



การวิเคราะห์พื้นสะพานพอลิเมอร์ชนิดน้ำหนักเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใย  
โดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

## Finite Element Analysis of Light Weight FRP Bridge Deck Composite

พงศ์ศักดิ์ สุขมณี

Pongsak Sookmanee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Engineering in Civil Engineering  
Prince of Songkla University

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์พื้นสะพานพอลิเมอร์ชนิดน้ำหนักเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์
ผู้เขียน	นายพงศ์ศักดิ์ สุขมณี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี)

..... กรรมการ  
(ดร.บุญ จันทร์ทักษิโณภาส)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เวทย์วิวัฒน์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม  
โยธา

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์            การวิเคราะห์พื้นสะพานพอลิเมอร์ชนิดน้ำหนักเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใย  
   โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์

ผู้เขียน                      นายพงศศักดิ์ สุขมณี

สาขาวิชา                    วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา                   2553

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุที่นิยมอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้งานทางด้านวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐาน โดยวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีประสิทธิภาพและศักยภาพที่สูงสำหรับใช้เป็นวัสดุเสริมแรง, เพิ่มประสิทธิภาพ, บำรุงปฏิสังขรณ์และใช้ในการทดแทนพื้นสะพานทางหลวง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก ได้แก่ **1)** ศึกษาพฤติกรรมทางโครงสร้างของพื้นสะพานพอลิเมอร์ชนิดน้ำหนักเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใย (ทั้งระดับชิ้นส่วนและระดับระบบ) ภายใต้อิทธิพลของแรงกระทำสถิตยศาสตร์ที่แตกต่างกันผ่านแบบจำลองทางไฟไนท์อิลิเมนต์ **2)** ตรวจสอบผลที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากห้องปฏิบัติการ และ **3)** หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักของระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและมีคานที่รองรับเป็นหลักผ่านการศึกษาระบบพาราเมตริกซ์โดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนต์และข้อมูลจากการศึกษาที่ผ่านมา

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแบบหลายเซลล์จำนวนสองประเภท ได้แก่ **Prodeck4** และ **Prodeck8** โดยวิเคราะห์หาผลตอบสนองในช่วงยึดหยุ่นตลอดจนค่าพิบัติจากแบบจำลองแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้งระดับชิ้นส่วนและระบบ ซึ่งผลที่ได้จากไฟไนท์อิลิเมนต์ ได้แก่ ค่าการโก่งตัว ค่าความแข็งเกร็งของการตัด และแรงกระทำพิบัติ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดสอบ พบว่ามีความสอดคล้องกันดีระหว่างผลที่ได้จากไฟไนท์อิลิเมนต์กับข้อมูลจากการทดสอบ สำหรับการศึกษาระบบพาราเมตริกซ์มีปัจจัยหลักเกี่ยวกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ทำการศึกษาภายใต้เงื่อนไขจากแรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน **AASHTO HS25** ได้แก่ ประเภทแผ่นพื้น, ตำแหน่งและจำนวนแรงกระทำบนช่องทางจราจร, ความกว้าง, ความยาว, ระยะห่างของคานที่รองรับ (**S**) และพฤติกรรมในการประกอบของแบบจำลอง เพื่อหาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักของระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและมีคานที่รองรับเป็นหลัก ผลการศึกษา

แบบพาราเมตริกแสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่มากที่สุดขึ้นอยู่กับระยะห่างของคานที่รองรับ (S) และตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุก จากการวิเคราะห์โดยอาศัยข้อมูลการทดสอบและข้อมูลจากการศึกษาอื่นๆที่ผ่านมา พบว่าค่าขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่เหมาะสม ได้แก่  $0.1331S+0.3116$  และ  $0.1331S+0.0116$  ตามลำดับ

ก่อนที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ในภาคสนาม มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาลักษณะของผลตอบสนองภายใต้สภาวะของแรงกระทำต่างๆ ดังนั้น การศึกษานี้จะช่วยให้วิศวกรสามารถออกแบบอย่างสมเหตุสมผลและปฏิบัติได้จริง ตลอดจนมีความคุ้มค่าต่องบประมาณของระบบโครงสร้าง

**คำหลัก:** พอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย แผ่นพื้นสะพาน ไฟไนท์อีพ็อกซี วัสดุประกอบ  
ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก

Thesis Title            Finite Element Analysis of Light Weight FRP Bridge Deck Composite  
Author                    Mr. Pongsak Sookmanee  
Major Program        Civil Engineering  
Academic Year        2010

## ABSTRACT

Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites are becoming more popular in civil engineering and infrastructure applications. Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites were considered to have high performance and potential for use in reinforcement, retrofit, rehabilitation and replacement of highway bridge decks.

The main objective of this research effort are: 1) to evaluate structural performance of light weight multi-cellular FRP composite bridge decks (both module and system levels) under various static loading conditions through finite element modeling, 2) to validate analytical response of FRP composite bridge decks with data from laboratory evaluations and 3) to evaluate the transverse load distribution factors of the steel stringer - FRP bridge deck systems through parametric studies using FEA and previous research data.

Two multi-cellular FRP composite bridge deck types including Prodeck4 (low profile) and Prodeck8 (high profile) were studied in this research. FE models of FRP bridge deck components and systems were performed to determine both elastic and failure responses. The relative deflection, equivalent flexural rigidity and failure load (mode) based on FE results have been compared with experimental data. A good correlation was found to exist between the FE results and the experimental data. For parametric study, six main factors namely FRP bridge decks, lane load, width, span length, girder spacing and composite action are comprehensively investigated under (AASHTO HS25) truck loading conditions. The load distribution factors (LDF) of the steel stringer - FRP bridge deck systems were generated and proposed using analysis and field data. The analytical results obtained from the parametric study showed that maximum LDF depends on the girder spacing and truck load position. By collecting the analytical results and previous research data, the LDF equations based on our study were proposed as follows:  $0.1331S+0.3116$  (upper limit) and  $0.1331S+0.0116$  (lower limit).

Before field implementation, the performance evaluation under various loading conditions is essential. Thus this study should help engineers arrive at more realistic designs and cost effective structural system

**Key words:** Fiber Reinforced Polymer (FRP), Bridge Deck, Finite Element, Composites, Load Distribution Factor (LDF)

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ประชาเสรี ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางแก่ผู้วิจัย ตลอดจนการปฏิบัติงานวิจัยชิ้นนี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ ลิ้มกัตถัญญู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.บุญ จันทร์ทักษิณโณภาส กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เวทย์วิวัฒน์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ให้งานวิจัยชิ้นนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2550

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณ น้ำใจจากพี่ๆเพื่อนๆและน้องๆ นักศึกษาปริญญาโท ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ สิ่งสำคัญสุด ที่ทำให้มีข้าพเจ้าในวันนี้ พระคุณของบิดามารดา และสมาชิกทุกคนในครอบครัว เป็นสิ่งสำคัญที่ผลักดันจนข้าพเจ้าสำเร็จการศึกษา และข้าพเจ้าจะระลึกถึงอยู่เสมอ

พงศ์ศักดิ์ สุขมณี

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(12)
รายการรูปประกอบ	(15)
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและแรงจูงใจของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 กระบวนการทำวิจัย	4
<b>2 วรรณกรรมปริทัศน์</b>	
2.1 รายละเอียดโดยทั่วไป	6
2.2 การพัฒนา การทดสอบ และการสร้างแบบจำลอง	8
2.3 การศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก	17
2.4 สรุป	23
<b>3 แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย</b>	
3.1 วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย	24
3.2 กระบวนการผลิต	25
3.3 พื้นสะพานพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้	26
3.3.1 แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck4	27
3.3.2 แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck8	31
3.4 สรุป	35
<b>4 วิธีการวิจัย</b>	
4.1 บทนำ	36
4.2 แบบจำลองระดับชิ้นส่วน	36
4.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนยาว	38
4.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนขวาง	40
	(8)



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 แบบจำลองระดับระบบ	41
4.4 การศึกษาแบบพาราเมตริก	44
4.4.1 ขนาดแบบจำลอง	45
4.4.2 นำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง	47
4.5 สรุป	57
<b>5 การวิเคราะห์ระดับชิ้นส่วนและระบบ</b>	
5.1 บทนำ	59
5.2 การวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck4	59
5.2.1 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนยาว	60
5.2.2 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนขวาง	67
5.2.3 การวิเคราะห์ระดับระบบ	71
5.3 การวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck8	75
5.3.1 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนยาว	75
5.3.2 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนขวาง	81
5.3.3 การวิเคราะห์ระดับระบบ	84
5.4 สรุป	91
<b>6 การศึกษาแบบพาราเมตริกของแบบจำลองสะพาน</b>	
<b>แบบแผ่นพื้น (พอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย) - คาน</b>	
6.1 บทนำ	92
6.2 ประเภทของแบบจำลอง	92
6.3 การศึกษาแบบพาราเมตริก	96
6.4 ผลการศึกษาแบบพาราเมตริก	99
6.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์แบบพาราเมตริก	99
6.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนแบบพาราเมตริก	126
6.5 สรุป	141

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>7 การเปรียบเทียบของการศึกษาแบบพาราเมตริก</b>	
7.1 บทนำ	143
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ โดยใช้โปรแกรม SPSS16	143
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S	147
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ในรูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น	157
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของนักวิจัยท่านอื่นๆ (เฉพาะสะพานที่มีพื้นสะพานเป็น FRP และรองรับด้วยคานเหล็ก) และงานวิจัยนี้	163
7.6 สรุป	170
<b>8 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ</b>	
8.1 บทนำ	171
8.2 สรุปผลการศึกษา	171
8.2.1 ระดับชิ้นส่วน	171
8.2.2 ระดับระบบ	172
3.2.3 การศึกษาแบบพาราเมตริก	173
8.3 ข้อเสนอแนะ	174
<b>บรรณานุกรม</b>	175
<b>ภาคผนวก</b>	
ก. รูปผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานในกรณีต่างๆ	180
ข. ตารางแสดงค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) ของคานที่รองรับโดยมีหน้าตัดของแบบจำลองและแรงกระทำจากรถบรรทุกต่างๆ	205
ค. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing)	231
ง. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) กับระยะทางที่ตำแหน่งต่างๆของหน้าตัดสะพาน (เฉพาะกรณีรับแรงกระทำจากรถบรรทุกในกรณีที่ 1 เท่านั้น)	248

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
จ. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing) ในรูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น	261
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	270
ประวัติผู้เขียน	292

## รายการตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Zhang และคณะ (2006)	20
2.2	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Zhang และคณะ (2006) จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์	21
2.3	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Moses และคณะ 2006	21
2.4	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Liu และคณะ 2008 (ข้อมูลจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ เท่ากับ 1.219 เมตร)	22
2.5	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Liu และคณะ 2008 จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์อิลิเมนต์	22
3.1	ทิศทางและโครงสร้างการเรียงตัวของแผ่นบาง สำหรับ Prodeck4	28
3.2	คุณสมบัติและอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตร ของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ DDBM 4015 สำหรับ Prodeck4	28
3.3	ลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck4	29
3.4	ลามิเนตของปีก (Flange) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck4	30
3.5	ทิศทางและโครงสร้างการเรียงตัวของแผ่นบาง สำหรับ Prodeck8	32
3.6	คุณสมบัติและอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตร ของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ CDB 400 สำหรับ Prodeck8	33
3.7	ลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck8	33
3.8	ลามิเนตของปีก (Flange) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck8	34
3.9	ลามิเนตของแผ่นเฉียง (Diagonal) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck8	34
4.1	ขนาดของหน้าตัดและแรงกระทำต่อแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว	39
4.2	ขนาดของหน้าตัดและแรงกระทำต่อแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนขวาง	41
4.3	สรุปค่าตัวแปรของแบบจำลองสะพานทั้งระบบ	46
4.4	ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของคานเหล็กที่รองรับ	47
4.5	สรุปจำนวนแบบจำลองในระดับต่างๆ	57
4.6	สรุปค่าของตัวแปรและจำนวนแบบจำลองในระดับต่างๆ	58

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
5.1	ขีดจำกัดความเค้นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยสำหรับ Prodeck4	64
5.2	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับชิ้นส่วน Prodeck4	67
5.3	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับชิ้นส่วน Prodeck4	70
5.4	ค่าระยะ โกงของที่รองรับเหล็กในการทดสอบทั้งระบบ	73
5.5	ค่าระยะ โกงของที่รองรับเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นในการทดสอบทั้งระบบ	73
5.6	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับชิ้นส่วน Prodeck8	80
5.7	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการสำหรับชิ้นส่วน Prodeck8	84
5.8	ค่าระยะ โกงของที่รองรับเหล็กในการทดสอบทั้งระบบ	87
5.9	ค่าระยะ โกงของที่รองรับเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นในการทดสอบทั้งระบบ	88
5.10	กระจายแรงอันเนื่องมาจากการ โกงตัวของคานาที่รองรับในการวิเคราะห์	90
6.1	รายละเอียดของแบบจำลองสะพานแบ่งตามลักษณะของหน้าตัดของแบบจำลอง	93
6.2	รายละเอียดของแบบจำลองแบ่งตามลักษณะของแรงกระทำจากรถบรรทุก	95
6.3	การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก คำนวณ มาจากสมการที่ 6.1 และ 6.2 (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case6)	101
6.4	ค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆกัน (Prodeck4, CS1 - 12, Case1)	104
6.5	ค่าผลตอบแทนต่างๆที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)	107
6.6	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เมื่อมีแรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกขนาดหน้าตัดของแบบจำลอง เฉพาะคานาด้านนอกและคานาด้านในตัวแรก	111
6.7	ค่าความแตกต่างของค่า LDF ของแบบจำลองที่มีความยาว 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร (กรณีความกว้างของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานาที่รองรับมีค่าคงที่)	112
6.8	ค่าความแตกต่างของค่า LDF ของแบบจำลองที่มีความกว้าง 9.30 เมตร และ 13.00 เมตร (กรณีความยาวของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานาที่รองรับมีค่าคงที่)	113

## รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
6.9 ค่าความแตกต่างของค่า LDF ของแบบจำลองสะพานที่มีหน้าตัดประเภท Prodeck4 และ Prodeck8	114
6.10 ค่าความแตกต่างของค่า LDF เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing) มีการเปลี่ยนแปลง	115
6.11 ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor, LDF) คำนวณมาจากสมการที่ 6.2 (Prodeck8, CS4 - 18, Case1 - Case9)	128
6.12 ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เมื่อมีแรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกขนาดหน้าตัดของแบบจำลอง เฉพาะคานตัวนอกและคานตัวในตัวแรก	131
7.1 ค่าคงที่ที่ใช้กับสมการในการวิเคราะห์หาค่า LDF (ตามสมการ 7.1)	145
7.2 ค่าคงที่ที่ใช้กับสมการในการวิเคราะห์หาค่า LDF (ตามสมการ 7.2)	147
7.3 ความแตกต่างของค่า LDF ระหว่างค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลอง ที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนกับค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลอง ที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์	148
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น (ส่วนที่ 1)	161
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น (ส่วนที่ 2)	161
7.6 สรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) ของสะพานที่มีพื้นสะพานเป็น FRP รองรับด้วยคานเหล็ก	164
7.7 สรุปสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น	168
8.1 ผลสรุปค่าความแข็งแกร่งของคัต (Flexural Rigidity, $EI$ )	171
8.2 ผลสรุปค่าการโก่งตัวจากการวิเคราะห์ระดับระบบ (แรงกระทำ 111.25 kN.)	172

## รายการรูปประกอบ

รูปที่	หน้า	
2.1	Bentley Creek Bridge เมืองเซมิง นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา (Sreenivas 2001)	6
2.2	หน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ซึ่ง McGhee และคณะทำการศึกษา	8
2.3	หน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ซึ่ง Zurieck และคณะทำการศึกษา	11
3.1	กระบวนการผลิตแบบพุลทรูชั่น (Pultrusion) (Bank 2006)	25
3.2	รูปแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Decks)	26
3.3	หน้าตัดแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์ Prodeck4	27
3.4	หน้าตัดของแผ่นพื้น Prodeck8 ที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์	31
4.1	ลักษณะทางกายภาพและแกนหลักของคุณสมบัติของแผ่นพื้น FRP	37
4.2	ลักษณะแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว สำหรับ Prodeck4	39
4.3	ลักษณะแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว สำหรับ Prodeck8	39
4.4	ลักษณะแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนขวาง	40
4.5	ลักษณะแบบจำลองระบบแผ่นพื้น – คานสะพาน (Slab - Stringer) (Prodeck4)	42
4.6	แบบจำลองระบบแผ่นพื้น – คานสะพาน (Prodeck8)	43
4.7	ตำแหน่งของแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกต่อแผ่นพื้นสะพาน	45
4.8	หน้าตัดทั่วไปของสะพานทั้งระบบในการสร้างแบบจำลอง	46
4.9	หน้าตัดของคานเหล็กที่รองรับ	47
4.10	ตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS25	48
4.11	แสดงน้ำหนักบรรทุกในแต่ละช่องจราจร	49
4.12	ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS1 ในกรณีต่างๆ	50
4.13	ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS2 ในกรณีต่างๆ	51
4.14	ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS3 ในกรณีต่างๆ	52
4.15	ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS4 ในกรณีต่างๆ	54
4.16	ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS5 ในกรณีต่างๆ	55
4.17	ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS6 ในกรณีต่างๆ	56

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว	60
5.2 การโค้งตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว	61
5.3 ค่าการยึดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว	61
5.4 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การโค้งตัวของชิ้นส่วน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว	62
5.5 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยึดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว	63
5.6 การพิบัติของแบบจำลองและชิ้นส่วน Prodeck4 (Punymurthula 2004) ตามแนวแกนยาว	65
5.7 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง	68
5.8 ค่าการยึดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง	68
5.9 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยึดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง	69
5.10 แบบจำลองพื้นสะพาน Prodeck4 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ	72
5.11 การโค้งตัวของแบบจำลองพื้นสะพาน Prodeck4 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ	72
5.12 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว	76
5.13 การโค้งตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว	76
5.14 ค่าการยึดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว	77
5.15 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การโค้งตัวของชิ้นส่วน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว	78
5.16 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยึดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว	78
5.17 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนขวาง	81
5.18 ค่าการยึดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน ProDeck8 ตามแนวแกนขวาง	82
5.19 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยึดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck8 ตามแนวแกนขวาง	83
5.20 แบบจำลองทั้งระบบ (Prodeck8) ที่มีคานรองรับ 2 ตัว	85
5.21 แบบจำลองทั้งระบบ (Prodeck8) ที่มีคานรองรับ 3 ตัว	85
5.22 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ (กรณีที่ 1)	86
5.23 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ (กรณีที่ 2)	86
5.24 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ (กรณีที่ 3)	87



## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 หน้าตัดทั่วไปของระบบสะพานในการศึกษาแบบพาราเมตริกซ์	93
6.2 หน้าตัดของสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ	94
6.3 ตำแหน่งของแรงจากรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด (AASHTO HS25)	98
6.4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพาน (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case6)	100
6.5 แปลนของแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกต่อพื้นสะพานในทิศทางตามแนวยาว และทิศทางตามแนวขวาง ส่งผลให้เกิดค่า LDF ที่มากที่สุด (CS1, Case1 และ Case4)	103
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1)	105
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS1 - 12, Case1)	105
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS4 - 18, Case1)	106
6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS4 - 18, Case1)	106
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการโค้งตัวที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)	108
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)	108
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดหดตัวที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)	108
6.13 ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกหน้าตัดของแบบจำลอง (CS1 ถึง CS6) และทุกความยาว (ของแบบจำลองแผ่นพื้นหน้าตัด Prodeck4)	110
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่คานตัวนอก (Exterior Girder) ของแบบจำลอง ที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 มีความกว้าง 13.00 เมตร และความยาว 12.00 เมตร	116
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่า LDF กับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า LDF เมื่อปัจจัย (L, W, Deck และ S) มีการเปลี่ยนแปลง (ภายใต้แรงกระทำกรณีที่ 1)	117
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)	118
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)	119
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)	120
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)	121

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)	122
6.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)	123
6.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)	124
6.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)	125
6.24 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพาน (Prodeck8, CS4 - 18, Case1 - Case9)	127
6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS4 - 18, Case1)	129
6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่คานตัวนอก (Exterior Girder) ของแบบจำลอง ที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 มีความกว้าง 13.00 เมตร และความยาว 18.00 เมตร	130
6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่คานตัวนอก (Interior Girder) ของแบบจำลอง ที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 มีความกว้าง 13.00 เมตร และความยาว 18.00 เมตร	130
6.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)	133
6.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)	134
6.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)	135
6.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)	136
6.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)	137
6.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)	138
6.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)	139
6.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)	140
7.1 ตำแหน่งรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองในกรณีที่ 1, กรณีที่ 4 และกรณีที่ 7	144
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck4, W=9.30)	149
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck4, W=13.00)	150
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck8, W=9.30)	150
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck8, W=13.00)	151
7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck4, W=9.30)	151
7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck4, W=13.00)	152
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck8, W=9.30)	152

## รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck8, W=13.00)	153
7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck4)	155
7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck8)	155
7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวในตัวแรก (Prodeck4)	156
7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวในตัวแรก (Prodeck8)	156
7.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC)	158
7.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC)	158
7.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC)	159
7.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC)	159
7.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC+PC)	160
7.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC+PC)	160
7.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (จากตารางที่ 7.6)	166
7.21 เส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (จากตารางที่ 7.6, 6.6 และ 6.12)	166
7.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (ข้อมูลจากตารางที่ 6.6, 6.12 และ 7.6)	167
7.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (จากตารางที่ 6.6, 6.12 และ 7.6 และ AASHTO 1996)	170

# บทที่ 1 (Chapter 1)

## บทนำ

### (Introduction)

#### 1.1 ความสำคัญและแรงจูงใจของงานวิจัย (Importance and Motivation)

ในปัจจุบันนี้สะพานในเส้นทางหลวงส่วนใหญ่ถูกก่อสร้างขึ้น โดยการใช้วัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม (Conventional Engineering Materials) เช่น เหล็ก คอนกรีต และอลูมิเนียม ซึ่งภายหลังจากการก่อสร้างและเปิดใช้งานไปได้ระยะหนึ่งจะพบข้อบกพร่องต่างๆ ที่มีผลต่อสะพาน ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 ประเภทหลักๆ ดังต่อไปนี้ คือ 1) ข้อบกพร่องที่มีผลต่อโครงสร้างสะพานเนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเสื่อมด้อยลงทำให้การใช้สะพานถูกจำกัดเฉพาะสำหรับยานพาหนะที่มีการบรรทุกไม่มากและมีปริมาณการจราจรต่ำเท่านั้น และ 2) สะพานเก่าหรือสะพานที่ก่อสร้างและใช้งานมานาน ซึ่งมีข้อจำกัดเนื่องมาจากการออกแบบในอดีตให้ใช้งานได้เฉพาะยานพาหนะที่ใช้ความเร็วไม่สูงนัก ตลอดจนสามารถรองรับปริมาณการจราจรผ่านสะพานดังกล่าวได้น้อยกว่าสถานะการจราจรในปัจจุบัน และมีข้อจำกัดถึงประเภทของยานพาหนะที่ใช้งานด้วย

จากลักษณะข้อบกพร่องดังกล่าวข้างต้นทำให้จำเป็นต้องลงทุนเป็นจำนวนมากในการลดจำนวนสะพานที่มีข้อบกพร่องซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงในการปรับปรุงซ่อมแซมเพื่อลดข้อบกพร่องต่างๆ จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลสะพานจำนวนมากในอดีต เช่นกรณีของสะพาน Bently Creek Bridge 1940 (Alampalli 2001) พบว่าสาเหตุสำคัญของข้อบกพร่องที่เกิดกับสะพานสืบเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างเกิดการกัดกร่อนเป็นสนิมและผุพัง ซึ่งเป็นผลสืบเนื่องมาจากการกระทำของทางเคมีและสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรและความถี่ที่มากขึ้นในการจราจรก็เป็นปัจจัยหลักเช่นเดียวกัน พบว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมที่ใช้กันในงานสะพานอย่างแพร่หลาย มีความสามารถด้านทานสภาวะปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสะพานที่กำลังเพิ่มมากขึ้นได้ค่อนข้างจำกัด เช่น ตัวอย่างของโครงสร้างพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete Bridge Deck) พบว่า มีความทนต่อการกัดกร่อนได้จำกัดในสภาพแวดล้อมปัจจุบัน ในขณะที่มีอัตราส่วนของสติฟเนส (Stiffness) ต่อหน่วยน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างต่ำ และ มีปัญหาเกี่ยวกับความล้าในวัสดุอันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิ

ดังนั้นเพื่อที่จะลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมที่กล่าวมาแล้วนั้น วัสดุประกอบ (Composite Materials) ซึ่งผลิตขึ้นจากเส้นใยแก้วถักทอ (Glass Fabrics) ที่ถูกจัดให้มีรูปแบบการเรียงตัวเป็นชั้นๆ โดยมีพอลิเมอร์หล่อหุ้ม และมีสารผสมเพิ่มอื่นๆถูกเติมลงในส่วนผสมของพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ เช่น สารยับยั้ง (Inhibitors) สารที่เป็นตัวหน่วง (Retardants) เป็นต้น ซึ่งวัสดุประกอบประเภทที่กล่าวมาเบื้องต้นนี้ถูกเรียกว่า วัสดุประกอบชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Composite Materials) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐาน โดยในงานทางด้านสาขาวิศวกรรมสะพานถูกนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งของส่วนพื้นสะพาน (Bridge Deck) แทนที่พื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและเหล็ก (Reinforced Concrete and Steel Deck) แบบดั้งเดิม ซึ่งพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Deck หรือ FRP Deck) มีคุณสมบัติที่ดีกว่าพื้นสะพานจากวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมในหลายๆด้าน เช่น มีความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนได้ดีมาก (ตัววัสดุไม่มีการกัดกร่อนหรือผุกร่อน) ทำให้อายุการใช้งานของสะพานยาวนานขึ้นกว่าพื้นสะพานคอนกรีตเสริมเหล็กและเหล็ก นอกจากนี้ความแข็งแรงที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของตัววัสดุเอง อีกทั้งเป็นวัสดุที่ผลิตสำเร็จรูปจากแหล่งผลิตซึ่งช่วยให้วิศวกรสามารถที่จะควบคุมปัจจัยทางงบประมาณในการก่อสร้างรวมถึงระบบและขั้นตอนในการก่อสร้างได้ดีอีกด้วย

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขณะนี้ยังอยู่ในวงจำกัด งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่ทำการศึกษาโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งมีข้อจำกัดในด้านขนาดและการจำลองสภาวะการใช้งานจริงในสนาม ส่วนการศึกษาโดยใช้วิธีเชิงตัวเลขยังไม่กว้างขวางนัก มักจะเป็นการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขในลักษณะเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งในส่วนแรกจะเป็นการสร้างแบบจำลองศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกันกับการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองก่อนที่จะทำการศึกษาในส่วนที่สอง ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะการใช้งานของสะพานในสนามภายใต้เงื่อนไขของที่รองรับและภาระบรรทุกต่างๆ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลเพื่อทำการคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) ลงสู่คานรองรับและทำการรวบรวมค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักจากการศึกษาวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่นๆ แต่เนื่องจากในปัจจุบันค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่ได้นำเสนอมานั้นจะมีลักษณะเป็นค่าเฉพาะสำหรับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ที่นักวิจัยท่านนั้นๆศึกษา ตลอดจนในการออกแบบยังไม่มี

มาตรฐานการออกแบบสะพานพอลิเมอร์อย่างชัดเจน ซึ่งในส่วนท้ายของโครงการวิจัยนี้จะทำการนำเสนอสรุปค่ามาตรฐานตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก สำหรับการออกแบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการวิจัย (Objective of this Research)

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษารูปแบบและพฤติกรรมของพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงกระทำทางสถิตศาสตร์ผ่านกระบวนการทางการสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์อีลิเมนต์และทำการศึกษาในลักษณะพาราเมตริก (Parametric) เพื่อจำลองสภาวะการใช้งานจริงในสนามพร้อมทั้งประมวลผลที่ได้เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบภายหลัง โครงการวิจัยนี้จำแนกวัตถุประสงค์ออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังต่อไปนี้คือ

### ส่วนที่ 1: ตรวจสอบแบบจำลอง (บทที่ 5)

☒ เพื่อหาค่าความแข็งแกร่งเทียบเท่า (Equivalent Rigidity) ของการตัด การเชื่อม ของพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเทียบกับค่าจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

☒ เพื่อหาค่ากำลังพิบัติของแผ่นพื้นโดยใช้เกณฑ์การพิบัติของ Tsai-Wu

☒ เพื่อหาผลตอบสนองของโครงสร้างทั้งระบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน AASHTO HS25

### ส่วนที่ 2: แบบจำลองสะพานภายใต้สภาวะใช้งานต่างๆ (บทที่ 6)

☒ เพื่อศึกษาแบบจำลองสะพานแบบพาราเมตริกและทำการเสนอตัวประกอบการกระจายของน้ำหนักบรรทุก (Load Distribution Factor) สู่کانรองรับ

### ส่วนที่ 3: นำเสนอตัวประกอบการกระจายน้ำหนักในการออกแบบ (บทที่ 7)

☒ เพื่อทำการรวบรวมและประมวลผลข้อมูลตัวประกอบการกระจายของน้ำหนักบรรทุก และนำเสนอสรุปค่ามาตรฐานตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก สำหรับการออกแบบ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย (Scope of the Research)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค้นคว้าด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical Method) ของแบบจำลองสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ แบบจำลองถูกสร้างและแสดงผลผ่านทางโปรแกรมประเภทก่อนและหลังการประมวลผล (Pre and Post Processor) โปรแกรมที่ใช้คือ MSC Patran ในขณะที่การประมวลผลคำนวณตามชุดคำสั่งจาก MSC Nastran ซึ่งแผ่นพื้น

สะพานที่ทำการศึกษารวบรวมไปด้วยแผ่นพื้น 2 ชนิดได้แก่ แผ่นพื้นที่มีชื่อทางการค้า 1) Prodeck4 (Low-Profile Cross Section) และ 2) Prodeck8 (High-Profile Cross Section) ซึ่งเริ่มทำการผลิตขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 2004 และ ค.ศ. 2002 ตามลำดับ โดยเป็นการร่วมกันพัฒนาขึ้นระหว่าง บริษัท Bedford Reinforced Plastic Inc. ตั้งอยู่ ณ.มลรัฐ Pennsylvania และมหาวิทยาลัย West Virginia University ประเทศสหรัฐอเมริกา แผ่นพื้นสะพานดังกล่าวนี้เป็นแผ่นพื้นชนิดเดียวกันกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการของนักวิจัยดังต่อไปนี้คือ Howard (2009) Prachasaree (2009) Punyamurthula (2005) Natarajan (2003) และ Haward (2002) รายละเอียดพื้นฐานเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของแผ่นพื้นสะพานที่ถูกศึกษาแสดงอยู่ในบทที่ 3

#### 1.4 กระบวนการทำวิจัย (Research Methodology)

เพื่อศึกษาผลตอบสนองทางโครงสร้างโดยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อมูลการทดสอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา ตลอดจนการนำเสนอผลที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบในอนาคต กระบวนการวิจัยในโครงการนี้สามารถแสดงสรุปอย่างย่อๆ ดังต่อไปนี้

- ☒ เริ่มจากการศึกษาบทความและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตลอดจนรวบรวมข้อมูลการทดสอบที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการของงานวิจัยอื่นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

- ☒ ทำการสร้างแบบจำลองทางโครงสร้างของพื้นสะพานในระดับชิ้นส่วน (Component) และวิเคราะห์ผลตอบสนองภายใต้ภาระบรรทุกต่างๆ โดยทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้ในห้องปฏิบัติการและทำการปรับรูปแบบวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อให้มีค่าการตอบสนองใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติ ตลอดจนทำการคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกล เช่นค่าความเกร็งต่อการตัด และการเฉือน เป็นต้น

- ☒ ทำการวิเคราะห์แบบจำลองจนกระทั่งถึงจุดพิบัติเปรียบเทียบกับค่าที่ได้กับผลการทดสอบและทำการปรับแบบจำลองเพื่อให้มีผลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ (ใช้เกณฑ์การพิบัติของ Tsai-Wu)

- ☒ ทำการสร้างแบบจำลองของระบบแผ่นพื้นสะพานและคานที่รองรับพร้อมทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลตอบสนองภายใต้ภาระบรรทุกต่างๆ

- ☒ นำแนวทางการสร้างแบบจำลองข้างต้นมาทำการจำลองระบบสะพานในสนามเพื่อศึกษาการตอบสนองและการกระจายน้ำหนักลงสู่คานสะพานที่รองรับ ทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายน้ำหนักของแผ่นพื้นสะพานภายใต้ภาระบรรทุกต่างๆ

๕ ทำการเปรียบเทียบตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่นำเสนอกับค่าที่ได้จากงานวิจัยอื่นๆ และทำการนำเสนอสรุปในลักษณะค่ามาตรฐานตัวประกอบการกระจายน้ำหนักสำหรับการออกแบบ



## บทที่ 2 (Chapter 2)

### วรรณกรรมปริทัศน์

#### (Literature Reviews)

#### 2.1 รายละเอียดโดยทั่วไป (General Information)

ในปี ค.ศ. 2001 Alampalli และ Kunin ได้เขียนรายงานพิเศษเกี่ยวกับสะพาน Bentley Creek ซึ่งเป็นสะพานที่มีโครงสร้างหลักเป็นเหล็ก (Steel Truss Bridge) ตั้งอยู่เมืองเซมิง นิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา ถูกก่อสร้างขึ้นในปี ค.ศ. 1940 ในรายงานได้กล่าวถึงการปรับปรุง สะพานหลังจากการใช้งานสะพานดังกล่าวมาอย่างยาวนานถึง 60 ปี โดยการรื้อฟื้นสะพานเดิม ซึ่งเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กและทำการเปลี่ยนเป็นแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแทน เหตุผลในการรื้อฟื้นสะพานเดิมคือโครงสร้างหลักและแผ่นพื้นสะพานเกิดการเสื่อมสภาพจากการใช้งานและเกิดการผุกร่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งในรายงานพิเศษยังกล่าวว่า สะพานดังกล่าวเป็นเพียงแค่หนึ่งในหลายพันสะพานที่ได้รับการปรับปรุงซ่อมแซม ส่งผลให้ทางหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง (The Federal Highway Administration (FHWA)) ประเมินการใช้งบประมาณในการซ่อมแซม ดังกล่าวนับหมื่นล้านเหรียญสหรัฐ จึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องของ สหรัฐอเมริกาต้องดำเนินการศึกษาอย่างจริงจังในการหาแนวทางแก้ไขและปรับปรุงสะพานตลอด จนถึงวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างด้วย



รูปที่ 2.1 Bentley Creek Bridge เมืองเซมิง นิวยอร์ก สหรัฐอเมริกา (Sreenivas 2001)

ในปี ค.ศ.1983 กรมทางหลวงของสหรัฐอเมริกา (the US department of transportation) ริเริ่มโครงการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์หลักในการนำเอาเทคโนโลยีทางด้านวัสดุประกอบมาประยุกต์ใช้งานทางด้านโครงสร้างพื้นฐาน เช่น สะพานในทางหลวง ซึ่งได้ดำเนินการภายใต้โครงการที่เรียกว่า “*Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges*” โครงการดังกล่าวถือได้ว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาวิจัยระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Deck หรือ FRP Deck) ในทวีปอเมริกาเหนือ นับตั้งแต่นั้นการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายตลอดจนได้มีการตีพิมพ์บทความทางวิชาการออกมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

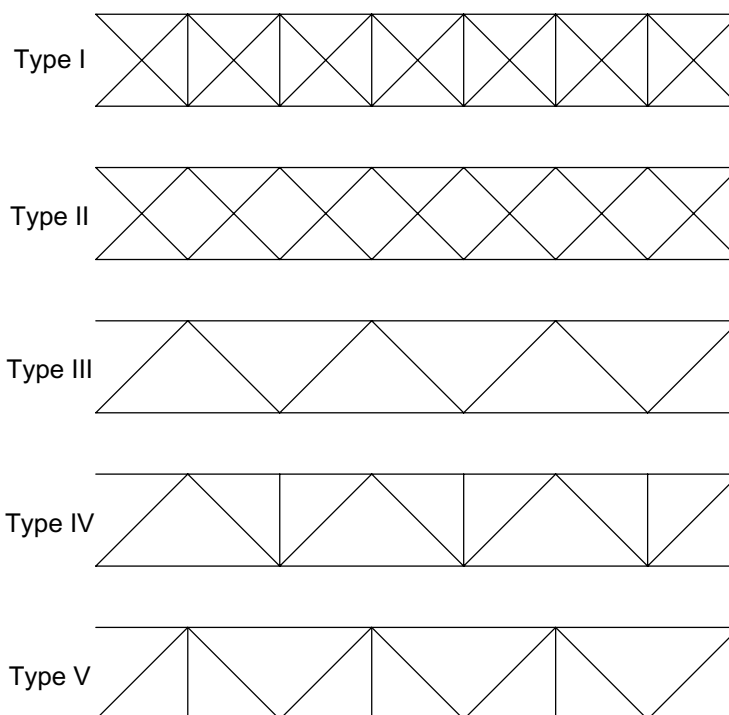
การวิจัยซึ่งเกี่ยวข้องกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยยังคงได้รับความสนใจอย่างยิ่งและกำลังดำเนินการอยู่เป็นจำนวนมากสืบเนื่องมาจากผลของการพัฒนาวัสดุประกอบตลอดจนถึงกระบวนการผลิต รวมถึงคุณสมบัติพื้นฐานทั้งทางเชิงกลและทางเคมีซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาตลอดช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา วัตถุประสงค์หลักในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการศึกษาวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นๆ ที่ได้ดำเนินการผ่านมา โดยงานวิจัยดังกล่าวเหล่านั้นสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะดังนี้คือ

- 1) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Testing) และ
- 2) การศึกษาผ่านการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical Modeling)

อย่างไรก็ตามพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการทำการศึกษาผ่านการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งมีข้อจำกัดบางประการเช่น ไม่สามารถทำการศึกษาในสภาวะแรงกระทำต่างๆ อย่างทั่วถึง ตลอดจนไม่สามารถทำการทดสอบในลักษณะเป็นระบบขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับงบประมาณและการขาดแคลนอุปกรณ์เครื่องมือ ตลอดจนความพร้อมของห้องปฏิบัติการเอง เป็นต้น ดังนั้นการศึกษาด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองทางตัวเลขจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะทำให้สามารถศึกษาพฤติกรรมและการตอบสนองของระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยในส่วนที่ยังขาดการทดลองในห้องปฏิบัติการและข้อมูลการทดสอบในสนามยังมีไม่เพียงพอ การนำเสนองานวิจัยอื่นๆ ที่ผ่านมามีได้ทำการแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักคือ 1) ส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ซึ่งการนำเสนอจะได้กล่าวถึง การพัฒนา การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์และทำนายผลการตอบสนองทางโครงสร้าง (Structural Responses) ซึ่งจะได้แสดงต่อไปในหัวข้อที่ 2.2 ในขณะที่ ส่วนที่ 2) จะเป็นการกล่าวถึงการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) ของแผ่นพื้นสะพาน ซึ่งจะถูกระบุแสดงในหัวข้อที่ 2.3

## 2.2 การพัฒนา การทดสอบ และการสร้างแบบจำลอง (Development, Testing and Modeling)

ในปี ค.ศ. 1991 McGhee และคณะ ได้ศึกษาโดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Method) สำหรับแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหลายรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งผลของการศึกษาดังกล่าวได้ถูกนำมาศึกษาเปรียบเทียบกับทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งดำเนินการโดย Henry ในปี ค.ศ. 1985 และในปี 1989 โดย Ahmad และคณะ ซึ่งในงานวิจัยของ McGhee และคณะนั้นมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษารูปแบบของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาเพื่อให้สามารถใช้งานในสนามได้ต่อไป ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้พบข้อสรุปว่ารูปแบบของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหน้าตัดประเภทที่ 3 เป็นประเภทที่มีประสิทธิภาพที่สุด



รูปที่ 2.2 หน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ซึ่ง McGhee และคณะทำการศึกษา

ในปีเดียวกัน (ค.ศ. 1991) Mongi และคณะได้ทำการศึกษาการโก่งตัว (Deflection) ของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีขนาดแตกต่างกัน ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้พื้นสะพานที่มีหน้าตัดแบบกล่อง (Cellular Box Section) โดยทำการเชื่อมต่อเข้าด้วยกันกับคานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหน้าตัดรูปตัวไอ (I-Beam) ซึ่งทำการศึกษาภายใต้ประเภทของชนิดรอยต่อ

และแรงกระทำที่แตกต่างกัน พบว่าการ โกงของพื้นสะพานซึ่งได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และวิธีเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกัน

ต่อมาในปี ค.ศ. 1994 Zureick และคณะได้ทำการทดสอบคานชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยขนาดเท่าของจริง (Full Scale Testing) โดยทำการศึกษาพฤติกรรมภายใต้แรงเฉือน และพิจารณาถึงเกณฑ์ในการออกแบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีหน้าตัดรูปตัวไอที่ถูกจำแนกเป็นคานลึก (Deep I-Shape) โดยทำการทดสอบภายใต้แรงกระทำในแนวตั้งตามระนาบของส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของคาน ในการทำการศึกษารั้งนี้ใช้คานตัวอย่างที่มีขนาด 61.00 เซนติเมตร x 0.95 เซนติเมตร และ ขนาด 19.00 เซนติเมตร x 1.90 เซนติเมตร สำหรับแผ่นตั้ง (Web) และปีก (Flange) ตามลำดับ เพื่อทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสการเฉือน (Shear Modulus) และ โมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) วิธีการทดสอบการคดด้วยแรงกระทำสามและสี่จุด (Three and Four Point Bending Tests) ถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว นอกจากนี้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้ โดยในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขดังกล่าวใช้โปรแกรม GTSTRUDL โดยเลือกสร้างแบบจำลองด้วยอิเลเมนต์ (Element) ชนิด 960 SBHQ (Stretching Bending Hybrid Quadrilateral Plate Element) พบว่าค่าของการ โกงตัวที่กึ่งกลางช่วงคานของแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่ามากกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการประมาณ 20%

ในปีถัดมา (ค.ศ. 1995) Sotiropoulus และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นพอลิเมอร์ซึ่งมีหน้าตัดประกอบขึ้นด้วยจำนวนหลายๆเซลล์ (Multi-cellular Decks) โดยทำการเชื่อมต่อแผ่นพื้นดังกล่าวเข้าด้วยกันเพื่อทำการศึกษาการตอบสนองทั้งระบบภายใต้แรงกระทำสถิตศาสตร์ (Static Loading) เช่นการคดและการบิด (Bending and Twisting) เป็นต้น ทั้งนี้แผ่นพื้นที่น่านำมาใช้ในการทดสอบถูกผลิตขึ้นมาจากเส้นใยแก้วและพอลิเมอร์เรซิน โดยในส่วนของแผ่นพื้นมีปริมาณของเส้นใยประมาณ 22.10 % โดยปริมาตร และสำหรับส่วนของคานรูปปีกกว้าง (Wide-Flange Section) มีปริมาณของเส้นใยประมาณ 29.60 % โดยปริมาตร ในการทำการเชื่อมต่อแผ่นพื้นเพื่อทำการทดสอบนั้นแบ่งเป็นสองขั้นตอน คือ 1) การเชื่อมต่อกันระหว่างแผ่นพื้นกับแผ่นพื้น (Deck-to-Deck) และ 2) การเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพื้นกับคานรองรับ (Deck to Stringer) สำหรับการทดสอบการบิด (Torsion Test) แผ่นพื้นแบบเซลล์เดี่ยวและเซลล์คู่ (Single and Double Cell) ถูกนำมาใช้ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้ถูกนำมาทำการคำนวณหาค่าสถิติเพนสสำหรับการคดและเฉือน โดยในการทดสอบต่างๆถูกดำเนินการภายใต้ขอบเขตของขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit)

ในปี ค.ศ.1996 Nagy และคณะ ได้ดำเนินการศึกษาผลตอบสนองของแรงกระทำทางสถิตยศาสตร์ที่มีต่อแผ่นพื้นประเภทแซนวิช (Sandwich Panel Decks) การทดสอบได้

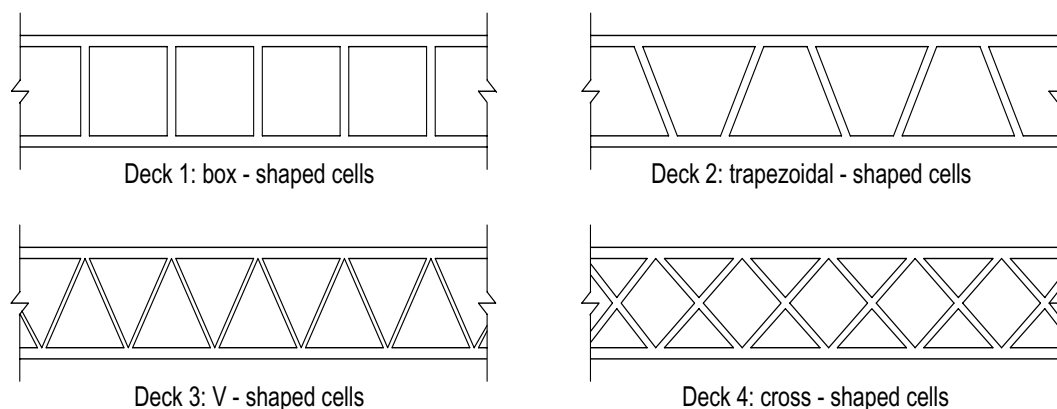
ดำเนินการตามแนวขวาง (Transverse Direction) เพื่อศึกษาผลของความแข็งแรงภายใต้แรงกระทำ และรูปแบบการพิบัติ (Failure Mode) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของปีกและแผ่นตั้ง (Flange and Web Junction) เนื่องจากผลของการคด โดยแผ่นพื้นทั้งหมดที่ทำการศึกษาดังกล่าวมีค่าของความแข็งแรงต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของแผ่นพื้นคอนกรีต

ต่อมาในปี ค.ศ. 1997 Sonti และคณะได้ทำการศึกษาวัสดุประกอบ (Composite Materials) ที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยถักทอ (Fabrics) ภายใต้แรงกระทำทางสถิตยศาสตร์ ตัวอย่างการทดสอบในการศึกษานี้มีอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตร (Fiber Volume Fraction) ประมาณ 30-35% และมีขนาดของตัวอย่างทดสอบประมาณ 182.88 เซนติเมตร x 60.96 เซนติเมตร x 13.97 เซนติเมตร จากผลการทดสอบพบว่าลักษณะการพิบัติของชิ้นตัวอย่างเกิดการแยกตัว (Delamination) ของแผ่นตั้งและปีกอันเนื่องมาจากผลของความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อดังกล่าว นอกจากนี้ในการศึกษาได้ทำการสร้างแบบจำลองทางไฟไนท์อิเลเมนต์ (Finite Element Model) เพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการซึ่งผลการศึกษา พบว่าแบบจำลองทางตัวเลขที่สร้างขึ้นสามารถทำนายพฤติกรรมของการตอบสนองภายใต้แรงกระทำของชิ้นตัวอย่างในการทดสอบได้ดีพอสมควร

ในปีเดียวกัน (ค.ศ.1997) Vedam และคณะได้ทำการศึกษาในประเด็นที่คล้ายคลึงกับการศึกษาของ Sonti และคณะ โดยทำการทดสอบแผ่นพื้นที่มีหน้าตัดแบบ คางหมูคู่ (Double-Trapezoid) และรูปทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal Shape) โดยมีขนาดของหน้าตัดภายนอกประมาณ 30.48 เซนติเมตร x 20.32 เซนติเมตร และมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 152.40 เซนติเมตร ถึง 274.32 เซนติเมตร และมีอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตร (Fiber Volume Fraction) ในช่วง 45-50% มีค่าอัตราน้ำหนักต่อพื้นที่ประมาณ 107.64 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ผลการทดสอบให้ค่าความแข็งแรงต่อการคด (Bending Rigidity) ประมาณ  $2.475 \times 10^5$  กิโลกรัม-ตารางเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งแรงของแผ่นพื้นทำการทดสอบมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างทดสอบนั้นๆ โดยในการศึกษานี้คณะผู้วิจัยได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาคุณสมบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบโดยประมาณ (The Approximate Classical Lamination Theory หรือ ACLT) มาใช้ในการศึกษาด้วย

ในช่วงเวลาเดียวกันของปี ค.ศ. 1997 Zurieck และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิเลเมนต์ ซึ่งแบบจำลองของแผ่นพื้นดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกันกับคานอย่างง่าย (Simple Beam) ช่วงเดียวที่มีขนาดยาวประมาณ 1,219.20 เซนติเมตร และมีขนาดหน้าตัดประมาณ 27.94 เซนติเมตร x 243.84 เซนติเมตร วางอยู่บนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) อยู่ภายใต้แรงกระจายบนพื้นที่ลักษณะสี่เหลี่ยม (Patch Load) ซึ่งในการวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ทำการศึกษาแผ่นพื้นที่มีลักษณะแตกต่างกันสี่แบบดัง

แสดงในรูปที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์ระยะ โกงตัว (Deflection) พบว่าแผ่นพื้นแบบหน้าตัดเซลล์สี่เหลี่ยมและเซลล์รูปตัววีมีระยะ โกงตัวที่น้อยกว่าแผ่นพื้นประเภทอื่นๆที่ใช้ในการศึกษานี้



รูปที่ 2.3 หน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ ซึ่ง Zurieck และคณะทำการศึกษา

สำหรับพฤติกรรมของคานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้แรงกระทำแบบสถิตศาสตร์และแรงกระทำแบบวัฏจักร (Static and Cyclic Loads) ถูกศึกษาโดย Nagaraj และคณะในปี ค.ศ.1997 โดยทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงต่อการคดและเฉือน (Flexural and Shear Rigidity) ที่ได้จาก 1) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ 2) ทฤษฎีแผ่นเรียงตั้งเดิม (Classical Lamination Theory) และ 3) ทฤษฎีแผ่นเรียงตั้งเดิมอย่างง่าย (Simplified Classical Lamination Theory) ผลการศึกษาพบว่าแรงเฉือนมีอิทธิพลที่สำคัญประการหนึ่งต่อการ โกงตัวของคานพอลิเมอร์ทั้งภายใต้แรงกระทำสถิตย์และแรงกระทำแบบวัฏจักร นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผล เช่น 1) การประกอบเข้าด้วยกันของแผ่นตั้งและปีก 2) การกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอของเส้นใยในคาน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนแต่มีผลกระทบต่อการกระจายของหน่วยแรงบนหน้าตัด โดยเฉพาะ ในส่วนของปีกคาน ผลการทดสอบต่างๆในห้องปฏิบัติการถูกเปรียบเทียบผลทางทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

ในปี ค.ศ. 1998 Brown และคณะได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นพื้นที่มีหน้าตัดเซลล์รูปสี่เหลี่ยม โดยมีที่รองรับเป็นคานรูปตัวไอ การทดสอบกระทำกับแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีรูปแบบแตกต่างกันสองรูปแบบดังนี้ 1) แผ่นพื้นมีขนาด 152.40 เซนติเมตร x 152.40 เซนติเมตร x 12.70 เซนติเมตร ประกอบเข้ากับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 12.70 เซนติเมตร x 12.70 เซนติเมตร x 0.95 เซนติเมตร และ 2) แผ่นพื้นที่มีขนาด 304.80 เซนติเมตร x 304.80 เซนติเมตร x 20.32

เซนติเมตร ประกอบเข้ากับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมขนาด 10.16 เซนติเมตร x 20.32 เซนติเมตร x 0.64 เซนติเมตร ซึ่งแผ่นพื้นสะพานทั้งสองรูปแบบดังกล่าวข้างต้นถูกวางบนที่รองรับซึ่งเป็นคานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยรูปตัวไอ (FRP Wide Flange) ขนาด 30.48 เซนติเมตร x 30.48 เซนติเมตร x 1.27 เซนติเมตร ในการทดสอบเสมือนเป็นการทดสอบแผ่นพื้นและคานสะพานทั้งระบบ นอกจากนี้สมการในการออกแบบอย่างง่ายถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์คานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้การค้ำ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ พบว่าค่าการตอบสนองที่ได้มีความสอดคล้องที่ดีระหว่างผลจากการทดสอบและจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

ในปีเดียวกัน (ค.ศ. 1998) Massa และ Barbero ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์คานพอลิเมอร์ประเภทผนังบางเซลล์เดี่ยว (FRP Single Cell Thin Wall Beam) ภายใต้การค้ำ (Bending) การเฉือน (Shear) และแรงในแนวแกน (Axial Load) ซึ่งในส่วนของการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ (Material Properties) ยังคงใช้ทฤษฎีแผ่นลามิเนตเรียงดั้งเดิม (Classical Laminated Plate Theory) โดยหน้าตัดที่ถูกวิเคราะห์จะถูกพิจารณาออกเป็นส่วนย่อยๆ (Segment) ที่มีคุณสมบัติทางรูปทรงที่แตกต่างกัน เช่น พื้นที่ โมเมนต์ที่หนึ่งของพื้นที่ จุดศูนย์กลาง เป็นต้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้แนวทางของกลศาสตร์ของวัสดุ (Mechanics of Materials) ในการวิเคราะห์คานพอลิเมอร์ผนังบางโดยการแปลงคุณสมบัติทางเชิงกลของผนังของคานพอลิเมอร์ให้เป็นคุณสมบัติของวัสดุไอโซทรอปิกที่เทียบเท่ากัน

ภายในช่วงปี ค.ศ. 2000 Shekar ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีหน้าตัดแบบสี่เหลี่ยมคางหมูและหน้าตัดแบบหกเหลี่ยม (Trapezoidal and Hexagonal FRP Bridge Decks) โดยมีขนาดหน้าตัดโดยประมาณ 30.48 เซนติเมตร x 20.32 เซนติเมตร และมีความยาวช่วงประมาณ 274.32 เซนติเมตร พบว่าค่าความแข็งแกร่งของการค้ำเทียบเท่า (Equivalent Flexural Rigidity) มีค่าเท่ากับ  $2.428 \times 10^7$  กิโลกรัม-ตารางเมตร และค่าหน่วยแรงค้ำดัดประลัย (Ultimate Bending Stress) มีค่าเท่ากับ 47,740 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ในส่วนของรูปแบบการพินดีพบว่าการเกิดการแยกตัว (Delamination) บริเวณแผ่นตั้งและปีก (Web-Flange Junction)

ในช่วงปีเดียวกัน (ค.ศ. 2000) Chandrashekhara และ Nanni ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อที่จะหาผลตอบสนองและพฤติกรรมของแผ่นพื้นสะพานซึ่งหน้าตัดประกอบด้วยเซลล์สี่เหลี่ยมขนาด 7.62 เซนติเมตร หน้า 0.64 เซนติเมตร ผลการวิจัยแสดงถึงความสอดคล้องที่ดีระหว่างผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้สรุปว่าแผ่น

พื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้แทนที่พื้นสะพานจากวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม (คอนกรีตและเหล็ก) สำหรับสะพานที่มีความยาวช่วงสั้น (Short Span Bridge)

ต่อมาในปี ค.ศ.2001 Kumar และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมการตัดสำหรับโครงสร้างของท่อพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว (GFRP Tube) โดยทำการทดสอบ 1) ท่อที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงประเภทเซลล์เดี่ยว 2) ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงประเภทสองเซลล์ (ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงประเภทสองเซลล์ประกอบขึ้นด้วยการเชื่อมต่อท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงประเภทเซลล์เดี่ยวสองท่อเข้าด้วยกัน) 3) ท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงประเภทสี่เซลล์ (ประกอบขึ้นจากการเชื่อมต่อท่อสี่เหลี่ยมจัตุรัสกลวงประเภทสองเซลล์สองท่อเข้าด้วยกัน) ท่อตัวอย่างดังกล่าวถูกทดสอบจนเกิดการพิบัติภายใต้แรงการตัด พบว่าในกรณีของท่อเดี่ยวและท่อคู่ การพิบัติเกิดขึ้นเนื่องมาจากการโก่งคาะ (Buckling) เนื่องมาจากแรงอัดในส่วนปีกของท่อตัวอย่างนำไปสู่การแยกตัวกันของแผ่นตั้งและปีก ซึ่งก่อให้เกิดรอยร้าวขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นตั้งและปีก จนกระทั่งเกิดการพิบัติในท้ายที่สุด สำหรับการพิบัติที่เกิดขึ้นกับท่อตัวอย่างแบบสี่เซลล์เกิดขึ้นเนื่องมาจากแรงเฉือนนำไปสู่รอยร้าวตรงขอบตามแนวยาวของท่อ ซึ่งรอยต่อระหว่างแผ่นตั้งกับปีกเป็นบริเวณหลักที่เกิดการพิบัติ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่มาจากทฤษฎีวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้จากทั้งสองแนวทางมีความใกล้เคียงกัน

ในปีเดียวกัน (ค.ศ. 2001) Temeles และคณะได้ทำการศึกษาและทดสอบกับแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีความหนา 17.78 เซนติเมตร มีหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมขนาด 457.20 เซนติเมตร x 152.40 เซนติเมตร ประกอบขึ้นจากท่อสี่เหลี่ยมกลวงเสริมแรงด้วยเส้นใยที่มีความยาวเท่ากับ 457.20 เซนติเมตร และมีขนาดหน้าตัด 15.24 เซนติเมตร x 15.24 เซนติเมตร หนา 0.95 เซนติเมตร จำนวน 10 ชิ้นส่วนด้วยกัน แผ่นพื้นถูกทำการทดสอบด้วยแรงกระทำวัฏจักรเพื่อศึกษาผลของความล้า (Fatigue) ภายใต้มาตรฐานการออกแบบของ AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) พบว่าระยะโก่งตัวมากที่สุดของแผ่นพื้นมีค่าประมาณ  $L/470$  ( $L$  คือความยาวช่วงของแผ่นพื้น) โดยที่แผ่นพื้นถูกกระทำด้วยแรงกระทำวัฏจักรประมาณ 4 ล้านรอบภายในช่วงระยะเวลา 8 เดือน ผลจากงานวิจัยรายงานว่าไม่เกิดการลดลงในส่วนของคุณสมบัติความแข็งแรงที่มีนัยสำคัญ

ในปี ค.ศ. 2002 Kollar และ Pluzsik ได้เสนอวิธีการวิเคราะห์คานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่มีหน้าตัดลักษณะหน้าตัดเปิด (Open Section) และหน้าตัดปิด (Closed Section) โดยมีสมมุติฐานซึ่งไม่ทำการพิจารณาค่าความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือน ในการวิเคราะห์นั้นค่าสติเฟนส์ต่อการตัดของคานจะคำนวณขึ้นจากคุณสมบัติของวัสดุแบบออร์ทोटโรปิก (Orthotropic) โดยที่หน้าตัดของคานมีรูปทรงอิสระ คานพอลิเมอร์ถูกวิเคราะห์ภายใต้แรงกระทำ



หลายประเภทพร้อมๆกันเช่น 1) แรงในแนวแกน 2) โมเมนต์คด และ 3) โมเมนต์บิด เป็นต้น ซึ่งค่าสถิติเนสของคานถูกแสดงในรูปแบบของเมทริกซ์ขนาด  $4 \times 4$  ผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ภายในปีเดียวกัน (ค.ศ.2002) Zhou ได้ทำการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเพื่อศึกษาความทนทาน (Durability) และความแข็งแรง (Strength) โดยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ทำการศึกษามีขนาดความยาว 464.82 เซนติเมตร และความกว้าง 152.40 เซนติเมตร ประกอบมาจากคานออร์โททรอปิกสี่เหลี่ยมขนาด 15.24 เซนติเมตร x 15.24 เซนติเมตรหนา 0.95 เซนติเมตร วิธีความยืดหยุ่นเทียบเท่า (Method of Elastic Equivalence - MEE) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ พบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถทำนายค่าระยะโก่งเนื่องมาจากการคดภายใต้แรงกระทำแบบแผ่กระจายสม่ำเสมอ (Uniformly Distributed Load) และแรงกระทำแบบพื้นที่สี่เหลี่ยม (Rectangular Patch Load) ได้ค่อนข้างใกล้เคียงและสมเหตุสมผล ส่วนค่าระยะโก่งของแผ่นพื้นภายใต้แรงกระทำแบบจุด (Point Load) ค่าที่ได้ค่อนข้างขาดความแม่นยำ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้แนะนำให้ใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หรือทฤษฎีของแผ่นบางที่ระดับขั้นสูง (Higher Order Classical Lamination Plate Theory) ขึ้นไปในการวิเคราะห์ เช่นเดียวกันกับวิธีการพิจารณาการพิบัติของแผ่นพื้น ได้ถูกพัฒนาเพื่อที่จะใช้วิเคราะห์หากการพิบัติของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวยังคงให้ผลที่ไม่ดีนักในการทำนายเมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎีของ Tsai-Wu และ Tsai-Hill

ในช่วงเวลาเดียวกันของปี ค.ศ. 2002 Howard ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยภายใต้แรงคดเป็นหลัก โดยพื้นสะพานที่นำมาใช้ในการทดสอบมีความสูงประมาณ 20.32 เซนติเมตร มีอัตราส่วนเส้นใยต่อปริมาตรประมาณ 54% ผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงต่อการคดและการบิด (Bending and Torsional Rigidity) มีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงต่อการคด (Bending Rigidity) เพียงอย่างเดียว

ภายในปี ค.ศ. 2002 Schniepp ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานพอลิเมอร์ไฮบริดที่มีหน้าตัดลักษณะแบบแผ่นดั่งคู่ (Hybrid Double-Web Composite Beam - DWB) โดยมีอัตราส่วนเส้นใย ต่อปริมาตรประมาณ 45 % ในการศึกษาวิจัยเพื่อหาความสามารถในการรับกำลังและพัฒนาแนวทางในการออกแบบโครงสร้าง โดยคานตัวอย่างจำนวน 19 คานถูกนำมาทำการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่ารูปแบบการพิบัติของคานเกิดขึ้นที่บริเวณที่ใกล้เคียงกับแรงกระทำตรงส่วนบนของปีกและการแตกหักขยายต่อไปในทิศทางต่างๆตาม

แนวแกนจนกระทั่งเกิดการพิบัติของคานในที่สุด นอกจากนี้พบว่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นของคานตัวอย่างเป็นผลจากแรงเฉือนประมาณ 16 % ของการโก่งทั้งหมด

ในปี ค.ศ. 2003 Natarajan ได้การศึกษาผลตอบสนองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วภายใต้แรงกระทำแบบวัฏจักร แผ่นพื้นสะพานที่ใช้ในการศึกษาเป็นพื้นสะพานชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการศึกษาของ Howard (2002) โดยแผ่นพื้นสะพานทั้งระบบถูกรองรับด้วยคานเหล็ก (W10x39) จำนวนสามคาน โดยมีแรงกระทำสี่เหลี่ยมขนาด 1,290.32 ตารางเซนติเมตร กระทำสองจุดบนแผ่นพื้นสะพานอยู่บริเวณกึ่งกลางระหว่างที่รองรับในแต่ละช่วงความยาว จากการทดสอบพบว่าแผ่นพื้นสะพานที่มีโพลีเอสเตอร์เป็นส่วนประกอบเกิดการพิบัติเนื่องจากแรงเฉือนทะลุ (Punching Shear Failure) ที่ 230,000 รอบ ในส่วนของแผ่นพื้นสะพานที่มีไวไนลีสเตอรัเรซินเมื่อทำการทดสอบถึง 2,000,000 รอบ ยังคงไม่พบรอยแตกร้าวแต่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงต่อการตัดประมาณ 2 %

ต่อมาในปี ค.ศ. 2004 Punyamurthula ได้ดำเนินการทดสอบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่หน้าตัดมีความลึก 10.16 เซนติเมตร มีอัตราส่วนของปริมาณเส้นใยต่อปริมาตรประมาณ 50 % การทดสอบกระทำเพื่อประเมินพฤติกรรมทางโครงสร้างของแผ่นพื้นภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบ AASHTO HS25 ผลที่ได้จากการทดสอบพบว่าแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยสามารถรับแรงกระทำแบบ AASHTO HS25 ได้โดยมีที่รองรับที่วางห่างกันราว 121.92 เซนติเมตร

ภายในปีเดียวกัน (ค.ศ. 2004) Reis และคณะได้ศึกษาประสิทธิภาพทางโครงสร้างของแผ่นพื้นชนิดแกนวิซ โดยมีผิวบนและล่างของแผ่นพื้นผลิตจากเส้นใยแก้วถักทอในลักษณะสามมิติ ขณะที่แกนกลางของแผ่นพื้นผลิตขึ้นจากโฟม (Foam Core) แผ่นพื้นต้นแบบดังกล่าวถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำเป็นจุด (จำลองลักษณะแรงกระทำเนื่องจากล้อรถบรรทุก) กลไกและลักษณะการพิบัติของแผ่นพื้นถูกตรวจสอบ นอกจากนี้คุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างแผ่นพื้นตลอดจนผลของรูปทรง ความหนาแน่นและการจัดเรียงของสถาปัตยกรรมของเส้นใยที่มีผลต่อพฤติกรรมการเนือ การอัดและการดึงของแผ่นพื้น ได้ถูกศึกษาในการวิจัย

ในปี ค.ศ. 2006 Stiller และคณะได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นสะพานสะพานเสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP) ที่ติดตั้งบนคานเหล็กที่รองรับที่เกิดสร้างเสร็จสมบูรณ์ในสนาม ผลการทดสอบในสนามแสดงถึงพฤติกรรมร่วม (Composite Action) ระหว่างแผ่นพื้นและคานที่รองรับเกิดขึ้นอย่างดีโดยใช้การวิเคราะห์หน้าตัดแปลง (Transformed Section) ของแผ่นพื้น ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.75 สำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกบนสองช่องทาง

จรรยา และสมการอย่างง่ายของการ โกงตัวได้ถูกเสนอเพื่อใช้ทำนายระยะ โกงของคานที่รองรับเมื่อใช้คุณสมบัติของหน้าตัดแปลง

ในช่วงเวลาเดียวกันของปี ค.ศ. 2006 Lee และคณะทำการศึกษาระบบแผ่นพื้น สะพานพอลิเมอร์ภายใต้แรงกระทำสถิตย์ ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปี ค.ศ. 2006 เช่นเดียวกัน Feng และคณะได้พัฒนารูปแบบพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยเส้นใยเสริมกำลังถูกพันรอบพื้นสะพานด้วยวิธีการ Filament – Winding และ พื้นสะพานพอลิเมอร์ต้นแบบถูกทดสอบเปรียบเทียบกับพื้นสะพานชนิดอื่นๆที่ไม่มีเส้นใยพันรอบ ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าพื้นสะพานชนิดมีเส้นใยเสริมกำลังพันรอบสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นและมีรูปแบบการพิบัติที่เปลี่ยนไป

ต่อมาในปี ค.ศ. 2007 Keller และคณะได้ศึกษาพฤติกรรมการค้ำของแผ่นพื้น สะพานประเภทแซนวิชไฮบริดจ์ ซึ่งผลิตขึ้นโดยมีจำนวนชั้นหลัก 3 ชั้นคือ 1) แผ่นโพลีเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยมีแผ่นตั้งรูปตัวที (สำหรับผิวรับแรงดึง) 2) คอนกรีตมวลเบาสำหรับแกนของแผ่นพื้น และ 3) คอนกรีตกำลังสูงพิเศษ (Ultra high performance concrete - UHPFRC) สำหรับผิวรับแรงอัด ผลจากการทดสอบแสดงถึงความเป็นไปได้ในที่จะสามารถนำแผ่นพื้นดังกล่าวติดตั้งสำหรับสะพานในอนาคต

ในปี ค.ศ. 2009 Prachasaree และคณะได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการเฉือนของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย แผ่นพื้นสะพานที่ทำการทดสอบเป็นแผ่นพื้น สะพานประเภทเดียวกันกับการทดสอบของ Punyamurthula (2004) แผ่นพื้นทั้งระบบถูกทดสอบภายใต้การบิดเพื่อศึกษาผลการตอบสนอง และทฤษฎีแผ่นบางดั้งเดิมอย่างย่อ (Simplified Classical Lamination Theory) ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทำนายค่าคุณสมบัติความแข็งแรงต่อการบิดและการเฉือน นอกจากนี้การศึกษาได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเฉือนทั้งในระนาบ (In-Plane Shear) และนอกระนาบ (Out-of-Plane Shear) สมการการทำนายกำลังเฉือนแบบเจาะทะลุ (Punching Shear) ถูกพัฒนาขึ้นตลอดจนการศึกษาผลของแรงเฉือนที่มีต่อรอยต่อระหว่างส่วนปีกและแผ่นตั้ง (Shear on Web-Flange Junction) แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งระบบภายใต้การบิดถูกศึกษาเพื่อทำการประเมินผลของพฤติกรรมโครงสร้างแบบแผ่น (Plate Action) ซึ่งพบว่ามีการตอบสนองทางโครงสร้างมีความแข็งแรงสูงกว่าประมาณ 20.00 – 25.00 % เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างจากวัสดุเดียวกันที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 1 มิติ (เช่นคานเป็นต้น)

### 2.3 การศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Study of Load Distribution Factor)

ในปี ค.ศ. 1999 Mabsout และคณะได้ทำการศึกษาแบบพารามेटริก (Parametric Study) เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของจำนวนช่องจราจรแบบหลายช่อง (Multi-Lane) และความต่อเนื่องของสะพานที่มีต่อการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากล้อรถ (Wheel Loads) ลงสู่คานเหล็กรองรับของแผ่นพื้นสะพาน โดยสะพานที่ทำการศึกษาคือสะพาน 1 และ 2 ช่อง โดยมีช่องทางจราจรตั้งแต่ 2 ถึง 4 ช่องทาง ซึ่งตัวแปรที่ถูกพิจารณาในการศึกษาได้แก่ 1) ความยาวช่วงสะพาน 2) ระยะห่างของคานที่รองรับ 3) จำนวนช่วงของสะพาน และ 4) จำนวนของช่องทาง โดยทำการจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ ทั้งหมด 144 แบบจำลอง และถูกทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAP90 การวิเคราะห์กระทำภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบ AASHTO HS20 ซึ่งค่าตัวประกอบการกระจายของน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่เสนอในมาตรฐาน AASHTO และ NCHRP 12 - 26 โดยที่ผลจากการศึกษาแบบพารามेटริกนี้แสดงความสอดคล้องกับค่าที่ได้มาจากมาตรฐาน NCHRP 12-26 และมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากมาตรฐาน AASHTO

ต่อมาในปี ค.ศ. 2000 Zokaie ได้ทำการศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกแบบตัวประกอบกำลังต้านทาน (LRFD) โดยผู้ศึกษาได้นำเสนอรูปแบบสมการการกระจายน้ำหนักบรรทุกที่เดิมมีความซับซ้อนให้อยู่ในรูปแบบอย่างง่าย โดยแสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วน  $S/D$  ซึ่ง  $S$  คือระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็ก และ  $D$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับประเภทของสะพาน (คล้ายคลึงกับวิธีหน่วยแรงที่ยอมให้ Allowable Stress Design - ASD) ในการศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นมาในการพัฒนารูปแบบของสมการและเปรียบเทียบความถูกต้องอันเนื่องมาจากการใช้สมการที่มีความซับซ้อนกับสมการอย่างง่ายที่เสนอขึ้น โดยนำเสนอด้วยตัวอย่างการออกแบบคานที่รองรับสำหรับสะพานช่วงเดียว

ในปี ค.ศ. 2001 Barr และคณะ ได้ทำการศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกของสะพานคอนกรีตอัดแรง ผลตอบสนองของสะพานถูกวัดและเก็บข้อมูลระหว่างทำการทดสอบด้วยแรงกระทำสถิตย์และถูกเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ซึ่งแบบจำลองสะพานที่แตกต่างกันจำนวน 24 แบบจำลองถูกศึกษาเพื่อคำนวณตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุก ผลจากการศึกษาแสดงถึง 1) แผ่นยึดระหว่างคานตรงปลายคาน 2) มุมของสะพาน รวมถึง 3) ประเภทของแรงกระทำ มีส่วนสำคัญมากต่อค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก ในขณะที่ค่าความต่อเนื่องของสะพานและแผ่นยึดระหว่างคานตรงกลางคานมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีที่สะพานถูกออกแบบโดยใช้ค่าตัวประกอบการกระจายที่ได้จากวิธีไฟ

ไฟในท้อลิเมนต์ (มีค่ามากกว่าค่าที่เสนอโดยมาตรฐานออกแบบ) พบว่าค่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการสามารถลดลงได้ถึง 6.9 เมกะปาสกาล

ต่อมาในปี ค.ศ. 2002 Mabsout และคณะได้ใช้วิธีไฟในท้อลิเมนต์เพื่อศึกษาการออกแบบสะพานที่มีช่องทางจราจรสามและสี่ช่องทาง โดยสะพานมีคานที่รองรับเป็นคานเหล็กแบบจำลองสะพานจำนวน 220 สะพานถูกนำมาศึกษาวิเคราะห์โดยโปรแกรม SAP2000 ค่าตัวแปรต่างๆที่ถูกพิจารณาในการศึกษาได้แก่ 1) ความยาวช่วงของสะพาน 2) ระยะห่างของคานที่รองรับเหล็ก 3) จำนวนของช่วงสะพาน 4) น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบ และ 5) ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุก ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก ผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในท้อลิเมนต์ได้แสดงให้เห็นว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักลดลงประมาณ 10% - 25% (เปรียบเทียบกับตัวประกอบการกระจายน้ำหนักตามมาตรฐาน AAHSTO)

ในปีถัดมา (ค.ศ.2003) Nowak และคณะได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวประกอบการกระจายน้ำหนักสำหรับสะพานเหล็กหลายช่วง การศึกษานี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์และการทดสอบในสนาม โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อคำนวณหาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักลงสู่คานที่รองรับสำหรับคานตัวใน (Interior Girder) รวมถึงตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกทางพลศาสตร์สะพานเหล็กจำนวน 6 สะพานถูกทำการทดสอบสนามพบว่าค่าเครียดที่วัดได้น้อยกว่าที่ค่าที่คาดไว้ซึ่งเนื่องมาจากที่รองรับของสะพานบางส่วนถูกยึดติดอยู่กับที่ สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟในท้อลิเมนต์ ผลที่ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในสนาม การทดสอบในสนามแสดงถึงค่าตัวประกอบของน้ำหนักบรรทุกทางพลศาสตร์สำหรับสะพานที่มีช่วงความยาวหลายช่วงต่อเนื่องกันจะมีค่าน้อยกว่ากรณีของสะพานที่มีช่วงเดียว นอกจากนี้ค่าการกระจายโมเมนต์สำหรับสะพานที่มีความยาวช่วงต่อเนื่องมีความแตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับสะพานช่วงเดียว โดยทั่วไปค่าการกระจายโมเมนต์มีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอสำหรับสะพานที่มีความยาวช่วงต่อเนื่อง

ในปีเดียวกัน (ค.ศ.2003) Luo ได้ทำการศึกษาเพื่อคำนวณหาการกระจายของน้ำหนักบรรทุกโดยทำการทดสอบสะพานช่วงเดียวยาว 12.70 เมตร ที่มีชื่อว่า Boyer ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีแผ่นพื้นสะพานเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีชื่อทางการค้าว่า Duraspan™ Deck Panel MMC และมีคานเหล็กขนาด W24x104 จำนวน 5 ตัว รองรับ โดยมีระยะห่างระหว่างคานแต่ละตัวเท่ากับ 1.754 เมตร ทำการทดสอบด้วยรถบรรทุกคันเดียว (One Lane Loaded) และผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ที่มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.420

ต่อมาในปี ค.ศ.2004 Turner และคณะ ได้ดำเนินการทดสอบและศึกษาวิเคราะห์สะพานช่วงเดียวกว้าง 11.30 เมตร และยาว 18.30 เมตร ชื่อว่า S655 Bridge ตั้งอยู่ทางตอนใต้ของมลรัฐแคลิฟอร์เนีย สหรัฐอเมริกา มีแผ่นพื้นสะพานเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Deck) โดยมีคานรองรับเหล็กขนาด W36x150 จำนวน 5 ตัว แต่ละตัวมีระยะห่างเท่ากับ 2.440 เมตร และทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน AASHTO HS 25-44 ด้วยแรงกระทำจากรถบรรทุกกระทำหนึ่งช่องทางจราจร (One Lane Loaded) และผลจากการวิเคราะห์พบว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักซึ่งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.440

ในปี ค.ศ. 2005 Moses ได้ทำการศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักของระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้ว ซึ่งในการทดสอบในสนามได้ทำการทดสอบการรับแรงของคานสะพานเหล็กจำนวน 3 สะพาน ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการออกแบบที่ถูกต้องและเหมาะสมอาจจะต้องสมมติว่าระบบแผ่นพื้นและคานที่รองรับไม่เกิดพฤติกรรมรับแรงร่วมกันในการหาค่าการกระจายของน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อทำการแทนที่แผ่นพื้นคอนกรีตด้วยแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วที่มีน้ำหนักเบากว่าจะส่งผลให้ค่าความเค้นในคานที่รองรับเหล็กมีค่าต่ำกว่าถึงแม้ว่าจะทำให้ค่าความกว้างประสิทธิผล (Effective Flange Width) มีค่าลดลงและตัวประกอบการกระจายของน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น

ในปีเดียวกัน (ค.ศ.2005) Chung และคณะ ได้ทำการศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักสำหรับสะพานคอนกรีตอัดแรง ในการศึกษาได้ดัดแปลงสมการตัวประกอบการกระจายน้ำหนักเดิมของ AASHTO โดย สมการที่ถูกดัดแปลงนี้ถูกประยุกต์ใช้กับสะพานคอนกรีตอัดแรงจำนวนทั้งหมด 17 สะพานและเปรียบเทียบกับผลที่ได้โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าสมการดัดแปลงดังกล่าวให้ค่าที่มีความปลอดภัยที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ได้มาจากการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผ่านมา

ต่อมาในปี ค.ศ.2006 Phuvoravan ได้ทำการศึกษาตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกของสะพานเหล็ก โดยพบว่าสมการตัวประกอบการกระจายน้ำหนักประเภทตัวประกอบกำลังต้านทาน (LRFD) ได้รวมเอาค่าพารามิเตอร์ของสติฟเนสในทิศทางตามแนวยาว (Longitudinal Stiffness Parameter) ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบในเบื้องต้น ในศึกษานี้สมการอย่างง่ายถูกนำเสนอโดยยังคงอยู่ในรูปแบบคล้ายคลึงสมการดั้งเดิม โดยในการศึกษานี้สะพานทั้งหมดจำนวน 43 สะพานได้ถูกทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้แสดงถึงค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักบรรทุกจากสมการที่นำเสนอมีค่าค่อนข้างจะปลอดภัยเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์อีกทั้งใช้ได้ครอบคลุมกว่าค่าที่ได้จากสมการของ AASHTO

ภายในช่วงเวลาเดียวกัน (ค.ศ. 2006) Zhang และคณะ ได้ทำการศึกษาเพื่อคำนวณการกระจายของน้ำหนักบรรทุกและผลตอบสนองของสะพานที่มีประเภทแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ซึ่งแบบจำลองของสะพานมีทั้งประเภทคานรองรับเป็นเหล็กและคอนกรีต ในงานวิจัยแบบจำลองถูกสร้างขึ้นโดยพิจารณาผลของพฤติกรรมร่วมระหว่างแผ่นพื้นกับคานรองรับทั้งในลักษณะ มีพฤติกรรมร่วมโดยสมบูรณ์และมีพฤติกรรมร่วมเพียงบางส่วน ซึ่งผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตเสริมเหล็กดั้งเดิม

ในปีเดียวกัน (ค.ศ.2006) Salim และคณะ ได้ทำการทำการศึกษาดัวประกอบการกระจายน้ำหนักของระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยทำการทดสอบสะพานที่มีแผ่นพื้นสะพานเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภทหน้าตัด Honeycomb ซึ่งมีคานที่รองรับเหล็ก W24x55 จำนวน 14 ตัว และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็กแต่ละตัวเท่ากับ 0.686 เมตร โดยใช้น้ำหนักในการทดสอบแบบรถคันเดียว (One Lane Loaded) และผลจากการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักซึ่งมีค่ามากที่สุดซึ่งเท่ากับ 0.234

ต่อมาภายในช่วงเวลาเดียวกัน (ค.ศ.2006) Zhang และคณะ ได้ทำการทดสอบสะพาน (Crawford Country Bridge 301) และวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์ที่มีหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Honeycomb โดยมีคานรองรับเหล็กขนาด W21x68 จำนวน 14 ตัว แต่ละตัวมีระยะห่างเท่ากับ 0.686 เมตร และทำการทดสอบภายใต้มาตรฐาน AASHTO HS 20-44 โดยผลการวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Zhang และคณะ (2006)

ตำแหน่ง คานที่รองรับ	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF)		
	การทดสอบจริง	ไฟไนท์อิลิเมนต์ มีพฤติกรรมประกอบ	
		อย่างสมบูรณ์	บางส่วน
คานตัวใน	0.226	0.184	0.180
คานตัวนอก	0.141	0.167	0.170

Zhang และคณะ ยังได้ทำการศึกษาแบบพารามเมตริก (Parametric Study) ทั้งกรณีที่เป็นแบบจำลองมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) และกรณีที่แบบจำลองมีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite) โดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลองของสะพานมีแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยรองรับด้วยคานเหล็กขนาด W36x232 จำนวน 5 ตัว มีระยะห่างระหว่างคานแต่ละตัวเท่ากับ 2.29 เมตร และมีแรงกระทำจากรถบรรทุกหนึ่งคัน สอง

คั้น และสามคั้น เพื่อวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่เกิดขึ้น โดยผลการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 2.2

**ตารางที่ 2.2** ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Zhang และคณะ (2006) จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์

จำนวน รถบรรทุก	ตำแหน่ง คานที่รองรับ	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของแบบจำลองมีพฤติกรรมประกอบ	
		อย่างสมบูรณ์	บางส่วน
รถ 1 คั้น	คานตัวใน	0.561	0.605
	คานตัวนอก	0.408	0.428
รถ 2 คั้น	คานตัวใน	0.604	0.594
	คานตัวนอก	0.607	0.649
รถ 3 คั้น	คานตัวใน	0.530	0.500
	คานตัวนอก	0.583	0.600

ในปีเดียวกัน (ค.ศ. 2006) Moses และคณะ ได้ทำการทำการศึกษาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักของระบบแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย โดยทำการทดสอบและวิเคราะห์สะพานที่มีแผ่นพื้นสะพานเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (GFRP) หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Deck) ซึ่งถูกรองรับด้วยคานเหล็ก จำนวน 3 สะพานด้วยกัน โดยมีรายละเอียดของสะพานแต่ละตัวพร้อมทั้งค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Moses และคณะ 2006

สะพาน	ความยาว (เมตร)	คานเหล็ก	ระยะห่าง (เมตร)	ค่าเฉลี่ย LDF
Fairground Road Bridge	20.70	4-W36x260	2.847	0.664
Boyer Bridge	12.70	5-W24x104	1.754	0.520
SC S655 Bridge	17.50	5-W36x150	2.440	0.821



ในปี ค.ศ.2008 Liu และคณะ ได้ทำการทดสอบแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Strongwell) เพื่อจะนำไปก่อสร้างสะพาน Haw-Thorne St. Bridge โดยทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งแผ่นพื้นมีขนาดกว้าง 6.71 เมตร ยาว 9.45 เมตร (โดยความยาวแบ่งเป็นสองช่วงคือ 4.88 เมตร และ 4.57 เมตร) รองรับด้วยคานเหล็กขนาด W14x34 จำนวน 6 ตัว ซึ่งมีระยะห่างระหว่างคานเหล็กแต่ละตัวเท่ากับ 1.219 เมตร และยังสามารถวิเคราะห์แบบพาราเมตริกด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์ซึ่งแบบจำลองที่สร้างขึ้นมามีจำนวนทั้งหมด 60 แบบจำลองที่แตกต่างกัน และมีความยาวของแบบจำลองอยู่ระหว่าง 4.57 เมตร ถึง 15.24 เมตร และมีระยะห่างของคานเหล็กที่รองรับอยู่ระหว่าง 1.22 เมตร ถึง 2.44 เมตร โดยแบบจำลองถูกวิเคราะห์แบบคานอย่างง่ายภายใต้แรงกระทำระบบ HL-93 ซึ่งผลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักดังผลที่แสดงในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.4** ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Liu และคณะ 2008 (ข้อมูลจากการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการ โดยมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.219 เมตร)

จำนวนช่องจราจร	ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ที่ได้จากห้องปฏิบัติการ	
	คานตัวนอก (Exterior)	คานตัวใน (Interior)
1 ช่องจราจร	0.27	0.47
2 ช่องจราจร	0.44	0.47

**ตารางที่ 2.5** ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ของ Liu และคณะ 2008 จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์

แบบจำลอง	ความยาว (เมตร)	คานเหล็ก	ระยะห่าง (เมตร)	ค่าเฉลี่ย LDF
1	9.1440	W24x55	1.2192	0.46
2	9.1440	W24x99	1.8288	0.65
3	18.2880	W24x76	1.2192	0.43
4	18.2880	W36x103	1.8288	0.64

## 2.4 สรุป (Conclusion)

การศึกษายทความการวิจัยข้างต้น ได้แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการในการพัฒนาระบบแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยรวมถึงรูปแบบที่ใช้ในการทดสอบและวิเคราะห์แผ่นพื้นก่อนที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ในการออกแบบต่อไป ซึ่งพบว่าการศึกษามี 2 ลักษณะหลักๆ คือ 1) การทดสอบในห้องปฏิบัติการ และ 2) การทดสอบภาคสนาม โดยผลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ผลโดยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักและทำการเปรียบเทียบผลที่ได้ นอกจากนี้พบว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่ได้จากการศึกษามีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของสะพานและรูปแบบของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย กล่าวได้ว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้นั้นขึ้นอยู่กับแรงกระทำจากรถบรรทุก (1 คัน, 2 คัน, 3 คัน หรือมากกว่าตามจำนวนของช่องจราจร), ความกว้างและความยาวของสะพาน, ประเภทของแผ่นพื้นสะพานและคานที่รองรับ รวมถึงระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ เป็นต้น

## บทที่ 3 (Chapter 3)

### แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย

#### (Fiber Reinforced Polymer Bridge Deck)

#### 3.1 วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Composite Materials)

เป็นเวลามากกว่าสามสิบปีที่วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer Composites) ถูกพัฒนาขึ้นและใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมเกี่ยวกับอากาศยาน โดยวัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเป็นวัสดุซึ่งมีวัสดุหลักที่แตกต่างกันสองส่วนประกอบเข้าด้วยกัน คือ ส่วนที่ 1) เส้นใยประเภทต่างๆ ทำหน้าที่เป็นส่วนรับกำลังที่เกิดขึ้นเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ส่วนที่ 2) พอลิเมอร์เรซินทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์และช่วยเพิ่มเสถียรภาพของเส้นใย

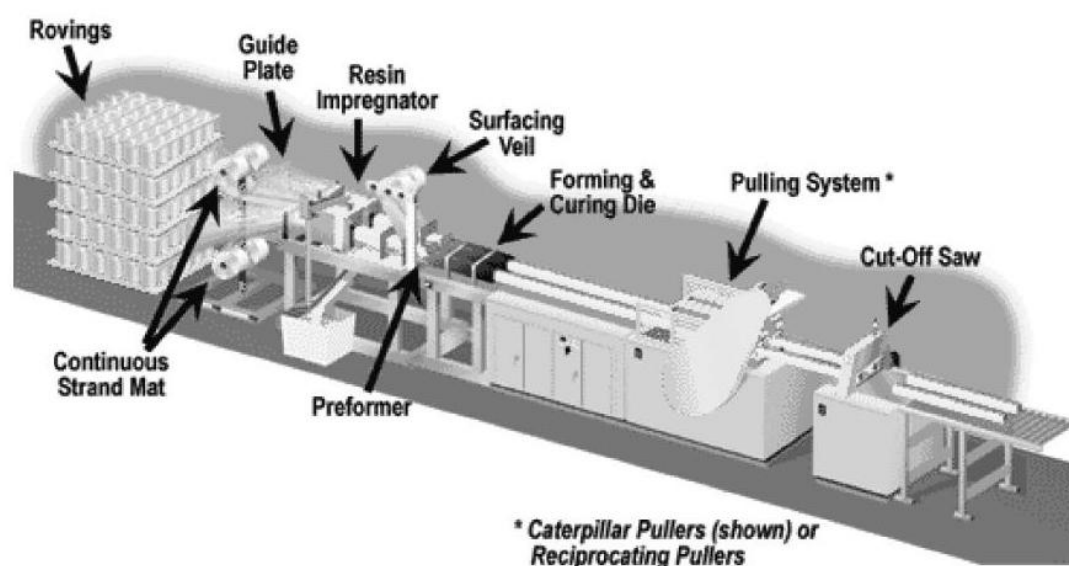
นอกจากนี้วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยยังสามารถถูกนิยามว่าเป็นพอลิเมอร์ซึ่งมีเส้นใยถูกเสริมเข้าไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง (Uni-direction) หรือในหลายๆทิศทาง (Multi-direction) โดยทั่วไปแล้ววัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยถูกจำแนกว่าเป็นวัสดุประเภทแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) โดยที่คุณสมบัติเชิงกลขึ้นอยู่กับปริมาณและทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมกำลัง ในงานทางวิศวกรรมโยธาและการประยุกต์ใช้ทางด้านโครงสร้างพื้นฐานนั้น วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภทที่ผลิตขึ้นโดยใช้เส้นใยแก้วและคาร์บอนถูกใช้อย่างทั่วไป ในขณะที่โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl Ester) อีพ็อกซี (Epoxy) ถูกใช้สำหรับเมทริก สำหรับตัวอย่างการใช้งาน เช่น เส้นใยแก้วประเภทอี (E-Glass Fiber) ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมกำลังสำหรับพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยเนื่องจาก เส้นใยแก้วมีราคาต่ำกว่าเส้นใยประเภทอื่นๆ ในขณะที่เมทริก (พอลิเมอร์) มักจะเลือกใช้ตามสภาพแวดล้อมที่จะต้องใช้งานในสนาม ซึ่งส่วนผสมของไวนิลเอสเตอร์และยูรีเทน (Urethane) ถูกแนะนำว่าเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเหมาะสมในการต้านต่อสภาพแวดล้อมที่ตีประเภทหนึ่ง

วัสดุประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีข้อดีเหนือกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมหลายประการดังซึ่งจะได้อธิบายโดยย่อต่อไปนี้คือ เป็นวัสดุซึ่งปราศจากการกัดกร่อน (Non-corrosiveness) มีอัตราส่วนสติฟเนสต่อน้ำหนักสูงกว่า (High Stiffness to Weight Ratio) มีค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานที่ต่ำกว่า (Low Life - Cycle Cost) ต้านทานการล้าได้ดี (Fatigue Resistance) และสามารถผลิตเป็นชิ้นส่วนสำเร็จรูปย่อยๆ ได้ (Modularization) จากประโยชน์ต่างๆ เหล่านี้ทำให้วิศวกรสามารถออกแบบโครงสร้างซึ่งมีประสิทธิภาพสูงด้วยราคาที่คุ้มค่าต่อการใช้งานยิ่งขึ้น นอกจากนี้การที่น้ำหนักของโครงสร้างโดยรวมลดลงจากการใช้ชิ้นส่วนที่เป็นวัสดุประกอบพอลิเมอร์

อร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทำให้การขนส่งและการติดตั้งสามารถกระทำได้โดยอาศัยเครื่องจักรหนักที่มีขนาดเล็กลงกว่าเดิม

### 3.2 กระบวนการผลิต (Fabrication)

ชิ้นส่วนพื้นสะพานพอลิเมอร์ (FRP Deck Module) สามารถถูกผลิตขึ้นด้วยทั้งกระบวนการอัตโนมัติหรือโดยการใช้แรงงานร่วมกับอุปกรณ์พื้นฐาน ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันไป โดยทั่วไปนั้นคุณสมบัติของชิ้นส่วนพื้นสะพานมักจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักหลายประการดังต่อไปนี้ 1) ประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการทำให้ส่วนผสมของวัสดุประกอบอยู่ในรูปแบบที่ต้องการ 2) เปอร์เซ็นต์การบวมของเรซินหรือพอลิเมอร์ที่ห่อหุ้มเส้นใยนั้นอยู่ และ 3) ปริมาณช่องว่าง (Void) ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุประกอบ ดังนั้นจากปัจจัยดังกล่าวข้างต้นเพื่อให้พื้นสะพานพอลิเมอร์ที่ผลิตขึ้นมีคุณสมบัติเชิงกลตามที่ต้องการ กระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติจึงถูกนำมาใช้ในการผลิตแผ่นพื้นสะพานเป็นส่วนใหญ่ โดยกระบวนการอัตโนมัติที่เป็นที่นิยมใช้คือ กระบวนการพุลทรูชัน (Pultrusion) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการผลิตแบบพุลทรูชัน (Pultrusion) (Bank 2006)

กระบวนการพุลทรูชั่น (Pultrusion) นี้สามารถผลิตแผ่นพื้นที่มีหน้าตัดอย่างง่ายจนถึงหน้าตัดที่มีความซับซ้อนซึ่งทำให้ลดขั้นตอนในการที่จะต้องประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้หน้าตัดที่ต้องการ นอกจากนี้ กระบวนการพุลทรูชั่นยังมีข้อดีหลายประการคือ ในด้านต้นทุนทำให้มีค่าแรงงานและต้นทุนในกระบวนการผลิตต่ำ มีปริมาณเศษวัสดุเหลือทิ้งน้อย และอัตราการผลิตอยู่ในอัตราที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดบางประการสำหรับกระบวนการผลิตนี้ซึ่งอาจจะพบได้โดยทั่วไปคือ บางครั้งในบางบริเวณของชิ้นส่วนอาจจะพบว่ามีส่วนที่มีเรซินอยู่ไม่เพียงพอ ในขณะที่บางส่วนของชิ้นงานอาจจะพบว่าเรซินมีการบ่มตัวไม่สม่ำเสมอเพียงพอ และอาจจะพบปัญหาเกี่ยวกับอัตราความเร็วในการดึงขึ้นรูปของชิ้นส่วนเพื่อให้เกิดปริมาณช่องว่างในชิ้นตัวอย่างให้น้อยที่สุด ซึ่งปัญหาเกี่ยวกับการที่เรซินและการบ่มไม่เพียงพอในบางส่วนของชิ้นส่วนอาจจะนำไปสู่การบิดตัวของชิ้นส่วนและทำให้ชิ้นส่วนมีคุณสมบัติเชิงกลต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้

### 3.3 พื้นสะพานพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ (FRP Deck in This Research)

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ศึกษาเฉพาะแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ถูกผลิตมาจากกระบวนการพุลทรูชั่น 2 ประเภท ได้แก่ แผ่นพื้นที่มีชื่อทางการค้าว่า 1) Prodeck4 และ 2) Prodeck8 ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้ง 2 ประเภท ได้ถูกผลิตขึ้นมาเพื่อให้สามารถรับน้ำหนักจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS25 Truck Loading ได้เมื่อถูกนำไปใช้งานจริงในการก่อสร้างสะพาน ซึ่งแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติของวัสดุบางประการที่แตกต่างกันซึ่งมีผลต่อกระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลิเมนต์ ดังที่จะกล่าวเป็นส่วนๆไปดังต่อไปนี้



Prodeck4



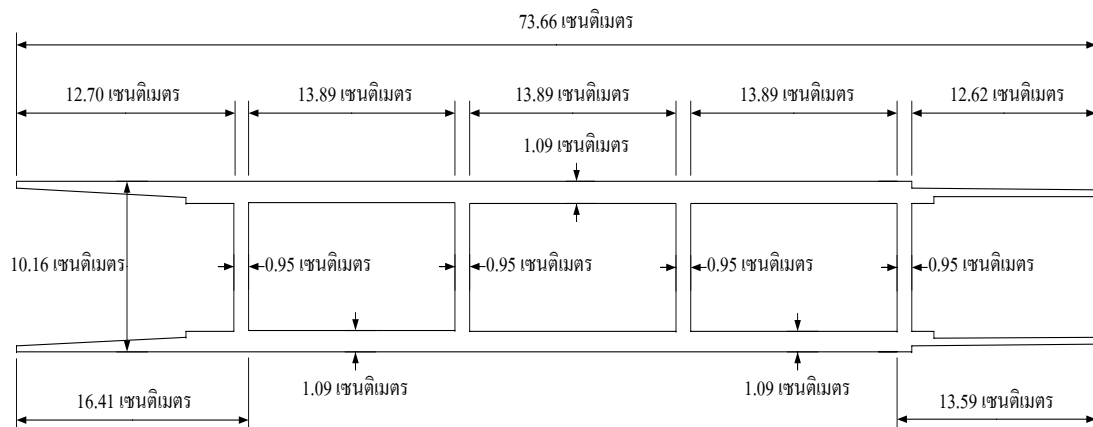
Prodeck8

รูปที่ 3.2 รูปแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (FRP Decks)

### 3.3.1 แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck4

Prodeck4 เป็นแผ่นพื้นสะพานซึ่งมีหน้าตัดประกอบด้วยเซลล์สี่เหลี่ยมจำนวน 3 เซลล์ มีขนาดของความกว้างและความสูงของหน้าตัดแผ่นพื้นเท่ากับ 73.66 เซนติเมตร และ 10.16 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีส่วนหลักๆ 2 ส่วนคือ แผ่นตั้ง (Web) ที่มีความหนา 0.95 เซนติเมตร และปีก (Flange) ที่มีความหนา 1.09 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถูกผลิตขึ้นมาจากกระบวนการพูลทรูชั่น

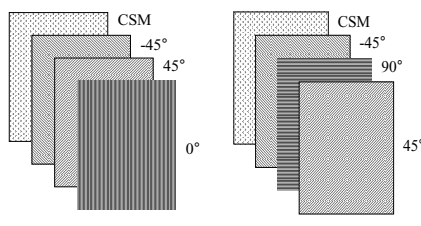
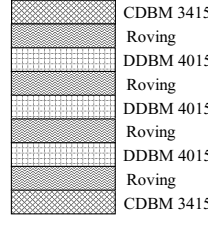
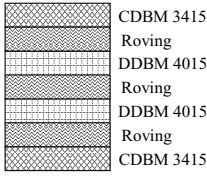
ผลิตขึ้นด้วย เส้นใยแก้วถักทอประเภทอี (E-glass Fiber) และไวนิลเอสเตอร์เรซิน (Vinyl Ester Resin) มีอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตรอยู่ที่ 54.00 % และมีน้ำหนักประมาณ 53.00 กิโลกรัมต่อตารางเมตร จะมีการเรียงกันของเส้นใยในสามทิศทาง (Triaxial Fabrics) กล่าวคือจะมีการเรียงตัวกันของเส้นใยมาจากปีก ไหลลงมาถึงแผ่นตั้งและไปจบที่ปีกอีกด้านหนึ่ง โดยมีวัสดุที่ช่วยในการเชื่อมประสาน (Roving and Mats) ที่มีความยืดหยุ่นตัวที่ดี



รูปที่ 3.3 หน้าตัดแผ่นพื้นประกอบพอลิเมอร์ Prodeck4

Prodeck4 จะมีวัสดุที่เป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ (Laminate) 3 ส่วน ได้แก่ 1) CDBM 3415, 2) DDBM 4015 และ 3) 113 Yield Roving ทั้งสามส่วนมีการเรียงตัวซ้อนกันของเส้นใยในสามทิศทาง คือ CDBM 3415 มีการเรียงตัวกันของเส้นใยในทิศทาง  $0^{\circ}$ ,  $+45^{\circ}$  และ  $-45^{\circ}$  ส่วน DDBM 4015 มีการเรียงตัวกันของเส้นใยในทิศทาง  $+45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  และ  $-45^{\circ}$  และ 113 Yield Roving ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสาน ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งทั้งสามส่วนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยคุณสมบัติได้แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ทิศทางและโครงสร้างการเรียงตัวของแผ่นบาง สำหรับ Prodeck4

ประเภท แผ่นพื้น	ทิศทางการเรียงตัวของแผ่นบาง	รูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเส้นใย	
		ปีกบนและปีกล่าง	แผ่นตั้ง
Prodeck4			
	CDBM 3415      DDBM 4015		

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติและอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตร ของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ DDBM 4015 สำหรับ Prodeck4

ทิศทางเส้นใย	น้ำหนัก (กรัม/ตารางเมตร)		ความหนา (มิลลิเมตร)		ปริมาตร ( $L_v$ ) (มิลลิเมตร <sup>3</sup> ) x 10 <sup>3</sup>	
	CDBM 3415	DDBM 4015	CDBM 3415	DDBM 4015	CDBM 3415	DDBM 4015
0°	532.663	-	0.508	-	40.116	-
+45°	306.510	387.885	0.252	0.330	23.361	30.677
-45°	306.510	387.885	0.252	0.330	23.361	30.677
90°	-	585.896	-	0.483	-	44.835
Mat (CSM)	457.731	457.731	0.356	0.356	33.036	33.036
รวม	1,603.414	1,819.397	1.366	1.499	119.874	139.225

การเรียงตัวทางสถาปัตยกรรมของเส้นใยและแผ่นลามิเนตทั้งสาม (CDBM, DDBM และ Roving) จะรวมกันเป็นแผ่นตั้งและปีกของแผ่นพื้น โดยแผ่นตั้งมีความหนารวม 0.95 เซนติเมตร จะประกอบไปด้วยลามิเนตซ้อนกันเป็นชั้นๆรวมทั้งหมด 8 ชั้น (Layer) โดยรูปแบบการซ้อนกันมีลักษณะแบบสมมาตรจากชั้นนอกสุดสองชั้น (ชั้นที่ 1 และชั้นที่ 8) เป็น CDBM ไปยังชั้นใน (ชั้นที่ 2 ถึงชั้นที่ 4 และชั้นที่ 7 ลงมายังชั้นที่ 5) ซึ่งประกอบด้วย Roving และ DDBM เรียงซ้อนสลับกัน ส่วนปีกประกอบไปด้วยลามิเนตซ้อนกันเป็นชั้นๆรวมทั้งหมด 10 ชั้น (Layer) และมีการเรียงตัวซ้อนกันแบบสมมาตรเหมือนกับในกรณีของแผ่นตั้ง มีความหนารวม 1.09 เซนติเมตร นอกจากนี้ลามิเนตในแต่ละชั้นที่ประกอบขึ้นเป็นปีกและแผ่นตั้งของแผ่นพื้นยังมีคุณสมบัติแบบออร์โททรอปิก (Orthotropic) กล่าวคือลามิเนตแต่ละชั้นประกอบด้วยค่าโมดูลัสที่แตกต่างกันและเรียงตัวในทิศทางที่ต่างกัน (ทิศทางในแนวยาว ( $E_{11}$ ), แนวยาว ( $E_{22}$ ) และ ในแนวตั้งฉาก( $G_{12}$ )) ดังนั้นการซ้อนกันของลามิเนตเป็นชั้นๆในทิศทางที่แตกต่างกัน ทำให้วัสดุประกอบมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่มากกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม (คอนกรีต และเหล็ก) เมื่อเทียบกับในอัตราส่วนของน้ำหนักที่เท่ากัน ทั้งนี้รูปแบบการเรียงตัวของลามิเนตและคุณสมบัติของลามิเนตที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละประเภทที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆเพื่อประกอบเป็นแผ่นตั้งและปีก แสดงในตารางที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.3 ลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck4

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (เซนติเมตร)	$E_{11}$ (ksc) x $10^6$	$E_{22}$ (ksc) x $10^6$	$G_{12}$ (ksc) x $10^6$	อัตราส่วนปัวซอง
1	CDBM	0.179	0.384	0.094	0.047	0.27
2	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
3	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
4	Roving	0.051	0.424	0.104	0.025	0.28
5	Roving	0.051	0.424	0.104	0.025	0.28
6	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
7	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
8	CDBM	0.179	0.384	0.094	0.047	0.27
รวม		0.953				

หมายเหตุ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่น และ G คือ โมดูลัสการเฉือน มีหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



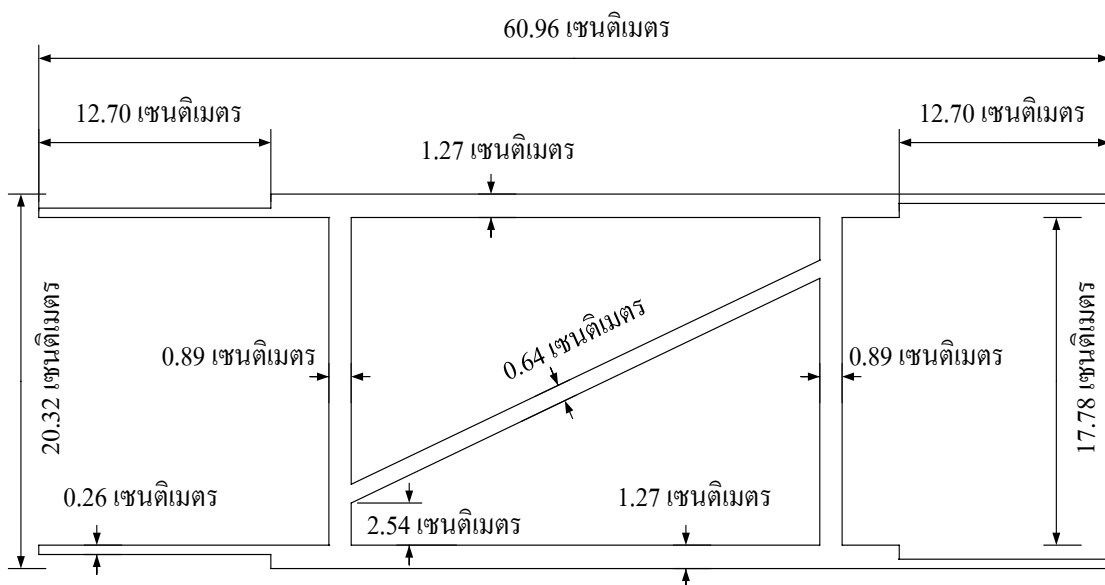
ตารางที่ 3.4 ทามิเนตของปีก (Flange) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck4

ชั้นที่	ประเภทแผ่นบาง	ความหนา (เซนติเมตร)	$E_{11}$ (ksc) x $10^6$	$E_{22}$ (ksc) x $10^6$	$G_{12}$ (ksc) x $10^6$	อัตราส่วนปัวซอง
1	CDBM	0.128	0.384	0.094	0.047	0.27
2	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
3	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
4	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
5	DDBM	0.072	0.388	0.095	0.046	0.28
6	DDBM	0.072	0.388	0.095	0.046	0.28
7	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
8	DDBM	0.145	0.388	0.095	0.046	0.28
9	Roving	0.102	0.424	0.104	0.025	0.28
10	CDBM	0.128	0.384	0.094	0.047	0.27
รวม		1.097				

### 3.3.2 แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck8

แผ่นพื้นสะพาน Prodeck8 ถูกผลิตขึ้นมาด้วยกระบวนการพูลทรูชั่นเช่นเดียวกับแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 มีส่วนประกอบจากเส้นใยแก้วประเภทอีและโพลีเอสเตอร์ (E-glass/Polyester) แผ่นพื้นมีความสูง 20.32 เซนติเมตร และความกว้างเท่ากับ 60.96 เซนติเมตร ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ 1) ปีกด้านบนและปีกด้านล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนา 1.27 เซนติเมตร และ 2) แผ่นเสริมความแข็งแรงในแนวเฉียงและแผ่นตั้งทั้งสองด้าน (Diagonal และ Web) มีความหนา 0.64 เซนติเมตร และ 0.89 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สำหรับการวิเคราะห์แผ่นพื้นแบบ Prodeck8 มีคุณสมบัติของวัสดุที่ได้มาจากกระบวนการผลิต คือ

