

การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วย
ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว

ณัทกฤษ เหล่าพรหม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วย
ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหี่ยว

ณัทกฤษ เหล่าพรหม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

มิถุนายน 2557

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม





คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายณัฏกฤษ เหล่าพรหม แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ศ. อภิสิทธิ์ คุ้ม
(ผศ.ดร. อลงกรณ์ ละม่อม)

ประธานกรรมการ
(กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ)

Bejo
(ผศ.ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา
(ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)

จักรพันธ์ วงษ์พา
(อ.ดร.จักรพันธ์ วงษ์พา)

กรรมการ
(กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์)

วันชัย สะตะ
(ผศ.ดร. วันชัย สะตะ)

กรรมการ
(ผู้ทรงคุณวุฒิ)

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สัมพันธ์ ฤทธิเดช
(รศ.ดร. สัมพันธ์ ฤทธิเดช)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ประดิษฐ์ เทอดทูล
(ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 17 เดือน ๕.๕. พ.ศ. 2557

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.จักรพันธ์ วงษ์พา กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ที่ได้ชี้แนวทางในการศึกษาวิจัยให้ข้อคิด คำแนะนำ ในการแก้ไขข้อบกพร่อง และดูแลเอาใจใส่ในการศึกษาวิจัย

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น กรรมการสอบ ที่กรุณาสละเวลาและให้เกียรติมาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ยิ่ง ซึ่งผู้วิจัยรู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่ง ขอกราบขอบพระคุณและขอรำลึกในพระคุณของคุณพ่อประสพสุข คุณแม่เบญจรงค์ เหล่าพรหม และครอบครัวซึ่งได้คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการศึกษามาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ณัทกฤษ เหล่าพรหม



ชื่อเรื่อง	การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธี การจำลองการอบเหนียว
ผู้วิจัย	นายณัทกฤช เหล่าพรหม
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา
กรรมการควบคุม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ อาจารย์ ดร.จักรพันธ์ วงษ์พา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2557

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้มีความมุ่งหมายเพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยผลที่ได้จากการออกแบบจะนำมา เปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป การศึกษาตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งเป็น 3 รูปแบบคือ คานช่วงเดียว คานสองช่วง และคานสามช่วง ซึ่งรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจาย ในการ ออกแบบคานด้วยวิธีการจำลองการอบเหนียว แต่ละรูปแบบจะกำหนด 3 กรณีศึกษาคือ แบบไม่ กำหนดค่ากำลังอัดคอนกรีต (f'_c) และกำลังครากเหล็กเสริมยื่น (f_y) แบบกำหนด f'_c และแบบ กำหนด f_y และหาราคาที่ต่ำที่สุดซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ โดยกำหนดตัวแปรต้นใน การหาราคาต่ำสุดสำหรับค่าที่เหมาะสมคือ ราคาวัสดุ และค่าแรง ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริม เหล็กใช้มาตรฐานการออกแบบวิธีกำลัง (วสท. 1008-38)

จากผลงานวิจัยนี้พบว่า ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวในการออกแบบคานคอนกรีต เสริมเหล็กสามารถประยุกต์ใช้งานได้อย่างเหมาะสมในทุกกรณีศึกษา ซึ่งราคารวมต่ำกว่าการออกแบบ โดยวิธีทั่วไป รวมทั้งยังใช้เวลาในการคำนวณน้อยมาก ซึ่งในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว ราคารวมลดลงร้อยละ 10.10 7.01 และ 3.27 สำหรับแต่ละกรณีศึกษา ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการ ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ในการออกแบบคานสองช่วง โปรแกรมได้ออกแบบคานที่มีราคารวมลดลงร้อยละ 12.57 7.29 และ 4.20 ตามลำดับ และสำหรับคานสามช่วงราคารวมลดลงร้อยละ 13.23 9.15 และ 5.85 ตามลำดับ ระยะเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการออกแบบสำหรับคานแต่ละรูปแบบ เท่ากับ 4.53 8.21 และ 66.10 วินาที ตามลำดับ



TITLE Optimum Design of Reinforced Concrete Beams Using Simulated Annealing Algorithm

AUTHOR Mr. Nuttakrit Laoprom

DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering

ADVISORS Asst. Prof. Raungrut Cheerarot, Ph.D.
Jakrapan Wongpa, Ph.D.

UNIVERSITY Maharakham University **YEAR** 2014

ABSTRACT

The objective of this study is to apply the simulated annealing algorithm (SA) in designing an optimized beam. The results designed from SA would be compared to that of classical design method. Three types of beam under uniform loading were studied namely; simple beam, 2-span continuous beam, and 3-span continuous beam, respectively. In case of design by SA method, each type of beam had 3 cases of study, particularly, non-fixed both compressive strength of concrete (f'_c) and yield strength of reinforcing steel (f_y), fixed only f_y , and fixed only f'_c . Each case had the same objective function, the minimum cost. The variables in this study composed of materials price and the labor cost. The designation method follows the strength design method of the EIT-standard (EIT. 1008-38).

It was found that the SA method can be suitably applied in designing an optimized beam for all case studies. The total costs given from the SA method were much lower than that from the classical design method as well as the time saving. For simple beam samples, the total cost reduced 10.10, 7.01, and 3.27 percent, respectively, compared to those of the classical method. In case of 2-span continuous beams, the total cost reduced off 12.57, 7.29, and 4.20 percent while that of the 3-span samples reduced 13.23, 9.15, and 5.85 percent, respectively. The average time to design each type of beam was 4.53, 8.21, and 66.10 second, respectively.



สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพประกอบ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ความสำคัญของการวิจัย	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	4
2.2 ทฤษฎีในการออกแบบคานาคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน	12
2.3 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมโดยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว	16
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	22
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลและการวิจัย	22
3.2 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย	22
3.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	23
3.4 การคำนวณออกแบบโดยวิธีทั่วไป	24
3.5 การคำนวณการออกแบบร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว	24
3.6 รายละเอียดของวัสดุ ค่าแรง ตัวแปรสุ่มที่ใช้ในการออกแบบ และตัวอย่างการทดสอบ	27
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	33
4.1 การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาสำหรับงานวิจัย	33
4.2 กรณีศึกษาคานาคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว	39
4.3 กรณีศึกษาคานาคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง	46
4.4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาคานาคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง	52
4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	59
บทที่ 5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผล	61
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการพัฒนาในการวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	62



	หน้า
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก	66
ภาคผนวก ก พื้นที่เหล็กเสริมตามยาวและตามขวางของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	67
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการออกแบบและการจัดเรียงเหล็กเสริม สำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	69
ประวัติย่อผู้วิจัย	123



สารบัญตาราง

		หน้า
ตาราง 3.1	ราคาคอนกรีตจากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2553 – 2555	27
ตาราง 3.2	ราคาเหล็กเสริม	28
ตาราง 3.3	ตัวอย่างสำหรับคานช่วงเดียว	31
ตาราง 3.4	ตัวอย่างสำหรับคานสองช่วง	32
ตาราง 3.5	ตัวอย่างสำหรับคานสามช่วง	32
ตาราง 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณและราคาการก่อสร้างตัวอย่างที่ 1	39
ตาราง 4.2	การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวด้วยวิธีการแบบทั่วไป	43
ตาราง 4.3	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานช่วงเดียวกรณีที่ 1	44
ตาราง 4.4	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานช่วงเดียวกรณีที่ 2	45
ตาราง 4.5	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานช่วงเดียวกรณีที่ 3	45
ตาราง 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณและราคาการก่อสร้างคานสองช่วง	46
ตาราง 4.7	การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วงด้วยวิธีการแบบทั่วไป	50
ตาราง 4.8	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานสองช่วง กรณีที่ 1	50
ตาราง 4.9	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานสองช่วง กรณีที่ 2	51
ตาราง 4.10	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานสองช่วง กรณีที่ 3	52
ตาราง 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณและราคาการก่อสร้างตัวอย่างที่ 3	53
ตาราง 4.12	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วงด้วยวิธีการแบบทั่วไป	56
ตาราง 4.13	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 1	57
ตาราง 4.14	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 2	58
ตาราง 4.15	ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 3	59
ตาราง 4.16	ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 1, 2 และ 3	59
ตาราง ก-1	พื้นที่เหล็กเสริมตามจำนวนเส้น (ชม. ²)	68
ตาราง ก-2	พื้นที่เหล็กเสริมต่อความยาวหนึ่งเมตร (ชม. ²)	68
ตาราง ข-1	ผลการเลือกหน้าตัดในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f_c' และ f_y	76
ตาราง ข-2	ผลการเลือกหน้าตัดในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	79
ตาราง ข-3	ผลการเลือกหน้าตัดในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_y	83
ตาราง ข-4	ผลการเลือกหน้าตัดในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบกำหนดค่า f_c' และ f_y	89
ตาราง ข-5	ผลการเลือกหน้าตัดในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	93
ตาราง ข-6	ผลการเลือกหน้าตัดในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y	97



	หน้า
ตาราง ข-7 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบกำหนดค่า f_c' และ f_y	103
ตาราง ข-8 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	107
ตาราง ข-9 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y	111
ตาราง ข-10 ข้อมูลรายละเอียดเหล็กเสริม	115



บัญชีภาพประกอบ

			หน้า
ภาพประกอบ	2.1	แบบจำลองเอลิเมนต์คานความยาว L	5
ภาพประกอบ	2.2	ฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์คาน	6
ภาพประกอบ	2.3	ลักษณะของโหลดกระจายที่กระทำบนเอลิเมนต์	10
ภาพประกอบ	2.4	การเรียงตัวของโครงสร้างผลึกตามขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว	17
ภาพประกอบ	2.5	ตัวอย่างปัญหาการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม	18
ภาพประกอบ	2.6	แผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว	19
ภาพประกอบ	3.1	การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กประยุกต์ใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว	26
ภาพประกอบ	3.2	แสดงการเสริมเหล็กในคานเสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว	28
ภาพประกอบ	3.3	แสดงการเสริมเหล็กในคานเสริมเหล็กรับทั้งแรงดึงและแรงอัด	29
ภาพประกอบ	3.4	(A) คานช่วงเดียวรับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอ (B) หน้าตัดคาน	31
ภาพประกอบ	4.1	ส่วนแสดงหน้าจอเริ่มต้นสำหรับการเลือกใช้โปรแกรม	34
ภาพประกอบ	4.2	ส่วนรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว	35
ภาพประกอบ	4.3	ส่วนรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง	36
ภาพประกอบ	4.4	ส่วนรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง	36
ภาพประกอบ	4.5	รายละเอียดผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว	37
ภาพประกอบ	4.6	รายละเอียดผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง	38
ภาพประกอบ	4.7	รายละเอียดผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง	38
ภาพประกอบ	4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 1	41
ภาพประกอบ	4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 2	42
ภาพประกอบ	4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 3	43
ภาพประกอบ	4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานสองช่วงกรณีที่ 1	48
ภาพประกอบ	4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบกรณีที่ 2 คานสองช่วง	48
ภาพประกอบ	4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานสองช่วง กรณีที่ 3	49
ภาพประกอบ	4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 1	54
ภาพประกอบ	4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 2	55
ภาพประกอบ	4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 3	55
ภาพประกอบ	ข-1	น้ำหนักคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว	70
ภาพประกอบ	ข-2	การเสริมเหล็กคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว	73
ภาพประกอบ	ข-3	การเสริมเหล็กยื่นและเหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว	75
ภาพประกอบ	ข-4	การเสริมเหล็กในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f_c' และ f_y	75



ภาพประกอบ	ข-5	การเสริมเหล็กในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	79
ภาพประกอบ	ข-6	ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_y	82
ภาพประกอบ	ข-7	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วง	86
ภาพประกอบ	ข-8	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 1	88
ภาพประกอบ	ข-9	ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบกำหนดค่า f_c' และ f_y	88
ภาพประกอบ	ข-10	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 2	92
ภาพประกอบ	ข-11	ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	92
ภาพประกอบ	ข-12	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 3	96
ภาพประกอบ	ข-13	ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y	96
ภาพประกอบ	ข-14	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วง	100
ภาพประกอบ	ข-15	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1	102
ภาพประกอบ	ข-16	การเสริมเหล็กในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f_c' และ f_y	103
ภาพประกอบ	ข-17	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	106
ภาพประกอบ	ข-18	การเสริมเหล็กในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	107
ภาพประกอบ	ข-19	ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'	110
ภาพประกอบ	ข-20	การเสริมเหล็กในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y	111
ภาพประกอบ	ข-21	การจัดเรียงเหล็กเสริมสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก	115



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

งานก่อสร้างโครงสร้างอาคารส่วนใหญ่ใช้วัสดุที่ก่อสร้างอย่างเช่น เหล็กและคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างเพราะมีความแข็งแรงทนทาน แต่เนื่องจากราคาต่อหน่วยน้ำหนักของเหล็กนั้นสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นส่วนใหญ่จึงนิยมออกแบบและก่อสร้างโดยใช้คอนกรีตเสริมเหล็ก ในประเทศไทยมักออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กกันอยู่ 2 วิธีคือ วิธีหน่วยแรงใช้งาน และวิธีกำลัง ซึ่งหลักการโดยทั่วไปของวิธี หน่วยแรงใช้งาน คือการออกแบบโดยทฤษฎีอิลาสติกที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นภายในองค์อาคารภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกปลอดภัยตามที่ได้กำหนดไว้เท่านั้น ในส่วนของการออกแบบโดยวิธีกำลัง คือทฤษฎีการออกแบบพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงขององค์อาคารภายใต้น้ำหนักบรรทุกสูงสุดก่อนที่องค์อาคารนั้นจะถึงการวิบัติ แต่อย่างไรก็ดีทั้ง 2 วิธีนี้จะทำการสุ่มเลือกขนาดของหน้าตัดก่อนแล้วจากนั้นทำการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง แล้วจึงทำการตรวจสอบความสามารถรับแรงภายในโครงสร้างตามข้อกำหนดที่เลือกไว้แล้ว ถ้าไม่ผ่านการตรวจสอบต้องทำตามขั้นตอนแรกใหม่ตั้งแต่ต้นหรือถ้าผ่านการตรวจสอบอาจไม่ใช่โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด ถ้าต้องการโครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดหรือใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจำเป็นต้อง สุ่มเลือกขนาดของโครงสร้างใหม่แล้วเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ผ่านการตรวจสอบข้อกำหนดแล้ว บางครั้งวิศวกรผู้ออกแบบอาจทำการออกแบบซ้ำเพียง 2-3 ครั้งเท่านั้นแล้วใช้โครงสร้างที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดที่ผ่านข้อกำหนดในการออกแบบ โครงสร้างนั้นจึงอาจไม่ใช่โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุด

โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กจัดเป็นโครงสร้างที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากของโครงสร้างทั้งหมดเนื่องจากต้องรับทั้งโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และในความเป็นจริงแล้วโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ที่เกิดจากการออกแบบนั้นอาจทำให้โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการแตกร้าวได้ในบางครั้งวิศวกรจึงจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน และบางครั้งยังต้องรับโมเมนต์บิด ซึ่งในปัจจุบันราคาวัสดุก่อสร้างมีราคาสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ต้นทุนในงานก่อสร้างสูงขึ้นเป็นอย่างมากโดยเฉพาะราคาเหล็กเส้นที่เป็นวัสดุสำคัญอันดับต้นๆของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และแบบหล่อคอนกรีตที่ส่งผลต่อต้นทุนงานก่อสร้าง ในบางครั้งจำเป็นต้องออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อรับโมเมนต์ดัด แรงเฉือน และบางครั้งยังต้องรับโมเมนต์บิด การออกแบบหน้าตัดคานจะเริ่มจากการออกแบบโมเมนต์ดัดเพียงอย่างเดียวก่อน จากนั้นพิจารณาเหล็กปลอกและเหล็กเสริมเพิ่มเติมเพื่อต้านทานแรงเฉือน ทำให้ต้องใช้ปริมาณเหล็กเส้นที่สูงในการออกแบบ ซึ่งอาจไม่ใช่หน้าตัดที่เหมาะสมที่สุดทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณค่าการก่อสร้างโดยเปล่าประโยชน์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมของคานในกรณีที่มีโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ภายในโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาแก้ปัญหาโดยใช้ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว งานวิจัยนี้จะพิจารณาถึงองค์ประกอบของโครงสร้างระหว่างเหล็กกับคอนกรีตและแบบหล่อคอนกรีตที่น้อยที่สุดที่สามารถรับแรง



กระทำภายในโครงสร้างซึ่งจะคิดกรณีที่คานนั้นรับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้เกณฑ์มาตรฐานการออกแบบวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์โดยวิธีกำลัง ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้จริงอย่างปลอดภัยและประหยัดที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อประยุกต์ใช้วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวในการออกแบบอย่างเหมาะสมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.2.2 ศึกษาเปรียบเทียบการออกแบบอย่างเหมาะสมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว กับวิธีการแบบทั่วไป

1.3. ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตการวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.3.1.1 พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในคานซึ่งประกอบด้วย แรงโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน

1.3.1.2 พิจารณาคานช่วงเดียว คานต่อเนื่องด้านเดียว และคานต่อเนื่องทั้งสองด้าน

1.3.1.3 พิจารณาเพียงคานที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอเท่านั้นโดยคานนั้นจะต้องไม่เป็นคานที่มีลักษณะคานแคบ หรือคานลึก

1.3.1.4 พิจารณาคานช่วงคานซึ่งมีหน้าตัดช่วงความกว้างตั้งแต่ 20, 25 และ 30 และช่วงความสูงตั้งแต่ 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เซนติเมตร

1.3.1.5 พิจารณาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 180, 210, 240, 280 และ 300 กก./ซม.²

1.3.1.6 พิจารณากำลังครากของเหล็กเสริมข้ออ้อย 3000 และ 4000 กก./ซม.² และเหล็กเสริมเส้นกลม 2400 กก./ซม.²

1.3.1.7 กำหนดให้การใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดใช้เหล็กข้ออ้อยเท่านั้นโดยมีขนาดตั้งแต่ 12, 16, 20, และ 25 มม.

1.3.1.8 กำหนดให้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนใช้เหล็กกลมโดยมีขนาดตั้งแต่ 6 และ 9 มม. ส่วนเหล็กข้ออ้อยใช้เหล็กขนาด 10 มม.

1.3.1.9 วิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์โดยวิธีกำลัง

1.3.1.10 ใช้โปรแกรม MATLAB (2010a) ในการวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว และวิธีการแบบทั่วไป



1.3.2 ขอบเขตการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ออกแบบโดยใช้ปริมาณคอนกรีตและปริมาณเหล็กเสริมที่มีราคาต่ำที่สุดโดยขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบโดยวิธีการทั่วไปโดยทั้งสองวิธีนี้ต้องผ่านเกณฑ์มาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์โดยวิธีกำลัง

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวร่วมกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อหาค่าความเหมาะสมดังต่อไปนี้

1.4.1 แนวทางการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนแบบไม่อัดแรงร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว

1.4.2 หน้าตัดของคานคอนกรีตที่ได้รับจากการออกแบบ สามารถนำไปใช้ในการออกแบบและก่อสร้างได้จริงอย่างปลอดภัยและประหยัดที่สุด

1.4.3 ลดระยะเวลาในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยได้รวบรวมทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการทำวิจัยโดยเริ่มจากศึกษาเอกสารงานวิจัยผลงานวิจัยและงานเขียนอื่นๆที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งเป็นสามตอนช่วงแรกเป็นทฤษฎีและมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลังจะมุ่งเน้นอธิบายลักษณะทั่วไปของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือน ตอนสุดท้ายเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวดังนี้

- 2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 2.2 ทฤษฎีการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน
- 2.3 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมโดยขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

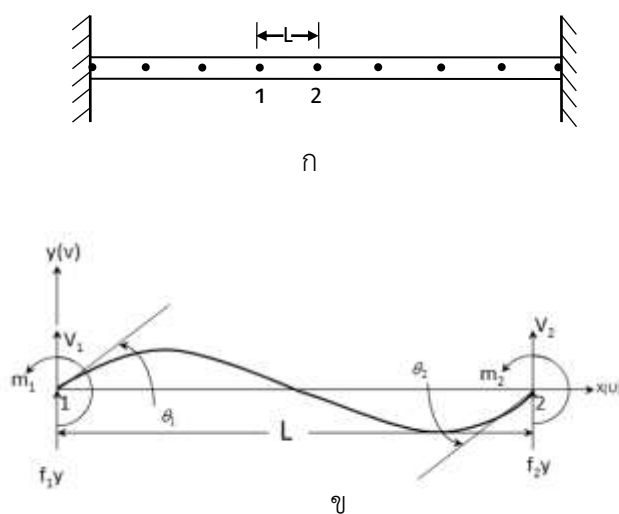
โดยทั่วไปหลักการทฤษฎีวิเคราะห์โครงสร้างคานจะใช้หลักการของพลังงานรวมต่ำสุดเพื่อหาสทิตพีเนสของเอลิเมนต์คาน วิธีหาโมเมนต์ดัด แรงเฉือน แรงปฏิกิริยา การโก่งและแรงในแนวแกนที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์การหาสทิตพีเนสเมทริกซ์รวมและสมการสมดุลของแรงเพื่อเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ปัญหาในลักษณะสองมิติ หรือในลักษณะของความเค้น-ความเครียดระนาบ

2.1.1 การหาสทิตพีเนสเมทริกซ์ของเอลิเมนต์คาน

ตามทฤษฎีทั่วไปของคาน จะสมมุติให้คานอยู่ในสภาพตรงมีพื้นที่หน้าตัดคงที่ตลอดความยาว ขณะที่ถูกแรงกระทำตามแนวขวางหรือในกรณีที่มีโมเมนต์ดัดกระทำ คานจะโก่งตัวเพียงเล็กน้อยคือคานจะโก่งอยู่ในช่วงยืดหยุ่น (Elastic) ความยาวของคานในแนวแกนสะเทินจะไม่เปลี่ยนแปลงและระนาบของหน้าตัดคานก่อนและหลังที่ถูกแรงกระทำจะยังมีสภาพเหมือนเดิม

สมมุติให้แบบจำลองเอลิเมนต์คาน ยาว L ที่จุดต่อ 1 และ 2 มีโมเมนต์ดัด m_1, m_2 และแรงเฉือน f_{1x}, f_{2y} กระทำตามลำดับ ส่วน v_1, v_2 และ θ_1, θ_2 เป็นการกระจัดและมุมเอียง (Slope) ที่จุดต่อ 1 และ 2 ตามลำดับดังภาพประกอบ 1





ภาพประกอบ 2.1 แบบจำลองเอลิเมนต์คานความยาว L

ที่แต่ละจุดต่อ โมเมนต์ตัด m จะมีค่าเป็นบวก ถ้าทิศของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา มุมเอียง θ จะเป็นบวก ถ้ามีทิศทวนเข็มนาฬิกา แรงเฉือนและการกระจัดมีค่าเป็นบวก ถ้ามีทิศทางเดียวกับทิศทางพิกัด y ดังแสดงในภาพประกอบ 1 (ข) จากทฤษฎีเบื้องต้นของคานจะได้สมการ

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = 0 \quad (1)$$

โดยที่ v คือการกระจัดหรือการโก่งของคาน ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับแกน y E คือมอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุและ I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดของคาน ส่วนทางขวามือคือสมการ (1) เท่ากับศูนย์ในการหาสทิงเฟนส ของคานจะไม่สมมุติให้ไม่มีโหลดกระทำระหว่างจุดต่อ 1 และ 2 เนื่องจากแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์คานจะมีตัวแปร 2 ตัวคือ v และ θ หนึ่งเอลิเมนต์ประกอบ 2 จุดต่อซึ่งจะมีตัวแปร 4 ตัว ดังนั้นแบบจำลองการกระจัดหรือการโก่งของเอลิเมนต์คานตลอดความยาว L ควรจะเป็นสมการพอลิโนเมียลกำลังสามคือ

$$V(x) = a_1 + a_2 x + a_3 x^2 + a_4 x^3 \quad (2)$$

โดยมีค่าคงตัว a_1, a_2, a_3 และ a_4 รวม 4 ค่า ซึ่งจะสอดคล้องกับระดับความเสรีของเอลิเมนต์ คาน และโดยอาศัยเงื่อนไขขอบของเอลิเมนต์คาน เราสามารถหาค่าคงตัวได้ดังนี้

$$\text{ที่จุดต่อ 1} \quad v(0) = V_1 = a_1 \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dx} = \theta_1 = a_2 \quad (4)$$



$$\text{และที่จุดต่อ 2 } V(L) = a_1 + a_2L + a_3L^2 + a_4L^3 = v_2 \quad (5)$$

$$\frac{dv(L)}{dx} = a_2 + 2a_3L + 3a_4L^2 = \theta_2 \quad (6)$$

จากสมการ (5) มีค่าคงตัวที่ไม่ทราบค่า 4 ตัว ดังนั้นสามารถจะหาค่า a_1, a_2, a_3 และ a_4 ได้คือ

$$a_1 = v_1, \quad a_2 = \theta_1, \quad a_3 = \frac{3}{L^2}(v_1 - v_2) - \frac{1}{L}(2\theta_1 + \theta_2)$$

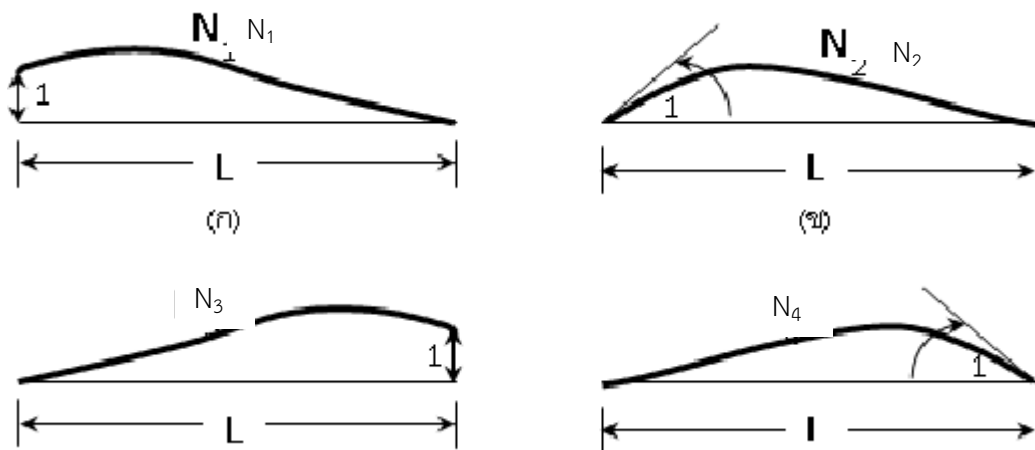
$$\text{และ } a_4 = \frac{2}{L^3}(v_1 - v_2) + \frac{1}{L^2}(\theta_1 + \theta_2)$$

แทนค่า a_1, a_2, a_3 และ a_4 ลงในสมการ (2) ผลที่ได้คือ

$$V(x) = v_1 + \theta_1 x + \left[-\frac{3}{L^2}(v_1 - v_2) - \frac{1}{L}(2\theta_1 + \theta_2) \right] x^2$$

$$+ \left[-\frac{2}{L^3}(v_1 - v_2) - \frac{1}{L^2}(\theta_1 + \theta_2) \right] x^3 \quad (7)$$

สำหรับฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์คาน สามารถหาได้โดยพิจารณาจากภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2.2 ฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์คาน

จากภาพประกอบ 2(ก) สามารถหาฟังก์ชันรูปร่าง $N_1(x)$ ได้คือ สมมุติให้จุดต่อ 1 เคลื่อนที่ในทิศทาง y เท่ากับ 1 หน่วย นั่นคือ $v(0) = 1$ ส่วน $\theta(0) = 0, v(L) = 0$ ดังนั้น จากสมการ 2 จะได้ว่า



$$V(0) = 1 = a_1 \text{ หรือ } a_1 = 1 \quad (8)$$

$$\text{และ } v(L) = 0 = a_1 + a_2L + a_3L^2 + a_4L^3 = v_2 \quad (9)$$

$$\text{เพราะว่า } \theta = v'(x) = a_2 + 2a_3x + 3a_4x^2 \text{ ดังนั้น } v'(0) = a_2 = 0 \quad (10)$$

$$\text{และ } v'(L) = a_2 + 2a_3L + 3a_4L^2 = 0 \quad (11)$$

จากสมการ (8, 9, 10 และ 11) ทั้งสี่สมการ, สามารถหา a_1, a_2, a_3 และ a_4 ได้คือ
 $a_1 = 1, a_2 = 0, a_3 = -3/L^2$ และ $a_4 = 2/L^3$

ดังนั้นฟังก์ชันรูปร่าง $N_1(x)$ คือ

$$N_1(x) = v(x) = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \quad (12)$$

ในกรณีของฟังก์ชันรูปร่าง $N_2(x)$ ดังแสดงภาพประกอบ 2.2 (ข) ก็จะสมมุติให้มุม θ ที่จุดต่อ 1 ซึ่งเคลื่อนเป็นมุมเท่ากับ 1 หน่วย หรือ $v'(0) = \theta(0) = 1$ ส่วน $v(0) = 0, v(L) = 0$ และ $\theta(L) = 0$, จากสมการการกระจัด (2)

$$V_2(0) = 0 = a_1 \text{ หรือ } a_1 = 0 \quad (13)$$

$$V_2'(0) = 1 = a_2 \text{ หรือ } a_2 = 1 \quad (14)$$

$$V_2(L) = 0 = a_1 + a_2L + a_3L^2 + a_4L^3 \text{ และ} \quad (15)$$

$$V_2'(L) = 0 = a_2 + 2a_3L + 3a_4L^2 \quad (16)$$

จากสมการ (13, 14, 15 และ 16) สามารถหาค่า a_1, a_2, a_3 และ a_4 ได้คือ

$$a_1 = 0, a_2 = 1, a_3 = -2/L \text{ และ } a_4 = 1/L^2$$

ดังนั้นฟังก์ชันรูปร่างของภาพประกอบ 2 (ข) คือ

$$N_2(x) = v(x) = x\left(1 - 2\frac{x}{L} + \frac{x^2}{L^2}\right) = x\left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 \quad (17)$$



ในการทำงานเดียวกัน สามารถจะหาฟังก์ชันรูปร่าง $N_3(x)$ และ $N_4(x)$ ในภาพประกอบ 2 (ค) และ 2 (ง) ได้คือ

$$N_3(x) = 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 \text{ และ} \quad (18)$$

$$N_4(x) = \frac{x^2}{L}\left(\frac{x}{L} - 1\right) \quad (19)$$

ถ้าให้ $[N]$ เป็นเมทริกซ์ของฟังก์ชันรูปร่างคือ

$$[N] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \quad (20)$$

และ $\{d\}$ เป็นเมทริกซ์ของการกระจัด v และมุมเอียง θ คือ

$$\{d\} = [v_1 \ \theta_1 \ v_2 \ \theta_2]^T \quad (21)$$

สมการ (2) จึงเขียนในรูปของเมทริกซ์ในเทอมของฟังก์ชันรูปร่าง $[N]$ และการกระจัด $\{d\}$ ได้ดังนี้

$$\{y\} = [N]\{d\} \quad (22)$$

จะเห็นว่าฟังก์ชันรูปร่าง $N_1 = 1$ ที่จุดต่อ 1 และ $N_1 = 0$ ที่จุดต่อ 2 ส่วน N_2 จะเป็นฟังก์ชันกับ θ_1 , คือ $\frac{dN_2}{dx} = \theta_1 = 1$ ที่จุดต่อ 1, ส่วนฟังก์ชัน N_3 และ N_4 ก็มีลักษณะคล้ายกับ N_1 และ N_2 ตามลำดับ

ถ้าพิจารณาเฉพาะส่วน dx ของคานารูป 3 จะเห็นว่าความเครียดในทิศทาง x

$$\varepsilon_x = du/dx \quad (23)$$

u คือการกระจัดในแนวแกนทิศทาง x ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดในแนวแกนทิศทาง x และการกระจัด (การโก่ง) ในทิศทาง y ของคานาคือ

$$-\frac{u}{y} = \frac{dv}{dx} \text{ หรือ } u = -y \frac{dv}{dx} \quad (24)$$

แทน u ในสมการ (24) ลงในสมการ (23)



$$\varepsilon_x = -y \frac{d^2 v}{dx^2} \quad (25)$$

และจากทฤษฎีเบื้องต้นของคานตรงตามภาพประกอบ 2 ที่โค้งเพียงเล็กน้อย

$$m = EI \frac{d^2 v}{dx^2}, \quad V = EI \frac{d^3 v}{dx^3} \quad (26)$$

โดยที่ $m =$ โมเมนต์ดัด

$V =$ แรงเฉือน

โดยอาศัยทฤษฎีเบื้องต้นของคานตรงสมการ (26) และสมการ (4) ก็สามารถจะหาแรงเฉือน f_{1y} , f_{2y} และโมเมนต์ดัด m_1 และ m_2 ที่เกิดขึ้นบนเอलिเมนต์คานได้ดังนี้

$$f_{1y} = v = EI \frac{d^3 v(0)}{dx^3} = \frac{EI}{L^3} (12v_1 + 6L\theta_1 - 12v_2 + 6L\theta_2)$$

$$m_1 = -m = -EI \frac{d^2 v(L)}{dx^2} = \frac{EI}{L^3} (6v_1 + 4L^2\theta_1 - 6v_2 + 2L^2\theta_2)$$

$$f_{2y} = -v = EI \frac{d^3 v(0)}{dx^3} = \frac{EI}{L^3} (-12v_1 - 6L\theta_1 + 12v_2 - 6L\theta_2)$$

