การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19
19-21 ตุลาคม 2548 จังหวัดภูเก็ต

การออกแบบหลายระดับของชิ้นส่วนยานยนต์

Multi-Level Design of an Automotive Part

อดุลยศักดิ์ บุญพันธ์ [1] สุจินต์ บุรีรัตน์[2] จำลอง ลิ้มตระกูล [3] สำรวจ อินแบน [4]
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น 40002
โทร 0-4320-2845 โทรสาร 0-4320-2849
E-mail:Sujbur@kku.ac.th[1] Autogear77@hotmail.com[2] Saminb@kku.ac.th[4]

Adulyasak Boonpan[1] Sujin Bureerat [2] Jumlong Limtrakool[3] Samruad Inban[4]
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Khonkaen University, Tel. 043-244296 Fax. 043-245872
E-mail:Sujbur@kku.ac.th[1] Autogear77@hotmail.com[2] Saminb@kku.ac.th[4]

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการหาค่าเหมาะสมสุดและระเบียบวิธีไฟไนท์อีเลเมนท์เพื่อออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์ซึ่งในที่นี้คือก้านโยกกระปุกเกียร์ (Housing lever control) กระบวนการออกแบบแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนคือ การหาค่าความอ่อนตัวของโครงสร้างต่ำสุด การหาค่าความแข็งเชิงพลวัตสูงสุดของโครงสร้าง และการออกแบบละเอียดของโครงสร้าง การออกแบบระดับแรกเป็นการหาโทโปโลยีเหมาะสมที่สุดของชิ้นส่วนเพื่อให้ได้ความอ่อนตัวต่ำสุด และจากนั้นใช้ผลเฉลยจากขั้นตอนแรกเป็นโครงสร้างเริ่มต้นของการออกแบบระดับที่สองซึ่งเป็นการหาส่วนเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างเริ่มต้นโดยมีฟังก์ชันเป้าหมายคือค่าความแข็งเชิงพลวัต การออกแบบระดับที่สามซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายเป็นการออกแบบละเอียดของโครงสร้างที่ได้จากขั้นตอนที่สอง ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตกแต่งและทำให้โครงสร้างเรียบพร้อมทั้งใส่ส่วนประกอบสำคัญอื่นเข้าไป ผลการออกแบบแสดงให้เห็นว่าการออกแบบหาค่าเหมาะสมสุดสามระดับนี้เป็นกระบวนออกแบบที่มีทั้งประสิทธิภาพและประสิทธิผล อีกทั้งยังเป็นการนำเสนอกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานจากที่ผู้ออกแบบรู้เพียงแนวคิดในการใช้งานของชิ้นส่วนเท่านั้น

คำหลัก: การหาโทโปโลยีเหมาะสมสุด, ระเบียบวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์, การหาค่าเหมาะสมสุดหลายระดับ, การออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์

Abstract

This work demonstrates the applications of optimization and finite element technologies to practical design of a housing control lever. There consist of three design levels that are compliance minimization, dynamic stiffness maximization and detailed design. The first level is to find a structural configuration that gives minimum structural compliance whilst meeting structural mass constraint. For the second level, the structure from the first level is used as an initial design. The design problem is to find stiffeners to be added to the initial topology so that maximization structural dynamic stiffness is achieved. The third level is detailed design of the structural shape taken from the second design stage. It is refined and smoothed while some additional important parts are attached. The optimum results obtained from these three steps of structural design shows that the proposed design process is efficient and effective. It is also a good demonstration on how to obtain a good design of a structure from simply knowing the concept of its use.

Keyword: Topology Optimization, Finite Element Method, Multilevel Optimization, Automotive Part Design

1.บทนำ

การออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์ ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆในการออกแบบเพื่อให้ได้ชิ้นงานออกแบบที่ดีที่สุดตรงตามเป้าหมายที่ต้องการ อีกทั้งยังสอดคล้องกับมาตรฐานและหลักการออกแบบทางวิศวกรรม กระบวนการออกแบบทางวิศวกรรมสามารถแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนหลัก ๆกล่าวคือ การออกแบบตามแนวคิด (Conceptual design) การออกแบบขั้นต้น (Preliminary design) และการออกแบบละเอียด (Detailed design) เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะมีการสร้างชิ้นส่วนต้นแบบและพัฒนาเพื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป [1] ในอดีตอุตสาหกรรมในประเทศไทยส่วนใหญ่จะนิยมคัดลอกรูปแบบเบื้องต้นของโครงสร้างมาจากต่างประเทศหรือแม้กระทั่งคิดขึ้นมาเองจากประสบการณ์และทำการออกแบบละเอียดแล้วนำเข้าสู่กระบวนการ