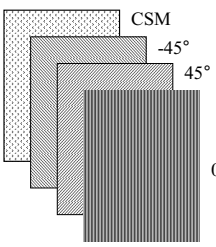
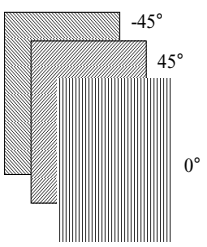
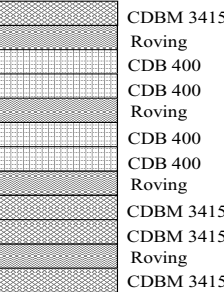
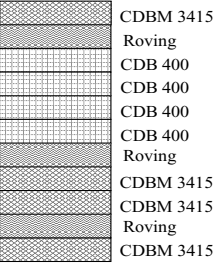
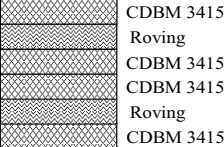
โมดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย / $E_f 0$	= $0.7384 \times 10^6$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
โมดูลัสยืดหยุ่นของเมทริกซ์ / $E_m 0$	= $0.3446 \times 10^5$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
โมดูลัสการเฉือนของเส้นใย / $G_f 0$	= $0.2940 \times 10^6$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
โมดูลัสการเฉือนของเมทริกซ์ / $G_m 0$	= $0.1667 \times 10^6$ กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



รูปที่ 3.4 หน้าตัดของแผ่นพื้น Prodeck8 ที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์

สำหรับ Prodeck8 ประกอบไปด้วยแผ่นบางลามิเนต 3 ชนิดโดยมีการเรียงตัวทางสถาปัตยกรรมกันใน 3 ทิศทางด้วยกัน ( $0^\circ$  และ  $\pm 45^\circ$ ) ดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยทั้งสามส่วนคือ 1) CDB 400, 2) CDBM 3415 พร้อมคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 3.6 และ 3) 113 Yield Roving ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมประสานการประกอบกันของแผ่นลามิเนตเป็นส่วนต่างๆของ Prodeck8 ได้แก่ ปีกบนและปีกล่าง ประกอบด้วยจำนวนชั้นลามิเนต 12 ชั้น มีความหนารวมเท่ากับ 1.27 เซนติเมตร, แผ่นตั้งประกอบด้วยจำนวนชั้นลามิเนต 11 ชั้น มีความหนารวมเท่ากับ 0.89 เซนติเมตร และแผ่นเฉียง มีจำนวนชั้นลามิเนตเท่ากับ 6 ชั้น มีความหนารวมเท่ากับ 0.64 เซนติเมตร โดยลามิเนตแต่ละชนิดที่มาประกอบเป็นแผ่นตั้ง, ปีกบน, ปีกล่าง และแผ่นเฉียง ของแผ่นพื้น Prodeck8 มีคุณสมบัติเฉพาะแบบออร์ทोटโรปิก (Orthotropic) เช่นเดียวกับกรณีแผ่นพื้น Prodeck4 คือลามิเนตแต่ละชนิดมีความหนาเฉพาะตัว และมีค่าโมดูลัสในทิศทางที่แตกต่างกัน ( $E_{11}$ ,  $E_{22}$  และ  $G_{12}$ ) เมื่อมาซ้อนกันไปในทิศทางที่แตกต่างกัน ประกอบกับการเชื่อมประสานจากวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบออร์ทोटโรปิกเช่นเดียวกัน ทำให้วัสดุประกอบลามิเนตมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้รูปแบบการเรียงตัวของลามิเนตและคุณสมบัติของลามิเนตที่ใช้ในการวิเคราะห์แต่ละประเภทที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆเพื่อประกอบเป็นแผ่นตั้ง ปีก และแผ่นเฉียง แสดงในตารางที่ 3.7 ถึง 3.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 ทิศทางและโครงสร้างการเรียงตัวของแผ่นบาง สำหรับ Prodeck8

ประเภทแผ่นพื้น	ทิศทางการเรียงตัวของแผ่นบาง	รูปแบบทางสถาปัตยกรรมของเส้นใย		
		ปีกบนและปีกล่าง	แผ่นตั้ง	
Prodeck8	 CDBM 3415	 CDB 400		
			 (แผ่นเฉียง)	

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติและอัตราส่วนของเส้นใยต่อปริมาตร ของแผ่นบางชนิด CDBM 3415 และ CDB 400 สำหรับ Prodeck8

ทิศทาง เส้นใย	น้ำหนัก/พื้นที่ (กรัม/ตารางเมตร)		ความหนา (มิลลิเมตร)		น้ำหนัก ( $W_p$ ) (กิโลกรัม)		ปริมาตร ( $L_v$ ) (มิลลิเมตร <sup>3</sup> ) x $10^3$	
	CDB	CDBM	CDB	CDBM	CDB	CDBM	CDB	CDBM
	400	3415	400	3415	400	3415	400	3415
0°	562.161	532.663	0.495	0.467	0.052	0.050	46.048	43.426
+45°	413.314	306.510	0.366	0.269	0.039	0.029	33.921	25.072
-45°	413.314	306.510	0.366	0.269	0.039	0.029	33.921	25.072
(CFM)	-	457.731	-	0.404	-	0.043	-	37.526
รวม	1,388.789	1,603.754	1.227	1.410	0.129	0.149	113.890	130.933

ตารางที่ 3.7 ลามิเนตของแผ่นตั้ง (Web) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck8

ชั้นที่	ประเภท แผ่นบาง	ความหนา (เซนติเมตร)	$E_{11}$ (ksc) x $10^6$	$E_{22}$ (ksc) x $10^6$	$G_{12}$ (ksc) x $10^6$	อัตราส่วน ปัวซอง
1	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
2	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
3	CDB	0.042	0.061	0.036	0.295	0.26
4	CDB	0.042	0.061	0.036	0.295	0.26
5	CDB	0.042	0.061	0.036	0.295	0.26
6	CDB	0.042	0.061	0.036	0.295	0.26
7	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
8	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
9	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
10	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
11	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
รวม		0.893				

ตารางที่ 3.8 ลามิเนตของปีก (Flange) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck8

ชั้นที่	ประเภท แผ่นบาง	ความหนา (เซนติเมตร)	$E_{11}$ (ksc) x $10^6$	$E_{22}$ (ksc) x $10^6$	$G_{12}$ (ksc) x $10^6$	อัตราส่วน ปีกของ
1	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
2	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
3	CDB	0.123	0.061	0.036	0.295	0.26
4	CDB	0.123	0.061	0.036	0.295	0.26
5	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
6	CDB	0.141	0.061	0.036	0.295	0.26
7	CDB	0.103	0.061	0.036	0.295	0.26
8	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
9	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
10	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
11	Roving	0.054	0.345	0.060	0.024	0.26
12	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
รวม		1.270				

ตารางที่ 3.9 ลามิเนตของแผ่นเฉียง (Diagonal) และคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ Prodeck8

ชั้นที่	ประเภท แผ่นบาง	ความหนา (เซนติเมตร)	$E_{11}$ (ksc) x $10^6$	$E_{22}$ (ksc) x $10^6$	$G_{12}$ (ksc) x $10^6$	อัตราส่วน ปีกของ
1	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
2	Roving	0.037	0.345	0.060	0.024	0.26
3	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
4	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
5	Roving	0.037	0.345	0.060	0.024	0.26
6	CDBM	0.141	0.338	0.058	0.024	0.26
รวม		0.638				

### 3.4 สรุป (Conclusion)

แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย (Prodeck4 และ Prodeck8) ที่ผลิตด้วยกระบวนการพูลทรูชั่น มีลักษณะการเรียงตัวของแผ่นบางลามิเนตที่คล้ายคลึงกัน คือประกอบด้วยลามิเนตที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆ มีวัสดุประสานที่มีคุณสมบัติแบบอโททรอปิก (Orthotropic) เหมือนกัน โดยมีความแตกต่างกันในส่วนของคุณสมบัติของแผ่นบางลามิเนต (ความหนา,  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  และ  $G_{12}$ ) และจำนวนชั้นของแผ่นบางลามิเนตที่มาเรียงตัวกัน ซึ่งทำให้วัสดุประกอบลามิเนตมีความสามารถในการรับน้ำหนักที่มากกว่าวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิมเมื่อเปรียบเทียบในหน่วยน้ำหนักที่เท่ากัน อีกทั้งยังมีน้ำหนักที่เบากว่า และกำลังได้รับการพัฒนาเพื่อมาแทนที่วัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม (คอนกรีต, เหล็ก และอลูมิเนียม) ในอนาคตต่อไป ทั้งนี้รูปแบบในการผลิตแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย หรือวัสดุประกอบพอลิเมอร์ต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และการนำไปใช้งาน

## บทที่ 4 (Chapter 4)

### วิธีการวิจัย

#### (Research Methodology)

##### 4.1 บทนำ (Introduction)

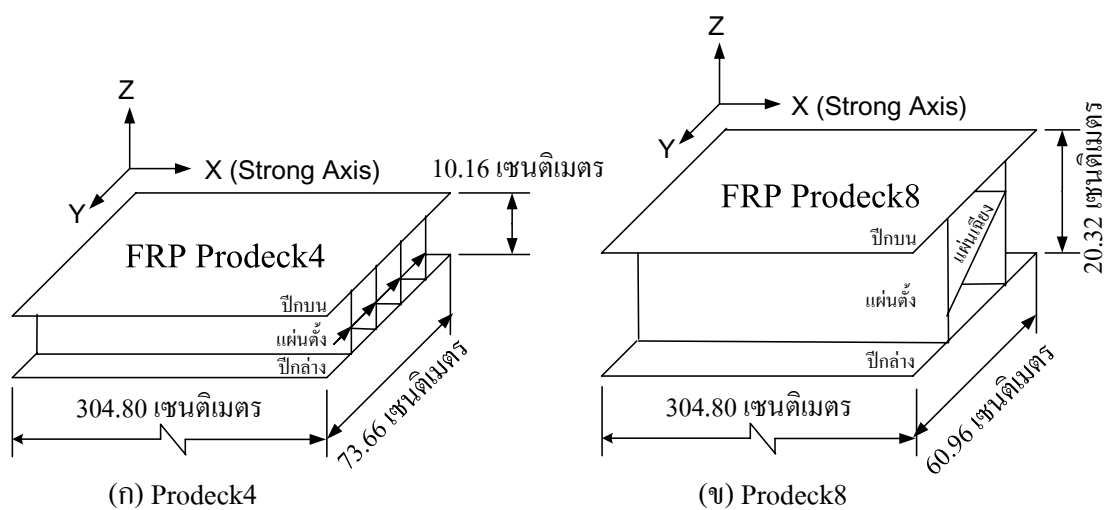
การศึกษานี้เป็นการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอาศัยโปรแกรมวิเคราะห์เชิงพาณิชย์ ประกอบด้วยส่วนของการสร้างแบบจำลองและส่วนแสดงผล ซึ่งดำเนินการผ่านโปรแกรม MSC Patran ในขณะที่ส่วนของการประมวลผลถูกดำเนินการผ่านโปรแกรม MSC Nastran ในงานวิจัยนี้ แบบจำลองชิ้นส่วนของสะพานพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดคือ 1) Prodeck4 (Low-Profile Cross Section) และ 2) Prodeck8 (High-Profile Cross Section) ถูกทำการวิเคราะห์สามระดับด้วยกัน ได้แก่ 1) ระดับของชิ้นส่วน (Component Level) 2) ระดับที่เป็นระบบ (คาน-พื้น) (System Level) เหมือนในห้องปฏิบัติการ และ 3) ระดับแบบจำลองสะพานช่วงเดียวแบบคาน-แผ่นพื้น (Slab-Stringer Bridge) ซึ่งใช้แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด โดยมีคานสะพานเป็นคานเหล็กรูปตัวไอ การวิเคราะห์เป็นไปตามวัตถุประสงค์การศึกษาที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 1.2 ของบทที่ 1 ส่วนวิธีการและรายละเอียดต่างๆในการสร้างแบบจำลองตลอดจนการวิเคราะห์จะได้กล่าวถึงต่อไปในบทนี้

##### 4.2 แบบจำลองระดับชิ้นส่วน (Component Level)

แบบจำลองทางโครงสร้างของพื้นสะพานทั้งสองชนิดแต่ละโมดูล (Module) ถูกจำลองโดยใช้เอลิเมนต์แบบแผ่นบางรูปสี่เหลี่ยม (Square Shell Element) สำหรับชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 มีจำนวนชั้นของวัสดุประกอบลามิเนตจำนวน 10 ชั้นสำหรับแผ่นปีกและมีจำนวนชั้นของวัสดุประกอบลามิเนตจำนวน 8 ชั้นสำหรับแผ่นตั้ง ในขณะที่ชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 มีจำนวนชั้นของวัสดุประกอบลามิเนตจำนวน 12 ชั้นสำหรับแผ่นปีกและมีจำนวนชั้นของวัสดุประกอบลามิเนตจำนวน 11 ชั้น และ 6 ชั้น สำหรับแผ่นตั้งและแผ่นเฉียงตามลำดับ (รายละเอียดคุณสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของวัสดุประกอบลามิเนตแต่ละชั้นกล่าวอยู่ในหัวข้อที่ 3.3 ของบทที่ 3)

แบบจำลองของชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 มีหน้าตัดขนาด 73.66 เซนติเมตร x 10.16 เซนติเมตร และมีความยาว 304.80 เซนติเมตร คุณสมบัติวัสดุประกอบลามิเนตแต่ละชั้นถูกจำลองด้วยคุณสมบัติแบบออร์ทอทรอปิก (Orthotropic) โดยที่แกนหลักของคุณสมบัติวัสดุ (Strong Axis) บนอิลิเมนต์ของทั้งส่วนปีกและแผ่นตั้งถูกวางอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางตามแกนหลักของชิ้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน (แกนตามยาว หรือในทิศทางที่ตั้งฉากกับหน้าตัด) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก)

แบบจำลองของชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 มีหน้าตัดขนาด 60.96 เซนติเมตร x 20.32 เซนติเมตร มีความยาว 304.80 เซนติเมตร และมีความยาวของแผ่นตั้งในแนวทแยงมุม (Diagonal) 304.8 เซนติเมตร คุณสมบัติวัสดุประกอบลามิเนตแต่ละชั้นถูกจำลองด้วยคุณสมบัติแบบออร์ทอทรอปิก (Orthotropic) โดยที่แกนหลักของคุณสมบัติวัสดุ (Strong Axis) บนอิลิเมนต์ของทั้งส่วนปีกและแผ่นตั้งถูกวางอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางตามแกนหลักของชิ้นส่วนแผ่นพื้นสะพาน (แกนตามยาว หรือในทิศทางที่ตั้งฉากกับหน้าตัด) เช่นเดียวกันกับ Prodeck4 ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข)



รูปที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพและแกนหลักของคุณสมบัติของแผ่นพื้น FRP



ได้ทำการวิเคราะห์ผลตอบสนองซึ่งได้แก่ ความเค้น การยืดหดตัว และการโก่งตัว (Stress ,Strain and Deflection) ภายใต้ภาระบรรทุกแบบสถิตศาสตร์และได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งดำเนินการโดยนักวิจัยท่านอื่นๆ (Howard 2002, Natarajan 2003, Punyamurthula 2004, Prachasaree 2009 และ Howard 2009) ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบดังกล่าวจะนำไปทำการปรับปรุงรูปแบบและวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อให้มีค่าการตอบสนองใกล้เคียงกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการนำผลการตอบสนอง (ความเค้น การยืดหดตัว และการโก่งตัว) ไปใช้เพื่อทำการคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกล เช่นค่าความเกร็งต่อการดัดเทียบเท่า (Equivalent Flexural Rigidity ,EI) และค่าความเกร็งต่อการเฉือนเทียบเท่า (Equivalent Shear Rigidity ,GA)

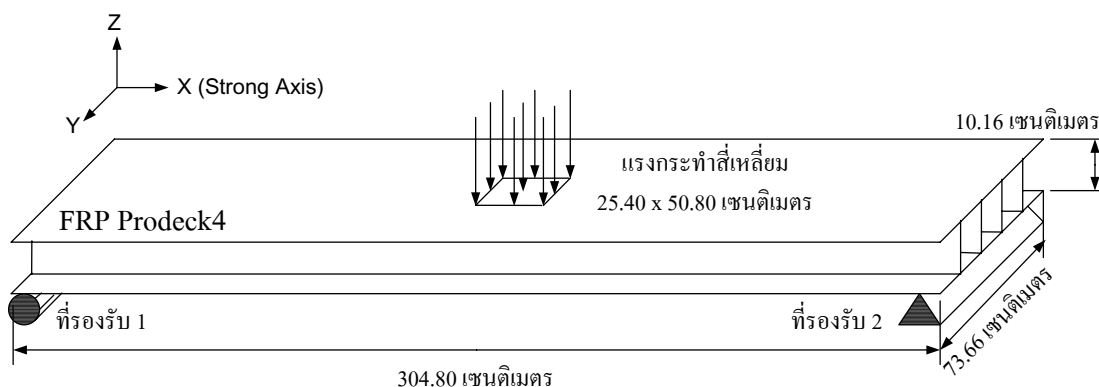
ในการสร้างแบบจำลองระดับชิ้นส่วนนั้นทำการสร้างแบบจำลองใน 2 ลักษณะสำหรับแผ่นพื้นแต่ละประเภทคือ

- 1) แบบจำลองตามแนวแกนยาว (Longitudinal Component Model)
- 2) แบบจำลองตามแนวแกนขวาง (Transverse Component Model)

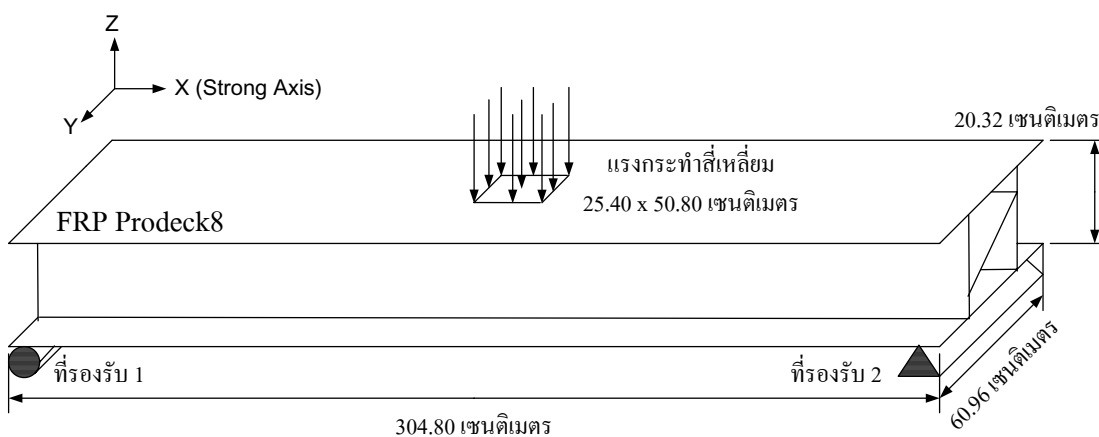
#### 4.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนยาว (Analysis of Longitudinal Component Model)

ในการวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนยาวทำการวิเคราะห์โดยทำการจำลองพื้นที่ซึ่งเปรียบเสมือนพื้นที่ของล้อรถบรรทุกประเภท HS 25 กระทำบนแบบจำลองในรูปแบบน้ำหนักกระจายบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาด 25.40 เซนติเมตร x 50.80 เซนติเมตร โดยที่แบบจำลองมีที่รองรับเป็นที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) ที่ปลายของชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ในการวิเคราะห์จะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็นขั้นๆ จนกระทั่งแบบจำลองเกิดการพิบัติ (Failure) ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว ตลอดจน ความเค้นและการยืดหดตัวที่จุดต่างๆ บนแบบจำลองถูกบันทึกเพื่อนำมาคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกลเทียบเท่าต่อไป (รายละเอียดการคำนวณแสดงในบทที่ 5) นอกจากนี้ตารางที่ 4.1 แสดงสรุปรายละเอียดแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

(หมายเหตุ: เนื่องจากแรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS25 มีรูปแบบเป็นลักษณะแรงกระทำรวม (Point Load) ต่อล้อรถบรรทุก 1 ล้อ ซึ่งในความเป็นจริงแรงที่เกิดจากล้อของรถบรรทุกที่กระทำต่อสะพานมีลักษณะเป็นแรงแผ่กระจายรูปสี่เหลี่ยม (Patch Load) ซึ่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002 และ Punyamurthula 2004) ใช้ขนาดแรงกระทำรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.40 เซนติเมตร x 50.80 เซนติเมตร ซึ่งจะนำมาวิเคราะห์ในส่วนของการวิจัยนี้)



รูปที่ 4.2 ลักษณะแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว สำหรับ Prodeck4



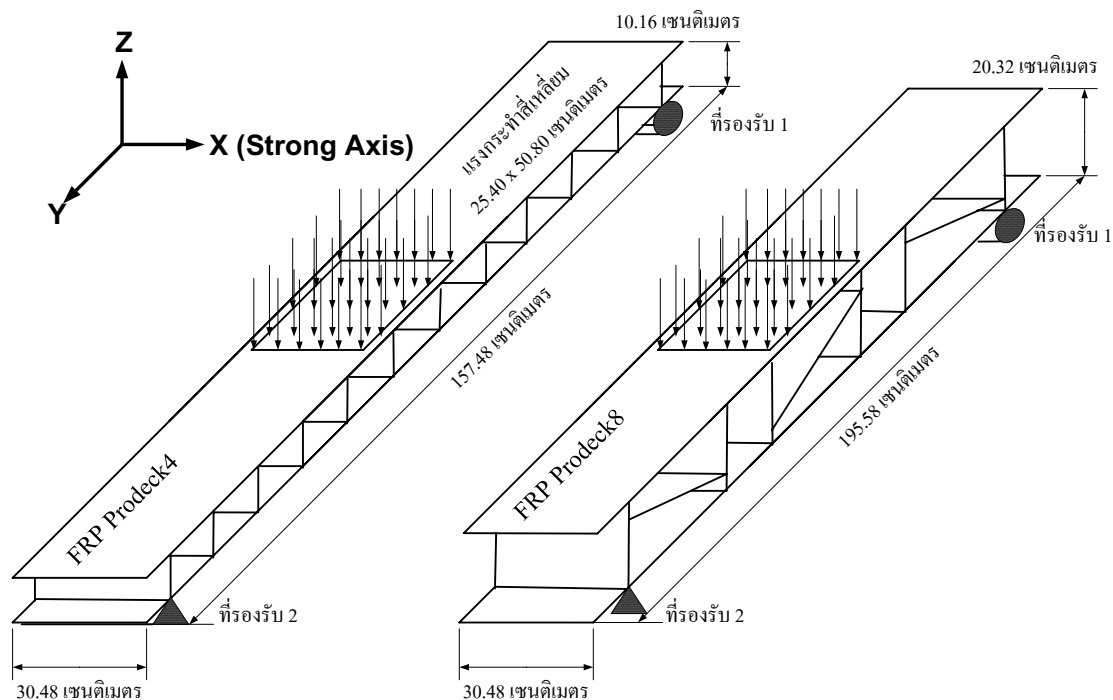
รูปที่ 4.3 ลักษณะแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว สำหรับ Prodeck8

ตารางที่ 4.1 ขนาดของหน้าตัดและแรงกระทำต่อแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว

รายละเอียด	Prodeck4			Prodeck8			
	ปีกบน	ปีกล่าง	แผ่นตั้ง	ปีกบน	ปีกล่าง	แผ่นตั้ง	แผ่นเฉียง
ความกว้าง (เซนติเมตร)	73.66	73.66	10.16	60.96	60.96	20.32	31.37
ความหนา (เซนติเมตร)	1.09	1.09	0.95	1.27	1.27	0.89	0.64
ความกว้างรวม (เซนติเมตร)	73.66			60.96			
ความสูงรวม (เซนติเมตร)	10.16			20.32			
ความยาว (เซนติเมตร)	304.8						
ขนาดแรงกระทำสี่เหลี่ยม	25.40 เซนติเมตร x 50.80 เซนติเมตร						
แรงกระทำสูงสุด	กระทำจนเกิดการพิบัติ			160.19 กิโลนิวตัน			

#### 4.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนขวาง (Analysis of Transverse Component Model)

สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนขวางมีความคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนยาวที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยทำการจำลองน้ำหนักบรรทุกทุกจากล้อรถบรรทุกประเภท HS 25 ในลักษณะน้ำหนักกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาด 25.40 เซนติเมตร x 50.80 เซนติเมตร เช่นเดียวกัน และแบบจำลองตามขวางนี้มีที่รองรับเป็นที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) ที่ปลายของชิ้นส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในการวิเคราะห์จะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกภายในช่วงการยืดหยุ่น (Elastic Range) เท่านั้น โดยน้ำหนักบรรทุกสูงสุดที่กระทำสำหรับ Prodeck4 และ Prodeck8 มีค่าเท่ากับ 4.45 กิโลนิวตัน และ 13.38 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว ตลอดจน ความเค้นและการยืดหดตัวที่จุดต่างๆ บนแบบจำลองถูกนำมาคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกลเทียบเท่าต่อไป รายละเอียดของแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงสรุปอยู่ในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.4 ลักษณะแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนขวาง

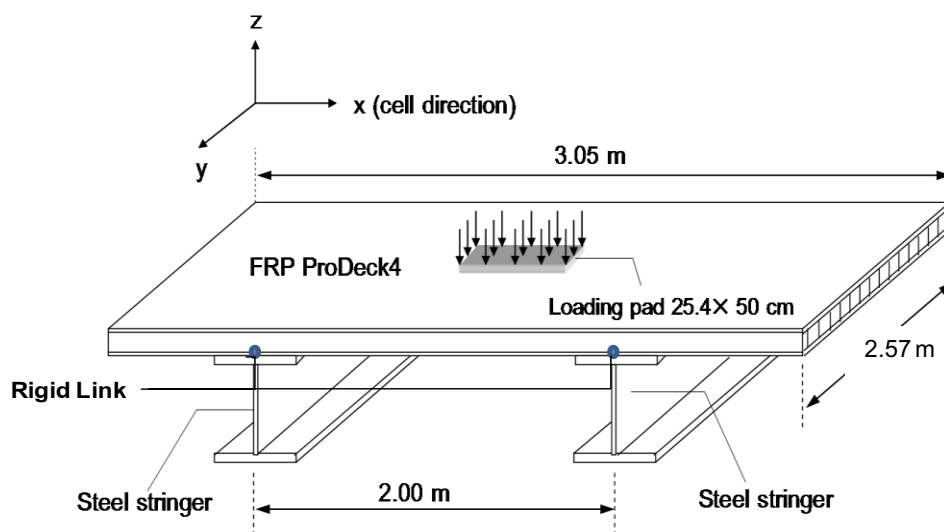
ตารางที่ 4.2 ขนาดของหน้าตัดและแรงกระทำต่อแบบจำลองในการวิเคราะห์ตามแนวแกนขวาง

รายละเอียด	Prodeck4			Prodeck8			
	ปีกบน	ปีกล่าง	แผ่นตั้ง	ปีกบน	ปีกล่าง	แผ่นตั้ง	แผ่นเฉียง
ความกว้าง (เซนติเมตร)	73.66	73.66	10.16	60.96	60.96	20.32	31.37
ความหนา (เซนติเมตร)	1.09	1.09	0.95	1.27	1.27	0.89	0.64
จำนวนแบบจำลอง	3 ชั้นส่วนต่อกัน						
ความกว้างรวม (เซนติเมตร)	195.58			157.48			
ความสูงรวม (เซนติเมตร)	10.16			20.32			
ความยาว (เซนติเมตร)	30.48						
ขนาดแรงกระทำสี่เหลี่ยม	25.40 เซนติเมตร x 50.8 เซนติเมตร						
แรงกระทำสูงสุด	4.45 กิโลนิวตัน			13.38 กิโลนิวตัน			

#### 4.3 แบบจำลองระดับระบบ (System Level)

ภายหลังจากการสร้างแบบจำลองในระดับชิ้นส่วน แบบจำลองระดับชิ้นส่วนจะถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันและประกอบเข้ากับแบบจำลองของคานสะพานเหล็กเพื่อทำการวิเคราะห์ในลักษณะแบบจำลองของระบบ แผ่นพื้น- คานสะพาน (Slab - Stringer) เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลการตอบสนองเชิงกลเทียบกับผลที่ได้ในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002, Natarajan 2003, Punyamurthula 2004, Prachasaree 2009 และ Howard 2009)

สำหรับแบบจำลองของระบบแผ่นพื้นสะพาน Prodeck4 แบบจำลองชิ้นส่วนสะพาน Prodeck4 ขนาดหน้าตัดมีความกว้าง 73.66 เซนติเมตร ความสูง 10.16 เซนติเมตร และยาว 304.80 เซนติเมตร จำนวน 4 ชิ้นส่วน ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นแบบจำลองพื้นสะพานขนาดความกว้าง 256.54 เซนติเมตร ความสูง 10.16 เซนติเมตร และยาว 304.80 เซนติเมตร แบบจำลองพื้นสะพานนี้ถูกวางอยู่บนแบบจำลองคานเหล็กที่รองรับรูปตัวไอขนาดปีกกว้าง 25.40 เซนติเมตร ความสูง 99.06 เซนติเมตร (W10"x39") จำนวน 2 คาน โดยวางห่างกันด้วยระยะเท่ากับ 200.00 เซนติเมตร ซึ่งในการวางแบบจำลองและคานเหล็กที่รองรับ แกนตามแนวยาวของคานเหล็กจะตั้งฉากกับแกนหลัก (แกนตามยาว) ของหน้าตัดแบบจำลองแผ่นพื้นสะพานดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ลักษณะแบบจำลองระบบแผ่นพื้น – คานสะพาน (Slab - Stringer) (Prodeck4)

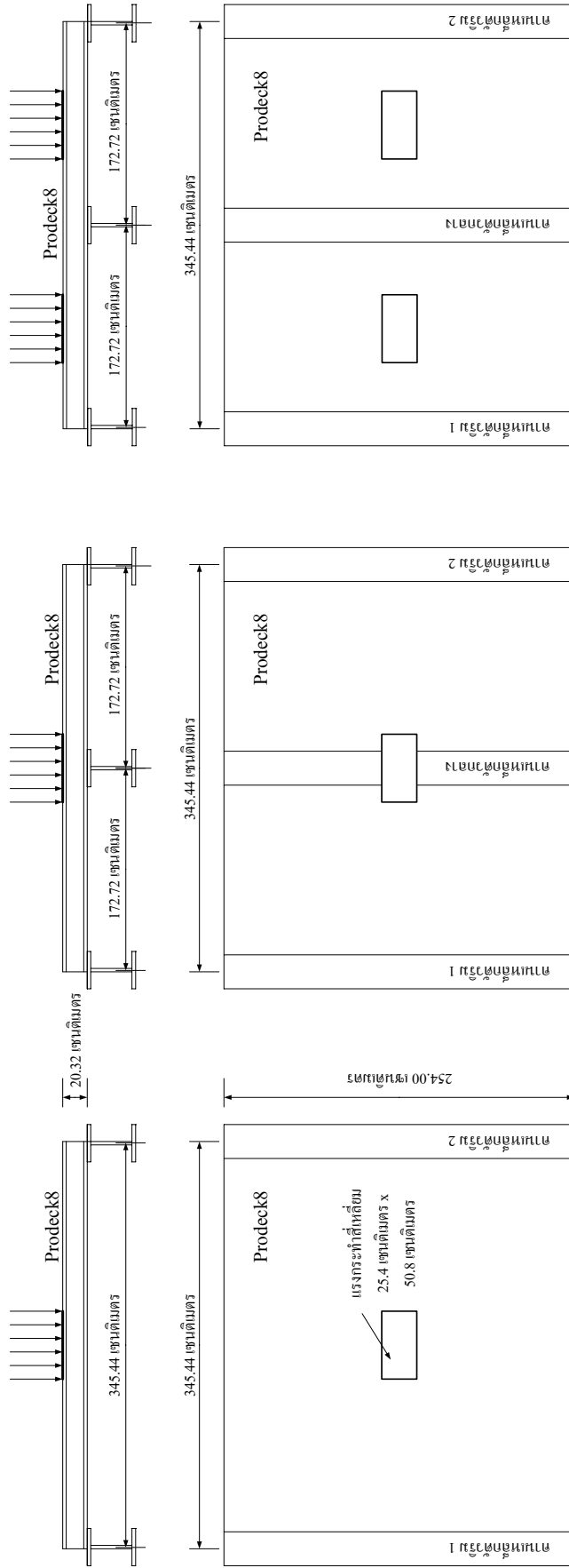
สำหรับแบบจำลองของระบบแผ่นพื้นสะพาน Prodeck8 แบบจำลองชิ้นส่วนสะพาน Prodeck8 ขนาดหน้าตัดมีความกว้าง 60.96 เซนติเมตร ความสูง 20.32 เซนติเมตร และยาวเท่ากับ 345.44 เซนติเมตร จำนวน 5 ชิ้นส่วน ถูกนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นแบบจำลองพื้นสะพานขนาดความกว้าง 254.00 เซนติเมตร ความสูง 20.32 เซนติเมตร และยาว 345.44 เซนติเมตร แบบจำลองพื้นสะพานนี้ถูกวางอยู่บนแบบจำลองคานเหล็กที่รองรับรูปตัวไอขนาดปีกกว้าง 25.40 เซนติเมตร ความสูง 99.06 เซนติเมตร (W10"x39") จำนวน 2 คาน และ 3 คาน โดยวางห่างกันด้วยระยะเท่ากับ 345.44 เซนติเมตร และ 172.72 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งในการวางแบบจำลองและคานเหล็กที่รองรับ พร้อมด้วยน้ำหนักกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้าง 25.40 เซนติเมตร ความยาว 50.80 เซนติเมตร ที่กระทำต่อแบบจำลอง สามารถแยกเป็น 3 กรณี ได้แก่

☒ กรณี 1 แบบจำลองของแผ่นพื้นถูกรองรับด้วยแบบจำลองของคานจำนวน 2 คาน มีระยะห่างกันเท่ากับ 345.44 เซนติเมตร และแรงกระทำตรงกึ่งกลางของแบบจำลองแผ่นพื้น

☒ กรณี 2 แบบจำลองของแผ่นพื้นถูกรองรับด้วยแบบจำลองของคานจำนวน 3 คาน มีระยะห่างกันเท่ากับ 172.72 เซนติเมตร และแรงกระทำตรงกึ่งกลางของแบบจำลองแผ่นพื้น

☒ กรณี 3 แบบจำลองของแผ่นพื้นถูกรองรับด้วยแบบจำลองของคานจำนวน 3 คาน มีระยะห่างกันเท่ากับ 172.72 เซนติเมตร และมีแรงกระทำ 2 ตำแหน่ง แต่ละตำแหน่งอยู่บนกึ่งกลางแบบจำลองของแผ่นพื้นระหว่างแบบจำลองของคานแต่ละคู่

ลักษณะของแบบจำลองทั้งสามกรณี แสดงดังในรูปที่ 4.6



กรณีที่ 1

กรณีที่ 2

กรณีที่ 3

รูปที่ 4.6 แบบจำลองระบบแผ่นพื้น – คานสะพาน (Prodeck8)

#### 4.4 การศึกษาแบบพารามตริก (Parametric Study)

ในส่วนของการศึกษาแบบพารามตริกของระบบสะพานแบบแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย มีวัตถุประสงค์หลักดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 คือ ทำการวิเคราะห์การกระจายของน้ำหนักบรรทุก (Load Distribution) ที่กระทำต่อคานสะพานเหล็กที่รองรับอยู่ ซึ่งในการวิเคราะห์นี้แบบจำลองของระบบสะพานแผ่นพื้น-คาน (Slab-Stringer Bridge) ประกอบด้วย ตัวแปรต่างๆของแบบจำลองดังต่อไปนี้คือ ความกว้างของแผ่นพื้นสะพาน (Deck Width) ความยาวช่วงของสะพาน (Span Length) ระยะห่างระหว่างคานเหล็ก (Girder Spacing) ที่รองรับ ชนิดของหน้าตัดแผ่นพื้นสะพาน (Deck Type) และ พฤติกรรมประกอบ (Composite Behavior) ระหว่างแผ่นพื้นกับคานที่รองรับ สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานแบบพารามตริกนี้ ระบบสะพานจะถูกจำลองในลักษณะสะพานช่วงเดียว (Simple Span Bridge) โดยมีแบบจำลองแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์วางอยู่บนเนื้อที่แบบจำลองของที่รองรับซึ่งเป็นคานเหล็กรูปตัวไอ (I-Girder) นอกจากนี้แบบจำลองมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์เนื่องมาจากสมมุติฐานบางประการดังต่อไปนี้

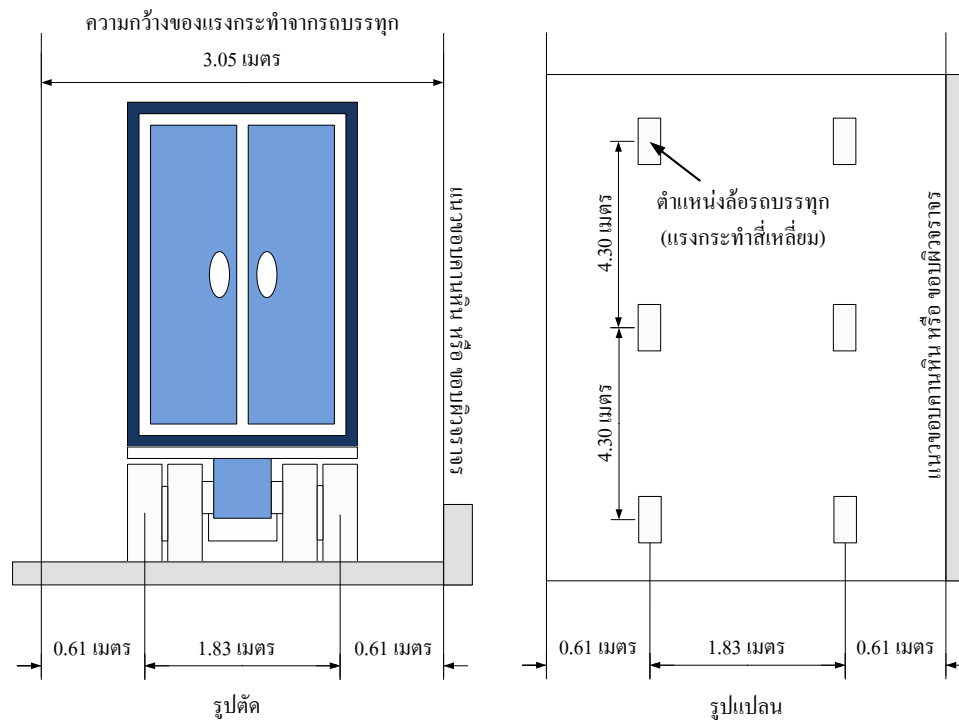
☒ แบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ถูกจำลองโดยมีลักษณะของวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นพื้นสะพาน

☒ แบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานถูกรองรับโดยแบบจำลองของคานเหล็กรูปตัวไอ โดยมีระยะห่างระหว่างคานรองรับแต่ละคานที่เท่ากันในแบบจำลอง

☒ แนวการวางของแบบจำลองคานเหล็กที่รองรับจะขนานกัน โดยตลอดความยาวของแบบจำลองสะพาน (ตั้งฉากทิศทางของหน้าตัดพื้นสะพาน)

☒ ตำแหน่งปลายของแบบจำลองระบบสะพานสมมุติว่าเป็นที่รองรับอย่างง่าย

☒ น้ำหนักบรรทุกซึ่งเป็นการจำลองน้ำหนักจากล้อรถบรรทุกจะกระทำห่างจากขอบของแผ่นพื้นสะพานอย่างน้อย 0.61 เมตร (แสดงอยู่ในรูปที่ 4.7)



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของแรงกระทำจากสื่อบรรทุกต่อแผ่นพื้นสะพาน

#### 4.4.1 ขนาดแบบจำลอง (Dimension of Models)

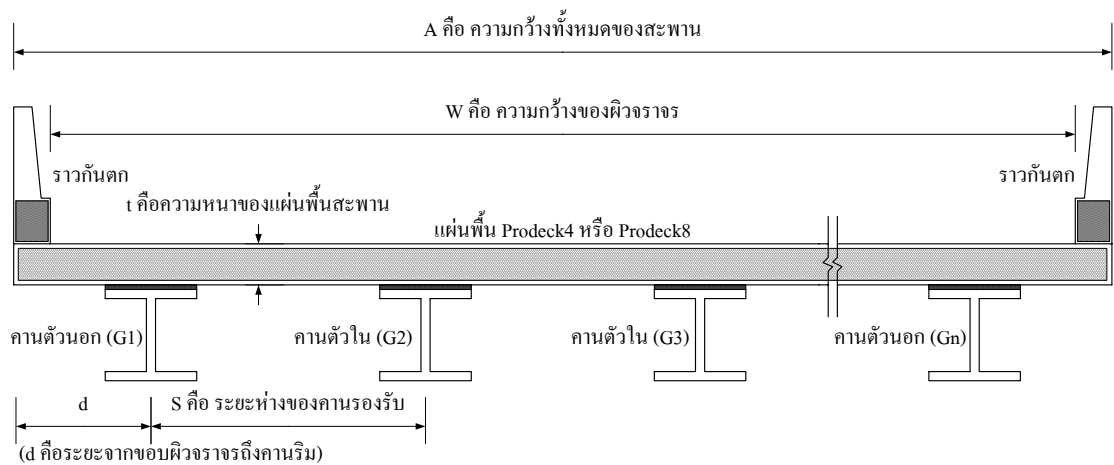
ในการสร้างแบบจำลองของระบบสะพานในการศึกษานี้จะประกอบไปด้วยแบบจำลองของสะพานที่มีสองช่องและสามช่องทางจราจรซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

☒ แบบจำลองสะพานที่มีสองช่องจราจร: จะมีความกว้างของสะพาน 9.30 เมตร และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร (7 คาน) 1.83 เมตร (5 คาน) และ 2.29 เมตร (4 คาน)

☒ แบบจำลองสะพานที่มีสามช่องจราจร: จะมีความกว้างของสะพาน 13.00 เมตร และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร (10 คาน) 1.83 เมตร (7 คาน) และ 2.29 เมตร (6 คาน)

ดังนั้นจากตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับหน้าตัดของสะพานซึ่งประกอบด้วยจำนวนของคานที่รองรับและจำนวนของช่องทางจราจร ทำให้สามารถจำแนกหน้าตัดของแบบจำลองสะพานที่แตกต่างกันเป็นจำนวน 6 หน้าตัด (6 - Cross Section และใช้สัญลักษณ์แทนหน้าตัดทั้ง 6 หน้าตัดของแบบจำลองระบบแผ่นพื้น-คานสะพาน คือ CS1 ถึง CS6) ตัวอย่างแบบจำลองสะพานที่มีคานรองรับจำนวน 4 คานถูกแสดงดังในรูปที่ 4.8 นอกจากนี้รายละเอียดเกี่ยวข้องกับตัวแปรต่างๆของแบบจำลองสะพานแสดงสรุปอยู่ในตารางที่ 4.3





รูปที่ 4.8 หน้าตัดทั่วไปของสะพานทั้งระบบในการสร้างแบบจำลอง

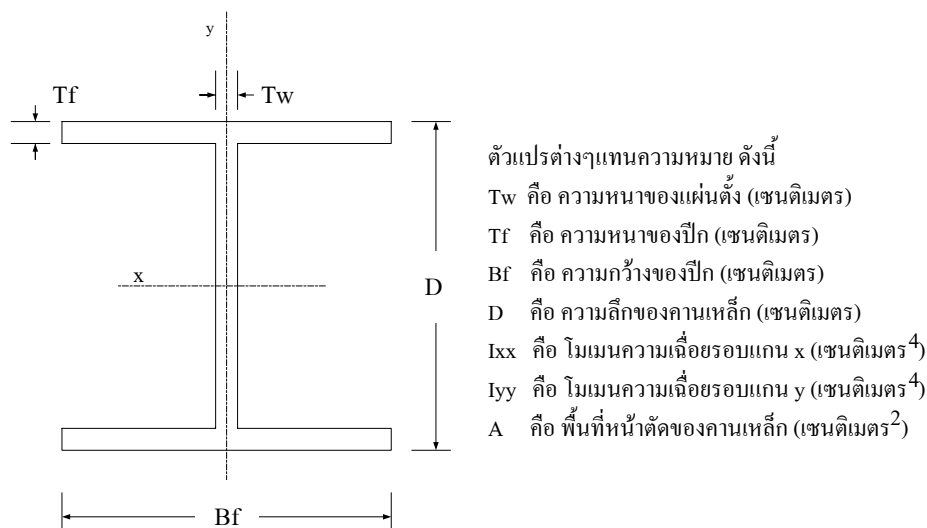
ตารางที่ 4.3 สรุปค่าตัวแปรของแบบจำลองสะพานทั้งระบบ

*ตัวแปร	สองช่องทางจราจร			สามช่องทางจราจร		
	CS1	CS2	CS3	CS4	CS5	CS6
A (เมตร)	9.30	9.30	9.30	13.00	13.00	13.00
W (เมตร)	8.53	8.53	8.53	12.20	12.20	12.20
S (เมตร)	1.20	1.83	2.29	1.20	1.83	2.29
d (เมตร)	1.05	0.99	1.20	1.10	1.01	0.77
t (เมตร)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
จำนวนคาน	7	5	4	10	7	6

\*ตัวแปรต่างๆอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 4.4

แบบจำลองของสะพานทั้งระบบที่ถูกสร้างขึ้นทั้งหมดนั้นเป็นแบบจำลองของสะพานที่ไม่มีการวางตัวในแนวที่เกิดมุมเอียง (Skew Angle) และมีความยาวช่วงสะพานในการสร้างแบบจำลองจำนวน 2 ช่วงความยาวคือ 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร รวมทั้งประเภทของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่ถูกจำลองเป็นแผ่นพื้นสะพานจำนวน 2 ประเภทคือ Prodeck4 และ Prodeck8 สำหรับแบบจำลองคานเหล็กที่รองรับเลือกใช้คานเหล็ก 2 ขนาดคือ W24x110 และ W36x150

สำหรับแบบจำลองของสะพานที่มีความยาว 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร ตามลำดับ ขนาดและคุณสมบัติทางกายภาพของหน้าตัดคานเหล็กดังกล่าวถูกแสดงสรุปอยู่ในรูปที่ 4.9 และตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.9 หน้าตัดของคานเหล็กที่รองรับ

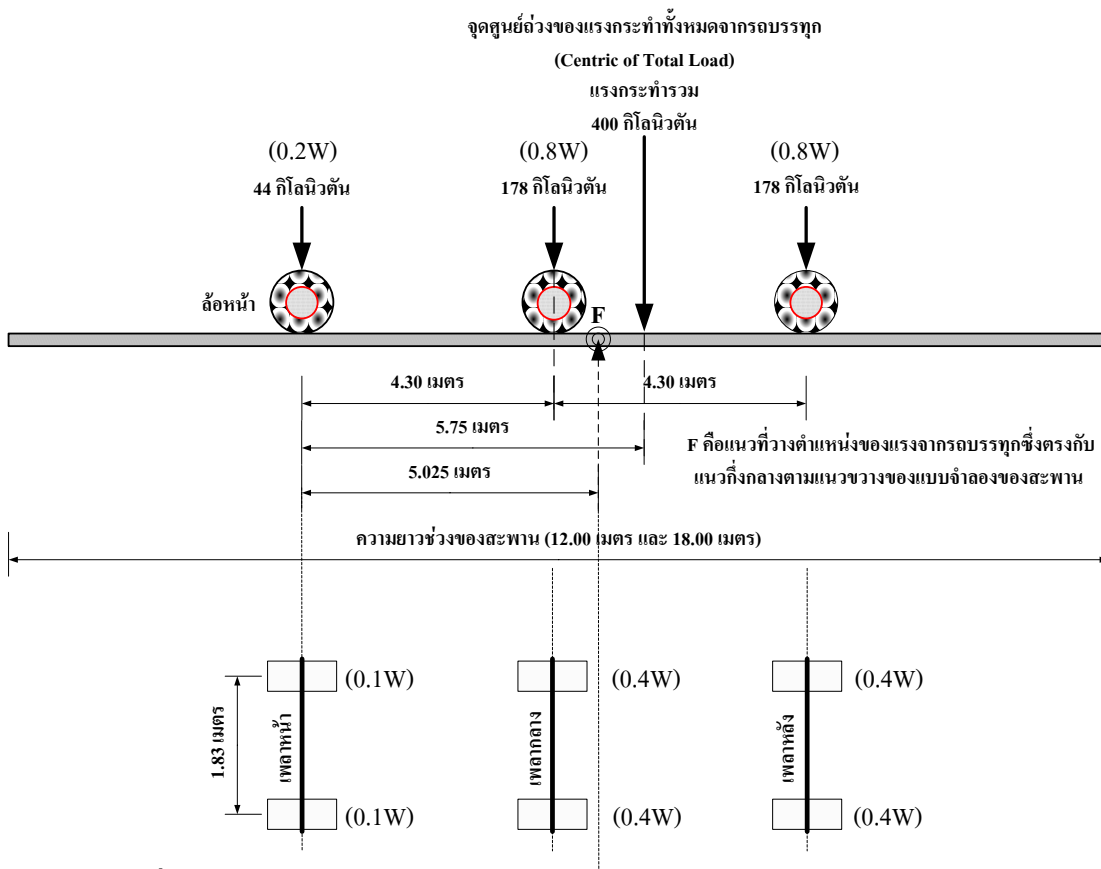
ตารางที่ 4.4 ค่าคุณสมบัติทางกายภาพของคานเหล็กที่รองรับ

*ตัวแปร	A	D	Bf	Tf	Tw	Ixx (10 <sup>3</sup> )	Iyy (10 <sup>3</sup> )
W36x150	284.90	91.03	30.40	2.39	1.59	375.11	10.42
W24x110	208.77	61.37	30.59	2.17	1.30	137.98	9.53

\*ตัวแปรต่างๆอ้างอิงดังแสดงในรูปที่ 4.9

#### 4.4.2 นำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง (Loads on Models)

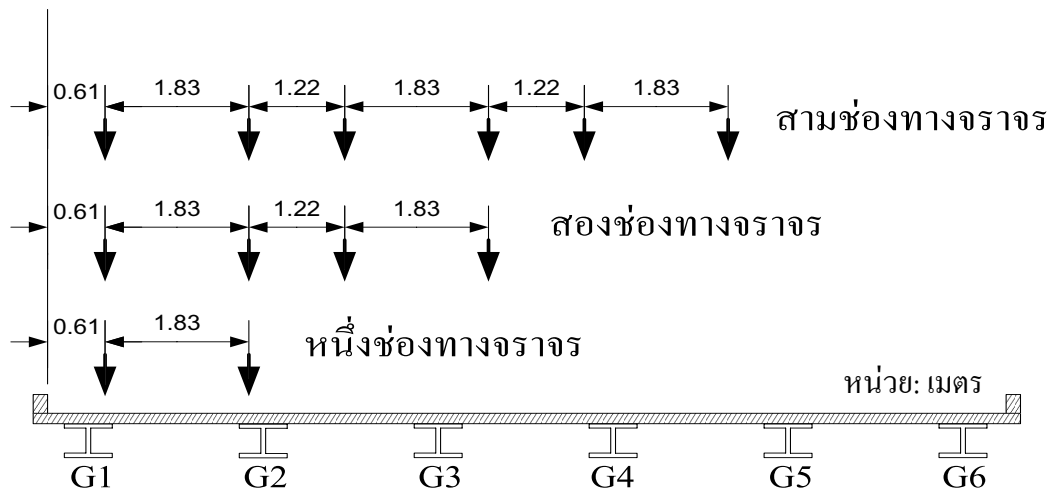
ในการวิเคราะห์แบบพาราเมตริกนี้ได้สมมุติว่าน้ำหนักบรรทุกทุกที่กระทำต่อแบบจำลองสะพานเป็นน้ำหนักบรรทุกมาตรฐาน AASHTO HS25 ขนาด 25 ตันซึ่งกระทำในลักษณะแรงกระทำแบบสม่ำเสมอกระจายบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Area) เนื้อตำแหน่งของล้อรถบรรทุกแต่ละล้อ โดยพื้นที่น้ำหนักบรรทุกกระทำมีขนาดความกว้าง 25.40 เซนติเมตร ความยาว 50.80 เซนติเมตร ในขณะที่รถบรรทุกมีความยาวของเพลลา 1.83 เมตรเท่ากันทั้งสามเพลลา ซึ่งน้ำหนักบรรทุกของแต่ละล้อบนเพลลาแรก เพลลากลาง และ เพลลาหลัง ของรถบรรทุกมีขนาดเท่ากับ 44.00 กิโลนิวตัน ,178.00 กิโลนิวตัน และ 178.00 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



**รูปที่ 4.10** ตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS25

สำหรับตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกที่กระทำต่อแผ่นพื้นสะพานของรถบรรทุก 1 คัน (พิจารณาในทิศทางตามความยาวของสะพาน) น้ำหนักบรรทุกของรถจะถูกจำลองเป็นชุดของแรงกระทำตามตำแหน่งของเพลาน้ำ โดยที่การวางน้ำหนักดังกล่าวจะทำให้เกิดโมเมนต์ดัดที่มากที่สุด โดยอาศัยหลักการของเส้นอิทธิพล (Influence Line) แนวกึ่งกลางช่วงความยาวของสะพานจะอยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างจุดศูนย์กลางรวมน้ำหนักบรรทุก (แรงลัพธ์ของรถบรรทุก) และ ตำแหน่งเพลาน้ำที่อยู่ใกล้ตำแหน่งน้ำหนักบรรทุกรวมของรถมากที่สุด (ดังแสดงในรูปที่ 4.6 คือ จุด F) สำหรับแบบจำลองสะพานที่มีสองช่องทางจราจรจะมีน้ำหนักบรรทุกจากรถกระทำใน 2 กรณี คือ น้ำหนักบรรทุกกระทำบนช่องทางจราจรช่องเดียวและ น้ำหนักบรรทุกกระทำบนช่องทางจราจรทั้งสองช่องทางจราจร (น้ำหนักบรรทุกบนช่องทางเดียวคือมีรถบรรทุกจำนวน 1 คันกระทำต่อแบบจำลองสะพาน และน้ำหนักบรรทุกบนสองช่องทางจราจรคือมีรถบรรทุกจำนวน 2 คันกระทำต่อแบบจำลองสะพานพร้อมกัน) ในทำนองเดียวกันแบบจำลองสะพานที่มีสามช่องทางจราจรจะมีน้ำหนักบรรทุกจากรถกระทำใน 3 กรณี คือ น้ำหนักบรรทุกกระทำบนช่องทางจราจรช่องเดียว

น้ำหนักบรรทุกทุกกระทำบนสองช่องทางจราจรและน้ำหนักบรรทุกกระทำทั้งสามช่องทางจราจรตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.11

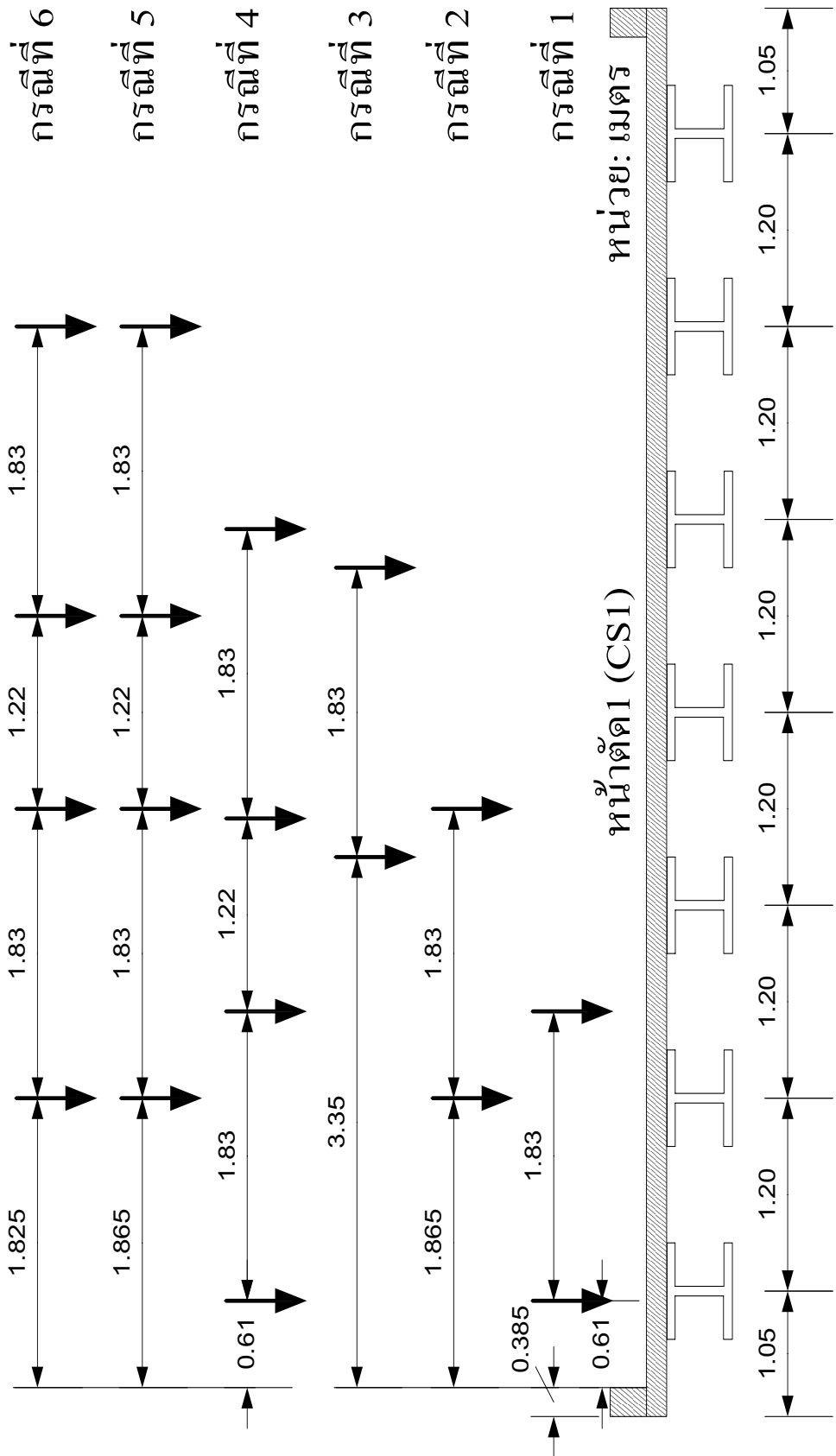


รูปที่ 4.11 แสดงน้ำหนักบรรทุกทุกในแต่ละช่องจราจร

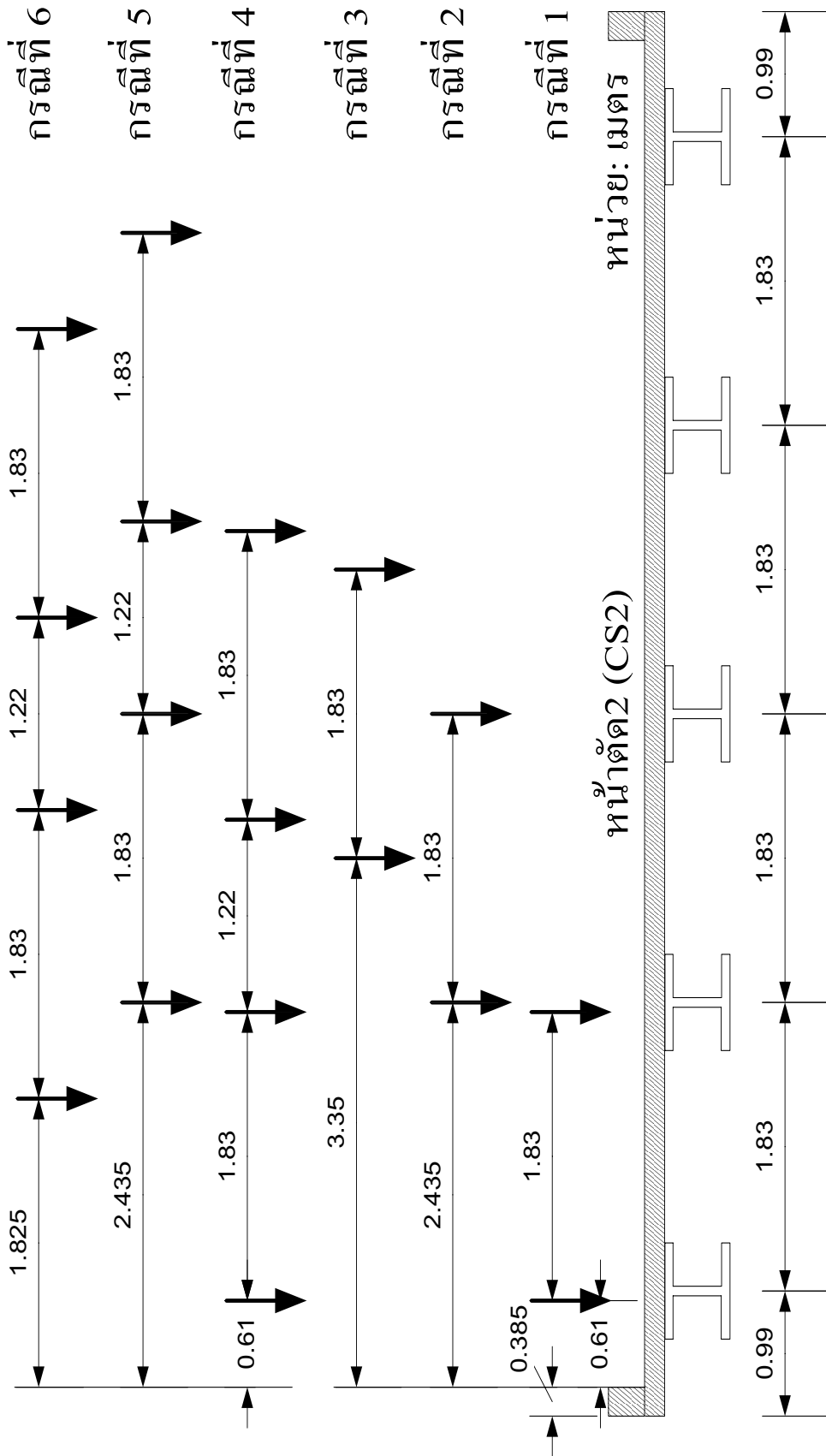
เนื่องจากระยะห่างคานที่รองรับและขนาดของแบบจำลองสะพานดังแสดงในตารางที่ 4.3 รวมถึงจำนวนน้ำหนักบรรทุกทุกบนช่องจราจรของแบบจำลอง (ในรูปที่ 4.11) ทำให้ตำแหน่งของรถบรรทุกที่อยู่บนแบบจำลองสามารถจำแนกออกได้ดังต่อไปนี้คือ

๕ สำหรับแบบจำลองของสะพานที่มีช่องทางจราจรสองช่อง (กรณีหน้าตัด CS1, CS2 และ CS3) ซึ่งแบบจำลองสะพานแต่ละหน้าตัดจะอยู่ภายใต้ น้ำหนักบรรทุกทุกในตำแหน่งที่แตกต่างกัน 6 กรณี (ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14)

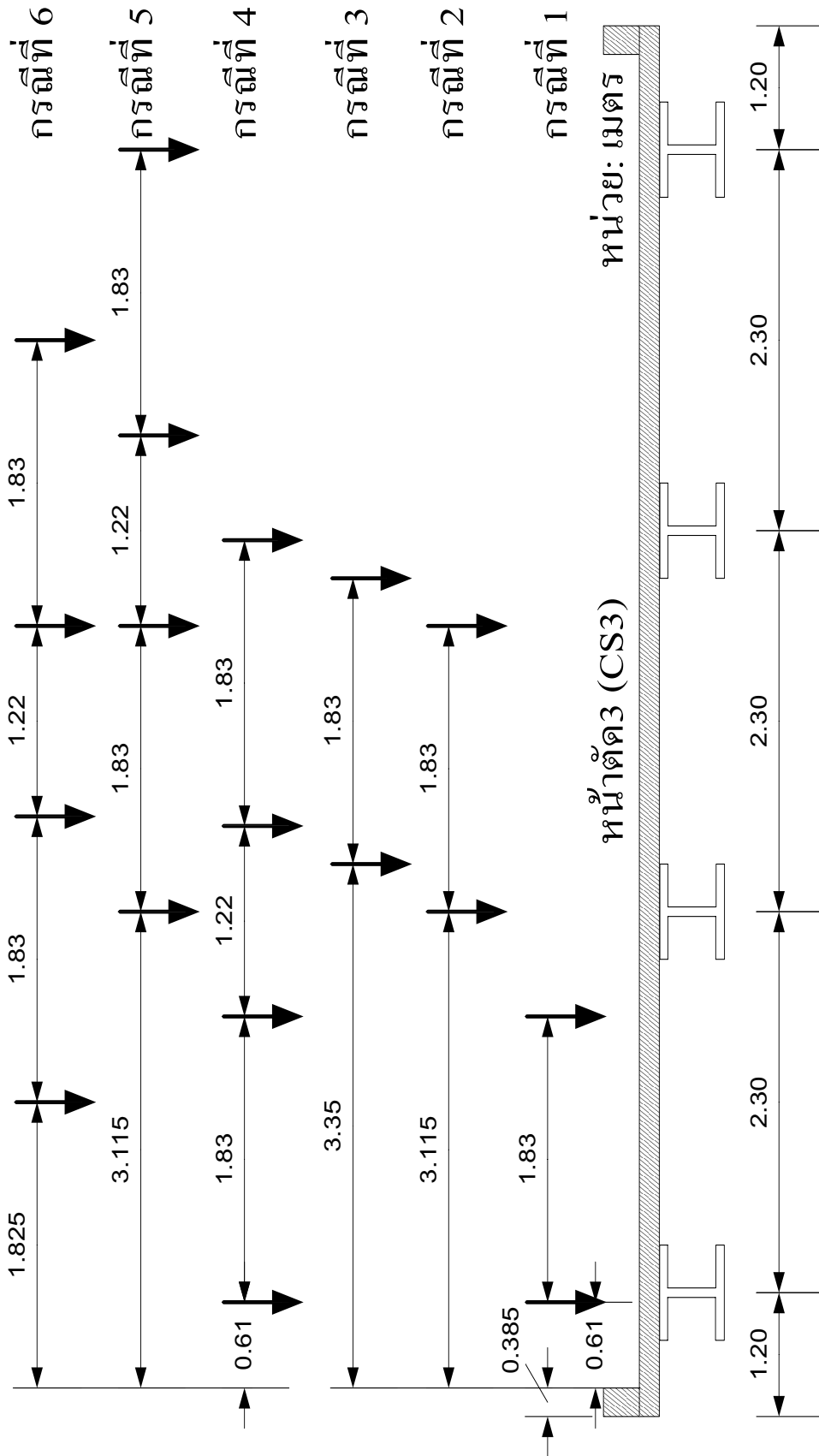
- กรณีที่ 1 รถบรรทุกหนึ่งคันกระทำห่างจากขอบคันทง 0.61 เมตร
- กรณีที่ 2 รถบรรทุกหนึ่งคันกระทำตรงกับที่รองรับด้านในตัวแรก
- กรณีที่ 3 รถบรรทุกหนึ่งคันกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน
- กรณีที่ 4 รถบรรทุกสองคันกระทำห่างจากขอบคันทง 0.61 เมตร
- กรณีที่ 5 รถบรรทุกสองคันกระทำตรงกับที่รองรับด้านในตัวแรก
- กรณีที่ 6 รถบรรทุกสองคันกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน



รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกแบบจำลอง CSI ในกรณีต่างๆ



รูปที่ 4.13 ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกแบบจำลอง CS2 ในกรณีต่างๆ



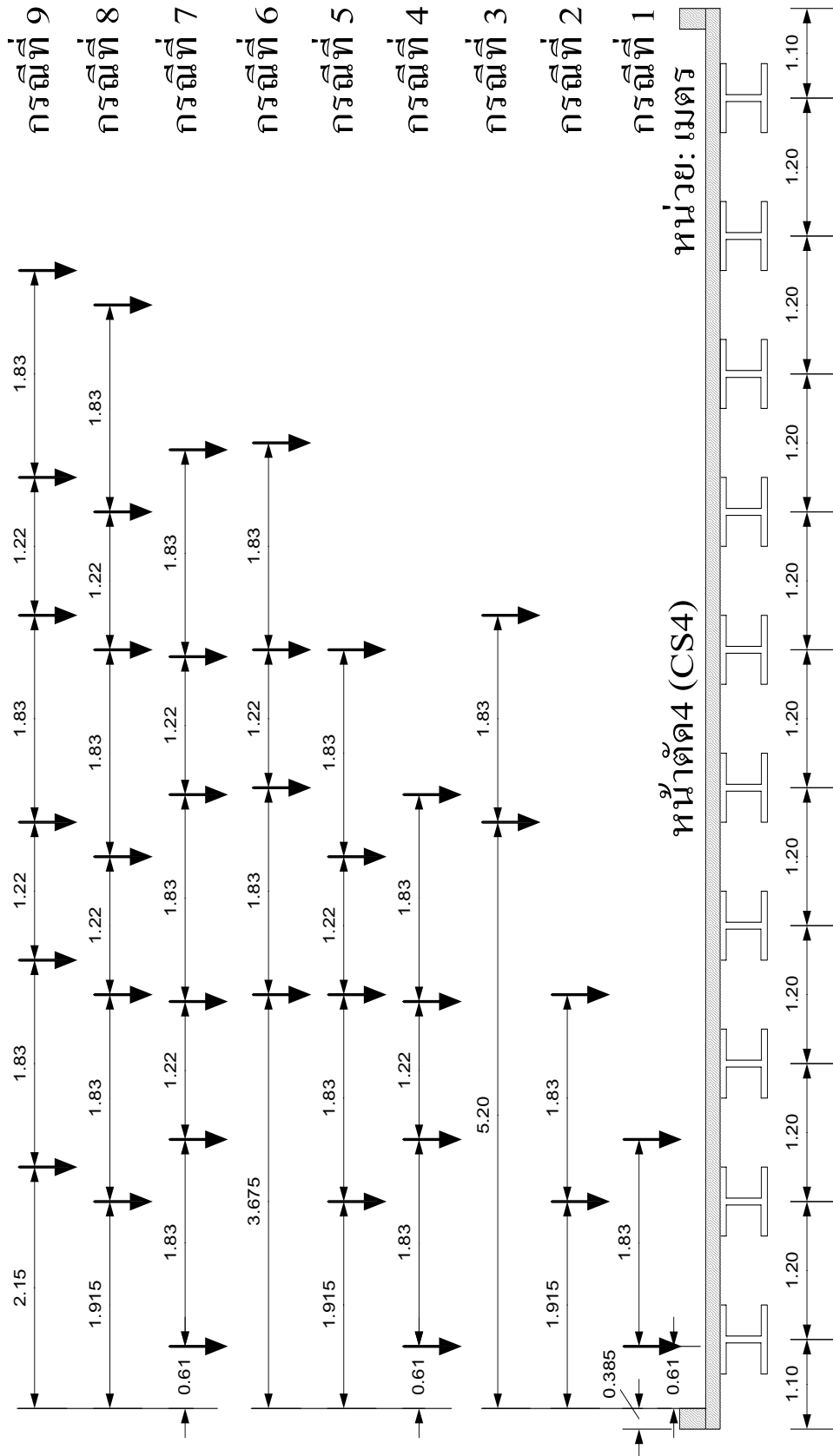
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS3 ในกรณีต่างๆ

☒ สำหรับแบบจำลองของสะพานที่มีช่องทางจราจรสามช่อง (กรณีหน้าตัด CS4, CS5 และ CS6) ซึ่งแบบจำลองสะพานแต่ละหน้าตัดจะอยู่ภายใต้น้ำหนักบรรทุกในตำแหน่งที่แตกต่างกัน 9 กรณี (ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.17)

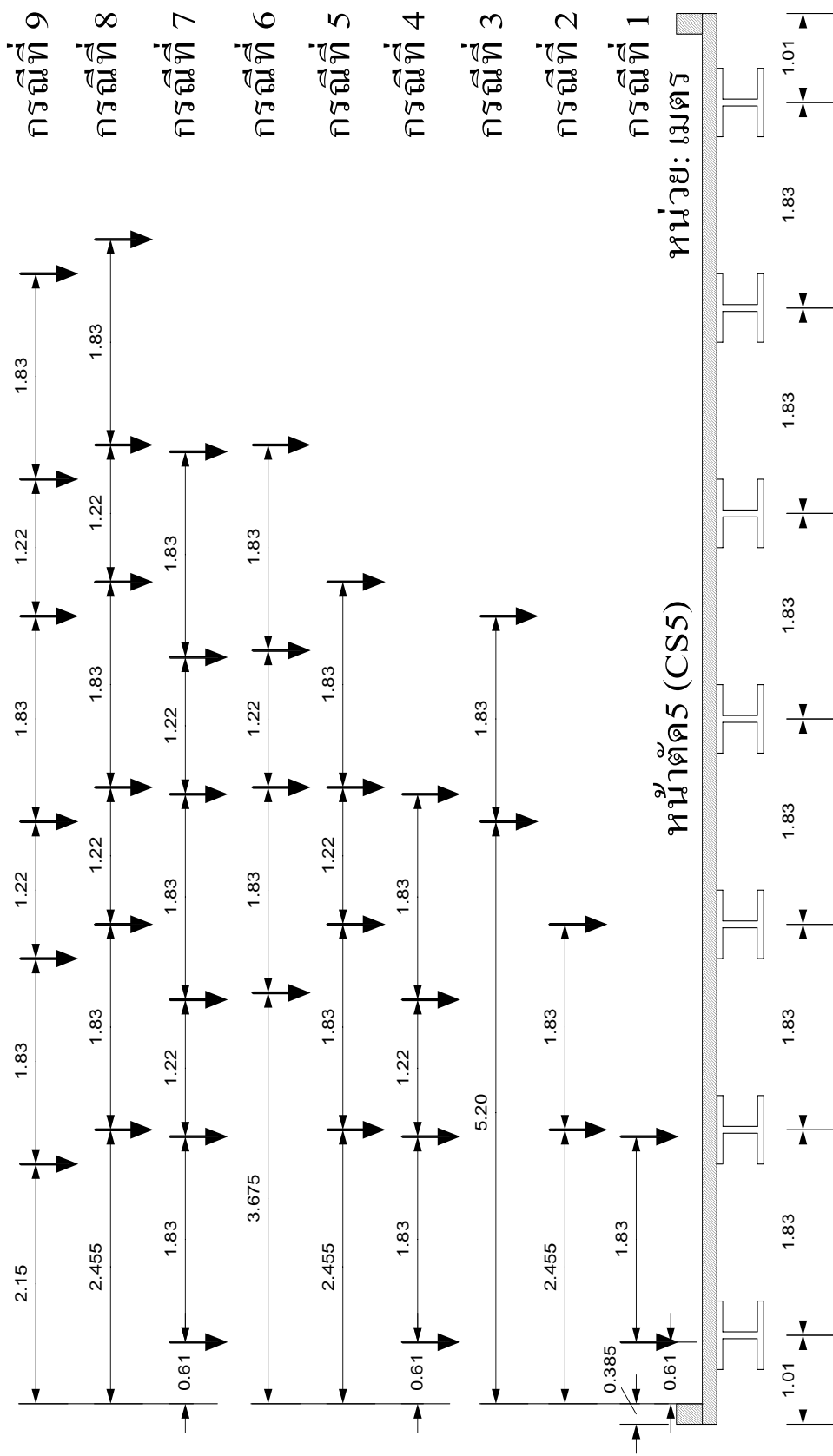
- กรณีที่ 1 รถบรรทุกหนึ่งคันกระทำห่างจากขอบคันทาง 0.61 เมตร
- กรณีที่ 2 รถบรรทุกหนึ่งคันกระทำตรงกับที่รองรับด้านในตัวแรก
- กรณีที่ 3 รถบรรทุกหนึ่งคันกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน
- กรณีที่ 4 รถบรรทุกสองคันกระทำห่างจากขอบคันทาง 0.61 เมตร
- กรณีที่ 5 รถบรรทุกสองคันกระทำตรงกับที่รองรับด้านในตัวแรก
- กรณีที่ 6 รถบรรทุกสองคันกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน
- กรณีที่ 7 รถบรรทุกสามคันกระทำห่างจากขอบคันทาง 0.61 เมตร
- กรณีที่ 8 รถบรรทุกสามคันกระทำตรงกับที่รองรับด้านในตัวแรก
- กรณีที่ 9 รถบรรทุกสามคันกระทำตรงกึ่งกลางของสะพาน

แบบจำลองสะพานทั้งหมดจะถูกนำมาประมวลผลโดยใช้ค่าระยะ โกงในแนวตั้ง ความเค้นและค่าความเครียดที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆเพื่อทำการวิเคราะห์หาการกระจายของน้ำหนักบรรทุกบนสะพานแผ่นพื้นพอลิเมอร์ที่มีต่อคานเหล็กที่รองรับ โดยมีตัวแปรที่ทำการพิจารณาในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับ ความกว้างของหน้าตัดสะพาน ความยาวของสะพาน (Span) และ ชนิดของพื้นสะพาน

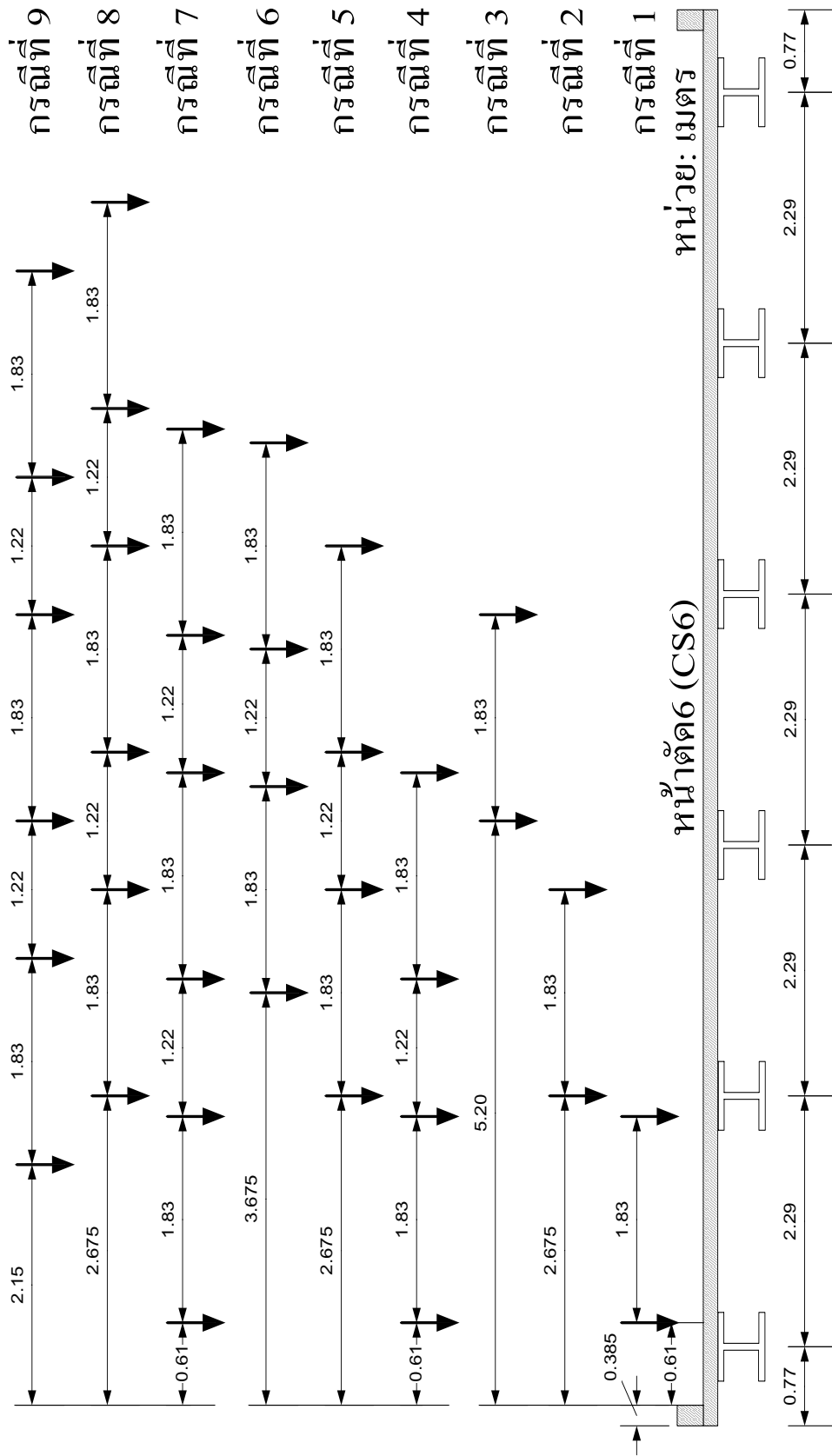




รูปที่ 4.15 ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกแบบจำลอง CS4 ในกรณีต่างๆ



รูปที่ 4.16 ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกบนแบบจำลอง CS5 ในกรณีต่างๆ



รูปที่ 4.17 ตำแหน่งของน้ำหนักบรรทุกแบบจำลอง CS6 ในกรณีต่างๆ

#### 4.5 สรุป (Conclusion)

แบบจำลองทั้งหมด (แบบจำลองระดับชิ้นส่วน, แบบจำลองระดับระบบ และแบบจำลองจากการศึกษาแบบพาราเมตริก) ถูกจำลองเพื่อหาค่าต่างๆ (ค่าระยะโก่งในแนวตั้ง, ค่าความเค้น และการยืดหดตัว) ด้วยวัสดุประสมที่แตกต่างกัน 2 ส่วน ดังนี้ 1) แบบจำลองระดับชิ้นส่วนและแบบจำลองระดับระบบ ภายหลังจากประมวลผลค่าต่างๆข้างต้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการศึกษาที่ผ่านมาของนักวิจัยท่านอื่นๆ (Howard 2002, Natarajan 2003, Punyamurthula 2004, Prachasaree 2009 และ Howard 2009) มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับแต่งแบบจำลองให้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับผลการศึกษาที่ผ่านมาและคำนวณหาค่าคุณสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงต่อการดัดเทียบเท่า เพื่อดำเนินการในส่วนต่อมาก็คือ 2) แบบจำลองจากการศึกษาแบบพาราเมตริก มีวัตถุประสงค์ที่จะวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor, LDF) และในการสร้างแบบจำลองทั้งหมดมีตัวแปรต่างๆ เช่น ประเภทแผ่นพื้น, ความกว้างและความยาวของแผ่นพื้น เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แบบจำลองมีรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปจำนวนของแบบจำลองในการสร้างแบบจำลองในระดับต่างๆ รวมถึงตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 สรุปจำนวนแบบจำลองในระดับต่างๆ

ประเภทแบบจำลองในระดับต่างๆ		จำนวนแบบจำลอง		รวม
		Prodeck4	Prodeck8	
ระดับชิ้นส่วน (Component Level)	ตามแนวแกนยาว (Longitudinal)	1	1	2
	ตามแนวแกนขวาง (Transverse)	1	1	2
ระดับระบบ (System Level)		1	3	4
พาราเมตริก (Parametric)	แบบพฤติกรรมประกอบกันทั้งหมด (Fully Composite)	90	90	180
	แบบพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)	90	90	180
รวมจำนวนแบบจำลองทั้งหมด		183	185	368

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าของตัวแปรและจำนวนแบบจำลองในระดับต่างๆ

ประเภทแบบจำลอง ในระดับต่างๆ		ประเภท แผ่นพื้น	ความกว้าง แผ่นพื้น W (เมตร)	ความยาว แผ่นพื้น L (เมตร)	ระยะห่าง คานที่รองรับ S (เมตร)	จำนวน ที่รองรับ	ขนาดคาน ที่รองรับ	จำนวน แบบจำลอง
ระดับชั้นส่วน	แนวแกนยาว	Prodeck4	0.74	3.05	3.05	2	-	1
		Prodeck8	0.61	3.05	3.05	2	-	1
	แนวแกนขวาง	Prodeck4	1.96	0.30	1.96	2	-	1
		Prodeck8	1.57	0.30	1.57	2	-	1
ระดับระบบ		Prodeck4	2.57	0.30	2.00	2	w10x39	1
		Prodeck8	2.54	3.45	3.45	2	w10x39	1
					1.73	3	w10x39	2
พารามetriกแบบพฤติกรรมประกอบกันอย่างสมบูรณ์และเชื่อมต่อบางส่วน	CS1	Prodeck4,8	9.30	12.00	1.20	7	w24x110	24
				18.00	1.20	7	w36x150	24
	CS2	Prodeck4,8	9.30	12.00	1.83	5	w24x110	24
				18.00	1.83	5	w36x150	24
	CS3	Prodeck4,8	9.30	12.00	2.29	4	w24x110	24
				18.00	2.29	4	w36x150	24
	CS4	Prodeck4,8	13.00	12.00	1.20	10	w24x110	36
				18.00	1.20	10	w36x150	36
	CS5	Prodeck4,8	13.00	12.00	1.83	7	w24x110	36
				18.00	1.83	7	w36x150	36
	CS6	Prodeck4,8	13.00	12.00	2.29	6	w24x110	36
				18.00	2.29	6	w36x150	36
รวมจำนวนแบบจำลองทั้งหมด								368

## บทที่ 5 (Chapter 5)

### การวิเคราะห์ระดับชิ้นส่วนและระบบ (Analysis of Component and System Level)

#### 5.1 บทนำ (Introduction)

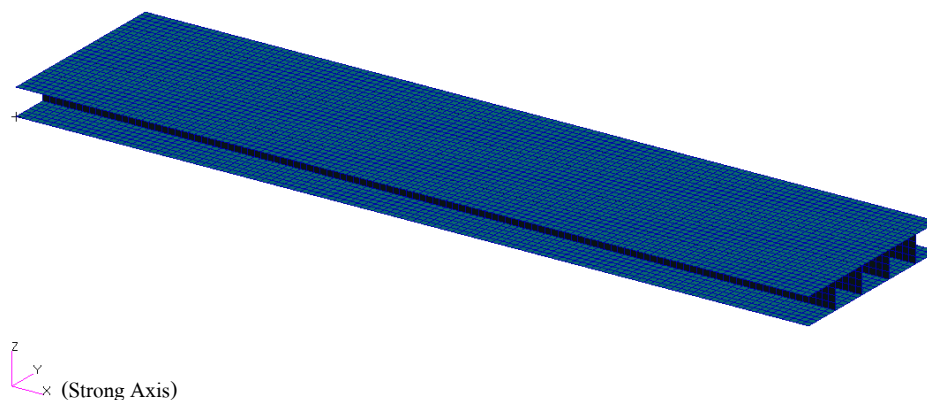
ผลการวิเคราะห์และรายละเอียดการคำนวณคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยในระดับชิ้นส่วน (Component Level) และระบบ (System Level) ถูกนำเสนอในบทนี้ โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับชิ้นส่วนซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อทำการตรวจสอบและปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นให้มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการ สำหรับส่วนหลังจะแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองในระดับระบบซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกัน นอกจากนี้คุณสมบัติเชิงกลตลอดจนเกณฑ์การใช้งานและออกแบบได้ถูกนำเสนอไว้ในบทนี้

#### 5.2 การวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck4 (Analysis of Prodeck4 Bridge Deck)

แบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck4 จะถูกทำการวิเคราะห์โดยการเพิ่มขนาดของแรงที่กระทำต่อแบบจำลองซึ่งเป็นแรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์ (Static Load) เพื่อหาค่าระยะโก่งตัว (Deflection) และค่าการยืดหดตัว (Strain) ของแบบจำลอง และนำผลที่ได้ดังกล่าวไปวิเคราะห์หาค่าความแข็งแกร่งของการดัด (Flexural Rigidity) ในทิศทางตามแนวแกนยาว และตามแนวแกนขวาง ตลอดจนวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการโก่งตัวของแผ่นพื้นกับคานเหล็กที่รองรับแผ่นพื้นในการวิเคราะห์ระดับระบบ ผลที่ได้ทั้งหมดถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004 และ Prachasaree 2009) โดยผลการวิเคราะห์และเกณฑ์ในการวิเคราะห์แบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck4 ระดับต่างๆ จะถูกแสดงเป็นลำดับ ดังต่อไปนี้ (ในหัวข้อ 5.2.1 ถึง 5.2.3)

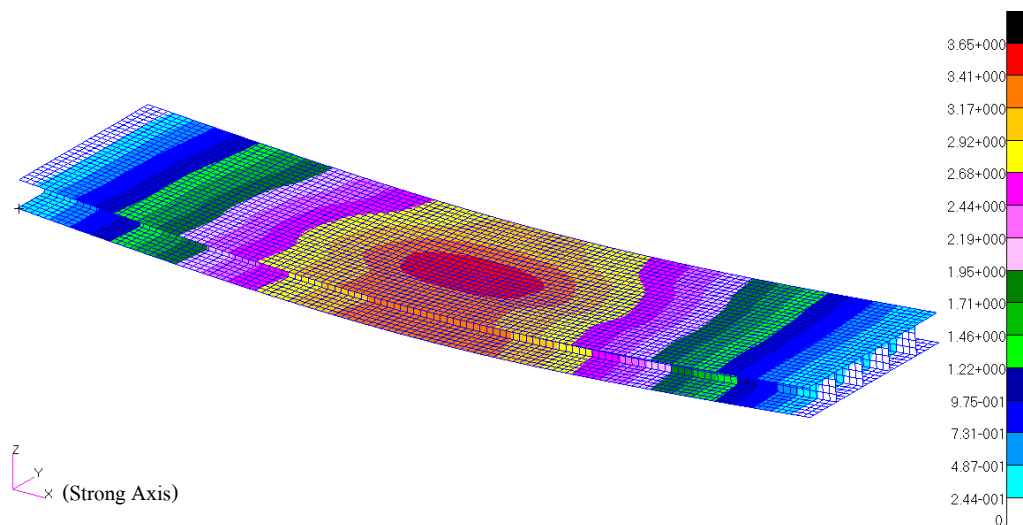
### 5.2.1 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนยาว (Analysis of Longitudinal Component)

แบบจำลองชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวมีความกว้าง 73.66 เซนติเมตร ความยาว 304.80 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 10.16 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของหน้าตัดมีความหนา 0.95 เซนติเมตร และส่วนปีกทั้งด้านบนและล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนาเท่ากันคือ 1.09 เซนติเมตร โดยแบบจำลองถูกวางบนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) และอยู่ภายใต้แรงกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25.40 เซนติเมตร และ 50.80 เซนติเมตร ตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิเลเมนต์แบบแผ่นโค้งบางแบบลามิเนตหลายชั้น (Thin Laminated Shell) ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 8,880 อิเลเมนต์ โดยแต่ละชั้นของลามิเนตมีคุณสมบัติแบบออร์ทोटโรปิก (Orthotropic) แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวถูกแสดงอยู่ในรูป 5.1

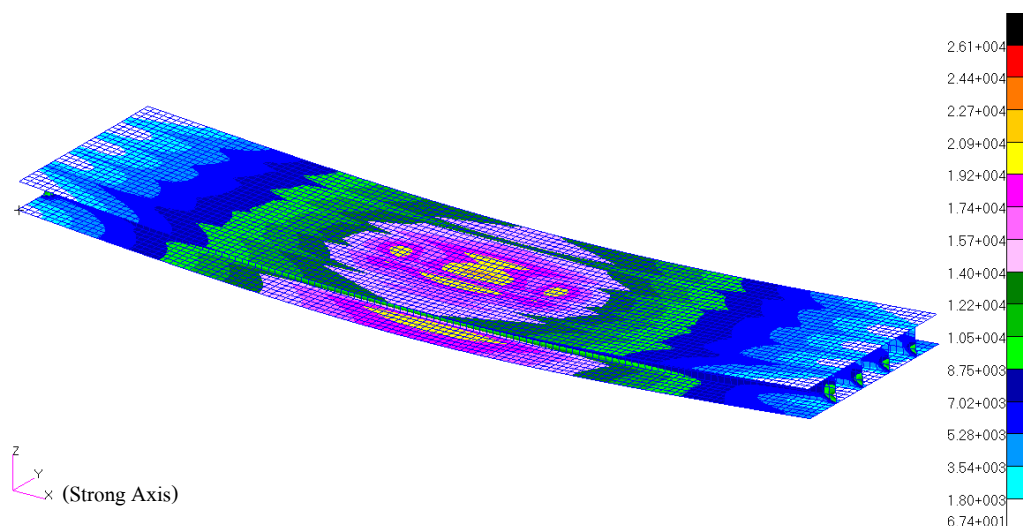


รูปที่ 5.1 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว

แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวนี้ถูกทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อระยะโก่ง (Deflection) และค่าการยืดหดตัว (Strain) บนชิ้นส่วนต่อน้ำหนักบรรทุก (ตัวอย่าง: การโก่งตัวและการยืดหดตัวตามแนวแกนของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 155.74 กิโลนิวตัน แสดงอยู่ในรูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.3) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004)



รูปที่ 5.2 การโก่งตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว

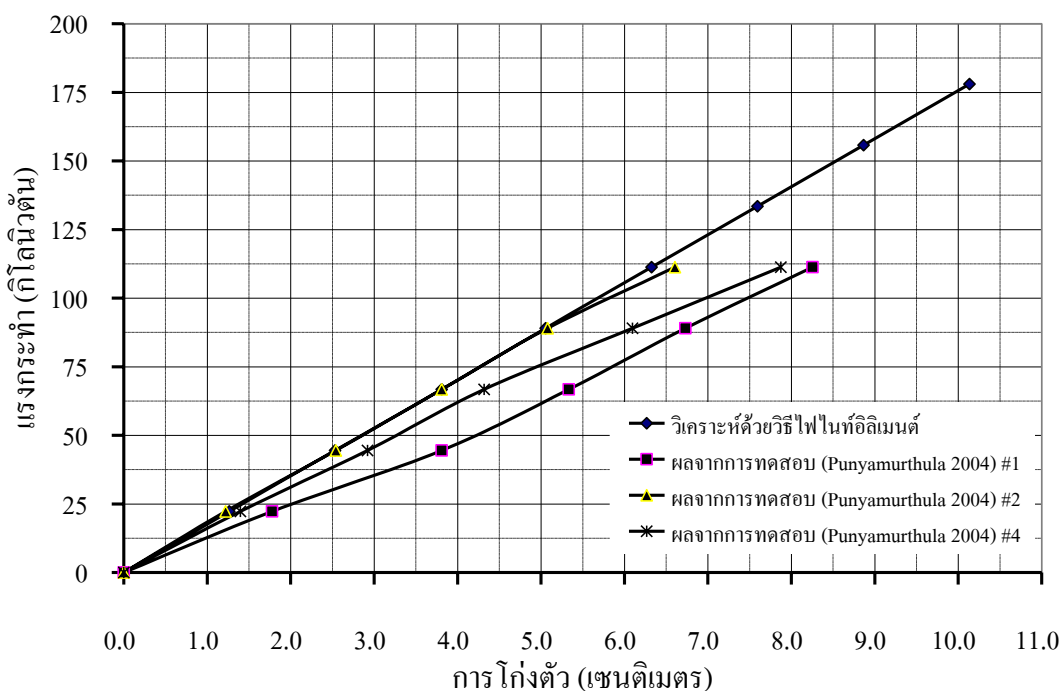


รูปที่ 5.3 ค่าการยึดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว

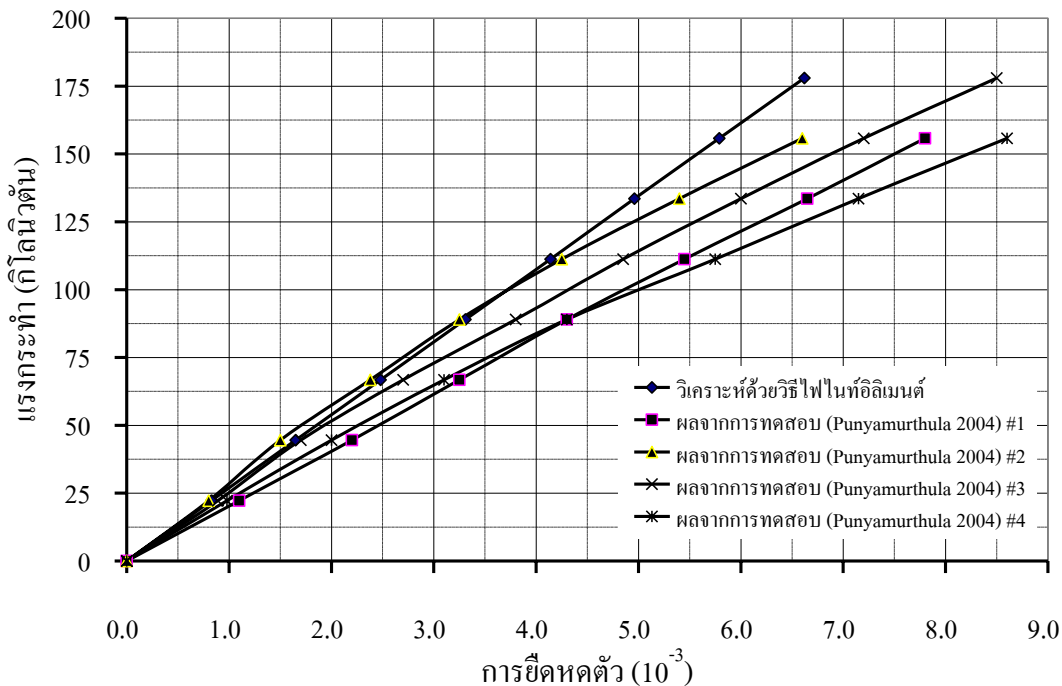
การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าทั้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก – การโก่งตัว และน้ำหนักบรรทุก – ค่าการยึดหดตัวตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 5.4 และรูปที่ 5.5 ตามลำดับ ผลการตอบสนองลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear) ทั้งการวิเคราะห์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการสืบเนื่องมาจากธรรมชาติของคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะมีพฤติกรรมตอบสนองแบบเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดแตกหักในลักษณะของวัสดุเปราะดังนั้นในการศึกษานี้การวิเคราะห์ผลตอบสนอง



ของชิ้นส่วนพื้นสะพานพอลิเมอร์จึงทำการวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear-Elastic) เท่านั้น นอกจากนี้พบว่าค่าสตีเฟนส (ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว) จากการวิเคราะห์มีค่าสูงกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งเป็นผลมาจากสมมุติฐานของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีความสมบูรณ์สม่ำเสมอของคุณสมบัติวัสดุ ปราศจากจุดบกพร่องและมีการถ่ายเทแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ทำให้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสมบูรณ์กว่าชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบจริง ข้อสังเกตประการหนึ่งถึงแม้ว่าเทคโนโลยีในการผลิตชิ้นส่วนวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยสำหรับงานทางวิศวกรรมโยธาและโครงสร้างพื้นฐานจะมีความก้าวหน้าอย่างมากในระยะเวลาที่ผ่านมาอย่างไรก็ตามข้อบกพร่องต่างๆ เช่น ความไม่สม่ำเสมอของพอลิเมอร์ การบ่มของพอลิเมอร์ที่ไม่เพียงพอตลอดจนช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนก็ยังคงเกิดขึ้นอยู่เสมอ ซึ่งชิ้นส่วนซึ่งถูกผลิตในช่วงเวลาเดียวกันจากวัสดุตั้งต้นเดียวกันก็อาจมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันได้



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การโก่งตัวของชิ้นส่วน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยืดหดตัว ของชิ้นส่วน Prodeck4 ตามแนวแกนยาว

สำหรับการประเมินค่าน้ำหนักบรรทุกพื้ดด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ทำการวิเคราะห์โดยอาศัยเกณฑ์การพื้ดของ Tsai-Wu ซึ่งในเกณฑ์การพื้ดนี้ค่าขีดจำกัดความเค้น (Stress Limit) ที่ประกอบไปด้วย ความเค้นดึง ความเค้นอัดและความเค้นเฉือน โดยที่ค่าขีดจำกัดความเค้นเหล่านี้ได้จากการทดสอบชิ้นส่วนของแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์ในระดับชิ้นเล็กๆ (Coupon Level) ค่าขีดจำกัดเหล่านี้ถูกใช้เพื่อเป็นค่าขอบเขตของน้ำหนักบรรทุกพื้ดตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 5.1

$$f_1 \omega_{11}^2 + f_2 \omega_{22}^2 + f_3 \omega_{33}^2 + f_{11} \omega_{11}^2 + f_{22} \omega_{22}^2 + f_{33} \omega_{33}^2 + f_{23} \omega_{23}^2 + f_{13} \omega_{13}^2 + f_{12} \omega_{12}^2 \tag{5.1}$$

$$2 f_{1122} \omega_{11} \omega_{22} + 2 f_{1133} \omega_{11} \omega_{33} + 2 f_{2233} \omega_{22} \omega_{33} \leq 1$$

โดยที่  $f_1 \leq \frac{1}{\omega_{11}^c} - 4 \frac{1}{\omega_{11}^c}$   $f_{11} \leq \frac{1}{\omega_{11}^t \omega_{11}^c}$  (5.1.1)

$$f_2 \leq \frac{1}{\omega_{22}^c} - 4 \frac{1}{\omega_{22}^c}$$
  $f_{22} \leq \frac{1}{\omega_{22}^t \omega_{22}^c}$  (5.1.2)

$$f_3 \mid \frac{1}{\omega_{33}^t} 4 \frac{1}{\omega_{33}^c} \quad f_{33} \mid \frac{1}{\omega_{33}^t \omega_{33}^c} \quad (5.1.3)$$

$$f_{23} \mid \frac{\binom{R}{C} 1}{\binom{C}{T} \omega_{23}^2} \Big| \quad f_{13} \mid \frac{\binom{R}{C} 1}{\binom{C}{T} \omega_{13}^2} \Big| \quad f_{12} \mid \frac{\binom{R}{C} 1}{\binom{C}{T} \omega_{12}^2} \Big| \quad (5.1.4)$$

$$f_{2233} \mid \frac{14 f_2 \omega_f 4 f_3 \omega_f 4 f_{22} \omega_f^2 4 f_{33} \omega_f^2}{2 \omega_f^2} \quad (5.1.5)$$

$$f_{1133} \mid \frac{14 f_1 \omega_f 4 f_3 \omega_f 4 f_{11} \omega_f^2 4 f_{33} \omega_f^2}{2 \omega_f^2} \quad (5.1.6)$$

$$f_{1122} \mid \frac{14 f_1 \omega_f 4 f_2 \omega_f 4 f_{11} \omega_f^2 4 f_{22} \omega_f^2}{2 \omega_f^2} \quad (5.1.7)$$

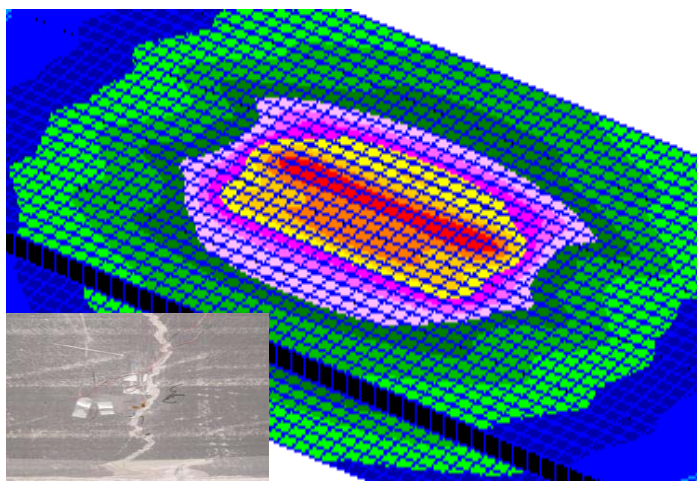
สำหรับค่าขีดจำกัดความเค้นต่างๆที่ใช้ในการประเมินน้ำหนักบรรทุกประลัยของชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 แสดงสรุปอยู่ในตารางที่ 5.1 (Punyamurthula 2004)

ตารางที่ 5.1 ขีดจำกัดความเค้นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยสำหรับ Prodeck4

ประเภทขีดจำกัดความเค้น		ขนาด x 10 <sup>6</sup> (นิวตันต่อตารางเมตร)
ความเค้นดึง	$\omega_{11}$	221.17
	$\omega_{22}$	221.17
ความเค้นอัด	$\omega_{11}$	207.35
	$\omega_{22}$	207.35
ความเค้นเฉือน	$\nu$	207.35

ในการประเมินหาค่าน้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติอาศัยกระบวนการทำซ้ำโดยการสมมุติค่าน้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติเริ่มต้นและทำการคำนวณผลตอบแทนของความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนโดยมีเงื่อนไขตามเกณฑ์การพิบัติที่ใช้ ข้อสังเกตในการวิเคราะห์แบบจำลองจะแสดงสิ่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยอาศัยดัชนีการพิบัติ (Failure Index - FI) เมื่อตำแหน่งใดๆบนแบบจำลองเกิดการพิบัติจะมีค่าดัชนีการพิบัติเท่ากับ 1.00 จากการวิเคราะห์โดยวิธีไฟท์อิลิเมนต์พบว่าตำแหน่งที่ชิ้นส่วนพื้นสะพานเกิดการพิบัติคือบริเวณแนวปีกบนยึดต่อกับแผ่นตั้งของแผ่นพื้นสะพานบริเวณกึ่งกลางช่วงความยาวโดยเป็นการพิบัติเนื่องจากการอัด ทั้งนี้การพิบัติที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองนั้นเป็นการพิบัติ

ของลามิเนตชั้นบนสุดของปีกบนของแผ่นพื้น (Local Failure) ในขณะที่ลามิเนตชั้นถัดมายังไม่เกิดการพิบัติ ( $FI < 1.00$ ) เมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004) พบว่าตำแหน่งที่เกิดการพิบัติมีความสอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 5.6 ทั้งนี้ในการทดสอบจริงไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดการพิบัติในลามิเนตชั้นใดก่อน เนื่องจากคุณสมบัติของ FRP มีความเปราะ เมื่อรับแรงกระทำจนถึงค่าพิบัติชั้นตัวอย่างก็จะเสียหายอย่างรวดเร็ว โดยในการทดสอบมีน้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติของแผ่นพื้นสะพานประมาณ 193.90 กิโลนิวตัน ซึ่งสูงกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการประมาณ 14.44 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 5.6 การพิบัติของแบบจำลองและชิ้นส่วน Prodeck4 (Punyamurthula 2004) ตามแนวแกนยาว

สำหรับการคำนวณหาค่าความแข็งเกร็งต่อการดัด (Flexural Rigidity, EI) โดยอาศัยความสัมพันธ์: 1) น้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว (Relation of Load-Deflection) และ 2) น้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวในแนวแกน (Relation of Load-Axial Strain) ตามวิธีการคำนวณที่เสนอโดย Punyamurthula (2004) มีข้อสังเกตคือ วิธีการดังกล่าวนี้มีสมมุติฐานซึ่งไม่ทำการพิจารณาผลของการโก่งตัวและการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงเฉือนซึ่งสมมุติฐานดังกล่าวจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อชิ้นส่วนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดหน้าตัดในอัตราที่สูงและสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบสำหรับวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ผลที่ได้จากการคำนวณเป็นเพียงค่าประมาณเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาว

$$EI \left| \frac{\text{RP}}{\text{TM}_\div} \right| \left| \frac{\text{RL}^3}{\text{TM}_{48}} \right| \quad (5.2)$$

$\frac{\text{RP}}{\text{TM}_\div}$  คือค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน

$$EI \left| \frac{\text{RP}}{\text{TM}_\kappa} \right| \left| \frac{\text{RLc}}{\text{TM}_4} \right| \quad (5.3)$$

$\frac{\text{RP}}{\text{TM}_\kappa}$  คือค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน

โดยที่  $L$  คือความยาวช่วงของแบบจำลอง (แบบจำลองมีช่วงความยาว 279.40 เซนติเมตร),  $E$  คือ ค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity),  $I$  คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia),  $c$  คือระยะห่างจากแนวแกนสะเทิน (Neutral Axis) ของหน้าตัดไปถึงขอบที่ไกลที่สุดของหน้าตัด (มีค่าประมาณ 5.08 เซนติเมตร),  $\div$  คือค่าการโก่งตัว (Deflection),  $\kappa$  คือค่าการยืดหดตัวตามแนวแกน (Strain) และ  $P$  คือน้ำหนักบรรทุก ส่วนค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาว ( $P - \div$ ) มีค่าประมาณ 17.59 กิโลนิวตันต่อเซนติเมตร และ ค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน ( $P - \kappa$ ) มีค่าประมาณ  $26.89 \times 10^3$  กิโลนิวตัน

