

การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้โครงสร้างแผ่นบางแบบแซนด์วิช
เป็นพื้นตู้บรรทุกสินค้าของรถบรรทุกหกล้อ
A Feasibility Study of Using Sandwich Plate Structure
as a Six-wheel Truck's Container Floor

สนธิพีร์ เอ็มมณี^{1*} * กิตติพงษ์ เอกอินทุมาศ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 โทร 0-2470-9108 โทรสาร 0-2470-9111

* อีเมลล์ sontipee.aim@kmutt.ac.th

Sontipee Aimmanee^{1*} Kittipong Ekintumas¹

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi,
126 Prachauthit Road Bangmod Thung Kharu District Bangkok 10140, Thailand, Tel: 0-2470-3997, Fax: 0-2470-9111,

*E-mail: sontipee.aim@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

ตู้บรรทุกสินค้าของรถบรรทุกหกล้อในปัจจุบันจะใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักในโครงสร้างของตู้ เนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งสูง มีคุณสมบัติทนการกระแทกและการขัดสีได้ดี อย่างไรก็ตามเนื่องจากเหล็กเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นสูงจึงทำให้โครงสร้างของตู้มีน้ำหนักมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติทางกลดังกล่าวข้างต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงสร้างของพื้นตู้ซึ่งมีน้ำหนักเกินหนึ่งในสามของน้ำหนักตู้ทั้งหมด ดังนั้นบทความนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการใช้โครงสร้างพื้นตู้บรรทุกแบบแซนด์วิชแทนพื้นตู้เหล็กเพื่อลดน้ำหนักของตู้บรรทุก ซึ่งโครงสร้างพื้นแซนด์วิชในการศึกษาจะมีทั้งหมด 5 ชั้นหลัก คือเหล็กแผ่นบางจำนวน 2 แผ่นที่ชั้นบนสุดและล่างสุด ไม้อัด 2 แผ่นที่ชั้นด้านในถัดมาจากแผ่นเหล็ก และแผ่นรังผึ้งพลาสติก 1 แผ่นเป็นชั้นตรงกลาง ในการศึกษาจะทำการทดสอบแผ่นแซนด์วิชภายใต้สภาวะการดัดแบบ 3 จุดและ 4 จุด และทำการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีคานแซนด์วิชและวิธีทางไฟไนท์อีลีเมนต์เพื่อทำนายการเปลี่ยนรูปเปรียบเทียบกับทดสอบ นอกจากนี้จะใช้ทฤษฎีแผ่นบางในกรณีที่มีคานเสริมความแข็งแรงและวิธีทางไฟไนท์อีลีเมนต์ในการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกเบื้องต้น ซึ่งจากผลการคำนวณพบว่าเมื่อใช้โครงสร้างพื้นตู้บรรทุกแบบแซนด์วิชดังกล่าว น้ำหนักของพื้นตู้บรรทุกจะลดลงถึง 400 กิโลกรัมโดยที่มีคุณสมบัติด้านการรับภาระทางกลไม่น้อยไปกว่าโครงสร้างเดิม

คำสำคัญ ตู้บรรทุกสินค้า, โครงสร้างแบบแซนด์วิช, ทฤษฎีคานแซนด์วิช, วิธีทางไฟไนท์อีลีเมนต์, ทฤษฎีแผ่นบาง

Abstract

Nowadays, steel is used as the main material for containers of six-wheel trucks, because of its high strength, high stiffness, good shock and wear resistances. However, a steel container has significantly excessive weight due to the high density of steel despite possessing the good mechanical properties mentioned, especially floor structure, which weighs more than one third of the whole container. Therefore, the aim of this paper is to study the feasibility of utilizing sandwich construction as the floor structure in order to reduce the empty container's weight. The proposed sandwich construction is composed of five major layers, namely two layers of thin steel plate located on the topmost and bottommost, two layers of ply-wood each next to either steel plate, and a layer of polypropylene honeycomb core in the middle. In this study, specimens of the sandwich are tested under three- and four-point bending conditions and, for comparison, the test conditions are modeled and computed by employing a sandwich beam theory and the finite-element method. In addition, the thin plate theory for a plate with stiffeners case and the finite-element method are applied to design and improve the floor structure in the elementary level. As a result, the calculations show that with the proposed sandwich floor structure the container's weight reduced about 400 kg without any losses of load carrying capability.

AMM095

Keywords: Container, Sandwich construction, Sandwich beam theory, Finite-element method, Plate theory

1. บทนำ

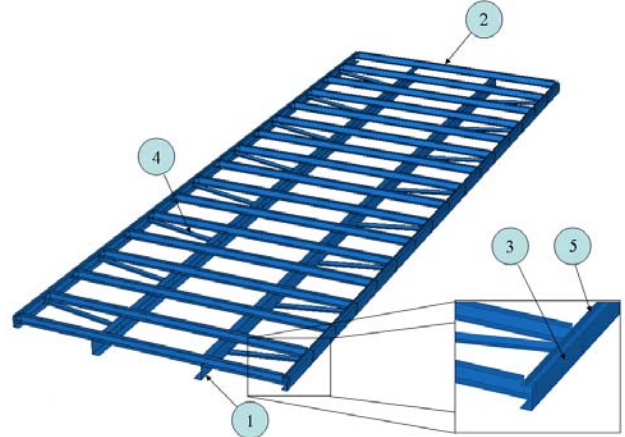
ปัจจุบันการขนส่งสินค้าภายในประเทศด้วยรถบรรทุกมีความสำคัญและมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากอัตราการบริโภคที่เพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะการใช้รถบรรทุกทุกหล้อเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่าและมีความคล่องตัวสูงกว่ารถบรรทุกที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงตู้บรรทุกสินค้าสำหรับรถบรรทุกทุกหล้อจำนวนมากในประเทศพบว่าตู้บรรทุกเปล่ามีโครงสร้างหลักที่ทำจากเหล็กและมีน้ำหนักมากถึง 3.3 ตัน [1] ซึ่งคิดเป็นเกือบแปดสิบเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของหัวรถบรรทุกและแชสซีส์รวมกัน [1,2] ทำให้รถบรรทุกต้องแบกน้ำหนักตู้เป็นจำนวนมากในการขนส่งสินค้าแต่ละเที่ยว เมื่อกอปรกับราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นอย่างควบคุมไม่ได้ทำให้ผู้รับส่งสินค้าประสบปัญหาค่าใช้จ่ายที่สูงเนื่องจากความสิ้นเปลืองน้ำมันและการบรรทุกสินค้าได้น้อยต่อเที่ยวเพราะโครงสร้างตู้มีน้ำหนักมากเกินไปซึ่งส่งผลให้ต้องเพิ่มเที่ยวในการขนส่งสินค้ามากขึ้น