ผลิตเลย การวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์โดยเป็นการแสดงวิธีการออกแบบในขั้นตอนการออกแบบตามแนวคิดและขั้นตอนการออกแบบละเอียด ชิ้นส่วนยานยนต์ที่ใช้สาธิตการออกแบบคือก้านโยกกระปุกเกียร์ กระบวนการออกแบบแบ่งออกเป็นสามระดับ คือ ขั้นแรกคือการออกแบบตามแนวคิด เป็นการหาโทโปโลยีเหมาะสมที่สุดที่มีฟังก์ชันเป้าหมายคือค่าความอ่อนตัวของโครงสร้างและมีเงื่อนไขบังคับคือน้ำหนักของโครงสร้าง ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นการหาส่วนเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบในขั้นตอนแรก และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตกแต่งความละเอียดและเพิ่มส่วนที่จำเป็นบนโครงสร้างที่ได้จากขั้นตอนที่สอง โครงสร้างของชิ้นส่วนยานยนต์ที่ได้รับจากการออกแบบสามระดับนี้ถูกทำการวิเคราะห์เชิงไฟไนท์อีเลเมนต์ [2] อย่างละเอียดเพื่อนำไปเป็นชิ้นงานต้นแบบต่อไป

2. การหาค่าเหมาะสมสุด

ปัญหาการหาค่าเหมาะสมสุดในที่นี้คือการหาค่าต่ำสุด (Minimization) ซึ่งปัญหาทั่วๆไปสามารถเขียนได้ดังนี้ [1]

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) \qquad (1)$$

subject to

$$g_i(\mathbf{x}) \le 0$$
$$h_j(\mathbf{x}) = 0$$
$$\mathbf{x}^l \le \mathbf{x} \le \mathbf{x}^u$$

เมื่อ $\mathbf{x}$ คือตัวแปรออกแบบ

$f(\mathbf{x})$ คือฟังก์ชันเป้าหมาย (objective function)

$g_i(\mathbf{x})$ คือเงื่อนไขบังคับแบบอสมการ

$h_j(\mathbf{x})$ คือเงื่อนไขบังคับแบบสมการ

$\mathbf{x}^l$ คือขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบ

และ $\mathbf{x}^u$ คือขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบ

สำหรับการหาโทโปโลยีเหมาะสมที่สุดของโครงสร้าง พิจารณารูปที่ 1 ซึ่งเป็นโดเมนการออกแบบเริ่มต้นของโครงสร้างที่มีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือต้องการให้โครงสร้างรับภาระและมีจุดรองรับตามต้องการ ในโดเมนการออกแบบอาจมีช่องว่างหรือพื้นที่ที่ไม่อนุญาตให้เกิดการเปลี่ยนแปลงดังรูป ปัญหาการออกแบบทางโทโปโลยีคือโครงสร้างควรจะมีรูปร่างเป็นอย่างไรภายใต้โดเมนการออกแบบที่กำหนดให้เพื่อให้ได้ค่าฟังก์ชันเป้าหมายเหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ เนื่องจากเป็นปัญหาการออกแบบที่ประยุกต์ใช้ในช่วงเริ่มต้นของกระบวนการออกแบบ ค่าเงื่อนไขบังคับในการออกแบบ (หรือเกณฑ์การออกแบบ) เช่น ความเค้นหรือการล้า สามารถตัดออกได้ ปัญหาการหาโทโปโลยีเหมาะสมสุดของโครงสร้างที่นิยมใช้กันคือ [3]

$$\min_{\boldsymbol{\rho}} F(\boldsymbol{\rho}) \qquad (2)$$

subject to

$$m(\rho) = r.m(1)$$
$$\mathbf{0} < \boldsymbol{\rho}^{\min} \le \boldsymbol{\rho} \le \boldsymbol{\rho}^{\max}$$

เมื่อ $\boldsymbol{\rho}$ คือตัวแปรออกแบบทางโทโปโลยีซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงเค้าโครงเบื้องต้นของโครงสร้าง

$\boldsymbol{\rho}^{\min}$ และ $\boldsymbol{\rho}^{\max}$ คือขอบเขตล่างและบนของตัวแปรออกแบบตามลำดับ

m คือมวลของโครงสร้างที่ $\boldsymbol{\rho}$ ใดๆ

m_0 คือมวลทั้งหมดของโครงสร้างเริ่มต้น

และ r คืออัตราส่วนการลดน้ำหนักของโครงสร้างเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้น