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง Prodeck4 ตามแนวแกนตามยาว (Longitudinal Direction) ค่าน้ำหนักบรรทุกพิบัติและความแข็งแรงต่อการตัดแสดงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004) ดังในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับชิ้นส่วน Prodeck4

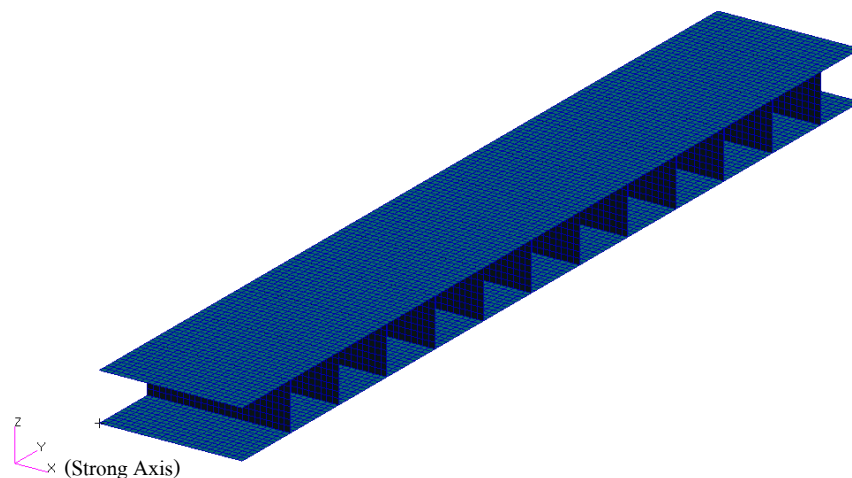
การประเมินค่า	วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	*การทดสอบในห้องปฏิบัติการ
น้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติ (kN)	193.90	187.30
$EI (P - \div)$ (kN-cm <sup>2</sup> )	$7.99 \times 10^6$	$7.85 \times 10^6$
$EI (P - \kappa)$ (kN-cm <sup>2</sup> )	$9.54 \times 10^6$	$8.89 \times 10^6$

\*ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าค่าน้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติและค่าความแข็งเกร็งต่อการตัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004) สาเหตุเนื่องมาจากความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทั้งทางกายและคุณสมบัติของวัสดุ ในแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ตั้งที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัว โดยมีความแตกต่างกันสำหรับน้ำหนักบรรทุกทุกพิบัติ ความแข็งเกร็งต่อการตัด (การโก่งตัว) และความแข็งเกร็งต่อการตัด (การยึดหดตัว) โดยประมาณ 3.50 เปอร์เซ็นต์ 1.77 เปอร์เซ็นต์ และ 7.35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

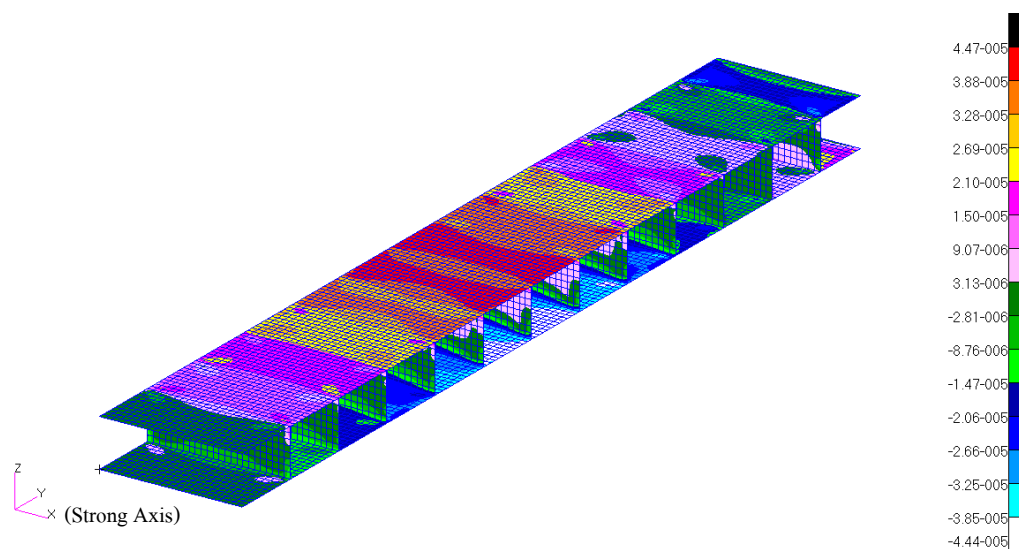
### 5.2.2 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนตามขวาง (Analysis of Transverse Component)

แบบจำลองชิ้นส่วนตามแนวแกนขวางมีความกว้าง 195.58 เซนติเมตร ความยาว 30.48 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 10.16 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของหน้าตัดมีความหนา 0.95 เซนติเมตร และส่วนปีกทั้งด้านบนและล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนาเท่ากันคือ 1.09 เซนติเมตร โดยแบบจำลองถูกวางบนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) และอยู่ภายใต้แรงกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25.40 เซนติเมตร และ 50.80 เซนติเมตร ตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยเอลิเมนต์แบบแผ่นโค้งบางแบบลามิเนตหลายชั้น (Thin Laminated Shell) ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 2,424 เอลิเมนต์ โดยแต่ละชั้นของลามิเนตมีคุณสมบัติแบบออร์โททรอปิก (Orthotropic) แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวถูกแสดงอยู่ในรูป 5.7



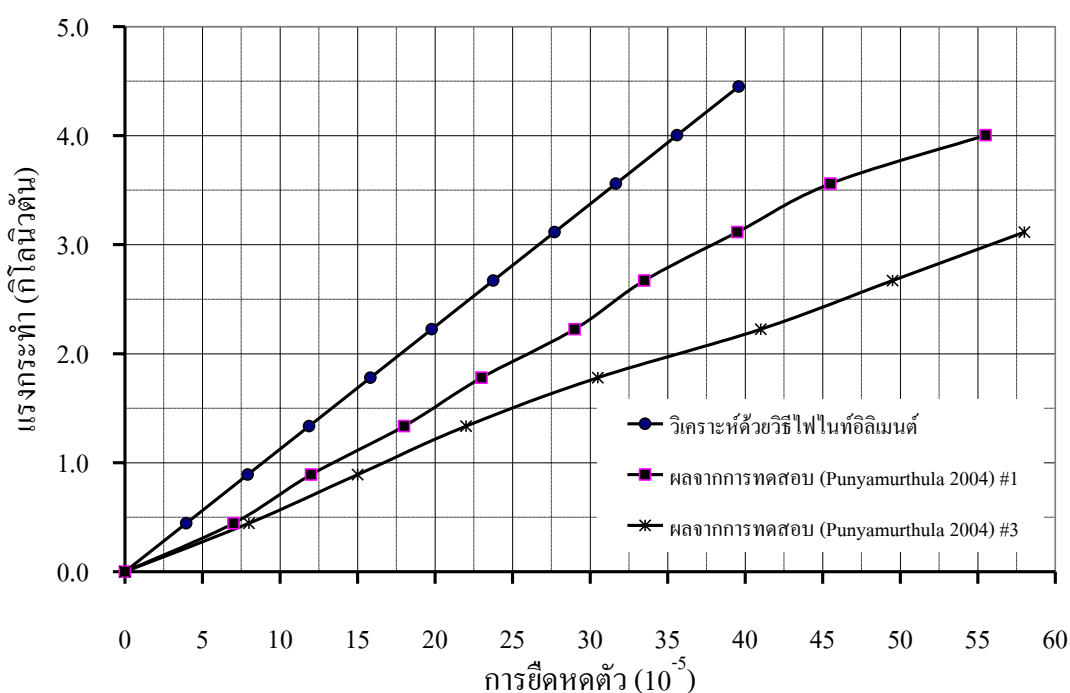
รูปที่ 5.7 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง

แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนขวางนี้ถูกทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อค่าการยืดหดตัว (Strain) บนชิ้นส่วนต่อน้ำหนักบรรทุก (ตัวอย่าง: ค่าการยืดหดตัวตามแนวแกนของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 4.45 กิโลนิวตันแสดงอยู่ในรูปที่ 5.8) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004)



รูปที่ 5.8 ค่าการยืดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง

จากการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก – ค่าการยืดหดตัวตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 5.9 มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear) ทั้งการวิเคราะห์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการสืบเนื่องมาจากธรรมชาติของคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะมีพฤติกรรมตอบสนองแบบเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดแตกหักในลักษณะของวัสดุเปราะ ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้นในการวิเคราะห์แบบจำลองตามแนวแกนยาว



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยืดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง

สำหรับการคำนวณหาค่าความแข็งเกร็งต่อการดัด (Flexural Rigidity, EI) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวในแนวแกน (Relation of Load-Axial Strain) ตามวิธีการคำนวณที่เสนอโดย Punymurthula (2004) (สมการที่ 5.3)

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวในแนวแกนในรูปที่ 5.9 พบว่าเมื่อแรงกระทำจนถึงค่าสูงสุดลักษณะของกราฟเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นอยู่ (Linear Elastic) และค่าความชันที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน ( $P - \kappa$ ) มีค่าประมาณ  $0.01124 \times 10^6$  กิโลนิวตัน ถูกนำไปแทนในสมการ 5.3 เพื่อคำนวณหาค่าความแข็งเกร็งของการดัด (Flexural Rigidity) ในแนวแกนขวาง โดยค่า L คือค่าความ



ยาวช่วงมีค่าประมาณ 195.58 เซนติเมตร และค่า  $c$  คือระยะห่างจากแนวแกนสะเทิน ของหน้าตัด ไปถึงขอบที่ไกลที่สุดของหน้าตัดมีค่าประมาณ 5.08เซนติเมตร ดังแสดง

$$EI \left| \frac{R_P}{\Gamma_{MK}} \right| \left| \frac{RLc}{\Gamma_{M4}} \right| = 2.793 \times 10^6 \text{ กิโลนิวตัน-ตารางเซนติเมตร}$$

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง Prodeck4 ตามแนวแกนขวาง (Transverse Direction) ค่าความแข็งเกร็งต่อการตัดแสดงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004) อยู่ในตารางที่ 5.3

**ตารางที่ 5.3** เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับชิ้นส่วน Prodeck4

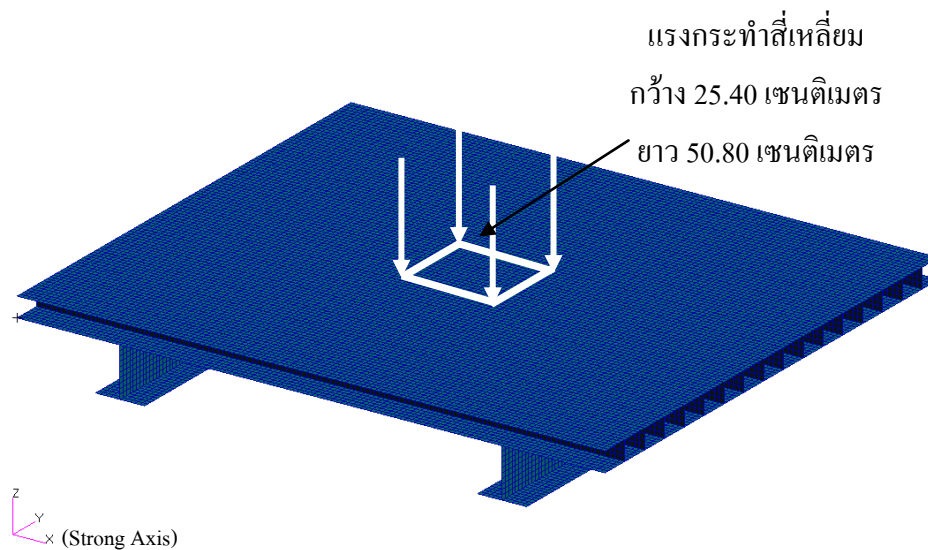
วิธีการคำนวณ	ค่าความแข็งเกร็งของการตัด $EI (P - \kappa) \text{ (kN-cm}^2\text{)}$
วิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์	$2.793 \times 10^6$
Punyamurthula 2004	
จากการทดสอบ #1	$2.647 \times 10^6$
จากการทดสอบ #3	$1.151 \times 10^6$

จากผลที่แสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าค่าความแข็งเกร็งต่อการตัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004) สาเหตุเนื่องมาจากแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์มีลักษณะทางกายภาพที่มีความต่อเนื่อง รวมถึงคุณสมบัติต่างๆของแบบจำลองมีความสมบูรณ์สม่ำเสมอทั่วทั้งแบบจำลอง (กล่าวได้ว่าทุกๆเอลิเมนต์ของแบบจำลองมีความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทั้งทางกายและคุณสมบัติของวัสดุ) ซึ่งแตกต่างกับชิ้นตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการที่ความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทั้งทางกายและคุณสมบัติของวัสดุอาจไม่มีความสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นตัวอย่าง (สาเหตุอาจมาจากชิ้นตอนในกระบวนการผลิต ดังกล่าวมาในบทที่ 3) ส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงกระทำหรือส่งถ่ายแรงกระทำในกรณีต่างๆไม่มีความสม่ำเสมอตามไปด้วย เหตุผลอีกประการหนึ่ง คือ ในการทดสอบจริงในห้องปฏิบัติการมีการเชื่อมต่อกันของชิ้นส่วนหน้าตัด ซึ่งทำให้การส่งถ่ายแรงตรงบริเวณรอยต่อเกิดการสูญเสียขึ้น ในขณะที่แบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ไม่ได้ออกแบบรอยต่อและไม่ได้พิจารณาการสูญเสียของ

แรงกระทำไว้ ทำให้แบบจำลองมีความแข็งแรงมากกว่าชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบ ดังผลที่แสดงในตารางที่ 5.3 ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงต่อการตัดมีค่าที่มากกว่า และความแตกต่างระหว่างค่าที่คำนวณมาจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิเลเมนต์กับค่าที่คำนวณได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ #1 และ #3 มีค่าประมาณ 5.23 เปอร์เซ็นต์ และ 58.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

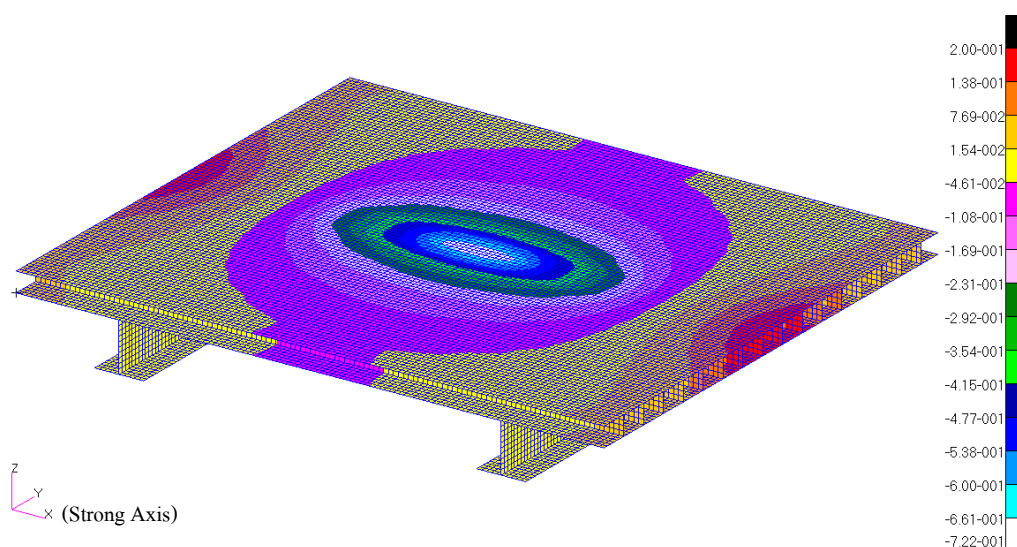
### 5.2.3 การวิเคราะห์ระดับระบบ (Analysis of System)

แบบจำลองระดับระบบประกอบด้วยสองส่วนคือ 1) แบบจำลองของแผ่นพื้นมีความกว้าง 256.54 เซนติเมตร ความยาว 304.80 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 10.16 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนคือส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของหน้าตัดมีความหนา 0.95 เซนติเมตร และส่วนปีกทั้งด้านบนและล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนาเท่ากันคือ 1.09 เซนติเมตร แบบจำลองแผ่นพื้นที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิเลเมนต์แบบแผ่นโค้งบางแบบลามิเนตหลายชั้น (Thin Laminated Shell) ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 31,920 อิเลเมนต์ โดยแต่ละชั้นของลามิเนตมีคุณสมบัติแบบออร์ทोटโรปิก (Orthotropic) โดยแบบจำลองแผ่นพื้นถูกวางบนแบบจำลองส่วนที่สองคือ 2) แบบจำลองคานเหล็กรูปตัวไอมีความกว้าง 25.40 เซนติเมตร ความยาว 256.54 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 99.06 เซนติเมตร (W10"x39") จำนวน 2 คาน โดยวางห่างกันด้วยระยะเท่ากับ 200.00 เซนติเมตร แบบจำลองของคานเหล็กที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิเลเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 14,160 อิเลเมนต์ โดยแต่ละอิเลเมนต์มีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) โดยแบบจำลองของคานเหล็กทั้งสองถูกวางบนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Supported) และแบบจำลองทั้งระบบอยู่ภายใต้แรงกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25.40 เซนติเมตร และ 50.80 เซนติเมตร ตามลำดับ แบบจำลองของชิ้นส่วนระดับระบบถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 แบบจำลองพื้นสะพาน Prodeck4 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ

แบบจำลองของชิ้นส่วนระดับระบบนี้ทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อระยะโก่ง (Deflection) (ทั้งระยะโก่งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของแผ่นพื้นและระยะโก่งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองคานเหล็กทั้งสอง) (ตัวอย่าง: การโก่งตัวของแบบจำลองทั้งระบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 111.25 กิโลนิวตันแสดงอยู่ในรูปที่ 5.11) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004)



รูปที่ 5.11 การโก่งตัวของแบบจำลองพื้นสะพาน Prodeck4 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ

การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าระยะโค้งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของคานเหล็กทั้งสองและระยะโค้งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของแผ่นพื้น มีค่าใกล้เคียงกับระยะโค้งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตารางที่ 5.5 พบว่าการโค้งตัวของแบบจำลองทั้งระบบหรือการโค้งตัวสัมพัทธ์ (การโค้งตัวสัมพัทธ์ คือความแตกต่างของค่าการโค้งตัวระหว่างการโค้งตัวของแผ่นพื้นกับการโค้งตัวของคานที่รองรับ หรือการโค้งตัวของแผ่นพื้นเทียบกับการโค้งตัวของคานที่รองรับ) มีค่าน้อยกว่าค่าจากการทดสอบ และมีความแตกต่างกันประมาณ 7.59 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสมบูรณ์และสม่ำเสมอของคุณสมบัติวัสดุ ปรากฏจุดบกพร่องและมีการถ่ายเทแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ทำให้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสมบูรณ์กว่าชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบจริง ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

ตารางที่ 5.4 ค่าระยะโค้งของที่รองรับเหล็กในการทดสอบทั้งระบบ

วิธีวิเคราะห์ระบบแผ่นพื้น	แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	การโค้งตัว (เซนติเมตร)		ค่าเฉลี่ยการโค้งตัว (เซนติเมตร)
		คานตัวที่ 1	คานตัวที่ 2	
ไฟไนต์เอลิเมนต์	111.25	0.086	0.086	0.086
การทดสอบ (Punyamurthula 2004)	111.25	0.084	0.086	0.085

ตารางที่ 5.5 ค่าระยะโค้งของที่รองรับเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นในการทดสอบทั้งระบบ

วิธีวิเคราะห์ระบบแผ่นพื้น	แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	ค่าเฉลี่ยการโค้งตัว (เซนติเมตร)	การโค้งตัวแผ่นพื้น (เซนติเมตร)	การโค้งตัวสัมพัทธ์ (เซนติเมตร)
ไฟไนต์เอลิเมนต์	111.25	0.086	1.834	1.748
การทดสอบ (Punyamurthula 2004)	111.25	0.085	1.936	1.851

จากการวิจัย ได้เสนอสมการตามมาตรฐาน AASHTO (สมการ 5.4) ซึ่งเป็นสมการค่าการโค้งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ ดังแสดง

$$\delta_{\max} \leq \frac{L}{800} \quad (5.4)$$

เมื่อ  $\delta_{\max}$  คือ ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ  
 $L$  คือ ช่วงความยาวของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ (เซนติเมตร)

เมื่อแทนค่า  $L = 200.00$  เซนติเมตร ลงในสมการ 5.4 จะได้  $\delta_{\max} = 0.25$  เซนติเมตร และนำไปเปรียบเทียบกับค่าในตารางที่ 5.4 พบว่าการโก่งตัวที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธี (ไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบ) ดังแสดงในตารางยังคงไม่เกินค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ หรืออยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ภายใต้น้ำหนักบรรทุก HS25 (น้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน AASHTO HS25 จากล้อรถบรรทุกล้อเดียวมีค่าประมาณ 90.00 กิโลนิวตัน)

ในกรณีเดียวกันเมื่อเราพิจารณาตารางที่ 5.5 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงให้เห็นถึงการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่รองรับกับแผ่นพื้นสะพาน (Deck Deflection Relative to Stringers) และเพื่อเป็นการตรวจสอบค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวโดย GangaRao and Shekar (2002) ได้เสนอสมการ (สมการ 5.5) ในการตรวจสอบขอบเขตของการโก่งตัวสัมพัทธ์ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ ดังแสดง

$$\delta_{\max} \leq \frac{S_{c4c}}{500} \quad (5.5)$$

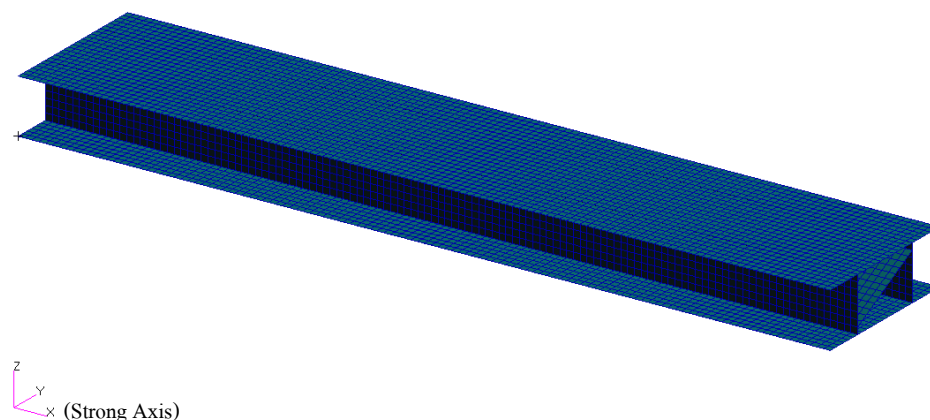
เมื่อ  $\delta_{\max}$  คือ ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของแผ่นพื้นที่สัมพัทธ์กับคานรองรับ  
 $S_{c4c}$  คือ ระยะห่างของคานรองรับทั้งสอง (ศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง)

### 5.3 การวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck8 (Analysis of Prodeck8 Bridge Deck)

การวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck8 มีขั้นตอนและจุดประสงค์ในการวิเคราะห์ไปในแนวทางเดียวกันกับการวิเคราะห์แผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck4 กล่าวคือ ภายหลังจากการสร้างแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck8 จะทำการวิเคราะห์โดยการเพิ่มขนาดของแรงที่กระทำต่อแบบจำลองซึ่งเป็นแรงกระทำแบบสถิตย์ศาสตร์ (Static Load) เพื่อหาค่าระยะโก่งตัว (Deflection) และค่าการยืดหดตัว (Strain) ของแบบจำลอง และนำผลที่ได้ดังกล่าวไปวิเคราะห์หาค่าความแข็งแกร่งของการตัด (Flexural Rigidity) ในทิศทางตามแนวแกนยาวและตามแนวแกนขวาง ตลอดจนวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการโก่งตัวของแผ่นพื้นกับคานเหล็กที่รองรับแผ่นพื้นในการวิเคราะห์ระดับระบบ ผลที่ได้ทั้งหมดถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Howard 2002) และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์ของ Suraj (2005) โดยผลการวิเคราะห์และเกณฑ์ในการวิเคราะห์แบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานชนิดหน้าตัด Prodeck8 ระดับต่างๆ จะถูกแสดงเป็นลำดับ ในหัวข้อที่ 5.3.1 ถึง 5.3.3

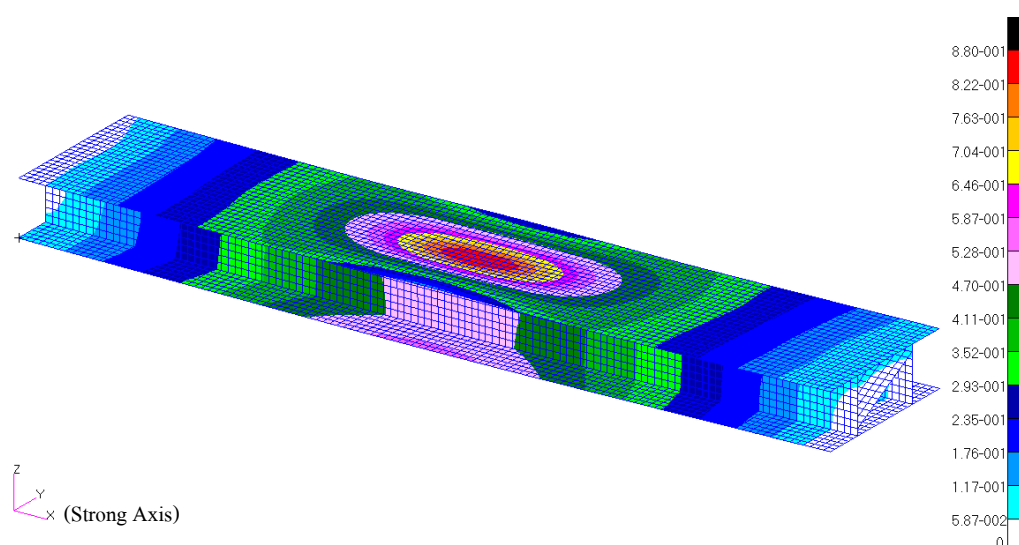
#### 5.3.1 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนยาว (Analysis of Longitudinal Component)

แบบจำลองชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวมีความกว้าง 60.96 เซนติเมตร ความยาว 304.80 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 20.32 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยสามส่วนคือส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของหน้าตัดมีความหนา 0.89 เซนติเมตร ส่วนปีกทั้งด้านบนและล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนาเท่ากันคือ 1.27 เซนติเมตร และส่วนที่เป็นแผ่นเฉียง (Diagonal) ของหน้าตัดมีความหนา 0.64 เซนติเมตร โดยแบบจำลองถูกวางบนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) และอยู่ภายใต้แรงกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25.4 เซนติเมตร และ 50.8 เซนติเมตร ตามลำดับ โดยมีค่าแรงกระทำสูงสุดเท่ากับ 160.187 กิโลนิวตัน) แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิลิเมนต์แบบแผ่น โคงบางแบบลามิเนตหลายชั้น (Thin Laminated Shell) ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 9,240 อิลิเมนต์ โดยแต่ละชั้นของลามิเนตมีคุณสมบัติแบบออร์ทอทรอปิก (Orthotropic) แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวถูกแสดงอยู่ในรูป 5.12

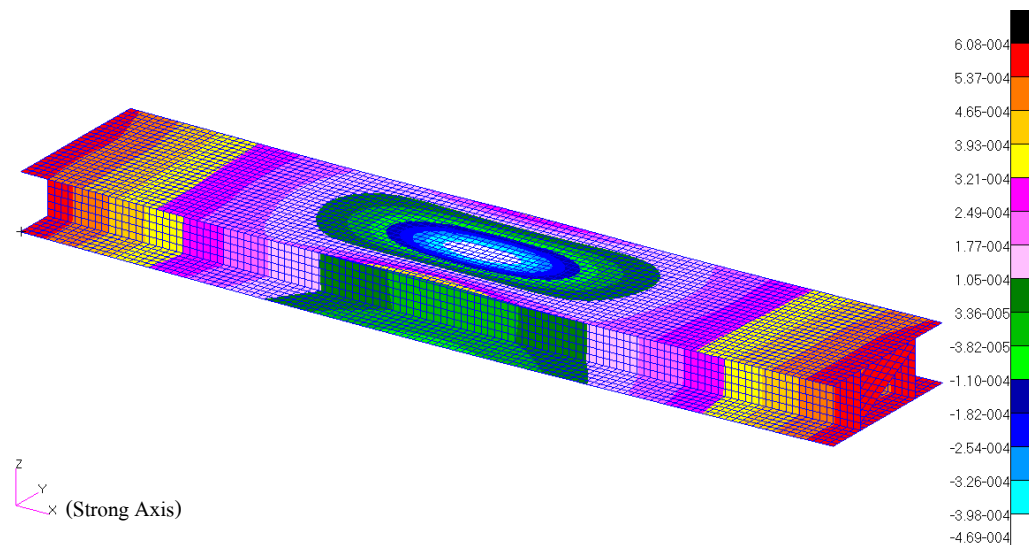


รูปที่ 5.12 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว

แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวนี้ถูกทำการวิเคราะห์เพื่อหาระยะโก่ง (Deflection) และค่าการยืดหดตัว (Strain) บนชิ้นส่วนต่อน้ำหนักบรรทุก (ตัวอย่าง: การโก่งตัวและการยืดหดตัวตามแนวแกนของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 124.60 กิโลนิวตันแสดงอยู่ในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002) และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของ Suraj (2005)



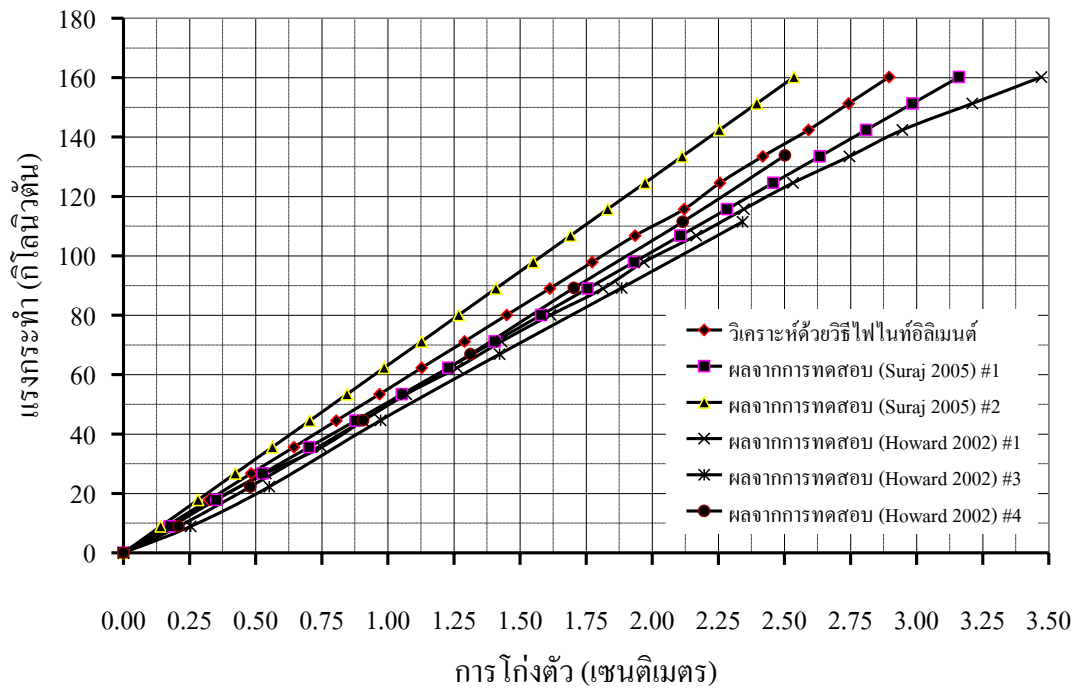
รูปที่ 5.13 การโก่งตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว



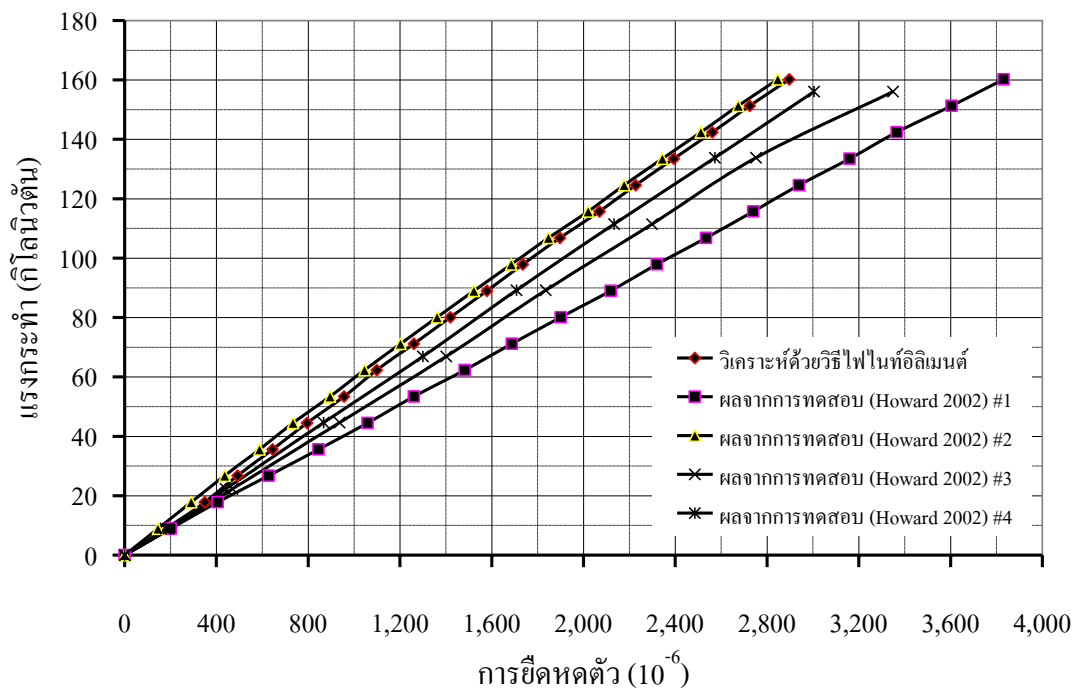
รูปที่ 5.14 ค่าการยึดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว

จากการเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าทั้งความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก – การโก่งตัว และน้ำหนักบรรทุก – ค่าการยึดหดตัวตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 ตามลำดับ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear) ทั้งการวิเคราะห์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการสืบเนื่องมาจากธรรมชาติของคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะมีพฤติกรรมตอบสนองแบบเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดแตกหักในลักษณะของวัสดุเปราะดังนั้นในการศึกษานี้การวิเคราะห์ผลตอบสนองของชิ้นส่วนพื้นสะพานพอลิเมอร์จึงทำการวิเคราะห์แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear-Elastic) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าสถิติพีเนสหรือความชันของกราฟแบบเชิงเส้นแต่ละเส้นในรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 มีความแตกต่างกันส่งผลให้ค่าความแข็งแกร่งของการค้ำ (Flexural Rigidity) ของตัวอย่างที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Suraj 2005) และที่วิเคราะห์จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002) กับผลจากการวิจัยในครั้งนี้มีความแตกต่างกัน โดยการคำนวณค่าความแข็งแกร่งของการค้ำสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5.2 และ 5.3





รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การโก่งตัวของชิ้นส่วน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยืดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck8 ตามแนวแกนยาว

จากรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 พบว่าค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาว ( $P-\delta$ ) มีค่าประมาณ 55.19 กิโลนิวตันต่อเซนติเมตร และ ค่าความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน ( $P-\kappa$ ) มีค่าประมาณ  $55.89 \times 10^3$  กิโลนิวตัน

จากสมการที่ 5.2 และ 5.3 จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับระยะโก่งและความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับการยืดหดตัวตามแนวแกน ตามลำดับ ภายใต้กฎของฮุก (Hook's Law) สามารถคำนวณหาความแข็งแกร่งของการตัด ดังนี้

- 1) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัว ( $P-\delta$ )

$$EI \left| \frac{\textcircled{R}P}{\textcircled{TM}_\delta} \right| \left| \frac{\textcircled{R}L^3}{\textcircled{TM}48} \right| = 32.555 \times 10^6 \text{ กิโลนิวตัน-ตารางเซนติเมตร}$$

- 2) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการยืดหดตัว ( $P-\kappa$ )

$$EI \left| \frac{\textcircled{R}P}{\textcircled{TM}_\kappa} \right| \left| \frac{\textcircled{R}Lc}{\textcircled{TM}4} \right| = 43.268 \times 10^6 \text{ กิโลนิวตัน-ตารางเซนติเมตร}$$

เมื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากทดสอบของ Howard (2002) และ Suraj (2005) ซึ่งได้สรุปไว้ ดังแสดงในตารางที่ 5.6

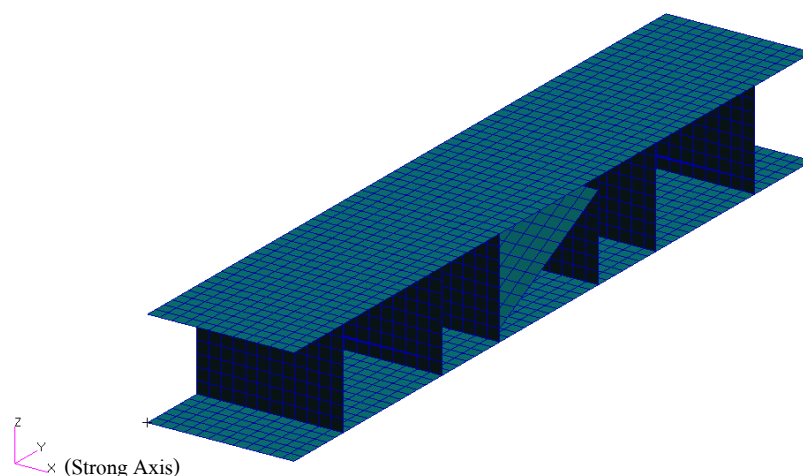
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับชิ้นส่วน Prodeck8

ที่มาของค่าที่วิเคราะห์	ค่าความแข็งแรงของการตัด	
	(10 <sup>6</sup> ) กิโลนิวตัน - ตารางเซนติเมตร	
	อันเนื่องด้วยการโก่ง	อันเนื่องด้วยการยืดหดตัว
วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์	32.555	43.268
การทดสอบในห้องปฏิบัติการ		
Isaac Howard #1	28.481	32.796
Isaac Howard #2	—	39.125
Isaac Howard #3	27.915	36.823
Isaac Howard #4	31.067	39.988
Suraj Suraj #1	37.111	—
Suraj Suraj #2	29.976	—

จากผลที่แสดงในตารางที่ 5.6 พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการตัดจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์มีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบของ Howard (2002) และ Suraj (2005) สาเหตุเนื่องมาจากความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทั้งทางกายและคุณสมบัติของวัสดุในแบบจำลองทางไฟไนท์อิลิเมนต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ยกเว้นค่าที่ได้จากการทดสอบของ Suraj #1 (ซึ่งวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์) ที่มีค่าของความแข็งแรงของการตัดมากกว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์ เนื่องจากตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ของ Suraj #1 มีค่าสัดส่วนของเส้นใยต่อปริมาตรเท่ากับ 0.64 ซึ่งมากกว่า Suraj #2 และแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์ในการวิจัยครั้งนี้ที่มีค่าสัดส่วนของเส้นใยต่อปริมาตรเท่ากับ 0.54 จึงเป็นสาเหตุทำให้ได้ค่าความแข็งแรงของการตัดมีค่ามากกว่าเพราะมีเส้นใยผสมอยู่ในตัวอย่างมากกว่า โดยค่าเปอร์เซ็นต์ของความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์กับค่าที่ได้จากการทดสอบเนื่องด้วยการโก่งตัวและการยืดหดตัวมีค่าอยู่ระหว่าง 4.57 % - 14.25 % และ 7.58 % - 24.20 % ตามลำดับ

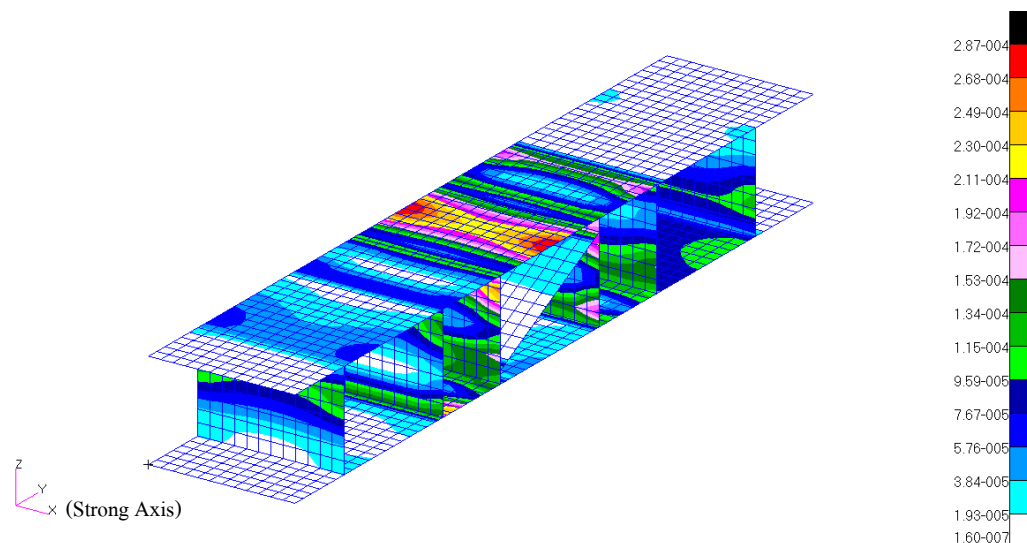
### 5.3.2 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนตามแนวแกนขวาง (Analysis of Transverse Component)

แบบจำลองชิ้นส่วนตามแนวแกนขวางมีความกว้าง 157.48 เซนติเมตร ความยาว 30.48 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 20.32 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วยสามส่วนคือส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของหน้าตัดมีความหนา 0.89 เซนติเมตร ส่วนปีกทั้งด้านบนและล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนาเท่ากันคือ 1.27 เซนติเมตร และส่วนที่เป็นแผ่นเฉียง (Diagonal) ของหน้าตัดมีความหนา 0.64 เซนติเมตร โดยแบบจำลองถูกวางบนที่รองรับอย่างง่าย (simple supported) และอยู่ภายใต้แรงกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25.40 เซนติเมตร และ 50.80 เซนติเมตร ตามลำดับ แบบจำลองที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิเลิเมนต์แบบแผ่นโค้งบางแบบลามิเนตหลายชั้น (Thin Laminated Shell) ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 2,532 อิเลิเมนต์ โดยแต่ละชั้นของลามิเนตมีคุณสมบัติแบบออร์โทโทรปิก (Orthotropic) แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนยาวถูกแสดงอยู่ในรูป 5.17



รูปที่ 5.17 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ตามแนวแกนขวาง

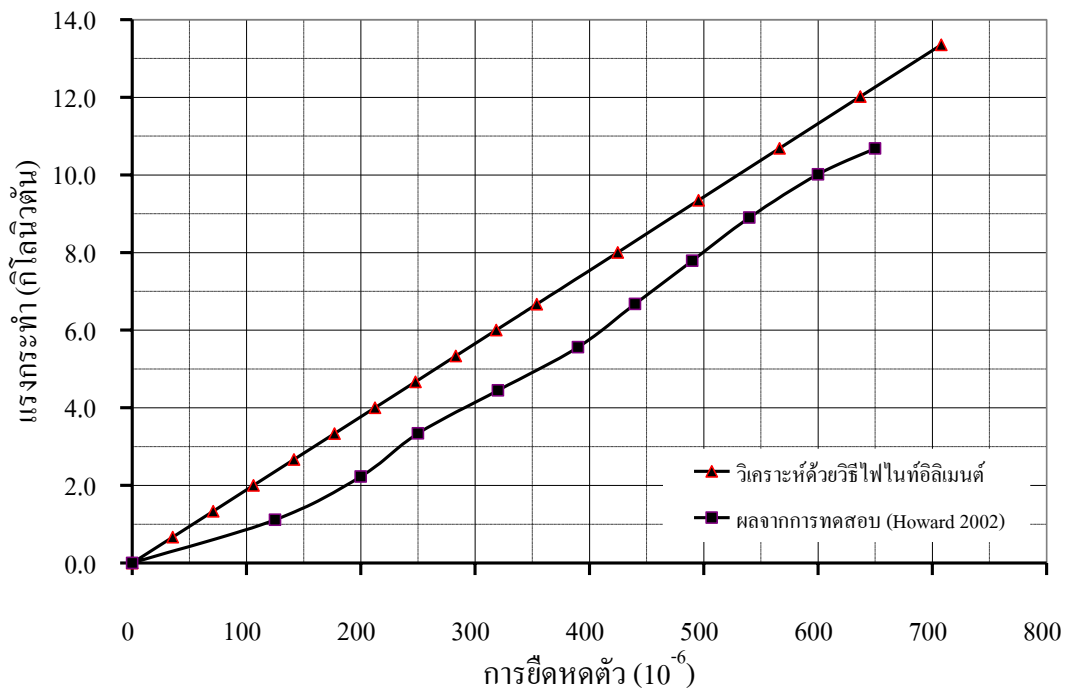
แบบจำลองของชิ้นส่วนตามแนวแกนขวางนี้ถูกทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อค่าการยืดหดตัว (Strain) บนชิ้นส่วนต่อน้ำหนักบรรทุก (ตัวอย่าง: ค่าการยืดหดตัวตามแนวแกนของชิ้นส่วนภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 13.35 กิโลนิวตันแสดงอยู่ในรูปที่ 5.18) โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002)



**รูปที่ 5.18** ค่าการยืดหดตัวของแบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน ProDeck8 ตามแนวแกนขวาง

การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าความสัมพันธ์ของน้ำหนักบรรทุก – ค่าการยืดหดตัวตามแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 5.19 มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear) ทั้งการวิเคราะห์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ด้วยเหตุผลเดียวกันที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว คือแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีความสมบูรณ์สม่ำเสมอของคุณสมบัติวัสดุ ปราศจากจุดบกพร่องและมีการถ่ายเทแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ทำให้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสมบูรณ์กว่าชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบจริง รวมถึงการส่งถ่ายแรงที่เกิดการสูญเสียขึ้นตรงบริเวณรอยต่อของชิ้นตัวอย่าง ในขณะที่แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เกิดการสูญเสียการส่งถ่ายแรง เนื่องจากในการวิจัยนี้ไม่ได้ออกแบบรอยต่อและพิจารณาการสูญเสียแรงกระทำของแบบจำลองไว้ ส่งผลให้ค่าสติฟเนส (ความชันของความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและค่าการยืดหดตัว) จากการวิเคราะห์ตามแนวแกนขวางมีค่าสูงกว่าผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002)



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์น้ำหนักบรรทุก-การยืดหดตัวของชิ้นส่วน Prodeck8 ตามแนวแกนขวาง

สำหรับการคำนวณหาค่าความแข็งแกร่งต่อการดัด (Flexural Rigidity EI) โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวในแนวแกน (Relation of Load-Axial Strain) ตามวิธีการคำนวณ (สมการที่ 5.3) และจากสมมุติฐานที่ไม่ทำการพิจารณาผลของการการยืดหดตัวที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของแรงเฉือนซึ่งสมมุติฐานดังกล่าวจะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อชิ้นส่วนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีอัตราส่วนความยาวต่อขนาดหน้าตัดในอัตราที่สูงและสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบสำหรับวัสดุวิศวกรรมดั้งเดิม อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการคำนวณในการศึกษาครั้งนี้เป็นเพียงค่าประมาณเพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวในแนวแกนในรูปที่ 5.19 พบว่าเมื่อแรงกระทำจนถึงค่าสูงสุดลักษณะของกราฟเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งยังอยู่ในช่วงยืดหยุ่นอยู่ (Linear Elastic) และค่าความชันที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน ( $P - \kappa$ ) มีค่าประมาณ  $0.01886 \times 10^6$  กิโลนิวตัน ถูกนำไปแทนในสมการ 5.3 เพื่อคำนวณหาค่าความแข็งแกร่งของการดัด (Flexural Rigidity) ในแนวแกนตามขวาง โดยค่า L คือค่าความยาวช่วงมีค่าประมาณ 127.00 เซนติเมตร และค่า c คือระยะห่างจากแนวแกนสะเทินของหน้าตัดไปถึงขอบที่ไกลที่สุดของหน้าตัดมีค่าประมาณ 10.16 เซนติเมตร ดังแสดง

$$EI \left| \frac{\textcircled{BP}}{\textcircled{MK}} \left| \frac{\textcircled{RLc}}{\textcircled{M4}} \right. \right| = 6.0834 \times 10^6 \text{ กิโลนิวตัน-ตารางเซนติเมตร}$$

จากการวิเคราะห์แบบจำลอง Prodeck8 ตามแนวแกนขวาง (Transverse Direction) ค่าความแข็งแรงต่อการตัดแสดงสรุปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ (Howard 2002) อยู่ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ สำหรับชิ้นส่วน Prodeck8

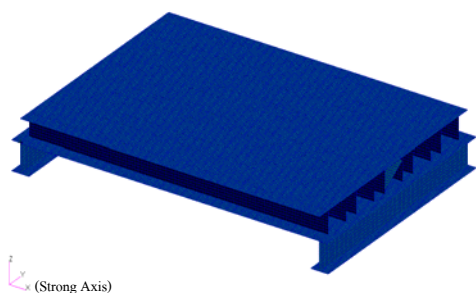
วิธีการคำนวณ	ค่าความแข็งแรงของการตัด (กิโลนิวตัน-ตารางเซนติเมตร)
วิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์	$6.0834 \times 10^6$
จากการทดสอบ (Howard 2002)	$5.6386 \times 10^6$
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	7.31 เปอร์เซ็นต์

จากผลที่แสดงในตารางที่ 5.7 พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการตัดมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002) เนื่องจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาก่อนข้างต้น โดยมีความแตกต่างกันสำหรับความแข็งแรงต่อการตัด (การยึดหดตัว) ระหว่างค่าที่คำนวณมาจากวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์กับค่าที่คำนวณได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการของชิ้นตัวอย่างแต่ละชิ้นส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณมาจากวิธีการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยมีค่าประมาณ 7.31 เปอร์เซ็นต์

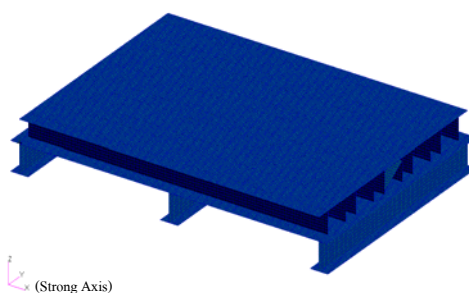
### 5.3.3 การวิเคราะห์ระดับระบบ (Analysis of System)

แบบจำลองชิ้นส่วนระดับระบบประกอบด้วยสองส่วนคือ 1) แบบจำลองของแผ่นพื้นที่มีความกว้าง 254.00 เซนติเมตร ความยาว 345.44 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 20.32 เซนติเมตร ซึ่งมีส่วนประกอบสามส่วนคือส่วนที่เป็นแผ่นตั้ง (Web) ของหน้าตัดมีความหนา 0.89 เซนติเมตร ส่วนปีกทั้งด้านบนและล่าง (Top and Bottom Flange) มีความหนาเท่ากันคือ 1.27 เซนติเมตร และส่วนที่เป็นแผ่นเฉียง (Diagonal) ของหน้าตัดมีความหนา 0.64 เซนติเมตร แบบจำลองแผ่นพื้นที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิลิเมนต์แบบแผ่นโค้งบางแบบลามิเนตหลายชั้น (Thin Laminated Shell) ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน

46,920 อิสิเมนต์ โดยแต่ละชั้นของลามิเนตมีคุณสมบัติแบบออร์โททรอปิก (Orthotropic) โดยแบบจำลองแผ่นพื้นถูกวางบนแบบจำลอง 2) แบบจำลองคานเหล็กรูปตัวไอมีความกว้าง 25.40 เซนติเมตร ความยาว 256.54 เซนติเมตร และความสูงของหน้าตัด 99.06 เซนติเมตร (W10"x39") จำนวน 2 คาน และ 3 คาน โดยวางห่างกันด้วยระยะเท่ากับ 345.44 เซนติเมตร และ 172.72 เซนติเมตร ตามลำดับ แบบจำลองของคานเหล็กที่สร้างขึ้นประกอบด้วยอิสิเมนต์ชนิดสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 2.54 เซนติเมตร และยาว 2.54 เซนติเมตร จำนวน 5,900 อิสิเมนต์ต่อแบบจำลองคานเหล็กแต่ละตัว โดยแต่ละอิสิเมนต์มีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) โดยแบบจำลองของคานเหล็กถูกวางบนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Supported) และแบบจำลองทั้งระบบอยู่ภายใต้แรงกระทำบนพื้นที่สี่เหลี่ยม (Patch Load) ขนาดความกว้างและความยาวเท่ากับ 25.40 เซนติเมตร และ 50.80 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองทั้งระบบของแผ่นพื้นหน้าตัด Prodeck8 แบ่งเป็น 3 กรณีด้วยกัน โดยแต่ละกรณีแตกต่างกันตรงจำนวนของคานรองรับและตำแหน่งของแรงกระทำที่กระทำต่อแบบจำลอง ดังนี้ กรณี 1 แบบจำลองทั้งระบบมีคานที่รองรับ 2 ตัว และแรงกระทำตรงกึ่งกลางแผ่นพื้น กรณี 2 แบบจำลองทั้งระบบมีคานที่รองรับ 3 ตัว และแรงกระทำตรงกึ่งกลางแผ่นพื้น และ กรณี 3 แบบจำลองทั้งระบบมีคานที่รองรับ 3 ตัว และแรงกระทำตรงกึ่งกลางแผ่นพื้น โดยแบบจำลองของชิ้นส่วนระดับระบบถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 5.20 และ รูปที่ 5.21



รูปที่ 5.20 แบบจำลองทั้งระบบ  
(Prodeck8) ที่มีคานรองรับ 2 ตัว

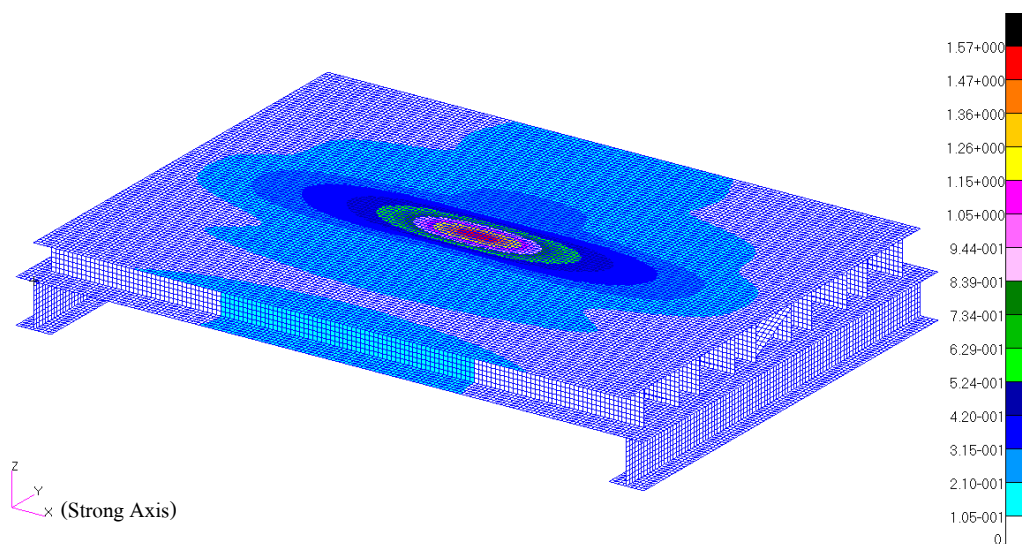


รูปที่ 5.21 แบบจำลองทั้งระบบ  
(Prodeck8) ที่มีคานรองรับ 3 ตัว

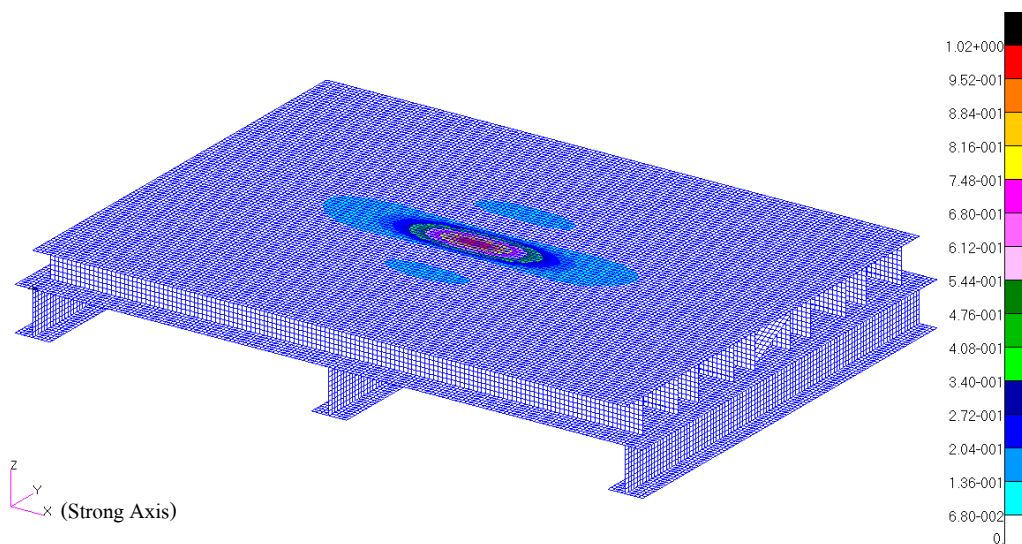
แบบจำลองของชิ้นส่วนระดับระบบนี้ถูกทำการวิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อระยะโก่ง (Deflection) (ทั้งระยะโก่งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของแผ่นพื้นและระยะโก่งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองคานเหล็กทั้งสอง) บนชิ้นส่วนต่อน้ำหนักบรรทุก (ตัวอย่าง: การโก่งตัวของแบบจำลองทั้งระบบภายใต้น้ำหนักบรรทุกขนาด 111.25 กิโลนิวตัน สำหรับกรณีที่ 1 กับ กรณีที่ 2 และ 177.993 กิโลนิวตัน สำหรับกรณีที่ 3 แสดงอยู่ในรูปที่ 5.22, รูปที่ 5.23 และรูปที่ 5.24 ตามลำดับ)



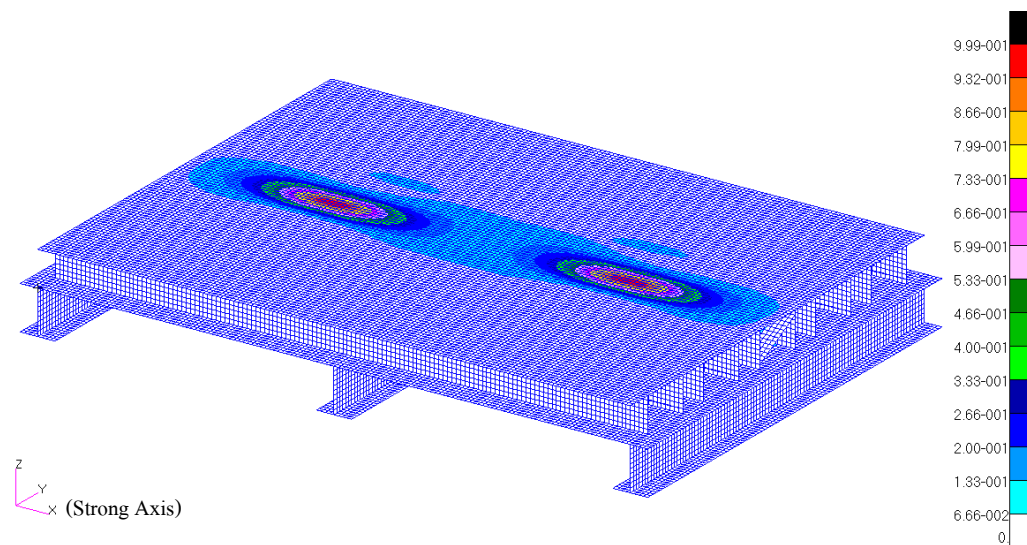
ทั้งนี้แรงกระทำจากล้อรถบรรทุกหนึ่งล้อและสองล้อตามมาตรฐาน AASHTO HS25 มีค่าประมาณ 90.00 กิโลนิวตัน และ 180.00 กิโลนิวตัน ตามลำดับ โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ถูกนำมาทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002)



รูปที่ 5.22 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ (กรณีที่ 1)



รูปที่ 5.23 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ (กรณีที่ 2)



รูปที่ 5.24 แบบจำลองชิ้นส่วนพื้นสะพาน Prodeck8 ในการวิเคราะห์ระดับระบบ (กรณีที่ 3)

การเปรียบเทียบผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002) พบว่าระยะโก่งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของคานเหล็กทั้งสองและระยะโก่งที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองของแผ่นพื้น มีค่าใกล้เคียงกับระยะโก่งจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ดังแสดงในตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9 โดยค่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยการโก่งตัวของคานจากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าประมาณ 14.94%, 57.75% และ 46.43% สำหรับ กรณีที่ 1, กรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.8 ค่าระยะโก่งของที่รองรับเหล็กในการทดสอบทั้งระบบ

การวิเคราะห์		แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	การโก่งตัว (เซนติเมตร)		
			คานตัวริม 1	คานตัวกลาง	คานตัวริม 2
กรณีที่ 1	ไฟไนต์เอลิเมนต์	111.245	0.086	NA	0.086
	Howard 2002		0.103	NA	0.097
กรณีที่ 2	ไฟไนต์เอลิเมนต์	111.245	0.020	0.174	0.020
	Howard 2002		0.074	0.193	0.069
กรณีที่ 3	ไฟไนต์เอลิเมนต์	177.993	0.077	0.181	0.077
	Howard 2002		0.155	0.221	0.117

เมื่อพิจารณาค่าการโค้งตัวที่ยอมให้จากสมการ 5.4 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าการโค้งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ ตามมาตรฐาน AASHTO ดังนี้

$$\div_{\max} \mid \frac{L}{800}$$

เมื่อ  $\div_{\max}$  คือ ค่าการโค้งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ  
 $L$  คือ ช่วงความยาวของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ

เมื่อแทนค่า  $L = 223.52$  เซนติเมตร (Howard 2002) ลงในสมการ 5.4 จะได้  $\div_{\max} = 0.28$  เซนติเมตร และนำไปเปรียบเทียบกับค่าต่างๆในตารางที่ 5.8 พบว่าการโค้งตัวที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองวิธีดังแสดงในตารางยังคงไม่เกินค่าการโค้งตัวสูงสุดที่ยอมให้ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ และยังพบว่าในตารางที่ 5.8 ค่าการโค้งตัวของคานที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิลิเมนต์ทุกกรณีมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 5.9 ค่าระยะโค้งของที่รองรับเหล็กเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นในการทดสอบทั้งระบบ

การวิเคราะห์		แรงกระทำ (กิโลนิวตัน)	การโค้งตัว (เซนติเมตร)		
			คาน (เฉลี่ย)	ของแผ่นพื้น	สัมพัทธ์
กรณีที่ 1	ไฟไนท์อิลิเมนต์	111.245	0.087	1.455	1.368
	Howard 2002		0.100	1.499	1.399
กรณีที่ 2	ไฟไนท์อิลิเมนต์	111.245	0.071	0.136	0.065
	Howard 2002		0.112	0.183	0.071
กรณีที่ 3	ไฟไนท์อิลิเมนต์	177.993	0.112	0.497	0.385
	Howard 2002		0.164	0.516	0.352

ในกรณีเดียวกันเมื่อเราพิจารณาตารางที่ 5.9 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงให้เห็นถึงการโก่งตัวสัมพัทธ์ระหว่างคานที่รองรับกับแผ่นพื้นสะพาน (Deck Deflection Relative to Stringers) และเพื่อเป็นการตรวจสอบค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวโดย GangaRao and Shekar (2002) ได้เสนอสมการ (สมการ 5.5) ในการตรวจสอบขอบเขตของการโก่งตัวสัมพัทธ์ของระบบแผ่นพื้นและคานรองรับ ดังแสดง

$$\div_{\max} \left| \frac{S_{c4c}}{500} \right|$$

เมื่อ  $\div_{\max}$  คือ ค่าการโก่งตัวสูงสุดที่ยอมรับได้ของแผ่นพื้นที่สัมพัทธ์กับคานรองรับ  
 $S_{c4c}$  คือ ระยะห่างของคานรองรับทั้งสอง (ศูนย์กลางถึงศูนย์กลาง)

ทั้งนี้เมื่อเราพิจารณาการโก่งตัวของคานที่รองรับในรูปแบบของการกระจายแรงไปยังคานที่รองรับแต่ละตัว (Transverse Load Distribution Factor) โดยสมการด้านล่าง

$$g_{di} = \frac{l_i}{\sum_{j=1}^n l_j} \quad (5.6)$$

เมื่อ  $g_{di}$  คือ ปัจจัยการกระจายของแรง เนื่องจากการโก่งตัว  
 $l_i$  คือ การโก่งตัวของคานที่รองรับ (i)  
 $l_j$  คือ การโก่งตัวของคานที่รองรับ (j)  
 $n$  คือ จำนวนของคานที่รองรับ

โดยผลที่ได้จากปัจจัยการกระจายของแรง เนื่องจากการโก่งตัว (Load Distribution Factor) ดังแสดงในตารางที่ 5.10

**ตารางที่ 5.10** กระจายแรงอันเนื่องมาจากการ โกงตัวของคานที่รองรับในการวิเคราะห์

แบบจำลอง		เปอร์เซ็นต์การกระจายของแรง		
		คานตัวริม 1	คานตัวกลาง	คานตัวริม 2
กรณีที่ 1	ไฟไนท์อีลิเมนต์	50.0%	NA	50.0%
	Howard 2002	51.5%	NA	48.5%
กรณีที่ 2	ไฟไนท์อีลิเมนต์	9.5%	81.0%	9.5%
	Howard 2002	22.0%	57.5%	20.5%
กรณีที่ 3	ไฟไนท์อีลิเมนต์	23.0%	54.0%	23.0%
	Howard 2002	31.0%	45.0%	24.0%

ในตารางที่ 5.10 เป็นการวิเคราะห์การกระจายแรงไปยังคานที่รองรับแต่ละตัว (Load Distribution Factor) เนื่องมาจากการ โกงตัวของคานที่รองรับ พบว่า ลักษณะการกระจายของแรงกระทำไปยังคานที่รองรับของแบบจำลองที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อีลิเมนต์เป็นแบบสมมาตร อย่างเช่นในกรณีที่ 3 พบว่าแรงกระจายลงคานตัวกลาง 54.0% และกระจายลงคานตัวริมทั้งสองตัว เท่าๆกัน เท่ากับ 23.0% ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบ (Howard 2002) ที่การกระจายแรงไม่สมมาตร คือมีแรงกระจายลงคานตัวกลาง 45.0% และกระจายลงคานตัวริมทั้งสองตัวแตกต่างกัน เท่ากับ 31.0% และ 24.0% ซึ่งมีลักษณะของการกระจายแรงเหมือนกันกับกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ตามลำดับ

#### 5.4 สรุป (Conclusion)

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้แผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 ที่ผ่านมา ได้แก่ การวิเคราะห์ชิ้นส่วนในแนวแกนยาว (Longitudinal Component), การวิเคราะห์ชิ้นส่วนในแนวแกนขวาง (Transverse Component) และการวิเคราะห์แผ่นพื้นทั้งระบบ (System Component) ผลที่วิเคราะห์ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Punyamurthula 2004, Howard 2002) และการทดสอบด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Suraj 2005) พบว่าผลที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยผลตอบสนอง (การโก่งตัว และการยืดหดตัว) ที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการทางทฤษฎีของไฟไนต์เอลิเมนต์เกี่ยวกับการโก่งตัวของเอลิเมนต์และจุดต่อในเรื่อง Minimum Total Potential Energy Principle และในทางปฏิบัติสืบเนื่องมาจากธรรมชาติของคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยจะมีพฤติกรรมตอบสนองแบบเชิงเส้นจนกระทั่งถึงจุดแตกหักในลักษณะของวัสดุเปราะ ดังนั้นแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งมีความสมบูรณ์สม่ำเสมอของคุณสมบัติวัสดุ ปราศจากจุดบกพร่อง ตลอดจนการถ่ายแรงกระทำตรงบริเวณรอยต่อของแบบจำลองซึ่งในการวิจัยนี้ไม่ได้จำลองผลของรอยต่อและพิจารณาการสูญเสียของแรงกระทำบริเวณรอยต่อของแบบจำลอง ส่งผลให้มีการถ่ายเทแรงกระทำอย่างสมบูรณ์ ทำให้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสมบูรณ์กว่าชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบจริง ข้อสังเกตประการหนึ่งถึงแม้ว่าเทคโนโลยีในการผลิตชิ้นส่วนวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยสำหรับงานทางวิศวกรรมโยธาจะมีความก้าวหน้า อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องต่างๆ เช่น ความไม่สม่ำเสมอของพอลิเมอร์ การบ่มของพอลิเมอร์ที่ไม่เพียงพอ ตลอดจนช่องว่างที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนอย่างยิ่งยังคงพบอยู่เสมอ ซึ่งชิ้นส่วนซึ่งถูกผลิตในช่วงเวลาเดียวกันจากวัสดุตั้งต้นเดียวกันก็อาจมีคุณสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันได้

## บทที่ 6 (Chapter 6)

### การศึกษาแบบพารามทริกของแบบจำลองสะพาน แบบแผ่นพื้น (พอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย) - คาน (Parametric Study on FRP Deck – Stringer Bridge Models)

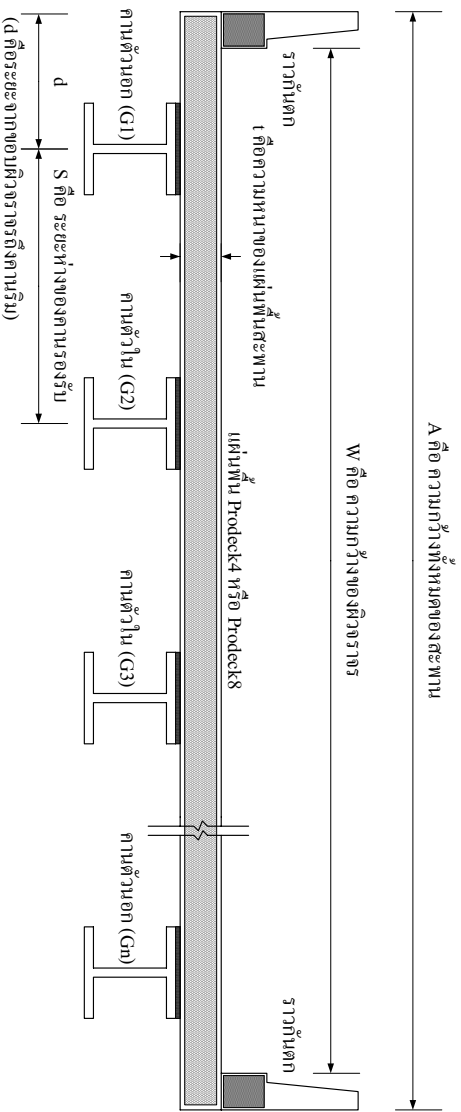
#### 6.1 บทนำ (Introduction)

ในการศึกษาแบบพารามทริก ได้ทำการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาสมการของตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักหรือแรงกระทำจากรถบรรทุกที่มีต่อคานที่รองรับ (Load Distribution Factor) โดยทำการวิเคราะห์น้ำหนักบรรทุกจากการรถบรรทุกซึ่งส่งผลต่อคานที่รองรับแต่ละตัวเพื่อทำการเสนอสมการของตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) สำหรับใช้ในการออกแบบสะพานระบบแผ่นพื้นเสริมกำลังด้วยเส้นใยอย่างเหมาะสมต่อไป โดยในการศึกษาแบบพารามทริกในบทนี้จะทำการสร้างแบบจำลองทั้งระบบ (System) ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพาน (Bridge Deck) และแบบจำลองของคานที่รองรับเหล็ก (Steel Girder) ทั้งนี้แบบจำลองทั้งระบบในการศึกษาพารามทริกนี้แตกต่างจากแบบจำลองทั้งระบบในบทที่ 5 เนื่องจากแบบจำลองทั้งระบบในการศึกษาแบบพารามทริกจำลองให้ขนาดที่สอดคล้องใกล้เคียงกับสะพานที่ใช้งานจริง

#### 6.2 ประเภทของแบบจำลอง (Type of Models)

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการศึกษาระบบพารามทริกมีขนาดและรูปแบบที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของหน้าตัดของแผ่นพื้นสะพาน (Type of Bridge Decks) ได้แก่ หน้าตัดแบบ Prodeck4 และหน้าตัดแบบ Prodeck8, ความกว้างของพื้นสะพาน (Width), ความยาวของสะพาน (Length), ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็ก (Girder Spacing) และตำแหน่งของแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก (Tuck Wheels Loading) โดยปัจจัยในการสร้างแบบจำลองดังกล่าวนี้ส่งผลให้แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นมีจำนวนหลายรูปแบบ อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ คือส่วนที่ 1) แบ่งประเภทของแบบจำลองตามหน้าตัดของสะพาน (Cross Section) ซึ่งมีหน้าตัดที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 แบบหน้าตัด (CSI-CS6) ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และตารางที่ 6.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประเภทของหน้าตัดของแบบจำลองต่างๆกันจำนวนทั้งหมด 6 ประเภท แบ่งตามความแตกต่างของควมกว้างของผิวจราจรของสะพาน และระยะห่างระหว่างคาน

ที่รองรับแต่ละคู่เป็นหลัก โดยในการวิเคราะห์จะทำการจำแนกคานที่รองรับเป็น 2 ประเภทคือ คานที่รองรับตัวนอก (Exterior Girder) และคานที่รองรับตัวใน (Interior Girder) สำหรับส่วนที่ 2) แบ่งประเภทของแบบจำลองตามลักษณะของแรงกระทำจากรถบรรทุก (Truck Loading) ซึ่งแบ่งได้เป็นทั้งหมด 9 กรณี (Case1 - Case9) ดังแสดงในรูปที่ 6.2 และตารางที่ 6.2

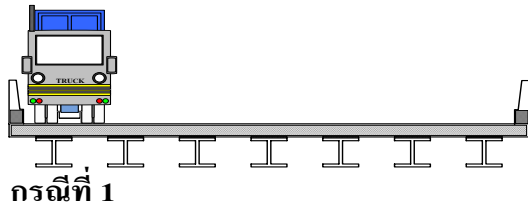


รูปที่ 6.1 หน้าตัดทั่วไปของระบบสะพานในการศึกษาแบบพาราเมตริก

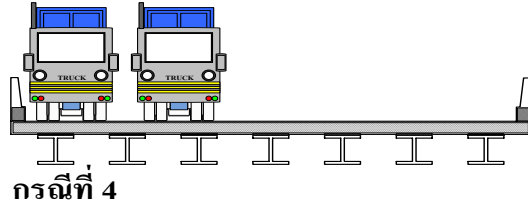
ตารางที่ 6.1 รายละเอียดของแบบจำลองสะพานแบ่งตามลักษณะของหน้าตัดของแบบจำลอง

หน้าตัด (Cross Section)	ความกว้าง (A) สะพาน (เมตร)	ความกว้าง (W) ผิวจราจร (เมตร)	ระยะห่าง (S) คานที่รองรับ (เมตร)	จำนวนคาน (n) (ตัว)	d (เมตร)
CS1	9.30	8.53	1.20	7	1.05
CS2	9.30	8.53	1.83	5	0.99
CS3	9.30	8.53	2.29	4	1.20
CS4	13.00	12.20	1.20	10	1.10
CS5	13.00	12.20	1.83	7	1.01
CS6	13.00	12.20	2.29	6	0.77

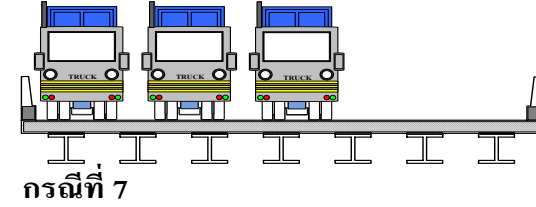




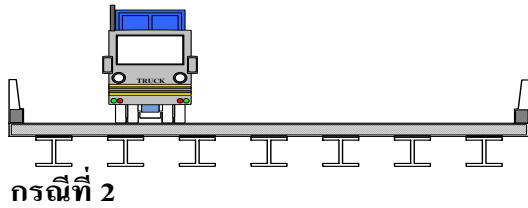
กรณีที่ 1



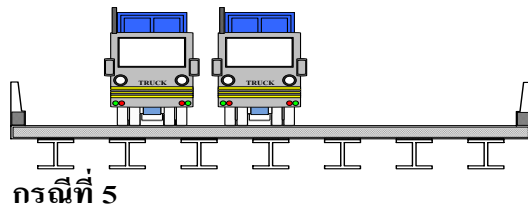
กรณีที่ 4



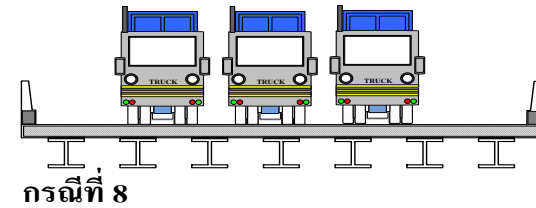
กรณีที่ 7



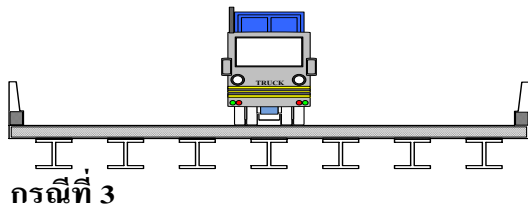
กรณีที่ 2



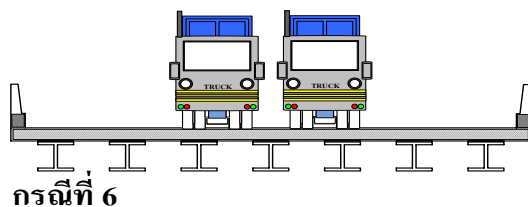
กรณีที่ 5



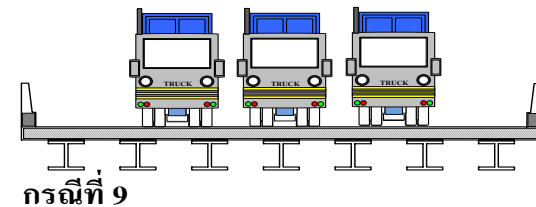
กรณีที่ 8



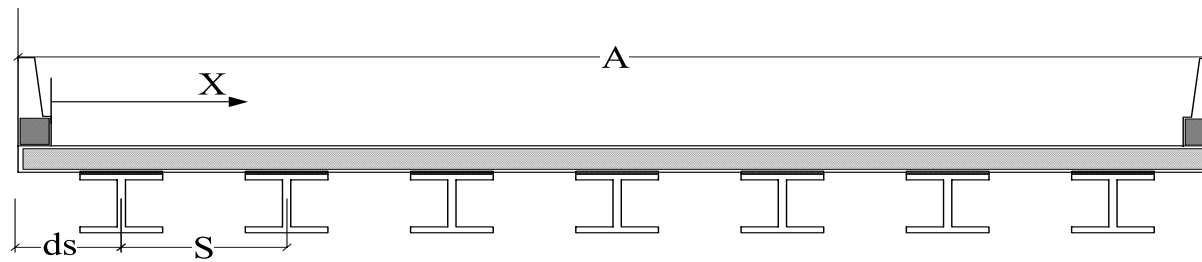
กรณีที่ 3



กรณีที่ 6



กรณีที่ 9



รูปที่ 6.2 หน้าตัดของสะพานภายใต้น้ำหนักจากรถบรรทุกในกรณีต่างๆ

**ตารางที่ 6.2** รายละเอียดของแบบจำลองแบบตามลักษณะของแรงกระทำจากบรรทุก

กรณีที่ (Case)	ความกว้าง สะพาน (เมตร)	จำนวนรถบรรทุก ที่กระทำต่อสะพาน	จำนวนช่องทางจราจร (ช่องทาง)	ระยะห่าง (X) จากขอบทาง ถึงรถบรรทุกคันแรก (เมตร)
1	9.30 และ 13.00	1 คัน	2 และ 3	0.61
2	9.30 และ 13.00	1 คัน	2 และ 3	S+(d-0.385)
3	9.30 และ 13.00	1 คัน	2 และ 3	(A/2)-0.530
4	9.30 และ 13.00	2 คัน	2 และ 3	0.61
5	9.30 และ 13.00	2 คัน	2 และ 3	S+(d-0.385)
6	9.30 และ 13.00	2 คัน	2 และ 3	(A/2)-2.055
7	13.00	3 คัน	3	0.61
8	13.00	3 คัน	3	S+(d-0.385)
9	13.00	3 คัน	3	(A/2)-3.580

หมายเหตุ S, A และ d ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และ 6.2

จากตารางที่ 6.1 และ 6.2 แบบจำลองสะพานถูกแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆอื่น เนื่องจากความกว้างของผิวจราจรของสะพาน (Deck Width), ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing), ตำแหน่งและลักษณะของน้ำหนักกระทำจากบรรทุกทุก (Truck Load) ส่งผลให้มีจำนวนของแบบจำลองที่ถูกต้องเท่ากับ 45 แบบจำลองที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ยังมีค่าตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ ความยาวของแบบจำลองสะพาน (Length of Bridge) ที่มีความยาวเท่ากับ 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร, ประเภทของหน้าตัดแบบจำลอง (Type of Bridge Deck) ที่มีทั้งหน้าตัดแบบ Prodeck4 และหน้าตัดแบบ Prodeck8 และปัจจัยสุดท้ายคือพฤติกรรมประกอบแบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) และพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 6.3 ดังนั้นแบบจำลองสะพานที่แตกต่างกันจำนวน 360 แบบจำลอง (รายละเอียดยึดตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด แสดงใน บทที่ 4 ตารางที่ 4.6) ถูกทำการวิเคราะห์ และนำเสนอในบทนี้

### 6.3 การศึกษาแบบพารามตริก (Parametric Study)

สำหรับการศึกษารูปแบบพารามตริกนั้นทำการพิจารณาปัจจัยที่มีผลเนื่องมาจากการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นพื้นสะพานและคานที่รองรับ โดยทำการจับแนกและวิเคราะห์แบบจำลองเป็นสองลักษณะตามการเชื่อมต่อของอิลิเมนต์ระหว่างอิลิเมนต์ของแผ่นพื้นกับอิลิเมนต์ของคานที่รองรับ ดังนี้

#### 1) แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

ในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองจะกำหนดให้แรงกระทำที่เกิดจากรถบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานมีการถ่ายแรงระหว่างแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานกับแบบจำลองของคานที่รองรับจากปีกล่างของแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพาน (Bottom Flange of Bridge Deck) ลงสู่ปีกบนของแบบจำลองของคานที่รองรับเหล็ก (Top Flange of Steel Stringer) แบบจุดต่อจุด (Node by Node) กล่าวคือ การแบ่งอิลิเมนต์ของแบบจำลองทั้งแบบจำลองของแผ่นพื้นและแบบจำลองของคานที่มีการแบ่งอิลิเมนต์ที่มีขนาดเท่ากัน (2.54 เซนติเมตร x 2.54 เซนติเมตร) ทำให้จุด (Node) ของแต่ละอิลิเมนต์ระหว่างอิลิเมนต์ของแผ่นพื้นและอิลิเมนต์ของคานที่รองรับอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกัน และทำการกำหนดให้อิลิเมนต์ที่ตรงกันนั้นจับคู่กันทั้งหมด ที่ตำแหน่งตรงกันดังกล่าวเสมือนเป็นตำแหน่งเดียวกัน ทำให้การถ่ายแรงและโมเมนต์ทั้งหมดจากรถบรรทุกส่งต่อจากแบบจำลองของแผ่นพื้นสู่แบบจำลองของคานที่รองรับเหล็กแบบจุดต่อจุดในทุกๆจุดที่มีผิวสัมผัสระหว่างปีกล่างของแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพาน (Bottom Flange of Bridge Deck) กับปีกบนของแบบจำลองของคานที่รองรับเหล็ก (Top Flange of Steel Stringer) (Zhang (2006))

#### 2) แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

สำหรับการสร้างแบบจำลองในส่วนนี้มีความคล้ายคลึงกับการสร้างแบบจำลองกรณีแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) โดยมีความแตกต่างกันที่การเชื่อมต่อของจุด (Node) ระหว่างปีกล่างของแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพาน (Bottom Flange of Bridge Deck) กับปีกบนของแบบจำลองของคานที่รองรับเหล็ก (Top Flange of Steel Stringer) เช่นส่งถ่ายแรงจากปีกล่างของแผ่นพื้น ลงสู่ปีกบนของคานที่รองรับเหล็กเพียงบางส่วน โดยในกรณีนี้การถ่ายแรงจากปีกล่างของแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพานลงสู่ปีกบนของแบบจำลองของคานเหล็กที่รองรับแต่ละตัวจะถ่ายแรงกระทำและโมเมนต์ลงเฉพาะจุด (Node) ที่อยู่ในแนวกลางของแบบจำลองของคานที่รองรับแต่ละตัวเท่านั้น หรือคิดเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนจุดทั้งหมดที่ปีกบนของแบบจำลองของคานที่รองรับ (Zhang (2006))

โดยการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์และแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน จะดำเนินการบันทึกผลตอบสนองอย่างอื่นเนื่องมาจากกระทำจากล้อรถบรรทุกที่มีต่อแบบจำลองของแผ่นพื้นสะพาน (Bridge Deck) คานที่รองรับ (Girder) ซึ่งผลตอบสนองอื่นเนื่องมาจากแรงกระทำจากล้อรถบรรทุก ได้แก่ ค่าการโก่งตัว (Deflection), ค่าการยืดตัวสูงสุด (Maximum Strain) และค่าความเค้น (Stress) โดยทำการพิจารณาค่าผลตอบสนองที่เกิดขึ้นกับคานที่รองรับเป็นหลัก เพื่อนำค่าผลตอบสนองต่างๆที่ได้มาคำนวณหาค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor, LDF) ของแรงกระทำจากรถบรรทุกที่มีต่อสะพาน และคานที่รองรับเหล็ก โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 6.1 และ สมการที่ 6.2 (GangsaRao, Sotiroopoulos and Mongi (1994))

$$LDF_{di} = \frac{l_i}{n} \quad (6.1)$$

$$\frac{l_j}{j \cdot l_1}$$

$$LDF_{si} = \frac{K_i}{n} \frac{K_j}{j \cdot l_1} \quad (6.2)$$

เมื่อ  $LDF_{di}$  คือ ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่มีต่อคานที่รองรับตัวที่ (i) อันเนื่องมาจากการโก่งตัว (LDF According to Deflection)

$LDF_{si}$  คือ ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่มีต่อคานที่รองรับตัวที่ (i) อันเนื่องมาจากการโก่งตัว (LDF According to Strain)

$l_i$  คือ ค่าการโก่งตัว (Deflection) ของคานที่รองรับตัวที่ (i)

$l_j$  คือ ค่าการโก่งตัว (Deflection) ของคานที่รองรับตัวอื่นๆ (j)

$K_i$  คือ ค่าการยืดหดตัว (Strain) ของคานที่รองรับตัวที่ (i)

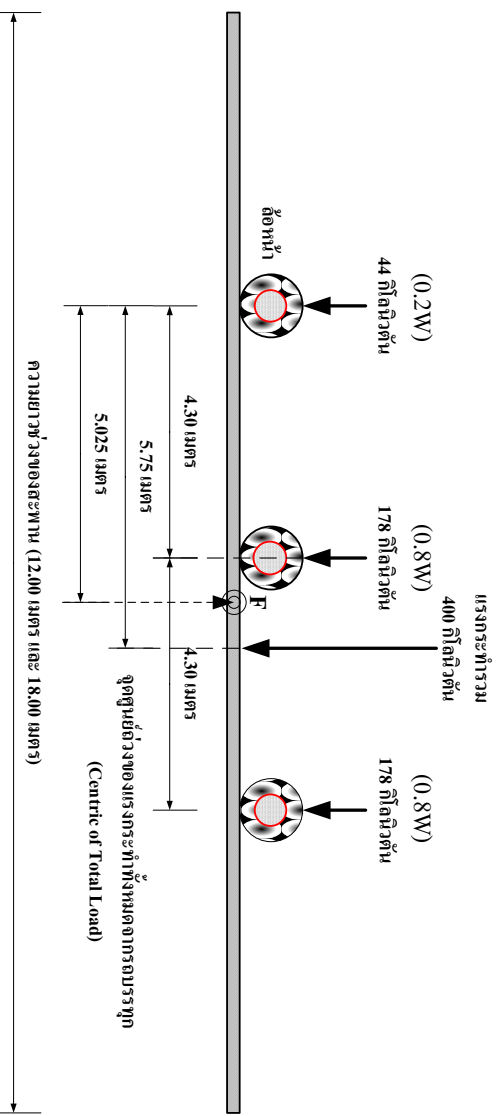
$K_j$  คือ ค่าการยืดหดตัว (Strain) ของคานที่รองรับตัวอื่นๆ (j)

$n$  คือ จำนวนของคานที่รองรับ (Number of stringer)

การคำนวณหาค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor,

LDF) ของน้ำหนักจากรถบรรทุกที่มีต่อสะพานและคาน คำนวณจากค่าการยืดหดตัวสูงสุด (Maximum Strain) หรือค่าการโก่งตัวมากที่สุด (Maximum Deflection) ที่เกิดขึ้นกับคานที่รองรับ ซึ่งค่าของผลตอบสนองดังกล่าวจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งคือ

ตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกบนแบบจำลองของสะพาน (Truck Load Location) โดยแบบจำลองกำหนดให้สะพานตั้งระบบวางอยู่บนที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) ดังนั้นตำแหน่งในการบันทึกผลการตอบสนองจะต้องตรงกับตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด (Maximum Bending Moment)



**รูปที่ 6.3** ตำแหน่งของแรงจากรถบรรทุกที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์สูงสุด (AASHTO HS25)

จากรูปที่ 6.3 แสดงแรงกระทำจากรถบรรทุกผ่านล้อของรถบรรทุกประเภทสามเพลาจำนวน 1 คัน มีความยาวทั้งหมดจากศูนย์กลางล้อหน้าถึงศูนย์กลางล้อหลังของรถบรรทุกเท่ากับ 8.60 เมตร (เป็นรูปแบบของรถบรรทุกที่ใช้ในการศึกษา) ซึ่งแรงกระทำรวม (Total Load) จากรถบรรทุกมีค่าเท่ากับ 400 กิโลนิวตัน กระทำตรงตำแหน่งที่ห่างจากศูนย์กลางของล้อหน้าของรถบรรทุกเท่ากับ 5.75 เมตร ซึ่งตำแหน่งของแรงกระทำรวมที่ก่อให้เกิดค่าโมเมนต์การคดสูงสุดคือตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแรงกระทำรวมกับล้อของรถบรรทุกที่อยู่ใกล้แรงกระทำรวมมากที่สุด (ล้อกลางของรถบรรทุก) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวคือ จุด F ดังแสดงในรูปที่ 5.3 โดยมีระยะอยู่ห่างจากศูนย์กลางของล้อหน้าของรถบรรทุกเท่ากับ 5.025 เมตร หรือห่างจากศูนย์กลางของล้อกลางของรถบรรทุกเท่ากับ 0.725 เมตร

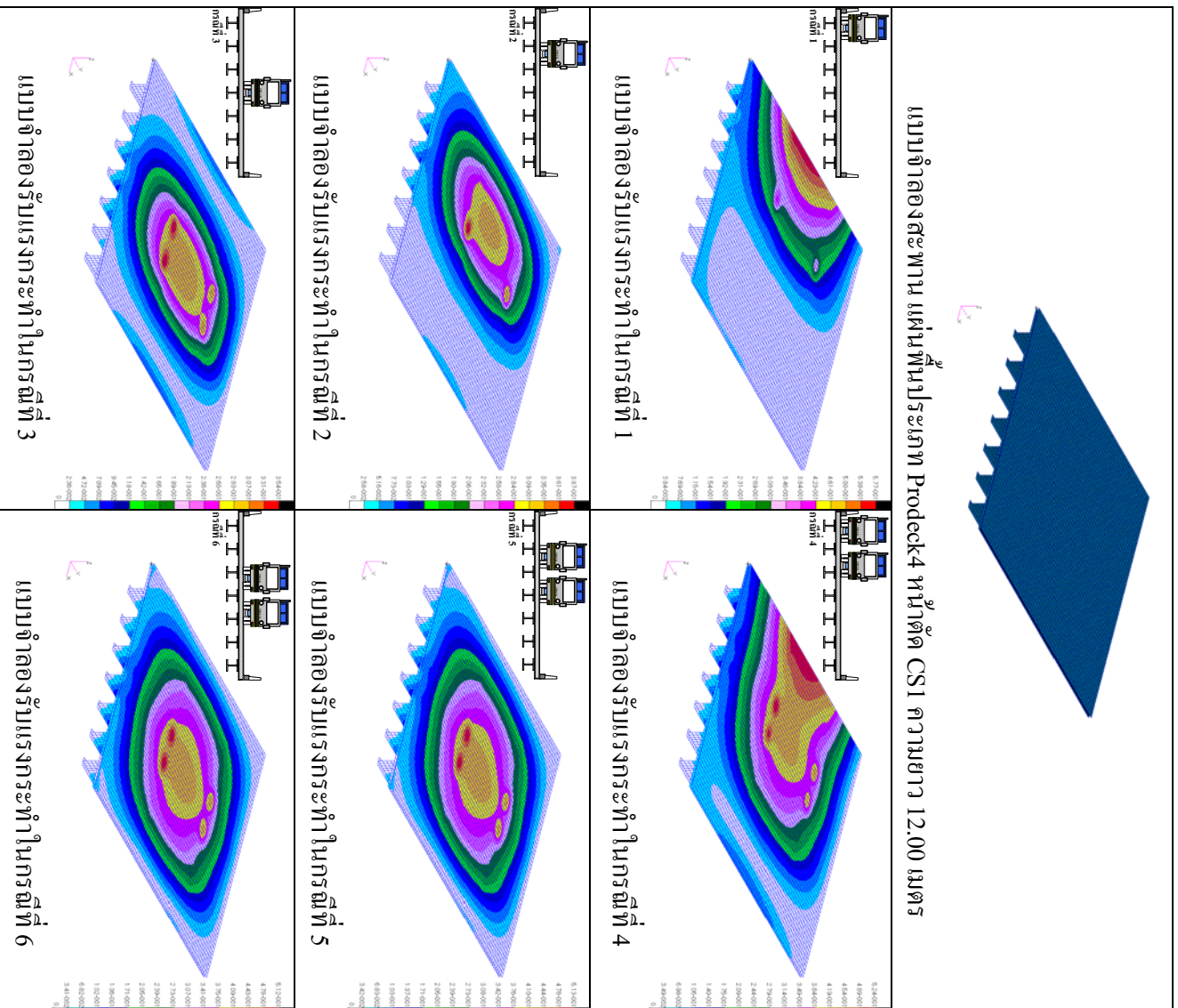
#### 6.4 ผลการศึกษาแบบพารามตริก (Parametric Study Results)

จากหัวข้อ 6.3 แบ่งผลการศึกษาแบบพารามตริกตามพฤติกรรมการงอแบบจำลองเป็นสองส่วน คือ 1) ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ และ 2) ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 6.4.1 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์แบบพารามตริก (Parametric Analysis of Fully Composite Models)

การวิเคราะห์แบบจำลองมีจุดประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์หาค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor, LDF) สำหรับกรณีนี้จำนวนแบบจำลองทั้งหมด 180 แบบจำลอง ประกอบไปด้วยแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นสะพานหน้าตัด Prodeck4 และ Prodeck8 ประเภทละ 90 แบบจำลอง เนื่องจากข้อมูลจากการวิเคราะห์ที่มีจำนวนมาก ดังนั้นผลที่ได้มาจากการวิเคราะห์ในส่วนนี้ทั้งหมดถูกแสดงอยู่ในภาคผนวก ก และ ข สำหรับผลของการวิเคราะห์ที่นำเสนอในส่วนนี้จะเน้นนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ (ค่าการโก่งตัว (Deflection) และ ค่าการยืดหดตัว (Strain)) เพื่อคำนวณหาค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักหรือแรงกระทำจากบรรทุกทุกที่ที่ต่อคานที่รองรับเหล็ก รวมทั้งการวิเคราะห์หลังปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก ตลอดจนการแสดงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักกับปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง

เพื่อเปรียบเทียบผลในการคำนวณค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่มีต่อคานที่รองรับเหล็ก ตามสมการที่ 6.1 ที่ใช้ค่าการโก่งตัว (Deflection) ในการคำนวณ และสมการที่ 6.2 ที่ใช้ค่าการยืดหดตัว (Strain) ในการคำนวณ โดยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่คำนวณได้จากทั้งสองสมการ โดยทำการพิจารณาจากกรณีที่แบบจำลองมีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และหน้าตัดแบบ CSI (แบบจำลองกว้าง 9.30 เมตร และระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร) ความยาวแบบจำลองสะพานเท่ากับ 12.00 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และผลการเปรียบเทียบแสดงในตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองของสะพาน (Prodeck4, CSI - 12, Case1 - Case6)

**ตารางที่ 6.3** การเปรียบเทียบค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก จำนวนจากสมการที่ 6.1 และ 6.2 (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case6)

กรณี ที่	วิธีคำนวณค่า LDF	ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (LDF)						
		คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	เนื่องจากการยืดหด	0.4249	0.3181	0.2008	0.0775	0.0116	-0.0095	-0.0234
	เนื่องจากการโค้งตัว	0.4155	0.3131	0.2011	0.0726	0.0125	0.0090	-0.0239
2	เนื่องจากการยืดหด	0.1576	0.2724	0.2863	0.2012	0.0792	0.0120	-0.0088
	เนื่องจากการโค้งตัว	0.1546	0.2767	0.2846	0.2045	0.0769	0.0137	-0.0110
3	เนื่องจากการยืดหด	0.0161	0.1184	0.2258	0.2805	0.2352	0.1067	0.0174
	เนื่องจากการโค้งตัว	0.0180	0.1095	0.2351	0.2784	0.2380	0.1035	0.0175
4	เนื่องจากการยืดหด	0.2162	0.2036	0.1991	0.1779	0.1348	0.0654	0.0031
	เนื่องจากการโค้งตัว	0.1979	0.2056	0.2086	0.1797	0.1403	0.0648	0.0031
5	เนื่องจากการยืดหด	0.0729	0.1437	0.1853	0.1987	0.1840	0.1464	0.0689
	เนื่องจากการโค้งตัว	0.0712	0.1468	0.1826	0.2033	0.1809	0.1468	0.0684
6	เนื่องจากการยืดหด	0.0740	0.1430	0.1859	0.1982	0.1839	0.1462	0.0689
	เนื่องจากการโค้งตัว	0.0720	0.1466	0.1821	0.2029	0.1808	0.1468	0.0689

หมายเหตุ: เพื่อความกระชับของข้อความ สัญลักษณ์ถูกนำมาใช้ ดังแสดงในรูปที่ 6.4 และตารางที่ 6.3 คือ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case6) ซึ่งแต่ละส่วนถูกค้นคว้าด้วยความหมาย ดังนี้ Prodeck4 หมายถึง แบบจำลองสะพานที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 (แผ่นพื้นสะพานที่วิเคราะห์มี 2 ประเภท คือ Prodeck4 และ Prodeck8), CS หมายถึง หน้าตัดของแบบจำลองสะพาน (รายละเอียดแสดงในตารางที่ 6.1) - 12 หมายถึง ความยาวของแบบจำลอง (การวิเคราะห์ห้มีความยาว 2 ความยาว คือ 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร) และ Case หมายถึง หน้าตัดการบรรทุกที่กระทำบนแบบจำลองในกรณีต่างๆ (รายละเอียดแสดงในตารางที่ 6.2)

เมื่อพิจารณาตารางที่ 6.3 เฉพาะในกรณีที่ 1 (คาน 1 และ คาน 2) พบว่าค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่คำนวณจากสมการที่ 6.2 (เนื่องด้วยการยืดหด) จะมีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่คำนวณจากสมการที่ 6.1 (เนื่องด้วยการโค้งตัว) สำหรับคานตัวที่ 1 (คานตัวริมนอกสุด) ที่ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่คำนวณจาก



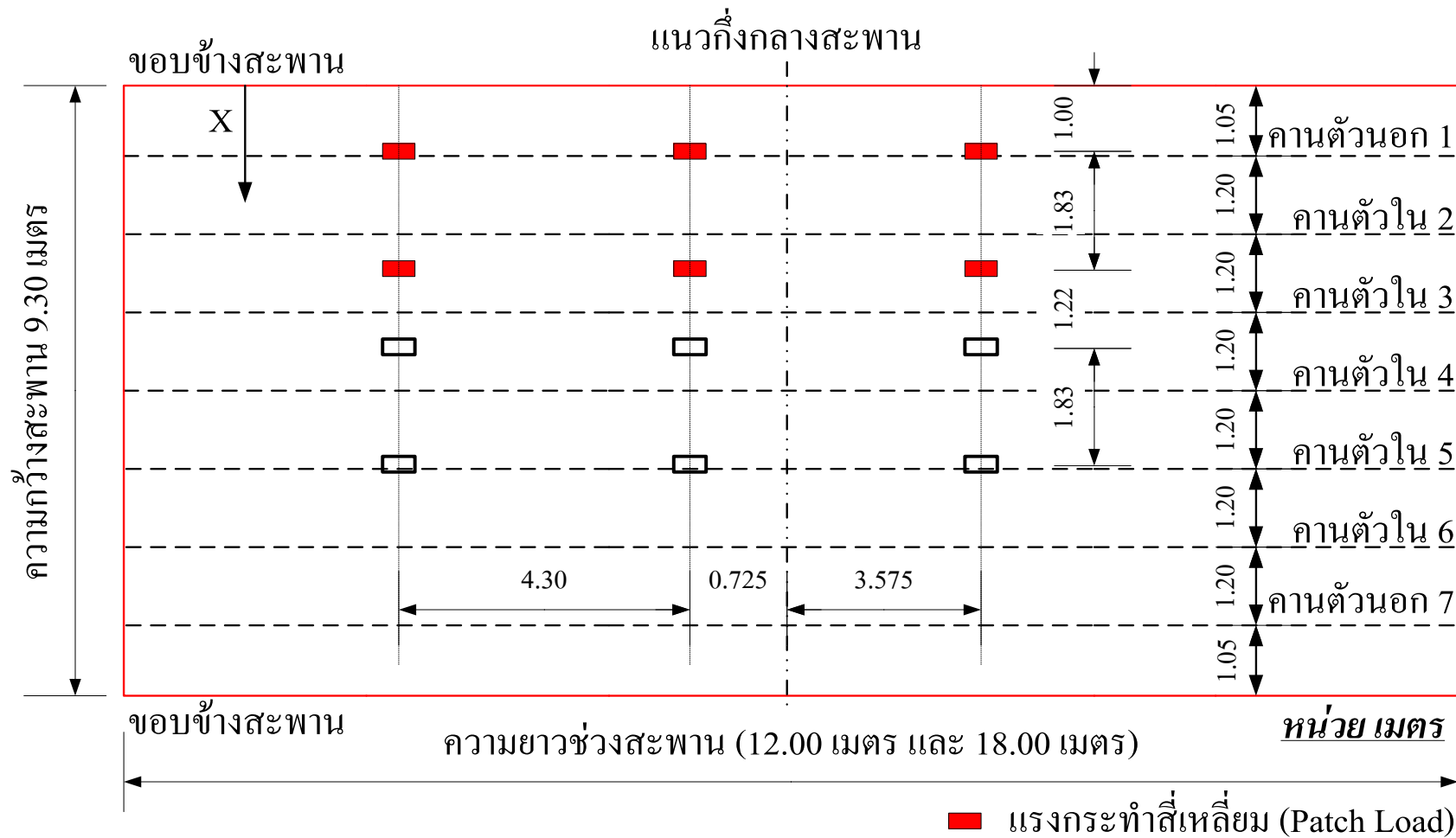
สมการที่ 6.2 มีค่าเท่ากับ 0.4249 ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดในตารางที่ 6.3 และค่าในตารางที่มากที่สุดในลำดับถัดมาคือ 0.4155 ซึ่งคำนวณมาจากสมการที่ 6.1 และในส่วนของแกนตัวที่ 2 (แกนตัวในตัวแรก) ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้จากสมการ 6.2 และ 6.1 มีค่าเท่ากับ 0.3181 และ 0.3131 ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะสัมพันธ์กับกรณีภายนอกที่สุด ด้วยผลลัพธ์ตามมาพบว่าค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักมากที่สุดในการกรณีที่ 1 เกิดขึ้นที่คานตัวรีมนอกสุด (Exterior Girder) และคานตัวในตั้แรก (First Interior girder) ตามลำดับ เพราะฉะนั้นผลการวิเคราะห์ค่า LDF ที่จะนำมาเสนอต่อไป จะนำเสนอค่า LDF ที่คำนวณมาจากสมการ 6.2 เท่านั้น

### ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก

#### 1) ตำแหน่งของรถบรรทุก (Truck Load Position) แบ่งเป็น 2 กรณี คือ

1.1) ตำแหน่งของรถบรรทุกในทิศทางตามแนวยาวของสะพาน ซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้นซึ่งแสดงในรูปแบบที่ 6.5 คือ ตำแหน่งของรถบรรทุกในทิศทางตามแนวยาวของสะพานที่มีผลต่อค่า LDF มากที่สุดคือตำแหน่งที่ทำให้เกิดค่าโมเมนต์การคดสูงสุด (Maximum Bending Moment) เนื่องจากเมื่อรถบรรทุกอยู่ในตำแหน่งที่เกิดค่าโมเมนต์การคดสูงสุด ที่คานรองรับก็จะมีค่าการยึดหดตัวที่มากที่สุดตามไปด้วย ส่งผลให้ค่า LDF ที่คำนวณจากสมการที่ 6.2 มีค่ามากขึ้นไปด้วย

1.2) ตำแหน่งของรถบรรทุกในทิศทางตามแนวขวางของสะพาน โดยพิจารณาจากตารางที่ 6.3 ซึ่งค่า LDF จะมีค่ามากที่สุดเมื่อรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองเฉพาะในกรณีที่ 1 เท่านั้น (จากตารางที่ 6.2 กรณีที่ 1 คือ กรณีที่มีแรงกระทำจากรถบรรทุกเพียงคันเดียวกระทำในทิศทางตามแนวขวางโดยแนวล้อค้ำหนึ่งของรถบรรทุกอยู่ห่างจากขอบค้ำขึ้นเท่ากับ 0.61 เมตร) ดังแสดงในรูปแบบที่ 6.5 และเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของรถบรรทุกเพียงคันเดียวที่กระทำต่อแบบจำลองสะพานในทิศทางตามแนวขวางที่ระยะต่างๆจากขอบทางจะให้ค่า LDF ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยพิจารณาจากตารางที่ 6.4 (ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์โดยรถบรรทุกหนึ่งคัน (รูปที่ 6.5 รถบรรทุกหนึ่งคันแทนด้วย สีเหลี่ยมทึบ) มีการเปลี่ยนตำแหน่งของแรงกระทำในทิศทางตามแนวขวางของสะพาน โดยมีการเลื่อนค้ำหนึ่งจากขอบข้างสะพานค้ำหนึ่งไปที่ระยะต่างๆ (รูปที่ 6.5 กำหนดให้ X คือระยะห่างจากขอบสะพานค้ำหนึ่งถึงแนวกลางรถบรรทุกในทิศทางตามแนวขวางของสะพาน) และทำการเปรียบเทียบค่า LDF เนื่องจากมีการเปลี่ยนตำแหน่งการกระทำของรถบรรทุก)