และ

$$m_2 = m = EI \frac{d^2 v(L)}{dx^2} = \frac{EI}{L^3} (6Lv_1 + 2L^2\theta_1 - 6Lv_2 + 4L^2\theta_2) \quad (27)$$

สมการ (27) เป็นสมการสมดุลของแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด เหตุที่มีเครื่องหมายลบหน้าสมการที่ 2 และ 3 ของสมการ (27) เพราะทิศทางของโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนในแบบจำลองเอลิเมนต์ของคาน กำหนดทิศทางของโมเมนต์ดัด และแรงเฉือนต่างกัน สมการ (27) เขียนในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} f_{1y} \\ m_1 \\ f_{2y} \\ m_2 \end{Bmatrix} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_1 \\ \theta_1 \\ V_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

หรือ $\{f\} = [k]\{d\}$

ซึ่ง $\{f\} = [f_{1y} \ m_1 \ f_{2y} \ m_2]^T$



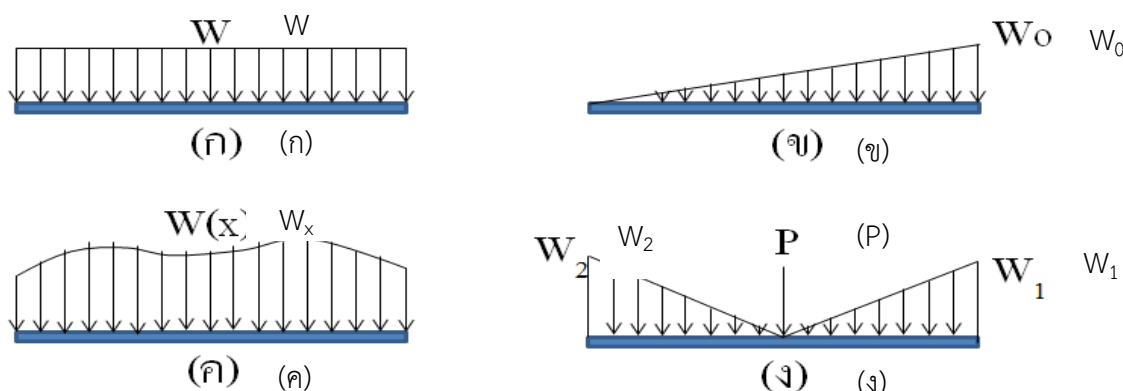
$\{d\} = [v_1 \ \theta_1 \ v_2 \ \theta_2]^T$ และสทิวพีเนสมเทริกซ์ของเอลิเมนต์คาน $[k]$ คือ

$$[k] = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_1 \\ \theta_1 \\ V_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (29)$$

สมการ(16) แสดงให้เห็นว่าแรงเฉือนและโมเมนต์ตัดกับการกระจัดและมุมเอียง สัมพันธ์กันด้วยสทิวพีเนสมเทริกซ์ของเอลิเมนต์ $[k]$

2.1.2 คานที่รับโหลดกระจาย

คานส่วนมากจะรับโหลดลักษณะกระจาย การกระจายของโหลดอาจจะเป็นแบบสม่ำเสมอ กระจายแบบลักษณะสามเหลี่ยมไม่สม่ำเสมอ เช่นแสดงในภาพประกอบ 3 ก, ข และ ค ตามลำดับ ในบางคานอาจจะมีรับโหลดแบบผสมระหว่างโหลดที่กระทำเป็นจุดและโหลดกระจายแสดงในภาพประกอบ 3 (ง)



ภาพประกอบ 2.3 ลักษณะของโหลดกระจายที่กระทำบนเอลิเมนต์

การวิเคราะห์คานที่มีโหลดกระจายกระทำด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เราจะสมมติให้โหลดที่กระจายนั้นรวมกันเป็นจุด, กระทำที่จุดต่อของแต่ละเอลิเมนต์มีโหลด w กระจายสม่ำเสมอกระทำบนเอลิเมนต์คาน เราสามารถจำลองการกระทำของโหลดเหล่านั้นได้ แทนโหลดที่กระจายสม่ำเสมอ w ด้วยแรงกระทำเป็นจุด และโมเมนต์ตัดที่ปลายแต่ละด้านของเอลิเมนต์คาน และเรียกแรงเหล่านี้ว่าแรงสมมูล (Equivalent Forces) แต่คานเป็นแบบยึดปลายแน่น (Fixed Ends) แรงโมเมนต์ตัดที่จำลองจะมีทิศทางตรงข้าม การจำลองโหลดจากโหลดที่กระจาย มาเป็นแรงสมมูล กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์คานนั้น, สามารถทำได้โดยวิธีงานสมมูล (Work Equivalence Method) นั่นคืองานที่เกิดจากโหลดกระจาย



$$W_1 = \int_0^L w(x)v(x)dx \quad (30)$$

ซึ่ง $v(x)$ คือระยะโก่งของคาน และงานที่เกิดจากแรงและโมเมนต์ดัดสมมูล คือ

$$W_2 = m_1\theta_1 + m_2\theta_2 + f_{1y} v_1 + f_{2y} v_2 \quad (31)$$

เราสามารถจะหา m_1 , m_2 , f_{1y} และ f_{2y} ได้โดยกำหนดให้งาน $W_1 = W_2$ ในทอมของการกระจัด θ_1 , θ_2 , v_1 และ v_2 ที่กำหนดให้ ตัวอย่างเช่น สมมุติให้โหนดที่กระทำบนเอลิเมนต์คานเป็นแบบกระจายสม่ำเสมอ, จากสมการ (30) แทนค่า $w(x)$ ด้วย w และใช้ค่า $v(x)$ จากสมการ (4) ดังนั้น

$$\begin{aligned} W_1 = \int_0^L w(x)v(x)dx &= -\frac{wL}{2}(v_1 - v_2) - \frac{wL^2}{4}(\theta_1 + \theta_2) - wL(v_2 - v_1) \\ &+ \frac{wL^2}{3}(2\theta_1 + \theta_2) - \theta_1\left(\frac{wL^2}{2}\right) - v_1(wL) \end{aligned} \quad (32)$$

เพราะว่า $W_1 = W_2$ หรือด้านขวาของสมการ (19) = ด้านขวาของสมการ (20) ถ้ากำหนดให้ที่จุดต่อ 1, $\theta_1 = 1$ ส่วน $\theta_2 = v_2 = v_1 = 0$ ผลที่ได้คือ

$$m_1(1) = -\left(\frac{wL}{4} - \frac{2}{3}wL^2 + \frac{L^2w}{2}\right) = -\frac{wL^2}{12} \quad (33)$$

ในการทำงานเดียวกัน ถ้าให้ $\theta_2 = 1$ และ $\theta_1 = v_1 = v_2 = 0$ ผลที่ได้คือ

$$m_2(1) = \left(-\frac{wL^2}{4} - \frac{wL^2}{3}\right) = -\frac{wL^2}{12} \quad (34)$$

สำหรับ f_{1y} และ f_{2y} ก็หาได้ในทำงานองเดียวกันคือ กำหนดให้ $v_1 = 1$, $v_2 = \theta_1 = \theta_2 = 0$ และ $v_2 = 1$, $v_1 = \theta_1 = \theta_2 = 0$ ตามลำดับ ผลที่ได้คือ

$$f_{1y}(1) = -\frac{wL}{2} + wL - wL = -\frac{wL}{2} \quad (35)$$

$$f_{2y}(1) = \frac{wL}{2} + Lw = -\frac{wL}{2} \quad (36)$$



ส่วนการจำลองแรงและโมเมนต์ตัดสมมูลที่แต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ในกรณีที่มีเอลิเมนต์คานามี โหลดกระจายหรือโหลดกระทำเป็นจุดกระทำ สมการสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างในพิกัดรวมคือ แรงที่แท้จริงจะเท่ากับแรงประสิทธิผล (effective force) ลบด้วยแรงสมมูลหรือ

$$\{F\} = [K]\{d\} - \{F_0\} \quad (37)$$

ซึ่ง $\{F_0\}$ คือแรงสมมูลที่กระทำที่จุดต่อในพิกัดรวมของโครงสร้าง ส่วนในภาคผนวก ง. แรงปฏิกิริยา $\{F_0\}$ คือแรงที่กระทำที่จุดต่อของเอลิเมนต์ในพิกัดเฉพาะที่ ส่วน $\{F\}$ นั่นก็คือแรงซึ่งรวมทั้งแรงกิริยาและโมเมนต์ตัดในพิกัดรวม ในกรณีที่ไม่มีแรงหรือโมเมนต์ตัดภายนอกอื่นกระทำ ($F = 0$), ดังนั้นสมการ (37)

$$\{F_0\} = [K]\{d\} \quad (38)$$

ซึ่งถ้าทราบ $\{F_0\}$ และ $[K]$ ก็สามารถหาค่า $\{d\}$ ได้โดยคูณด้วย $[K]^{-1}$ ตลอดเช่นในกรณี 4

$$\{F_0\} = [-wL/2 - wL^2/12 \quad -wL/2 \quad wL^2/12]^T$$

ในกรณีของพิกัดเฉพาะที่ แรงที่แท้จริงที่จุดต่อต่าง ๆ $\{F\}_{act}$ ของเอลิเมนต์คานาของโครงสร้างก็คล้ายกับสมการ (37) คือ

$$\{F\}_{act} = [k]\{d\} - \{f_0\} \quad (39)$$

ซึ่ง $\{f_0\}$ คือแรงสมมูลในพิกัดเฉพาะที่ของคานาเอลิเมนต์ และ $[k]\{d\} = \{f\}_{eff}$ คือแรงประสิทธิผลที่เกิดขึ้นที่จุดต่อของเอลิเมนต์ในพิกัดเฉพาะที่

2.2 ทฤษฎีการออกแบบคานาคอนกรีตเสริมเหล็กรับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน

ตามทฤษฎีการออกวิธีกำลังจะพิจารณาพฤติกรรมขององค์อาคารในการรับน้ำหนักบรรทุกไปจนถึงสภาวะการวิบัติ ทำให้สามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าองค์อาคารที่ออกแบบจะสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้มากจนวิบัตินั้นเป็นเท่าไร แต่เดิมจึงเรียกวิธีนี้ว่า วิธีกำลังประลัย (Ultimate Strength Design, USD) ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นจะไม่ให้โครงสร้างนั้นรับน้ำหนักถึงค่าที่ทำให้เกิดการวิบัตินั้น น้ำหนักบรรทุกที่ใช้ในการออกแบบจะคูณเพิ่มค่าขึ้นมา ในขณะที่กำลังขององค์อาคารจะถูกคูณลดค่าลงมาแล้วจึงทำการคำนวณออกแบบ

2.2.1 การคำนวณออกแบบตั้งสมมุติฐานดังนี้

2.2.1.1 ความเครียดในคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ตำแหน่งเดียวกันมีค่าเท่ากันโดยที่แรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตมีอย่างเพียงพอ

2.2.1.2 ความเครียดในคอนกรีตแปรผันเป็นเส้นตรงตามระยะจากแกนสะเทิน



2.2.1.3 โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กทุกเกรดใช้ $E_s = 2.04 \times 10^6$ กก./ซม.²

2.2.1.4 ระบายหน้าตัดยังคงเป็นระนาบหลังการเสียรูปทรงจากการรับน้ำหนัก

2.2.1.5 กำลังดึงของคอนกรีตจะไม่นำมาคิดเนื่องจากมีค่าน้อยเพียงร้อยละ 10 ของกำลังอัด และการแตกร้าวทำให้คอนกรีตมีประสิทธิภาพลดลง

2.2.1.6 ณ จุดวิบัติความเครียดมาที่สุดของคอนกรีตถูกสมมุติให้เท่ากับ 0.003

2.2.1.7 หน้าตัดคานคอนกรีตสามารถรับแรงบิดได้ ไม่เกินร้อยละ 25 ของกำลังต้านทานแรงบิดหากเกินจะต้องมีการเสริมเหล็กรับแรงบิด

2.2.2 การออกแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว

ในการออกแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยมรับแรงดัดโดยเสริมเพียงเหล็กรับแรงดึงทำได้โดยพิจารณา ค่า b , d และ A_s จากค่าโมเมนต์ดัดที่ต้องการให้หน้าตัดรับ M_u และคุณสมบัติของวัสดุ f'_c และ f_y ขั้นตอนในการออกแบบคือเลือกขนาดคานก่อนแล้วคำนวณปริมาณเหล็กเสริมที่ต้องการซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.2.1 เลือกขนาดความกว้าง b คำนวณ คำนวณหาขนาดความสูง h

2.2.2.2 วิเคราะห์โครงสร้างหาค่าโมเมนต์ ที่เกิดขึ้น

2.2.2.3 กำหนดค่ากำลังอัดคอนกรีต กำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

2.2.2.4 คำนวณสัมประสิทธิ์ความต้านทานโมเมนต์ดัด R_n ที่ต้องการจากสมการ

$$R_n = M_n / bd^2 = M_u / \phi bd^2 \quad (40)$$

2.2.2.5 คำนวณอัตราส่วนเหล็กเสริมจากสมการ

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}} \right] \quad (41)$$

2.2.2.6 ตรวจสอบ ρ_{min} และ ρ_{max} ปริมาณเหล็กเสริมในคานต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{min}) และต้องไม่มากกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{max})

2.2.2.7 ตรวจสอบความสามารถในการรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนเพื่อให้แน่ใจว่ารูปแบบเหล็กเสริมที่เลือกมา สามารถรับแรงได้ตามค่าโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้น จึงต้องตรวจสอบว่าหน้าตัดคานและเหล็กเสริมที่เลือกสามารถรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนได้โดย

$$M_u \leq \phi M_n \quad (42)$$

2.2.3 การออกแบบคานคอนกรีตใช้เหล็กเสริมรับทั้งแรงดึงและแรงอัด

ในการออกแบบคานที่มีเหล็กเสริมรับแรงดึงและเหล็กเสริมรับแรงอัด จะออกแบบได้ก็ต่อเมื่อกำลังรับโมเมนต์ดัดสูงสุดสำหรับคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว หรือ $M_u \leq$



ϕM_n หรือว่า ρ ที่เลือกใช้มีค่ามากกว่า $0.75 \rho_b$ หรือว่าหากต้องการรับโมเมนต์ดัดสูงสุดมากกว่านี้

2.2.3.1 กำหนด b, d, d', f'_c, f_y

2.2.3.2 วิเคราะห์โครงสร้างหาค่าโมเมนต์ ที่เกิดขึ้น M_u

2.2.3.3 ตรวจสอบว่าคานที่ออกแบบต้องมีเหล็กเสริมรับแรงอัดหรือไม่ โดยหาโมเมนต์ดัดของคานที่สภาวะสมดุลในสมการ

$$\theta M_{nbal} = \phi 0.85 f'_c b a_{max} \quad (43)$$

ถ้า $\theta M_{nbal} < M_u$ จะต้องออกแบบคานเป็นแบบเสริมเหล็กรับแรงดึงและแรงอัด ถ้า $\theta M_{nbal} > M_u$ จะต้องออกแบบคานเป็นแบบเสริมเหล็กรับแรงดึงอย่างเดียว

2.2.3.4 พิจารณาให้ $M'_u = M_u - \theta M_{nbal}$ เนื้อที่หน้าตัดเหล็กเสริมรับแรงอัดซึ่งสมมติว่า $f'_s = f_y$ และต้องตรวจสอบภายหลัง

2.2.3.5 เลือกปริมาณเหล็กเสริม จำนวน ขนาด $A_s = A_{s1} + A_{s2}$, $A_{s2} = A'_s$ ตรวจสอบ d, d' และตรวจสอบว่าเหล็กเสริมรับแรงอัดมีกำลังถึงจุดครากหรือไม่ ถ้า $\epsilon'_c < \epsilon_y$ ต้องหา f'_s ที่แท้จริง ถ้ามากกว่าก็ทำการตรวจสอบกำลังของหน้าตัด ตามสมการ

$$\theta M_n = M'_u + \theta M_{nbal} \geq M_u \quad (44)$$

$$\theta M_n = \left[(A_s f_y - A'_s f'_s) \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [A'_s f'_s (d - d')] \geq M_u \quad (45)$$

2.2.3.6 เข้าสู่กระบวนการคำนวณออกแบบเหล็กเสริมทางขวางในคานคอนกรีตรับแรงเฉือนต่อไป

2.2.4 กำลังต้านแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

จำนวนของเหล็กเสริมทางขวาง ณ หน้าตัดระหว่างขอบของที่รองรับและที่หน้าตัดซึ่งห่างออกมาเป็นระยะเท่ากับ d ให้ใช้เท่ากับที่ต้องการตรงหน้าตัดวิกฤตนั้นและให้ยึดปลายทั้งสองของเหล็กเสริมทางขวางเพื่อให้มีกำลังถึงจุดครากตามต้องการ และในทางปฏิบัติจะให้มีระยะเรียงห่างกันไม่น้อยกว่า 10 ซม. ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการทำงาน

2.2.4.1 ปริมาณของเหล็กเสริมทางขวางในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาตรฐาน ACI หรือ วสท. กำหนดปริมาณของเหล็กเสริมทางขวาง (A_v) ดังนี้

2.2.4.1.1 ปริมาณของเหล็กเสริมทางขวางอย่างน้อย $A_{v \min} \geq 3.5 b_w s / f_y$ ซม.². นั้นหมายความว่า ระยะห่างมากที่สุดของเหล็กเสริมทางขวางต้องไม่เกินกว่า $A_v f_y / 3.5 b_w$ ซม.



2.2.4.1.2 ให้เหล็กเสริมทางขวางมีกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด ที่มีได้ไม่เกินกว่า $2.1\sqrt{f'_c} b_w d$ กก. ซึ่งเสมือนเป็นการกำหนดปริมาณที่มากที่สุดของเหล็กเสริมทางขวางนั่นเอง ฉะนั้น เมื่อเสริมเหล็กขวางด้วยเหล็กดัดจะต้องมีปริมาณของเหล็กดัดไม่เกิน

$$A_{v\min} \leq \frac{2.1(\sqrt{f'_c} b_w s)}{f_y} \quad (46)$$

เมื่อ b_w เป็นความกว้างของตัวคาน ซม.

S เป็นระยะเรียงห่างกันของเหล็กเสริมรับแรงเฉือน ซม.

อนึ่ง เมื่อแรงเฉือนประลัย V_u มีค่าเท่ากับกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต θV_c ซึ่งในทางทฤษฎีหมายความว่าไม่ต้องใช้เหล็กเสริมทางขวางเพื่อต้านทานแรงเฉือนแต่อย่างใด แต่เพื่อเป็นการป้องกันมิให้คานมีพฤติกรรมแบบเปราะเนื่องจากการเฉือน ตามมาตรฐาน ACI code หรือ วสท. จึงกำหนดให้เสริมเหล็กทางขวางในช่วงที่ $\theta V_c \geq V_u \geq \theta V_c / 2$ โดยใช้ปริมาณเท่ากับ $A_{v\min}$

การคำนวณออกแบบเหล็กเสริมทางขวางในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการพิจารณาคานที่ทำด้วยวัสดุเนื้อเดียวกันการคำนวณและออกแบบเหล็กเสริมทางขวางในคานคอนกรีตจากการคำนวณออกแบบเหล็กเสริมทางขวาง เพื่อต้านทานแรงเฉือน พิจารณาได้จากสมการ

$$V_u \leq \theta V_n \text{ (ตัวคูณลดกำลัง } \theta = 0.85) \quad (47)$$

ส่วนที่เกินกว่าคอนกรีตสามารถรับได้ กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุด

$$V_n = V_c + V_s \quad (48)$$

$$V_c = 0.53(\sqrt{f'_c} b_w d) \quad (49)$$

เมื่อ V_c คือกำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของคอนกรีต

$$V_s = A_v f_y d / s \quad (50)$$

เมื่อ V_s คือ กำลังต้านทานแรงเฉือนสูงสุดของเหล็กเสริมทางขวาง

ดังนั้น $V_u \leq \theta (V_c + V_s)$ หรือ $\theta V_s \geq V_u - \theta V_c$



2.2.4.2 จากหลักการข้างต้นสามารถที่นำไปคำนวณออกแบบเหล็กเสริมทางขวางได้ ดังนี้

1) จากคานคอนกรีตกำหนด b_w, d, f'_c, f_y ให้ค่าแรงเฉือนที่กระทำ V_u ซึ่งเกิดจากน้ำหนักบรรทุกที่กระทำคูณด้วยตัวคูณเพิ่มค่าแล้ว

2) หากำลังต้านทานแรงเฉือนของคอนกรีต θV_c โดยที่ $V_c = 0.53(\sqrt{f'_c} b_w d)$

3) ถ้าค่า $V_u - \theta V_c < 2.1(\sqrt{f'_c} b_w d)$ ให้ทำการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดใหม่ และถ้า $V_u < \theta V_c / 2$ ไม่ต้องเสริมเหล็กทางขวาง

4) ถ้า $\theta V_c / 2 < V_u < \theta V_c$ ให้ใช้ปริมาณเหล็กเสริมทางขวางอย่างน้อยเท่ากับ $A_{v \min} \geq 3.5 b_w s / f_y$ โดยเรียงเหล็กผูกตั้งห่างกันได้ไม่เกิน $A_v f_y / 3.5 b_w$ หรือ $0.5d$ หรือ 60 ซม.

5) ถ้า $V_u > \theta V_c$ แต่ $V_u - \theta V_c \leq 1.1(\sqrt{f'_c} b_w d)$ หาระยะเรียงของเหล็กผูกตั้งจากสมการ $s = A_v f_y d / N_s - \theta V_c$ ซึ่งมีระยะเรียงห่างกันได้ไม่เกิน $0.5d$ หรือ 60 ซม. แต่ถ้า $1.1(\sqrt{f'_c} b_w d) < V_u - \theta V_c \leq 2.1(\sqrt{f'_c} b_w d)$ ให้ระยะเรียงของเหล็กผูกตั้งห่างกันได้ไม่เกิน $0.25d$ หรือ 30 ซม.

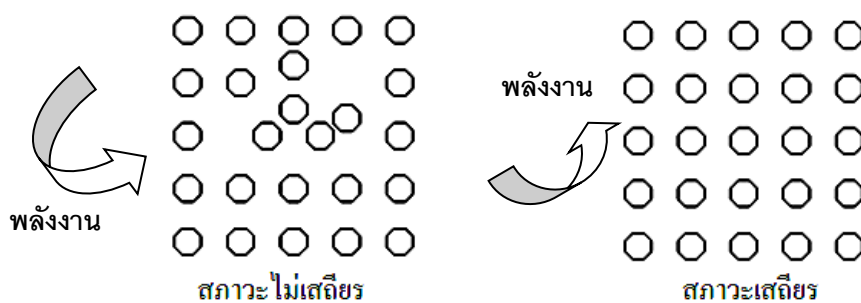
ทั้งนี้ค่าของหน่วยแรงที่ยอมให้ใช้ต้องไม่เกินกว่า 27 กก./ซม.² และกำลังที่จุดคราก f_y ของเหล็กเสริมทางขวางที่ใช้ต้องไม่เกินกว่า 4200 กก./ซม.²

2.3 ทฤษฎีการหาค่าที่เหมาะสมโดยขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว

ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) ถูกค้นพบในปี ค.ศ.1980 โดย Kirkpatrick และคณะ (1982) และ Cerny (1985) ได้แนะนำความคิดของการหลอหลอมมาใช้ในการหาความเหมาะสม โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของกระบวนการหลอหลอมของแข็งและการแก้ปัญหาความเหมาะสมที่ซับซ้อน ซึ่งกล่าวว่า Simulated Annealing เป็นเทคนิคการคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สโตคาสติก ที่ใช้หลักการทางสถิติ เพื่อหาคำตอบที่ใกล้เคียงที่สุดสำหรับการแก้ปัญหาที่เหมาะสมทั้งหมด และเป็นปัญหาที่มีความซับซ้อนที่ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยกระบวนการความเหมาะสมอื่นๆ (Simulated Annealing) มีการใช้อย่างกว้างขวางในการแก้ปัญหา การจัดวาง และปัญหาการเดินทาง Bohachevsky (1986) กล่าวว่าอะตอมของโลหะจะอยู่ในโครงข่ายที่มีพลังงานศักย์ต่ำสุด เมื่ออุณหภูมิเย็นถึงจุดเยือกแข็ง อะตอมจำนวนมากจะเกิดการจัดเรียงตัวทำให้สภาวะสุดท้ายมีพลังงานต่ำสุดเฉพาะที่ แทนที่จะอยู่ในสภาวะต่ำสุดทั้งหมด โดยวิธีการเพิ่มความร้อนและทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ โดยกระบวนการดังกล่าวก็คือการหลอมโลหะ ดังนั้นจึงเรียกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้ว่า Simulated Annealing โดย Ottem และ Ginneken (1989) กล่าวว่า Simulated Annealing มีความลึกซึ้งและการใช้ประโยชน์ของการต่อเนื่องกันระหว่างหลักการทางสถิติและการหาความเหมาะสมที่ซับซ้อน นั่นคือ Simulated Annealing เป็นกระบวนการที่มีพื้นฐานมาจาก Metropolis Algorithm โดยอาศัยหลักความน่าจะเป็นช่วยให้คำตอบที่ได้ไม่ตกอยู่ในค่าที่เหมาะสมเฉพาะที่หลักการของขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว



หลักการของขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithm) พัฒนาขึ้นโดยการเลียนแบบพฤติกรรมการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึก จากการเรียงตัวที่ไม่เป็นระเบียบไปสู่การเรียงตัวที่เป็นระเบียบโดยค่อยๆ ปล่อยพลังงานออกมาเรื่อยๆ แสดงดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 การเรียงตัวของโครงสร้างผลึกตามขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว

ในตอนแรกสถานะของระบบจะเป็นแบบไม่เสถียรซึ่งภายในระบบมีพลังงานอยู่มากและการจัดเรียงของอะตอมภายในโครงสร้างจะเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ เมื่อพลังงานค่อยๆ ลดลงระบบจะพยายามปรับไปสู่สถานะที่สมบูรณ์ ซึ่งจะเรียงตัวเป็นระเบียบมากที่สุด

ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing) เป็นกระบวนการที่มีพื้นฐานมาจาก Metropolis Algorithm กล่าวคือเป็นกระบวนการทางกายภาพที่จะทำให้วัตถุแน่นขึ้น โดยการนำของแข็งใส่ลงในเตาหลอมเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับอนุภาคของแข็งที่อยู่ในสถานะพลังงานต่ำ ในขณะที่เป็นของแข็งนั้นอนุภาคของแข็ง จะมีการจัดเรียงตัวเองอย่างสุ่ม แต่ในสถานะที่อนุภาคจะถูกเรียงในโครงข่ายที่แข็งแรงมากและพลังงานต่ำสุด กระบวนการนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ (Barker and Henderson, 1976; Kirkpatrick et al., 1983)

1. การเพิ่มอุณหภูมิให้กับเตาหลอมจนถึงค่าสูงสุดที่ทำให้ของแข็งหลอมเหลว
2. การลดอุณหภูมิอย่างระมัดระวังในเตาหลอมจนกระทั่งอนุภาคของของแข็งจัดเรียงตัวใหม่อยู่ในสถานะพื้นหรือ สถานะที่อนุภาคของของแข็งที่มีพลังงานต่ำสุด

Toda และคณะ (1983) ได้แนะนำกระบวนการแบบจำลองสำหรับหาความสมดุลของอุณหภูมิที่ให้กับของแข็งในเตาหลอม กระบวนการนี้อยู่บนพื้นฐานของ Monte Carlo technique กล่าวคือถ้าให้พลังงานในปัจจุบันของของแข็งคือ E_i และโดยกระบวนการต่างๆ ก่อให้เกิดพลังงานใหม่ E_j พบว่าถ้าผลต่างพลังงานทั้งสองสถานะ $E_j - E_i$ น้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์จะได้ว่า ให้นำค่าพลังงานใหม่ E_j แทนที่ค่าพลังงานเดิม E_i ถ้าผลดังกล่าวมากกว่าศูนย์ค่าพลังงานใหม่ E_j ขึ้นกับสมการความน่าจะเป็นดังนี้

$$P_T = \exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B T}\right) \quad (51)$$

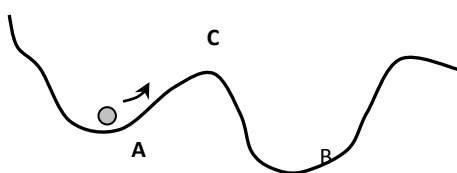
โดยที่ P_T = ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ



T = อุณหภูมิของการหลอมเหลว

k_B = ค่าคงที่ Boltzmann

ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing) เป็นเทคนิคการหาคำตอบแบบสุ่ม ซึ่งเลียนแบบวิธีการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะ โดยใช้แนวคิดของ อุณหพลศาสตร์ของกระบวนการการอบอ่อนจำลอง ซึ่งเป็นขั้นตอนการลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ ระหว่างการหลอมเพื่อให้ได้โลหะที่อยู่ในสภาวะเหมาะสมเป็นโลหะที่เหนียว ไม่เปราะ ซึ่งแนวคิดนี้ได้อธิบายแสดงดังภาพประกอบ 5 โดยแสดงเป้าหมายของการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม คือ ค่าที่น้อยสุด



ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างปัญหาการค้นหาคำตอบที่เหมาะสม

ดังนั้นเพื่อให้เกิดความเข้าใจในกระบวนการ วิธีการอบอ่อนจำลองสามารถอธิบายได้จากการอบอ่อนของโลหะซึ่งเป็นการหลอมโลหะจนละลายเป็นการทำให้โลหะอยู่ในสถานะที่มีพลังงานสูง แล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงทีละน้อยจนโลหะเปลี่ยนกลับสู่สถานะของแข็ง ซึ่งเป็นสถานะที่มีพลังงานต่ำลงและมีความเสถียร แต่ก็มีแนวโน้มจะเป็นที่สสารจะเปลี่ยนจากสถานะที่มีพลังงานต่ำไปยังสถานะที่มีพลังงานสูงอยู่บ้างซึ่งความน่าจะเป็นนี้สามารถคำนวณได้โดยสมการ

$$p = e^{-\Delta E/kT} \quad (52)$$

โดยที่ ΔE = ระดับพลังงานที่เปลี่ยนไป

T = อุณหภูมิ

k = ค่าคงที่ (Boltzmann)

p = ความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสถานะ

การเปลี่ยนแปลงจากระดับพลังงานสูงไปต่ำนั้น มีความน่าจะเป็นในช่วงเริ่มต้นมากกว่า ในช่วงปลายของกระบวนการอบอ่อน อัตราการลดอุณหภูมิการอบเหนียวเรียกว่า กำหนดการอบอ่อน (Annealing Schedule) การกำหนดการการอบอ่อนเร็วเกินไป การลู่เข้าคำตอบอาจจะเร็วเกินไป ทำให้ระบบลู่เข้าสู่คำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น ในทางตรงกันข้ามถ้าช้าเกินไปก็ทำให้เสียเวลาได้ในการคำนวณมากเกินไป การเลือกตารางกำหนดการอบอ่อนหลายๆ วิธีถูกนำเสนอไม่ว่าจะเป็นวิธีการใช้ลูกโซ่มาร์คอฟ (Markov chain) ขนาดจำกัดในการลดอุณหภูมิ Isaacson and Madsen (1976) หรือวิธีการปรับอุณหภูมิ Geman และ Geman (1984)



