของวิธีนี้คือขอบเขตและรูปร่างของเศษต้องถูกทราบก่อนที่จะทำแบบจำลอง

ลักษณะที่ดีของวิธี Lagrangian และ Eulerian ถูกผสมผสานและถูกเรียกว่า วิธี Arbitrary Lagrangian-Eulerian แนวคิดของวิธีนี้คือ วิธี Eulerian ถูกใช้สำหรับการจำลองพื้นที่รอบส่วนปลายของเครื่องมือตัด ซึ่งการตัดเฉือนเกิดขึ้น ดังนั้นการบิดเบี้ยวที่รุนแรงของเอลิเมนต์ถูกหลีกเลี่ยงโดยไม่มีการใช้การกำหนดใหม่ของโคจรดาข่าย (Remeshing) วิธี Lagrangian ถูกใช้สำหรับการไหลตัวที่ไม่ถูกบังคับของวัสดุที่ขอบเขตอิสระ

### 2.2 สมการของวัสดุชิ้นงาน

หนึ่งในบรรดาหัวข้อที่สำคัญที่สุดในการสร้างแบบจำลองของการตัดคือการจำลองความเค้นไหลตัว (Flow Stress) ของวัสดุชิ้นงานอย่างเหมาะสมเพื่อจะได้รับความที่แท้จริง ความเค้นไหลตัวเป็นความเค้นครากในพริบตา (Instantaneous Yield Stress) และขึ้นอยู่กับความเร็ว, อัตราความเครียด, และอุณหภูมิ ประเภทของความเค้นถูกจัดเป็นพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ ในส่วนของพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปยืดหยุ่นของวัสดุโลหะ กฎของฮุกถูกนำมาใช้

สำหรับพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปถาวร Johnson และ Cook [10] เสนอสมการวัสดุที่อยู่ภายใต้พื้นฐานของการทดสอบของการบิดและการทดสอบทางการเค้นที่ของ Hopkinson ประกอบด้วย การพิจารณาช่วงของอัตราความเครียดและอุณหภูมิ

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_c}{T_m - T_c} \right)^m \right) \quad (1)$$



## CST-53

ซึ่ง  $A, B, C, n$ , และ  $m$  เป็นค่าคงที่ของวัสดุ  $T$  คืออุณหภูมิในพหุภาค  $T$ , คืออุณหภูมิของห้อง  $T_m$  คืออุณหภูมิที่ลอมเหลวของวัสดุ

วงเล็บแรกเป็นเทอมของการเปลี่ยนรูปแบบยืดหยุ่นและแบบถาวรซึ่งแสดง Strain Hardening วงเล็บที่สองเป็นเทอมในลักษณะความเหนียวซึ่งแสดงการเพิ่มขึ้นของความเค้นไหลตัวของวัสดุกับอัตราความเครียดที่สูง วงเล็บสุดท้ายเป็นเทอมของอุณหภูมิ

### 2.3 เกณฑ์ของการแยกตัวของเศษ

ในการวิจัยของการตัดด้วยเครื่องจักร (Machining Operations) เศษโลหะจะเกิดขึ้น ลักษณะของเศษมี 3 ประเภท คือเศษต่อเนื่อง, เศษไม่ต่อเนื่อง, และเศษที่มีลักษณะเป็นข้อปล้อง (Segmented Chip) มี 2 วิธีที่ถูกใช้เพื่อจะจำลองการก่อตัวของเศษ [9] หนึ่งคือกำหนดเกณฑ์ของการแยกตัวของเศษตามเส้นที่ถูกกำหนดก่อนล่วงหน้า และสองคือการแยกตัวของโหนด (Nodes) หรือเอลิเมนต์ซึ่งเป็นไปตามหลักของความเสียหายของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ วิธีที่สองจะถูกกล่าวถึง

เมื่อแผนภาพของความเค้นและความเครียดจากการดึงในแนวแกนของวัสดุชิ้นงานถูกพิจารณาตั้งในรูปที่ 4 จุด A คือการเริ่มต้นของความเสียหาย และเส้น AB คือการวิวัฒนาการของความเสียหาย สองส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญและถูกพิจารณาในซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์