หนึ่งในหลักการที่สามารถนำมาใช้ลดน้ำหนักโครงสร้างพื้นของตู้รถบรรทุกคือการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างแบบแซนด์วิช แทนการใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักแต่เพียงอย่างเดียวเนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความแข็งแรงและความแข็งแกร่งต่อหน่วยน้ำหนักมากกว่าเหล็ก [3-4] ตัวอย่างของการใช้วัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างแบบแซนด์วิชในการออกแบบชิ้นส่วนตู้บรรทุก และส่วนพวงด้านหลังของรถบรรทุกในต่างประเทศได้แก่ที่บริษัท Martin Marietta Materials [5], Foresight Vehicle [6] และ Lightweight Structures B.V. [7] อย่างไรก็ตามการนำเข้ารถบรรทุกหรือส่วนตู้บรรทุกจากบริษัทเหล่านี้เข้ามาใช้ในประเทศไทยจะประสบกับปัญหาเรื่องราคาที่สูงขึ้นเพราะความไม่แพร่หลายของตลาดการใช้งานตู้บรรทุกประเภทนี้ และการเสียดุลย์การค้าให้ต่างประเทศ ดังนั้นงานวิจัยในเรื่องการศึกษาความเป็นไปได้ในการลดน้ำหนักตู้บรรทุกในประเทศไทยจึงเกิดขึ้นโดยความร่วมมือของอุตสาหกรรมไทยกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติเพื่อที่จะสร้างตู้บรรทุกต้นแบบจากวัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างแบบแซนด์วิช

เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่ความต้องการลดน้ำหนักตู้บรรทุกของรถบรรทุกทุกหล้อในประเทศไทยที่แสดงไว้ในรูปที่ 1 โดยในขั้นต้นจะศึกษาโครงสร้างพื้นของตู้บรรทุกในปัจจุบันก่อนเนื่องจากโครงสร้างส่วนนี้มีน้ำหนักประมาณ 1.25 ตันซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักส่วนหนึ่งที่ทำให้ตู้บรรทุกมีน้ำหนักมาก โครงสร้างพื้นตู้จะประกอบไปด้วยแผ่นเหล็กเหนียวขนาดยาว 7.2 เมตร กว้าง 2.4 เมตร และหนา 4.5 มิลลิเมตรซึ่งหนักประมาณ 0.6 ตันและโครงคานเหล็กหน้าตัดรูปตัว C และ L ซึ่งมีน้ำหนัก 0.65 ตันซึ่งใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงของแผ่นเหล็กเหนียว รายละเอียดของโครงคานเหล็กจะแสดงในรูปที่ 2 และในตารางที่ 1 โดยงานวิจัยนี้จะใช้หลักการในการลดน้ำหนักตู้บรรทุกด้วยการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบแซนด์วิชแทนโครงสร้างเหล็กเช่นเดียวกันหากแต่พื้นตู้บรรทุกแบบใหม่จะต้องไม่สูญเสียความแข็งแรงและความสมบูรณ์ของโครงสร้างแต่อย่างใด



รูปที่ 1 รถบรรทุกทุกหล้อและตู้บรรทุกที่ใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 2 โครงคานเหล็กหน้าตัดรูปตัว C และ L เพื่อรองรับแผ่นเหล็กที่ใช้เป็นพื้นตู้

ตารางที่ 1 รายละเอียดโครงคานเหล็กรองรับพื้นตู้

ชิ้นส่วน*	รายละเอียด	หน่วย		น้ำหนักรวม (kg)
		น้ำหนัก (kg/m)	จำนวน	
1	C-125x65x6x8tx7,200L	13.4	2	193
2	C-75x40x5x7tx2,450L	6.92	17	288
3	C-100x50x5x7.5tx7,200L	9.36	2	135
4	L-30x30x3tx740L	1.36	16	16
5	L-25x25x3tx7,200L	1.12	2	16
รวม				648

* หมายเลขของชิ้นส่วนในตารางจะแสดงไว้ในรูปที่ 2 ด้วย

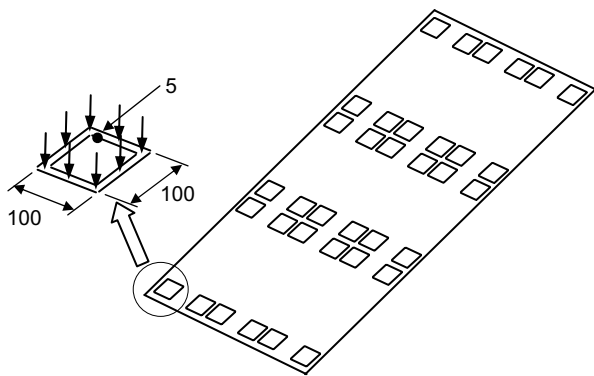
2. การวิเคราะห์พื้นตู้บรรทุกที่ใช้โครงสร้างเหล็ก

ตามพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก น้ำหนักรวมทั้งหมดของรถบรรทุกทุกหล้อที่บรรทุกสินค้าแล้วจะต้องไม่เกิน 12 ตัน ซึ่งถ้าหักน้ำหนักของตู้บรรทุกที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน 3.3 ตันและน้ำหนักของหัวรถลากและแชสซีส์หน้าหลังอีก 4.2 ตันออกจากน้ำหนักรวมทั้งหมดตามกฎหมายจะได้น้ำหนักที่บรรทุกได้สูงสุดเท่ากับ 4.5 ตัน ซึ่งน้ำหนัก

AMM095

ขนาดนี้จะต้องเป็นน้ำหนักเบื้องต้นที่โครงสร้างพื้นตู้บรรทุกจำเป็นต้องรับได้ อย่างไรก็ตามก็จากข้อมูลที่สังเกตในทางปฏิบัติโครงสร้างของพื้นตู้บรรทุกที่ใช้กันอยู่ในการขนส่งสินค้าในประเทศไทยสามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า 4.5 ตันค่อนข้างมาก (อาจมากถึง 8 ตัน [1]) โดยไม่เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างพื้นตู้บรรทุกแต่ประการใด ดังนั้นเพื่อที่จะทราบถึงความสามารถในการรับภาระสูงสุดของตู้บรรทุกก่อนที่จะเกิดความเสียหายแก่โครงสร้างพื้นตู้ จึงจำเป็นต้องวิเคราะห์ความแข็งแรงของพื้นตู้บรรทุกที่ทำจากโครงเหล็กเพื่อที่จะทราบถึงขอบเขตความแข็งแรงที่จะใช้ในการออกแบบใหม่ และทราบถึงค่าตัวประกอบความปลอดภัยโดยประมาณด้วย

ความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นที่ทำมาจากเหล็กจะถูกกำหนดไว้ว่าเป็นค่าความเค้นที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกและน้ำหนักของโครงสร้างพื้นตู้เองซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดความเค้นที่จุดใดจุดหนึ่งในโครงสร้างเท่ากับความเค้นที่จุดครากของเหล็กเหนียวหรือประมาณ 200 MPa ในการวิเคราะห์นี้จะให้ลักษณะของภาระหรือน้ำหนักบรรทุกเป็นภาระที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งขาที่รองรับสินค้า (Pallet) เนื่องจากภาระชนิดนี้เป็นแรงแบบขั้วขั้นหรือมีความเข้มข้นของภาระต่อพื้นที่หน้าตัดของขาสูงมาก ซึ่งจะทำให้ความเค้นและการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นในโครงสร้างพื้นมีค่าสูงตามไปด้วย ขนาดของขาที่รองรับสินค้ามีขนาดภายนอก 10 cm x 10 cm และมีความหนาของเนื้อเหล็ก 5 mm จำนวนที่รองรับสินค้ามีทั้งหมด 9 ตัววางกระจายเต็มพื้นที่ของพื้นตู้บรรทุก ดังนั้นจำนวนของตำแหน่งขาที่รองรับสินค้าทั้งหมดคือ 36 ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3