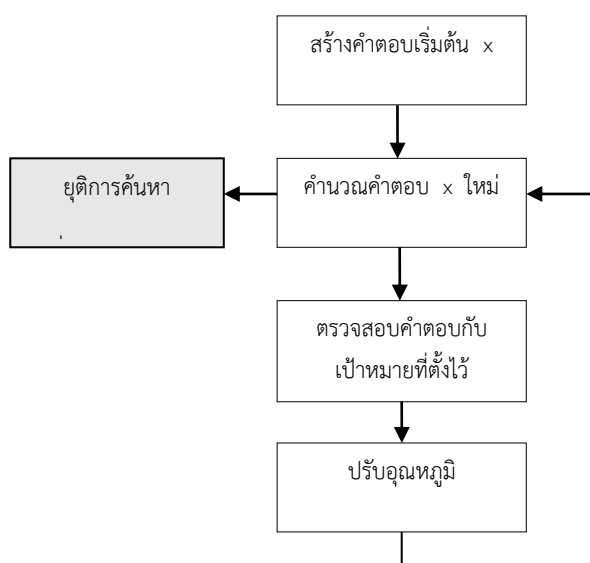
2.3.1 ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวแบ่งองค์ประกอบที่สำคัญออกเป็น 4 อย่างดังนี้

2.3.1.1 รูปแบบของคำตอบที่ต้องการค้นหา

2.3.1.2 ตัวกำเนิดสุ่ม (Random generator) หรือตัวปฏิบัติการค้นหาสำหรับเดินหรือเคลื่อนย้ายคำตอบของระบบไปยังคำตอบใหม่

2.3.1.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ของระบบ

2.3.1.4 การจัดการการอบอ่อน (annealing schedule) ซึ่งเป็นส่วนใช้ปรับค่าอุณหภูมิและกำหนดเวลาที่จะให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6



ภาพประกอบ 2.6 แผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว

แผนผังการทำงานของขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. สุ่มค่าเริ่มต้นเวกเตอร์คำตอบ x ในปริภูมิค้นหา โดยค่าเวกเตอร์คำตอบ x นี้สามารถพิจารณาว่าเป็นสถานะของระบบ
2. กำหนดตารางการอบอ่อนสำหรับค่าพารามิเตอร์อุณหภูมิ T และตั้งค่าเริ่มต้นของ T ไว้ที่ค่าสูงอย่างเพียงพอ
3. คำนวณหาเวกเตอร์คำตอบใหม่ $x_p = x + \Delta x$ โดยที่ Δx เป็นการเปลี่ยนแปลงที่ถูกนำเสนอต่อระบบ
4. คำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $\Delta f = f(x_p) - f(x)$
5. ทำการคำนวณหาว่าควรจะใช้ x_p เป็นคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบหรือไม่ กล่าวคือใช้ความน่าจะเป็นในการตัดสินใจที่จะเปลี่ยนสถานะตามเงื่อนไขดังสมการ

$$\Pr(x \rightarrow x_p) = \begin{cases} 1 & \text{if } \Delta f < 0 \\ e^{-\Delta f/T} & \text{if } \Delta f \geq 0 \end{cases} \quad (53)$$



โดยที่ T แทนอุณหภูมิของระบบ ในกรณีที่ $\Delta f \geq 0$ ค่าตัวเลขสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) η จะถูกเลือกในช่วง $[0, 1]$ ถ้า $\Pr(x \rightarrow x_p) > \eta$ แล้ว เวกเตอร์คำตอบ x_p จะถูกใช้เป็นคำตอบหรือสถานะใหม่ของระบบ มิฉะนั้นแล้วให้คงคำตอบหรือสถานะเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยปกติแล้วจำนวนครั้งของการทำซ้ำจะถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

2.3.1.5 ขั้นตอนข้างต้นจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งระบบเข้าสู่จุดสมดุล ที่ซึ่งรู้ได้จากจำนวนครั้งของการเปลี่ยนสถานะไม่มีนัยสำคัญเพียงพอ สถานะดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีคำตอบหรือสถานะเข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบเฉพาะถิ่น โดยปกติแล้ว จำนวนครั้งของการทำซ้ำจะถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า

2.3.1.6 ทำการปรับอุณหภูมิ T ตารางจัดการรอบอ่อน แล้วเริ่มทำขั้นตอนทำซ้ำทั้งหมดใหม่อีกครั้ง กระบวนการทั้งหมดสามารถยุติได้เมื่อค่าอุณหภูมิ T ค่าเป็นศูนย์

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซึ่งขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนี้ได้ถูกคิดค้นขึ้นโดย John Holland (1973) ได้นำแนวคิดหลักการวิวัฒนาการและกระบวนการคัดเลือกแบบเป็นธรรมชาติของ Charles Darwin มาแก้ไข ปัญหาการเลือกอาชีพ โดยได้สร้างทฤษฎีการเลือกอาชีพ

ต่อมา Goldberg (1989) ได้นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) มาพัฒนาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษาเทอร์โบปาสคาลซึ่งเป็นภาษาอย่างง่ายเรียกว่า (Simple Genetic Algorithms) โดยแทนค่าของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบเลขฐานสองคือ 0000001101, 0101010010, 1111111000, 1010100111 ทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในกระบวนการทำงานของเจเนติกอัลกอริทึมและสามารถนำไปพัฒนาใช้กับการแก้ปัญหาในงานวิทยาศาสตร์ การแพทย์ และวิศวกรรมด้านต่างๆ เช่น ฟิสิกส์ วิศวกรรมไฟฟ้า เครื่องกล โครงสร้าง และเคมี และอีกมากมาย

Jenkins (1991) ได้เสนอการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวแปรในโครงสร้างแบบ 2 มิติเพื่อหาน้ำหนักของโครงสร้างที่น้อยที่สุด ซึ่งสามารถรับน้ำหนักโครงสร้างได้อย่างปลอดภัยตามมาตรฐาน โดยการใช้ฟังก์ชันลงโทษ (Penalty Function) แสดงในรูปแบบฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic Function) ซึ่งแบ่งประเภทของโครงสร้างที่ศึกษาดังต่อไปนี้

โครงสร้างที่เป็นโครงข้อหมุน (Truss)

โครงสร้างหลังคาแบบคานโครงข้อหมุน (Truss-Beam Roof)

โครงสร้างผนังบาง (Thin-Walled CrossSection)

ทำให้สามารถลดจำนวนประชากรของการสุ่มตัวอย่างซึ่งทำให้ลดระยะเวลาในการคำนวณได้เป็นอย่างมาก Saka (1992) ได้นำเสนอวิธีการออกแบบที่เหมาะสมของกำแพงรับแรงเฉือนเป็นผนังเสริมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กของอาคารสูงโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Ohsaki (1995) ได้พัฒนาขั้นตอนวิธีพันธุกรรมสำหรับการหารูปแบบของโครงข้อหมุนโดยอาศัยยีนที่ใช้แทนรูปแบบของโครงสร้างเพื่อใช้กำหนดการมีอยู่ของชิ้นส่วนนั้นในโครงสร้างประกอบเข้ากับโครโมโซมที่ใช้แทนขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนการพัฒนาโครงสร้างจะอยู่ในรูปแบบของการลดจำนวน



ชิ้นส่วนภายในโครงสร้างพร้อมๆกับการเลือกขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วนที่เหลืออยู่จนทำให้โครงสร้างที่ได้มีรูปร่างที่แตกต่างจากโครงสร้างเดิมทั้งจำนวนและขนาดหน้าตัดของชิ้นส่วน Adamu และ Karihaloo (1995); Balling และ Yao (1997); Fadaee และ Grierson (1996); Huanchun และ Zheng (1985) ได้นำเสนอการออกแบบที่เหมาะสมโดยนำฟังก์ชันราคาของวัสดุในการหล่อแบบคอนกรีตผนังรับแรงเฉือนโดยไม่คำนึงถึงค่าใช้จ่ายเสริมพิจารณาเพียงปริมาณเหล็กและคอนกรีตที่ใช้ในโครงสร้าง Kirsch (1997) ได้นำเสนอ 2 ระดับการเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นคอนกรีตอัดแรงโดยการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบลวดอัดแรงในสมการเชิงเส้นทำให้แก้ไขปัญหาได้ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้นเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างเพียงครั้งเดียวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด Govindaraj และ Ramasamy (2005) ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีพันธุกรรมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กตามข้อกำหนดมาตรฐานประเทศอินเดีย ซึ่งนำเสนอฟังก์ชันจุดประสงค์คือต้นทุนรวมทั้งหมดขององค์อาคาร คือ คาน พื้น เสา และฐานราก



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงขั้นตอนการศึกษาสำหรับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา โดยนำเอาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในงานก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กมาสร้างฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งจะมุ่งเน้นลักษณะทั่วไปของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วงเดียวไปจนถึงคานคอนกรีตต่อเนื่องกันสามช่วงที่รับโมเมนต์ดัด และการเงื่อนไขที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลและการวิจัย
- 3.2 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย
- 3.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 3.4 การคำนวณออกแบบโดยวิธีทั่วไป
- 3.5 การคำนวณการออกแบบร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว
- 3.6 รายละเอียดของวัสดุ, ค่าแรง, ตัวแปรสุ่มที่ใช้ในการออกแบบ และตัวอย่างการ

ทดสอบ

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลและการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งคุณสมบัติของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้สร้างแบบจำลองในการดำเนินงานวิจัยมีรายละเอียดดังนี้

- 3.1.1 ระบบปฏิบัติการ Microsoft Window 7
- 3.1.2 หน่วยประมวลผลกลาง Dual-Core CPU E5200 2.5 GHZ
- 3.1.3 หน่วยความจำแรม DDR2 ขนาด 4 กิกะไบต์
- 3.1.4 ซอฟต์แวร์ในการสร้างข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบ Microsoft Excel 2010
- 3.1.5 ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์แบบจำลองใช้โปรแกรม MATLAB Version 2010a

3.2 ขอบเขตของการดำเนินการวิจัย

ขอบเขตทั่วไปของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวไปจนถึงคานคอนกรีตต่อเนื่องกันสามช่วงที่รับโมเมนต์ดัด และการเงื่อนไขที่แตกต่างกัน ความยาวช่วงคานความกว้างของคาน และความลึกช่วงคานที่ต้องการศึกษามีรายการดังต่อไปนี้คือ

- 3.2.1 พิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในคานซึ่งประกอบด้วย แรงโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน
- 3.2.2 พิจารณาคานช่วงเดียว คานต่อเนื่องด้านเดียว และคานต่อเนื่องทั้งสองด้าน
- 3.2.3 พิจารณาเพียงคานที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้ารับน้ำหนักบรรทุกทุกแผ่กระจาย

สม่าเสมอเท่านั้นโดยคานนั้นจะต้องไม่เป็นคานที่มีลักษณะคานแคบ หรือคานลึก



3.2.4 พิจารณาช่วงคานซึ่งมีหน้าตัดช่วงความกว้างตั้งแต่ 20, 25 และ 30 และช่วงความสูงตั้งแต่ 30, 35, 40, 45, 50, 55 และ 60 เซนติเมตร

3.2.5 พิจารณาค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต 180, 210, 240, 280 และ 300 กก./ซม.²

3.2.6 พิจารณากำลังครากของเหล็กเสริมข้ออ้อย 3,000 และ 4,000 กก./ซม.² และเหล็กเสริมเส้นกลม 2400 กก./ซม.²

3.2.7 กำหนดให้การใช้เหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัดใช้เหล็กข้ออ้อยเท่านั้นโดยมีขนาดตั้งแต่ 12, 16, 20, และ 25 มม.

3.2.8 กำหนดให้เหล็กเสริมรับแรงเฉือนใช้เหล็กกลมโดยมีขนาดตั้งแต่ 6 และ 9 มม. ส่วนเหล็กข้ออ้อยใช้เหล็กขนาด 10 มม.

3.2.9 วิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนท์เอลิเมนต์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับโมเมนต์ดัด และแรงเฉือน ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ โดยวิธีกำลัง

3.2.10 ใช้โปรแกรม MATLAB (2010a) ในการวิเคราะห์และออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้ขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว และวิธีการแบบทั่วไป

3.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาต่างๆ ทำได้โดยเลือกรูปแบบของสมการหรือฟังก์ชันที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก คือผลรวมของราคาคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากราคาวัสดุและค่าแรง โดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ซึ่งแสดงดังสมการที่ (54)

$$F = \text{Min } \Sigma (V_C \times C_C) + (W_{S1} \times C_{S1}) + (W_{S2} \times C_{S2}) + (A_F \times C_F) \quad (54)$$

โดยที่	F	=	ราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
	V_C	=	ปริมาตรของคอนกรีต
	C_C	=	ราคาต่อหน่วยคอนกรีตรวมค่าแรง
	W_{S1}	=	ปริมาณเหล็กเสริม
	C_{S1}	=	ราคาต่อหน่วยเหล็กเสริมรวมค่าแรง
	W_{S2}	=	ปริมาณเหล็กปลอก
	C_{S2}	=	ราคาต่อหน่วยเหล็กปลอกรวมค่าแรง
	A_F	=	ปริมาณแบบหล่อคอนกรีต
	C_F	=	ราคาแบบหล่อคอนกรีตรวมค่าแรง



3.4. การคำนวณออกแบบโดยวิธีทั่วไป

การออกแบบโดยทั่วไปทำการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์ เอ็กเซลเวอร์ชัน 2010 ซึ่งขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเป็นไปตามหลักการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (มงคล จิรวรรณ, 2549 : สำเร็จ รักซ้อน 2551) โดยมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

3.4.1 เริ่มต้น ป้อนข้อมูลน้ำหนักบรรทุกคงที่, น้ำหนักบรรทุกจร, ความยาวคาน, เลือกกำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), กำลังครากของเหล็กเสริม (f_y) และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบ

- 3.4.2 คำนวณโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้น
- 3.4.3 คำนวณสัมประสิทธิ์ความต้านทานโมเมนต์ดัด R_n
- 3.4.4 คำนวณหาอัตราส่วนเหล็กเสริม ρ
- 3.4.5 เลือกเหล็กเสริม
- 3.4.6 ตรวจสอบกำลังรับโมเมนต์ดัดของหน้าตัด และเงื่อนไขการออกแบบ
 - 3.4.6.1 ผ่าน คำนวณกำลังรับแรงเฉือน
 - 3.4.6.2 ไม่ผ่าน เลือกเหล็กเสริมใหม่หรือเพิ่มขนาดหน้าตัดคาน
- 3.4.7 คำนวณกำลังเฉือนของคอนกรีต
- 3.4.8 คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องเสริมของเหล็กปลอก
- 3.4.9 ตรวจสอบกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก
 - 3.4.9.1 ผ่าน เลือกเหล็กปลอกที่ต้องการเสริม
 - 3.4.9.2 ไม่ผ่าน เลือกขนาดหน้าตัดคานใหม่
- 3.4.10 เลือกเหล็กปลอกและระยะห่างที่ต้องการ
- 3.4.11 ตรวจสอบกำลังรับแรงเฉือนและระยะห่างของเหล็กปลอก
 - 3.4.11.1 ผ่าน จบการทำงาน
 - 3.4.11.2 ไม่ผ่าน ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 10
- 3.4.12 จบการทำงาน

3.5 การคำนวณการออกแบบร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว

ในการนำขั้นตอนการออกแบบมาประยุกต์ใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวจำเป็นจะต้องมีการประยุกต์รูปแบบการออกแบบให้เข้ากับขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวเพื่อให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังแสดงในภาพประกอบ 3.1 โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

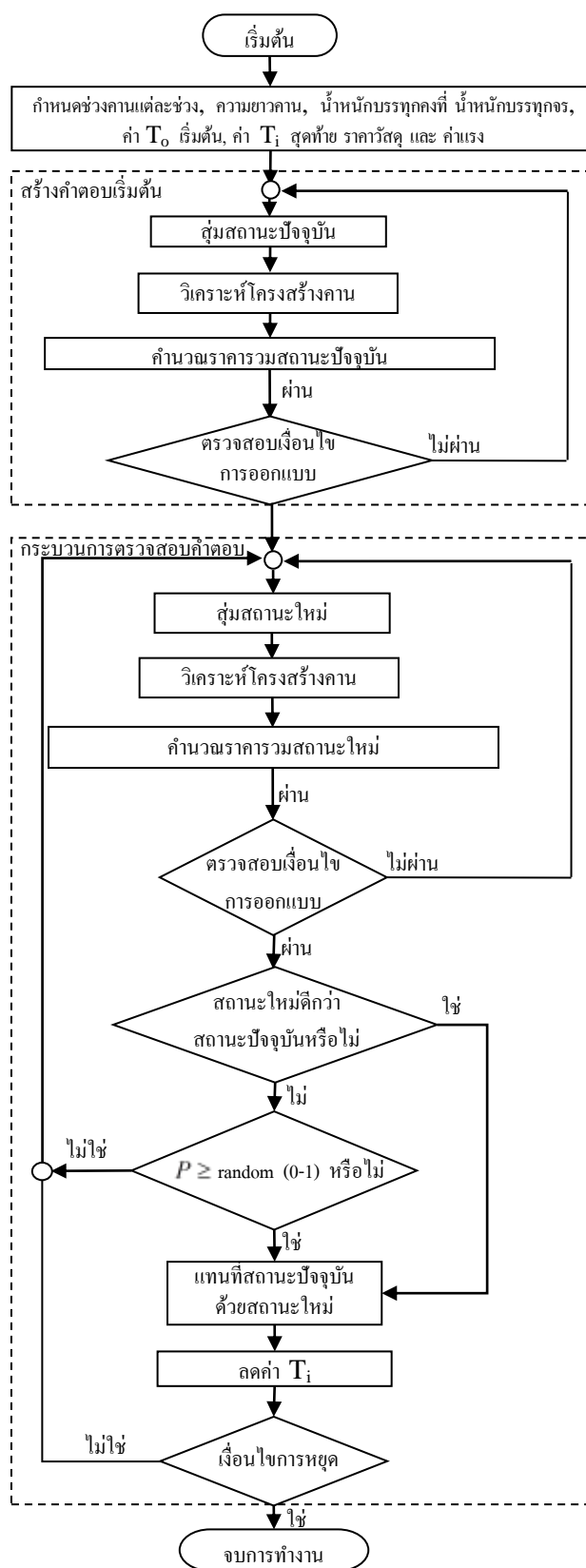
3.5.1 กำหนดช่วงคานแต่ละช่วง, ความยาวคาน, น้ำหนักบรรทุกคงที่ น้ำหนักบรรทุกจร, ค่าเริ่มต้น T_0 , ค่าสุดท้าย T_i ราคาวาสตุ และ ค่าแรง

3.5.2 สุ่มสถานะปัจจุบัน เป็นขั้นตอนการสุ่มตัวแปรประกอบด้วย f'_c , f_y , b , h , A_s และ A_v



- 3.5.3 วิเคราะห์โครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาโมเมนต์ดัด (M_u) และ แรงเฉือน (V_u)
- 3.5.4 คำนวณราคารวมของสถานะปัจจุบัน
- 3.5.5 ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบ ถ้าผ่านเงื่อนไขทำขั้นตอนที่ 3.5.6 ถ้าไม่ผ่านทำขั้นตอนที่ 3.5.2
- 3.5.6 สุ่มสถานะใหม่ f'_c, f_y, b, h, A_s และ A_v
- 3.5.7 วิเคราะห์โครงสร้างด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาโมเมนต์ดัด (M_u) และแรงเฉือน (V_u)
- 3.5.8 คำนวณราคารวมของสถานะใหม่
- 3.5.9 ตรวจสอบเงื่อนไขการออกแบบตามมาตรฐานการออกแบบ ถ้าผ่านเงื่อนไขทั้งหมดให้ดำเนินการต่อให้ขั้นตอนที่ 3.5.10 ถ้าไม่ผ่านให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 3.5.6
- 3.5.10 เปรียบเทียบราคารวมของคานสถานะใหม่กับสถานะปัจจุบัน ถ้าคานสถานะใหม่ราคาร้อยกว่าหรือเท่ากับให้ทำต่อขั้นตอนที่ 3.5.12 ถ้าคานสถานะใหม่ราคาสูงกว่าคานสถานะปัจจุบันให้ดำเนินการขั้นตอนที่ 3.5.11
- 3.5.11. คำนวณค่าผลต่างของราคาจากนั้นนำไปคำนวณค่า P ตามสมการ (52) ถ้า P มากกว่าหรือเท่ากับค่าสุ่มระหว่าง 0-1 ให้ทำขั้นตอนที่ 3.5.12 ถ้าน้อยกว่าค่าสุ่มระหว่าง 0-1 ให้ทำขั้นตอนที่ 3.5.6
- 3.5.12 กำหนดคานสถานะใหม่แทนที่คานสถานะปัจจุบัน
- 3.5.13 ลดค่า T_i โดยใช้สมการ (53)
- 3.5.14 ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดการทำงาน
- 3.5.15 จบการทำงาน





ภาพประกอบ 3.1 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กประยุกต์ใช้ร่วมกับขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียว



3.6 รายละเอียดของวัสดุ ค่าแรง ตัวแปรสุ่มที่ใช้ในการออกแบบ และตัวอย่างการทดสอบ

จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ปริมาณของคอนกรีต ปริมาณแบบหล่อคอนกรีตและน้ำหนักรวมของเหล็กเสริม จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรในการออกแบบ และทำให้ราคารวมของคานคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไปด้วย ส่วนราคาของคอนกรีต ราคาของแบบหล่อคอนกรีตและราคาของเหล็กเสริมเป็นตัวแปรตามโดยกำหนดราคาวัสดุใช้ราคาเฉลี่ย จากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2553 – 2555 สำหรับราคาค่าแรงงานคำนวณจากบัญชีค่าแรงเนื้องาน สำหรับถอดแบบคำนวณราคากลางงานก่อสร้าง ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2555 ของคณะกรรมการกำกับนโยบายราคากลางงานก่อสร้าง กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง

3.6.1 ราคาแบบหล่อคอนกรีต

3.6.1.1 ราคาวัสดุแบบหล่อคอนกรีต ใช้แบบเหล็กราคา 550 บาทต่อตารางเมตร

3.6.1.2 ราคาค่าแรงงานแบบหล่อคอนกรีต คัดกรณีแบบหล่อคอนกรีตทั่วไปน้อยกว่า 5,000 ตารางเมตร ราคา 105 บาทต่อตารางเมตร

3.6.1.3 ราคารวมแบบหล่อคอนกรีตและราคาค่าแรงงาน เท่ากับ $550 + 105 = 655$ บาทต่อตารางเมตร

3.6.2 ราคาคอนกรีต

ราคาคอนกรีตผสมเสร็จต่อหน่วยลูกบาศก์เมตรคำนวณจากราคาวัสดุและราคาค่าแรงงานโครงสร้างและส่วนประกอบอาคารหลายชั้นของคอนกรีตที่กำลังอัดประลัย 180, 210, 240, 280 และ 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 ราคาคอนกรีตจากสำนักงานพาณิชย์จังหวัดกรุงเทพมหานคร ตั้งแต่เดือน มกราคม ถึง ธันวาคม พ.ศ. 2553 – 2555

กำลังอัดประลัยคอนกรีต ทรงกระบอก (กก./ซม. ²)	ราคาวัสดุเฉลี่ย (บาท/ลบ.ม.)	ราคาค่าแรงงาน (บาท/ลบ.ม.)	ราคารวม (บาท/ลบ.ม.)
180	2380	340	2720
210	2514	340	2854
240	2554	340	2894
280	2620	340	2960
300	2810	340	3150

3.6.3 ราคาเหล็กเสริม

ราคาเหล็กเสริมต่อหน่วยตัน คำนวณจากราคาวัสดุและราคาค่าแรงงานที่มีปริมาณการใช้เหล็กน้อยกว่า 100 ตัน ของเหล็กเสริมแต่ละประเภทตามกำลังครากของเหล็กเสริมสำหรับเหล็กข้ออ้อย 3000, 4000 กก./ซม.² และสำหรับเหล็กเส้นกลมคือ 2400 กก./ซม.² ดังแสดงในตาราง 3.2



ตาราง 3.2 ราคาเหล็กเสริม

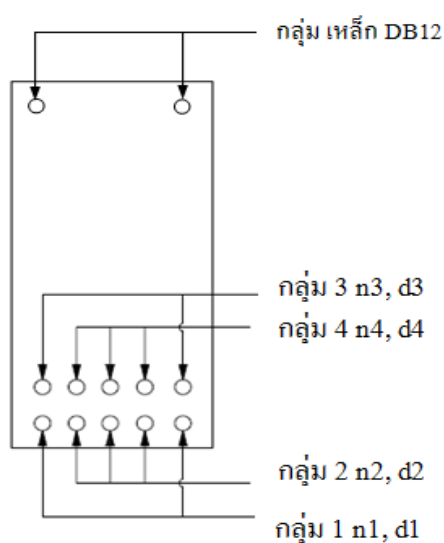
กำลังครากของเหล็กเสริม (กก./ชม. ²)	ราคาวัสดุเฉลี่ย (บาท/กก.)	ราคาค่าแรงงาน (บาท/กก.)	ราคารวม (บาท/กก.)
2400	28	3	31
3000	29	3	32
4000	30	3	33

3.6.4 ตัวแปรสุมที่ใช้ในการออกแบบ

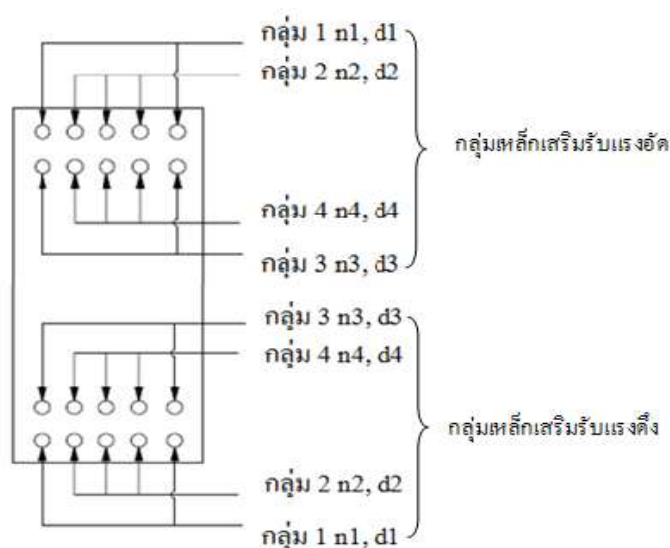
จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณวัสดุ คือ คอนกรีต แบบหล่อคอนกรีตและเหล็กเสริม ซึ่งปริมาณวัสดุจะขึ้นอยู่กับตัวแปรในการสุมค่าการออกแบบ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปรในการสุมค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน (b , h) ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c) ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง ขนาดเหล็กรับแรงอัด และเหล็กปลอก

3.6.5 รูปแบบการจัดเรียงเหล็กเสริม

ในการศึกษานี้ได้สร้างฐานข้อมูลของรูปแบบเหล็กเสริมในขอบเขตที่ทำการศึกษาคือ ใช้เหล็กเสริมเส้นกลมขนาด 6 และ 9 มิลลิเมตร เหล็กเสริมข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กรับแรงเฉือนหรือเหล็กปลอก และใช้เหล็กเสริมข้ออ้อยขนาด 12, 16, 20 และ 25 มิลลิเมตร สำหรับเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด โดยเหล็กเสริมรับแรงดึงและแรงอัด แบ่งเหล็กเสริมเป็น 4 กลุ่ม กลุ่ม 1 และกลุ่ม 3 มีจำนวน 2 เส้น กลุ่ม 2 และกลุ่ม 4 มีจำนวนไม่เกิน 3 เส้น ดังแสดงในภาพประกอบ 3.2 - 3.3



ภาพประกอบ 3.2 แสดงการเสริมเหล็กในคานเสริมเหล็กรับแรงดึงเพียงอย่างเดียว



ภาพประกอบ 3.3 แสดงการเสริมเหล็กในคานเสริมเหล็กรับทั้งแรงดึงและแรงอัด

เมื่อ n คือ จำนวนของเหล็กเสริมในแต่ละกลุ่ม

d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม

3.6.6 ตัวอย่างการทดสอบ

ในการศึกษานี้ จะยกตัวอย่างคานช่วงเดียว คานสองช่วง และคานสามช่วง ที่รับน้ำหนักบรรทุกคงที่และน้ำหนักบรรทุกจรที่แตกต่างกัน ทั้งนี้การคำนวณหาโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้รวมน้ำหนักของคานเข้ากับน้ำหนักบรรทุกคงที่ด้วย โดยตัวอย่างการรับน้ำหนักของคานช่วงเดียวแสดงในภาพประกอบ 3.4

3.6.6.1 กรณีศึกษาเมื่อให้โปรแกรมทำการสุ่มข้อมูลการออกแบบกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 6 ตัวแปรในการสุ่มค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน (b, h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด, และเหล็กปลอก

3.6.6.2 กรณีศึกษาเมื่อให้โปรแกรมทำการสุ่มข้อมูลการออกแบบกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ในการสุ่มค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน (b, h), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด และเหล็กปลอก

โดยมีการกำหนดให้ f'_c มีค่าเท่ากับ 300 ksc ในตัวอย่างที่ 1 ส่วนในตัวอย่างกำหนดให้ f'_c มีค่าเท่ากับ 210 ksc และตัวอย่างที่ 3 กำหนดให้ f'_c มีค่าเท่ากับ 280 ksc

3.6.6.3 กรณีศึกษาเมื่อให้โปรแกรมทำการสุ่มข้อมูลการออกแบบกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ในการสุ่มค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน (b, h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด, และเหล็กปลอก โดยมีการกำหนดให้ f_y มีค่าเท่ากับ 3000 ksc ในตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ



การทดสอบผลความแม่นยำของขั้นตอนจำลองการอบเหนียวในงานวิจัยนี้ทดสอบด้วยคานช่วงเดียว, คานสองช่วง และ คานสามช่วง ซึ่งแสดงในตารางที่ 3, 4 และ 5 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว ยาว 5 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 3000 กก./ม.

กรณีที่ 1 ข้อมูลการออกแบบกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 6 ตัวแปรในการสู่มค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีตค่า (f'_c), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด, และเหล็กปลอก

กรณีที่ 2 การออกแบบโดยการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการสู่มค่าทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ประกอบด้วยตัวแปรการออกแบบดังต่อไปนี้ ขนาดหน้าตัดคานความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด, และเหล็กปลอก จากนั้นได้มีการควบคุม f'_c มีค่าเท่ากับ 300 ksc

กรณีที่ 3 ข้อมูลการออกแบบตัวแปรควบคุมค่า f_y ที่ 3000 จากนั้นมีการสู่มค่าการออกแบบทั้งสิ้น 5 ตัวแปรคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กเสริมรับแรงอัด, และเหล็กปลอก เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป

ตัวอย่างที่ 2 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง ยาว 5 และ 5 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1200 กก./ม. และช่วงที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1200 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1000 กก./ม.

กรณีที่ 1 ข้อมูลการออกแบบกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 6 ตัวแปรในการสู่มค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีตค่า (f'_c), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด และเหล็กปลอก

กรณีที่ 2 การออกแบบโดยการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการสู่มค่าทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ประกอบด้วยตัวแปรการออกแบบดังต่อไปนี้ ขนาดหน้าตัดคานความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด, และเหล็กปลอก จากนั้นได้มีการควบคุม f'_c มีค่าเท่ากับ 210 ksc

กรณีที่ 3 ข้อมูลการออกแบบตัวแปรควบคุมค่า f_y ที่ 3000 จากนั้นมีการสู่มค่าการออกแบบทั้งสิ้น 5 ตัวแปรคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กเสริมรับแรงอัด, และเหล็กปลอก เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป

ตัวอย่างที่ 3 คานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง ยาว 5, 3 และ 5 เมตร รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1000 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1500 กก./ม. ช่วงที่ 2 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1000 กก./ม.

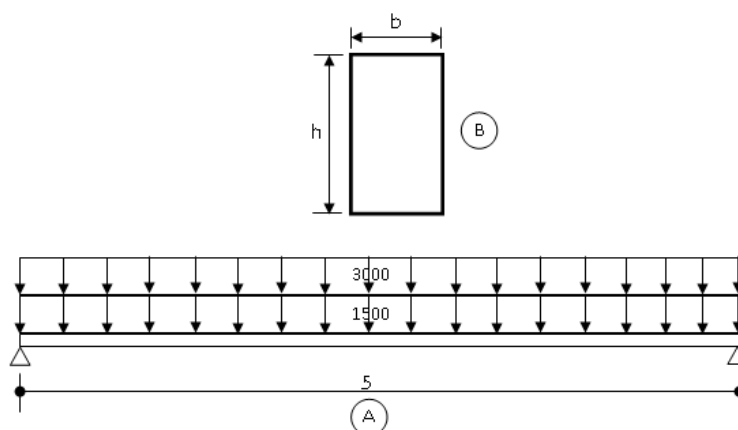


และช่วงที่ 3 รับน้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL ไม่รวมน้ำหนักคาน) 1500 กก./ม. และ น้ำหนักบรรทุกจร (LL) 1500 กก./ม.