ในการเริ่มต้นของความเสียหาย บางซอฟต์แวร์ไฟไนต์เอลิเมนต์เชิงพาณิชย์ให้คำนิยามของสาเหตุของการเกิดขึ้นเป็น 2 ประเภท หนึ่งเกี่ยวข้องกับสภาวะของการเปลี่ยนเฟสของรูพรุน (Void Nucleation), การเกาะกัน (Coalescence), และการเติบโตของเนื้อวัสดุสองเกี่ยวข้องกับการเกิดขึ้นของแถบความเฉือนเฉพาะแหล่ง (Shear Band Localization) ในงานวิจัยนี้ ประเภทที่สองถูกกล่าวถึงถัดมา

ความเสียหายหรือการแตกหักของเอลิเมนต์หนึ่งสามารถถูกกำหนดโดย [7]

$$D = \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}'} \quad (2)$$

ซึ่ง  $D$  คือตัวแปรของความเสียหาย  $\Delta \bar{\epsilon}$  คือค่าที่เพิ่มของความเครียดถาวรที่เท่าเทียมกัน (Equivalent Plastic Strain) และ  $\bar{\epsilon}'$  คือความเครียดที่เท่าเทียมกันไปสู่การแตกหัก สมการของความเสียหายของ Johnson และ Cook [11] ถูกพิจารณาในงานวิจัยนี้ ซึ่งอยู่ภายใต้พื้นฐานของความเสียหายของการเฉือน (Shear Failure) ความเครียดของการแตกหักถูกให้โดย

$$\bar{\epsilon}' = \left( D_1 + D_2 \exp D_3 \frac{\sigma_m}{\sigma} \right) \left( 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right) \left( 1 - D_5 \left( \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (3)$$

ซึ่ง  $\sigma_m$  คือค่าเฉลี่ยของความเค้นตั้งฉาก 3 ตัว  $\bar{\sigma}$  คือความเค้นที่เท่าเทียมกันของ von Mises

จากสมการที่ (3) เทอมที่หนึ่งเกี่ยวกับความเค้นเทอมที่สองเกี่ยวกับอัตราของความเครียด และเทอมที่สามเกี่ยวกับอุณหภูมิ เนื่องจากสมการของความเสียหายของ Johnson และ Cook กล่าวถึงอัตราของความเครียด ดังนั้นสมการนี้มีความเหมาะสมกับปัญหาที่มีอัตราของความเครียดสูง

ความเค้นในช่วงของการวิวัฒนาการของความเสียหายถูกแสดงดังนี้ [12]

$$\sigma = (1 - D_{overall}) \bar{\sigma} \quad (4)$$

ซึ่ง  $\sigma$  และ  $\bar{\sigma}$  คือ Tensor ของความเค้นที่ถูกคำนวณและความเค้นที่เป็นไปตามสมการของการเปลี่ยนรูปถาวรของวัสดุ  $D_{overall}$  คือตัวแปรของความเสียหายทั้งหมด โดยทั่วไป ค่าเบื้องต้นของ  $D_{overall}$  ถูกกำหนดให้เท่ากับ 1.0 ซึ่งเป็นค่าสูงสุดและเป็นค่าที่เหมาะสมกับปัญหาทางโครงสร้าง ผลที่ตามมาคือเอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องจะถูกลบออกจากการคำนวณเมื่อค่าที่ถูกคำนวณของ  $D_{overall}$  เท่ากับหนึ่ง สิ่งนี้หมายถึงการคำนวณเชิงตัวเลขไม่ยอมให้เอลิเมนต์มีการเสื่อม (Degradation) ในงานวิจัยนี้ ค่าของ  $D_{overall}$  ถูกกำหนดใหม่ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสูงสุด (คือ 1.0) ในที่นี้  $D_{overall}$  เท่ากับ 0.5 ดังนั้นรูปร่างของเอลิเมนต์ที่ถูกทำให้เสื่อม (Degraded) จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหา



## CST-53

0 มม. 0.1 มม. 0.2 มม.  
รูปที่ 5 ลักษณะของปัจจัยกรรมวิธีที่ถูกศึกษา

นอกจากการตรวจสอบแบบจำลอง 2 และ 3 มิติ  
ตั้งในชั้นที่ 2 ชั้นที่ 3 นี้พิจารณาพารามิเตอร์ของ  
พฤติกรรมของวัสดุโดยเปลี่ยนวัสดุจาก AISI 1045  
เป็น AISI 4340 เพื่อตรวจสอบว่าพารามิเตอร์ของ  
พฤติกรรมของวัสดุมีผลต่อการแตกหักของเอลิเมนต์  
ชนิดตัดหรือไม่

การสร้างแบบจำลองในขั้นตอนที่ 3 มีดังนี้

1. ลักษณะทั่วไปของชิ้นงานและการทำงานในการตัด
    - ขนาดของชิ้นงาน : สูง 3.5 มิลลิเมตร กว้าง 1 มิลลิเมตร ยาว 10 มิลลิเมตร
    - ความลึกของการตัดเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร
    - อัตราเร็วของการตัดเท่ากับ 5 เมตรต่อวินาที
    - ชิ้นงานถูกกำหนดให้เป็น Deformable Body
    - เครื่องมือตัดถูกกำหนดให้เป็น Discrete Rigid Body
  2. สมบัติของชิ้นงาน
- ตารางที่ 2 ข้อมูลของวัสดุ AISI 4340 ที่ถูกใช้ใน  
งานวิจัย

ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
Young's Modulus (GPa)	208
Poisson's Ratio	0.3
A (MPa)	1,150
B (Mpa)	739
$n$	0.26
$m$	0
$C$	0
$T_s$	0
$T_m$	0
$D_1$	-0.08
$D_2$	2.1
$D_3$	0.5
$D_4$	0
$D_5$	0

หมายเหตุ พารามิเตอร์ส่วนใหญ่มาจากงานของ  
Sadeghinia และคณะ [13] มีบางพารามิเตอร์ เช่น  
ความหนาแน่น เป็นต้น เป็นค่าทั่วไปของ AISI 4340

3. จากแบบจำลองของ Linear Perturbation ของวัสดุ  
ที่ถูกกล่าวข้างต้น ความถี่ธรรมชาติเท่ากับ 89,458 Hz  
ดังนั้น ค่าของเวลาของการทำงาน (Step Time)  
เท่ากับ 0.000011 วินาที

4. ในการร้องขอข้อมูลจาก สำหรับบางซอฟต์แวร์  
ผลที่เกี่ยวกับความเสียหายของชิ้นงานต้องถูกแสดง  
ออกมาเพื่อให้ภาพของการแสดงผลมีความถูกต้อง  
กล่าวคือเอลิเมนต์ที่บิดเบี้ยวจะได้ไม่ปรากฏบน  
แบบจำลอง

5. ในการกำหนดการสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานและ  
เครื่องมือตัด ณ พื้นผิวภายนอกของเครื่องมือตัด  
และโหนดทั้งหมดภายในของชิ้นงานถูกกำหนดภายใต้  
ความเสียหายของคูลอมบี้ ลักษณะเช่นนี้หมายความว่า  
พื้นผิวของชิ้นงานถูกสร้างขึ้นจากการต่อกันของ  
โหนดภายในของชิ้นงาน อย่างไรก็ตาม ลักษณะของ  
การตัดชิ้นงานที่ถูกศึกษามีหลากหลายรูปแบบ  
กล่าวคือทั้งการตัดแบบตั้งฉาก, การตัดแบบเฉียง,  
มุมคายเป็นบวก, มุมคายเป็นลบ, และมุมคายเป็นตั้งฉาก  
รูปแบบเหล่านี้มีผลต่อค่าของความเสียหาย  
ยกตัวอย่างเช่น สำหรับการตัดแบบเฉียง งานของ  
Grzesik และ Zak [14] กล่าวว่าเมื่อมุมคยาที่มีค่าลบ  
ต่ำๆ เป็นเหตุให้แรงตั้งฉากกับผิวที่วัดมุมคยาเพิ่มขึ้น  
และแรงเสียดทานลดลง ผลที่ตามมาคือสัมประสิทธิ์  
ของความเสียหายที่ค่าต่ำกว่า 0.1 ถูกได้รับ ใน  
งานวิจัยนี้ สัมประสิทธิ์ของความเสียหายเท่ากับ 0.1  
ซึ่งเป็นค่าคงที่สำหรับทุกผิวและไม่ถูกพิจารณาอย่าง  
สำคัญ

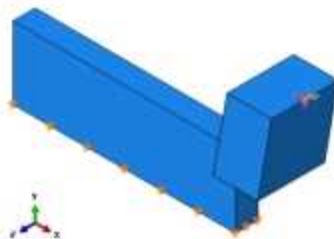
6. เงื่อนไขของขอบเขตตั้งในรูปที่ 6

- พื้นผิวล่างของชิ้นงานถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่
- อัตราเร็วของเครื่องมือตัดอยู่ในแนวแกน คือ 5 เมตร  
ต่อวินาที โดยกำหนดที่จุดอ้างอิงของเครื่องมือตัด

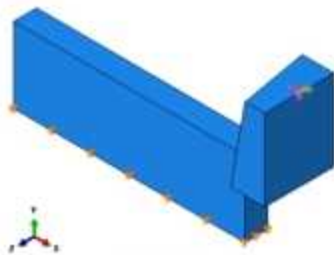
7. โครงสร้างตาข่ายของเอลิเมนต์ของชิ้นงานและ  
เครื่องมือตัด

## CST-53

- ขนาดแต่ละด้านของเอลิเมนต์ของทั้งชิ้นงานและเครื่องมือตัดเท่ากับ 0.00005 เมตร ในงานวิจัยนี้ความละเอียดของพื้นที่ของโครงสร้างตาข่ายของเอลิเมนต์ (Refined Element Mesh Area) ไม่ถูกพิจารณา
- ประเภทของเอลิเมนต์ของชิ้นงานคือ C3D8R ซึ่งเป็น 8-node Reduced-integration First-order Hexahedral Continuum Elements, มีการยกเลิกการควบคุมการบิดเบี้ยวของเอลิเมนต์ (Element Distortion Control), มีการใช้ของการลบเอลิเมนต์ที่บิดเบี้ยว (Element Deletion) และมีค่าของ  $D_{\text{control}}$  เท่ากับ 0.5 ดังที่ถูกลำในหัวข้อ 2.3
- ประเภทของเอลิเมนต์ของเครื่องมือตัดคือ R3D4 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์พื้นผิวหรือ Three-dimensional, 4-node, Rigid Element



การตัดแบบตั้งฉาก



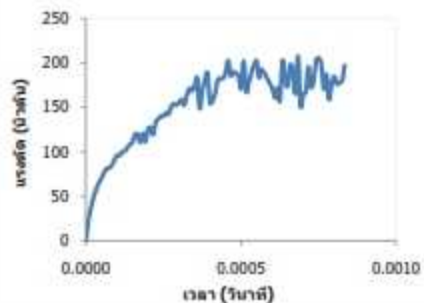
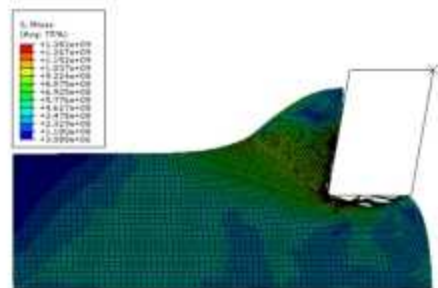
การตัดแบบเฉียง

รูปที่ 6 แบบจำลองของการตัดกับเงื่อนไขขอบเขต

### 4. ผลของการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

จากงานของ Zouhar และ Piska [7] ซึ่งเป็นแบบจำลอง 3 มิติ แรงตัดมีค่าเท่ากับ 150 นิวตัน และ

จากแบบจำลอง 2 มิติ ในงานวิจัยนี้ แรงตัดมีค่าประมาณเท่ากับ 175 นิวตัน ดังในรูปที่ 7 แรงตัดในงานวิจัยมีค่าที่สูงกว่าแรงตัดในงานของ Zouhar และ Piska [7] สิ่งนี้เป็นเพราะงานวิจัยไม่ทราบค่าของหลายพารามิเตอร์ในงานของ Zouhar และ Piska [7] งานวิจัยจำเป็นต้องสมมติค่าขึ้นมา ได้แก่ ความหนาแน่นของชิ้นงาน, โมดูลัสของความยืดหยุ่น, และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเติบโตของความเสียหาย เป็นต้น ในการเพิ่มเติม แบบจำลองของงานวิจัยอยู่ในรูปแบบของ Quasi-static คือไม่คำนึงถึงผลของความเฉื่อยหรือไม่คำนึงถึงการกระแทกกันระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่กำลังถูกตัดตั้งรูปที่ 7 พารามิเตอร์ที่ถูกกล่าวข้างต้นส่งผลต่อความเสียหายของเอลิเมนต์ ดังนั้นพารามิเตอร์ของวัสดุจำเป็นต้องจะถูกกำหนดให้ถูกต้องเพื่อจะทำให้แบบจำลองใกล้เคียงกับสภาพของปัญหา

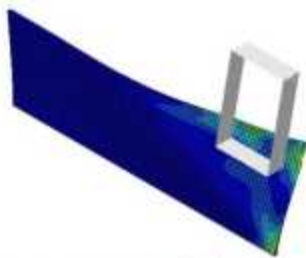


รูปที่ 7 ผลของแบบจำลอง 2 มิติที่ดำเนินการตามงานของ Zouhar และ Piska [7] ซึ่งวัสดุคือ AISI 1045



## CST-53

ถัดมา เมื่องานวิจัยสร้างแบบจำลอง 3 มิติ งานวิจัยพบว่า สำหรับชิ้นงานที่มีความกว้างน้อยมาก ในที่นี้คือ 0.1 มิลลิเมตร แบบจำลอง 3 มิติ ไม่สามารถ ตัดชิ้นงานได้ ชิ้นงานมีการบิดงอตั้งในรูปที่ 8 สิ่งนี้เป็น เพราะว่าการงานของ Zouhar และ Piska [7] กำหนดให้ ชิ้นงานไม่เคลื่อนไหวในทิศทางของความกว้างซึ่งมี ลักษณะคล้ายกับการกลิ้งปาดหน้าท่อนชิ้นงานโดย กำหนดให้มีการคลี่ท่อนออกมาเป็นแผ่นสี่เหลี่ยม ขณะที่ งานวิจัยต้องการศึกษาการตัดแบบเฉียงซึ่งเรียกร้องให้ ชิ้นงานเปลี่ยนรูปร่างอย่างอิสระใน 3 มิติในการตัดแบบ เฉียง ดังนั้นเพื่อให้การศึกษาการมีวิธสำเร็จผล งานวิจัยได้เปลี่ยนความกว้างจาก 0.1 มิลลิเมตร เป็น 1 มิลลิเมตร

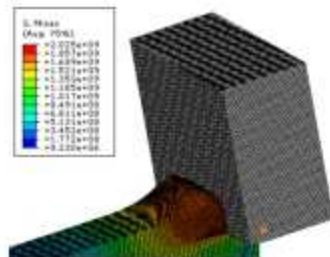


รูปที่ 8 ผลของแบบจำลอง 3 มิติ ที่ดำเนินการตามงานของ Zouhar และ Piska [7]

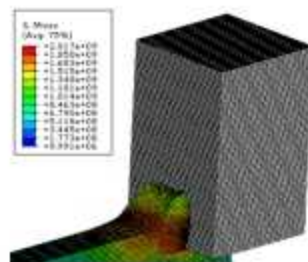
จากการเปลี่ยนวัสดุจาก AISI 1045 เป็น AISI 4340 งานวิจัยพบว่าพารามิเตอร์ของพฤติกรรมของ วัสดุมีผลต่อการแตกหักของเอลิเมนต์ขณะตัด ดังในรูป ที่ 7 ซึ่ง AISI 1045 ถูกใช้ และรูปที่ 9 ซึ่ง AISI 4340 ถูกใช้

ในรูปที่ 9 และ 10 สำหรับการตัดแบบตั้งฉาก แรง ตัดมีค่าน้อยที่สุดสำหรับมุมคายที่เป็นบวกหรือ 10 องศา ขณะที่แรงตัดมีค่ามากที่สุดสำหรับมุมคายที่เป็น ลบหรือ -10 องศา สิ่งนี้สอดคล้องกับผลของงานของ Zouhar และ Piska [7] อย่างไรก็ตาม ค่าสูงสุดของ ความเค้นตั้งในรูปที่ 9 แตกต่างกันเล็กน้อย แม้ว่ามุม คายที่ถูกเพิ่มขึ้นได้เพิ่มความกว้างของ Primary Shear Zone และความหนาของเศษ เมื่อพิจารณา

เทียบกับผลของการทดลอง งานของ Gunay และ คณะ [15] กล่าวไว้ว่าสำหรับงานกลึงในรูปแบบของ การตัดแบบตั้งฉาก แรงตัดลดลงโดยเพิ่มมุมคายที่เป็น บวก และแรงตัดเพิ่มขึ้นโดยเพิ่มมุมคายที่เป็นลบ

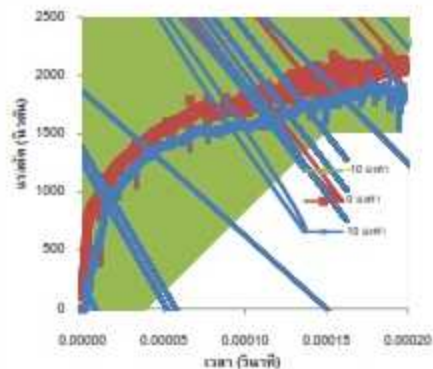


มุมคาย -10 องศา



มุมคาย 10 องศา

รูปที่ 9 แบบจำลอง 3 มิติ ของการตัดแบบตั้งฉากซึ่งมี ความกว้าง 1 มิลลิเมตร ซึ่งวัสดุคือ AISI 4340

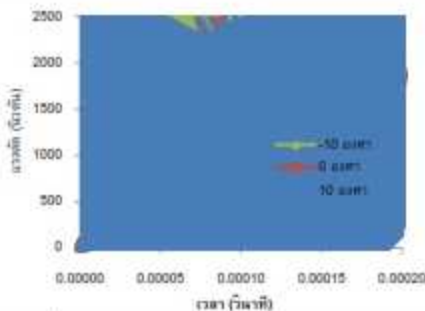


รูปที่ 10 แรงตัดสำหรับมุมคาย 3 ขนาด ในการ ตัดแบบตั้งฉากของวัสดุ AISI 4340



## CST-53

สำหรับการตัดแบบเฉียงตั้งในรูปที่ 11 แรงตัดมี ทดลองเหมือนกันกับแรงตัดสำหรับการตัดแบบตั้ง จากเมื่อมุมคายเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามของมุม คายสำหรับการตัดแบบเฉือนต่อแรงตัดเด่นชัดกว่า สำหรับการตัดแบบตั้งจาก ผลของแบบจำลองของการ ตัดแบบเฉียงนี้สอดคล้องกับงานของ Cerro และคณะ [16] ซึ่งเปรียบเทียบผลของแบบจำลองและผลของการ ทดลองสำหรับงานกลึงในรูปแบบของการตัดแบบเฉียง ในงานของ Cerro และคณะ [16] แรงตัดลดลงเมื่อมุม คายที่เป็นบวกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 11 แรงตัดสำหรับมุมคาย 3 ขนาด ในการตัด แบบเฉียงของวัสดุ AISI 4340

ในรูปที่ 12 และ 13 สำหรับการตัดแบบตั้งจาก และแบบเฉียง เมื่อการตัดดำเนินในระยะเวลาหนึ่ง แรงตัดเพิ่มขึ้นกับการขนาดที่เพิ่มขึ้นของรัศมีคมตัด สิ่งนี้สอดคล้องกับงานของ Zouhar และ Piska [7] ถึงแม้ว่าผลจากแบบจำลองที่มีรัศมีคมตัด 0.1 มิลลิเมตร แตกต่างเล็กน้อยจากผลจากแบบจำลองที่มี รัศมีคมตัด 0.2 มิลลิเมตร นอกจากนี้ มีข้อสังเกตที่ว่า สำหรับรัศมีคมตัด 0.1 มิลลิเมตร ความเค้นมีการ กระจายเพิ่มขึ้นไปสู่ Secondary Shear Zone ดังใน รูปที่ 14 และ 15

เมื่อมีการเปรียบเทียบกับระหว่างการตัดแบบตั้ง จากและการตัดแบบเฉียงที่มุมคาย 10 องศาและรัศมี คมตัด 0 มิลลิเมตร งานวิจัยพบว่าแรงตัดในการตัด

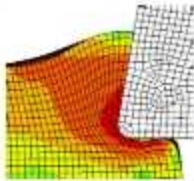
แบบเฉียงน้อยกว่าแรงตัดในการตัดแบบตั้งจากตั้งใน รูปที่ 16 ในการเพิ่มเติม ในช่วงต้นของการตัด การตัด แบบตั้งจากผลิตความชันของกราฟของแรงที่มากกว่า การตัดแบบเฉียง สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าในช่วงเริ่มต้น การตัดแบบตั้งจากต้องการแรงที่มากเพื่อจะทำให้เศษ เกิดการแยกตัว

รูปที่ 12 แรงตัดสำหรับรัศมีคมตัด 3 ขนาด ในการตัด แบบตั้งจากของวัสดุ AISI 4340

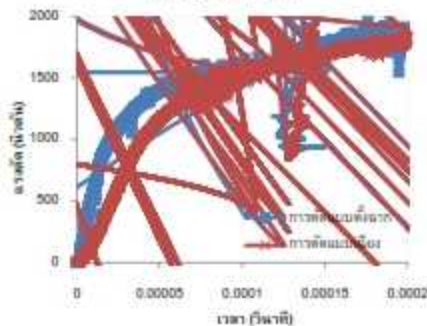
รูปที่ 13 แรงตัดสำหรับรัศมีคมตัด 3 ขนาด ในการตัด แบบเฉียงของวัสดุ AISI 4340

รูปที่ 14 การกระจายตัวของความเค้นสำหรับรัศมีคม ตัด 0 มิลลิเมตร

## CST-53



รูปที่ 15 การกระจายตัวของความเค้นสำหรับรัศมีคมตัด 0.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 16 แรงตัดของการตัดแบบตั้งฉากและแบบเฉื่อยของวัสดุ AISI 4340

### 5. สรุปผลของการวิจัย

เพื่อจะสร้างแบบจำลองของการตัดอย่างมีประสิทธิภาพ การกำหนดและตั้งค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ต้องถูกใส่ใจ ตั้งแต่การเข้าใจในหลักการของ Lagrangian ไปยังการวิเคราะห์สภาพของปัญหาและการพิจารณาทฤษฎีของการเปลี่ยนรูปถาวรและความเสียหายของวัสดุ นอกจากนี้การเข้าใจเกี่ยวกับกลศาสตร์ของการตัดจะช่วยให้วิเคราะห์ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นได้

ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองแบบ Quasi-static กับการใช้ทฤษฎีของการเปลี่ยนรูปถาวรและความเสียหายของ Johnson และ Cook โดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิและอัตราของความเครียดถูกเสนอ เมื่อพิจารณาการเพิ่มของมุมคม ทั้งการตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉื่อยผลิตแรงตัดที่ลดลง ในการตัดแบบเฉื่อย อิทธิพลของมุมคมมีความเด่นชัดกับการเพิ่มของรัศมีคมตัดในการตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉื่อย แรงตัดมีค่าสูงขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างการตัดแบบตั้งฉากและการตัดแบบเฉื่อย แรงตัดในการตัดแบบเฉื่อยมีค่าน้อยกว่าการตัดแบบตั้งฉาก

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมา การตัดแบบเฉื่อยมักถูกใช้ในการออกแบบเครื่องมือตัด เช่น ดอกเจาะที่มีลักษณะเป็นเกลียวบิด (Twisted Drill Bit) เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อลดแรงตัดซึ่งส่งผลไปยังการลดพลังงานไฟฟ้าของมอเตอร์หรือลดค่าใช้จ่ายในการทำงาน

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลือของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Massachusetts Institute of Technology (No Date). Lecture, URL: <http://web.mit.edu/2.008/www/lectures/Culpepper-Cutting.pdf>, access on 15/06/2014.
- [2] Morten, F.V. and Torben, G.F. (2008). Prediction of Cutting Forces in Metal Cutting, Using the Finite Element Method, a Lagrangian Approach, paper presented in LS-DYNA Anwenderforum 2008, Bamberg, Germany.
- [3] Duan, C.Z., Dou, T., Cai, Y.J., and Li, Y.Y. (2009). Finite element simulation and experiment of chip formation process during high speed machining of AISI 1045 hardened steel, *Internal Journal of Recent Trends in Engineering*, vol. 1(5), May 2009, pp. 46 – 50.
- [4] Satyanarayana, K., VenuGopal A., and VenkateswaraRao, G. (2011). Effect of Rake Angle and Feed Rate on Cutting Forces in an Orthogonal Turning, paper presented in *International Conference on Trends in Mechanical and Industrial Engineering (ICTME) 2011*, Bangkok, Thailand.

## CST-53

- [5] Eyup, B. (2011). 3-D numerical analysis of orthogonal cutting process via mesh-free method, *Internal Journal of the Physical Science*, vol. 6(6), March 2011, pp. 1267 – 1282.
- [6] Zone, C.L. and Yeou, Y.L. (1999). Fundamental modeling for oblique cutting by thermo-elastic-plastic FEM, *Internal Journal of Mechanical Sciences*, vol. 41(8), August 1999, pp. 941 – 965.
- [7] Zouhar, J. and Piska, M. (2008). Modelling the orthogonal machining process using cutting tools with different geometry, *MM Science Journal*, October 1999, pp. 48 – 51.
- [8] Groover M.P. (2002). *Fundamentals of Modern Manufacturing 2/e*, John Wiley & Sons, New York.
- [9] Cenik K. (2009). *Modelling and Simulation of Metal Cutting by Finite Element Method*, Thesis of Izmir Institute of Technology.
- [10] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1983). A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, paper presented in *Seventh International Symposium on Ballistics 1983*, Hague, Netherlands.
- [11] Johnson, G.R. and Cook, W.H. (1985). Fracture characteristics of three metals subjected to various strain, strain rates, temperatures and pressures, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21(1), pp. 31 – 48.
- [12] Abaqus Inc. (No Date). *Abaqus/Explicit User's Manual Version 6.10*, Karlsson and Sorensen.
- [13] Sadeghinia, H., Razfar, M.R., and Takabi, J. (2007). 2D Finite Element Modeling of Face Milling with Damage Effects, paper presented in *3<sup>rd</sup> WSEAS International Conference on Applied and Theoretical Mechanics 2007*, Spain.
- [14] Grzesik, W. and Zak, K. (2014). Assessment of friction incorporating tool wear effect, *Journal of Machine Engineering*, vol. 14(2), pp. 5 – 15.
- [15] Gunay, M., Korkut, I., Aslan, E., and Seker U. (2005). Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, July 2004, pp. 44 – 49.
- [16] Cerro, I., Alcaraz, J.L., and Lopez-de-Lacalle L.N. (2005). Numerical Simulation of the Oblique Cutting Process for Two Ductile Materials, paper presented in *2005 ABAQUS Users' Conference*, Rhode Island, United State.