รูปที่ 6.5 แปลนของแรงกระทำจากล้อรถบรรทุกต่อพื้นสะพาน

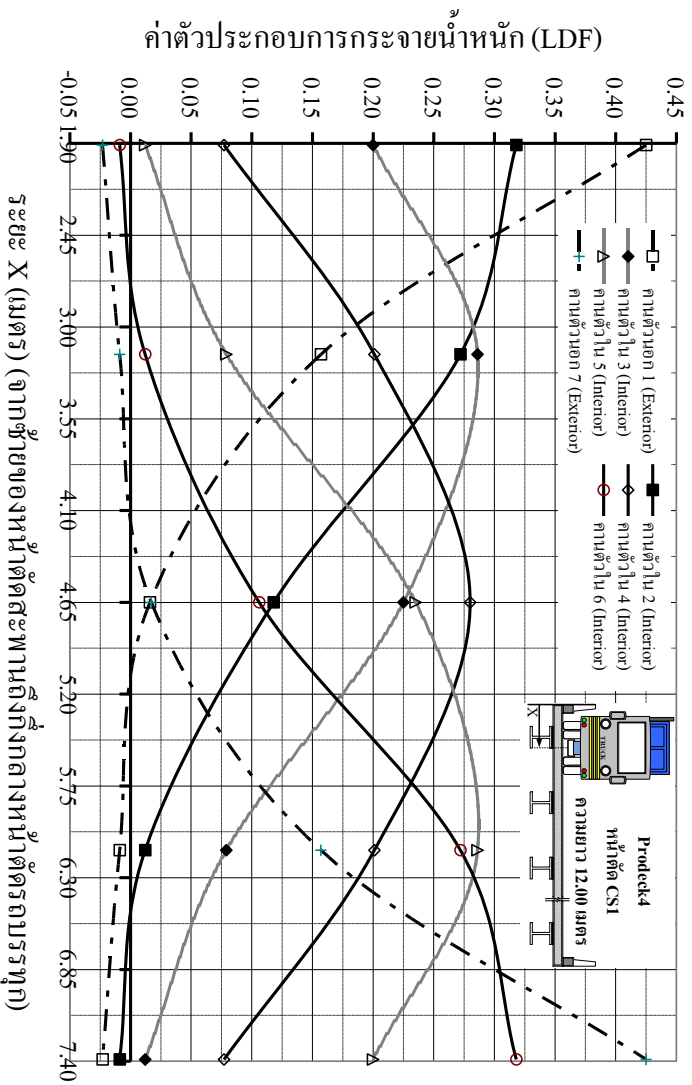
ในทิศทางตามแนวยาวและทิศทางตามแนวขวาง ส่งผลให้เกิดค่า LDF ที่มากที่สุด (CS1, Case1 และ Case4)

ตารางที่ 6.4 ค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆกัน (Prodeck4, CS1 - 12, Case1)

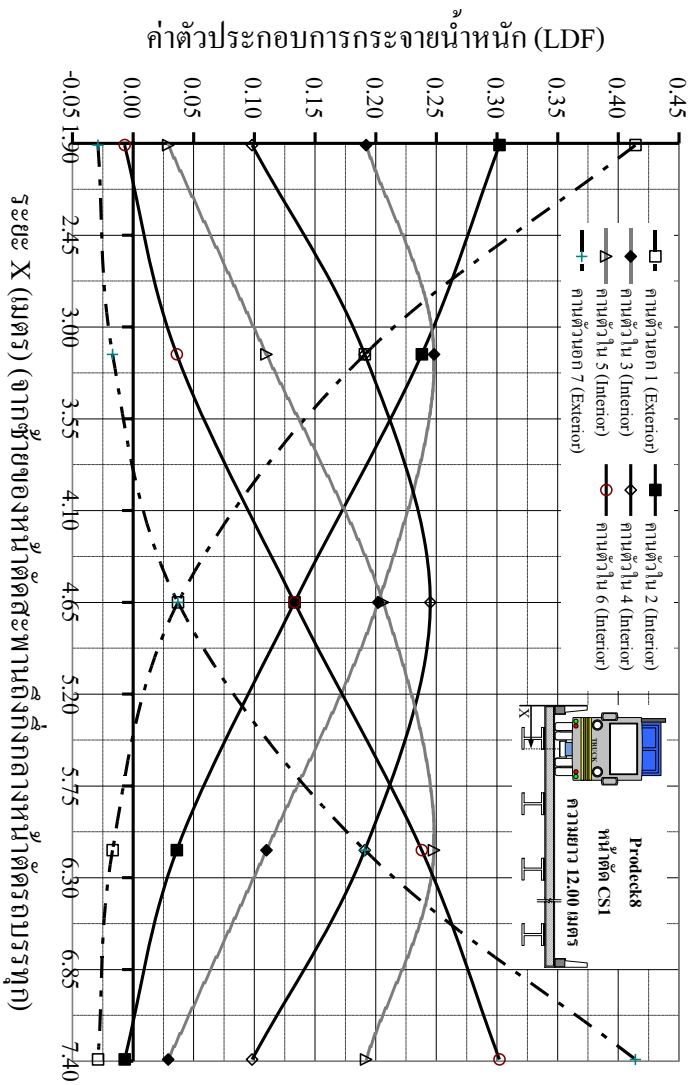
Prodeck4 Fully Composite (หน้าตัด CS1 กรณีที่ 1)	ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (LDF) ที่ระยะ X (เมตร)					
	คานตัวนอก 1 (Exterior)	1.910	3.165	4.650	6.135	7.390
คานตัวใน 2 (Interior)	0.425	0.157	0.016	-0.009	-0.023	
คานตัวใน 3 (Interior)	0.318	0.272	0.118	0.012	-0.009	
คานตัวใน 4 (Interior)	0.200	0.286	0.225	0.079	0.012	
คานตัวใน 5 (Interior)	0.077	0.201	0.280	0.201	0.077	
คานตัวใน 6 (Interior)	0.012	0.079	0.235	0.286	0.200	
คานตัวใน 6 (Interior)	-0.009	0.012	0.106	0.272	0.318	
คานตัวนอก 7 (Exterior)	-0.023	-0.009	0.017	0.157	0.425	

จากตารางที่ 6.4 พบว่าค่า LDF มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.425 เมื่อตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัดของรบบรทุกทุกหนึ่งคันท่างจากขอบสะพานด้านซ้ายเท่ากับ 1.91 เมตร และ 7.39 เมตร (ซึ่งก็คือระยะห่างของล้อรบบรทุกจากขอบคันทันเท่ากับ 0.61 เมตร ทั้งทิศทางด้านซ้ายและทิศทางด้านขวาของสะพานตามลำดับ) ส่วนในกรณีล้อรบบรทุกในตำแหน่งอื่น (X เท่ากับ 3.165, 4.650 และ 6.135) ค่า LDF มีค่าน้อยกว่า

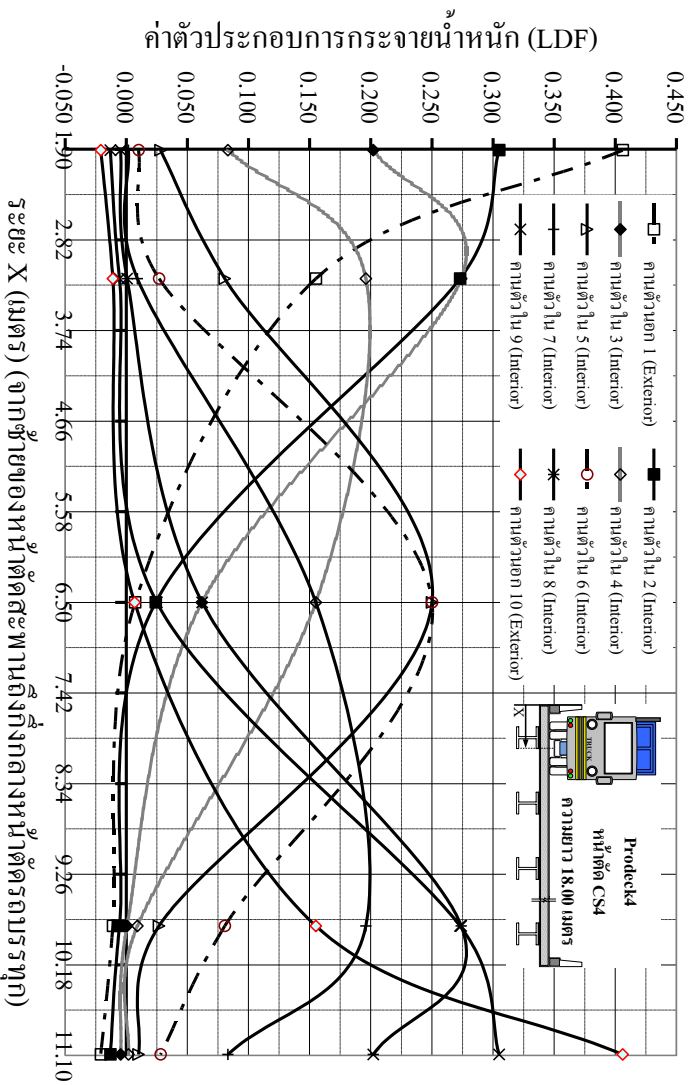
จากรูปที่ 6.6 ถึง 6.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่เกิดจากแรงกระทำของรบบรทุกทุกหนึ่งคันทัน กับระยะห่างจากขอบสะพานด้านซ้ายจนถึงแนวกึ่งกลางของหน้าตัดรบบรทุกของแบบจำลองสะพานที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 กรณีที่แบบจำลองมีหน้าตัดแบบ CS1 และ CS4 ที่มีความยาวแบบจำลองเท่ากับ 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร ตามลำดับ พบว่าค่า LDF มีค่ามากที่สุดเมื่อรบบรทุกอยู่ตำแหน่งที่มีแรงกระทำต่อพื้นสะพานในกรณีที่ 1 ซึ่งค่า LDF ที่มากที่สุดเกิดที่คานตัวนอกริมสุด และค่า LDF ที่มีค่ามากที่สุดรองลงมาเกิดขึ้นที่คานตัวในตัวแรก ในส่วนของหน้าตัดแบบ CS2, CS3, CS5 และ CS6 ก็มีผลเช่นเดียวกัน ดังนั้นตำแหน่งของแรงกระทำจากรบบรทุกในทิศทางตามขวางมีผลต่อค่า LDF ที่เกิดขึ้น โดยทำการกระจายน้ำหนักที่เกิดขึ้นกับคานตัวนอกริมสุดและคานตัวในตัวแรกมากที่สุดและมากรองลงมาตามลำดับ



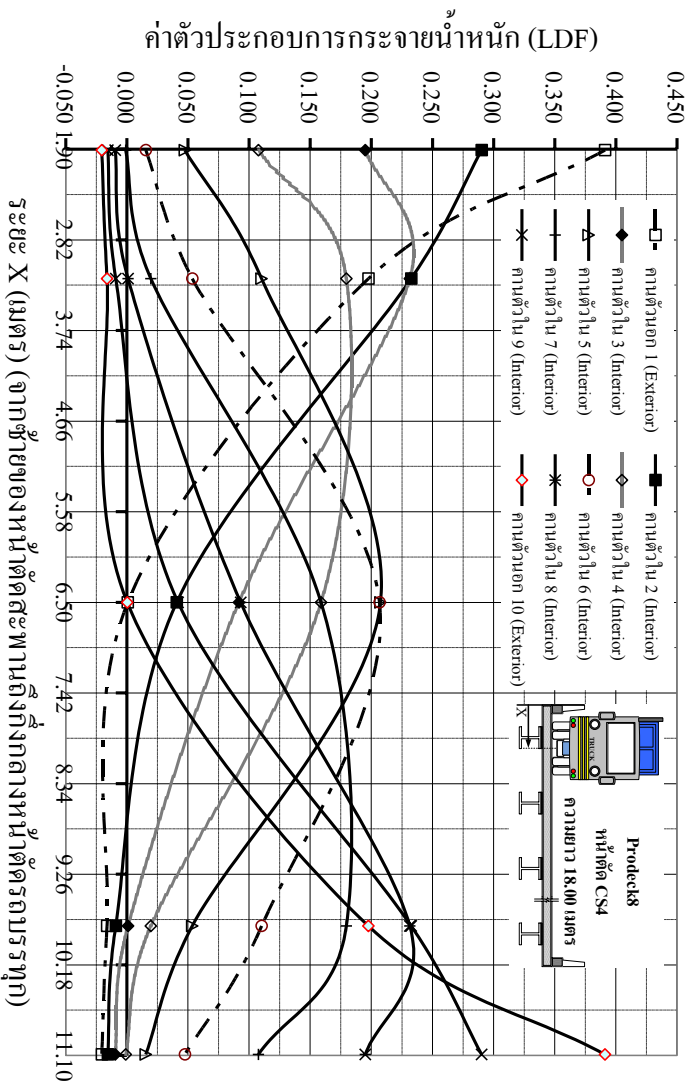
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1)



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS1 - 12, Case1)

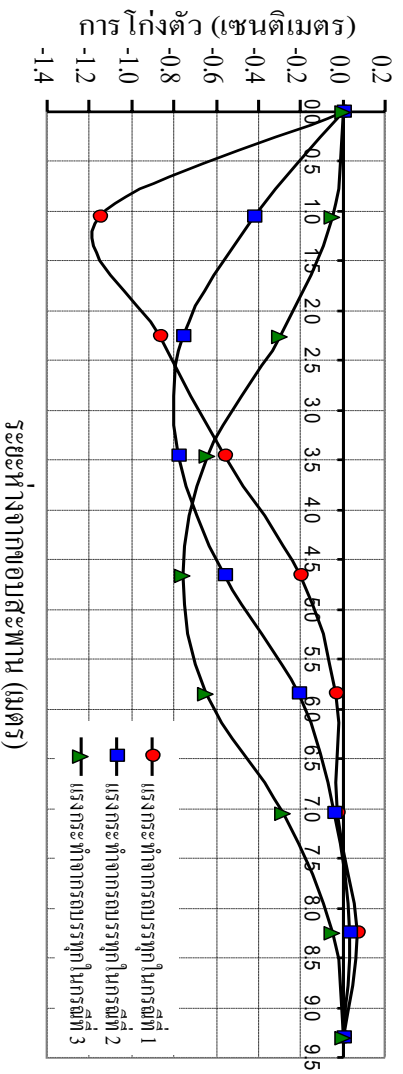


รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS4 - 18, Case1)

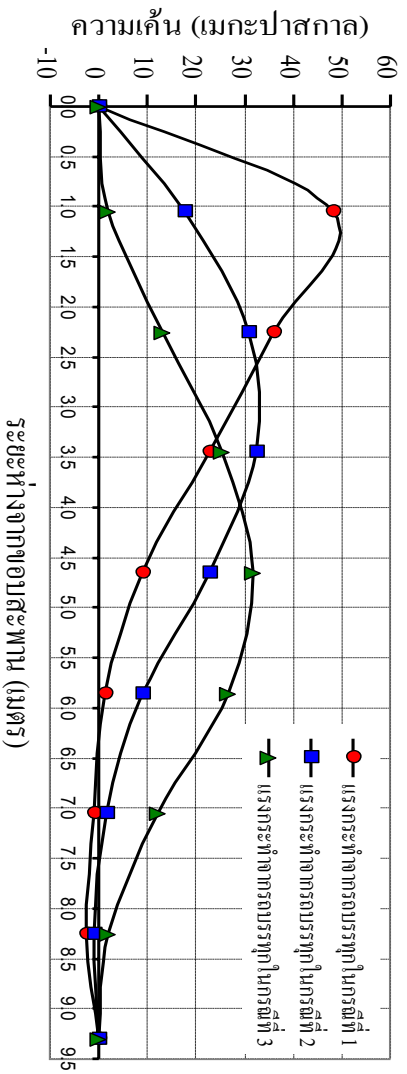


รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS4 - 18, Case1)

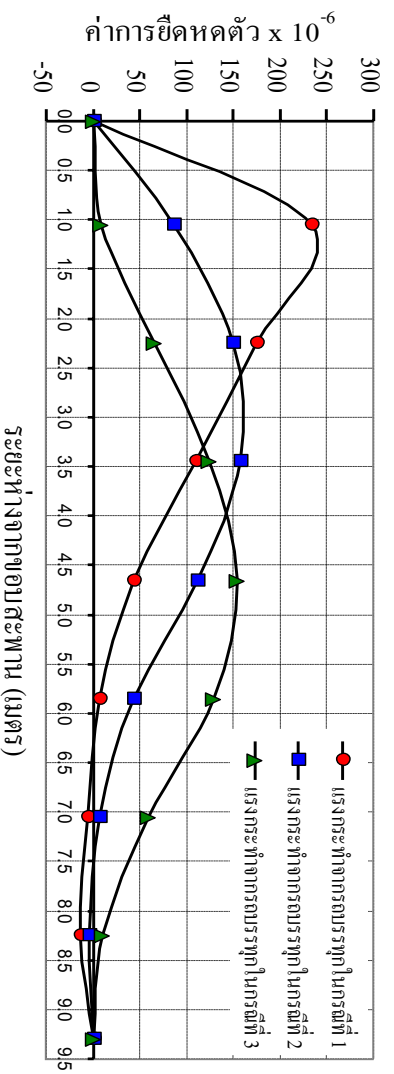




รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)



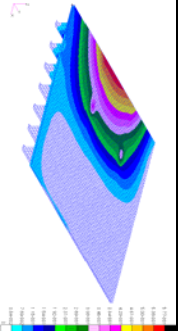
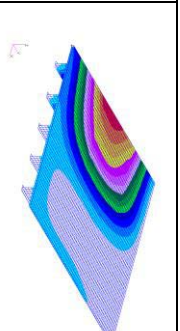
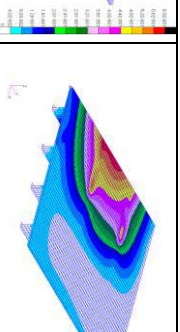
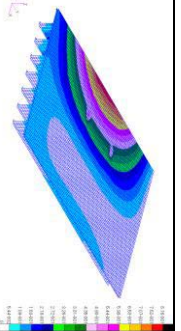
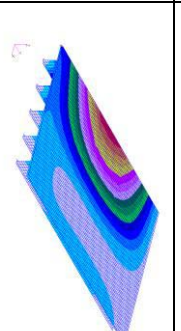
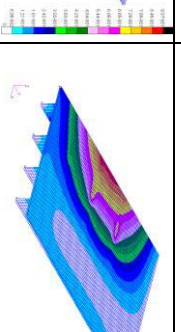
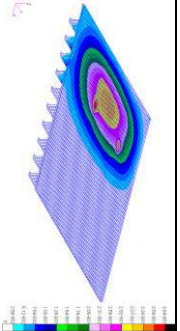
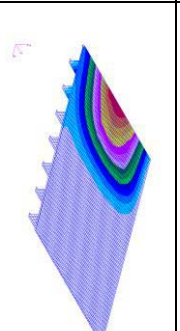
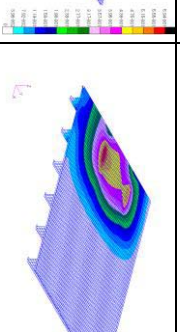
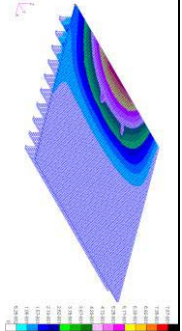
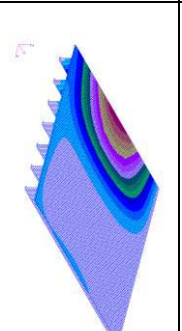
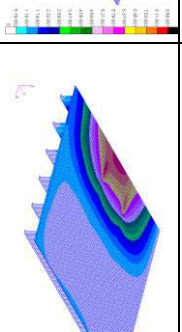
รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการยึดหดตัวที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1 - 12, Case1 - Case3)

พบว่าเมื่อมีแรงกระทำจากระบบข้อต่อแบบจำลองสะพานในกรณีที่ 1 ทำให้ค่าผลตอบแทนที่ได้จากค่ารับแต่ละตัวมีค่ามากที่สุดและค่าที่มากที่สุดเกิดขึ้นกับค่าด้านนอก ในรูปที่ 6.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวกับระยะห่างจากขอบสะพาน (หรือระยะที่แสดงตำแหน่งของค่ารับแต่ละตัว) พบว่าค่าการโก่งตัวมากที่สุดเกิดขึ้นที่ด้านนอกและมีค่าเท่ากับ 1.15 เซนติเมตร ซึ่งเกิดจากแรงกระทำในกรณีที่ 1 ส่งผลให้การคำนวณค่า LDF จากสมการที่ 6.1 หรือ 6.2 มีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้นจากตารางที่ 6.3 ถึง 6.5 และรูปที่ 6.6 ถึง 6.12 ที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่า LDF ก็คือตำแหน่งของแรงกระทำจากระบบรตุก โดยตำแหน่งของแรงกระทำจากระบบรตุกที่มีผลต่อค่า LDF มากที่สุดคือแรงกระทำจากระบบรตุกเพียงคนเดียวกระทำต่อแบบจำลองสะพานที่ระยะห่างจากขอบคันทันด้านหนึ่งจนถึงขอบของล้อรถบรรทุกด้านที่ใกล้เคียงกับระยะเท่ากับ 0.61 เมตร และค่าที่รองรับซึ่งได้รับผลจากแรงในกรณีที่ 1 มากที่สุดคือ คานที่รองรับตัวนอกริมสุด (Exterior Girder) และได้รับผลรองลงมาคือคานที่รองรับตัวในตัวแรก (First Interior Girder) เพราะฉะนั้นจากข้อสรุปนี้ทำให้การแสดงผลจากการวิเคราะห์จะมุ่งเน้นผลอันเนื่องมาจากแรงกระทำในกรณีที่ 1 รวมถึงผลที่เกิดขึ้นกับคานตัวนอกริมสุด และคานตัวในตัวแรกเป็นหลัก



## 2) ความกว้างและความยาวของแบบจำลอง (Width and Length)

แบบจำลองสะพานที่ใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ในบทนี้ประกอบด้วยแบบจำลองที่มีขนาดหน้าตัดกว้าง 9.30 เมตร และ 13.00 เมตร ในส่วนของความยาวมีค่าเท่ากับ 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร โดยในส่วนของนี้จะแสดงความแตกต่างของ LDF เนื่องจากจากความแตกต่างของขนาดความกว้างและความยาวของแบบจำลอง โดยแสดงผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยแรงกระทำเฉพาะกรณีที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.13 และตารางที่ 6.6 ซึ่งแสดงผลการคำนวณค่า LDF จากการวิเคราะห์ ภายใต้แรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกหน้าตัดของแบบจำลอง โดยแสดงเฉพาะคานตัวนอกirimสุดและคานตัวในตัวแรก

แบบจำลองที่ถูกวิเคราะห์ในกรณีรับแรงในกรณีที่ 1 ที่หน้าตัดและความยาวแตกต่างกัน		
 CS1 ความยาว 12.00 เมตร	 CS2 ความยาว 12.00 เมตร	 CS3 ความยาว 12.00 เมตร
 CS1 ความยาว 18.00 เมตร	 CS2 ความยาว 18.00 เมตร	 CS3 ความยาว 18.00 เมตร
 CS4 ความยาว 12.00 เมตร	 CS5 ความยาว 12.00 เมตร	 CS6 ความยาว 12.00 เมตร
 CS4 ความยาว 18.00 เมตร	 CS5 ความยาว 18.00 เมตร	 CS6 ความยาว 18.00 เมตร

**รูปที่ 6.13** ผลการวิเคราะห์แบบจำลอง ภายใต้แรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกหน้าตัดของแบบจำลอง (CS1 ถึง CS6) และทุกความยาว (ของแบบจำลองแผ่นพื้นหน้าตัด Prodeck4)

**ตารางที่ 6.6** ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เมื่อมีแรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกขนาดหน้าตัดของแบบจำลอง ผนวหะคานตัวนอกและคานตัวในตัวแรก

กรณีที่ 1		ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor)			
CS	สะพานยาว (เมตร)	แผ่นพื้นประเภท Prodeck4		แผ่นพื้นประเภท Prodeck8	
		คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก	คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก
CS1	12.00	0.4249	0.3181	0.4143	0.3024
	18.00	0.4158	0.3105	0.4031	0.2978
CS2	12.00	0.5159	0.3762	0.5100	0.3447
	18.00	0.5153	0.3715	0.5021	0.3431
CS3	12.00	0.6209	0.3640	0.5992	0.3449
	18.00	0.6168	0.3635	0.5980	0.3462
CS4	12.00	0.4161	0.3138	0.4036	0.2968
	18.00	0.4062	0.3058	0.3910	0.2901
CS5	12.00	0.5073	0.3759	0.4962	0.3370
	18.00	0.4985	0.3669	0.4861	0.3355
CS6	12.00	0.5629	0.3889	0.5529	0.3516
	18.00	0.5518	0.3805	0.5415	0.3524

ตารางที่ 6.6 แสดงค่า LDF เมื่อมีน้ำหนักจากรถบรรทุกกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกขนาดหน้าตัดที่วิเคราะห์ (CS1-CS6) สำหรับแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 โดยพิจารณาเฉพาะค่า LDF ที่เกิดกับคานตัวนอกที่ริมสุด และคานตัวในตัวแรก พบว่าส่วนใหญ่ค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองสะพานที่มีความยาว 12.00 เมตร มีค่ามากกว่าค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองสะพานที่มีความยาว 18.00 เมตร ในทุกขนาดของหน้าตัด

ดังนั้นเมื่อพิจารณาความกว้างของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าคงที่ (จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การกำหนดหน้าตัดแบบจำลองให้เป็นแบบ CS1 ถึง CS6 ขึ้นอยู่กับความกว้างของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับแต่ละตัว) เพื่อพิจารณาผลที่เกิดกับค่า LDF เมื่อความยาวของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลง อย่างเช่น แบบจำลองสะพานที่มีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และมีหน้าตัดของแบบจำลองแบบ CS1 เมื่อพิจารณาเฉพาะค่า LDF ที่เกิดกับคานตัวนอก พบว่าค่า LDF ของแบบจำลองที่มีความยาว 12.00 เมตร มีค่าเท่ากับ

0.4249 และค่า LDF ของแบบจำลองที่มีความยาว 18.00 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.4158 ซึ่งค่า LDF ที่แตกต่างกันเท่ากับ 2.14% ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า LDF ทั้งหมดจากตารางที่ 6.6 ในกรณีที่มีความกว้างของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าคงที่ โดยความยาวของแบบจำลองเพิ่มขึ้น (12.00 เมตร เป็น 18.00 เมตร) ถูกแสดงในตารางที่ 6.7

**ตารางที่ 6.7** ค่าความแตกต่างของค่า LDF ของแบบจำลองที่มีความยาว 12.00 เมตร และ 18.00 เมตร (กรณีความกว้างของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าคงที่)

กรณีที่ 1	ค่าความแตกต่างของตัวประกอบการกระจาย (Load Distribution Factor)			
	แผ่นพื้นประเภท Prodeck4		แผ่นพื้นประเภท Prodeck8	
CS (คงที่)	คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก	คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก
CS1	2.14%	2.39%	2.69%	1.52%
CS2	0.11%	1.26%	1.57%	0.47%
CS3	0.65%	0.16%	0.21%	-0.37%
CS4	2.38%	2.56%	3.10%	2.24%
CS5	1.74%	2.39%	2.03%	0.44%
CS6	1.98%	2.18%	2.04%	-0.22%

ในทำนองเดียวกัน จากตารางที่ 6.6 เมื่อพิจารณาให้ความยาวของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าคงที่ เพื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้นค่า LDF เมื่อความกว้างของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลง อย่างเช่น แบบจำลองของสะพานที่มีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และมีความยาวของแบบจำลองสะพานเท่ากับ 12.00 เมตร เมื่อพิจารณาเฉพาะค่า LDF ที่เกิดขึ้นคานตัวนอก พบว่าค่า LDF เมื่อหน้าตัดของแบบจำลองแบบ CSI (แบบจำลองกว้าง 9.30 เมตร และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร) มีค่าเท่ากับ 0.4249 และค่า LDF เมื่อหน้าตัดของแบบจำลองแบบ CS4 (แบบจำลองกว้าง 13.00 เมตร และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร) มีค่าเท่ากับ 0.4161 ซึ่งมีค่า LDF ที่แตกต่างกันเท่ากับ 2.07% ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า LDF ทั้งหมดจากตารางที่ 6.6 ในกรณีที่ความยาวของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าคงที่ โดยความกว้างของแบบจำลองเพิ่มขึ้น (9.30 เมตร เป็น 13.00 เมตร) ถูกแสดงในตารางที่ 6.8

**ตารางที่ 6.8** ค่าความแตกต่างของค่า LDF ของแบบจำลองที่มีความกว้าง 9.30 เมตร และ 13.00 เมตร (กรณีความยาวของแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าคงที่)

กรณีที่ 1	ค่าความแตกต่างของตัวประกอบการกระจาย (Load Distribution Factor)			
	แผ่นพื้นประเภท Prodeck4		แผ่นพื้นประเภท Prodeck8	
L, S (คงที่) (เมตร)	คานตัวนอก	คานตัวในครั้งแรก	คานตัวนอก	คานตัวในครั้งแรก
12.00, 1.20	2.07%	1.35%	2.59%	1.87%
18.00, 1.20	2.32%	1.52%	3.00%	2.59%
12.00, 1.83	1.67%	0.10%	2.72%	2.24%
18.00, 1.83	3.27%	1.24%	3.18%	2.21%
12.00, 2.29	9.33%	-6.84%	7.74%	-1.94%
18.00, 2.29	10.54%	-4.68%	9.43%	-1.79%

จากตารางที่ 6.7 พบว่าส่วนใหญ่เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ LDF มีค่าลดลงเมื่อความยาวของแบบจำลองเปลี่ยนจาก 12.00 เมตร เป็น 18.00 เมตร โดยมีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุดเท่ากับ 3.10 และ 0.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และโดยเฉลี่ยค่าเท่ากับ 1.89 เปอร์เซ็นต์ (ไม่นำค่าที่น้อยกว่า 1.00 เปอร์เซ็นต์ มาพิจารณา) และเมื่อพิจารณาตารางที่ 6.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของ LDF ส่วนใหญ่มีค่าลดลง เมื่อความยาวของแบบจำลองเปลี่ยนจาก 9.30 เมตร เป็น 13.00 เมตร โดยมีค่ามากที่สุดและน้อยที่สุด เท่ากับ 10.54 และ 0.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 2.42 เปอร์เซ็นต์ (ไม่นำค่าที่น้อยกว่า 1.00 เปอร์เซ็นต์ มาพิจารณา) จากผลข้างต้นพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างหรือความยาวของแบบจำลองทำให้ค่า LDF มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีค่าที่ลดลงเฉลี่ยประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงที่นี้ไม่มาก

อย่างไรก็ตามค่าความแตกต่างของ LDF บางค่ามีค่าสูงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ (จากตารางที่ 6.6 กรณีที่แบบจำลองของสะพานที่มีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และมีความยาวของแบบจำลองสะพานเท่ากับ 18.00 เมตร เมื่อพิจารณาเฉพาะค่า LDF ที่เกิดกับคานตัวนอกพบว่าค่า LDF เมื่อหน้าตัดของแบบจำลองแบบ CS3 มีค่าเท่ากับ 0.6168 และค่า LDF เมื่อหน้าตัดของแบบจำลองแบบ CS6 มีค่าเท่ากับ 0.5518 ซึ่งมีค่า LDF ที่แตกต่างกันเท่ากับ 10.54 เปอร์เซ็นต์ที่เกิดกับคานตัวนอก ของ Prodeck4 ดังแสดงในตารางที่ 6.8 ในกรณีที่แบบจำลองมีความยาว 18.00 เมตร และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 2.29 เมตร) จึงจำเป็นต้องนำมาพิจารณา

### 3) ประเภทแผ่นพื้นของแบบจำลอง (Prodeck4 และ Prodeck8)

จากตารางที่ 6.6 เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า LDF ในกรณีของประเภทแผ่นพื้นของแบบจำลองที่แตกต่างกัน (Prodeck4 และ Prodeck8) พบว่าในกรณีที่แผ่นพื้นของแบบจำลองเป็น Prodeck4 จะมีค่า LDF ที่สูงกว่าในกรณีที่แผ่นพื้นของแบบจำลองเป็น Prodeck8 เมื่อเปรียบเทียบที่ตำแหน่งงานที่รองรับเดียวกัน (ค่า LDF ที่มากที่สุดเกิดขึ้นตรงตำแหน่งของคานารองรับตัวนอก) ซึ่งค่าความแตกต่างแสดงสรุปไว้ในตารางที่ 6.9 ในกรณีที่แบบจำลองสะพานมีความยาวเท่ากับ 12.00 เมตร ประเภทของแผ่นพื้นมีผลต่อค่า LDF ที่เกิดขึ้น ทั้งคานาค้นวอกตัวริมและคานาตัวในค้ำวแรก แต่แนวโน้มจะมีผลต่อคานาตัวในมากกว่า และมีผลเช่นเดียวกันในกรณีที่แบบจำลองสะพานมีความยาวเท่ากับ 18.00 เมตร

**ตารางที่ 6.9** ค่าความแตกต่างของค่า LDF ของแบบจำลองสะพานที่มีหน้าตัดประเภท Prodeck4 และ Prodeck8

CS	กรณีที่ 1	ค่าความแตกต่างของตัวประกอบกระจาย (Load Distribution Factor)	
		สะพาน	(คงที่)
CS1	ยาว (เมตร)	คานาค้นวอก	คานาค้นวแรก
	12	2.49%	4.94%
CS2	18	3.05%	4.09%
	12	1.14%	8.37%
CS3	18	2.56%	7.64%
	12	3.49%	5.25%
CS4	18	3.05%	4.76%
	12	3.00%	5.42%
CS5	18	3.74%	5.13%
	12	2.19%	10.35%
CS6	18	2.49%	8.56%
	12	1.78%	9.59%
	18	1.87%	7.39%

#### 4) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับแต่ละตัว (Girder Spacing)

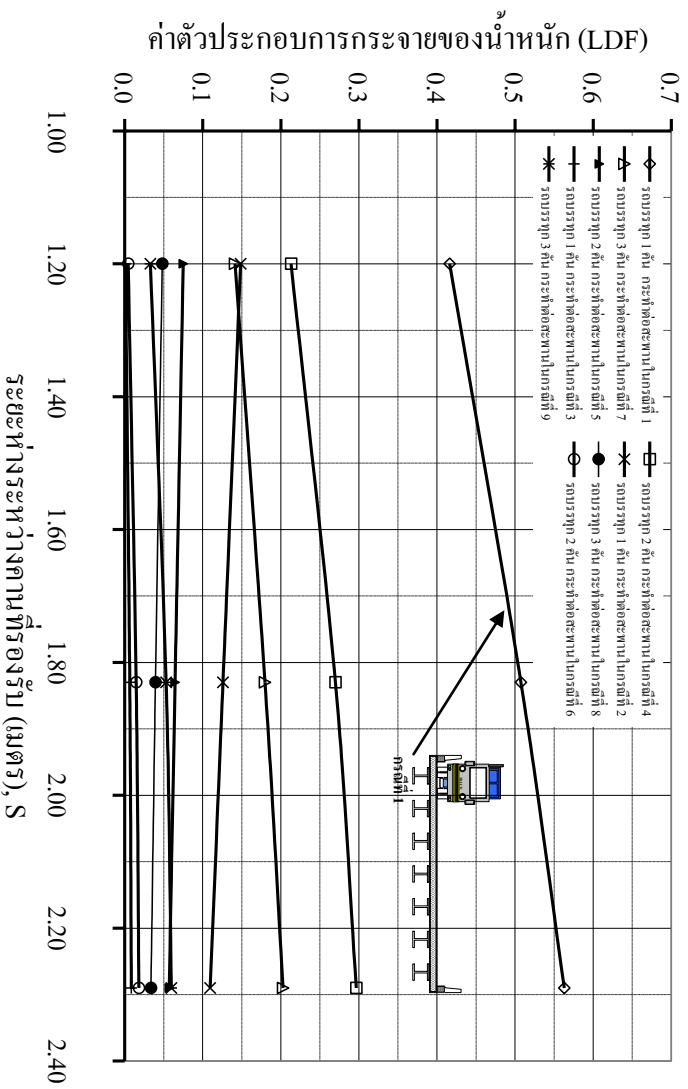
ในการสร้างแบบจำลองที่มีหน้าตัดแบบ CS1 ถึง CS6 ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing) มีค่า 1.22 เมตร, 1.83 เมตร และ 2.29 เมตร ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ค่า LDF มีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 6.10 (แสดงเฉพาะค่า LDF ของแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 ที่เกิดกับคานตัวนอก (Exterior Girder))

**ตารางที่ 6.10** ค่าความแตกต่างของค่า LDF เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing) มีการเปลี่ยนแปลง

กรณีที่ 1		ค่าความแตกต่างของตัวประกอบการกระจาย (Load Distribution Factor)	
ยาว (เมตร)	ระยะห่าง (เมตร)	เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีการเปลี่ยนแปลง	% ความแตกต่าง
12.00	CS1	0.4249	-
	CS2	0.5159	21.42 %
	CS3	0.6209	20.35 %
18.00	CS4	0.4158	-
	CS5	0.5153	23.93 %
	CS6	0.6168	19.70 %

หมายเหตุ: เพอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่แสดงในตาราง 6.10 คำนวณโดยนำค่า LDF ที่แตกต่างกัน (เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีค่าเพิ่มขึ้น) เทียบกับค่า LDF ของแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับที่น้อยกว่า

ค่าความแตกต่างของ LDF เนื่องมาจากค่าระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีการเปลี่ยนแปลง (เช่น เมื่อค่าระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มจาก 1.20 เมตร เป็น 1.83 เมตร ในการที่แบบจำลองมีความยาว 12.00 เมตร ทำให้ค่า LDF เพิ่มขึ้นจาก 0.4249 เป็น 0.5159 หรือมีการเพิ่มขึ้น 21.42 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่า LDF เท่ากับ 0.4249) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยการเพิ่มขึ้นของค่า LDF ประมาณ 21.35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปัจจัยอื่นที่มีผลกับค่า LDF พบว่าค่าความแตกต่างของ LDF นั้นเนื่องจากค่าระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเปลี่ยนแปลงนั้นมีผลต่อค่า LDF มากที่สุด นอกจากนี้สามารถพิจารณาในรูปที่ 6.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็กแต่ละตัว (Girder Spacing)

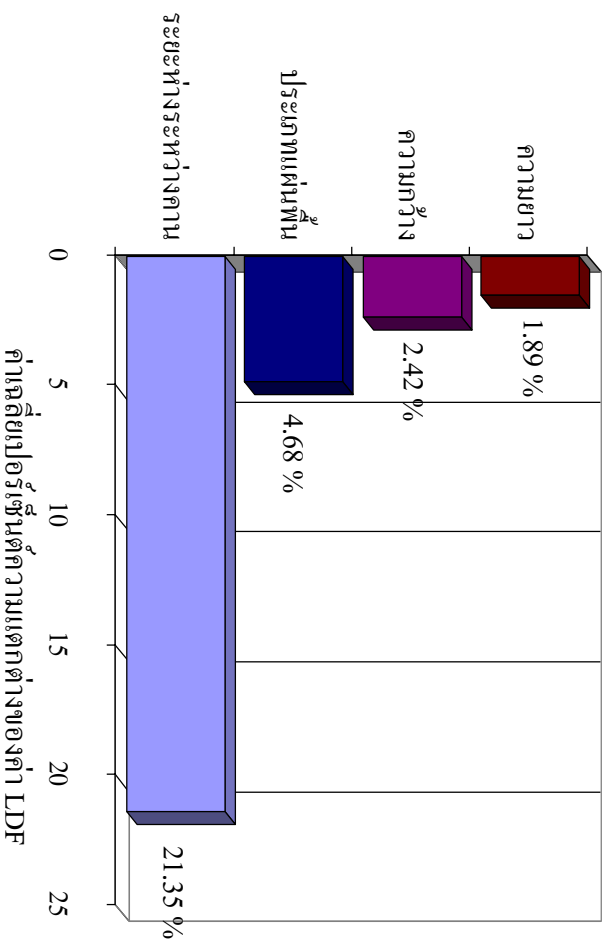


**รูปที่ 6.14** ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่คานตัวนอก (Exterior Girder) ของแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 มีความกว้าง 13.00 เมตร และความยาว 12.00 เมตร

ในรูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นว่าจำนวนและตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลองและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีผลต่อค่า LDF มากที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น นอกจากนี้ลักษณะความสัมพันธ์กล่าวสำหรับกรณีคานตัวใน (Interior Girder) ของแบบจำลองที่มีหน้าตัด Prodeck4 และ Prodeck8 ก็คล้ายคลึงกัน

จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (LDF) ข้างต้น ด้วยการศึกษาแบบพารามตริก (Parametric Study) ของแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composites) สามารถแสดงสรุปจำแนกปัจจัยที่มีผลต่อค่า LDF จากปัจจัยที่มีผลมากที่สุดน้อยตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6.15 ต่อไปนี้

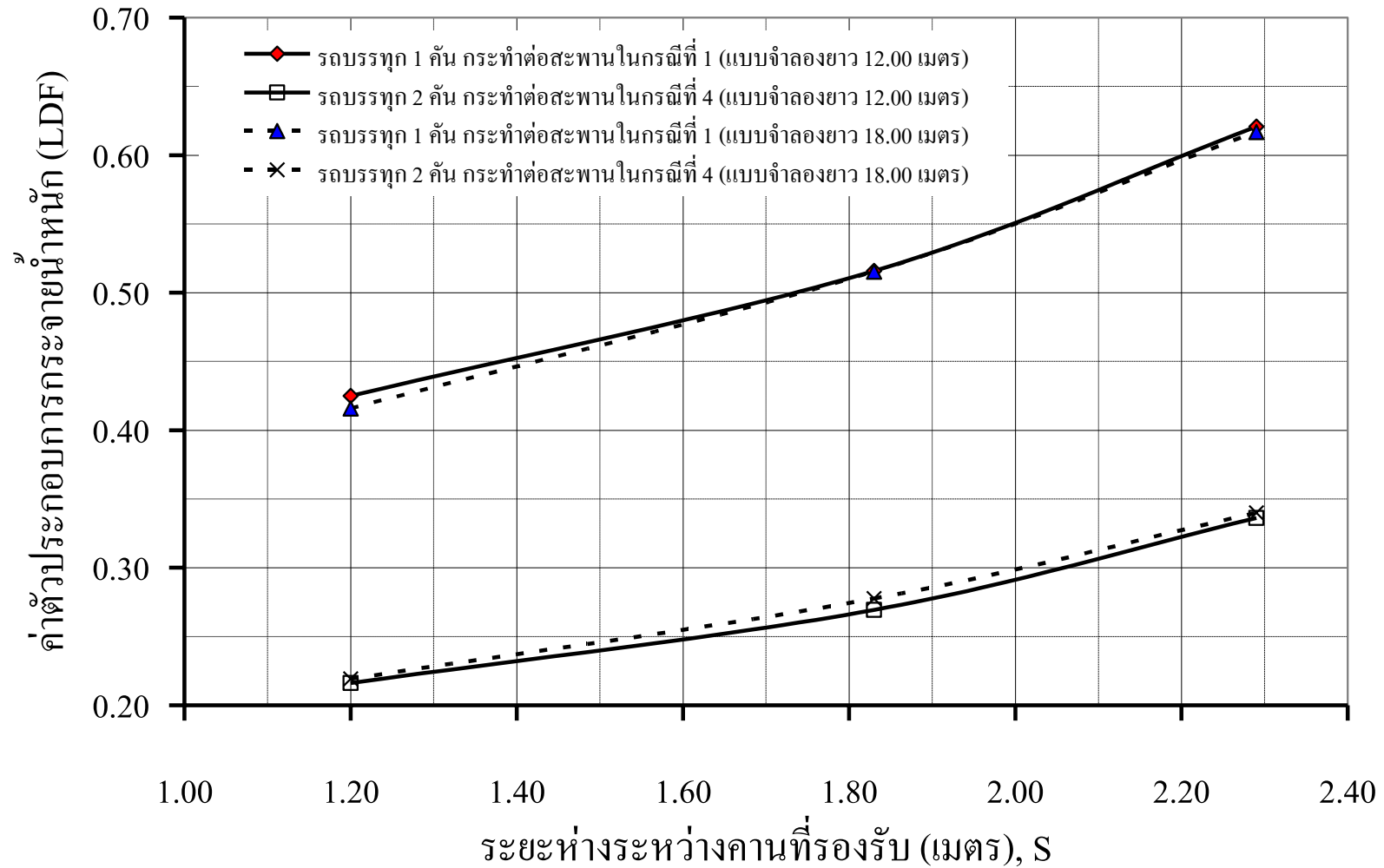
- 1) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็ก (Girder Spacing, S)
- 2) จำนวนหรือตำแหน่งของแรงจากรถบรรทุก (Number of Lane Load, N)
- 3) ความกว้างของแบบจำลอง (Width, W)
- 4) ความยาวของแบบจำลอง (Length, L)
- 5) ประเภทของแผ่นพื้นที่ใช้สร้างแบบจำลอง (Type of Bridge Deck)



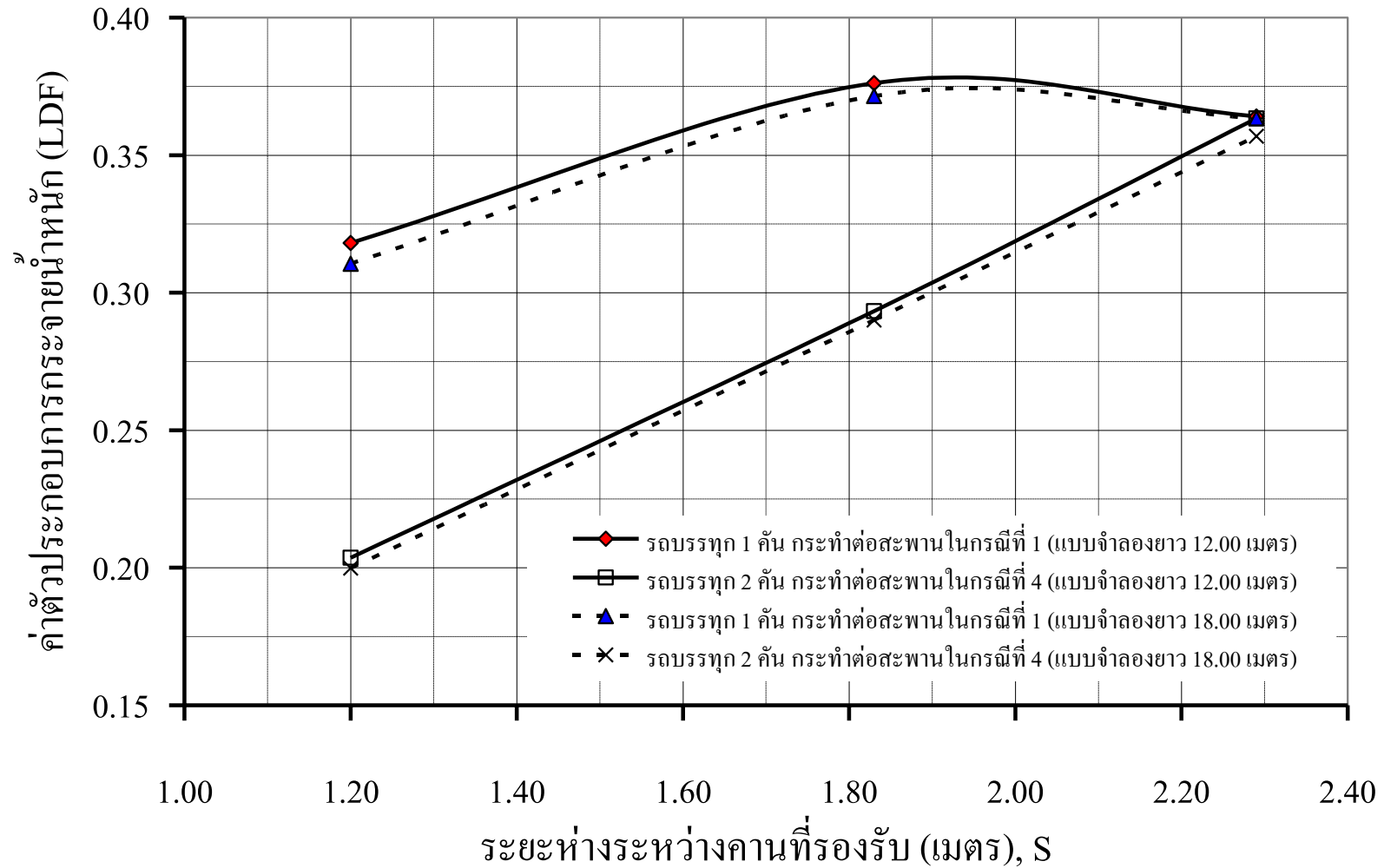
**รูปที่ 6.15** ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่า LDF กับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ค่าความแตกต่างของค่า LDF เมื่อปัจจัย (L, W, Deck และ S) มีการเปลี่ยนแปลง (ภายใต้แรงกระทำกรณีที่ 1)

ปัจจัยที่มีผลต่อค่า LDF พบว่า LDF มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing, S) มีการเพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่ามากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ประเภทของแผ่นพื้น (Type of Bridge Deck), ความกว้างของแบบจำลอง (Weight, W) และความยาวของแบบจำลอง (Length, L) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า LDF ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองด้วยไฟไนต์ลิเมนต์ในกรณีศึกษาแบบจำลองมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์แบบพลาสมทริก โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ (แสดงในภาคผนวก ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระเจายนํ้าหนัก (LDF) กับค่าระยะห่างคานที่รองรับ (S) สำหรับคานตัวนอก (Exterior Girder) และคานตัวในครั้งแรก (First Interior Girder) แสดงในรูปที่ 6.16 ถึงรูปที่ 6.23

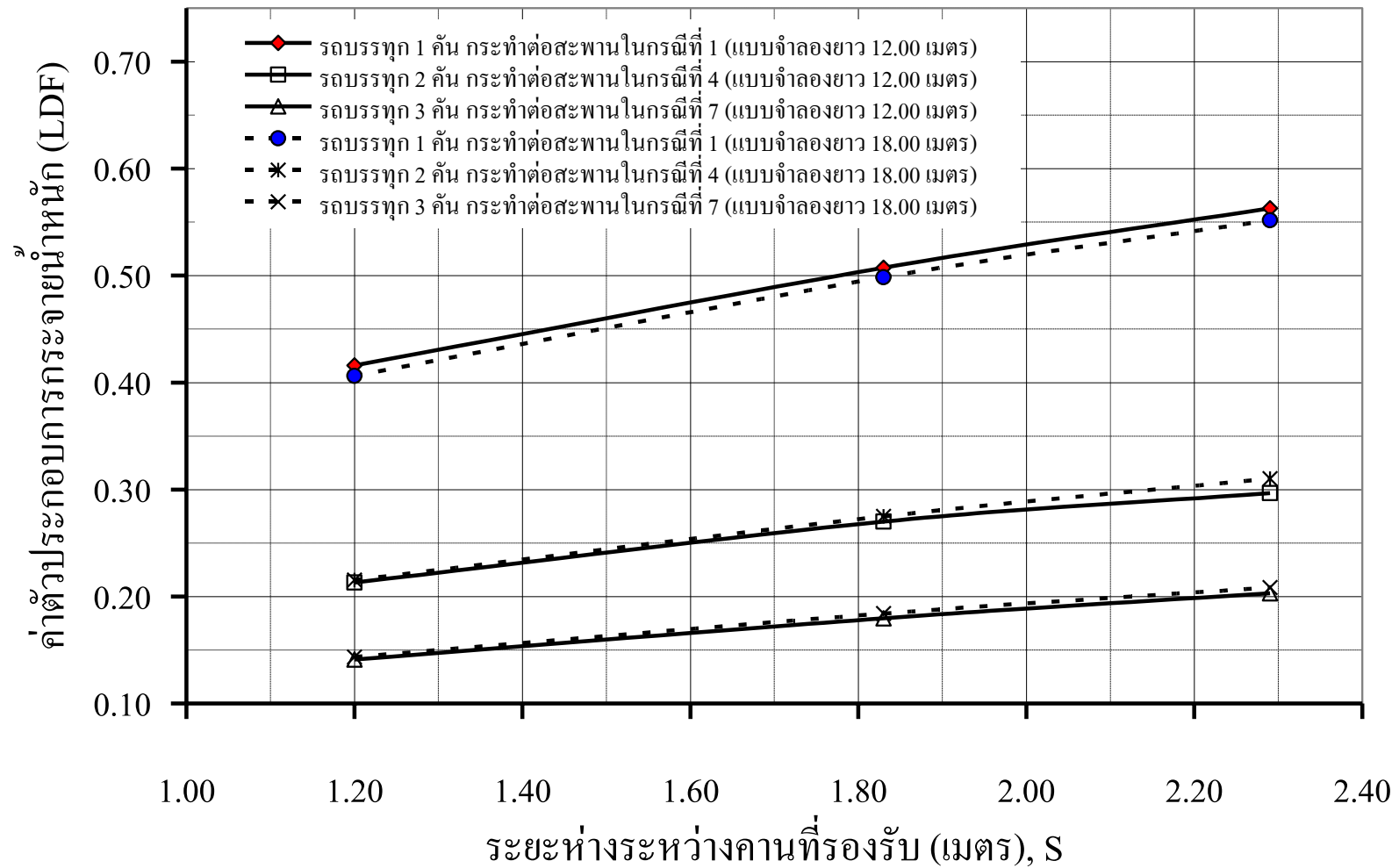




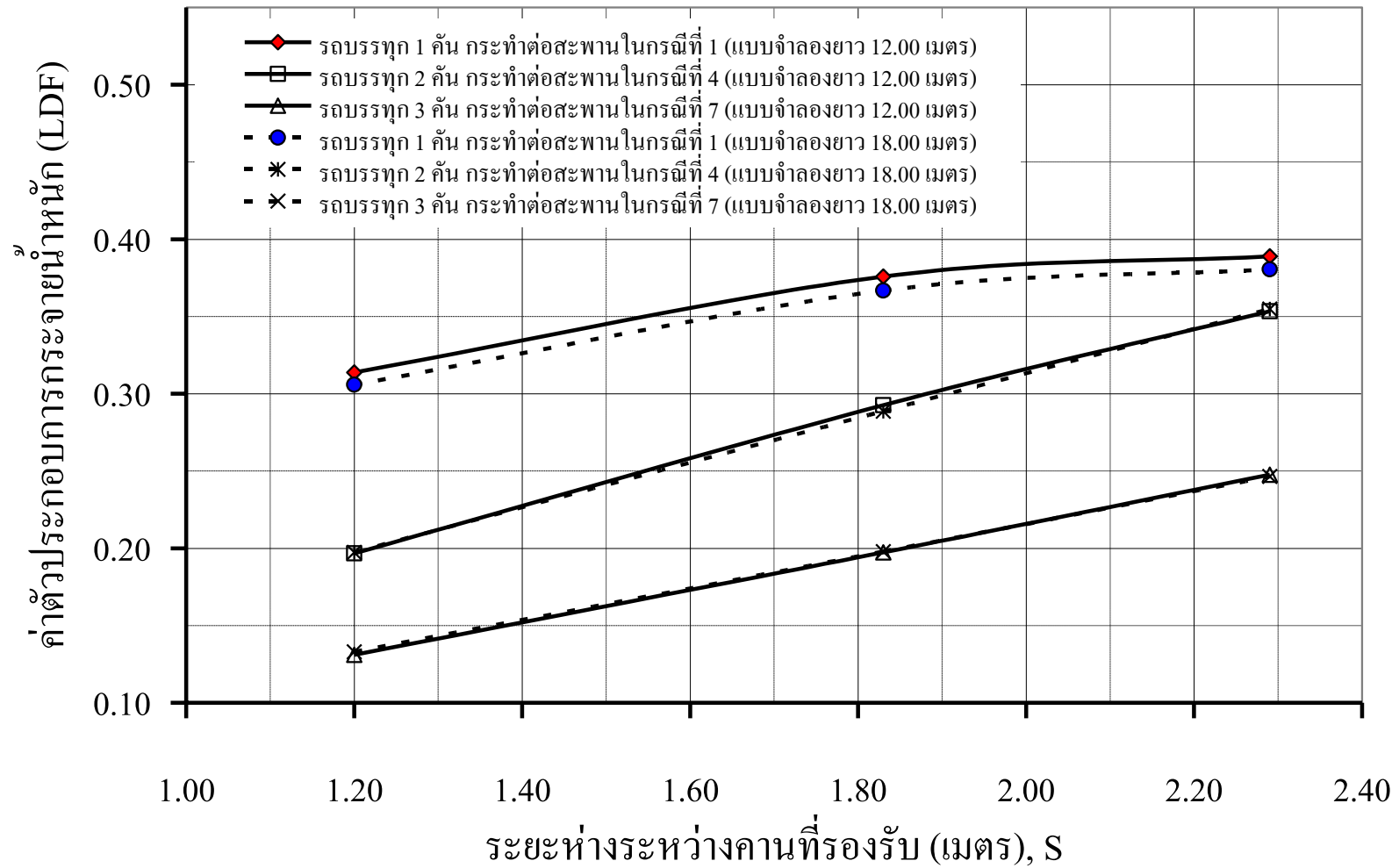
รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)



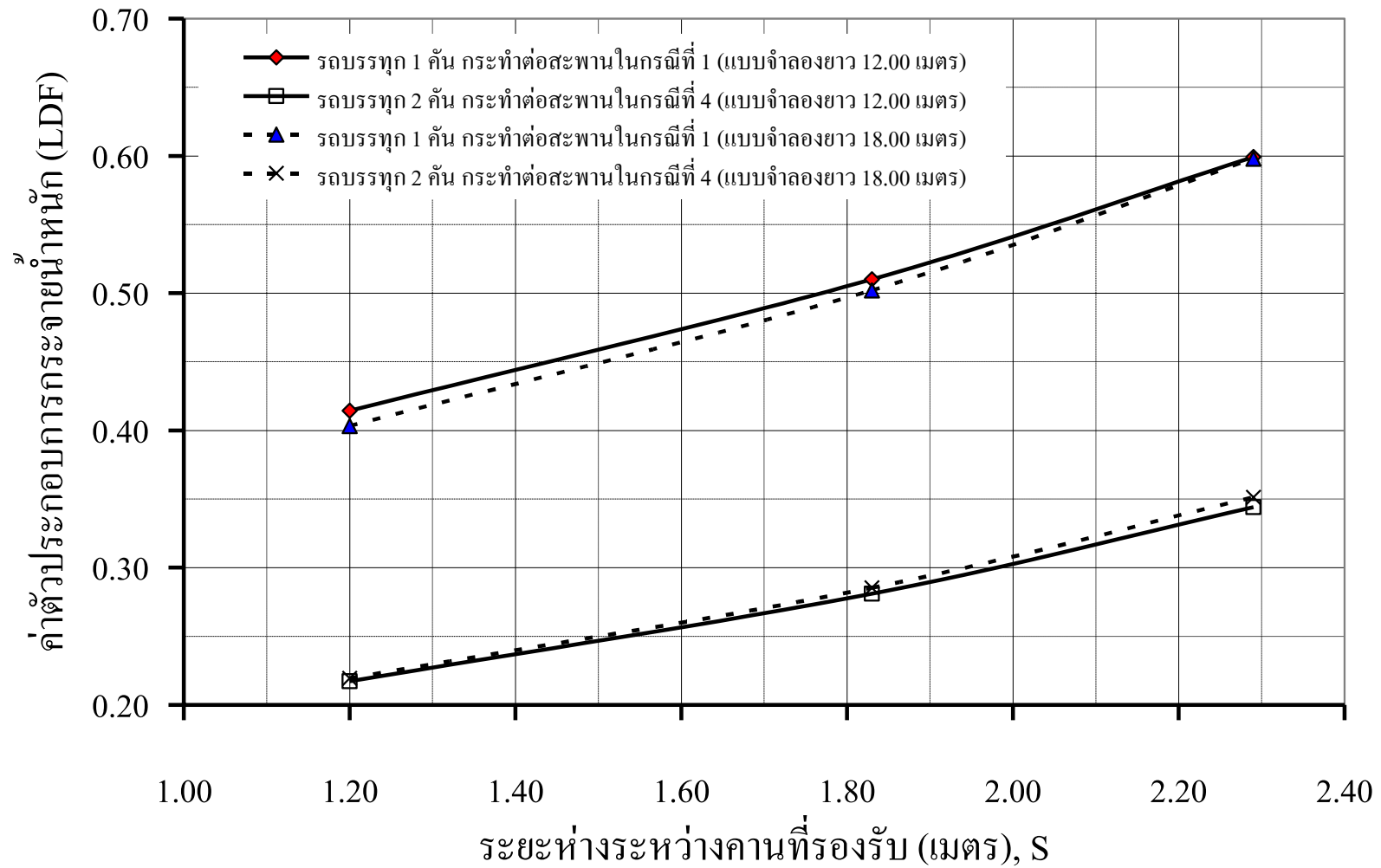
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)



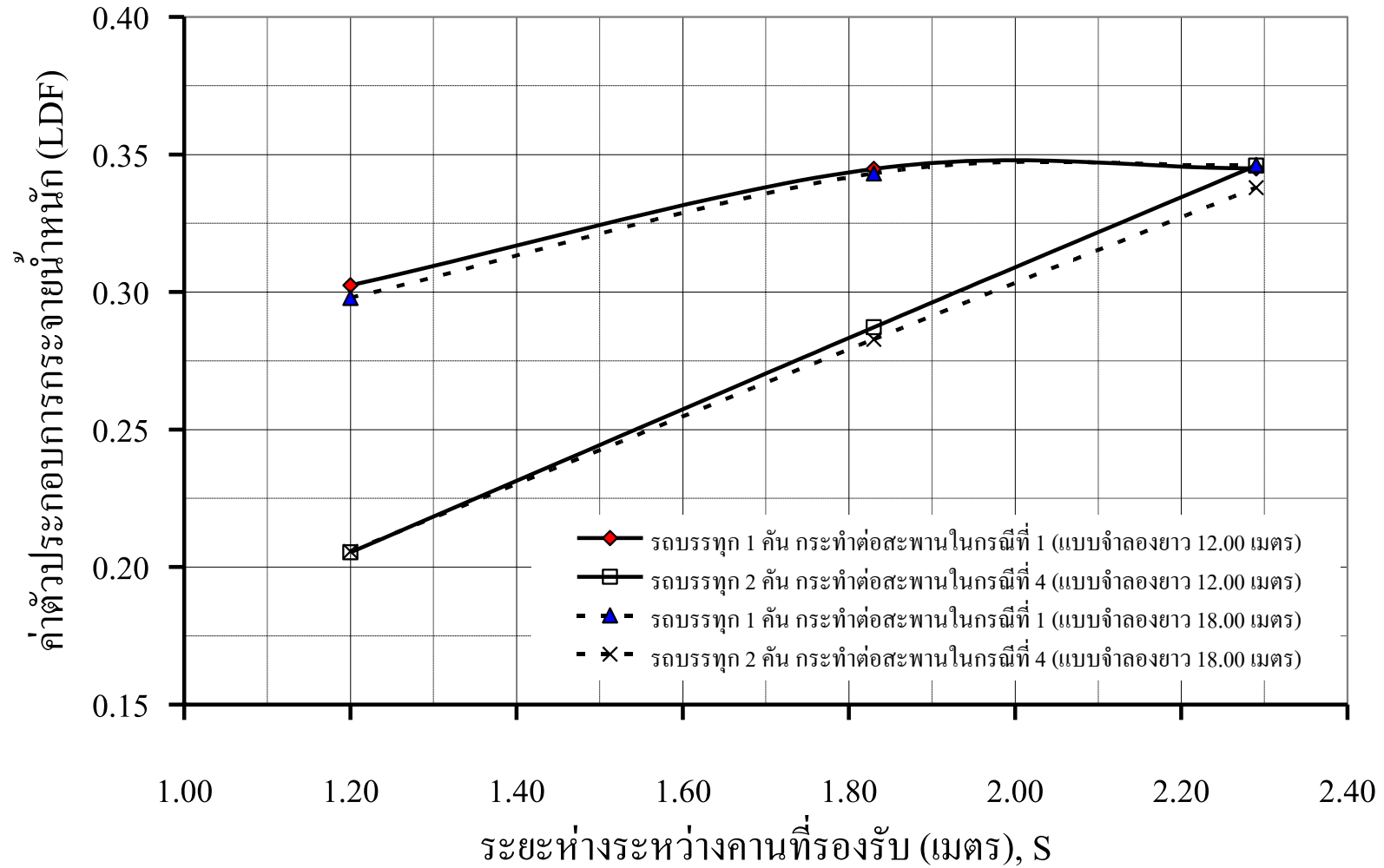
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)



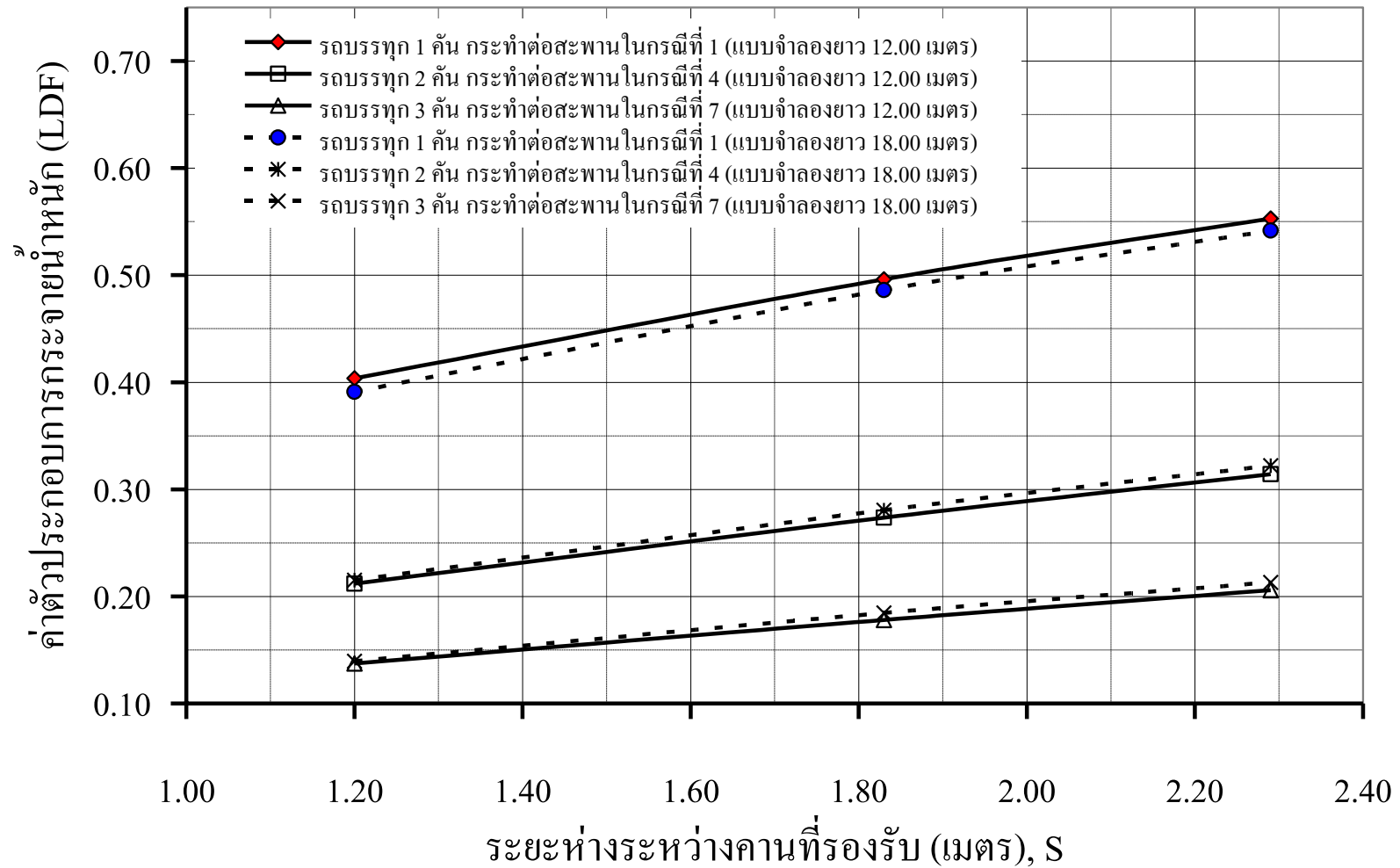
รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)



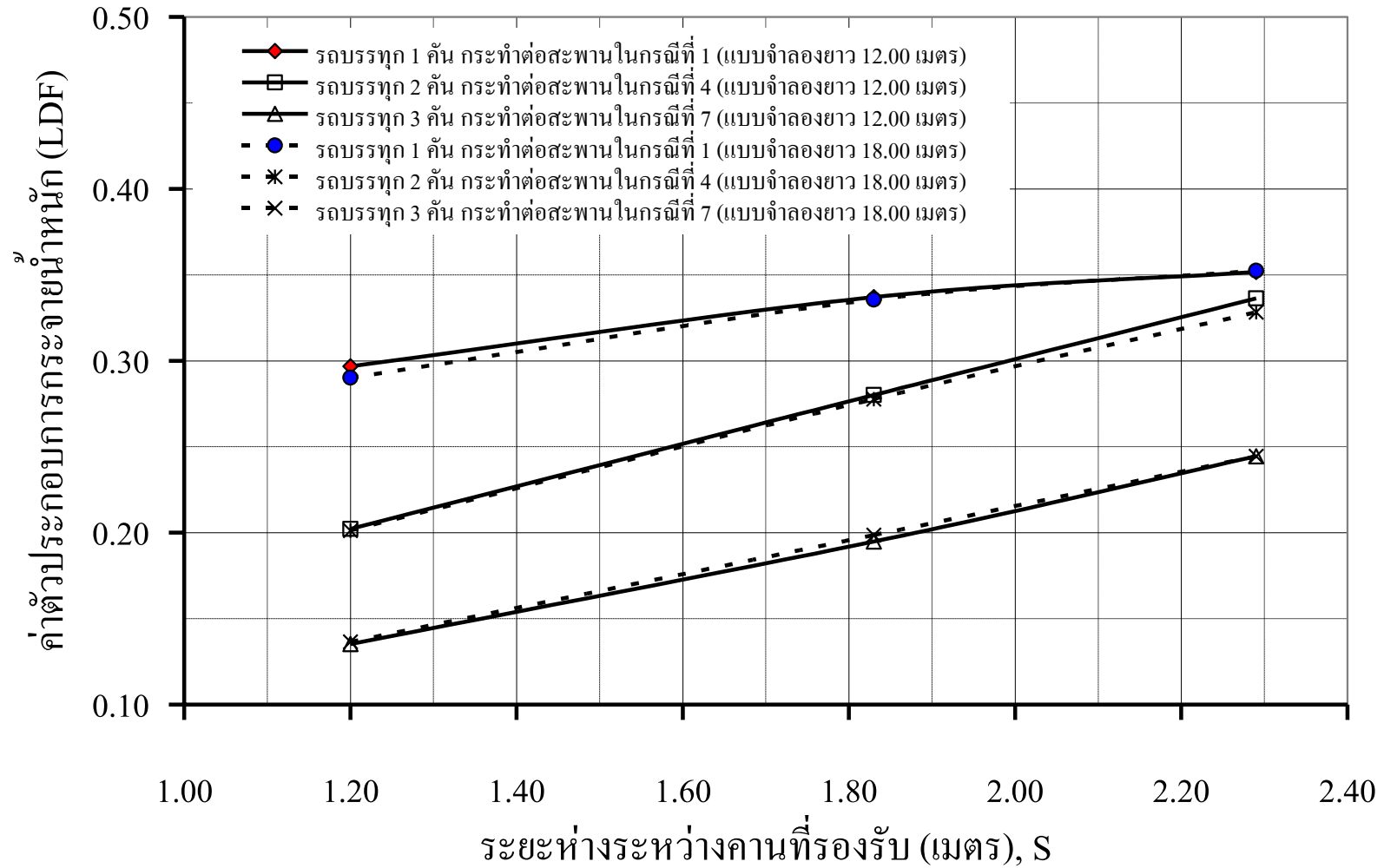
รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)



รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)



รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)



รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)

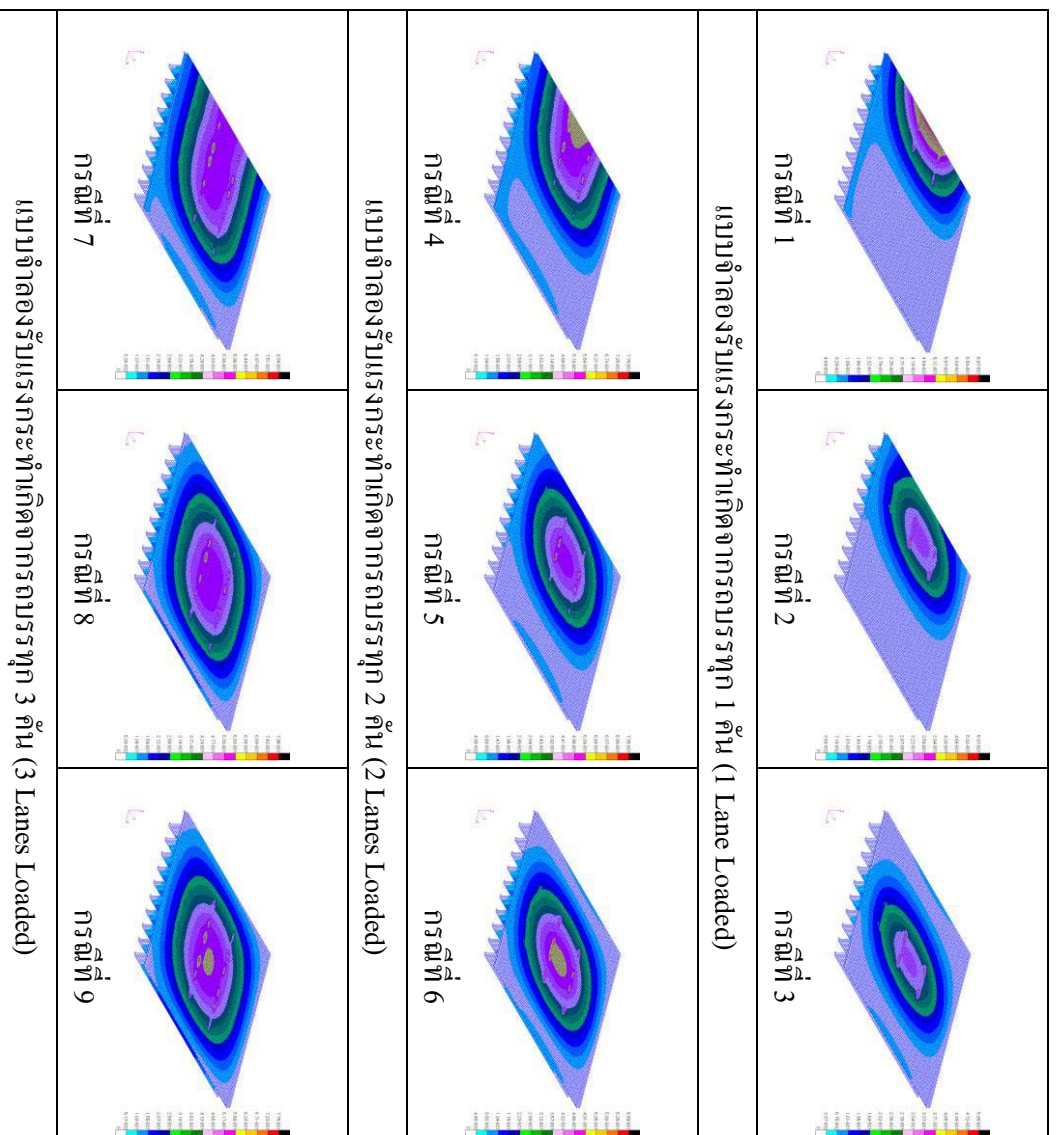


ผลที่ได้จากศึกษาวิเคราะห์แบบพารามตริก (Parametric Study) ของแบบจำลองสะพานที่พฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) พบว่าค่าระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีผลต่อค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือค่าความกว้างและความยาวของแบบจำลอง โดยจะพิจารณาผลของค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่เกิดกับคานที่รองรับคานอก (Exterior Girder) และคานตัวในครั้งแรก (First Interior Girder) อันเนื่องมาจากแรงกระทำจากรถบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลองสะพานในกรณีนี้ 1 เป็นหลัก ซึ่งจากผลและข้อสรุปดังกล่าวทำให้สามารถวิเคราะห์หาสมการของค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่มีตัวแปรเป็นปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้สมการค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้ก็จะนำไปใช้ในการพิจารณาออกแบบคานที่รองรับสะพานต่อไป โดยจะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ในส่วนหลังต่อไป (บทที่ 7)

#### 6.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนแบบพารามตริก (Parametric Analysis of Partial Connection Models)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การศึกษาแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection) นั้นในลักษณะรูปแบบทางกายภาพของแบบจำลองจะเหมือนกับการศึกษาแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) แตกต่างกันในส่วนของรูปแบบการเชื่อมต่อ ระหว่างปีกล่างของแบบจำลองของแผ่นพื้นกับปีกลบนของแบบจำลองของคานที่รองรับเหล็กซึ่งมีการเชื่อมต่อกันบางจุดเท่านั้น ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น (หัวข้อ 6.3) ทั้งนี้ในการศึกษาส่วนนี้ก็เพื่อที่จะพิจารณาถึงค่าผลตอบสนองที่เกิดขึ้น (ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) LDF) อันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกเช่นเดียวกับกรณีแบบจำลองพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์

ในเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักสำหรับแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน มีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ ที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 6.4.1 (พิจารณาผลได้ในภาคผนวก ก และ ข) ดังนั้นในส่วนการแสดงผลการศึกษารูปแบบพารามตริกของแบบจำลองพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน แสดงผลของการวิเคราะห์แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 6.24



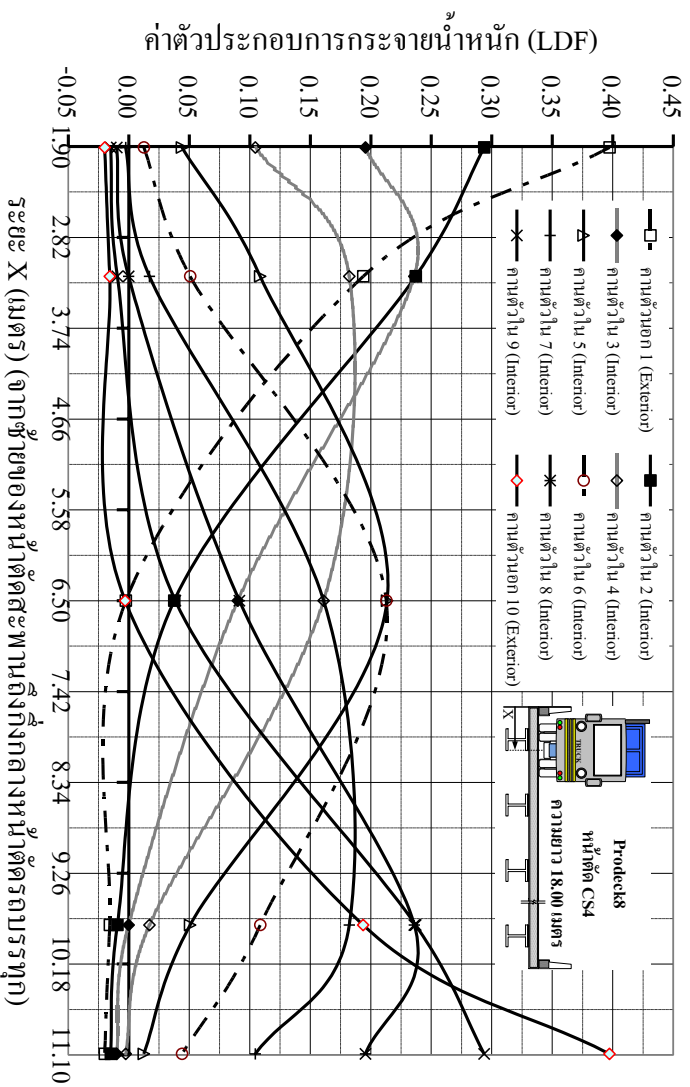
**รูปที่ 6.24** ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน (Prodeck8, CS4 - 18, Case1 - Case9)

จากการสังเกตพบว่าผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองในรูปที่ 6.24 มีความคล้ายคลึงกับผลการวิเคราะห์ในกรณีแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ในรูปที่ 6.4 และ 6.13 (รูปของผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน) ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก) สำหรับค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) ที่คำนวณจากสมการที่ 6.2 โดยคำนวณมาจากค่าการยืดหดตัว (Strain) ที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.11 ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์การศึกษาแบบพารามเทริกที่แบบจำลองมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection) ทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข

**ตารางที่ 6.11** ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor, LDF) ที่คำนวณจากสมการที่ 6.2 (Prodeck8, CS4 - 18, Case1 - Case9)

กรณี	ค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor)									กรณี นอก 10
	คานตัวในคานที่									
คานตัว นอก 1	2	3	4	5	6	7	8	9	นอก 10	
1	0.3972	0.2937	0.1956	0.1045	0.0439	0.0125	-0.0025	-0.0099	-0.0150	-0.0199
2	0.1936	0.2371	0.2360	0.1823	0.1086	0.0506	0.0170	-0.0001	-0.0095	-0.0157
3	-0.0026	0.0375	0.0900	0.1610	0.2135	0.2128	0.1611	0.0914	0.0385	-0.0031
4	0.2155	0.2017	0.1886	0.1642	0.1256	0.0777	0.0371	0.0110	-0.0054	-0.0158
5	0.0966	0.1428	0.1723	0.1799	0.1641	0.1281	0.0801	0.0371	0.0097	-0.0108
6	0.0118	0.0570	0.1064	0.1493	0.1746	0.1744	0.1493	0.1074	0.0580	0.0118
7	0.1391	0.1362	0.1363	0.1346	0.1312	0.1208	0.0989	0.0682	0.0331	0.0016
8	0.0597	0.0935	0.1175	0.1308	0.1349	0.1334	0.1238	0.1024	0.0714	0.0327
9	0.0444	0.0823	0.1097	0.1278	0.1347	0.1349	0.1282	0.1106	0.0825	0.0449

เมื่อพิจารณาตารางที่ 6.11 พบว่าค่า LDF ที่คำนวณจากสมการที่ 6.2 (โดยใช้ข้อมูลการยึดหด) ในการตีแบบจำลองสะพานมีหน้าตัดแบบ CS4 มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.3972 สำหรับคานตัวที่ 1 (คานตัวริมนอกสุด) และมากที่สุดในการตีคานคือ 0.2937 สำหรับคานตัวที่ 2 (คานตัวในคานแรก) ซึ่งเกิดมาจากการกระทำของแรงจากรถบรรทุกในกรณีที่ 1 นั่นคือตำแหน่งของรถบรรทุกบนแบบจำลองยังคงมีผลต่อค่า LDF เช่นเดียวกันกับผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีพฤติกรรมการประกอบอย่างสมบูร์แสดงในตารางที่ 6.3 ที่กล่าวมาแล้ว หรือพิจารณาจากรูปที่ 6.25 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่เกิดจากแรงกระทำของรถบรรทุกหนึ่งคัน กับระยะห่างจากขอบสะพานด้านซ้ายจนถึงแนวกึ่งกลางของหน้าตัดรถบรรทุก ของแบบจำลองสะพานที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 กรณีที่แบบจำลองมีหน้าตัดแบบ CS4 ที่มีความยาวแบบจำลองเท่ากับ 18.00 เมตร พบว่าค่า LDF มีค่ามากที่สุดเมื่อมีแรงกระทำในกรณีที่ 1 ซึ่งค่า LDF ที่มากที่สุดเกิดที่คานตัวนอก และมีการลดลงมาเกิดขึ้นที่คานตัวในคานแรก



รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS4 - 18, Case1)

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.25 พบว่าผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน มีรูปแบบเดียวกันกับความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.9 ซึ่งเป็นผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (โดยความสัมพันธ์ทั้งสอง (รูปที่ 6.25 และ 6.9) ถูกวิเคราะห์จากแบบจำลองสะพานที่มีลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองเหมือนกันแต่แตกต่างกันเฉพาะการเชื่อมแผ่นพื้นและคานสะพาน ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น เท่านั้น)

ในส่วนของหน้าตัดแบบ CS1, CS2, CS3, CS5 และ CS6 ที่มีแบบจำลองแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 ผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกัน (แสดงไว้ในภาคผนวก ง) ดังนั้นตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกในทิศทางตามขวางของสะพานมีผลต่อค่า LDF ที่เกิดขึ้นและส่งผลต่อคานตัวนอกและคานตัวในบริเวณมากที่สุดและมากที่สุดและมากรองลงมาตามลำดับ

นอกจากนี้เมื่อนำผลของค่า LDF ที่วิเคราะห์ได้จากหน้าตัด CS5 และ CS6 โดยแบบจำลองมีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck8 ความยาวสะพาน 18.00 เมตร มาพิจารณาร่วมกับค่า LDF ในตารางที่ 6.11 สามารถแสดงความสัมพันธ์ดังในรูปที่ 6.26 และ 6.27



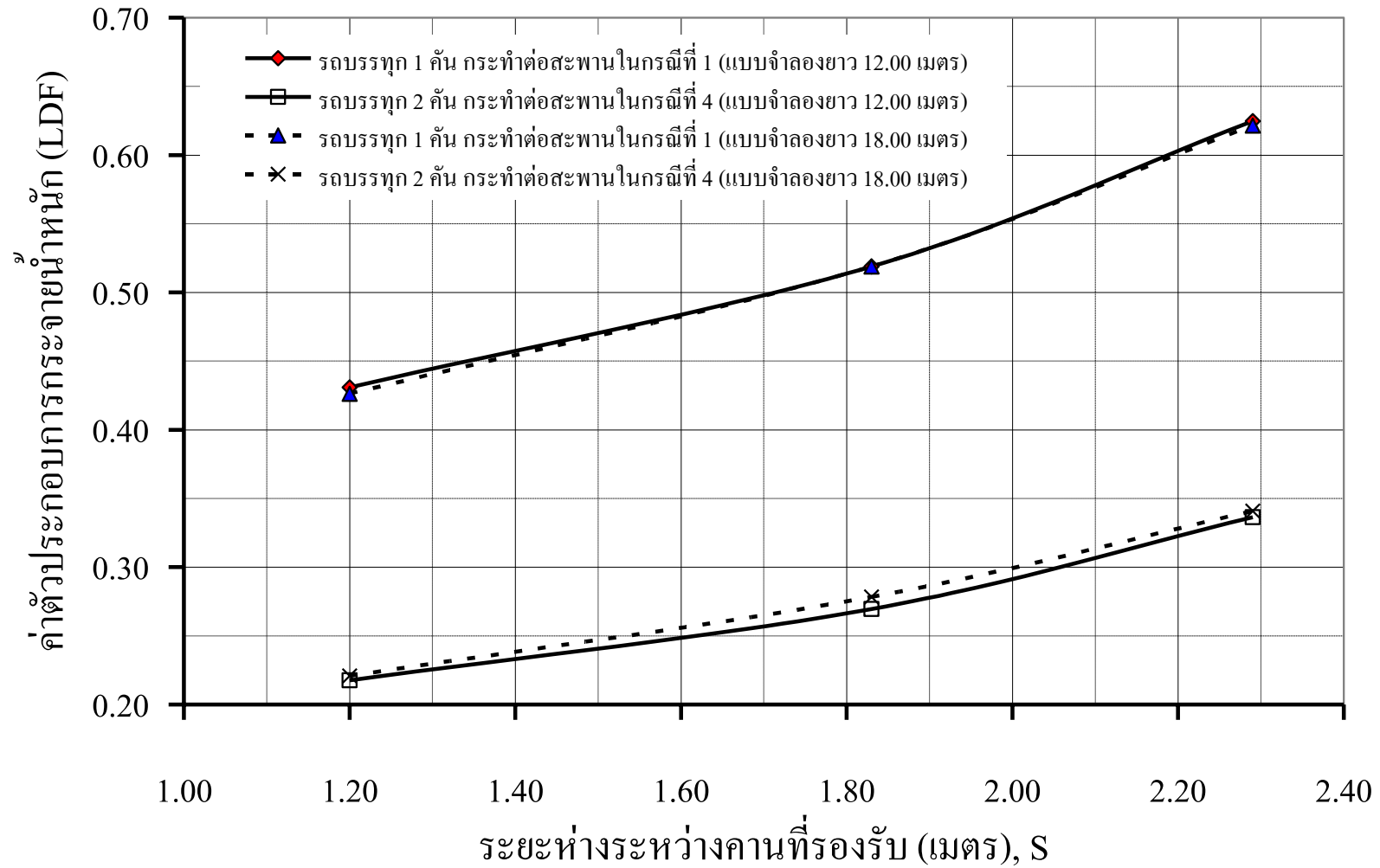
จากรูปที่ 6.26 และ 6.27 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็กแต่ละตัว (S) ของแบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนยังคงสอดคล้องกับผลของแบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ จากรูปที่ 6.26 จะเห็นว่าในกรณีที่เกิดกระทำจากแรงบรรทุกหนึ่งคันที่กระทำ ใกล้กับคานหินและกระทำต่อแบบจำลองยังคงทำให้ค่า LDF ที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่า LDF ที่เกิดจากแรงกระทำของรถบรรทุกในกรณีอื่น (กรณีรถบรรทุกสองคันและสามคัน) และ LDF ก็ยังคงเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกล่าวได้ว่าผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection) มีแนวโน้มของรูปแบบและผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกันกับการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) อย่างไรก็ตามในส่วนของค่า LDF ที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างกัน

**ตารางที่ 6.12** ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เมื่อมีแรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกขนาดหน้าตัดของแบบจำลอง เฉพาะคานตัวนอกและคานตัวในตัวแรก

กรณีที่ 1	ค่าตัวประกอบการกระจาย (Load Distribution Factor)					
	สะพาน	แผ่นพื้นประเภท Prodeck4	แผ่นพื้นประเภท Prodeck8			
CS...	ยาว (เมตร)	คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก	คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก	
		CS1	12.00	0.4309	0.3175	0.4196
		18.00	0.4262	0.3138	0.4091	0.3017
CS2	12.00	0.5190	0.3785	0.5136	0.3486	
		18.00	0.5190	0.3733	0.5066	0.3471
CS3	12.00	0.6248	0.3623	0.6044	0.3455	
		18.00	0.6214	0.3620	0.6035	0.3478
CS4	12.00	0.4228	0.3135	0.4089	0.3007	
		18.00	0.4130	0.3061	0.3972	0.2937
CS5	12.00	0.5104	0.3784	0.4998	0.3412	
		18.00	0.5021	0.3690	0.4901	0.3393
CS6	12.00	0.5660	0.3888	0.5568	0.3530	
		18.00	0.5556	0.3798	0.5460	0.3538

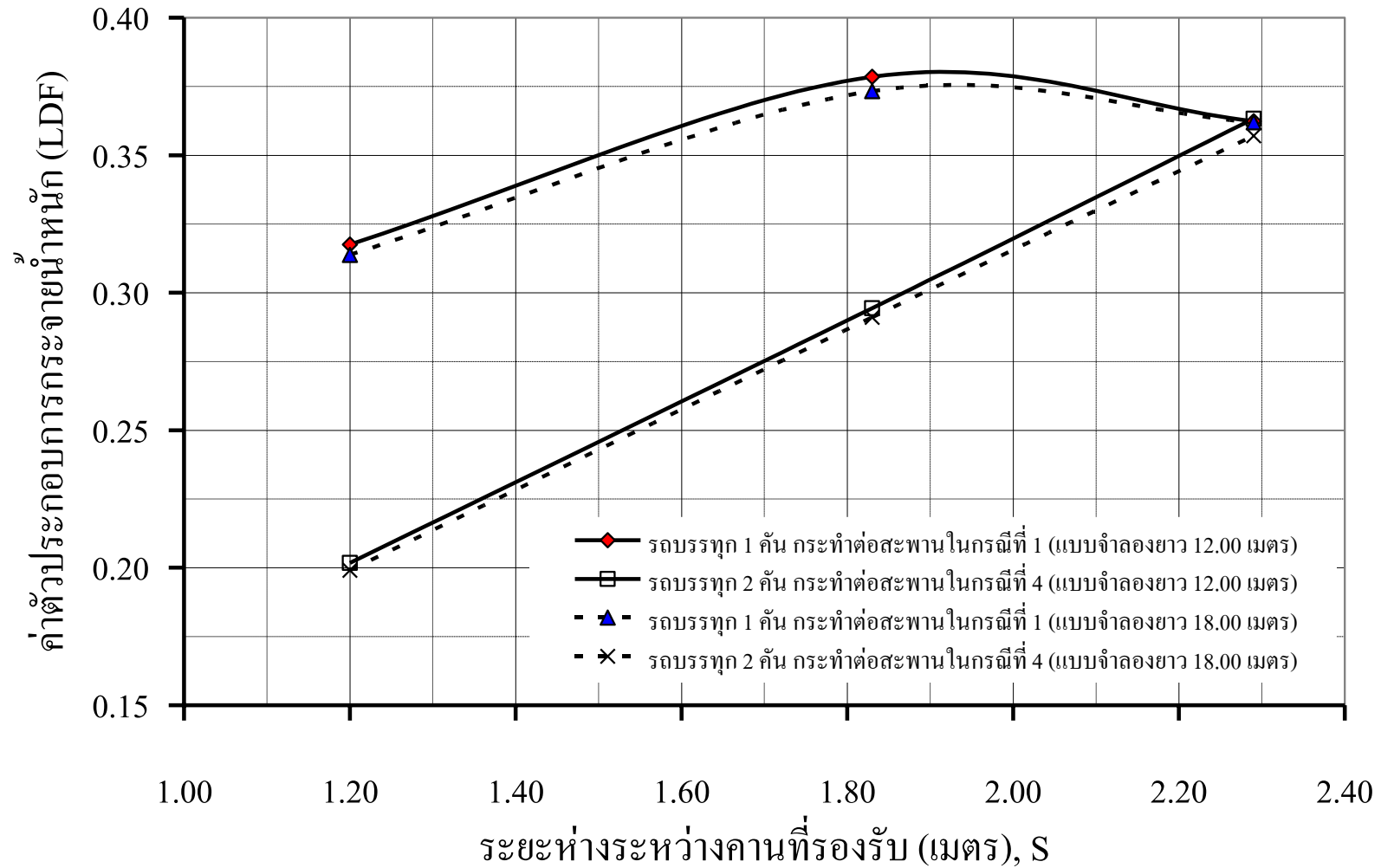
ตารางที่ 6.12 แสดงผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเชื่อมบางส่วน (พิจารณาเฉพาะน้ำหนักกระทำจากบรรทุกบนแบบจำลองในกรณีที่ 1) ของแบบจำลองสะพานทุกขนาดของหน้าตัดและความยาว เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ (ความกว้าง, ความยาว, ประเภทของแผ่นพื้น และระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ) ที่มีผลต่อค่า LDF ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มของผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 6.6 (วิเคราะห์จากแบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมอย่างสมบูรณ์) และผลสรุปที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับผลสรุปจากตาราง 6.7 ถึง 6.10 ซึ่งปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อค่า LDF ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเชื่อมบางส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เกิดขึ้นมากสุดในกรณีที่ทำจากรบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองสะพานในกรณีที่ 1
  - 2) แบบจำลองที่มีพื้นที่สะพานประเภท Prodeck4 มีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก มากกว่าแบบจำลองที่มีพื้นที่สะพานประเภท Prodeck8
  - 3) ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เกิดที่คานตัวนอก (Exterior Girder) มีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก ที่เกิดขึ้นคานตัวใน (Interior Girder)
  - 4) สำหรับหน้าตัดของแบบจำลองที่เหมือนกัน ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักเกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีความยาว 12.00 เมตร มีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีความยาว 18.00 เมตร
  - 5) เมื่อแบบจำลองมีความยาวของแบบจำลองคงที่ ในขณะที่ค่าความกว้างของแบบจำลองเพิ่มขึ้น (เช่น CSI กับ CS4) แบบจำลองที่มีความกว้าง 9.30 เมตร มีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก มากกว่าค่าแบบจำลองที่มีความกว้าง 13.00 เมตร
  - 6) แบบจำลองที่มีระยะห่างคานที่รองรับเท่ากับ 2.29 เมตร จะมีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก มากกว่าแบบจำลองที่มีระยะห่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.83 เมตร และแบบจำลองที่มีระยะห่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร จะมีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก น้อยที่สุด เมื่อความกว้างและความยาวของแบบจำลองคงที่
- รูปที่ 6.28 ถึงรูปที่ 6.35 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก กับระยะห่างคานที่รองรับ จากตารางที่ 6.12 และเป็นเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณน้ำหนักกระทำจากบรรทุกทุกต่อแบบจำลองสะพานแบบบรรทุกทุกสอและสามคาน

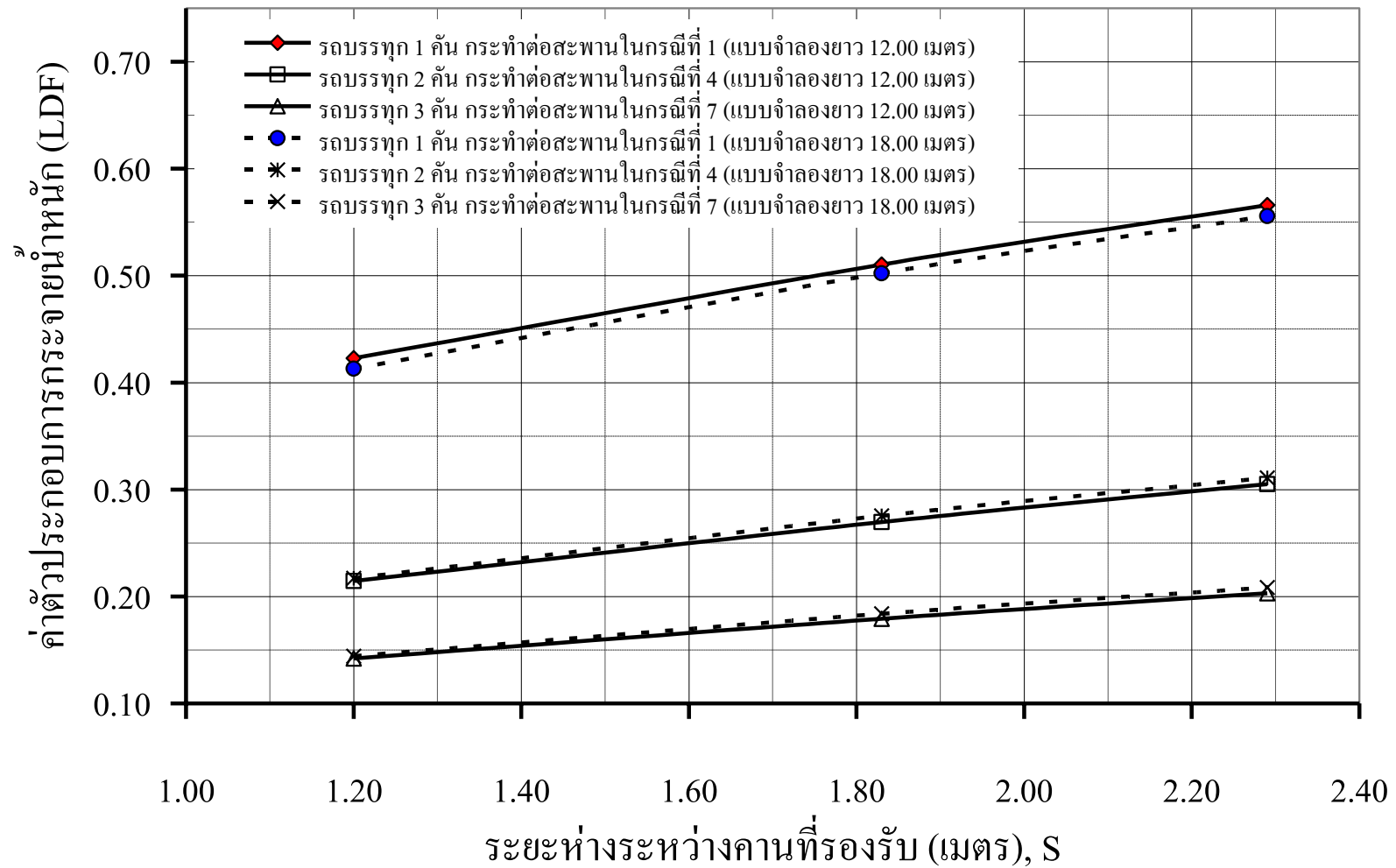


รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)

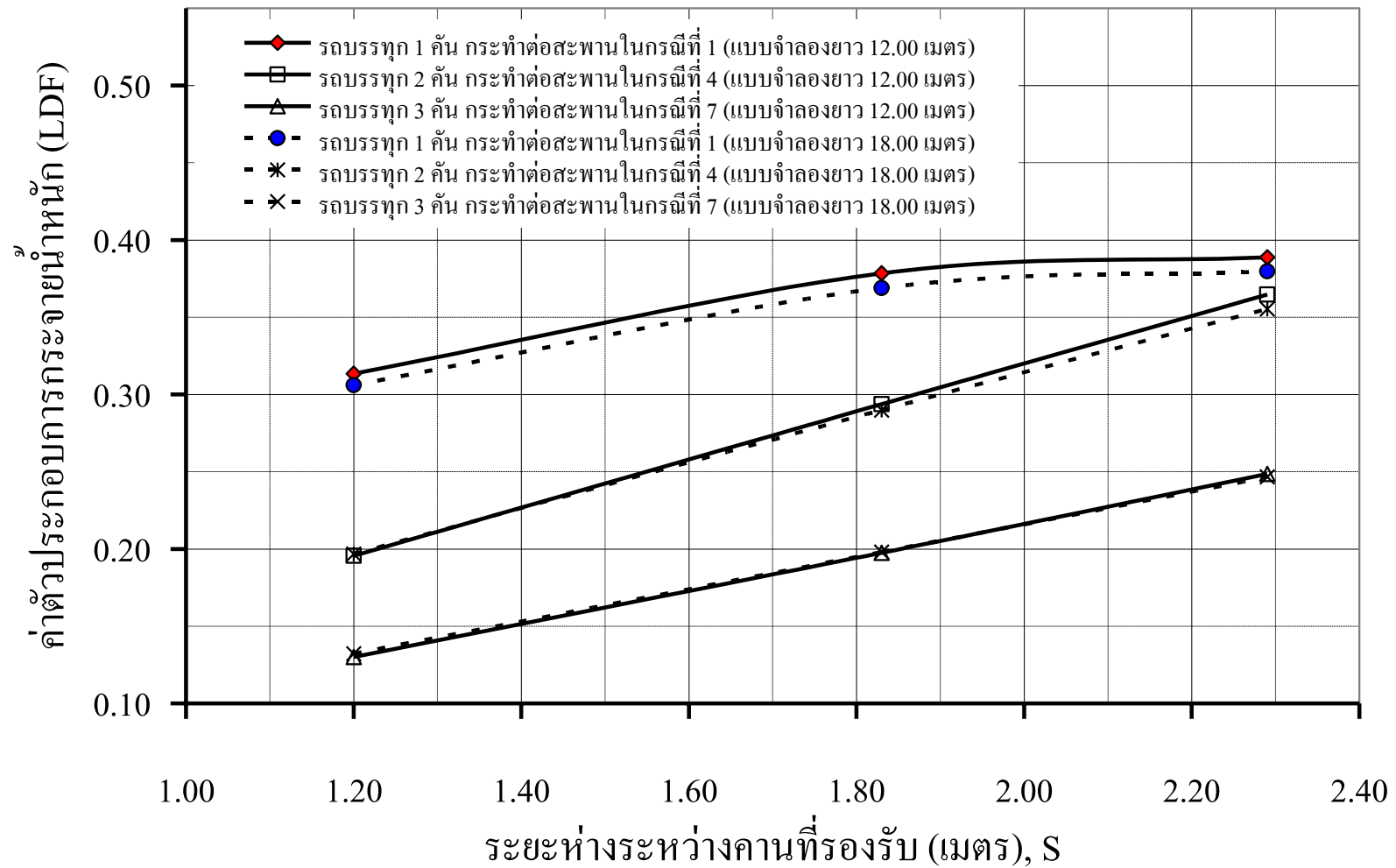




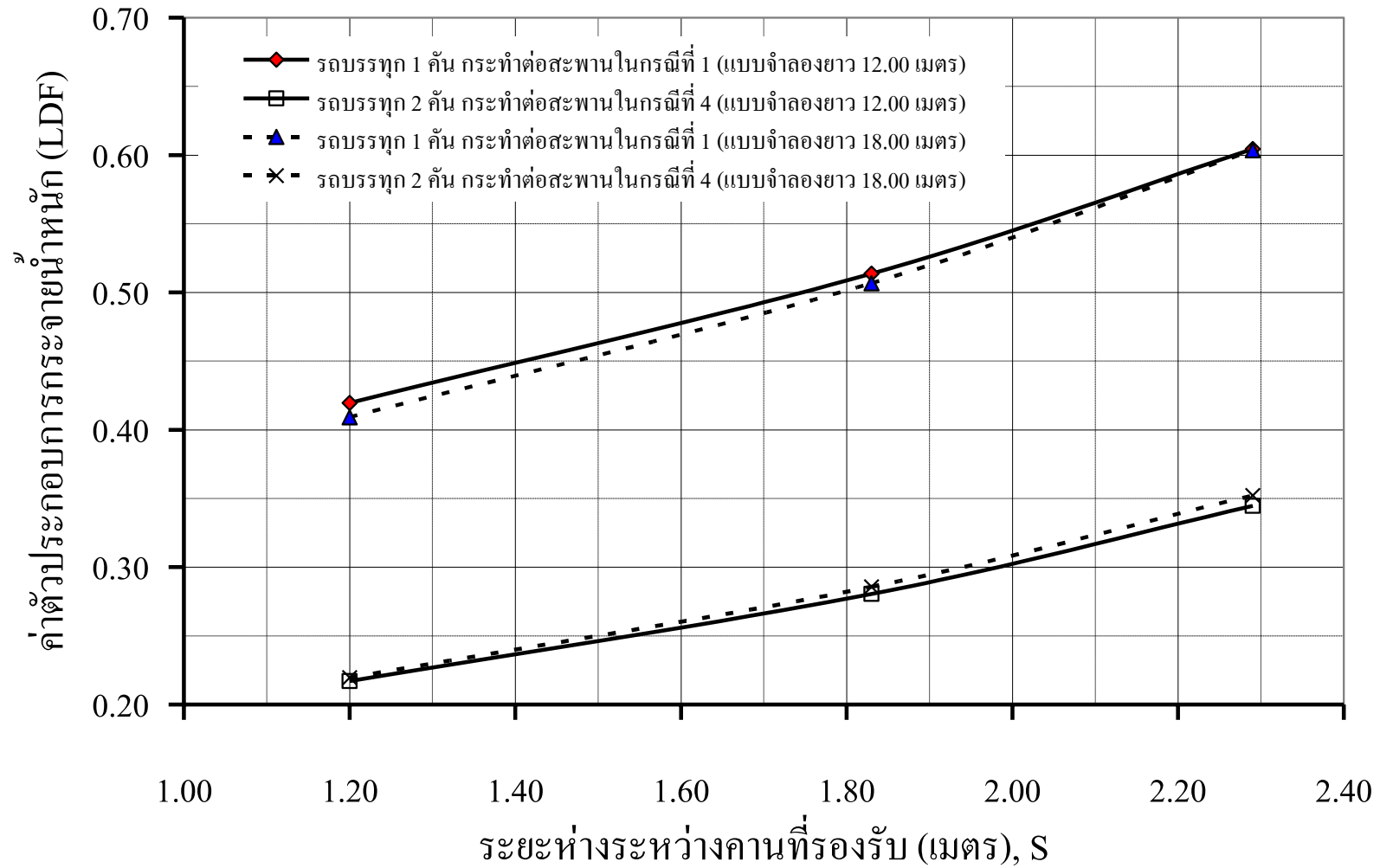
รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)



