

การออกแบบระบบการตามกระดูกสันหลังจากทางด้านหลังด้วย
วิธีการมัลติออปเจกทีฟโทโปโลยีออฟติไมเซชัน
Multi-Objective Topology Optimization for
Posterior Fixation Device of Lumbar Spine

ชญานันท์ วิรุฬห์ศรี^{1*} และ ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6586 โทรสาร 0-2252-2889 *อีเมลล์: juksanee.v@chula.ac.th

Chanyaphan Virulsri^{1*} and Pairat Tangpornprasert²

^{1,2} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330,
Thailand, Tel: 0-2218-6586, Fax: 0-2252-2889, *E-mail: juksanee.v@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการตามกระดูกสันหลังอันเนื่องมาจากหมอนรองกระดูกเสื่อม (Degenerative Disc Disease) มักจะใช้วิธีการเชื่อมกระดูกสันหลัง (Spinal fusion) แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นหลังจากการเชื่อมกระดูกสันหลังจะยึดกันแข็งเกินไป ก่อให้เกิดความเค้นสูงมากและมีโอกาสสูงที่จะทำให้หมอนรองกระดูกในท่อนที่ติดกันเกิดความเสื่อมต่อไป [1,2] ดังนั้นบทความนี้จึงนำเสนอแนวความคิดในการออกแบบระบบการตามกระดูกสันหลังจากทางด้านหลังที่สามารถเลียนแบบการเคลื่อนที่ของธรรมชาติ และมีความยืดหยุ่นมากกว่าหลักการยึดกระดูกสันหลังด้วยการเชื่อมกระดูกสันหลัง โดยหลักการที่นำเสนอจะใช้วิธีมัลติออปเจกทีฟโทโปโลยีออฟติไมเซชันในการจำลองหารูปร่างของแผ่นตามกระดูกสันหลังจากทางด้านหลังที่สามารถเลียนแบบค่า Stiffness ในหลายทิศทางของหมอนรองกระดูกสันหลังธรรมชาติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำหลักการที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับข้อมูล Stiffness ของกระดูกสันหลังของวัวที่ได้จากการทดลอง จากผลการคำนวณพบว่าได้รูปร่างของแผ่นตามกระดูกจากทางด้านหลังที่ได้ค่า Stiffness ตรงกับค่าที่ได้จากการทดลองในหลายทิศทาง ซึ่งแนวคิดในการออกแบบแสดงให้เห็นว่าเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเป็นระบบตามกระดูกสันหลังสำหรับมนุษย์ต่อไป

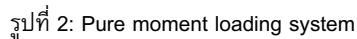
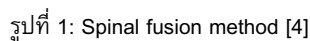
Abstract

Recently, in order to heal the problem of degenerative disc disease, the major approach is spinal fusion. Nevertheless, the spinal fusion causes the fixed spine too rigid, carrying high stress at levels adjacent to the level fused. This paper is to propose a new conceptual design of posterior fixation device that is more flexible with natural motion than spinal fusion concept. In this

proposed concept, a multi-objective topology optimization is applied to simulate a shape and structure of a posterior plate that satisfy the stiffness of the removed intervertebral disc in many directions. In this paper, the proposed concept is applied for finding the shape of posterior plate, the stiffness of which conforms to the stiffness from the experiment data of cow's lumbar spine. From simulation results, the obtained design shape of the posterior plate has most of stiffness values close on the experimental stiffness. Therefore, the proposed conceptual design provides an effective scheme to be further developed for design of the fixation device for the human spine.