กรณีที่ 1 ข้อมูลการออกแบบกำหนดตัวแปรทั้งสิ้น 6 ตัวแปรในการสุ่มค่าการออกแบบคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีตค่า (f'_c), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด และเหล็กปลอก

กรณีที่ 2 การออกแบบโดยการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการสุ่มค่าทั้งสิ้น 5 ตัวแปร ประกอบด้วยตัวแปรการออกแบบดังต่อไปนี้ ขนาดหน้าตัดคานความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังครากเหล็กเสริม (f_y), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กรับแรงอัด, และเหล็กปลอก จากนั้นได้มีการควบคุม f'_c มีค่าเท่ากับ 280 ksc

กรณีที่ 3 ข้อมูลการออกแบบตัวแปรควบคุมค่า f_y ที่ 3000 จากนั้นมีการสุ่มค่าการออกแบบทั้งสิ้น 5 ตัวแปรคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กเสริมรับแรงอัด, และเหล็กปลอก เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป



ภาพประกอบ 3.4 (A) คานช่วงเดียวรับน้ำหนักบรรทุกแผ่กระจายสม่ำเสมอ (B) หน้าตัดคาน

ตาราง 3.3 ตัวอย่างสำหรับคานช่วงเดียว

ช่วงคาน	1
ความยาวคาน (m)	5.0
DL (kg/m)	1500
LL (kg/m)	3000



ตาราง 3.4 ตัวอย่างสำหรับคานสองช่วง

ช่วงคาน	1	2
ความยาวคาน (m)	5.0	5.0
DL (kg/m)	1500	1200
LL (kg/m)	1200	1000

ตาราง 3.5 ตัวอย่างสำหรับคานสามช่วง

ช่วงคาน	1	2	3
ความยาวคาน(m)	5.0	3.0	5.0
DL (kg/m)	1000	1500	1500
LL (kg/m)	1500	1000	1500



บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ในบทที่ 3 ได้นำเสนอขั้นตอนการวิจัยและตัวอย่างที่ในการทดสอบรูปแบบต่างๆ ในบทนี้ ได้มีการทดสอบผลของขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวที่ประยุกต์ใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม MATLAB (2010a) ที่พัฒนาขึ้นตามตัวอย่างที่กำหนดในบทที่ 3 นำมาแก้ไขปัญหาด้านค่าใช้จ่ายต่างๆของการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดราคาต่ำสุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งข้อมูลที่ใช้เป็นตัวแปรสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมได้แก่ ขนาดหน้าตัดคาน กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ปริมาณเหล็กเสริม กำลังครากของเหล็กเสริม ราคาวัสดุ และค่าแรงงาน สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการออกแบบรายละเอียดต่างๆ ใช้มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยวิธีกำลัง (ว.ส.ท. 1008-38) การศึกษามีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 4.1 การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาสำหรับงานวิจัย
- 4.2 ผลการทดสอบกรณีศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว
- 4.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง
- 4.4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง
- 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 การทำงานของโปรแกรมที่พัฒนาสำหรับงานวิจัย

ในการศึกษานี้ได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB (2010a) เขียนเป็นโปรแกรม Optimum Design Reinforced Concrete Beams Using Simulated Annealing Algorithm โดยอาศัยหลักการของขั้นตอนจำลองการอบเหนียวร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการพัฒนาการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสม โดยการทำงานของโปรแกรมประกอบไปด้วยส่วนการทำงานที่สำคัญ 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

4.1 ส่วนแสดงหน้าจอเริ่มต้นสำหรับการเลือกใช้โปรแกรม

โดยหน้าแรกของโปรแกรมมีการแสดงชื่อโปรแกรมและการทำงานของโปรแกรมผู้ใช้จำเป็นต้องเลือกรูปแบบการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งโปรแกรมได้แบ่งการออกแบบเป็น 3 รูปแบบคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว, คานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1





ภาพประกอบ 4.1 ส่วนแสดงหน้าจอเริ่มต้นสำหรับการเลือกใช้โปรแกรม

4.1.2 ส่วนการรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวจากผู้ใช้งานโปรแกรม

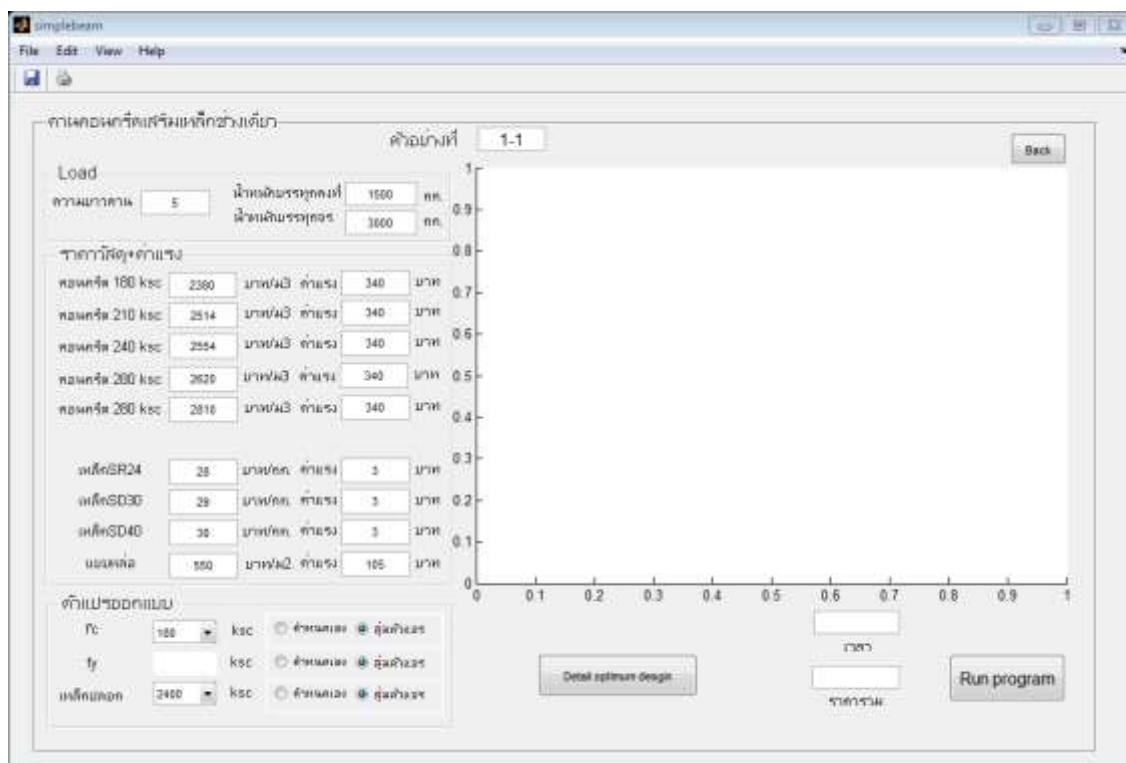
หลังจากที่ผู้ใช้โปรแกรมเลือกรูปแบบการออกแบบแล้วในส่วนนี้จะกล่าวถึงการใช้งาโปรแกรมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยการทำงานของโปรแกรมจำเป็นต้องมีการป้อนข้อมูลสำหรับการประมวลผลของโปรแกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนของการให้ผู้ใช้งานกำหนดค่าความยาวคานของแต่ละช่วงคาน, น้ำหนักบรรทุกคงที่ (DL), น้ำหนักบรรทุกจร (LL), ซึ่งไม่จำเป็นต้องรวมน้ำหนักของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากเมื่อโปรแกรมทำงานจะมีการสุ่มหน้าตัดคานจากฐานข้อมูลจากนั้นโปรแกรมจะวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

ในส่วนของช่อง ราคาวัสดุ+ค่าแรง ที่ต้องระบุกำลังของคอนกรีตราคาวัสดุ+ค่าแรงราคาของเหล็กเสริมไม่ว่าจะเป็นเหล็กเสริมยื่นและเหล็กปลอกจะต้องมีการระบุราคาวัสดุ+ค่าแรงงานเช่นเดียวกัน วัสดุที่ใช้ในการออกแบบในงานวิจัยนี้มีการกำหนดราคาให้สอดคล้องกับความเป็นจริงรวมไปถึงราคาค่าแรงงานโดยในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากมาตรฐานคณะกรรมการกำกับนโยบายราคางานก่อสร้างกรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง

ตัวแปรการออกแบบซึ่งประกอบไปด้วย กำลังของคอนกรีต, กำลังครากของเหล็กเสริมยื่น, และกำลังครากของเหล็กปลอก ผู้ใช้งานโปรแกรมสามารถเลือกได้ว่าจะกำหนดเองหรือมีการสุ่มตัวแปร ด้านขวาเป็นการแสดงกราฟผลการทำงานของโปรแกรม ด้านขวาล่างแสดงรายละเอียดของผลการออกแบบคานคอนกรีตอย่างเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว (Detail Optimum Design), เวลาที่ใช้ในการคำนวณ ราคารวมของการออกแบบอย่างเหมาะสม

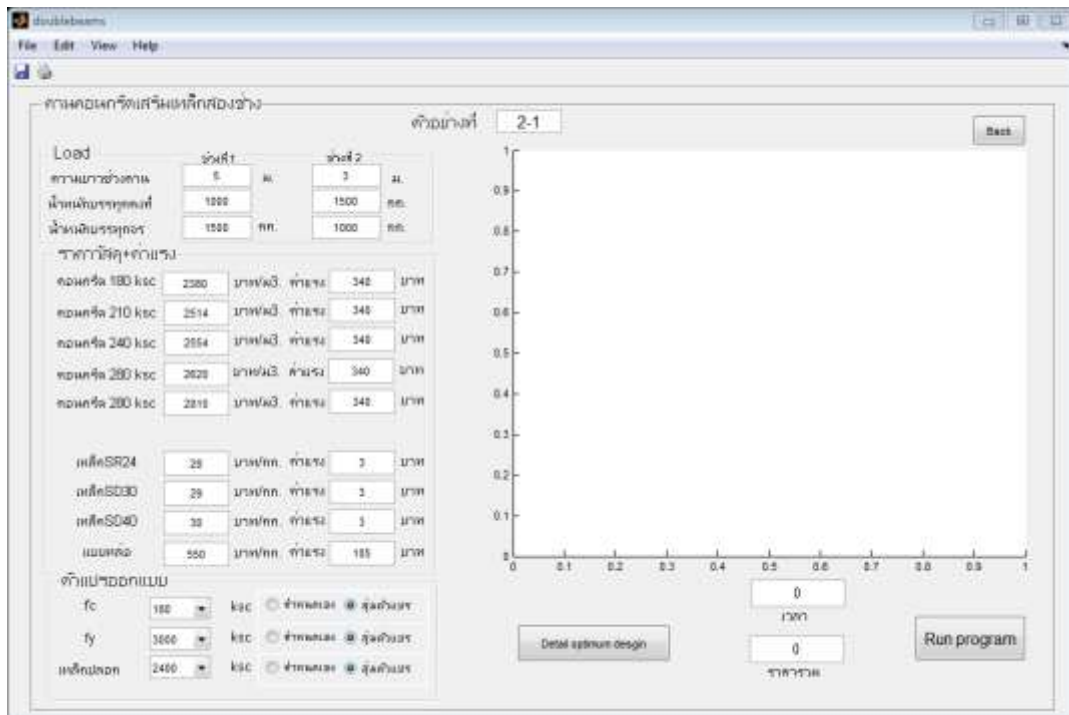


และสุดท้ายเป็นปุ่มสั่งโปรแกรมทำงาน (Run program) ซึ่งโปรแกรมได้แบ่งการออกแบบเป็น 3 รูปแบบคือ คานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว, คานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง และคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2 - 4.4

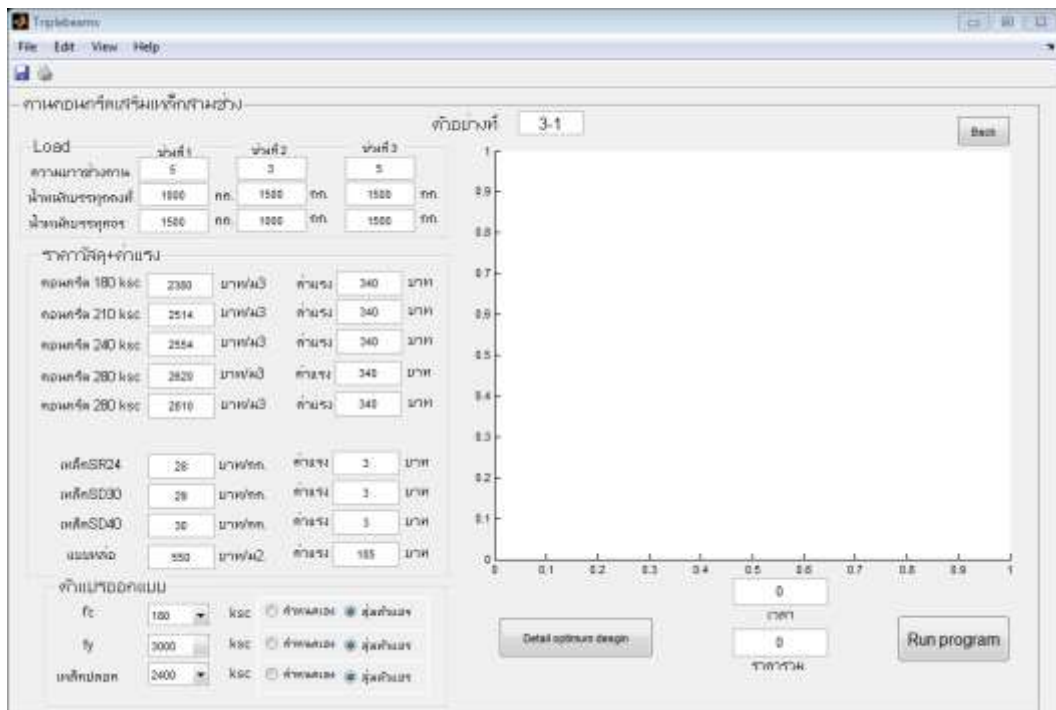


ภาพประกอบ 4.2 ส่วนรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว





ภาพประกอบ 4.3 ส่วนรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง



ภาพประกอบ 4.4 ส่วนรับค่าการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง

4.1.3 ส่วนการแสดงผลละเอียดผลการคำนวณของโปรแกรมเพื่อติดต่อผู้ใช้งานโปรแกรม

ในส่วนนี้เป็นส่วนแสดงผลรายละเอียดการออกแบบโดยใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการออกแบบแยกออกเป็น 4 ส่วนหลักๆคือ 1. คุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม (Property of concrete and steel) ซึ่งประกอบด้วยกำลังของคอนกรีต (f'_c), กำลังครากของเหล็กเสริม (f_y) และกำลังครากของเหล็กปลอก (f_v) 2. พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (Section property) ซึ่งประกอบด้วย ความกว้าง (b) และ ความสูง (h) 3. เหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่าง (Design tension and compression steel) ซึ่งประกอบด้วยจำนวนของเหล็กเสริมบนและล่าง ขนาดของเหล็กเสริมบนและล่าง 4. การออกแบบเหล็กปลอก (Design of stirrup bar) ซึ่งประกอบไปด้วยขนาดของเหล็กปลอก, จำนวนขาเหล็กปลอก และระยะห่างการเสริมเหล็กปลอก ดังแสดงรายละเอียดในภาพประกอบ 4.5 - 4.7

The screenshot shows the 'Resultsimplebeam' software interface with the following sections:

- Project:** [] Engineer: [] Date: []
- Property of Concrete and Steel:**
 - (1) ค่ากำลังของคอนกรีต(f'_c) = [] ksc
 - (2) ค่ากำลังครากของเหล็กเสริม(f_y) = [] ksc
 - (3) ค่ากำลังครากของเหล็กปลอก(f_v) = [] ksc
- Section Property:**
 - (1) ความกว้างของคาน(b) = [] cm
 - (2) ความสูงของคาน(h) = [] cm
- Design tension and compression steel:**
 - เหล็กเสริมบน [] เส้น DB [] mm
 - เหล็กเสริมล่าง [] เส้น DB [] mm
 - [] เส้น DB [] mm
 - [] เส้น DB [] mm
 - [] เส้น DB [] mm
- Design of stirrup bar:**
 - ขนาดเหล็กปลอก [] [] mm
 - จำนวนขาเหล็กปลอก [] ขา
 - ระยะเรียง Spacing [] cm

ภาพประกอบ 4.5 รายละเอียดผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว



Resultsimplebeam

File Edit View Help

Project : _____ Date _____

Property of Concrete and Steel

(1) ค่ากำลังของคอนกรีต(f_c) = _____ ksc

(2) ค่าลึกลากของเหล็กเสริม(f_y) = _____ ksc

(3) ค่าลึกลากของเหล็กมดอก(F_u) = _____ ksc

Section Property

(1) ความกว้างของคาน(b) = _____ cm

(2) ความสูงของคาน(h) = _____ cm

Design tension and compression steel

section A-A

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

เหล็กเสริมล่าง เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

section B-B

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

เหล็กเสริมล่าง เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

section C-C

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

Design of stirrup bar

คานช่วงที่ 1

ขนาดเหล็กมดอก มม

จำนวนขาเหล็กมดอก ขา

ระยะเรียง Spacing cm

คานช่วงที่ 2

ขนาดเหล็กมดอก มม

จำนวนขาเหล็กมดอก ขา

ระยะเรียง Spacing cm

ภาพประกอบ 4.6 รายละเอียดผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง

Resultsimplebeam

File Edit View Help

Project : _____ Engineer : _____ Date _____

Property of Concrete and Steel

(1) ค่ากำลังของคอนกรีต(f_c) = _____ ksc

(2) ค่าลึกลากของเหล็กเสริม(f_y) = _____ ksc

(3) ค่าลึกลากของเหล็กมดอก(F_u) = _____ ksc

Section Property

(1) ความกว้างของคาน(b) = _____ cm

(2) ความสูงของคาน(h) = _____ cm

Design tension and compression steel

section A-A

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

เหล็กเสริมล่าง เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

section B-B

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

เหล็กเสริมล่าง เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

section C-C

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

section D-D

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

section E-E

เหล็กเสริมบน เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

_____ เส้น DB มม

Design of stirrup bar

คานช่วงที่ 1

ขนาดเหล็กมดอก มม

จำนวนขาเหล็กมดอก ขา

ระยะเรียง Spacing cm

คานช่วงที่ 2

ขนาดเหล็กมดอก มม

จำนวนขาเหล็กมดอก ขา

ระยะเรียง Spacing cm

คานช่วงที่ 3

ขนาดเหล็กมดอก มม

จำนวนขาเหล็กมดอก ขา

ระยะเรียง Spacing cm

ภาพประกอบ 4.7 รายละเอียดผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง



4.2 กรณีศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว

จากการศึกษาพฤติกรรมของคานในกรณีที่ไม่เมนต์ดัด และแรงเฉือน ภายในโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กในการแก้ปัญหาซึ่งใช้ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยงานวิจัยนี้ได้นำราคารวมของการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาค่าที่เหมาะสมผลปรากฏว่า การทดสอบกรณีศึกษาทั้ง 3 กรณี ซึ่งใช้คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการออกแบบวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์โดยวิธีกำลัง โดยผลที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้จริงอย่างปลอดภัยและประหยัดที่สุดทั้ง 3 กรณีด้วยกัน

ผลการทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการทดสอบทั้ง 3 กรณี ตัวอย่างละ 10 ครั้ง ผลปรากฏว่าใน การทดสอบครั้งที่ 2 มีจำนวนรอบที่สูงสุดอยู่ที่ 1605 รอบ จำนวนรอบต่ำที่สุดคือ 1547 รอบ โดยมีค่าเฉลี่ยของการรันรอบอยู่ที่ 1584.1 รอบ ซึ่งมีค่าตอบที่ต่ำที่สุดและมีการซ้ำกันของคำตอบในการทดสอบอยู่ที่ 8 ครั้ง จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง อีกทั้งยังมีราคาโดยรวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 8487 บาท

ส่วนกรณีที่ 2 มีเป็นการทดสอบที่ควบคุมค่ากำลังอัดของคอนกรีต (f'_c) โดยในกรณีนี้มีการควบคุมให้เท่ากับตัวอย่างเปรียบเทียบคือ 300 กก./ซม.² ผลปรากฏว่าขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถหาค่าตอบที่เหมาะสมซึ่งเป็นราคาต่ำที่สุดซ้ำกันทั้งหมด 6 ครั้ง จากการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง โดยมีรอบการคำนวณที่สูงที่สุด 1862 รอบ จำนวนรอบต่ำที่สุดคือ 1712 รอบ มีค่าเฉลี่ยของการรันรอบอยู่ที่ 1795.3 รอบ มีราคารวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 9062 บาท

ส่วนกรณีที่ 3 เป็นการควบคุมกำลังครากของเหล็กเสริมยื่น (f_y) ในกรณีนี้มีการควบคุมให้เท่ากับตัวอย่างเปรียบเทียบคือ 3000 กก./ซม.² ในตัวอย่างนี้จะมีราคาค่าก่อสร้างโดยเฉลี่ยสูงกว่ากรณีศึกษาที่ 1 และ 2 คือ 9148.8 บาท มีจำนวนรอบที่สูงสุดอยู่ที่ 1745 รอบ จำนวนรอบต่ำที่สุดคือ 1622 รอบ โดยมีค่าเฉลี่ยของการรันรอบอยู่ที่ 1677.4 รอบ และราคาโดยรวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 9036 บาท ดังแสดงรายละเอียดในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณและราคาการก่อสร้างตัวอย่างที่ 1

ครั้งที่	กรณีศึกษา					
	1		2		3	
	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม
1	1574	8487	1856	9062	1658	9036
2	1547	8487	1786	8687	1684	9036
3	1595	8487	1862	8687	1745	9036
4	1585	9325	1813	8911	1625	9552

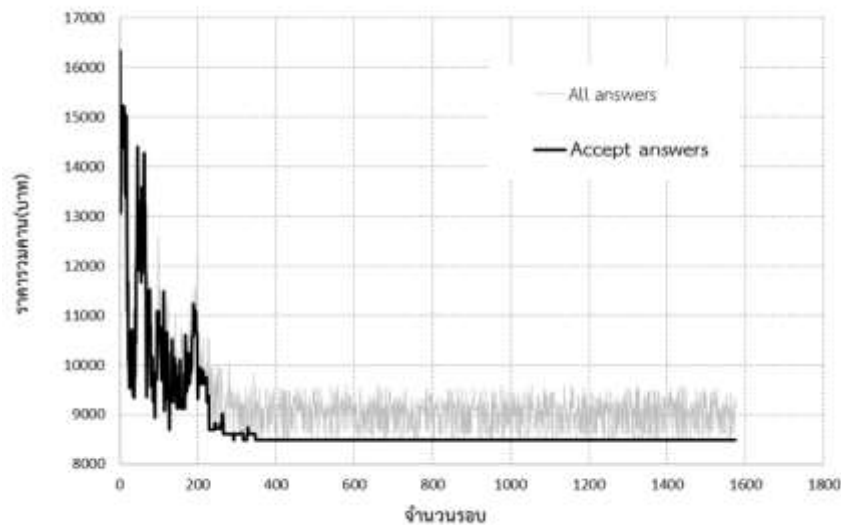


ตาราง 4.1 (ต่อ)

ครั้งที่	กรณีศึกษา					
	1		2		3	
	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม
5	1576	8487	1795	8687	1656	9036
6	1588	8487	1742	8712	1622	9342
7	1603	8791	1811	8752	1741	9036
8	1590	8550	1712	8687	1695	9342
9	1605	8487	1785	8687	1683	9036
10	1578	8487	1791	8687	1665	9036
ค่าเฉลี่ย	1584.1	8620.9	1795.3	8755.9	1677.4	9148.8
ค่าสูงสุด	1605	8791	1862	9062	1745	9552
ค่าต่ำสุด	1547	8487	1712	8687	1622	9036

จากการศึกษาผลการวิจัยข้างต้นในคานช่วงเดียวเป็นการพิจารณาถึงประสิทธิภาพของขั้นตอนการจำลองการรอบเหนียวที่มีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ความยาวช่วงคาน 5 เมตร จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งตอนแรกไม่คิมน้ำหนักของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีค่าโมเมนต์ลบโดยประมาณเท่ากับ -19687.5 กก./ม. และมีแรงเฉือนโดยประมาณ 15750 กก./ม. ซึ่งเบื้องต้นมีผลต่อการหาค่าที่เหมาะสมโดยโปรแกรมจะนำค่าที่ได้ไปหาหน้าตัดที่เหมาะสมซึ่งจะมีการคำนวณใหม่อีกรอบโดยคิมน้ำหนักของโครงสร้างพร้อมทั้งหาค่าการรับน้ำหนักของแรงที่มากระทำจากนั้นโปรแกรมจะค่อยๆหาค่าที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบจากค่าที่สุ่มซึ่งจะมีค่าอยู่ 2 ค่า คือ ค่าตอบที่เกิดจากค่าสุ่มมีความเป็นไปได้ทั้งหมดที่ผ่านเกณฑ์การออกแบบ (All answer) และ คำตอบที่ถูกลอยอมรับ (Accept answers) แล้วทำการลดค่า T_i ในเวลาเดียวกันซึ่งจะทำให้กราฟแสดงผลมีค่าที่แกว่งในวงกว้างในช่วง 300 คำตอบแรกจากนั้นจะค่อยลดลงจนในที่สุดเมื่อค่า T_i เข้าใกล้ 0 ค่าของคำตอบจะแกว่งในช่วงแคบๆเพื่อหาค่าที่เหมาะสมแบบวงแคบจะทำให้การแสดงผลของเส้นกราฟจะมีค่าที่นิ่งและโปรแกรมจะหยุดการทำงานเมื่อค่า T_i เท่ากับ 0 ซึ่งในคานช่วงเดียวนี้นี้กราฟหยุดการทำงานในรอบที่ 1547 ดังแสดงในภาพประกอบ 4.8

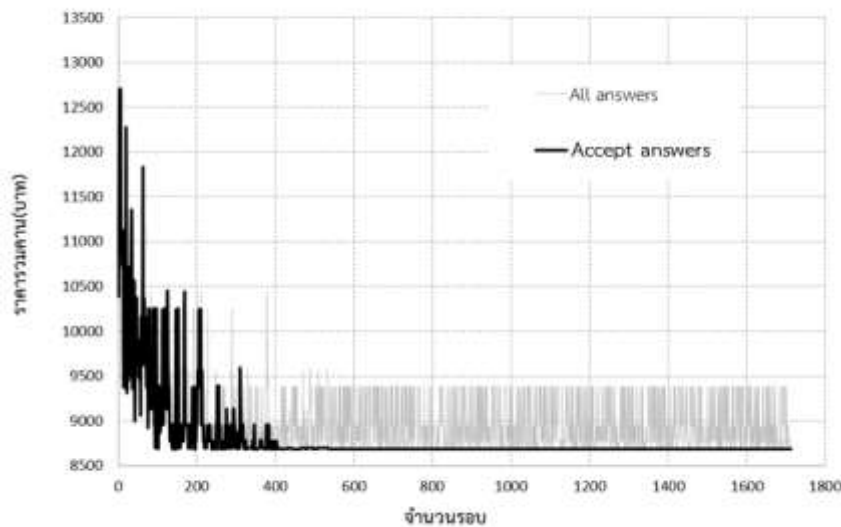




ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 1

จากผลการคำนวณโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กผลการหาค่าที่ดีที่สุดในการคำนวณของ การก่อสร้างในกรณีที่ 2 โดยมีการกำหนดให้ f'_c มีค่าเท่ากับ 300 กก./ซม.² ในคานช่วงเดียวผลที่ได้ สามารถพล็อตกราฟในการลู่เข้าของคำตอบที่เหมาะสม สำหรับคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบ เริ่มต้นจะเห็นได้ว่าช่วงของคำตอบในช่วงแรกๆจะมีค่าที่สูงจากนั้นคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีจำลองการ วนเวียนจะปรับตัวค่อยๆลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม โดยมีลักษณะกระโดดของเส้นกราฟเพื่อให้ได้ คำตอบที่หลุดจากค่าที่ต่ำที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optimum) จากนั้นจะค่อยๆยอมรับคำตอบที่ เหมาะสมด้วยเงื่อนไขการหาคำตอบของขั้นตอนวิธีจำลองการวนเวียนจนกระทั่งเมื่อค่าที่ได้เหมาะสม ตามเงื่อนไขแล้วโปรแกรมจะหยุดการทำงานซึ่งในคานช่วงเดียวได้มีการตั้งเงื่อนไขให้มีการหยุดการ ทำงานของการรันโปรแกรมตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมจะหยุดก็ต่อเมื่อ T_i มีค่าเท่ากับ 0 หรือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดมีค่าซ้ำของคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบจำนวน 3 ครั้ง หรือ รัน คำตอบครบ 5,000 รอบ (กรณีนี้ทำไว้เพื่อป้องกันการรับของโปรแกรมแบบไม่มีที่สิ้นสุด) ดังแสดงใน ภาพประกอบ 4.9

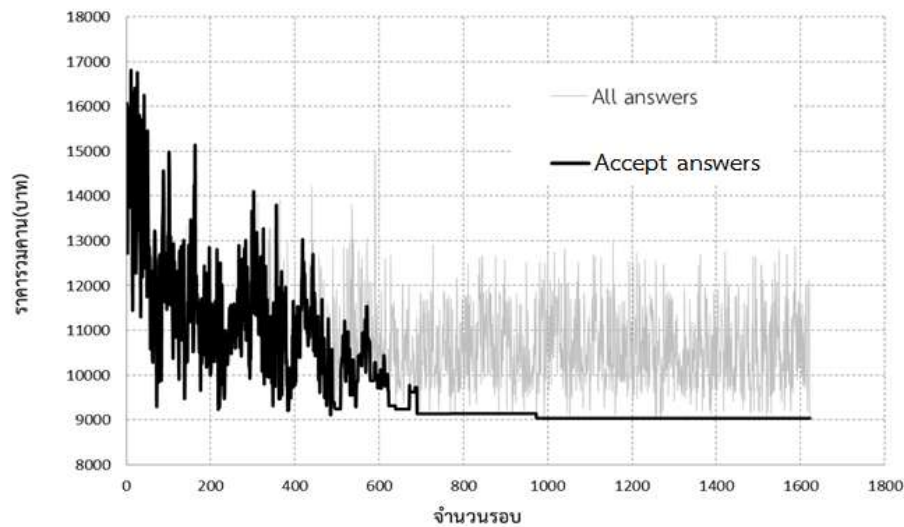




ภาพประกอบ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 2

จากผลการคำนวณโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กผลการหาค่าที่ดีที่สุดในการลงทุนของการก่อสร้างในกรณีที่ 3 ข้อมูลการออกแบบกำหนดค่าตัวแปร f_y ที่ 3000 กก./ซม.² ทั้ง 3 ตัวอย่าง การทดสอบผลที่ได้สามารถพล็อตกราฟในการลู่เข้าของคำตอบที่เหมาะสม ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10 ตามลำดับ สำหรับคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบเริ่มต้นจะเห็นได้ว่าช่วงของคำตอบในช่วงแรกๆจะมีค่าที่สูงจากนั้นคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวจะปรับตัวค่อยๆลู่เข้าหาคำตอบที่เหมาะสม โดยมีลักษณะกระโดดของเส้นกราฟเพื่อให้ได้คำตอบที่หลุดจากค่าที่ต่ำที่สุดเฉพาะแห่ง (Local Optimum) จากนั้นจะค่อยๆยอมรับคำตอบที่เหมาะสมด้วยเงื่อนไขการหาคำตอบของขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวจนกระทั่งเมื่อค่าที่ได้เหมาะสมตามเงื่อนไขแล้วโปรแกรมจะหยุดการทำงานซึ่งในคานช่วงเดียวได้มีการตั้งเงื่อนไขให้มีการหยุดการทำงานของการรันโปรแกรมตัวอย่างการทำงานของโปรแกรมจะหยุดก็ต่อเมื่อ T_i มีค่าเท่ากับ 0 หรือ คำตอบที่เหมาะสมที่สุดมีค่าซ้ำของคำตอบที่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบจำนวน 3 ครั้ง หรือ รันคำตอบครบ 5,000 รอบ (กรณีนี้ทำไว้เพื่อป้องกันการรับของโปรแกรมแบบไม่มีที่สิ้นสุด) ดังแสดงในภาพประกอบ 4.10





ภาพประกอบ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 3

การศึกษานี้เป็นการศึกษาผลการออกแบบที่เหมาะสมของขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวและวิธีทั่วไปจะเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง เหล็กปลอก ระยะห่างเหล็กปลอก และราคารวมของงานก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด ทั้งนี้ได้เปรียบเทียบการออกแบบวิธีการทั่วไปแสดงในตาราง 4.2 และวิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวซึ่งผลการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตาราง 4.2 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวด้วยวิธีการแบบทั่วไป