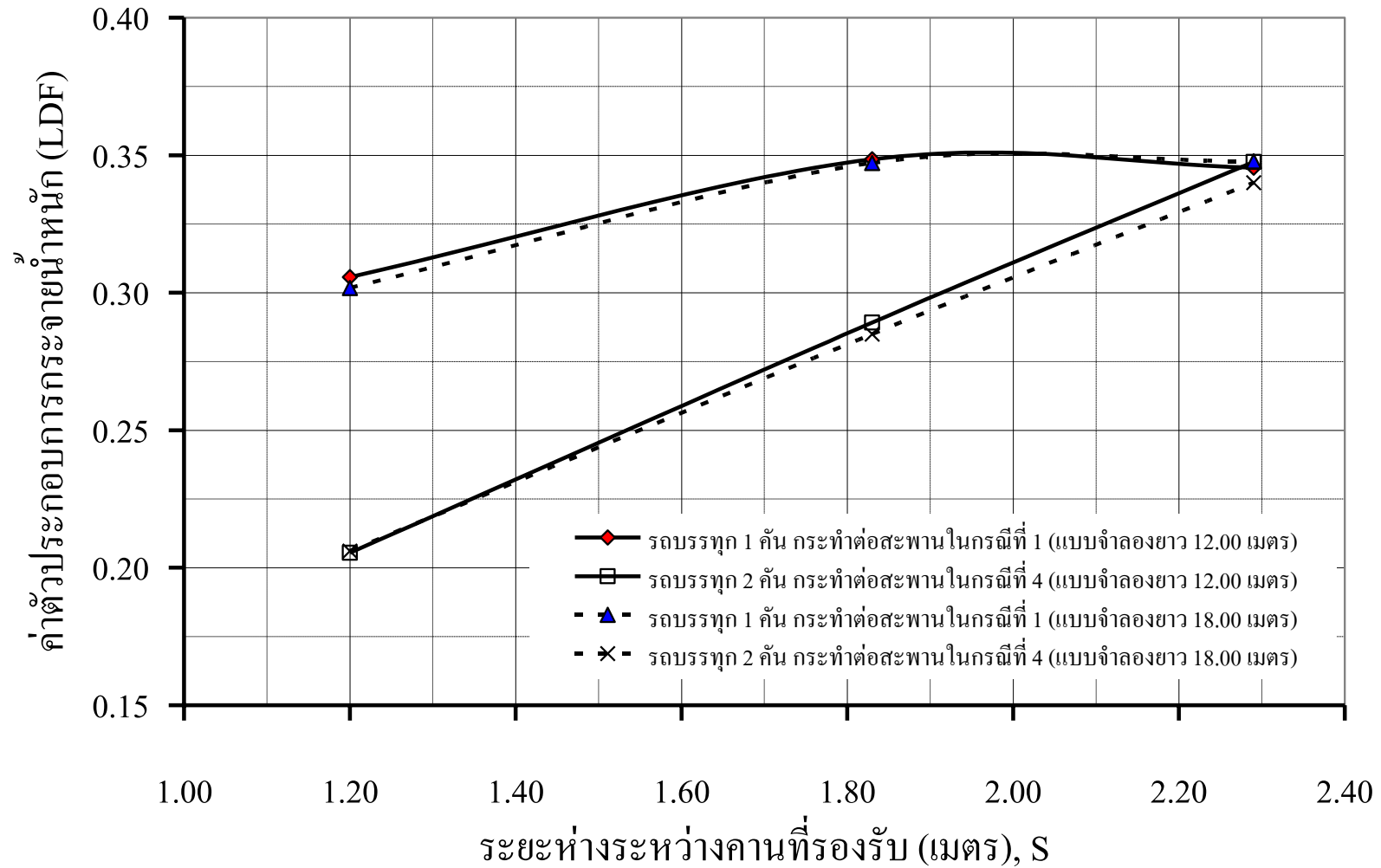
รูปที่ 6.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)



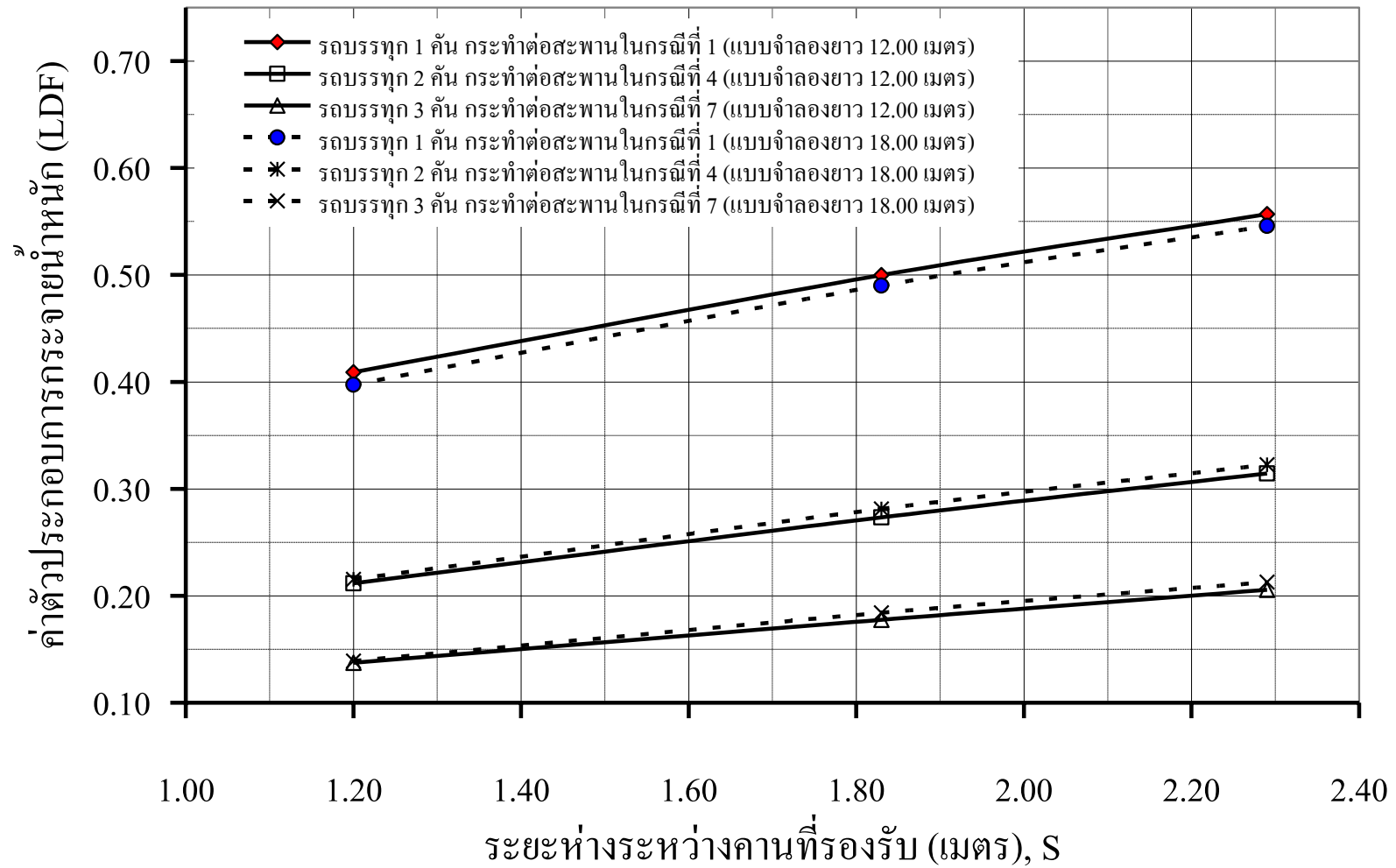
รูปที่ 6.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck4, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)



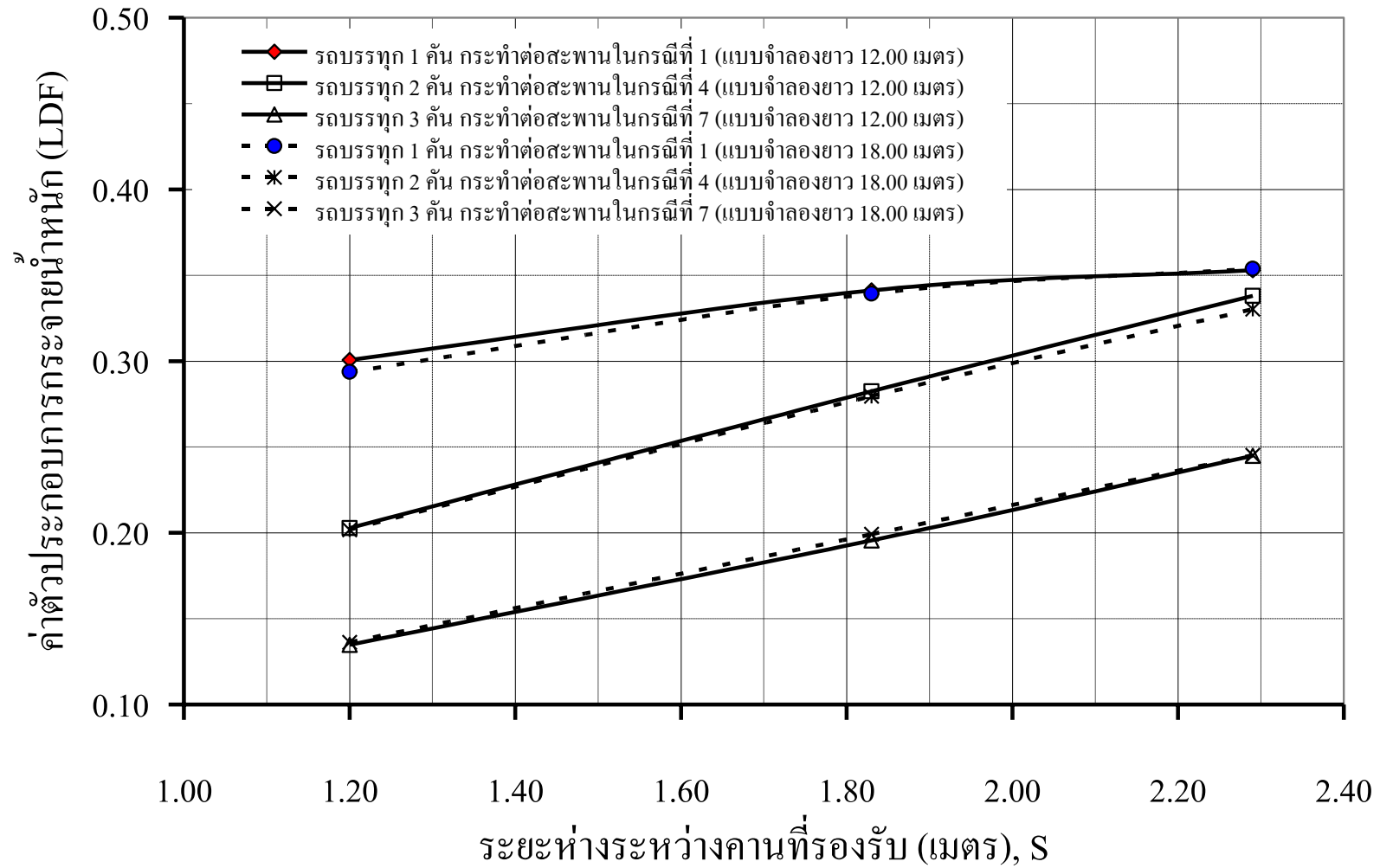
รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Exterior Girder)



รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 9.30 เมตร ของ Interior Girder)



รูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Exterior Girder)



รูปที่ 6.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Prodeck8, W = 13.00 เมตร ของ Interior Girder)

จากรูปที่ 6.28 ถึง 6.35 พบว่าแนวโน้มของผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อนบางส่วน (Partial Connection) มีความคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) กล่าวคือ ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างความที่รองรับมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 และค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมีค่ามากที่สุดในการณ์ที่มีแรงกระทำต่อแบบจำลองนี้เองมาจากรบรรทุกคันเดียว ยกเว้นในรูปที่ 6.17 และรูปที่ 6.29 ตรงตำแหน่งคานตัวใน จะเห็นว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักในกรณีที่มีแบบจำลองถูกแรงกระทำจากรบรรทุกเพียงคันเดียวจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างความที่รองรับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.83 เมตร เป็น 2.29 เมตร ทั้งนี้สาเหตุที่ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างความเหลือที่รองรับมีค่าเพิ่มขึ้นนี้เนื่องมาจาก เมื่อแรงกระทำจากรบรรทุกคันเดียวกระทำต่อแบบจำลองที่ตำแหน่งเดิม กล่าวคือกระทำที่คานตัวนอกหรือใกล้กับขอบคานหนึ่งห่างออกมา 0.61 เมตร และกระทำอยู่ระหว่างคานที่รองรับตัวนอกและตัวใน ในขณะที่ระยะห่างของที่รองรับเพิ่มขึ้น ทำให้แรงที่เท่ากันส่งถ่ายไปยังที่รองรับหลักที่มีระยะห่างน้อยกว่าได้มากกว่าแรงที่ส่งถ่ายไปยังที่รองรับที่มีระยะห่างมากกว่า (มีคานที่รองรับอย่างง่าย (Simple Support) อยู่จำนวน 2 ชุด ที่มีระยะห่างระหว่างคานของคานชุดแรกเท่ากับ 1.83 เมตร และชุดที่สองเท่ากับ 2.29 เมตร เมื่อมีแรงกระทำเป็นจุด (Point Load) กระทำต่อคานที่ตำแหน่งห่างจากที่รองรับคานหนึ่ง 0.61 เมตร เท่ากัน พบว่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับที่รองรับที่ห่างออกไปในคานชุดแรกมากกว่าชุดที่สอง)

### 6.5 สรุป (Conclusion)

ผลที่ได้จากการศึกษาวิเคราะห์แบบพารามตริก (Parametric Study) ของแบบจำลองของสะพานทั้งระบบ ทั้งแบบจำลองที่ถูกจำลองแบบมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) และแบบจำลองที่ถูกจำลองแบบมีพฤติกรรมเชื่อมต่อนบางส่วน (Partial Connection) นั้น เพื่อที่จะวิเคราะห์ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor, LDF) และปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ของแบบจำลองที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก ดังกล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ลักษณะทางกายภาพของแบบจำลองทั้งสองแบบ มีความคล้ายคลึงกัน รวมถึงค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้ก็มีความใกล้เคียงกัน โดยมีความที่แตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักที่วิเคราะห์ได้ตั้งแต่แสดงในบทนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ส่งผลให้ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมีค่าที่มากขึ้นหรือแตกต่างกัน ซึ่ง



ปัจจัยที่สำคัญที่สุดสองประการคือ 1) ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ และ 2) ตำแหน่งของแรงกระทำจากระบบรอกบนแบบจำลอง

นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทนี้ ถูกนำไปวิเคราะห์หาสมการของค่าตัวประกอบของการกระจายน้ำหนักอันเนื่องด้วยปัจจัยทางกายภาพต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น โดยการรวมผล การวิเคราะห์ทั้งสองแบบ (แบบมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์และแบบมีพฤติกรรมต่อเนื่องต่อบางส่วน) และทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS16 (Statistical Package for the Social Science version16) รวมถึงเปรียบเทียบกับผลจากการวิจัยของผู้วิจัยท่านอื่น ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาถูกนำเสนอในบทที่ 7

## บทที่ 7 (Chapter 7)

### การเปรียบเทียบของการศึกษาแบบพารามเมตริก (Comparison of Parametric Study)

#### 7.1 บทนำ (Introduction)

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงค่า LDF ที่คำนวณมาจากผลตอบสนองอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุก โดยทำการวิเคราะห์แบบพารามเมตริก ทั้งแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน รวมถึงปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ของแบบจำลองที่มีผลต่อค่า LDF ซึ่งประกอบไปด้วย ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S), ความกว้างของแบบจำลอง (W) และความยาวของแบบจำลอง (L) เป็นต้น

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงค่า LDF โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติคือ SPSS16 (Statistical Package for the Social Science version 16) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) นอกจากนี้ยังกล่าวถึง ความแตกต่างระหว่างค่า LDF ที่คำนวณมาจากแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน ตลอดจนการเปรียบเทียบค่า LDF ที่ได้จากการศึกษากับค่า LDF ของนักวิจัยท่านอื่นๆ ที่มีรูปแบบในการศึกษาใกล้เคียงกัน (เป็นการศึกษาระบบสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นพอลิเมอร์และคานเหล็กที่รองรับ ทั้งที่เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการหรือภาคสนามจริง และที่เป็นการศึกษาโดยใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์) ดังรายละเอียดเป็นลำดับ ต่อไปนี้

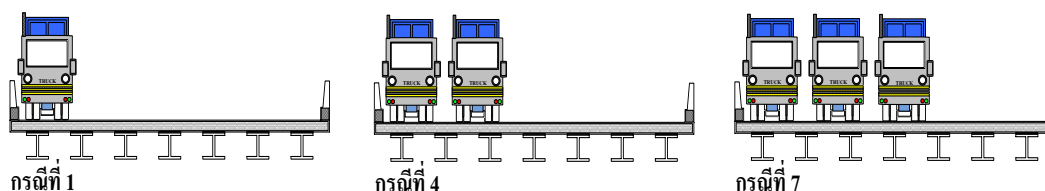
#### 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ โดยใช้โปรแกรม SPSS16

จากการวิเคราะห์หาค่า LDF จากแบบจำลองของสะพานภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ได้แก่ ประเภทของแผ่นพื้นพอลิเมอร์, ความกว้างและความยาวของแบบจำลอง, รูปแบบของแรงกระทำหรือตำแหน่งของรถบรรทุกที่กระทำต่อแบบจำลอง ตลอดจนถึงประเภทของคานเหล็กที่รองรับและระยะห่างระหว่างคานเหล็กที่รองรับ ปรากฏว่าปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาล้วนมีผลต่อค่า LDF ทั้งสิ้น ไม่มากก็น้อย เรียงตามลำดับจากปัจจัยที่มีผลมากไปยังปัจจัยที่มีผลน้อยที่สุด ดังต่อไปนี้

- 1) ระยะห่างระหว่างคันที่รองรับ (S)
- 2) ประเภทของแผ่นพื้นพอลิเมอร์ (การวิจัยนี้ใช้ Prodeck4 และ Prodeck8)
- 3) ตำแหน่งของแรงกระทำที่กระทำต่อแบบจำลอง
- 4) จำนวนของแรงกระทำที่กระทำต่อแบบจำลอง (จำนวนของรถบรรทุก) (N)
- 5) ความกว้างของแบบจำลอง (W)
- 6) ความยาวของแบบจำลอง (L)

เมื่อนำปัจจัยต่างๆข้างต้นมาหาความสัมพันธ์เพื่อจะทำนายหรือประมาณค่าของ LDF ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้น โดยใช้โปรแกรม SPSS16 ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ซึ่งรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS16 จะแยกเป็นสองส่วนตามจำนวนของปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ดังนี้

ส่วนที่ 1) เมื่อตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกที่ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมีค่ามาก เมื่อรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองในกรณีที่ 1, กรณีที่ 4 และกรณีที่ 7 ดังแสดงในรูปที่ 7.1 โดยมีรูปแบบความสัมพันธ์ดังสมการที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ตำแหน่งรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองในกรณีที่ 1, กรณีที่ 4 และกรณีที่ 7

$$LDF = \zeta \cdot 2 \dots \Delta W \cdot 2 \lambda \Delta L \cdot 2 \xi \Delta N \cdot 2 \bullet \Delta S \quad (7.1)$$

เมื่อ

$\zeta, \dots, \lambda, \xi, \bullet$  คือค่าคงที่

$W$  คือความกว้างของแบบจำลอง (9.30 เมตร และ 13.00 เมตร)

$L$  คือความยาวของแบบจำลอง (12.00 เมตร และ 18.00 เมตร)

$N$  คือจำนวนแรงกระทำใกล้เคียงขอบทาง (1 คัน, 2 คัน และ 3 คัน)

$S$  คือระยะห่างระหว่างที่รองรับ (1.20 เมตร, 1.83 เมตร และ 2.20 เมตร)

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS16 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ 7.1 โดยแสดงค่าคงที่ในกรณีต่างๆ ซึ่งพิจารณาจากการรวมผลการวิเคราะห์ค่า LDF ที่มีรูปแบบการวิเคราะห์ (แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composites) และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)) และประเภทของแผ่นพื้นในการวิเคราะห์ (Prodeck4 และ Prodeck8) ที่แตกต่างกันมารวมกัน ดังแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ค่าคงที่ที่ใช้กับสมการในการวิเคราะห์หาค่า LDF (ตามสมการ 7.1)

ประเภท แผ่นพื้น	ตำแหน่ง คานที่รองรับ	รูปแบบ การวิเคราะห์	ค่าคงที่					R <sup>2</sup>
			$\zeta$	$\dots \times 10^{-5}$	$\lambda \times 10^{-5}$	$\xi$	$\bullet$	
Prodeck4	คานตัวนอก	FC	0.458	-0.456	5.222	-0.174	0.113	0.910
		PC	0.465	7.237	6.444	-0.177	0.112	0.912
	คานตัวใน	FC	0.267	0.000	0.000	-0.078	0.103	0.925
		PC	0.265	0.000	0.000	-0.079	0.104	0.917
Prodeck8	คานตัวนอก	FC	0.441	0.000	-6.889	-0.165	0.118	0.932
		PC	0.446	0.000	5.556	-0.168	0.118	0.931
	คานตัวใน	FC	0.268	-200	0.000	-0.064	0.089	0.924
		PC	0.272	-200	0.000	-0.066	0.088	0.920
Prodeck4	คานตัวนอก	FC + PC	0.462	3.904	5.833	-0.175	0.112	0.918
	คานตัวใน	FC + PC	0.266	0.000	0.000	-0.079	0.103	0.927
Prodeck8	คานตัวนอก	FC + PC	0.443	0.000	-3.167	-0.167	0.118	0.936
	คานตัวใน	FC + PC	0.270	-200	-0.065	-0.065	0.088	0.928
Prodeck 4 + 8	คานตัวนอก	FC + PC	0.452	0.000	1.333	-0.171	0.115	0.928
	คานตัวใน	FC + PC	0.268	-100	0.000	-0.072	0.096	0.916

หมายเหตุ สัญลักษณ์ในตารางที่ 7.1 ได้แก่ FC ใช้แทนคำว่า Fully Composite หรือ แบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ และ PC ใช้แทนคำว่า Partial Connection หรือ แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน

ส่วนที่ 2) เมื่อตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกที่ทำให้ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมีค่ามากที่สุด เมื่อรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองเฉพาะในกรณีที่ 1 เท่านั้น มีรูปแบบความสัมพันธ์ดังนี้

$$LDF = \zeta \cdot W^2 \cdot \lambda \cdot L^2 \cdot S \quad (7.2)$$

เมื่อ  $\zeta, \dots, \lambda, \bullet$  คือค่าคงที่  
 $W$  คือความกว้างของแบบจำลอง (9.30 เมตร และ 13.00 เมตร)  
 $L$  คือความยาวของแบบจำลอง (12.00 เมตร และ 18.00 เมตร)  
 $S$  คือระยะห่างระหว่างที่รองรับ (1.20 เมตร, 1.83 เมตร และ 2.20 เมตร)

ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS16 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับปัจจัยทางกายภาพต่างๆ ในรูปแบบของสมการถดถอยเชิงเส้นตามสมการที่ 7.2 โดยแสดงค่าคงที่ในกรณีต่างๆ ซึ่งพิจารณาจากการรวมผลการวิเคราะห์ค่า LDF ที่มีรูปแบบการวิเคราะห์ และประเภทของแผ่นพื้นในการวิเคราะห์ ที่แตกต่างกันมารวมกัน (รูปแบบเดียวกันกับตารางที่ 7.1) ดังแสดงในตารางที่ 7.2

พบว่าผลในส่วนที่ 1 (ตารางที่ 7.1) ปัจจัยทางกายภาพของแบบจำลองสะพานที่มีผลต่อค่า LDF ได้แก่ ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) และจำนวนของแรงกระทำที่กระทำต่อแบบจำลอง (N) โดยพิจารณาจากค่าคงที่  $\zeta, \xi$  และ  $\bullet$  ที่มีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับ ... และ  $\lambda$  ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจากบทที่ 6 สรุปว่าค่า LDF จะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีแรงกระทำต่อแบบจำลองในกรณีที่เกิดจากรถบรรทุกเพียง 1 คันเท่านั้น (N เท่ากับ 1) ซึ่งกระทำต่อแบบจำลองในกรณีที่ 1 และเมื่อพิจารณาผลในส่วนที่ 2 (ตารางที่ 7.2) ซึ่งพิจารณาจากแรงกระทำในกรณีที่ 1 เท่านั้น พบว่าปัจจัยทางกายภาพของแบบจำลองสะพานที่มีผลต่อค่า LDF มากที่สุด ได้แก่ ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากทั้งสองส่วน (ตารางที่ 7.1 และ 7.2) จากการวิเคราะห์โดย SPSS16 สอดคล้องกับผลที่ได้ในบทที่ 6 คือปัจจัยที่มีผลต่อค่า LDF มากที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ ดังนั้นในลำดับต่อไปจะกล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่านั้น

ตารางที่ 7.2 ค่าคงที่ที่ใช้กับสมการในการวิเคราะห์หาค่า LDF (ตามสมการ 7.2)

ประเภท แผ่นพื้น	ตำแหน่ง คานที่รองรับ	รูปแบบ การวิเคราะห์	ค่าคงที่				R <sup>2</sup>
			$\zeta$	...	$\lambda$	$\bullet$	
Prodeck4	คานตัวนอก	Fully	0.327	-0.008	-0.001	0.158	0.960
		Partial	0.337	-0.008	-0.001	0.154	0.957
	คานตัวใน	Fully	0.250	0.001	-0.001	0.059	0.738
		Partial	0.251	0.001	0.000	0.058	0.686
Prodeck8	คานตัวนอก	Fully	0.316	-0.007	-0.002	0.156	0.977
		Partial	0.322	-0.007	-0.001	0.155	0.975
	คานตัวใน	Fully	0.255	0.000	0.000	0.049	0.868
		Partial	0.260	0.000	0.000	0.047	0.830
Prodeck4	คานตัวนอก	Fully + Partial	0.332	-0.008	-0.001	0.156	0.964
	คานตัวใน	Fully + Partial	0.250	0.001	-0.001	0.059	0.759
Prodeck8	คานตัวนอก	Fully + Partial	0.319	-0.007	-0.001	0.155	0.978
	คานตัวใน	Fully + Partial	0.258	0.000	0.000	0.048	0.870
Prodeck 4 + 8	คานตัวนอก	Fully + Partial	0.326	-0.007	-0.001	0.155	0.965
	คานตัวใน	Fully + Partial	0.254	0.000	0.000	0.053	0.659

### 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S (LDF-S Relation)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของค่า LDF อันเนื่องมาจากระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ และรับแรงกระทำจากรถบรรทุกในกรณีที่ 1 เท่านั้น (ซึ่งได้แสดงให้เห็นในบทที่ 6 และหัวข้อ 7.2) ที่ผ่านมา ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ และแรงกระทำจากรถบรรทุกในกรณีที่ 1 มีผลต่อค่า LDF มากที่สุด พร้อมกับแสดงผลเปรียบเทียบค่า LDF ที่ได้มาจากการวิเคราะห์แบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์กับแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนด้วย

จากตารางที่ 6.6 และ 6.12 แสดงค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เมื่อมีแรงกระทำแบบกรณีที่ 1 ในทุกขนาดหน้าตัดของแบบจำลอง เฉพาะคานตัวนอกและคานตัวในตัวแรกของแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์และแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน

ตามลำดับ พบว่าค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (ตารางที่ 6.12) ส่วนใหญ่จะมีค่ามากกว่าค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (ตารางที่ 6.6) โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 7.3

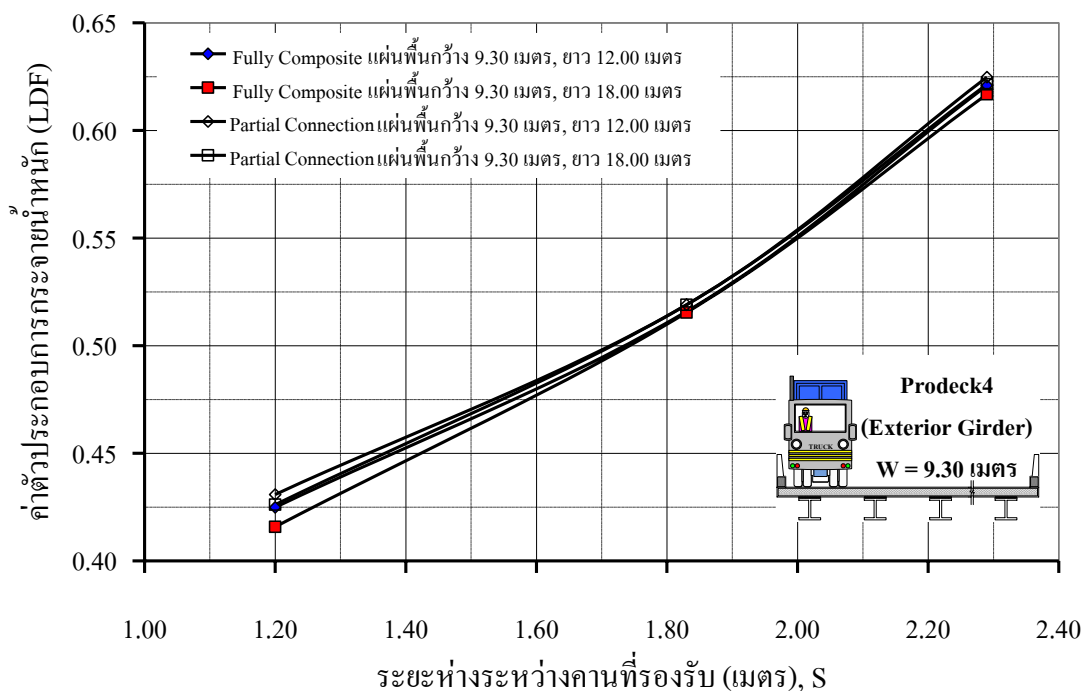
**ตารางที่ 7.3** ความแตกต่างของค่า LDF ระหว่างค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนกับค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์

กรณีที่ 1		เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า LDF			
CS...	สะพานยาว (เมตร)	แผ่นพื้นประเภท Prodeck4		แผ่นพื้นประเภท Prodeck8	
		คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก	คานตัวนอก	คานตัวในตัวแรก
CS1	12	1.41%	-0.19%	1.28%	1.09%
	18	2.50%	1.06%	1.49%	1.31%
CS2	12	0.60%	0.61%	0.71%	1.13%
	18	0.72%	0.48%	0.90%	1.17%
CS3	12	0.63%	-0.47%	0.87%	0.17%
	18	0.75%	-0.41%	0.92%	0.46%
CS4	12	1.61%	-0.09%	1.31%	1.31%
	18	1.67%	0.10%	1.59%	1.24%
CS5	12	0.61%	0.67%	0.73%	1.25%
	18	0.72%	0.57%	0.82%	1.13%
CS6	12	0.55%	-0.03%	0.71%	0.40%
	18	0.69%	-0.18%	0.83%	0.40%

หมายเหตุ: เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า LDF ในตารางที่ 7.3 เกิดจากการนำค่าความแตกต่างของค่า LDF ระหว่างค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนกับค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ เทียบกับค่า LDF ที่วิเคราะห์จากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์

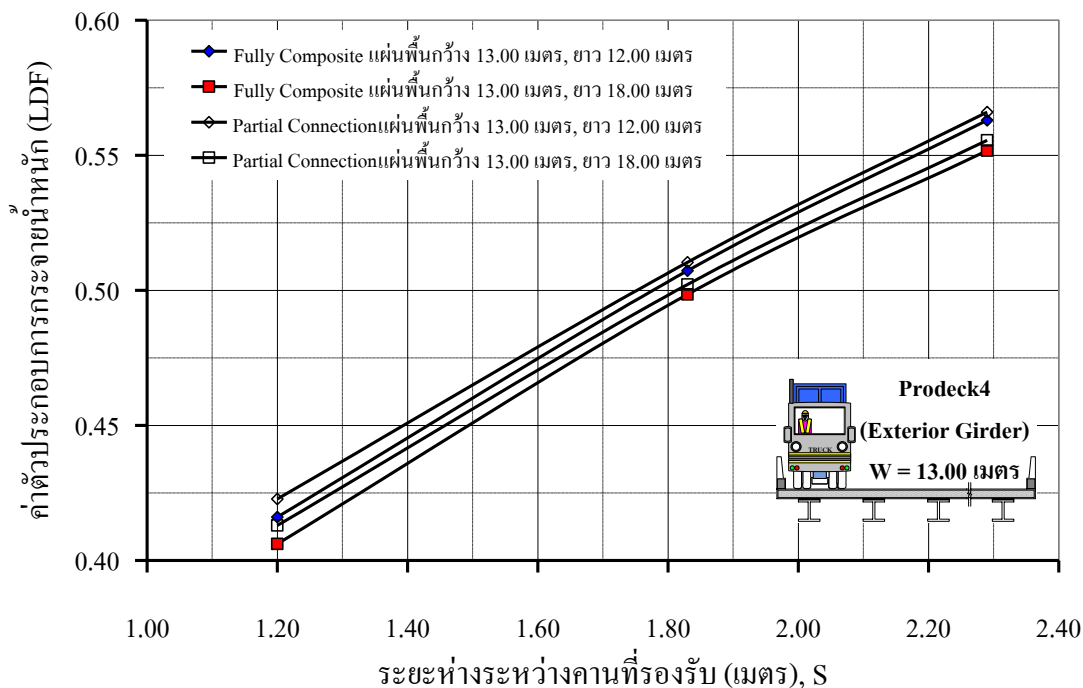
เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่า LDF ในตารางที่ 7.3 พบว่าค่า LDF ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์กับแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน มีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่า LDF โดยประมาณ 1.0 - 1.5 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของนักวิจัยท่านอื่น ได้แก่ Zhang และคณะ (2006), Liu และคณะ (2008) พบว่าผลการวิเคราะห์ค่า LDF โดยไฟไนต์อีลิเมนต์จากแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน มีค่าที่ใกล้เคียงเช่นเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าค่า LDF ที่มาจากการวิเคราะห์แบบพาราเมตริกทั้งสองแบบ มีความใกล้เคียงกัน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกระจายน้ำหนัก (LDF) กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) เนื่องมาจากแรงกระทำในกรณีที่ 1 ของการวิเคราะห์แบบพาราเมตริกทั้งสองวิธี ตามประเภทของแผ่นพื้นสะพาน (Prodeck4 และ Prodeck8) และตำแหน่งของคานที่รองรับ (เฉพาะคานตัวนอกและคานตัวในที่เกิดค่า LDF มากที่สุดและมากรองลงมาตามลำดับ) แสดงในรูปที่ 7.2 ถึง 7.9

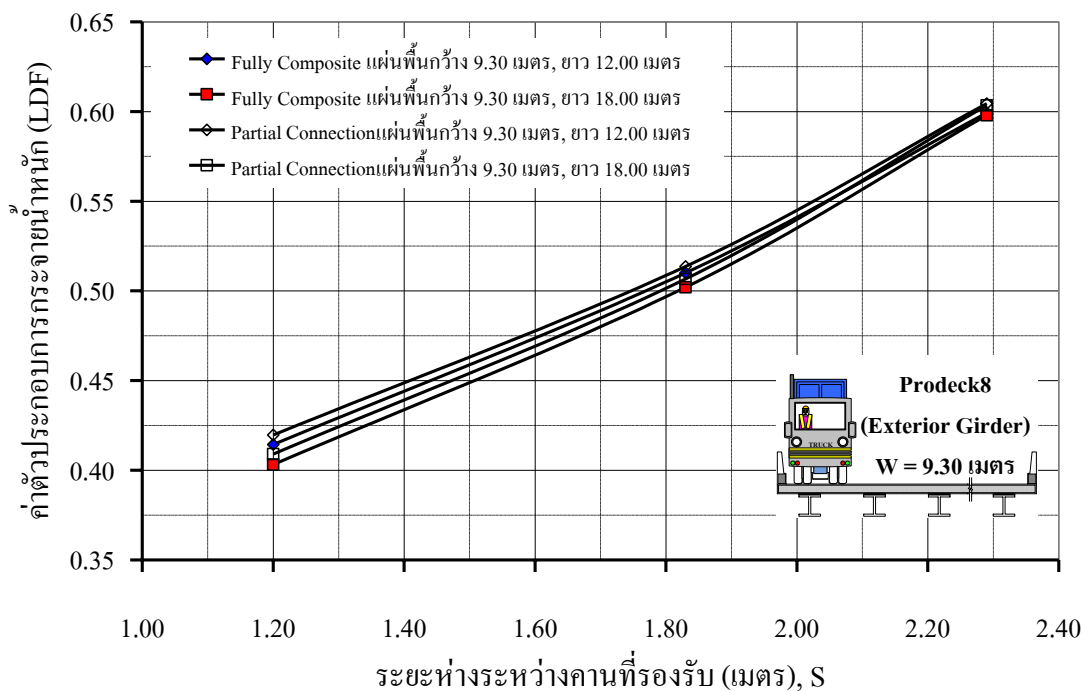


รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck4, W=9.30)

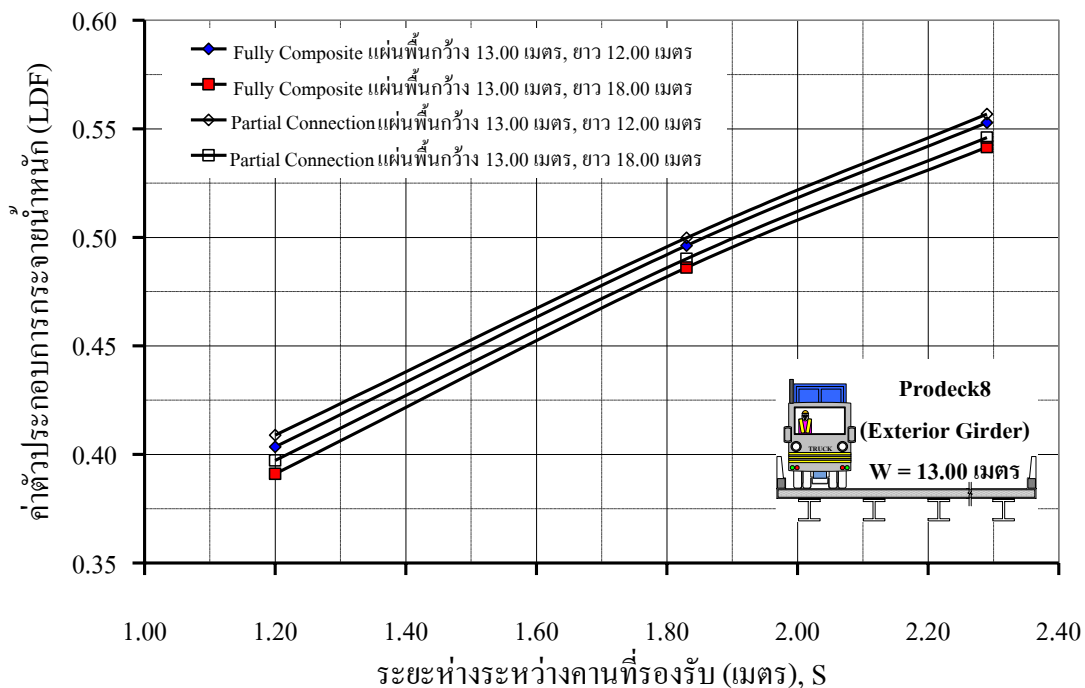




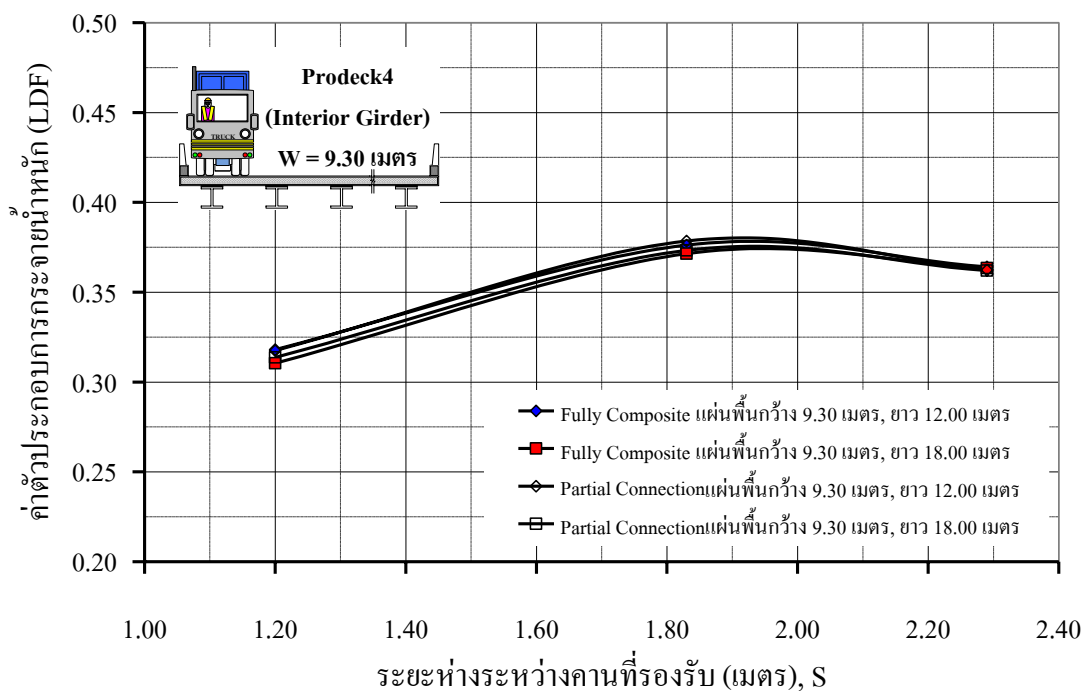
รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck4, W=13.00)



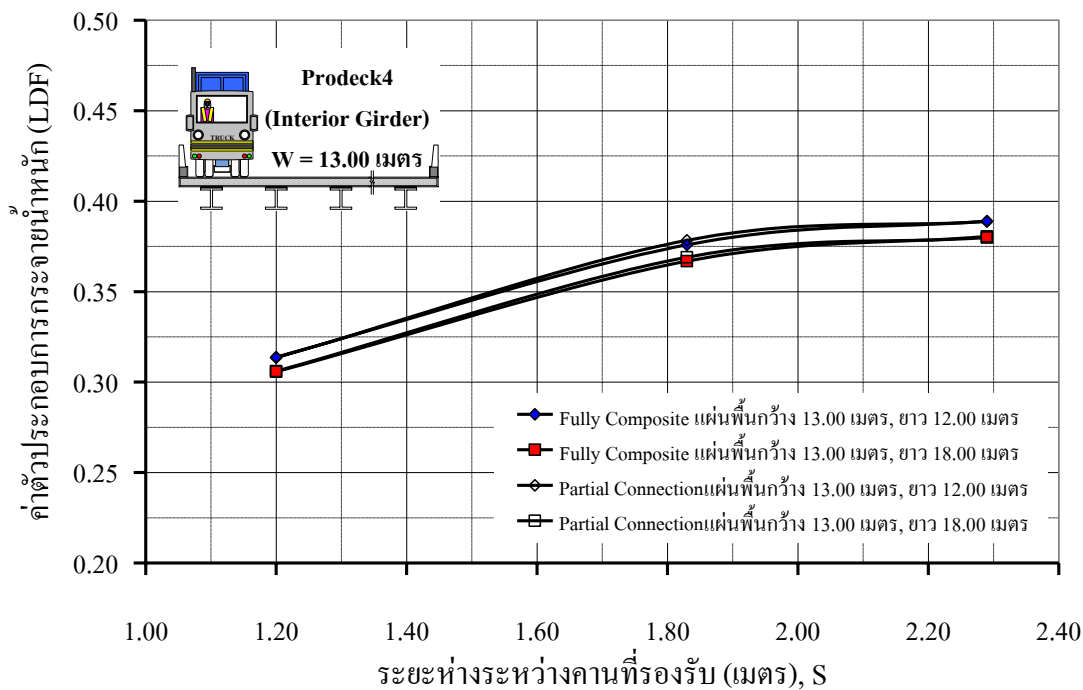
รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck8, W=9.30)



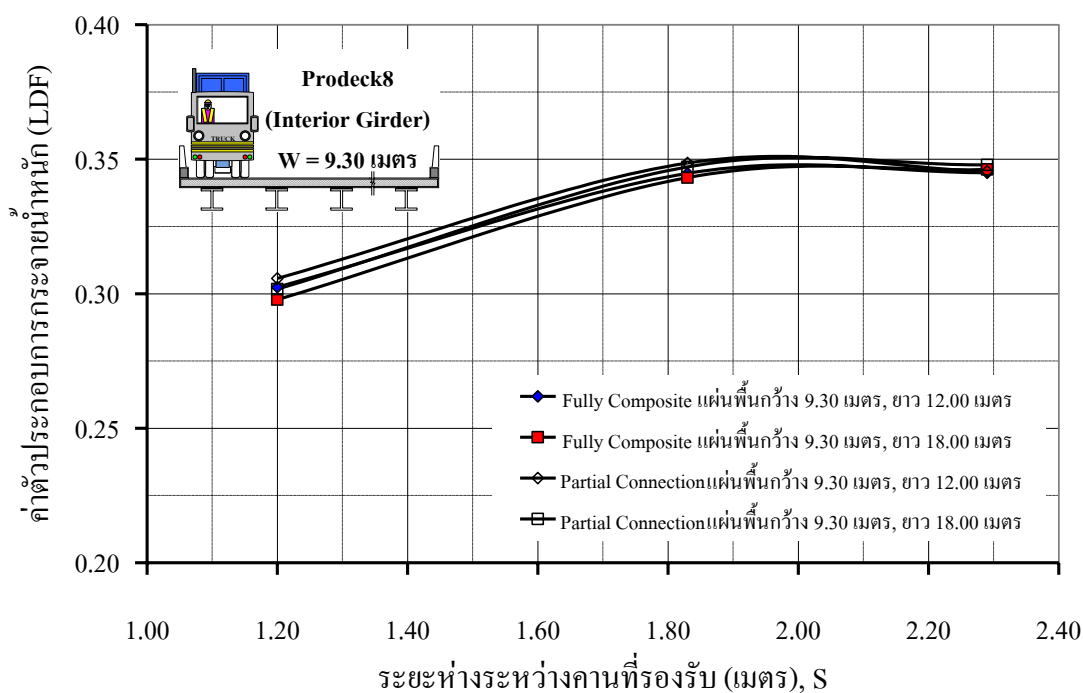
รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck8, W=13.00)



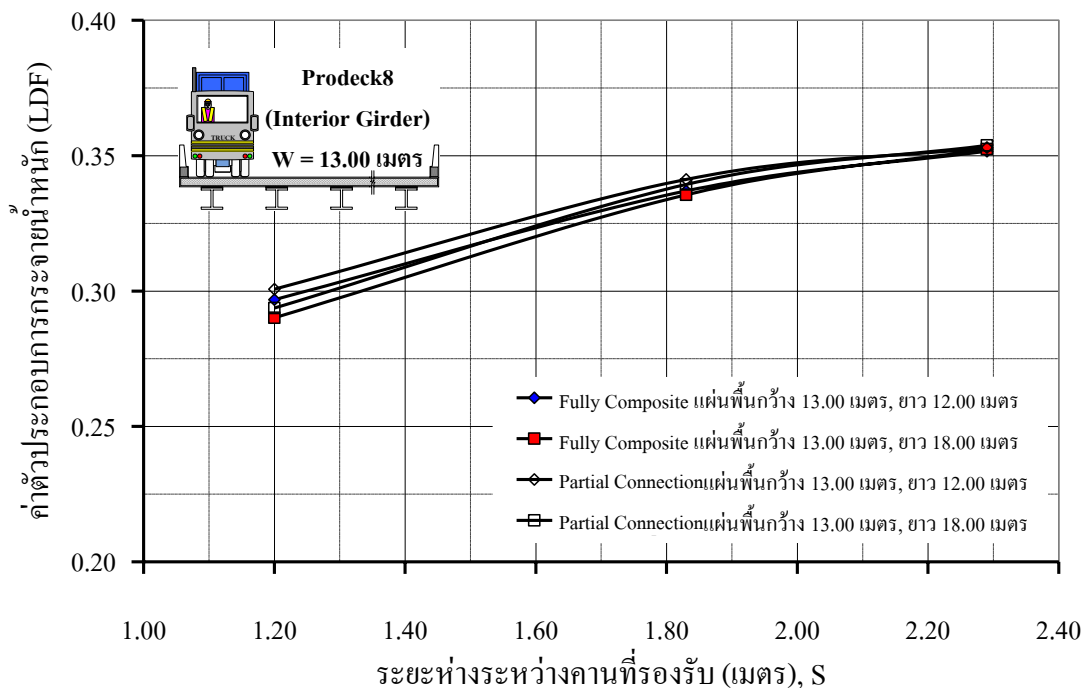
รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck4, W=9.30)



รูปที่ 7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck4, W=13.00)



รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck8, W=9.30)



รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวใน (Prodeck8, W=13.00)

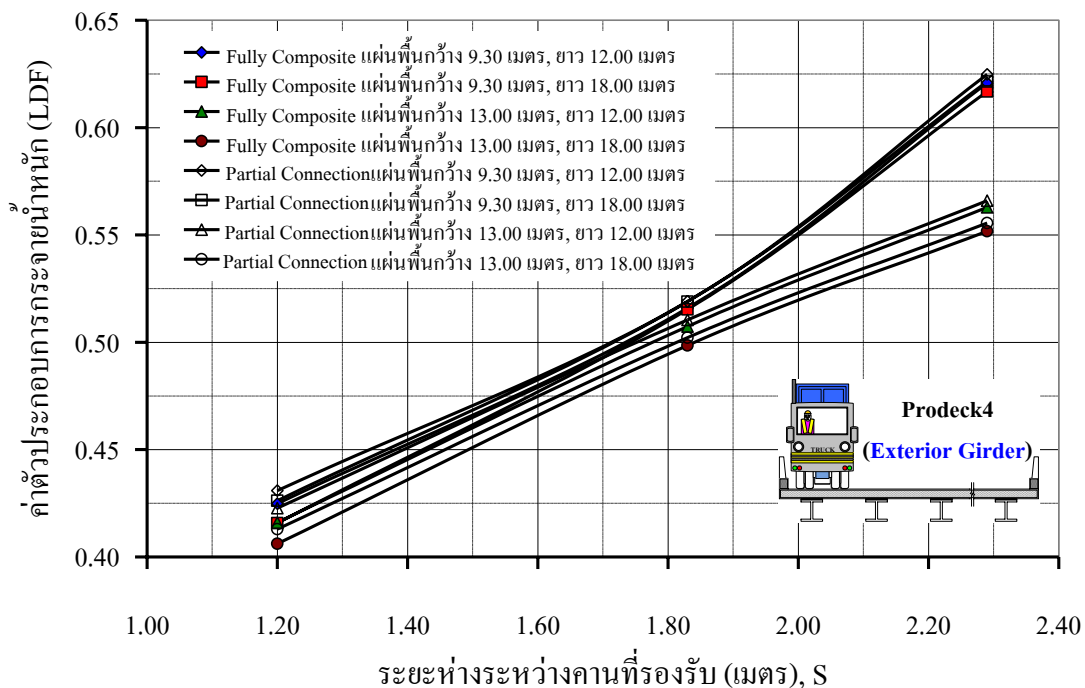
จากรูปที่ 7.2 ถึง 7.9 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีความกว้างของแบบจำลองเท่ากัน พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าตัว LDF เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มขึ้นนั้น มีลักษณะเหมือนกันระหว่างแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์กับแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน โดยแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่า LDF ที่เกิดกับคานตัวนอกจะมากกว่าที่เกิดกับคานตัวใน และเส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่า LDF ที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน จะอยู่เหนือเส้นแสดงความสัมพันธ์ของค่า LDF ที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์เล็กน้อย

ข้อสังเกต แบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน จะมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับสะพานจริงมากกว่าแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากพฤติกรรมของโครงสร้างจริงจะเกิดพฤติกรรมประกอบอย่างไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ค่า LDF ที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนมีแนวโน้มที่สูงกว่าค่า LDF ที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Yin Zhang และคณะ (2006) และเมื่อความกว้างของแบบจำลองคงที่แต่ความยาวของแบบจำลองเปลี่ยนจาก 12.00 เมตร

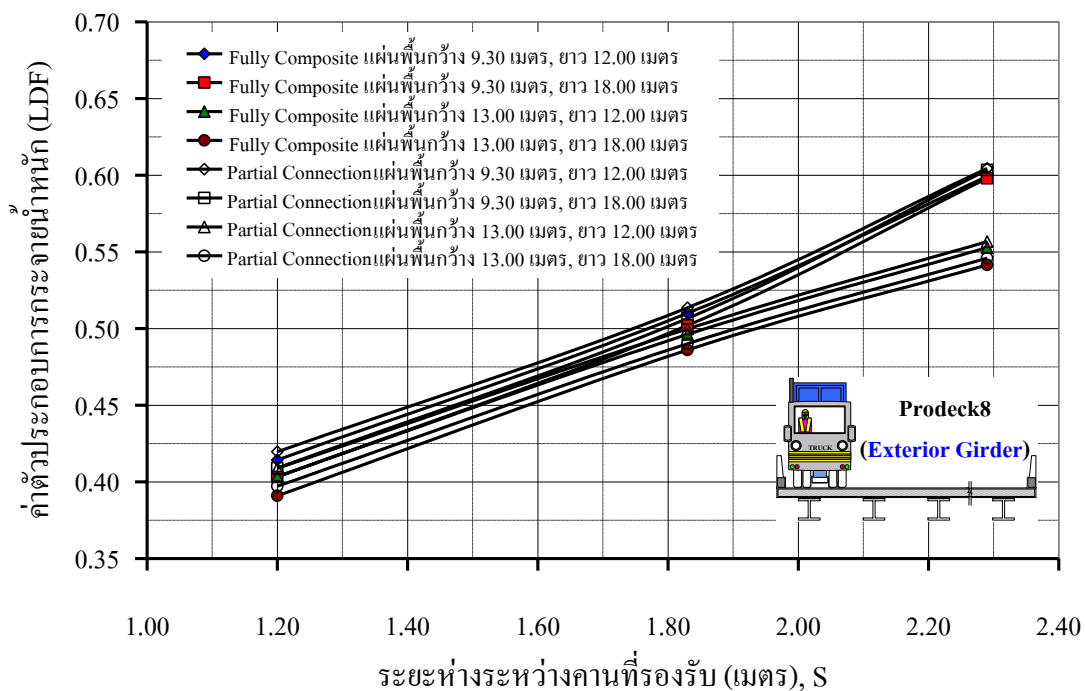
เป็น 18.00 เมตร ค่า LDF มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยโดยค่า LDF ที่เกิดขึ้นในกรณีที่แบบจำลองยาว 12.00 เมตร จะมีค่ามากกว่าค่า LDF ที่เกิดขึ้นในกรณีที่แบบจำลองยาว 18.00 เมตร เล็กน้อย

ในกรณีรูปที่ 7.6 ถึง 7.9 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นกับคานตัวในนั้น การเพิ่มขึ้นของค่า LDF เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มจาก 1.83 เมตร เป็น 2.29 เมตร มีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สำหรับในกรณีรูปที่ 7.6 ค่า LDF เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มจาก 1.83 เมตร เป็น 2.29 เมตร มีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากว่าเมื่อแบบจำลองถูกแรงกระทำจากรถบรรทุกในกรณีที่ 1 ซึ่งตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกอยู่คงที่คือตรงกับตำแหน่งคานที่รองรับตัวนอก ในขณะที่เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเพิ่มขึ้นทำให้ตำแหน่งของคานตัวในตัวแรกห่างจากตำแหน่งเดิมรวมถึงห่างจากตำแหน่งของแรงกระทำจากรถบรรทุกออกไป ทำให้การส่งถ่ายแรงจากรถบรรทุกสู่คานตัวนอกมีมากขึ้น และการส่งถ่ายแรงจากรถบรรทุกสู่คานตัวในตัวแรกมีค่าน้อยลงเมื่อระยะห่างเพิ่มมากขึ้น ทำให้ผลตอบสนอง (ค่าการยืดหดตัว) ที่ได้เพื่อใช้ในการคำนวณค่า LDF สำหรับคานที่รองรับตัวในตัวแรกมีค่าน้อยลงตามไปด้วย

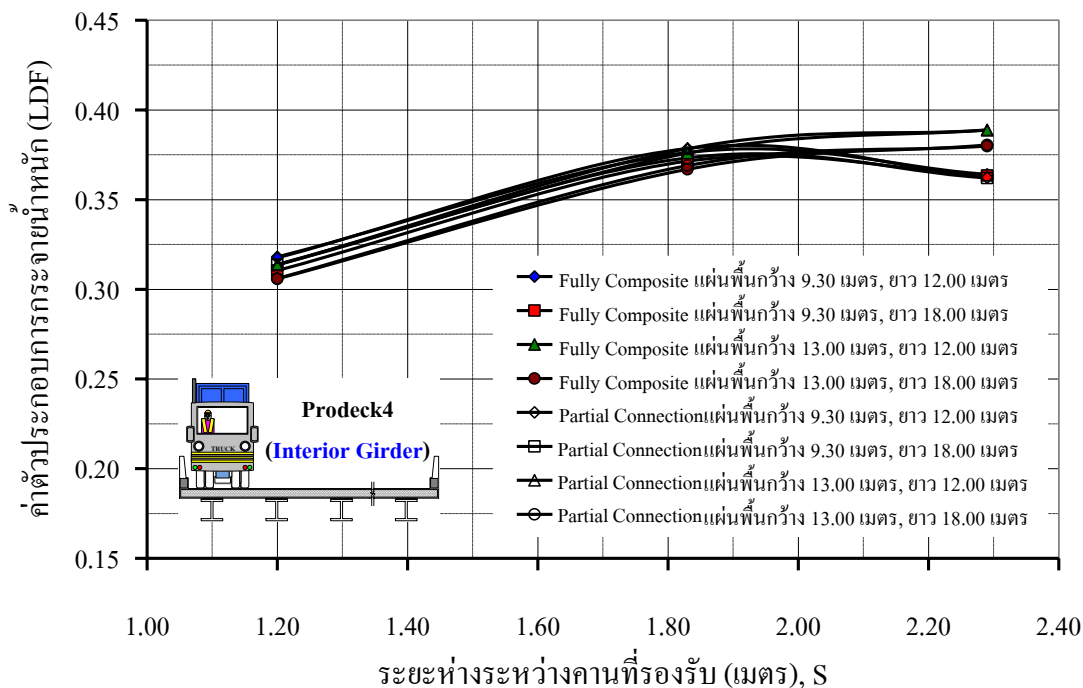
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) สำหรับคานที่รองรับตัวนอกและคานที่รองรับตัวในตัวแรก ของแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 ดังแสดงในรูปที่ 7.10 ถึง 7.13 ซึ่งแต่ละรูปแสดงผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งหมด 8 รูปแบบ จากรูปที่ 7.10 และ 7.11 พบว่าผลที่เกิดขึ้นกับคานที่รองรับตัวนอกนั้น เมื่อระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.83 เมตร เป็น 2.29 เมตร โดยที่ความยาวของแบบจำลองมีค่าคงที่ (ความกว้างของแบบจำลองมีการเปลี่ยนแปลง) จะเห็นว่าค่า LDF มีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะแตกต่างกับผลในรูปที่ 7.12 และ 7.13 จะเห็นว่าค่า LDF ยังคงมีแนวโน้มของการเพิ่มที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นความกว้างของแบบจำลองมีผลต่อค่า LDF มากกว่าความยาวของแบบจำลอง และมีผลโดยตรงกับคานที่รองรับตัวนอกมากกว่าคานที่รองรับตัวในตัวแรก ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น และในส่วนต่อไปจะทำการพิจารณาถึงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) ในรูปแบบสมการเชิงเส้น



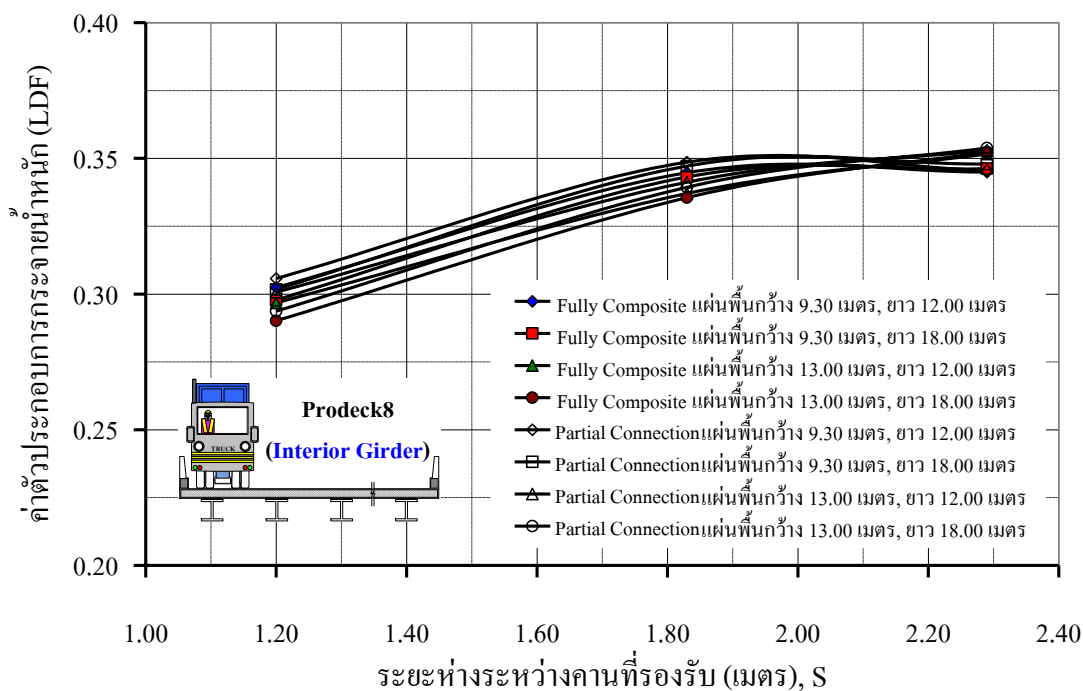
รูปที่ 7.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck4)



รูปที่ 7.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวนอก (Prodeck8)



รูปที่ 7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวในตู้แรก (Prodeck4)



รูปที่ 7.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของคานที่รองรับตัวในตู้แรก (Prodeck8)

#### 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ในรูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ ทั้งแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite) และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection) โดยมีแรงกระทำจากรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองในกรณีที่ 1 ของแบบจำลองที่มีแผ่นพื้นสะพานประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 มาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S เฉพาะที่เกิดขึ้นกับคานที่รองรับตัวนอก (Exterior Girder) และคานที่รองรับตัวใน (Interior Girder) ซึ่งเป็นตำแหน่งของคานที่รองรับที่มีค่า LDF มากที่สุดนั้น เพื่อจะแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปแบบของสมการประมาณค่าที่เกี่ยวข้องเนื่องกับการวิเคราะห์แบบจำลองแต่ละรูปแบบในลักษณะเชิงเส้น

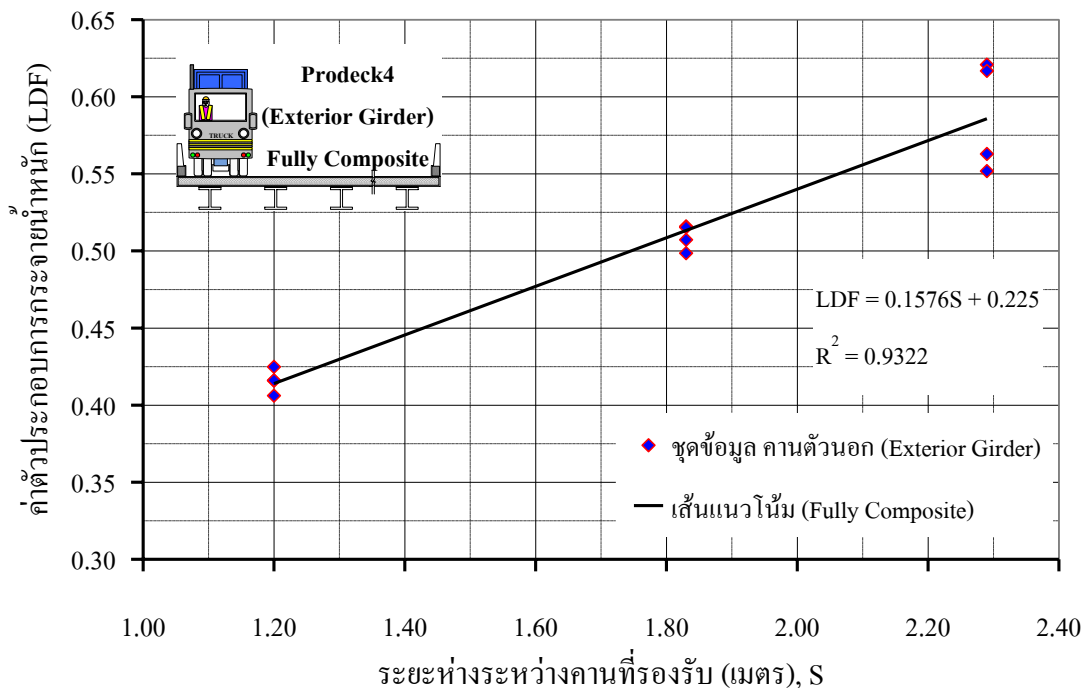
ทั้งนี้การนำเสนอความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S ในรูปแบบของสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นจะกล่าวเป็นสองส่วนด้วยกัน โดยแบ่งแยกแต่ละส่วนจากการรวมชุดของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองแต่ละประเภท ดังนี้

1) ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S ตามลำดับของการวิเคราะห์แบบจำลองที่ผ่าน มาซึ่งชุดข้อมูลแต่ละชุดที่แสดงความสัมพันธ์แบ่งตามรูปแบบของการวิเคราะห์ (แบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน), ประเภทของหน้าตัดของแบบจำลอง (Prodeck4 และ Prodeck8) และตำแหน่งของคานที่รองรับที่เกิดค่า LDF มากที่สุดและมากในลำดับถัดมา ซึ่งได้แก่ คานที่รองรับตัวนอกและตัวใน ตามลำดับ ถูกแสดงในรูปที่ 7.14 ถึง 7.17 (รูปทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง) และรวมผลทั้งหมดในส่วนนี้ไว้ในตารางที่ 7.4

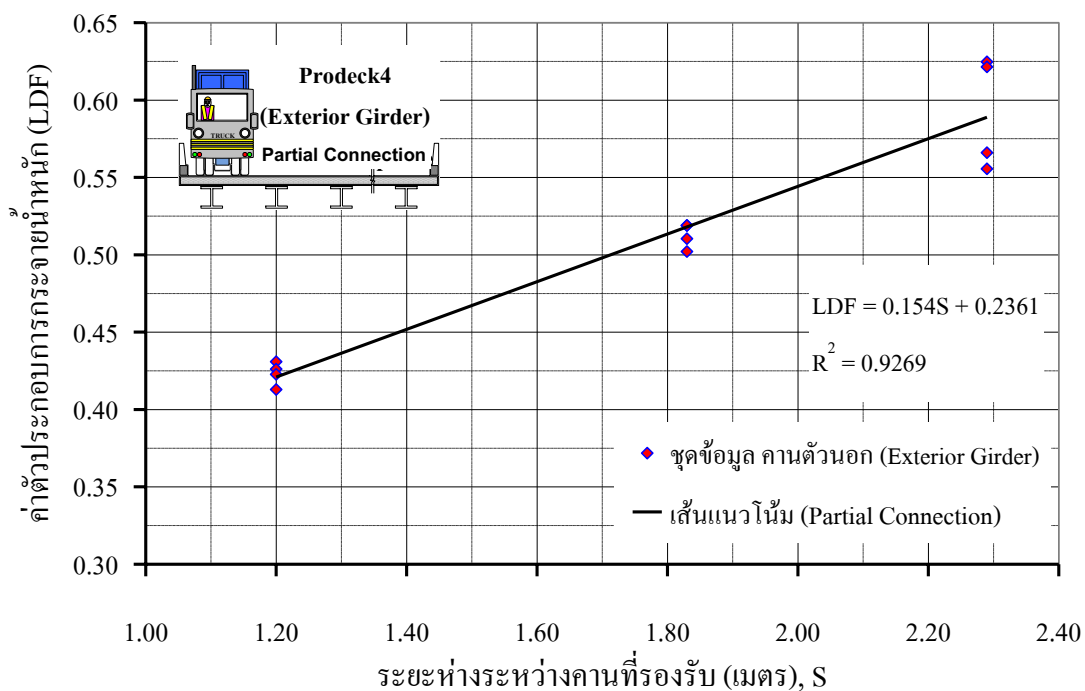
2) ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S โดยการรวมชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์และแบบจำลองประเภทที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วนเข้าด้วยกัน ตลอดจนรวมชุดข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ประเภทของหน้าตัดที่แตกต่างกัน (Prodeck4 และ Prodeck8) ยกเว้นตำแหน่งของคานที่รองรับที่เกิดค่า LDF มากที่สุดและมากรองลงมา ถูกแสดงในรูปที่ 7.18 ถึง 7.19 (รูปทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ง) และรวมผลทั้งหมดในส่วนนี้ไว้ในตารางที่ 7.5

(หมายเหตุ ในการนำเสนอจะใช้สัญลักษณ์ ได้แก่ Fully Composite สัญลักษณ์คือ FC, Partial Connection สัญลักษณ์คือ PC, Prodeck4 สัญลักษณ์คือ PD4, Prodeck8 สัญลักษณ์คือ PD8, Exterior Girder สัญลักษณ์คือ Ext-G และ Interior Girder สัญลักษณ์คือ Int-G)

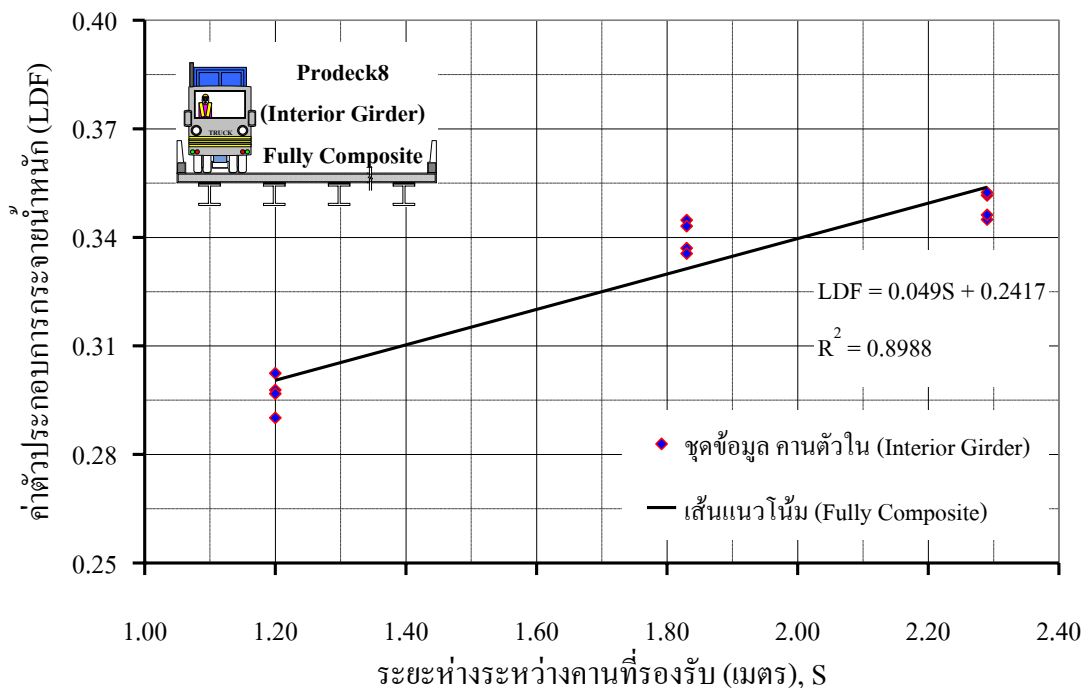




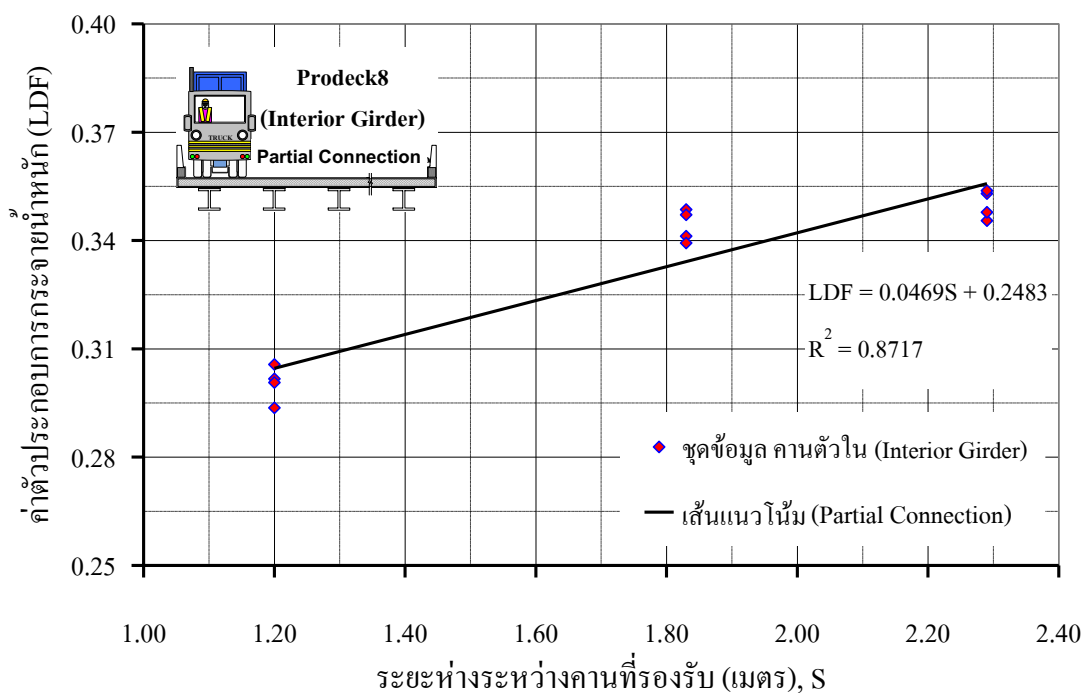
รูปที่ 7.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC)



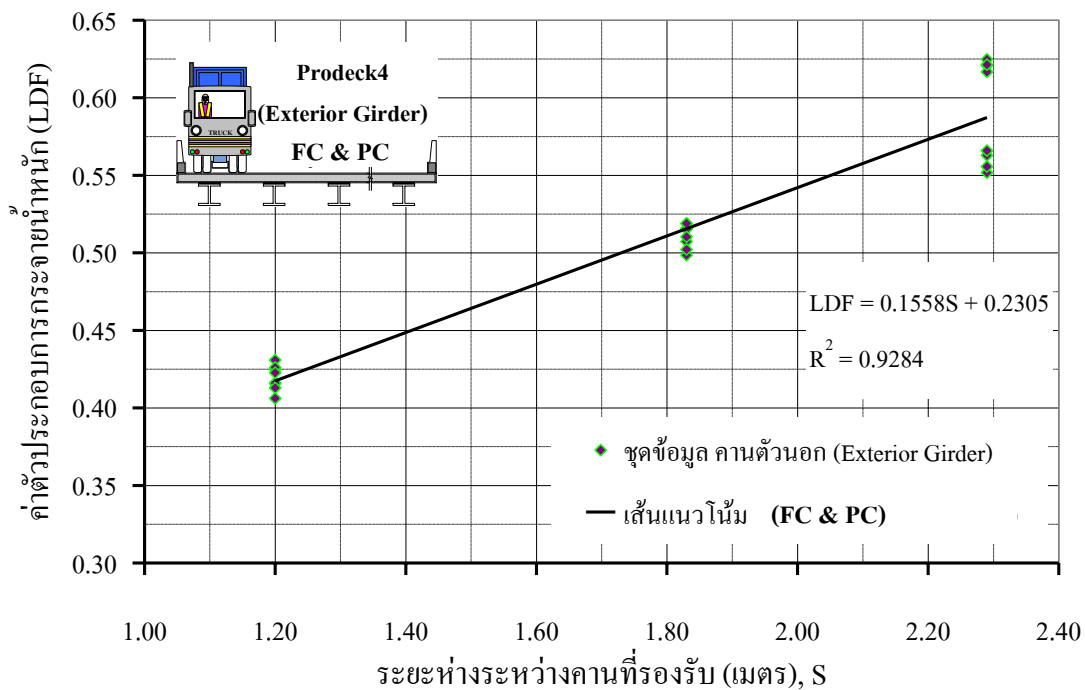
รูปที่ 7.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC)



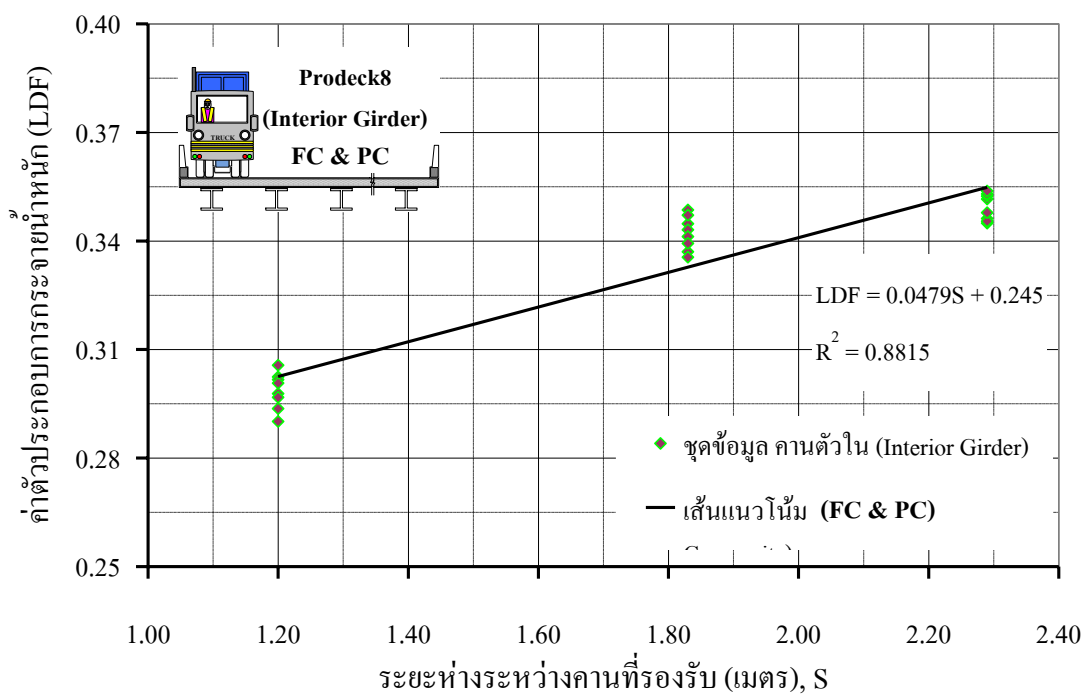
รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC)



รูปที่ 7.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC)



รูปที่ 7.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC+PC)



รูปที่ 7.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC+PC)

ตารางที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น (ส่วนที่ 1)

หน้าตัดแผ่นพื้นประเภท		Fully Composite		Partial Connection	
		LDF	R <sup>2</sup>	LDF	R <sup>2</sup>
Prodeck4	คานดัดนอก	0.1576S + 0.2250	0.9322	0.1540S + 0.2361	0.9269
	คานดัดใน	0.0594S + 0.2477	0.7919	0.0581S + 0.2506	0.7566
Prodeck8	คานดัดนอก	0.1556S + 0.2155	0.9462	0.1546S + 0.2221	0.9437
	คานดัดใน	0.0490S + 0.2417	0.8988	0.0469S + 0.2483	0.8717
Prodeck(4&8)	คานดัดนอก	0.1566S + 0.2202	0.9316	0.1543S + 0.2291	0.9276
	คานดัดใน	0.0542S + 0.2447	0.6815	0.0525S + 0.2494	0.6720

ตารางที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ในรูปแบบของสมการเชิงเส้น (ส่วนที่ 2)

หน้าตัดแผ่นพื้นประเภท		Fully Composite & Partial Connection	
		LDF	R <sup>2</sup>
Prodeck4	คานดัดนอก	0.1558S + 0.2305	0.9284
	คานดัดใน	0.0587S + 0.2491	0.7741
Prodeck8	คานดัดนอก	0.1551S + 0.2188	0.9439
	คานดัดใน	0.0479S + 0.2450	0.8815
Prodeck(4 & 8)	คานดัดนอก	0.1555S + 0.2247	0.9285
	คานดัดใน	0.0533S + 0.2471	0.6760

จากตารางที่ 7.4 และ 7.5 ซึ่งเป็นตารางแสดงรูปแบบของสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear Regression) โดยนำชุดข้อมูลต่างๆจากการวิเคราะห์แบบจำลองแต่ละประเภทที่แบ่งเป็นสองส่วนดังกล่าวมาแล้วข้างต้น โดยสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นแต่ละสมการจะมีค่า Multiple Coefficient of Determination (R<sup>2</sup>) ซึ่งจะเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีความสอดคล้องกันมากน้อยเพียงใด โดยตัวแปรอิสระและตัวแปรตามในที่นี้ ได้แก่ ค่าระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ และค่าตัวประกอบกระจายน้ำหนัก (S และ LDF) ตามลำดับ ทั้งนี้ในกรณีที่ค่า R<sup>2</sup> มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามอย่างมาก

อาจกล่าวได้ว่าค่า Multiple Coefficient of Determination ( $R^2$ ) เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า สมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่ได้มามีความใกล้เคียงหรือสอดคล้องกับชุดข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์หาสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นนั้น มากน้อยเพียงใด ในกรณีที่ค่า  $R^2$  มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นกับชุดข้อมูล มีความใกล้เคียงกันดี (มีความคลาดเคลื่อนน้อย) อย่างเช่นจากรูปที่ 7.18 และ 7.19 ที่มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9284 และ 0.8815 ตามลำดับ พบว่าเส้นตรงกับชุดข้อมูลในรูปที่ 7.18 มีระยะห่างโดยเฉลี่ยระหว่างเส้นตรงกับชุดข้อมูลน้อยกว่าระยะห่างโดยเฉลี่ยระหว่างเส้นตรงกับชุดข้อมูลในรูปที่ 7.19 ส่งผลให้ค่า  $R^2$  มีค่าที่แตกต่างกัน

ดังนั้นจากตารางที่ 7.4 และ 7.5 พบว่า สมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่เกิดมาจากชุดข้อมูลที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์มีความสอดคล้องกันมากกว่าสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่เกิดมาจากชุดข้อมูลที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน เนื่องจากมีค่า  $R^2$  ที่มากกว่าหรือเข้าใกล้ 1 มากกว่า และยังพบอีกว่าสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่เกิดมาจากชุดข้อมูลของคานที่รองรับตัวนอกมีความสอดคล้องใกล้เคียงกันดีกว่าสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่เกิดมาจากชุดข้อมูลของคานตัวใน รวมถึงชุดข้อมูลของแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 ให้สมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่สอดคล้องใกล้เคียงกับชุดข้อมูลกันดีกว่าสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่เกิดจากชุดข้อมูลของแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 ด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่กล่าวมาข้างต้น

เพราะฉะนั้น สามารถสรุปได้ว่าการนำสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นจากตารางที่ 7.4 และ 7.5 ไปใช้ ควรพิจารณาจากค่า  $R^2$  นอกจากนี้ส่วนสำคัญที่ต้องพิจารณาร่วมคือประเภทของสะพานและคานที่รองรับ ซึ่งมีผลต่อค่า LDF ทั้งสิ้นและยังส่งผลให้รูปแบบของสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นมีความแตกต่างกันอีกด้วย ดังจะกล่าวในหัวข้อต่อไป เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่ถูกศึกษาโดยนักวิจัยท่านอื่นๆ ในรูปแบบที่แตกต่างกัน

## 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ของนักวิจัยท่านอื่นๆ (เฉพาะสะพานที่มีพื้นสะพานเป็น FRP และรองรับด้วยคานเหล็ก) และงานวิจัยนี้

ในบทที่ 2 ได้ทำการศึกษาบทความต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ โดยบทความส่วนหนึ่ง Luo (2003), Tunner (2004), Salim (2006), Zhang (2006), Moses (2006) และ Liu (2008) ได้นำเสนอถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (LDF) กับ ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) จากรูปแบบของการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ การวิเคราะห์จากการทดสอบสะพานจริงในภาคสนามและในห้องปฏิบัติการ รวมถึงการวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยรูปแบบการวิเคราะห์ที่กล่าวมามีลักษณะที่เหมือนกันคือ สะพานหรือแบบจำลองของสะพานมีแผ่นพื้นเป็นแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและถูกรองรับด้วยคานหรือแบบจำลองของคานที่เป็นเหล็ก

ดังนั้น ในหัวข้อนี้ ได้นำความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S ที่ถูกแสดงโดยนักวิจัยตามที่กล่าวมา ได้แก่ Luo (2003), Tunner (2004), Salim (2006), Zhang (2006), Moses (2006) และ Liu (2008) เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างค่า LDF เนื่องมาจากความแตกต่างของรูปแบบของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย รวมถึงประเภทและขนาดของคานเหล็กที่รองรับ ตลอดจนทำการเปรียบเทียบผลดังกล่าวกับการวิจัยนี้รวมถึงนำเสนอสมการการประมาณค่าแบบเชิงเส้นเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์และออกแบบคานเหล็กที่รองรับพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย ในเบื้องต้นต่อไป

โดยค่าจากการวิเคราะห์ของนักวิจัยที่กล่าวมา แสดงในตารางที่ 7.6 พบว่าค่า LDF มีความแตกต่างกันเนื่องด้วยระยะห่างระหว่างคานที่รองรับและประเภทของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยมีความแตกต่างกัน หรือในกรณีที่แผ่นพื้นสะพานเป็นประเภทเดียวกันและมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากันยังมีค่า LDF ที่แตกต่างกันได้ อย่างเช่น ผลการวิเคราะห์ค่า LDF ของ Tunner (2004) และ Moses (2006) ที่มีแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยแก้วมีหน้าตัดแบบคางหมู (GFRP (Trapazoidal)) เหมือนกัน และมีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากัน ( $S = 2.440$  เมตร) ยังมีค่า LDF ที่แตกต่างกัน (Tunner (2004) และ Moses (2006) วิเคราะห์ค่า LDF จากการทดสอบจริงในภาคสนาม ซึ่งสะพานที่ถูกทดสอบเป็นสะพานชุดเดียวกัน แต่ทำการทดสอบในช่วงระยะเวลาที่ต่างกัน) และจากข้อมูลทั้งหมดในตารางที่ 7.6 เมื่อนำไปแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S และรูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นดังแสดงในรูปที่ 7.20 และเมื่อรวมชุดข้อมูลจากนักวิจัยท่านอื่นๆ (ตารางที่ 7.6) กับชุดข้อมูลจากการวิจัยในครั้งนี้ (ตารางที่ 6.6 และ 6.12 เฉพาะคานตัวนอก) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S และสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 7.21

ตารางที่ 7.6 สรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาค่าความสัมพัทธ์ระหว่างค่า LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) ของสะพานที่มีพื้นสะพานเป็น FRP รองรับด้วยคานเหล็ก

ที่	ผู้วิจัย	ประเภทแผ่นพื้น (FRP Deck Type)	คานเหล็ก (Steel Girder)	ตำแหน่งคานที่รองรับ	ระยะห่าง (S) (เมตร)	ค่า LDF	สมการ	หมายเหตุ (วิธีวิเคราะห์)	
1	Salim (2006)	Honey Comb	14-W24x55	คานตัวนอก	0.686	0.234	S/2931	ภาคสนาม	
2	Luo (2003)	MMC	5-W24x104	คานตัวนอก	1.754	0.42	S/4176	ภาคสนาม	
3	Tunner (2004)	GFRP (Trapezoidal)	5-W36x150	คานตัวนอก	2.44	0.44	S/5545	ภาคสนาม	
4	Zhang (2006)	Honey Comb	14-W21x68	คานตัวใน	0.686	0.226	S/3035 (max.)	ห้องปฏิบัติการ	
				คานตัวใน	0.686	0.184		ไฟในที่อลิเมนต์	
				คานตัวนอก	0.686	0.17		ไฟในที่อลิเมนต์	
				คานตัวนอก	0.686	0.141		ห้องปฏิบัติการ	
			5-W36x232	คานตัวนอก	2.29	0.649	S/3529 (max.)	ไฟในที่อลิเมนต์	
				คานตัวใน	2.29	0.605		ไฟในที่อลิเมนต์	
				คานตัวนอก	2.29	0.408		S/5613 (min.)	ไฟในที่อลิเมนต์
				คานตัวนอก	2.29	0.428			ไฟในที่อลิเมนต์

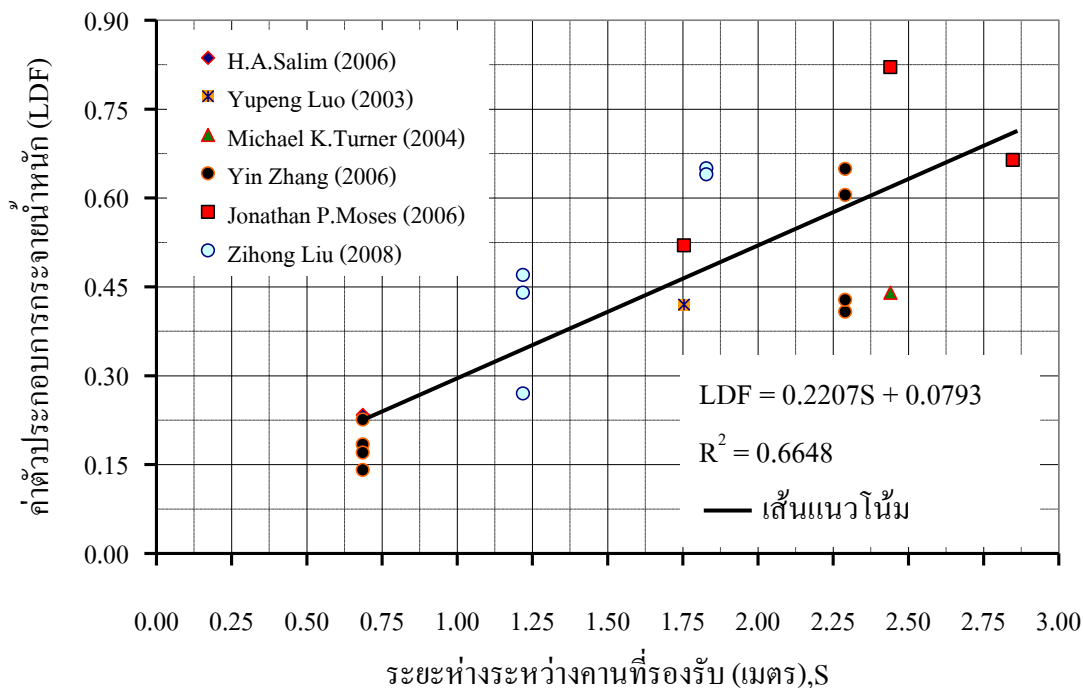
หมายเหตุ: สมการ LDF = S / (ค่าคงที่) โดย S มีหน่วยมิลลิเมตร

**ตารางที่ 7.6 (ต่อ) สรุปเปรียบเทียบผลการศึกษาคำถามสัมพันธระหว่างค่า LDF กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (S) ของสะพานที่มีพื้นสะพานเป็น FRP รองรับด้วยคานเหล็ก**

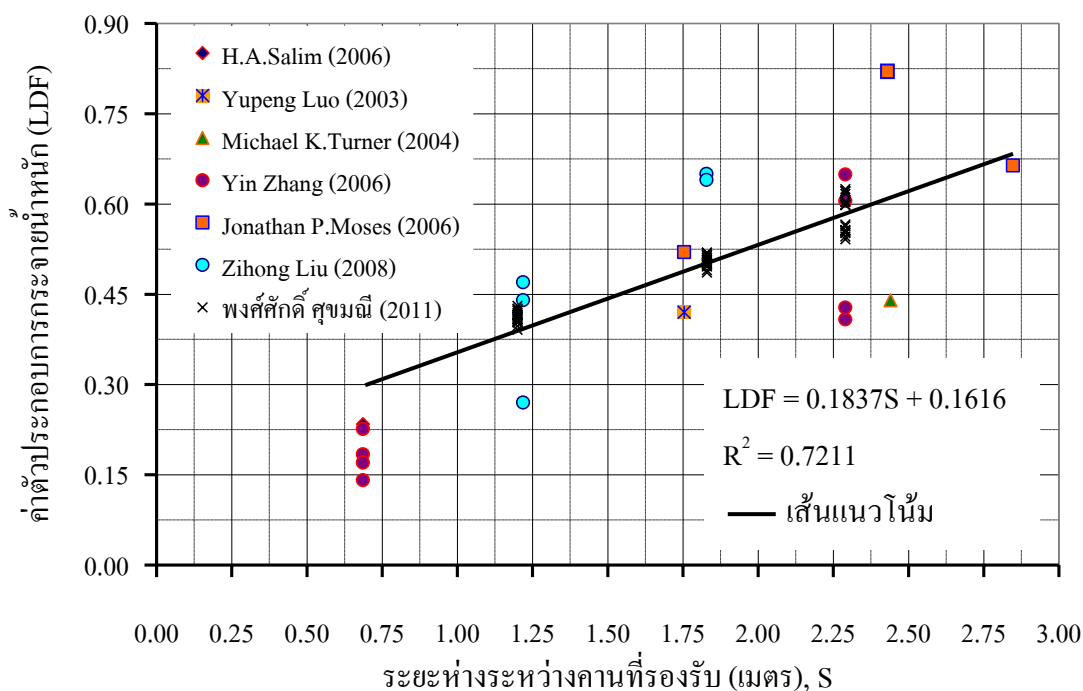
ที่	ผู้วิจัย	ประเภทแผ่นพื้น (FRP Deck Type)	คานเหล็ก (Steel Girder)	ตำแหน่งคานที่รองรับ	ระยะห่าง (S) (เมตร)	ค่า LDF	สมการ	หมายเหตุ (วิธีวิเคราะห์)
5	Moses (2006)	GFRP (Trapezoidal)	4-W36x260	คานตัวนอก	2.847	0.664	LDF	ภาคสนาม
				คานตัวนอก	1.754	0.52	S/3373	ภาคสนาม
				คานตัวนอก	2.44	0.821	S/2972	ภาคสนาม
6	Liu (2008)	Strongwell	6-W14x34	คานตัวใน	1.2192	0.47	S/2594 (max.)	ห้องปฏิบัติการ
				คานตัวนอก	1.2192	0.27	S/4516 (min.)	ห้องปฏิบัติการ
				คานตัวนอก	1.2192	0.44		ห้องปฏิบัติการ
				คานตัวนอก	1.8288	0.65	S/2814	ไฟไนท์อิลิเมนต์
				คานตัวนอก	1.8288	0.64		ไฟไนท์อิลิเมนต์
				คานตัวนอก				

หมายเหตุ: สมการ  $LDF = S / (\text{ค่าคงที่})$  โดย S มีหน่วยมิลลิเมตร



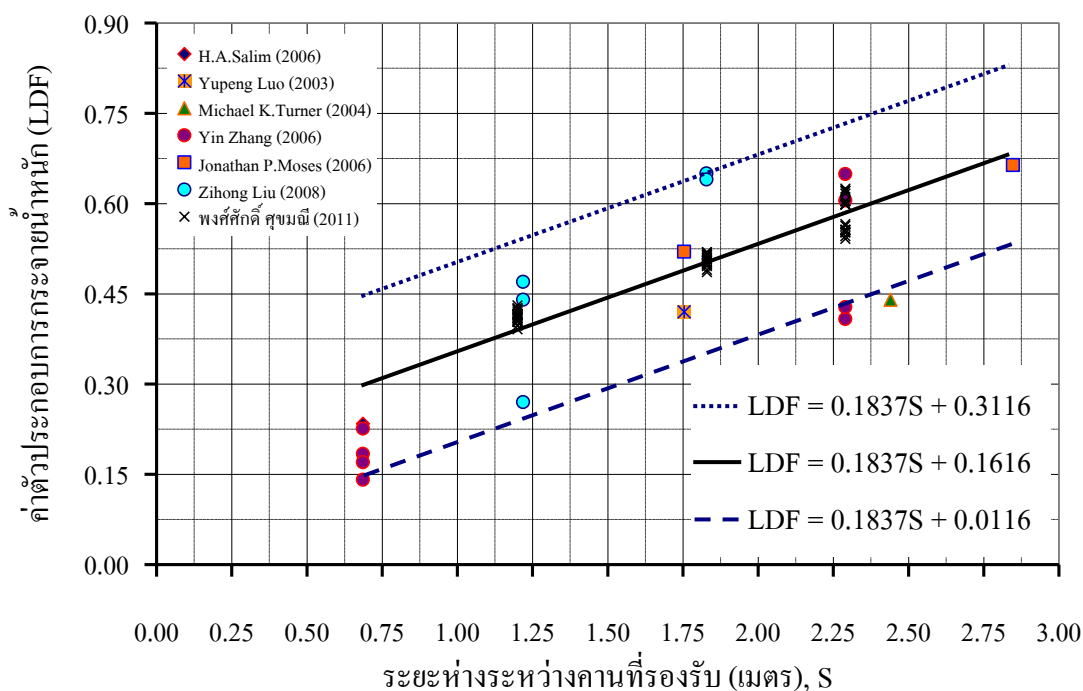


รูปที่ 7.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (จากตารางที่ 7.6)



รูปที่ 7.21 เส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (จากตารางที่ 7.6, 6.6 และ 6.12)

จากรูปที่ 7.20 พบว่าชุดข้อมูลมีการกระจายตัวมาก และเมื่อนำชุดข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น รูปแบบของสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นคือ  $LDF = 0.2207S + 0.0793$  และมีค่า  $R^2 = 0.6648$  ซึ่งแสดงว่าสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่วิเคราะห์ได้มาจากชุดข้อมูลจากตารางที่ 7.6 มีความสัมพันธ์ที่ดี ( $R^2$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.50 ถึง 0.80) และเมื่อรวมชุดข้อมูลจากนักวิจัยท่านอื่นๆ (ตารางที่ 7.6) กับชุดข้อมูลจากการวิจัยในครั้งนี้ (ตารางที่ 6.6 และ 6.12) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF กับ S และสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น (เส้นทึบ) ดังแสดงในรูปที่ 7.21 รูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นคือ  $LDF = 0.1837S + 0.1616$  และมีค่า  $R^2 = 0.7211$  ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ที่ดีเช่นกัน ส่วนเส้นประทั้งสองเส้นในรูปที่ 7.22 เกิดจากการเลื่อนเส้นทึบหรือเส้นแนวโน้มในรูปที่ 7.21 ขึ้นและลงจากแนวเดิมเป็นระยะเท่ากับ 0.15 ในแนวแกนของค่า LDF และสังเกตเห็นว่า ข้อมูลส่วนใหญ่อยู่ระหว่างเส้นประทั้งสอง โดยสมการของเส้นประทั้งสอง ได้แก่ เส้นประเส้นบนและเส้นประเส้นล่างคือ  $LDF = 0.1837S + 0.3116$  และ  $LDF = 0.1837S + 0.0116$  ตามลำดับ



รูปที่ 7.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (ข้อมูลจากตารางที่ 6.6, 6.12 และ 7.6)

พบว่า ข้อมูลส่วนใหญ่ (ประมาณกว่า 90 เปอร์เซ็นต์) อยู่ระหว่างเส้นประทั้งสอง หรืออาจกล่าวได้ว่า สมการของเส้นประเส้นบนและเส้นประเส้นล่าง สามารถที่จะใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการประมาณค่า LDF ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสำหรับรูปแบบของสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและรองรับด้วยคานเหล็ก ที่ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับมีความแตกต่างกันได้

ทั้งนี้ สมการประมาณค่าแบบเชิงเส้นที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่วิเคราะห์หาค่า LDF ในการวิจัยนี้ รวมถึงที่ถูกวิเคราะห์โดยนักวิจัยท่านอื่นๆ (Luo (2003), Turner (2004), Salim (2006), Zhong (2006), Moses (2006) และ Liu (2008)) ถูกนำเสนอแสดงในตารางที่ 7.7

ตารางที่ 7.7 สรุปสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

ลำดับที่	ผู้วิจัย	ประเภทแผ่นพื้น	LDF
1	Salim (2006)	Honey Comb	S/2931
2	Luo (2003)	MMC	S/4176
3	Turner (2004)	GFRP (Trapazoidal)	S/5545
4	Zhang (2006)	Honey Comb	S/5613 (Min.)
			S/3529 (Max.)
5	Moses (2006)	GFRP (Trapazoidal)	S/3373
			S/4288
6	Liu (2008)	Strongwell	S/2814
เมื่อรวมผลจากข้อมูลจากลำดับที่ 1 ถึง 6 (รูปที่ 7.20)			$0.2207S+0.0793$
7	พงศ์ศักดิ์ สุขมณี (2011)	Prodeck4 and Prodeck8	$0.1555S+0.2247$ (Ext-G)
			$0.0533S+0.2471$ (Int-G)
เมื่อรวมผลจากข้อมูลจากลำดับที่ 1 ถึง 7 (รูปที่ 7.22)			
8	ลำดับที่ 1 - 7 (เส้นทึบ)	For All (FRP-Deck with Steel Girder)	$0.1837S+0.1616$
9	Upper Limit (เส้นประบน)		$0.1331S+0.3116$
10	Lower Limit (เส้นประล่าง)		$0.1331S+0.0116$

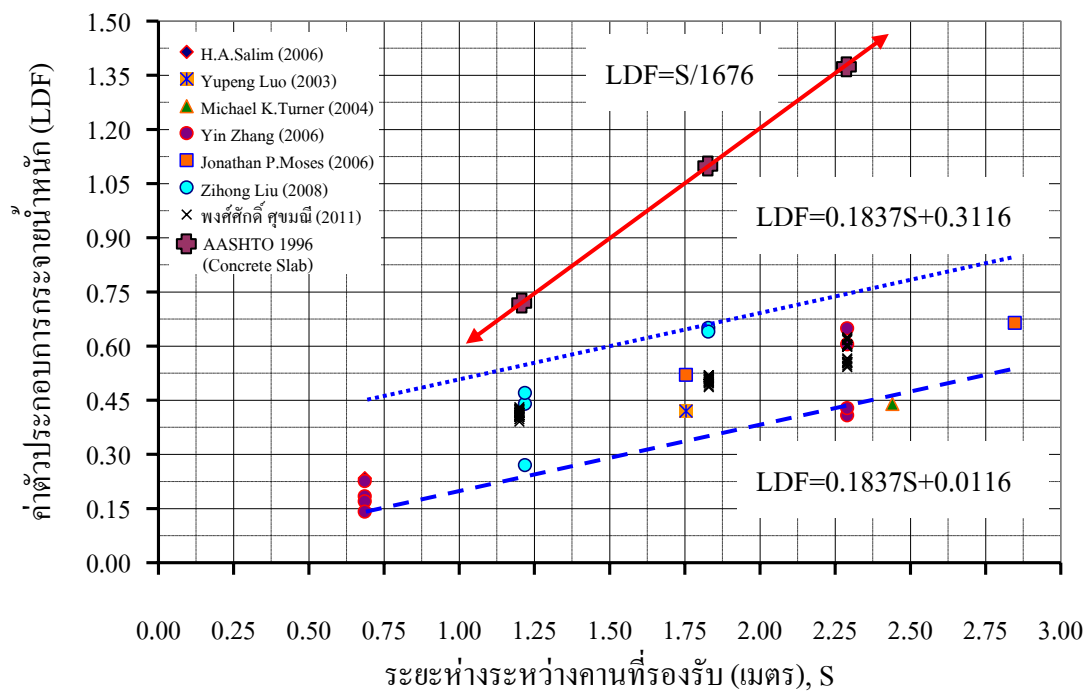
ลำดับที่ 1 ถึง 6 ใช้หน่วยมิลลิเมตร และ 7 ถึง 10 ใช้หน่วยเมตร

จากตาราง 7.7 พบว่าสมการสำหรับการประมาณค่า LDF มีความแตกต่างกันตามรูปแบบของแผ่นพื้นสะพาน (สังเกตได้จากสมการในลำดับที่ 1 ถึง 7) ส่วนสมการในลำดับที่ 8 เป็นสมการที่เกิดจากการรวมข้อมูลที่ได้จากนักวิจัยท่านอื่นๆ กับ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ (รูป 7.22 เส้นทึบ) ซึ่งมีค่า  $R^2=0.7211$  แสดงให้เห็นว่าข้อมูลทั้งหมดมีการกระจายตัวน้อย (ข้อมูลกับเส้นตรงมีความใกล้เคียงกัน) และจากสมการในลำดับที่ 9 และ 10 (เส้นประบนและล่าง) ซึ่งเป็นการเลื่อนสมการในลำดับที่ 8 ขึ้นและลงเป็นระยะ 0.15 ตามแนวตั้ง (ตามแนวแกนของค่า LDF) ดังกล่าวมาข้างต้น ทำให้เส้นประทั้งสองครอบคลุมข้อมูลเกือบทั้งหมด ซึ่งอาจจะใช้สมการของเส้นประทั้งสองเส้นเป็นขอบบน (Upper Boundary) และขอบล่าง (Lower Boundary) ในการพิจารณาเพื่อประมาณค่า LDF สำหรับคานเหล็กที่รองรับและมีแผ่นพื้นเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยใย ในเบื้องต้นได้ โดยมีเงื่อนไขในการนำสมการดังกล่าวไปประมาณค่า LDF ดังนี้

- ต้องมีแผ่นพื้นสะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck4, prodeck8, Honey Comb, GFRP (Trapazoidal), MMC และ Strongwell
- ต้องมีคานที่รองรับเป็นเหล็กรูปตัวไอ
- มีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับอยู่ระหว่าง 0.686 เมตร ถึง 2.44 เมตร
- ความกว้างของสะพานอยู่ระหว่าง 9.30 เมตร ถึง 13.00 เมตร
- เป็นคานช่วงเดียว มีความยาวอยู่ระหว่าง 4.50 เมตร ถึง 18.00 เมตร

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก จากสมการ  $LDF=S/1676$  (หน่วยมิลลิเมตร) ซึ่งเป็นสมการตามมาตรฐานของ AASHTO 1996 ที่ใช้ในการหาค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักในกรณีที่สะพานมีแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตและมีคานรองรับเป็นเหล็ก (Concrete Slab on Steel Girder Bridge) โดยการแทนค่า S เท่ากับ 1200, 1830 และ 2290 และนำค่า LDF ที่ได้แสดงเปรียบเทียบกับค่า LDF ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ ซึ่งมีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักในกรณีที่สะพานมีแผ่นพื้นเป็น FRP และมีคานรองรับเป็นเหล็ก เพื่อแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างค่า LDF ในกรณีที่แผ่นพื้นสะพานมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.23

พบว่าในรูปที่ 7.23 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักในกรณีที่สะพานมีแผ่นพื้นเป็นคอนกรีตและมีคานรองรับเป็นเหล็ก กับค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักในกรณีที่สะพานมีแผ่นพื้นเป็น FRP และมีคานรองรับเป็นเหล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อหาสมการ LDF จึงขึ้นอยู่กับประเภทของแผ่นพื้นสะพานด้วยประการหนึ่ง ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น (บทที่ 6)



รูปที่ 7.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (จากตารางที่ 6.6, 6.12 และ 7.6 และ AASHTO 1996)

## 7.6 สรุป (Conclusion)

ผลการศึกษานำเสนอในบทนี้ แสดงให้เห็นว่า นอกจากตำแหน่งของแรงกระทำ จาจรถบรรทุกและระยะห่างระหว่างคานที่รองรับที่ทำให้ค่า LDF มีค่าสูงแล้ว ประเภทของแผ่นพื้น สะพานพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยที่แตกต่างกัน มีผลต่อค่า LDF เช่นเดียวกัน ซึ่งพิจารณาจาก สมการประมาณค่า LDF ที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 7.7

เพราะฉะนั้น เพื่อที่จะประมาณค่า LDF สำหรับคานเหล็กที่รองรับและมีแผ่นพื้น เป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยใย ในเบื้องต้นได้ โดยใช้สมการลำดับที่ 8 จากตารางที่ 7.7 ( $LDF = 0.1387S + 0.1616$ ) ในการประมาณค่า LDF เบื้องต้น และ สมการ  $LDF = 0.1387S + 0.3116$  ในการควบคุมค่า LDF ไม่ให้สูงกว่า รวมถึงใช้สมการ  $LDF = 0.1387S + 0.0116$  ในการควบคุมค่า LDF ไม่ให้ต่ำกว่า ดังแสดงในรูปที่ 7.22 และตารางที่ 7.7

## บทที่ 8 (Chapter 8)

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

#### (Conclusions and Recommendations)

#### 8.1 บทนำ (Introduction)

จากการวิเคราะห์แบบจำลองที่รับแรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์ (Static Load) ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) โดยแบบจำลองมีแผ่นพื้นแบบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยชนิดน้ำหนักเบา (Light Weight Fiber Reinforced Polymer Deck) ซึ่งเป็นวัสดุประกอบ (Composite Material) ที่แตกต่างกันสองประเภท ได้แก่ แผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck4 และ Prodeck8 และมีรูปแบบทางกายภาพของแบบจำลองที่แตกต่างกัน (แบบจำลองระดับชิ้นส่วนและระดับระบบ รวมถึงแบบจำลองสะพานที่มีทั้งแผ่นพื้นและคานที่รองรับ) ตามวัตถุประสงค์ในการวิจัย ดังผลที่ได้แสดงในบทที่ผ่านมามาตามลำดับ (บทที่ 5, บทที่ 6 และ บทที่ 7)

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปทั้งหมดจากศึกษาในครั้งนี้ รวมถึงข้อเสนอแนะเพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาในลำดับต่อไป ในภายภาคหน้า

#### 8.2 สรุปผลการศึกษา (Conclusion)

##### 8.2.1 ระดับชิ้นส่วน (Component Level)

จากผลการทดลองระดับชิ้นส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1) ผลตอบสนอง (การโก่งตัว (Deflection), ความเค้น (Stress) และการยืดหดตัว (Strain)) ที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่มาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002 และ Punyamurthula 2004)

2) ค่าความแข็งแกร่งของการค้ำ (Flexural Rigidity,  $EI$ ) ที่คำนวณจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่ามากกว่าค่าความแข็งแกร่งของการค้ำที่คำนวณจากการทดสอบของนักวิจัยท่านอื่นๆ (Howard 2002, Punyamurthula 2004 และ Suraj 2005) ทั้งที่คำนวณมาจากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการโก่งตัวที่กึ่งกลางช่วงความยาว ( $P-\delta$ ) และความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและการยืดหดตัวตามแนวแกน ( $P-k$ )

3) ค่าความแข็งแกร่งของการตัดของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck8 มีค่ามากกว่า ค่าความแข็งแกร่งของการตัดของแผ่นพื้นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยประเภท Prodeck4 ทั้งการวิเคราะห์ตามแนวแกนยาว (Longitudinal) และการวิเคราะห์ตามแนวแกนขวาง (Transverse)

ผลสรุปในข้อ 2) และ 3) ดังแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ผลสรุปค่าความแข็งแกร่งของการตัด (Flexural Rigidity,  $EI$ )

ประเภท หน้าตัด	รูปแบบ การวิเคราะห์	แรงกระทำ พิบัติ (kN.)	ค่าความแข็งแกร่งของการตัด ( $EI$ ) $\times 10^6$ (kN.-cm. <sup>2</sup> )		
			$(P - \div)$	$(P - \kappa)$	
				แนวยาว	แนวยาว
Prodeck4	ไฟไนท์อิเลเมนต์	193.90	7.990	9.540	2.793
	*ห้องปฏิบัติการ	187.30	7.850	8.890	2.647
Prodeck8	ไฟไนท์อิเลเมนต์	-	32.555	43.268	6.083
	**ห้องปฏิบัติการ	-	31.067	39.988	5.639

\*Punymurthula 2004, \*\*Howard 2002

### 8.2.2 ระดับระบบ (System Component)

จากผลการทดลองระดับระบบสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

1) ค่าการโก่งตัวเฉลี่ย (Average Deflection) ของคานที่รองรับ และค่าการโก่งสัมพัทธ์ (Relative Deflection) ของระบบแผ่นพื้นและคาน ที่วิเคราะห์ด้วยไฟไนท์อิเลเมนต์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ (Howard 2002 และ Punymurthula 2004)

2) ค่าการโก่งตัวเฉลี่ย (Average Deflection) ของคานที่รองรับของระบบแผ่นพื้นและคานมีค่าไม่เกินค่าที่ยอมให้ตามมาตรฐาน AASHTO ( $\div_{\max} | L/800$ )

3) ผลของการบิดทางด้านข้างต่อระบบแผ่นพื้นและคานทำให้ค่าของความเค้นและความเครียดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสติฟเนสมีค่าลดลงและมีผลกับการโก่งตัวสัมพัทธ์ของระบบแผ่นพื้นและคาน

ผลสรุปในข้อ 2) และ 3) ดังแสดงในตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ผลสรุปค่าการโก่งตัวจากการวิเคราะห์ระดับระบบ (แรงกระทำ 111.25 kN.)

