

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**การวิเคราะห์การตัดและกดลวดทองแดงในกระบวนการวางลวดทองแดงบนแขนยึด
หัวอ่านฮาร์ดดิสก์แบบอัตโนมัติด้วยระเบียบวิธี
ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ชัดแจ้ง**

**Analysis of Bending and Pressing Copper-Wire Process in Automatic Loading
Copper-Wire on Actuator Arm Using Explicit Dynamic Finite Element method**

รัชชัย บุญเหลือ¹, ธนธรรม สองสี¹ และ วีระ เจียศิริพงษ์กุล^{*1}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี 12120

* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 5643001 ต่อ 3041, โทรสาร: (662) 5643001 ต่อ 3049

E-mail: bthawatchai@hotmail.com

บทคัดย่อ

ในการตัดและกดลวดทองแดงบนแขนยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Actuator arm) ให้มีลักษณะความโค้งงอตามต้องการซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการวางลวดทองแดงแบบอัตโนมัติโดยใช้เครื่องจักร อาจมีความเสียหายที่ไม่สามารถยอมรับได้ที่เกิดขึ้นบนลวดทองแดง เช่น ผิวที่ถูกเคลือบฉนวนบนลวดทองแดงมีการถลอก ลวดทองแดงมีการขาดหรือยุบตัวถาวร ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากลักษณะของตัวตัดและตัวกดลวดทองแดงที่ไม่เหมาะสม การเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ไม่เหมาะสมรวมถึงความเร็วและตำแหน่งที่ทำการตัดและกดลวดทองแดงไม่เหมาะสมด้วย เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายของลวดทองแดงจากการตัดและกดลวดทองแดงด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ชัดแจ้ง (Explicit dynamics Finite Element) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะซับซ้อน เช่น ปัญหาวัตถุต่างชนิดชนกันแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิม การวิเคราะห์โดยวิธีนี้จะทำให้ทราบถึง ลักษณะรูปร่างของลวดทองแดงในระหว่างการตัดและการกดลวดทองแดง ความเค้นในแต่ละจุดบนลวดทองแดงที่เวลาต่างๆ กัน และลักษณะของลวดทองแดงหลังการตัดและกดด้วย โดยในการวิเคราะห์ได้ทำการเปลี่ยนรูปร่างของตัวตัดและตัวกด วัสดุที่ใช้ทำ ความเร็วและตำแหน่งในการตัดและกดลวดทองแดงเพื่อหาลักษณะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการตัดและกดลวดทองแดง จากผลการวิเคราะห์พบว่า การตัดลวดทองแดงที่ใช้ความเร็วต่ำกว่า 1 m/s ที่ตำแหน่งสูงจากโคนลวดไม่เกิน 1 mm วัสดุที่ใช้ทำตัวตัดเป็น Polyethylene และมีการลบมุมของตัวตัดให้ผลการตัดลวดเป็นไปตามต้องการ และไม่เกิดความเสียหายบนลวดทองแดง ในส่วนของการกดลวดทองแดงพบว่า การใช้ตัวกดที่เป็นชิ้นเดียวกับตัวตัดที่ความเร็วต่ำกว่า 1 m/s เช่นเดียวกับการตัดลวด จะทำให้ลวดทองแดงมีลักษณะตามต้องการ จากข้อมูลการวิเคราะห์นี้จะนำไปใช้ในการออกแบบและควบคุมตัวตัดและตัวกดลวดทองแดงต่อไป

คำหลัก: ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, พลศาสตร์ชัดแจ้ง, ปัญหาการชน

Abstract

In automatic loading machine, the copper wires on the actuator arm involve in the process of bending and pressing. From this process, there might be an unacceptable damage on the copper wires, such as the scratches on the electrical insulation (coating) and the depletion or permanent subsidence of the copper wires. The damage is caused by the improper design of the tool which used to bend and press the copper wires. The designing factors consist of the geometry of the tool, the material of the tool, and the speed and position of the tool as well. Therefore, in order to avoid the unwanted damage, explicit dynamics finite element is presented to analyze this process. The explicit dynamics finite element is commonly used in the analysis of complex problems such as the impact and deformation caused by the material difference between two objects. This method can show the geometric variation of the copper wires during and also after the process. Moreover, it is capable of displaying the stress distribution on the copper wires at various points in time. In this analysis, the material, speed, and position of the tool (bending head and pressing head) are varied in order to find the optimum point of the process. From the analysis, for the bending head, the optimum point is acquired by adjusting the speed of the bending head to be 1 m/s or lower. In addition, the position of the bending head is set to be 1 mm or less above the bottom of the wire and the Polyethylene material is used. The edges of the bending head are also filled so that the copper wires are bent as desired without any damage. For the pressing head, the optimum point is reached by using the two-point pressing head at the same speed as the bending head. These results will be useful in designing and controlling the bending head and the pressing head of the automatic loading machine.

Keywords: Finite Element Method, Explicit Dynamic, Dynamic Contact Problem, Explicit dynamic Finite Element Method