จากปัญหาการออกแบบ (2) อาจกล่าวได้ว่า การหาโทโปโลยีเหมาะสมสุดคือศิลปะการประยุกต์ใช้เนื้อวัสดุที่มีจำกัดเพื่อบรรลุเป้าหมายเหมาะสมสุด โดยการประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีเลเมนท์เมื่อโดเมนการออกแบบถูกแบ่งออกเป็นอีเลเมนท์เล็กๆตัวแปรออกแบบคือความหนาแน่นของอีเลเมนท์เหล่านั้น นั่นหมายความว่าเมื่อได้รับผลเฉลยเหมาะสมสุดแล้วอีเลเมนท์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงขอบเขตล่างของตัวแปรออกแบบจะเกิดเป็นช่องว่างบนโครงสร้างส่วนอีเลเมนท์ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับขอบเขตบนของตัวแปรออกแบบหมายถึงเนื้อวัสดุบนโครงสร้างเมื่อมองรวมกันทุกอีเลเมนท์จะได้โครงร่างเบื้องต้นหรือโทโปโลยีของโครงสร้างตามต้องการ ค่า $\boldsymbol{\rho}^{\min}$ ต้องมีค่าเป็นบวกและเข้าใกล้ศูนย์ สาเหตุที่ต้องใช้ $\boldsymbol{\rho}^{\min}$ แทนค่าศูนย์เพื่อป้องกันการเกิดซิงกูลาริตี้ในเมตริกซ์สทิฟเนสของโครงสร้าง วิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดที่นิยมใช้คือวิธีเกณฑ์ความเหมาะสมที่สุด (Optimality Criteria Method, OCM) จากปัญหาการหาค่าเหมาะสมสุด (2) ผลเฉลยเริ่มต้นคือ $\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{\rho}^{\max}$ ทำการเปลี่ยนแปลงค่าผลเฉลยแบบวนซ้ำจนผลเฉลยหรือตัวแปรออกแบบลู่เข้าสู่ผลเฉลยเหมาะสมสุด การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรออกแบบแบบวนซ้ำสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (3) [4]

$$\rho_e^{new} = \begin{cases} \max(\rho_e^{\min}, \rho_e^{old} - l) \\ \text{if } \rho_e^{old} B_e^{\eta} \le \max(\rho_e^{\min}, \rho_e^{old} - l) \\ \rho_e^{old} B_e^{\eta} \text{ if } \max(\rho_e^{\min}, \rho_e^{old} - l) \\ < \rho_e^{old} B_e^{\eta} < \min(\rho_e^{\max}, \rho_e^{old} + l) \\ \min(\rho_e^{\max}, \rho_e^{old} + l) \\ \text{if } \rho_e^{old} B_e^{\eta} \ge \min(\rho_e^{\max}, \rho_e^{old} + l) \end{cases} \qquad (3)$$

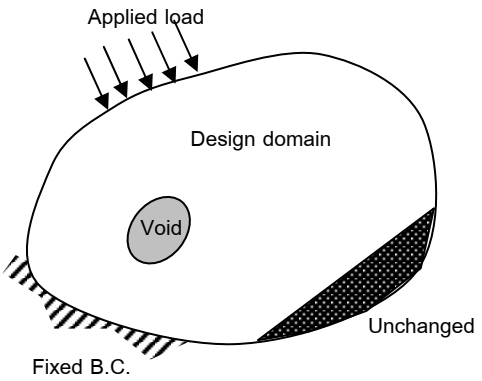
เมื่อ

$$B_e = \max\left(-\frac{\partial F}{\partial \rho_e}, 0\right) \Big/ v\frac{\partial m}{\partial \rho_e}$$

l เรียกว่าขอบเขตการเปลี่ยนแปลง

η คืออัตราการหน่วงใช้ป้องกันการลู่เข้าก่อนเวลาอันควร

v คือตัวคูณลากรานจ์



รูปที่ 1 การหาโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด

ปัญหาการออกแบบโทโปโลยีของโครงสร้างที่นิยมคือการหาค่าความแข็งเชิงสถิตของโครงสร้างสูงสุด (Static stiffness maximization) ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นการหาค่าความอ่อนตัวของโครงสร้างต่ำสุด (Structural compliance minimization) ฟังชั่นเป้าหมายสามารถแสดงได้ดังนี้

$$c(\boldsymbol{\rho}) = \mathbf{U}^T\mathbf{K}\mathbf{U} = \sum_{e=1}^{N} \rho_e \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (4)$$

เมื่อ $\mathbf{U}$ คือเวคเตอร์การกระจัดของโครงสร้าง

$\mathbf{K}$ คือเมตริกซ์สทิฟเนสของโครงสร้าง

$\mathbf{u}_e$ คือเวคเตอร์การกระจัดของจุดต่อ (nodes) ของอีเลเมนต์ที่ e

$\mathbf{k}_e$ คือเมตริกซ์สทิฟเนสของอีเลเมนต์ที่ e

การใช้สมการ (4) โดยตรงอาจส่งผลให้เกิดปัญหาที่เรียกว่าความหนาแน่นปานกลาง (Intermediate density) บนผลเฉลยเหมาะสมสุดซึ่งไม่เป็นที่ปรารถนา ดังนั้นเพื่อให้ผลเฉลยโทโปโลยีเหมาะสมสุดเกิดรูปร่างที่มีช่องว่างหรือเป็นเนื้อวัสดุเท่านั้น ควรมีการเพิ่มพารามิเตอร์ปรับแก้ (Penalty parameter, p) ในการคำนวณค่าความอ่อนตัวดังนี้

$$c(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{e=1}^{N} \rho_e^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (5)$$

ซึ่งสามารถคำนวณค่าอนุพันธ์ได้เป็น

$$\frac{\partial c}{\partial \rho_e} = p\rho_e^{(p-1)} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e \quad (6)$$