รายการ	
รายละเอียด	วิธีการแบบทั่วไป
หน้าตัดคาน (B : H)	25 : 50
f_y (กก./ซม ² .)	3000
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	5-DB25 1-DB12
Stirrups @ (cm)	DB10 @ 20
Total cost (baht)	9342

ผลการทดสอบพบว่า การหาค่าที่เหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวได้มีการคัดเลือกพื้นที่หน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดตัวอย่างที่ออกแบบโดยวิธีทั่วไป ถึงแม้ว่า f_y จะสูงกว่าที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป แต่ก็ทำให้ปริมาณการใช้เหล็กเสริมยื่นลดลง



และยังสามารถลด f'_c ลงได้อีก อย่างไรก็ตามทำให้ต้องเสริมระยะของเหล็กปลอกให้ถี่ขึ้นกว่าเดิมแต่ก็ลดขนาดของเหล็กปลอกลงเช่นกันเพื่อรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ผลรวมของราคาค่าใช้จ่ายต่างๆ ลดลง แต่ยังคงความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลัง (วสท. 1008-38) จากการคำนวณราคาเพื่อเปรียบเทียบโดยใช้ฐานข้อมูลที่ระบุในบทที่ 3 และภาคผนวก ก และ ข พบว่าประหยัดกว่าหน้าตัดตัวอย่างเปรียบเทียบร้อยละ 10.10 ดังแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานช่วงเดียวกรณีที่ 1

รายการ	
รายละเอียด	วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 55
f'_c (กก./ซม. ²)	280
f_y (กก./ซม. ²)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB25
	2-DB20
	1-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 15
Total cost (baht)	8485
Diff cost (%)	+10.10

ในส่วนกรณีที่ 2 ผลการศึกษาขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวเมื่อกำหนดค่า f'_c การออกแบบที่เหมาะสมและวิธีทั่วไปมาเปรียบเทียบขนาดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง เหล็กปลอก ระยะห่างเหล็กปลอก และราคารวมของงานก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด ซึ่งตัวอย่างคานช่วงเดียวใช้ f'_c 300 กก./ซม.² จากการทดสอบคานช่วงเดียวพบว่า โปรแกรมเลือกใช้ f_y 4000 กก./ซม.² ซึ่งสูงกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบและเลือกขนาดหน้าตัดกว้าง 20 ซม. ความสูง 55 ซม. แต่ทำให้ใช้ขนาดเหล็กเสริมและปริมาณเหล็กเสริมรับโมเมนต์ลบน้อยลงเป็นอย่างมาก อีกทั้งยังลดขนาดของเหล็กปลอกจากเหล็ก DB10 เป็น RB9 โดยใช้ระยะห่างของเหล็กปลอก 15 ซม. อีกด้วยทำให้ประหยัดกว่าถึงร้อยละ 7.01 ดังแสดงในตาราง 4.4



ตาราง 4.4 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานช่วงเดียวกรณีที่ 2

รายการ	
รายละเอียด	วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 55
f_y (กก./ซม. ²)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB25
	3-DB20
	1-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 15
Total cost (baht)	8687
Diff cost (%)	+7.01

จากการทดสอบคานช่วงเดียวกรณีที่ 3 เมื่อกำหนด f_y 3000 กก./ซม.² พบว่าโปรแกรมเลือกใช้ f_c' ที่เท่ากับตัวอย่างเปรียบเทียบและเลือกขนาดหน้าตัดกว้าง 20 ซม. มีขนาดแคบกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบ ความสูง 55 ซม. ถึงแม้ว่าจะใช้ความสูงของคานมากกว่าหน้าตัดเปรียบเทียบ แต่ก็ทำให้ใช้ขนาดเหล็กเสริมและปริมาณเหล็กเสริมรับโมเมนต์ลดได้น้อยลงเล็กน้อย อีกทั้งยังลดขนาดของเหล็กปลอกจากเหล็ก DB10 เป็น RB9 โดยใช้ระยะห่างของเหล็กปลอกถี่ขึ้นเป็นระยะห่าง 15 ซม. อีกด้วยทำให้ประหยัดกว่าร้อยละ 3.27 ซึ่งก็ยิ่งถือว่ามีค่าประหยัดกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบ ดังแสดงในตาราง 4.5

ตาราง 4.5 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานช่วงเดียวกรณีที่ 3

รายการ	
รายละเอียด	วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 55
f_c' (กก./ซม. ²)	300
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB25
	4-DB20
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 15
Total cost (baht)	9036
Diff cost (%)	+3.27



4.3. กรณีศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วง

ในหัวข้อนี้นำเสนอการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยมีเป้าหมายเป็นราคารวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่น้อยที่สุดซึ่งมีเงื่อนไขในการออกแบบที่ซับซ้อนขึ้นโดยกำหนดให้หน้าตัดคานทั้งสองช่วงเท่ากัน

จากผลวิเคราะห์การทดสอบด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจากการทดสอบทั้ง 3 กรณี กรณีตัวอย่างละ 10 ครั้ง ผลปรากฏว่าใน กรณีที่ 1 มีจำนวนรอบที่สูงที่สุดคือ 1895 รอบ มีจำนวนรอบที่ต่ำที่สุดคือ 1799 รอบ โดยมีจํารอบเฉลี่ย 1855.4 รอบ จากการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ซ้ำกันของคำตอบทั้งหมด 6 ครั้ง อีกทั้งยังมีราคาโดยรวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 12153 บาท ส่วนกรณีที่ 2 มีการควบคุม f_c' ให้มีค่าเท่ากับ 210 กก./ซม.² ผลปรากฏว่าขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถหาค่าตอบที่เหมาะสมซึ่งมีการซ้ำกันของคำตอบทั้งหมด 6 ครั้ง มีราคารวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 14288 บาท ในส่วนกรณีศึกษาตัวอย่างสุดท้ายนั้นได้มีการควบคุมค่า f_y เท่ากับ 3000 กก./ซม.² ซึ่งผลการทดสอบพบว่ามีคำตอบที่น้อยที่สุดที่ซ้ำกันของคำตอบทั้งหมด 6 ครั้ง โดยมีรอบการคํานวณที่น้อยที่สุดมีผลการคํานวณ 1711 รอบ และราคาโดยรวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 14766 บาท ดังแสดงในตาราง 4.6

ตาราง 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคํานวณและราคาการก่อสร้างคานสองช่วง

ครั้งที่	ตัวอย่างทดสอบ					
	1		2		3	
	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม
1	1833	12678	1833	14288	1784	15023
2	1805	12153	1805	14288	1854	15210
3	1709	12153	1860	14288	1723	14966
4	1875	12153	1875	14952	1723	14766
5	1865	12153	1865	14862	1852	14766
6	1885	13799	1895	14288	1846	14766
7	1842	12153	1842	14288	1751	14981
8	1718	12153	1799	15132	1711	14766
9	1859	12153	1859	15520	1715	14766
10	1865	12153	1865	14288	1769	14766



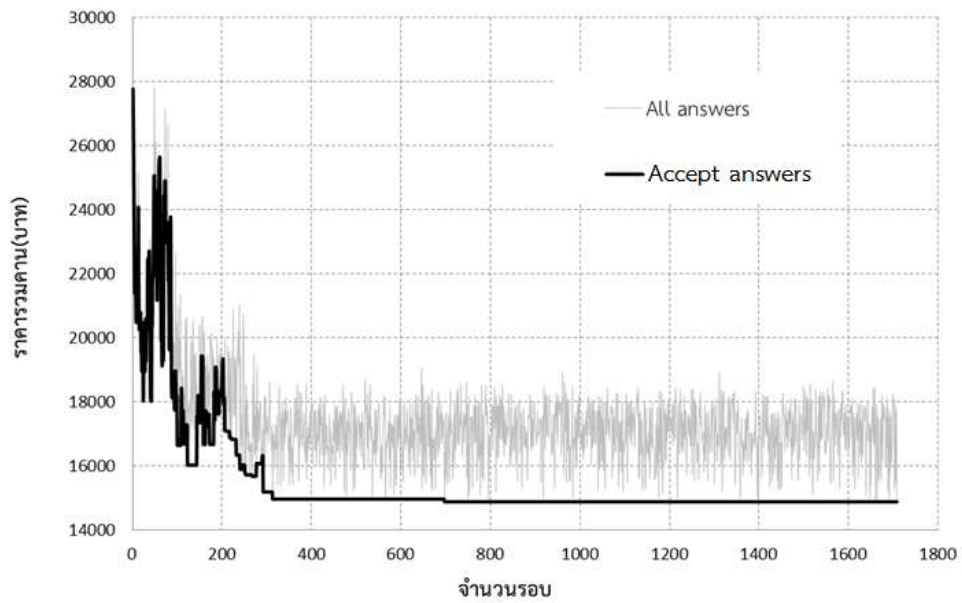
ตาราง 4.6 (ต่อ)

ครั้งที่	ตัวอย่างทดสอบ					
	1		2		3	
	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม
ค่าเฉลี่ย	1820.83	12394	1855.4	14619.4	1772.8	14877.6
ค่าสูงสุด	1885	13799	1895	15520	1854	15210
ค่าต่ำสุด	1709	12153	1799	14288	1711	14766

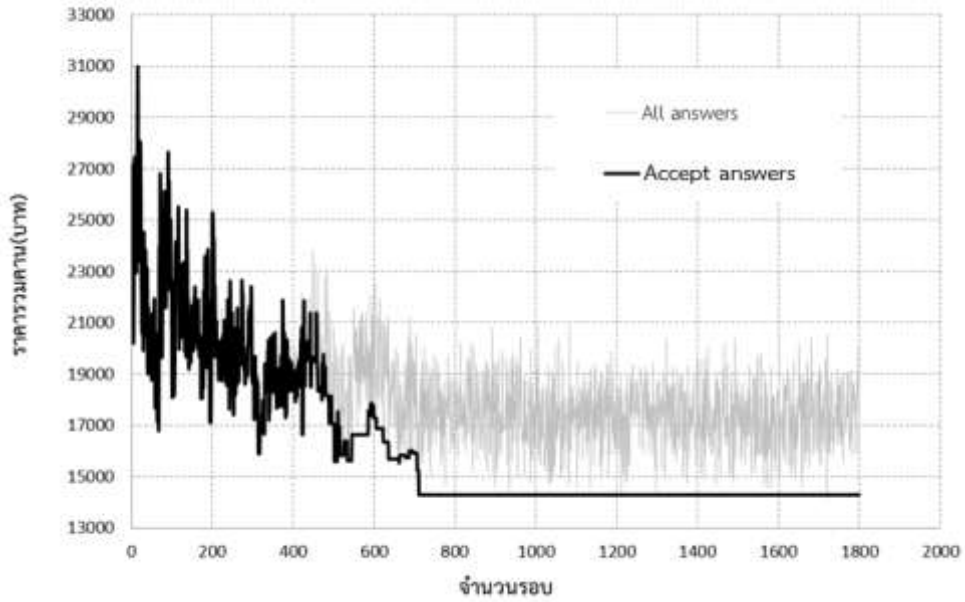
จากการศึกษาผลการวิจัยลำดับต่อไปเป็นคานสองช่วง ในการทดสอบนี้คานช่วงแรกยาว 5 เมตรและช่วงที่ 2 ยาว 5 เมตรเช่นกัน โดยรับแรงที่มากระทำแต่ละช่วงคานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 3.4 (ในบทที่ 3) จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งครั้งแรกไม่คิदन้าหนักของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีค่าโมเมนต์ช่วงแรกเท่ากับ 4140 กก./ม. ส่วนโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นเป็นโมเมนต์ลบช่วงต่อระหว่างคานมีค่าเท่ากับ -11750 กก./ม. และโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในช่วงสุดท้ายเท่ากับ 3380 กก./ม. ส่วนแรงเฉือนที่นำมาคิดเพื่อออกแบบเหล็กปลอกรับแรงเฉือนนั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยมีค่าเท่ากับ -12700 กก./ม. และช่วงที่ 2 มีค่าเท่ากับ 10800 กก./ม.

ซึ่งต่อจากนี้โปรแกรมจะมีการหาค่าที่เหมาะสม โดยที่โปรแกรมจะนำค่าที่ได้ไปสู่มหาหน้าตัดที่จะสามารถรับโมเมนต์ดัดและแรงเฉือนในแต่ละช่วงคานโดยมีการคำนวณใหม่อีกรอบซึ่งจะคิदन้าหนักของโครงสร้างพร้อมทั้งหาค่าการรับน้ำหนักของแรงที่มากระทำจากนั้นโปรแกรมจะค่อยๆหาค่าที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบจากค่าที่สู่มซึ่งจะมีค่าอยู่ 2 ค่า แล้วทำการลดค่า T_i ในเวลาเดียวกันซึ่งจะทำให้กราฟแสดงผลมีค่าที่แกว่งในวงกว้างในช่วงแรกของการค้นหาค่าตอบจากนั้นจะค่อยลดลงจนในที่สุดเมื่อค่า T_i เข้าใกล้ 0 ค่าของค่าตอบจะแกว่งในช่วงแคบๆเพื่อหาค่าที่เหมาะสมแบบวงแคบจะทำให้การแสดงผลของเส้นกราฟจะมีค่าที่นิ่งและโปรแกรมจะหยุดการทำงานเมื่อค่า T_i เท่ากับ 0 ซึ่งในกรณีศึกษาที่ 1, 2 และ 3 นี้กราฟหยุดการทำงานในรอบที่ 1709, 1799 และ 1711 ตามลำดับดังแสดงในภาพประกอบ 4.11



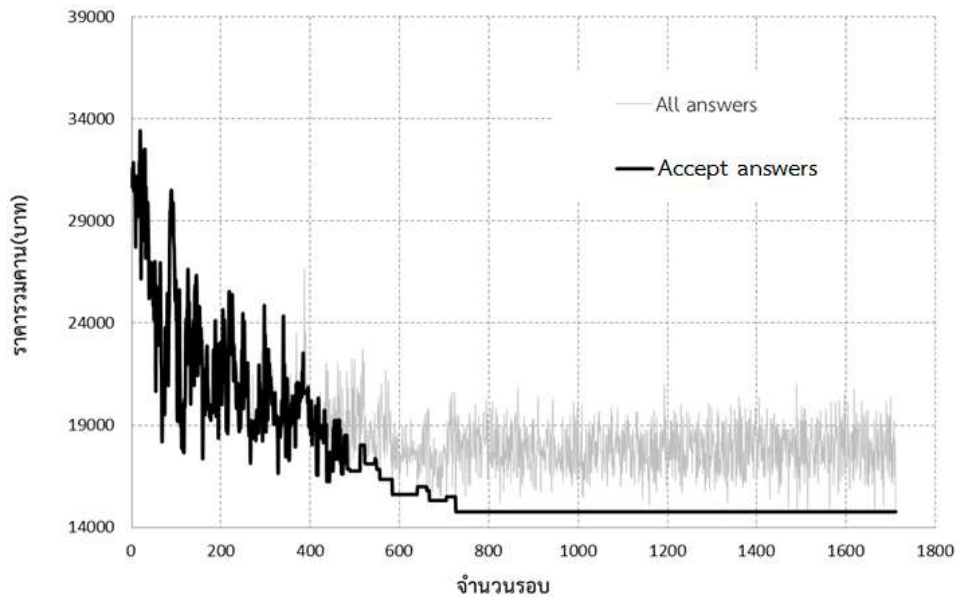


ภาพประกอบ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานสองช่วงกรณีที่ 1



ภาพประกอบ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบกรณีที่ 2 คานสองช่วง





ภาพประกอบ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบคานสองช่วง กรณีที่ 3

ผลการทดสอบพบว่า การออกแบบคานต่อเนื่อง 2 ช่วงด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวได้มีการเลือกกำลังของเหล็กที่มี f_y สูงขึ้นทำให้สามารถใช้ขนาดหน้าตัดคานที่เล็กลงเนื่องจากใช้ f_c สูงขึ้น โดยคาน 2 ช่วง แบ่งหน้าตัดการเสริมเหล็กออกเป็น 3 หน้าตัด การออกแบบวิธีการทั่วไปใช้เหล็กขนาด DB16 เป็นเหล็กยื่นเสริมด้วย DB12 แต่ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวใช้เหล็กขนาด DB12 เป็นเหล็กยื่นทั้งหมดทำให้ปริมาณเหล็กรับโมเมนต์โดยรวมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กน้อยลง ส่วนเหล็กรับแรงเฉือนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงแรกใช้ขนาดเหล็กเท่าเดิมแต่ระยะการเสริมเหล็กปลอกของวิธีทั่วไปห่างกว่าขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวเนื่องจากขนาดหน้าตัดของคอนกรีตลดลงทำให้ต้องเพิ่มระยะของเหล็กปลอกถี่ขึ้นนั่นเอง ในส่วนช่วงที่ 2 ขนาดเหล็กปลอกเล็กลงแต่ระยะของเหล็กปลอกถี่ขึ้นกว่าเดิมเนื่องจากหน้าตัดคานคอนกรีตเล็กลงทำให้คอนกรีตที่จะช่วยต้านทานแรงเฉือนได้น้อยกว่าเดิมเมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป แต่เนื่องจากโปรแกรมผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลัง (วสท. 1008-38) ทำให้มั่นใจได้ว่าหน้าตัดออกแบบสามารถรับน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดได้อย่างปลอดภัย ซึ่งพบว่าราคาก่อสร้างถูกกว่าวิธีการแบบทั่วไปร้อยละ 12.57 ดังแสดงในตาราง 4.7 - 4.8



ตาราง 4.7 การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสองช่วงด้วยวิธีการแบบทั่วไป

รายการ			
วิธีการแบบทั่วไป			
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
หน้าตัดคาน(B : H)	25 : 50	25 : 50	25 : 50
f'_c	210 (กก./ซม. ² .)		
f_y	3000 (กก./ซม. ² .)		
เหล็กเสริมบน	2-DB16	4-DB20 3-DB16	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 2-DB12	2-DB16	3-DB16 2-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20	-	RB9 @ 20
Total (baht)	15413		

ตาราง 4.8 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานสองช่วง กรณีที่ 1

รายการ			
วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว			
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
หน้าตัดคาน	20 : 50	20 : 50	20 : 50
f'_c	240 (กก./ซม. ² .)		
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
f_y	4000 (กก./ซม. ² .)		
เหล็กเสริมบน	2-DB12	7-DB12	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	3-DB12 2-DB12	2-DB12	3-DB12 2-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20	-	RB6 @ 15
Total (baht)	13692		
Diff cost (%)	+12.57		

จากตาราง 4.8 แสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบกรณีที่ 2 เมื่อมีการกำหนดค่า f'_c ที่ 210 กก./ซม.² ในคานสองช่วง คานสองช่วง พบว่าขนาดหน้าตัดของการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดการออกแบบเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวด้วยโปรแกรมเข้าช่วยหาค่าที่เหมาะสมผลปรากฏว่า โปรแกรมคัดเลือกขนาดหน้าตัดที่เท่ากันและขนาดของเหล็กปลอกรวมไปถึง



ระยะห่างการวางเหล็กปลอกของคานทั้ง 2 ช่วงเท่ากันอีกด้วย แต่ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวยังคงเลือกใช้ f_y ที่สูงกว่าการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ทำให้ใช้ทั้งขนาดของเหล็กเสริมลดลงจาก DB16 เป็น DB12 ถึงแม้ว่าจะใช้จำนวนเส้นที่เยอะกว่าแต่เมื่อนำมาคำนวณน้ำหนักโดยรวมของเหล็กเสริมผลปรากฏว่า ใช้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าทำให้ราคาต้นทุนโดยรวมมีราคาที่ลดลงกว่าการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปจึงเป็นผลให้ประหยัดต้นทุนลงไป 1125 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 7.29

ตาราง 4.9 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานสองช่วง กรณีที่ 2

รายการ			
วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว			
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
หน้าตัดคาน	25 : 50	25 : 50	25 : 50
f_y	4000 (กก./ชม ² .)		
เหล็กเสริมบน	2-DB16	2-DB16 5-DB12	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	4-DB12	2-DB12	4-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20	-	RB9 @ 25
Total (baht)	14288		
Diff cost (%)	+7.29		

ผลการทดสอบในคานสองช่วง กรณีที่ 2 เมื่อมีการกำหนดค่า f_y 3000 กก./ชม.² คานสองช่วง พบว่าขนาดหน้าตัดของการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดการออกแบบเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวด้วยโปรแกรมเข้าช่วยหาค่าที่เหมาะสมผลปรากฏว่า โปรแกรมคัดเลือขนาดหน้าตัดด้านกว้างน้อยกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบคือ 20 ซม. ส่วนความสูงโปรแกรมเลือกใช้ความยาวเท่ากับตัวอย่างเปรียบเทียบ แต่ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวยังคงเลือกใช้ f_c ที่สูงกว่าการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ทำให้ใช้ทั้งขนาดของเหล็กเสริมลดลง ถึงแม้ว่าจะใช้จำนวนเส้นที่เยอะกว่าแต่เมื่อนำมาคำนวณน้ำหนักโดยรวมของเหล็กเสริมผลปรากฏว่า ใช้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าทำให้ราคาต้นทุนโดยรวมมีราคาที่ลดลงกว่าการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปจึงเป็นผลให้ประหยัดต้นทุนลงไป 647 บาท หรือคิดเป็นร้อยละ 4.20 ดังแสดงในตาราง 4.10



ตาราง 4.10 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กคานสองช่วง กรณีที่ 3

วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว			
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3
หน้าตัดคาน	20 : 50	20 : 50	20 : 50
f'_c	280		
เหล็กเสริมบน	2-DB16	3-DB16 3-DB16	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	4-DB12	2-DB12	4-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20	-	RB6 @ 15
Total (baht)	14766		
Diff cost (%)	+4.20		

4.4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วง

ข้อมูลการออกแบบตัวแปรกำหนดค่า f_y ที่ 3000 จากนั้นมีการสุ่มค่าการออกแบบทั้งสิ้น 5 ตัวแปรคือ ขนาดหน้าตัดคาน ความกว้าง (b) ความสูง (h), ค่ากำลังอัดประลัยคอนกรีต (f'_c), ขนาดเหล็กเสริมรับแรงดึง, ขนาดเหล็กเสริมรับแรงอัด, และเหล็กปลอก เพื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป

จากผลวิเคราะห์การทดสอบด้วยโปรแกรมขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการค้นหาคำตอบจากการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 10 ครั้ง ผลปรากฏว่าในคานช่วงเดียวมีจำนวนรอบที่ต่ำที่สุดคือ 1622 รอบ โดยมีจํารอบเฉลี่ย 1677.4 รอบ อีกทั้งยังมีราคาโดยรวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 9036 บาท จากการค้นหาด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวมีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ซ้ำกันของคำตอบทั้งหมด 7 ครั้ง โดยราคารวมของการออกแบบคานช่วงเดียวถือว่าราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่มาเปรียบเทียบกับส่วนคานสองช่วง การทดสอบของคาน 2 ช่วง ผลปรากฏว่าขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถหาคำตอบที่มีราคารวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 14766 บาท ซึ่งซ้ำกันของคำตอบทั้งหมด 7 ครั้ง ส่วนในตัวอย่างสุดท้ายนั้นเป็นคาน 3 ช่วง ซึ่งผลการทดสอบพบว่ามีคำตอบที่น้อยที่สุดที่ซ้ำกันของคำตอบทั้งหมด 6 ครั้ง โดยมีรอบการคำนวณที่น้อยที่สุดมีผลการคำนวณ 2526 รอบ และราคาโดยรวมของการก่อสร้างที่ต่ำที่สุดคือ 19619 บาท จะเห็นได้ว่ารอบการคำนวณของขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวในตัวอย่างที่ 3 มีการค้นหาคำตอบโดยเฉลี่ย 2600.7 รอบ ดังแสดงในตาราง 4.11



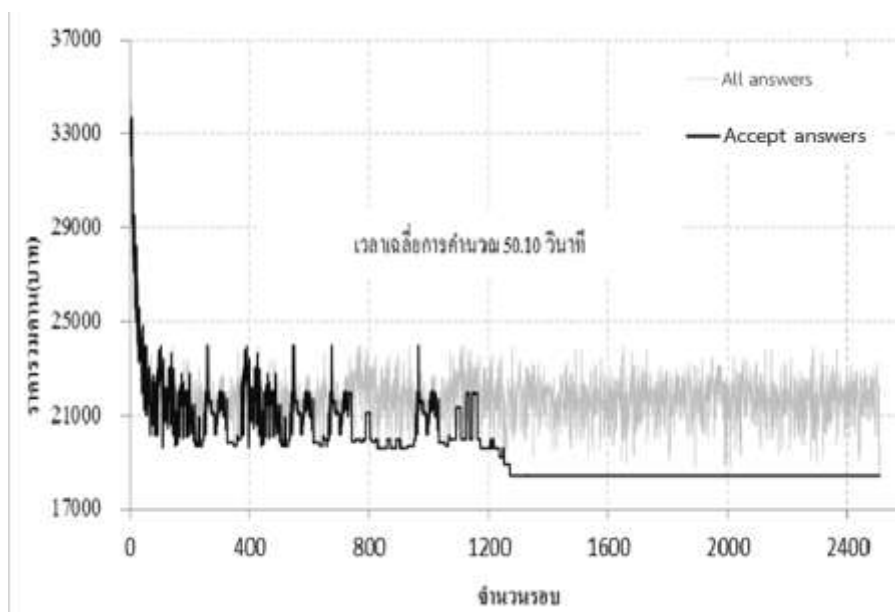
ตาราง 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบการคำนวณและราคาการก่อสร้างตัวอย่างที่ 3

ครั้งที่	ตัวอย่างทดสอบ					
	1		2		3	
	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม	จำนวนรอบ	ราคารวม
1	2546	18445	2521	18976	2526	19619
2	2589	18445	2612	18976	2652	19619
3	2564	21052	2521	18976	2632	19619
4	2541	18445	2584	18976	2717	19619
5	2532	18445	2536	19648	2569	19688
6	2512	18445	2610	19648	2541	19688
7	2522	18445	2521	18976	2581	19616
8	2550	19851	2563	18976	2573	19619
9	2548	18445	2651	19688	2665	19688
10	2509	18445	2616	19735	2551	19731
ค่าเฉลี่ย	2544.9	18890.9	2563.5	19257.5	2600.7	19650.6
ค่าสูงสุด	2589	21052	2651	19735	2717	19731
ค่าต่ำสุด	2509	18445	2521	18976	2526	19619

ตัวอย่างที่ 3 เป็นคาน 3 ช่วงต่อเนื่องกัน ในการทดสอบนี้คานช่วงแรกมีความยาว 5 เมตร ช่วงที่ 2 ยาว 3 เมตร และช่วงที่ 3 ยาว 5 เมตร โดยรับแรงที่มากกระทำแต่ละช่วงคานที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 3.5 (ในบทที่ 3) จากการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งครั้งแรกไม่คิมน้ำหนักของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กนั้นมีค่าโมเมนต์ในคานช่วงแรกโดยประมาณ 8844 กก./ม. โมเมนต์ช่วงที่ 2 ที่นำมาคิดคำนวณตรงช่วงต่อระหว่างคานช่วงที่ 1 และ 2 มีค่าติดลบโดยประมาณ -7581 กก./ม. ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ 2 ตรงกลางคานซึ่งมีค่าโมเมนต์ติดลบโดยประมาณ -4147 กก./ม. ส่วนโมเมนต์ออกแบบช่วงที่ 4 อยู่ตรงช่วงต่อระหว่างคานช่วงที่ 2 และ 3 ซึ่งมีค่าโมเมนต์ติดลบโดยประมาณ -9264 กก./ม. และโมเมนต์ออกแบบช่วงสุดท้ายและมีค่าโมเมนต์ที่มากที่สุดเป็นคานช่วงที่ 3 มีค่าโมเมนต์โดยประมาณ 10268 กก./ม. รูปแบบแรงเฉือนในคาน 3 ช่วงแรงเฉือนในคานช่วงที่ 1 มีค่าโดยประมาณ -11391 กก./ม. แรงเฉือนคานช่วงที่ 2 มีค่าโดยประมาณ -6260 กก./ม. และแรงเฉือนในคานช่วงที่ 3 มีค่าโดยประมาณ 13477 กก./ม.

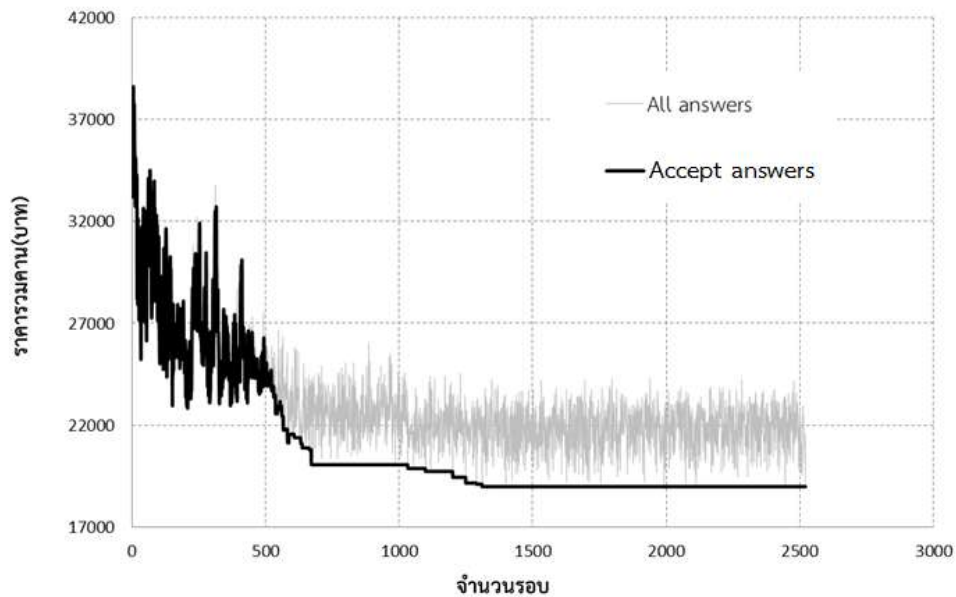


ซึ่งต่อจากนี้โปรแกรมจะมีการหาค่าที่เหมาะสม โดยที่โปรแกรมจะนำค่าที่ได้ไปสุ่มหาหน้าตัดที่จะสามารถรับโมเมนต์ตัดและแรงเฉือนในแต่ละช่วงคานโดยมีการคำนวณใหม่อีกรอบซึ่งจะคติน้ำหนักของโครงสร้างพร้อมทั้งหาค่าการรับน้ำหนักของแรงที่มากระทำจากนั้นโปรแกรมจะค่อยๆหาค่าที่เหมาะสมโดยเปรียบเทียบจากค่าที่สุ่มซึ่งจะมีค่าอยู่ 2 ค่า แล้วทำการลดค่า T_i ในเวลาเดียวกันซึ่งจะทำให้กราฟแสดงผลมีค่าที่แกว่งในวงกว้างในช่วง 1320 คำตอบแรกจากนั้นจะค่อยลดลงจนในที่สุดเมื่อค่า T_i เข้าใกล้ 0 ค่าของคำตอบจะแกว่งในช่วงแคบๆเพื่อหาค่าที่เหมาะสมแบบวงแคบจะทำให้การแสดงผลของเส้นกราฟจะมีค่าที่นิ่งและโปรแกรมจะหยุดการทำงานเมื่อค่า T_i เท่ากับ 0 ซึ่งในตัวอย่างที่ 3 นี้กราฟหยุดการทำงานในรอบที่ 2509 ดังแสดงในภาพประกอบ 4.14

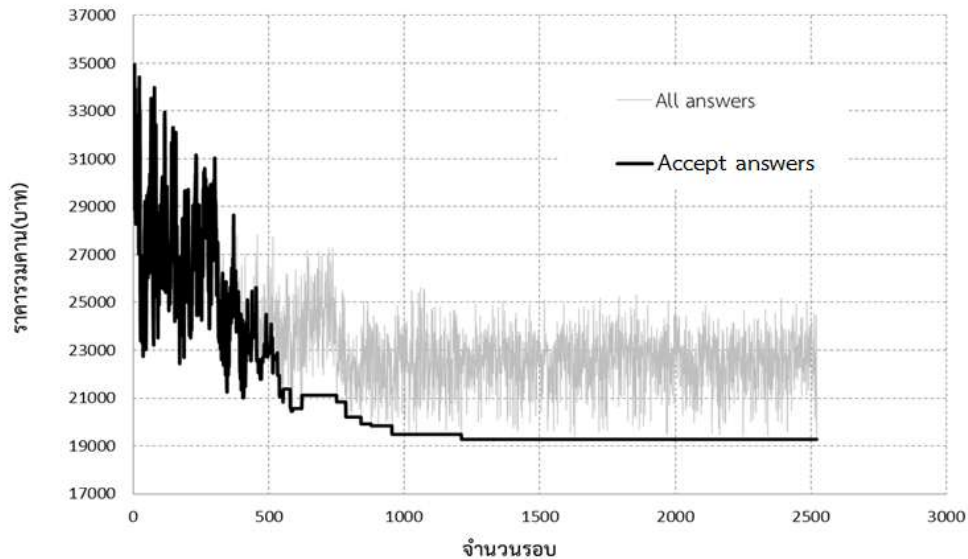


ภาพประกอบ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 1





ภาพประกอบ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 2



ภาพประกอบ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างราคาและจำนวนรอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 3

ผลการทดสอบจากตัวอย่างที่ 3 แสดงข้อมูลในตาราง 4.12 - 4.13 พบว่าการออกแบบในลักษณะเดียวกันคือโปรแกรมเลือก f_y เท่ากับ 4000 กก./ซม.² และทำให้ต้องใช้ f'_c เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ซึ่งคน 3 ช่วงได้แบ่งหน้าตัดการเสริมเหล็กออกเป็น 5 ช่วง เพื่อรับโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งวิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวนั้นเลือกขนาดเหล็กเสริมที่เล็กลงและมีปริมาณ



การใช้เหล็กเสริมหลักลดลงตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างที่คำนวณด้วยวิธีทั่วไปมีการเผื่อกำลังรับแรงไว้ค่อนข้างมาก ส่วนเหล็กรับแรงเฉือนแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกและช่วงที่ 2 ใช้ขนาดเหล็กปลอกและระยะห่างเท่าเดิม ส่วนช่วงที่ 3 นั้นขนาดเหล็กปลอกเท่าเดิมแต่ระยะของเหล็กปลอกถี่ขึ้นกว่าเดิมเนื่องจากหน้าตัดคานคอนกรีตเล็กลงทำให้คอนกรีตที่จะช่วยต้านทานแรงเฉือนได้น้อยกว่าเดิมเมื่อเทียบกับหน้าตัดที่ออกแบบด้วยวิธีทั่วไป แต่เนื่องจากโปรแกรมผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขตามมาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลัง (วสท. 1008-38)

เมื่อเปรียบเทียบราคาพบว่าหน้าตัดที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวประหยัดกว่าวิธีการแบบทั่วไปร้อยละ 13.23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายิ่งคานที่ออกแบบยิ่งมีหลายช่วงมากเท่าไรก็จะมีแนวโน้มที่จะประหยัดค่าการก่อสร้างมากได้เท่านั้น

ตาราง 4.12 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามช่วงด้วยวิธีการแบบทั่วไป

รายการ					
วิธีการแบบทั่วไป					
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 4	หน้าตัดที่ 5
(B : H)	25 : 50	25 : 50	25 : 50	25 : 50	25 : 50
f'_c	280 (กก./ซม. ² .)				
f_y	3000 (กก./ซม. ² .)				
เหล็กเสริมบน	2-DB20	3-DB20 2-DB20	2-DB20	3-DB20 2-DB20	2-DB20
เหล็กเสริมล่าง	2-DB20 1-DB20	2-DB20	2-DB20	2-DB20	4-DB20
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20		RB9 @ 20		RB9 @ 20
Total (baht)	20887				



ตาราง 4.13 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 1

วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว					
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 4	หน้าตัดที่ 5
(B:H)	20 : 50	20 : 50	20 : 50	20 : 50	20 : 50
f'_c	240 (กก./ซม. ²)				
f_y	4000 (กก./ซม. ²)				
เหล็กเสริมบน	2-DB16	4-DB16	2-DB16	4-DB16	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 3-DB12	2-DB16	2-DB16	2-DB16	2-DB16 4-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20		RB9 @ 20		RB9 @ 15
Total (baht)	18445				
Diff cost (%)	+13.23				

ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 2 เมื่อมีการกำหนดค่า f'_c 300 กก./ซม.² พบว่าขนาดหน้าตัดของการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดการออกแบบเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวด้วยโปรแกรมเข้าช่วยหาค่าที่เหมาะสมผลปรากฏว่า โปรแกรมคัดเลือกขนาดหน้าตัดด้านกว้างเท่ากับตัวอย่างเปรียบเทียบ ส่วนความสูงโปรแกรมเลือกใช้ความสูงที่เยอะกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบ แต่ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวยังคงเลือกใช้ f_y ที่มากกว่าตัวอย่างการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ทำให้ใช้ทั้งขนาดของเหล็กเสริมลดลง ถึงแม้ว่าจะใช้จำนวนเส้นที่เยอะกว่าแตเมื่อนำมาคำนวณน้ำหนักโดยรวมของเหล็กเสริมผลปรากฏว่า ใช้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าทำให้ราคาต้นทุนโดยรวมมีราคาที่ลดลงกว่าการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปคิดเป็น 9.15 % ดังแสดงในตาราง 4.14



ตาราง 4.14 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 2

วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว					
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 4	หน้าตัดที่ 5
(B:H)	25 : 50	25 : 50	25 : 50	25 : 50	25 : 50
f_y	4000 (กก./ซม. ² .)				
เหล็กเสริมบน	2-DB16	2-DB16 4-DB12	2-DB16	2-DB16 4-DB12	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 2-DB12	2-DB16	2-DB16	2-DB16	2-DB16 6-DB12
Stirrups @ (cm)	RB6 @ 20		RB6 @ 20		RB9 @ 20
Total (baht)	18976				
Diff cost (%)	+9.15				

ผลการทดสอบตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 3 เมื่อมีการกำหนดค่า f_y 3000 กก./ซม.² คานสามช่วง พบว่าขนาดหน้าตัดของการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดการออกแบบเมื่อใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวด้วยโปรแกรมเข้าช่วยหาค่าที่เหมาะสมผลปรากฏว่า โปรแกรมคัดเลือกขนาดหน้าตัดด้านกว้างเท่ากับตัวอย่างเปรียบเทียบ ส่วนความสูงโปรแกรมเลือกใช้ความสูงที่เยือกกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบ แต่ขั้นตอนวิธีจำลองการอบเหนียวยังคงเลือกใช้ f_c' ที่เท่ากันกับการออกแบบด้วยวิธีทั่วไป ทำให้ใช้ทั้งขนาดของเหล็กเสริมลดลง ถึงแม้ว่าจะใช้จำนวนเส้นที่เยือกกว่าแต่เมื่อนำมาคำนวณน้ำหนักโดยรวมของเหล็กเสริมผลปรากฏว่า ใช้ปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าทำให้ราคาต้นทุนโดยรวมมีราคาที่ลดลงกว่าการออกแบบด้วยวิธีทั่วไปคิดเป็นร้อยละ 5.85 ดังแสดงในตาราง 4.15



ตาราง 4.15 ผลการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กตัวอย่างที่ 3 กรณีที่ 3

วิธีขั้นตอนการจำลองการอบเหนียว					
รายละเอียด	หน้าตัดที่ 1	หน้าตัดที่ 2	หน้าตัดที่ 3	หน้าตัดที่ 4	หน้าตัดที่ 5
(B:H)	20 : 55	20 : 55	20 : 55	20 : 55	20 : 55
f'_c	280				
เหล็กเสริมบน	2-DB16	4-DB16 4-DB12	2-DB16	2-DB16 6-DB12	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 4-DB12	2-DB16	2-DB16	2-DB16	3-DB16 3-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 25		RB9 @ 25		RB9 @ 25
Total (baht)	19619				
Diff cost (%)	+5.85				

สำหรับการออกแบบที่ดีที่สุดของขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวเพื่อหาค่าที่เหมาะสม โดยระยะเวลาการคำนวณน้อยที่สุดโดยเฉลี่ยของกรณีที่ 1, 2 และ 3 ผลปรากฏว่า มีเวลาโดยเฉลี่ยที่ 4.53, 8.21 และ 66.10 วินาทีต่อการคำนวณหาค่าที่เหมาะสม ดังแสดงในตาราง 4.16

ตาราง 4.16 ระยะเวลาโดยเฉลี่ยที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 1, 2 และ 3

รายละเอียด	ตัวอย่างที่ 1	คานสองช่วง	ตัวอย่างที่ 3
เวลา (วินาที)	4.53	8.21	66.10

4.5. การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการศึกษาและการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสำหรับใช้ร่วมกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบดังต่อไปนี้ หลักการของขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวมีการประยุกต์ใช้หาค่าที่เหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แน่นอนซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ราคารวมของการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่า ในคานช่วงเดียวราคารวมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงร้อยละ 10.10, 7.01 และ 3.27 ตามลำดับ ในคานสองช่วง เปรียบเทียบซึ่งโปรแกรมได้มีการคำนวณราคารวมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงร้อยละ 12.57, 7.29 และ 4.20 ตามลำดับ และ ตัวอย่างสุดท้ายค่าความเหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความประหยัดลงร้อยละ 13.23, 9.15 และ 5.85



จากกรณีศึกษากรณีที่ 1 และ 2 พบว่า โปรแกรมขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวมีแนวโน้มที่เลือกกำลังของเหล็กเสริมที่สูงเนื่องจากราคาของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อนำมาใช้งานเหล็กเสริม SD40 มีความคุ้มค่ามากกว่า SD30 อย่างเห็นได้ชัด ส่วนกรณีศึกษากรณีที่ 3 เมื่อกำหนดค่า f_y เป็น 3000 กก./ ซม.² พบว่า โปรแกรมขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถค้นหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมได้แต่มีความประหยัดน้อยกว่ากรณีที่ 1 และ 2 ทั้ง 3 ตัวอย่างทดสอบ

จากการทดสอบทั้ง 3 ตัวอย่างการทดสอบพบว่า กรณีศึกษาที่ 1 มีแนวโน้มทำให้สามารถโปรแกรมขั้นตอนการจำลองการอบเหนียวค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดได้ราคาที่ถูกกว่า กรณีศึกษาที่ 2 และ 3 ซึ่งมีการควบคุมกำลังอัดของคอนกรีตและเหล็กเสริม ตามลำดับ



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การนำขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของระบบปัญญาประดิษฐ์ ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อนำมาแก้ไขปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมของปัญหาต่างๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำมาแก้ไขปัญหาด้านค่าใช้จ่ายต่างๆของการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยกำหนดราคาต่ำสุดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งข้อมูลที่ใช้เป็นตัวแปรสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมได้แก่ ขนาดหน้าตัดคาน กำลังอัดประลัยของคอนกรีต ปริมาณเหล็กเสริม กำลังครากของเหล็กเสริม ราคาวัสดุ และค่าแรงงาน การประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB (2010a) ในการพัฒนาขั้นตอนของอัลกอริทึมจำลองการอบเหนียว สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างนั้นใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการออกแบบรายละเอียดต่างๆ ใช้มาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยกำลัง (ว.ส.ท. 1008-38) จากผลการศึกษาของงานวิจัยสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังต่อไปนี้

- 5.1 สรุปผล
- 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการพัฒนาในงานวิจัย
- 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสำหรับใช้ร่วมกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมสามารถสรุปผลการวิจัยดังต่อไปนี้

5.1.1 หลักการของขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวมีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้หาค่าที่เหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมโดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่แน่นอนซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ราคารวมของการก่อสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการออกแบบวิธีทั่วไปถึงแม้ว่าจะมีจำนวนรอบการคำนวณที่มากแต่ระยะเวลาที่ใช้สั้นถือว่า น้อยมากสำหรับงานการออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งคำตอบทุกคำตอบที่ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวค้นหาได้นั้นล้วนแล้วแต่ผ่านเงื่อนไขการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างเหมาะสมปลอดภัยอีกทั้งยังมีราคาค่าก่อสร้างที่ถูกลง

5.1.2 จากงานวิจัยนี้พบว่า พบว่า ในตัวอย่างที่ 1 ราคารวมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงร้อยละ 10.10, 7.01 และ 3.27 ตามลำดับ ในตัวอย่างที่ 2 เปรียบเทียบซึ่งโปรแกรมได้มีการค้นหาราคารวมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลงร้อยละ 12.57, 7.29 และ 4.20 ตามลำดับ และตัวอย่างที่ 3 ค่าความเหมาะสมของการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีความประหยัดลดลงร้อยละ 13.23, 9.15 และ 5.85

จากกรณีศึกษากรณีที่ 1 และ 2 พบว่า โปรแกรมขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวมีแนวโน้มที่เลือกกำลังของเหล็กเสริมที่สูงเนื่องจากราคาของวัสดุมีค่าใกล้เคียงกันแตเมื่อนำมาใช้งานเหล็กเสริม SD40 มีความคุ้มค่ามากกว่า SD30 อย่างเห็นได้ชัด ส่วนกรณีศึกษากรณีที่ 3 เมื่อกำหนดค่า f_y เป็น



3000 กก./ชม.² พบว่า โปรแกรมขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสามารถค้นหาขนาดหน้าตัดที่เหมาะสมได้แต่มีความประหยัดน้อยกว่ากรณีที่ 1 และ 2 ทั้ง 3 ตัวอย่างทดสอบ

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการพัฒนาในการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสำหรับใช้ร่วมกับการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมซึ่งมีประโยชน์ที่ได้รับดังต่อไปนี้

5.2.1 สามารถนำไปใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวใช้ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

5.2.2 สามารถหาแนวทางการเลือกใช้วัสดุที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับราคาในท้องตลาดเพื่อใช้ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3 ข้อเสนอแนะ

กระบวนการในการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวสำหรับใช้ร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้อย่างเหมาะสม จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบของขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียวแล้วก็ตาม แต่ทั้งนี้หากนำไปพัฒนากระบวนการดังกล่าวเพิ่มเติมขึ้นอีกอาจจะสามารถช่วยในการหาคำตอบที่ดีได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น สำหรับแนวทางการพัฒนางานวิจัยในครั้งต่อไปดังต่อไปนี้

5.3.1 พิจารณาถึงผลของแรงที่มากกระทำต่อคานเพิ่มเติม อาทิเช่น แรงที่กระทำเป็นจุด (Point Load),

แรงบิดที่มากกระทำโครงสร้าง (Torsion) ภายในโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.3.2 เพิ่มเติมรูปแบบการหาค่าที่เหมาะสมโดยนำโครงสร้างรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น โครงข้อหมุน พื้น คานยื่น เสา ฐานราก เสาเข็ม และสะพาน เป็นต้น



เอกสารอ้างอิง



เอกสารอ้างอิง

- กนกอร แก้วนิรัตน์. (2544). *การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมสำหรับคานคอนกรีตอัดแรงบางส่วน*. กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คณะกรรมการกำกับนโยบายราคางานก่อสร้าง กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง. (2555). *บัญชีค่าแรงงาน/ดำเนินการสำหรับการถอดแบบคำนวณราคากลางงาน*. กรุงเทพฯ: กรมบัญชีกลาง กระทรวงการคลัง.
- จักรี ตียะวงศ์สุวรรณ และจิรัฐิติ บรรจงศิริ. (2550). *การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมด้วยวิธีคำนวณเชิงพันธุกรรม*. [ออนไลน์]. ได้จาก: http://www.thaiccontractors.com/uploads/article/article_1196172926.pdf. [สืบค้นเมื่อ วันที่ 2 กรกฎาคม 2556].
- มงคล จิรวชิรเดช. (2549). *การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก*. พิมพ์ครั้งที่ 4. นครราชสีมา: สาขาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พิพัฒน์ ทองบ่อ. (2543). *การพัฒนาเจเนติกอัลกอริทึมสำหรับใช้ร่วมกับการออกแบบโครงสร้างเสาโทรมนาคม*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี.
- วินิต ช่อวิเชียร. (2545). *การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง*. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: ป. สัมพันธ์พาณิชย์.
- วีระพงษ์ ลีम्मกลทิพย์. (2548). *การใช้เจเนติกอัลกอริทึมเพื่อการออกแบบและการหาค่าที่เหมาะสมของคานสะพานคอนกรีตอัดแรง*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- วรรณาด แซ่มสุวรรณ. (2548). *การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับโครงถักเหล็กในระนาบโดยใช้วิธีอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม*. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2545). *มาตรฐานการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง*. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์.
- _____. (2548). *แนวทางการวัดปริมาณงานก่อสร้างอาคาร*. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระราชูปถัมภ์.
- สำเร็จ รักซ้อน. (2552). *การออกแบบโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลังและหน่วยแรงใช้งาน*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อลงกรณ์ ละม่อม. (2550). *อัลกอริทึมการเลือกขนาดวัสดุที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการจำลองการอบเหนียว*. วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Alongkorn Lamom and Wanchai Rivepipoon. (2005). A nodal numbering algorithm for 2D structural simulation. *ECTI Transaction on Computer and Information Tech*, 1(2), 108 -116; November.
- Nimtawa, A. and Nanakorn, P. (2010). A Genetic Algorithm for Beam–Slab Layout Design of Rectilinear Floors. *Engineering Structures*, 32, 3488-3500.



- Kirkpatrick, C. D., Gelatt, Jr. and Vecchi, M. P. (2009). Optimization by Simulated Annealing. *Journal of Science*, 220, 671-680.
- Paya-Zaforteza, I. (2009) CO₂-Optimization of Reinforced Concrete Frames by Simulated Annealing. *Engineering Structures*, 31, 1501-1508.
- Cheng, J. (2010). Optimum Design of Steel Truss Arch Bridges Using a Hybrid Genetic Algorithm. *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 1011-1017.
- Bathe, K.J. (1996). *Finite Element Procedure in Engineering Analysis*. New Jersey: Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River.
- Lamberti, L. (2008). An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Design Optimization of Truss Structures. *Computers and Structures*, 86, 1936–1953.
- Noilublao, N. and Bureerat, S. (2011). Simultaneous Topology, Shape And Sizing Optimization Of A Three-Dimensional Slender Truss Tower Using Multi Objective Evolutionary Algorithms. *Computers and Structures*, 89, 2531-2538.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

พื้นที่เหล็กเสริมตามยาวและตามขวางของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ตาราง ก-1 พื้นที่เหล็กเสริมตามจำนวนเส้น (ซม.²)

ขนาดเหล็กเสริม (ม.ม.)	จำนวนเส้นของเหล็กเสริม									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DB12	1.13	2.26	3.39	4.52	5.65	6.79	7.92	9.05	10.18	11.31
DB16	2.01	4.02	6.03	8.04	10.05	12.06	14.07	16.08	18.10	20.11
DB20	3.14	6.28	9.42	12.57	15.71	18.85	21.99	25.13	28.27	31.42
DB25	4.91	9.82	14.73	19.63	24.54	29.45	34.36	39.27	44.18	49.09
DB28	6.16	12.32	18.47	24.63	30.79	36.95	43.10	49.26	55.42	61.58

ตาราง ก-2 พื้นที่เหล็กเสริมต่อความยาวหนึ่งเมตร (ซม.²)

ระยะห่างเหล็กเสริม	พื้นที่เหล็กเสริมต่อความยาวหนึ่งเมตร (ซม. ²)			
	RB 6	RB6	DB10	DB12
5 ซม.	5.66	12.72	15.60	22.60
10 ซม.	2.83	3.36	7.80	11.30
15 ซม.	1.89	4.24	5.20	7.53
20 ซม.	1.42	3.18	3.90	5.65
25 ซม.	1.13	2.54	3.12	4.52
30 ซม.	0.94	2.12	2.60	3.77
35 ซม.	0.81	1.82	2.23	3.23
40 ซม.	0.94	1.59	1.95	2.83
45 ซม.	0.81	1.41	1.73	2.51



ภาคผนวก ข

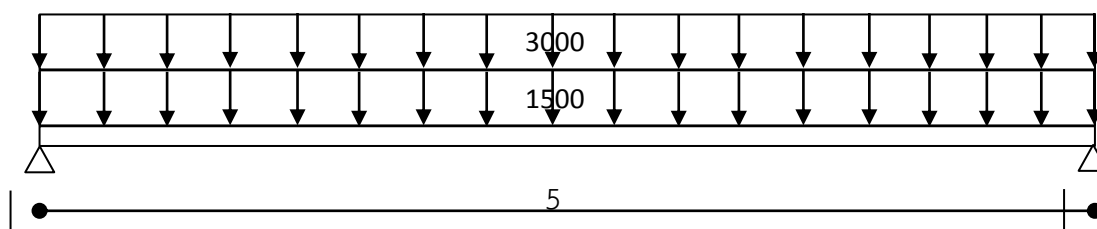
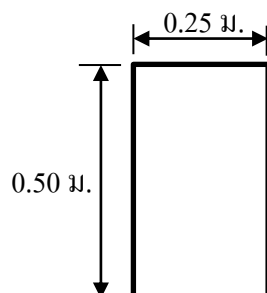
ตัวอย่างการออกแบบและการจัดเรียงเหล็กเสริมสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ตัวอย่างการออกแบบวิธีทั่วไปใช้ตัวอย่างและวิธีทำตามตัวอย่างที่ 1 หัวข้อ 6.2 หน้า 76-82 ในหนังสือการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กวิธีกำลังและหน่วยแรงใช้งาน (สำเร็จ รักซ้อน)

DL = 1500 กก./ม. (ไม่รวมน้ำหนักคาน)

LL = 3000 กก./ม.



ภาพประกอบ ข-1 น้ำหนักคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว

กำหนดให้

1. น้ำหนักพื้นและผนังลงบนคาน ไม่รวมน้ำหนักคาน DL = 1500 กก./ม.
2. น้ำหนักบรรทุกจร LL = 3000 กก./ม.
3. กำลังต้านทานแรงอัดสูงสุดของคอนกรีต $f'_c = 300$ กก./ซม.²
4. กำลังครากของเหล็กเสริม $f_y = 3000$ กก./ซม.²
5. ขนาดของหน้าตัดคานใช้ 0.25×0.50 ม.

การคำนวณออกแบบ

1. คำนวณน้ำหนักแผ่กระจายประลัย (W_u)
 น้ำหนักคาน = $0.25 \times 0.50 \times 2400 = 300$ กก./ม.
 $W_u = 1.4 (1500 + 300) + 1.7 (3000)$ กก./ม.
 $W_u = 7620$ กก./ม.
2. คำนวณโมเมนต์ตัดประลัย (M_u)
 $M_u = W_u L^2 / 8$ กก.-ม.
 $M_u = 7620 \times 5^2 / 8 = 23813$ กก.-ม.
3. คำนวณหาค่า



$$\rho_b = \beta_1 \frac{0.85 f'_c}{f_y} \cdot \frac{6120}{6120 + f_y}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{f'_c - 280}{70} \right)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \left(\frac{300 - 280}{70} \right) = 0.84$$

ดังนั้น

$$\rho_b = 0.84 \frac{0.85 \times 300}{3000} \times \frac{6120}{6120 + 3000} = 0.0447$$

จากสมการ $\rho_{\max} = 0.75 \rho_b = 0.75 \times 0.0447 = 0.036$

และจากสมการของ $\rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = 0.0047$

$$\rho = 0.50 \rho_b = 0.50 \times 0.0447 = 0.024$$

4. พิจารณาค่าความลึกประสิทธิภาพ (d) โดยสมมติใช้เหล็กเสริมคอนกรีตขนาด DB25 จำนวน 2 ชั้นและใช้เหล็กลูกตั้ง DB10

5. คำนวณระยะ $A_{s1} = \rho b d$

$$A_{s1} = 0.024 \times 25 \times 41.25 = 24.75 \text{ ซม.}$$

6. คำนวณระยะ $a = \frac{A_{s1} f_y}{0.85 f'_c b}$ ซม.

$$a = \frac{24.75 \times 3000}{0.85 \times 300 \times 25} \text{ ซม.}$$

7. คำนวณโมเมนต์ดัด M_n

$$\phi M_n = \phi A_{s1} f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \text{ กก.-ม.}$$

$$\phi M_n = 0.90 \times 24.75 \times 3000 \left(41.25 - \frac{11.6}{2} \right) = \frac{2368946}{100} \text{ กก.-ม.}$$



$$\phi M_n = 23690 \text{ กก.-ม.}$$

8. ตรวจสอบ $\phi M_n < M_u$ หรือ $\phi M_n < M_u$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\phi M_n = 0.90 \times 61.80 \times 25 \times 41.25^2 = \frac{2368946}{100} = 23690 \text{ กก.-ม.}$$

ดังนั้น $\phi M_n \approx M_u$ เนื่องจากค่า ϕM_n น้อยกว่าค่า M_u เพียง 123 กก.-ม. ฉะนั้นจึงสามารถนำไปใช้งานได้

9. ตรวจสอบค่า ρ ซึ่งควรอยู่ระหว่าง $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$

$$\text{จะได้ว่า } 0.0047 \leq 0.024 \leq 0.036 \text{ ok}$$

10. คำนวณ R_u จากน้ำหนักจริง

$$R_u = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{23813 \times 100}{0.90 \times 25 \times 41.25^2} = 62.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

11. คำนวณ ρ ที่ต้องการ

$$\rho = \frac{0.85 f_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_u}{0.85 f_c}} \right)$$

$$\rho = \frac{0.85 \times 300}{3000} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 62.2}{0.85 \times 300}} \right) = 0.024$$

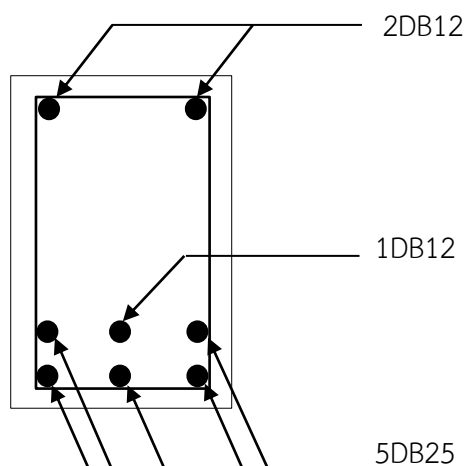
12. คำนวณหาปริมาณเหล็กเสริม

$$A_s = \rho b d$$

$$A_s = 0.024 \times 25 \times 41.25 = 24.9 \text{ ซม.}^2$$

ดังนั้นการออกแบบนี้ใช้เหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร จำนวน 5 เส้น และ DB12 จำนวน 1 เส้น หรือ 5DB25+1DB12 แสดงดังภาพประกอบ ข-2





ภาพประกอบ ข-2 การเสริมเหล็กคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว

การออกแบบเหล็กดัด

1. คำนวณน้ำหนักแผ่นประลัย (W_u)

น้ำหนักคาน = 300 กก./ม.

$$W_u = 1.4 (1500+300) + 1.7 (3000) \text{ กก./ม.}$$

$$W_u = 7620 \text{ กก./ม.}$$

2. คำนวณแรงเฉือนประลัย

$$V = \frac{W_u L}{2} = \frac{7620 \times 5}{2} = 19050 \text{ กก.}$$

3. แรงเฉือนประลัย (V_u)

$$V_u = V - W_u d \text{ กก.}$$

$$V_u = 19050 - 7620 \times 0.4125 = 15907 \text{ กก.}$$

4. คำนวณกำลังเฉือนของคอนกรีต (ϕV_c)

$$\phi V_c = \phi 0.53 \sqrt{f_c} b_w d \text{ กก.}$$

$$\phi V_c = \phi 0.85 \times \sqrt{300} \times 25 \times 41.25 = 8047 \text{ กก.}$$

5. ตรวจสอบว่าต้องเสริมเหล็กดัดหรือไม่

พบว่า $V_u > \phi V_c$ หรือ $19050 > 8047$ กก.

ดังนั้นต้องเสริมเหล็กดัด



6. ค่าครึ่งหนึ่งของกำลังรับแรงเฉือนของคอนกรีต

$$\frac{\phi V_c}{2} = \frac{8047}{2} = 4023 \text{ กก.}$$

7. จากสามเหลี่ยมคล้าย

$$\frac{x1}{(19050 - 8047)} \text{ ระยะ } x1 = 1.45 \text{ เมตร}$$

$$\frac{x2}{(19050 - 4023)} \text{ ระยะ } x2 = 2.00 \text{ เมตร}$$

ต้องเสริมเหล็กดัดจากขอบฐานรองรับจนถึงระยะ 2.00 ม. ใช้เหล็กดัดขนาด DB10

คิด 2 ขา

$$A_v = 2 \times 0.78 = 1.56 \text{ ซม.}^2$$

8. จากสมการ $\phi V_s = V_u - \phi V_c$

$$\text{จะได้ว่า } \phi V_s = 150907 - 8047 = 7860 \text{ กก.}$$

$$\text{เทียบสมการ } \phi 1.1 \sqrt{f_c} b d = 0.85 \times 1.1 \sqrt{300} \times 25 \times 41.25 = 16701 \text{ กก.}$$

$$\text{ในที่นี้ } V_u - \phi V_c \leq 1.1 \sqrt{f_c} b_w d$$

9. เรียงเหล็กดัดเลือกใช้ค่าที่น้อยจากสมการข้างล่างนี้

$$S_{\max} = \frac{d}{2} = \frac{41.25}{2} = 20 \text{ ซม.}$$

$$S = 60 \text{ ซม.}$$

ดังนั้นใช้เหล็กดัด DB10 @ 20 ซม.

10. คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของเหล็กดัดที่ ระยะ 20 ซม.

$$\phi V_s = \frac{\phi A_v \cdot f_y \cdot d}{s} = \frac{0.85 \times 1.56 \times 3000 \times 41.25}{20} = 8205 \text{ กก.}$$

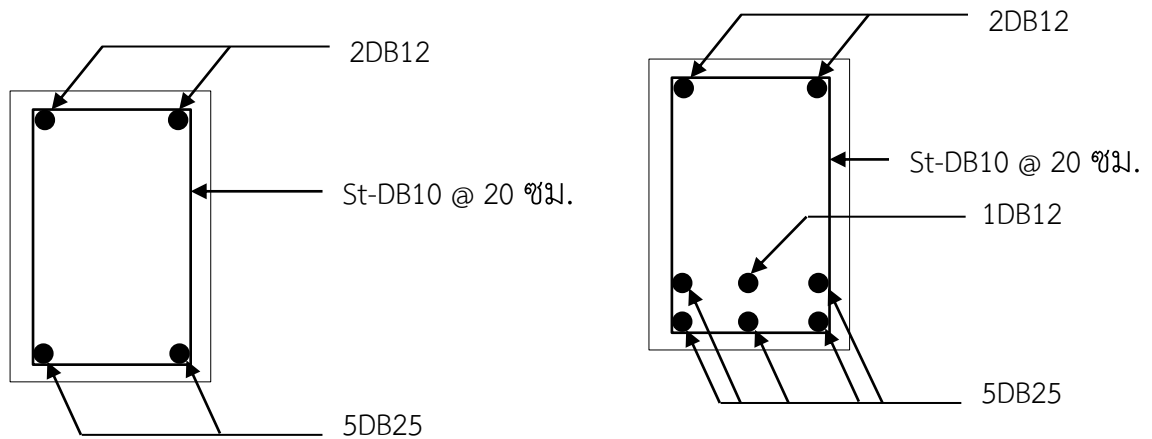
11. คำนวณค่า $\phi V_c + \phi V_s = 8047 + 8205 = 16252 \text{ กก.}$

$$x3 = 0.40 \text{ ม.}$$

12. การเสริมเหล็กดัด

$$0.40 < x < 2.00 \text{ จากระยะขอบฐานใช้ DB10 @ 20 ซม.}$$

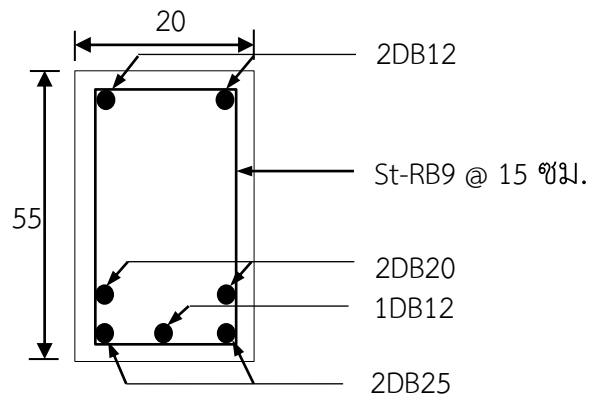




ภาพประกอบ ข-3 การเสริมเหล็กยื่นและเหล็กปลอกของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียว
ตัวอย่างคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f_c' และ f_y

กำหนดให้

1. น้ำหนักพื้นและผนังลงบนคาน ไม่รวมน้ำหนักคาน $DL = 1500$ กก./ม.
2. น้ำหนักบรรทุกจร $LL = 3000$ กก./ม.



ภาพประกอบ ข-4 การเสริมเหล็กในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f_c' และ f_y

ตาราง ข-1 ผลการเลือกหน้าตัดในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f_c' และ f_y

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน B : H (cm)	20 : 55
f_c' (กก./ซม ² .)	280
f_y (กก./ซม ² .)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB25
	1-DB12
	2-DB20
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 15

การคำนวณออกแบบ

1. คำนวณน้ำหนักแผ่กระจายประลัย (W_u)

$$\text{น้ำหนักคาน} = 0.20 \times 0.55 \times 2400 = 264 \quad \text{กก./ม.}$$

$$W_u = 1.4 (1500+264) + 1.7 (3000) = 7569.6 \quad \text{กก./ม.}$$

2. คำนวณโมเมนต์ดัดประลัย (M_u)

$$M_u = W_u L^2 / 8 = 7569.6 \times 5^2 / 8 = 23655 \quad \text{กก.-ม.}$$

$$V_u = W_u L / 2 = 7569.6 \times 5 / 2 = 18924 \quad \text{กก.-ม.}$$

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.55 - \left(\frac{10.95 \left(3 + 0.9 + \frac{2.5}{2} \right) + 6.27 \left(3 + 0.9 + 10.95 + 2.5 + \frac{2.0}{2} \right)}{10.95 + 6.27} \right) = 48.157 \quad \text{ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.2}{2} = 4.5 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ (h) ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{16}$ กรณีคานช่วงเดียว



$$\frac{L}{16} = \frac{5}{16} = 0.31 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.55$ ม.) มากกว่า 0.31 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{17.22}{20 \times 48.157} - \frac{2.26}{20 \times 48.157} = 0.0136$$

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)(4.5)}{4000(48.157)} \left(\frac{6120}{6120 - 4000} \right) = 0.0131$$

$0.0136 > 0.0131$ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f'_s = f_y = 4000$ กก./ชม.²

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0031, 0.0035) = 0.0035$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0306$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0306) + 0.0023 \frac{4000}{4000} = 0.02525$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{17.22}{20 \times 48.157} = 0.0179$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.0179$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f_c b} = \frac{(17.22 - 2.26) 4000}{0.85(280)(20)} = 14.571 \text{ ชม.}$$

$$\phi M_n = 0.9(A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$



$$= 0.9(17.22 - 2.26)4000 \left(48.157 - \frac{14.571}{2} \right) + 2.26(4000)(48.157 - 4.5)$$

$$\phi M_n = 25,286 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_n ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ตัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{18924 \left(\frac{5}{2} - 0.48157 \right)}{\frac{5}{2}} = 15279 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c} b d = 0.53 \sqrt{280} (20)(48.157) = 8542 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{15279}{0.85} - 8542 = 9433 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(48.157)}{15} = 9801 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 0.85(8542 + 9801) = 15592 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{smax} = 2.1 \sqrt{f_c} b d = 2.1 \sqrt{280} (20)(48.157) = 33845 \text{ กก.}$$

$\phi V_n < V_{smax}$ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1 \sqrt{f_c} b d = 1.1 \sqrt{280} (20)(48.157) = 17728 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1 \sqrt{f_c} b d$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$$d/2 = 48.157/2 = 24 \text{ ซม.}$$

เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.15 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 15592$ กก.

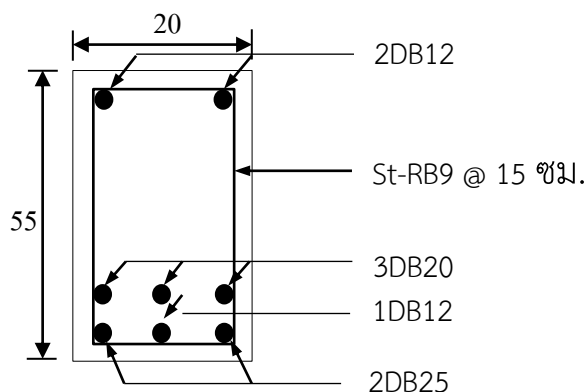
ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้



ตัวอย่างคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

กำหนดให้

1. น้ำหนักพื้นและผนังลงบนคาน ไม่รวมน้ำหนักคาน DL = 1500 กก./ม.
2. น้ำหนักบรรทุกจร LL = 3000 กก./ม.



ภาพประกอบ ข-5 การเสริมเหล็กในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

ตาราง ข-2 ผลการเลือกหน้าตัดในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 55
f_c' (กก./ซม. ²)	300
f_y (กก./ซม. ²)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB25
	1-DB12
	3-DB20
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 15
Covering (cm)	3

การคำนวณออกแบบ

1. คำนวณน้ำหนักแผ่กระจายประลัย (W_u)
 น้ำหนักคาน = $0.20 \times 0.55 \times 2400 = 264$ กก./ม.
 $W_u = 1.4 (1500+264) + 1.7 (3000) = 7569.6$ กก./ม.
2. คำนวณโมเมนต์ตัดประลัย (M_u)
 $M_u = W_u L^2 / 8 = 7569.6 \times 5^2 / 8 = 23655$ กก.-ม.
 $V_u = W_u L / 2 = 7569.6 \times 5 / 2 = 18924$ กก.



3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.55 - \left(\frac{12.96 \left(3 + 0.9 + \frac{2.5}{2} \right) + 7.4 \left(3 + 0.9 + 12.96 + 2.5 + \frac{2.0}{2} \right)}{12.96 + 7.4} \right) = 48.391 \text{ ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{\text{top}}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.2}{2} = 4.5 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ (h) ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{16}$ กรณีคาน

ช่วงเดียว

$$\frac{L}{16} = \frac{5}{16} = 0.31 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.55$ ม.) มากกว่า 0.31 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไข
การตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f_c \cdot d'}{f_y \cdot d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{20.36}{20 \times 48.391} - \frac{2.26}{20 \times 48.391} = 0.0165$$

$$\frac{0.85 \cdot \beta \cdot f_c \cdot d'}{f_y \cdot d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(300)(4.5)}{4000(48.391)} \left(\frac{6120}{6120 - 4000} \right) = 0.0149$$

$$0.0165 > 0.0149 \text{ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก } f'_s = f_y = 4000 \text{ กก./ซม.}^2$$

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจาก
สมการ



$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794\sqrt{f_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0031, 0.0035) = 0.0035$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85\beta_1 f_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.84)(300)}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0328$$

$$\rho_{\max} = 0.75\rho_b + \rho' \frac{f_s}{f_y} = 0.75(0.0328) + 0.0023 \frac{4000}{4000} = 0.0269$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{20.36}{20 \times 48.391} = 0.021$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.021$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f_c b} = \frac{(20.36 - 2.26)4000}{0.85(300)(20)} = 15.971 \text{ ซม.}$$

$$\phi M_n = 0.9(A_s - A'_s)f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$

$$= 0.9(20.36 - 2.26)4000 \left(48.391 - \frac{15.971}{2} \right) + 2.26(4000)(48.391 - 4.5)$$

$$\phi M_n = 29,620 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_n ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{18924 \left(\frac{5}{2} - 0.48391 \right)}{\frac{5}{2}} = 15261 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f_c}bd = 0.53\sqrt{300}(20)(48.391) = 8885 \text{ กก.}$$



คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{15261}{0.85} - 8885 = 9069 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(48.391)}{15} = 9848 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(8885 + 9848) = 15923 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s\max} = 2.1\sqrt{f'_c}bd = 2.1\sqrt{300}(20)(48.391) = 35202 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n < V_{s\max} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{300}(20)(48.391) = 18439 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$$d/2 = 48.391/2 = 24 \text{ ซม.}$$

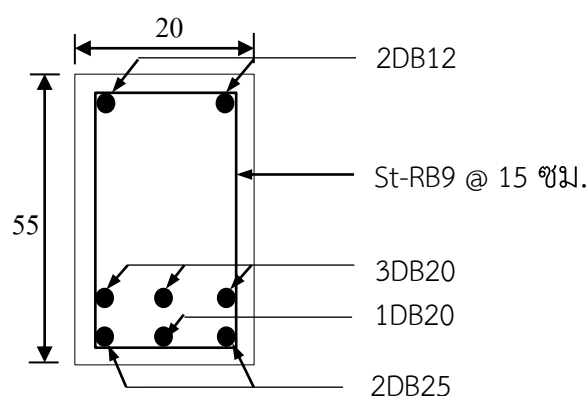
เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9 @ 0.15 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 15923$ กก.

ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

ตัวอย่างคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y

กำหนดให้

1. น้ำหนักพื้นและผนังลงบนคาน ไม่รวมน้ำหนักคาน DL = 1500 กก./ม.
2. น้ำหนักบรรทุกจร LL = 3000 กก./ม.



ภาพประกอบ ข-6 ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_y



ตาราง ข-3 ผลการเลือกหน้าตัดในคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_y

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 55
f_c' (กก./ซม. ²)	300
f_y (กก./ซม. ²)	3000
เหล็กเสริมบน	2-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB25
	1-DB20
Stirrups @ (cm)	3-DB20
	RB9 @ 15

การคำนวณออกแบบ

1. คำนวณน้ำหนักแผ่กระจายประลัย (W_u)

$$\text{น้ำหนักคาน} = 0.20 \times 0.55 \times 2400 = 264 \text{ กก./ม.}$$

$$W_u = 1.4 (1500+264) + 1.7 (3000) = 7569.6 \text{ กก./ม.}$$

2. คำนวณโมเมนต์ดัดประลัย (M_u)

$$M_u = W_u L^2 / 8 = 7569.6 \times 5^2 / 8 = 23655 \text{ กก.-ม.}$$

$$V_u = W_u L / 2 = 7569.6 \times 5 / 2 = 18924 \text{ กก.}$$

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.55 - \left(\frac{12.96 \left(3 + 0.9 + \frac{2.5}{2} \right) + 9.4227 \left(3 + 0.9 + 12.96 + 2.5 + \frac{2.0}{2} \right)}{12.96 + 9.42} \right) = 48.952 \text{ ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.2}{2} = 4.5 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ (h) ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{16}$

กรณีคานช่วงเดียว



$$\frac{L}{16} = \frac{5}{16} = 0.31 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.55$ ม.) มากกว่า 0.31 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{22.38}{20 \times 48.952} - \frac{2.26}{20 \times 48.952} = 0.0205$$

$$\frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(300)(4.5) \left(\frac{6120}{6120 - 3000} \right)}{3000(48.952)} = 0.0128$$

$$0.0205 > 0.0128 \text{ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก } f'_s = f_y = 3000 \text{ กก./ซม.}^2$$

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) จำนวนจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0046, 0.0046) = 0.0046$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.84)(300)}{3000} \left(\frac{6120}{6120 + 3000} \right)$$

$$= 0.0479$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0479) + 0.0023 \frac{3000}{3000} = 0.038225$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{22.38}{20 \times 48.952} = 0.0228$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.0228$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด



$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(22.38 - 2.26)3000}{0.85(300)(20)} = 11.84 \quad \text{ซม.}$$

$$\begin{aligned}\phi M_n &= 0.9(A_s - A'_s)f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \\ &= 0.9(22.38 - 2.26)3000 \left(48.952 - \frac{11.84}{2} \right) + 2.26(3000)(48.952 - 4.5)\end{aligned}$$

$$\phi M_n = 26,391 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ตัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{18924 \left(\frac{5}{2} - 0.48952 \right)}{\frac{5}{2}} = 15219 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd = 0.53\sqrt{300}(20)(48.952) = 8987.45 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{15219}{0.85} - 8987.45 = 8917 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(48.952)}{15} = 9962.7 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(8987.45 + 9962.7) = 16107.62 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s\max} = 2.1\sqrt{f'_c}bd = 2.1\sqrt{300}(20)(48.952) = 35610.69 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n < V_{s\max} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{300}(20)(48.952) = 18653 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$$d/2 = 48.952/2 = 24.4 \text{ ซม.}$$

เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.15 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 16107.62$ กก.

ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้



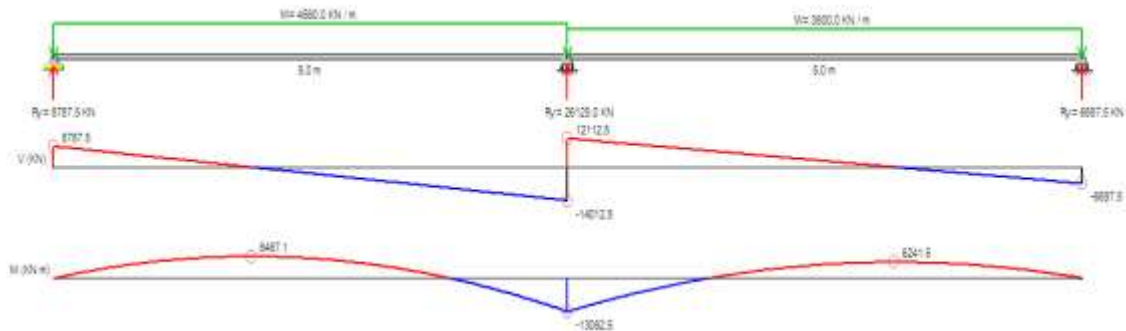
การออกแบบคานสองช่วงด้วยวิธีทั่วไป

นำโมเมนต์สูงสุดมาพิจารณาซึ่งในกรณีคานสองช่วงโมเมนต์สูงสุดเกิดที่จุดต่อระหว่างคานโดยมีค่าเป็นลบทำให้ต้องเสริมเหล็กบนเพื่อรับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นดังนี้

สมมติให้โมเมนต์สูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ

$$1. M_U = -13,063 \text{ กก.-ม.}$$

$$2. V_U = -14,013 \text{ กก.}$$



ภาพประกอบ ข-7 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วง

3. กำหนดให้

$$\text{ความสูงคาน } 50 \text{ ซม. } f'_c = 210 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\text{ความกว้างคาน } 25 \text{ ซม. } f_y = 3000 \text{ กก./ซม.}^2$$

สมมติให้ $d = 42$ ซม.

4. พิจารณากำลังมากที่สุดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสริมเหล็ก

$$\text{เหล็กเสริมน้อยสุด } \rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = 0.0047$$

$$\text{เหล็กเสริมมากที่สุด } \rho_{\max} = 0.75 \bar{\rho}_b = 0.75 \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = 0.0255$$

5. อัตราส่วนเสริมเหล็ก ρ ที่ต้องการ

$$R_n = \frac{M_U}{\phi b d^2} = \frac{13063}{0.9 \times 25 \times 42^2} = 32.91 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}} \right) = \frac{0.85 \times 210}{3000} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 32.91}{0.85 \times 210}} \right) = 0.0163$$

$$\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$$



6. คำนวณค่า A_s ที่ต้องการและเลือกใช้เหล็กเสริม

$$A_s = \rho b d = 0.0163 \times 25 \times 42 = 17.115 \text{ ซม.}^2$$

เลือกเหล็กเสริม 4DB20 และ 3DB16 ($A_s = 18.59 \text{ ซม.}^2$)

7. ตรวจสอบการออกแบบ

$$T = A_s f_y = 18.59 \times 3000 = 55770 \text{ กก.}$$

$$a = \frac{T}{0.85 \times f'_c b} = \frac{55770}{0.85 \times 210 \times 25} = 12.50 \text{ ซม.}$$

$$\phi M_n = 0.9 \left(T \left(d - \frac{a}{2} \right) \right) = 37680 \left(42 - \frac{12.50}{2} \right) / 100 = 17944.2 \text{ กก.-ม.}$$

$$\phi M_n = 17944.2 \text{ กก.-ม.} > M_u = 13063 \text{ กก.-ม.} \text{ ผ่านเงื่อนไขการออกแบบ}$$

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{14013 \left(\frac{5}{2} - 0.42 \right)}{\frac{5}{2}} = 11658.8 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 0.53 \sqrt{210} (25)(42) = 8064.45 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{11658.8}{0.85} - 8064.45 = 5651.79 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(42)}{20} = 6410.88 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 0.85(8064.45 + 6410.88) = 14475.33 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s \max} = 2.1 \sqrt{f'_c} b d = 2.1 \sqrt{210} (25)(42) = 31953.48 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n < V_{s \max} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$



$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{210}(25)(42) = 16737.54 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

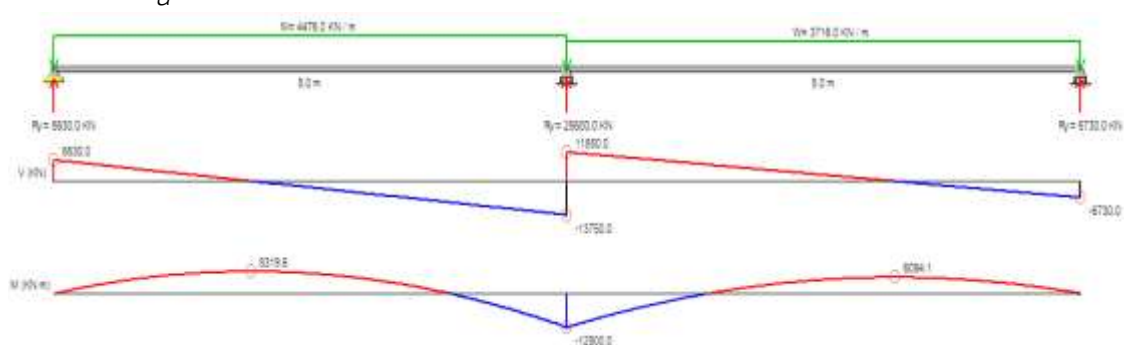
$d/2 = 42/2 = 21$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.20 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 12833.45$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

ตัวอย่างคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f'_c และ f_y

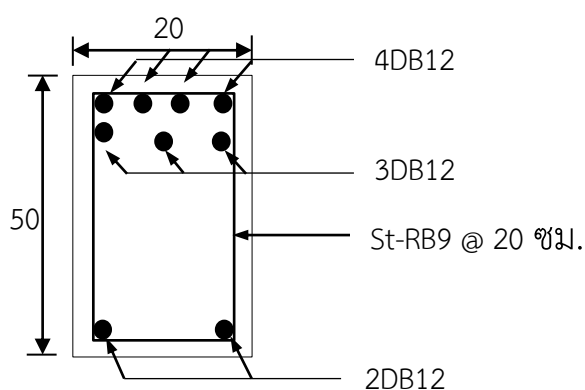
นำโมเมนต์สูงสุดมาพิจารณาซึ่งในกรณีคานสองช่วงโมเมนต์สูงสุดเกิดที่จุดต่อระหว่างคานโดยมีค่าเป็นลบทำให้ต้องเสริมเหล็กบนเพื่อรับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นดังนี้

$$1. M_U = -12800 \text{ กก.-ม.}$$

$$2. V_U = -13750 \text{ กก.}$$



ภาพประกอบ ข-8 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 1



ภาพประกอบ ข-9 ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 1 แบบกำหนดค่า f'_c และ f_y



ตาราง ข-4 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบกำหนดค่า f_c' และ f_y

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 50
f_c' (กก./ซม ² .)	240
f_y (กก./ซม ² .)	4000
เหล็กเสริมบน	4-DB12 3-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.50 - \left(\frac{4.52 \left(3 + 0.9 + \frac{1.2}{2} \right) + 3.39 \left(3 + 0.9 + 4.52 + 2.5 + \frac{1.2}{2} \right)}{4.52 + 3.39} \right) = 42.472 \text{ ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.2}{2} = 4.5 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ(h)ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{18.5}$

กรณีคานสองช่วง

$$\frac{L}{18.5} = \frac{5}{18.5} = 0.27 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.50$ ม.) มากกว่า 0.27 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน



5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{7.91}{20 \times 42.472} - \frac{2.26}{20 \times 42.472} = 0.0066$$

$$\frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(240)(4.5) \left(\frac{6120}{6120 - 4000} \right)}{4000(42.472)} = 0.00133$$

$0.0066 > 0.00133$ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f'_s = f_y = 4000$ กก./ซม.²

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0031, 0.0035) = 0.0035$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(240)}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0262$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0262) + 0.0023 \frac{4000}{4000} = 0.0285$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{7.91}{20 \times 42.472} = 0.00931$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.00931$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้น

ปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(7.91 - 2.26) 4000}{0.85(240)(20)} = 5.539 \quad \text{ซม.}$$

$$\phi M_n = 0.9 (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$



$$= 0.9(7.91 - 2.26)4000 \left(42.472 - \frac{5.539}{2} \right) + 2.26(4000)(42.472 - 4.5)$$

$$\phi M_n = 15,799 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ตัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{13750 \left(\frac{5}{2} - 0.42472 \right)}{\frac{5}{2}} = 11414.04 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 0.53 \sqrt{240} (20)(42.2472) = 6937.6 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{11414.04}{0.85} - 6937.6 = 6410 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(42.2472)}{20} = 6490 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 0.85(6937.6 + 6490) = 13,427.6 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s \max} = 2.1 \sqrt{f'_c} b d = 2.1 \sqrt{240} (20)(42.2472) = 27,488 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n < V_{s \max} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1 \sqrt{f'_c} b d = 1.1 \sqrt{240} (20)(42.2472) = 14398 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1 \sqrt{f'_c} b d$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$d/2 = 42.2472/2 = 21$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9 @ 0.20 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 13,427.6$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

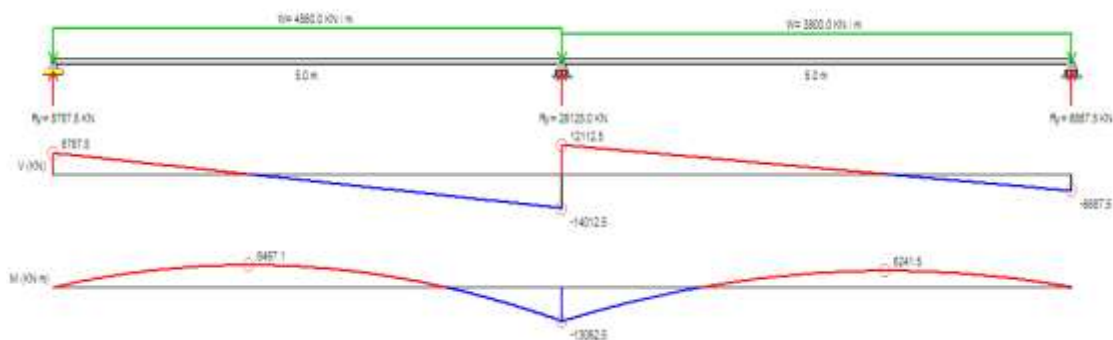


ตัวอย่างคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

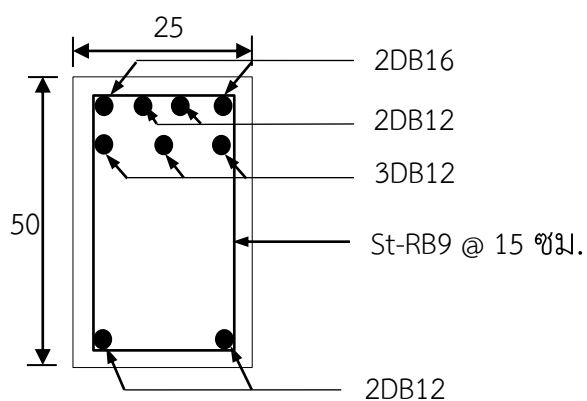
นำโมเมนต์สูงสุดมาพิจารณาซึ่งในกรณีคานสองช่วงโมเมนต์สูงสุดเกิดที่จุดต่อระหว่างคานโดยมีค่าเป็นลบทำให้ต้องเสริมเหล็กบนเพื่อรับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นดังนี้

$$1. M_U = -13063 \text{ กก.-ม.}$$

$$2. V_U = -14013 \text{ กก.}$$



ภาพประกอบ ข-10 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 2



ภาพประกอบ ข-11 ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'



ตาราง ข-5 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	25 : 50
f_c' (กก./ซม ² .)	210
f_y (กก./ซม ² .)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB16 5-DB12
เหล็กเสริมล่าง	2-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.50 - \left(\frac{\left(\left(6.28 + 0.9 + \frac{1.6}{2} \right) + 3.39 \left(3 + 0.9 + 6.28 + 2.5 + \frac{1.2}{2} \right) \right)}{6.28 + 3.39} \right) = 42.29 \text{ ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.2}{2} = 4.5 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ (h) ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{18.5}$

กรณีคานสองช่วง

$$\frac{L}{18.5} = \frac{5}{18.5} = 0.27 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.50$ ม.) มากกว่า 0.27 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโค้งตัวของคาน



5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{9.67}{25 \times 42.29} - \frac{2.26}{25 \times 42.29} = 0.007008$$

$$\frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(210)(4.5)}{4000(42.29)} \left(\frac{6120}{6120 - 4000} \right) = 0.00116$$

$0.007008 > 0.00116$ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก $f'_s = f_y = 4000$ กก./ชม.²

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0028, 0.0035) = 0.0035$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(210)}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0229$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0229) + 0.0023 \frac{4000}{4000} = 0.0252$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{9.67}{25 \times 42.29} = 0.00915$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.00915$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} = \frac{(9.04 - 2.26) 4000}{0.85(210)(25)} = 2.53 \quad \text{ชม.}$$

$$\phi M_n = 0.9 \left((A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \right)$$



$$= 0.9 \left((9.67 - 2.26) 4000 \left(42.29 - \frac{2.53}{2} \right) + 2.26(4000)(42.29 - 4.5) \right)$$

$$\phi M_n = 14018.02 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{14013 \left(\frac{5}{2} - 0.4182 \right)}{\frac{5}{2}} = 11,668.90 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 0.53 \sqrt{210} (25)(42.29) = 8029.89 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{11,668.90}{0.85} - 8026.89 = 5701.23 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(41.82)}{20} = 6383 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s) = 0.85(8029.89 + 6383) = 1441289 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s\max} = 2.1 \sqrt{f'_c} b d = 2.1 \sqrt{210} (25)(42.29) = 31816.54 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n < V_{s\max} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$

ตรวจสอบ $1.1 \sqrt{f'_c} b d = 1.1 \sqrt{210} (25)(42.29) = 16665.81 \text{ กก.}$

เนื่องจาก $V_s < 1.1 \sqrt{f'_c} b d$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

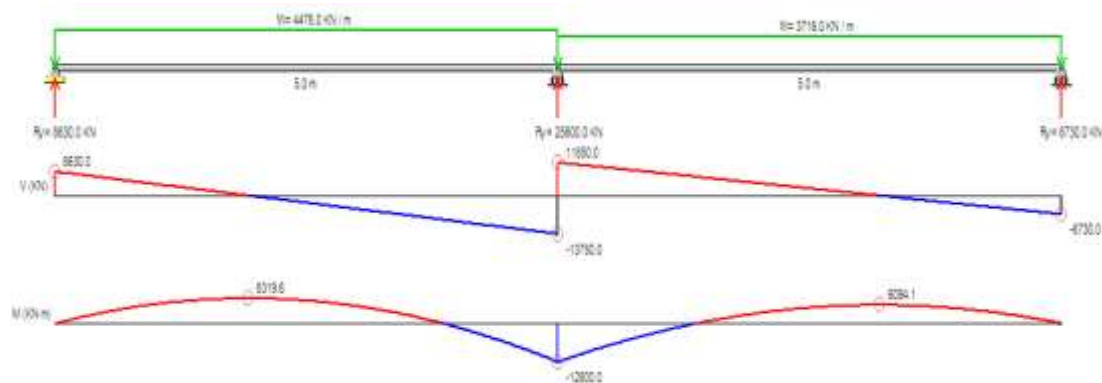
$d/2 = 41.82/2 = 21$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.20 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 1441289$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้



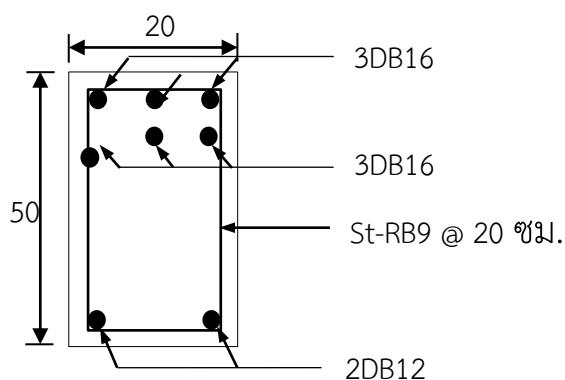
ตัวอย่างคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y

นำโมเมนต์สูงสุดมาพิจารณาซึ่งในกรณีคานสองช่วงโมเมนต์สูงสุดเกิดที่จุดต่อระหว่างคานโดยมีค่าเป็นลบทำให้ต้องเสริมเหล็กบนเพื่อรับโมเมนต์ลบที่เกิดขึ้นดังนี้

1. $M_u = -12800$ กก.-ม.
2. $V_u = -13750$ กก.



ภาพประกอบ ข-12 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 3



ภาพประกอบ ข-13 ผลการเลือกของโปรแกรมคานช่วงเดียวกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y



ตาราง ข-6 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสองช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหินยว	
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 50
f_c' (กก./ซม. ²)	280
f_y (กก./ซม. ²)	3000
เหล็กเสริมบน	3-DB16
	3-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.50 - \left(\frac{6.03 \left(3 + 0.9 + \frac{1.6}{2} \right) + 6.03 \left(3 + 0.9 + 6.03 + 2.5 + \frac{1.6}{2} \right)}{6.03 + 6.03} \right) = 41.04 \text{ ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.2}{2} = 4.5 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ (h) ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{18.5}$

กรณีคานสองช่วง

$$\frac{L}{18.5} = \frac{5}{18.5} = 0.27 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.50$ ม.) มากกว่า 0.27 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน



5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{12.06}{20 \times 41.04} - \frac{2.26}{20 \times 41.04} = 0.0119$$

$$\frac{0.85 \beta_1 f'_c d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)(4.5)}{3000(41.04)} \left(\frac{6120}{6120 - 3000} \right) = 0.0114$$

$$0.0119 > 0.0114 \text{ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก } f'_s = f_y = 3000 \text{ กก./ซม.}^2$$

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0044, 0.0046) = 0.0046$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)}{3000} \left(\frac{6120}{6120 + 3000} \right) = 0.0453$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0453) + 0.0023 \frac{3000}{3000} = 0.0339$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{12.06}{20 \times 41.04} = 0.0147$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.0147$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้น

ปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}



7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(12.06 - 2.26)3000}{0.85(280)(20)} = 5.62 \text{ ซม.}$$

$$\begin{aligned} \phi M_n &= 0.9(A_s - A'_s)f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \\ &= 0.9(11.18 - 2.26)3000 \left(41.04 - \frac{5.62}{2} \right) + 2.26(3000)(41.04 - 4.5) \end{aligned}$$

$$\phi M_n = 12,952 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{13750 \left(\frac{5}{2} - 0.4246 \right)}{\frac{5}{2}} = 11414.7 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c}bd = 0.53\sqrt{280}(20)(42.46) = 7531.21 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{11414.7}{0.85} - 7531.21 = 5897.85 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(42.46)}{20} = 6481.06 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n



$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(7531.21 + 6481.06) = 11910.43 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s\max} = 2.1\sqrt{f'_c}bd = 2.1\sqrt{280}(20)(42.46) = 29,840.64 \text{ กก.}$$

$$\phi V_n < V_{s\max} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{240}(20)(42.2472) = 14398 \text{ กก.}$$

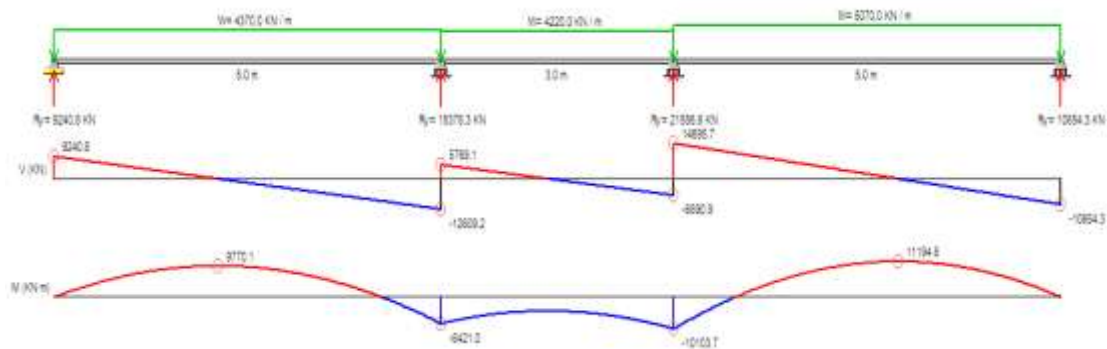
เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$d/2 = 42.46/2 = 21$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.20 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 11,940.43$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

การออกแบบคานสามช่วงด้วยวิธีทั่วไป

นำโมเมนต์สูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดมาพิจารณาซึ่งในกรณีคานสามช่วงเกิดที่กลางช่วงที่สามโดยมีค่าเป็นบวกทำให้ต้องเสริมเหล็กกลางเพื่อรับโมเมนต์บวกและแรงเฉือนที่เกิดขึ้นดังนี้

1. $M_u = 11195$ กก.-ม.
2. $V_u = 14695$ กก.



ภาพประกอบ ข-14 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วง

3. กำหนดให้

ความสูงคาน 50 ซม. $f'_c = 280$ กก./ cm^2 .

ความกว้างคาน 25 ซม. $f_y = 3000$ กก./ cm^2 .

สมมติให้ $d = 42$ ซม.