ประเภท หน้าตัด	รูปแบบ การวิเคราะห์	ค่าการโก่งตัว (cm.)	
		คานที่รองรับ (เฉลี่ย)	สัมพัทธ์
Prodeck4	ไฟไนท์อิเลเมนต์	0.0861	1.7478
	*ห้องปฏิบัติการ	0.0857	1.8504
	ค่าที่ยอมให้	0.2500	-
Prodeck8	ไฟไนท์อิเลเมนต์	0.0870	1.3680
	**ห้องปฏิบัติการ	0.1000	1.3790
	ค่าที่ยอมให้	0.2800	-

\*Punyamurthula 2004, \*\*Howard 2002

### 8.2.3 การศึกษาแบบพารามเมตริก (Parametric Study)

จากผลการศึกษาแบบพารามเมตริกสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

- 1) ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) ที่คำนวณมาจากค่าการโก่งตัว (Deflection) มีค่ามากกว่าที่คำนวณมาจากการยืดหดหัว (Strain)
- 2) ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เกิดขึ้นมากสุดในกรณีที่แรงกระทำจากรถบรรทุกกระทำต่อแบบจำลองสะพานในกรณีที่ 1
- 3) แบบจำลองที่มีพื้นสะพานประเภท Prodeck4 มีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก มากกว่าแบบจำลองที่มีพื้นสะพานประเภท Prodeck8
- 4) ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เกิดที่คานตัวนอก (Exterior Girder) มีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก ที่เกิดที่คานตัวใน (Interior Girder)
- 5) สำหรับหน้าตัดของแบบจำลองที่เหมือนกัน ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีความยาว 12.00 เมตร มีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก ที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองที่มีความยาว 18.00 เมตร
- 6) เมื่อแบบจำลองมีความยาวของแบบจำลองคงที่ในขณะที่ความกว้างของแบบจำลองเพิ่มขึ้น (เช่น CS1 กับ CS4) แบบจำลองที่มีความกว้าง 9.30 เมตร มีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก มากกว่าค่าแบบจำลองที่มีความกว้าง 13.00 เมตร
- 7) แบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 2.29 เมตร จะมีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก มากกว่าแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.83



เมตร และแบบจำลองที่มีระยะห่างระหว่างคานที่รองรับเท่ากับ 1.20 เมตร จะมีค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก น้อยที่สุด เมื่อความกว้างและความยาวของแบบจำลองคงที่

8) ค่าตัวประกอบการกระจายที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบบางส่วน (Partial Composite) มีค่ามากกว่าค่าตัวประกอบการกระจายที่วิเคราะห์มาจากแบบจำลองที่มีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

9) โปรแกรม SPSS16 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักมากที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing, S)

10) ค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนักสำหรับสะพานที่มีแผ่นพื้นเป็นพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใยและรองรับด้วยคานเหล็ก (FRP Deck – Steel Stringer Bridge) มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของแผ่นพื้น

### 8.3 ข้อเสนอแนะ (Recommendations)

มีข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

1) การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เท่านั้น แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นๆ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์มีความแตกต่างกันกับการทดสอบจริง เนื่องจากการทดสอบจริงมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อค่าตอบสนอง อย่างเช่น การเชื่อมต่อหรือติดตั้งระบบแผ่นพื้นสะพานหรือชิ้นตัวอย่าง เครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่างๆ ในการอ่านและบันทึกผลตอบสนอง หรือแม้กระทั่งความพร้อมของผู้สังเกตและทำการบันทึกข้อมูลต่างๆ

2) ผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้ โดยแบบจำลองรับแรงกระทำแบบสถิตยศาสตร์ (Static Load) เท่านั้น แล้วคำนวณหาค่าตัวประกอบการกระจาย ซึ่งการใช้งานจริงสะพานจะรับแรงทั้งแบบสถิตยศาสตร์ และแรงแบบพลศาสตร์ (Dynamic Load) รวมถึงแรงแบบกระทำซ้ำๆ (Fatigue Load)

## บรรณานุกรม

### (Reference)

- Jones, R.M. (1975). *Mechanics of Composite Materials*: Hemisphere Publishing Co.
- Mongi, A.N.K. (1991). Theoretical and Experimental Behavior of FRP Floor System. Master Thesis, West Virginia University, Morgantown, WV.
- GangaRao, H.V.S. and Nagaraj V. (1993). Characterization of GFRP Pultruded Box Beams Under Static and Fatigue Loads. *SAMPE Quarterly (Journal of Advance Materials)*. 24, July : 3-9.
- Zureick, A., Kahn, L.F., and Bandy, B.J. (1994). Tests on Deep I-Shape Pultruded Beams. 49<sup>th</sup> Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., February 7-9 : 8c1-8c6.
- Sotiropoulos, S., GangaRao, H.V.S., and Mongi A. (1995). Theoretical and Experimental Evaluation of FRP Composite and System. *Journal of Structural Engineering, ASCE*. 120(2) February : 464-485.
- NaGraj, V., and GangaRao, H.V.S. (1997). Static Response of GFRP Pultruded Beams. *Journal of Composites for Construction, ASCE*. 1(3) : 15-20.
- Massa, J.C., and Barbero, E.J. (1998). A Strength of Materials Formulation for Thin Walled Composite Beams with Torsion. *Journal of Composite Materials*. 32 :1560-1594.
- Mabsout, M.E., Tarhini, K., Frederick, G., and Kesserwan, A. (1999). Effect of Multilanes on Wheel Load Distribution in Steel Girder Bridges. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. Vol.4, No.2, May : 99-106.
- Zokaie, T. (2000). AASHTO-LRFD Live Load Distribution Specifications. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. Vol.5, No.2, May : 131-138.
- Kumar, P., Chandrashekhara, K., and Nanni, A. (2001). Testing and Evaluation of Components for a Composite Bridge Deck. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 20(5).
- Barr, P.J., Eberhard, M., and Stanton, J. (2001). Live-Load Distribution Factor in Prestressed Concrete Girder Bridges. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. Vol.6, No.5, September/October : 298-306.

- Tabsh, S.W., and Tabatabai, M. (2001). Live Load Distribution in Girder Subject to Oversized Trucks. *Journal of Bridges Engineering, ASCE*. Vol.6, N0.1, January/February : 9-16 .
- Alampalli, S., and Kunin, J. (2001). Load Testing of An FRP Bridge Deck On A Truss Bridge. Special Report 137, *Transportation Research and Development Bureau*, New York State Department of Transportation.
- Eom, J., and Nowak, A. (2001). Live Load Distribution for Steel Girder Bridges. *Journal of Bridges Engineering, ASCE*. Vol.6, No.6, November/December : 489-497.
- Kollar, L.P., and Pluzsik, A. (2002). Analysis of Thin-Walled Composite Beam with Arbitrary Lay up. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 21 : 1423-1465.
- Howard, I. (2002). Development of Lightweight FRP Bridge Deck Design and Evaluations. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Schniepp, T.J. (2002). Design Manual Development for Hybrid, FRP Double-Web Beam and Characterization of Shear Stiffness in FRP Composite Beams. M.S. Thesis, Department of Engineering Science and mechanics, Virginia Polytechnic and State University, Blackburg, VA.
- Zhou, A. (2002). Stiffness and Strength of Fiber Reinforced Polymer Composite Bridge Deck Systems. Ph.D Dissertation, Virginia Polytechnic and State University, Blackburg, Virginia, USA.
- Mabsout, M.E., Naddaf, I., Tarhini, K., and Frederick, G. (2002). Load Reduction in Steel Girder Bridges Practice Periodical of Structural Design and Construction. Vol.7, No.1, Febuary : 37-44.
- Punyamuthula, D. (2004). Structural performance of low-profile FRP composite cellular modules. Master's Thesis, Department of Civil Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Chung, W., Phuvoravan, K., Liu, J., and Sotelino, E. (2005). Applicability of the Simplified Load Distribution Factor Equation to PSC Girder Bridge. *Journal of Civil Engineering, KSCE*. Vol.9, No.4, July : 313-319.

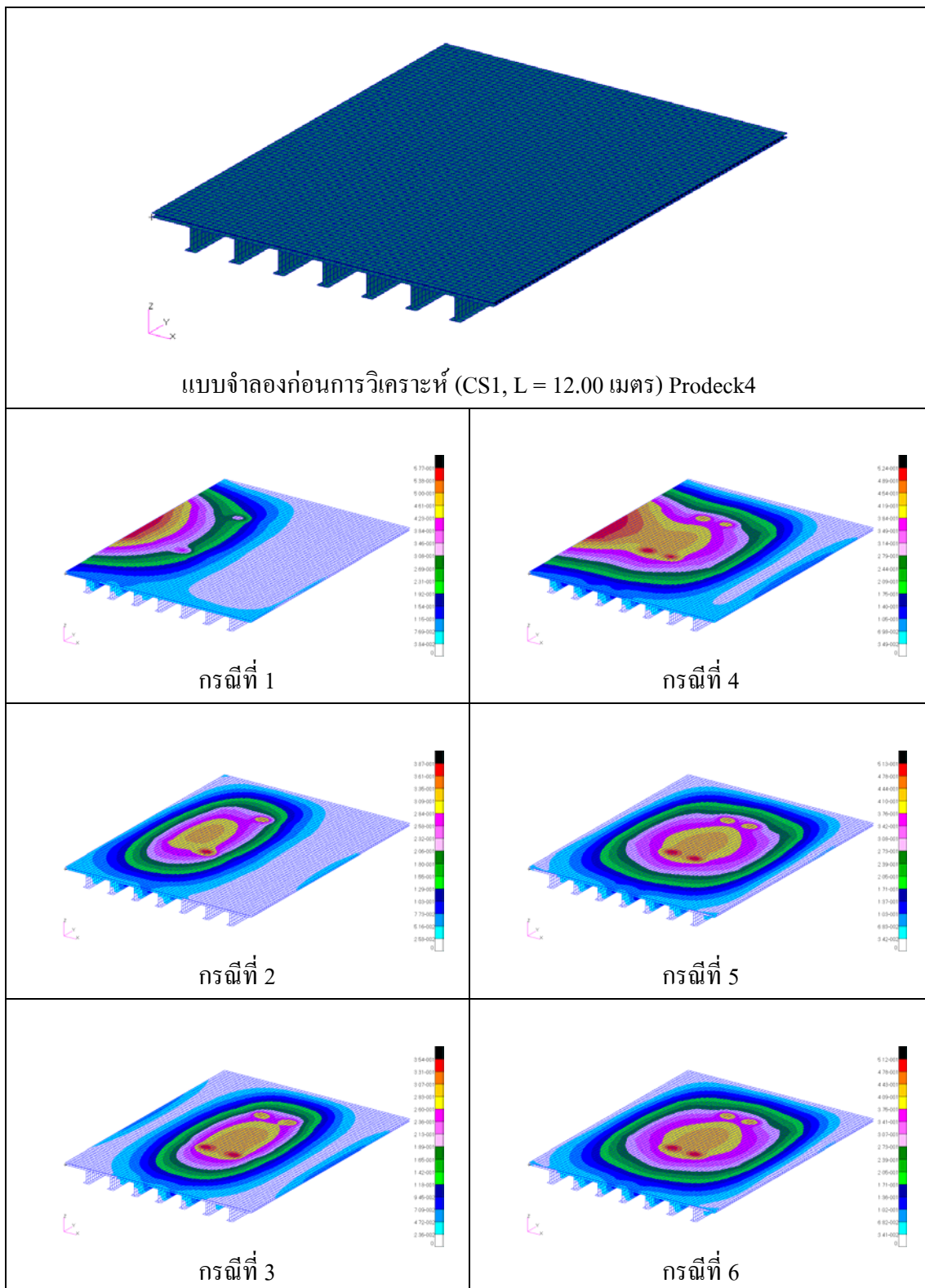
- Mantri, S. (2005). Fiber Reinforced Polymer Composite Decks for Military Applications. Master's thesis, Department of Civil Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Stiller, W.B., Gergely, J., and Rochelle, R. (2006). Testing, Analysis, and Evaluation of a GFRP Deck on Steel Girders. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. 11(4) : 394-399.
- Moses, J.P., Harries, K., Earls, C., and Yulismama, W. (2006). Evaluation of Effective Width and Distribution Factors for GFRP Bridge Decks Supported on Steel Girder. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. Vol.11, No.4, July : 401-409.
- Prachasaree, W., GangaRao, H.V.S., and Shekar, V. (2006). Performance Evaluation of FRP Bridge Deck Component under Torsion. *Journal of Bridge Engineering, ASCE*. 11(4) : 430-442.
- Prachasaree, W., GangaRao, H.V.S., and Shekar, V. (2009). Performance Evaluation of FRP Bridge Deck Component under Shear Loads. *Journal of Composite Materials.*, Vol.43, No.4, February : 377-395
- Reis, E.M., Hassan, T.K., and Rizkalla, S.H. (2004). Behavior of FRP Sandwich Panels for Transportation Infrastructure. 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Composites Materials in Bridges and Structures, July 20-23, Calgary, Alberta, Canada.
- Muthyala, V.D. (2005). Composite Sandwich Structure with Grid Stiffened Core. Master of Science in Mechanical Engineering, Louisiana State University, Louisiana, USA
- Suraj, S. (2005). Finite Element Modeling of a Composite Bridge Deck. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, West Virginia University, Morgantown, WV.
- Feng, P., Ye, L., Li, T., and Ma, Q. (2006). Outside Filament-wound Reinforcement : A Novel Configuration for FRP Bridge Decks. The Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, August 18-21, Fuzhou & Xiamen, China .
- Zhang, Y., Cai, C. (2006). Load Distribution and Dynamic Response of Multi-Girder Bridge with FRP Decks. *Journal of Engineering Structures*. 29 (2007) : 1676-1689.
- Phuvoravan. K. (2006). Load Distribution Factor Equation for Steel Girder Bridges in LRFD Design. Symposium on Infrastructure Development and the Environment, December 7-8, University of the Philippines, Diliman, Quezon City, Philippines.
- Bank, L.C. (2006). *Composites For Construction : Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada.

- Lee, J., Kim, Y., Jung, J., and Kosmatka, J. (2006). Experimental Characterization of a Pultruded Bridge Deck for Light Weight Vehicals. *Journal of Composites Construction*, 80 (2007) : 141-151
- Keller, T., Schaumann, E., and Vallee, T. (2007). Flexural Behavior of a Hybrid FRP and Light Weight Concrete Sandwich Bridge Deck. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38 : 879-889.
- Liu, Z., Cousins, T., Lesko, J., and Sotelino, E. (2008). Design Recommendations for a FRP Bridge Deck Supported on Steel Superstructure. *Journal of Composites for Construction, ASCE*. 12(6) : 660-668.

**ภาคผนวก**

**ภาคผนวก ก**

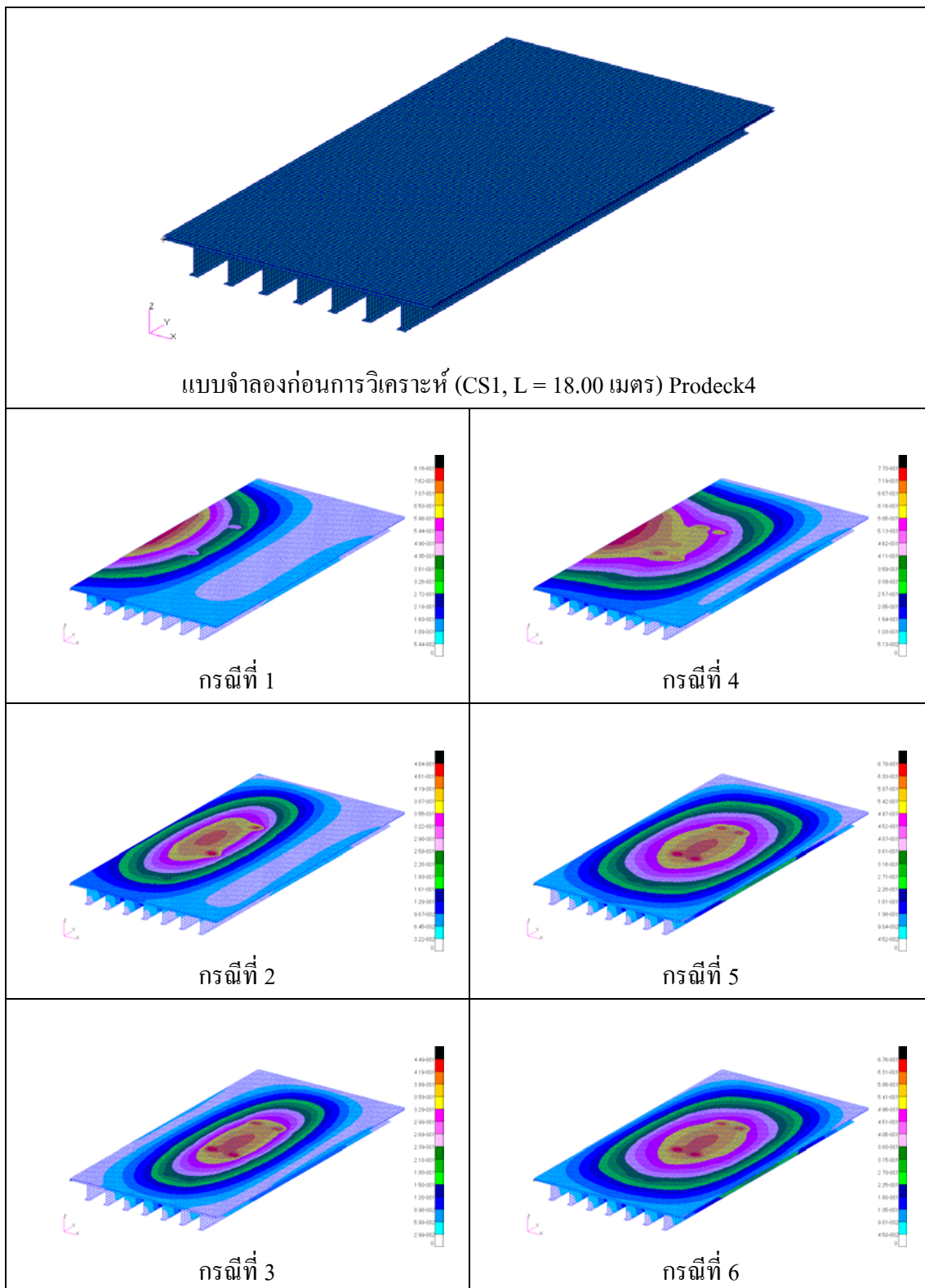
รูปผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพานในกรณีต่างๆ



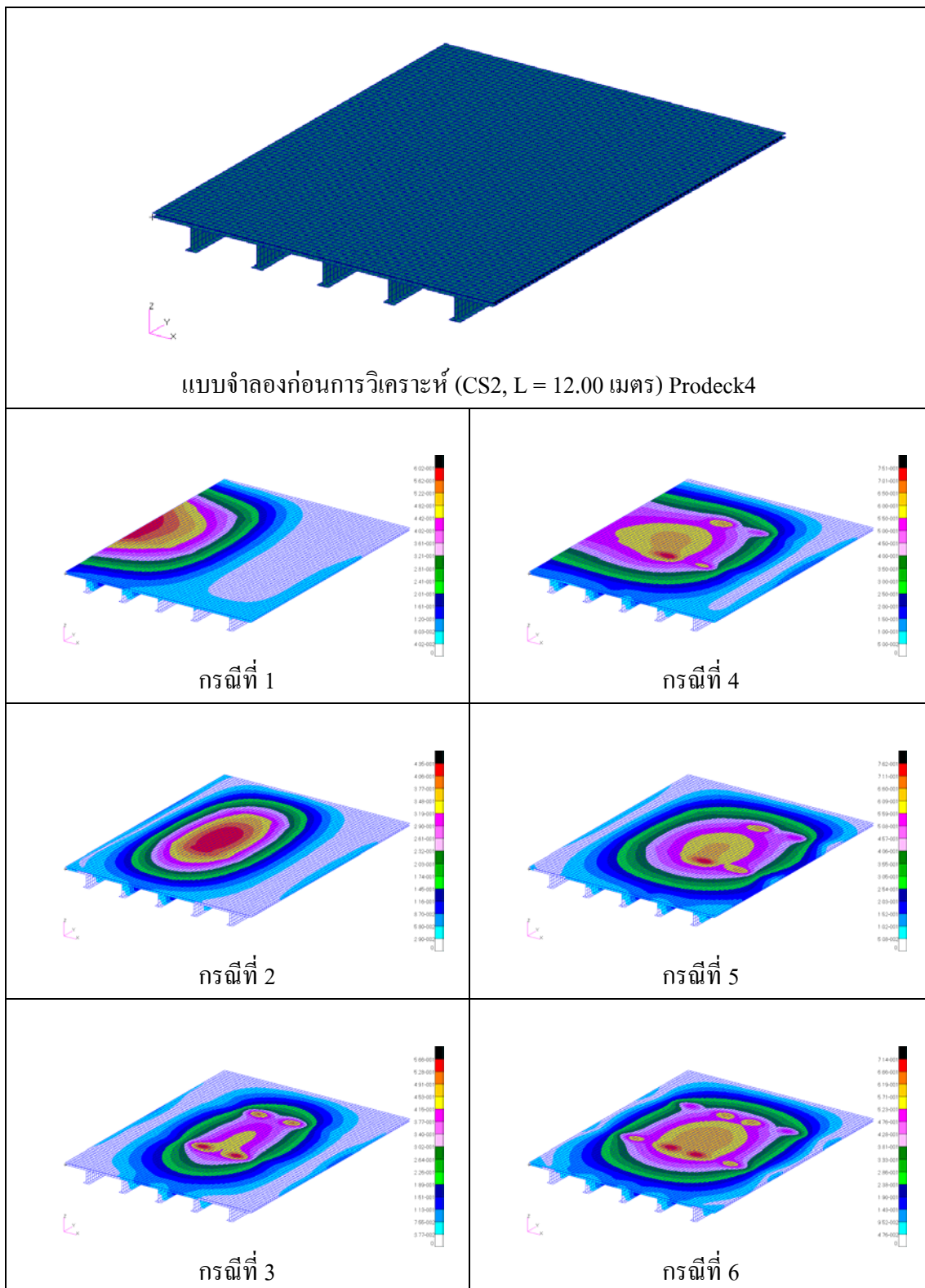
รูปที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร)

L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



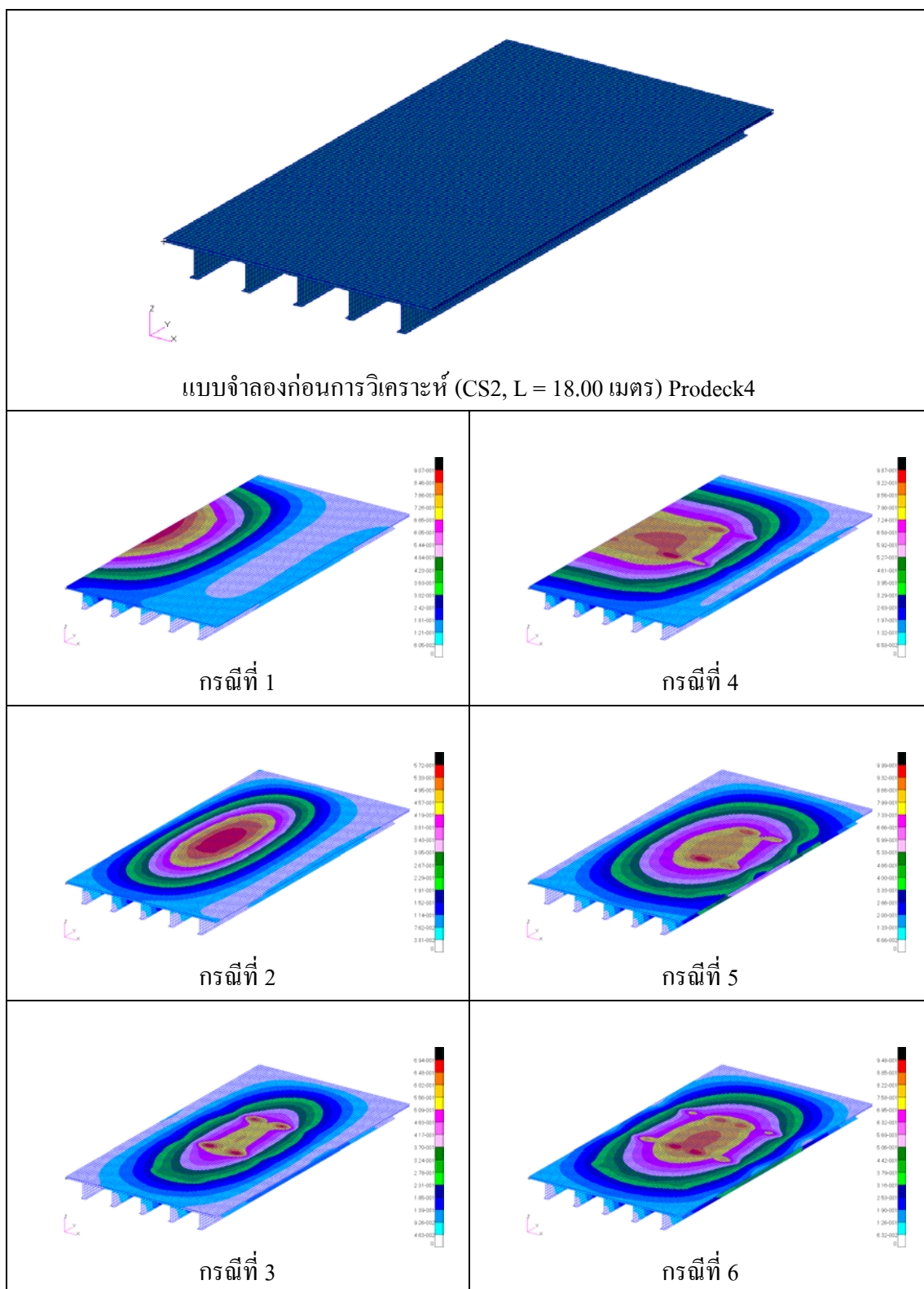


รูปที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6

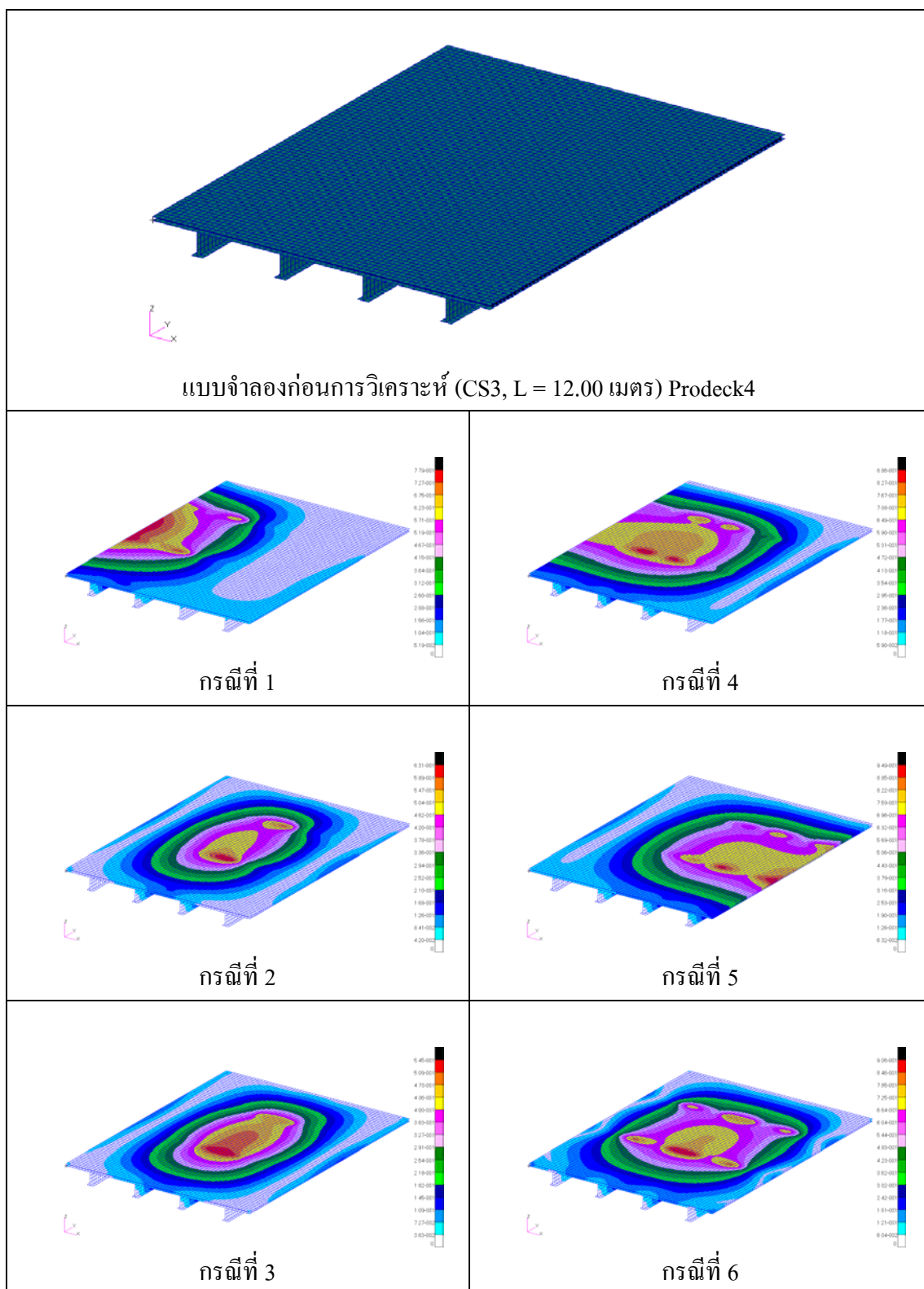


รูปที่ ก-3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร)

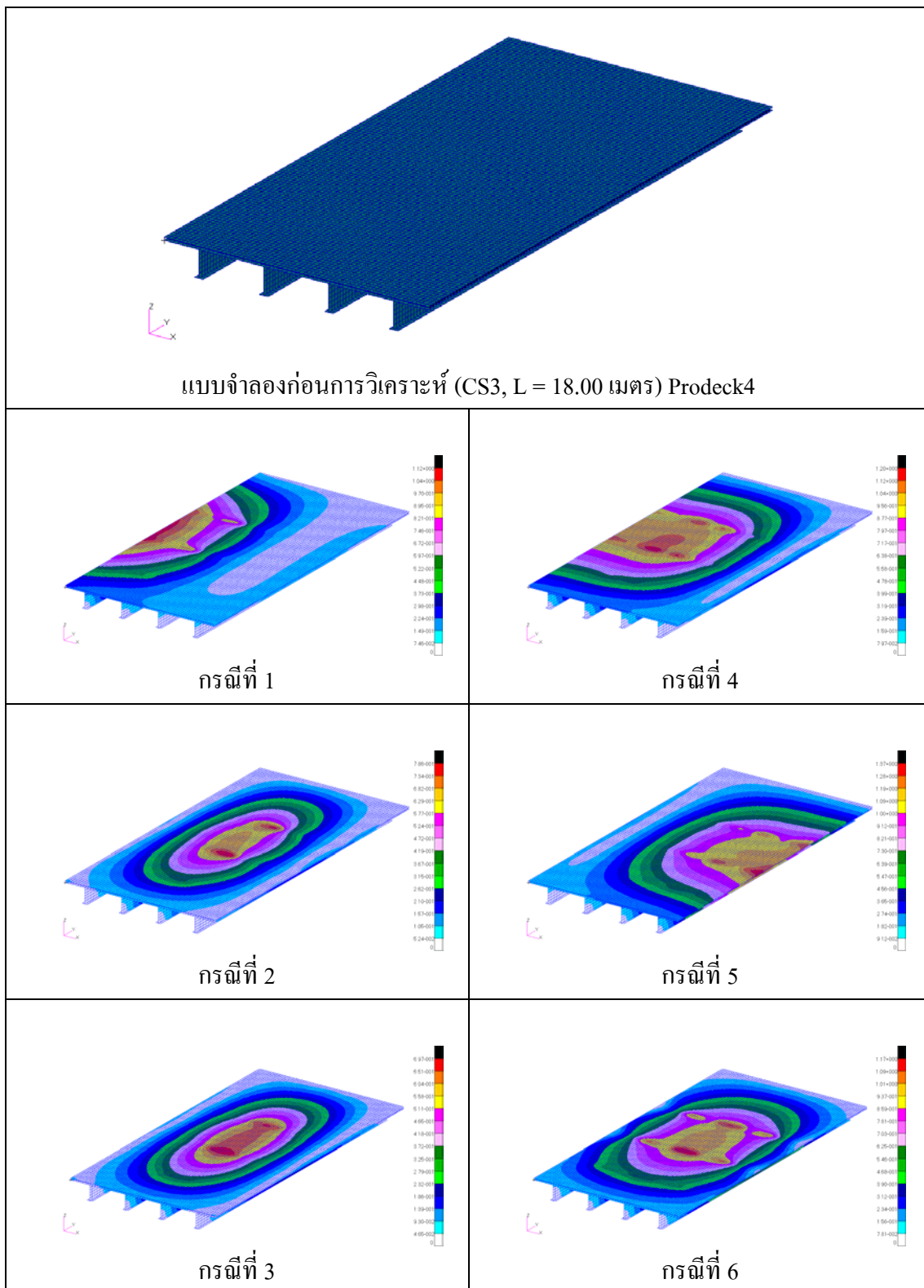
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



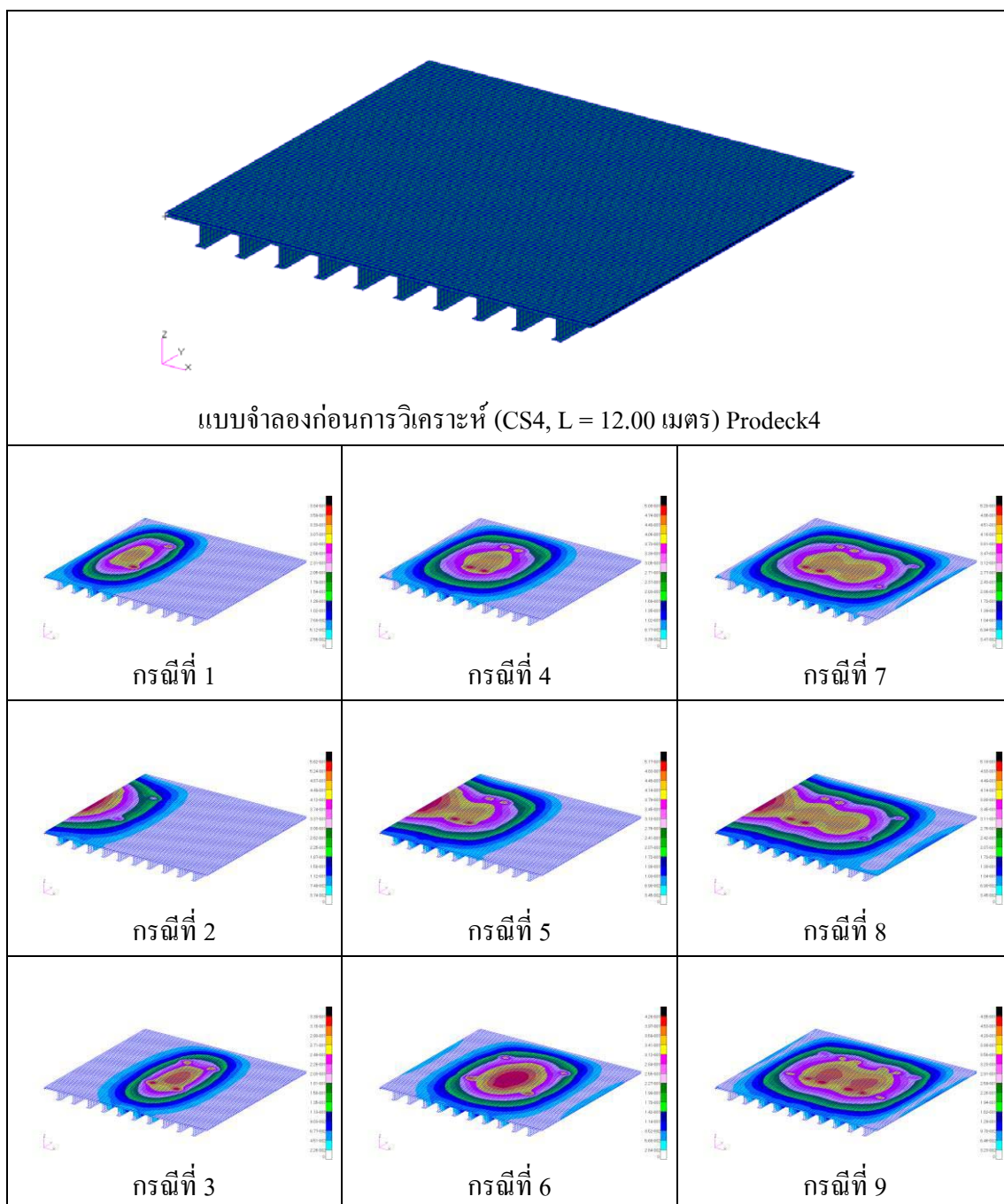
รูปที่ ก-4 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



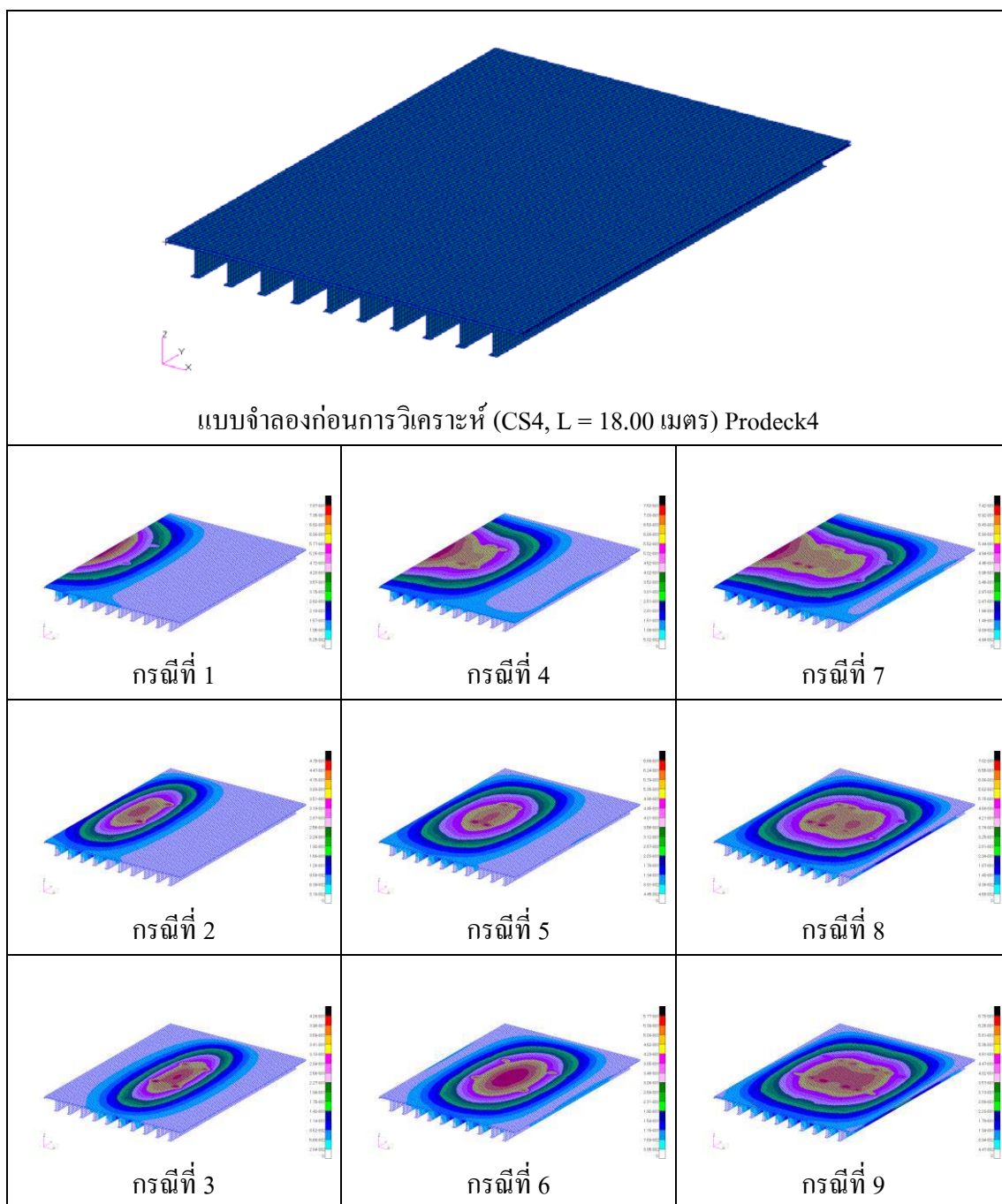
รูปที่ ก-5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



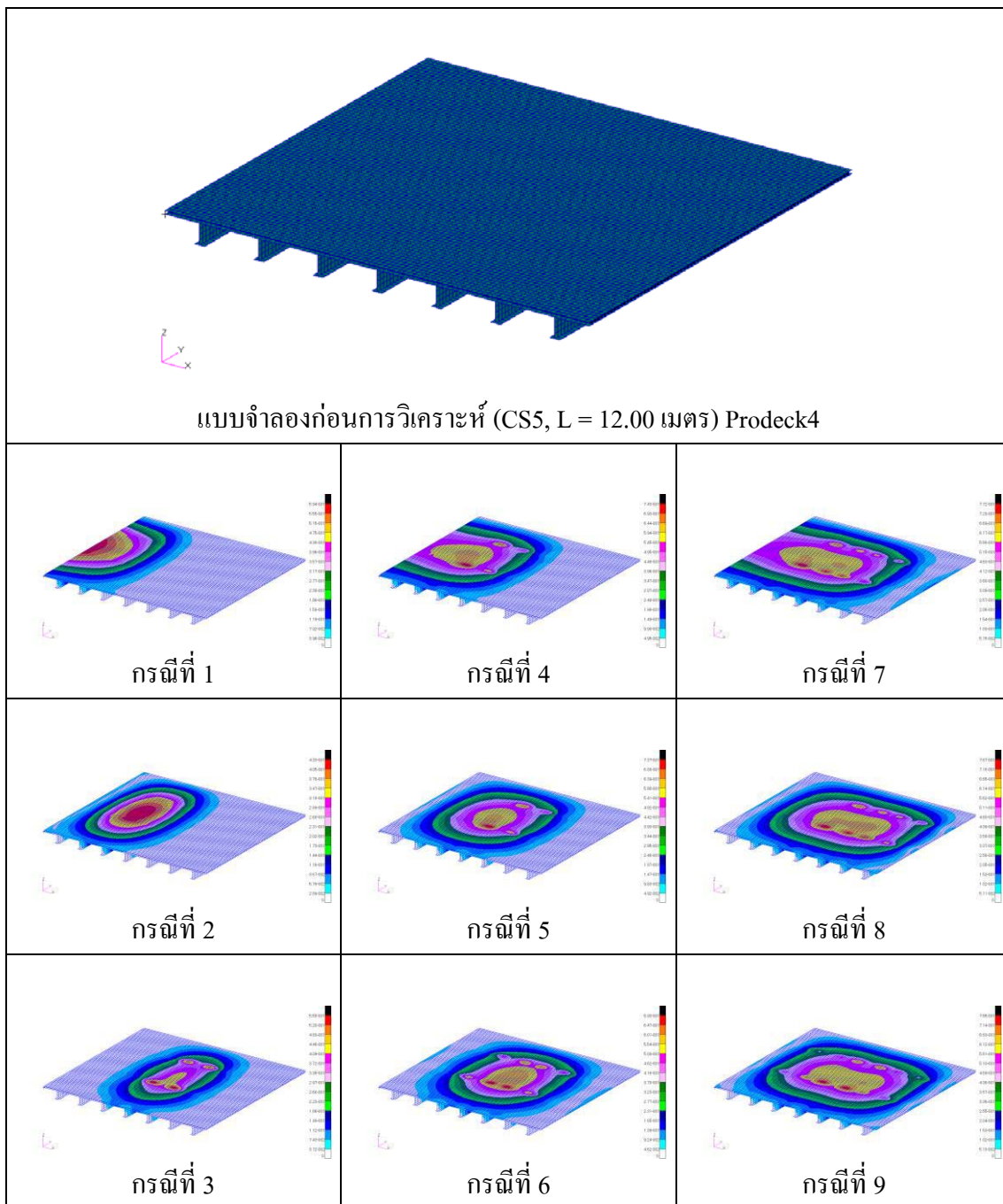
รูปที่ ก-6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



รูปที่ ก-7 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9

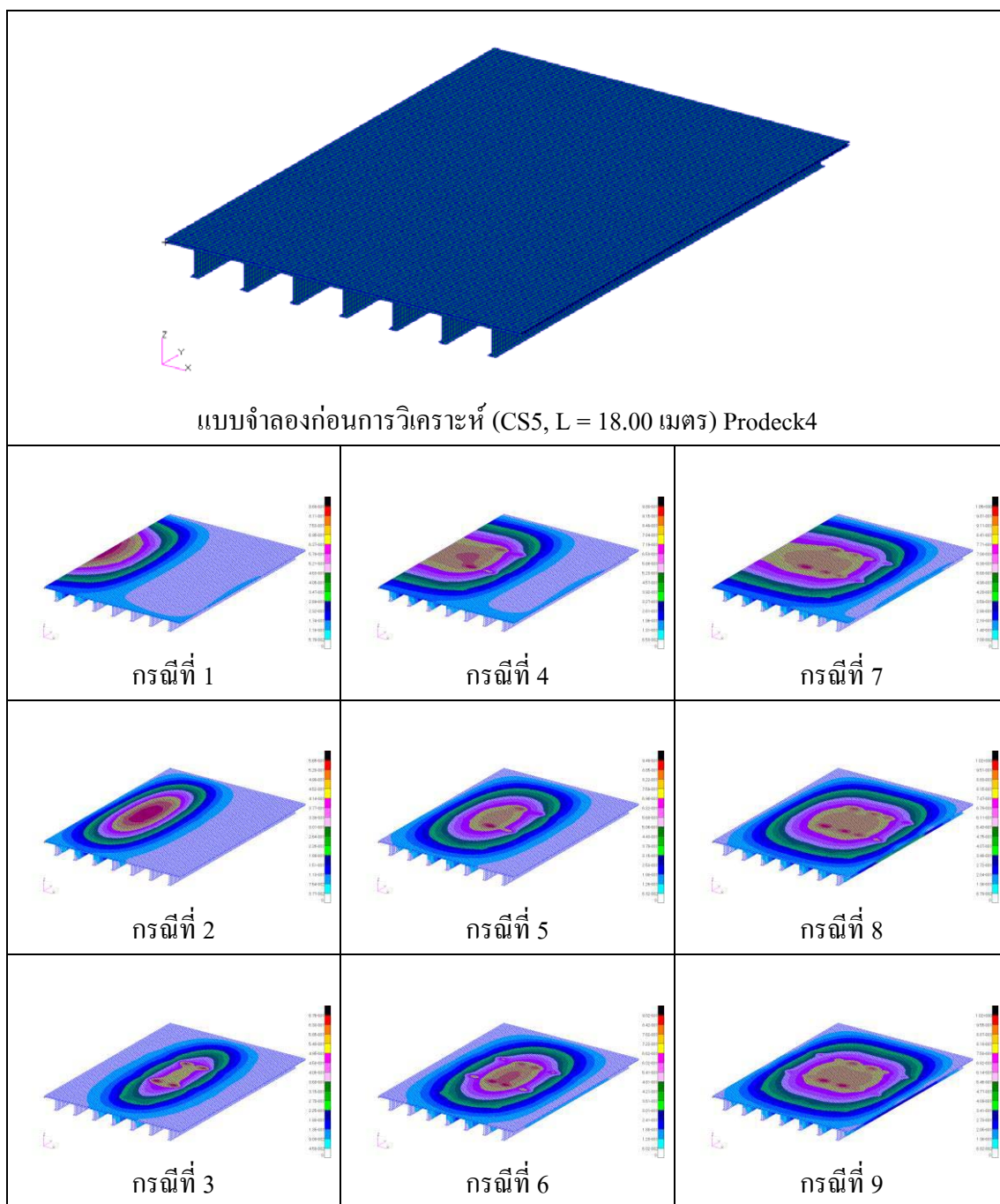


รูปที่ ก-8 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
 L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9

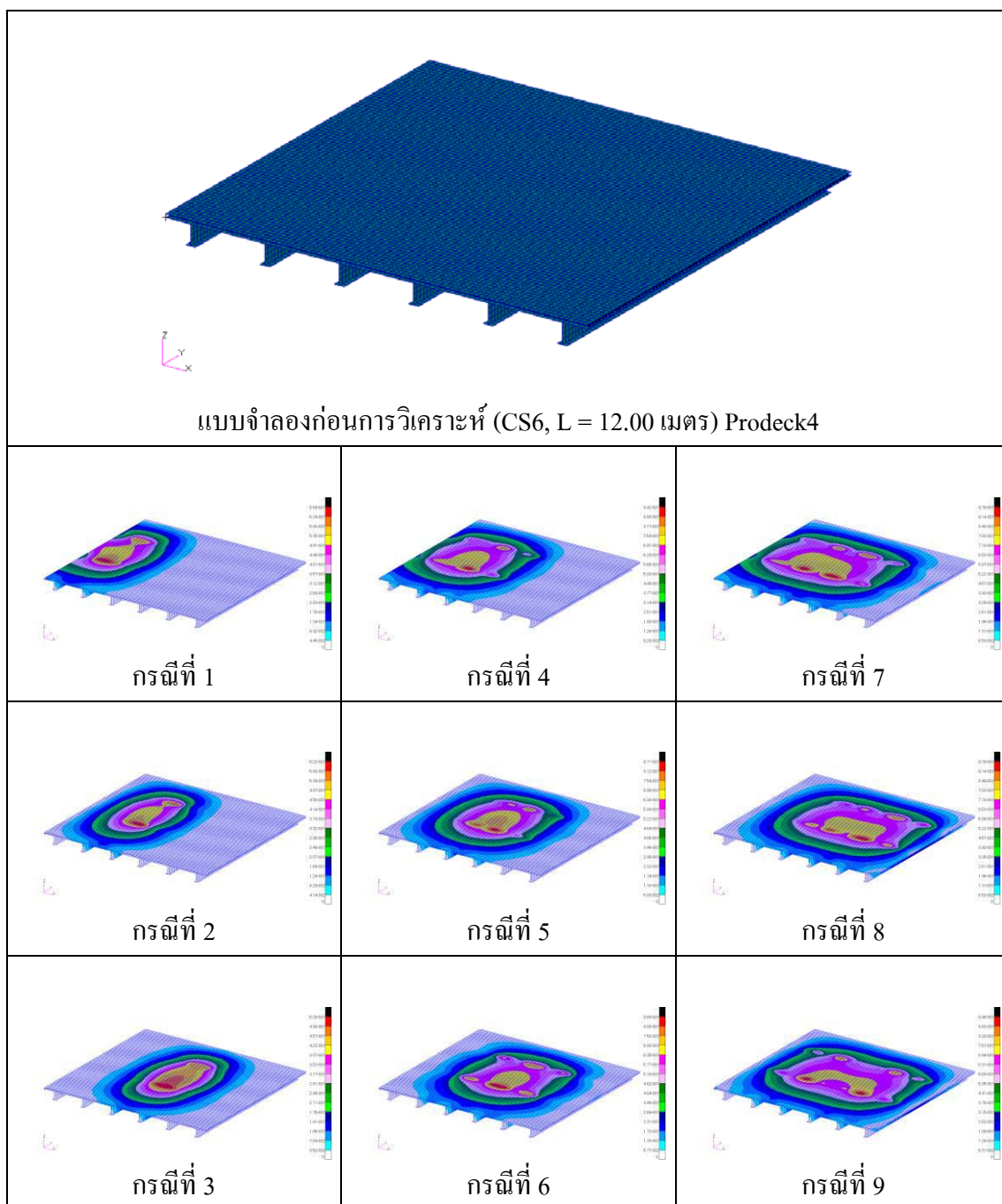


รูปที่ ก-9 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9

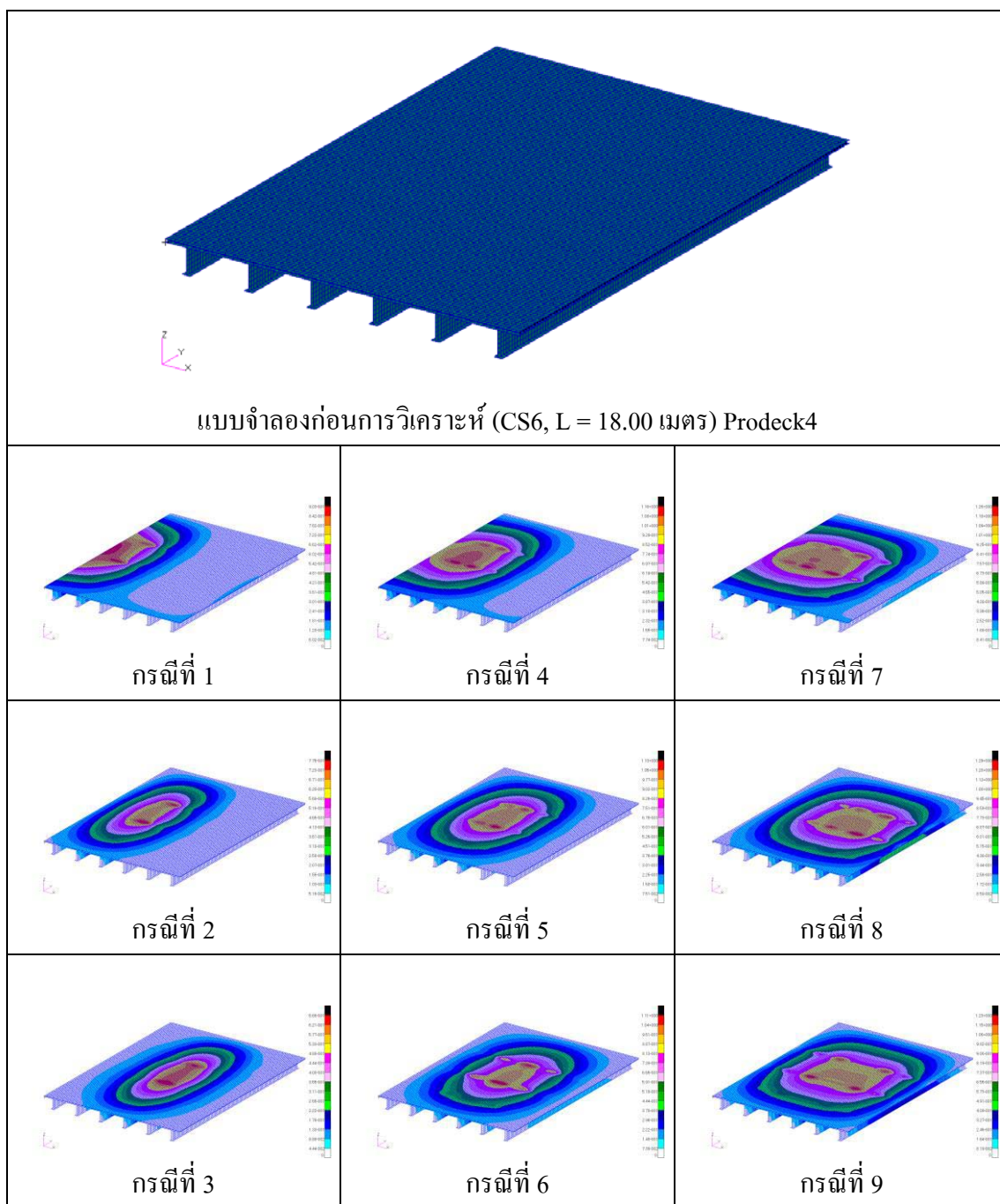




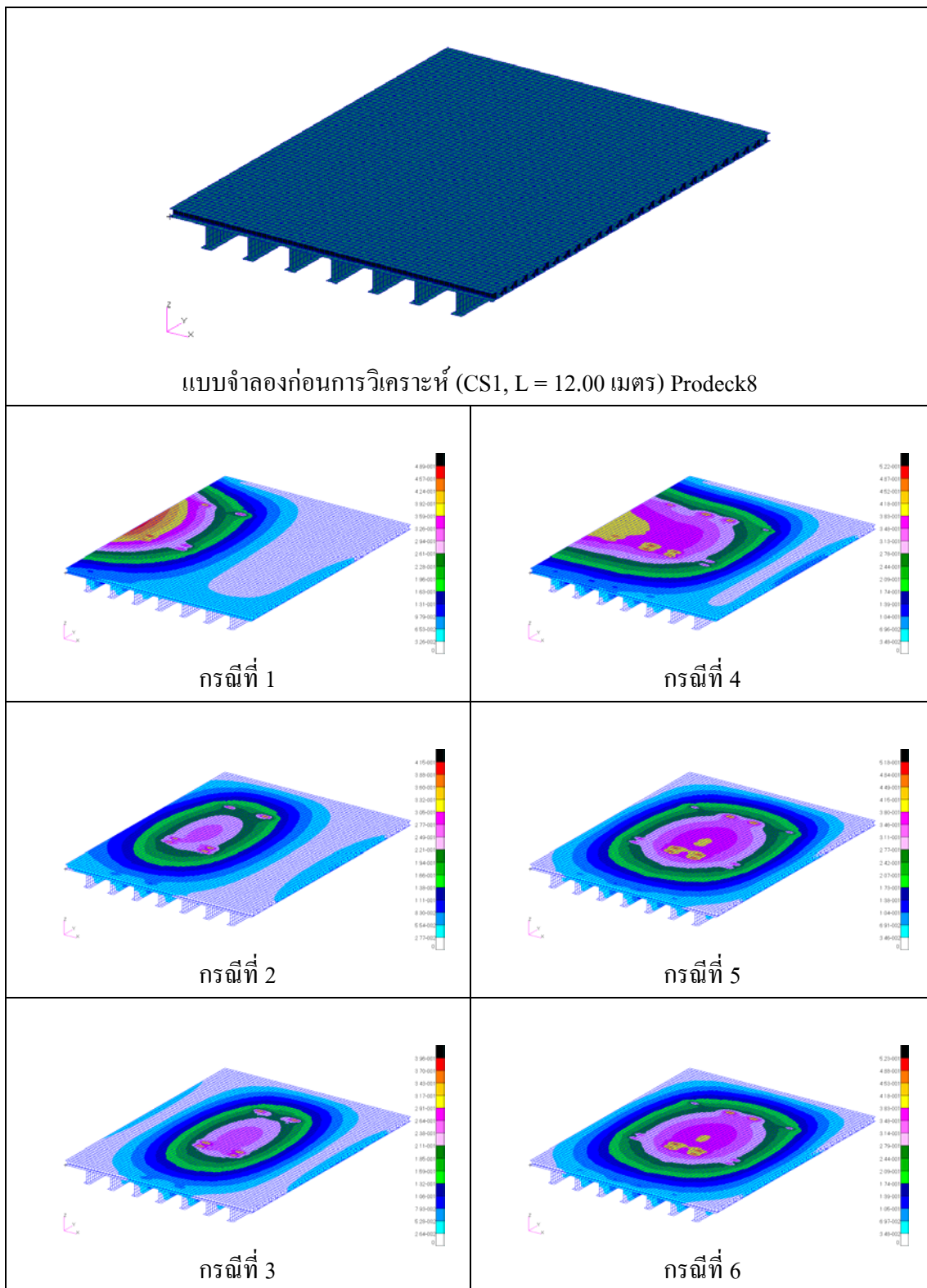
รูปที่ ก-10 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



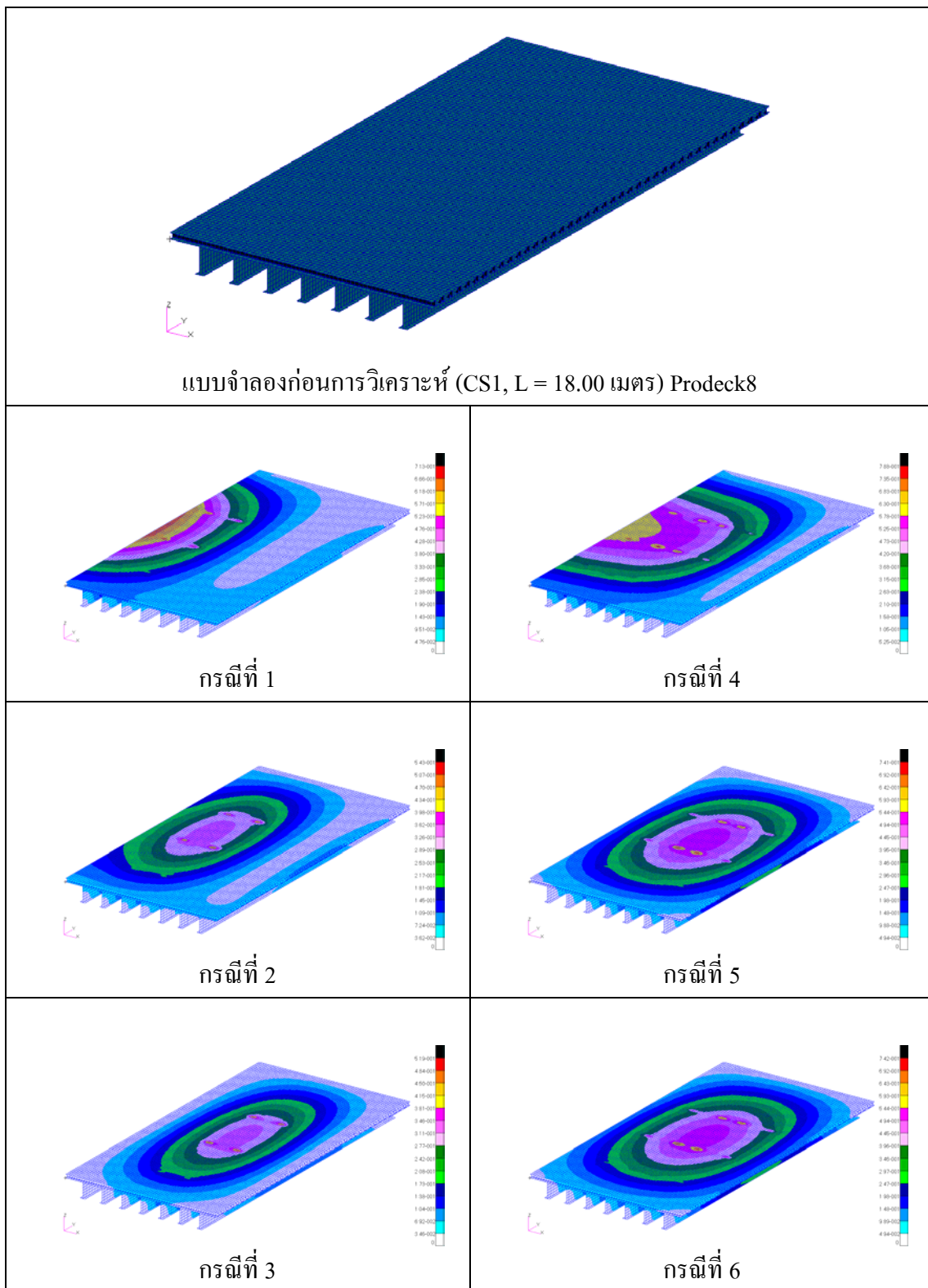
**รูปที่ ก-11** ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS6 ( $W = 13.00$  เมตร,  $S = 2.29$  เมตร)  
 $L = 12.00$  เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



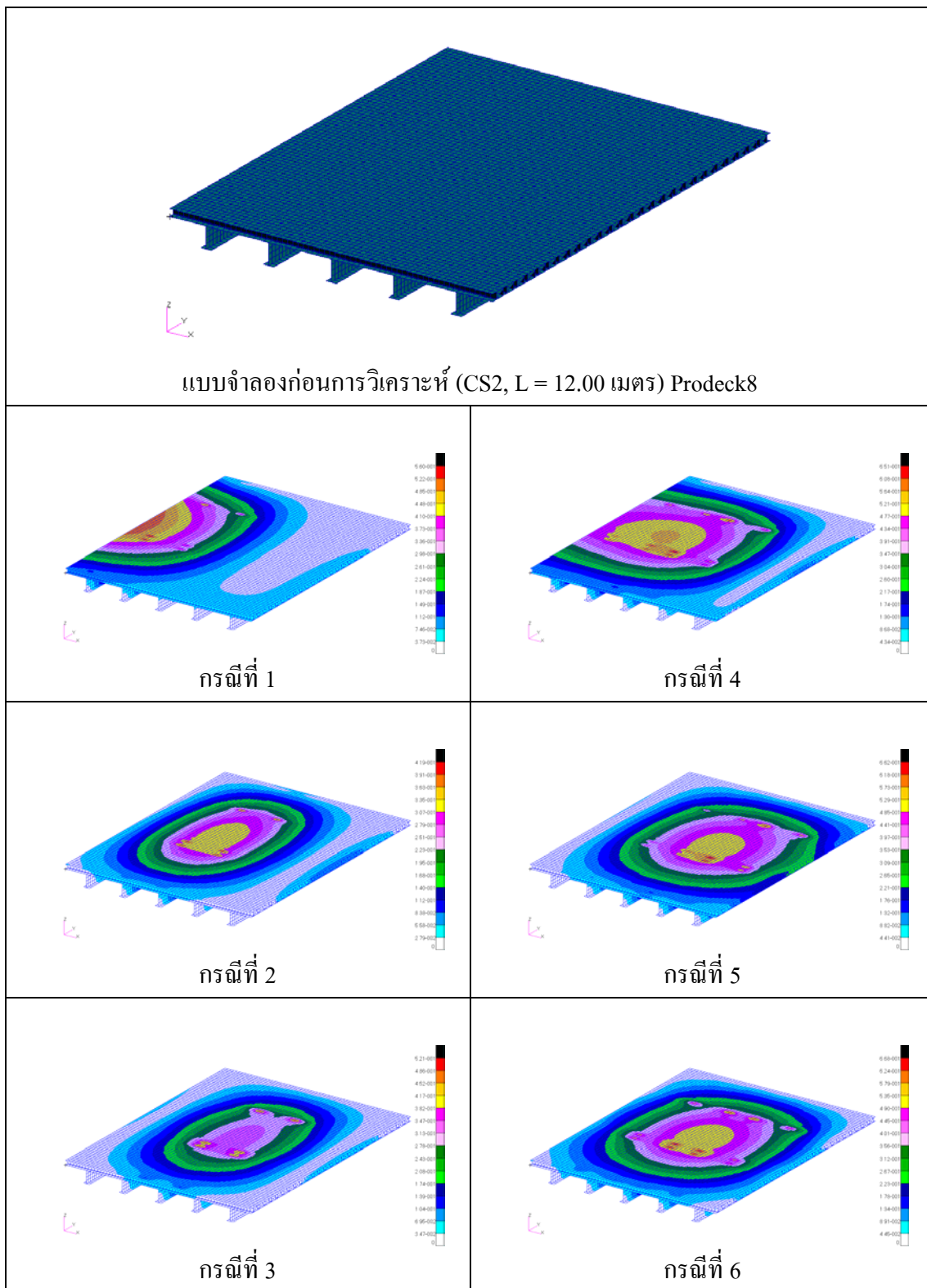
รูปที่ ก-12 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
 L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



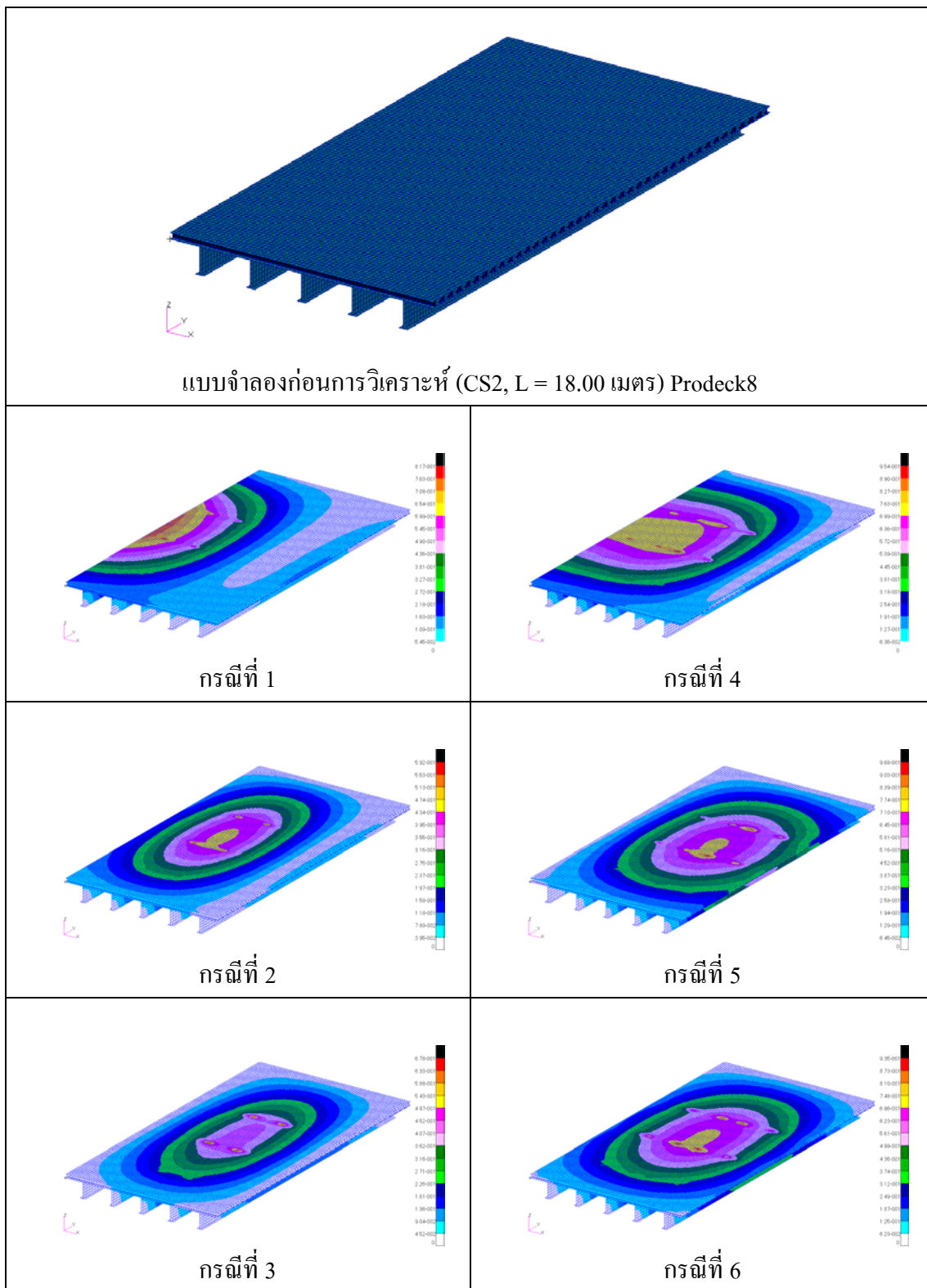
รูปที่ ก-13 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



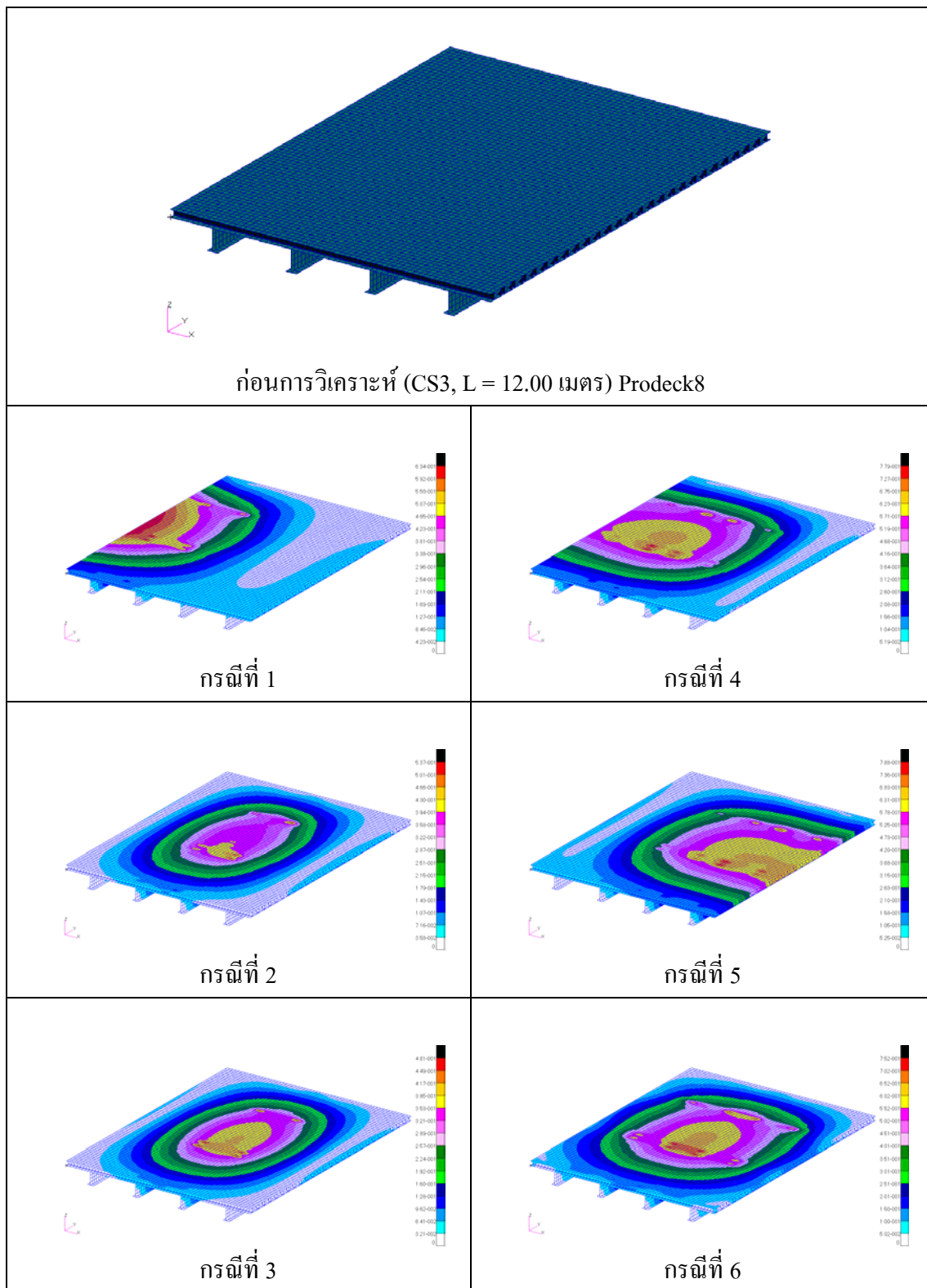
รูปที่ ก-14 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



รูปที่ ก-15 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
 L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6

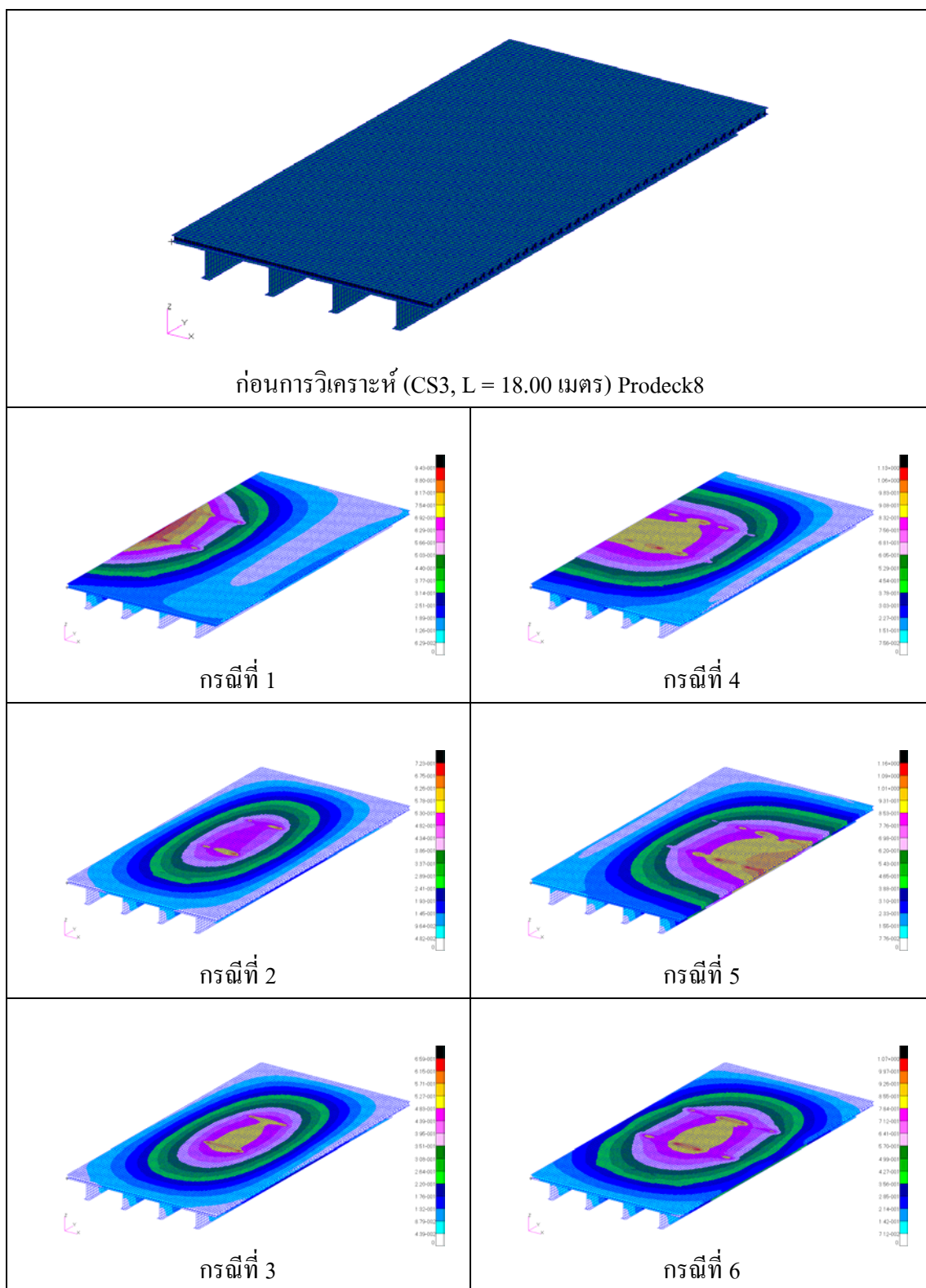


รูปที่ ก-16 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
 L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6

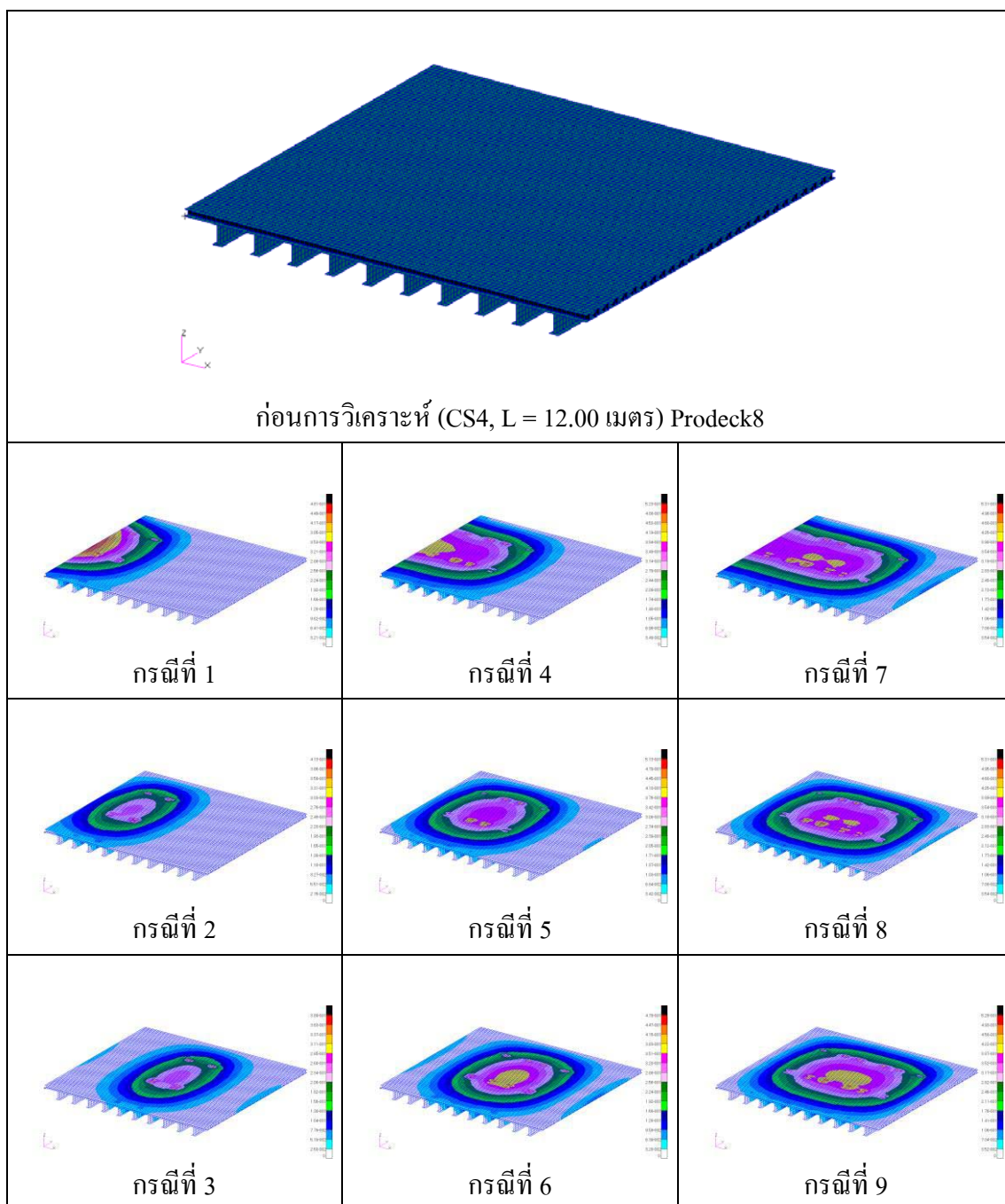


รูปที่ ก-17 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6

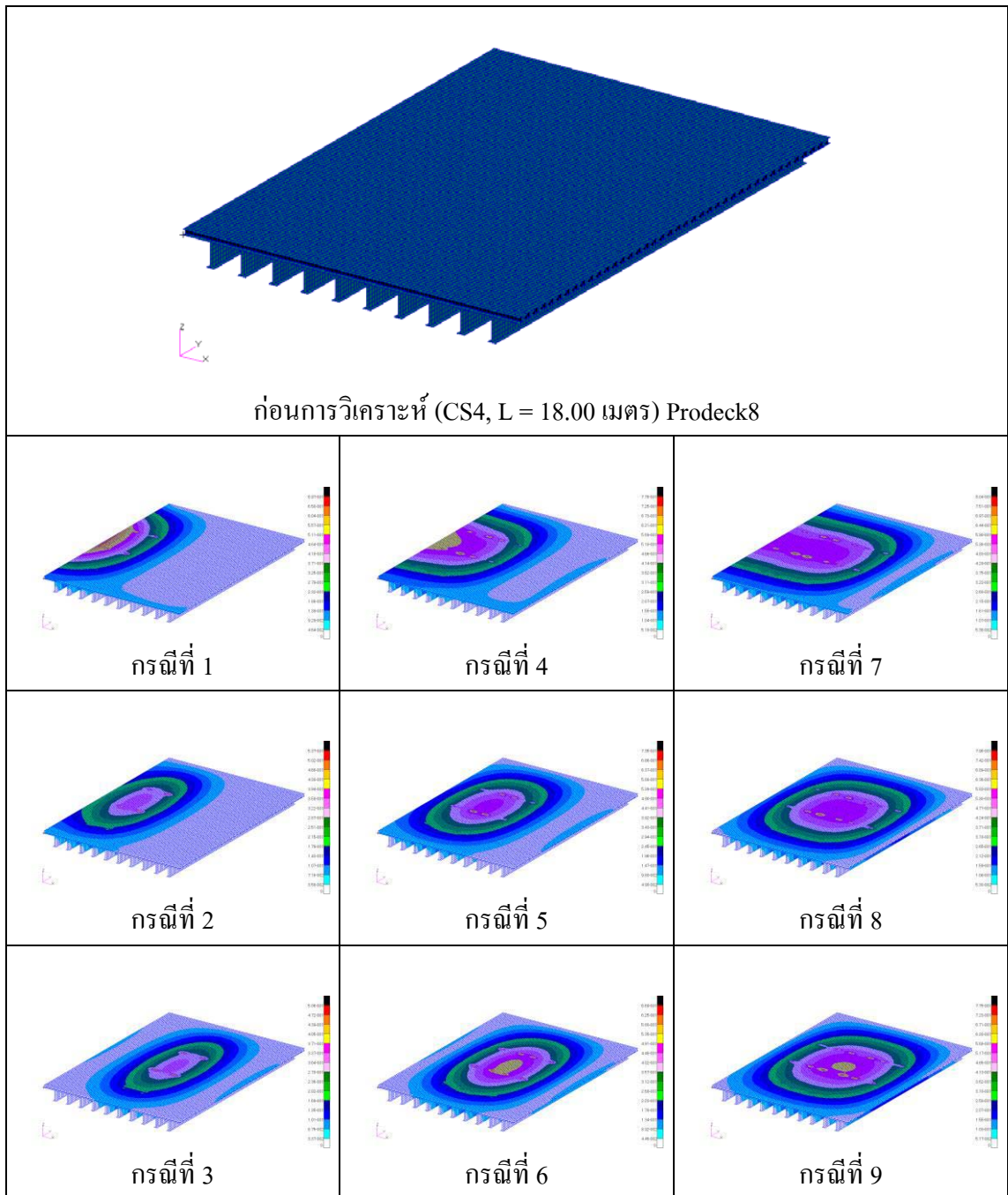




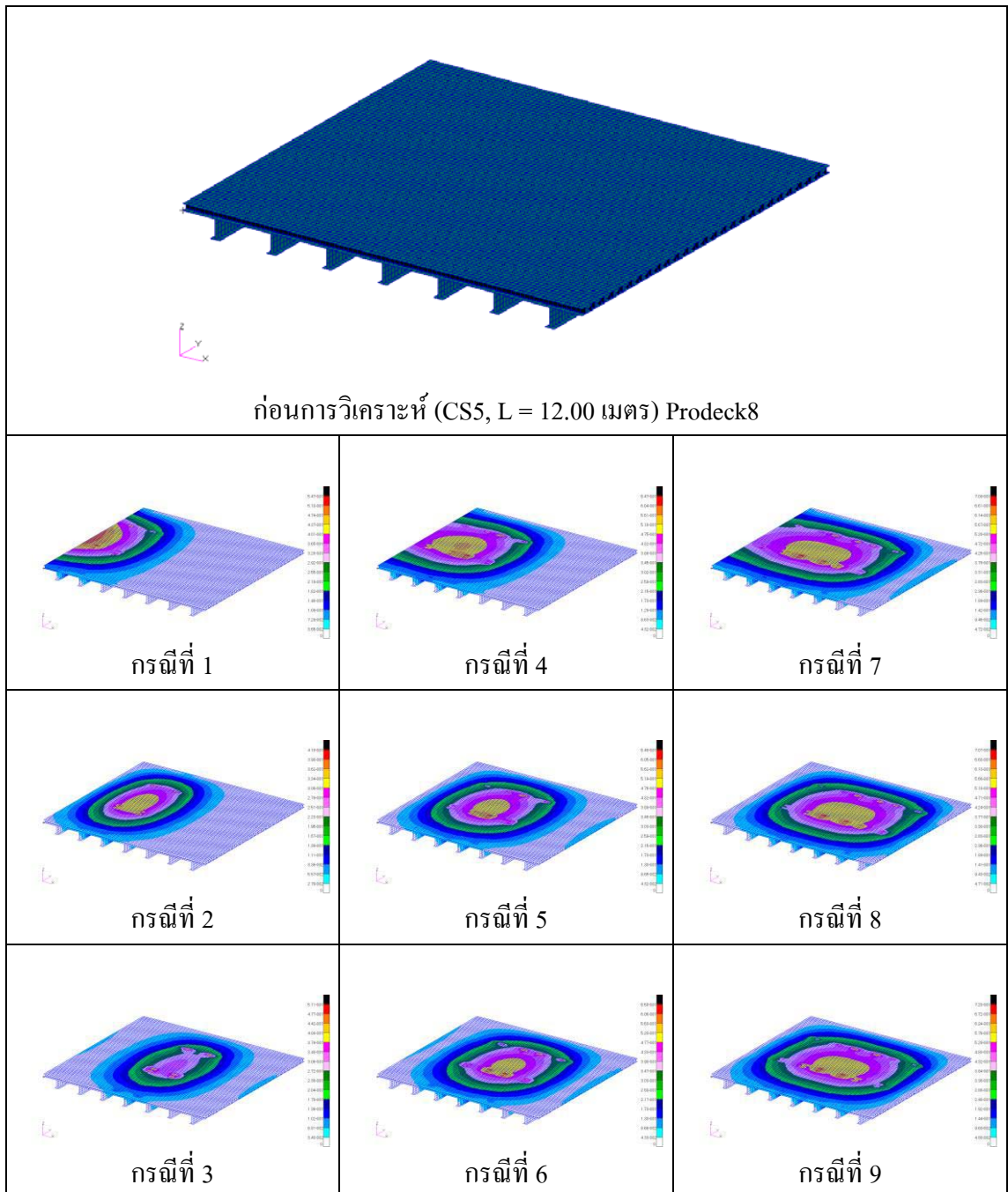
รูปที่ ก-18 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 6



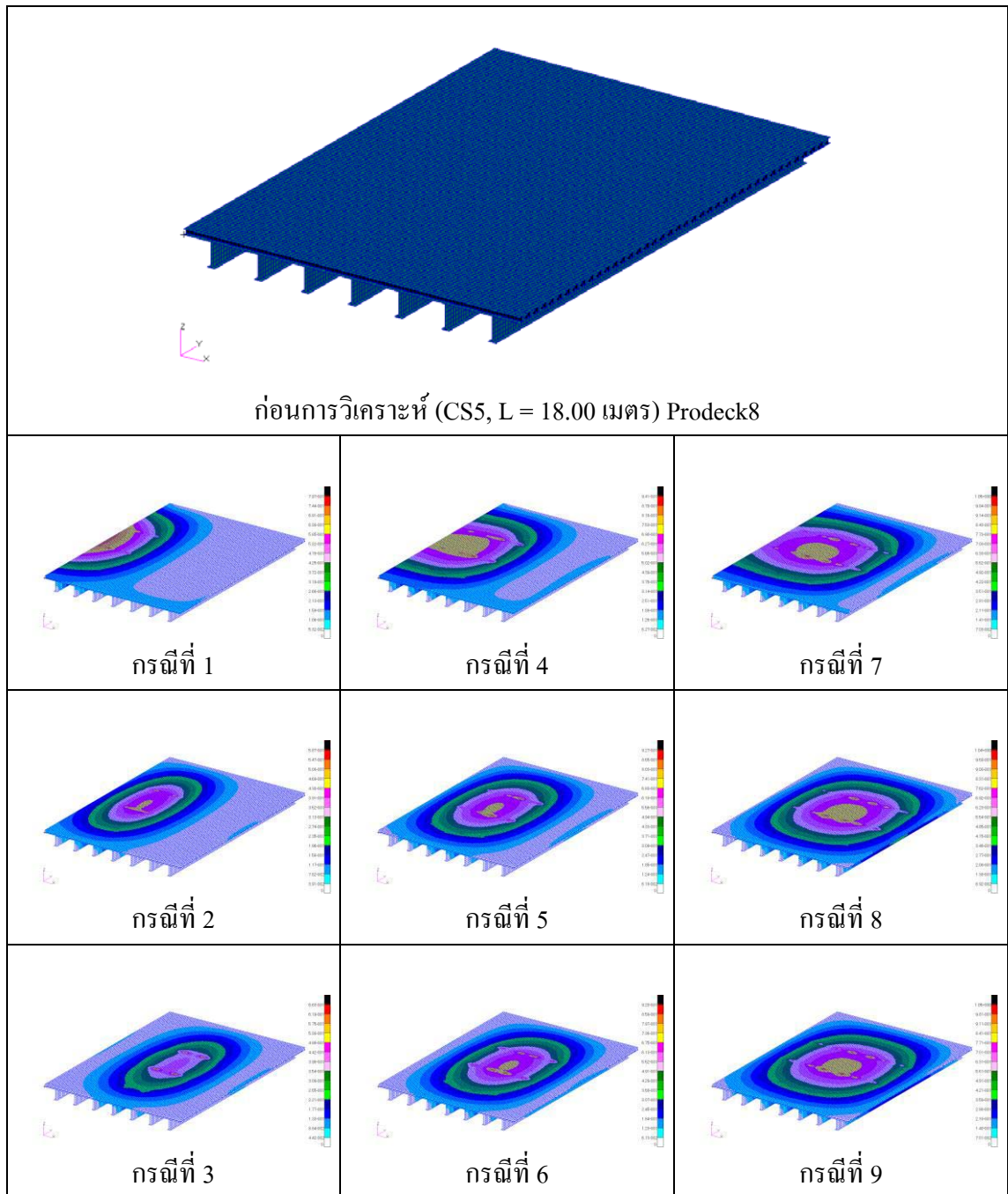
รูปที่ ก-19 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
 L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



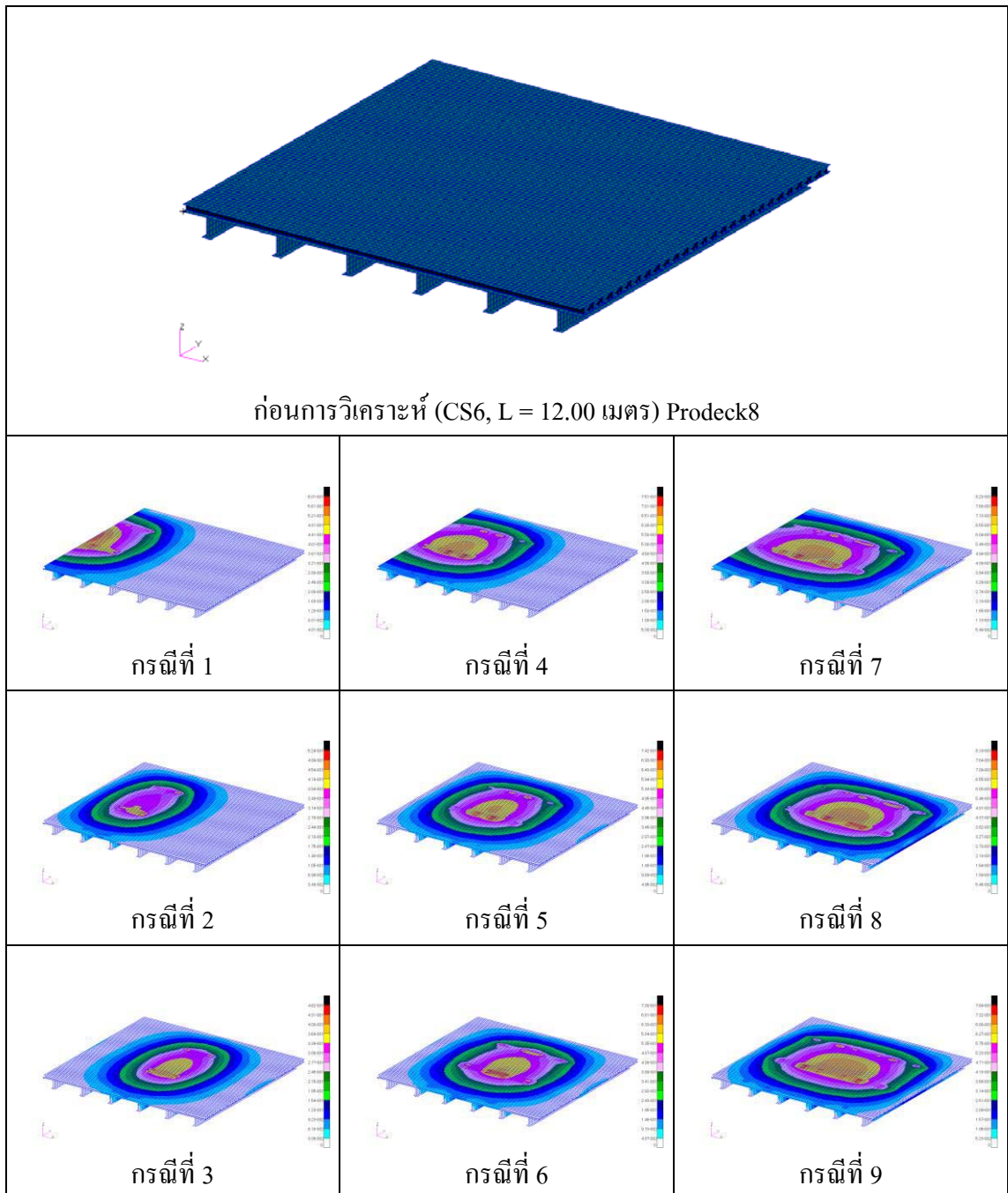
รูปที่ ก-20 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



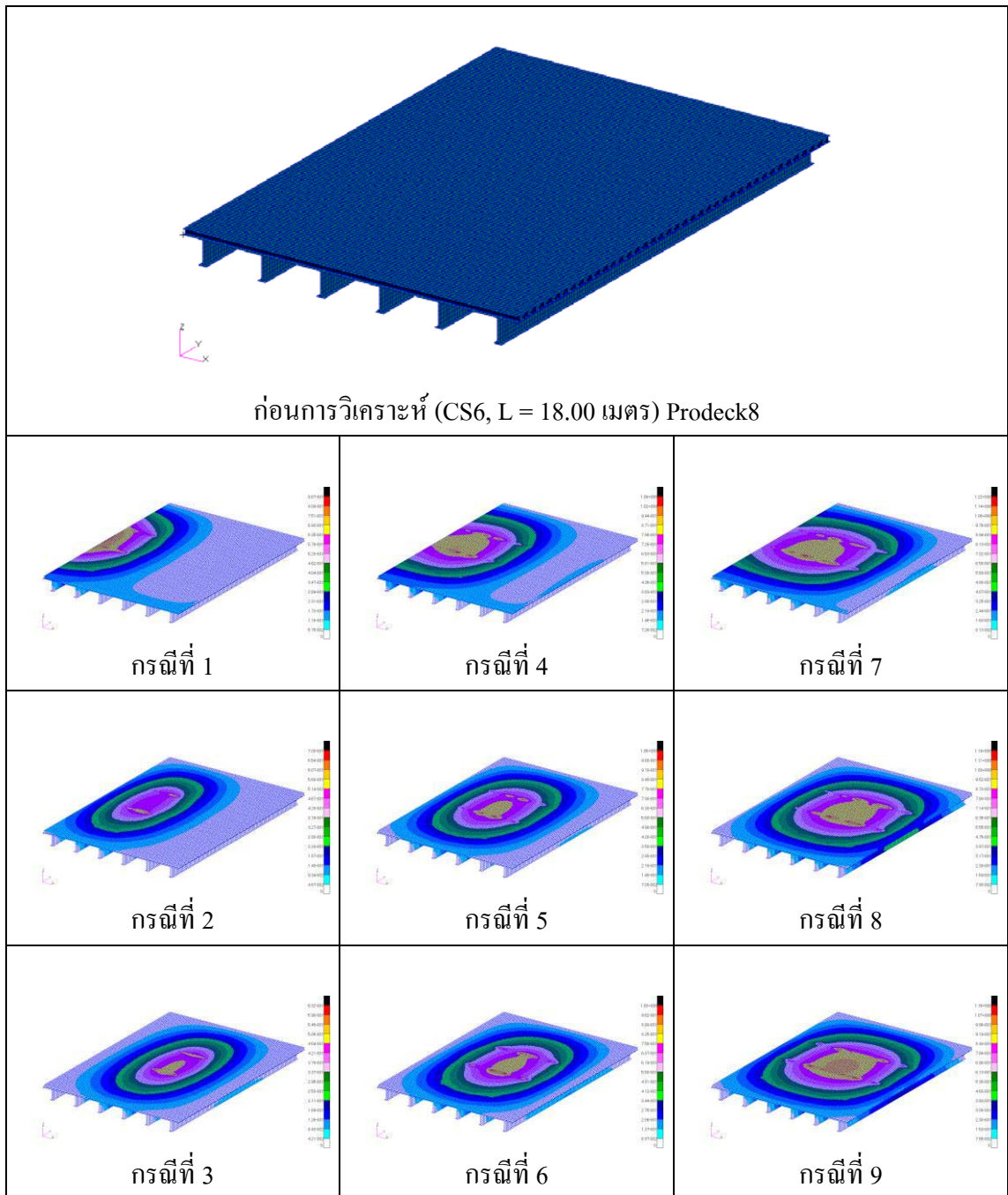
รูปที่ ก-21 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



รูปที่ ก-22 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9



รูปที่ ก-23 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
L = 12.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9

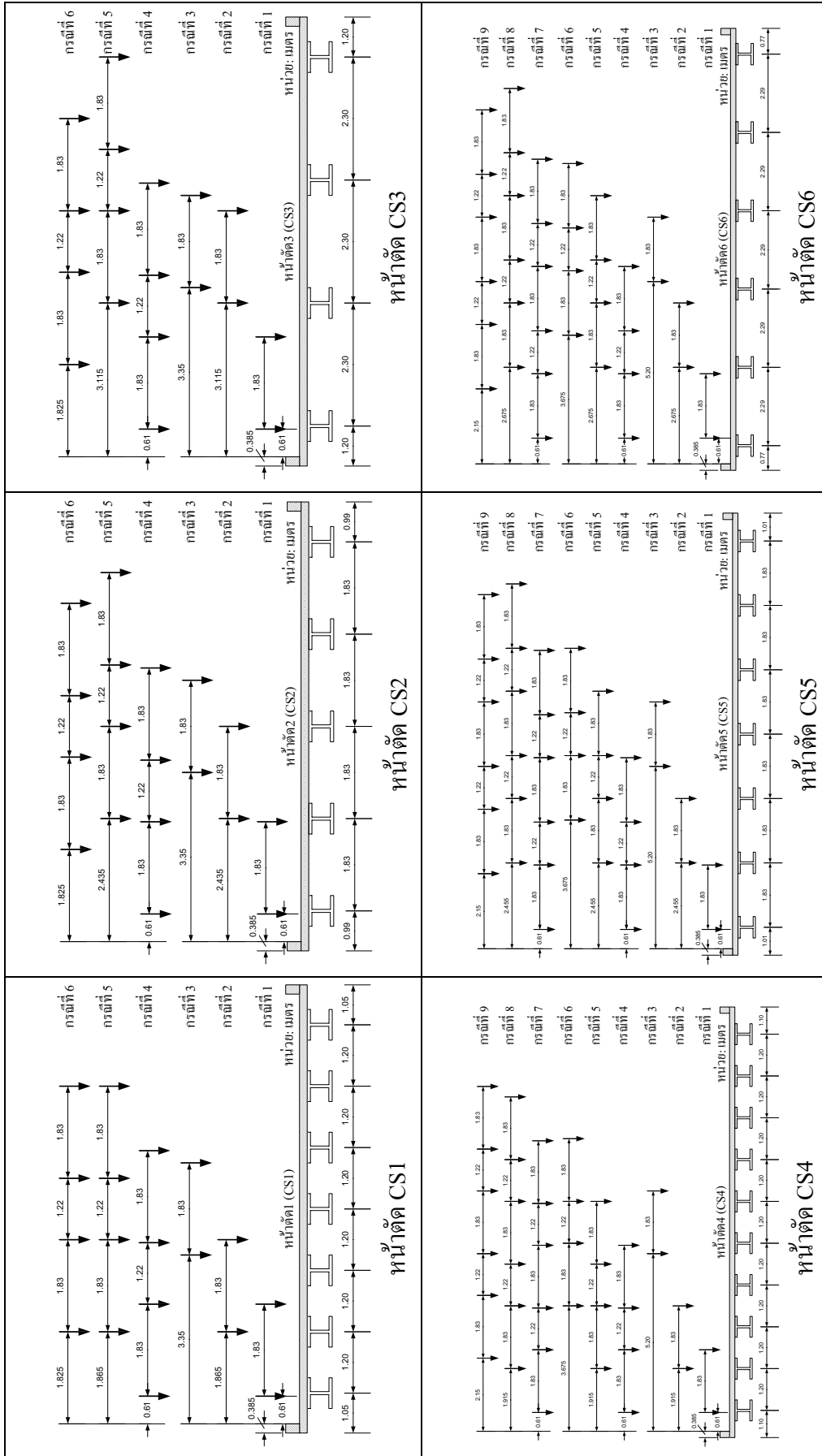


รูปที่ ก-24 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสะพาน หน้าตัด CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร)  
L = 18.00 เมตร แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 รับแรงกระทำในกรณีที่ 1 ถึง กรณีที่ 9