แผนการเชิงตัวเลขนี้เรียกว่า SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) [3] สามารถใช้ลดจำนวนอีเลเมนท์ที่มีความหนาแน่นปานกลางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากการหาค่าความอ่อนต่ำสุดแล้ว การหาค่าความแข็งเชิงพลวัตก็เป็นที่นิยมประยุกต์ใช้ ค่าความแข็งเชิงพลวัตในที่นี้คือค่าไอเก้น (Eigenvalue) ของระบบโครงสร้างซึ่งในกรณีของระบบเชิงเส้นสามารถหาได้จากการแก้ปัญหาค่าไอเก้น [5]

$$(\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M})\overline{\mathbf{U}}_i = \mathbf{0} \quad (7)$$

เมื่อ $\mathbf{M}$ คือเมตริกซ์มวลของโครงสร้าง

และ $\overline{\mathbf{U}}_i$ คือเวคเตอร์ไอเก้น (Eigenvector) ของค่าไอเก้นที่ i, λ_i

ค่าอนุพันธ์ของค่าไอเก้นที่ i สามารถคำนวณได้จาก [6]

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \rho_e} = \frac{\overline{\mathbf{U}}_i^T \left(\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial \rho_e} - \lambda_i \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \rho_e} \right) \overline{\mathbf{U}}_i}{\overline{\mathbf{U}}_i^T \mathbf{M} \overline{\mathbf{U}}_i} \quad (8)$$

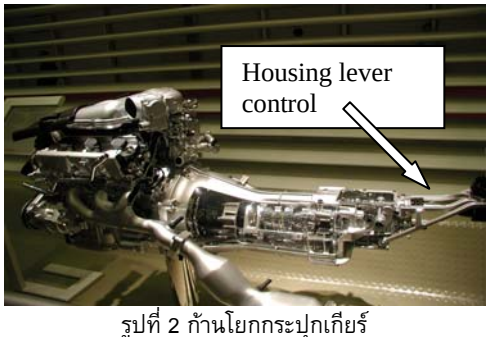
ถ้าแบบจำลองไฟไนท์อีเลเมนต์ของโครงสร้างมี N องศาอิสระ การแก้สมการ (7) จะได้ค่าไอเก้นและเวคเตอร์ไอเก้นที่สอดคล้องกัน N ชุด ในการออกแบบโทโปโลยีเหมาะสมสุดนิยมใช้ผลรวมของค่าไอเก้นต่ำสุดจำนวนหนึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบเป็นคนกำหนด

นอกจากปัญหาความหนาแน่นปานกลางแล้วยังมีปัญหาอื่นๆอีกในกระบวนการการหาคำตอบการออกแบบโทโปโลยีเช่น ปัญหาการเกิดตาหมากรุกซึ่งเป็นผลมาจากความไม่เสถียรของระเบียบวิธีไฟไนท์อีเลเมนท์ รูปร่างของโครงสร้างที่มีตาหมากรุกไม่สามารถสร้างในความเป็นจริงได้ ได้มีการพัฒนาแผนการเชิงตัวเลขขึ้นมาเพื่อแก้ไขการเกิดตาหมากรุกที่เป็นที่รู้จักและนิยมใช้เช่นเทคนิคการกรองค่าอนุพันธ์ (Derivative filtering technique) [4] การเพิ่มเงื่อนไขบังคับตาหมากรุกในปัญหาการออกแบบ (Checkerboard constraint) [7] การใช้ตัวแปรออกแบบโทโปโลยีที่กรองแล้ว (Filtered topological design variables) [8] และอีกวิธีหนึ่งคือการใช้อีเลเมนท์ชนิดที่มีอันดับสูงกว่า (Higher order element type) [3] วิธีหลังสุดได้มีการประยุกต์ใช้ในในโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS

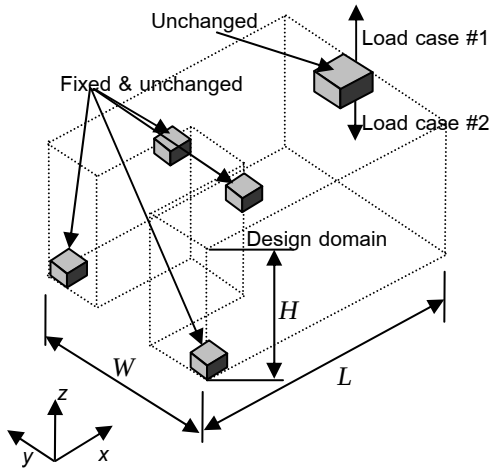
3. กรณีศึกษาการออกแบบ

ในบทความนี้ได้นำชิ้นงานตัวอย่างของชิ้นส่วนยานยนต์มาเป็นแบบสาธิตกระบวนการออกแบบนั่นคือ ก้านโยกกระปุกเกียร์ (Housing Control Lever) โดยหน้าที่ของชิ้นส่วนนี้คือเป็นตัวเชื่อมระหว่างเครื่องยนต์กับกระปุกเกียร์ดังรูปที่ 2 ชิ้นส่วนได้รับแรงพลวัตจากเครื่องยนต์และจากแรงภายนอกอื่นที่มากระทำเช่นความขรุขระของผิวถนน ฯลฯ การออกแบบชิ้นส่วนนี้ในทางปฏิบัติต้องคำนึงถึงเกณฑ์การออกแบบหลายอย่างเช่น เงื่อนไขเชิงสถิตชิ้นส่วนไม่เกิดการเสียหายจากแรงสถิตที่กระทำ เงื่อนไขทางพลวัตโครงสร้างต้องไม่เกิดกำธรขณะทำงาน การส่งถ่ายแรงแบบฮาร์โมนิก (Force transmissibility) ไปยังผู้โดยสารหรือชิ้นส่วนอื่นต้องอยู่ในอัตราที่ต่ำ [9] อายุการล้าจะต้องสูงพอ เป็นต้น