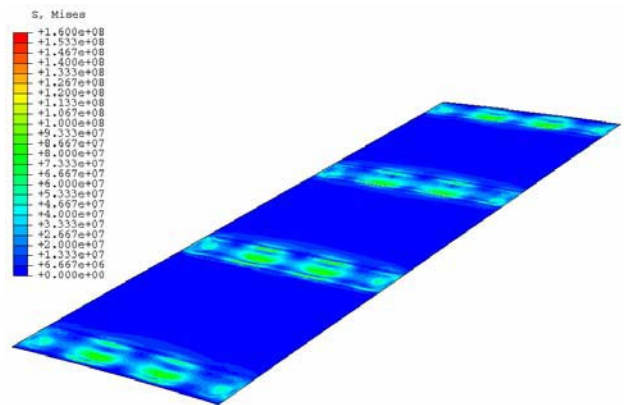


รูปที่ 3 ลักษณะของน้ำหนักที่ตกลงบนพื้นตู้จากขาที่รองรับสินค้า

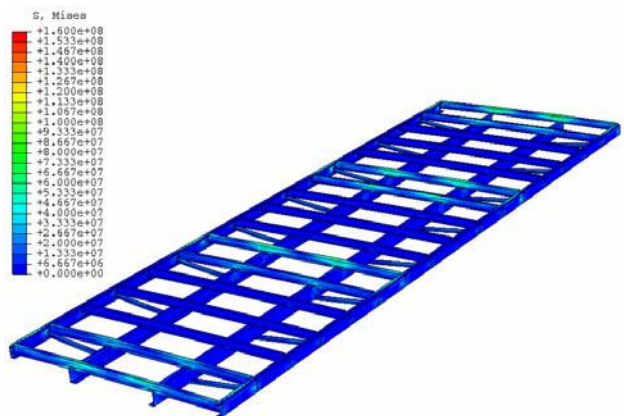
การวิเคราะห์เบื้องต้นจะใช้วิธีการทางไฟไนท์อีลีเมนต์ (Finite element method) ซึ่งใช้อีลีเมนต์ชนิดเปลือกบาง (Shell element) รูป 4 เหลี่ยมที่มี 8 โหนดในการโมเดลแผ่นเหล็กเหนียวและโครงคานเหล็กหน้าตัดรูปตัว C และ L โดยการต่อระหว่างชิ้นส่วนของโครงคานเหล็กและแผ่นพื้นตู้เหล็กจะใช้วิธีการผูกโหนด (Tie node) เข้าด้วยกันเพื่อให้การเปลี่ยนรูปของโครงสร้างรวมมีสภาพเข้ากันได้ (displacement compatibility) หรือการกระจัดของชิ้นส่วนที่ติดกันมีขนาดเท่ากันในทุกทิศทาง ส่วนการโมเดลลักษณะของน้ำหนักที่ตกลงที่พื้นตู้จากขาที่รองรับสินค้าจะให้เป็นการกระจัดแบบเป็นเส้น (line load) ตามขอบของขารองรับ และสมมุติให้แรงกดจากน้ำหนักบรรทุกในแต่ละขาและแต่ละ

ขอบในหนึ่งขามีค่าเท่ากัน นอกจากนี้การวิเคราะห์จะคำนึงถึงภาระเนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกเองไว้ด้วย

ผลจากการวิเคราะห์หาความแข็งแรงและความต้านทานการเปลี่ยนรูปของโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกจะได้ค่าน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดที่อาจทำให้เกิดการครากของโครงสร้างเหล็กเท่ากับ 10 ตันโดยประมาณ ความเค้นวอนมิสเสส (von Mises stress) ในแผ่นเหล็กเหนียวและโครงคานเหล็กที่เกิดจากน้ำหนักบรรทุกดังกล่าวแสดงได้ในรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จากรูปเหล่านี้จะสามารถสังเกตได้ว่าตำแหน่งที่เกิดความเค้นวอนมิสเสสสูงสุดคือตำแหน่งที่ใกล้กับตำแหน่งของขาที่รองรับสินค้าที่วางชิดกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณด้านหัวและด้านท้ายตามแนวยาวของพื้นตู้บรรทุกเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่องของโครงสร้าง ซึ่งค่าความเค้นวอนมิสเสสสูงสุดมีค่าเท่ากับ 140 MPa ในรูปที่ 4 และ 157 MPa ในรูปที่ 5

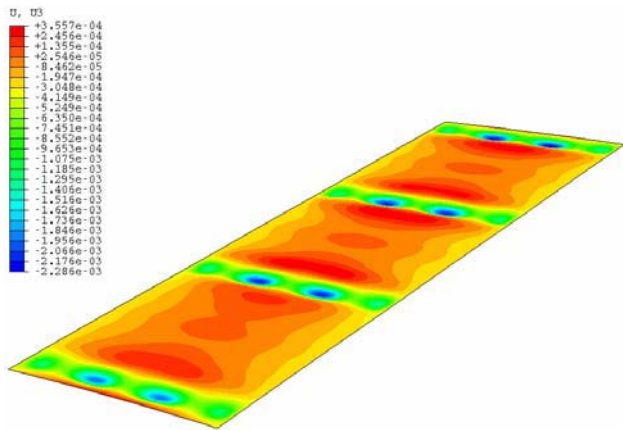


รูปที่ 4 ความเค้นวอนมิสเสสที่แผ่นเหล็ก

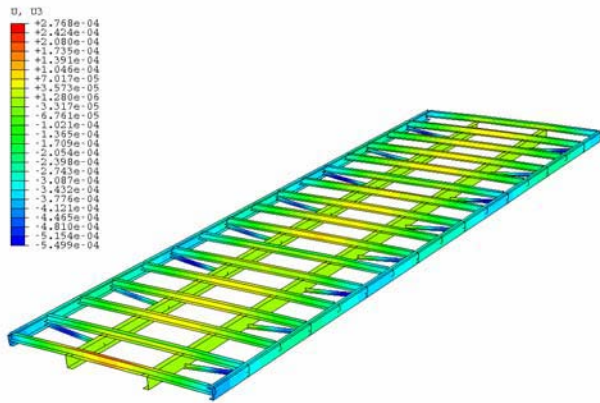


รูปที่ 5 ความเค้นวอนมิสเสสที่โครงคานเหล็กด้านล่าง

ส่วนผลการวิเคราะห์ของการเปลี่ยนรูปในแนวตั้งฉากกับพื้นของแผ่นเหล็กและโครงคานเหล็กจะปรากฏในรูปที่ 6 และ 7 ระยะเวลาขยับตัวสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของขาที่รองรับสินค้าที่วางชิดกันเช่นเดียวกับในกรณีของความเค้น ซึ่งระยะขยับตัวในแผ่นเหล็กและในโครงคานเหล็กนั้นมีขนาดประมาณ 2.3 mm และ 0.55 mm ตามลำดับ