1. บทนำ

ภาวะหมอนรองกระดูกสันหลังเสื่อม นับเป็นปัญหาที่พบบ่อยที่สุดในผู้ป่วยที่มีอาการปวดหลังเรื้อรัง โดยประมาณหนึ่งในสามของผู้ป่วยของแผนกออร์โธปิดิกส์ทั่วโลกจะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับหมอนรองกระดูกสันหลังเสื่อม [3] การรักษาโดยทั่วไปมักใช้วิธีการเชื่อมกระดูกสันหลัง (Spinal fusion) [4] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งทำให้สูญเสียการเคลื่อนไหวอย่างเป็นธรรมชาติของกระดูกสันหลังไป อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการทำการรักษาด้วยวิธีการเปลี่ยนใส่หมอนรองกระดูกเทียม (Artificial Disc) [3] ซึ่งการรักษาด้วยวิธีการนี้สามารถช่วยให้เกิดการเคลื่อนไหวได้เป็นธรรมชาติมากขึ้นหลังการผ่าตัด แต่การเปลี่ยนหมอนรองกระดูกเทียมจะต้องทำการผ่าตัดจากทางด้านหน้า (Anterior approach) ซึ่งมีรายงานว่าต้องอาศัยความเชี่ยวชาญจากแพทย์สูง และค่อนข้างเสี่ยงต่ออันตรายในการทำการผ่าตัด เนื่องจากการผ่าตัดทางด้านหน้าต้องผ่านเส้นเลือดใหญ่จากหัวใจ หากผ่าตัดผิดพลาดอาจทำให้เลือดออกมากจนเสียชีวิตได้ [5]

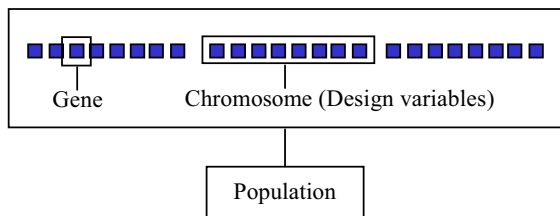


រូប ៣: Finite element model before performing topology optimization

3.2 มัลติออฟเจกทีฟอพอติไมเซชันโดยใช้หลักการของ GA

Binary genetic algorithm (GA) เป็นวิธีการที่ช่วยในการทำออฟติไมเซชันที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งมีหลักการที่สามารถสร้างและเลือกสรรตลอดจนปรับปรุงสายพันธุ์ผ่านกระบวนการวิวัฒนาการที่เลียนแบบหลักการเลือกในระบบพันธุกรรมของธรรมชาติ โดยหลักการของ GA จะดำเนินการผ่านขั้นตอนของการคัดเลือก (selection) การคลอสโอเวอร์ (crossover) และมิวเตชัน (mutation) โดยทั่วไปเรามักจะเรียกตัวแปร (decision variables) ใน GA ว่าโครโมโซม (chromosomes) ซึ่งแสดงได้ด้วยตัวแปรแบบไบนารี (binary strings) สำหรับ Binary genetic algorithm และเรามักจะเรียกแต่ละบิต (bit) ของโครโมโซมว่า ยีน (gene) ดังแสดงในรูปที่ 4

ระเบียบวิธีมัลติออฟเจกทีฟอพอติไมเซชัน โดยใช้หลักการของ GA จะมีหลักการทำงานด้วยระบบประชากร (population) ซึ่งประกอบไปด้วยหลายโครโมโซม ทำให้สามารถจัดการกับปัญหาที่มีหลายวัตถุประสงค์ได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้อัลกอริทึมของ Deb [7] โดยใช้วิธีการที่เรียกว่า the Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm หรือ NSGA-II [7] เพื่อทำการวิเคราะห์มัลติออฟเจกทีฟอพอติไมเซชัน ผลลัพธ์ของการทำมัลติออฟเจกทีฟอพอติไมเซชันจะประกอบไปด้วยคำตอบจำนวนมากหลายค่าซึ่งแต่ละค่าจะเป็นค่าที่เหมาะสมแล้วทุกค่า (non-dominated optimal solutions) และเรียกชุดคำตอบนั้นว่า Pareto-optimal solutions [7] ในบทความนี้ได้ทำการวิเคราะห์มัลติออฟเจกทีฟอพอติไมเซชัน โดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 4: Representation of gene, chromosome and population in binary genetic algorithms

ตารางที่ 1: Parameters used in optimization

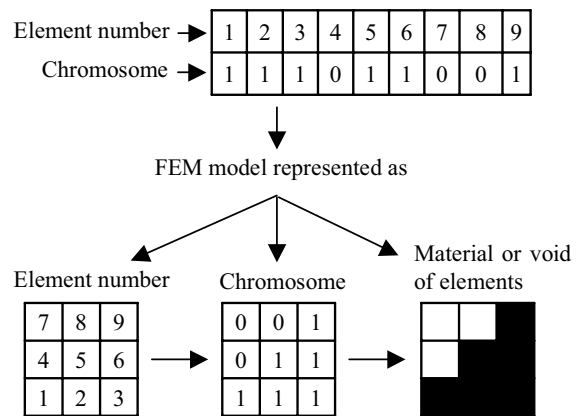
Parameters	Values
Encoding mechanism	Binary
Population size	100
Generation numbers	50
Crossover probability	0.8
Mutation probability	0.005

3.3 โทโปโลยีออฟติไมเซชัน

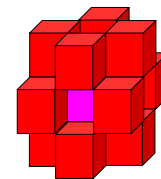
โทโปโลยีออฟติไมเซชัน [8] เป็นวิธีการที่ช่วยในการค้นหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของชิ้นงานที่บรรลุวัตถุประสงค์ในการออฟติไมเซชันที่ต้องการ บทความนี้ได้นำวิธีการ NSGA-II มาประยุกต์เพื่อทำโทโปโลยีออฟติไมเซชัน โดยการประยุกต์ครั้งนี้ได้พิจารณาให้แต่ละยีนของตัวแปรหรือโครโมโซมในแทนการมีอยู่หรือไม่มีของเนื้อชิ้นงานในการทำโทโปโลยีออฟติไมเซชัน [9,10] ดังแสดงในสมการที่ 1

$$x = \begin{cases} 1 & \text{represented a material state of element} \\ 0 & \text{represented a void state of element.} \end{cases} \quad (1)$$

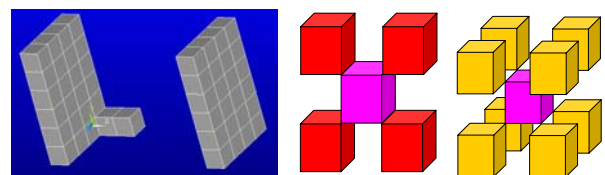
ส่วนรูปที่ 5 เป็นการแสดงการแปลค่าตัวแปรหรือโครโมโซมใน GA เป็นโมเดลของรูปร่างในการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในขั้นตอนของการทำมัลติออฟเจกทีฟอพอติไมเซชัน



รูปที่ 5: Mapping chromosome to finite element model



รูปที่ 6(a) checkerboard patterns



รูปที่ 6 (b) non-connectivity patterns

รูปที่ 6: checkerboard and connectivity analysis

เพื่อให้ได้รูปร่างที่ผ่านการออฟติไมเซชัน สามารถนำไปใช้ได้จริง และมีความง่ายในการทำการผลิต งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาอัลกอริทึมอย่างง่าย เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการเกิดเป็นช่องว่างรูปแบบตารางในเนื้อชิ้นงาน (checkerboard) ปัญหาการเกิดความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงาน (connectivity analysis) และกำจัดรูปร่างในกรณีที่เกิดการเชื่อมกันระหว่างเอลิเมนต์ด้วยเพียงมุม หรือขอบของเอลิเมนต์ซึ่งไม่สามารถรับภาระภายนอกได้ โดยสภาวะที่ถูกกำจัดเหล่านี้ได้แสดงในรูปที่ 6

นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ใช้หลักการของ strain energy filter คือกำจัดบางเอลิเมนต์ที่มีค่า strain energy ต่ำซึ่งหมายความว่าเอลิเมนต์เหล่านั้นไม่มีประสิทธิภาพในการรับภาระ เช่น บริเวณเนื้อชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นปุ่มยื่นออกมา

3.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการทำออฟติไมเซชัน

หลังจากโมเดลของไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกสร้างขึ้นตามการพิจารณาถึงการมีหรือไม่มีของเนื้อชิ้นงานของแต่ละเอลิเมนต์จากตัวแปรหรือโครโมโซมในการทำอัลติออฟเจกทีฟโทโปโลยีออฟติไมเซชัน ดังแสดงในสมการที่ 1 แล้ว ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะได้จากการทำการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในบทความนี้ได้พิจารณาถึงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 3 ฟังก์ชัน ดังแสดงในสมการที่ 2

$$\text{minimize } f_m(x) = 1 - \frac{K_{\text{exp}}^m}{K_{\text{FEM}}^m}, \quad (2)$$

โดย m หมายถึง ทิศทางของ stiffness ได้แก่ lateral bending, flexion-extension bending และ axial rotation

x เป็นตัวแปรหรือโครโมโซมซึ่งแสดงในสมการที่ 1

K_{exp} หมายถึงค่า stiffness ที่ได้จากการทดลอง

K_{FEM} หมายถึงค่า stiffness ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

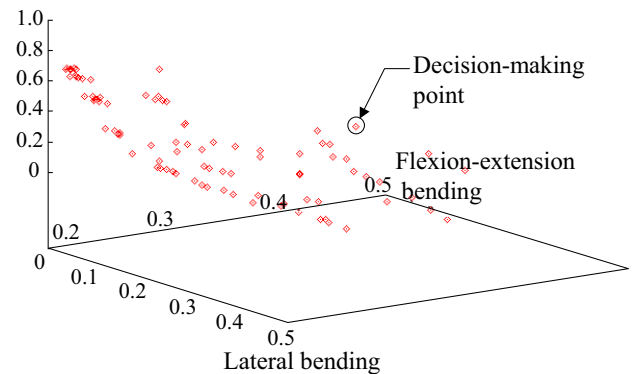
4. ผลลัพธ์ และการอภิปราย

ผลการทดลองของค่า stiffness ในแต่ละทิศทางได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2: Stiffness values in each direction

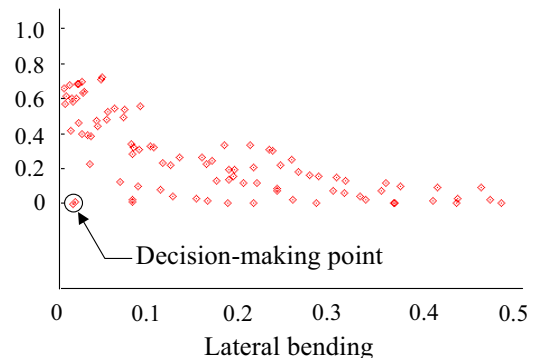
Direction	Stiffness values from experiment	Selected stiffness values from simulations
Lateral bending	1.7	1.7
Flexion-extension Bending	3.0	5.6
Axial rotation	9.8	9.8

Axial rotation



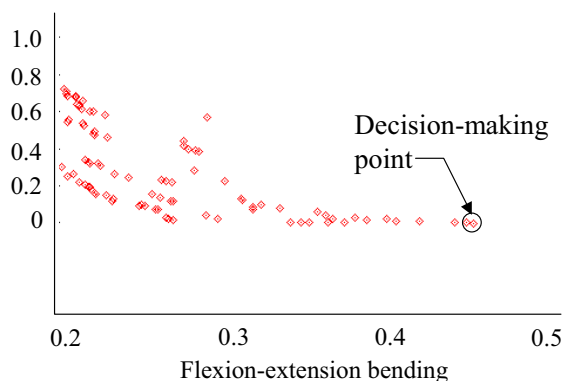
รูปที่ 7(a): The Pareto-optimal solutions

Axial rotation



รูปที่ 7(b): The Pareto solutions projected on axial rotation and lateral bending plane

Axial rotation



รูปที่ 7(c): The Pareto solutions projected on axial rotation and flexion-extension plane

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า stiffness ในทิศทาง lateral bending และทิศทาง flexion-extension bending นั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า stiffness ในทิศทาง axial rotation ดังนั้นจึงมีความยากหากจะทำการออกแบบรูปร่างของแผ่นตามกระดูกสันหลังด้วยการลองผิดลองถูก (trial & error technique) ซึ่งวิธีการมัลติออฟเจกทีฟโทโปโลยีออฟติไมเซชันมีความเหมาะสมในการหารูปร่างสำหรับปัญหาลักษณะนี้ซึ่งเป็นปัญหาที่ประกอบไปด้วยหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ stiffness ในหลายทิศทาง และจากการวิเคราะห์มัลติออฟเจกทีฟโทโปโลยีออฟติไมเซชันทำให้ได้ผลของ Pareto optimal solutions สำหรับทุกฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังแสดงในรูปที่ 7(a) และเพื่อทำให้การวิเคราะห์ผลทำได้ง่ายขึ้น จึงได้แสดงผลใน 2 มิติของภาพฉายของ Pareto optimal solutions ลงบนแกนของฟังก์ชันวัตถุประสงค์แต่ละคู่ดังแสดงในรูปที่ 7(b) และรูปที่ 7(c)

เมื่อพิจารณาถึงฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2 จะพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimize value) จะเกิดขึ้นเมื่อค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เข้าใกล้ค่าศูนย์ และจากผลของ Pareto optimal solutions ในรูปที่ 7(b) จะพบว่าจากการคำนวณครั้งนี้จะได้รูปร่างของแผ่นตามกระดูกสันหลังที่มีค่า stiffness ทั้งในทิศทาง axial rotation และ ทิศทาง lateral bending เหมือนกับการทดลอง เนื่องจากคำตอบของ Pareto optimal solutions สำหรับทั้งสองฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้เข้าสู่จุดเดียวกันคือค่าศูนย์ แสดงว่าระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทิศทาง axial rotation และ ทิศทาง lateral bending นี้ไม่มีความขัดแย้งซึ่งกันและกัน (non-conflicting objectives)

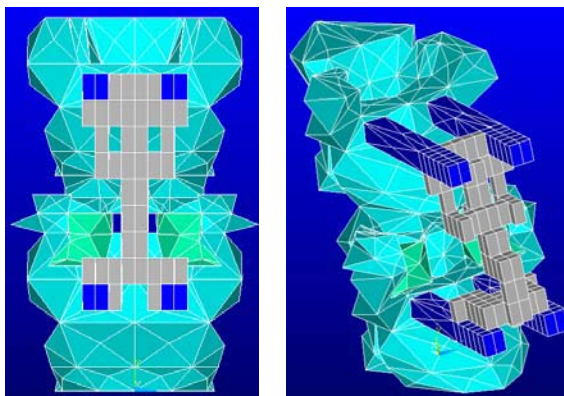
อย่างไรก็ตามรูปที่ 7(c) แสดงให้เห็นว่าเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทิศทาง axial rotation เข้าใกล้ค่าศูนย์ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทิศทาง flexion-extension จะมีค่าห่างจากค่าศูนย์มาก หรือในทางกลับกันเมื่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทิศทาง flexion-extension เข้าใกล้ค่าศูนย์ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทิศทาง axial rotation จะมีค่าห่างจากค่าศูนย์ ซึ่งลักษณะของคำตอบเช่นนี้แสดงให้เห็นว่ามีความขัดแย้ง (tradeoff or conflicting scenarios) ระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในทิศทาง axial rotation และทิศทาง flexion-extension

จากผลของการคำนวณ และการอภิปรายข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการทำมัลติออฟเจกทีฟออฟติไมเซชันมีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้สำหรับแนวความคิดในการออกแบบระบบตามกระดูกสันหลังจากทางด้านหลังในงานวิจัยนี้ เนื่องจากการทำมัลติออฟเจกทีฟออฟติไมเซชันจะแสดงผลของความหลากหลายของคำตอบทั้งหมดที่เหมาะสม ทำให้สามารถอธิบายถึงธรรมชาติของลักษณะของปัญหาที่กำลังวิเคราะห์ได้ เช่น อธิบายว่ามีความขัดแย้งหรือไม่มีความขัดแย้งกันของคำตอบระหว่างแต่ละฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งในกรณีที่มีความขัดแย้งกันระหว่างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะต้องมีการทำการตัดสินใจ (decision-making) เลือกคำตอบที่เหมาะสม

สำหรับการเลือกคำตอบที่เหมาะสมจากผลของ Pareto optimal results ที่ได้สำหรับบทความนี้ คณะผู้วิจัยได้เลือกคำตอบหนึ่งคำตอบซึ่งสามารถให้ค่า stiffness ทั้งในทิศทาง lateral bending และทิศทาง axial rotation เหมือนกับค่าที่ได้จากการทดลองทั้งสองทิศทาง ในขณะที่ค่า stiffness ในทิศทาง flexion-extension bending นั้นค่อนข้างมากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเหตุผลที่ยอมให้ค่าของ stiffness ในทิศทางนี้มีค่ามากกว่าการทดลองเนื่องจากคำนึงถึงประโยชน์ที่จะทำกระดูกสันหลังแต่ละท่อนเกิดการโน้มมาชนกันได้ง่าย

ผลของรูปร่างของแผ่นตามกระดูกสันหลังจากทางด้านหลังจากคำตอบที่ได้ทำการตัดสินใจเลือกได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และค่าของ stiffness ที่ได้จากการคำนวณของรูปร่างที่เลือกนี้ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 เปรียบเทียบกับค่า stiffness ที่ได้จากการทดลอง

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ได้จากบทความนี้นี้ยังคงสามารถทำการปรับปรุงให้ใกล้เคียงกับการทดลองได้มากขึ้น เนื่องจากขนาดของเอลิเมนต์ที่ใช้วิเคราะห์ในบทความนี้ค่อนข้างมีขนาดใหญ่ ซึ่งส่งผลให้รูปร่างของแผ่นตามกระดูกสันหลังที่ทำการวิเคราะห์มีความหนาเกินควรแม้จะคำนวณแล้วเหลือความหนาเพียงความกว้างของหนึ่งเอลิเมนต์ก็ตาม ในอนาคตงานวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงขนาดของเอลิเมนต์ให้เล็กลงเพื่อให้รูปร่าง และผลการคำนวณที่เหมาะสมยิ่งขึ้น หลังจากนั้นจะเป็นการนำแนวความคิดที่นำเสนอในบทความนี้ไปประยุกต์ใช้กับกระดูกสันหลังของมนุษย์ต่อไปในอนาคต



รูปที่ 8 (a): Back view

รูปที่ 8 (b): Oblique view

รูปที่ 8: Optimal structure of posterior plate of the selected solution

5. สรุป

ในบทความนี้ได้นำเสนอแนวความคิดในการออกแบบระบบตามกระดูกสันหลังจากทางด้านหลังรูปแบบใหม่ที่สามารถเลียนแบบการเคลื่อนที่ของธรรมชาติ แนวความคิดที่นำเสนอได้นำไปประยุกต์ใช้กับกระดูกสันหลังของวัว และผลลัพธ์ที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 5.1 แนวความคิดที่นำเสนอสามารถช่วยในการวิเคราะห์หารูปร่างที่เหมาะสมของแผ่นตามกระดูกสันหลังที่เลียนแบบค่า stiffness ของธรรมชาติได้ในหลายทิศทาง
- 5.2 ระเบียบวิธีมัลติออฟเจกทีฟโทโปโลยีออฟติไมเซชันสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในแนวความคิดที่นำเสนอได้อย่างเหมาะสม
- 5.3 แนวโน้มของผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าแนวความคิดที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ต่อเนื่องเพื่อใช้กับกระดูกสันหลังของมนุษย์อย่างมีประสิทธิภาพได้ต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kim, YE., Goel, VK., Weinstein, JN., and Lim, TH., 1991. Effect of disc degeneration at one level on the adjacent level in axial mode. Spine, Vol. 16, pp. 331-35.
- [2] Schlegel, JD., Smith, JA., and Schleusener, RL., 1996. Lumbar motion segment pathology adjacent to thoracolumbar, lumbar, and lumbosacral fusions. Spine, Vol 21, pp.970-981.
- [3] Yingsakmongkol,W., 2006. Total Artificial Disc Replacement. <http://www.thaispinecenter.com/Abstract/discrepla.html/>
- [4] Spine Surgery, PSC, 2006. Bone Grafts. <http://www.spine-surgery.com/>
- [5] Hamblen, D., Apostolou, T., Boeree, N., Kilian Ch., F., Pfeiffer, M. and Pointillart, V., 2006. Dynamic stabilization of the lumbar spine. Orthopaedics Today International, March/April, pp. 1-15
- [6] จักรพันธ์ วิรุพหิศรี, ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ และ Shigeru Tadano 2548. การ Interface ระหว่าง C Program และ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS ในการโทโปโลยีลิตติออปเจคทีฟออปติไมเซชัน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19, ภูเก็ต, ประเทศไทย, 19-21 ตุลาคม
- [7] Deb, K., 2001. Multi-objective optimization using evolutionary algorithms, John Wiley & Sons.
- [8] Bendsoe, M. P., and Sigmund, O., 2004. Topology optimization, Springer, New York.
- [9] Mark, J.J., Colin, C., James, D., Adenike, A., and Kazuhiro, S., 2000. Continuum structural topology design with genetic algorithms. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol 186, pp. 339-56
- [10] Madeira, J.F.A., Rodriques, H., and Pina, H., 2005. Multi-objective optimization of structures topology by genetic algorithms. Advances in Engineering Software, Vol 36, pp. 21-28