**ภาคผนวก ข**

ตารางแสดงค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor) ของคานที่รองรับ  
โดยมีหน้าตัดของแบบจำลองและแรงกระทำจากรถบรรทุกต่างๆ





รูปที่ ข-1 หน้าตัดและแรงกระทำจากบรรทุกในรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ ข-2 หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4249	0.3181	0.2008	0.0775	0.0116	-0.0095	-0.0234
2	0.1576	0.2724	0.2863	0.2012	0.0792	0.0120	-0.0088
3	0.0161	0.1184	0.2258	0.2805	0.2352	0.1067	0.0174
4	0.2162	0.2036	0.1991	0.1779	0.1348	0.0654	0.0031
5	0.0729	0.1437	0.1853	0.1987	0.1840	0.1464	0.0689
6	0.0740	0.1430	0.1859	0.1982	0.1839	0.1462	0.0689

ตารางที่ ข-3 หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4158	0.3105	0.2023	0.0804	0.0190	-0.0096	-0.0184
2	0.1696	0.2688	0.2714	0.1960	0.0821	0.0196	-0.0074
3	0.0296	0.1117	0.2272	0.2621	0.2209	0.1190	0.0295
4	0.2193	0.1999	0.2001	0.1717	0.1336	0.0679	0.0075
5	0.0800	0.1458	0.1788	0.1944	0.1780	0.1473	0.0758
6	0.0760	0.1469	0.1781	0.1942	0.1795	0.1454	0.0798

ตารางที่ ข-4 หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5159	0.3762	0.1309	0.0077	-0.0308
2	0.1227	0.3816	0.3579	0.1341	0.0037
3	0.0387	0.2543	0.4119	0.2550	0.0401
4	0.2694	0.2933	0.2632	0.1574	0.0167
5	0.0518	0.2040	0.2835	0.2804	0.1804
6	0.1044	0.2473	0.2939	0.2481	0.1063

ตารางที่ ข-5 หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5153	0.3715	0.1356	0.0133	-0.0357
2	0.1444	0.3652	0.3414	0.1343	0.0148
3	0.0630	0.2487	0.3826	0.2487	0.0571
4	0.2776	0.2900	0.2557	0.1548	0.0219
5	0.0620	0.2013	0.2743	0.2749	0.1874
6	0.1154	0.2423	0.2838	0.2415	0.1169

ตารางที่ ข-6 หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.6209	0.3640	0.0502	-0.0351
2	0.1075	0.4463	0.3883	0.0579
3	0.0808	0.4171	0.4137	0.0885
4	0.3361	0.3633	0.2570	0.0435
5	0.0339	0.2425	0.3608	0.3627
6	0.1621	0.3358	0.3352	0.1669

ตารางที่ ข-7 หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.6168	0.3635	0.0598	-0.0401
2	0.1270	0.4226	0.3696	0.0807
3	0.1018	0.3996	0.3988	0.0998
4	0.3399	0.3569	0.2518	0.0514
5	0.0405	0.2379	0.3532	0.3684
6	0.1742	0.3267	0.3278	0.1714

ตารางที่ ข-8 หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.4161	0.3138	0.1983	0.0799	0.0172	0.0022	-0.0005	-0.0038	-0.0089	-0.0143
2	0.1484	0.2752	0.2924	0.1980	0.0780	0.0164	0.0040	-0.0004	-0.0041	-0.0080
3	0.0010	0.0122	0.0548	0.1619	0.2698	0.2696	0.1623	0.0557	0.0119	0.0009
4	0.2130	0.1967	0.2014	0.1786	0.1328	0.0679	0.0187	0.0032	-0.0039	-0.0084
5	0.0751	0.1476	0.1848	0.1965	0.1772	0.1342	0.0658	0.0211	0.0025	-0.0048
6	0.0044	0.0415	0.1049	0.1587	0.1901	0.1905	0.1589	0.1047	0.0416	0.0046
7	0.1412	0.1311	0.1360	0.1329	0.1325	0.1278	0.1051	0.0684	0.0282	-0.0032
8	0.0481	0.0975	0.1232	0.1340	0.1309	0.1324	0.1292	0.1087	0.0732	0.0228
9	0.0328	0.0864	0.1159	0.1329	0.1316	0.1320	0.1330	0.1161	0.0865	0.0328

ตารางที่ ข-9 หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.4062	0.3058	0.2023	0.0839	0.0290	0.0103	0.0018	-0.0047	-0.0134	-0.0209
2	0.1557	0.2732	0.2745	0.1962	0.0805	0.0268	0.0091	0.0007	-0.0057	-0.0111
3	0.0072	0.0246	0.0618	0.1555	0.2504	0.2506	0.1553	0.0625	0.0254	0.0068
4	0.2154	0.1974	0.1992	0.1715	0.1317	0.0708	0.0235	0.0050	-0.0040	-0.0106
5	0.0825	0.1507	0.1772	0.1926	0.1683	0.1299	0.0699	0.0264	0.0064	-0.0039
6	0.0124	0.0486	0.1059	0.1517	0.1809	0.1813	0.1518	0.1054	0.0500	0.0119
7	0.1434	0.1330	0.1375	0.1297	0.1311	0.1238	0.1026	0.0693	0.0289	0.0005
8	0.0525	0.0994	0.1190	0.1329	0.1280	0.1310	0.1260	0.1070	0.0754	0.0288
9	0.0395	0.0882	0.1128	0.1305	0.1284	0.1284	0.1308	0.1135	0.0878	0.0401

**ตารางที่ ข-10** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.5073	0.3759	0.1262	0.0181	0.0009	-0.0081	-0.0203
2	0.1260	0.3771	0.3578	0.1298	0.0159	0.0005	-0.0071
3	0.0064	0.0460	0.2414	0.4111	0.2418	0.0476	0.0057
4	0.2699	0.2925	0.2627	0.1523	0.0333	-0.0003	-0.0105
5	0.0646	0.2082	0.2804	0.2601	0.1519	0.0350	-0.0001
6	0.0147	0.1071	0.2333	0.2886	0.2334	0.1076	0.0152
7	0.1797	0.1974	0.1971	0.1969	0.1547	0.0718	0.0024
8	0.0394	0.1380	0.1893	0.1970	0.1990	0.1654	0.0719
9	0.0532	0.1530	0.1957	0.1950	0.1962	0.1530	0.0540

**ตารางที่ ข-11** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4985	0.3669	0.1374	0.0318	0.0056	-0.0114	-0.0288
2	0.1443	0.3627	0.3425	0.1269	0.0292	0.0030	-0.0085
3	0.0162	0.0624	0.2332	0.3772	0.2326	0.0619	0.0166
4	0.2750	0.2888	0.2547	0.1507	0.0414	0.0032	-0.0137
5	0.0784	0.2063	0.2678	0.2479	0.1508	0.0429	0.0060
6	0.0264	0.1130	0.2241	0.2729	0.2242	0.1130	0.0263
7	0.1840	0.1979	0.1951	0.1911	0.1506	0.0730	0.0083
8	0.0473	0.1370	0.1834	0.1915	0.1952	0.1655	0.0801
9	0.0624	0.1516	0.1903	0.1912	0.1909	0.1513	0.0623

ตารางที่ ข-12 หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5629	0.3889	0.0714	0.0056	-0.0065	-0.0224
2	0.1094	0.4489	0.3770	0.0646	0.0052	-0.0050
3	0.0084	0.0887	0.4007	0.4007	0.0931	0.0084
4	0.2966	0.3534	0.2544	0.0767	0.0310	-0.0120
5	0.0570	0.2501	0.3512	0.2615	0.0770	0.0032
6	0.0182	0.1637	0.3168	0.3167	0.1656	0.0191
7	0.2029	0.2477	0.2469	0.2101	0.0912	0.0011
8	0.0337	0.1661	0.2393	0.2439	0.2256	0.0913
9	0.0599	0.2032	0.2355	0.2357	0.2040	0.0617

ตารางที่ ข-13 หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5518	0.3805	0.0945	0.0146	-0.0089	-0.0324
2	0.1324	0.4245	0.3521	0.0833	0.0127	-0.0049
3	0.0222	0.1039	0.3732	0.3732	0.1062	0.0213
4	0.3103	0.3549	0.2561	0.0858	0.0085	-0.0156
5	0.0736	0.2462	0.3304	0.2524	0.0854	0.0121
6	0.0319	0.1669	0.3005	0.3013	0.1668	0.0325
7	0.2084	0.2464	0.2411	0.2033	0.0944	0.0065
8	0.0431	0.1688	0.2305	0.2379	0.2196	0.1002
9	0.0710	0.1990	0.2295	0.2301	0.1986	0.0719

**ตารางที่ ข-14** หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4143	0.3024	0.1928	0.0987	0.0296	-0.0078	-0.0300
2	0.1917	0.2385	0.2489	0.1914	0.1108	0.0366	-0.0178
3	0.0371	0.1335	0.2064	0.2453	0.2069	0.1337	0.0371
4	0.2173	0.2053	0.1931	0.1737	0.1272	0.0725	0.0109
5	0.0870	0.1375	0.1799	0.1914	0.1801	0.1374	0.0866
6	0.0866	0.1379	0.1801	0.1900	0.1805	0.1379	0.0869

**ตารางที่ ข-15** หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4031	0.2978	0.1985	0.1075	0.0382	-0.0065	-0.0387
2	0.1997	0.2389	0.2395	0.1833	0.1092	0.0421	-0.0127
3	0.0509	0.1316	0.2025	0.2288	0.1993	0.1331	0.0538
4	0.2194	0.2057	0.1916	0.1672	0.1265	0.0735	0.0161
5	0.0936	0.1408	0.1738	0.1833	0.1726	0.1418	0.0941
6	0.0921	0.1412	0.1734	0.1837	0.1730	0.1421	0.0945



**ตารางที่ ข-16** หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5100	0.3447	0.1560	0.0252	-0.0360
2	0.1634	0.3314	0.3239	0.1696	0.0117
3	0.0740	0.2561	0.3411	0.2569	0.0720
4	0.2810	0.2872	0.2509	0.1529	0.0280
5	0.0682	0.1964	0.2730	0.2659	0.1965
6	0.1261	0.2353	0.2793	0.2354	0.1238

**ตารางที่ ข-17** หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5021	0.3431	0.1642	0.0354	-0.0448
2	0.1897	0.3124	0.3005	0.1687	0.0287
3	0.0874	0.2488	0.3290	0.2482	0.0864
4	0.2854	0.2828	0.2430	0.1528	0.0361
5	0.0817	0.1946	0.2602	0.2602	0.2033
6	0.1345	0.2317	0.2681	0.2312	0.1345

**ตารางที่ ข-18** หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.5992	0.3449	0.0978	-0.0419
2	0.1498	0.3918	0.3627	0.0957
3	0.1286	0.3727	0.3727	0.1261
4	0.3441	0.3459	0.2486	0.0613
5	0.0510	0.2354	0.3447	0.3690
6	0.1832	0.3187	0.3179	0.1802

**ตารางที่ ข-19** หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.5980	0.3462	0.1018	-0.0460
2	0.1612	0.3786	0.3434	0.1168
3	0.1492	0.3514	0.3525	0.1469
4	0.3513	0.3379	0.2430	0.0678
5	0.0538	0.2304	0.3386	0.3772
6	0.1944	0.3065	0.3067	0.1924

ตารางที่ ข-20 หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.4036	0.2968	0.1906	0.1021	0.0359	0.0068	-0.0043	-0.0079	-0.0100	-0.0135
2	0.1890	0.2361	0.2498	0.1894	0.1069	0.0385	0.0101	-0.0028	-0.0074	-0.0096
3	-0.0061	0.0283	0.0854	0.1667	0.2242	0.2224	0.1672	0.0895	0.0288	-0.0063
4	0.2118	0.2022	0.1885	0.1699	0.1245	0.0778	0.0337	0.0079	-0.0049	-0.0115
5	0.0911	0.1385	0.1786	0.1857	0.1708	0.1273	0.0784	0.0327	0.0057	-0.0089
6	0.0064	0.0528	0.1040	0.1539	0.1808	0.1806	0.1545	0.1064	0.0540	0.0065
7	0.1374	0.1352	0.1335	0.1369	0.1326	0.1227	0.1016	0.0675	0.0326	0.0000
8	0.0580	0.0909	0.1204	0.1316	0.1374	0.1344	0.1251	0.1041	0.0692	0.0288
9	0.0406	0.0790	0.1114	0.1288	0.1379	0.1384	0.1297	0.1135	0.0800	0.0407

ตารางที่ ข-21 หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.3910	0.2901	0.1950	0.1076	0.0474	0.0155	-0.0010	-0.0096	-0.0157	-0.0205
2	0.1975	0.2326	0.2315	0.1795	0.1101	0.0535	0.0196	0.0009	-0.0091	-0.0163
3	0.0006	0.0407	0.0916	0.1589	0.2074	0.2067	0.1589	0.0931	0.0418	0.0003
4	0.2153	0.2011	0.1866	0.1628	0.1241	0.0786	0.0389	0.0128	-0.0044	-0.0157
5	0.1004	0.1420	0.1706	0.1768	0.1619	0.1264	0.0807	0.0390	0.0117	-0.0096
6	0.0150	0.0593	0.1065	0.1476	0.1708	0.1706	0.1473	0.1075	0.0603	0.0151
7	0.1396	0.1366	0.1362	0.1347	0.1302	0.1181	0.0982	0.0685	0.0346	0.0035
8	0.0621	0.0933	0.1173	0.1298	0.1342	0.1319	0.1220	0.1020	0.0722	0.0352
9	0.0468	0.0826	0.1094	0.1266	0.1335	0.1337	0.1269	0.1103	0.0829	0.0474

**ตารางที่ ข-22** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4962	0.3370	0.1603	0.0409	-0.0015	-0.0129	-0.0200
2	0.1685	0.3193	0.3111	0.1686	0.0455	0.0005	-0.0134
3	-0.0002	0.0978	0.2440	0.3228	0.2422	0.0942	-0.0008
4	0.2735	0.2801	0.2440	0.1534	0.0594	0.0053	-0.0158
5	0.0812	0.1990	0.2640	0.2454	0.1561	0.0583	-0.0040
6	0.0211	0.1246	0.2238	0.2652	0.2228	0.1227	0.0198
7	0.1779	0.1949	0.2025	0.1906	0.1487	0.0784	0.0070
8	0.0492	0.1317	0.1856	0.2042	0.1949	0.1542	0.0801
9	0.0638	0.1443	0.1920	0.2044	0.1910	0.1434	0.0612

**ตารางที่ ข-23** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4861	0.3355	0.1660	0.0522	0.0044	-0.0156	-0.0286
2	0.1875	0.3057	0.2927	0.1661	0.0582	0.0079	-0.0181
3	0.0116	0.1074	0.2316	0.2998	0.2312	0.1057	0.0128
4	0.2806	0.2776	0.2370	0.1522	0.0616	0.0095	-0.0186
5	0.0962	0.1973	0.2507	0.2330	0.1551	0.0667	0.0010
6	0.0323	0.1285	0.2146	0.2503	0.2146	0.1279	0.0319
7	0.1846	0.1986	0.1993	0.1849	0.1440	0.0775	0.0111
8	0.0568	0.1314	0.1803	0.1967	0.1908	0.1555	0.0886
9	0.0706	0.1440	0.1866	0.1981	0.1865	0.1440	0.0703

**ตารางที่ ข-24** หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5529	0.3516	0.1195	0.0106	-0.0127	-0.0218
2	0.1486	0.3798	0.3434	0.1288	0.0140	-0.0146
3	0.0046	0.1439	0.3509	0.3467	0.1491	0.0048
4	0.3142	0.3363	0.2515	0.1027	0.0119	-0.0166
5	0.0706	0.2418	0.3264	0.2542	0.1065	0.0005
6	0.0253	0.1716	0.3016	0.3005	0.1756	0.0253
7	0.2059	0.2444	0.2475	0.1993	0.0990	0.0039
8	0.0417	0.1609	0.2374	0.2521	0.2084	0.0995
9	0.0690	0.1866	0.2428	0.2436	0.1891	0.0689

**ตารางที่ ข-25** หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมประกอบอย่างสมบูรณ์ (Fully Composite)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5415	0.3524	0.1290	0.0239	-0.0143	-0.0325
2	0.1694	0.3647	0.3218	0.1330	0.0276	-0.0165
3	0.0192	0.1588	0.3232	0.3231	0.1554	0.0204
4	0.3221	0.3283	0.2442	0.1080	0.0187	-0.0213
5	0.0873	0.2392	0.3062	0.2456	0.1132	0.0085
6	0.0411	0.1772	0.2833	0.2827	0.1756	0.0401
7	0.2130	0.2445	0.2399	0.1938	0.1002	0.0086
8	0.0503	0.1604	0.2288	0.2432	0.2070	0.1103
9	0.0818	0.1858	0.2338	0.2332	0.1848	0.0805

ตารางที่ ข-26 หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4309	0.3175	0.1996	0.0745	0.0098	-0.0097	-0.0225
2	0.1531	0.2768	0.2895	0.2028	0.0775	0.0103	-0.0100
3	0.0123	0.1152	0.2305	0.2841	0.2397	0.1048	0.0132
4	0.2176	0.2017	0.1994	0.1784	0.1375	0.0643	0.0011
5	0.0702	0.1449	0.1856	0.2004	0.1848	0.1480	0.0661
6	0.0712	0.1442	0.1861	0.2000	0.1845	0.1479	0.0661

ตารางที่ ข-27 หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4262	0.3138	0.2035	0.0793	0.0172	-0.0105	-0.0295
2	0.1671	0.2721	0.2736	0.1972	0.0813	0.0179	-0.0092
3	0.0261	0.1103	0.2306	0.2651	0.2246	0.1171	0.0263
4	0.2208	0.1990	0.2003	0.1722	0.1355	0.0667	0.0055
5	0.0779	0.1466	0.1791	0.1958	0.1787	0.1483	0.0737
6	0.0739	0.1480	0.1787	0.1957	0.1797	0.1461	0.0778

**ตารางที่ ข-28** หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5190	0.3785	0.1269	0.0061	-0.0305
2	0.1176	0.3862	0.3634	0.1310	0.0017
3	0.0350	0.2560	0.4162	0.2566	0.0362
4	0.2696	0.2944	0.2636	0.1575	0.0149
5	0.0489	0.2059	0.2860	0.2796	0.1795
6	0.1025	0.2478	0.2970	0.2485	0.1042

**ตารางที่ ข-29** หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5190	0.3733	0.1327	0.0116	-0.0366
2	0.1408	0.3689	0.3458	0.1325	0.0120
3	0.0537	0.2517	0.3885	0.2514	0.0548
4	0.2782	0.2910	0.2559	0.1547	0.0202
5	0.0595	0.2025	0.2764	0.2743	0.1873
6	0.1141	0.2425	0.2862	0.2417	0.1155

**ตารางที่ ข-30** หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.6248	0.3623	0.0483	-0.0354
2	0.1028	0.4518	0.3911	0.0544
3	0.0781	0.4212	0.4169	0.0838
4	0.3363	0.3633	0.2591	0.0414
5	0.0316	0.2442	0.3608	0.3634
6	0.1611	0.3373	0.3361	0.1655

**ตารางที่ ข-31** หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.6214	0.3620	0.0582	-0.0417
2	0.1240	0.4269	0.3712	0.0779
3	0.0985	0.4028	0.4022	0.0966
4	0.3409	0.3570	0.2529	0.0492
5	0.0382	0.2390	0.3529	0.3700
6	0.1734	0.3272	0.3286	0.1708



**ตารางที่ ข-32** หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.4228	0.3135	0.1976	0.0765	0.0145	0.0006	-0.0010	-0.0035	-0.0079	-0.0132
2	0.1440	0.2799	0.2953	0.1996	0.0762	0.0142	0.0024	-0.0009	-0.0037	-0.0070
3	-0.0007	0.0098	0.0528	0.1624	0.2754	0.2753	0.1627	0.0535	0.0096	-0.0008
4	0.2145	0.1956	0.2019	0.1789	0.1349	0.0666	0.0172	0.0022	-0.0039	-0.0079
5	0.0718	0.1487	0.1854	0.1982	0.1784	0.1369	0.0647	0.0193	0.0015	-0.0049
6	0.0024	0.0397	0.1048	0.1594	0.1934	0.1938	0.1596	0.1046	0.0399	0.0025
7	0.1421	0.1300	0.1357	0.1321	0.1336	0.1295	0.1055	0.0682	0.0271	-0.0040
8	0.0461	0.0982	0.1234	0.1345	0.1308	0.1340	0.1308	0.1087	0.0725	0.0211
9	0.0310	0.0865	0.1159	0.1341	0.1322	0.1322	0.1341	0.1162	0.0867	0.0310

**ตารางที่ ข-33** หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.4130	0.3061	0.2013	0.0815	0.0260	0.0080	0.0009	-0.0046	-0.0124	-0.0198
2	0.1533	0.2771	0.2764	0.1974	0.0797	0.0247	0.0073	0.0000	-0.0055	-0.0105
3	0.0048	0.0219	0.0606	0.1566	0.2553	0.2556	0.1564	0.0613	0.0226	0.0049
4	0.2170	0.1967	0.1995	0.1720	0.1335	0.0695	0.0223	0.0041	-0.0042	-0.0104
5	0.0800	0.1514	0.1778	0.1944	0.1697	0.1322	0.0689	0.0249	0.0052	-0.0045
6	0.0101	0.0468	0.1056	0.1527	0.1843	0.1847	0.1528	0.1051	0.0480	0.0098
7	0.1442	0.1321	0.1372	0.1295	0.1323	0.1252	0.1029	0.0692	0.0280	-0.0005
8	0.0508	0.0998	0.1191	0.1335	0.1284	0.1324	0.1273	0.1069	0.0745	0.0273
9	0.0380	0.0878	0.1128	0.1315	0.1294	0.1294	0.1317	0.1134	0.0874	0.0385

**ตารางที่ ข-34** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.5104	0.3784	0.1226	0.0155	0.0000	-0.0076	-0.0192
2	0.1208	0.3819	0.3636	0.1270	0.0139	-0.0003	-0.0069
3	0.0041	0.0445	0.2432	0.4152	0.2436	0.0461	0.0034
4	0.2697	0.2937	0.2630	0.1527	0.0321	-0.0010	-0.0103
5	0.0611	0.2096	0.2831	0.2609	0.1527	0.0339	-0.0013
6	0.0126	0.1064	0.2348	0.2917	0.2348	0.1068	0.0130
7	0.1793	0.1976	0.1968	0.1982	0.1554	0.0712	0.0014
8	0.0373	0.1388	0.1905	0.1969	0.2005	0.1655	0.0706
9	0.0513	0.1534	0.1971	0.1951	0.1975	0.1533	0.0522

**ตารางที่ ข-35** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.5021	0.3690	0.1344	0.0294	0.0043	-0.0111	-0.0280
2	0.1405	0.3659	0.3475	0.1257	0.0272	0.0019	-0.0087
3	0.0136	0.0613	0.2352	0.3804	0.2346	0.0608	0.0140
4	0.2753	0.2898	0.2550	0.1510	0.0404	0.0023	-0.0138
5	0.0754	0.2073	0.2707	0.2491	0.1512	0.0419	0.0044
6	0.0243	0.1123	0.2255	0.2759	0.2256	0.1122	0.0242
7	0.1839	0.1980	0.1951	0.1923	0.1511	0.0724	0.0073
8	0.0454	0.1374	0.1848	0.1920	0.1961	0.1652	0.0791
9	0.0609	0.1517	0.1916	0.1917	0.1920	0.1514	0.0607

**ตารางที่ ข-36** หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5660	0.3888	0.0691	0.0040	-0.0064	-0.0214
2	0.1045	0.4541	0.3797	0.0631	0.0037	-0.0050
3	0.0067	0.0876	0.4041	0.4051	0.0903	0.0062
4	0.3050	0.3647	0.2635	0.0765	0.0024	-0.0122
5	0.0537	0.2519	0.3535	0.2634	0.0757	0.0018
6	0.0160	0.1638	0.3190	0.3187	0.1655	0.0169
7	0.2030	0.2486	0.2459	0.2110	0.0912	0.0003
8	0.0317	0.1670	0.2404	0.2454	0.2256	0.0899
9	0.0585	0.2034	0.2367	0.2373	0.2040	0.0602

**ตารางที่ ข-37** หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck4 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5556	0.3798	0.0920	0.0128	-0.0091	-0.0311
2	0.1288	0.4289	0.3544	0.0822	0.0111	-0.0054
3	0.0195	0.1025	0.3772	0.3773	0.1048	0.0186
4	0.3108	0.3553	0.2568	0.0851	0.0077	-0.0157
5	0.0707	0.2478	0.3325	0.2542	0.0845	0.0104
6	0.0298	0.1670	0.3025	0.3033	0.1669	0.0305
7	0.2084	0.2467	0.2418	0.2037	0.0938	0.0056
8	0.0415	0.1650	0.2328	0.2403	0.2207	0.0998
9	0.0697	0.1988	0.2310	0.2316	0.1983	0.0706

**ตารางที่ ข-38** หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4196	0.3057	0.1929	0.0948	0.0262	-0.0095	-0.0297
2	0.1863	0.2431	0.2549	0.1944	0.1085	0.0333	-0.0204
3	0.0305	0.1314	0.2118	0.2520	0.2123	0.1316	0.0304
4	0.2170	0.2055	0.1947	0.1750	0.1290	0.0713	0.0076
5	0.0829	0.1382	0.1818	0.1944	0.1821	0.1381	0.0825
6	0.0825	0.1385	0.1821	0.1933	0.1824	0.1384	0.0827

**ตารางที่ ข-39** หน้าตัดแบบ CS1 (W = 9.30 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4091	0.3017	0.1994	0.1042	0.0345	-0.0090	-0.0399
2	0.1962	0.2429	0.2442	0.1863	0.1080	0.0389	-0.0164
3	0.0452	0.1301	0.2071	0.2342	0.2040	0.1315	0.0479
4	0.2196	0.2061	0.1934	0.1685	0.1278	0.0720	0.0126
5	0.0900	0.1412	0.1754	0.1863	0.1744	0.1423	0.0904
6	0.0886	0.1417	0.1751	0.1866	0.1747	0.1425	0.0908

**ตารางที่ ข-40** หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5136	0.3486	0.1528	0.0221	-0.0372
2	0.1575	0.3371	0.3308	0.1676	0.0070
3	0.0694	0.2576	0.3473	0.2583	0.0674
4	0.2805	0.2892	0.2524	0.1529	0.0251
5	0.0642	0.1982	0.2764	0.2669	0.1944
6	0.1234	0.2365	0.2823	0.2366	0.1212

**ตารางที่ ข-41** หน้าตัดแบบ CS2 (W = 9.30 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ				
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5
1	0.5066	0.3471	0.1618	0.0320	-0.0476
2	0.1852	0.3170	0.3068	0.1674	0.0237
3	0.0836	0.2498	0.3334	0.2496	0.0835
4	0.2856	0.2850	0.2443	0.1524	0.0327
5	0.0778	0.1957	0.2632	0.2613	0.2021
6	0.1322	0.2326	0.2708	0.2321	0.1322

ตารางที่ ข-42 หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.6044	0.3455	0.0940	-0.0439
2	0.1446	0.3981	0.3664	0.0909
3	0.1232	0.3779	0.3780	0.1209
4	0.3445	0.3476	0.2498	0.0581
5	0.0475	0.2365	0.3461	0.3699
6	0.1816	0.3203	0.3194	0.1787

ตารางที่ ข-43 หน้าตัดแบบ CS3 (W = 9.30 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ			
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4
1	0.6035	0.3478	0.0985	-0.0499
2	0.1918	0.2496	0.4216	0.1370
3	0.1447	0.3560	0.3568	0.1425
4	0.3522	0.3400	0.2437	0.0642
5	0.0501	0.2313	0.3401	0.3785
6	0.1930	0.3081	0.3078	0.1911

**ตารางที่ ข-44** หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.4089	0.3007	0.1910	0.0980	0.0321	0.0042	-0.0053	-0.0076	-0.0092	-0.0128
2	0.1834	0.2412	0.2558	0.1924	0.1049	0.0352	0.0073	-0.0041	-0.0073	-0.0089
3	-0.0085	0.0248	0.0828	0.1684	0.2311	0.2294	0.1690	0.0866	0.0252	-0.0088
4	0.2116	0.2027	0.1904	0.1713	0.1261	0.0768	0.0315	0.0061	-0.0055	-0.0111
5	0.0868	0.1391	0.1805	0.1889	0.1731	0.1291	0.0773	0.0305	0.0040	-0.0094
6	0.0035	0.0505	0.1039	0.1555	0.1846	0.1844	0.1563	0.1061	0.0515	0.0037
7	0.1373	0.1347	0.1336	0.1368	0.1338	0.1244	0.1024	0.0675	0.0312	-0.0017
8	0.0553	0.0912	0.1209	0.1326	0.1379	0.1358	0.1267	0.1048	0.0686	0.0263
9	0.0379	0.0791	0.1120	0.1301	0.1387	0.1393	0.1310	0.1139	0.0799	0.0382

**ตารางที่ ข-45** หน้าตัดแบบ CS4 (W = 13.00 เมตร, S = 1.20 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ									
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7	คาน 8	คาน 9	คาน 10
1	0.3972	0.2937	0.1956	0.1045	0.0439	0.0125	-0.0025	-0.0099	-0.0150	-0.0199
2	0.1936	0.2371	0.2360	0.1823	0.1086	0.0506	0.0170	-0.0001	-0.0095	-0.0157
3	-0.0026	0.0375	0.0900	0.1610	0.2135	0.2128	0.1611	0.0914	0.0385	-0.0031
4	0.2155	0.2017	0.1886	0.1642	0.1256	0.0777	0.0371	0.0110	-0.0054	-0.0158
5	0.0966	0.1428	0.1723	0.1799	0.1641	0.1281	0.0801	0.0371	0.0097	-0.0108
6	0.0118	0.0570	0.1064	0.1493	0.1746	0.1744	0.1493	0.1074	0.0580	0.0118
7	0.1391	0.1362	0.1363	0.1346	0.1312	0.1208	0.0989	0.0682	0.0331	0.0016
8	0.0597	0.0935	0.1175	0.1308	0.1349	0.1334	0.1238	0.1024	0.0714	0.0327
9	0.0444	0.0823	0.1097	0.1278	0.1347	0.1349	0.1282	0.1106	0.0825	0.0449

**ตารางที่ ข-46** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4998	0.3412	0.1571	0.0373	-0.0032	-0.0128	-0.0194
2	0.1623	0.3254	0.3181	0.1667	0.0422	-0.0013	-0.0133
3	-0.0029	0.0951	0.2456	0.3283	0.2441	0.0918	-0.0019
4	0.2732	0.2824	0.2456	0.1533	0.0573	0.0040	-0.0159
5	0.0769	0.2006	0.2678	0.2475	0.1563	0.0563	-0.0055
6	0.0184	0.1234	0.2257	0.2687	0.2248	0.1217	0.0173
7	0.1774	0.1956	0.2027	0.1917	0.1494	0.0776	0.0055
8	0.0465	0.1324	0.1873	0.2047	0.1961	0.1546	0.0785
9	0.0616	0.1448	0.1931	0.2050	0.1923	0.1440	0.0592

**ตารางที่ ข-47** หน้าตัดแบบ CS5 (W = 13.00 เมตร, S = 1.83 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมี  
แผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ						
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6	คาน 7
1	0.4901	0.3393	0.1636	0.0489	0.0026	-0.0161	-0.0285
2	0.1829	0.3105	0.2985	0.1654	0.0554	0.0059	-0.0186
3	0.0092	0.1055	0.2337	0.3047	0.2333	0.1038	0.0098
4	0.2813	0.2795	0.2382	0.1522	0.0599	0.0081	-0.0192
5	0.0925	0.1991	0.2542	0.2351	0.1555	0.0646	-0.0009
6	0.0296	0.1274	0.2166	0.2537	0.2165	0.1269	0.0292
7	0.1840	0.1991	0.1997	0.1862	0.1447	0.0768	0.0095
8	0.0543	0.1321	0.1818	0.1976	0.1919	0.1554	0.0869
9	0.0692	0.1442	0.1878	0.1988	0.1877	0.1442	0.0683



**ตารางที่ ข-48** หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 12.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

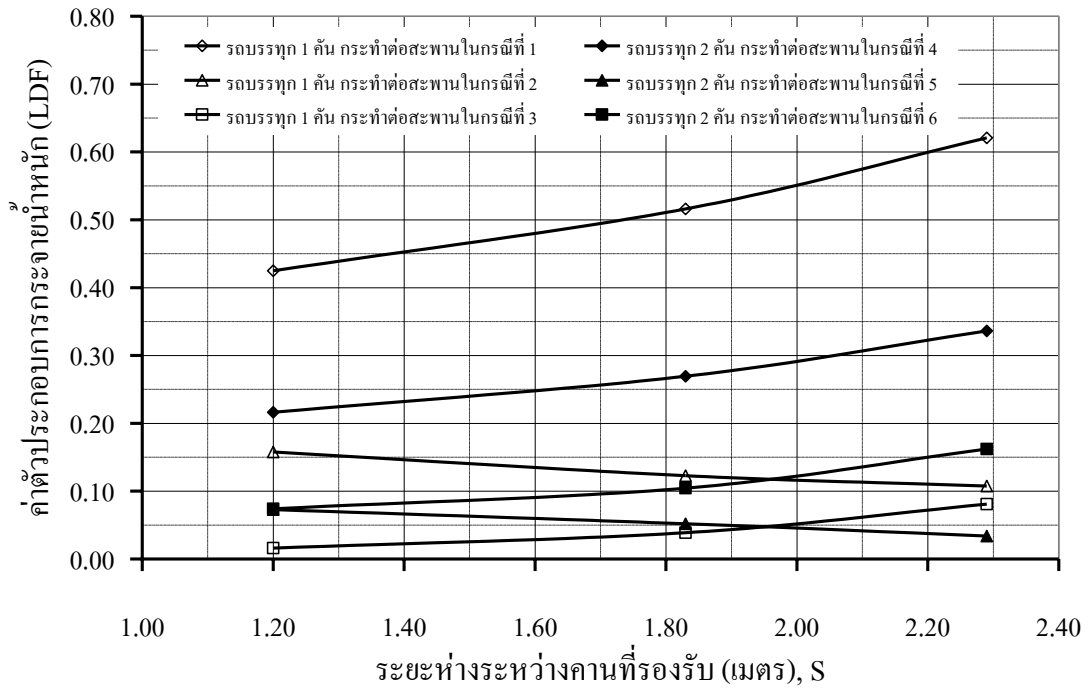
กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5568	0.3530	0.1159	0.0086	-0.0129	-0.0214
2	0.1434	0.3861	0.3474	0.1260	0.0119	-0.0148
3	0.0019	0.1415	0.3562	0.3520	0.1464	0.0020
4	0.3144	0.3381	0.2528	0.1009	0.0107	-0.0168
5	0.0671	0.2438	0.3295	0.2558	0.1048	-0.0011
6	0.0231	0.1718	0.3040	0.3028	0.1754	0.0230
7	0.2056	0.2449	0.2483	0.2000	0.0985	0.0027
8	0.0394	0.1619	0.2387	0.2529	0.2088	0.0982
9	0.0674	0.1871	0.2441	0.2447	0.1894	0.0673

**ตารางที่ ข-49** หน้าตัดแบบ CS6 (W = 13.00 เมตร, S = 2.29 เมตร) L = 18.00 เมตร แบบจำลองมีแผ่นพื้นประเภท Prodeck8 และมีพฤติกรรมเชื่อมต่อบางส่วน (Partial Connection)

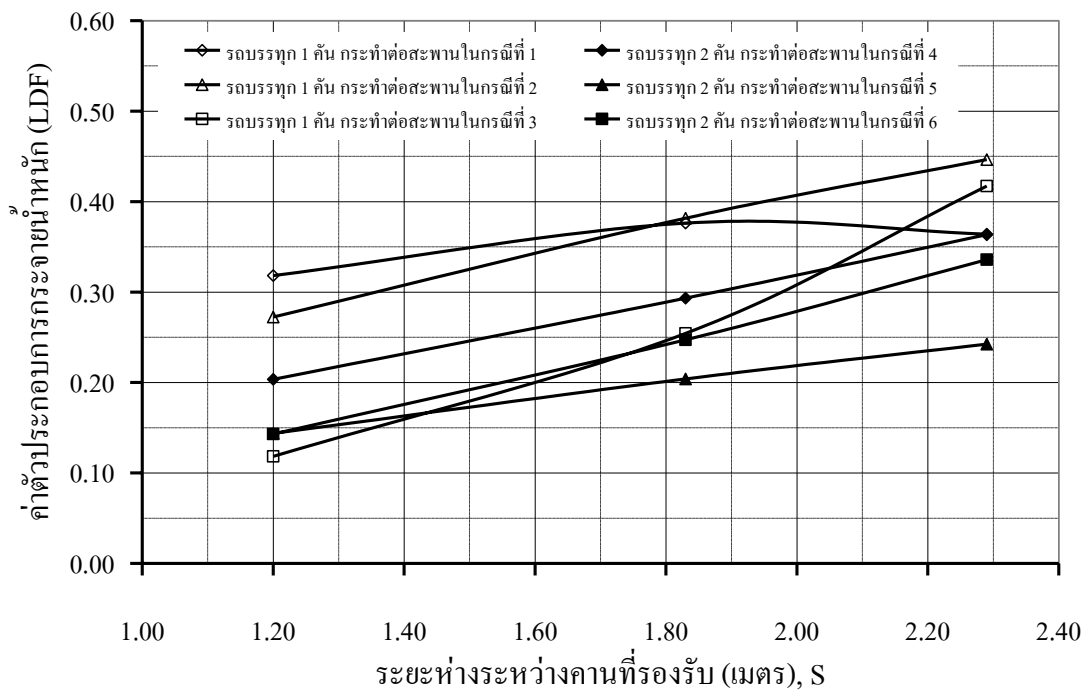
กรณี	ค่า LDF ของคานที่รองรับ					
	คาน 1	คาน 2	คาน 3	คาน 4	คาน 5	คาน 6
1	0.5460	0.3538	0.1263	0.0214	-0.0150	-0.0325
2	0.1656	0.3698	0.3254	0.1313	0.0253	-0.0174
3	0.0166	0.1568	0.3281	0.3279	0.1536	0.0170
4	0.3226	0.3302	0.2458	0.1065	0.0170	-0.0220
5	0.0842	0.2412	0.3092	0.2474	0.1116	0.0065
6	0.0387	0.1770	0.2858	0.2853	0.1756	0.0377
7	0.2127	0.2451	0.2411	0.1943	0.0996	0.0072
8	0.0480	0.1613	0.2302	0.2444	0.2070	0.1091
9	0.0801	0.1860	0.2355	0.2349	0.1852	0.0782

**ภาคผนวก ค**

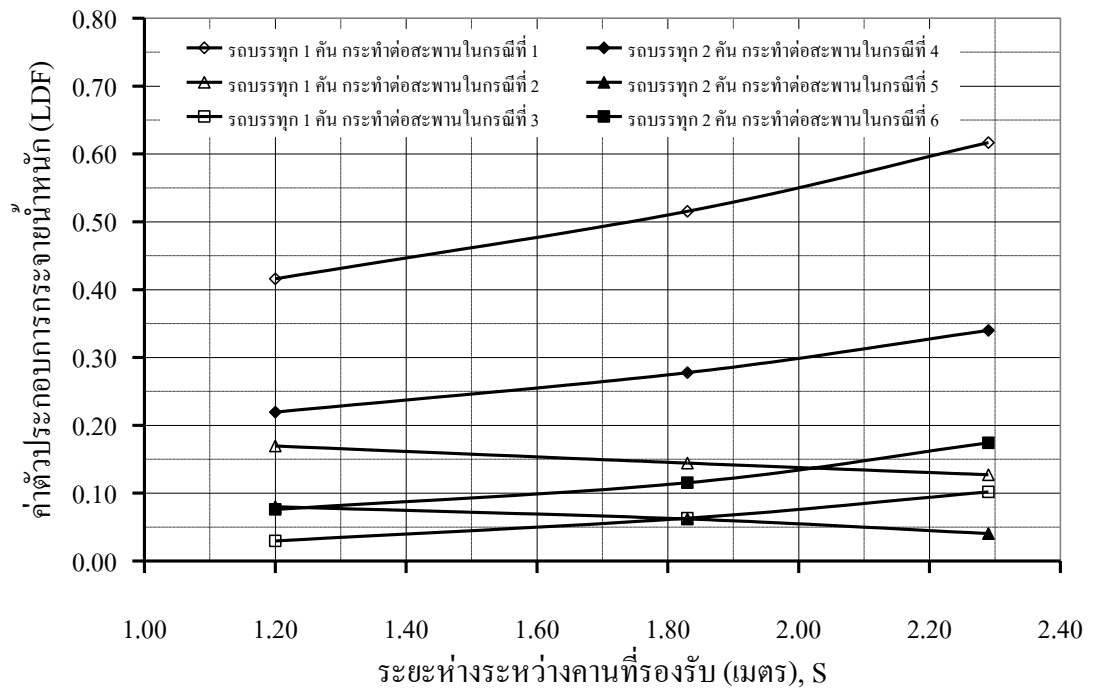
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor)  
กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing)



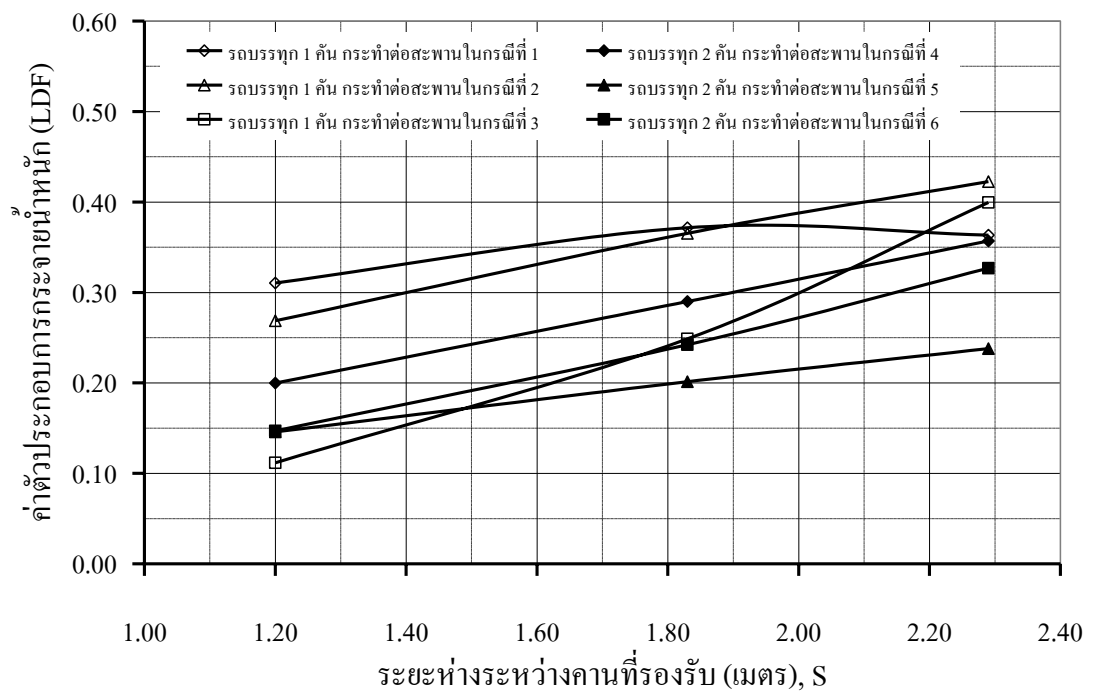
รูปที่ ค-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร



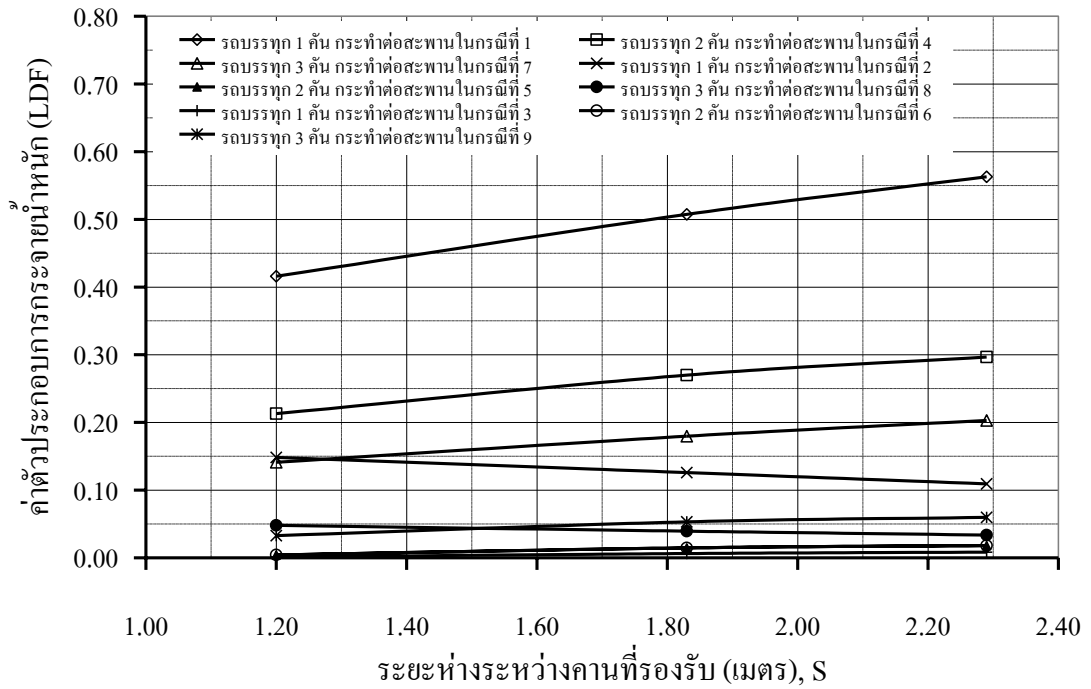
รูปที่ ค-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, FC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร



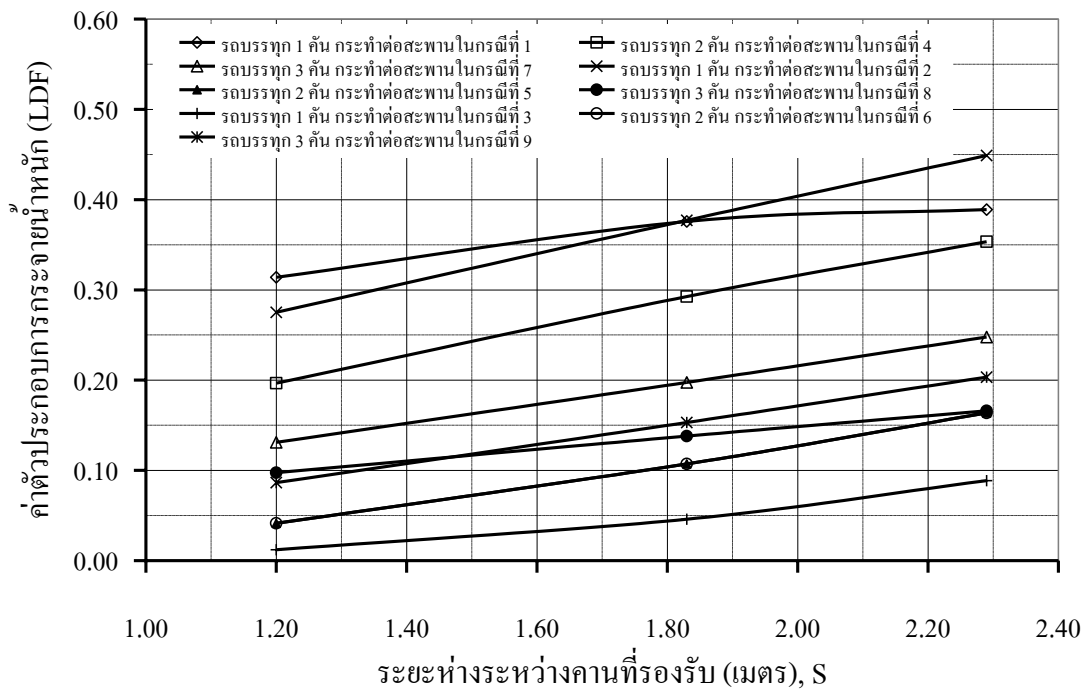
รูปที่ ค-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร



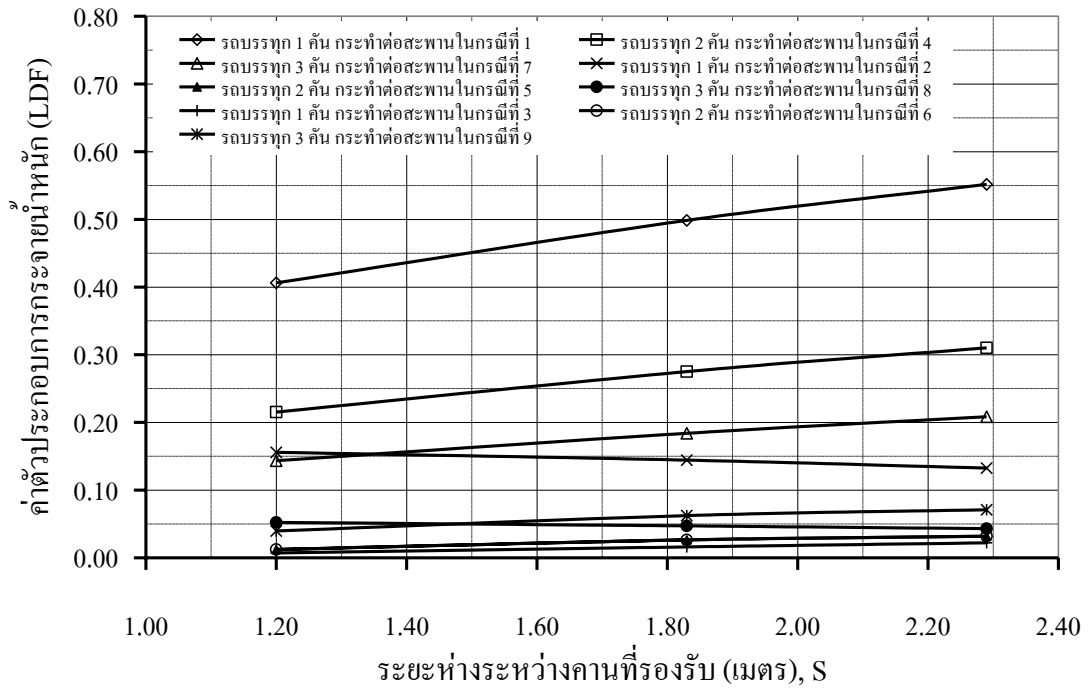
รูปที่ ค-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, FC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร



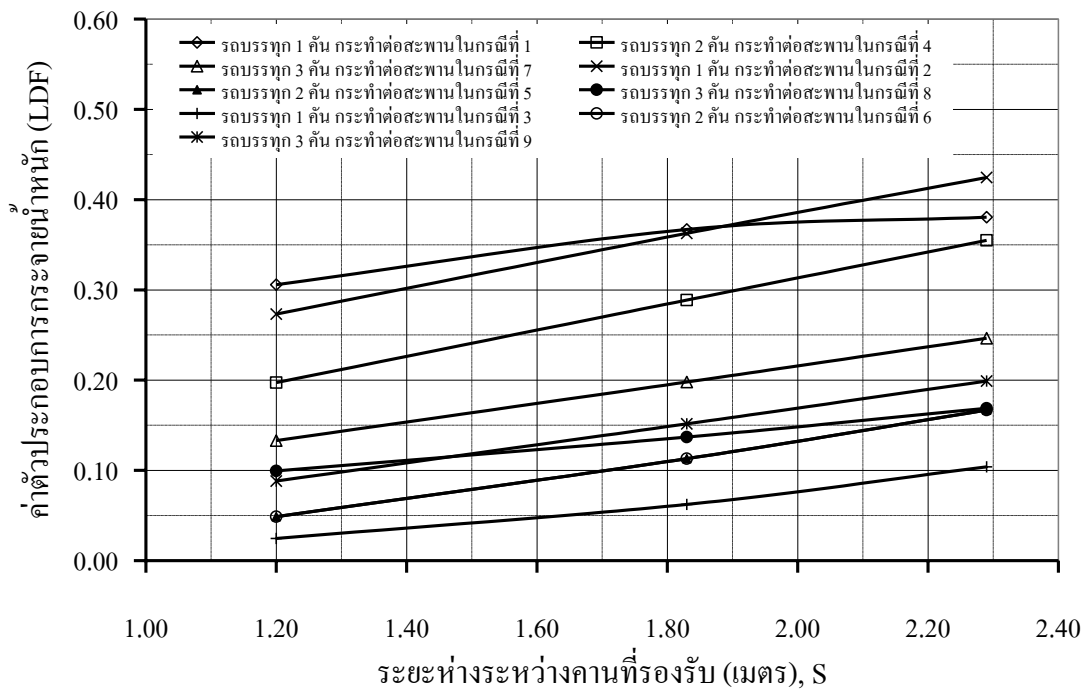
รูปที่ ค-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



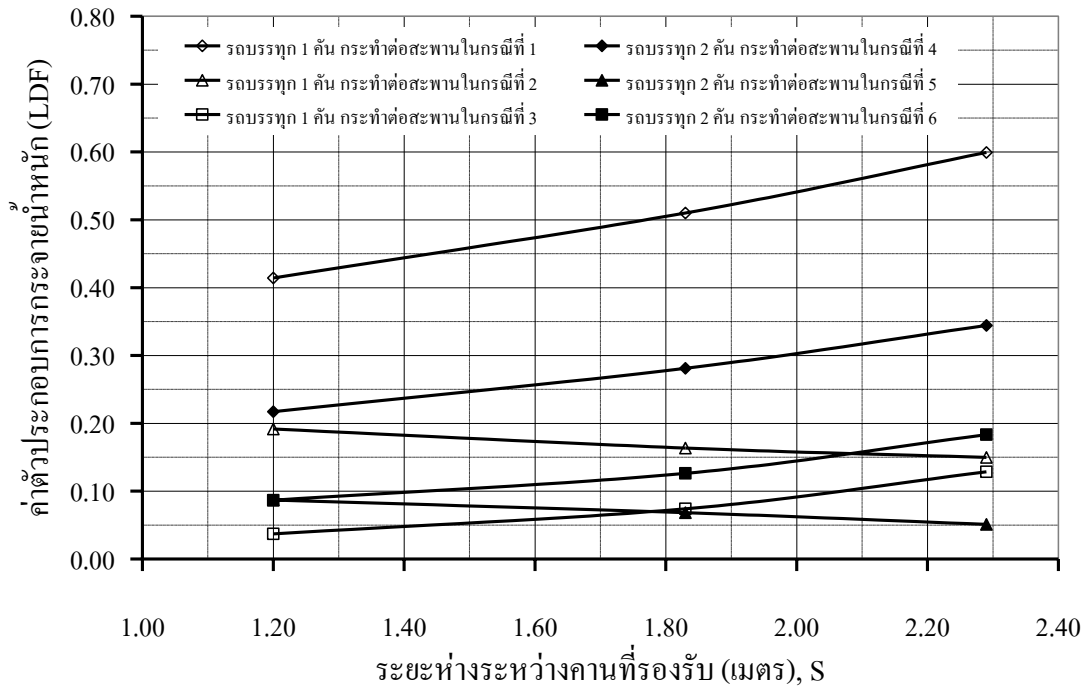
รูปที่ ค-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, FC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



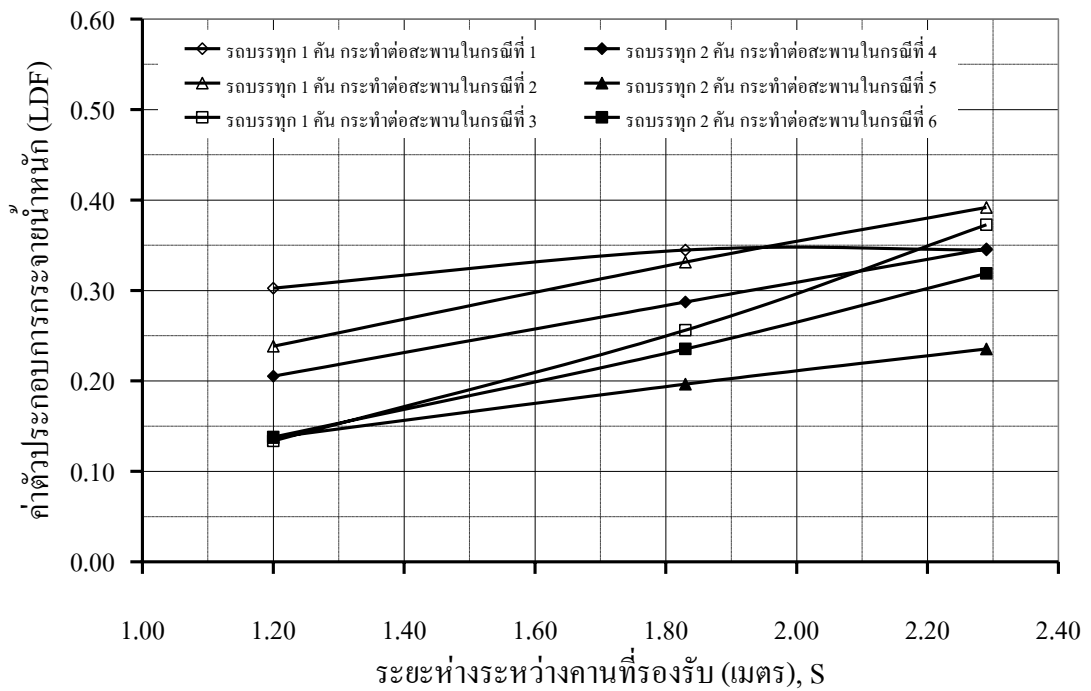
รูปที่ ค-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



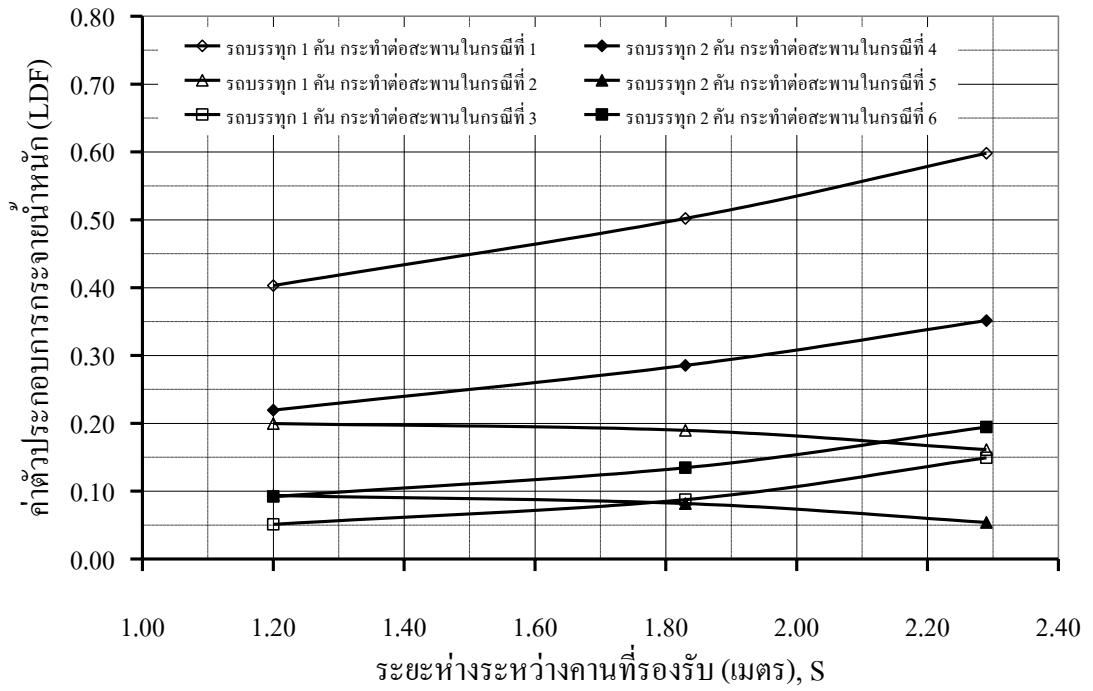
รูปที่ ค-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, FC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



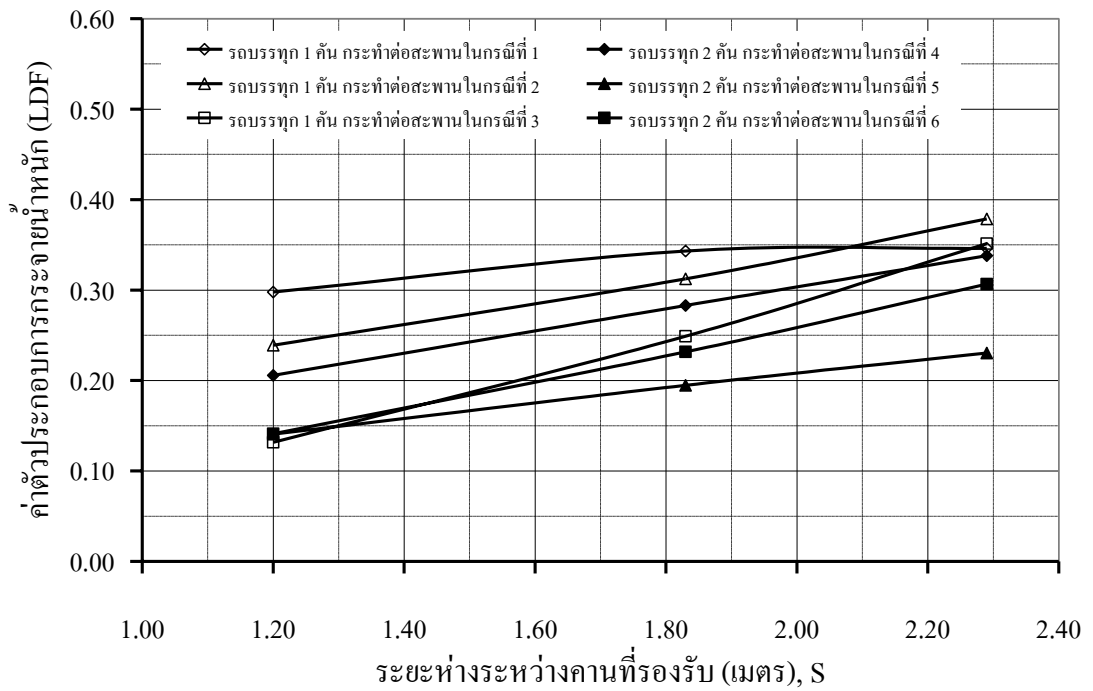
รูปที่ ๙-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, FC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร



รูปที่ ๙-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร

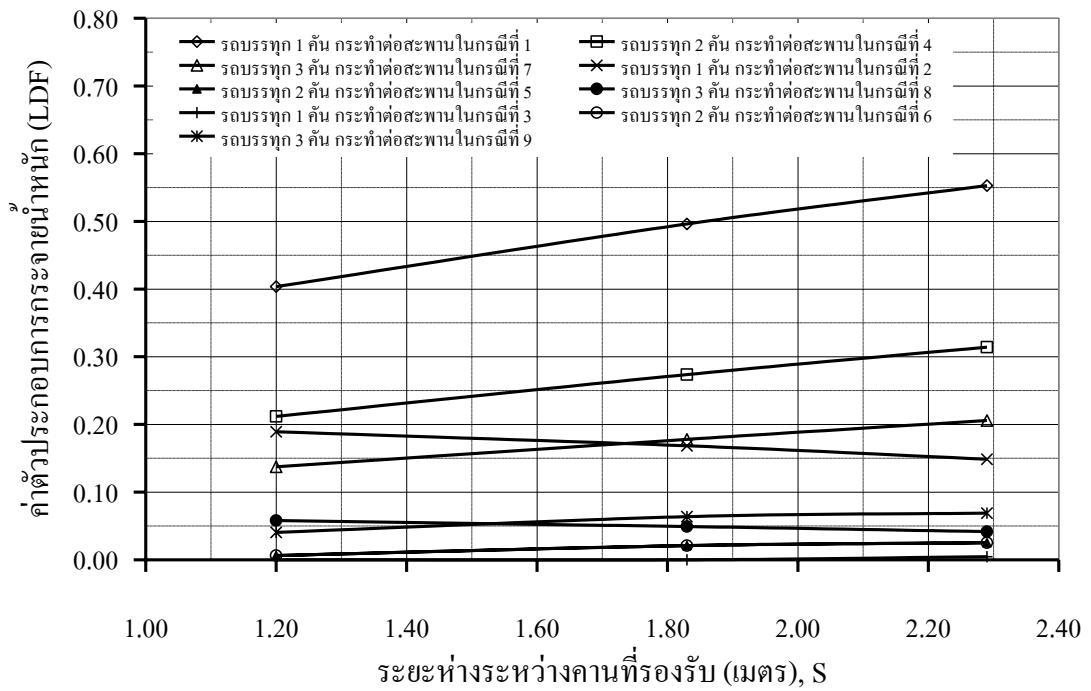


รูปที่ ค-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, FC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร

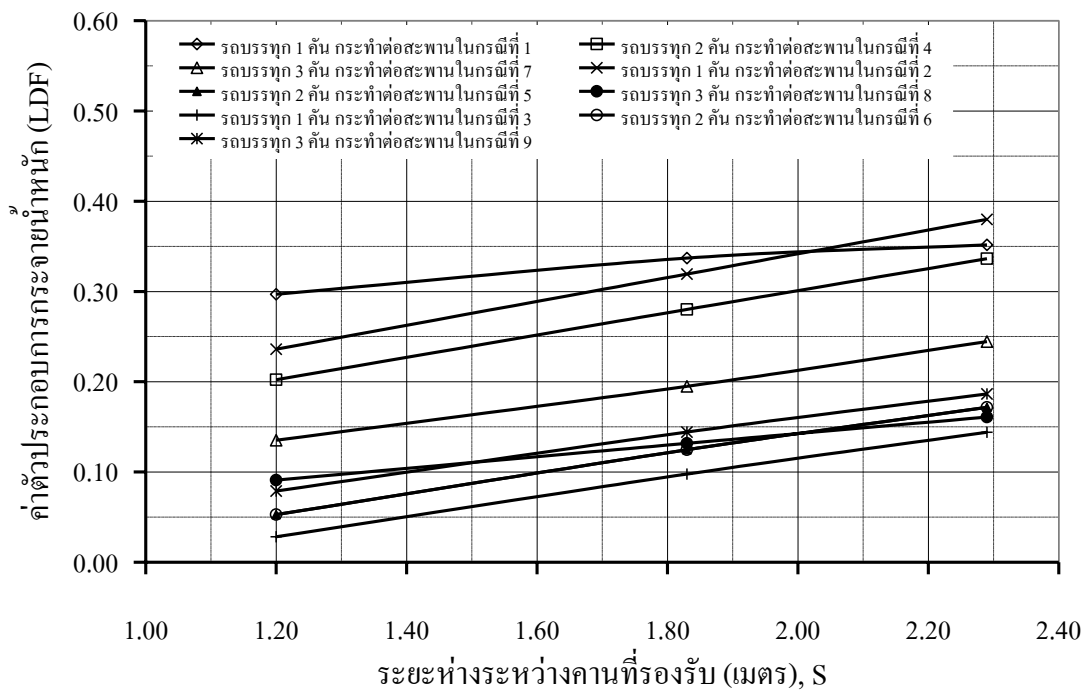


รูปที่ ค-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร

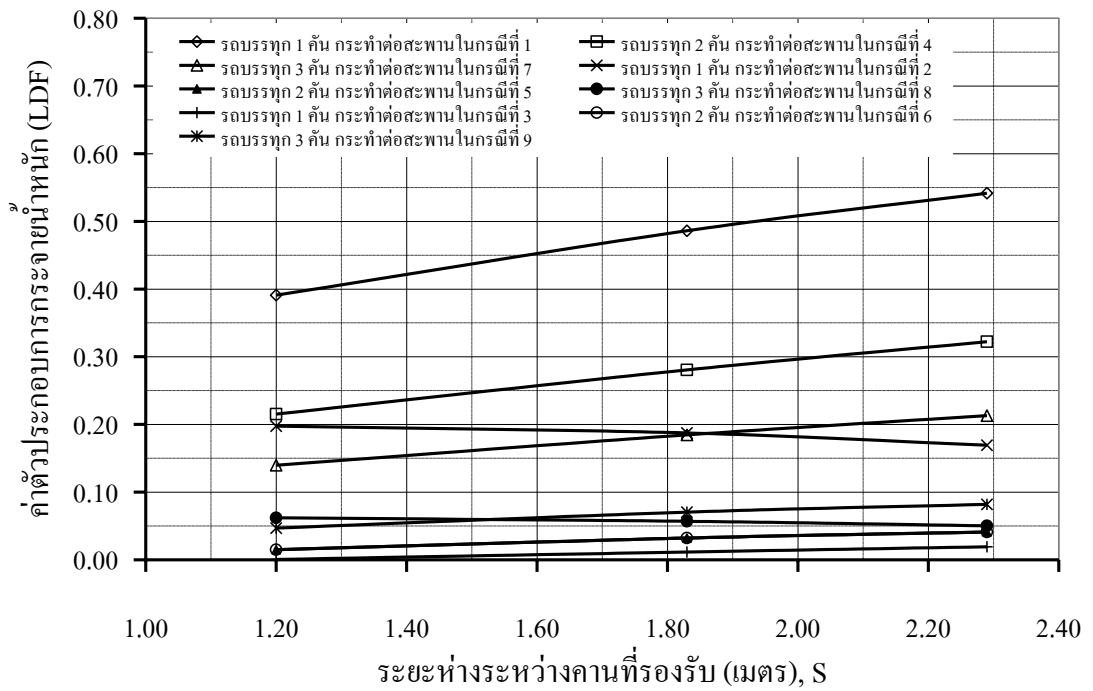




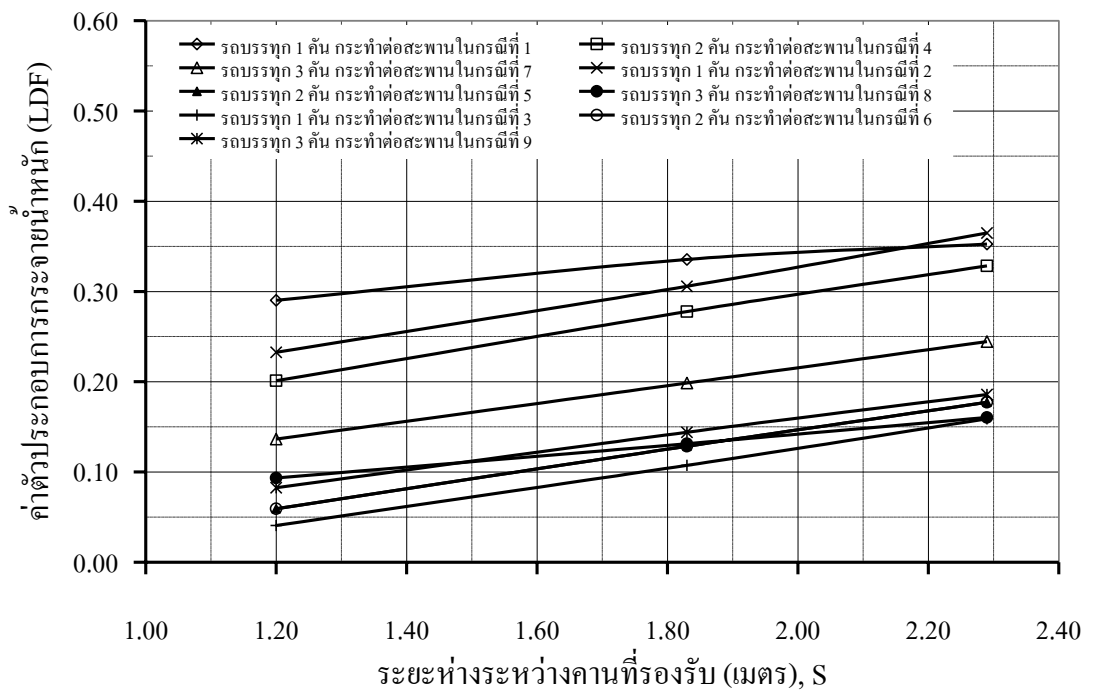
รูปที่ ค-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, FC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



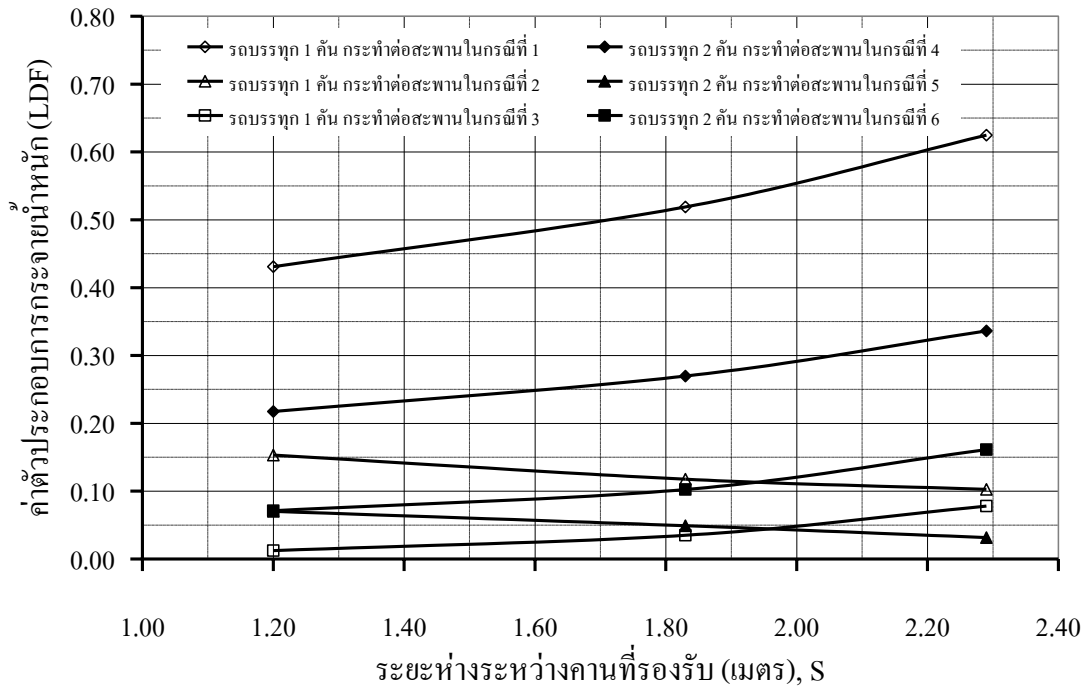
รูปที่ ค-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



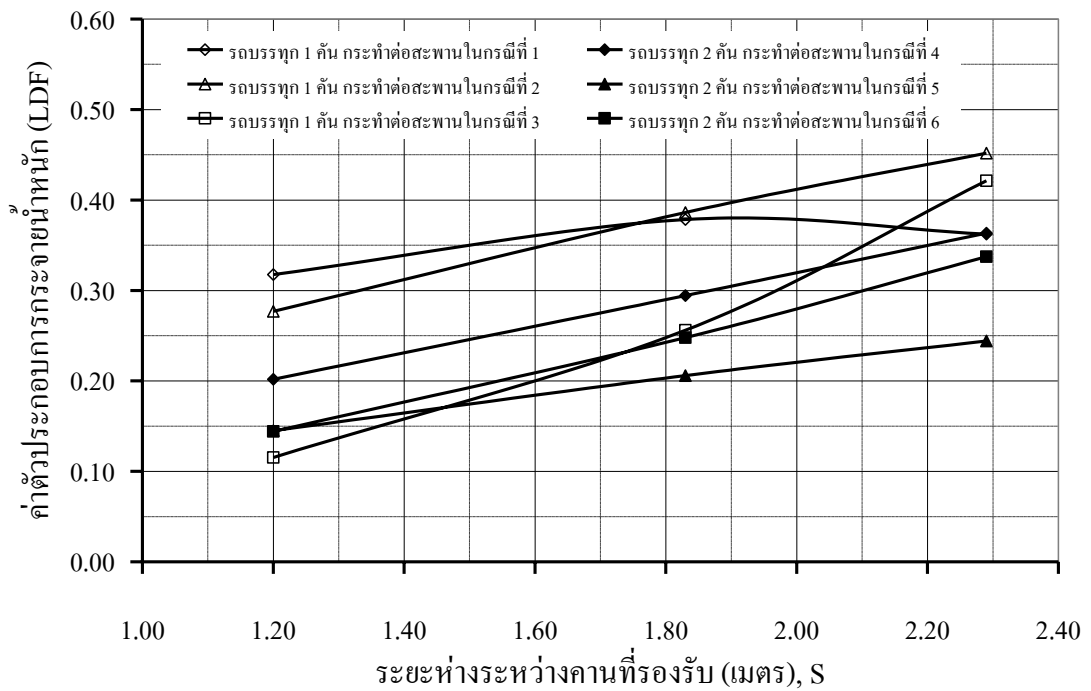
รูปที่ ค-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, FC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



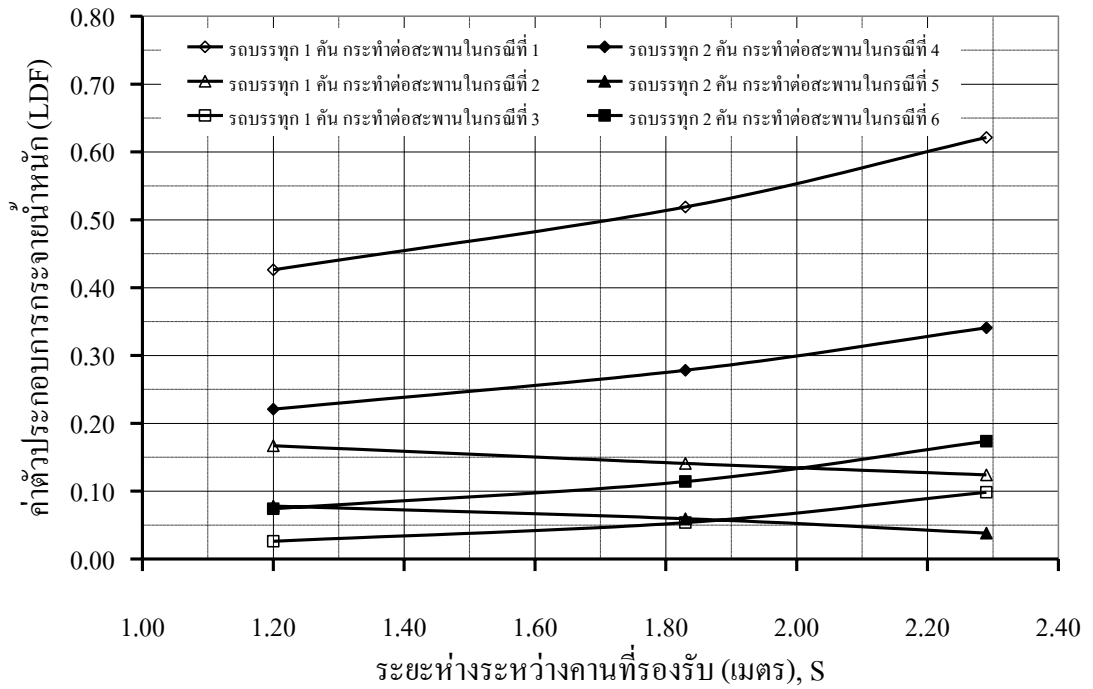
รูปที่ ค-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



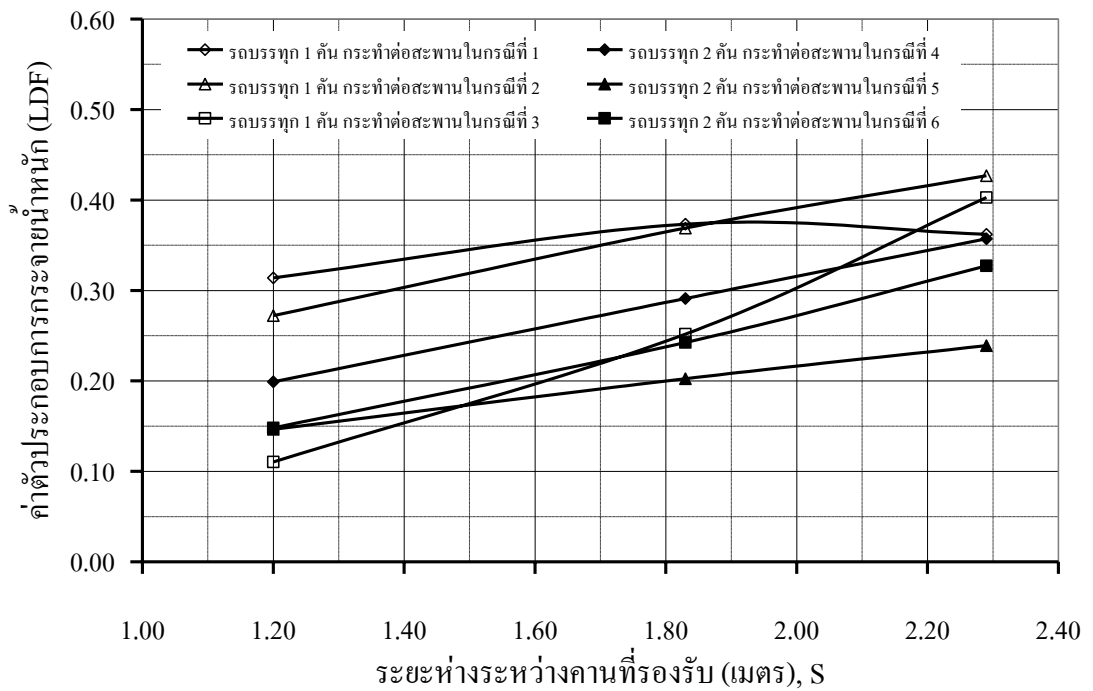
รูปที่ ค-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร



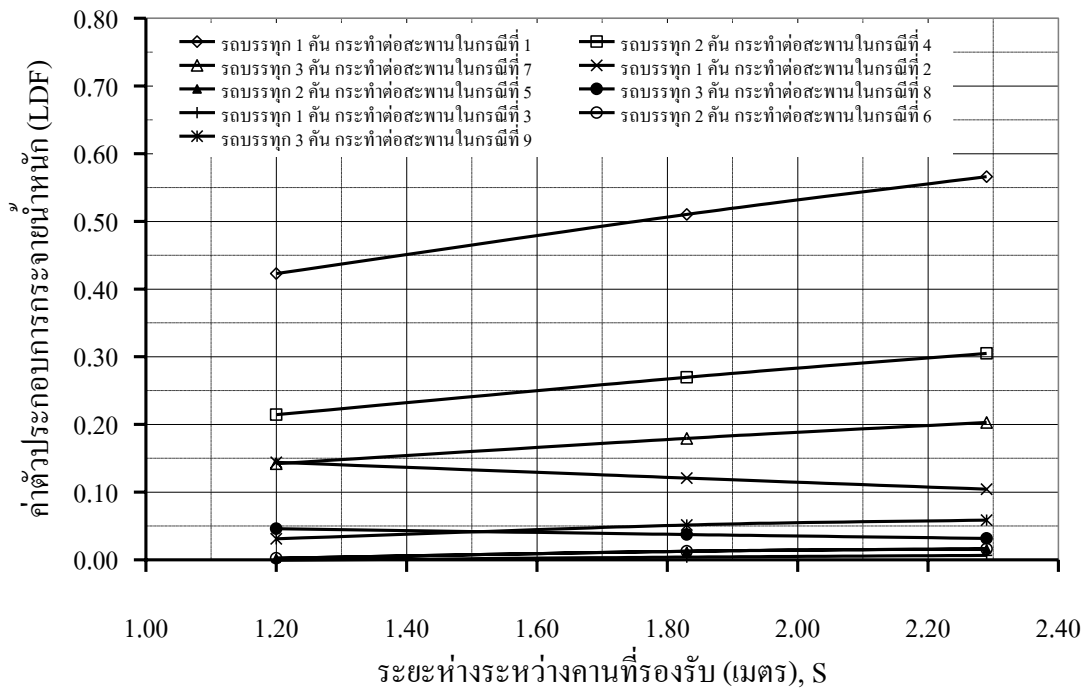
รูปที่ ค-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, PC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร



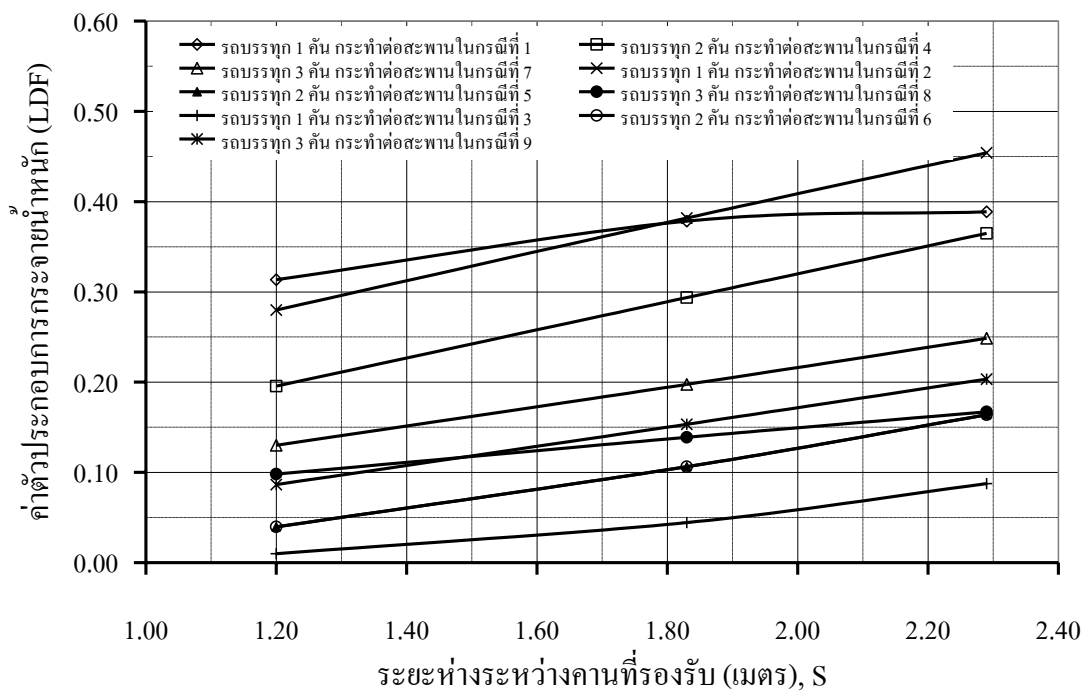
รูปที่ ค-19 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร



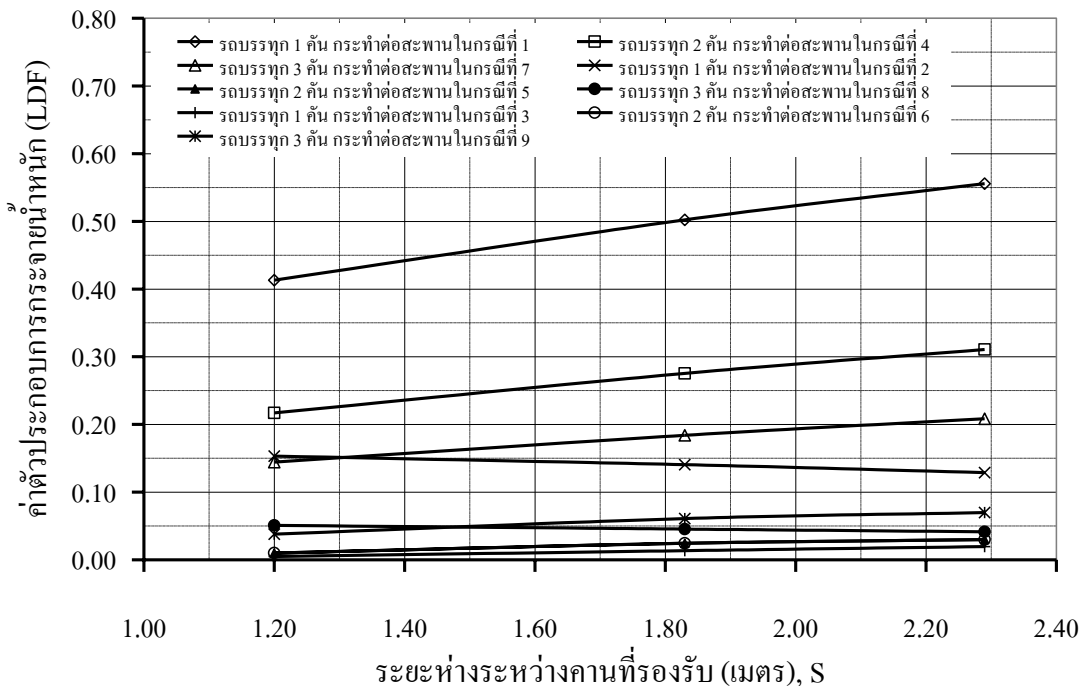
รูปที่ ค-20 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, PC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร



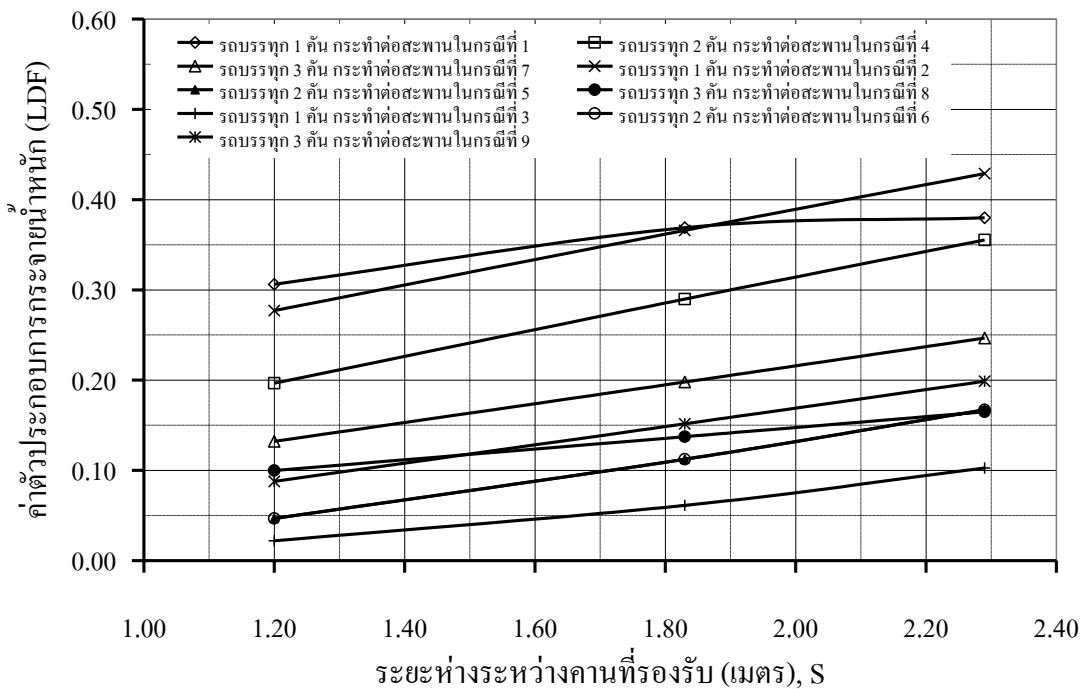
รูปที่ ค-21 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



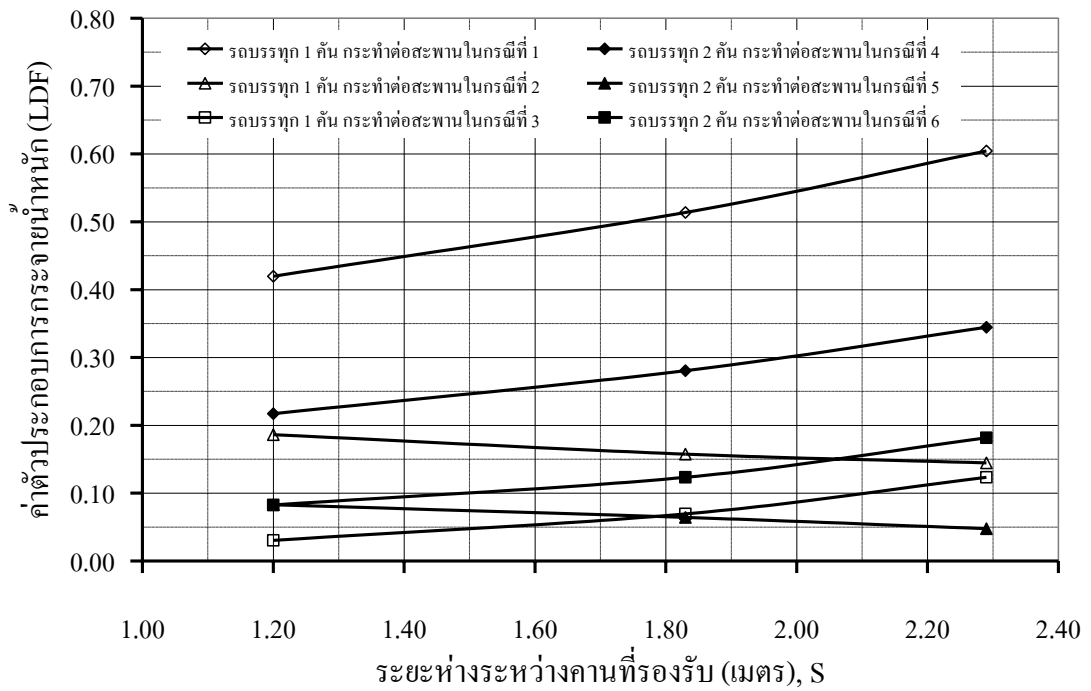
รูปที่ ค-22 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, PC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



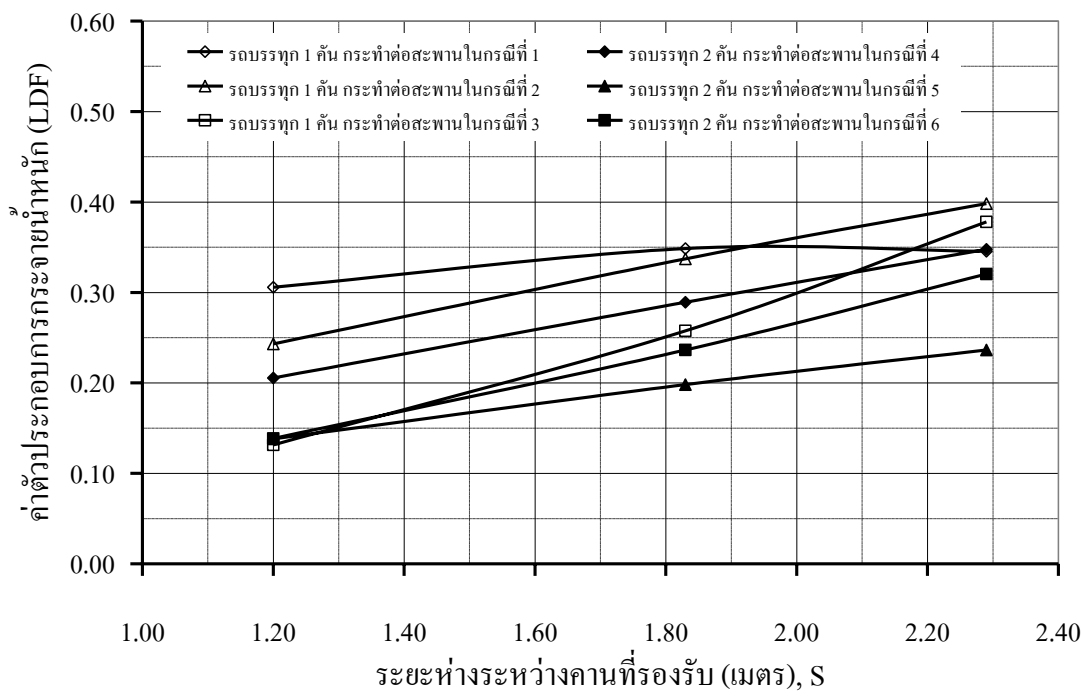
รูปที่ ค-23 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



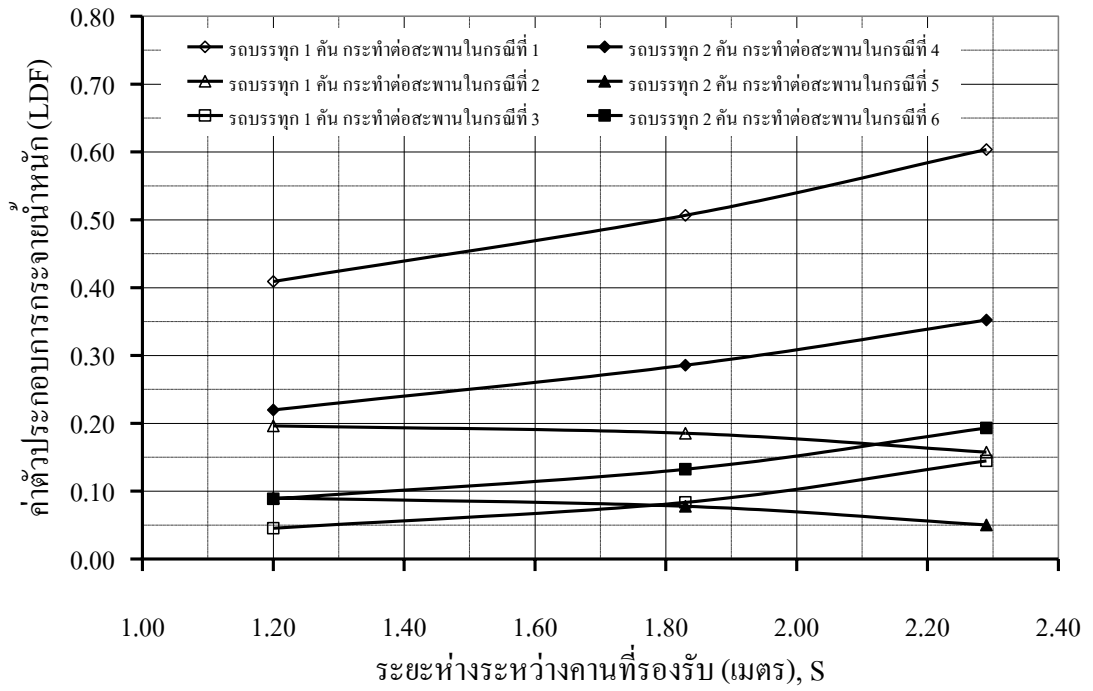
รูปที่ ค-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, PC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



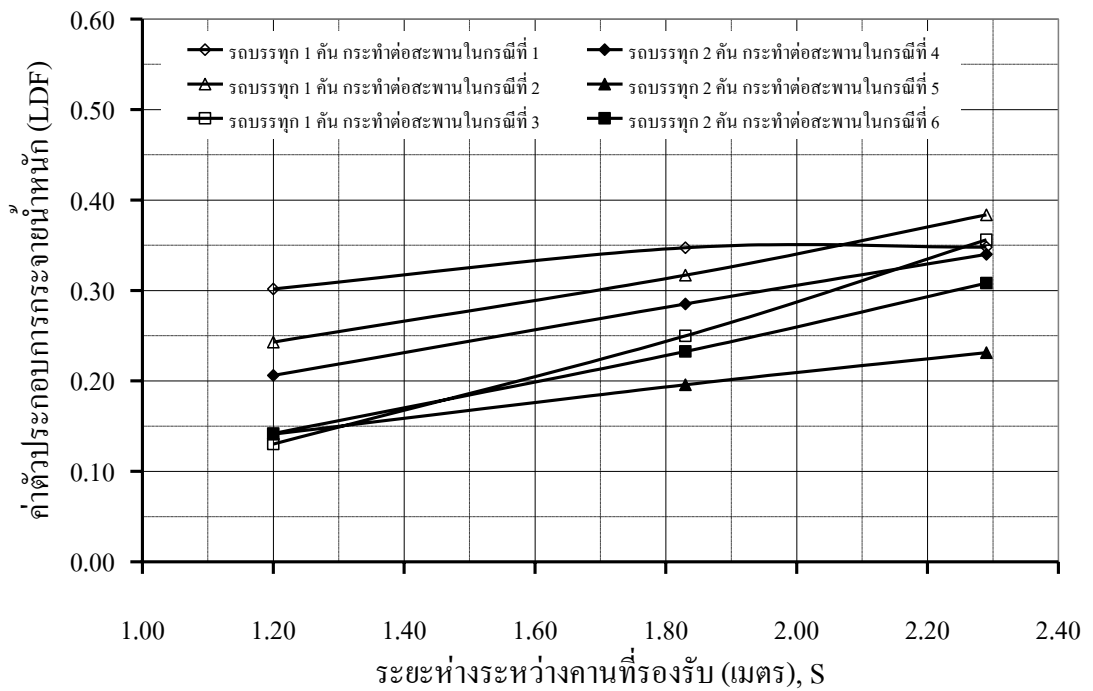
รูปที่ ค-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, PC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร



รูปที่ ค-26 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC) W = 9.30 เมตร, L = 12.00 เมตร

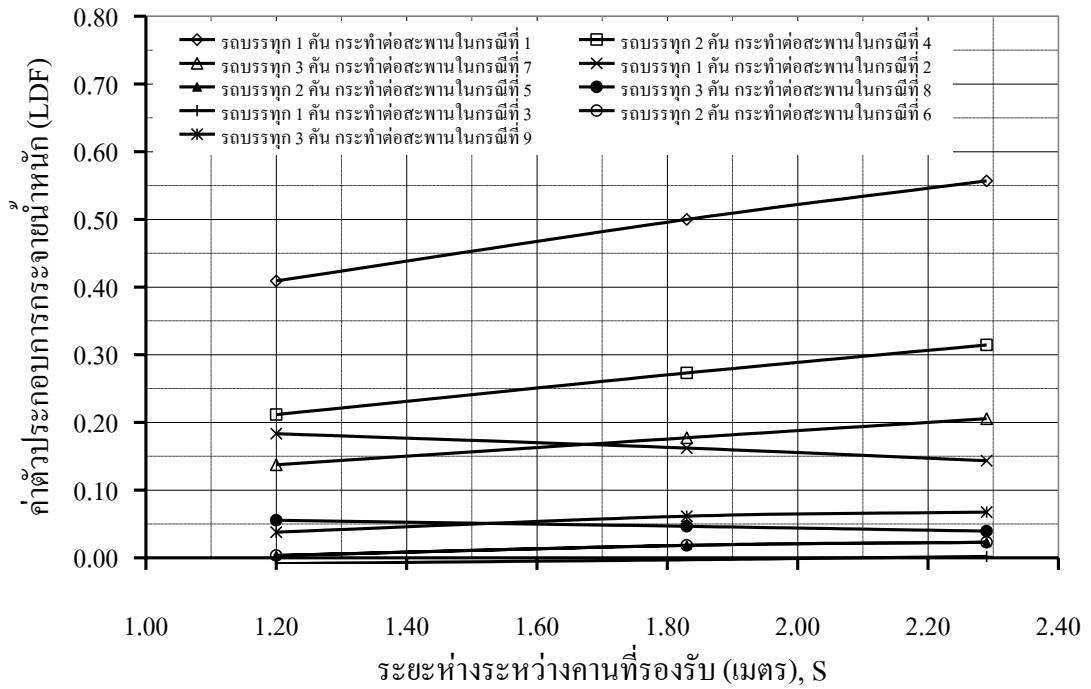


รูปที่ ค-27 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, PC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร

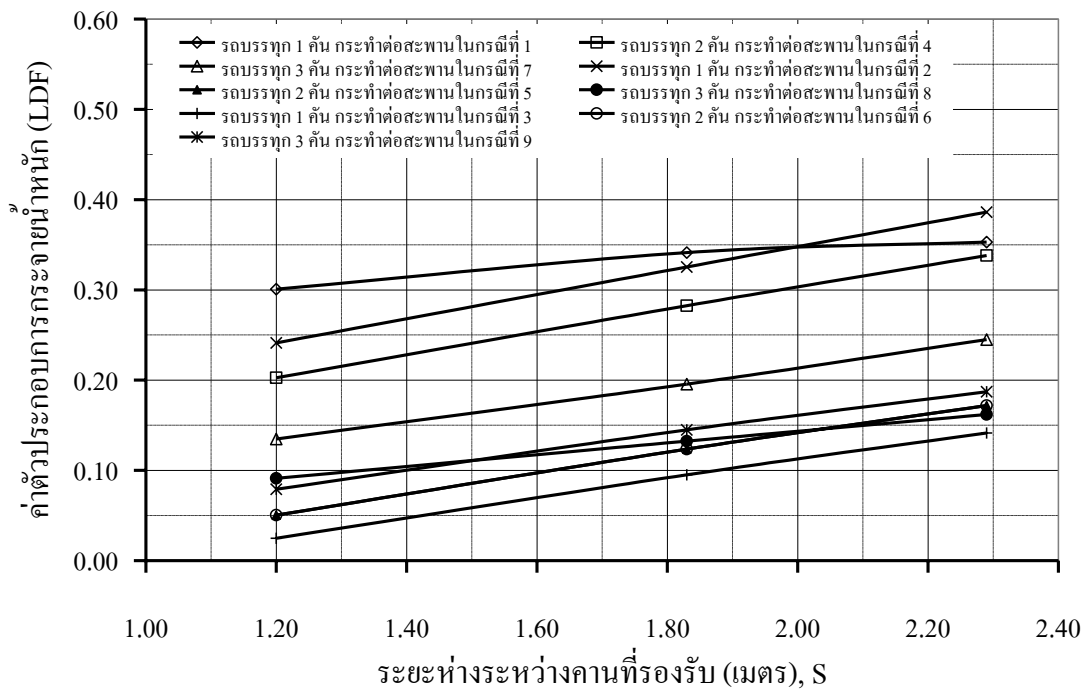


รูปที่ ค-28 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC) W = 9.30 เมตร, L = 18.00 เมตร