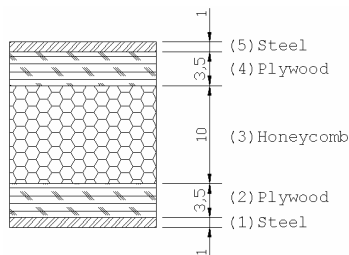
รูปที่ 6 การเปลี่ยนรูปของแผ่นเหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้น



รูปที่ 7 การเปลี่ยนรูปของโครงคานเหล็กในแนวตั้งฉากกับพื้น

3. การทดสอบโครงสร้างแบบแซนดวิช

ดังที่ได้กล่าวมาในบทนำข้างต้น หลักการที่จะนำมาใช้ในการลดน้ำหนักโครงสร้างของพื้นตู้บรรทุกคือการประยุกต์ใช้วัสดุคอมโพสิตและโครงสร้างแบบแซนดวิช เพราะฉะนั้นในงานวิจัยนี้โครงสร้างแบบแซนดวิชซึ่งได้ถูกนำเสนอเพื่อใช้แทนแผ่นเหล็กเหนียวจะมีลักษณะดังรูปด้านล่าง

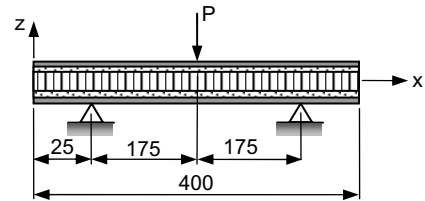


รูปที่ 8 ภาพตัดขวางของโครงสร้างแบบแซนดวิชที่นำเสนอ

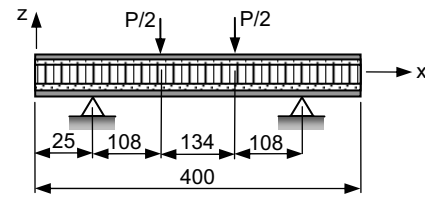
โดยแผ่นแซนดวิชนี้มีทั้งหมด 5 ชั้นหลัก คือเหล็กแผ่นบางความหนา 1 mm จำนวน 2 แผ่นที่ชั้นบนสุดและล่างสุด ไม้อัดขนาดความหนา 3.5 mm จำนวน 2 แผ่นที่ชั้นด้านในถัดมาจากแผ่นเหล็ก และแผ่นรังผึ้ง

พลาสติกโพลีพร็อพไพลีน (Polypropylene honeycomb) ความหนา 10 mm จำนวน 1 แผ่นเป็นชั้นตรงกลาง

แผ่นแซนดวิชนี้จะนำมาทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C393-00 [8] เพื่อหาพฤติกรรมการโก่งตัวเมื่อมีภาระกระทำและทำนายค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ ในการทดสอบจะให้แรงกระทำแก่คานแซนดวิชเพื่อศึกษาความต้านทานการดัดทั้งแบบ 3 จุด (Three-point flexural test) และแบบ 4 จุด (Four-point flexural test) ดังแสดงในรูปที่ 9



(ก) การดัดแบบ 3 จุด

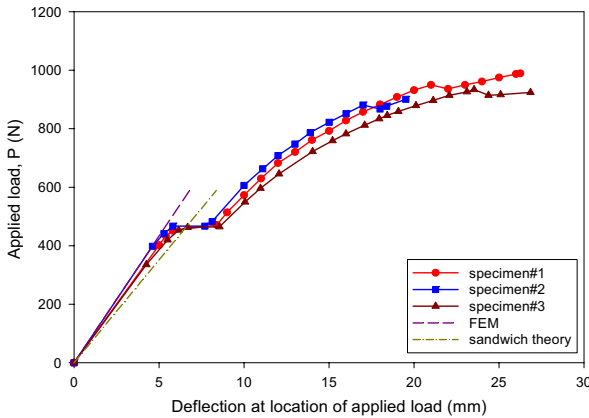


(ข) การดัดแบบ 4 จุด

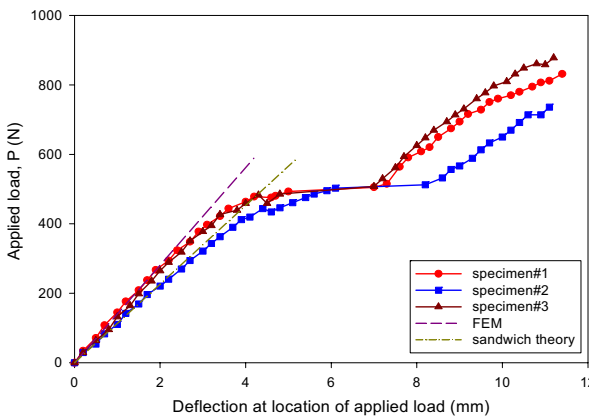
รูปที่ 9 การทดสอบความต้านทานการดัดของแผ่นแซนดวิช

ผลการทดสอบความต้านทานการดัดของคานแซนดวิชปรากฏในกราฟรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อคานแซนดวิช (หรือแรง P ในรูปที่ 9) กับระยะยวบตัวของคานแซนดวิชที่จุดเดียวกับตำแหน่งที่มีแรงกระทำ ในช่วงแรกของการให้แรงนั้นค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคานแซนดวิชมีคุณสมบัติความแข็งแรงเชิงเส้นจนกระทั่งเมื่อค่าแรง P ที่กระทำมีค่าประมาณ 460 – 480 N ระยะยวบในคานแซนดวิชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ค่าแรงมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการสังเกตจากชิ้นงานทดสอบและจากการคำนวณค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานพบว่าปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการครากของแผ่นรังผึ้งเนื่องจากความเค้นเฉือนของระนาบ τ_{xz} ซึ่งค่าแรงในช่วงดังกล่าวจะเหนี่ยวนำให้เกิด τ_{xz} เท่ากับ 0.51 – 0.53 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งแรงเฉือนของแผ่นรังผึ้งในเอกสารของผู้ผลิตคือ 0.5 MPa หลังจากผ่านช่วงการครากแล้ว ค่าแรงที่กระทำจะมีค่าสูงขึ้นอีกเมื่อระยะยวบตัวมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งคานแซนดวิชที่ใช้ในการทดสอบมีความเสียหายทางโครงสร้างอย่างเห็นได้ชัดจึงทำการยุติการทดสอบ

นอกจากนี้ค่าคุณสมบัติของวัสดุโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าคุณสมบัติของชั้นไม้อัดซึ่งไม่สามารถหาจากผู้ผลิตได้นั้นจะสามารถคำนวณได้จากการเทียบผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองจากวิธีทางไฟไนท์อีลีเมนต์และจากทฤษฎีคานแซนดวิช ซึ่งแบบจำลองทางไฟไนท์อีลีเมนต์ของคานแซนดวิชที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้อีลีเมนต์ 4 เหลี่ยมที่มี 4 โหนดโดยที่แต่ละโหนดมีตำแหน่งอยู่ที่มุมของ



รูปที่ 10 ผลการทดสอบความต้านทานการดัดแบบ 3 จุด



รูปที่ 11 ผลการทดสอบความต้านทานการดัดแบบ 4 จุด

อีลีเมนต์และใช้สมมติฐานความเค้นระนาบ (plane stress) นอกจากนี้ โหนดที่ตรงกับตำแหน่งที่รองรับด้านล่าง 2 โหนดในแบบจำลองจะถูกบังคับไม่ให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ทั้งในทิศทาง x และทิศทาง z ส่วนทฤษฎีคานแซนดวิชที่นำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบนั้นจะเป็นการใช้สมการที่ 1 และ 2 เพื่อทำนายระยะยุบของคานแซนดวิชที่ตำแหน่งแรงที่กระทำภายใต้การดัดแบบ 3 จุดและ 4 จุดตามลำดับดังนี้ [9]

$$w_{pb} = \frac{PL_2^3}{48D} + \frac{PL_2}{4S} \quad (1)$$

$$w_{fpb} = \frac{P(L_2 - L_1)^2 (L_2 + 2L_1)}{24D} + \frac{P(L_2 - L_1)}{2S} \quad (2)$$

โดยที่ w_{pb} และ w_{fpb} คือระยะยุบที่ตำแหน่งที่มีแรงกระทำสำหรับการทดสอบแบบ 3 จุดและ 4 จุด, L_2 คือระยะระหว่างที่รองรับด้านล่าง (span), L_1 คือระยะระหว่างแรงที่กระทำในการทดสอบแบบ 4 จุด, D และ S คือค่าความแข็งเกร็งการดัดและความแข็งเกร็งการเฉือนขวางระนาบซึ่งแสดงได้ในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$D = \frac{E_s t_s^3}{6} + \frac{E_s t_s d_s^2}{2} + \frac{E_p t_p^3}{6} + \frac{E_p t_p d_p^2}{2} + \frac{E_h t_h^3}{12} \quad (3)$$

เมื่อ E_s, E_p , และ E_h คือค่าโมดูลัสการยืดในแนวแกน x ของเหล็ก, ไม้อัด, และแผ่นรังผึ้งตามลำดับ t_s, t_p , และ t_h คือค่าความหนาของเหล็ก, ไม้อัด, และแผ่นรังผึ้งตามลำดับ d_s และ d_p คือระยะห่างระหว่างแกนสะเทินของแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่นและระยะห่างระหว่างแกนสะเทินของไม้อัดทั้งสองแผ่น และ

$$S = G_{h,xz} t_h + G_{p,xz} t_p \quad (4)$$

โดยที่ $G_{h,xz}$ และ $G_{p,xz}$ คือโมดูลัสการเฉือนขวางระนาบ (หรืออยู่บนระนาบ x-z) ของแผ่นรังผึ้งและไม้อัดตามลำดับ ดังนั้นเมื่อทำการวิเคราะห์ที่ข้อมูลจากผลการทดสอบและจากข้อมูลที่ได้รับจากผู้ผลิตวัสดุจะสามารถหาค่าคงที่ของวัสดุที่ใช้ทำคานแซนดวิชได้โดยประมาณดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของวัสดุของคานแซนดวิช

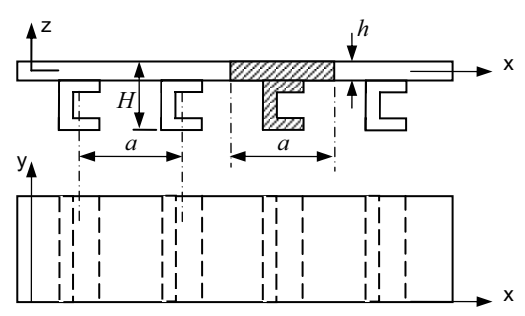
วัสดุ	เหล็ก	ไม้อัด	แผ่นรังผึ้ง
โมดูลัสการยืดแนว x (GPa)	210	7.6	~ 0
โมดูลัสการเฉือนขวางระนาบ (GPa)	80.8	0.01	0.008

จากข้อมูลในตารางที่ 2 ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดกับระยะยุบตัวที่ตำแหน่งที่มีแรงกระทำที่คำนวณมาด้วยวิธีแบบจำลองไฟไนท์อีลีเมนต์ของคานแซนดวิชและด้วยทฤษฎีคานแซนดวิชสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบได้ในรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งการเปรียบเทียบแสดงถึงความสอดคล้องกันของผลการทดสอบและค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีในช่วงที่วัสดุยังแสดงพฤติกรรมของคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นก่อนที่จะเกิดการครากขึ้นในแผ่นรังผึ้ง

4. การออกแบบพื้นตู้บรรทุกด้วยโครงสร้างแบบแซนดวิช

ผลจากการทดสอบในหัวข้อที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างแบบแซนดวิชที่ได้นำเสนอในช่วงต้นนั้นน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีและเป็นไปได้ทางหนึ่งในการใช้แทนแผ่นเหล็กเหนียวเพื่อทำหน้าที่เป็นพื้นตู้บรรทุกเนื่องจากค่าความแข็งเกร็งดัดที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 32.3 kN.m ซึ่งมีค่ามากกว่าความความแข็งเกร็งดัดของแผ่นเหล็กเหนียวที่ใช้อยู่ถึง 20 เท่า และยังมีน้ำหนักน้อยกว่าแผ่นเหล็กเหนียวประมาณ 2 เท่า ด้วยเหตุนี้คานเหล็กรูปตัว C และตัว L ที่ใช้ทำโครงสร้างเพื่อเสริมความแข็งแรงของแผ่นพื้นจึงสามารถลดจำนวนลงได้ ซึ่งทำให้น้ำหนักรวมของโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกมีค่าน้อยลงอีก จำนวนของคานเหล็กหน้าตัดตัว C ตามแนวด้านกว้างหรือแนวขวางถนนที่เหมาะสมในการใช้เสริมความแข็งแรงของพื้นตู้แบบแซนดวิชสามารถประเมินเบื้องต้นได้จากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีแผ่นบางที่ประกอบด้วยคานเสริมความแข็งแรงด้านล่าง [10] ดังแสดงในรูปที่ 12 แล้วเทียบให้ค่าความแข็งเกร็งดัดของโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกซึ่งมีแผ่นพื้นเป็นแผ่นเหล็กมีค่าเท่ากับโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกซึ่งมีแผ่นพื้นเป็นแบบแซนดวิช

AMM095



รูปที่ 12 ลักษณะแผ่นบางที่มีคานเสริมความแข็งแรงด้านล่าง

จากทฤษฎีแผ่นบางที่ไต่กล่าวไว้ในข้างต้น ค่าความแข็งเกร็งดัดแนวแกน y ของโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกซึ่งมีแผ่นพื้นเป็นแผ่นเหล็กและมีโครงคานเหล็กรูปตัว C เป็นตัวเสริมแรงหลักในแนวกว้าง (ทั้งหมดมี 17 ชั้นดังแสดงในรูปที่ 2) ซึ่งมีระยะห่างเท่ากันเท่ากับ a จะคำนวณได้ตามสมการที่ (5) โดยที่ค่าโมดูลัสของเหล็กเท่ากับ E_s , ค่าโมเมนต์เฉื่อยของพื้นที่ที่แลรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางพื้นที่นั้นเท่ากับ I

$$D_y = \frac{E_s I}{a} \quad (5)$$

และในกรณีที่แผ่นพื้นทำมาจากโครงสร้างแบบแซนด์วิช ค่าความแข็งเกร็งดัดในแนวแกน y เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$D_{y,sand} = \frac{1}{a_{sand}} \left(E_s I_s \Big|_{top} + E_p I_p \Big|_{top} + E_h I_h + E_p I_p \Big|_{bottom} + E_s I_s \Big|_{bottom} + E_s I_C \right) \quad (6)$$

โดยที่ค่า a_{sand} คือระยะห่างของคานเหล็กหน้าตัดตัว C ตามแนวกว้างเมื่อแผ่นพื้นเป็นโครงสร้างแซนด์วิช I_s, I_p , และ I_h คือโมเมนต์เฉื่อยของชั้นเหล็ก, ชั้นไม้อัดและชั้นรังผึ้งตามลำดับ ซึ่งค่าโมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัดในแต่ละชั้นนั้นจะคำนวณในช่วงความกว้าง a_{sand} และเป็นการพิจารณารอบแกนที่ขนานกับแกน y ผ่านจุดศูนย์กลางพื้นที่ของพื้นที่แผ่นพื้นแซนด์วิชกับพื้นที่คานเหล็กหน้าตัดตัว C รวมกัน ตัวห้อย top และ bottom จะบ่งบอกถึงว่าแผ่นวัสดุนั้นอยู่ตำแหน่งบนหรือล่างของแผ่นรังผึ้ง ส่วน I_C คือโมเมนต์เฉื่อยของคานเหล็กหน้าตัดรูปตัว C รอบแกนที่เป็นแกนเดียวกับ I_s, I_p , และ I_h

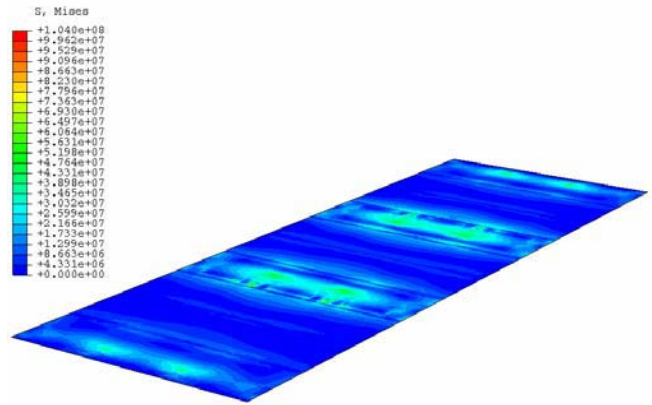
ดังนั้นถ้าใช้หลักการที่ว่าความแข็งเกร็งดัดในแนวแกน y ของโครงสร้างพื้นตู้บรรทุกซึ่งมีแผ่นพื้นเป็นแผ่นแซนด์วิชและเสริมด้วยคานหน้าตัดตัว C ซึ่งต้องกำหนดจำนวนในโครงสร้างใหม่นี้ ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าค่าความแข็งเกร็งดัดในแนวแกน y ของแผ่นพื้นเหล็กกับคานเสริมหน้าตัดตัว C จำนวน 17 ตัวของโครงสร้างเดิม หรืออยู่ในรูปสมการคือ

$$D_{y,sand} \geq D_y \quad (7)$$

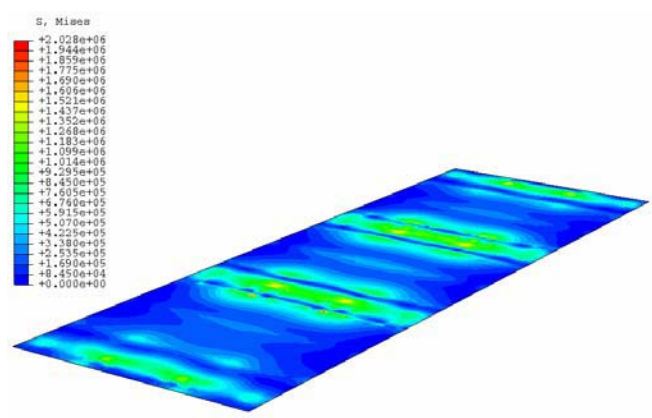
จะสามารถคำนวณหา a_{sand} ที่มากที่สุดหรือในอีกนัยหนึ่งจำนวนคานเสริมหน้าตัดตัว C ที่น้อยที่สุดได้ ซึ่งจากค่าคุณสมบัติของวัสดุและขนาดทางเรขาคณิตที่กำหนดไว้ข้างต้น จะคำนวณหา a_{sand} ได้เท่ากับ 0.74 m ซึ่งเทียบเท่ากับคานหน้าตัดตัว C ในแนวขวางจำนวน

ประมาณ 10 ชั้นซึ่งวางตัวห่างเท่าๆ กันภายในช่วงความยาวของแผ่นพื้น หรือเทียบเท่ากับจำนวนคานหน้าตัดตัว C จำนวน 11 ชั้นในกรณีที่มีการวางคานเสริมที่ตำแหน่งหัวและท้ายของพื้นตู้บรรทุกด้วยเพื่อให้บริเวณด้านปลายทั้งสองของแผ่นพื้นมีความแข็งแรงมากขึ้น โครงคานเหล็กที่ออกแบบใหม่นี้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 18 (หรือ 20)

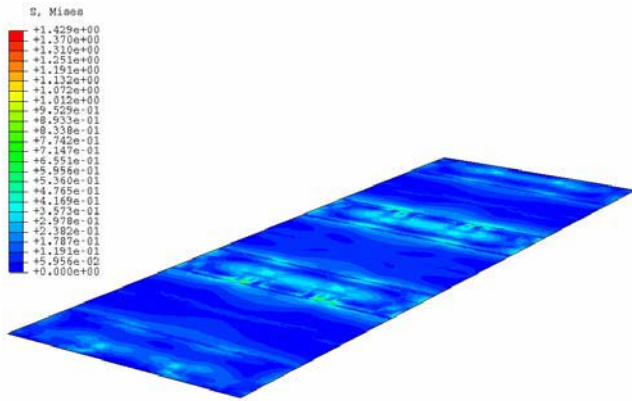
อย่างไรก็ดีเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลการคำนวณจากทฤษฎีแผ่นบางในข้างต้นและเพื่อทำนายความแข็งแรงของโครงสร้างพื้นแบบแซนด์วิชในเชิงลึก วิธีการทางไฟไนท์อีลีเมนต์จึงถูกนำมาใช้อีกครั้งในการหาค่าความเค้นและระยะยุบตัวที่เกิดขึ้นโดยให้มิติเคมีการโมเดลและลักษณะของน้ำหนักบรรทุกเหมือนในกรณีที่แสดงในรูปที่ 3 ค่าความเค้นวอนมิสเชสที่คำนวณได้ในชั้นต่างๆ และในโครงคานเหล็กจะปรากฏอยู่ในรูปที่ 13-18 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความเค้นวอนมิสเชสในชั้นเหล็กทั้งด้านบนและด้านล่างจะมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นที่จุดครากของเหล็ก โดยที่มีค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดเท่ากับ 68 MPa และ 104 MPa ตามลำดับ ส่วนค่าความเค้นในชั้นไม้อัดทั้งสองชั้นจะมีค่าประมาณความเค้นที่จุดครากของไม้อัดพอดิ (ประมาณ 3 MPa) เพราะเนื่องจากมีระดับเดียวกับความเค้นที่



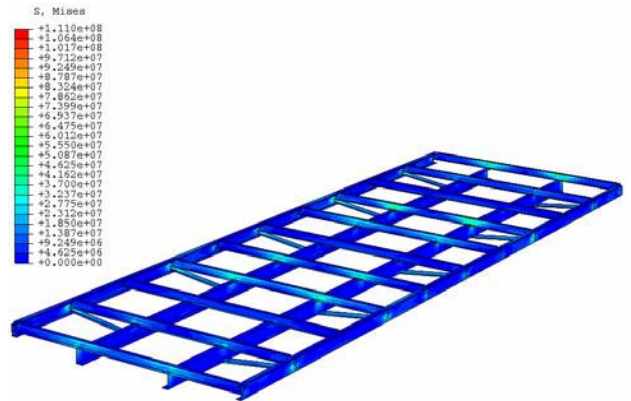
รูปที่ 13 ความเค้นวอนมิสเชสที่ชั้นเหล็กด้านบนของแผ่นแซนด์วิช



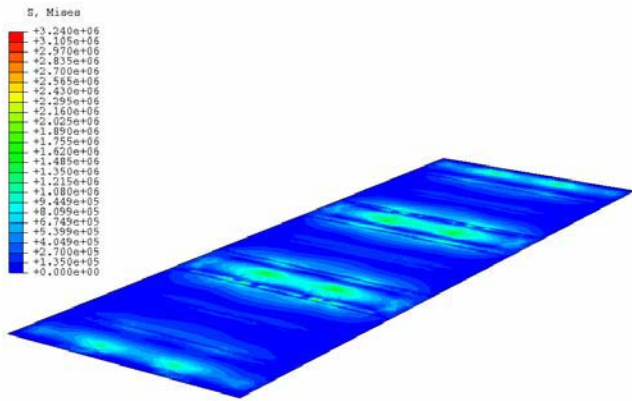
รูปที่ 14 ความเค้นวอนมิสเชสที่ชั้นไม้อัดด้านล่างของแผ่นแซนด์วิช



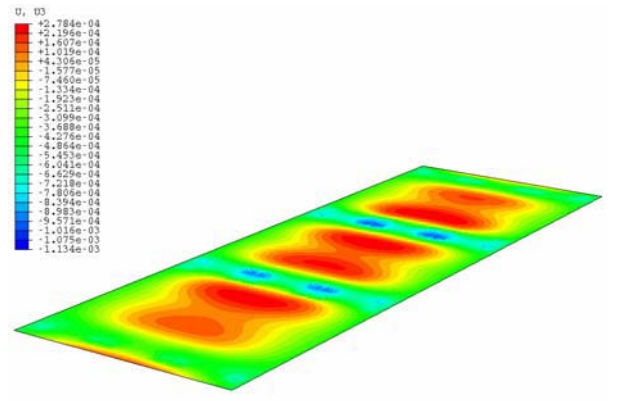
รูปที่ 15 ความเค้นวอนมิสเซสที่ชั้นรังผึ้งของแผ่นแซนด์วิช



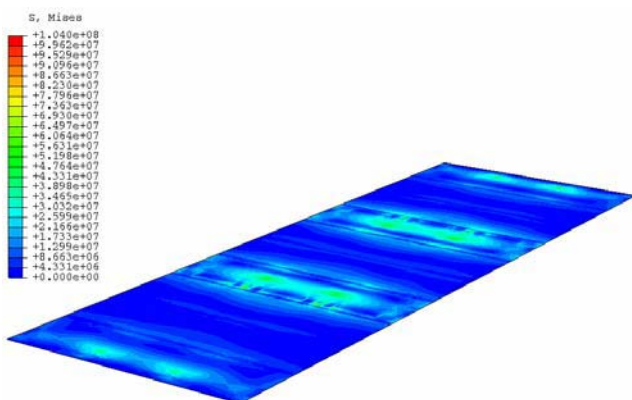
รูปที่ 18 ความเค้นวอนมิสเซสที่โครงคานเหล็กใหม่



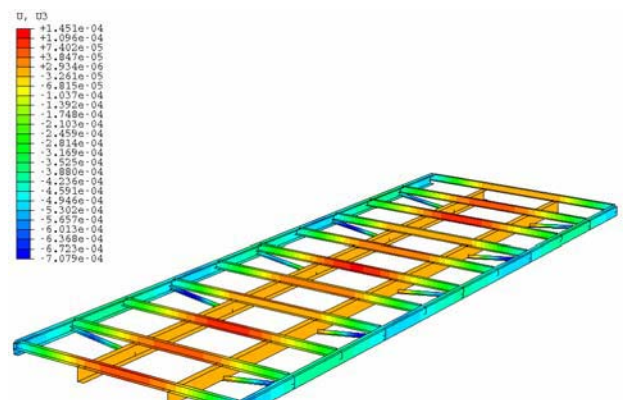
รูปที่ 16 ความเค้นวอนมิสเซสที่ชั้นไม้อัดด้านล่างของแผ่นแซนด์วิช



รูปที่ 19 การเปลี่ยนรูปของแผ่นแซนด์วิชในแนวตั้งฉากกับพื้น



รูปที่ 17 ความเค้นวอนมิสเซสที่ชั้นเหล็กด้านล่างของแผ่นแซนด์วิช



รูปที่ 20 การเปลี่ยนรูปของโครงคานเหล็กใหม่ในแนวตั้งฉากกับพื้น

ก่อให้เกิดความเสียหายในชั้นไม้อัดของคานแซนด์วิชที่ได้ทำการทดสอบในข้างต้น นอกจากนี้เนื่องจากค่าโมดูลัสของชั้นรังผึ้งในแนวระนาบมีค่าต่ำมากจึงทำให้ค่าความเค้นวอนมิสเซลในชั้นรังผึ้งมีค่าน้อย (ประมาณ 1 Pa) และไม่เหนียวทำให้เกิดความเสียหายในชั้นรังผึ้งหนึ่งเนื่องจากชนิดของอีพ็อกซีที่ใช้ในการโมเดลพื้นตู้แบบแซนด์วิชเป็นชนิดเปลือบบางดังนั้นจึงไม่สามารถบ่งบอกถึงค่าความเค้นเฉือนขวางระนาบที่เกิดขึ้นในชั้นรังผึ้งซึ่งเป็นสาเหตุของการร้าวที่ปรากฏในรูปที่ 10 และ 11 อย่างไรก็ดีเมื่อนำน้ำหนักที่ตกลงในแต่ละขาที่รองรับสินค้ามาคำนวณหาความเค้นเฉือนเฉลี่ยในชั้นรังผึ้ง ณ ตำแหน่งที่ขาตั้งอยู่จะได้ค่าประมาณ 70 kPa ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นเฉือนครากของชั้นรังผึ้งจึงไม่เกิดความเสียหายขึ้น

ส่วนระยะยุบของพื้นแซนด์วิชและโครงคานเหล็กใหม่จะแสดงไว้ในรูปที่ 19 และ 20 ซึ่งตำแหน่งที่มีระยะยุบสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณขาที่รองรับสินค้าเช่นเดียวกับรูปที่ 6 และ 7 และขนาดของระยะยุบจะมีค่าใกล้เคียงกับกรณีที่โครงสร้างพื้นตู้บรรจุสินค้าเป็นโครงสร้างเหล็กกล่าวคือในแผ่นแซนด์วิชมีระยะยุบสูงสุดเท่ากับ 1.13 mm และในโครงคานมีระยะยุบสูงสุด 0.71 mm

ดังนั้นจากการประมวลผลการวิเคราะห์ในเบื้องต้นจะสามารถสรุปข้อมูลได้โดยสังเขปในตารางที่ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างพื้นตู้บรรจุสินค้าแบบใหม่ที่ใช้โครงสร้างแบบแซนด์วิชเป็นพื้นตู้มีความเป็นไปได้สูงในการนำมาประยุกต์ใช้จริง โดยมีน้ำหนักโครงสร้างพื้นตู้รวมน้อยกว่าโครงสร้างพื้นตู้บรรจุที่ใช้อยู่ในปัจจุบันถึง 400 กิโลกรัมโดยที่ความแข็งแรงของโครงสร้างทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 สรุปผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นตู้บรรจุ

ชนิดพื้น	เหล็ก	แซนด์วิช
น้ำหนัก (kg)	1250	850
ความเค้นวอนมิสเซลสูงสุดในแผ่นพื้น (MPa)	140	104
ระยะยุบสูงสุดในแผ่นพื้น (mm)	2.3	1.13
ความเค้นวอนมิสเซลสูงสุดในโครงคาน (MPa)	157	85
ระยะยุบสูงสุดในโครงคาน (mm)	0.55	0.7

5. บทสรุป

บทความนี้ได้ทำการนำเสนอการออกแบบพื้นตู้บรรจุสินค้าที่ใช้กับรถบรรทุกหกล้อในปัจจุบันโดยการใช้โครงสร้างแบบแซนด์วิชเป็นแผ่นพื้นตู้บรรจุทุกแทนการใช้แผ่นเหล็กเพื่อลดน้ำหนักรวมของตู้บรรจุสินค้า ซึ่งจากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นตู้บรรจุทั้งแบบเดิมและแบบใหม่ในการรับภาระทางสถิตศาสตร์ และการทดสอบความต้านทานการกดในแนวขวางระนาบและการตัดชิ้นส่วนของแผ่นแซนด์วิชพบว่าการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบแซนด์วิชกับโครงสร้างพื้นตู้บรรจุที่มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติโดยที่คงความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างพื้นตู้ไว้เหมือนเดิม

อย่างไรก็ดีเพื่อให้การประยุกต์ใช้โครงสร้างพื้นตู้บรรจุแบบใหม่นี้เป็นไปอย่างสมบูรณ์ การวิเคราะห์และการทดสอบชิ้นส่วนโครงสร้าง

เพิ่มเติมทางพลศาสตร์และการรับภาระกระแทกจึงมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการวิเคราะห์ทางสถิตศาสตร์ที่บรรยายไว้ในบทความนี้ เนื่องจากพื้นตู้บรรจุทุกจะเชื่อมติดอยู่กับส่วนหัวลากซึ่งมีการเคลื่อนที่และการสั่นสะเทือนอยู่ตลอดเวลาในขณะที่เดินทางขนส่งสินค้าและการกระแทกของสินค้ากับตู้บรรจุทุกในขณะที่ยกถ่ายสินค้าและในการเคลื่อนที่ยิ่งไปกว่านี้การปรับปรุงพื้นตู้แบบโดยใช้โครงสร้างแบบใหม่ก็เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในทางปฏิบัติเพื่อที่จะเชื่อมโยงให้เกิดการศึกษาถึงขั้นตอนและเทคนิคในกรรมวิธีการผลิต การเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนและในท้ายที่สุดเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบรับน้ำหนักบรรทุกที่มีความเป็นไปได้จริงและสามารถนำไปปรับปรุงเพื่อผลิตในเชิงอุตสาหกรรมต่อไปอย่างสัมฤทธิ์ผล

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณประสงค์ เพิ่มอารยวงศ์, คุณณัฐวุฒิ ชัยญาคุณาภักษ์, คุณสมชาย พิณใจอุดมการณ์ และคุณมนู ธนเขตไพศาล สำหรับความร่วมมือในโครงการวิจัยต้นแบบตู้บรรจุสินค้าคอมโพสิตสำหรับการขนส่งสินค้า นอกจากนี้ขอขอบคุณ นายอภิมุข สุรินทร์รัตน์ นายวิโรจน์ ลิ้มปิ๋วชกริจ นายสมโภชน์ อุทัยศรี นักศึกษาปริญญาตรีของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลสำหรับการทดสอบคานแซนด์วิช และ ดร. นันทิยา วิริยบัณฑิต สำหรับข้อมูลทางเทคนิคเกี่ยวกับวัสดุ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้อมูลจากบริษัท VNS Transport limited ประเทศไทย
- [2] ข้อมูลจากแผ่นพับของบริษัท Isuzu ประเทศไทย หรือจากเว็บไซต์ <http://www.isuzu-tis.com/> (เข้าชมเมื่อ พฤษภาคม 2549)
- [3] Hyer, M.W., 1997. Stress Analysis of Fiber-reinforced Composite Materials., WCB McGraw-Hill, Singapore
- [4] Allen, H.G., 1969. Analysis and Design of Structural Sandwich Planels. 1st Ed., Pergamon Press, Hungary.
- [5] ข้อมูลจากเว็บไซต์บริษัท Martin Marietta Materials. <http://www.martinmarietta.com/Products/trailers.asp> / (เข้าชมเมื่อ พฤษภาคม 2549)
- [6] ข้อมูลจากเว็บไซต์บริษัท Foresight Vehicle. <http://www.foresightvehicle.org.uk/> (เข้าชมเมื่อ พฤษภาคม 2549)
- [7] ข้อมูลจากเว็บไซต์บริษัท Lightweight Structures B.V.. <http://www.lightweight-structures.com> / (เข้าชมเมื่อ พฤษภาคม 2549)
- [8] American Society of Testing Materials. ASTM Designation C393-00: Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions.
- [9] Zenkert, D., 1995, An Introduction to Sandwich Construction., EMAS Publishing, United Kingdom.
- [10] Timoshenko, S.P. and Woinosky-Krieger, S., Theory of Plates and Shells. 2nd Ed., McGraw-Hill, Singapore