4. พิจารณากำลั้งมากที่สุดที่ยอมให้ของหน้าตัดเสริมเหล็ก

$$\text{เหล็กเสริมน้อยสุด } \rho_{\min} = \frac{14}{f_y} = 0.0047$$

$$\text{เหล็กเสริมมากที่สุด } \rho_{\max} = 0.75 \bar{\rho}_b = 0.75 \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = 0.0339$$

5. อัตราส่วนเสริมเหล็ก ρ ที่ต้องการ

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{1119500}{0.9 \times 25 \times 42^2} = 28.2 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$\rho = \frac{0.85 f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85 f'_c}} \right) = \frac{0.85 \times 280}{3000} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 25.7}{0.85 \times 280}} \right) = 0.0107$$

$$\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$$

6. คำนวณค่า A_s ที่ต้องการและเลือกใช้เหล็กเสริม

$$A_s = \rho b d = 0.0107 \times 25 \times 42 = 11.235 \text{ ซม.}^2$$

เลือกเหล็กเสริม 4DB20 ($A_s = 12.56 \text{ ซม.}^2$)

7. ตรวจสอบการออกแบบ

$$T = A_s f_y = 12.56 \times 3000 = 37680 \text{ กก.}$$

$$a = \frac{T}{0.85 \times f'_c \times b} = \frac{37680}{0.85 \times 280 \times 25} = 6.33 \text{ ซม.}$$

$$\phi M_n = \phi T \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0.9 (37680 (42 - 6.33 / 2) / 100) = 13211.67 \text{ กก.-ม.}$$

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{14695 \left(\frac{5}{2} - 0.42 \right)}{\frac{5}{2}} = 12226.24 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 0.53 \sqrt{280} (25)(42) = 9312 \text{ กก.}$$



คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{12226.24}{0.85} - 9312 = 5071.81 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(42)}{20} = 6410.88 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(9312 + 6410.88) = 14761.248 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s\max} = 2.1\sqrt{f'_c}bd = 2.1\sqrt{280}(25)(42) = 36896.7 \text{ กก.}$$

$\phi V_n < V_{s\max}$ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{280}(25)(42) = 19326.84 \text{ กก.}$$

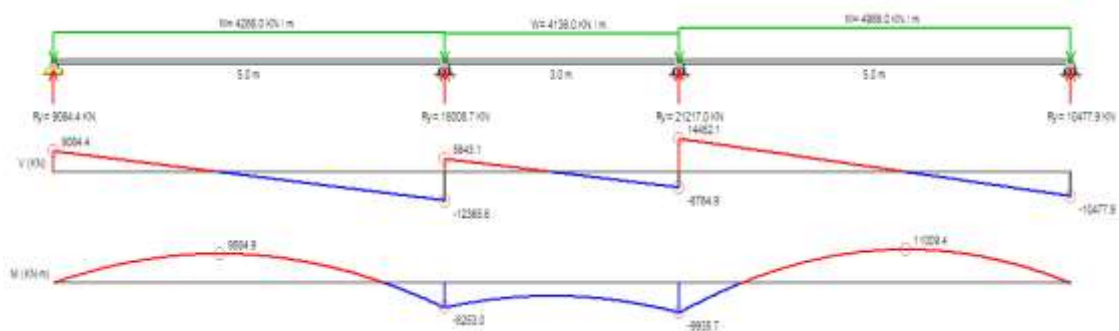
เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$d/2 = 42/2 = 21$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.20 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 14761.248$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

ตัวอย่างคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f'_c และ f_y

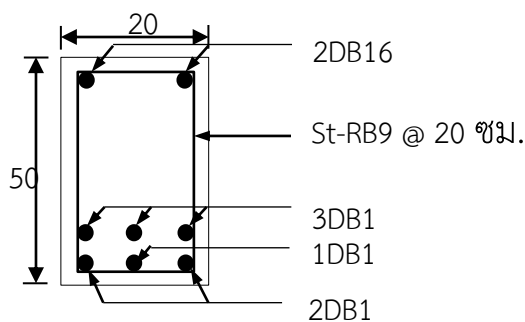
นำโมเมนต์สูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดมาพิจารณาซึ่งเกิดขึ้นดังนี้

1. $M_u = 11009$ กก.-ม.
2. $V_u = 14452$ กก.



ภาพประกอบ ข-15 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1





ภาพประกอบ ข-16 การเสริมเหล็กในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบไม่กำหนดค่า f'_c และ f_y

ตาราง ข-7 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 1 แบบกำหนดค่า f'_c และ f_y

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 50
f'_c (กก./ซม ² .)	240
f_y (กก./ซม ² .)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 4-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 50 - \left(\frac{7.41 \left(3 + 0.9 + \frac{1.6}{2} \right) + 3.39 \left(3 + 0.9 + 7.41 + 2.5 + \frac{1.2}{2} \right)}{7.41 + 3.39} \right) = 42.25 \text{ ซม.}$$

$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.6}{2} = 4.7 \text{ ซม.}$$



4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ (h) ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{21}$ กรณีคานสามช่วง

$$\frac{L}{21} = \frac{5}{21} = 0.24 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน (h = 0.50 ม.) มากกว่า 0.24 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c \cdot d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{10.8}{20 \times 42.25} - \frac{2.26}{20 \times 42.25} = 0.0128$$

$$\frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c \cdot d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(210)(4.5)}{4000(41.82)} \left(\frac{6120}{6120 - 4000} \right) = 0.0121$$

$$0.0128 > 0.0121 \text{ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก } f'_s = f_y = 4000 \text{ กก./ซม.}^2$$

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0031, 0.0035) = 0.0035$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(240)}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0262$$

$$\rho_{\max} = 0.75 \rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0262) + 0.004 \frac{4000}{4000} = 0.0237$$



$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{10.8}{20 \times 42.25} = 0.0128$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.0128$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(10.8 - 4.02)4000}{0.85(240)(20)} = 8.37$$

$$\begin{aligned}\phi M_n &= 0.9(A_s - A'_s)f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \\ &= 0.9(10.8 - 4.02)4000 \left(42.25 - \frac{8.37}{2} \right) + 10.8(4000)(42.25 - 4.7)\end{aligned}$$

$$\phi M_n = 14,774 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{14452 \left(\frac{5}{2} - 0.4225 \right)}{\frac{5}{2}} = 12009.49 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} bd = 0.53\sqrt{240}(20)(42.25) = 6938.41 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{12009.49}{0.85} - 6938.41 = 7190.40 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก



$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(42.25)}{15} = 8599.16 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(6938.41 + 8599.16) = 13206.93 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s \max} = 2.1\sqrt{f'_c} bd = 2.1\sqrt{240}(20)(42.25) = 27491.83 \text{ กก.}$$

$\phi V_n < V_{s \max}$ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c} bd = 1.1\sqrt{240}(20)(42.25) = 14399.75 \text{ กก.}$$

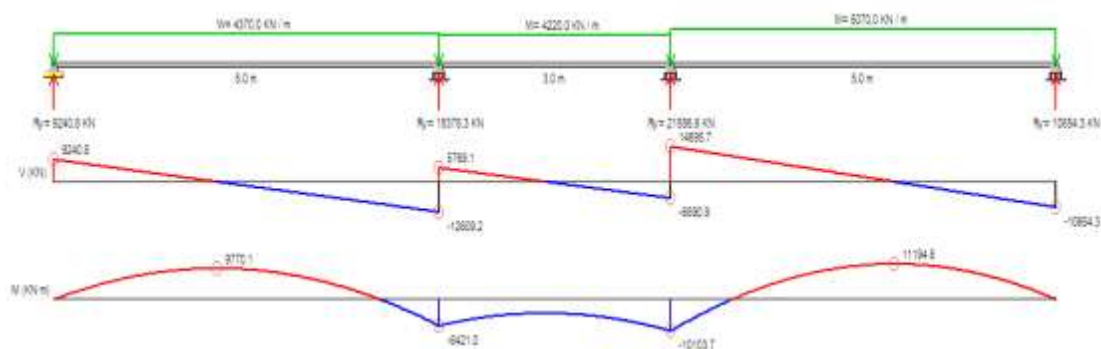
เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c} bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน $d/2 = 42.25/2 = 21$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.15 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 13,206.93$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

ตัวอย่างคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f'_c

นำโมเมนต์สูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดมาพิจารณาซึ่งเกิดขึ้นดังนี้

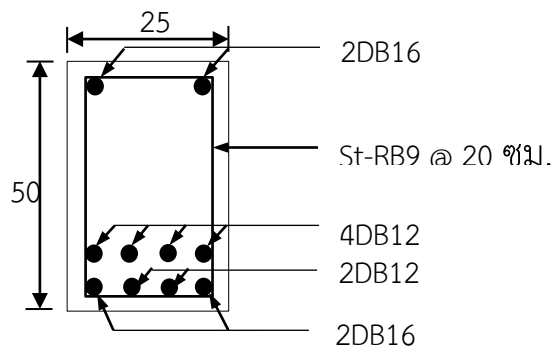
$$1. M_u = 11195 \text{ กก.-ม.}$$

$$2. V_u = 14695 \text{ กก.}$$



ภาพประกอบ ข-17 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f'_c





ภาพประกอบ ข-18 การเสริมเหล็กในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

ตาราง ข-8 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f_c'

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	25 : 50
f_c' (กก./ซม. ² .)	280
f_y (กก./ซม. ² .)	4000
เหล็กเสริมบน	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	2-DB16 6-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 20

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.50 - \left(\frac{6.28 \left(3 + 0.9 + \frac{1.6}{2} \right) + 4.52 \left(3 + 0.9 + 6.28 + 2.5 + \frac{1.2}{2} \right)}{6.28 + 4.52} \right) = 41.71 \text{ ซม.}$$



$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.6}{2} = 4.7 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ(h)ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{21}$ กรณีคานสามช่วง

$$\frac{L}{21} = \frac{5}{21} = 0.24 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.50$ ม.) มากกว่า 0.24 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c \cdot d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{10.80}{25 \times 41.71} - \frac{2.26}{25 \times 41.71} = 0.0143$$

$$\frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c \cdot d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(210)(4.5)}{4000(41.82)} \left(\frac{6120}{6120 - 4000} \right) = 0.0140$$

$$0.0143 > 0.0140 \text{ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก } f'_s = f_y = 4000 \text{ กก./ ซม.}^2$$

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0033, 0.0035) = 0.0035$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)}{4000} \left(\frac{6120}{6120 + 4000} \right) = 0.0306$$



$$\rho_{\max} = 0.75\rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0306) + 0.0032 \frac{4000}{4000} = 0.02615$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{10.80}{20 \times 41.71} = 0.0104$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho=0.0104$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(10.8 - 4.02)4000}{0.85(280)(25)} = 5.74$$

$$\phi M_n = 0.9(A_s - A'_s)f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$

$$= 0.9(10.8 - 4.02)4000 \left(41.71 - \frac{6.78}{2} \right) + 4.02(4000)(41.71 - 4.7)$$

$$\phi M_n = 14,968 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{14695 \left(\frac{5}{2} - 0.4171 \right)}{\frac{5}{2}} = 12,242.34 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} bd = 0.53\sqrt{280}(25)(41.71) = 9247.53 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก



$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{12,242.34}{0.85} - 9247.53 = 5156.40 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(41.71)}{20} = 6366.48 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(9247.53 + 6366.48) = 13,271.9 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{s\max} = 2.1\sqrt{f'_c}bd = 2.1\sqrt{280}(25)(41.71) = 36,641.16 \text{ กก.}$$

$\phi V_n < V_{s\max}$ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{280}(25)(41.71) = 19192.99 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

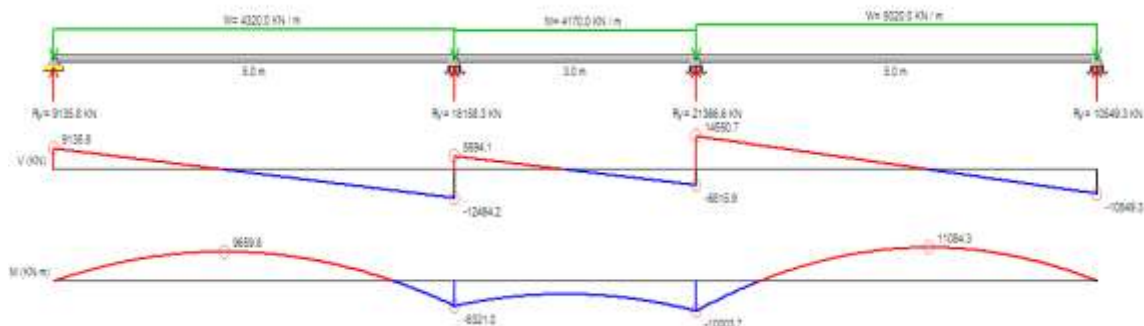
$d/2 = 41.71/2 = 20.5$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.20 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 13,271.9$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้

ตัวอย่างคานสามช่วงกรณีสึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y

นำโมเมนต์สูงสุดและแรงเฉือนสูงสุดมาพิจารณาซึ่งเกิดขึ้นดังนี้

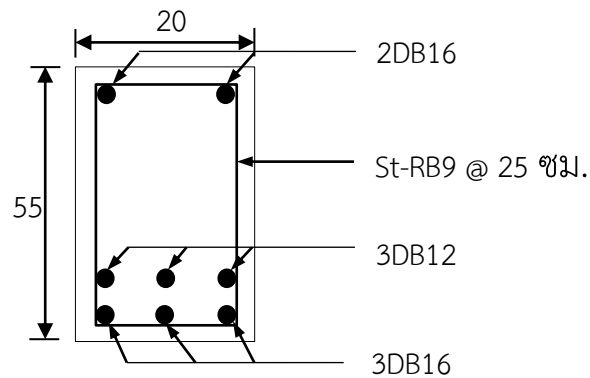
1. $M_u = 11084$ กก.-ม.

2. $V_u = 14551$ กก.



ภาพประกอบ ข-19 ค่าโมเมนต์และแรงเฉือนในคานสามช่วงกรณีสึกษาที่ 2 แบบกำหนดค่า f'_c





ภาพประกอบ ข-20 การเสริมเหล็กในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y

ตาราง ข-9 ผลการเลือกหน้าตัดในคานสามช่วงกรณีศึกษาที่ 3 แบบกำหนดค่า f_y

ผลการเลือกของโปรแกรมขั้นตอนจำลองการอบเหนียว	
หน้าตัดคาน (B : H)	20 : 55
f_c' (กก./ซม ² .)	280
f_y (กก./ซม ² .)	3000
เหล็กเสริมบน	2-DB16
เหล็กเสริมล่าง	3-DB16 3-DB12
Stirrups @ (cm)	RB9 @ 25

3. คำนวณค่า d และ d' ที่ใช้ในงานจริง

$$d = h - \left(\frac{A_{As1} \left(\text{covering} + d_v + \frac{d_{As1}}{2} \right) + A_{As2} \left(\text{covering} + d_v + d_{As1} + 2.5 + \frac{d_{As2}}{2} \right)}{A_{As1} + A_{As2}} \right)$$

$$d = 0.50 - \left(\frac{6.03 \left(3 + 0.9 + \frac{1.6}{2} \right) + 3.39 \left(3 + 0.9 + 6.03 + 2.5 + \frac{1.2}{2} \right)}{6.03 + 3.39} \right) = 47.30 \text{ ซม.}$$



$$d' = \text{covering} + d_v + \frac{d_{top}}{2} = 3.0 + 0.9 + \frac{1.6}{2} = 4.7 \text{ ซม.}$$

4. ตรวจสอบความลึกน้อยสุดของคานซึ่งหาได้จากสมการ(h)ต้องไม่น้อยกว่า $\frac{L}{21}$ กรณีคานสามช่วง

$$\frac{L}{21} = \frac{5}{21} = 0.24 \text{ ม.}$$

ความลึกคานต่ำสุดของคาน ($h = 0.55$ ม.) มากกว่า 0.24 ม. ดังนั้นหน้าตัดคานผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบไม่จำเป็นต้องคำนวณค่าการโก่งตัวของคาน

5. ตรวจสอบเหล็กเสริมรับแรงอัดครากหรือไม่

$$\rho - \rho' \geq \frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c \cdot d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right)$$

$$\rho - \rho' = \frac{10.80}{25 \times 47.30} - \frac{4.02}{25 \times 47.30} = 0.00993$$

$$\frac{0.85 \cdot \beta \cdot f'_c \cdot d'}{f_y d} \left(\frac{6120}{6120 - f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)(4.5)}{3000(47.30)} \left(\frac{6120}{6120 - 3000} \right) = 0.00125$$

$$0.0993 > 0.00125 \text{ ดังนั้นเหล็กเสริมรับแรงอัดคราก } f'_s = f_y = 3000 \text{ กก./ซม.}^2$$

6. ตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน (ρ) ต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมต่ำสุด (ρ_{\min}) คำนวณจากสมการ

$$\rho_{\min} = \text{Max} \left(\frac{0.794 \sqrt{f'_c}}{f_y}, \frac{14}{f_y} \right) = \text{Max}(0.0044, 0.0046) = 0.0046$$

และต้องไม่น้อยกว่าปริมาณเหล็กเสริมมากที่สุด (ρ_{\max})

$$\rho_b = \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{f_y} \left(\frac{6120}{6120 + f_y} \right) = \frac{0.85(0.85)(280)}{3000} \left(\frac{6120}{6120 + 3000} \right) = 0.0453$$



$$\rho_{\max} = 0.75\rho_b + \rho' \frac{f'_s}{f_y} = 0.75(0.0453) + 0.0037 \frac{3000}{3000} = 0.0377$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{10.8}{20 \times 47.30}$$

ปริมาณเหล็กเสริมในคาน $\rho = 0.00856$ ซึ่งมากกว่า ρ_{\min} แต่มีค่าน้อยกว่า ρ_{\max} ดังนั้นปริมาณเหล็กเสริมผ่านเงื่อนไขการตรวจสอบ ρ_{\min} และ ρ_{\max}

7. ตรวจสอบความสามารถรับโมเมนต์ดัด

$$a = \frac{(A_s - A'_s)f_y}{0.85f'_c b} = \frac{(9.42 - 4.02)3000}{0.85(280)(20)} = 4.51$$

$$\phi M_n = 0.9(A_s - A'_s)f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d')$$

$$= 0.9(9.42 - 4.02)3000 \left(47.30 - \frac{4.51}{2} \right) + 4.02(3000)(47.30 - 4.7)$$

$$\phi M_n = 11,320 \text{ กก.-ม.}$$

ϕM_n ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่า M_u ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กเสริมสามารถรับโมเมนต์ดัดได้

8. ตรวจสอบค่าความสามารถรับแรงเฉือนของหน้าคาน

คำนวณแรงเฉือนที่ระยะ d จากจุดรองรับ

$$V_{ud} = \frac{V_u \left(\frac{L}{2} - d \right)}{\frac{L}{2}} = \frac{14,551 \left(\frac{5}{2} - 0.4730 \right)}{\frac{5}{2}} = 11,797.82 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนคอนกรีต

$$V_c = 0.53\sqrt{f'_c} bd = 0.53\sqrt{280}(20)(47.30) = 9390.09 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนที่ต้องการจากเหล็กปลอก



$$V_s = \frac{V_{ud}}{\phi_v} - V_c = \frac{11,797.82}{0.85} - 9390.09 = 5489.69 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังเฉือนของเหล็กปลอก

$$V_s = \frac{A_v f_v d}{S_v} = \frac{2(0.636)(2400)(47.30)}{25} = 5776.17 \text{ กก.}$$

คำนวณกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัดคาน ϕV_n

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s) = 0.85(9390.09 + 5489.69) = 12,041.33 \text{ กก.}$$

ตรวจสอบกำลังเฉือน V_s ว่าขนาดหน้าตัดเพียงพอหรือไม่

$$V_{smax} = 2.1\sqrt{f'_c}bd = 2.1\sqrt{280}(20)(47.30) = 33,243.77 \text{ กก.}$$

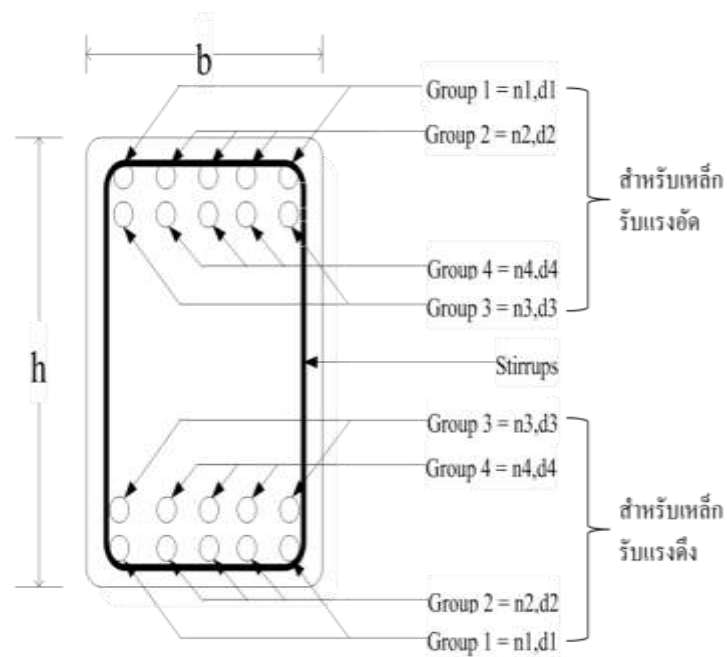
$$\phi V_n < V_{smax} \text{ หน้าตัดเพียงพอใช้งานได้}$$

$$\text{ตรวจสอบ } 1.1\sqrt{f'_c}bd = 1.1\sqrt{280}(20)(47.33) = 17,413.4 \text{ กก.}$$

เนื่องจาก $V_s < 1.1\sqrt{f'_c}bd$ ดังนั้น ระยะห่างเหล็กปลอกมากที่สุดไม่เกิน

$d/2 = 47.33/2 = 25$ ซม. เหล็กปลอกที่เลือกคือ RB9@0.25 ม. มีกำลังรับแรงเฉือนของหน้าตัด $\phi V_n = 12,041.33$ กก. ดังนั้นหน้าตัดคานและเหล็กปลอกที่เลือกสามารถรับแรงเฉือนที่เกิดขึ้นได้





ภาพประกอบ ข-21 การจัดเรียงเหล็กเสริมสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

Group คือ กลุ่มของเหล็กเสริม

n คือ จำนวนของเหล็กเสริม (เส้น)

d คือ ขนาดของเหล็กเสริม(ม.ม.)

และมีเงื่อนไขว่า $Group\ 1 + Group\ 2 \geq Group\ 3 + Group\ 4$

ตาราง ข-10 ข้อมูลรายละเอียดเหล็กเสริม

ลำดับ	n_1	d_1	n_2	d_2	n_3	d_3	n_4	d_4	$A_s(\text{cm}^2)$
1	2	12	0	0	0	0	0	0	2.26
2	2	12	1	12	0	0	0	0	3.39
3	2	16	0	0	0	0	0	0	4.03
4	2	12	2	12	0	0	0	0	4.52
5	2	16	1	12	0	0	0	0	5.15
6	2	12	3	12	0	0	0	0	5.65
7	2	12	1	12	2	12	0	0	5.65



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	$A_s(\text{cm}^2)$
8	2	16	2	12	0	0	0	0	6.28
9	2	20	0	0	0	0	0	0	6.28
10	2	12	1	12	2	12	1	12	6.78
11	2	12	2	12	2	12	0	0	6.78
12	2	16	1	12	2	12	0	0	7.41
13	2	16	3	12	0	0	0	0	7.41
14	2	20	1	12	0	0	0	0	7.41
15	2	12	2	12	2	12	1	12	7.91
16	2	12	3	12	2	12	0	0	7.91
17	2	16	1	16	2	12	0	0	8.29
18	2	20	1	16	0	0	0	0	8.29
19	2	16	1	12	2	12	1	12	8.54
20	2	16	2	12	2	12	0	0	8.54
21	2	20	2	12	0	0	0	0	8.54
22	2	12	3	12	2	12	1	12	9.04
23	2	12	2	12	2	12	2	12	9.04
24	2	16	1	16	2	12	1	12	9.42
25	2	20	1	20	0	0	0	0	9.42
26	2	16	2	12	2	12	1	12	9.67
27	2	16	3	12	2	12	0	0	9.67
28	2	20	3	12	0	0	0	0	9.67
29	2	20	1	12	2	12	0	0	9.67
30	2	25	0	0	0	0	0	0	9.81



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	AS(cm ²)
31	2	16	1	16	2	16	0	0	10.05
32	2	12	3	12	2	12	2	12	10.18
33	2	16	2	16	2	12	0	0	10.30
34	2	20	2	16	0	0	0	0	10.30
35	2	20	1	16	2	12	0	0	10.55
36	2	16	2	12	2	12	2	12	10.80
37	2	16	3	12	2	12	1	12	10.80
38	2	20	2	12	2	12	0	0	10.80
39	2	20	1	12	2	12	1	12	10.80
40	2	25	1	12	0	0	0	0	10.94
41	2	16	1	16	2	16	1	12	11.18
42	2	12	3	12	2	12	3	12	11.31
43	2	16	2	16	2	12	1	12	11.43
44	2	20	1	16	2	12	1	12	11.68
45	2	20	1	20	2	12	0	0	11.68
46	2	25	1	16	0	0	0	0	11.82
47	2	16	3	12	2	12	2	12	11.93
48	2	20	2	12	2	12	1	12	11.93
49	2	20	3	12	2	12	0	0	11.93
50	2	16	2	16	2	16	0	0	12.06
51	2	16	2	16	1	16	1	16	12.06
52	2	25	2	12	0	0	0	0	12.08
53	2	16	3	16	2	12	0	0	12.31



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	AS(cm ²)
54	2	20	3	16	0	0	0	0	12.31
55	2	20	1	16	2	16	0	0	12.31
56	2	20	2	20	0	0	0	0	12.56
57	2	16	2	16	2	12	2	12	12.56
58	2	20	2	16	2	12	0	0	12.56
59	2	20	1	20	2	12	1	12	12.81
60	2	25	1	20	0	0	0	0	12.96
61	2	16	3	12	2	12	3	12	13.07
62	2	20	2	12	2	12	2	12	13.07
63	2	20	3	12	2	12	1	12	13.07
64	2	16	2	16	2	16	1	12	13.19
65	2	25	3	12	0	0	0	0	13.21
66	2	25	1	12	2	12	0	0	13.21
67	2	16	3	16	2	12	1	12	13.44
68	2	20	1	16	2	16	1	12	13.44
69	2	20	1	20	2	16	0	0	13.44
70	2	20	2	16	2	12	1	12	13.69
71	2	16	2	16	2	16	1	16	14.07
72	2	16	3	16	2	16	0	0	14.07
73	2	20	3	12	2	12	2	12	14.20
74	2	16	2	16	2	16	2	12	14.32
75	2	20	2	16	2	16	0	0	14.32
76	2	20	1	16	2	16	1	16	14.32



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	$A_s(\text{cm}^2)$
77	2	16	3	16	2	12	2	12	14.57
78	2	20	3	16	2	12	0	0	14.57
79	2	20	1	20	2	16	1	12	14.57
80	2	20	2	16	2	12	2	12	14.83
81	2	20	2	20	2	12	0	0	14.83
82	2	16	3	16	2	16	1	12	15.20
83	2	20	3	12	2	12	3	12	15.33
84	2	20	2	16	2	16	1	12	15.45
85	2	20	1	20	2	16	1	16	15.45
86	2	20	3	20	0	0	0	0	15.71
87	2	20	1	20	2	20	0	0	15.71
88	2	20	2	20	2	12	1	12	15.96
89	2	16	2	16	2	16	2	16	16.08
90	2	16	3	16	2	16	1	16	16.08
91	2	16	3	16	2	16	2	12	16.33
92	2	20	2	16	2	16	1	16	16.33
93	2	20	3	16	2	16	0	0	16.33
94	2	20	2	20	2	16	0	0	16.58
95	2	20	2	20	2	12	2	12	17.09
96	2	20	3	16	2	16	1	12	17.46
97	2	20	1	20	2	20	1	16	17.72
98	2	20	3	16	2	12	3	12	17.97
99	2	20	3	20	2	12	0	0	17.97



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	$A_s(\text{cm}^2)$
100	2	16	3	16	2	16	2	16	18.09
101	2	20	2	16	2	16	2	16	18.34
102	2	20	3	16	2	16	1	16	18.34
103	2	20	2	20	2	16	1	16	18.60
104	2	20	2	20	2	20	0	0	18.85
105	2	20	1	20	2	20	1	20	18.85
106	2	25	3	20	0	0	0	0	19.24
107	2	25	1	20	2	20	0	0	19.24
108	2	25	2	25	0	0	0	0	19.63
109	2	20	3	20	2	16	0	0	19.73
110	2	16	3	16	2	16	3	16	20.10
111	2	20	3	16	2	16	2	16	20.36
112	2	25	1	12	2	20	1	20	20.37
113	2	20	2	20	2	16	2	16	20.61
114	2	20	2	20	2	20	1	16	20.86
115	2	25	1	25	2	20	0	0	21.01
116	2	20	3	20	2	16	1	16	21.74
117	2	20	2	20	2	20	1	20	21.99
118	2	20	3	20	2	20	0	0	21.99
119	2	20	3	16	2	16	3	16	22.37
120	2	25	2	20	2	20	0	0	22.38
121	2	25	1	20	2	20	1	20	22.38
122	2	20	2	20	2	20	2	16	22.87



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	$A_s(\text{cm}^2)$
123	2	20	3	20	2	16	2	16	23.75
124	2	20	3	20	2	20	1	16	24.00
125	2	25	2	20	2	16	2	16	24.14
126	2	25	1	25	2	20	1	20	24.15
127	2	25	3	25	0	0	0	0	24.54
128	2	25	1	25	2	25	0	0	24.54
129	2	20	2	20	2	20	2	20	25.13
130	2	20	3	20	2	20	1	20	25.13
131	2	25	2	20	2	20	1	20	25.52
132	2	25	3	20	2	20	0	0	25.52
133	2	25	2	25	2	20	0	0	25.92
134	2	20	3	20	2	20	2	16	26.01
135	2	25	1	25	2	25	1	20	27.68
136	2	20	3	20	2	20	3	16	28.02
137	2	20	3	20	2	20	2	20	28.27
138	2	25	3	25	2	16	0	0	28.56
139	2	25	3	20	2	20	1	20	28.67
140	2	25	2	25	2	25	0	0	29.45
141	2	25	3	25	2	20	0	0	30.83
142	2	20	3	20	2	20	3	20	31.42
143	2	25	3	20	2	20	2	20	31.81
144	2	25	2	25	2	20	2	20	32.20
145	2	25	2	25	2	25	1	20	32.59



ตาราง ข-10 (ต่อ)

ลำดับ	n1	d1	n2	d2	n3	d3	n4	d4	$A_s(\text{cm}^2)$
146	2	25	3	25	2	20	1	20	33.97
147	2	25	2	25	2	25	1	25	34.36
148	2	25	3	25	2	25	0	0	34.36
149	2	25	3	20	2	20	3	20	34.95
150	2	25	2	25	2	25	2	20	35.74
151	2	25	3	25	2	20	2	20	37.11
152	2	25	3	25	2	25	1	20	37.50
153	2	25	2	25	2	25	2	25	39.27
154	2	25	3	25	2	25	1	25	39.27
155	2	25	3	25	2	20	3	20	40.25
156	2	25	3	25	2	25	2	20	40.64
157	2	25	3	25	2	25	3	20	43.79
158	2	25	3	25	2	25	3	20	43.79
159	2	25	3	25	2	25	2	25	44.18
160	2	25	3	25	2	25	3	25	49.09



ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นายณัทกฤษ เหล่าพรหม
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 13 มิถุนายน พ.ศ. 2523
จังหวัด และประเทศที่เกิด	อำเภออมลาคาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	<p>พ.ศ. 2538 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนอมลาคาไสย อำเภออมลาคาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์</p> <p>พ.ศ. 2540 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาเทคโนโลยีก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น</p> <p>พ.ศ. 2542 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาเทคโนโลยีก่อสร้าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตขอนแก่น</p> <p>พ.ศ. 2552 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ.) สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม แขนงเทคโนโลยีก่อสร้าง มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม</p> <p>พ.ศ. 2557 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม</p>
ตำแหน่ง สถานที่ทำงาน	-
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	บ้านเลขที่ 143/5 ถนนถีนานนท์ ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000
ผลงานด้านวิชาการ	<p>ณัทกฤษ เหล่าพรหม. (2554). การออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วงเดียวอย่างเหมาะสมโดยใช้ขั้นตอนวิธีการจำลองการอบเหนียว. ใน <i>การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 7 (The Annual Concrete Conference ACC7)</i>; 19 - 21 ตุลาคม 2554; ระยอง: โรงแรมระยอง รีสอร์ท อำเภอเมือง จังหวัดระยอง, หน้า STR-46-51.</p>