สำหรับการออกแบบนั้นจะสมมติว่าผู้ออกแบบยังไม่รู้มาก่อนว่าชิ้นส่วนมีรูปร่างอย่างไรดังนั้นจึงเริ่มต้นด้วยการหาโทโปโลยี (หรือเรียกว่าเค้าโครงเบื้องต้น) เหมาะสมสุด ในกระบวนการออกแบบสามารถแบ่งออกเป็นสามระดับขั้นดังนี้ ในขั้นตอนแรกจะเป็นการหาโทโปโลยีหรือโครงร่างของชิ้นส่วน รูปที่ 3 แสดงโดเมนการออกแบบและส่วนพื้นที่ต่างๆเช่นพื้นที่ที่เป็นจุดรองรับแบบยึด (Fixed support) ซึ่งในที่นี้พิจารณาว่าชิ้นส่วนยึดติดกับเครื่องยนต์และมีแรงกระทำที่ปลายชิ้นส่วนอีกด้านหนึ่งดังรูป (การตั้งเงื่อนไขในลักษณะนี้เพื่อสะดวกในการประยุกต์แรงกระทำบนโครงสร้าง) สำหรับเงื่อนไขการออกแบบนี้กำหนดให้ฟังก์ชันเป้าหมายคือผลรวมของค่าความอ่อนตัวจากกรณีของแรงกระทำ (Load Cases) สองกรณีคือขึ้นกับลงในแนวดิ่งที่ปลายชิ้นส่วนตามรูป นอกจากนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของส่วนปลายของชิ้นส่วน ได้ทำการคงรูปบางพื้นที่ (Unchanged regions) รวมทั้งหมด 5 จุดดังแสดงในรูปที่ 3 ในระดับการออกแบบนี้ใช้อีเลเมนท์แบบกล่องสี่เหลี่ยม 20 จุดต่อเพื่อความง่ายในการแบ่งกริดและลดการเกิดตาหมากรุกในโทโปโลยี ตัวแปรออกแบบคือค่าความหนาแน่นเสมือน (Pseudo-density) การเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรออกแบบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังในอีเลเมนท์นั้นๆ



รูปที่ 2 ก้านโยกกระปุกเกียร์



รูปที่ 3 โดเมนการออกแบบโทโปโลยีขั้นที่หนึ่ง

ในระดับที่สอง รูปร่างที่ได้จากขั้นตอนแรกถูกนำมาเป็นโครงร่างเบื้องต้นโดยปัญหาการออกแบบคือการหาค่าความแข็งเชิงพลวัตสูงสุด กำหนดให้โครงสร้างที่ได้จากการออกแบบระดับที่หนึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การออกแบบในขั้นตอนนี้คือการหาโทโปโลยีของตัวเสริมความแข็งแรง (Stiffeners) ของโครงสร้างจากขั้นตอนแรก ในขั้นตอนนี้ใช้อีเลเมนท์แบบปิระมิดฐานสามเหลี่ยม 10 จุดต่อเพื่อความสะดวกในการแบ่งกริดและลดปัญหาการเกิดตาหมากรุก ตัวแปรออกแบบคือค่าความหนาแน่นเสมือน (Pseudo-density) การเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรออกแบบส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมดูลัสของยังและความหนาแน่นในอีเลเมนท์นั้นๆ ค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ

obj1 = λ_1 ค่าไอเก้นค่าแรก (ต่ำสุด)

obj2 = $\lambda_1 + \lambda_2$ ผลรวมของค่าไอเก้นต่ำสุดสองค่าแรก

obj3 = $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ ผลรวมของค่าไอเก้นต่ำสุดสามค่าแรก

ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการออกแบบละเอียดของโครงสร้างที่ได้มาจากการออกแบบระดับที่สอง ผลเฉลยการออกแบบในระดับที่หนึ่งและสองโดยทั่วไปจะไม่มีความละเอียดมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนและชนิดของอีเลเมนท์ที่ใช้ ดังนั้นในการออกแบบระดับสุดท้ายจะเป็นการตกแต่งทำให้พื้นผิวของชิ้นงานเรียบและตัดบางส่วนที่ไม่เหมาะสมในการสร้างชิ้นงานจริงออก นอกจากนี้ยังต้องติดตัวยึด (Attachments) ที่ใช้เชื่อมต่อตัวชิ้นส่วนกับเครื่องยนต์และกระปุกเกียร์สำหรับใช้ในงานจริง เมื่อตกแต่งปรับปรุงชิ้นส่วนเรียบร้อยแล้วทำการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีเลเมนท์ของโครงสร้างสุดท้ายอย่างละเอียดพร้อมทั้งปรับเปลี่ยนบางเล็กน้อยเพื่อให้ได้ชิ้นส่วนที่สอดคล้องกับเกณฑ์การออกแบบทั้งหมด

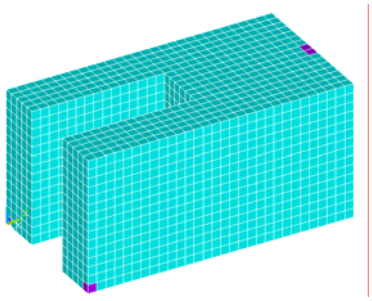
วัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้คือ Aluminum 6061-T6 โดยมีค่าคุณสมบัติทางวัสดุดังต่อไปนี้คือ

Modulus of Elasticity	7.3×10^{10}	N/m^2
Poisson's Ratio	0.35	
Mass Density	2700	kg/m^3
Yield Strength	2.76e8	N/m^2

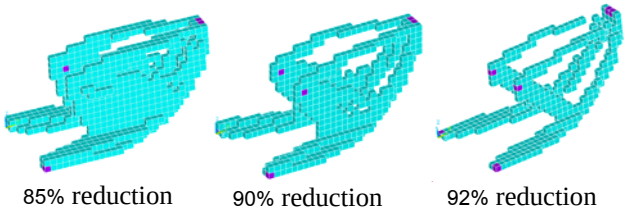
กำหนดอัตราส่วนของขอบเขตชิ้นงานเริ่มต้น (รูปที่ 3) เป็น $W{:}L{:}H$ = 16:30:15

4. ผลการออกแบบ

การแบ่งกริดของโดเมนการออกแบบระดับที่หนึ่งแสดงในรูปที่ 4 ผลเฉลยโทโปโลยีเหมาะสมที่สุด (ค่าความอ่อนตัวเนื่องจากแรงกระทำทั้งสองกรณีต่ำสุด) ที่เปอร์เซ็นต์การลดน้ำหนัก r = 0.85, 0.9 และ 0.92 แสดงในรูปที่ 5 ทำการเลือกเอาผลเฉลยโทโปโลยีเหมาะสมที่สุดเมื่ออัตราการลดมวลเป็น 0.92 เป็นต้นแบบสำหรับการหาค่าความแข็งเชิงพลวัตในการออกแบบระดับที่สอง เกณฑ์ในการเลือกครั้งนี้คือต้องการโครงสร้างที่มีรูปทรงคล้ายเฟรม (Frame) และมีน้ำหนักน้อย

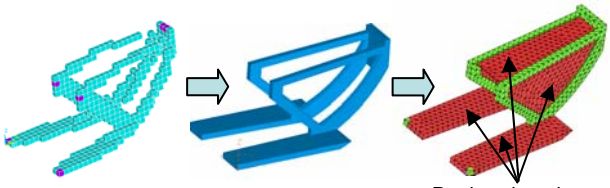


รูปที่ 4 การแบ่งกริดของโดเมนการออกแบบทางโทโปโลยี



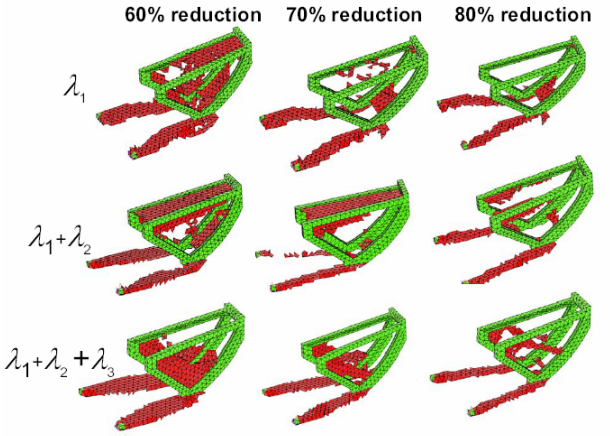
รูปที่ 5 ผลเฉลยโทโปโลยีของการออกแบบขั้นที่หนึ่ง

เนื่องจากรูปทรงที่ได้จากขั้นตอนแรกจะมีความละเอียดน้อย ทำการตกแต่งผิวให้เรียบโดยใช้หลักการอินเตอร์โปเลชัน และคำนึงถึงความง่ายในการขึ้นรูปจริง จะได้ชิ้นงานตามรูปที่ 6 และกำหนดโดเมนการออกแบบส่วนเสริมความแข็งแรงเพื่อทำการหาค่าความแข็งเชิงพลวัตสูงสุดดังแสดงในรูป