1. บทนำ

การตัดและกดลวดทองแดงเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการวางลวดทองแดงบนแผ่นยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Actuator arm) โดยใช้เครื่องจักรอัตโนมัติทำหน้าที่ในการจัดวาง ในการตัดและกดลวดทองแดงนั้นจะทำการตัดให้ปลายลวดทองแดงไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการแล้วจึงทำการกดให้แนบติดกับจุดบัดกรีและตัวแขนยึดหัวอ่านก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการบัดกรีแบบอัตโนมัติ ข้อสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการตัดและกดลวดทองแดงคือต้องไม่ทำให้ลวดทองแดงมีความเสียหายและเส้นลวดทองแดงต้องอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการด้วย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ความเสียหายและลักษณะของลวดทองแดงในระหว่างทำการตัดและกดและหลังเสร็จสิ้นกระบวนการว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นบนลวดทองแดงหรือไม่เมื่อใช้ความเร็วและลักษณะการตัดและกดที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้จะได้ทำการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ชัดแจ้ง (Explicit Dynamic Finite Element Method) ทำการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ชัดแจ้ง นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางพลศาสตร์ เช่น นำมาใช้ในการวิเคราะห์และออกแบบก่อนเพื่อใช้ในการทูลขึ้นรูปโลหะ[1] และการวิเคราะห์พลศาสตร์ของการหมุนขึ้นรูปโลหะ[2] เนื่องจากการวิเคราะห์แบบชัดแจ้ง (Explicit) สามารถให้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงมากกว่าการวิเคราะห์ปัญหาแบบปริยาย (Implicit) จากการเปรียบเทียบผลเฉลยในการวิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ [3] ดังนั้นการวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้งจึงเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนด้านพลศาสตร์และปัญหาแบบไม่เชิงเส้น[4] ซึ่งบางปัญหาเป็นลักษณะของการสัมผัสกันของวัตถุ 2 ชนิด ที่มีความเร็วเข้าชนกัน การแก้ปัญหาลักษณะนี้จะใช้ทฤษฎีของการสัมผัส (Contact Mechanic) เข้าช่วยในการแก้ปัญหา[5,6] เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงมากที่สุด

ในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอผลการวิเคราะห์การตัดและกดลวดทองแดงโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ชัดแจ้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อหาค่าความเร็วและลักษณะของตัวตัดและตัวกดลวดทองแดงที่มีความเหมาะสมและไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่ตัวลวดทองแดง โดยจะแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 2 จากนั้นแสดงการกำหนดเงื่อนไขที่ใช้ในการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 3 และแสดงผลการวิเคราะห์และผลการทดลองในหัวข้อที่ 4 และทำการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยในหัวข้อที่ 5

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ที่ละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่ตั้งอยู่บนรากฐานที่ว่า สมการที่สร้างขึ้นมานั้นจะต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมามาประกอบกันเป็นระบบสมการชุดใหญ่ซึ่งเป็นตัวแทนของลักษณะปัญหาจริง จากนั้นจึงทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ระบบสมการแล้วจึงทำการแก้สมการ ซึ่งจะทำให้ได้ผลเฉลยโดยประมาณของตำแหน่งต่างๆของปัญหานั้น[7] วิธีการแก้ระบบสมการสำหรับแต่ละปัญหาที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดความแตกต่างของผลเฉลย ดังนั้นในการแก้ระบบสมการจึงจำเป็นต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสมสำหรับลักษณะปัญหานั้นๆด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้การแก้สมการโดยใช้ระเบียบวิธีแบบชัดแจ้งซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาด้านพลศาสตร์และปัญหาแบบไม่เชิงเส้น

2.1 พลศาสตร์ชัดแจ้งสำหรับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการทั่วไปของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบพลศาสตร์ชัดแจ้งแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + F = R \quad (1)$$

โดย $\ddot{u}$ คือ ความเร่งของแต่ละโหนด, $\dot{u}$ คือ ความเร็วของแต่ละโหนด, M คือ เมตริกซ์ของมวล, C คือ เมตริกซ์ของตัวหน่วง, F คือ เวกเตอร์ของแรงภายใน และ R คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอก

เปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์แบบสถิตที่พบว่าเมตริกซ์ของมวลและตัวหน่วงจะอยู่ในลักษณะของสมมูลทางพลศาสตร์ เพราะจะไม่รวมเอาแรงเฉื่อยและแรงหน่วงเข้ามาคิด ผลเฉลยของระบบสมการจึงเป็นแบบสมการเชิงอนุพันธ์เชิงสามัญ โดยทั่วไปแล้วสมการที่ 1 สามารถแก้ได้โดยการใช้กระบวนการแบบระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบตรงกลาง (Central finite difference method) ในระเบียบวิธีนี้การหาการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและความเร่งที่เวลา t_n สามารถหาได้จากสมการที่ 2 และ 3

$$\dot{u}_n = \frac{1}{2\Delta t}(u_{n+1} - u_{n-1}) \quad (2)$$

$$\ddot{u}_n = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{n+1} - 2u_n + u_{n-1}) \quad (3)$$

ทำการแทนสมการที่ 2 และ 3 ลงในสมการที่ 1 จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$u_{n+1} = \left[M + \frac{\Delta t}{2} C \right]^{-1} \left[\Delta t^2 (R_n - F_n) + 2Mu_n - \left(M - \frac{\Delta t}{2} C \right) u_{n-1} \right] \quad (4)$$

ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมแบบตรงกลางจะให้ผลที่ลู่เข้าสู่คำตอบช่วงเวลา (Δt) จะต้องน้อยกว่า ค่าเวลาวิกฤติ ($\Delta t_{\min}$) ซึ่งจากเกณฑ์การมีเสถียรภาพของ Corant-Friedrichs-levy เราจะได้ค่า $\Delta t_{\min}$ ดังสมการ