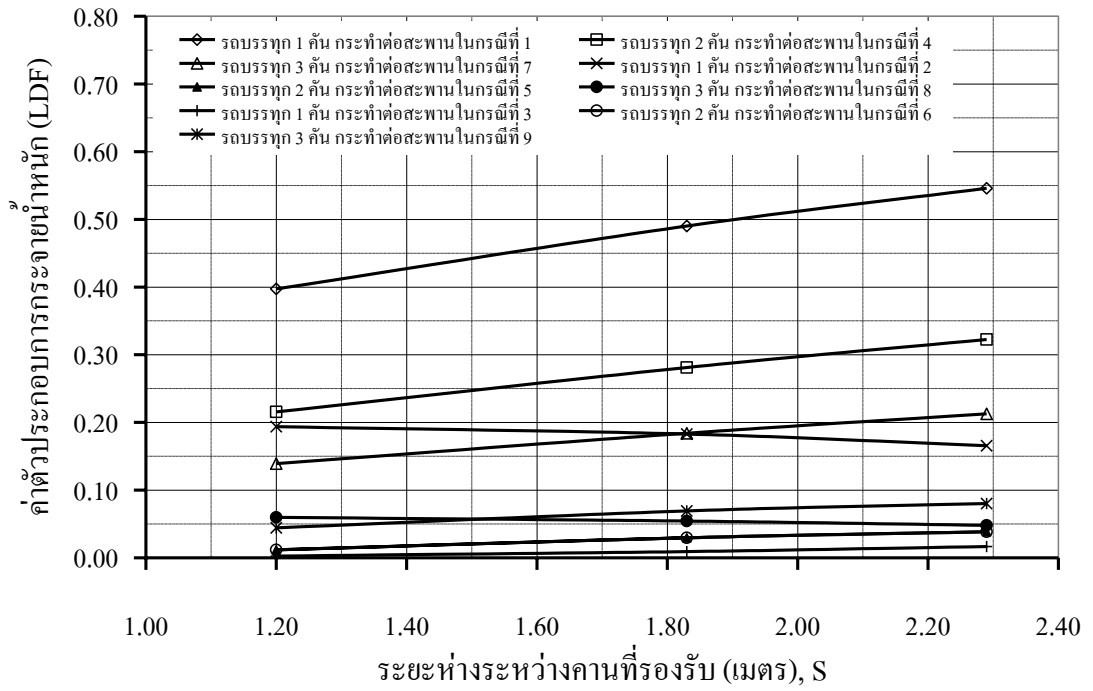




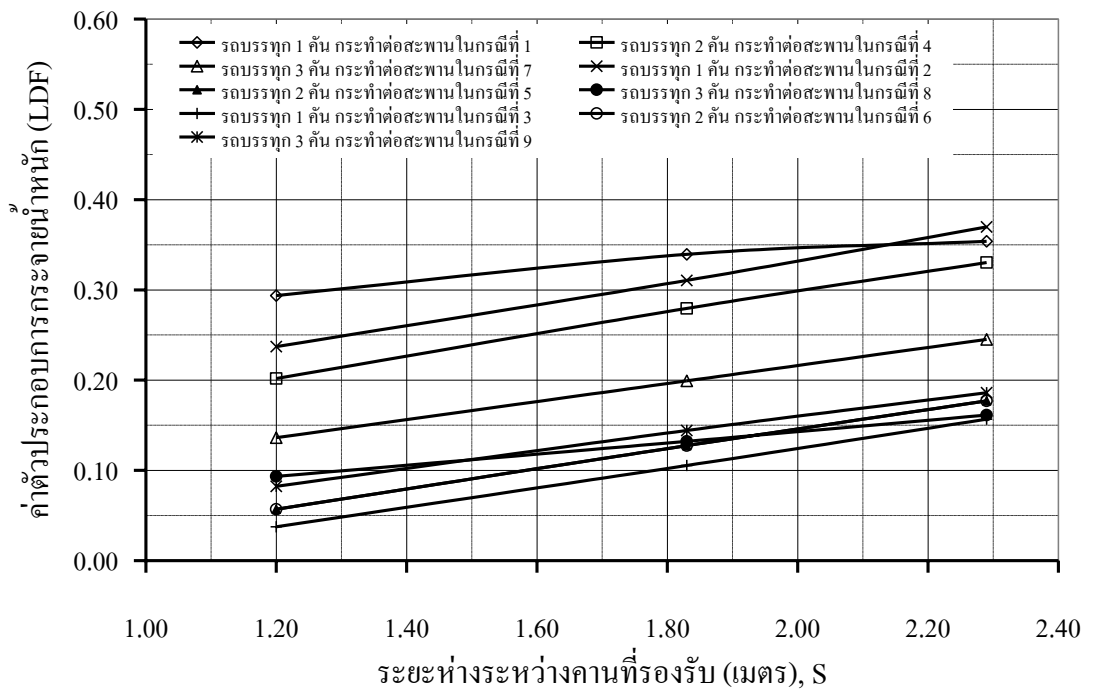
รูปที่ ค-29 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, PC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



รูปที่ ค-30 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC) W = 13.00 เมตร, L = 12.00 เมตร



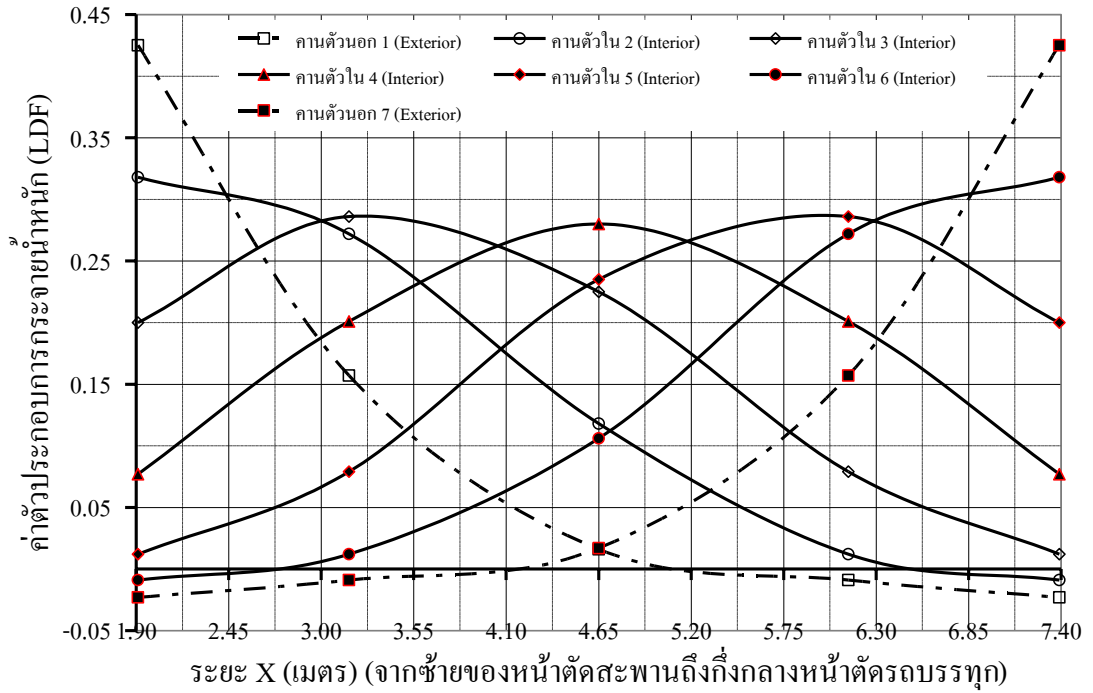
รูปที่ ค-31 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, PC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร



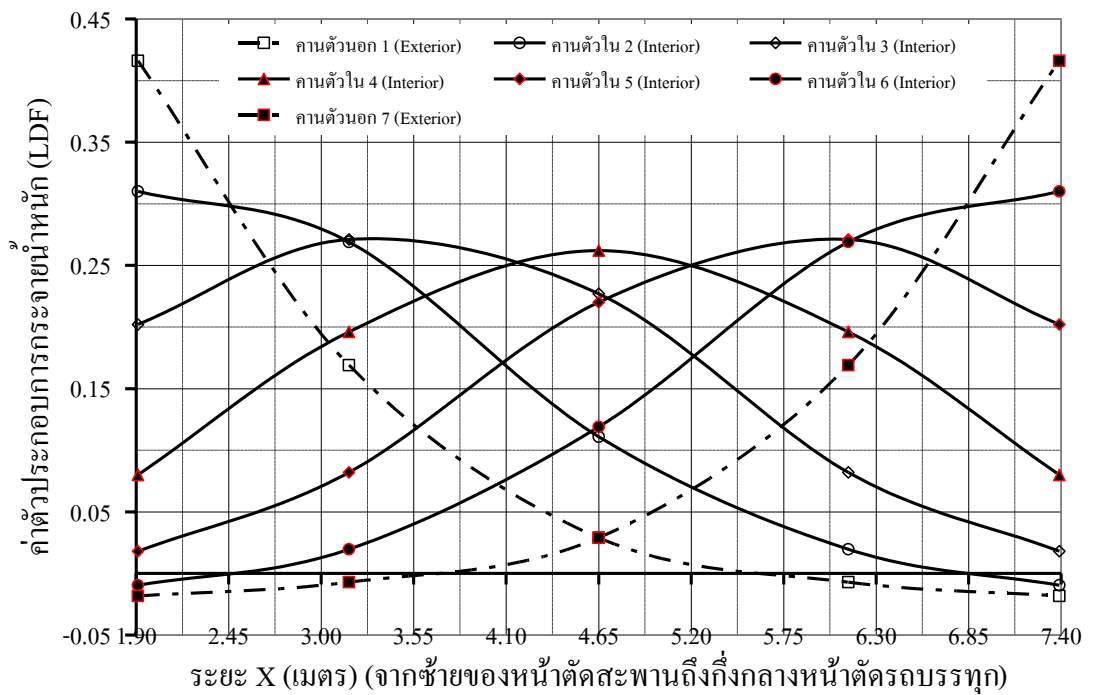
รูปที่ ค-32 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC) W = 13.00 เมตร, L = 18.00 เมตร

**ภาคผนวก ง**

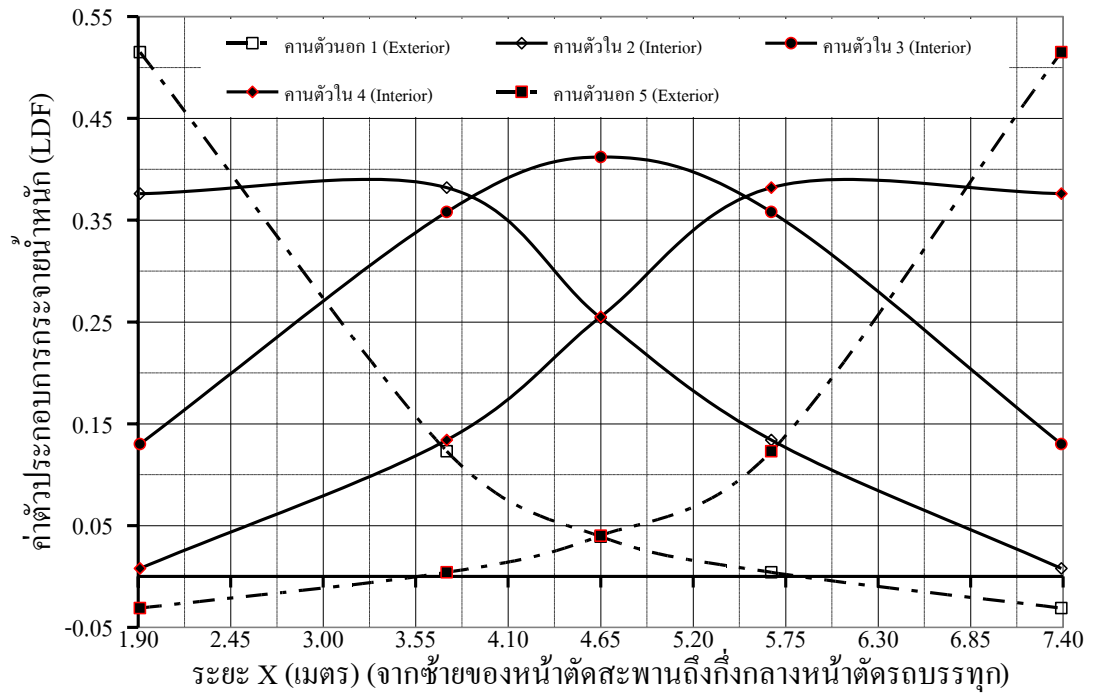
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบการกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor)  
กับระยะทางที่ตำแหน่งต่างๆของหน้าตัดสะพาน  
(เฉพาะกรณีรับแรงกระทำจากรถบรรทุกในกรณีที่ 1 เท่านั้น)



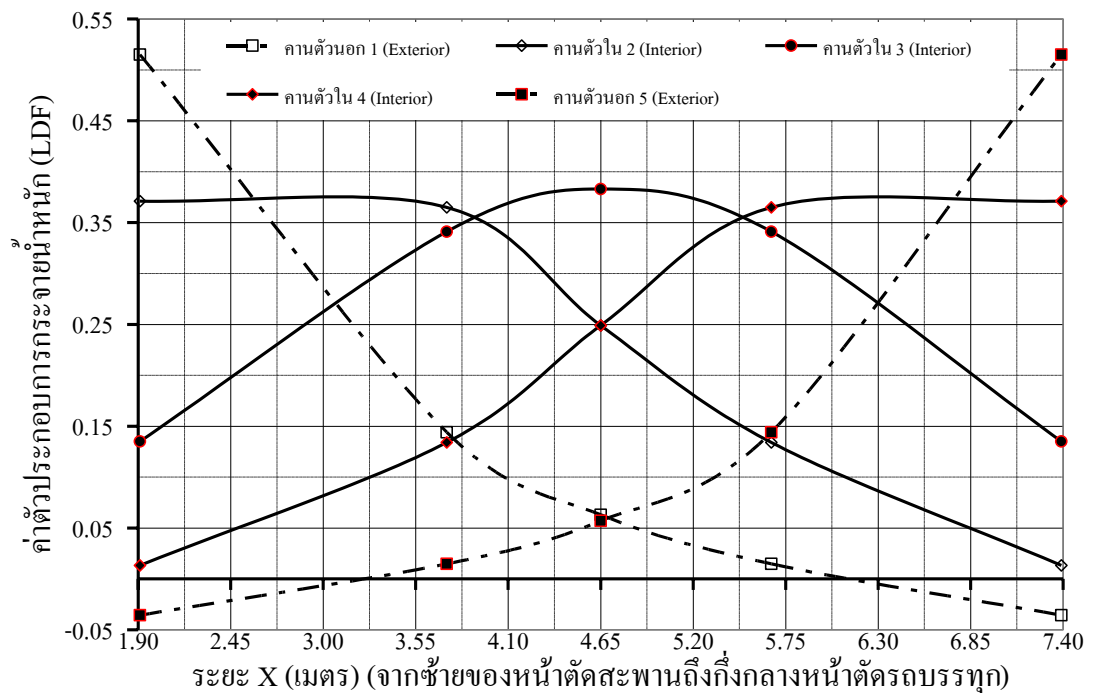
รูปที่ 1-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1, L = 12.00 เมตร)



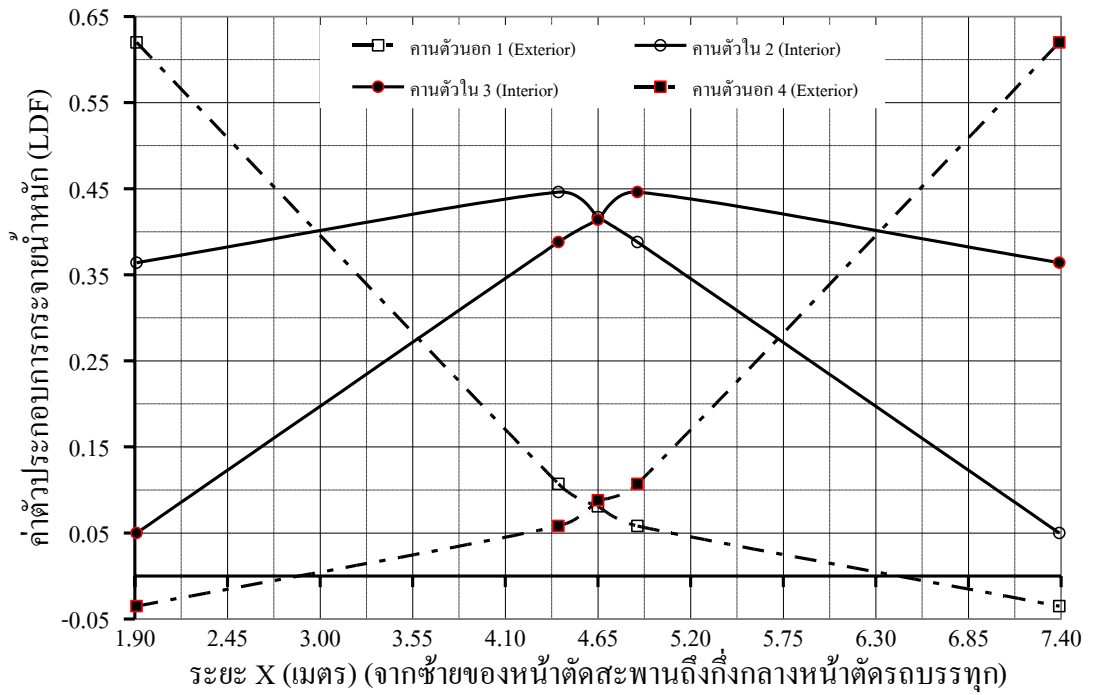
รูปที่ 1-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS1, L = 18.00 เมตร)



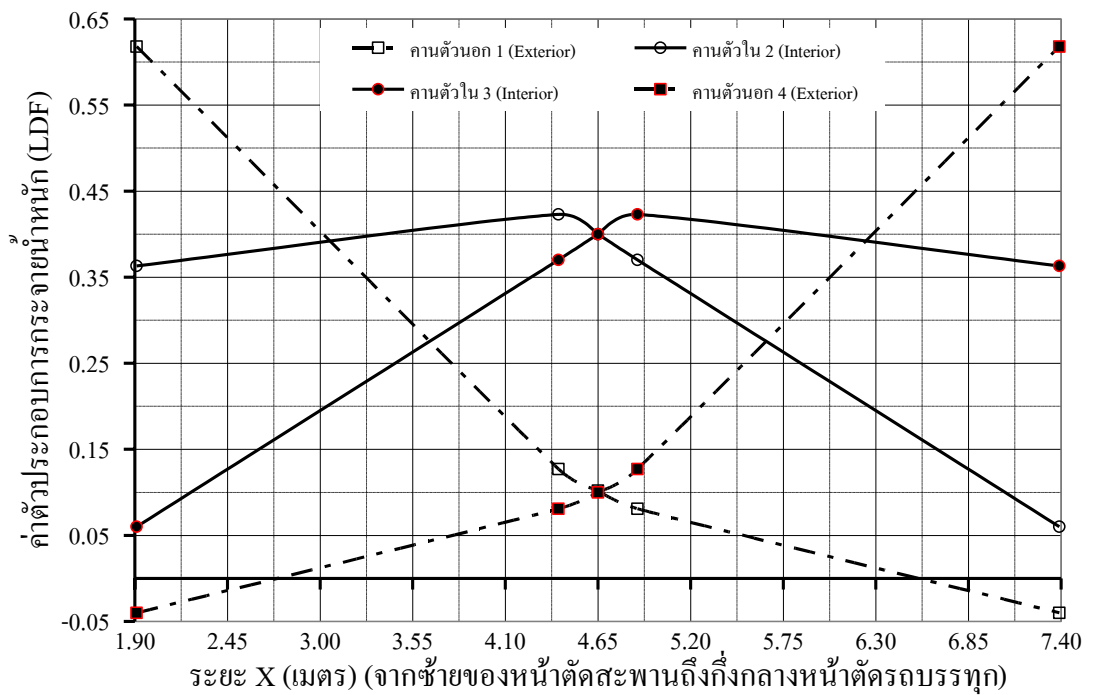
รูปที่ ง-3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS2, L = 12.00 เมตร)



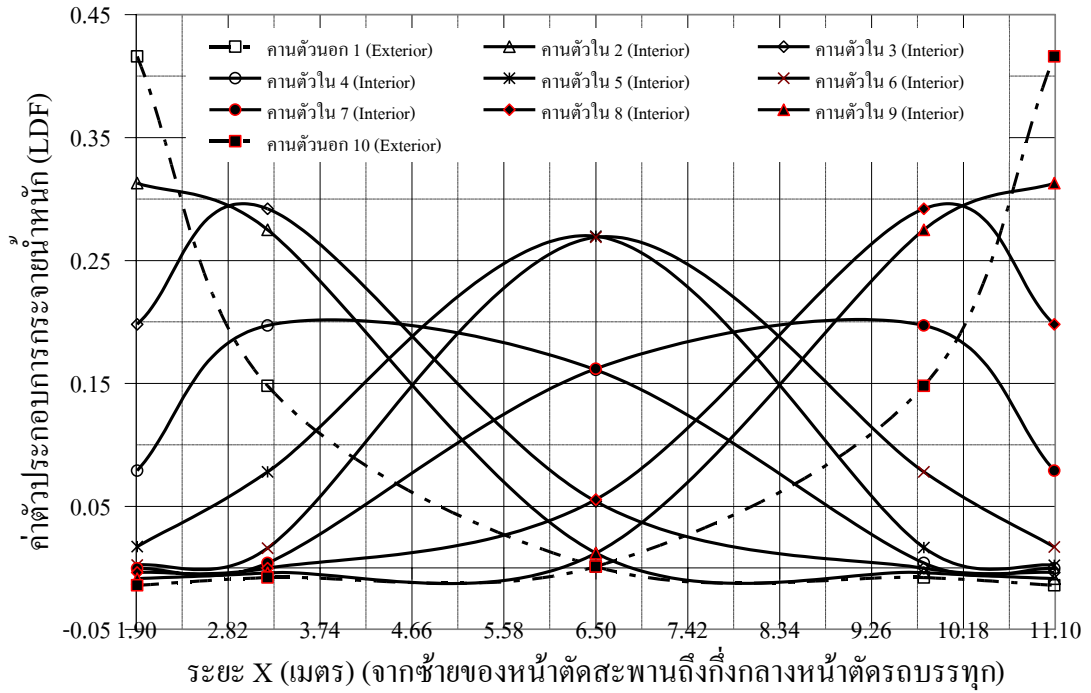
รูปที่ ง-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS2, L = 18.00 เมตร)



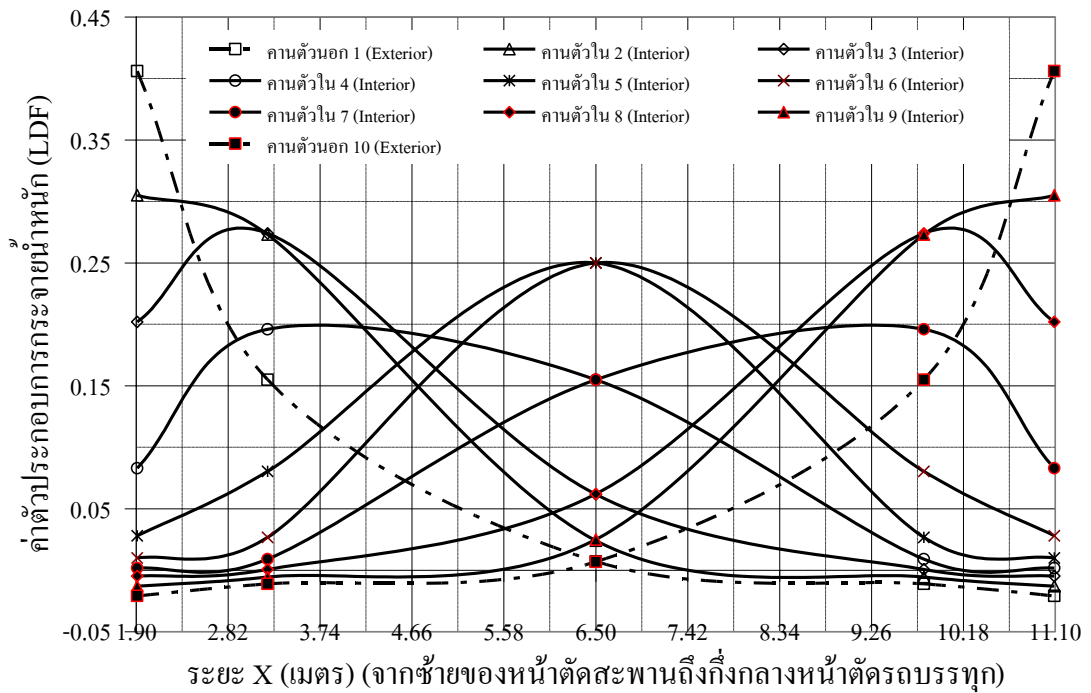
รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS3, L = 12.00 เมตร)



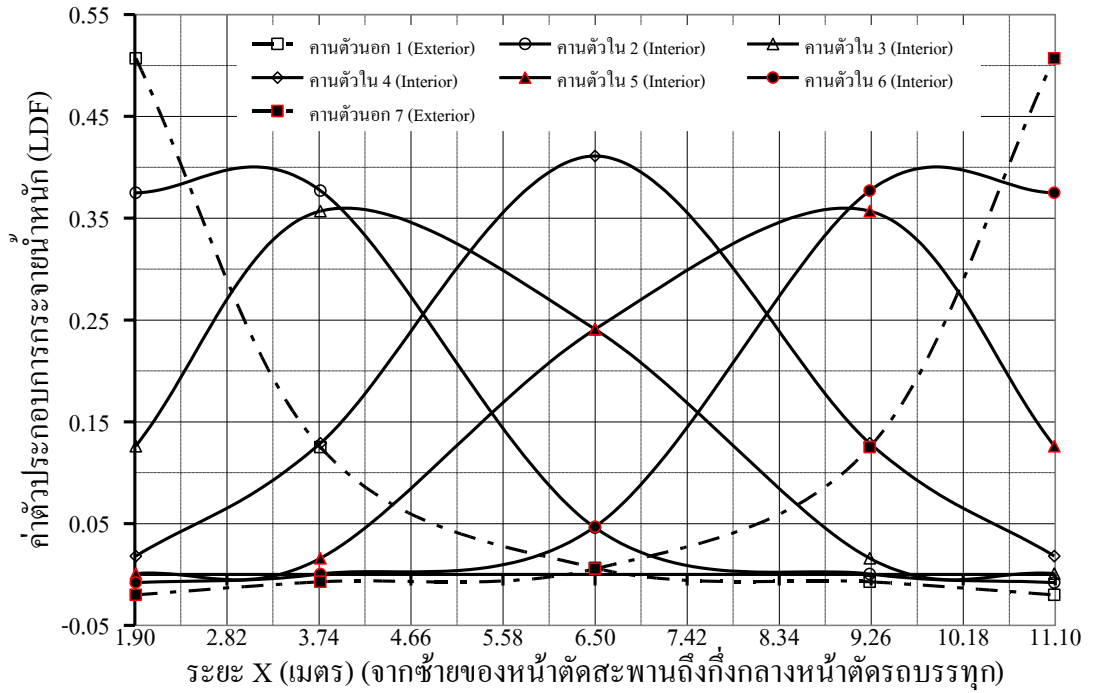
รูปที่ 5-6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS3, L = 18.00 เมตร)



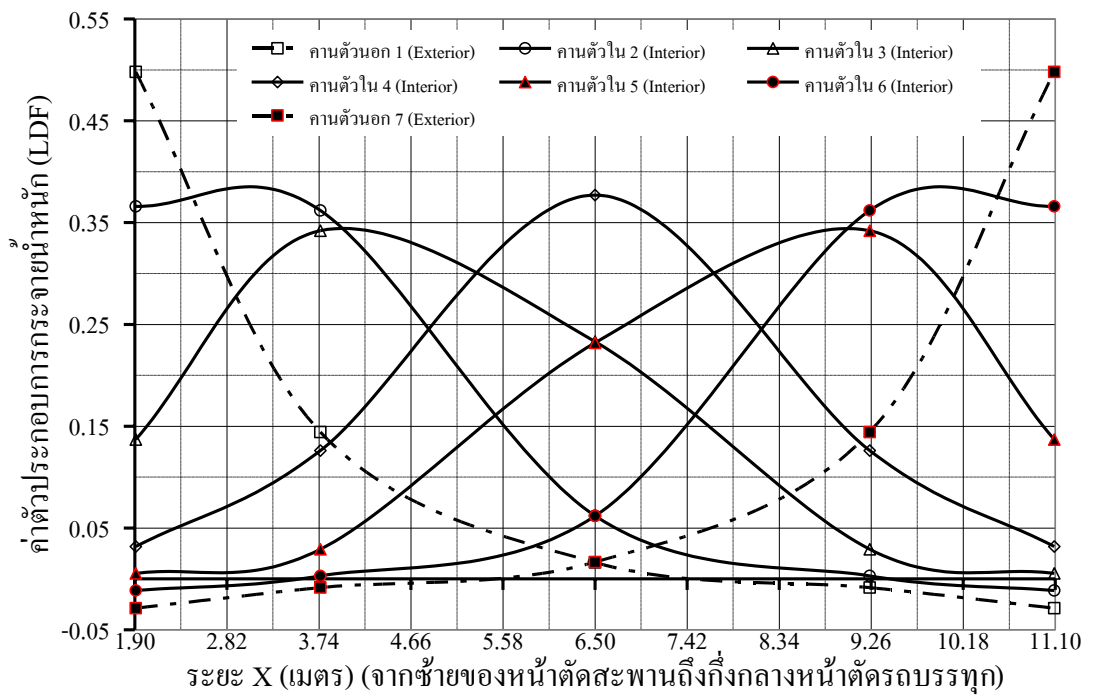
รูปที่ ง-7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS4, L = 12.00 เมตร)



รูปที่ ง-8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS4, L = 18.00 เมตร)

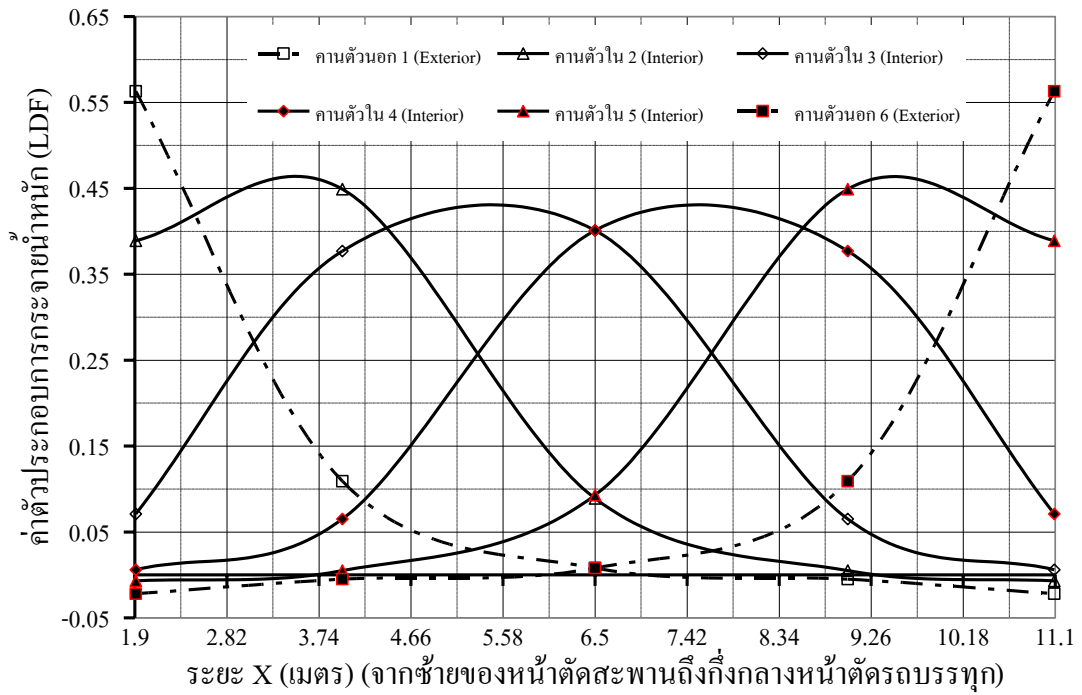


รูปที่ ง-9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS5, L = 12.00 เมตร)

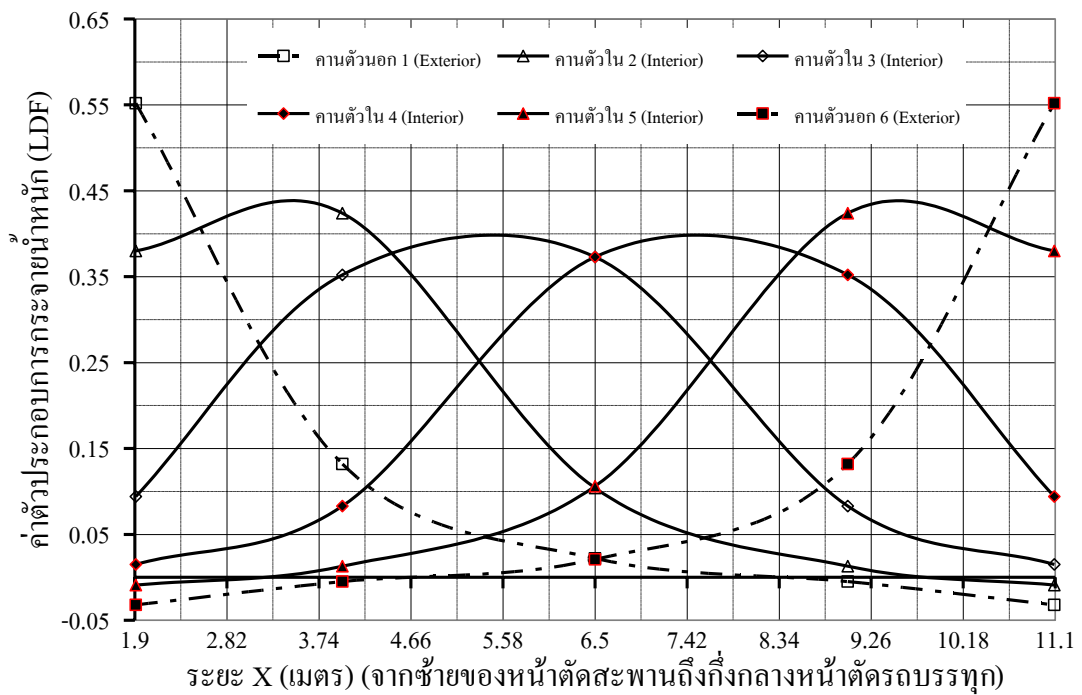


รูปที่ ง-10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS5, L = 18.00 เมตร)

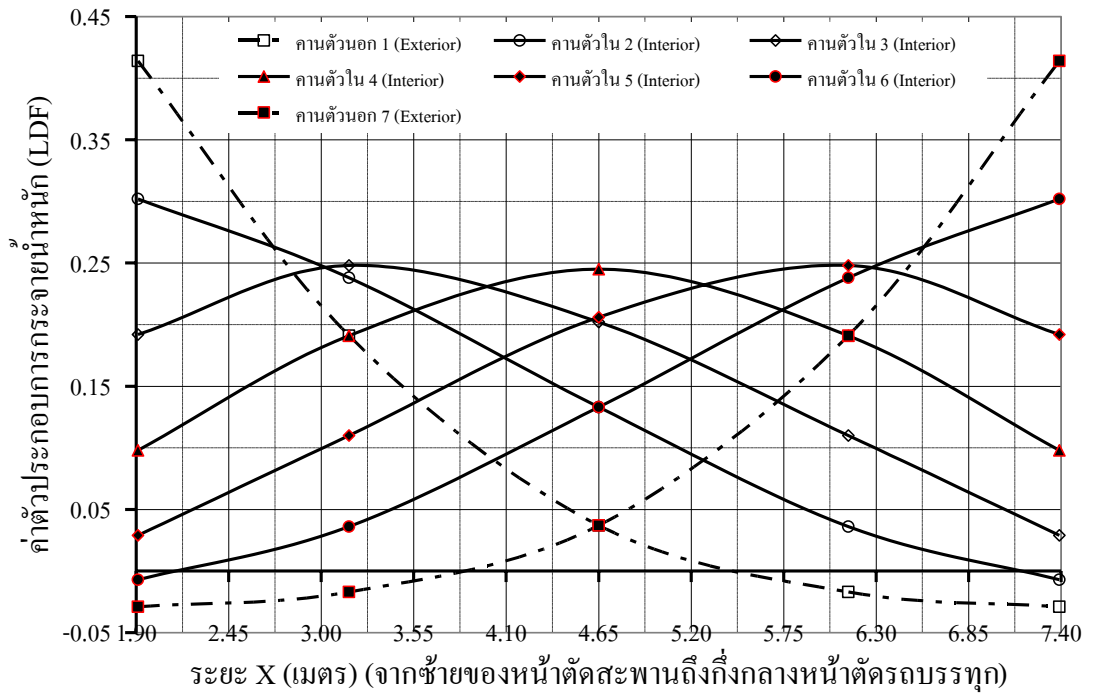




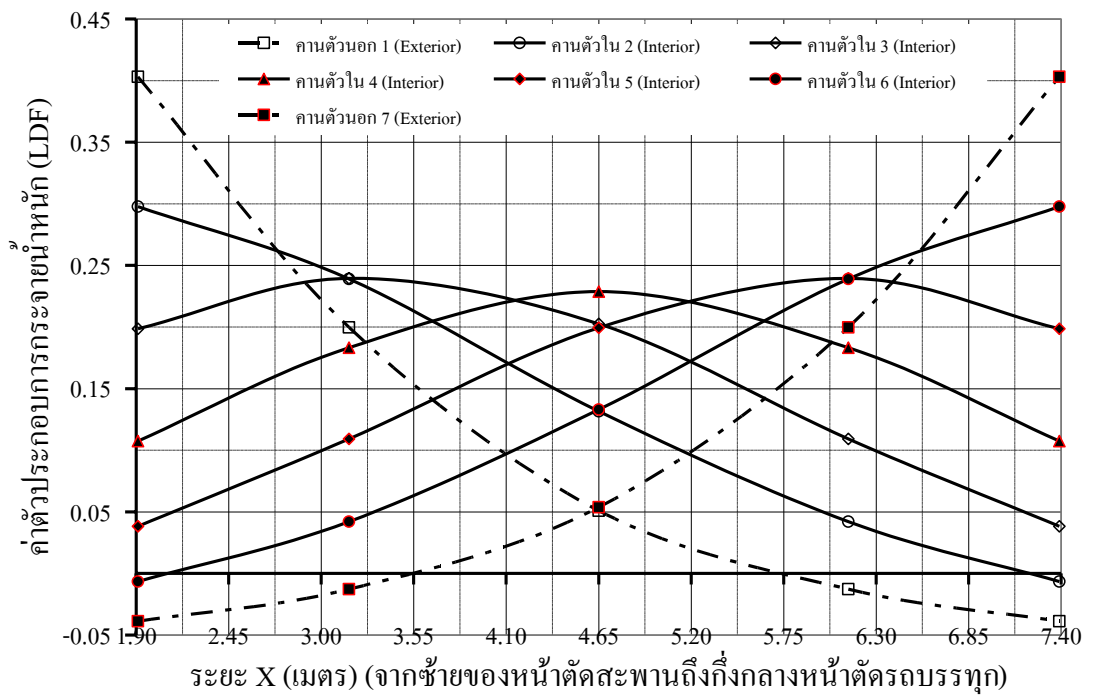
รูปที่ ง-11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS6, L = 12.00 เมตร)



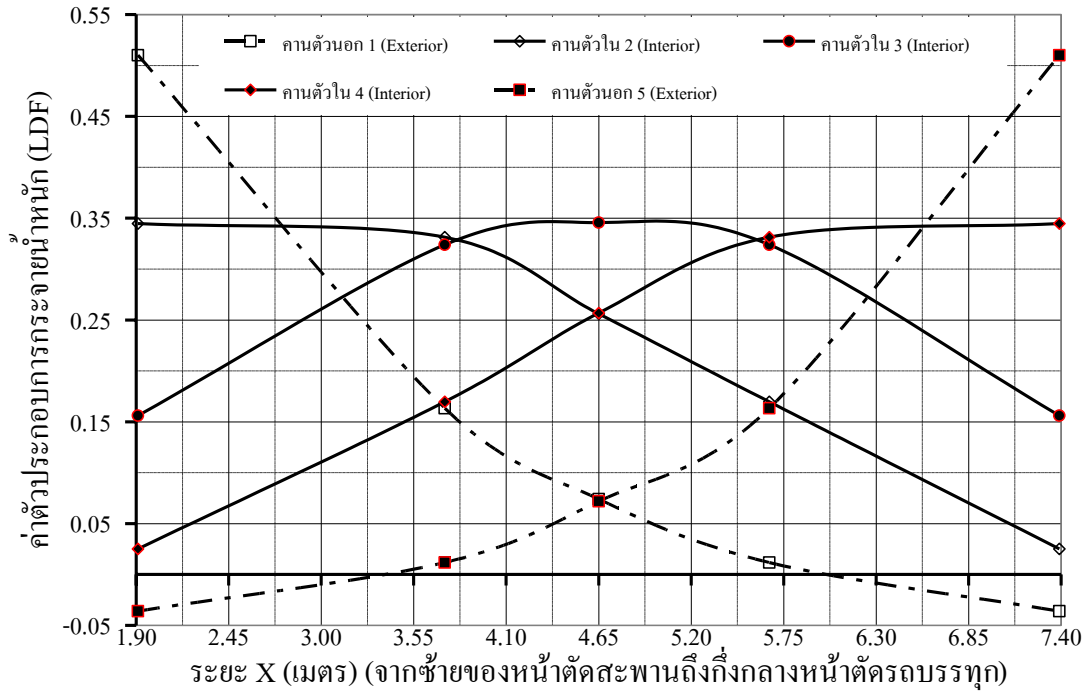
รูปที่ ง-12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck4, CS6, L = 18.00 เมตร)



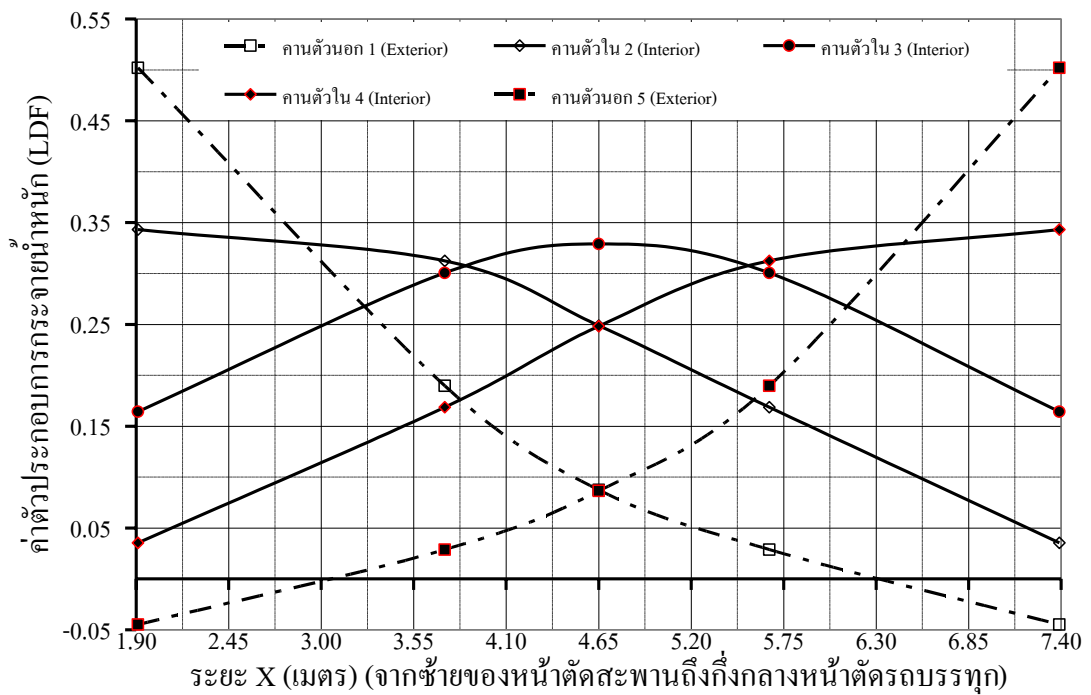
รูปที่ ง-13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS1, L = 12.00 เมตร)



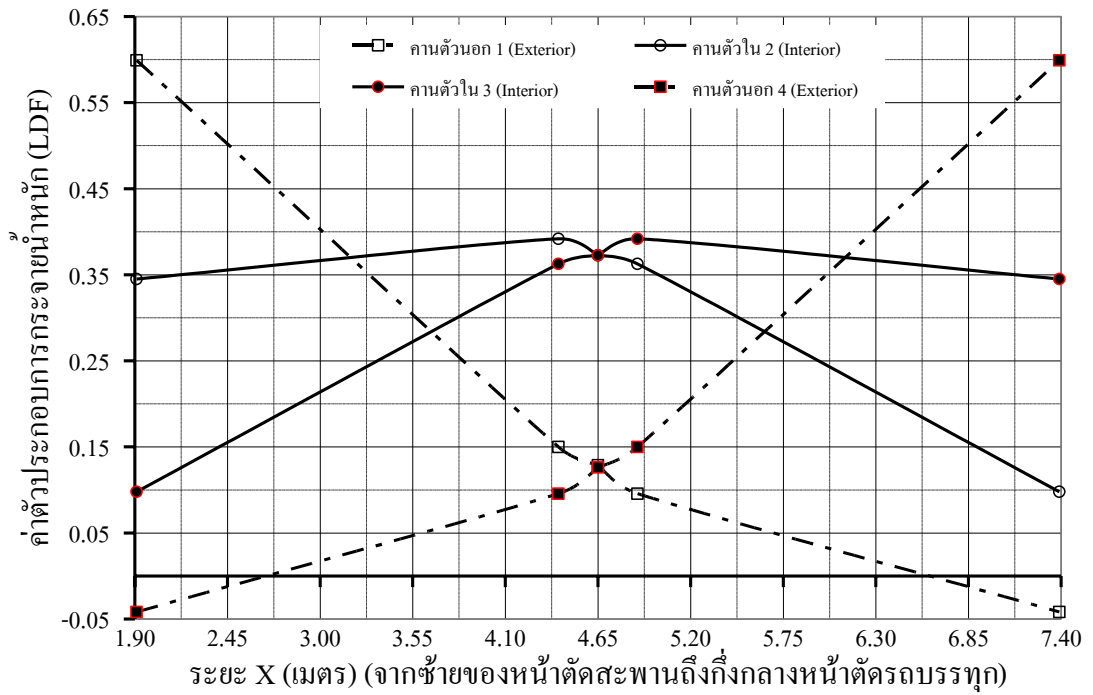
รูปที่ ง-14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS1, L = 18.00 เมตร)



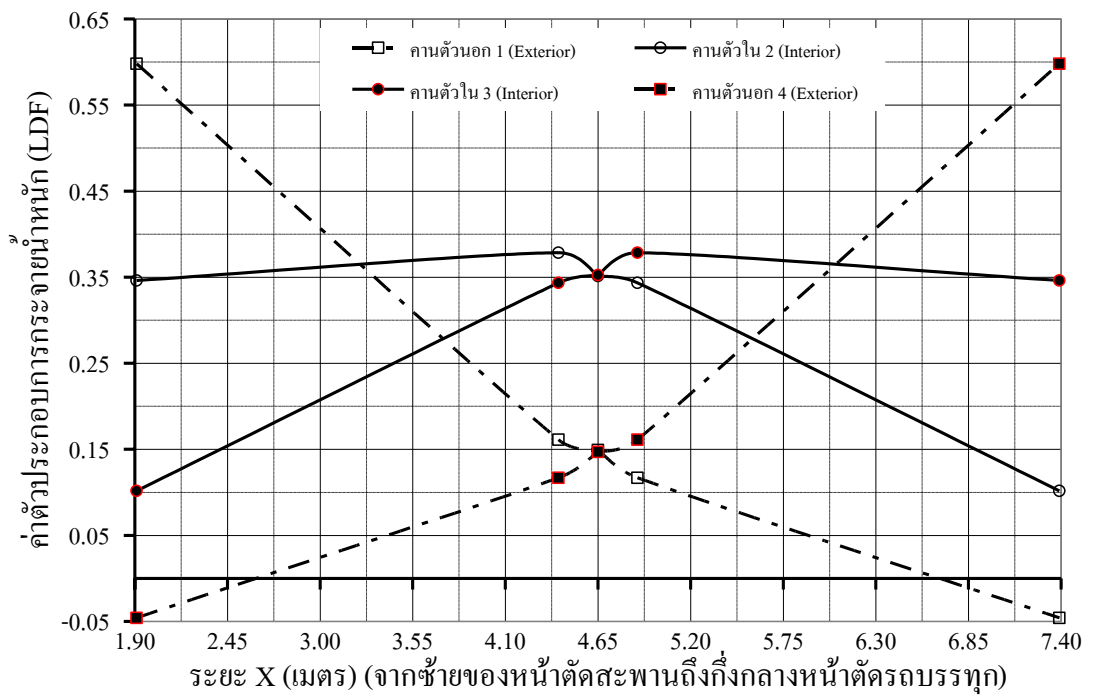
รูปที่ ง-15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS2, L = 12.00 เมตร)



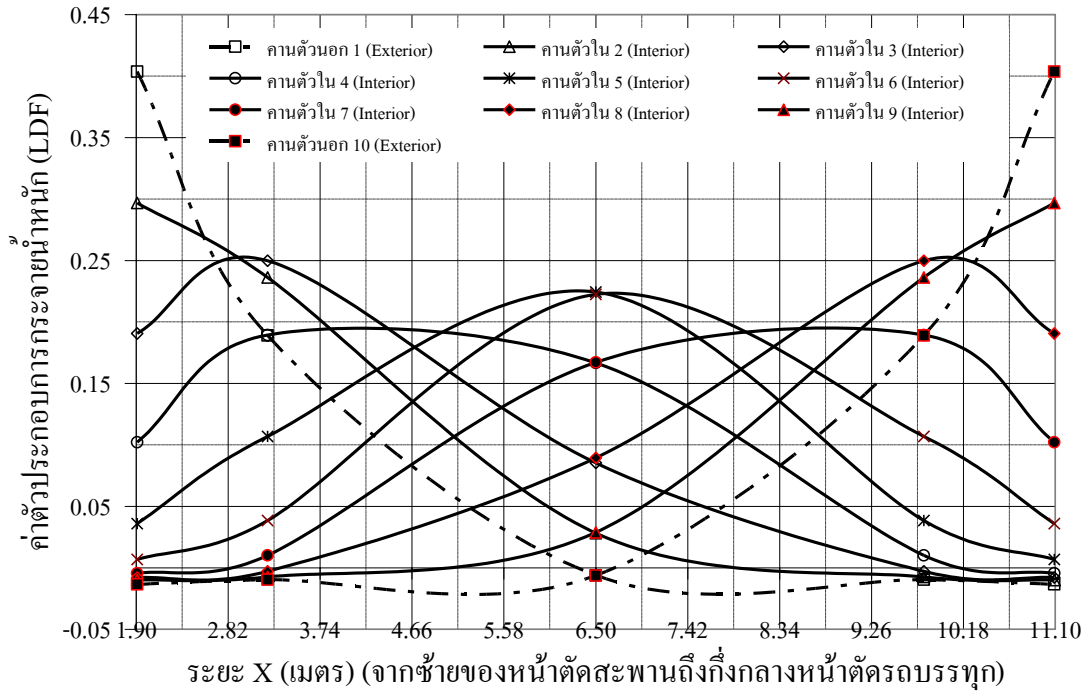
รูปที่ ง-16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS2, L = 18.00 เมตร)



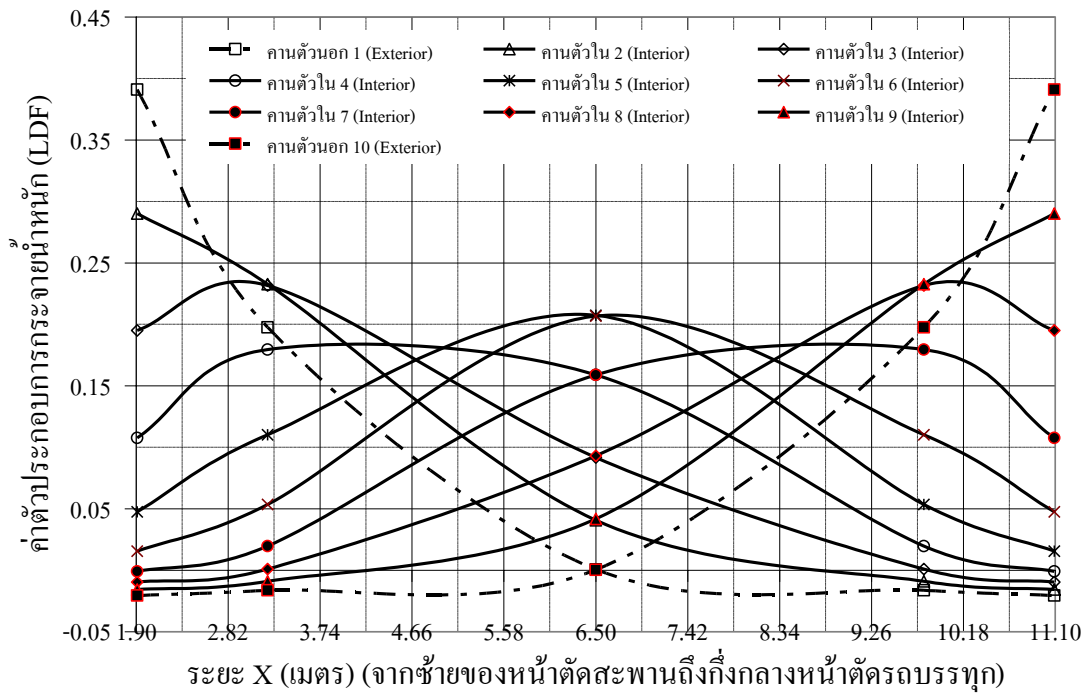
รูปที่ ง-17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS3, L = 12.00 เมตร)



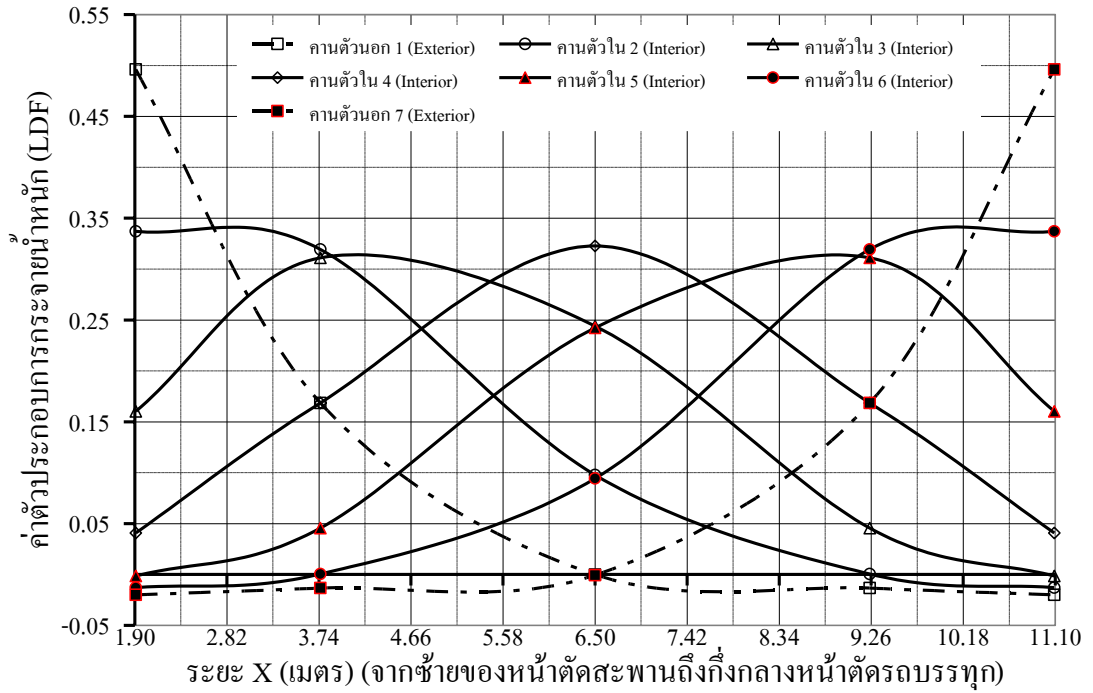
รูปที่ ง-18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS3, L = 18.00 เมตร)



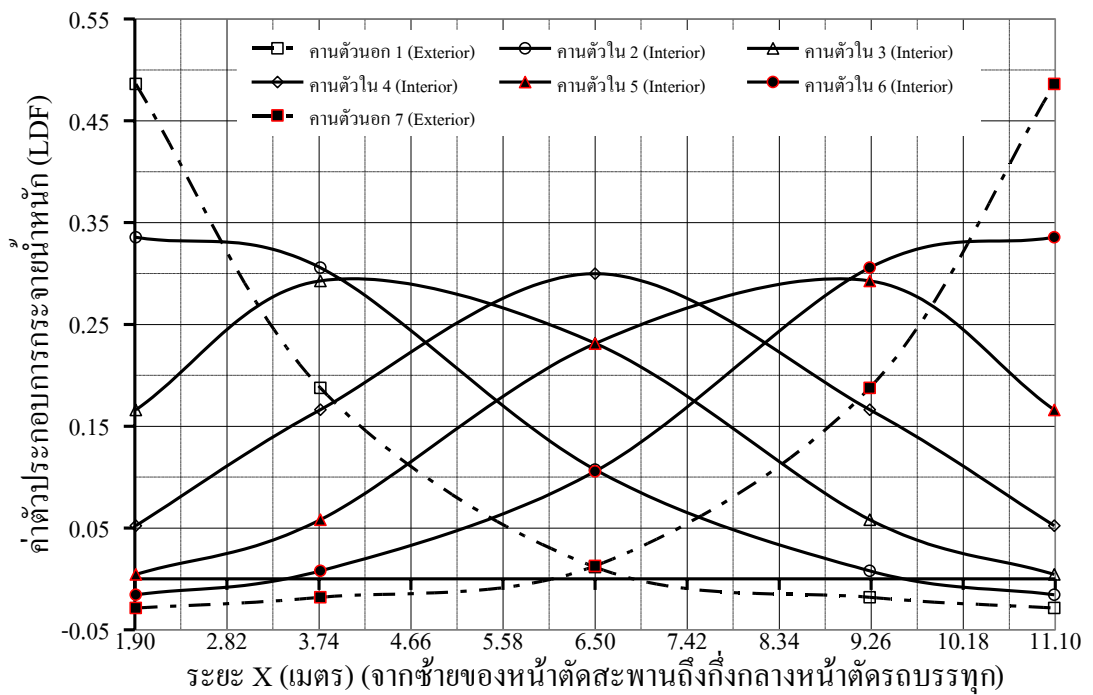
รูปที่ ง-19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS4, L = 12.00 เมตร)



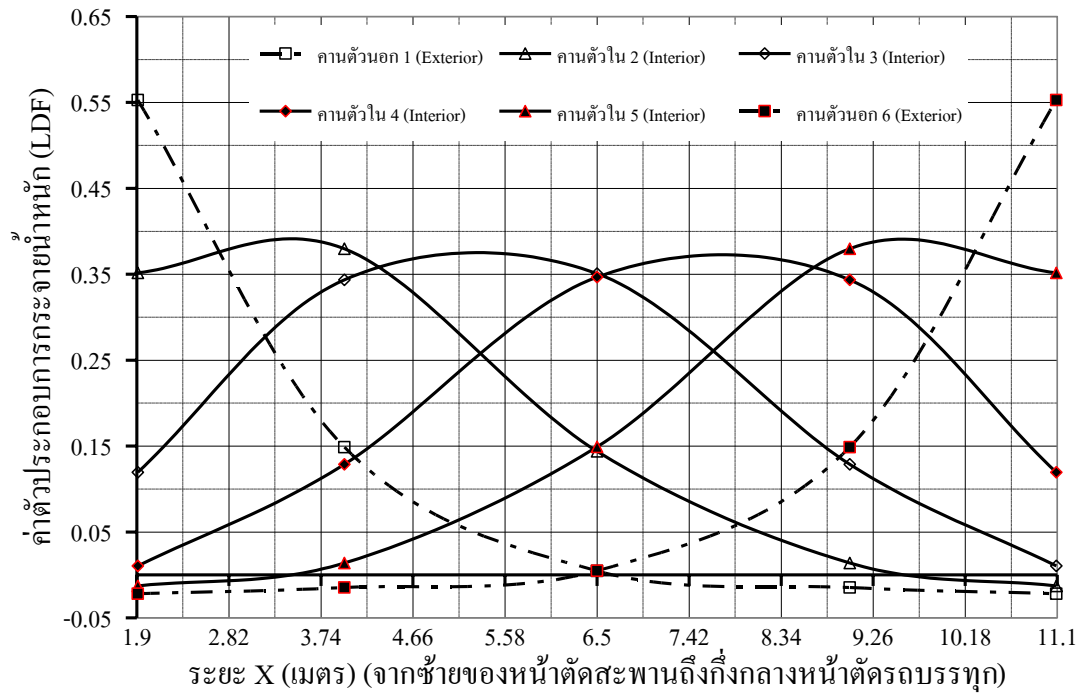
รูปที่ ง-20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS4, L = 18.00 เมตร)



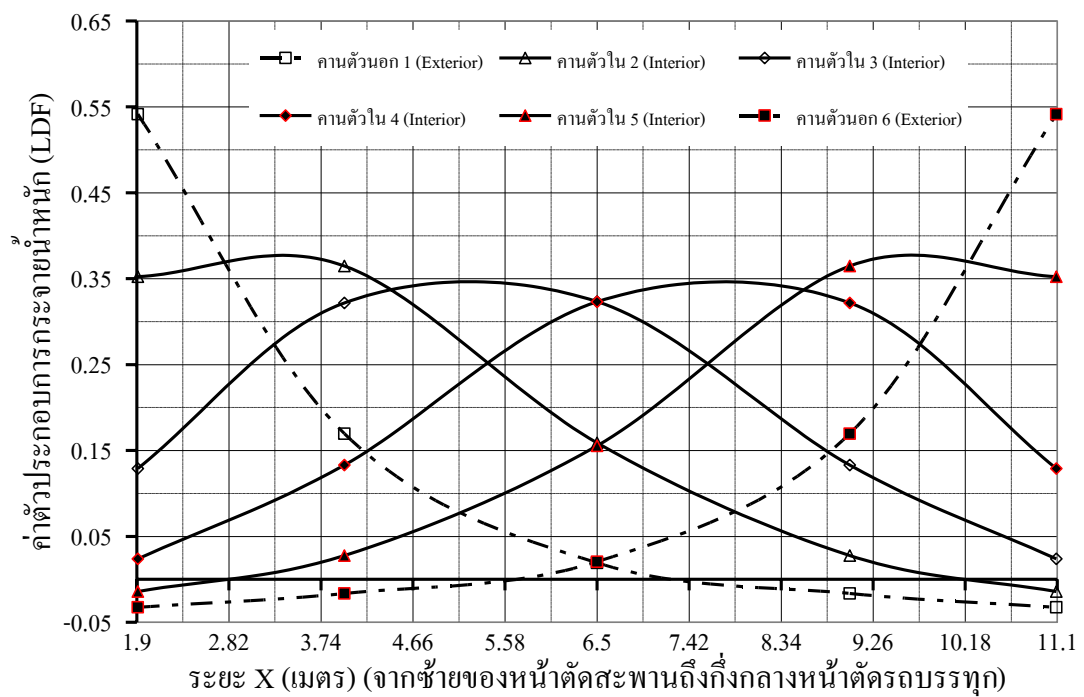
รูปที่ ง-21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS5, L = 12.00 เมตร)



รูปที่ ง-22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS5, L = 18.00 เมตร)



รูปที่ ง-23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS6, L = 12.00 เมตร)

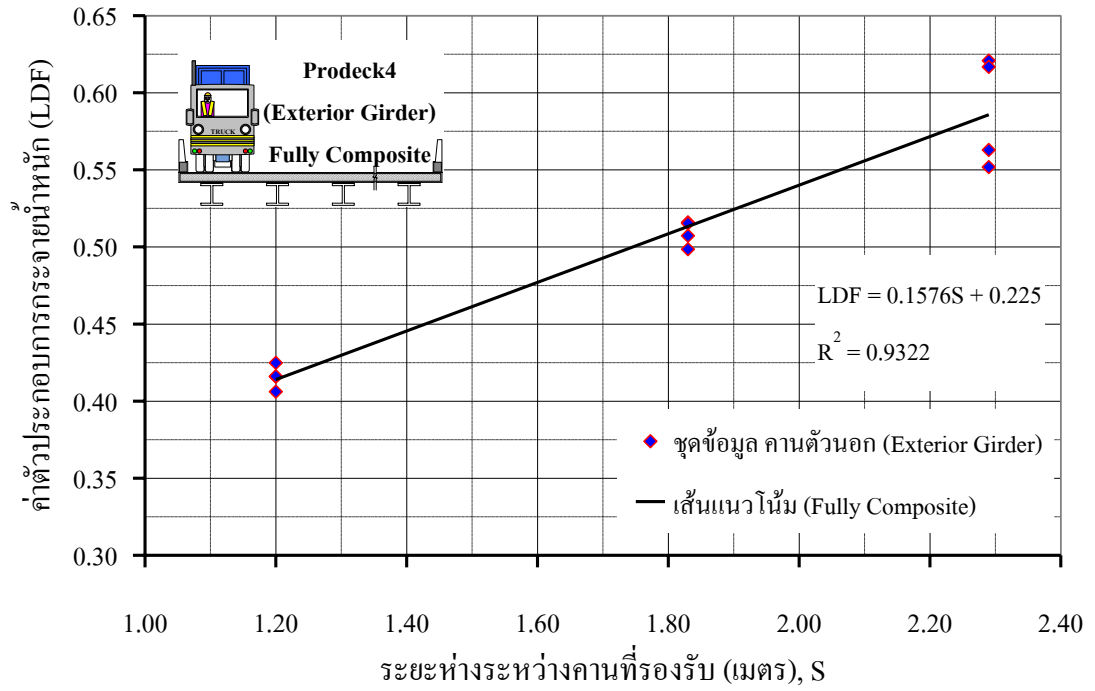


รูปที่ ง-24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า LDF ที่ระยะ X ต่างๆ (Prodeck8, CS6, L = 18.00 เมตร)

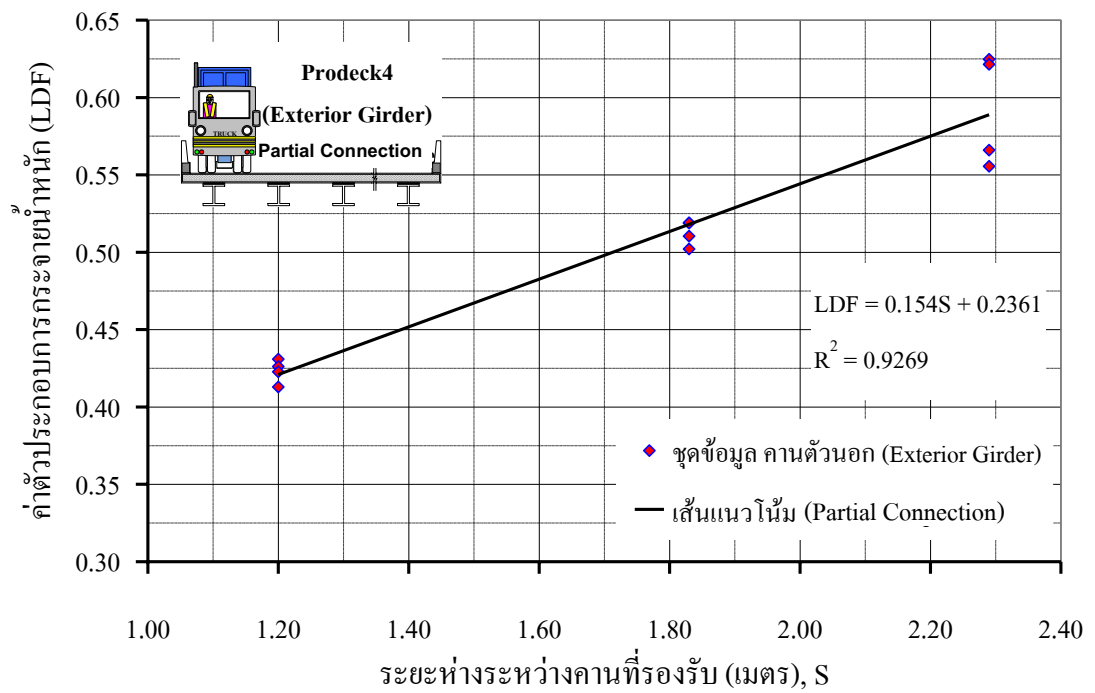
**ภาคผนวก จ**

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบกระจายน้ำหนัก (Load Distribution Factor)  
กับระยะห่างระหว่างคานที่รองรับ (Girder Spacing) ในรูปแบบสมการประมาณค่าแบบเชิงเส้น

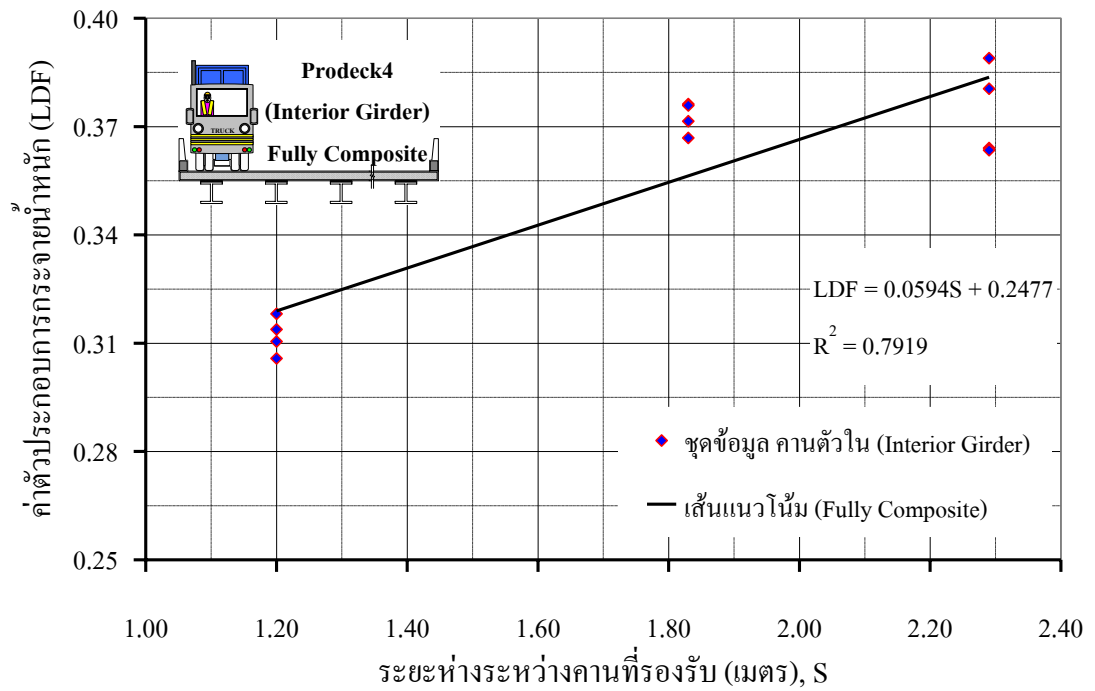




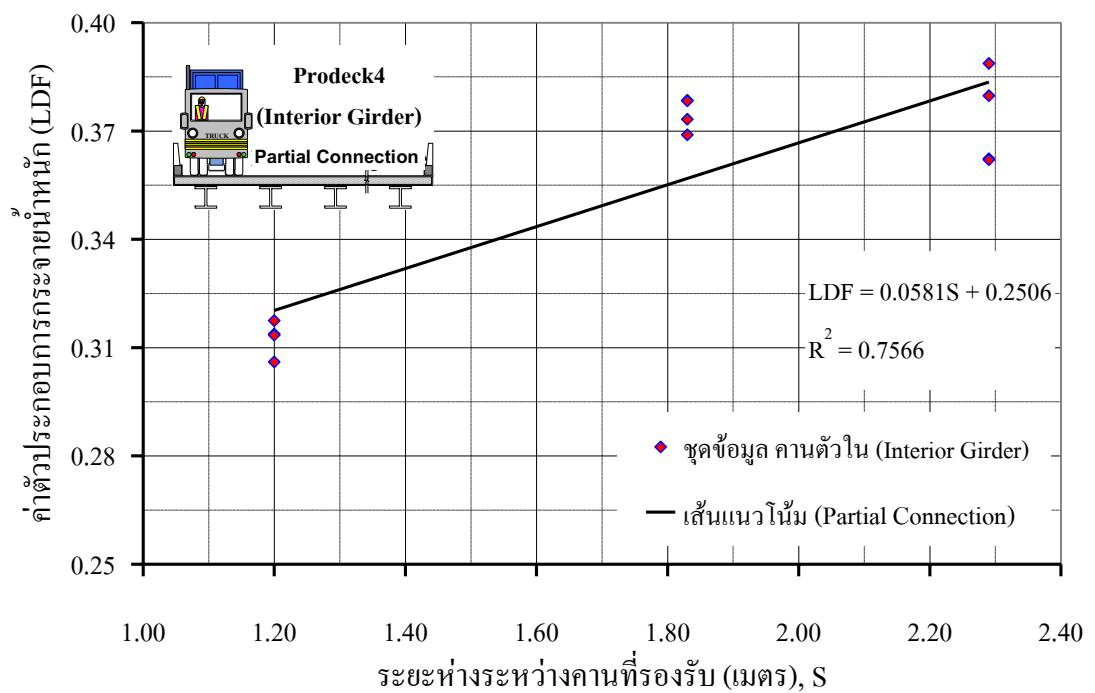
รูปที่ จ-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC)



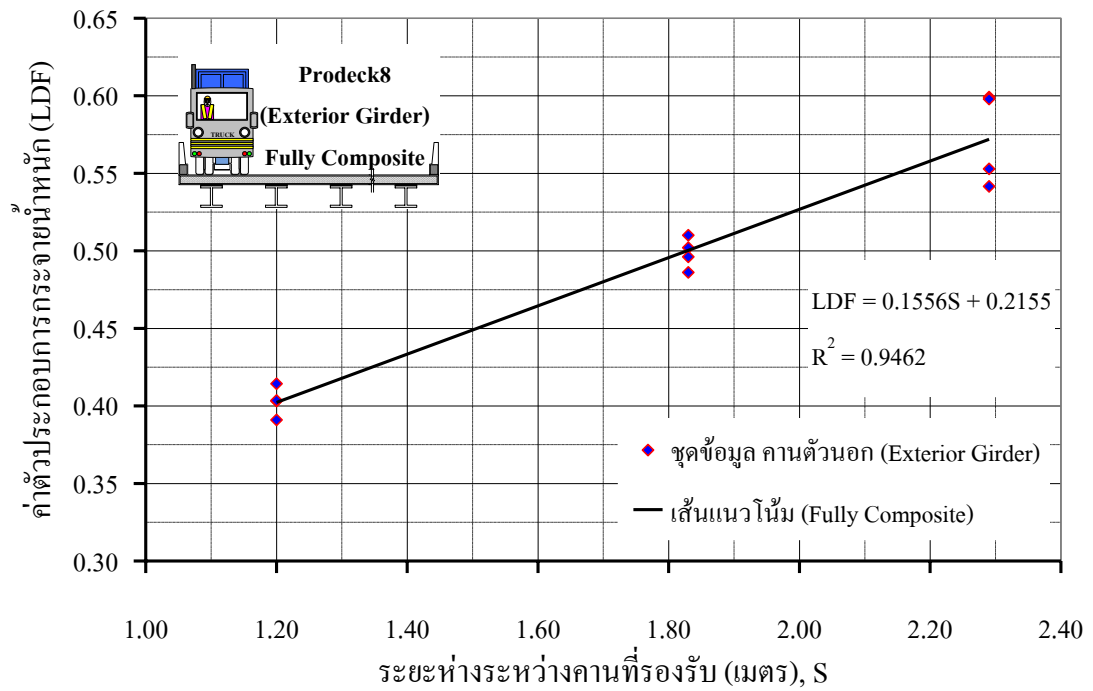
รูปที่ จ-2 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, PC)



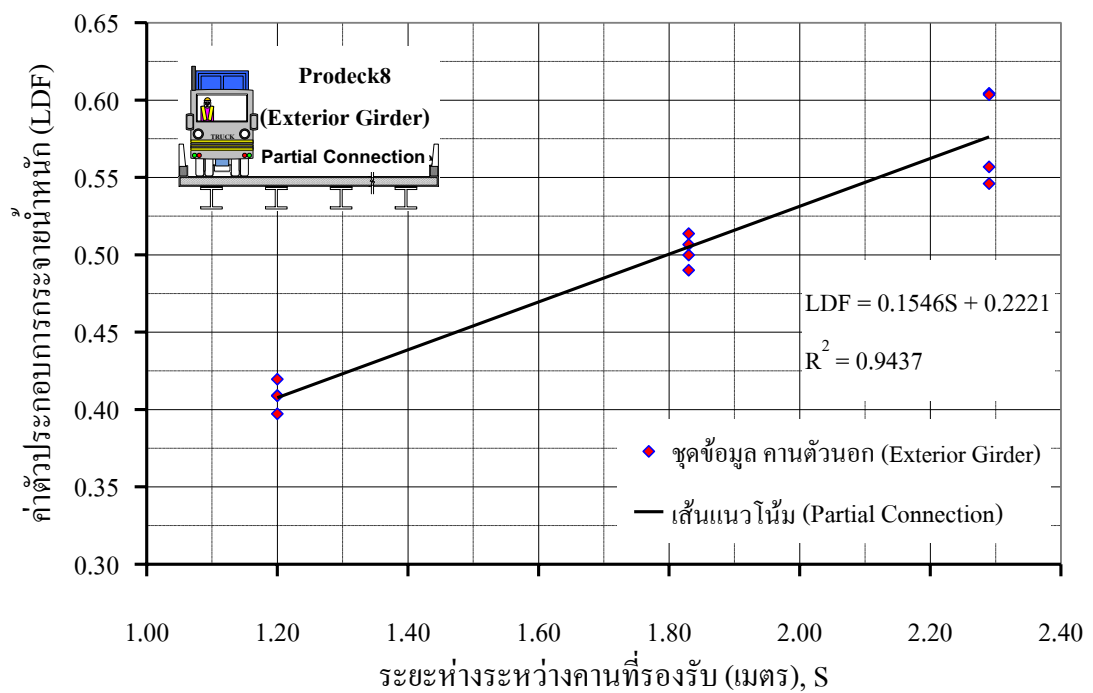
รูปที่ ๓-3 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, FC)



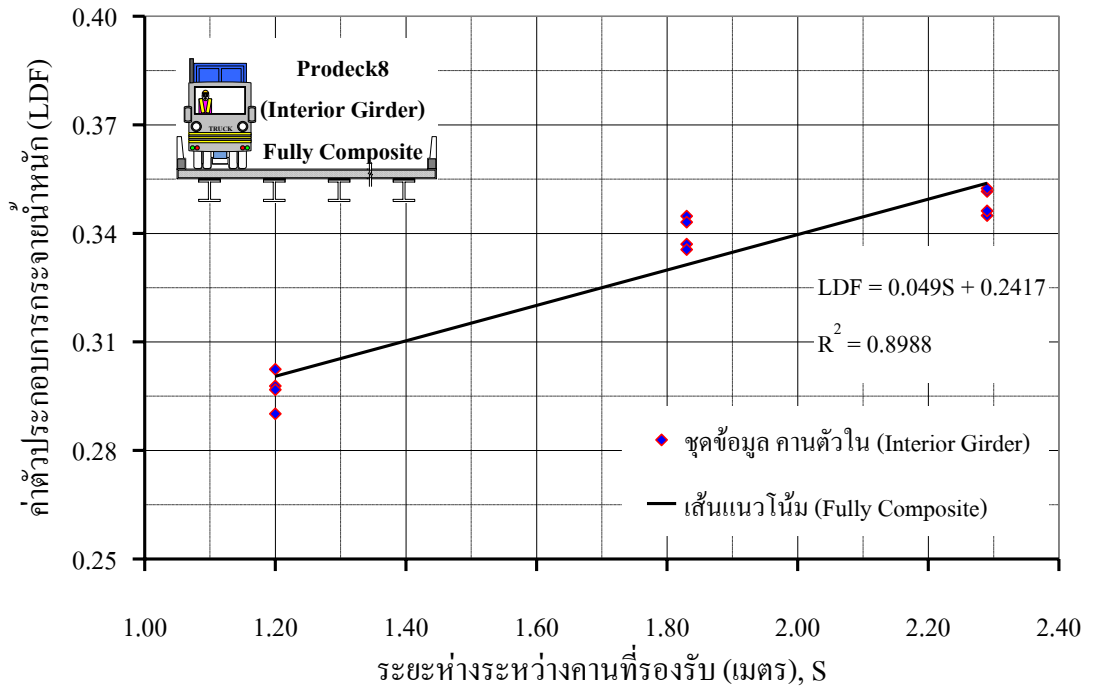
รูปที่ ๓-4 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, PC)



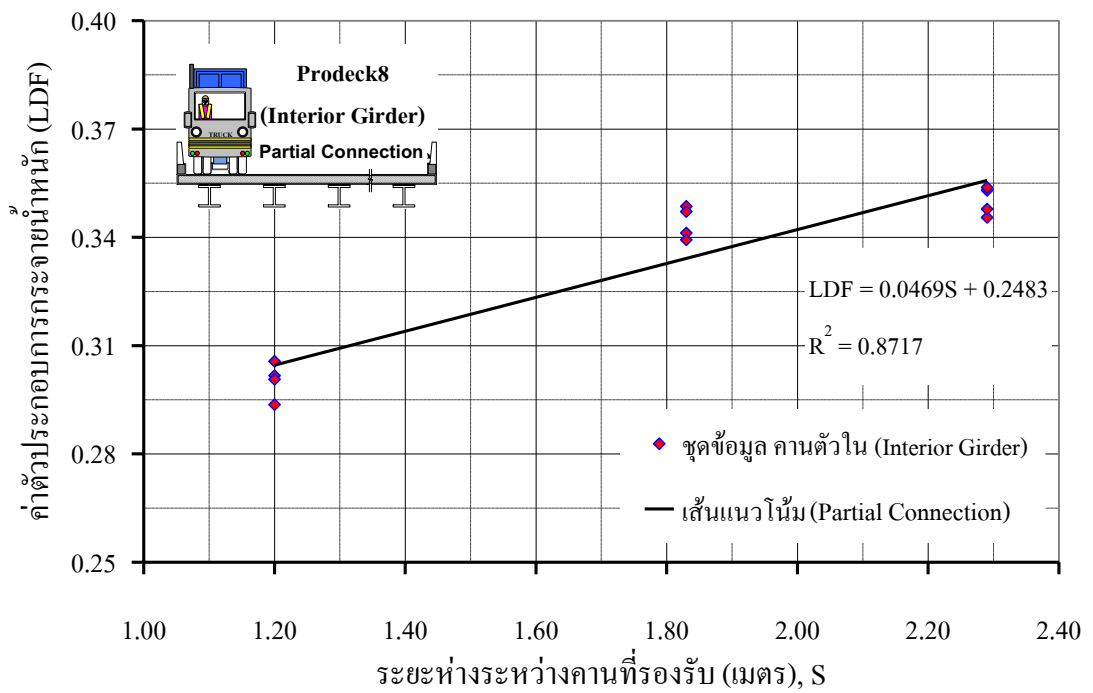
รูปที่ จ-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, FC)



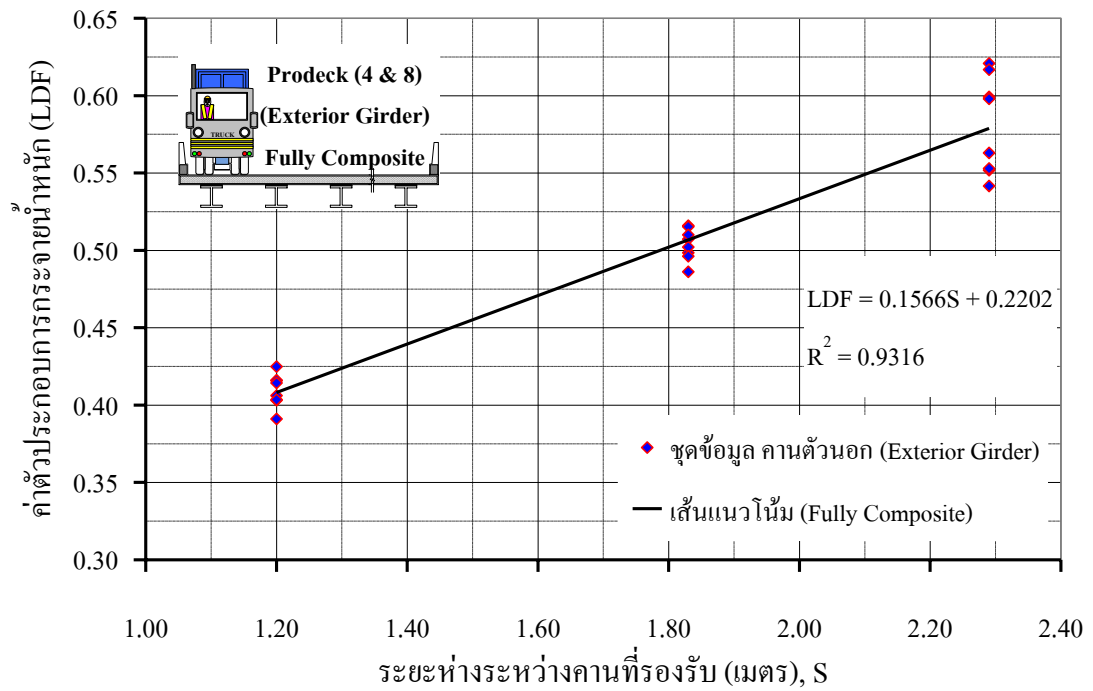
รูปที่ จ-6 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, PC)



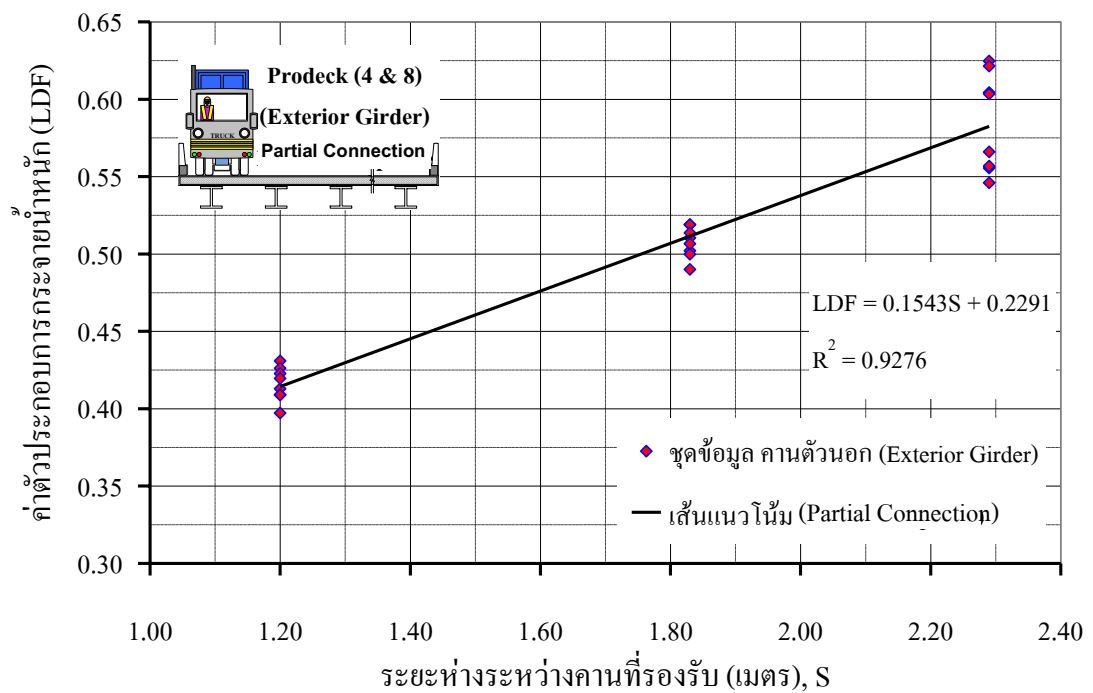
รูปที่ จ-7 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC)



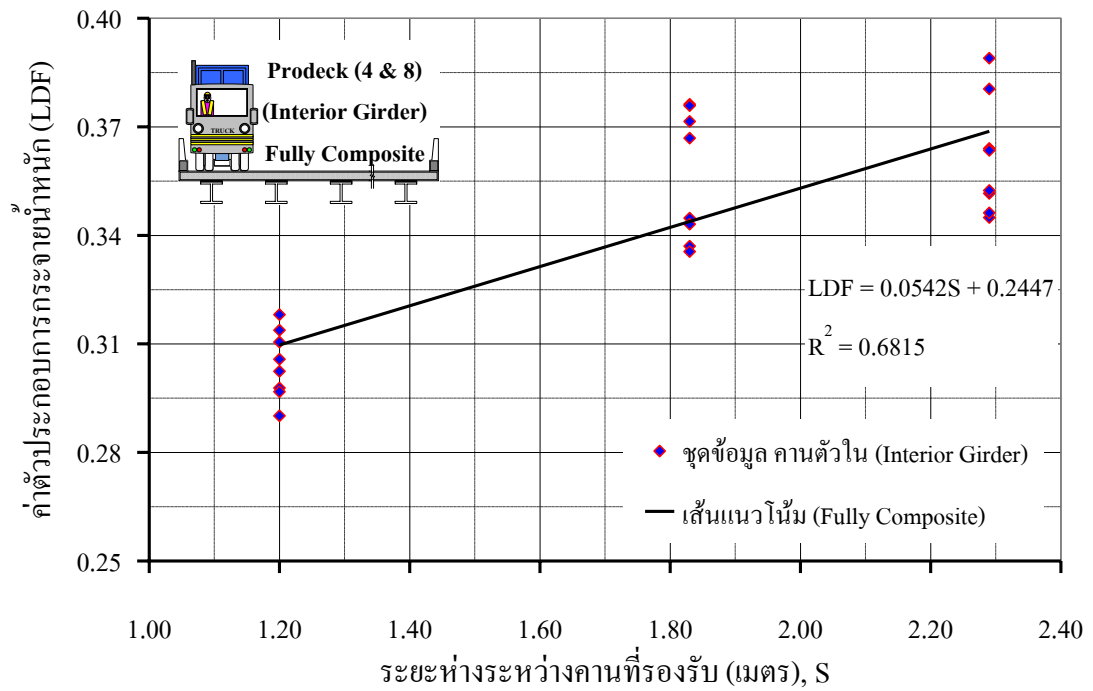
รูปที่ จ-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, PC)



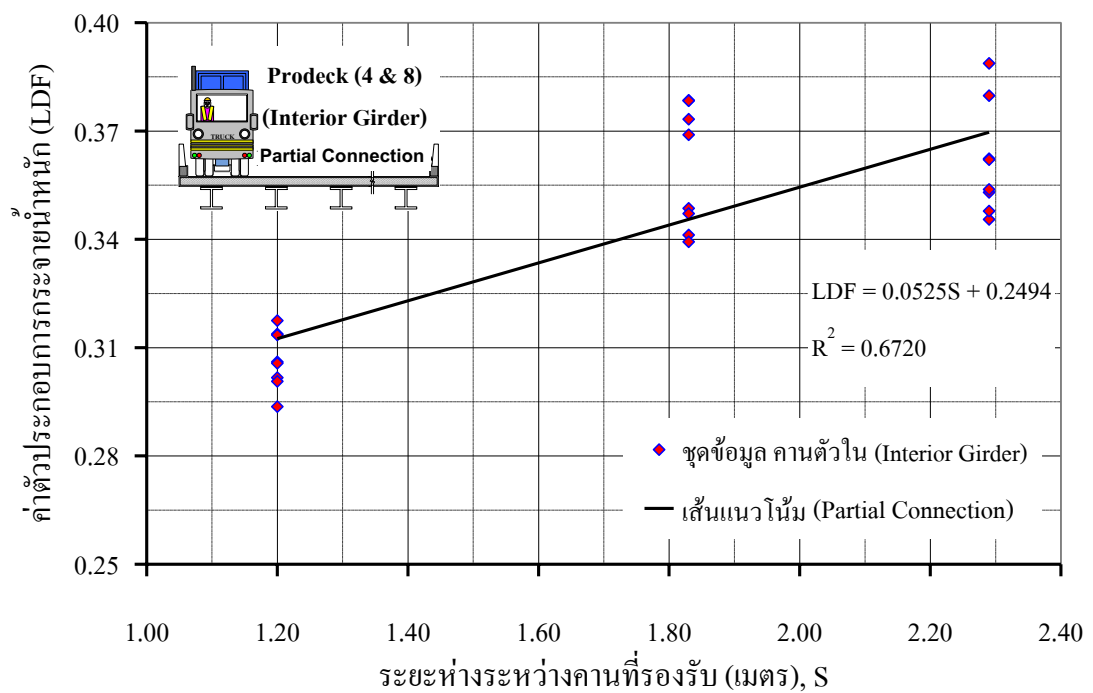
รูปที่ จ-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4+PD8, FC)



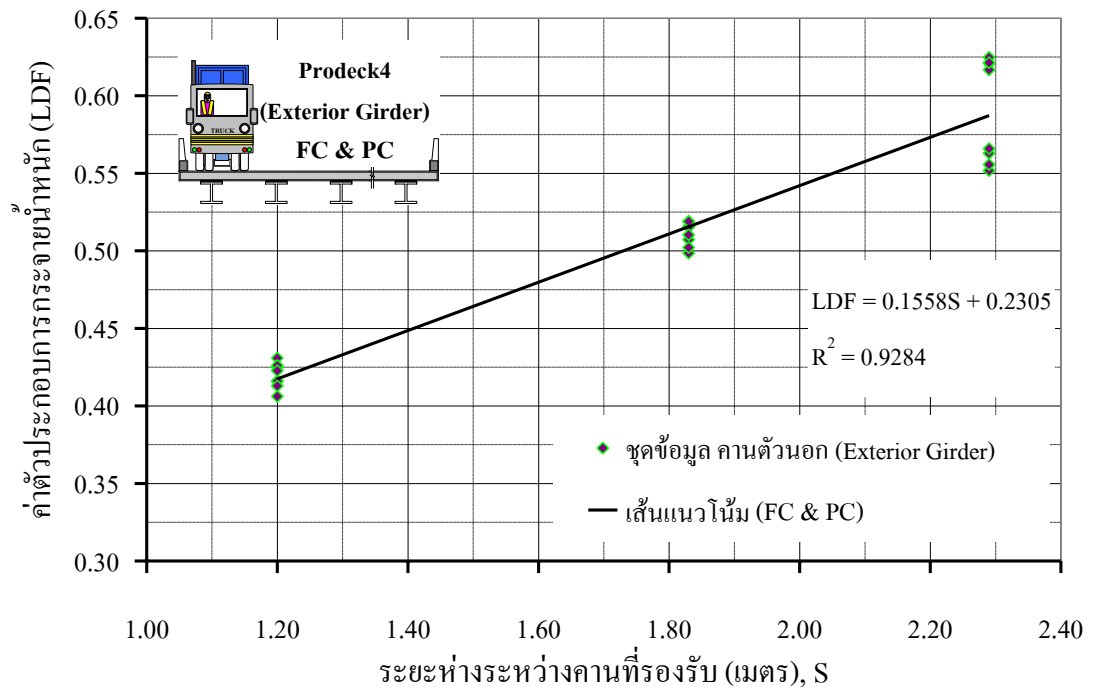
รูปที่ จ-10 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4+PD8, PC)



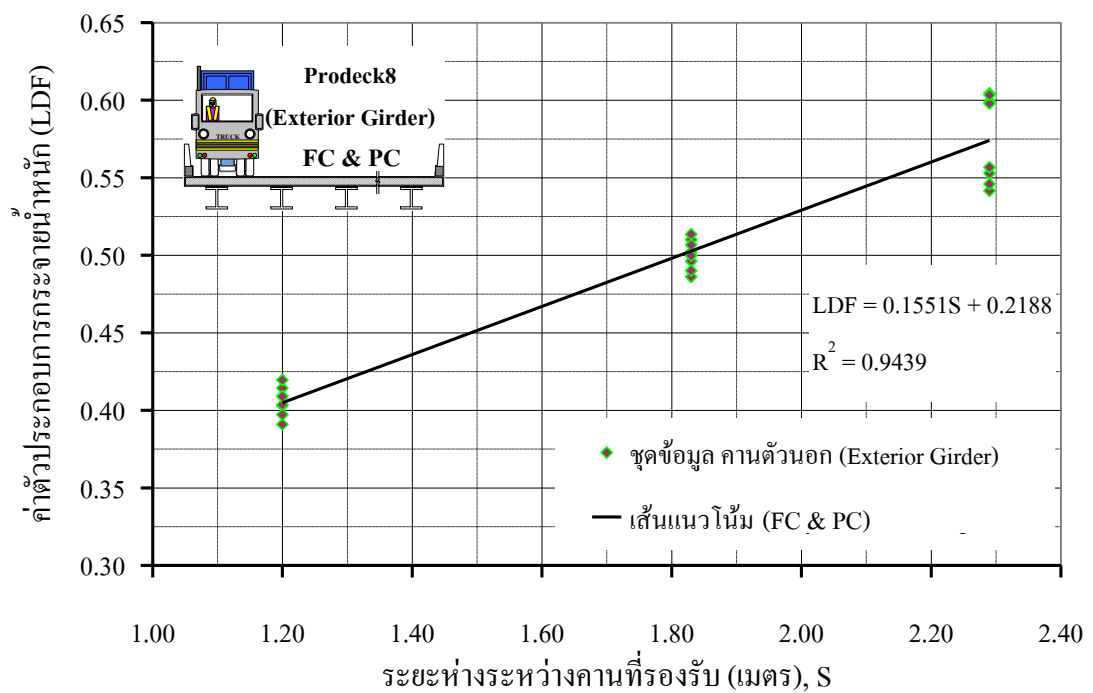
รูปที่ จ-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4+PD8, FC)



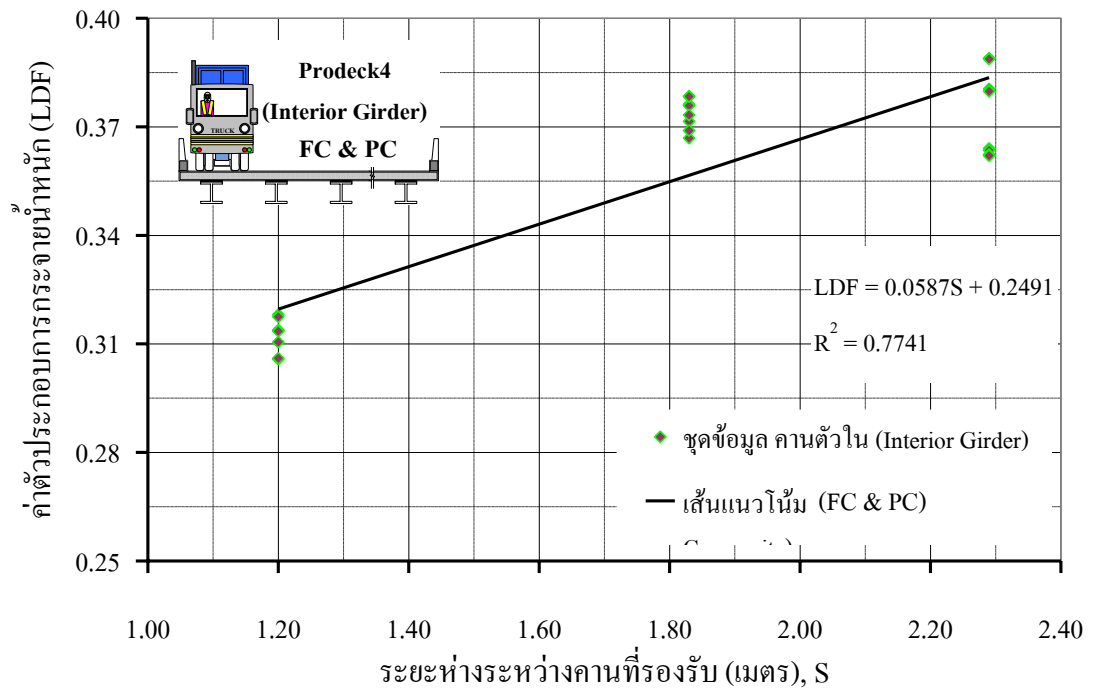
รูปที่ จ-12 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4+PD8, PC)



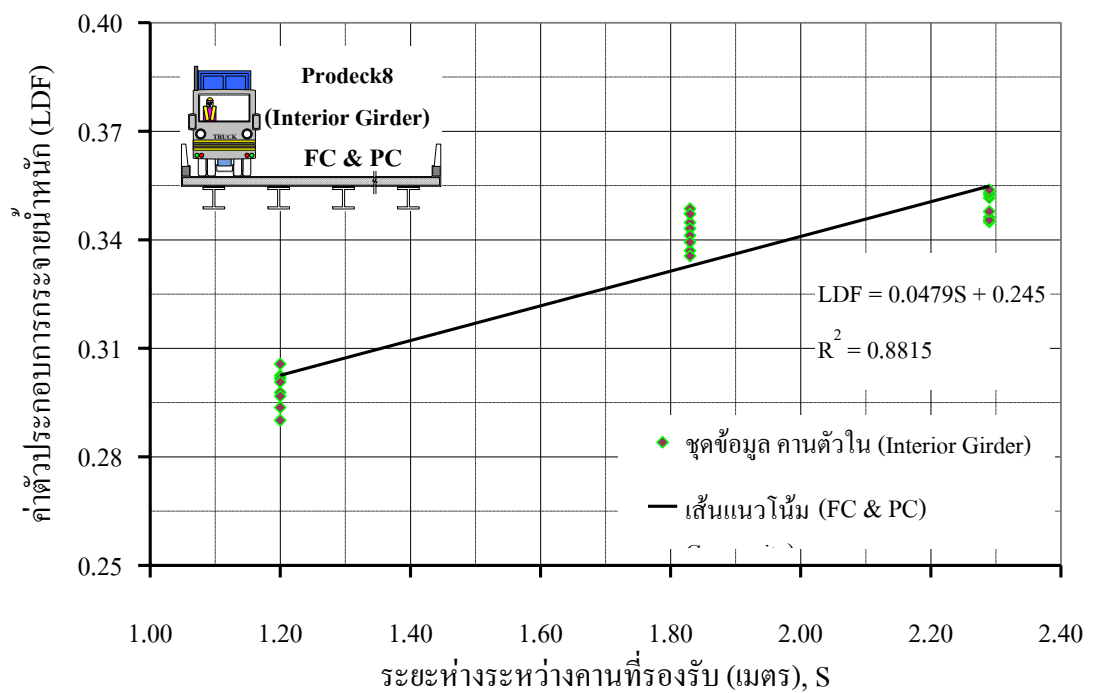
รูปที่ จ-13 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4, FC+PC)



รูปที่ จ-14 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD8, FC+PC)

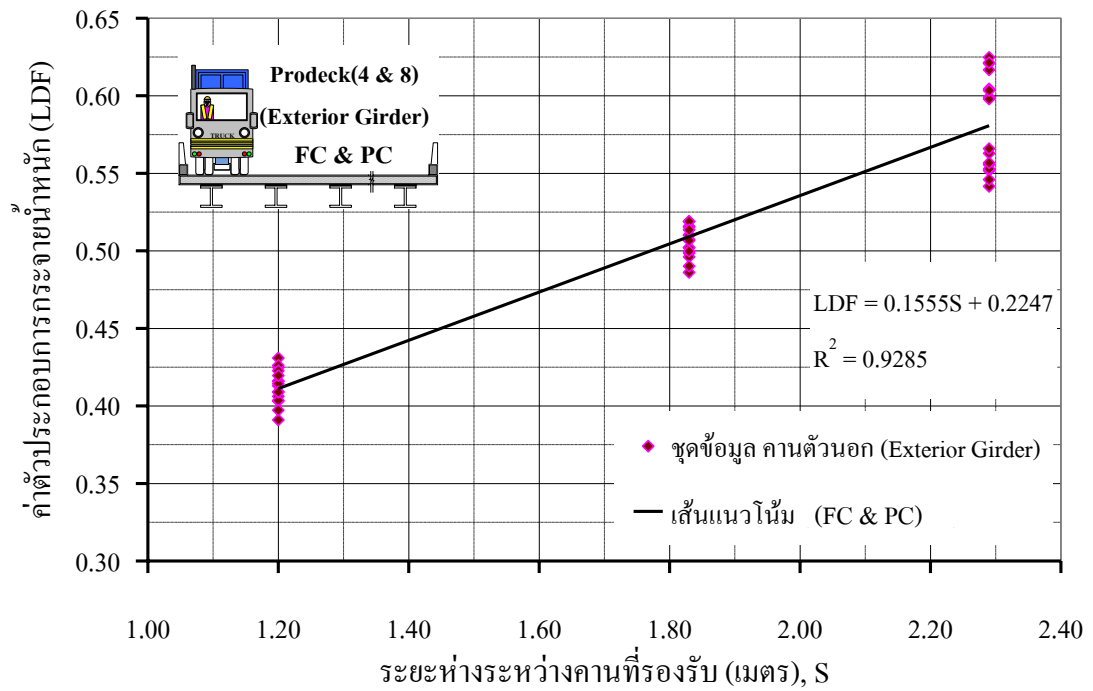


รูปที่ จ-15 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4, FC+PC)

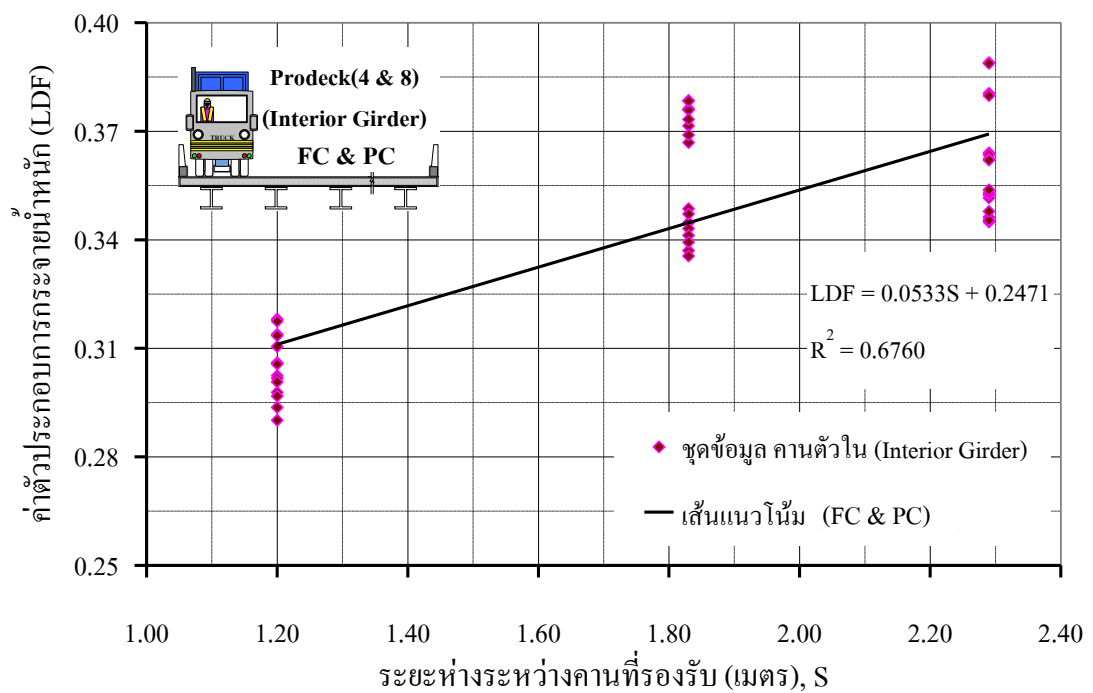


รูปที่ จ-16 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD8, FC+PC)





รูปที่ จ-17 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Ext-G, PD4+PD8, FC+PC)



รูปที่ จ-18 ความสัมพันธ์ระหว่าง LDF กับ S (Int-G, PD4+PD8, FC+PC)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายพงศ์ศักดิ์ สุขุมณี  
รหัสประจำตัวนักศึกษา 5010120049  
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2542

### ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

ทุนศึกษีก้นกฏคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2550 – 2552

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วรพจน์ ประชาเสรี และ พงศ์ศักดิ์ สุขุมณี. (2551). แนวทางการออกแบบเบื้องต้นของชิ้นส่วนโครงสร้างชนิดพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย: การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 6, 8-9 พฤษภาคม 2551 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา.

พงศ์ศักดิ์ สุขุมณี และ วรพจน์ ประชาเสรี. (2552). การวิเคราะห์พื้นสะพานพอลิเมอร์ชนิดน้ำหนักเบาเสริมกำลังด้วยเส้นใยโดยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา.

วรพจน์ ประชาเสรี. และ พงศ์ศักดิ์ สุขุมณี. (2552). ลำดับขั้นการพัฒนาของพื้นสะพานประกอบพอลิเมอร์เสริมกำลังด้วยเส้นใย: การพัฒนา, การผลิต และการนำไปใช้งานในภาคสนาม: การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14, 13-15 พฤษภาคม 2552 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา.