

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ในการจัดทำงานวิจัยเรื่องทดสอบการสิ้นสะเก็ือน สำหรับใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปขนาดเล็กทางด้านอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมนี้ จะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับเนื้อหาและทฤษฎีต่างๆที่ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติม เช่น การทดสอบการสิ้นสะเก็ือนที่เน้นถึงผลิตภัณฑ์ที่บรรจุอยู่ว่าสามารถรับแรงสิ้นสะเก็ือนได้เท่าไร จนถึง การศึกษาการทำงานร่วมกันของชุดควบคุมการทำงานและอุปกรณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง

จุดประสงค์หลักอย่างหนึ่งของการบรรจุหีบห่อก็คือการป้องกันและรักษาสภาพของสินค้าให้อยู่ในสภาพที่ดีจนถึงจุดหมายปลายทาง แต่ในขบวนการส่งสินค้าจากจุดเริ่มต้นไปจนถึงมือผู้รับนั้นสินค้าจะต้องผ่านขั้นตอนของการขนถ่าย ขนส่ง และเก็บรักษา เช่น จากแหล่งผลิตจะต้องขนถ่ายไปยังโกดัง จากโกดังจะต้องถูกขนถ่ายไปขึ้นยานพาหนะ ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ รถบรรทุกเร็ว หรือเครื่องบิน การขนถ่ายสินค้าก็ต้องอาศัยเครื่องมือทุนแรงต่าง ๆ หลายชนิด เมื่อถึงที่หมายก็ต้องมีการขนถ่าย และนำไปเก็บอีก กว่าสินค้าจะถึงจุดหมายปลายทางอาจจะต้องผ่านขั้นตอนดังกล่าวหลายครั้งหลายหน และในระหว่างนี้เองสินค้านั้นก็อาจจะได้รับความเสียหายจากคน จากเครื่องมือขนถ่ายวัสดุ หรือจากยานพาหนะที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นการศึกษาถึงความแข็งแรงของสินค้า วิธีการขนส่ง ขนถ่าย ตลอดจนสภาพแวดล้อมที่ต้องเผชิญจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบการออกแบบภาชนะบรรจุหีบห่อ เพื่อลดความสูญเสียและเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายด้วย

2.2 มาตรฐานการทดสอบ

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและวิธีการทดสอบจะขึ้นอยู่กับมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ เช่น มาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมไทย หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า สมอ. มาตรฐานในการบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ที่ร่างขึ้นมาโดย สมอ. รายชื่อมาตรฐานผลิตภัณฑ์ของสมอ. แล้ว มาตรฐานการทดสอบยังอาจแบ่งได้หลายระดับ ดังต่อไปนี้

2.2.1. มาตรฐานของแต่ละองค์กร บริษัทหรือหน่วยงานที่มีการจัดซื้อจัดหาวัสดุบรรจุภัณฑ์ และระบบบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ จะร่างมาตรฐานการทดสอบของตัวเองออกมาใช้เพื่อให้ได้คุณภาพ

ของบรรจุกฎเกณฑ์ตามแต่ความเหมาะสมที่จะใช้งาน มาตรฐานของแต่ละองค์กรเหล่านี้จะมีความต้องการหรือรายละเอียดทางการทดสอบเฉพาะเจาะจงมากที่สุด

2.2.2 มาตรฐานกลุ่มอาชีพเดียวกัน มาตรฐานการทดสอบใหม่ ๆ ที่เกิดขึ้นมักจะมีเกิดจากองค์กรเหล่านี้ เนื่องจากมีความพร้อมในห้องปฏิบัติการและนักวิจัย กลุ่มอาชีพเหล่านี้จะมีการจัดตั้งในแต่ละประเทศและมีการถ่ายทอดและเปลี่ยนความรู้ทางวิชาการซึ่งกันและกัน กลุ่มที่มีชื่อเสียง ได้แก่

- FEFCO, Federation Europeene des Fabricants de Carton Ondule Test Methods (มาตรฐานทดสอบของสหพันธ์แปรรูปกล่องกระดาษลูกฟูกของยุโรป)
- TAPPI หรือ The Technical Association of Pulp and Paper Industry, Atlanta.
- Uniform Freight Classification Committee, Atlanta.
- The American Society of mechanical Engineers, New York.
- INCPEN, Industry Council for Packaging in the Environment, London.
- USDA, Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin
- BPBMA, British Paper

องค์กรต่าง ๆ เหล่านี้ส่วนมากจะเป็นองค์กรเอกชนที่ไม่ได้แสวงหากำไร แต่เป็นการเผยแพร่ความรู้ให้กับกลุ่มอาชีพเดียวกัน เพื่อยกระดับมาตรฐานความรู้ในการประกอบอาชีพ

2.2.3. มาตรฐานขององค์กรระดับประเทศและระหว่างประเทศ องค์กรสมอ. ของไทยเป็นองค์กรหนึ่งที่อยู่ในประเภทนี้ ซึ่งประสานงานโดยตรงกับ ISO หรือ International Standard Organization สำหรับวงการบรรจุกฎเกณฑ์มีองค์กรที่เรียกว่า ISTA (International Safe Transit Association) ที่มีเครือข่ายทั่วโลก โดยเน้นในเรื่องการทดสอบก่อนทำการขนส่งเพื่อลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้น ในวงการอาหารมาตรฐานระหว่างประเทศที่ได้รับการอ้างอิงถึงมากที่สุด คือ Codex ซึ่งมีชื่อเต็มว่า Codex Alimentarius Commission ซึ่งเป็นองค์กรรวมระหว่าง Food and Agriculture Organization of the United Nations และ World Health Organization ส่วนองค์กรแต่ละประเทศที่มีร่างมาตรฐานเกี่ยวกับบรรจุกฎเกณฑ์ ได้แก่

- ASTM. American Society for Testing and Materials
- BS, British Standard
- JIS, Japan Institute of Standard

- Normes Francaise (มาตรฐานฝรั่งเศส)
- Deutsche Normen (มาตรฐานเยอรมันที่รู้จักในนาม DIN)

การเลือกใช้มาตรฐานใดเป็นแนวทางในการทดสอบต้องขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในการใช้งาน ตัวอย่างเช่น มีการส่งสินค้าไปประเทศใด ย่อมที่จะใช้มาตรฐานการทดสอบของประเทศ หรืออาจจะใช้มาตรฐานการทดสอบในจุดมุ่งหมาย 2 และ 3 เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานการทดสอบของระดับ 1 สำหรับเพื่อใช้ในการรองรับของตัวเอง

2.3 การทดสอบผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ของไทยถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญต่อเศรษฐกิจไทยในปัจจุบันค่อนข้างมาก โดยมีการส่งออกเป็นอันดับหนึ่งต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลาหลายปี โดยในปี 2544 การส่งออกสินค้าเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์คิดเป็นมูลค่า 15,498 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 600,000 ล้านบาท และการนำเข้าคิดเป็นมูลค่า 10,847 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 200,000 ล้านบาท

จากการประเมินของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม¹ พบว่า จุดแข็งที่สำคัญของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยในปัจจุบันคือ เป็นฐานการผลิตเพื่อการส่งออกที่สำคัญของสหรัฐอเมริกา สิงคโปร์ โดยเฉพาะญี่ปุ่น ที่เข้ามาลงทุนจำนวนมากในไทยช่วงหลายปีที่ผ่านมา ประกอบกับไทยมีแรงงานที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ ทั้งความละเอียด ประณีต ซึ่งเหมาะกับความต้องการของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อีกทั้งประเทศไทยเริ่มที่จะพัฒนาขีดความสามารถของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นไปตามมาตรฐานสากลมากขึ้น ทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยเริ่มเป็นที่ยอมรับในศักยภาพและได้รับความเชื่อถือในด้านการผลิตจากหน่วยงานและบริษัทต่างประเทศเป็นลำดับ

ส่วนจุดอ่อนของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากการศึกษาของบรรษัทพัฒนาพันธะแห่งญี่ปุ่น² (JODC) พบว่า อุตสาหกรรมของไทยขาดการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ ตลอดจนไม่มีความชำนาญในด้านการตลาดสำหรับผู้ประกอบการท้องถิ่น ขณะที่บริษัทที่แข่งขันในตลาดโลกได้ ส่วนใหญ่จะเป็นกิจการร่วมทุนกับต่างชาติหรือเป็นกิจการของต่างประเทศที่เข้ามาลงทุนในไทย อีกทั้งผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมนี้ มีการเปลี่ยนแปลงทางเทคโนโลยีค่อนข้างรวดเร็ว ดังนั้น กิจการของคนไทยส่วนใหญ่จึงอยู่ในส่วนของการรับจ้างประกอบและทดสอบผลิตภัณฑ์ ทำ

¹ “เร่งพลิกฟื้นอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ แก่จุดอ่อนปรับโครงสร้างอย่างเป็นระบบ,” สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (<http://www.oie.go.th>), 4 กันยายน 2545.

² “ประเด็นสัมภาษณประธานสภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย,” วารสารสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (มัย.-สค. 2545): 59.

ให้แรงงานไทยขาดโอกาสในการพัฒนาฝีมือระดับสูง นอกจากนี้ การเชื่อมโยงระหว่างอุตสาหกรรมสนับสนุนกับอุตสาหกรรมหลักที่ยังมีไม่มากเท่าที่ควร ส่งผลให้การผลิตของไทยมีต้นทุนสูงขึ้น ขณะที่ปัจจุบันไทยเริ่มสูญเสียความได้เปรียบทางการแข่งขันให้กับประเทศเพื่อนบ้าน อาทิ จีนและเวียดนาม จากการที่ค่าแรงงานเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้เกิดการย้ายฐานการผลิตไปยังประเทศเพื่อนบ้านมากขึ้น

ภายใต้สถานการณ์แข่งขันที่เริ่มมีความรุนแรงมากขึ้นทั้งตลาดในประเทศและต่างประเทศ จากการเปิดเสรีทางการค้าอาฟต้า (AFTA) และการรวมกลุ่มจัดตั้งเขตการค้าเสรีต่างๆ เช่น นาฟตา (NAFTA) และการที่จีนเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในตลาดโลก ส่งผลให้ผู้ผลิตไทยจะต้องปรับตัว โดยจะต้องเพิ่มประสิทธิภาพและยกระดับเทคโนโลยีเพื่อลดต้นทุนการผลิต รวมทั้งเพิ่มการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความแตกต่างจากสินค้าในตลาดและมีความหลากหลายเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันด้านราคากับสินค้าในตลาดล่างและยังเป็นการสร้างโอกาสใหม่ทางการตลาด

ช่วงการส่งเสริมอุตสาหกรรมสนับสนุน และช่วงปรับโครงสร้างอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2536-2545) ปัจจัยที่สำคัญ 3 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ไทยในช่วงนี้ได้แก่ (1) ภาวะเศรษฐกิจทั่วโลกที่ได้รับผลกระทบจากการก่อวินาศกรรมในสหรัฐอเมริกาเมื่อ 11 กันยายน 2544 และวิกฤตทางเศรษฐกิจในภูมิภาคเอเชียที่ยังไม่คลี่คลายเท่าที่ควร (2) จังหวะการพัฒนาเทคโนโลยีที่สำคัญที่มีความกระชั้นมากขึ้น โดยเฉพาะเทคโนโลยีแผงวงจรรวม (IC) ที่ส่งผลต่อความก้าวหน้าของพัฒนาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องโดยรวม ทั้งเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์โทรคมนาคม และทำให้การแข่งขันของอุตสาหกรรมทั้งหมดมีความรุนแรงมากขึ้น และ (3) การเปลี่ยนแปลงระเบียบและกติกาการค้า อาทิ มาตรการทางการค้าทั้งในด้านภาษีศุลกากรและที่มิใช่ภาษี รวมทั้งสถานการณ์ความร่วมมือทางเศรษฐกิจระดับระหว่างประเทศ ระดับภูมิภาค และระดับประเทศที่เป็นตลาดส่งออกที่สำคัญ อย่างสหรัฐอเมริกา สหภาพยุโรป และญี่ปุ่น และที่สำคัญคือ การที่จีนเข้าเป็นสมาชิกองค์การการค้าโลก (WTO) ปัจจัยทั้งสามทำให้อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของไทยมีความตื่นตัวในการปรับโครงสร้างค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อจีนเข้ามาเป็นสมาชิกองค์การการค้าโลกทำให้การแข่งขันระหว่างประเทศมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงมากขึ้น ผู้ประกอบการในประเทศจึงได้มีความพยายามที่จะชี้ให้รัฐบาลเห็นถึงความจำเป็นอย่างเร่งด่วนที่จะต้องปรับโครงสร้างภาษีที่เกี่ยวข้องให้มีความสอดคล้องกับสากลมากขึ้น เพื่อรักษาความได้เปรียบทางการแข่งขันของอุตสาหกรรมในประเทศ ในปี 2545 รัฐบาลก็ได้มีการปรับลดภาษีชิ้นส่วนและวัตถุดิบให้กับอุตสาหกรรมโทรทัศน์และ

สายใยแก้วนำแสงโดยผ่านระบบธุรกรรม ช่วยให้บริษัทต่างชาติบางส่วนในอุตสาหกรรมทั้งสองยังรักษาฐานการผลิตไว้ในประเทศต่อไป นอกจากนี้ องค์กรภาคเอกชนก็ได้มีความพยายามที่จะจัดระบบของอุตสาหกรรมให้เข้ามาอยู่ภายใต้องค์กรเดียวกันคือ สภาอุตสาหกรรมฯ เพื่อให้การดำเนินงานของอุตสาหกรรมโดยรวมมีความเป็นเอกภาพและเป็นระบบมากขึ้น รวมทั้งเพื่อยกระดับการผลิตของประเทศ ขณะที่ภาครัฐก็มีความพยายามที่จะกำหนดยุทธศาสตร์และแนวทางการปรับโครงสร้างอุตสาหกรรมให้มีผลในทางปฏิบัติชัดเจน รวมทั้งการพัฒนาอุตสาหกรรมสนับสนุน ส่งเสริมผู้ประกอบการขนาดกลางและขนาดเล็กและสร้างความเชื่อมโยงระหว่างอุตสาหกรรมในขั้นตอนการผลิตต่างๆ ให้มากขึ้น โดยเฉพาะการดำเนินการของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน และสถาบันไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ บริษัทต่างชาติก็เริ่มที่จะถ่ายโอนหน่วยงานด้านการวิจัยและพัฒนาเข้ามาดำเนินงานในไทยมากขึ้น เนื่องจากต้นทุนด้านนี้ในต่างประเทศเริ่มสูงขึ้น ขณะที่ราคาสินค้าเพิ่มขึ้นไม่มากนักและบางรายการกลับมีแนวโน้มลดลง บริษัทของคนไทยก็เริ่มที่จะหันมาให้ความสำคัญกับการจำหน่ายสินค้าภายใต้เครื่องหมายการค้าของตนเองและเน้นการทำวิจัยและพัฒนามากขึ้น แม้จะยังมีปัญหาในด้านเทคโนโลยีกระบวนการผลิตและตัวสินค้าอยู่มากก็ตาม การผลิตอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ของไทย แบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่

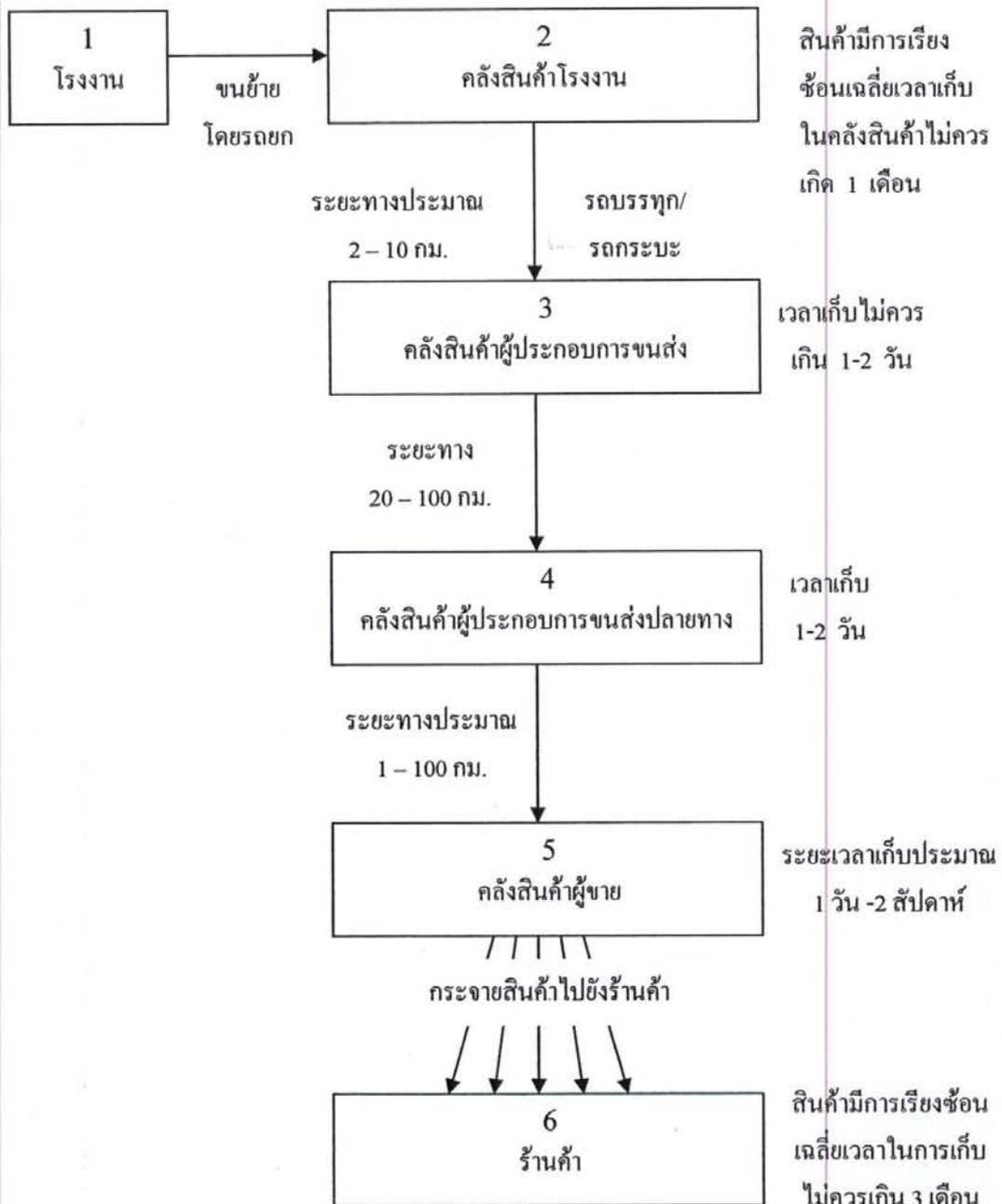
- (1) กลุ่มเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน อาทิ ตู้เย็น เครื่องปรับอากาศ พัดลม และโทรทัศน์
- (2) กลุ่มชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เช่น แผงวงจรไฟฟ้า สายไฟฟ้า และมอเตอร์ไฟฟ้า
- (3) กลุ่มคอมพิวเตอร์และส่วนประกอบ เช่น พริ้นเตอร์ สแกนเนอร์ กล้องดิจิทัล และโมเด็ม
- (4) กลุ่มอุปกรณ์โทรคมนาคม อาทิ เครื่องรับโทรศัพท์ โทรสาร และอุปกรณ์เครือข่าย
- (5) กลุ่มซอฟต์แวร์ อาทิ ระบบบัญชี ระบบปฏิบัติการ

สำหรับการทดสอบการสันตะเทียนของเครื่องใช้ไฟฟ้าชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าเป็นอย่างมาก ในการทดสอบจะพิจารณาถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังนี้

- Conformance Testing เป็นการทดสอบเพื่อทราบถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ หรือทดสอบตาม Specification ที่อ้างถึงมาตรฐานต่างๆ
- Performance Testing เป็นการทดสอบเพื่อทราบถึงการใช้งานในระบบร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ หรือใช้งานในโครงข่ายสื่อสารโทรคมนาคม
- Reliability Testing เป็นการทดสอบเพื่อทราบถึงความแข็งแรง ความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ ที่ใช้งาน

2.4 การทดสอบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่ง

การทดสอบบรรจุภัณฑ์เพื่อการขนส่งต้องใช้อุปกรณ์ในการทดสอบที่มีราคาสูงกว่าเครื่องทดสอบต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาแล้ว การทดสอบที่มีความสำคัญมาก ได้แก่ การทดสอบการสั่น กระแทก และความต้านทานแรงกดในแนวตั้ง เพื่อเป็นการจำลองการขนย้ายผลิตภัณฑ์ดังแสดงใน



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างช่องทางการขนส่งสินค้า

2.4.1 การทดสอบการสั่นกระแทก

การทดสอบจะทำการปล่อยบรรจุภัณฑ์พร้อม สินค้าให้แตกกระแทกลงสู่พื้น สิ่งสำคัญในการทดสอบนี้ จะต้องสามารถควบคุมบริเวณที่ตกกระแทกของบรรจุภัณฑ์ได้ โดยในขณะที่ปล่อยตกลงมาจะไม่มีการหมุนตัวเพื่อสามารถควบคุมบริเวณที่ตกกระแทกได้ ก็สามารถศึกษาความแข็งแรงในทุก ๆ ด้านของบรรจุภัณฑ์ วิธีการทดสอบการตกกระแทก ณ ความสูงคงที่ ด้วยการกำหนดจำนวนครั้งที่ปล่อยให้ตก ณ ความสูงนั้น ๆ หรืออาจจะทดสอบโดยการเพิ่มความสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งบรรจุภัณฑ์ไม่สามารถปกป้องสินค้าต่อไปได้ วิธีการนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเปรียบเทียบบรรจุภัณฑ์ขนส่งต่างชนิดกันว่า สามารถป้องกันสินค้าได้ดีกว่ากันมากน้อยแค่ไหน

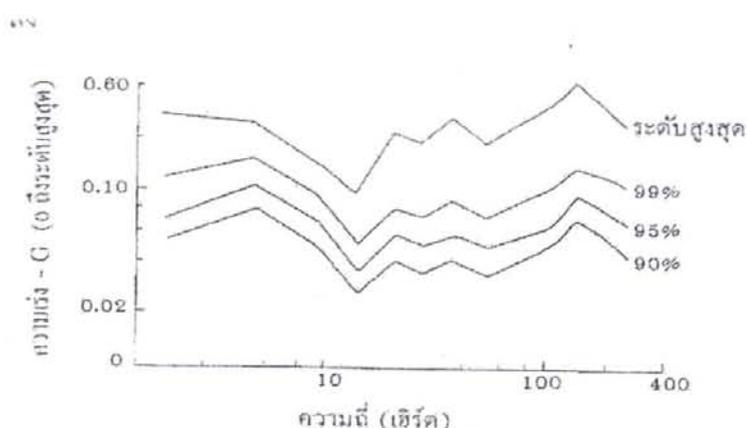
ในห้องปฏิบัติการ การทดสอบประเมินความสามารถของบรรจุภัณฑ์ที่จะป้องกันผลิตภัณฑ์อาหารจากการตกกระแทกใช้เกณฑ์การทดสอบ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 การทดสอบการสั่นกระแทก

น้ำหนักของบรรจุภัณฑ์ (กก.)	ความสูงที่ปล่อยตก (มม.)
น้อยกว่า 10	800
10 ถึง 20	600
20 ถึง 30	500
30 ถึง 40	400
40 ถึง 50	300
50 ถึง 100	200
มากกว่า 100	100

การสั่นสะเทือน เริ่มจากการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเร่งของการสั่นสะเทือนที่มีโอกาสเกิดในระหว่างการขนส่ง

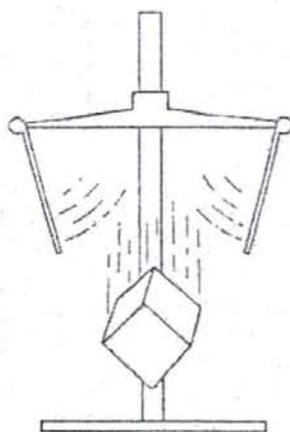
การสั่นสะเทือนที่เกิดระหว่างการขนส่งค่อนข้างสลับซับซ้อนและไม่แน่นอน (Random) ด้วยเหตุนี้การออกแบบบรรจุภัณฑ์เพื่อป้องกันอันตรายจากการสั่นสะเทือนจึงจำต้องทราบถึงค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies) ของสินค้าและชิ้นส่วนของสินค้าบริเวณที่แตกหักง่ายที่สุดแล้วหาวิธีการป้องกันหรือหน่วงให้สินค้าพ้นจากความถี่อันตรายดังกล่าว



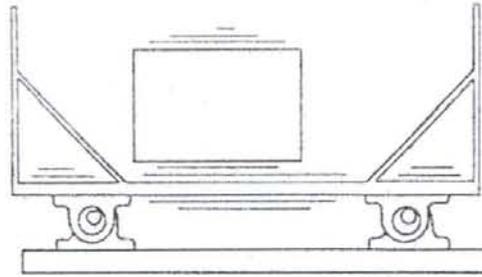
ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง ณ ความถี่ต่าง ๆ

นักออกแบบบรรจุภัณฑ์จำเป็นต้องเลือกหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและความถี่ตามที่แสดงในภาพ 2.2 พร้อมทั้งใช้ข้อมูลอื่น ๆ ประกอบการออกแบบ เช่น ข้อมูลเกี่ยวกับสินค้า สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและความถี่นี้ องค์ประกอบที่จะทำให้สินค้าแตกหัก คือ ค่า Amplitude ของความเร่งซึ่งสูงพอที่จะก่อให้เกิดอันตรายต่อชิ้นส่วนของสินค้า พร้อมทั้งช่วงความถี่ที่ก่อให้เกิดความเร่งนี้ โดยปกติในความถี่นี้จะพิจารณาเฉพาะช่วง 1-200 Hz ซึ่งเป็นช่วงความถี่ในสภาวะการขนส่งจริง

การสั่นสะเทือน มีโอกาสทำให้สินค้าแตกหักเสียหายได้ หรือเกิดการเสียดสีจนทำให้สินค้าขายไม่ออกหรือจำต้องขายลดราคา วิธีป้องกันคือ การพยายามจัดเรียงสินค้าพร้อมวัสดุป้องกัน การสิ้นกระแทก เช่น นำกระดาษลูกฟูกหรือเศษหนังสือพิมพ์มาก่อหรือแทรกภายในบรรจุภัณฑ์ให้แน่นและไม่ให้ยุบตัวโดยง่าย ก็จะช่วยป้องกันอันตรายจากการสั่นสะเทือนในระหว่างการขนส่งได้



ภาพที่ 2.3 การทดสอบการตกกระแทกบรรจุภัณฑ์จะตกลงมาจากที่วางตามความสูงกำหนด



ภาพที่ 2.4 การทดสอบการสั่นสะเทือนโดยบรรจุภัณฑ์วางบนหนึ่งที่สั่นสะเทือนไปตามลูกเบี้ยว

การทดสอบการตกกระแทกและการสั่นสะเทือนตามที่แสดงในภาพที่ 2.3 , 2.4 เป็นวิธีการทดสอบแบบง่าย ๆ ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางด้านนี้ได้รับการพัฒนามากขึ้น โดยการนำเอาระบบคอมพิวเตอร์เข้ามาจำลองและวิเคราะห์การทดสอบ

กล่าวโดยสรุปแล้ว การทดสอบการสั่นกระแทกในการออกแบบบรรจุภัณฑ์ คือ การกำหนดความสูงที่จะตกกระแทกและความสัมพันธ์ของความเร่งและความถี่ของการสั่นสะเทือนในสถานะขนส่ง

2.4.2 ค่า G - Factor

G - Factor หมายถึง ตัวเลขที่จะบอกว่าวัตถุนี้ได้รับแรงทำให้เกิดความเร่ง หรือความหน่วงเป็นกี่เท่าของค่าความเร่งที่ได้รับเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ยกตัวอย่างเช่น วัตถุมีอัตราเร่ง 322 ฟุต/วินาที/นาที

$$\text{ค่า } G = \frac{322}{32.2} = 10$$

$$\text{สรุปเป็นสูตรได้ว่า } G = \frac{A}{g} \quad \dots (2.1)$$

ต่อไปจะหาความสัมพันธ์ระหว่างแรง F กับน้ำหนักของวัตถุ W

กำหนดให้	F	หมายถึง	แรงภายนอกที่มากกระทำต่อวัตถุ
	A	หมายถึง	ความเร่ง
	M	หมายถึง	มวลของวัตถุ

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\text{แรงกระทำ} \quad F = MA \quad \dots (2.2)$$

$$\text{น้ำหนักของวัตถุ} \quad W = Mg \quad \dots (2.3)$$

$$\begin{array}{rclcl} \text{จาก (2)/(3)} & E & = & MA & = & A \\ & W & & Mg & & g \\ & E & = & G & & \\ & W & & & & \end{array}$$

จะกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าค่า G-Factor หมายถึงอัตราส่วนของแรงที่กระทำต่อน้ำหนักของตัววัตถุเอง

2.4.3 Fragility Factor

Fragility Factor เป็นตัวเลขที่บอกว่าวัตถุนี้สามารถทนทานต่อความเร่งได้เป็นกี่เท่าของความเร่ง เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก โดยที่วัตถุนั้นไม่ได้รับความเสียหาย หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าหมายถึงตัวเลขที่บอกว่าวัตถุนี้สามารถรับแรงได้เป็นกี่เท่าของน้ำหนักตัวเอง ยกตัวอย่างเช่น มีผลิตภัณฑ์ชิ้นหนึ่งมี Fragility Factor เท่ากับ 50 หมายความว่า ผลิตภัณฑ์ชิ้นนี้ทนต่อความเร่งได้ถึง 50g หรือรับแรงได้เท่ากับ 50 เท่าของน้ำหนักของตัวเองโดยไม่เสียหาย

2.4.4 โมเมนตัม (Momentum)

โมเมนตัมเป็นคุณสมบัติอันหนึ่งของวัตถุซึ่งกำลังเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างน้ำหนักของวัตถุและความเร็วขณะนั้นมีหน่วยเป็น แรง-ระยะทาง/เวลา เช่น วัตถุอันหนึ่งมีน้ำหนัก 10 ปอนด์ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3 ฟุต/วินาที จะมีโมเมนตัมเท่ากับ 30 ฟุต-ปอนด์/วินาที Law of Conservation of Momentum เป็นกฎที่กล่าวไว้ว่า โมเมนตัมจะไม่สูญหายไปไหน กล่าวคือ ถ้ามีวัตถุ 2 ชิ้นวิ่งมากระทบกัน ผลรวมของโมเมนตัมก่อนกระทบและหลังกระทบจะต้องเท่ากันเสมอ หมายถึงว่าโมเมนตัมของวัตถุชิ้นที่หนึ่งอาจจะลดลง แต่ส่วนที่ลดลงไปนั้นจะไปอยู่ในวัตถุชิ้นที่สอง

การกำหนดค่า G's ของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยประมาณ

0-25	G's	สำหรับอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์บอบบางมาก และชิ้นส่วนของเครื่องบิน
26-50	G's	สำหรับโวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ และเครื่องมือทางไฟฟ้าทั่วไป
51-75	G's	สำหรับวิทยุ โทรทัศน์ (บอบบางน้อยกว่าที่กล่าวแล้วข้างบน)
76-100	G's	สำหรับเครื่องจดบันทึกทางอิเล็กทรอนิกส์และทางไอน้ำ เครื่องมือในห้องทดลอง
101-125	G's	สำหรับเครื่องมือใช้งานเบา ๆ
126-150	G's	ชิ้นส่วนแข็งแรงมาก ทนทานต่อการกระแทกได้สูง

ความสั่นสะเทือน (Vibration) ความสั่นสะเทือนเป็นสาเหตุสำคัญอีกประการหนึ่ง ที่ทำให้สินค้าเสียหายได้ ซึ่งอาจจะเป็นการสั่นสะเทือนแบบ Steady-state หรือ transient shock โดยทั่ว ๆ ไปในการขนส่งด้วยพาหนะต่าง ๆ จะมีความถี่และความเร่งอยู่ในช่วงต่อไปนี้

ตารางที่ 2.2 ความถี่และความเร่งที่เกิดจากการขนส่งด้วยพาหนะต่างๆ

พาหนะที่ใช้	ช่วงความถี่ (f)	ความเร่ง
รถราง	2-10 Hz	0.4 g's
รถบรรทุก	5-23 Hz	0.5 g's
เครื่องบิน	15-100 Hz	0.5 g's
เรือ	2-10 Hz	0.3 g's

ความถี่ (Frequency)	เป็นจำนวนรอบ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา
ความกว้าง (Amplitude)	เป็นระยะทางมากที่สุดที่วัตถุเคลื่อนที่ออกจากเส้นสมดุล
Natural Frequency	เป็นความถี่ที่วัตถุนั้นสั่น เนื่องจากน้ำหนักและคุณสมบัติความยืดหยุ่นของตัวเอง
Forcing Frequency	เป็นความถี่ที่เกิดจากแรงภายนอกกระทำ
Resonance	เป็นกรณีที่ Forcing frequency กระทำให้เกิดความถี่ตรงกัน Natural frequency พอดี

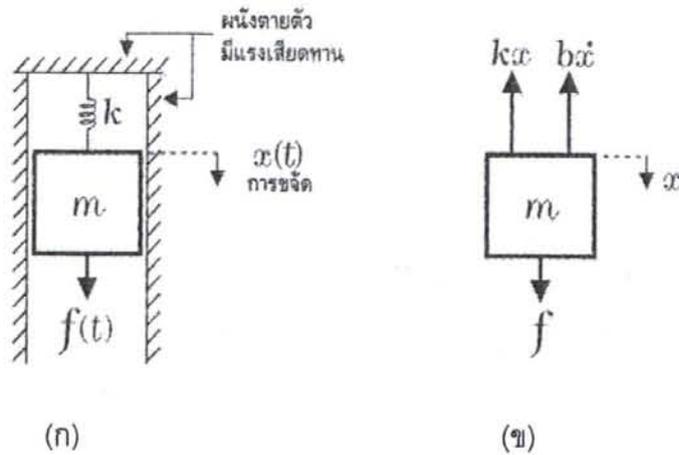
2.5 ระบบทางกล

ระบบทางกลที่จะหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีทั้งประเภทไถล (Translation) และหมุน (rotation) กฎทางฟิสิกส์ที่สำคัญแบบจำลอง คือ กฎของนิวตัน (Newton's law)

$$\sum F = ma \quad \dots(2.4)$$

สำหรับระบบประเภทไถล เมื่อ

F	=	แรงที่กระทำต่อวัตถุ มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
m	=	มวลของวัตถุ มีหน่วยเป็น กิโลกรัม (kg) และ
a	=	ความเร่งของวัตถุ มีหน่วยเป็น เมตร / วินาที ²



ภาพที่ 2.5 (ก) มวลไถลภายในผนังมีแรงเสียดทาน แสดงระบบมวล-สปริง-ตัวหน่วง (mass-spring- damper system)

(ข) แผนภาพวัตถุอิสระ (free-body diagram)

สำหรับผลการทดลอง การคำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ย RMS ของการสั่นสะเทือน ต้องใช้วิธีคำนวณตามสูตรคณิตศาสตร์ หรือใช้ในโมกราฟเปรียบเทียบ สำหรับสูตรการคำนวณ มีดังนี้

$$v = \frac{a}{\omega} = \frac{a}{2\pi f} \dots\dots\dots (2.5)$$

- เมื่อ
- v = ค่าความเร็วเฉลี่ย RMS ของการสั่นสะเทือน
 - ω = ค่าความเร็วเชิงมุมของสั่นสะเทือนเฉลี่ย
 - a = ค่าความเร่งของสั่นสะเทือนเฉลี่ย
 - f = ค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนเฉลี่ย

ส่วนการคำนวณหาค่าระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยของการสั่นสะเทือน ต้องใช้วิธีคำนวณตามสูตรคณิตศาสตร์ หรือใช้ในโมกราฟเปรียบเทียบ สำหรับสูตรการคำนวณ มีดังนี้

$$X = \frac{a}{(\omega)^2} = \frac{a}{(2\pi f)^2} \dots\dots\dots (2.6)$$

- เมื่อ
- X = ค่าระยะการเคลื่อนที่เฉลี่ยของการสั่นสะเทือน
 - ω = ค่าความเร็วเชิงมุมของสั่นสะเทือนเฉลี่ย
 - a = ค่าความเร่งของสั่นสะเทือนเฉลี่ย
 - f = ค่าความถี่ของการสั่นสะเทือนเฉลี่ย

2.6 แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetism)

2.6.1 กระแสไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็ก (The Magnetic Field) คือ บริเวณ (Space) ที่มีอำนาจการกระทำที่เกิดจากแม่เหล็ก อำนาจการกระทำที่ส่งออกมาจากแม่เหล็กนี้มีลักษณะเป็นเวกเตอร์ (Magnetic Field Vector) มีสัญลักษณ์เป็น B เรียกอีกหนึ่งว่าอำนาจแม่เหล็กชักนำ (Magnetic Induction) เส้นแรงชักนำ (Line of Induction) เหล่านี้มีลักษณะที่เป็นเวกเตอร์ด้วย เรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux) มีสัญลักษณ์เป็น Φ_B และมีหน่วยในหารวัดเป็น weber

สนามแม่เหล็กมีหน่วยการวัดเป็นความเข้มของจำนวนฟลักซ์แม่เหล็กหรือเป็นจำนวน Magnetic Flux / unit area

ดังนั้น

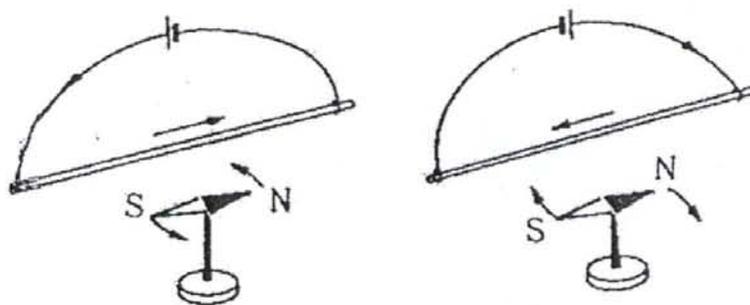
$$\text{Magnetic Induction} = \text{Magnetic Flux} / \text{unit area}$$

$$\text{หรือ} \quad B = \frac{\Phi_B}{A} \text{ weber/m}^2 \quad \dots(2.7)$$

∴ ในทางกลับ จะสามารถหาเส้นแรงแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กได้ ดังนี้

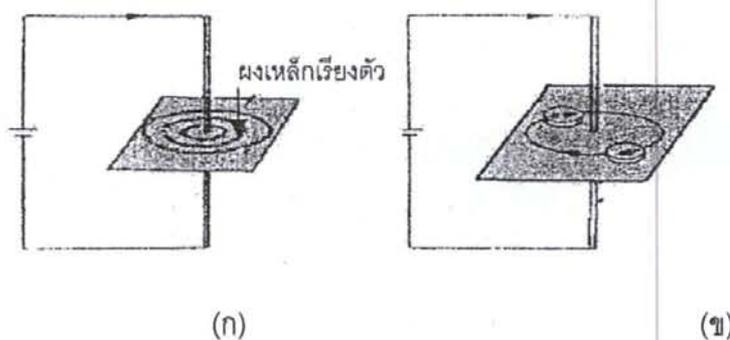
$$\begin{aligned} \Phi_B &= \int \bar{B} \cdot d\bar{S} \\ &= \int B \cos \theta \, dS \text{ weber} \end{aligned} \quad \dots(2.8)$$

เมื่อนำเข็มทิศแม่เหล็กเข้าเส้นลวดไฟฟ้าที่มีกระแสไหลผ่าน เข็มทิศจะหมุนตามทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้างดภาพที่ 2.6 จากผลการทดลองนี้ทำให้ทราบว่ากระแสไฟฟ้าสามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกับก้อนแม่เหล็กนั่นเอง



ภาพที่ 2.6 สนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้า

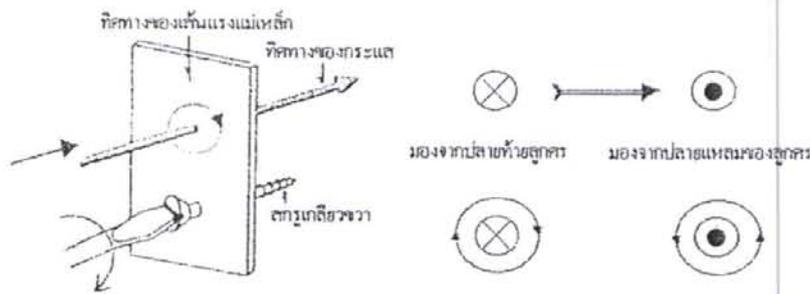
เมื่อนำเอาสายไฟฟ้าร้อยผ่านรูกระดาดแข็งดังภาพที่ 2.7 (ก) แล้วรอยผงเหล็กบนกระดาดแข็งนั้น เมื่อผ่านกระแสเข้าไปในเส้นลวด แล้วเคาะกระดาดแข็งนั้นเบา ๆ ผงเหล็กจะเรียงตัวกันเป็นวงกลม โดยมีเส้นลวดไฟฟ้าเป็นศูนย์กลางและจะกระจายตัวกันอย่างหนาแน่นถ้ายิ่งใกล้เส้นลวดไฟฟ้านั้น เราจึงทราบว่า รอบ ๆ กระแสไฟฟ้านั้นมีเส้นแรงแม่เหล็กเป็นรูปวงกลม โดยมีกระแสไฟฟ้านั้นเป็นจุดศูนย์กลาง และยิ่งใกล้เส้นลวดไฟฟ้าเส้นแรงแม่เหล็กยิ่งหนาแน่นขึ้น



ภาพที่ 2.7 (ก) กระแสไฟฟ้าและเส้นแรงแม่เหล็ก

(ข) กระแสไฟฟ้าและทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก

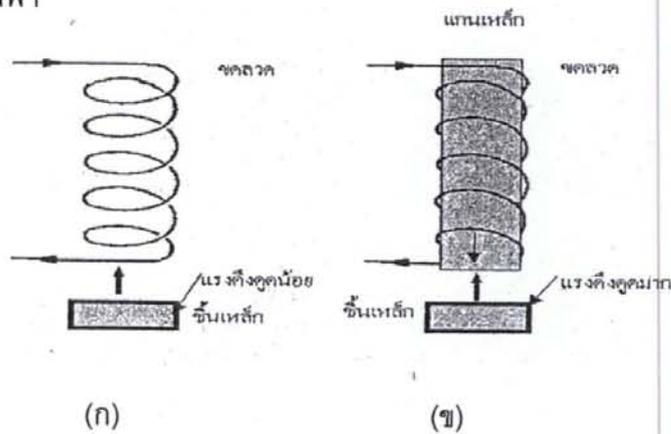
จากภาพ 2.7 (ข) กล่าวคือเมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในเส้นลวดไฟฟ้าที่ร้อยผ่านกระดาดโดยมีเข็มทิศแม่เหล็กวางไว้บนกระดาดแข็งนั้นแทนที่ผงเหล็ก เส้นแรงแม่เหล็กที่ออกจากเข็มทิศแม่เหล็ก จะมีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเข็มทิศแม่เหล็กจะมีทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของกระแสไฟฟ้าและมีทิศเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้านั้น จึงได้กฎเกณฑ์ที่ว่า "เมื่อกระแสไฟฟ้าไปในทิศทางการชันสกรูเกลียวขวา ทิศทางของเกลียวขวาจะแสดงถึงทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้น" กฎข้อนี้เรียกว่า "กฎสกรูเกลียวขวา" ความสัมพันธ์ดังกล่าวเขียนแสดงในภาพที่ 2.8 โดยที่เครื่องหมาย \otimes และ \odot แสดงถึงทิศทางกรไหลของกระแสไฟฟ้า \otimes หมายถึงปลายส่วนหาง และ \odot หมายถึง ปลายส่วนหัวของลูกศรดังภาพ



ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างทิศทางกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็ก

2.13.4 ขดลวดกับแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อนำขดลวดที่มีกระแสไหลผ่านเข้าไปใกล้ขั้วเหล็ก ขั้วเหล็กจะขยับเขยื้อนบ้าง แต่ไม่สามารถดูดติดขึ้นมาได้ ดังภาพ 2.9 (ก) เมื่อนำเอาแท่งเหล็ก (เรียกว่าแกนเหล็ก) สอดเข้าไปในขดลวด ขั้วเหล็กจะถูกดูดอย่างแรง ดังภาพ 2.9 (ข) เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะเมื่อขดลวดยังไม่มีแกนเหล็ก สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อย และไม่มีขั้วแม่เหล็ก และเมื่อเอาแกนเหล็กใส่เข้าไป เหล็กมีคุณสมบัติเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กได้ดี เส้นแรงแม่เหล็กจึงรวมตัวกันหนาแน่น ในแกนเหล็กนั้น โดเมนแม่เหล็กที่อยู่ในเนื้อเหล็กจะเรียงตัวในทิศทางเดียวกับเส้นแรงแม่เหล็กนั้น แกนเหล็กจึงกลายเป็นแท่งแม่เหล็ก และให้เส้นแรงแม่เหล็กที่มีกำลังสูง แท่งแม่เหล็กที่ทำขึ้นเช่นนี้ เรียกว่าแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า



ภาพที่ 2.9 (ก) ขดลวดเปล่า
(ข) เมื่อใส่แกนเหล็ก

เมื่อหยุดกระแสที่ไหลผ่านขดลวด โดเมนแม่เหล็กในแกนเหล็กจะมีทิศทางการจัดกระจายตามเดิมทำให้เส้นแรงแม่เหล็กหายไป แกนเหล็กจึงไม่เป็นแม่เหล็กอีกต่อไป แต่มีเหล็กบางชนิดที่เมื่อตัดกระแสของขดลวดแล้วก็ยังเป็นแม่เหล็กอยู่ได้ เพราะโดเมนแม่เหล็กยังคงรักษาการเรียงตัวในสภาพเดิมได้ ดังเช่นแม่เหล็กรูปเกือกม้า หรือแท่งแม่เหล็กที่พูดในตอนต้นนั่นเอง แม่เหล็กประเภทนี้เรียกว่าแม่เหล็กถาวร

2.13.5. ฟลักซ์แม่เหล็กและวงจรแม่เหล็ก

หลักการวิเคราะห์วงจรแม่เหล็กเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น เส้นสนามแม่เหล็ก (ϕ) ศักดาไฟฟ้าของสนามแม่เหล็ก (V_m) ค่ารีลัคแทนซ์ (Reluctance) ฯลฯ ก็คล้ายกับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าเบื้องต้น กรณีวงจรแม่เหล็กที่เป็นแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งเกิดจากการไม่เชิงเส้น หนึ่งวงจรไฟฟ้าที่ไม่เชิงเส้นหมายถึงวงจรอาจประกอบด้วยเทอร์มิสเตอร์ไดโอด (thermister diode) เช่น ไล้หลอดไฟฟ้า ไล้หลอดวิทยุ ฯลฯ เป็นต้น

ขอเริ่มวิเคราะห์วงจรแม่เหล็ก โดยอาศัยสมการ ในเรื่องของสนามไฟฟ้าช่วย นั่นคือสำหรับสนามแม่เหล็กอาจเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\vec{H} = -\nabla V_m \quad \dots(2.9)$$

ค่า V_m หมายถึงศักดาไฟฟ้าที่เกิดในสนามแม่เหล็กแถวๆ บริเวณที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่าน หน่วยของ V_m คือ แอมป์ และ V_m เป็นปริมาณทางสเกลาร์ หนึ่งชื่ออีกชื่อหนึ่งของ V_m คือ magneto motive force เขียนย่อๆ ว่า "mmf" นอกจากนี้ V_m อาจหมายถึงต้นกำเนิดของวงจรแม่เหล็ก

พิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างจุด a กับจุด b ซึ่งเกิดจากการย้ายประจุทดสอบ (+1 คูลอมบ์) ในสนามไฟฟ้า \vec{E} เมื่อใช้หลักการอินทิกรัลเส้นตรง พบว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าคือ

$$V_{ab} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{L} = \int_b^a \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad \dots(2.10)$$

ดังนั้นเมื่อนำหลักการดังกล่าวข้างบนมาใช้กับวงจรแม่เหล็กที่มีสนามแม่เหล็ก จะได้ค่า mmf ของแม่เหล็ก ดังนี้คือ

$$V_{mab} = \int \bar{H} \cdot d\bar{L} \quad \dots(2.11)$$

อาจกล่าวได้ว่าทั้งสมการ $\bar{J} = o\bar{E}$ (ในเรื่องสนามไฟฟ้า) กับสมการ $\bar{B} = \mu\bar{H}$ (ในเรื่องสนามแม่เหล็ก) มีส่วนคล้ายคลึงกันมาก นอกจากนี้สมการ $I = \int \bar{J} \cdot d\bar{S}$ ก็คล้ายกับสมการ $\phi = \int \bar{B} \cdot d\bar{S}$ มาก

จากวงจรไฟฟ้าเบื้องต้นจะได้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับกระแสไฟฟ้า \times ความต้านทานไฟฟ้านั้นคือ $V = IR$ ดังนั้นสำหรับวงจรแม่เหล็กที่มีเส้นที่มีเส้นลวดไฟฟ้าพันอยู่ที่แกนเหล็กและมีกระแสไฟฟ้าตรงไหลผ่านขดลวดดังกล่าว ย่อมหาค่าของ V_m ได้ดังนี้

$$V_m = \phi R \quad \text{แอมป์} \quad \dots(2.12)$$

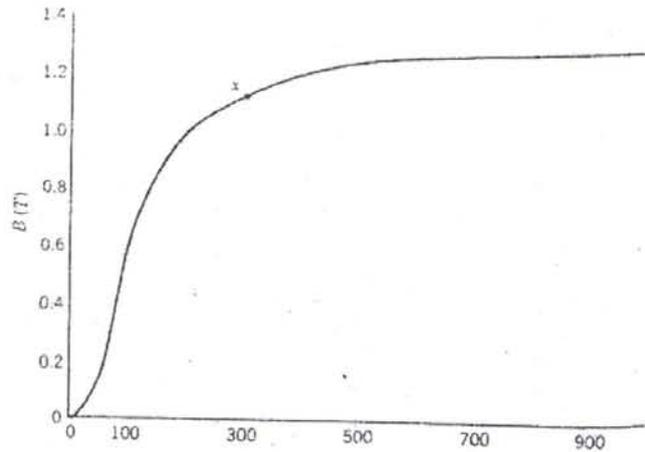
เมื่อ ϕ หมายถึง เส้นสนามแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์ (Wb)

R หมายถึง ค่ารีลัคแทนซ์ มีหน่วยเป็นแอมป์-จำนวนรอบ/เวเบอร์ (A-N/Wb)

บทเรียนที่ผ่านมาได้เคยกล่าวไว้ว่า กรณีวัสดุสื่อไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัด S ยาว d และสภาพความเป็นสื่อไฟฟ้าเท่ากับ σ จากข้อมูลดังกล่าวย่อมหาความต้านทานของวัสดุสื่อไฟฟ้าชิ้นนี้ได้ดังนี้ $R = \frac{d}{\sigma S}$ ดังนั้นสำหรับวงจรแม่เหล็กย่อมหาค่าของ R ได้ด้วย

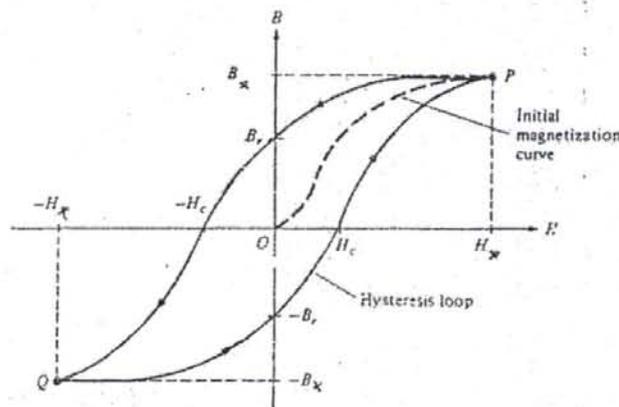
$$R = \frac{d}{\mu S} \quad \text{A-N/Wb} \quad \dots(2.13)$$

ต่อไปนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า \bar{H} กับค่า \bar{B} ที่ไหลในวงจรแม่เหล็กหรือไหลในแกนเหล็ก ตัวอย่างเส้นกราฟ $-\bar{B}\bar{H}$ ของแกนซิลิคอน สตีล มีลักษณะดังภาพ (2.10) ข้างล่าง อนึ่งเส้นกราฟดังกล่าวมีอีกชื่อหนึ่งว่า "Magnetization curve"



ภาพที่ 2.10 แสดงเส้นกราฟ -BH ของซิลิกอน สตีล

จากภาพ (2.24) เมื่อค่อยๆ เพิ่ม V_m ให้สูงขึ้น อันนี้หมายถึงการเพิ่มค่าของสนามแม่เหล็ก \bar{H} นั้นเอง และทำให้ค่า \bar{B} เพิ่มตามอย่างไม่เป็นเชิงเส้น จะเห็นว่าที่สนามแม่เหล็ก \bar{H} ระหว่าง 0 ถึง 100 แอมป์-รอบ สนามแม่เหล็ก \bar{B} จะเพิ่มอย่างรวดเร็วแต่หลังจาก \bar{H} มากกว่า 100 แอมป์-รอบขึ้นไปแล้ว ค่า \bar{B} จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อให้ \bar{H} สูงมากขึ้นทำให้ค่า \bar{B} ถึงจุดอิ่มตัว คือที่ $\bar{H} = 300$ แอมป์-รอบ จะได้ค่า \bar{B} อิ่มตัวที่จุด x คือ B_x ถ้าเพิ่มค่า \bar{H} ให้สูงกว่า 300 แอมป์-รอบขึ้นไปอีก ก็ไม่ทำให้ค่า \bar{B} สูงกว่าค่า B_x เท่าไหร่ แต่ผลเสียตามมาก็คือ แกนเหล็กจะร้อนมากขึ้น ทำให้สูญเสียพลังงานไฟฟ้าทางอ้อมโดยเปล่าประโยชน์สัมพันธ์ระหว่างค่า \bar{H} กับ \bar{B} อีกแบบหนึ่งที่รู้จักกันดีก็คือ ฮิสเตอรีซิส ลูป (Hysteresis loop) เช่นภาพที่ (2.11) แสดง ฮิสเตอรีซิส ลูป ของแกน ซิลิกอน สตีล จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มค่า \bar{H} จาก 0 ถึง H_x เส้นกราฟจะเริ่มจาก 0 เรื่อยๆ ไปอย่างไม่เป็นเชิงเส้น จนถึงจุด (ก) ณ ที่จุด ก. จะได้ค่าขนาดของสนามแม่เหล็ก $\bar{B} = B_x$ ที่ B_x นี้ถือว่าเป็นจุดอิ่มตัว



ภาพที่ 2.11 แสดง ฮิสเตอรีซิส ลูป ของแกน ซิลิกอน สตีล

ของสนามแม่เหล็ก ถ้าเพิ่มค่า \bar{H} ให้มากกว่า \bar{H}_x แล้ว ค่า \bar{B} ที่จะได้ก็จะไม่ต่างไปกว่าหรือมากกว่า \bar{H}_x เท่าใดเลย ถ้าค่อยๆ ลดค่า \bar{H} ให้ต่ำลงจนเป็นศูนย์ จะเห็นว่าที่ $\bar{H} = 0$ ค่า $\bar{B} \neq 0$ แต่จัดเท่ากับ B_r แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ไม่มีกระแสไหลในวงจร ก็ยังมีขนาดสนามแม่เหล็ก $\bar{B} = B_r$ ลงเหลือในแกนเหล็ก เมื่อเปลี่ยนทิศทางกระแสไฟฟ้าตรงเข้าวงจร นั่นคือเป็นการเพิ่มค่า \bar{H} ในทางลบ ถ้าค่อยๆ เพิ่มค่า \bar{H} ในทางลบให้มากขึ้นๆ จนถึง $-H_x$ ก็จะได้ขนาดสนามแม่เหล็ก $\bar{B} = -B_x$ และพบว่าขนาดของ $-B_x = +B_x$ แต่ทิศทางตรงกันข้าม อนึ่งค่า $-B_x$ นี้คือขนาดของสนามแม่เหล็ก \bar{B} ที่อิ่มตัวเมื่อขนาดของ $\bar{H} = -H_x$ ส่วนค่า B_x คือขนาดสนามแม่เหล็ก \bar{B} ที่อิ่มตัวเมื่อขนาดของ $\bar{H} = +H_x$ ต่อไปถ้าค่อยๆ ลดค่า \bar{H} ลงมาจนมีค่าเป็นศูนย์ จะพบว่าค่าขนาดของ \bar{B} ในแกนเหล็กเท่ากับ $-B_r$ แสดงว่าที่ $\bar{H} = 0$ ครั้งนี้ก็ยังมีสนามแม่เหล็ก \bar{B} ลงเหลือในแกนเหล็กอีก และค่า $-B_r$ ครั้งหลังจะเท่ากับค่า $+B_r$ ครั้งก่อนอีกด้วย แต่ทิศทางตรงกันข้าม อย่างไรก็ตาม อย่างไรก็ดีถ้าเพิ่มค่า \bar{H} ให้มากขึ้นในทางบวกอีกครั้งจะได้เส้นกราฟไม่ผ่านจุด O อนึ่งเส้นกราฟของ ฮีสเทอรีซิส ลูปของแกนเหล็กชั้นดีคือให้สนามแม่เหล็ก \bar{B} สูงก็จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสมาก

2.7 บทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนและการทดสอบการสั่นของผลิตภัณฑ์ที่มีผู้สนใจซึ่งได้นำเผยแพร่ มีดังนี้

บทความเรื่อง การสั่นสะเทือนที่มีผลต่อเสียงของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
โดย ชานนท์ วรวรรษนันท์ ฐาปณีย์ ภมรบุตร และ นกตัญญ อชวาคม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บทความได้ศึกษาผลกระทบจากการหมุนของสปินเดิลมอเตอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งคือ การสั่นสะเทือน และเสียงรบกวน เพื่อศึกษาแนวทางปฏิบัติในการทดสอบหาคุณสมบัติการสั่นสะเทือน (Vibration characteristics) ได้แก่วิธีการวัดธรรมชาติของ สปินเดิลมอเตอร์ ชนิด Fluid-Dynamic Bearing (FDB) อีกทั้งยังทดสอบการตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ขณะหมุน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์ ผลการทดสอบแสดงถึงการตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์ขณะหมุน ซึ่งปรากฏเป็น Harmonic อันดับต่างๆของความถี่รอบ โดยอันดับที่ปรากฏสอดคล้องกับจำนวน Pole และ slot ของมอเตอร์ และจากผลการทดสอบการสั่นสะเทือนทั้งสอง ลักษณะ พบว่าผลการตอบสนองเชิงความถี่ของมอเตอร์นั้นมีความถี่หนึ่งที่มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ซึ่งจะทำให้มอเตอร์มีการ สั่นสะเทือนสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดระดับเสียงที่

สูง ณ ความถี่นั้น การลดการสั่นสะเทือนที่ความถี่ดังกล่าวสามารถทำได้ โดยอาจจะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของมอเตอร์เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติของให้ปรากฏ ณ ความถี่อื่น

งานวิจัยเรื่อง การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของ Actuator Arm ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ พร้อมทั้งตรวจสอบการสั่นสะเทือนโดยการใช้ LDV โดย นายเทวิน พันภัย และ อ. ธีระ เจียศิริพงษ์กุล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ บทความนี้ได้ศึกษาถึงการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator Arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ ของการสั่นสะเทือนในแขนหัวอ่าน/เขียน พร้อมกับเปรียบเทียบค่าที่ได้กับการทดสอบโดยการใช้ LDV (Laser Doppler Vibrometer) ปรากฏว่าจากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) และผลการวิเคราะห์การสั่นสะเทือน โดยการทดสอบด้วย LDV แสดงให้เห็นถึงค่าความถี่ธรรมชาติ ของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษารูปแบบของการสั่นสะเทือนของตัว Head Stack Assembly (HSA) และเพื่อใช้ในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของแขนหัวอ่าน/เขียนในระดับสูงต่อไป

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบและการสร้างบรรจุภัณฑ์แฉกกันเซรามิค โดยนายอาทิตย์ จันทระจิต และรศ.ชัยพร วงศ์พิศาล เทคโนโลยีชนถ่ายวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งเป็นการออกแบบและสร้างบรรจุภัณฑ์แฉกกันเซรามิค โดยคำนึงถึงความแข็งแรงของกล่องบรรจุภัณฑ์ ให้ช่วยลดความเสียหายและ การช่วยให้สามารถลำเลียงขนส่งได้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึง ความสามารถในการคุ้มครองและเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์เป็นสิ่งสำคัญ ในการทดสอบบรรจุภัณฑ์ ได้มีการทดสอบอยู่ 3 ชนิด คือ การทดสอบความต้านแรงกดของกล่องกระดาษลูกฟูก โดยใช้เครื่องทดสอบ คือ Compression Tester Tamogrocki, การทดสอบความต้านการตกกระแทก และการทดสอบการต้านแรงสั่นสะเทือนของภาชนะบรรจุเพื่อการขนส่ง โดยใช้เครื่องทดสอบคือ Vibration Tester ในการทดสอบ การทดสอบหาค่าความต้านทานแรงกด การทดสอบคือนำกล่องที่จะทำการทดสอบ เข้าไปวางไว้ที่ใต้เครื่องทดสอบ แล้วให้เครื่องทำการกดทับสังเกตตุลอนของกล่อง เกิดการหักก็ให้หยุดการทดสอบ ทำการบันทึกค่า ทำเช่นนี้กับทุกกล่องที่ทำการทดสอบ ส่วนการทดสอบการสั่นสะเทือนนั้นจะนำกล่องที่จะทำการทดลอง มาใส่สินค้าที่ต้องการจะขนส่งจริง ทำการปิดกล่องให้เรียบร้อย วางบนเครื่องทดสอบแล้วเปิดเครื่องทำการทดสอบ เครื่องจะทำการสั่นสะเทือน ที่ความถี่ 240 รอบต่อนาที ระยะการสั่น 25 มิลลิเมตร เป็น

ระยะเวลา 60 นาที และการทดสอบความต้านการทดสอบจะใช้ความสูงในการตกกระแทกที่ความสูง 30 นิ้ว ผลจากการทดสอบบรรจุภัณฑ์ ภาชนะบรรจุที่เลือกใช้สำหรับแพ็คเกจเดียว คือกล่องแจกันเซรามิคลายเบญจรงค์แบบแปดเหลี่ยม (Code A2) สามารถรับแรงกดได้ 110 กิโลกรัม และกล่องแจกันเซรามิคลายไข่มุกแบบหกเหลี่ยม (Code B1) สามารถรับแรงกดได้ 108 กิโลกรัม สำหรับแพ็คเกจคือ กล่องแจกันเซรามิค ลายเบญจรงค์แบบสี่เหลี่ยมแนวนอน (Code A4) สามารถรับแรงกดได้ 79 กิโลกรัม และกล่องแจกันเซรามิคลายไข่มุกแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Code B4) สามารถรับแรงกดได้ 139 กิโลกรัม ทั้งหมดนี้สามารถรับแรงด้านทานแรงกดทับ แรงสั่นสะเทือน และแรงด้านทานการตกกระแทกได้ดี และสามารถที่จะทำหน้าที่คุ้มครองป้องกันสินค้าไม่ให้เกิดความเสียหายได้

งานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติการสั่นสะเทือน ของผลส้มเขียวหวานที่สัมพันธ์กับการลดความเสียหายและลดต้นทุนการผลิต โดย รศ.ดร.บัณฑิต จริโมภาส ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์วัดและทดสอบหาคุณสมบัติการสั่นสะเทือนของผลส้มเขียวหวาน ซึ่งประกอบด้วย ถังเหล็กขนาด $0.4 \times 0.6 \times 0.6$ ม. สามารถบรรจุตะกร้าพลาสติกที่บรรจุผลส้มเขียวหวานได้ 25 กก. กลไกในการสั่นสะเทือนประกอบ ไปด้วยเบี่ยงขนาด 2 และ 4 มม. พร้อมด้วยแขนที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของลูกเบี่ยง มอเตอร์ขนาด 3 แรงม้า เป็นชนิดปรับรอบและกล่องควบคุมเวลาการทำงานของมอเตอร์ สามารถทดสอบการสั่นสะเทือนได้ทั้งแนวตั้งและแนวระดับ ปัจจัยตัวคุมแอมพลิจูด, ความถี่ และระยะเวลาในการสั่นสะเทือนมีอิทธิพลมีนัยสำคัญที่ระดับ 5% ต่อค่าดัชนีการทรงตัว, เปอร์เซ็นต์การยุบตัว และเปอร์เซ็นต์ความชื้นในแนวตั้งและแนวระดับ ซึ่งปัจจัยตัวคุมที่เหมาะสมคือ แอมพลิจูด 2 มิลลิเมตร, ความถี่ 10 Hz และระยะเวลาในการสั่นสะเทือน 5 วินาที ให้คุณสมบัติการสั่นสะเทือน (1) ในแนวตั้ง ค่าดัชนีการทรงตัว = 2.10, เปอร์เซ็นต์การยุบตัว = 3.19 และ เปอร์เซ็นต์ความชื้น = 0.48 (2) ในแนวระดับ ค่าดัชนีการทรงตัว = 2.08, เปอร์เซ็นต์การยุบตัว = 1.99 และเปอร์เซ็นต์ความชื้น = 0 คุณสมบัติการสั่นสะเทือนของผลส้มเขียวหวานที่หาได้จากการศึกษา นี้ จะเป็นเกณฑ์ช่วยให้สามารถออกแบบสร้างเครื่องทำให้ผลไม้เต็มแบบสั่นสะเทือนต่อไป ซึ่งเครื่องจักรดังกล่าวจะช่วยแก้ปัญหาผลส้มยุบตัว ผลส้มช่นกันเสียหายระหว่างการขนส่งทางบก นอกจากนี้ผู้ขายส่งจะสามารถบรรจุส้มได้มากขึ้น ทำให้ขายของได้มากขึ้น ในขณะที่ผู้ซื้อ (ผู้ขายปลีก) สามารถขนส่งต่อ 1 คันรถบรรทุกไปได้มากขึ้น ด้วยค่าขนส่งเท่าเดิม ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้

งานวิจัยเรื่อง บรรจุภัณฑ์ขายส่งผลมังคุดที่เหมาะสมภายใต้การสั่นสะเทือนจำลอง โดย รศ.ดร.บัณฑิต จริโมภาส นายนเรนทร บุญส่ง นายอาทิตย์ จันทรหิรัญ และนายวิเชฐ ศรีชลเพชร งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะทดสอบเปรียบเทียบการทำงานของบรรจุภัณฑ์ขายส่งผลมังคุดที่ใช้ในประเทศและเพื่อส่งออกในปัจจุบัน และเสนอบรรจุภัณฑ์ใหม่ที่มีความสามารถในการปกป้องผลมังคุดสำหรับการขนส่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาได้รวมเอาการทดสอบเขย่าบรรจุภัณฑ์ที่มีใช้อยู่และพัฒนาใหม่ 9 แบบกับผลมังคุดที่เก็บใหม่จากสวนจำนวน 315 กิโลกรัม ด้วยเครื่องจำลองการสั่นสะเทือนที่ความถี่ของการเขย่า 4 Hz เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM D999 method A2 ทำการทดลองบรรจุภัณฑ์แบบละ 3 ซ้ำ ผลปรากฏว่า กล่องโฟมบรรจุมังคุด 3 ชั้น และใช้ถาดหลุมปกป้องผลมังคุดได้ดีที่สุดคือ มีผลมังคุดเสียหายต่ำสุด (ความเสียหายที่กลีบเลี้ยง 9.3%, ซ้ำ 3.7%, เปลือกแข็ง 2.8%, เปลือกถลอก 3.7%) ที่ความหนาแน่นการบรรจุ 21.14% และราคาบรรจุภัณฑ์ 5.54 บาท/กก. ของผลมังคุด