$$\Delta t_{\min} = \frac{2}{\omega_{\max}} = \frac{l}{c} \quad (5)$$

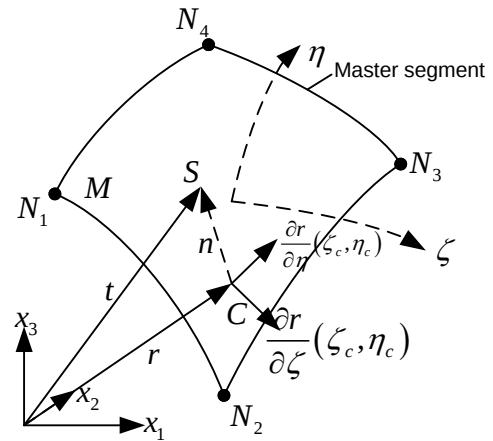
โดยที่ $\omega_{\max}$ คือ ค่าความถี่ธรรมชาติสูงสุดของระบบ, l คือ ค่าความยาวเฉพาะของเอลิเมนต์ซึ่งก็คือระยะที่สั้นที่สุดระหว่างสองโหนดใดๆ ในเอลิเมนต์, c คือ ความเร็วของเสียงในวัสดุ สำหรับเอลิเมนต์แบบสามมิติสามารถหาความเร็วในวัสดุได้จาก

$$c = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (6)$$

โดย E คือ ค่ายังโมดูลัส, ν คือ Poisson's ratio, ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

2.2. กลไกของแรงสัมผัสในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ชัดเจน

การคำนวณแรงสัมผัสมีความสำคัญต่อความแม่นยำของผลเฉลยและประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาพลศาสตร์ที่วัตถุมีความเร็วเข้าชนวัตถุกับอันหนึ่ง[7] วิธีการของ Penalty และ Lagrange ได้ถูกผสมผสานเข้าด้วยกันเพื่อใช้ในการคำนวณหาแรงสัมผัสที่ถูกต้องมากที่สุด โดยกลไกการคำนวณจะสามารถสร้างขึ้นจากการใช้รูปที่ 1 ซึ่งแสดงโหนดและทิศทางในการเข้าชน



รูปที่ 1 โหนดรอง(s) และโหนดหลัก (M) ของการสัมผัส

โดยการสร้างระบบสมการในการคำนวณแรงสัมผัสของวัตถุ[7] จะได้สมการดังสมการที่ 7, 8

$$f_{t\xi}^I = \frac{M^I M^{II}}{M^I + M^{II}} \left[\frac{{}^t\hat{F}_{t\xi}^{II} + \bar{R}_{ct\xi}^{II}}{{}^tM^{II}} - \frac{{}^t\hat{F}_{t\xi}^I + \bar{R}_{ct\xi}^I}{{}^tM^I} + \frac{{}^{t-\Delta t}\dot{U}_{t\xi}^{II}}{\Delta t} - \frac{{}^{t-\Delta t}\dot{U}_{t\xi}^I}{\Delta t} - \frac{{}^t g_{t\xi}}{(\Delta t)^2} \right] \quad (7)$$

$$f_{\eta}^I = \frac{M^I M^{II}}{M^I + M^{II}} \left[\frac{\frac{{}^t\hat{F}_{\eta}^{II} + \bar{R}_{c\eta}^{II}}{M^{II}} - \frac{{}^t\hat{F}_{\eta}^I + \bar{R}_{c\eta}^I}{M^I}}{\frac{{}^{t-\Delta t}\dot{U}_{\eta}^{II}}{\Delta t} - \frac{{}^{t-\Delta t}\dot{U}_{\eta}^I}{\Delta t} - \frac{{}^t g_{\eta}}{(\Delta t)^2}} \right] \quad (8)$$

โดยเราสมมติว่า โหนดรอง S นั้นถูกยึดอยู่กับที่บนชิ้นส่วนหลัก M และตัวห้อย ζ, η คือทิศทางในแนวสัมผัสของชิ้นส่วนหลักและโหนดรอง, ตัวห้อย I, II คือตัวแปรที่ตั้งอยู่ที่โหนดรองและที่จุดสัมผัส C ตามลำดับ, M คือ มวลของโหนด, $\hat{F}$ คือ แรงบนโหนดไม่รวมแรงสัมผัส, R_c คือ แรงสัมผัสบนโหนด, $\bar{R}_c$ คือ แรงสัมผัสบนโหนดที่มีผลมาจากโหนดอื่นๆ, $\dot{U}$ คือ ความเร็ว จากนั้นทำการระบุเงื่อนไขของการไหลของผิวสัมผัสโดยสมการที่ 9

$$\phi = |f_t| - \mu |f_n| = \sqrt{f_{t\xi}^2 - f_{\eta}^2} - \mu |f_n| \quad (9)$$

โดย μ คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ จากนั้นทำการหาแรงในแนวสัมผัสจริงที่เพิ่มขึ้นบนโหนดรองแสดงได้ดังสมการที่ 10

$$f_t = \begin{cases} f_{t\xi}^I \frac{\partial r}{\partial \zeta}(\zeta_c, \eta_c) + f_{\eta} \frac{\partial r}{\partial \eta}(\zeta_c, \eta_c), & \text{if } \phi \leq 0 \\ \mu |f_n| n_t, & \text{if } \phi > 0 \end{cases} \quad (10)$$

โดยที่ n_t คือทิศทางของการสัมผัสที่สามารถหาได้จากสมการที่ 11

$$n_t = \frac{\left[f_{t\xi}^I \frac{\partial r}{\partial \zeta}(\zeta_c, \eta_c) + f_{\eta} \frac{\partial r}{\partial \eta}(\zeta_c, \eta_c) \right]}{\left| f_{t\xi}^I \frac{\partial r}{\partial \zeta}(\zeta_c, \eta_c) + f_{\eta} \frac{\partial r}{\partial \eta}(\zeta_c, \eta_c) \right|} \quad (11)$$

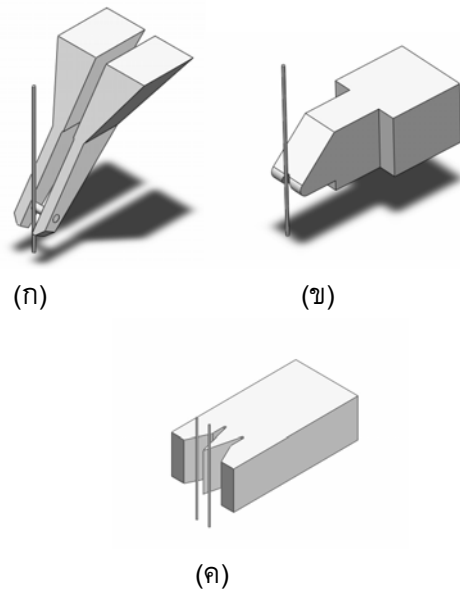
จากการใช้ทฤษฎีของกลไกของแรงสัมผัสในระบบพลศาสตร์จะทำให้เราสามารถหาผลเฉลยได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

3. การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์

ในหัวข้อนี้จะได้นำเสนอแบบจำลอง 3 มิติ ที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหารูปแบบของตัวตัดและตัวกดหลอดทองแดงที่เหมาะสม และยังแสดงลักษณะของการแบ่งเอลิเมนต์รวมถึงชนิดของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมทั้งยังจะได้แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นของการวิเคราะห์ในแต่ละลักษณะด้วย

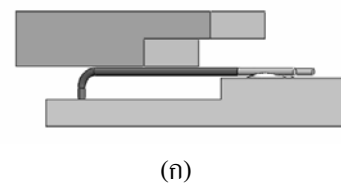
3.1 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

หลังจากที่ได้ทำการสร้างแบบจำลองแบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แล้วโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการตัดหลอดทองแดงและการกดหลอดทองแดงได้ผลดังนี้

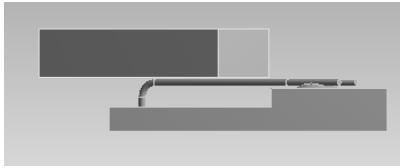


รูปที่ 2 การตัดหลอดทองแดงสามแบบ

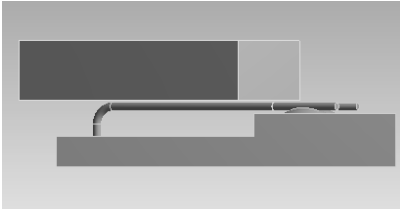
และการสร้างชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์การกดหลอดทองแดงได้ผลดังนี้



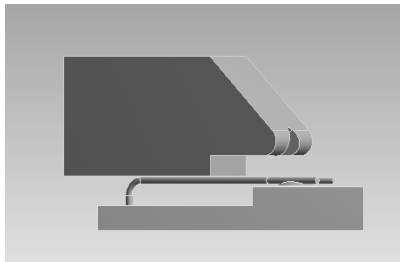
(ก)



(ข)



(ค)



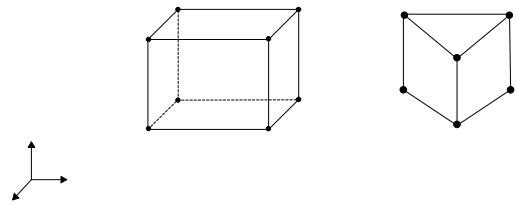
(ง)

รูปที่ 3 การกวดทงแดงทั้งสี่แบบ

3.2 ชนิดของเอลิเมนต์และลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์

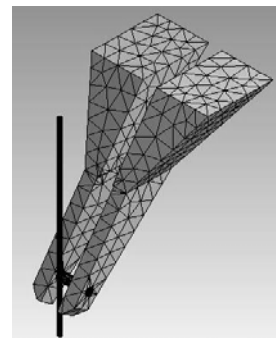
ในบทความวิจัยนี้ได้แบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการแก้ปัญหา ในรูปที่ 4 เป็นชนิดของการแบ่งรูปร่างของปัญหาหรือแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ การแบ่งเอลิเมนต์ย่อยสามารถแบ่งออกได้หลายแบบด้วยกันแต่ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งเอลิเมนต์ย่อยเป็นชนิด

Solid185 ซึ่งเป็นรูปแบบสำเร็จรูปของโปรแกรม และ Solid185 นั้นเหมาะสำหรับรูปแบบที่เป็นปัญหามีมิติของโครงสร้างที่เป็นของแข็ง ซึ่งในแต่ละเอลิเมนต์ได้แบ่งจุดที่เชื่อมต่อกันทั้งหมด 8 จุด (Node) และมีลำดับชั้นความเป็นอิสระเท่ากับ 3 (Degrees of Freedom, DOF) คือ การเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z

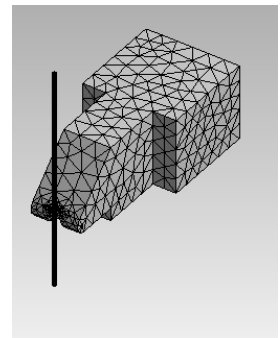


รูปที่ 4 เป็นการแบ่งรูปร่างของปัญหาของออกเป็น
เอลิเมนต์ชนิด Solid185

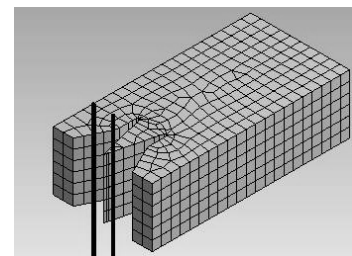
หลังจากการแบ่งเอลิเมนต์ของปัญหาที่จะทำการวิเคราะห์ให้มีลักษณะดังรูปที่ 4 จะได้แบบจำลองที่ทำการแบ่งเอลิเมนต์แล้วดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6



(ก)

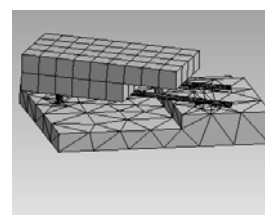


(ข)

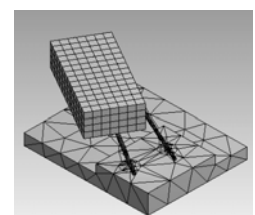


(ค)

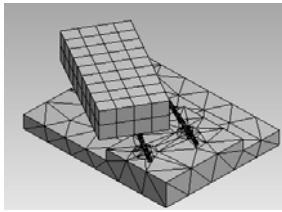
รูปที่ 5 ผลการแบ่งเอลิเมนต์ปัญหาการตัด
ลวดทองแดง



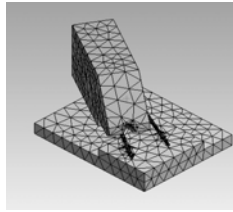
(ง)



(ข)



(ค)

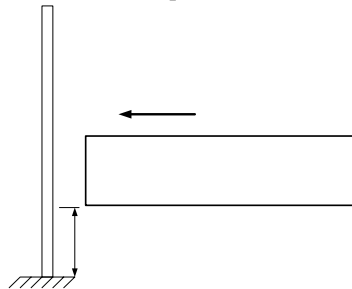


(ง)

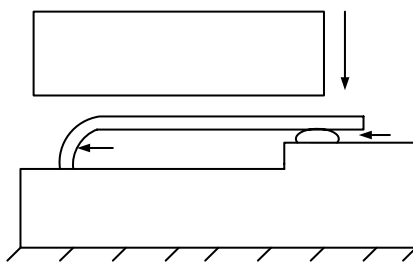
รูปที่ 6 ผลการแบ่งเอลิเมนต์ปัญหาการกดตลอด
ทองแดง

3.3 การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์

การกำหนดเงื่อนไขในการวิเคราะห์สำหรับการตัดและ
การกดตลอดทองแดงแสดงดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์การตัด
ตลอดทองแดง



รูปที่ 8 การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์การ
กดตลอดทองแดง

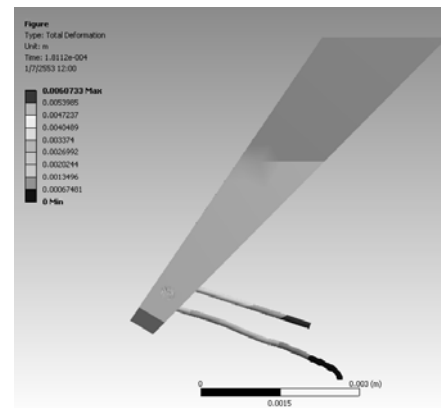
ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนวัสดุ
ของตัวตัดและตัวกดตลอดทองแดงเพื่อหาวัสดุที่
เหมาะสมจากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของ
การตัดและกดเพื่อสังเกตลักษณะของตลอดทองแดง
หลังกระบวนการแล้วหาค่าที่เหมาะสมสำหรับวัสดุ
ชนิดนั้น

Fixed

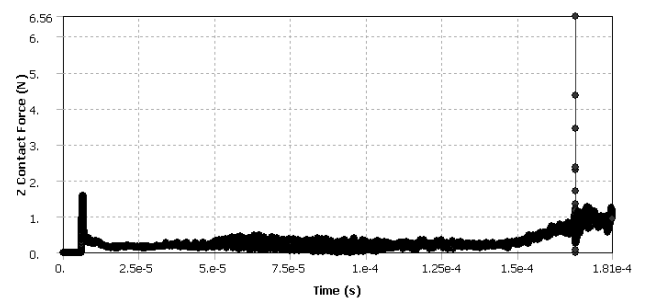
4. ผลการวิเคราะห์และอภิปราย

หลังจากได้ทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุและ
เงื่อนไขในการวิเคราะห์แล้ว จึงได้ทำการวิเคราะห์โดย
ใช้คอมพิวเตอร์ในกรณีต่างๆ โดยจะแสดงผลการ
วิเคราะห์พร้อมกับการอภิปรายผลไปพร้อมกัน

ผลการวิเคราะห์การตัดตลอดทองแดงใน 3 รูปแบบ
ของตัวตัดตลอดทองแดงแสดงในรูปที่ 9-11



(ก)



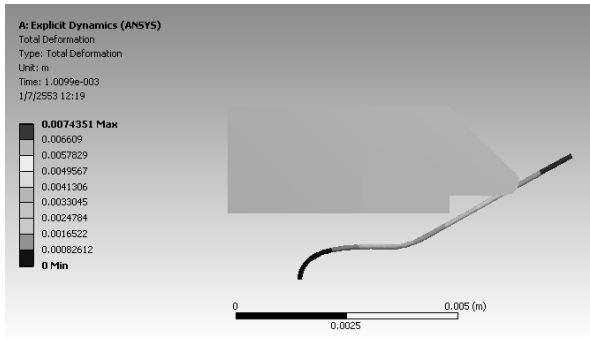
(ข)

รูปที่ 9 (ก) ผลการตัดตลอดทองแดงแบบที่ 1

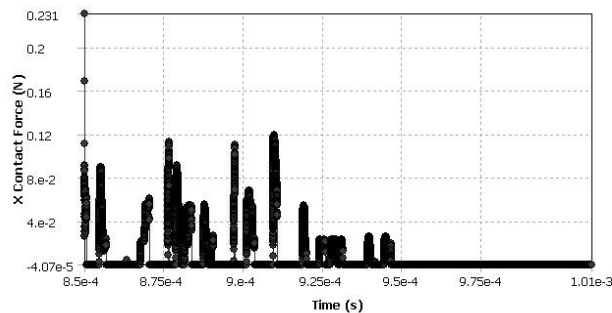
(ข) ค่าแรงสัมผัสของการตัด

ตลอดทองแดงรูปที่ 9 (ก) แสดงให้เห็นว่าการออกแบบ
ตัวตัดตลอดทองแดงให้ติดอยู่กับปลายกริปเปอร์นั้นเมื่อ
เข้าทำการตัดตลอดทองแดงทำให้ตลอดทองแดงมีความ
โค้งงอในลักษณะพับ ทำให้ตลอดทองแดงมีโอกาสขาด
ได้สังเกตได้จากค่าแรงสัมผัสที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน
รูปที่ 9 (ข) เมื่อตัวตัดมีความเร็วมากกว่า 1 m/s
เพราะฉะนั้นถ้าหากเราต้องการตัดให้ลดลงก็
จะสามารถทำการตัดได้โดยไม่ทำให้ตลอดทองแดงขาด

X



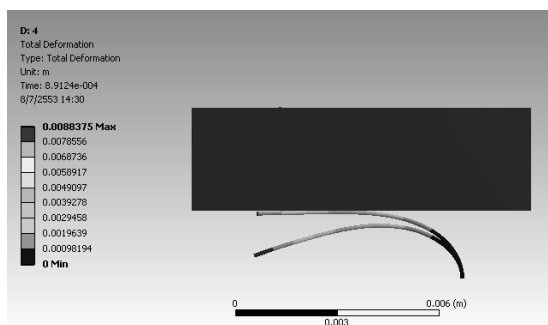
(ก)



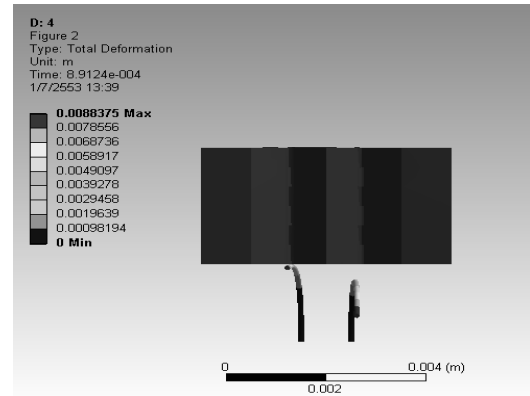
(ข)

รูปที่ 10 (ก) ผลการดัดลวดทองแดงแบบที่ 2
(ข) ค่าแรงสัมผัสของการดัด

จากรูปที่ 10 (ก) จะเห็นได้ว่าตัวดัดลวดทองแดงลักษณะนี้เมื่อเข้าทำการดัดลวดทองแดงแล้วทำให้ลวดทองแดงเกิดการงอเล็กน้อยในบริเวณที่เกิดการชนกันระหว่างตัวดัดลวดกับเส้นลวด แต่อย่างไรก็ตามผลการดัดลวดในกรณีนี้ก็ให้ผลการดัดที่ใกล้เคียงกับลักษณะที่ต้องการ และเมื่อสังเกตจากแรงสัมผัสในรูปที่ 10 (ข) จะพบว่าแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นในกรณีนี้มีค่าไม่เกิน 0.12 N ในระหว่างการดัดซึ่งถือว่ามีความน้อย จึงไม่ทำให้เส้นลวดเกิดการยุบตัวหรือผิวถลอกได้



(ก)

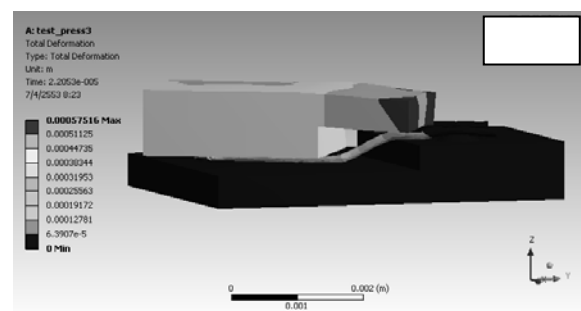


(ข)

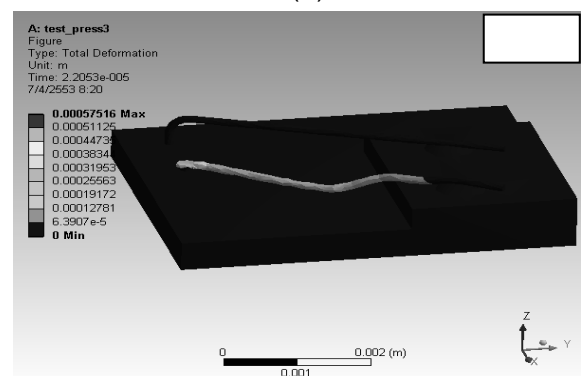
รูปที่ 11 (ก) ผลการดัดลวดทองแดงแบบที่ 3
(ข) ค่าแรงสัมผัสของการดัด

จากรูปที่ 11 (ก) จะเห็นได้ว่าการดัดลวดทองแดงแบบที่ 3 ซึ่งเป็นการดัดลวดทองแดง 2 เส้นพร้อมกันนั้น เส้นลวดทั้งสองเส้นจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับที่ต้องการมาก และยังสามารถลดเวลาในการดัดลวดทองแดงได้เนื่องจากการดัดทีละสองเส้น

ผลการวิเคราะห์การกดลวดทองแดงในกรณีต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 12-15



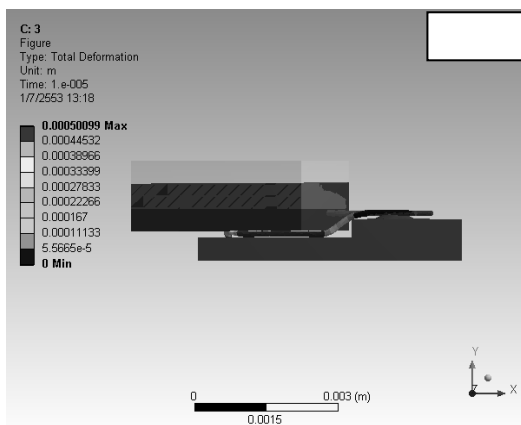
(ก)



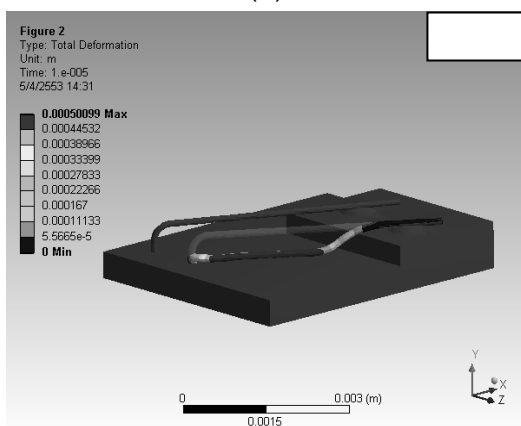
(ข)

รูปที่ 12 (ก) ผลการกดลวดทองแดงแบบที่ 1
(ข) ลวดทองแดงหลังการกด

จากรูปที่ 12 (ก) เป็นการกดลวดทองแดงในแบบติดกับแกนยึดหัวอ่านโดยใช้ตัวกดที่สามารถกดลวดได้ทั้งด้านแกนยึดหัวอ่านและบริเวณจุดบัดกรีจากรูปจะเห็นว่าหลังจากทำการกดลวดทองแดงแล้วลวดทองแดงจะแนบติดกับตัวแกนยึดหัวอ่านและจุดบัดกรีด้วย ส่วนวัสดุที่ใช้ทำตัวกดนี้เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าลวดทองแดงจึงไม่ทำให้ลวดทองแดงมีความเสียหาย



(ก)

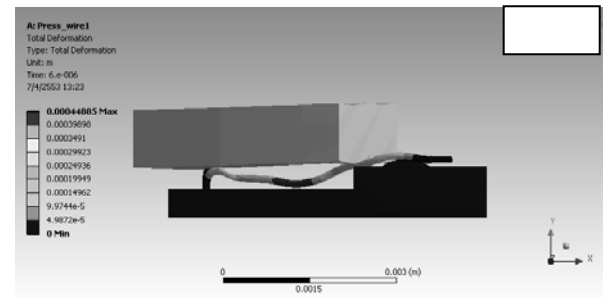


(ข)

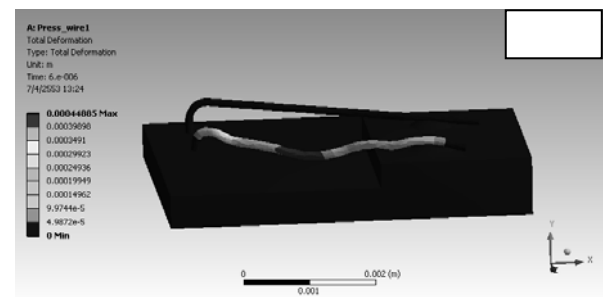
รูปที่ 13 (ก) ผลการกดลวดทองแดงแบบที่ 2
(ข) ลวดทองแดงหลังการกด

จากรูปที่ 13 (ก) จะเห็นว่าการออกแบบตัวกดลวดทองแดงให้ทำการกดเฉพาะด้านแกนยึดหัวอ่านทำให้ลวดทองแดงแนบติดเฉพาะส่วนด้านแกน

ยึดหัวอ่าน ส่วนที่เป็นด้านใกล้กับจุดบัดกรีจะเกิดการยกตัวขึ้นเล็กน้อย ลักษณะเช่นนี้เมื่อทำการปล่อยมือจึบจากปลายลวดทองแดงอาจจะทำให้เกิดการลอยของปลายลวดจากจุดบัดกรีได้



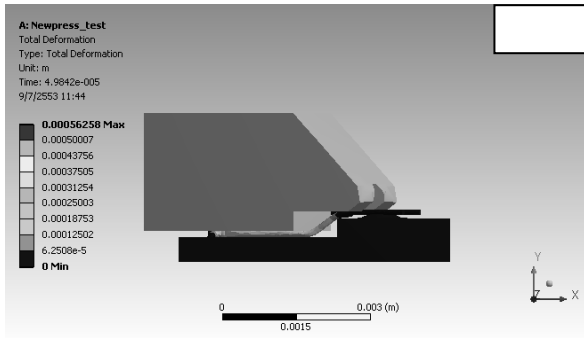
(ก)



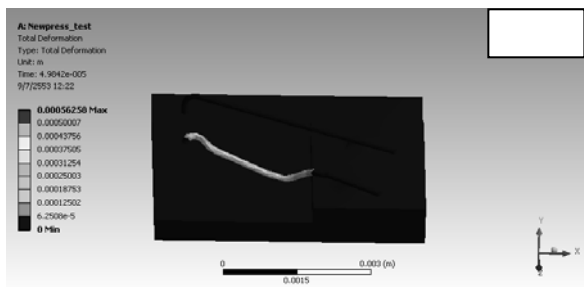
(ข)

รูปที่ 14 (ก) ผลการกดลวดทองแดงแบบที่ 3
(ข) ลวดทองแดงหลังการกด

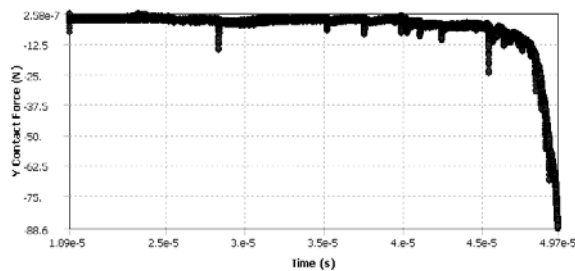
จากรูปที่ 14 (ก) จะเห็นได้ว่าการกดลวดที่ด้านจุดบัดกรีเพียงอย่างเดียวนี้ทำให้ลวดทองแดงมีรูปร่างไม่เหมาะสม คือลวดทองแดงไม่แนบติดกับแกนยึดหัวอ่านลักษณะแบบนี้เมื่อทำการปล่อยมือจึบที่ปลายลวดทองแดงจะทำให้ลวดทองแดงเปลี่ยนรูปร่างและตำแหน่งอันเนื่องมาจากแรงคืนตัว (Spring back) ซึ่งไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในการกดลวดทองแดง เพราะฉะนั้นการกดลวดลักษณะนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 15 (ก) ผลการกดลวดทองแดงแบบที่ 4

(ข) ลวดทองแดงหลังการกด

(ค) แรงสัมผัสในแนวแกน Y

จากรูปที่ 15 (ก) เป็นการออกแบบตัวกดและตัวดัดลวดทองแดงให้เป็นชิ้นเดียวกันเมื่อทำการกดจะพบว่าลวดทองแดงอยู่ในสภาพที่ดีและแนบติดกับแขนยึดหัวอ่านและบริเวณจุดบัดกรีด้วยดังแสดงใน (ข) และจากการพิจารณาแรงสัมผัสในรูป (ค) พบว่าค่าแรงสัมผัสอยู่ที่ค่ามากที่สุดประมาณ -88.6 N หรือความเค้นได้เท่ากับ -620 MPa เกิดขึ้นบริเวณโคนลวดทองแดงซึ่งเป็นความเค้นอัด จากทฤษฎีความเสียหายโดยใช้เกณฑ์จุดครากของวัสดุเป็นหลัก วัสดุจะเกิดความเสียหายเมื่อความเค้นบนวัสดุมีค่าเกินครึ่งหนึ่งของจุดคราก จึงทำให้ทราบว่าลวดทองแดงจะ

เกิดความเสียหายถาวรขึ้นที่บริเวณโคนลวดทองแดงเนื่องจากลวดทองแดงมีจุดครากอยู่ที่ประมาณ 70 MPa การเสียรูปของวัสดุจะเกิดขึ้นที่ตัวกดลวดทองแดงก่อนเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าทองแดง แต่อย่างไรก็ตามการเสียรูปที่เกิดขึ้นบนตัวกดลวดทองแดงที่ทำมาจาก HDPE ก็ยังอยู่ในช่วงที่ไม่ใช่การเสียรูปแบบถาวร

5. สรุปผล

จากผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล ในการดัดลวดทองแดงให้มีลักษณะตามที่ต้องการโดยใช้ตัวดัดลวดทองแดงสามแบบทำให้ทราบว่ารูปแบบที่เหมาะสมของตัวดัดลวดทองแดงควรจะเป็นไปตามแบบที่ 2 (รูปที่ 10) ซึ่งเป็นรูปแบบของการดัดลวดที่ละเอียดแต่เป็นการออกแบบให้สามารถเป็นตัวกดลวดทองแดงได้ด้วยและยังเป็นการลดจำนวนชิ้นส่วนในเครื่องจักรลงได้อีกทำให้ง่ายต่อการควบคุม ตัวดัดลวดทองแดงแบบที่ 2 นี้เหมาะสมที่จะเป็นตัวกดลวดทองแดงดังผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 15 ด้วย ในส่วนของวัสดุเหมาะสมในการทำตัวดัดและตัวกดนั้นจะใช้วัสดุเป็นโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงน้อยกว่าลวดทองแดงจึงไม่ทำให้ลวดทองแดงเสียหายในขณะที่สัมผัสหรือกดทับกัน นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่าความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการดัดลวดทองแดงคือน้อยกว่า 1 m/s

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบริษัท Belton Technology (Thailand) จำกัด ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์ทดสอบ และได้รับทุนสนับสนุนจาก ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ภายใต้โครงการพัฒนาทรัพยากรบุคคล ในอุตสาหกรรม Hard Disk Drive ภายใต้รหัสโครงการ CPN-HR 08-08-50 M

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yang, D.Y., Yoo, Y.H. (1997). Analysis and Design of Multiblow Hammer Forging Processes by the Explicit Dynamic Finite Element Method, Annals of the CIRP, vol. 46, January 1997, pp. 191-194.
- [2] YU Hai-Liang, LIU Xiang-Hua, ZHAO Xian-Ming, WU Di, Y. Kusaba. (2006). Explicit Dynamic FEM of Mutipass Vertical-Horizontal Rolling, Journal of Iron and Steel Research International, vol. 13(26-30), May 2005.
- [3] Sun, J.S., Lee, K.H., Lee, H.P. (1999). Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods for Dynamic Problems. Journal of Materials Processing Technology, vol. 105(110-118), April 1999.
- [4] Shen Rong Wu, Weifeng Qiu. (2006). Nonlinear Transient Dynamic Analysis by Explicit Finite Element with Interactive Consistent Mass Matrix. Communications in Numerical Methods in Engineering, vol. 10(1002-1110), December 2007.
- [5] Johnson, K.L. (1985), Contact Mechanics, Cambridge University Press, New York.
- [6] Fu-Jun Wang, Li-Ping Wang, Jian-Gang Cheng, Zhen-Han Yao. (2007). Contact Force Algorithm in Explicit Transient Analysis using Finite Element Method. Finite Elements in Analysis and Design, vol. 43(580-587), February 2007.
- [7] ปราโมทย์เดชะอำไพ (2547). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547, หน้า 5