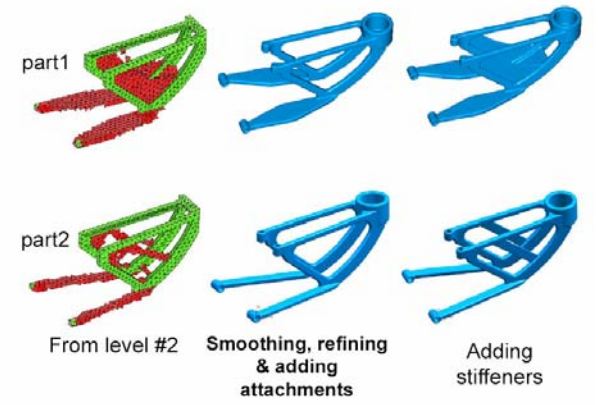
รูปที่ 6 โดเมนการออกแบบระดับที่สอง

ผลการออกแบบเมื่อประยุกต์ใช้ obj1, obj2 และ obj3 ที่อัตราการลดมวล 0.6 0.7 และ 0.8 แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งส่งผลให้เกิดส่วนเสริมความแข็งแรงให้กับโครงสร้างจากการออกแบบระดับที่หนึ่งหลากหลายรูปแบบ ในที่นี้เลือกผลเฉลยในกรณีของการใช้ obj3 ที่อัตราส่วนการลดมวล 0.6 และ 0.8 เพราะเป็นรูปทรงที่เหมาะแก่การนำมาตกแต่งและขึ้นรูปใช้งานจริงได้มากที่สุดโดยเรียกชิ้นส่วนทั้งสองว่า part1 และ part2 ตามลำดับ



รูปที่ 7 ผลเฉลยทางโทโปโลยีเหมาสมสุดของการออกแบบระดับที่สอง

รูปที่ 8 แสดงผลการออกแบบละเอียดของชิ้นงาน part1 และ part2 ขั้นตอนนี้เป็นการนำผลเฉลยในขั้นตอนที่สองมาตกแต่งให้ผิวเรียบและมีความคล้ายคลึงกับโทโปโลยีต้นแบบให้มากที่สุด จากนั้นทำการเพิ่มตัวยึดที่ใช้เชื่อมต่อกับเครื่องยนต์และกระปุกเกียร์เข้าไปในโครงสร้าง ผลการออกแบบสุดท้ายของ part1 และ part2 แสดงในคอลัมน์สุดท้ายในรูปที่ 8



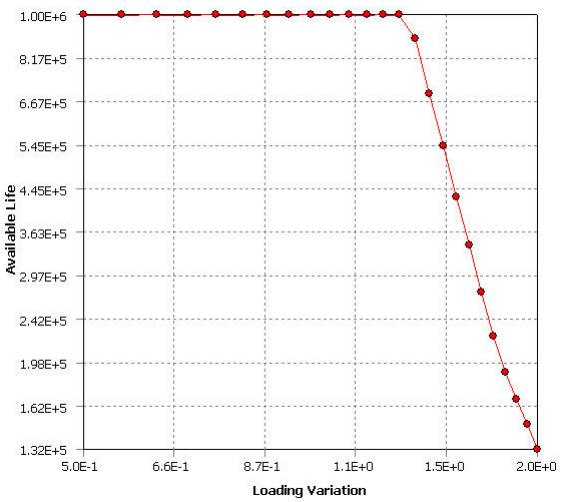
รูปที่ 8 ผลเฉลยของการออกแบบละเอียดในระดับที่สาม

5. การวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีเลเมนต์ของชิ้นงาน

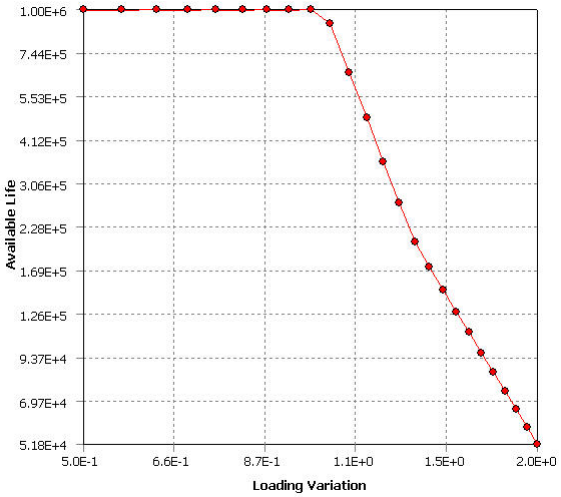
เมื่อได้ชิ้นงาน part1 และ part2 ที่ผ่านการออกแบบสามขั้นตอนแล้ว ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนท์อย่างละเอียด การวิเคราะห์นี้ประกอบด้วย การวิเคราะห์เชิงสถิตโดยพิจารณาให้ชิ้นส่วนถูกยึดกับเครื่องยนต์เป็นเงื่อนไขขอบเขตและแรงสถิตกระทำในแนวดิ่ง (แกน *z*) ที่ปลายยึดด้านกระปุกเกียร์ 3000 N จากนั้นทำการวิเคราะห์การล้าด้วยเงื่อนไขการรับภาระดังกล่าว และทำการวิเคราะห์การสั่นอิสระของชิ้นงาน ในการวิเคราะห์ใช้แบบจำลองไฟไนท์อีเลเมนท์เชิงเส้นซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

คุณสมบัติเชิงกล	**part1**	**part2**
มวล (kg)	1.13555	0.86331
ปริมาตร (mm^3)	420575	319743
การวิเคราะห์เชิงสถิต		
ความเค้นสูงสุด (Von-misses) (N/m^2)	6.39×10^7	8.25×10^7
ความเครียดสูงสุด	8.75×10^{-4}	1.13×10^{-3}
ระยะยุบตัวสูงสุด (mm)	1.52	0.216
การวิเคราะห์การล้า		
ค่าความปลอดภัย	1.35	1.04
การวิเคราะห์การสั่นอิสระ		
โหมด 1 (Hz) 1^{st} bending in *xy*	439.85	286.12
โหมด 2 (Hz) 1^{st} Torsion	591.64	647.29
โหมด 3 (Hz) Bending in *xz*	1122.66	976.30
โหมด 4 (Hz) 2^{nd} Torsion	1413.47	1212.74
โหมด 5 (Hz) Stretching in *x*	1420.86	1287.42

รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุล้ากับอัตราส่วนของแรงกระทำของ part1 ส่วนรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุล้ากับอัตราส่วนของแรงกระทำของ part2 จากผลการวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ชิ้นส่วนทั้งสองมีความปลอดภัยในการใช้งาน part1 มีความแข็งแรงสูงกว่า part2 อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาน้ำหนักของโครงสร้างพบว่า part2 มีน้ำหนักน้อยกว่าซึ่งถือว่าได้เปรียบถ้าคิดถึงราคาในการผลิต



รูปที่ 9 กราฟ log-log แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุล้ากับอัตราส่วนของแรงกระทำของ part1



รูปที่ 10 กราฟ log-log แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอายุล้ากับอัตราส่วนของแรงกระทำของ part2

6. สรุปและวิจารณ์และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนำเสนอกระบวนการออกแบบสามระดับเพื่อประยุกต์ใช้กับงานออกแบบชิ้นส่วนจริงของยานยนต์ จากผลการออกแบบที่เป็นกรณีศึกษาพบว่า กระบวนการออกแบบที่นำเสนอนี้มีประสิทธิภาพสูงมาก และเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในกรณีที่ผู้ออกแบบรู้เฉพาะหลักการทำงานของชิ้นส่วนแต่ไม่เคยเห็นรูปร่างของชิ้นงานมาก่อน ขั้นตอนในการออกแบบแต่ละขั้นไม่สลับซับซ้อนเกินไป นอกจากนี้กระบวนการออกแบบดังกล่าวยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบชิ้นส่วนอื่นๆของยานยนต์หรือแม้กระทั่งการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา ข้อควรพัฒนาเพิ่มเติมและแก้ไขคือ ควรมีการใช้จำนวนอีเลเมนท์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้ได้โทโปโลยีที่มีรายละเอียดสูงและถูกต้อง ควรใช้อีเลเมนต์แบบกล่องสี่เหลี่ยมมากกว่าอีเลเมนท์แบบปิระมิดซึ่งจะได้โทโปโลยีที่เหมาะสมกว่า ควรมีการประยุกต์ใช้การหารูปร่างและขนาดเหมาะสมสุด (Shape and sizing optimization) เพื่อเพิ่มสมรรถนะของชิ้นงานให้สูงขึ้นไปอีก และควรพิจารณาผลกระทบจากการส่งถ่ายแรงแบบฮาร์โมนิกต่อผู้โดยสารและต่อการล้าของตัวชิ้นงานเอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บจ.นาริมูเนะ เทคโนโลยี เอ็นจิเนียริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด ที่สนับสนุนอนุเคราะห์ชิ้นงานต้นแบบเป็นต้นแบบในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Robinson G.M. and Keane A.J. “A Case for Multi-Level Optimisation in Aeronautical Design,” Proceeding of Multidisciplinary Design and Optimisation, RAeS, UK, 1998, pp. 9.1-9.6.

[2] ศ.ดร. ปราโมทย์ เดชะอำไพ *ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม* สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[3] M.P. Bensϕe and O. Sigmund, Topology Optimization Theory, Method and Applications, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2003.

[4] O. Simund, “A 99 Line Topology Optimization Code Written in MATLAB,” Struct. Multidisc. Optim, Vol. 21, 2001, pp. 120 – 127.

[5] รศ.ดร. เดช พุทธเจริญทอง *การวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์* ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ

[6] R.L. Fox, and M.P. Kapoor, “Rate of Change of Eigenvalues and Eigenvectors,” AIAA, Vol. 6, 1968, pp. 2426-2492.

[7] A. Poulsen, “A simple Scheme to Prevent Checkerboard Patterns and One-Node Connected Hinges in Topology Optimization,” Struct. Multidisc. Optim, Vol. 24, 2002, pp. 396 – 399.

[8] S. Bureerat, “Structural Compliance Minimisation Using Approximated Distribution of Material Density,” KKU-Engineering Conference, 2004, Khon Kaen University.

[9] S. Bureerat and S. Khamsuwan, “Structural Vibration Alleviation via Evolutionary Optimisation,” 18th ME-NETT, Khon Kaen, Thailand, 2004