รหัสโครงการ **SUT7-712-54-24-19**

รายงานการวิจัย

การสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเพื่อลดเศษในงานก่อสร้าง

(A Cutting Plan of One-Dimensional Construction Materials to Reduce Loss in Construction Projects)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ **SUT7-712-54-24-19**

รายงานการวิจัย

การสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเพื่อลดเศษในงานก่อสร้าง

(A Cutting Plan of One-Dimensional Construction Materials to Reduce Loss in Construction Projects)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. วชรภูมิ เบญจโอฬาร

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีปีงบประมาณพ.ศ. 2554-5

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กุมภาพันธ์ 2556

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้จะไม่สามารถสำเร็จลงได้ หากปราศจากการสนับสนุนเงินทุนที่ใช้ในการวิจัยด้วยเงินงบประมาณจากสำนักงบประมาณ (ผ่านการพิจารณาจัดสรรโดยคณะกรรมวิจัยแห่งชาติ) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 และ 2555 และความร่วมมือจากผู้บริหารและพนักงานของบริษัทก่อสร้างที่สนับสนุนข้อมูลที่สำคัญในการวิจัย ผู้วิจัยจึงขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัย

กุมภาพันธ์ 2556

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น เช่น เหล็กเส้น เป็นวัสดุหลักของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีปริมาณการใช้และราคาต่อหน่วยสูง การนำวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นมาใช้จำเป็นต้องตัดวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานให้ได้ขนาดความยาวตามที่ต้องการต่างๆกัน และทำให้เกิดเศษการตัดและความสูญเสียขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลต่อต้นทุนในงานก่อสร้างในที่สุด วิศวกรในโครงการมีหน้าที่เตรียมรายการความต้องการเพื่อให้คนงานช่างเหล็กสร้างแบบแผนการตัดและดำเนินการตัดเอง แบบแผนการตัดมักถูกสร้างขึ้นด้วยอัลกอริทึ่มง่ายๆที่คิดขึ้นเองไม่มีการใช้เครื่องมือช่วยคำนวณ ส่งผลให้มีปริมาณเศษจากการตัดเหล็กเส้นโดยเฉลี่ยมากกว่า 8% ของปริมาณเหล็กที่ต้องการใช้ การวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาวิธีการสร้างแบบแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่ดี ซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือ การสร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดที่ดี และการหาจำนวนครั้งของการตัดซ้ำ เซ็ตของรูปแบบการตัดที่ดีถูกสร้างขึ้นด้วย Intensive Search Algorithm ซึ่งทำให้ได้รูปแบบการตัดที่หลากหลายและสมบรูณ์ อีกทั้งยังสามารถควบคุมเศษการตัดของรูปแบบได้ด้วย ส่วนการหาจำนวนครั้งของการตัดซ้ำใช้เทคนิคการหาคำตอบสองขั้นตอน คือเริ่มจากการหาคำตอบของแบบจำลองปัญหาการตัด One Dimensional Cutting Stock Problem (1D-CSP) ซึ่งเป็นการหาคำตอบด้วยการออพติไมเซชั่น และการหาคำตอบส่วนที่เหลือด้วย Best-Fit-Decreasing algorithm

ผลการทดสอบวิธีการสร้างแบบแผนการตัดชี้ให้เห็นว่าวิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถให้คำตอบเป็นแผนการตัดวัสดุที่มีอัตราการสูญเสียเฉลี่ยเพียง 1.24% ซึ่งดีกว่าคำตอบที่ได้จาก BFD algorithm เพียงอย่างเดียว ที่มีอัตราการสูญเสียที่ 3.71% (ต่ำกว่าถึง 3 เท่า) และดีกว่าวิธีปฏิบัติที่เป็นอยู่มาก แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อช่วยสร้างแบบแผนการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง ให้เกิดอัตราการสูญเสียวัสดุคงคลังจากการตัดให้น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดต้นทุนค่าก่อสร้างลงได้เป็นจำนวนมากและเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดขยะ

คำสำคัญ: ปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง, วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น, การวางแผนการตัด, เศษการตัด, เหล็กเส้น

Abstract

Linear construction materials such as steel bars are the main materials of reinforced-concrete structures. They are consumed in a large amount and have a high unit price. These linear materials have to be cut into various desired lengths and pieces before using. The cutting process creates a large amount of trim loss and usually wasted. This finally affects on the project price. An engineer is responsible for preparing the demanded bars list whereas steel workers create a cutting plan and perform the cutting process. The cutting plan is generally created using a simple intuitive algorithm without any computational tools. The result from the survey showed that the trim loss was more than 8% of the demanded amount. Hence, this research aims to develop a method to arrange an efficient cutting plan for linear construction materials particularly steel bars. The cutting plan arrangement consists of two main steps i.e. the cutting patterns generation and the number of cutting replication determination. A set of efficient cutting patterns is generated using the Intensive Search Algorithm which is comprised of diverse and complete patterns. The algorithm also controls the trim loss of the patterns to a specified allowable length. The number of cutting replication is determined using two steps. First is to determine the answer of the optimization of the One Dimensional Cutting Stock Problem (1D-CSP) model. Second is to find the answer or cutting the remaining demand using the Best-Fit-Decreasing algorithm.

Test results showed that the cutting plan arrangement which was developed in this research could give good plans. The plans had a low trim loss rate of only 1.24%, which was better than the plans from the BFD algorithm alone with the trim loss rate of 3.71% (less than about 3 times) and they are much better than the ones from the current practice. This cutting plan arrangement has the potential to help create an efficient cutting plan for the linear construction materials. It helps keep the trim loss from the cutting process to a minimum. It can save a lot of construction costs and also helps the environment by using resources efficiently and minimizing waste.

Keywords: Cutting Stock Problem, One-dimensional Construction Materials, Cutting Plan, Trim Loss, Steel Bar

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ..... ข
บทคัดย่อ ..... ค
Abstract ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญรูป ..... ซ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขต 3
1.4 แผนการดำเนินการวิจัย 4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6
บทที่ 2 ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น 7
2.1 สมมติฐานและกรอบแนวความคิด 7
2.2 ลักษณะปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น 8
2.3 โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น 12
2.4 การหาคำตอบที่ดี 14
2.4.1 LP Relaxation of IP 15
2.4.2 Heuristic Algorithms 17
2.4.3 Efficient Feasible Cutting Patterns 18
2.4.4 Sequential Heuristic Procedure (SHP) 20
2.4.5 Random Search for efficient pattern 22
2.4.6 Genetic Algorithm 24
2.4.7 Evolutionary Programming (EP) 26
2.5 Extended CSP Model 28
2.5.1 Item-oriented SHP 28
2.5.2 Contiguity 33
2.5.3 Lot Sizing and Production Planning 36
2.5.4 Usable leftover 38
2.5.5 Exhaustive Repetition Heuristic Algorithm 40
2.5.6 FFD_L Algorithm with Usable Leftover Consideration 41

2.5.7 CSP with Due Dates 41
2.6 โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ 44
2.7 สภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นของไทย 47
2.7.1 วิธีการสำรวจ 48
2.7.2 ผลการทำโจทย์ปัญหาและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ 49
2.7.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ 55
2.7.4 สรุปผลการศึกษาสำรวจ 57
2.8 สรุปการทบทวนวรรณกรรม 58
2.8.1 บทวิจารณ์ลักษณะโมเดลปัญหา 59
2.8.2 บทวิจารณ์วิธีการแก้ปัญหา 59
2.8.3 บทวิจารณ์สภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นของไทย 60
บทที่ 3 โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง 61
3.1 แนวคิดและหลักการ 61
3.2 โจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง 63
3.3 การสร้างรูปแบบการตัดที่ดี 64
3.3.1 หลักการของ Intensive Search Algorithm 64
3.3.2 การทดสอบและผล 69
3.4 การหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบการตัดที่ดี 74
3.4.1 ตัวแปรตัดสินใจ 74
3.4.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด 75
3.4.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 76
3.5 การตัดความต้องการส่วนที่เหลือด้วย Best Fit Decreasing Algorithm 76
3.6 การคำนวณเศษการตัดทั้งหมด 78
3.7 การประเมินคำตอบ 79
3.8 การสร้างโมเดลด้วย Spreadsheet 79
3.8.1 ข้อมูลโจทย์ปัญหา 80
3.8.2 การสร้างรูปแบบการตัด 81
3.8.3 การหาคำตอบขั้นแรกด้วย 1D-CSP Model 82
3.8.4 การหาคำตอบขั้นที่สองด้วย BFD algorithm 86
3.8.5 การคำนวณดัชนีสำหรับประเมินผลคำตอบ 87
3.9 การทดสอบ 87
3.10 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล 89

3.10.1 ประเด็นที่ 1 ความต่อเนื่อง (consistency) ของคำตอบ 90
3.10.2 ประเด็นที่ 2 จำนวนรูปแบบการตัด (nEffPat).....92
3.10.3 ประเด็นที่ 3 ขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_W) 94
3.11 สรุปผลการพัฒนา.....95
บทที่ 4 บทสรุป.....99
4.1 สรุปผลการวิจัย.....99
4.2 ข้อจำกัด..... 101
4.3 ข้อเสนอแนะ..... 102
เอกสารอ้างอิง..... 104
ประวัตินักวิจัย..... 106

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กราฟสถิติดัชนีราคาเหล็กและดัชนีราคาวัสดุก่อสร้างรวมทุกประเภท 2
รูปที่ 1.2 แผนงานโครงการวิจัย 6
รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น 12
รูปที่ 2.2 ขั้นตอนของ SHP (ปรับปรุงจาก Vahrenkamp (1996)) 21
รูปที่ 2.3 Flowchart ของ Random Search algorithm 23
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแสดงแทนคำตอบที่เป็นไปได้ (Salem et al. 2007) 24
รูปที่ 2.5 การคำนวณกำหนดจำนวนการตัดซ้ำสูงสุด 25
รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแบบ order-based representation และการคำนวณหาปริมาณเศษการตัด 27
รูปที่ 2.7 algorithm สำหรับการตัดวัสดุในกรณีต่างๆ (Gradisar et al. 1999) 32
รูปที่ 2.8 การเข้ารหัสและความหมายของ Group-based GA 34
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงเส้น arc ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา Network Shortest Path 38
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างปัญหา CSP และคำตอบแบบต่างๆ (Cherri et al. 2009) 39
รูปที่ 2.11 ช่วงการผลิตต่างๆที่กำหนดด้วยวันส่งมอบในรอบการวางแผนหนึ่ง 42
รูปที่ 2.12 การจัดการกับประเภทวัสดุของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager 44
รูปที่ 2.13 การบริหารจำนวนวัสดุคงคลัง (ทั้งขนาดมาตรฐาน และ leftovers) ของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager 45
รูปที่ 2.14 การป้อนข้อมูลรายการความต้องการสำหรับงานใหม่ของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager 46
รูปที่ 2.15 การรายงานผลลัพธ์และการปรับปรุงจำนวนวัสดุคงคลังของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager 47
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโจทย์ปัญหาการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น 48
รูปที่ 2.17 สรุปโจทย์ปัญหาการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น 49
รูปที่ 2.18 สรุปผลคำตอบปริมาณเศษการตัดจากกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็ก 50
รูปที่ 2.19 ผลคำตอบปริมาณเศษการตัดที่เกิดจากรูปแบบการตัดที่จัดขึ้นโดยแต่ละคน 51
รูปที่ 2.20 ผลคำตอบปริมาณเศษการตัดที่เกิดจากรูปแบบการตัดที่จัดขึ้นโดยแต่ละคน (ต่อ) 52
รูปที่ 2.21 การกระจายของเศษการตัดในช่วงความยาวต่างๆ 53
รูปที่ 2.22 ผลรวมของปริมาณเศษการตัดในช่วงความยาวต่างๆและค่า S.D. 54
รูปที่ 2.23 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเศษการตัดระหว่างกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็กด้วย t-Test 54

รูปที่ 2.24 t-Test ของปริมาณเศษในช่วง (0, 0.25] ระหว่างกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็ก 54
รูปที่ 2.25 ตัวอย่างวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มที่ 1 55
รูปที่ 2.26 ตัวอย่างวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มที่ 2 56
รูปที่ 2.27 ตัวอย่างวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มที่ 3 57
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาขึ้น 63
รูปที่ 3.2 Flowchart ของ Intensive Search Algorithm 67
รูปที่ 3.3 ตัวอย่าง Weighted Random Wheel ในการสุ่มหยิบ L_i 69
รูปที่ 3.4 รายการความต้องการของโจทย์ทดสอบ 70
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเซ็ตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นได้ 71
รูปที่ 3.6 ค่าเฉลี่ยและค่า S.D. ของเศษการตัดของรูปแบบ (T_j) ที่สร้างขึ้น 71
รูปที่ 3.7 การกระจายของขนาดเศษการตัดของรูปแบบ (T_j) 72
รูปที่ 3.8 ผลค่าดัชนี richness ของโจทย์รายการความต้องการ 72
รูปที่ 3.9 ผลค่าเฉลี่ยของดัชนี richness ของชุดทดสอบ 73
รูปที่ 3.10 ตารางแสดงตัวอย่างรายการความต้องการส่วนที่ undersupply 77
รูปที่ 3.11 ตารางแสดงผลลัพธ์การตัดด้วย BFD กับรายการ undersupply 77
รูปที่ 3.12 โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel 80
รูปที่ 3.13 ข้อมูลโจทย์ปัญหา 81
รูปที่ 3.14 ส่วนข้อมูล parameters ของการสร้างรูปแบบการตัด 81
รูปที่ 3.15 ส่วนแสดงผลการสร้างรูปแบบการตัด 82
รูปที่ 3.16 ส่วนแสดงผล 1D-CSP Model 82
รูปที่ 3.17 ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 83
รูปที่ 3.18 เมนู Ribbon ของ Evolver ที่ได้ติดตั้ง Add-in แล้ว 83
รูปที่ 3.19 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของ 1D-CSP Model 84
รูปที่ 3.20 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ Population Size ของ GA 85
รูปที่ 3.21 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าเงื่อนไขการจบ Runtime 85
รูปที่ 3.22 ส่วนป้อนค่าพารามิเตอร์ของ GA 86
รูปที่ 3.23 ส่วนการแสดงรายละเอียดคำตอบการตัดที่ได้จาก BFD algorithm 86
รูปที่ 3.24 ส่วนการแสดงคำตอบของ BFD algorithm 87
รูปที่ 3.25 ส่วนการแสดงค่าดัชนีสำหรับประเมินผลคำตอบ 87
รูปที่ 3.26 รายละเอียดการตัดที่ได้จาก Best Fit Decreasing Algorithm 89
รูปที่ 3.27 ผลคำตอบที่ได้จาก Best Fit Decreasing Algorithm 90
รูปที่ 3.28 ผลคำตอบค่าดัชนีของการทดสอบประเด็นความต่อเนื่องของคำตอบ 91

รูปที่ 3.29 กราฟดัชนีของการทดสอบประเด็นความต่อเนื่องของคำตอบ 91
รูปที่ 3.30 ผลคำตอบค่าดัชนีของการทดสอบประเด็นจำนวนรูปแบบการตัด 92
รูปที่ 3.31 กราฟดัชนีของการทดสอบประเด็นจำนวนรูปแบบการตัด 93
รูปที่ 3.32 ผลคำตอบค่าดัชนีของการทดสอบประเด็นขนาดเศษที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด 94
รูปที่ 3.33 กราฟดัชนีของการทดสอบประเด็นขนาดเศษที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด 95

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1 บทนำ

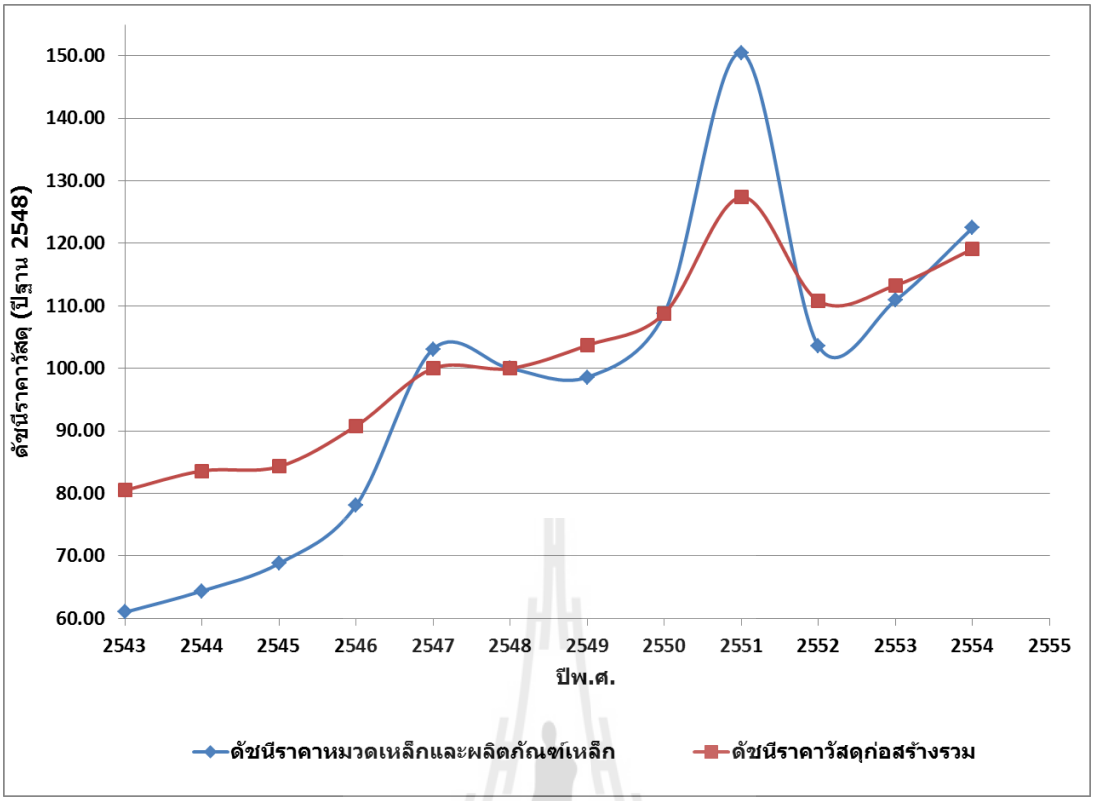
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันราคาสินค้าโภคภัณฑ์ต่างๆได้มีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั่วโลก รวมทั้งราคาวัสดุก่อสร้างที่มีอัตราเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยทุกประเภทถึง 25% ภายในช่วงเวลาเพียงครึ่งปี 2551 ที่ผ่านมา ซึ่งได้สร้างผลกระทบต่อธุรกิจการก่อสร้างอย่างมาก ทั้งต่อเจ้าของโครงการที่ต้องแบกรับภาระค่าก่อสร้างที่เพิ่มสูงขึ้น จนเกิดการชะลอการริเริ่มโครงการใหม่ และต่อบริษัทรับเหมาก่อสร้างที่ต้องรับความเสี่ยงจากการเพิ่มขึ้นอย่างไม่หยุดยั้งของราคาสินค้าและวัสดุก่อสร้างทุกประเภท ความสำคัญของปัญหานี้ที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ได้ปรากฏเป็นมาตรการช่วยเหลือตามมติคณะรัฐมนตรี เลขที่ นร 0506/ว113 เมื่อวันที่ 17 มิถุนายน 2551 เรื่องการพิจารณาช่วยเหลือผู้ประกอบอาชีพงานก่อสร้างและผู้ประกอบอาชีพอื่น เพื่อแก้ปัญหาผู้ประกอบการที่ได้รับผลกระทบโดยตรงอันเกิดจากวิฤตภาวะราคาน้ำมัน (ดีเซล) ราคาเหล็ก และวัสดุก่อสร้างที่ปรับราคาสูงขึ้น

อย่างไรก็ตามสัญญาก่อสร้างส่วนใหญ่เป็นแบบราคาคงที่ จึงเป็นความจำเป็นอันหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่บริษัทรับเหมาก่อสร้างจะต้องปรับปรุงประสิทธิภาพในทุกด้านเพื่อที่จะลดต้นทุนการดำเนินงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้วัสดุก่อสร้างอย่างคุ้มค่าและเกิดการสูญเสียน้อยที่สุด จะเป็นแนวทางที่ช่วยบรรเทาปัญหาได้อย่างตรงจุดที่สุดทางหนึ่ง ซึ่งผลประโยชน์อีกประการคือการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากการลดปริมาณขยะและเศษวัสดุจากงานก่อสร้าง

จากสถิติราคาวัสดุก่อสร้างของสำนักดัชนีเศรษฐกิจการค้า กระทรวงพาณิชย์ พบว่าราคาวัสดุก่อสร้างในกลุ่มเหล็ก (เหล็กเส้น เหล็กรูปพรรณ และอื่นๆ) มีอัตราการเพิ่มขึ้นสูงที่สุด (60% ภายในช่วงเวลาครึ่งปี 2551) โดยสูงกว่าราคาน้ำมันเชื้อเพลิง ในขณะที่เหล็กเป็นวัสดุหลักอย่างหนึ่งในงานก่อสร้าง โดยเฉลี่ยคิดเป็นสัดส่วนต้นทุนเฉพาะค่าเหล็กเส้นต่อต้นทุนโครงการทั้งหมดประมาณ 10-20% (พิจารณาจากอาคารโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ถ้าเป็นโครงสร้างเหล็กสัดส่วนจะมากกว่านี้) และจากแนวทางการปฏิบัติงานที่เป็นอยู่จะทำให้เกิดเศษเหล็กเส้นในอัตราโดยประมาณ 15-20% โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาราคาขายเหล็กเส้นปัจจุบัน (ปี 2551) ประมาณ 39 บาท ในขณะที่เศษเหล็กเส้นที่เกิดขึ้นมีราคารับซื้อที่ประมาณ 9 บาท/กิโลกรัม ทำให้เกิดการสูญเสียคำนวณได้เท่ากับ 77% แต่ในความเป็นจริงเศษเหล็กเส้นที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่มักสูญหายไปจากการขโมย ความสูญเสียจึงมากกว่าที่คำนวณ

กราฟสถิติดัชนีราคาเหล็กและผลิตภัณฑ์เหล็กเทียบกับดัชนีราคาวัสดุก่อสร้างรวมทุกประเภท



รูปที่ 1.1 กราฟสถิติดัชนีราคาเหล็กและดัชนีราคาวัสดุก่อสร้างรวมทุกประเภท

นอกจากตัวอย่างเหล็กเส้นดังกล่าวแล้ว วัสดุที่ใช้ในงานก่อสร้างยังมีอีกมากมายหลายประเภท โดยที่วัสดุก่อสร้างประเภทเชิงเส้น (One-dimensional construction materials) จัดเป็นวัสดุกลุ่มหลักที่มีลักษณะการใช้งานที่ก่อให้เกิดเศษวัสดุ (Trim loss) และการสูญเสียมากที่สุดประเภทหนึ่ง ปัญหาในการตัดและการใช้วัสดุเชิงเส้นนี้จัดเป็นปัญหาประเภท Cutting stock problem หรือ Bin packing problem ซึ่งเป็นปัญหาในวงการอุตสาหกรรมการผลิต (manufacturing) อื่นๆอีกด้วย และได้มีการพัฒนาสร้างโมเดลปัญหาขึ้น รวมทั้งมีการเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วย algorithms ต่างๆกันเป็นลำดับ อย่างไรก็ตามยังขาดการวิจัยเพื่อสร้างโมเดลปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างประเภทเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ รวมทั้งการพัฒนาวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมกับโมเดลที่สร้างขึ้น

ผลที่ได้จากโครงการวิจัยนี้คือ โปรแกรมต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นจะเป็นประโยชน์ต่อธุรกิจงานก่อสร้าง ที่สามารถนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงได้ ส่งผลให้เกิดการลดค่าวัสดุก่อสร้างลงได้ และลดการสูญเสียและขยะจากงานก่อสร้าง องค์ความรู้ใหม่ที่คาดว่าจะได้จากโครงการวิจัยนี้ จะทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดด้วยการปรับปรุงวิธีการโมเดลปัญหาสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ และวิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าเดิม รวมทั้งยังทำให้เกิดกระแสการพัฒนาการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าที่สุด ที่จะเป็นกระแสที่มีความสำคัญยิ่งในยุคที่สินค้ามีราคาแพง

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ริเริ่มพัฒนาโมเดลปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นโดยเฉพาะสำหรับงานก่อสร้าง และคิดค้นวิธีการ (Algorithms) หารูปแบบการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุด

2. สร้างโปรแกรมต้นแบบและทดสอบประเมินผลประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขต

ขอบเขตของการวิจัยนี้จะครอบคลุมถึงเรื่องต่างๆดังนี้

วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น หรือ one-dimensional construction materials คือวัสดุก่อสร้างประเภทต่าง ๆ ที่มีลักษณะการใช้งานตามหน่วยปริมาณความยาวเป็นแบบมิติเดียวหรือเชิงเส้น ได้แก่ เหล็กเส้น เหล็กรูปพรรณ ไม้ท่อน ไม้แผ่น ท่อเหล็ก ท่อ PVC เป็นต้น วัสดุก่อสร้างเหล่านี้เป็นกลุ่มหลักที่สำคัญในการก่อสร้างและมีหลากหลายประเภท และใช้ในปริมาณมาก แต่จะมีลักษณะการใช้งานแบบเดียวกันคือ วัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเหล่านี้จะจัดจำหน่ายในความยาวมาตรฐาน เช่น เหล็กเส้นจำหน่ายที่ความยาว 10 เมตร เหล็กรูปพรรณที่ความยาว 6 เมตร โดยการใช้งานจะต้องนำมาตัดออกเป็นท่อนๆ ตามความยาวที่ต้องการใช้ ซึ่งปกติจะมีเศษเหลือจากการตัด (trim loss) เป็นท่อนที่มีความยาวสั้นกว่าและไม่ได้ตามต้องการเป็นจำนวนมาก

กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้างในประเทศที่จะเลือกมาอย่างเหมาะสมทั้งขนาดและประเภทของงาน เพื่อให้สามารถใช้เป็นตัวแทนของกรณีที่จะเกิดขึ้นทั่วๆไปได้ ด้วยการคำนึงกรอบระยะเวลาของโครงการวิจัยนี้ โดยข้อมูลการปฏิบัติงานจริง โมเดลปัญหา และการสร้างโปรแกรมต้นแบบ ในโครงการวิจัยนี้จะอ้างอิงมาการใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้าง ให้สามารถเปรียบเทียบนำไปใช้กับกรณีทั่วไป

โปรแกรมต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นนั้นก็เพื่อให้เกิดความสะดวกในการเผยแพร่องค์ความรู้ที่คิดค้นขึ้นจากโครงการให้สำหรับผู้ที่สนใจ แต่ทั้งนี้ไม่ได้มุ่งเน้นสร้างฟังก์ชั่นอำนวยความสะดวกต่อการใช้งานหรือความสวยงามอย่างเต็มที่ โปรแกรมต้นแบบจะพัฒนาขึ้นจากซอฟแวร์สำนักงานพื้นฐานที่บริษัทก่อสร้างทั่วไปมีใช้อยู่ เพื่อให้สามารถเข้าใจการใช้งานได้รวดเร็ว และสามารถติดตั้งใช้งานได้โดยไม่ต้องพึ่งพาซอฟแวร์เฉพาะทางอื่นใด การพัฒนาโปรแกรมต้นแบบนี้เพื่อการค้าอยู่นอกเหนือวัตถุประสงค์ของโครงการนี้

1.4 แผนการดำเนินการวิจัย

เพื่อที่จะดำเนินการวิจัยนี้ให้บรรลุวัตถุประสงค์ของโครงการ จึงได้แบ่งระเบียบวิธีวิจัยออกเป็นลำดับ 6 ขั้นตอนในการดำเนินโครงการดังนี้

ขั้นตอนที่1: ศึกษาวิเคราะห์ปัญหาการตัดและการใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่เป็นอยู่ โดยใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้างในการเก็บข้อมูล

วิธีการ: เลือกกรณีศึกษาเป็นโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการ เพื่อการเก็บข้อมูลโดยการสังเกตการณ์ ตรวจเยี่ยมชม และสัมภาษณ์ผู้บริหาร (วิศวกรโครงการ) และผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการตัดใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น รวมทั้งการทบทวนความรู้หรืองานวิจัยอื่นๆจากวรรณกรรมวารสารทางวิชาการ เพื่อให้เข้าใจในรายละเอียดวิธีการปฏิบัติงานจริงที่เป็นอยู่ จากนั้นจึงทำการตรวจวัดปริมาณความสูญเสียของวัสดุที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงกัน โดยที่ขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบทำความเข้าใจในรายละเอียดกับปัญหาวิจัยของโครงการวิจัยนี้ ยืนยันถึงความสำคัญของปัญหา

ขั้นตอนที่2: ทบทวนพัฒนาการของการโมเดลปัญหาและวิธีการแก้ปัญหา cutting stock problem และ bin packing problem ที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อบ่งชี้จุดในการพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้น

วิธีการ: สืบค้นหนังสือ วารสาร และบทความการประชุมทางวิชาการต่างๆที่มีอยู่และเข้าถึงได้อ่านและรวบรวมเพื่อทำความเข้าใจกับพัฒนาการและความหลากหลายของโมเดลปัญหา รวมทั้งพัฒนาการและความหลากหลายของ algorithms ที่ใช้ในการแก้ปัญหาทั้งแบบ heuristics, stochastic, linear programming และ integer programming แนวทางการประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ทำให้สามารถรู้ขีดความสามารถของ algorithms ที่ดีที่สุดที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อให้คณะผู้วิจัยพร้อมสำหรับการคิดค้นพัฒนาต่อยอดให้ดียิ่งขึ้นจากที่มีอยู่เดิม

ขั้นตอนที่3: สร้างโมเดลปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่สอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริงและคิดค้นวิธีการ (algorithms) ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นกว่าที่มีอยู่ในปัจจุบัน

วิธีการ: จากการวิเคราะห์ปัญหาจริงจากโครงการก่อสร้างในขั้นตอนที่ 1 และการวิเคราะห์โมเดลปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 เพื่อหาจุดด้อยหรือประเด็นเงื่อนไขที่ยังไม่ได้มีการพิจารณารวมเข้าไว้ในโมเดล จากนั้นจึงสังเคราะห์โมเดลปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะที่สอดคล้องเหมาะสมกับความจริงที่สุด

และจากการวิเคราะห์ algorithms ที่มีอยู่ในปัจจุบันในขั้นตอนที่ 2 เพื่อประเมินหาประสิทธิภาพในการหาคำตอบ และทำให้สามารถคิดค้นการปรับปรุง algorithms ใหม่ให้มี

ประสิทธิภาพดีกว่าเดิม สามารถได้คำตอบที่ดีกว่าโดยที่ทำให้ลดความสูญเสียจากการตัดได้มากขึ้น ต่อมาจึงทำการทดสอบกับตัวอย่างปัญหาและเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีการแบบเดิม

ขั้นตอนที่4: พัฒนาโปรแกรมต้นแบบให้สะดวกและสอดคล้องกับการนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงในโครงการก่อสร้าง

วิธีการ: โปรแกรมต้นแบบสำหรับการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นจะถูกพัฒนาขึ้นจากโมเดลปัญหาและวิธีการแก้ปัญหา (algorithms) ที่ได้ริเริ่มขึ้นมาใหม่ในขั้นตอนที่ผ่านมา โดยคณะผู้วิจัยที่มีองค์ความรู้นั้นพร้อมทั้งประสบการณ์เกี่ยวกับเทคโนโลยีสารสนเทศ และความเชี่ยวชาญในการพัฒนาซอฟแวร์ จะทำการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบขึ้นมาจากซอฟแวร์ปฏิบัติการ (ซอฟแวร์สำนักงาน) ที่เป็นที่รู้จักและใช้กันโดยทั่วไปธุรกิจการก่อสร้างในประเทศ และที่มีอยู่แล้วในหน่วยงานของคณะผู้วิจัย โดยโปรแกรมต้นแบบจะถูกพัฒนาบนพื้นฐานข้อมูลจริงของโครงการก่อสร้างที่เลือกใช้เป็นกรณีศึกษา โปรแกรมต้นแบบสำหรับการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่พัฒนาขึ้นจะพร้อมติดตั้งและทดลองใช้ในบริษัทก่อสร้างที่สนใจ

ขั้นตอนที่5: ทดลองใช้และประเมินผลความสำเร็จของโปรแกรมต้นแบบกับผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้อง โดยใช้กรณีตัวอย่างโครงการก่อสร้าง

วิธีการ: การทดสอบและประเมินผลจะดำเนินการควบคู่ไปในระหว่างการพัฒนาโปรแกรมต้นแบบ โดยการเลือกกรณีตัวอย่างเป็นโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการ มีการออกแบบการทดลองใช้งานกับโจทย์ตัวอย่างที่เหมาะสม ผลการประเมินประสิทธิภาพจะนำไปสู่บทสรุป

ขั้นตอนที่6: เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยนี้สู่องค์ความรู้ส่วนรวมในที่ประชุมและวารสารทางวิชาการต่างๆทั้งระดับชาติและนานาชาติ รวมทั้งเป็นแหล่งเผยแพร่การใช้ประโยชน์จากงานวิจัยนี้ให้กับอุตสาหกรรมการก่อสร้างของประเทศ

วิธีการ: นำองค์ความรู้ใหม่จากผลการดำเนินโครงการวิจัยนี้ออกเผยแพร่สู่สาธารณะทั้งในและนอกประเทศ โดยการเขียนบทความทางวิชาการจากการวิเคราะห์ปัญหา สร้างโมเดลปัญหาและริเริ่มวิธีการวางแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่พัฒนาให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น สามารถได้คำตอบที่ดีกว่าที่ทำให้ลดความสูญเสียจากการตัดได้มากขึ้น โดยมุ่งหมายให้ได้บทความตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ และนำเสนอบทความในการประชุมทางวิชาการระดับประเทศหรือต่างประเทศ รวมทั้งเผยแพร่โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นสู่ผู้ที่สนใจทั่วไป

จากรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินโครงการและผลลัพธ์ของแต่ละขั้นตอนในหัวข้อระเบียบวิธีวิจัยข้างต้น ได้ทำการประมาณระยะเวลาของแต่ละขั้นตอน และวางแผนการดำเนินงานโดยได้แสดงไว้ในรูปตารางดังต่อไปนี้

รายการกิจกรรม	ระยะเวลา (เดือน)	ไตรมาศที่							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1. ศึกษาวิเคราะห์ปัญหาที่เป็นอยู่ โดยการเก็บข้อมูลจากกรณีตัวอย่าง	4								
2. ทบทวนพัฒนาการของโมเดลปัญหาและวิธีการแก้ปัญหา	6								
3. โมเดลปัญหาและคิดค้นวิธีการ (algorithms) ที่ดีขึ้นสำหรับงานก่อสร้าง	6								
4. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบ (prototype)	3								
5. ทดลองใช้และประเมินผลความสำเร็จของโปรแกรมต้นแบบ	4								
6. เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัย	4								

รูปที่ 1.2 แผนงานโครงการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากโครงการวิจัยนี้อันจะเป็นประโยชน์ต่อธุรกิจการก่อสร้าง คือจะช่วยให้สามารถสร้างแผนการตัดและการใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่ลดการเหลือเศษลงได้มากกว่าเดิม ซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรให้เกิดคุณค่ามากที่สุด และช่วยประหยัดต้นทุนในงานก่อสร้าง เนื่องจากวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นมีอยู่หลากหลายประเภทและเป็นวัสดุหลักในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะเมื่อแนวโน้มราคาค่าวัสดุก่อสร้างเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเศษวัสดุก่อสร้างน้อยลงยังทำให้ปัญหาขยะจากงานก่อสร้างลดลง หรือปัญหาการขโมยเศษวัสดุโดยคนงานก่อสร้างลดลงด้วย ซึ่งผลงานที่เป็นรูปธรรมของโครงการวิจัยคือโปรแกรมต้นแบบที่สามารถเผยแพร่ไปสู่ผู้ที่สนใจทั่วไปที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจก่อสร้างของประเทศ เป็นการลดการพึ่งพาซอฟแวร์จากต่างประเทศ

องค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยอันจะเป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการ คือโมเดลปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นที่พัฒนาสำหรับงานก่อสร้างโดยเฉพาะ ซึ่งจะรวมเอาข้อเงื่อนไขต่างๆจากสภาพการปฏิบัติงานก่อสร้างจริงไว้ และ algorithms ใหม่ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้นสำหรับการแก้ปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นนี้ โดยทำให้เกิดการพัฒนาต่อยอดจากที่มีอยู่เดิม

บทที่ 2 ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น

ในบทนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น รวมทั้งประเด็นการสร้างโมเดลและประเด็นการหาคำตอบที่ดีของปัญหา ที่ปรากฏอยู่ในงานวิจัยต่างๆ นอกจากนี้เนื้อหาในบทนี้ยังรวมถึงการสำรวจสภาพทั่วไปของปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นในธุรกิจก่อสร้างของประเทศไทย ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากบริษัทกรณีศึกษา และบทวิจารณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ วิจารณ์เนื้อหาของการศึกษาในประเด็นต่างๆดังกล่าว บทวิจารณ์นี้จึงสะท้อนแนวคิดและมุมมองของผู้วิจัยต่อการพัฒนาโมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับธุรกิจก่อสร้างในประเทศไทย

2.1 สมมติฐานและกรอบแนวความคิด

สมมติฐานของโครงการวิจัยนี้คือ การนำวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นไปใช้งานจำเป็นต้องตัดให้ได้ความยาวขนาดต่างๆกันตามจำนวนที่ต้องการ โดยที่ลักษณะการปฏิบัติงานจริง วิศวกรมีหน้าที่จัดเตรียมรายการการตัด (cutting list) ที่แจกแจงรายละเอียดขนาดหน้าตัดของวัดสุ ความยาว และจำนวนท่อนที่ต้องการใช้งานในแต่ละช่วงเวลาของงานก่อสร้าง เพื่อให้คนงานได้ทำการตัดตามรายการนี้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปรายการการตัดนี้ยังขาดรายละเอียดของรูปแบบการตัด (cutting pattern) หรือวิธีการจัดเรียงท่อนวัสดุขนาดความยาวต่างๆเพื่อให้เหลือเศษจากการตัดน้อยที่สุดด้วยการทำ optimization โดยปล่อยให้เป็นภาระของคนงาน (ช่างเหล็ก) ในการสร้างรูปแบบการตัดขึ้นเอง

การสร้างรูปแบบการตัดวัสดุเชิงเส้นให้เหลือเศษน้อยที่สุดนี้ เป็นปัญหาที่เรียกว่า One-dimensional cutting stock problem (1D-CSP) ซึ่งจัดเป็นปัญหาแบบ NP-hard ทำให้การสร้างรูปแบบการตัดวัสดุเชิงเส้นที่ optimum เป็นไปได้ยาก จึงมีความเป็นไปได้ว่าการปล่อยให้คนงานการสร้างรูปแบบการตัดขึ้นเองจะทำให้เกิดเศษขึ้นเป็นจำนวนมาก แต่ก็เป็นประเด็นที่น่าสนใจว่าคนงานเหล่านี้มี algorithms ในการสร้างรูปแบบการตัดอย่างไร ซึ่งพวกเขาอาจพัฒนาขึ้นจากประสบการณ์ทำงานของแต่ละคน รวมทั้งเงื่อนไขและข้อจำกัดต่างๆที่มีผลต่อการสร้างรูปแบบการตัดที่สะดวกต่อสภาพการทำงานจริงเป็นอย่างไรบ้าง ตัวอย่างเช่น การตัดขนาดความยาวซ้ำๆกันจำนวนมากจะทำให้ทำงานได้เร็วกว่าแม้จะเหลือเศษมาก หรือการเก็บรักษาท่อนวัสดุขนาดที่ต้องการต่างๆจำนวนมากไว้นานเกินไปอาจเกิดความเสียหายหรือยากต่อการค้นหา

ดังนั้นหากการวิจัยได้รวบรวมวิธีปฏิบัติงานจริงในงานก่อสร้างของประเทศและปรับปรุง algorithms สำหรับการสร้างรูปแบบการตัดในวรรณกรรมวิชาการ เพื่อพัฒนาเป็นโปรแกรมต้นแบบที่สามารถสร้างรูปแบบการตัดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขการปฏิบัติงานและลดเศษจากการตัดได้มากกว่าเดิม

ก็จะทำให้ได้รายการการตัดที่มีรายละเอียดสมบูรณ์ขึ้นและสะดวกต่อการนำไปใช้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการลดต้นทุนของงานก่อสร้างของประเทศลงได้

2.2 ลักษณะปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น

เศษวัสดุก่อสร้างเป็นความสูญเสียที่สำคัญในงานก่อสร้างที่ในท้ายที่สุดจะต้องจ่ายราคาโดยเจ้าของงาน และทำให้บริษัทผู้รับเหมาเสียความสามารถในการแข่งขันราคา ทั้งยังลดประสิทธิภาพและอัตราผลผลิตของบริษัท นอกจากนี้ยังส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อม (Kulatunga et al. 2006) การบริหารเศษวัสดุก่อสร้าง โดยเฉพาะวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นที่มีแนวโน้มการเกิดเศษจำนวนมากจากการใช้งาน จึงเป็นประเด็นที่สำคัญในงานวิจัย De Silva และ Vithana (2008) ได้แบ่งแนวทางการบริหารเศษวัสดุก่อสร้างออกเป็น 4 ประเภทคือ 1. avoid and reduction 2. reuse 3. recycle และ 4. disposal ซึ่งพวกเขาได้เสนอว่าแนวทางที่เหมาะสมที่สุดที่ควรปฏิบัติคือ การหลีกเหลี่ยงและการลดการเกิดเศษ เพราะเป็นแนวทางที่จัดการที่ต้นเหตุและสิ้นเปลืองน้อยที่สุด โดยใช้ต้นทุนเป็นเพียงการคิดวางแผนและการออกแบบการใช้วัสดุอย่างรอบคอบ ซึ่งต้องมีการบันทึกวัดเศษวัสดุ (waste quantification) เป็นกระบวนเริ่มต้นที่จำเป็นในการลดเศษวัสดุ (waste minimization) จากนั้นจึงสร้างโมเดลปัญหาและใช้วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมต่อไป

ปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง (Cutting Stock Problems: CSP) คือกลุ่มปัญหาหนึ่งที่เป็นแขนงหนึ่งของปัญหาการตัดและจัดเก็บ (Cutting and Packing Problems: C&P) ที่มีความหลากหลายแต่จุดร่วมคล้ายกันอันหนึ่ง สามารถพิจารณาความแตกต่างของประเด็นปัญหาและแตกแขนงออกไปเป็นกลุ่มปัญหาย่อยจำนวนมาก ซึ่งมีชื่อเรียกแตกต่างกันไป (Dyckhoff 1990) ได้แก่ ปัญหาการบรรจุกล่อง (Bin Packing Problems) ปัญหากระเป๋าเป้ (Knapsack Problems) ปัญหาการจัดเรียงรถบรรทุกหรือตู้สินค้า (Vehicle Loading, Container Loading) เป็นต้น ซึ่ง CSP อาจพิจารณาวัตถุใน 1 มิติหรือมากกว่า ทั้งนี้การทบทวนวรรณกรรมในบทนี้จะเลือกเฉพาะวัตถุ 1 มิติ หรือวัตถุเชิงเส้นเท่านั้น ซึ่งเป็นขอบเขตของการวิจัยนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ CSP มีอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เนื่องจาก CSP เป็นปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นได้ในหลากหลายอุตสาหกรรม และเป็นประเด็นที่มีผลกระทบโดยตรงต่อต้นทุนหรือกำไรของธุรกิจ จึงเป็นแรงผลักดันให้มีการแก้ปัญหา ซึ่งคำตอบที่ได้จะสามารถนำไปปฏิบัติและผลประโยชน์ที่ได้รับจะเกิดขึ้นอย่างเป็นรูปธรรม (Haessler and Sweeney 1991)

เนื่องจากความหลากหลายของปัญหาตัดและจัดเก็บ (C&P) (Dyckhoff 1990) จึงได้ทำการจำแนกประเภทของ C&P ออกอย่างเป็นระบบด้วยการใช้ลักษณะเฉพาะที่สำคัญ 4 ประการ ดังต่อไปนี้

1. มิติของวัตถุ (Dimensionality) โดยใช้ตัวเลขหรือตัวอักษรเป็นสัญลักษณ์ แบ่งออกได้เป็น

(1) หมายถึงวัตถุ 1 มิติ หรือวัสดุเชิงเส้น

(2) หมายถึงวัตถุ 2 มิติ

(3) หมายถึงวัตถุ 3 มิติ

(N) หมายถึงวัตถุมากกว่า 3 มิติขึ้นไป (N-dimensional)

2. ลักษณะการมอบหมาย C&P เป็นเสมือนการจัดการมอบหมายวัตถุขนาดใหญ่กับวัตถุขนาดเล็ก แบ่งออกได้เป็น

(B) หมายถึง การมอบหมายวัตถุขนาดใหญ่ทั้งหมดที่กำหนด (all large items) ด้วยวัตถุขนาดเล็กที่ไม่จำกัด (unlimited small items)

(V) หมายถึง การมอบหมายวัตถุขนาดใหญ่ที่ไม่จำกัด (unlimited large items) ด้วยวัตถุขนาดเล็กทั้งหมดที่กำหนด (all small items)

3. ขนาดคละของวัตถุขนาดใหญ่ แบ่งออกได้เป็น

(O) หมายถึง มีวัตถุขนาดใหญ่เพียงชิ้นเดียว

(I) หมายถึง มีวัตถุขนาดใหญ่ที่มีขนาดเท่ากันจำนวนหลายชิ้น

(D) หมายถึง มีวัตถุขนาดใหญ่ที่มีขนาดต่างๆกัน

4. ขนาดคละของวัตถุขนาดเล็ก แบ่งออกได้เป็น

(F) หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดต่างๆกัน จำนวนเพียงไม่กี่ชิ้น

(M) หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดต่างๆกัน แต่ละขนาดมีเป็นจำนวนมาก

(R) หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดต่างกันเพียงไม่กี่ขนาด แต่ละขนาดมีเป็นจำนวนมาก

(C) หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กเพียงขนาดเดียว เป็นจำนวนมาก

ด้วยการจำแนกประเภทของปัญหาด้วยลักษณะเฉพาะที่สำคัญ 4 ประการนี้ จะทำให้ได้ประเภทปัญหารูปแบบต่างๆได้ถึง 96 ประเภท (4x2x3x4=96) ซึ่งเพื่อความสะดวกในการบ่งชี้ประเภทจึงใช้ระบบสัญลักษณ์ $(\alpha/\beta/\gamma/\delta)$ แสดงถึงลักษณะเฉพาะที่สำคัญทั้ง 4 ตามลำดับ (Dyckhoff 1990)

หากพิจารณาแบ่งประเภทตามที่ Dyckhoff (1990) กำหนดระบบขึ้นนี้ จะได้ว่า One-dimensional cutting stock problem (1D-CSP) ที่เป็นเป้าหมายของการวิจัยนี้จัดอยู่ในปัญหาประเภท (1/V/I/R)

ส่วนปัญหากระเป๋าเป้ 1 มิติ (Classical One-dimensional knapsack problem) จะเขียนสัญลักษณ์ประเภทได้เป็น (1/B/O/) และปัญหาการบรรจุกล่อง 1 มิติ (Classical One-dimensional bin-packing problem) มีสัญลักษณ์ประเภทคือ (1/V/I/M)

งานวิจัยล่าสุดของ Wäscher et al. (2007) ได้วิจารณ์ข้อบกพร่องของการจำแนกประเภทปัญหา C&P ของ Dyckhoff (1990) และได้ทำการปรับปรุงวิธีการจำแนกประเภทใหม่ให้ชัดเจนขึ้น โดยพวกเขาได้พิจารณาจุดร่วมทั่วไปของปัญหา C&P และจุดต่างที่เป็นลักษณะเฉพาะของแต่ละกลุ่มปัญหาย่อย ลักษณะร่วมทั่วไปของปัญหา C&P คือการจัดการกับวัสดุสองกลุ่มหลัก ได้แก่

1. วัสดุขนาดใหญ่ (large objects) ที่ใช้เป็นวัสดุคงคลัง หรือ input หรือ supply ของปัญหา

2. วัสดุขนาดเล็ก (small items) ที่ใช้เป็นรายการความต้องการ หรือ output หรือ demand ของปัญหา

ด้วยการเลือก small items บางส่วน หรือทั้งหมด จัดกลุ่มย่อยๆของวัสดุเหล่านี้ แล้วทำการมอบหมายให้กับ large objects โดยที่ต้องไม่เกินกว่าขีดความสามารถของ large objects และ small items ในกลุ่มย่อยๆนี้ต้องไม่ซ้อนทับกัน (do not overlap) การจำแนกประเภทปัญหา C&P ที่ปรับปรุงใหม่โดย Wäscher et al. (2007) ด้วยการใช้ลักษณะเฉพาะที่สำคัญ 5 ประการ ดังต่อไปนี้

1. มิติของวัสดุ ได้แก่ 1, 2, 3, และ >3 มิติ

2. ลักษณะการมอบหมาย ระหว่างวัสดุ large objects กับ small items แบ่งเป็น 2 รูปแบบที่ชัดเจนคือ

Output value maximization คือ การมอบหมายที่มี large objects ไม่เพียงพอสำหรับ small items ทั้งหมด ดังนั้น large objects ทั้งหมดจะต้องถูกใช้ จึงไม่ต้องคัดเลือก ทั้งนี้ประเด็นสำคัญคือการคัดเลือก small items เพื่อให้เกิดเป็นผลลัพธ์สูงที่สุดของการมอบหมาย

Input value minimization คือ การมอบหมายที่มี large objects มากเพียงพอสำหรับ small items ทั้งหมด ดังนั้น small items ทั้งหมดจะต้องถูกใช้ หรือถูกจัดกลุ่มย่อยๆของ small items เพื่อเตรียมมอบหมายให้กับ large objects ทั้งนี้ประเด็นสำคัญคือการมอบหมายกลุ่มย่อยเหล่านี้ให้เกิดการใช้ input ของ large objects ที่ต่ำที่สุด

ทั้งนี้คำว่า “value” เป็นคำกว้างๆที่อาจหมายถึง ต้นทุน กำไร หรือปริมาณวัสดุ ก็ได้

3. ขนาดคละของวัสดุขนาดเล็ก เพื่อให้เกิดความชัดเจนขึ้นจึงแบ่งออกได้เป็น

Identical small items หมายถึง มีขนาดเท่ากันทั้งหมด

Weakly heterogeneous assortment หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดต่างกันเพียงไม่กี่ขนาด แต่ละขนาดมีเป็นจำนวนมาก

Strongly heterogeneous assortment หมายถึง มีวัตถุขนาดเล็กที่มีขนาดหลากหลายต่างๆกัน แต่ละขนาดจำนวนเพียงไม่กี่ชิ้นหรือมีเป็นจำนวนมาก

4. ขนาดคละของวัสดุขนาดใหญ่ แบ่งออกได้เป็น

One large object ซึ่ง dimensions ทั้งหมด ถูกกำหนดขนาดไว้แล้ว หรืออาจมีบาง dimension ยังไม่ได้กำหนดขนาด

Several large objects ซึ่ง dimensions ทั้งหมด ถูกกำหนดขนาดไว้แล้ว แบ่งออกได้เป็น

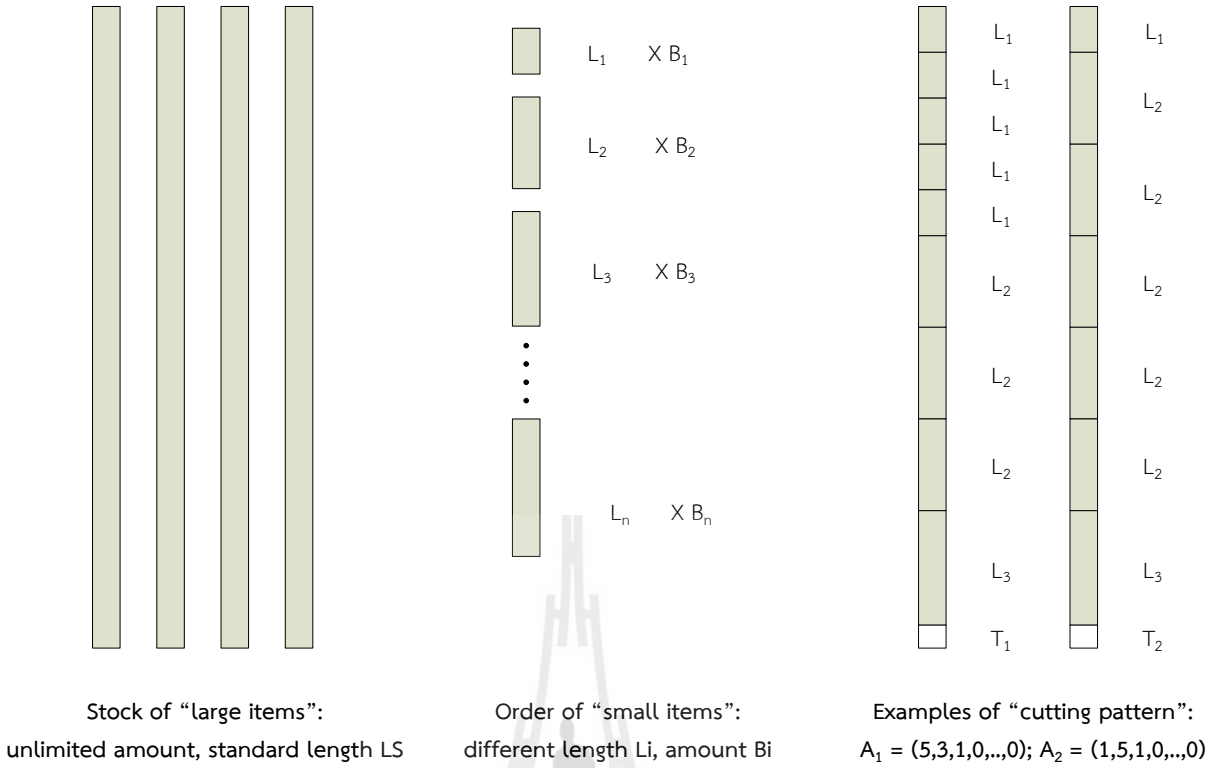
Identical large objects

Weakly heterogeneous assortment

Strongly heterogeneous assortment

5. รูปร่างของวัสดุขนาดเล็ก ซึ่งอาจเป็น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม วงกลม ทรงกระบอก ทรงกลม ปริซึม

ปัญหาทั่วไปการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น (Classical 1D-CSP) คือกลุ่มปัญหาทั่วไปที่มีวัสดุคงคลังเชิงเส้น (1 มิติ) และมีความยาวมาตรฐาน LS จำนวนไม่จำกัด โดยมีความต้องการตัดวัสดุนี้ออกเป็นท่อนที่ความยาวต่างๆกันจำนวน n ความยาว (L_1, L_2, L_3, ..., L_n) แต่ละความยาวต้องการเป็นจำนวนหลายๆท่อน (B_1, B_2, B_3, ..., B_n) ตามลำดับ ซึ่งการตัดวัสดุนี้ออกเป็นท่อนตามที่ต้องการจะใช้แบบแผนการตัด (cutting pattern) โดยแบบแผนการตัดแต่ละแบบจะเป็นการจัดท่อนที่ความยาวต่างๆกันจำนวนต่างๆกันเพื่อให้มีผลรวมความยาวไม่เกินกว่าความยาวมาตรฐาน แบบแผนการตัดแบบที่ j ใดๆ คือ $A_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, ..., a_{nj})$ โดยที่ a_{ij} คือจำนวนท่อนของการตัดที่ความยาว L_i ดังนั้น a_{ij} จึงเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ศูนย์ขึ้นไป โดยที่การตัดวัสดุตามแบบแผนการตัดแบบที่ j นี้ อาจทำให้เกิดเศษการตัด (trim losses) (T_j) ที่มีความยาวท่อนสั้นกว่าความยาวที่ต้องการที่สั้นที่สุด ($0 < T_j < Min[L_i]$) มีเป้าหมายของการแก้ปัญหาคือเพื่อหาแบบแผนการตัดที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดผลรวมของเศษการตัดน้อยที่สุด (Vahrenkamp 1996) แสดงแผนภาพของ CSP ได้ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปของปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น

2.3 โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้น

สามารถเขียนสมการทั่วไปได้ดังนี้ ปรับปรุงจาก Haessler and Sweeney (1991) และ Vahrenkamp (1996)

Decision variable: X_j

Objective function: $Minimize\ \sum_j (T_j X_j)$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\left(\sum_j (A_j X_j)\right)_i = B_i$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n

2. ข้อจำกัดจำนวนเต็มบวก: $X_j \geq 0$ และ $X_j \in \mathbb{N}$

โดยที่:

X_j คือ จำนวนครั้งการตัดวัสดุคงคลังตามแบบแผน A_j สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง m

T_j คือ เศษการตัดของแบบแผน A_j ซึ่ง $T_j = LS - \sum_i a_{ij} L_i$ และ $0 < T_j < Min\ [L_i]$

ในขณะที่แบบแผนการตัดวัสดุใดๆที่ใช้ $A_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, ..., a_{nj})$ จะต้องเป็นแบบแผนที่เป็นไปได้ (feasible cutting patterns) ซึ่ง $\sum_i a_{ij} L_i \leq LS$

a_{ij} คือ จำนวนท่อนของการตัดท่อนความยาว L_i ของแบบแผนการตัด A_j ซึ่ง $a_{ij} \geq 0$

L_i คือ ขนาดความยาวที่ต้องการ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n

B_i คือ จำนวนท่อนของความยาว L_i ที่ต้องการ

LS คือ ขนาดความยาวของวัสดุคงคลัง

$\mathbb{N}$ คือ เซ็ตของจำนวนนับ

One-dimensional bin-packing problem (1D-BPP) เป็นกลุ่มปัญหาทั่วไปที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับ 1D-CSP คือมีกลุ่มวัตถุเชิงเส้น 1 มิติที่มีความยาวต่างๆกันอยู่จำนวนหนึ่ง ที่ต้องการจัดใส่ในถัง 1 มิติที่มีความจุเท่าๆกัน โดยที่วัตถุเหล่านี้เมื่อรวมกันจะต้องไม่ทำให้เกินความจุของถังแต่ละใบ และมีเป้าหมายเพื่อที่จะหาแบบแผนการบรรจุที่ทำให้ใช้จำนวนถังน้อยที่สุด ความแตกต่างระหว่าง 1D-CSP กับ 1D-BPP คือ 1D-CSP จะมีจำนวนที่ต้องการ B_i มากกว่าหนึ่งท่อนสำหรับขนาดความยาวท่อนที่ต้องการ L_i แต่ใน 1D-BPP จำนวนที่ต้องการในแต่ละความยาวที่ต้องการมักเป็นหนึ่ง นอกจากนี้เป้าหมายของการหาคำตอบก็ต่างกันคือ 1D-CSP จะต้องการ minimize เศษเหลือจากการตัด ในขณะที่ 1D-BPP จะต้องการ minimize จำนวนถังที่ต้องใช้ (Vahrenkamp 1996)

กลุ่มปัญหาทั้งสองนี้จัดเป็นปัญหาประเภท NP-hard (nondeterministic polynomial-time hard) ซึ่งหมายความว่าเป็นปัญหาที่จะต้องใช้เวลาโพลิโนเมียลเพื่อที่จะพิจารณาคำตอบทุกคำตอบที่เป็นไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราส่วนโดยเฉลี่ย $LS/L_i < 5$ จะเป็นปัญหาที่ยากที่จะแก้ ซึ่งการประยุกต์ใช้ปัญหาทั้งสองกลุ่มนี้ในการโมเดลปัญหาการปฏิบัติงานต่างๆมีอยู่อย่างกว้างขวาง (Gupta and Ho, 1999) ได้แก่ ปัญหาการบรรจุภัณฑ์หรือการโหลดสินค้าขึ้นรถบรรทุก ปัญหาในวงการวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์เช่น table formatting, prepaging และ file allocation ปัญหาในอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าต่างๆ เช่น กระดาษ รวมทั้งการประยุกต์ใช้กับปัญหาการใช้วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น

วิธีการหาคำตอบแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming: LP) เป็นวิธีการที่เหมาะสมกับปัญหาในระดับ “ง่าย” คือปัญหาที่มีความต้องการความยาวของวัสดุหลากหลายขนาดและเป็นท่อนสั้นๆ เนื่องจากปัญหาแบบนี้จะทำให้มีคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมาก คำตอบที่ไม่เป็นจำนวนเต็มจึงมีโอกาสหาได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่เป็นจำนวนเต็ม อย่างไรก็ตาม หากว่าความยาวที่ต้องการของวัสดุมีเพียงไม่กี่ขนาดและเป็นท่อนยาวๆ จะจัดว่าเป็นปัญหาระดับ “ยาก” ซึ่งมักจะไม่สามารถหาคำตอบที่ดีได้ด้วยวิธี LP (Hinterding et al. 1994)

2.4 การหาคำตอบที่ดี

การหาคำตอบที่แท้จริง (optimal solutions) ของปัญหา CSP จะสามารถทำได้เมื่อเป็นปัญหาที่มีจำนวนความยาวที่ต้องการของวัสดุเพียงไม่กี่ขนาด (small n) ซึ่งมักจะเป็น n ที่น้อยกว่าในทางปฏิบัติ อย่างไรก็ตามการหาคำตอบที่ดี (approximate optimal solutions) ก็อาจดีเพียงพอสำหรับนำไปใช้ได้ โดยวิธีการหาคำตอบที่ดีเป็นวิธีการที่ใช้ heuristic procedures ซึ่งมีวิธีการที่นิยมใช้กันอยู่ 2 วิธีคือ (1) Linear Programming (LP) Relaxation of the Integer Problem (IP) โดยสรุปคือการใช้ LP ในการหาคำตอบเบื้องต้นแล้วจึงปรับเปลี่ยนคำตอบที่ได้ไปเป็นคำตอบที่เป็นจำนวนเต็ม (2) Sequential Heuristic Procedure (SHP) โดยสรุปคือการสร้างแบบแผนการตัดที่ดีเป็นลำดับเพื่อให้สอดคล้องกับรายการความต้องการส่วนที่ยังเหลือ และจะหยุดสร้างเมื่อรายการความต้องการได้รับการตอบสนองทั้งหมดแล้ว รายละเอียดของทั้งสองวิธีมีดังนี้ (Haessler and Sweeney 1991)

นอกจากรายละเอียดของโมเดลปัญหาจะแตกต่างกันออกไปมากมายตามแต่การประยุกต์ใช้วิธีการแก้ปัญหา (Algorithms) ที่มีอยู่ก็มีอยู่จำนวนมากซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก (Scholl et al., 1997) คือวิธีการในการหาคำตอบที่ดีสุดแบบจริง (exact algorithms) และแบบประมาณ (approximation algorithms) เนื่องจากปัญหา 1D-CSP และ 1D-BPP เป็นปัญหาประเภท NP-hard การหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบจริงอาจทำไม่ได้กับปัญหาที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อน ดังนั้นการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบประมาณจึงเป็นแนวทางที่เหมาะสมกว่า และวิธีการแก้ปัญหาแบบนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นมากมาย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น heuristic และ stochastic approaches จากการทบทวนงานวิจัยสามารถสรุปรายการตัวอย่างวิธีการแก้ปัญหาต่างๆที่สำคัญได้ดังต่อไปนี้

Exact algorithms:

Linear programming Relaxation of Integer Programming และ Delayed Pattern Generation Technique เป็นการหาคำตอบโดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ ถูกเสนอโดย Gilmore and Gomory (1961) และ Gilmore and Gomory (1963)

Approximation algorithms:

Heuristic approach เป็นการหาคำตอบแบบง่ายและรวดเร็ว ซึ่งจะให้คำตอบที่ดีพอประมาณ มี Heuristic หลายวิธีที่ถูกสร้างขึ้น ได้แก่ First fit decreasing (Coffman et al. 1984), Best fit decreasing (Coffman et al. 1984), Next-fit decreasing (Coffman et al. 1984), การสร้างแบบแผนการตัดที่มีประสิทธิภาพดี (Pierce 1964) , และ Sequential Heuristic Procedure (SHP) (Haessler and Sweeney 1991)

Stochastic approach เป็นการหาคำตอบแบบประมาณโดยอาศัย algorithms ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่อยู่ในเซ็ตของคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมด ได้แก่ Randomized pattern selection (Vahrenkamp 1996), Genetic algorithms (Salem et al. 2007), Evolutionary algorithms (Liang et al. 2002)

2.4.1 LP Relaxation of IP

วิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้ สามารถอ้างย้อนกลับไปถึงงานของ Gilmore and Gomory (1961); Gilmore and Gomory (1963) ที่ได้ริเริ่มการใช้วิธีเพิ่มแบบแผนการตัดอันถัดไป (next pattern) เข้าไปโมเดล LP ด้วยการแก้ปัญหาย่อยที่สัมพันธ์กันที่อยู่ในรูปแบบปัญหากระเป๋าเป้ (Knapsack problem) ทำให้สามารถแก้ปัญหา CSP ที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการหาเศษการตัดที่น้อยที่สุด ได้ด้วยโมเดล LP โดยไม่ต้องสร้างแบบแผนการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาก่อน ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญ เนื่องจากแบบแผนการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดอาจมีอยู่เป็นจำนวนมากมหาศาล เป็นล้านๆแบบ โดยเฉพาะเมื่อ จำนวนความยาวที่ต้องการมีหลากหลายขนาดและเป็นท่อนสั้นๆ เทคนิคที่ Gilmore and Gomory (1961) คิดค้นขึ้นนี้เรียกว่า Delayed Pattern Generation Technique หรือ Column Generation Technique ซึ่งเป็นเทคนิคที่ช่วยในการหาคำตอบที่ดีได้ภายในเวลาที่สั้น

โมเดลปัญหา LP relaxation ของปัญหา IP ของ 1D-CSP สามารถเขียนได้ดังนี้ (อ้างอิงกับสมการและตัวแปรของโมเดล 1D-CSP ที่แสดงข้างบน)

Decision variable: X_j

Objective function: $Minimize\ \sum_j(X_j)$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\left(\sum_j(A_jX_j)\right)_i \geq B_i$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n

2. ข้อจำกัดจำนวนบวก: $X_j \geq 0$ และ $X_j \in \mathbb{R}$

โดยที่:

X_j คือ จำนวนครั้งการตัดวัสดุคงคลังตามแบบแผน A_j สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง m

$\mathbb{R}$ คือ เซ็ตของจำนวนจริง

ถ้าให้ Y_i เป็น dual variables ของข้อจำกัดที่ i จะได้โมเดลปัญหาคู่ (Dual Problem) ของโมเดลนี้ (จากคุณสมบัติ Duality ของโมเดลปัญหา LP) เป็นดังนี้

Decision variable: Y_i

Objective function: $Maximize\ \sum_i(B_iY_i)$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $(\sum_i(A_iY_i))_j \geq 1$ สำหรับ *j* ตั้งแต่ 1 ถึง *m*

2. ข้อจำกัดจำนวนบวก: $Y_i \geq 0$

โดยที่:

Y_i คือ dual variables ของโมเดลปัญหาคู่ (Dual Problem) สำหรับ *i* ตั้งแต่ 1 ถึง *n*

ฟังก์ชันข้อจำกัดของ Dual Problem ข้างบนแสดงให้เห็นว่าคำตอบของปัญหา (optimal LP solution) ได้เกิดขึ้นแล้วหรือยัง ด้วยการสังเกตว่าหากยังคงมีแบบแผนการตัดใดที่สามารถปรับปรุงคำตอบของโมเดล LP ได้ จะทำให้ Dual Problem ยังคง infeasible

แบบแผนการตัดอันถัดไปที่จะเพิ่มเข้ามาในโมเดลปัญหา จะหาได้จากการแก้ปัญหาที่ซ้อนอยู่ที่อยู่ในรูปแบบประเภทปัญหากระเป๋าเป้ (Knapsack Problem) มีโมเดลปัญหาที่เชื่อมโยงกันดังนี้ (อ้างอิงกับสมการและตัวแปรของโมเดล 1D-CSP ที่แสดงข้างบน)

Decision variable: A_i

Objective function: $Maximize\ \sum_i(Y_iA_i)$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\sum_i(L_iA_i) \leq LS$

2. ข้อจำกัดจำนวนเต็มบวก: $A_i \geq 0$ และ $A_i \in \mathbb{N}$

หาก A_i ที่เป็นคำตอบนี้ทำให้ค่า Max. $\sum_i(Y_iA_i)$ ที่หาได้ มีค่าน้อยกว่า 1 ซึ่งเป็นการละเมิดฟังก์ชันข้อจำกัดของ Dual Problem แสดงว่าคำตอบปัจจุบันของโมเดล LP เป็นคำตอบที่ดีที่สุดแล้ว หรือสรุปว่าปฏิเสธ A_i อันใหม่ที่ได้นี้ แต่หาก A_i ที่เป็นคำตอบนี้ทำให้ค่า Max. $\sum_i(Y_iA_i)$ ที่หาได้ มีค่ามากกว่า 1 ซึ่งสอดคล้องกับฟังก์ชันข้อจำกัดของ Dual Problem แสดงว่า A_i อันใหม่ที่ได้นี้ สามารถช่วยปรับปรุงคำตอบปัจจุบันของโมเดล LP ได้ จึงต้องสรุปว่าตอบรับ A_i อันใหม่ที่ได้นี้

เมื่อได้คำตอบที่ดีของโมเดล LP แล้ว (X_j) จะต้องทำการปรับปรุงคำตอบต่อไป เนื่องจากคำตอบที่ได้อาจไม่ใช่ตัวเลขจำนวนนับ วิธีการทั่วไปที่นิยมใช้คือการปัดตัวเลขทศนิยมลงเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม และเพิ่มบาง X_j เพื่อให้ได้จำนวนท่อนวัสดุครบตามที่ต้องการ

ข้อด้อยของวิธีการหาคำตอบแบบ LP Relaxation of IP นี้คือ มักจะได้คำตอบที่มีจำนวนแบบแผนการตัดที่ใช้ (m) ใกล้เคียงกับจำนวนความยาวที่แตกต่างกันของวัสดุที่ต้องการ (n) ซึ่งอาจยอมรับได้ในกรณีที่มีคำตอบที่เป็นไปได้ไม่มากและไม่สามารถหาคำตอบที่ดีกว่านี้ได้ คำตอบที่ได้ที่ประกอบไป

ด้วยแบบแผนการตัดต่างๆกันจำนวนมากนี้อาจทำให้ยากในการปฏิบัติงานจริงและเป็นเหตุให้ต้นทุนค่าติดตั้งเพิ่มสูงขึ้น (Vahrenkamp 1996)

2.4.2 Heuristic Algorithms

Heuristic algorithms ที่นำมาใช้ในการหาคำตอบแบบประมาณ (Coffman et al. 1984) ได้แก่ algorithms ต่อไปนี้ โดยสมมติให้รายการท่อนความยาวที่ต้องการเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ทราบค่า รายการท่อนความยาวเหล่านี้มีการเรียงลำดับไว้ก่อนแล้วและจะถูกพิจารณาต่อไปตามลำดับ การเรียงลำดับรายการท่อนความยาวอาจใช้รูปแบบ การเรียงลำดับจากความยาวแบบสุ่ม (random order) การเรียงลำดับจากความยาวน้อยไปมาก (ascending order) และการเรียงลำดับจากความยาวมากไปน้อย (descending order)

1. Next fit คือการพิจารณานำท่อนความยาวในลำดับถัดไปของรายการความต้องการ มาตัดด้วยวัสดุคงคลังเส้นปัจจุบันที่กำลังถูกตัดอยู่ (current stock length) หากวัสดุคงคลังเส้นนี้ยังคงเหลือความยาวเกินกว่าท่อนความยาวที่เลือกก็สามารถทำการตัดต่อได้ แต่หากเหลือความยาวไม่เพียงพอให้ทิ้งวัสดุคงคลังเส้นปัจจุบันนี้ และไปเริ่มใช้วัสดุคงคลังเส้นใหม่มาตัดท่อนความยาวที่เลือก

2. First fit คือการพิจารณานำท่อนความยาวในลำดับถัดไปของรายการความต้องการ มาตัดด้วยวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดก่อนที่สามารถตัดได้ (กลุ่มวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วและยังคงเหลือความยาวเพื่อจะนำมาตัดต่อไป (leftovers)) แต่หากกลุ่มวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วไม่ยาวพอสำหรับตัดท่อนความยาวที่เลือก ให้เริ่มใช้วัสดุคงคลังเส้นใหม่มาตัดท่อนความยาวที่เลือก

3. Worst fit คือการพิจารณานำท่อนความยาวในลำดับถัดไปของรายการความต้องการ มาตัดด้วยวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้ว (กลุ่มวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วและยังคงเหลือความยาวเพื่อจะนำมาตัดต่อไป) ที่ทำให้เหลือเศษความยาวมากที่สุด แต่หากกลุ่มวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วไม่ยาวพอสำหรับตัดท่อนความยาวที่เลือก ให้เริ่มใช้วัสดุคงคลังเส้นใหม่มาตัดท่อนความยาวที่เลือก

4. Best fit คือการพิจารณานำท่อนความยาวในลำดับถัดไปของรายการความต้องการ มาตัดด้วยวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้ว (กลุ่มวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วและยังคงเหลือความยาวเพื่อจะนำมาตัดต่อไป) ที่ทำให้เหลือเศษความยาวน้อยที่สุด แต่หากกลุ่มวัสดุคงคลังเส้นที่ถูกตัดไปแล้วไม่ยาวพอสำหรับตัดท่อนความยาวที่เลือก ให้เริ่มใช้วัสดุคงคลังเส้นใหม่มาตัดท่อนความยาวที่เลือก

ตัวอย่าง การคำนวณการตัดวัสดุคงคลังด้วย Heuristic algorithms ต่างๆ รายการท่อนความยาวที่ต้องการเรียงเป็นลำดับดังนี้ 8, 5, 7, 6, 2, 4, 1 ต้องการตัดด้วยวัสดุคงคลังขนาดเดียวความยาวเท่ากับ 10 จะได้ผลดังนี้

1. Next fit: (8 | 2), (5 | 5), (7 | 3), (6, 2 | 2), (4, 1 | 5)

2. First fit: (8, 2), (5, 4, 1), (7 | 3), (6 | 4)

3. Worst fit: (8 | 2), (5, 2, 1 | 2), (7 | 3), (6, 4)

4. Best fit: (8, 2), (5 | 5), (7, 1 | 2), (6, 4)

ตัวเลขในแต่ละวงเล็บคือการตัดวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น ตัวเลขหลังเครื่องหมาย "|" คือความยาวของเศษการตัด จากตัวอย่างนี้แสดงว่าผลการคำนวณการตัดวัสดุจะต้องใช้วัสดุคงคลังอย่างน้อย 4 เส้น ไม่ว่าจะเป็น algorithms ใด นอกจากนี้คำตอบที่ได้จาก algorithms อาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุด (optimal solution) และคำตอบจาก algorithms เหล่านี้ยังขึ้นกับโจทย์ปัญหา ไม่มี algorithm ใดที่ให้คำตอบดีกว่าเสมอในทุกโจทย์ปัญหา

ในกรณีที่โมเดลปัญหา CSP มีขนาดใหญ่และซับซ้อน คือมีวัสดุคงคลังหลายขนาดความยาว หรือมีรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการจำนวนมาก ซึ่งอาจทำให้ขนาดความยาวท่อนที่ยาวมากหรือยาวปานกลางที่อยู่ในลำดับหลังๆของรายการ ไม่สามารถถูกตัดได้ด้วยวัสดุคงคลัง leftovers วิธีการหาคำตอบที่มักมีประสิทธิผลดีคือการจัดเรียงลำดับรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการก่อนจากความยาวมากไปน้อย (descending order) (จากตัวอย่างโจทย์ปัญหาข้างต้นสามารถจัดเรียงรายการความต้องการได้เป็น 8, 7, 6, 5, 4, 2, 1) แล้วจึงใช้ algorithm อันใดอันหนึ่งในการหาคำตอบ ซึ่งจะทำให้ได้วิธีการหาคำตอบแบบใหม่ เรียกวิธีการหาคำตอบเหล่านี้ว่า next fit decreasing, first fit decreasing, worst fit decreasing และ best fit decreasing

จากตัวอย่างเดิมจะได้ผลลัพธ์คำตอบที่ต่างออกไปดังนี้

1. Next fit decreasing: (8 | 2), (7 | 3), (6 | 4), (5, 4 | 1), (2, 1 | 7)

2. First fit decreasing: (8, 2), (7, 1 | 2), (6, 4), (5 | 5)

3. Worst fit decreasing: (8 | 2), (7, 1 | 2), (6, 2 | 2), (5, 4 | 1)

4. Best fit decreasing: (8, 2), (7, 1 | 2), (6, 4), (5 | 5)

วิธีการหาคำตอบแบบ Heuristic algorithms ในแต่ละวิธีเหล่านี้อาจให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับโจทย์ปัญหา ที่บางโจทย์อาจเหมาะกับวิธีหนึ่งจึงทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีมาก ในขณะที่ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดีกับวิธีอื่นๆ ความไม่แน่นอนของประสิทธิภาพของวิธีการหาคำตอบจึงอาจทำให้ต้องทำการหาคำตอบทั้ง 4 วิธี แล้วจึงนำมาประเมินเพื่อเลือกคำตอบที่ดีที่สุด

2.4.3 Efficient Feasible Cutting Patterns

Salem et al. (2007) ได้เสนอการสร้างแบบแผนการตัดที่มีประสิทธิภาพ (Efficient feasible cutting patterns) แบบต่างๆกันจำนวนหนึ่ง ด้วย algorithm ที่ปรับปรุงมาจาก Pierce (1964) ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. ให้ทำการจัดเรียงรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการตามลำดับจากความยาวมากไปหาน้อย (descending order)

2. แบบแผนการตัด (cutting pettern) ที่ j ใดๆ

$$a_{1j} = min\left(\left[\frac{LS}{L_1}\right], B_1\right)$$

$$a_{2j} = min\left(\left[\frac{LS - a_{1j} \cdot L_1}{L_2}\right], B_2\right)$$

$$a_{nj} = min\left(\left[\frac{LS - \sum_i^{n-1} a_{ij} \cdot L_i}{L_n}\right], B_n\right)$$

3. จะได้แบบแผนการตัดที่มีประสิทธิภาพที่ j ใดๆ เป็น $A_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, \ldots, a_{nj})$

4. พิจารณาแบบแผนการตัดที่ j, ค่าตัวเลข i ที่มากที่สุด โดยที่ $1 \leq i \leq n-1$ ให้เท่ากับ k หากไม่มี k ให้จบการสร้างแบบแผน

5. สำหรับ j = j+1 (แบบแผนการตัดถัดไป) ให้

จำนวนท่อนตัดของ L_1: $a_{1j} = a_{1(j-1)}$

จำนวนท่อนตัดของ L_2: $a_{2j} = a_{2(j-1)}$

จำนวนท่อนตัดของ L_{k-1}: $a_{(k-1)j} = a_{(k-1)(j-1)}$

จำนวนท่อนตัดของ L_k: $a_{kj} = a_{k(j-1)} - 1$

จำนวนท่อนตัดของ L_{k+1}:

$$a_{(k+1)j} = \min\left(\left[\frac{LS - \sum_i^{k} a_{ij} \cdot L_i}{L_{k+1}}\right], B_{k+1}\right)$$

จำนวนท่อนตัดของ L_{k+2} ,....,

จำนวนท่อนตัดของ L_n:

$$a_{nj} = \min\left(\left[\frac{LS - \sum_i^{n-1} a_{ij} \cdot L_i}{L_n}\right], B_n\right)$$

6. กลับไปทำซ้ำขั้นตอนที่ 3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Algorithm นี้สามารถสร้างแบบแผนการตัดที่มีประสิทธิภาพขึ้นเป็นจำนวนหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการหาคำตอบด้วยโมเดลปัญหา CSP แบบ Integer Programming (IP) ต่อไปได้ (Salem et al. 2007) ตัวอย่างเช่น ให้ LS = 10 หน่วย รายการท่อนความยาวที่ต้องการตามลำดับเป็น 6, 5, 3, 2, 1 จำนวนที่ต้องการของแต่ละท่อนความยาวเป็น 4, 3, 5, 4, 5 ตามลำดับ จะสามารถสร้างแบบแผนการตัดตาม algorithm ข้างบนได้ดังนี้

A_1 = (1, 0, 1, 0, 1)
A_2 = (1, 0, 0, 2, 0)
A_3 = (1, 0, 0, 1, 2)
A_4 = (1, 0, 0, 0, 4)
A_5 = (0, 2, 0, 0, 0)
A_6 = (0, 1, 1, 1, 0)
A_7 = (0, 1, 1, 0, 2)
A_8 = (0, 1, 0, 2, 1)
A_9 = (0, 1, 0, 1, 3)
A_{10} = (0, 1, 0, 0, 5)
A_{11} = (0, 0, 3, 0, 1)
A_{12} = (0, 0, 2, 2, 0)
A_{13} = (0, 0, 2, 1, 2)
A_{14} = (0, 0, 2, 0, 4)
A_{15} = (0, 0, 1, 3, 1)
A_{16} = (0, 0, 1, 2, 3)
A_{17} = (0, 0, 1, 1, 5)
A_{18} = (0, 0, 1, 0, 5)
A_{19} = (0, 0, 0, 4, 2)
A_{20} = (0, 0, 0, 3, 4)
A_{21} = (0, 0, 0, 2, 5)
A_{22} = (0, 0, 0, 1, 5)
A_{23} = (0, 0, 0, 0, 5)

2.4.4 Sequential Heuristic Procedure (SHP)

หลักการของ SHP คือการเพิ่มแบบแผนการตัดอย่างเป็นขั้นตอนทีละหนึ่งแบบแผนจนกระทั่งได้จำนวนและท่อนความยาวตามที่ต้องการ เริ่มต้นจากการค้นหาแบบแผนการตัดที่ดีอันหนึ่ง ซึ่งให้เศษการตัดที่น้อย แล้วจึงใช้แบบแผนนี้ตัดท่อนความยาวให้ได้จำนวนมากที่สุดตามที่ต้องการเท่าที่เป็นไปได้ จากนั้นจึงปรับปรุงรายการความต้องการที่คงเหลืออยู่ ก่อนที่จะค้นหาแบบแผนการตัดที่ดีอันต่อไป มาตอบสนองต่อความต้องการที่คงเหลืออยู่นี้ หลักสำคัญอยู่ที่การเลือกแบบแผนการตัดที่ดีอันแรกๆ ซึ่งควรเป็นแบบแผนที่มีเศษการตัดน้อยๆ นำไปใช้ตัดซ้ำได้มากๆ และทำให้จำนวนความต้องการที่คงเหลือสามารถถูกตัดได้อย่างลงตัวในแบบแผนการตัดอันถัดมา

ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นการหาแบบแผนการตัดที่ดีที่ใช้ได้กับโจทย์ความต้องการทั่วไป (Haessler and Sweeney 1991)

1. คำนวณหา descriptors ของรายการความต้องการที่คงเหลือ ค่า descriptors ที่มักนำมาใช้ได้แก่ จำนวนวัสดุคงคลังที่เหลือ จำนวนท่อนความยาวโดยเฉลี่ยที่ถูกตัดออกด้วยแบบแผนการตัด

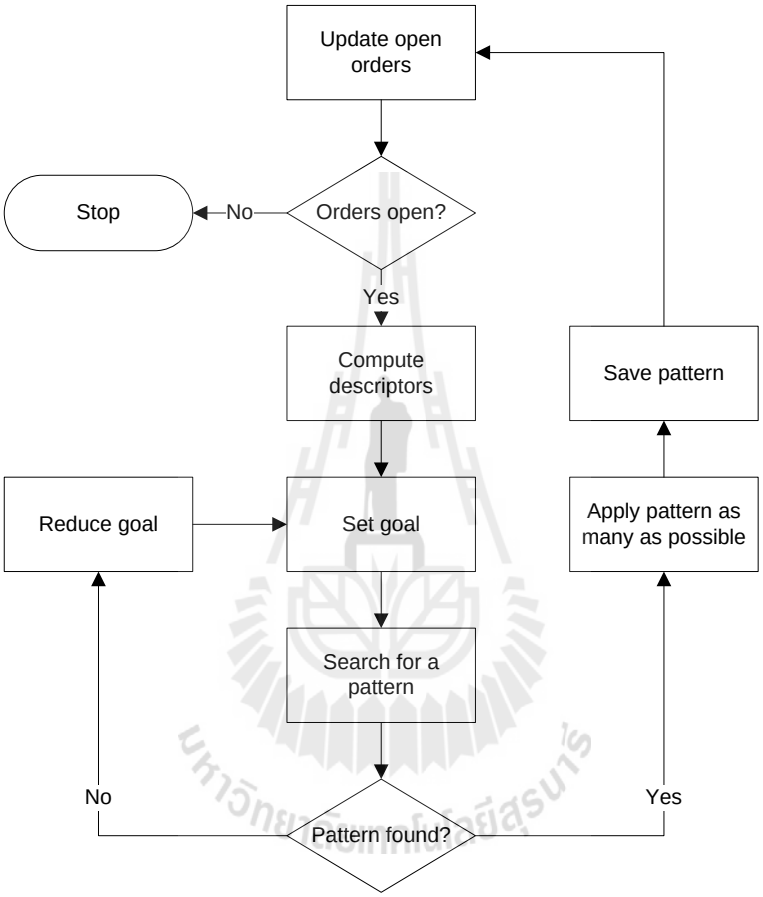
2. ตั้งเป้าหมายสำหรับแบบแผนการตัดอันถัดไป เป้าหมายที่มักนำมาใช้ได้แก่ ปริมาณเศษการตัด จำนวนครั้งของการตัดซ้ำ จำนวนท่อนความยาวที่ถูกตัดออกด้วยแบบแผน

3. ค้นหาแบบแผนการตัดที่สอดคล้องกับเป้าหมายที่ตั้งไว้

4. เมื่อพบแบบแผนการตัดที่ดีแล้วจึงนำมาเพิ่มไว้ในคำตอบ และทำการตัดแบบแผนนี้ซ้ำๆให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

5. ปรับปรุงรายการความต้องการที่คงเหลือ และทำซ้ำขั้นตอนที่ 1

6. หากไม่พบแบบแผนที่ดี ให้ปรับเปลี่ยนเป้าหมายลง แล้วทำซ้ำขั้นตอนที่ 3



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนของ SHP (ปรับปรุงจาก Vahrenkamp (1996))

เป้าหมายที่เป็นจำนวนครั้งของการตัดซ้ำ (pattern usage) จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตบนของจำนวนท่อนความยาวที่ถูกตัดออกด้วยแบบแผน (number of the ordered length in the pattern) ตัวอย่างเช่น ถ้าให้ท่อนความยาวขนาดหนึ่งมีความต้องการใช้คงเหลือจำนวน 10 ท่อน และกำหนดเป้าหมาย pattern usage ไว้ที่ 4 ครั้ง แสดงว่า number of the ordered length in the pattern จะไม่เกิน 2 หากเป้าหมายที่กำหนดไว้นี้ไม่สามารถหาแบบแผนการตัดได้ จึงต้องปรับลดเป้าหมายลง ในกรณีนี้สมมุติให้ pattern usage ลดลงเหลือ 3 ครั้ง จะทำให้ number of the ordered length in the pattern เปลี่ยนเป็นไม่เกิน 3 ลักษณะการจบของ SHP อาจจะเป็นการเลือกแบบแผนการตัดอันหนึ่งที่ให้เศษน้อยที่จำนวน pattern usage เท่ากับ 1

ข้อดีของ SHP คือสามารถพิจารณาปัจจัยอื่นๆร่วมกัน แทนที่จะพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หรือเศษการตัดทั้งหมด เช่น สามารถพิจารณาปัจจัยจำนวนของแบบแผนที่ใช้ทั้งหมดและควบคุมให้อยู่ในจำนวนต่ำได้ ซึ่งทำให้ได้ลักษณะการ optimization แบบ multi-objective และ SHP ยังมีข้อดีที่ไม่ต้องยุ่งยากกับการปัดคำตอบตัวเลขทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็ม ข้อด้อยของ SHP คืออาจให้คำตอบที่มีเศษการตัดมากๆในช่วงท้ายๆของรอบการค้นหาคำตอบ เช่น เหลือท่อนความยาวขนาด 34 cm. ที่ต้องตัดจากวัสดุคงคลังขนาดยาว 100 cm.

2.4.5 Random Search for efficient pattern

Vahrenkamp (1996) ได้สร้าง algorithm เพื่อใช้ค้นหาแบบแผนการตัดที่ดีด้วยการสุ่ม โดยผู้ใช้กำหนดขอบเขตของเศษการตัดที่ยอมรับได้ขึ้น (acceptable trim of a pattern: Tw) แล้วจึงให้ algorithm สุ่มหาแบบแผนการตัดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขให้

Random Search algorithm for pattern มีขั้นตอนดังแสดงในรูปแผนภาพข้างล่างนี้

โดยที่ให้ Tw คือ เศษการตัดที่ยอมรับได้จากแบบแผนการตัด

Tc คือ เศษการตัดปัจจุบันจากแบบแผนปัจจุบัน

Ac คือ แบบแผนการตัดปัจจุบันที่ได้จากการสุ่ม

Lc คือ ความยาวปัจจุบันของวัสดุ

LS คือ ความยาวของวัสดุคงคลัง

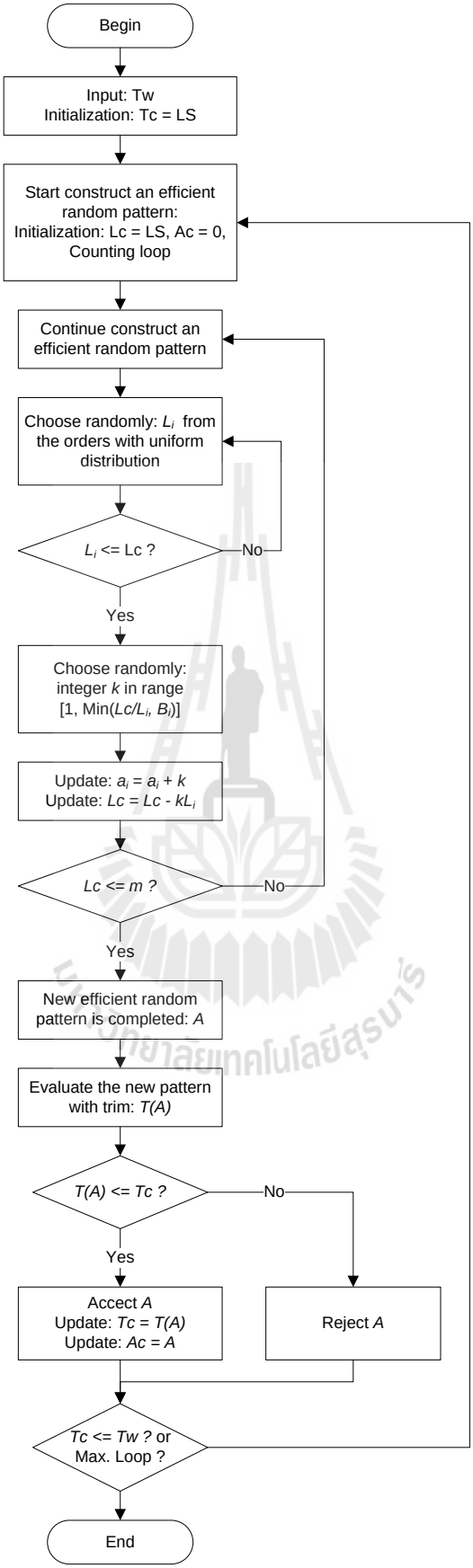
L_i คือ ขนาดความยาวที่ต้องการ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n

B_i คือ จำนวนท่อนของความยาว L_i ที่ต้องการ

A คือ แบบแผนการตัดที่กำลังสร้างที่ได้จากการสุ่ม

a_i คือ จำนวนท่อนของการตัดท่อนความยาว L_i ของแบบแผนการตัด A

$T(A)$ คือ เศษการตัดของแบบแผนการตัด A



รูปที่ 2.3 Flowchart ของ Random Search algorithm

(Vahrenkamp 1996) ได้ทำการทดสอบ algorithm นี้ได้ผลว่า Random search algorithm สามารถค้นหาแบบแผนการตัดที่ดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเมื่อได้แบบแผนการตัดที่ดีแบบต่างๆแล้ว ก็จะนำแบบแผนที่ได้เหล่านี้ไปทำการตัดซ้ำๆเพื่อให้ครบจำนวนท่อนที่ต้องการ โดยได้ใช้ SHP ในการหาคำตอบ และได้ใช้ descriptors ดังนี้

- ค่าประมาณจำนวนวัสดุคงคลังที่ต้องการใช้ทั้งหมด (EN)

- ร้อยละของเศษการตัดที่ยอมรับได้ (TL)

- จำนวนการตัดซ้ำสูงสุด (UN)

โดยค่า descriptors เหล่านี้จะนำไปใช้ในการกำหนดเป้าหมาย (goal) โดยอาจเปลี่ยนแปลงค่าเป้าหมายไปตามรอบของการหาแบบแผนการตัดอันใหม่ เมื่อเริ่มต้นการหาคำตอบ SHP จะเริ่มด้วยการกำหนดค่า UN ไว้ที่ค่าสูงๆ เพื่อให้แบบแผนแรกที่นำมาใช้ตัดซ้ำให้มากที่สุด และตอบสนองต่อรายการความต้องการที่มีให้ได้มากที่สุด และทำการลดค่า UN ที่ตั้งเป้าหมายลงเรื่อยๆเมื่อดำเนินการกับแบบแผนถัดๆไป ตรงข้ามกับ TL ที่ควรเริ่มจากการกำหนดค่าที่น้อยๆและค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อดำเนินการกับแบบแผนถัดๆไป

2.4.6 Genetic Algorithm

Salem et al. (2007) ได้เสนอโมเดลปัญหา CSP ที่มุ่งเน้นที่การตัดเหล็กเส้นในงานก่อสร้าง โดยใช้แนวทางการหาคำตอบแบบ pattern-oriented คือการสร้างแบบแผนการตัดที่ดีก่อนแล้วจึงหาจำนวนครั้งการตัดแบบแผนเหล่านี้ซ้ำ โดยได้ใช้ Genetic Algorithm ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด

การเข้ารหัสของโมเดลปัญหา CSP ด้วย GA ที่เสนอโดย Salem et al. (2007) ให้แต่ละโครโมโซมแสดงแทนคำตอบที่เป็นไปได้ 1 คำตอบ ซึ่งประกอบด้วยคู่ของค่าตัวเลข เลขที่แบบแผนการตัดที่เลือกและจำนวนการตัดซ้ำ ดังนั้นโครโมโซมจึงมีลักษณะเป็นสายคู่ของยีน แต่ละยีนประกอบด้วยค่าตัวเลข 2 ตัว ที่เป็นเลขที่แบบแผนการตัดที่เลือกและจำนวนการตัดซ้ำ

10	2	12	9	26	11	59	29	58	16	67	11

รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแสดงแทนคำตอบที่เป็นไปได้ (Salem et al. 2007)

จากรูปโครโมโซมตัวอย่าง หมายถึงคำตอบที่เลือกใช้แบบแผนการตัดเลขที่ 10 ทำการตัดซ้ำจำนวน 2 ครั้ง, แบบแผนการตัดเลขที่ 12 ทำการตัดซ้ำจำนวน 9 ครั้ง, แบบแผนการตัดเลขที่ 26 ทำการตัดซ้ำจำนวน 11 ครั้ง, ... (ตามลำดับ) โครโมโซมตัวอย่างนี้จะเลือกใช้แบบแผนการตัดต่างๆกันจำนวน 6 แบบแผน ซึ่ง Salem et al. (2007) ได้เสนอว่าจำนวนแบบแผนการตัดต่างกันที่เหมาะสมในคำตอบควรเท่ากับจำนวนขนาดท่อนความยาวที่ต่างกันที่ต้องการ

การสร้างแบบแผนการตัดที่เป็นไปได้ (efficient feasible cutting patterns) สำหรับไว้คัดเลือกใช้เป็นคำตอบ ได้ใช้วิธีที่ปรับปรุงจากวิธีที่เสนอโดย Pierce (1964) ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อก่อนหน้า แบบแผนการตัดที่สร้างได้ถูกนำมากำหนดเลขที่ประจำตัว

ส่วนจำนวนการตัดซ้ำ ได้มีการคำนวณหาจำนวนการตัดซ้ำสูงสุด (the maximum repetition of each generated pattern) ซึ่งถูกกำหนดขอบเขตด้วยจำนวนท่อนที่ต้องการ (B_i) ของขนาดท่อนความยาว (L_i) ใดๆ ตัวอย่างเช่น แบบแผนการตัดหนึ่งแสดงในตารางจะมี maximum repetition ของแบบแผนการตัดนี้ได้เท่ากับ 9 จำนวนท่อนความยาวที่ตัดเกินความต้องการจะถูกพิจารณาว่าเป็นเศษการตัด

ขนาดท่อนความยาว (L_i)	1	2	3	4	5
จำนวนท่อนที่ต้องการ (B_i)	20	14	12	17	25
แบบแผนการตัดที่ j (A_j)	3	0	2	2	0
จำนวนการตัดซ้ำสูงสุด (max. repetition)	7	0	6	9	0

รูปที่ 2.5 การคำนวณกำหนดจำนวนการตัดซ้ำสูงสุด

นอกจากนี้พวกเขาได้กำหนดใช้ค่าพารามิเตอร์ของ GA ได้แก่ ค่า population size = 2.5 เท่าของความยาวของโครโมโซม ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของโมเดลกำหนดให้เป็นดังนี้

Fitness function: Minimize (sum of the demanded lengths) / [(sum of stock lengths used) + (sum of uncut demanded lengths)]

ซึ่งเขียนสมการด้วยสัญลักษณ์ตัวแปรได้เป็น

$$\text{Minimize}\left(\sum_i^n (L_i \cdot B_i) \Big/ \sum_j^m (X_j \cdot LS) + w \cdot \sum_i^n \left(L_i \cdot \left[\sum_i \left[B_i - \sum_j (X_{ij})\right]\right]\right)\right)$$

ปฏิบัติการวิวัฒนาการของโครโมโซม ได้นำกลยุทธ์ Elitism ซึ่งเป็นการเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดจำนวนตามที่กำหนด เพื่อส่งต่อไปยังรุ่นถัดไป (next generation) โดยไม่ผ่านปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงโครโมโซม และใช้วิธีการ linear normalization ค่า fitness value ของโครโมโซมที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นการใช้ค่าลำดับ (จากการจัดเรียงโครโมโซมที่มีค่า fitness ดีที่สุดไปหาแย่ที่สุด) ในการคัดเลือกโครโมโซมพ่อแม่ แทนการใช้ค่า fitness ที่คำนวณได้โดยตรง ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้เพิ่มโอกาสการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดที่มีค่าแตกต่างกันน้อยๆได้ จึงช่วยเพิ่มความเร็วในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (faster convergence)

ปฏิบัติการ crossover ที่ใช้เป็นแบบ two-points crossover ซึ่งเป็นการสร้างโครโมโซมรุ่นลูก 2 โครโมโซม จากรุ่นพ่อแม่จำนวน 2 โครโมโซม โดยการเลือกตำแหน่งยีน 2 ตำแหน่งในสายโครโมโซมพ่อแม่ แล้วจึงทำการสลับยีนระหว่างกัน ได้เป็นโครโมโซมลูกใหม่จำนวน 2 โครโมโซม ส่วนปฏิบัติการ mutation ที่ใช้เป็นการเปลี่ยนค่าตัวเลขของยีนของโครโมโซมลูกแบบสุ่ม ด้วยอัตราการกลายพันธุ์ (mutation rate) น้อยๆ

2.4.7 Evolutionary Programming (EP)

Liang et al. (2002) ได้สร้างโมเดลปัญหา CSP ที่ใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Evolutionary Programming (EP) โดยได้แบ่งเป็น CSP ที่ไม่พิจารณาและที่พิจารณาประเด็น contiguity ซึ่งพวกเขาชี้ว่า contiguity เป็นประเด็นที่สำคัญอันหนึ่งที่พบในการปฏิบัติงานจริง โดยเฉพาะเมื่อโมเดลปัญหามีขนาดใหญ่ เมื่อขนาดท่อนความยาวขนาดหนึ่ง (L_i) ที่ได้เริ่มทำการตัดไปแล้วแต่ยังไม่ครบจำนวน (partially finished items) อาจจะต้องใช้พื้นที่จำนวนหนึ่งในการกองเก็บ เพื่อรอจนกว่าจะตัดได้ครบจำนวนที่ต้องการ

1. CSP without contiguity

โมเดลนี้จะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สองฟังก์ชันร่วมกันคือ การเกิดเศษการตัดที่น้อยที่สุด และการมีจำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่น้อยที่สุดที่เกิดเศษขึ้น ดังนี้

Minimize $\sum_j f(T_j, V_j)$

โดยที่ $V_j = \begin{cases} 1; if\ T_j > 0 \\ 0; otherwise \end{cases}$

$f(T_j, V_j)$ เป็นฟังก์ชันของ T_j และ V_j

T_j คือ เศษการตัดของวัสดุคงคลังเส้นที่ j

V_j คือ สถานะแสดงว่าวัสดุคงคลังเส้นที่ j มีเศษการตัด

2. CSP with contiguity

โมเดลปัญหา CSP with contiguity จะมีความยากลำบากในการหาคำตอบมากกว่าโมเดลที่ไม่พิจารณา contiguity หากทำการหาคำตอบแบบ heuristic approach จะต้องทำการหาแบบแผนการตัดวัสดุคงคลังก่อน (cutting patterns) แล้วจึงทำการเรียงลำดับแบบแผนเหล่านี้ให้มี contiguity มากที่สุด โมเดลนี้จะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สองฟังก์ชันร่วมกันคือ การเกิดเศษการตัดที่น้อยที่สุด และการมี contiguity มากที่สุด ดังนี้

Minimize $\sum_j f(T_j, O_j)$

โดยที่ $O_j = \sum_i o_i$

$$o_i = \begin{cases} 0; if \ \sum_j X_{ij} = 0 \ \vee \ \sum_j X_{ij} = \ B_i \\ 1; otherwise \end{cases}$$

$f(T_j, O_j)$ เป็นฟังก์ชันของ T_j และ O_j

O_j คือ จำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน

o_i คือ สถานะแสดงการอยู่ในระหว่างตัดหรือไม่ (open status) ของขนาดท่อนความยาวขนาดหนึ่ง (L_i) ถ้าหากว่า L_i หนึ่งยังไม่ได้เริ่มถูกตัดจะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0 หากกำลังอยู่ในระหว่างการตัดแต่ยังไม่ครบจำนวนจะมีสถานะเป็นเปิดหรือมีค่าเท่ากับ 1 แล้วหากได้ทำการตัดจนครบจำนวนความต้องการทั้งหมดแล้ว (B_i) จะมีสถานะเป็นปิดหรือมีค่าเท่ากับ 0

การเข้ารหัสของโมเดลปัญหา CSP ด้วย EP

ใช้วิธีการเข้ารหัสแบบ order-based representation โดยที่แต่ละโครโมโซมจะแสดงแทนลำดับของรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด (all items) โดยจะนำลำดับของขนาดท่อนความยาวนี้มาทำการคำนวณหาปริมาณเศษการตัด ตัวอย่างเช่น มีรายการความต้องการเป็น ขนาด 3 เมตรจำนวน 2 ท่อน, ขนาด 4 เมตรจำนวน 3 ท่อน, ขนาด 5 เมตรจำนวน 1 ท่อน และขนาด 6 เมตรจำนวน 3 ท่อน โครโมโซมอันหนึ่งเป็นลำดับของขนาดท่อนความยาวเหล่านี้ แสดงดังในรูป

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการเข้ารหัสโครโมโซมแบบ order-based representation และการคำนวณหาปริมาณเศษการตัด

หากกำหนดให้วัสดุคงคลังมีความยาวเดียวคือ 12 เมตร จะทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณเศษตามลำดับท่อนความยาวที่กำหนด ดังรูปข้างบน

Hinterding et al. (1994) ได้พิจารณาเห็นว่าปฏิบัติการ Crossover Operation ของโครโมโซม order-based GA เป็นการทำให้คำตอบที่ดีแล้วถูกทำลายลงได้ โดยไม่สามารถนำคำตอบที่ดีอยู่แล้วไปพัฒนาต่อในรุ่นถัดๆไปเพื่อให้ได้คำตอบที่ดีขึ้น EP จึงเป็น algorithm ในการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากกว่า GA และ EP ยังเป็น algorithm ที่เรียบง่ายกว่าและใช้เวลาน้อยกว่า GA จุดสำคัญของ EP คือใช้ปฏิบัติการ Mutation Operation เท่านั้น (ไม่ใช้ปฏิบัติการ Crossover Operation) และใช้โครโมโซมที่มีการเข้ารหัสแบบ order-based representation ซึ่งให้ผลคำตอบที่ดีกว่า group-based GA (Liang et al. 2002)

2.5 Extended CSP Model

โมเดลปัญหา CSP อยู่ในความสนใจของนักวิจัยและมีการศึกษากันต่อเนื่องมาอย่างยาวนาน ทำให้เกิดเป็นส่วนขยายของโมเดลปัญหา CSP เพื่อจัดการกับประเด็นอื่นๆที่สำคัญในรายละเอียด เช่น ประเด็นการมีวัสดุคงคลังหลายขนาด ความต้องการจัดลำดับของแบบแผนการตัด รายการความต้องการที่มีการกำหนดวันส่งมอบ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปในหัวข้อนี้

2.5.1 Item-oriented SHP

ได้สร้างวิธีการหาคำตอบสำหรับโมเดลปัญหา 2 ประเภทคือ 1/V/D/M หรือ 1/B/D/M (ตามการจำแนกประเภทปัญหาของ Dyckhoff (1990);(Gradisar, Jesenko, and Resinovic 1997) โดย 1 หมายถึงปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้น 1 มิติ, V หมายถึงปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่มีจำนวนไม่จำกัดเพื่อให้ได้ตามจำนวนขนาดท่อนเล็กที่ต้องการทั้งหมด, D หมายถึงปัญหาการตัดที่มีวัสดุคงคลังขนาดไม่เท่ากัน, M หมายถึงปัญหาการตัดที่มีความต้องการวัสดุท่อนเล็กขนาดต่างๆกันจำนวนมาก ส่วนโมเดลปัญหาอีกประเภทที่ใช้สัญลักษณ์ B หมายถึงปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่มีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอสำหรับการตัดตามจำนวนขนาดท่อนเล็กที่ต้องการได้ทั้งหมด

Dyckhoff (1990) ยังได้จำแนกประเภทวิธีการหาคำตอบออกเป็นสองกลุ่มหลักคือ วิธี item-oriented และวิธี pattern-oriented โดยที่วิธี item-oriented จะพิจารณาวัสดุคงคลังแต่ละเส้นที่นำมาตัดและทำการตัดแบบเฉพาะเส้นต่อเส้น ในขณะที่วิธี pattern-oriented จะแบ่งขั้นตอนการหาคำตอบเป็นสองระยะคือ เริ่มจากการหาแบบแผนการตัดก่อน (cutting patterns) จากนั้นจึงนำแบบแผนการตัดเหล่านี้มาหาจำนวนครั้งของการตัดซ้ำให้ได้จำนวนตามที่ต้องการ ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ได้มุ่งไปที่วิธี pattern-oriented โดยมีการสร้าง algorithm แบบต่างๆในการหาแบบแผนการตัดที่ดี เช่น งานวิจัยที่ถูกอ้างอิงอย่างกว้างขวางของ (Gilmore and Gomory 1961; Gilmore and Gomory 1963) อย่างไรก็ตามวิธีการหาคำตอบในกลุ่มนี้มักจะได้ผลดีเมื่อวัสดุคงคลังมีขนาดเท่ากันหรือมีขนาดมาตรฐานกำหนดไว้ หากปัญหาเป็นประเภท 1/V/D/M หรือ 1/B/D/M จะทำให้การหาคำตอบด้วยวิธี item-oriented ได้ผลที่ดีกว่า ดังนั้น (Gradisar, Jesenko, and Resinovic 1997; Gradisar et al. 1999) จึงได้เสนอวิธีการหาคำตอบแบบ item-oriented ที่ใช้หลักการ Sequential Heuristic Procedure (SHP)

รายละเอียดของการสร้างโมเดลปัญหามีดังนี้ กำหนดให้วัสดุคงคลังมีขนาดความยาวต่างๆกันทั้งหมดและเป็นเลขแบบจำนวนเต็ม แบ่งเป็น 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 จำนวนวัสดุคงคลังมีอยู่อย่างเพียงพอสำหรับรายการความต้องการทั้งหมด

Decision variable: X_{ij}

Objective function: $Minimize\ \sum_j(t_j)$

$$t_j = \begin{cases} \delta_j; if\ Z_j = 1\ \wedge\ \delta_j \leq UB \\ 0; otherwise \end{cases}$$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\left(\sum_j(X_{ij})\right)_i \geq B_i$ สำหรับ *i* ตั้งแต่ 1 ถึง *n*

2. ข้อจำกัดด้านความยาวของวัสดุคงคลัง: $\sum_i(L_i X_{ij}) + \delta_j \leq LS_j$

3. ข้อจำกัดด้านวัสดุที่เหลือจากการตัดและเก็บไว้ใช้ต่อ (residual lengths): $\sum_j(u_j) \leq 1$

4. ข้อจำกัดด้านจำนวนท่อนความยาวที่ต่างกันที่ตัดจากวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น: $\sum_i(w_{ij}) \leq W$ สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง m

5. ข้อจำกัดจำนวนบวก

และยังมีตัวแปรที่บ่งชี้สถานะอีกดังนี้

1. ตัวแปรแสดงว่าวัสดุคงคลังที่ j ใดๆได้ถูกนำมาตัด: $Z_j = \begin{cases} 0; if\ X_{ij} = 0 \\ 1; otherwise \end{cases}$

2. ตัวแปรแสดงว่าท่อนความยาว L_i ถูกตัดจากวัสดุคงคลังที่ j: $w_j = \begin{cases} 0; if\ X_{ij} = 0 \\ 1; otherwise \end{cases}$

3. ตัวแปรแสดงว่าวัสดุคงคลังที่เหลือจากการตัดที่ j ยาวกว่าท่อนความยาวที่ยาวที่สุด: $u_j = \begin{cases} 1; if\ Z_j = 1\ \wedge\ \delta_j > \max(L_i) \\ 0; otherwise \end{cases}$

กรณีที่ 2 จำนวนวัสดุคงคลังที่มีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอสำหรับการตัดตามจำนวนขนาดท่อนเล็กที่ต้องการได้ทั้งหมด แบ่งเป็นกรณีย่อยได้อีก ตามการกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัด

กรณีที่ 2.1 เมื่อการกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัดไม่สำคัญ สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นการหาผลรวมความยาวของท่อนความยาวที่ไม่ได้ตัดที่น้อยที่สุด

Decision variable: X_{ij}

Objective function: $Minimize\ \left(\sum_i\left[B_i - \sum_j(X_{ij})\right]\right) \cdot L_i$

Subject to: เหมือนกับของกรณีที่ 1 ยกเว้นข้อจำกัดที่ 1

กรณีที่ 2.2 เมื่อการกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัดมีความสำคัญ มีเป้าหมายให้การกระจายของท่อนความยาวที่ต้องการที่ไม่ได้ถูกตัดเป็นแบบสม่ำเสมอ สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็น

Decision variable: X_{ij}

Objective function: $Minimize\ \left(\sum_i \left[B_i - \sum_j (X_{ij})\right]\right)$

และ $Minimize\ \sum_j (\delta_j); if\ \delta_j < \max(L_i)$

Subject to: เหมือนกับของกรณีที่ 1 ยกเว้นข้อจำกัดที่ 1

วิธีการหาคำตอบด้วยหลักการ SHP

Algorithm ที่ใช้ในการหาคำตอบจะต้องทำขั้นตอนพื้นฐานต่อไปนี้วนรอบซ้ำ เป็นจำนวนรอบเท่ากับจำนวนวัสดุคงคลังที่มีอยู่ หรือจนกว่ารายการความต้องการจะถูกตัดครบถ้วน

1. เลือกขนาดท่อนความยาวที่ต้องการที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน

2. เลือกวัสดุคงคลังเส้นที่เหลืออยู่ และทำการตัดท่อนความยาวตามขนาดที่เลือกในข้อที่ 1

คำถามที่สำคัญของ algorithm นี้คือ จะเลือกขนาดท่อนความยาวในข้อที่ 1 และจะเลือกวัสดุคงคลังเส้นที่เหลืออยู่ในข้อที่ 2 อย่างไรจึงจะทำให้ได้คำตอบของปัญหาที่ดี? ซึ่ง (Gradisar et al. 1999) ได้สร้างนโยบายในการเลือกดังนี้

1. ควรรักษาความหลากหลายของขนาดความยาวที่ต้องการที่ยังไม่ได้ตัดไว้ จนกระทั่งจบการค้นหาคำตอบ

2. ควรรักษาความแตกต่างระหว่างความยาวเฉลี่ยของวัสดุคงคลังที่เหลือกับของท่อนความยาวที่ต้องการที่ยังไม่ได้ตัด

3. ควรรักษาจำนวนท่อนความยาวที่ต้องการที่ยังไม่ได้ตัดให้มากที่สุด

4. ควรรักษาความแตกต่างระหว่างความยาวของวัสดุคงคลังที่เหลือที่ยาวที่สุดกับที่สั้นที่สุด

5. ควรรักษาความแตกต่างระหว่างความยาวของท่อนความยาวที่ต้องการที่ยังไม่ได้ตัดที่ยาวที่สุดกับที่สั้นที่สุด

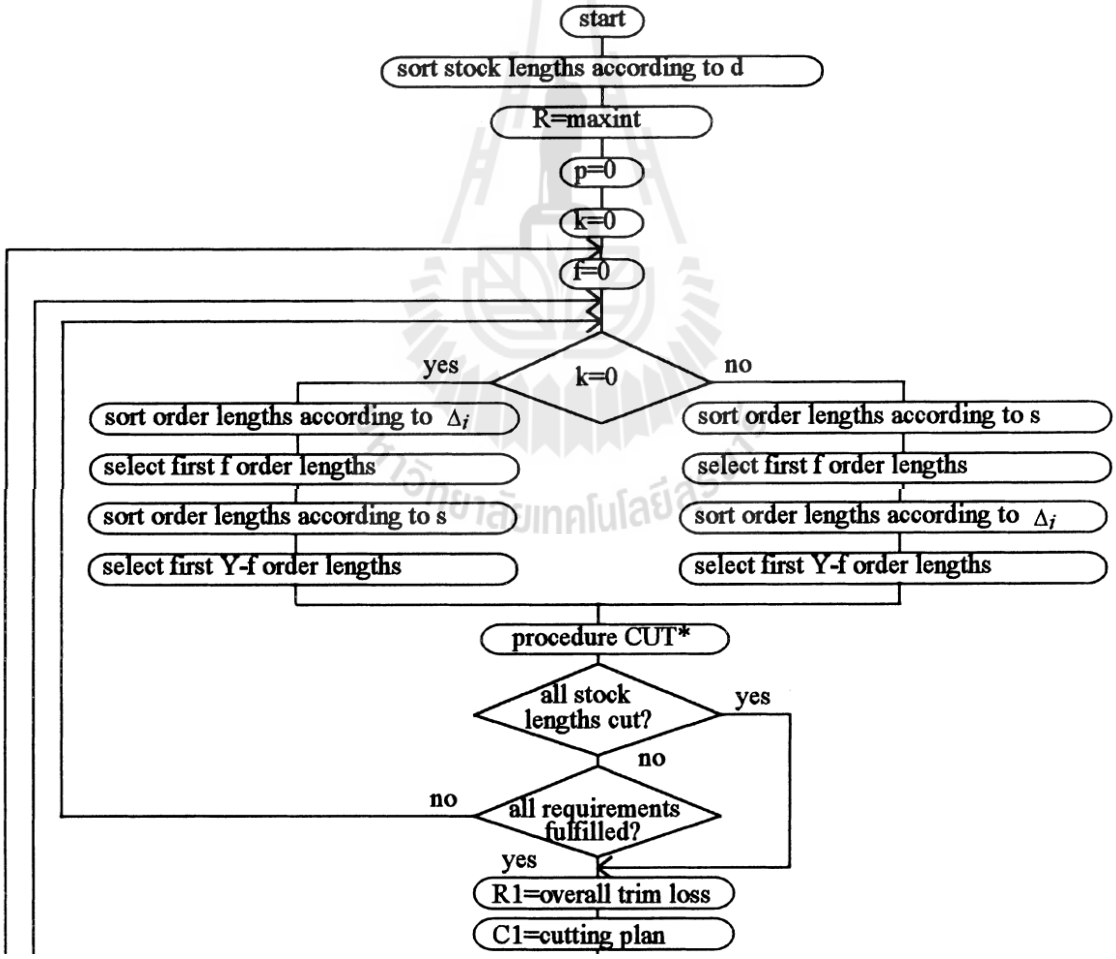
สำหรับกรณีที่ 1 จำนวนวัสดุคงคลังมีอยู่อย่างเพียงพอสำหรับรายการความต้องการทั้งหมด

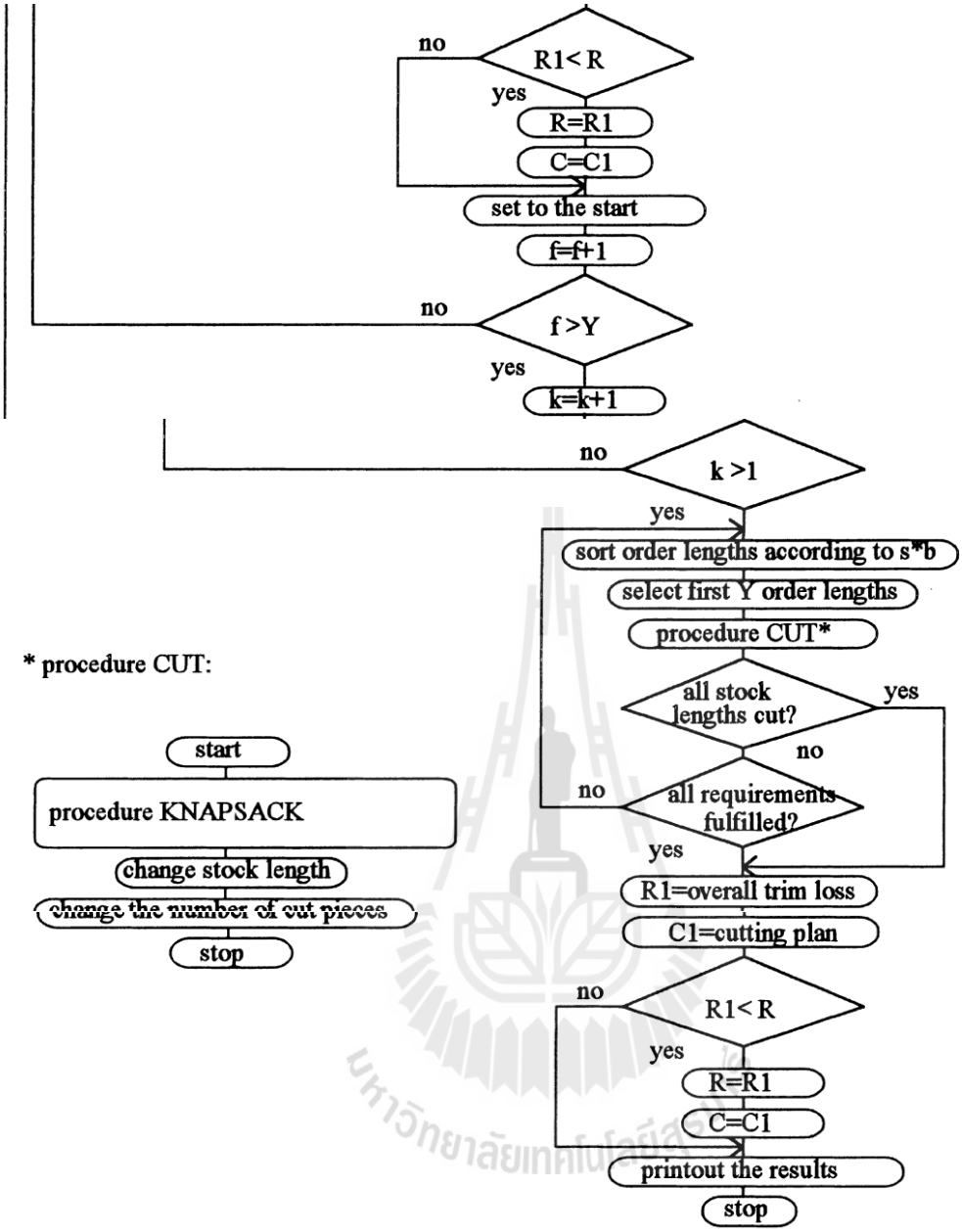
1.ขั้นตอนการเลือกท่อนความยาว พิจารณาจากนโยบายในการเลือกจะได้ว่า ให้เลือกท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนที่มีจำนวนท่อนความต้องการที่ยังไม่ได้ตัดเหลืออยู่มากที่สุด (the greatest number of uncut pieces) การเลือกเช่นนี้จะทำให้ความหลากหลายของขนาดท่อนความ

ยาวที่เหลืออยู่ ยังคงอยู่จนกระทั่งจบการหาคำตอบ จะทำการเลือกท่อนความยาวตามลำดับนี้ส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะเลือกท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนตามลำดับความยาวที่ยาวที่สุด

2. ขั้นตอนการเลือกวัสดุคงคลัง พิจารณาจากนโยบายในการเลือกจะได้ว่า ให้ทำการคำนวณหาเศษตัดของวัสดุคงคลังเส้นที่เหลืออยู่แต่ละเส้น หากนำมาตัดท่อนความยาวที่เลือกไว้ในข้อที่ 1 แล้วทำการเลือกวัสดุคงคลังเส้นที่ทำให้เกิดเศษตัดน้อยที่สุด หากมีวัสดุคงคลังที่เกิดเศษน้อยที่สุดเท่ากันหลายเส้น ให้เลือกเส้นที่สั้นที่สุด ซึ่งจะทำให้วัสดุคงคลังเส้นที่ยาวกว่าถูกนำไปใช้ในช่วงท้ายของการหาคำตอบ และเป็นไปตามนโยบายที่กำหนด

สำหรับกรณีที่ 2 จำนวนวัสดุคงคลังที่มีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอสำหรับการตัดตามจำนวนขนาดท่อนเล็กที่ต้องการได้ทั้งหมด ซึ่งเป็นกรณีปัญหาที่ยุ่งยากกว่ากรณีแรก algorithm ที่ใช้มีขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน เช่นเดียวกับปัญหาในกรณีที่ 1 คือการเลือกท่อนความยาวและการเลือกวัสดุคงคลัง มีลำดับดังแสดงในแผนภาพข้างล่างนี้





รูปที่ 2.7 algorithm สำหรับการตัดวัสดุในกรณีต่างๆ (Gradisar et al. 1999)

Subprocedure KNAPSACK ใน procedure CUT เป็นขั้นตอนในการตัดวัสดุคงคลังเส้นที่เลือกตามท่อนความยาวที่เลือกไว้ มีรายละเอียดดังนี้ ในกรณีที่กำหนดให้ข้อจำกัดด้านจำนวนท่อนความยาวที่ต่างกันที่ตัดจากวัสดุคงคลังหนึ่งเส้นเท่ากับ W ดังนั้นการพิจารณาคัดเลือกท่อนความยาวที่นำมาตัดในแต่ละรอบจะเป็น L_1, L_2, L_3, ... L_w

Subprocedure KNAPSACK

Initialize T_{min} = big integer

For j=1 To m

$L_c = LS_j$

For i=1 To W

$X_{ij} = \min[B_i, \text{int}(L_c/L_i)]$

$L_c = L_c - L_i \cdot X_{ij}$

Next i

If $L_c < T_{min}$ then

$T_{min} = L_c$

End If

Next j

2.5.2 Contiguity

ความต่อเนื่องของการตัดท่อนความยาว (Contiguity) ในบางกรณีอาจเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องพิจารณา การตัดท่อนความยาว (L_i) ขนาดหนึ่งให้ได้จำนวนครบตามที่ต้องการอย่างต่อเนื่องโดยไม่ขัดจังหวะไปตัดขนาดอื่นๆ สลับไปมา อาจเป็นประเด็นที่ทำให้ช่วยลดต้นทุนหรือสะดวกในการปฏิบัติงานจริง เช่น ลดจำนวนครั้งของการตั้งค่าระยะตัด (knife-setting changes) ทำให้มีความต่อเนื่องของคุณภาพวัสดุ ลดการจัดเก็บชิ้นงานที่ตัดแล้วแต่ยังได้จำนวนไม่ครบตามต้องการ (หากท่อนความยาวขนาดหนึ่งต้องจัดเก็บรวมกัน) (the storage of partly-finished order lengths or unready-for-packaging product stacks) เพื่อจัดการกับประเด็นปัญหานี้ ท่อนความยาวขนาดหนึ่งควรถูกตัดออกมาอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งได้จำนวนครบตามต้องการในคราวเดียวหรืออยู่ในแบบแผนการตัดที่ใกล้กันมากที่สุด ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการจัดเรียงลำดับการตัดของแบบแผนการตัดที่หาได้ (contiguous sequencing of patterns) การจัดการกับ contiguity requirements นี้สามารถทำได้โดยการใช้ตัวชี้วัดค่า contiguity และนำไปรวมอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์หรือฟังก์ชันข้อจำกัด ซึ่งตัวชี้วัดค่า contiguity ได้แก่ ค่าจำนวนสูงสุดที่ยอมให้ของขนาดท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวนในชั่วขณะใดๆ (maximum number of partly-finished order lengths at any instant of a production run) หากค่าชี้วัดดังกล่าวมีค่าน้อยแสดงว่าลำดับการตัดมีความต่อเนื่อง (contiguous) มากขึ้น ลักษณะค่าชี้วัดนี้จะเป็นฟังก์ชันแบบ non-linear ซึ่งอาจทำให้วิธีการหาคำตอบแบบ LP ไม่สามารถทำได้ จึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Heuristic algorithms ได้แก่ GAs (Hinterding et al. 1994)

การเข้ารหัสของโมเดลปัญหา CSP ด้วย GAs มีแนวทางอยู่ 2 แนวดังนี้คือ Group-based GA และ Order-based GA โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. Group-based GA ใช้วิธีการเข้ารหัสโครโมโซมที่แต่ละโครโมโซมจะแสดงแทนกลุ่มทั้งหมดของขนาดท่อนความยาวที่จัดแบ่งไว้สำหรับการตัด แต่ละยีนจะแทนกลุ่มของขนาดท่อนความยาวหนึ่งกลุ่ม แทนที่จะเป็นเพียงแค่หนึ่งขนาดท่อนความยาว แต่ละยีนหรือกลุ่มนี้จะถูกจัดไว้สำหรับใช้ตัดวัสดุคงคลังหนึ่งเส้น รูปภาพข้างล่างแสดงตัวอย่างการเข้ารหัสแบบ Group-based GA การเข้ารหัสแบบนี้จะมีจำนวนของยีนในหนึ่งโครโมโซมไม่แน่นอน ลำดับของขนาดท่อนความยาวภายในยีนจะไม่มีความสำคัญ และลำดับของยีนในโครโมโซมอาจจะมีหรือไม่มีความสำคัญ (ขึ้นอยู่กับจำนวนขนาดต่างๆกันของวัสดุคงคลัง) สำหรับปัญหา CSP with contiguity ลำดับของยีนในโครโมโซมจะมีความสำคัญ ดังนั้นปฏิบัติการ crossover และ mutation จะต้องสามารถคำนึงถึงความสำคัญของลำดับของยีนในโครโมโซมด้วย

Genotype: a single chromosome

Stock lengths: 12, 13, 15

10	6,5,2	15	6,5	7,6	10,5

Phenotype: a single solution

Items	10	6,5,2	15	6,5	7,6	10,5
To be cut from stock length	12	13	15	12	13	15

รูปที่ 2.8 การเข้ารหัสและความหมายของ Group-based GA

2. Order-based GA ใช้วิธีการเข้ารหัสโครโมโซมที่แต่ละโครโมโซมจะแสดงแทนลำดับของรายการขนาดท่อนความยาวที่ต้องการตัดทั้งหมด (all items) โดยจะนำลำดับของขนาดท่อนความยาวนี้มาทำการถอดรหัส ด้วย Heuristic algorithm ที่เหมาะสม เช่น First Fit Algorithm ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาจำนวนวัสดุคงคลังที่ต้องใช้และปริมาณเศษตัดทั้งหมดที่เกิดขึ้น

ปฏิบัติการของ GA ได้แก่ Crossover และ Mutation Operations มีรายละเอียดดังนี้

1. Crossover Operations จะใช้การสุ่มเลือกจุดแทรก (insertion point) และส่วนแทรก (segment) ของโครโมโซมพ่อและแม่ ในการสร้างโครโมโซมรุ่นลูกอันใหม่

2. Mutation Operations มีได้หลายวิธี เช่น การลบยีนเดิมและสร้างยีนใหม่ (group mutation) การย้ายยีนไปแทรกที่ตำแหน่งใหม่ (remove and reinsert mutation) และการสลับตำแหน่งของยีน (swap mutation)

ฟังก์ชันความสมบูรณ์ (Fitness Functions) ที่เสนอโดย Hinterding et al. (1994) มีดังนี้

1. CSP without contiguity

Minimize $\frac{1}{m}\left(\sum_j\left(\sqrt{\frac{T_j}{LS_j}}\right)+\frac{number_wasted}{m}\right)$

โดยที่ m คือ จำนวนวัสดุคงคลังที่ใช้ทั้งหมด

T_j คือ เศษการตัดวัสดุคงคลังเส้นที่ j

LS_j คือ ความยาวของวัสดุคงคลังเส้นที่ j

number_wasted คือจำนวนเส้นของวัสดุคงคลังที่เกิดเศษ

Fitness Function นี้ประกอบด้วยสองเทอม เทอมแรกจะเป็นการชี้วัดปริมาณเศษการตัด ส่วนเทอมที่สองจะเป็นการบังคับให้เกิดการตัดวัสดุคงคลังแบบพอดีทั้งเส้น

2. CSP with contiguity

Minimize $\frac{1}{m}\left(\sum_j\left(\sqrt{\frac{T_j}{LS_j}}\right)+\frac{number_open_items}{n}\right)$

โดยที่ n คือ จำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ต้องการ

T_j คือ เศษการตัดวัสดุคงคลังเส้นที่ j

LS_j คือ ความยาวของวัสดุคงคลังเส้นที่ j

number_open_items คือจำนวนขนาดที่แตกต่างกันของท่อนความยาวที่ยังตัดได้ไม่ครบจำนวน

Fitness Function นี้ประกอบด้วยสองเทอม เทอมแรกจะเป็นการชี้วัดปริมาณเศษการตัด ส่วนเทอมที่สองจะเป็นการบังคับให้เกิดการตัดแบบต่อเนื่อง (contiguity) อย่างไรก็ตาม การบังคับให้เกิดการตัดที่ต่อเนื่องมากเกินไปอาจส่งผลให้เกิดเศษมากขึ้นและเกินกว่าที่ยอมรับได้

Yanasse and Pinto Lamosa (2007) ได้เสนอโมเดลที่มีแนวคิดคล้ายกับประเด็น contiguity คือการพิจารณาลำดับของการตัด (cutting sequence) แบบแผนการตัด เนื่องจากการเริ่มต้นตัดแบบแผนการตัดอันใหม่ อาจเป็นการเริ่มต้นตัดท่อนความยาวอันใหม่ซึ่งเรียกว่าเป็นสถานะ opened stack ในทางปฏิบัติคือท่อนความยาวที่มีขนาดเดียวกันควรจะมีการกองเก็บไว้กองเดียวกัน ท่อนความยาวแต่ละขนาดที่ยังตัดได้จำนวนไม่ครบตามที่ต้องการอาจทำให้ต้องมีการกองเก็บไว้ในพื้นที่บริเวณใกล้กับเครื่องจักรตัด รอการตัดให้ครบจำนวนแล้วจึงนำออกไปส่งมอบต่อไป ซึ่งหากจำนวน opened stack มีมากเกินไปในขณะหนึ่งอาจทำให้พื้นที่การทำงานไม่เพียงพอหรือประสิทธิภาพการทำงานลดลง ลำดับของการตัด (cutting pattern sequence) ที่ดีจะสามารถช่วยลดจำนวน opened stack ในขณะใดลงได้ โมเดลปัญหานี้เหมือนเป็นการผสมรวมกันของปัญหา cutting stock และปัญหา pattern sequencing

หากพิจารณาโมเดลปัญหา Minimization of Opened Stack Problem จะได้ว่า

Decision variable: X_{jm}

Objective function: $Minimize\ C$

Subject to:

1. ข้อจำกัดจำนวนสูงสุดของ opened stack: $\sum_{m}^{M-1} P_m \leq N - C$

2. ข้อจำกัดจำนวนเต็มบวก: $X_j \geq 0$ และ $X_j \in \mathbb{N}$

โดยที่:

X_{jm} คือ ตัวแปรแบบ binary แสดงสถานะของแบบแผนการตัดที่ j ที่อยู่ในลำดับการตัดที่ m โดยที่จะมีค่าเป็น 1 เมื่อ แบบแผนการตัดที่ j ถูกจัดอยู่ในลำดับการตัดที่ m นอกเหนือจากนี้จะมีค่าเป็น 0 ซึ่งจะทำให้สำหรับ j ใดๆ $\sum_m X_{jm} = 1$ และสำหรับ m ใดๆ $\sum_j X_{jm} = 1$

N คือ จำนวนท่อนความยาวที่ต่างกันทั้งหมด

M คือ จำนวนแบบแผนการตัดที่ใช้ทั้งหมด

C คือ จำนวน opened stack สูงสุดที่เคยเกิดขึ้นที่ขณะใด

P_m คือ จำนวน opened stack อันใหม่ (ยังไม่เคยเริ่มตัดมาก่อน) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดแบบแผนที่ m ซึ่ง $P_m \geq W_{m+1} - W_m$ และ $P_m \geq 0$

W_m คือ จำนวน stack (จำนวนท่อนความยาวที่ต่างกัน) ที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัดแบบแผนที่ m โดยที่ $W_m \leq C$

A_j คือ เวกเตอร์ขนาด N ของค่า binary ที่แสดงว่ามีท่อนความยาวอะไรบ้างในแบบแผนการตัดที่ j โดยที่ $X_{jm} \cdot A_j \leq W_m$

2.5.3 Lot Sizing and Production Planning

Gramani and França (2006) กระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลายประเภทมักประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน คือหนึ่งขั้นตอนการรับมอบคำสั่งความต้องการจากลูกค้าที่เป็นปริมาณของสินค้า (products) ประเภทต่างๆรวมทั้งกำหนดส่งสินค้า ขั้นตอนที่สองคือการแปลงให้คำสั่งความต้องการนี้เป็นความต้องการของชิ้นส่วนประกอบย่อยๆ (pieces) ขั้นตอนที่สามคือการกำหนดแผนการตัดวัสดุคงคลังให้เป็นชิ้นส่วนประกอบย่อยๆเพื่อให้ได้ปริมาณตามความต้องการและทันตามกำหนดส่งในแต่ละรอบของการผลิต อีกทั้งยังต้องกำหนดให้เกิดต้นทุนค่าจัดเก็บ ต้นทุนค่าเริ่มต้นการผลิต และต้นทุนของเศษการตัดให้น้อยที่สุด ดังนั้นในการวางแผนกระบวนการผลิตจริงที่พิจารณาแบบต่อเนื่อง จึงเป็น

ปัญหาการตัดวัสดุที่ผสมกับปัญหาการจัด lot sizing ซึ่ง Gramani and França (2006) ได้เสนอโมเดลปัญหาที่ผสมกันไว้ดังนี้

Decision variable: X_{jt}

Objective function: $Minimize\ \left(\sum_t\left[\sum_j\left(X_{jt}\right)+\sum_i(h\cdot I_{it})+(s\cdot Z_t)\right]\right)$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านความต้องการ: $\left(\sum_j\left(A_jX_j\right)\right)_{it}+I_{i,t-1}-I_{it}=B_{it}$ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n และสำหรับที่ช่วงการผลิตที่ t

2. ข้อจำกัดจำนวนเต็มบวก: $X_{jt}\geq 0$ และ $X_{jt}\in\mathbb{N}$

โดยที่:

X_{jt} คือ จำนวนครั้งการตัดวัสดุคงคลังตามแบบแผน A_j สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง m ในช่วงการผลิต t

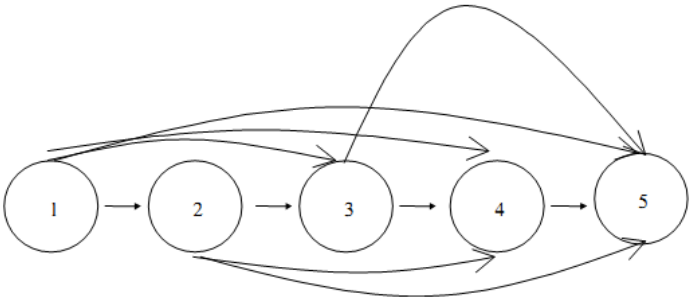
I_{it} คือ จำนวนท่อนความยาวที่ i ที่เหลือจากความต้องการและทำการจัดเก็บ ในช่วงการผลิตที่ t โดยที่ $I_{it}\geq 0$ และ $I_{it}\in\mathbb{N}$

Z_t คือ ค่าแสดงสถานะการผลิตในช่วงการผลิตที่ t เป็นตัวเลข binary โดยที่ $Z_t=\{0\ if\ X_{jt}=0;and\ 1\ if\ X_{jt}>0\}$

h คือ ค่าต้นทุนต่อหน่วยของการจัดเก็บท่อนความยาวที่เหลือจากความต้องการต่อหน่วยช่วงการผลิต

s คือ ค่าต้นทุนของการเริ่มต้นการผลิต (setup cost) ต่อหน่วยช่วงการผลิต

โมเดลปัญหาข้างบนที่ Gramani and França (2006) ได้เสนอนี้ เป็นปัญหาการตัดวัสดุคงคลังในช่วงการผลิตต่างๆ หากนำโมเดลปัญหาย่อยมาร้อยเรียงกันตามแผนการผลิต (หลายๆช่วงการผลิต) ที่ต่อเนื่องกัน จะได้เป็นปัญหาการวางแผนการผลิตโดยรวม ซึ่งสามารถสร้างให้อยู่ในรูปโมเดลปัญหาแบบ Network Shortest Path โดยให้แต่ละ arc (k-l) ของ network แสดงแทนโมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังในระหว่างช่วงการผลิตย่อย ตั้งแต่ช่วงที่ k ไปจนถึงช่วงที่ l ตัวอย่างเช่น หากคำตอบของโมเดลปัญหา Network Shortest Path เลือก arc หนึ่งเป็น (1-4) หมายถึงว่าการผลิตให้ครอบคลุมช่วงการผลิตที่ 1, 2, และ 3 จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงเส้น arc ที่เป็นไปได้ทั้งหมดของปัญหา Network Shortest Path

2.5.4 Usable leftover

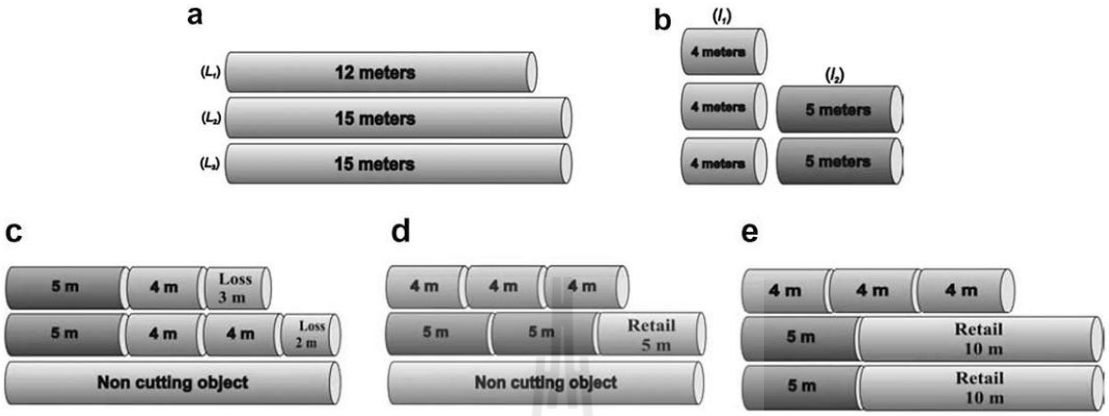
Cherri et al. (2009) ในขั้นตอนการตัดวัสดุคงคลังให้ได้ขนาดท่อนความยาวตามต้องการนั้น จะทำให้เกิดท่อนส่วนที่เหลือ (leftover) ขึ้นอย่างหลีกเหลี่ยงได้ยาก ท่อนส่วนที่เหลือ (leftover) นี้ หมายถึง ส่วนของวัสดุคงคลัง (stock length) ที่เหลือจากการตัดท่อนความยาวที่ต้องการ (items) ที่อาจจะมีความยาวมากน้อยแตกต่างกันไป ซึ่งอาจสามารถนำมาใช้ตัดเป็นท่อนความยาวขนาดอื่นๆได้อีกภายหลังสำหรับรายการความต้องการในอนาคต (usable leftover) หรือหากไม่สามารถนำไปใช้ต่อได้ ส่วนนี้เองก็จะกลายเป็นเศษ (scraps) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของโมเดลปัญหา CSP ที่ต้องการให้เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด จึงคล้ายคลึงกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้เกิด leftover น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการพิจารณาประเด็นนี้ทำให้เกิดเป็นปัญหาใหม่ที่ต้องการให้เกิดการนำ leftover กลับมาใช้ตัดอีกให้มากที่สุด

Cherri et al. (2009) ได้เสนอโมเดลปัญหาใหม่ขึ้นมาเรียกว่า Cutting Stock Problem with Usable Leftover (CSPUL) ที่หมายถึง ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังขนาดมาตรฐาน (standard stock length) หรือท่อนส่วนที่เหลือ (leftovers) ให้ได้ท่อนความยาว (items) ขนาดต่างๆและปริมาณตามที่ต้องการ โดยให้เกิดท่อนส่วนที่เหลือที่ใช้ไม่ได้เป็นเศษการตัด (scraps) น้อยที่สุด หรือท่อนส่วนที่เหลือที่สามารถเก็บไว้ใช้ในคราวต่อไป (retails) ที่ยาวที่สุดและมีจำนวนน้อยที่สุด

จากขอบเขตของปัญหานี้ทำให้ต้องมีการกำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาว่า leftovers อันใดที่จัดเป็น scraps และอันใดที่จัดเป็น retails เพื่อนำไปเก็บไว้ใช้ต่อไป เกณฑ์การกำหนดนี้ขึ้นอยู่กับการตัดสินใจ โดยอาจใช้ ความยาวที่ยาวที่สุดของท่อนความยาว (the longest demanded item), ความยาวเฉลี่ยของท่อนความยาวที่ต้องการทั้งหมด, หรือขนาดที่สั้นที่สุดของท่อนความยาว ทั้งนี้การกำหนดด้วยขนาดที่ยาวที่สุดหรือสั้นที่สุดควรพิจารณาให้ไม่ห่างกับขนาดท่อนความยาวโดยปกติ (typical) เกินไปนัก

โมเดลปัญหา CSP โดยทั่วไปจะมี objective functions เป็น minimize the total waste, minimize the number of objects cut, หรือ minimize the costs แต่ในโมเดล CSPUL ได้

กำหนด objective functions เป็น minimize the total scraps และ minimize the number of retails ซึ่งอาจทำให้คำตอบที่มี leftover เท่ากันมีประสิทธิผลต่างกันได้ ดังตัวอย่างในรูปข้างล่าง กำหนดให้ retail คือ leftover ที่ยาว ≥ 4 เมตร, มีวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานอยู่ในรูปย่อย a, มีขนาดท่อนความยาวในรูปย่อย b, คำตอบที่เป็นไปได้ 3 แบบอยู่ในรูปย่อย c, d, และ e



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างปัญหา CSP และคำตอบแบบต่างๆ (Cherri et al. 2009)

จากตัวอย่างนี้หากใช้ objective functions ของ CSPUL ในการประเมินคำตอบแบบต่างๆจะได้ว่า คำตอบแบบ d เป็นคำตอบที่ดีที่สุดใน 3 แบบ เนื่องจากเป็นคำตอบที่ทำให้เกิดปริมาณ scraps น้อยที่สุดและจำนวน retails น้อยที่สุดด้วย โดย retail ที่เกิดขึ้นเป็นท่อนที่มีความยาวมากกว่า 4 เมตร และมีจำนวนเพียงหนึ่งท่อน ต่างจากในคำตอบแบบ c ที่เกิด scraps ถึง 2 ท่อน ซึ่งผลรวมได้เท่ากับ retail ของคำตอบแบบ d ส่วนคำตอบแบบ e แย่กว่าคำตอบแบบ d เนื่องจากทำให้เกิด retails จำนวน 2 ท่อน (และใช้จำนวน stock lengths มากกว่าคำตอบแบบอื่น)

จากการกำหนด objective functions ของ CSPUL ทำให้ได้แนวการประเมินคำตอบเป็น 3 ประเภทคือ

1. คำตอบที่ดี คือคำตอบที่เกิดปริมาณ scraps รวมน้อย แต่ละ scraps เป็นมีขนาดสั้นมาก และมีจำนวน retails รวมน้อย แต่ละ retails มีขนาดยาวมาก (ส่งผลให้ใช้จำนวน stock lengths รวมน้อย)

2. คำตอบที่ยอมรับได้ คือคำตอบที่เกิดปริมาณ scraps รวมน้อย และมีจำนวน retails รวมน้อย

3. คำตอบที่ไม่ต้องการ คือคำตอบที่เกิดปริมาณ scraps รวมมาก แต่ละ scraps เป็นมีขนาดยาวมาก และมีจำนวน retails รวมมาก แต่ละ retails มีขนาดสั้นมาก

2.5.5 Exhaustive Repetition Heuristic Algorithm

ขั้นตอนวิธีการหาคำตอบของโมเดลปัญหา CSP วิธี Exhaustive Repetition Heuristic Algorithm (Cherri et al. 2009) มีดังนี้

Step 1: สร้างแบบแผนการตัดที่ดีสำหรับแต่ละวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานที่ k (k =1, … , K) (สำหรับปัญหาที่มีวัสดุคงคลังความยาวมาตรฐานหลายความยาว)

Step 2: เลือกแบบแผนที่ดีที่สุดที่ได้จาก Step 1 (เช่น ได้เศษการตัดน้อยที่สุด) แบบแผนการตัดนี้จะเป็นของวัสดุคงคลังที่ k

Step 3: ใช้แบบแผนการตัดที่เลือกใน Step 2 ตัดท่อนความยาวให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยไม่เกินจำนวนที่ต้องการ หรือไม่เกินกว่าจำนวนวัสดุคงคลังที่ k ที่มีอยู่

Step 4: ปรับปรุงรายการจำนวนท่อนความยาวที่ต้องการที่ยังไม่ได้ตัด และจำนวนวัสดุคงคลังและ retails ที่เหลือ

Step 5: ถ้ารายการท่อนความยาวที่ต้องการได้ครบถ้วนแล้วหรือไม่มีวัสดุคงคลังเหลือ ให้จบการดำเนินการ ถ้าไม่แล้วให้ทำซ้ำ Step 1

ประสิทธิภาพของ Exhaustive Repetition Heuristic ขึ้นอยู่กับแบบแผนการตัดที่ดีที่สร้างขึ้นใน Step 1 ซึ่งมี algorithm ที่นิยมสำหรับใช้สร้างแบบแผนการตัดที่ดีได้แก่ First Fit Decreasing (FFD) และ Greedy ซึ่ง algorithm ทั้งสองมีหลักการที่ต่างกันคือ FFD เน้นการตัดท่อนความยาวที่ยาวมากก่อนท่อนที่สั้นเพราะเป็นท่อนความยาวที่ยากต่อการตัดร่วมกับท่อนความยาวขนาดอื่นๆ แต่ Greedy เน้นการตัดด้วยแบบแผนการตัดที่ดีที่สุดก่อน (เหลือเศษน้อยที่สุด) โดยไม่คำนึงถึงแบบแผนการตัดที่เหลือ การสร้างแบบแผนการตัดด้วย Greedy algorithm เป็นการใช้โมเดลปัญหา Knapsack ในการสร้างแบบแผนดังนี้

Decision variable: $A_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, \ldots, a_{nj})$

Objective function: $Maximize \ \sum_i a_{ij} L_i$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านขนาดของวัสดุคงคลังที่ k: $\sum_i a_{ij} L_i \ \leq LS_k$
2. ข้อจำกัดด้านจำนวนที่ต้องการ: $0 \leq a_i \leq r_i$ สำหรับ *i* ตั้งแต่ 1 ถึง *n*

โดยที่:

r_i คือจำนวนท่อนความยาวที่ *i* ที่ต้องการที่เหลือ หลังจากการปรับปรุงจำนวนใน Step 4 เมื่อตอนเริ่มต้น $r_i = B_i$

เนื่องจาก CSPUL มีการประเมินคำตอบแบ่งออกเป็นคำตอบที่ดี ที่ยอมรับได้ และที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงมีการปรับแก้ FFD ที่จะนำมาใช้ด้วยการเพิ่มขั้นตอนการประเมินคำตอบเข้าไว้ใน algorithm ได้เป็น FFD_L

2.5.6 FFD_L Algorithm with Usable Leftover Consideration

มีรายละเอียดดังนี้ เป็นการวนลูปในขั้นตอนต่อไปนี้ โดยพิจารณาวัสดุคงคลังทีละความยาวที่ k ที่มีอยู่

Step 1: ใช้ FFD algorithm เพื่อสร้างแบบแผนการตัดสำหรับวัสดุคงคลังที่ k โดยให้สัญญลักษณ์ α_k^{FFD} แทนแบบแผนการตัดที่เป็นคำตอบ (เป็นตัวแปรแบบเวกเตอร์)

Step 2: ทำการวิเคราะห์ α_k^{FFD} ว่าทำให้เกิด leftovers ที่ยอมรับได้หรือไม่ (มีปริมาณ scraps น้อย และจำนวน retails น้อย) ซึ่งหากยอมรับได้ก็จะเก็บ α_k^{FFD} ไว้ หากไม่แล้ว จะทำ Step ต่อไป

Step 3: ถอนท่อนความยาวที่ยาวที่สุด (L_i) ใน α_k^{FFD} ออกมาจากแบบแผน

Step 4: ซึ่งจะทำให้เกิด SPACE ขึ้นขนาดเท่ากับ Leftover ของ $\alpha_k^{FFD} + L_i$ นำส่วน SPACE นี้มาสร้างแบบแผนด้วย โมเดล Knapsack โดยให้สัญญลักษณ์ α_k^{Knap} แทนแบบแผนการตัดส่วนที่ได้ที่เป็นคำตอบนี้ (เป็นตัวแปรแบบเวกเตอร์)

Step 5: ทำการวิเคราะห์ α_k^{Knap} นี้ว่าทำให้เกิด leftovers ที่ยอมรับได้หรือไม่ (มีปริมาณ scraps น้อย และจำนวน retails น้อย) ซึ่งหากยอมรับไม่ได้ก็จะทำ Step ต่อไป

Step 6: ถอนท่อนความยาวที่ยาวที่สุดลำดับที่ 2 ใน α_k^{FFD} ออกมาจากแบบแผน ซึ่งจะทำให้เกิด SPACE ใหม่อีกเพื่อนำไปสร้างแบบแผนด้วยโมเดล Knapsack อีกเช่นนี้เรื่อยไป จนกว่าจะได้แบบแผนที่ทำให้เกิด leftovers ที่ยอมรับได้

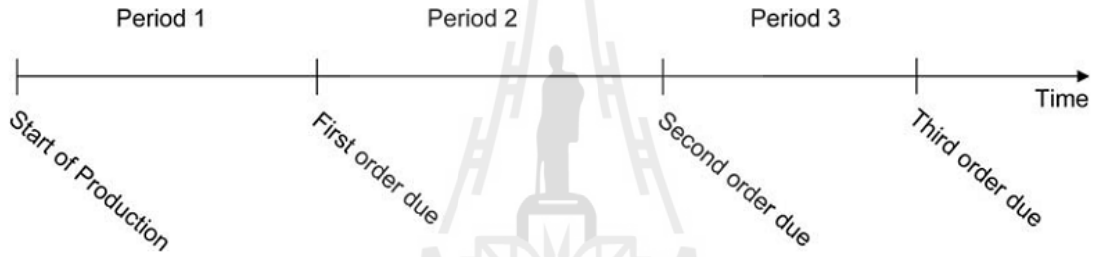
Step 7: แต่หาก α_k^{Knap} ใน step 5 ยอมรับได้ก็จะนำ α_k^{FFD} ส่วนที่เหลือ + α_k^{Knap} เป็นแบบแผนการตัดคำตอบที่ได้ (หากการถอนท่อนความยาวใน α_k^{FFD} ออกมาจนกระทั่งหมด จะทำให้คำตอบที่ได้เป็นแบบแผนการตัดจากโมเดล Knapsack เพียงอย่างเดียว

2.5.7 CSP with Due Dates

คำตอบของโมเดลปัญหา CSP โดยทั่วไปจะประกอบด้วย แบบแผนการตัด (cutting pattern) ที่เลือกใช้ และจำนวนครั้งของการตัดแบบแผนเหล่านั้น (run lengths) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าข้อมูลทั้งสองชุดนี้ประกอบกันได้เป็นแผนการตัดวัสดุคงคลัง (cutting plan) อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า คำตอบทั่วไปนี้ไม่ได้รวมประเด็นของกำหนดเวลาไว้ด้วย ซึ่งทำให้ไม่สามารถจัดตารางเวลาของการตัด (cutting scheduling) ได้หากรายการความต้องการมีการกำหนดวันส่งมอบ (due dates) ด้วย ในบางกรณีการตัดให้ทันตามกำหนดวันส่งมอบอาจมีความสำคัญกว่าการตัดให้เกิดเศษน้อย ซึ่งการจัดการตารางเวลา

ของการตัดอาจทำให้เกิด open stacks จำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหา inventory หรือเกิดปัญหา bottlenecks ที่ขั้นตอน downstream process

Reinertsen and Vossen (2010) ได้เสนอโมเดลปัญหา CSP ที่พิจารณากำหนดวันส่งมอบของรายการความต้องการ ซึ่งเป็นประเด็นที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการวางแผนการตัดวัสดุเหล็กเส้นในงานก่อสร้าง โมเดลปัญหา CSP ที่พิจารณากำหนดวันส่งมอบมีลักษณะที่คล้ายกับการพิจารณาลำดับการตัดแบบแผนการตัด (cutting sequence) พวกเขาได้กำหนดให้รายการความต้องการทั้งหมดในรอบการวางแผนหนึ่ง (planning horizon) เป็นค่าที่รู้แน่ชัด และมีวัสดุคงคลังจำนวนเหลือเฟือ สมมติฐานคือให้รอบการวางแผนหนึ่งถูกแบ่งออกเป็นช่วงการผลิตต่างๆ (periods) ที่กำหนดด้วยวันส่งมอบ (due dates) ดังรูปข้างล่าง และสมมติให้รายการความต้องการที่ *i* มีกำหนดส่งมอบเรียงตามลำดับช่วงการผลิตที่ *k* ซึ่งสมมติฐานนี้ทำให้โมเดลที่ได้ไม่สมจริงนักแต่เพื่อความง่ายของโมเดล (Reinertsen and Vossen 2010)



รูปที่ 2.11 ช่วงการผลิตต่างๆที่กำหนดด้วยวันส่งมอบในรอบการวางแผนหนึ่ง

วัตถุประสงค์ของโมเดลปัญหาคือการหาแบบแผนการตัดที่ต้องใช้และจำนวนครั้งการตัดแบบแผนเหล่านั้น สำหรับในแต่ละช่วงการผลิต เพื่อให้ได้ตามรายการความต้องการและทันต่อกำหนดส่งมอบ หรือให้เกิดค่า tardiness cost (ค่าปรับจากการล่าช้ากว่ากำหนด) น้อยที่สุด รายละเอียดของโมเดลที่เสนอมีดังนี้

Decision variable: X_{jk}

Objective function: $Minimize\ \sum_k \sum_j X_{jk} + \sum_i T \cdot D_i$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านขนาดของวัสดุคงคลัง: $\sum_i a_{ij} L_i \ \leq LS$ สำหรับแบบแผนที่ *j* ใดๆ

2. ข้อจำกัดด้านจำนวนที่ต้องการ: $\sum_{k=1}^{i} \sum_j a_{ij} \cdot X_{jk} \leq B_i$ สำหรับ *i* ตั้งแต่ 1 ถึง *n*

จะเห็นได้ว่า k และ i มีความสัมพันธ์กัน เนื่องจากสมมติให้ *i* เรียงเป็นลำดับตาม *k*

โดยที่:

X_{jk} คือ จำนวนครั้ง (run lengths) ที่ตัดแบบแผนที่ *j* ในช่วงการผลิตที่ *k*

Y_i คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดได้ตามกำหนดส่งมอบ ของท่อนความต้องการที่ *i*

D_i คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบซึ่งถูกค่าปรับตามอัตราของท่อนความต้องการที่ *i*

T คือ อัตราค่าปรับของการล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบ ต่อจำนวนเส้นวัสดุคงคลัง

ซึ่ง $\sum_{k=1}^{i}\sum_j(X_{jk}) \leq Y_i + D_i$ สำหรับแต่ละท่อนความต้องการที่ *i*

อย่างไรก็ตาม พิจารณาได้ว่า Y_i เป็นค่าที่ถูกจำกัดด้วยความสามารถของกำลังผลิต (machine capacity)

โมเดลที่ปรับปรุงใหม่จากสมมติฐานให้รายการความต้องการที่ *i* มีกำหนดส่งมอบเรียงตามลำดับช่วงการผลิตที่ *k* เปลี่ยนเป็นการแบ่งช่วงการผลิตที่ k ที่มีรายการความต้องการต่างๆกันผสมกัน รายละเอียดของโมเดลที่ปรับปรุงจะเป็นดังนี้

Decision variable: X_{jk}

Objective function: $Minimize\ \sum_k\sum_j X_{jk} + \sum_k T \cdot D_k$

Subject to:

1. ข้อจำกัดด้านขนาดของวัสดุคงคลัง: $\sum_i a_{ij}L_i \leq LS$ สำหรับแบบแผนที่ *j* ใดๆ

2. ข้อจำกัดด้านจำนวนที่ต้องการ: $\sum_1^k\sum_j a_{ij} \cdot X_{jk} \leq B_{ik}$ สำหรับแต่ละ *i* ตั้งแต่ 1 ถึง *n* และแต่ละ *k*

โดยที่:

X_{jk} คือ จำนวนครั้ง (run lengths) ที่ตัดแบบแผนที่ *j* ในช่วงการผลิตที่ *k*

Y_k คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดได้ตามกำหนดส่งมอบ ก่อนสิ้นสุดช่วงการผลิตที่ *k*

D_k คือ จำนวนเส้นวัสดุคงคลังที่ตัดล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบซึ่งถูกค่าปรับตามอัตราอนสิ้นสุดช่วงการผลิตที่ *k*

T คือ อัตราค่าปรับของการล่าช้ากว่ากำหนดส่งมอบ ต่อจำนวนเส้นวัสดุคงคลัง

ซึ่ง $\sum_1^k\sum_j(X_{jk}) \leq Y_k + D_k$ สำหรับแต่ละช่วงการผลิตที่ *k*

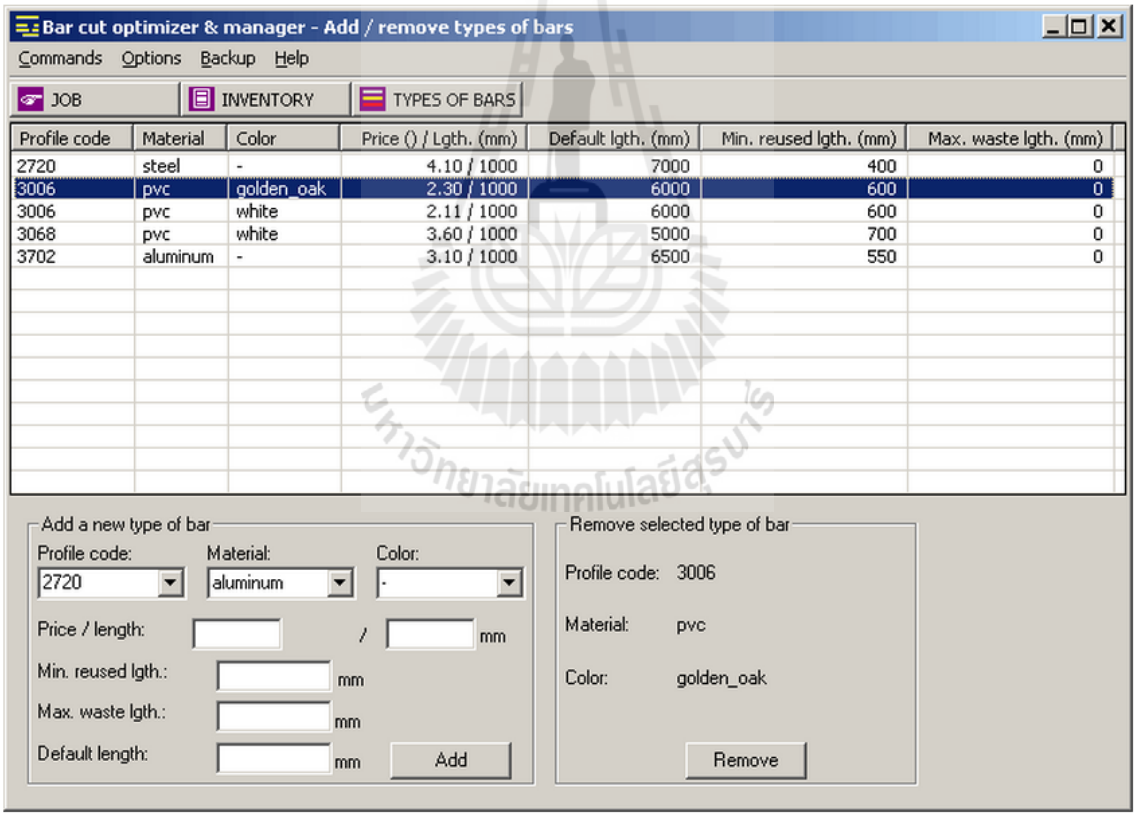
นอกจากนี้โมเดลปัญหานี้ยังอาจขยายไปครอบคลุมในกรณีที่มีวัสดุคงคลังหลายขนาดมาตรฐานได้อีกด้วย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.6 โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่

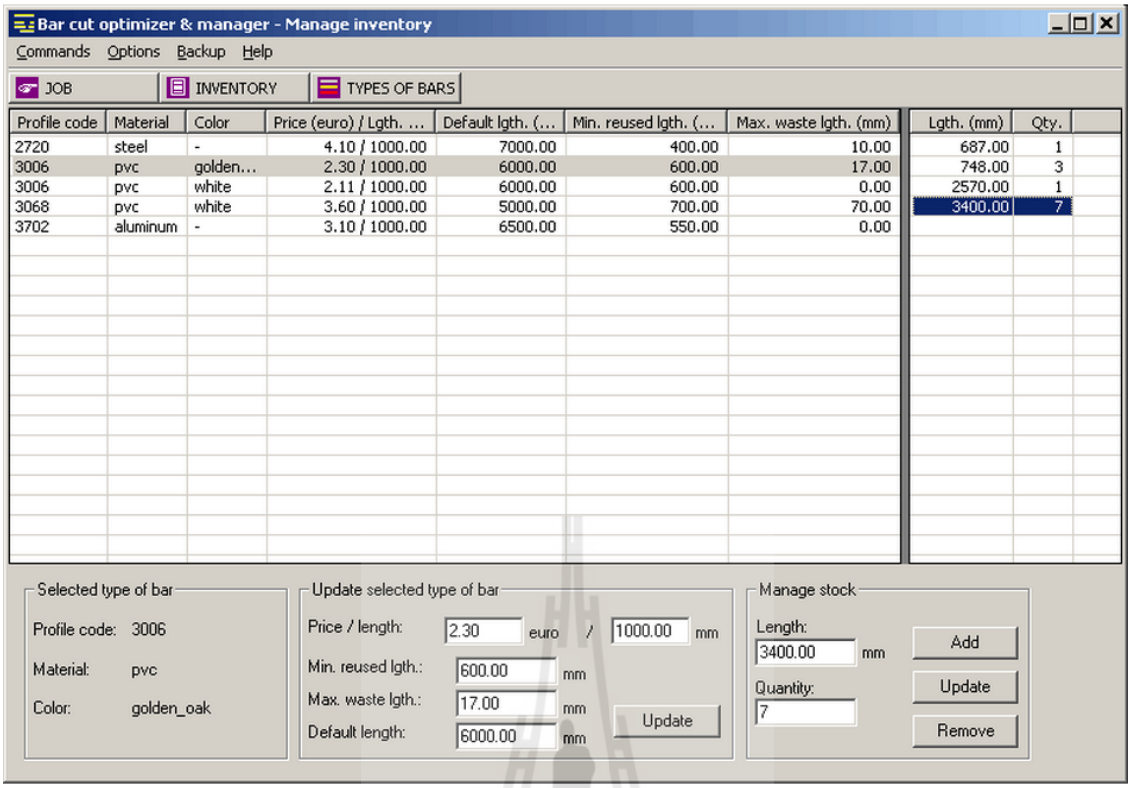
นอกจากวิธีการแก้ปัญหาต่างๆที่มีอยู่ในงานวิจัยแล้ว ยังมีโปรแกรมสำเร็จรูปจำนวนหนึ่งที่ใช้ในการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้น ได้แก่ Bar Cut Optimizer and Manager ® (Binrace SRL, 2008) ซึ่งพัฒนาโดยบริษัทจากประเทศโรมาเนีย โปรแกรมนี้มีความสามารถในการสร้างแผนการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นเพื่อให้เหลือเศษน้อยที่สุด (cutting waste minimization for linear materials) บริหารวัสดุคงคลัง (stock and leftover inventory management) ปรับเปลี่ยนระบบหน่วยความยาวได้ และให้คำตอบในรูปแบบไฟล์ html ความสามารถโดยสรุปของโปรแกรมนี้มีดังนี้

1. Managing types of materials สามารถจัดการกับวัสดุเชิงเส้นได้หลากหลายประเภท ซึ่งรวมถึงการบริหารฐานข้อมูลของวัสดุประเภทต่างๆเหล่านี้ ผู้ใช้สามารถสร้างรหัสเฉพาะสำหรับวัสดุเชิงเส้นแต่ละประเภท ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันได้ เช่น ประเภทวัสดุ ราคาต่อหน่วย ขนาดความยาวมาตรฐาน เกณฑ์ขนาดความยาวที่เป็นเศษ ดูรูปข้างล่างประกอบ



รูปที่ 2.12 การจัดการกับประเภทวัสดุของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

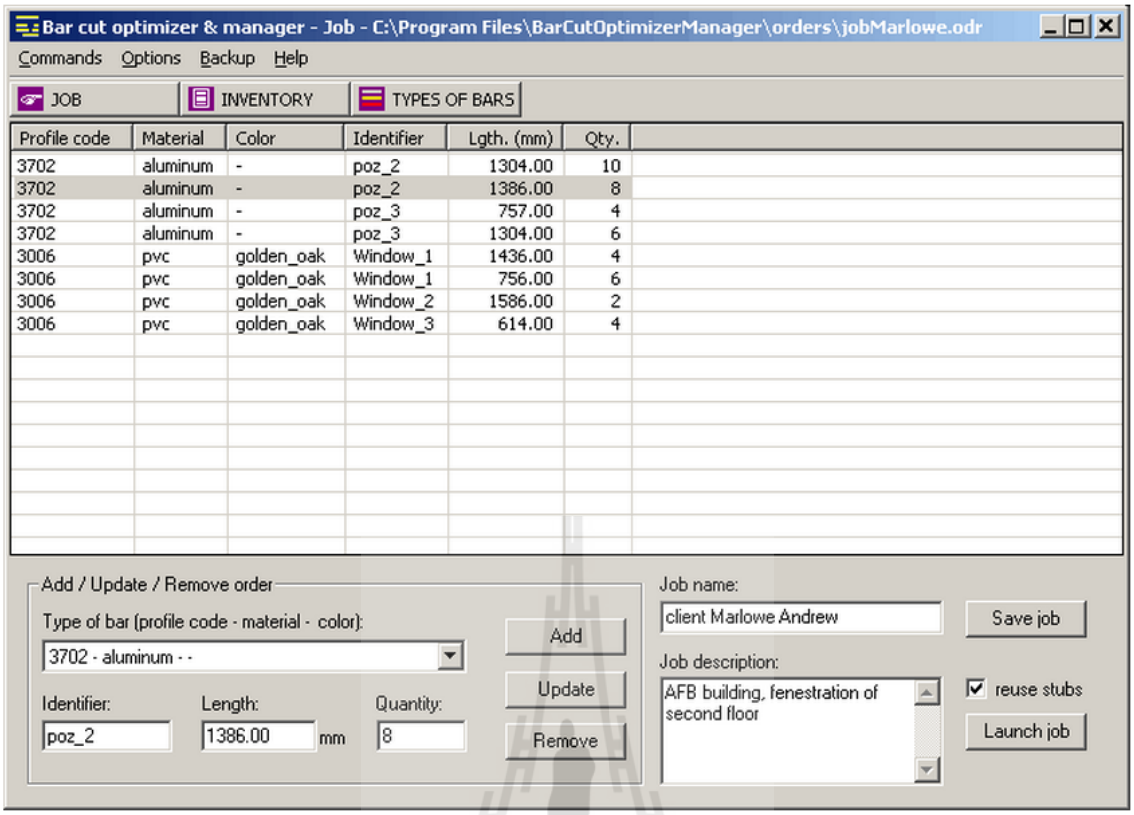
2. Managing inventory สามารถจัดการกับจำนวนคงคลัง (ทั้งขนาดมาตรฐาน และ leftovers) ของวัสดุเชิงเส้นประเภทต่างๆ ได้ ในรูปแบบของฐานข้อมูลที่มีประโยชน์ ซึ่งทำให้สามารถติดตามจำนวนที่มีอยู่ ปรับปรุงสถานะปัจจุบัน รวมถึงการวางแผนสั่งซื้อต่อไปได้



รูปที่ 2.13 การบริหารจำนวนวัสดุคงคลัง (ทั้งขนาดมาตรฐาน และ leftovers) ของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

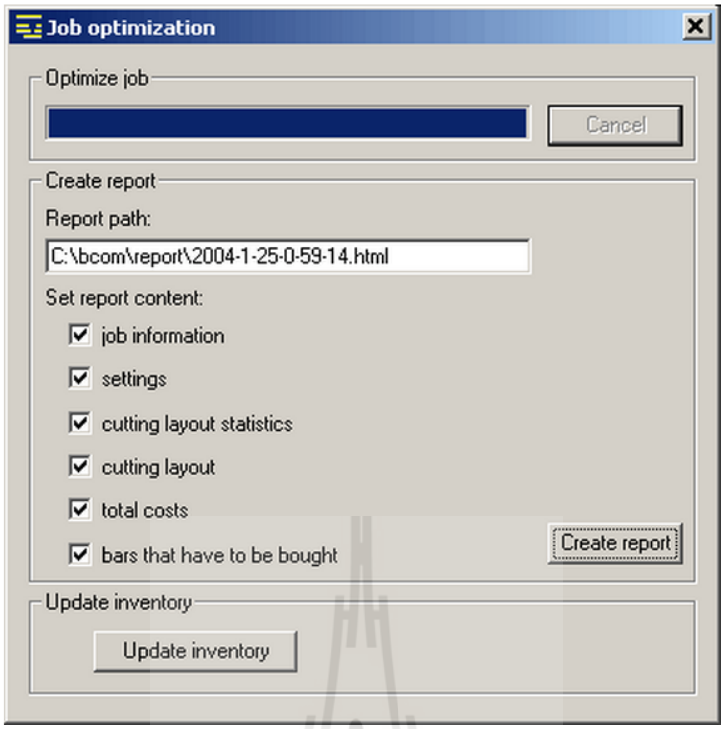
3. Launching a job คือการกำหนดข้อมูลรายการท่อนความยาวที่ต้องการ เพื่อเริ่มการตัดครั้งใหม่ ลักษณะข้อมูลที่ต้องกำหนดให้กับโปรแกรม ได้แก่ รหัสวัสดุ ชื่อเรียก (ใช้ในการอ้างอิงสำหรับนำท่อนความยาวไปใช้) ขนาดท่อนความยาว และจำนวนที่ต้องการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 2.14 การป้อนข้อมูลรายการความต้องการสำหรับงานใหม่ของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

4. Job report and inventory update คือส่วนที่สั่งให้แสดงผลรายงานการคำนวณ ซึ่งโปรแกรมจะแสดงแบบแผนการตัด จำนวนวัสดุคงคลัง (ทั้งขนาดมาตรฐาน และ leftovers) ที่ต้องการใช้สำหรับงานนั้น จำนวนเศษที่เกิดขึ้น ต้นทุนทั้งหมด โดยรายงานนี้จะอยู่ในไฟล์รูปแบบ html ที่สะดวกต่อการนำไปเผยแพร่ต่อไป นอกจากนี้ยังมีส่วนสำหรับปรับปรุงวัสดุคงคลัง ซึ่งจะเป็นการนำค่าจำนวนวัสดุที่ต้องการใช้ทั้งหมดสำหรับงานปัจจุบันที่ได้จากการคำนวณล่าสุดนี้ไปปรับปรุง (หักลบกับ) จำนวนวัสดุคงคลังที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะทำให้ได้จำนวนวัสดุคงคลังที่ควรเหลืออยู่หลังจากเสร็จสิ้นการตัดงานนี้



รูปที่ 2.15 การรายงานผลลัพธ์และการปรับปรุงจำนวนวัสดุคงคลังของโปรแกรม Bar Cut Optimizer and Manager

Bar Cut Optimizer and Manager เป็นตัวอย่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีความสามารถหลากหลายและประโยชน์ในระดับหนึ่ง มี user interface ที่เรียบง่ายและเรียนรู้วิธีใช้ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามวิธีการโมเดลปัญหาไม่มีความยืดหยุ่นในการตั้งค่าจากผู้ใช้และวิธีการแก้ปัญหายังเป็น heuristic algorithms แบบง่ายซึ่งไม่ได้ให้คำตอบที่ใกล้จุด optimal ที่เหมาะสม โปรแกรมสำเร็จรูปเหล่านี้ยังมีราคาแพงและไม่เป็นที่นิยมใช้ในบริษัทผู้รับเหมา จึงเป็นประเด็นที่ควรวิจัยเพื่อหาแนวทางการนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงให้สอดคล้องกับความต้องการเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2.7 สภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นของไทย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ดีในสภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นในงานก่อสร้างของประเทศไทย และวิธีการจัดลำดับการตัดวัสดุคงคลังแบบที่เป็นอยู่จริง โดยการวิจัยนี้ได้เลือกทำการศึกษากับวัสดุคงคลังเชิงเส้นที่เป็นเหล็กเส้น ทั้งนี้เนื่องจากงานก่อสร้างในประเทศไทยนิยมใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นหลัก เหล็กเส้นจึงเป็นวัสดุหลักของโครงการที่มีปริมาณการใช้เป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นวัสดุที่มีราคาต่อหน่วยสูง การวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาสำรวจด้วยการสัมภาษณ์และแบบสอบถามกับกลุ่มผู้รับผิดชอบดูแลงานการตัดเหล็กเส้นคือวิศวกร และกลุ่มผู้ปฏิบัติงานซึ่งโดยทั่วไปคือคนงานตำแหน่งช่างเหล็ก และนำผลการศึกษาที่ได้จากกลุ่มตัวอย่างทั้งสองกลุ่มมาทำการเปรียบเทียบกัน

2.7.1 วิธีการสำรวจ

การศึกษาสำรวจด้วยวิธีการสัมภาษณ์และตอบแบบสอบถาม มีผู้ให้ข้อมูลรวมทั้งสิ้น 60 คน แบ่งเป็น กลุ่มวิศวกรจำนวน 30 คนและกลุ่มช่างเหล็ก 30 คน จากโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่จำนวน 17 โครงการ เป็นสิ่งก่อสร้างประเภทต่างๆ ได้แก่ อาคารสูง และโรงงาน เพื่อหาวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มตัวอย่าง โดยตัวแบบสอบถามจะประกอบด้วยโจทย์ปัญหาที่เตรียมขึ้นเพื่อให้ผู้ถูกสัมภาษณ์หาคำตอบพร้อมทั้งอธิบายถึงหลักการวิธีการจัดรูปแบบการตัดของตนเอง ผู้ถูกสัมภาษณ์ทุกคนจะได้โจทย์ปัญหาเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลคำตอบและวิธีการจัดรูปแบบของแต่ละคนได้ นอกจากนี้ในตัวแบบสอบถามยังเก็บข้อมูลรายละเอียดทั่วไปของผู้ตอบ เพื่อนำมาศึกษาปัจจัยส่วนบุคคลที่ทำให้ใช้วิธีการที่ต่างๆกันในการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น

โจทย์ปัญหาที่ใช้ในแบบสอบถามเป็นรายการตัดเหล็กเส้น (bar cut list) ที่แสดงถึงความต้องการใช้เหล็กเส้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและขนาดท่อนความยาวต่างๆกัน และเป็นจำนวนท่อนต่างๆกัน โจทย์ปัญหานี้เตรียมขึ้นจากแบบก่อสร้างแสดงรายละเอียดการเสริมเหล็ก (shop drawings) ของชิ้นส่วนอาคาร ได้แก่ ฐานราก พื้น เสา และคาน ข้อมูลโจทย์ประกอบด้วยรูปร่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้น ความยาวท่อน และจำนวนท่อนที่ต้องการใช้ ดังแสดงตัวอย่างโจทย์ในรูปข้างล่างนี้

รูปร่างชิ้นงาน	ขนาด	ความยาว (เมตร/ท่อน)	จำนวน (ท่อน)	ความยาวที่ตัด (เมตร/ท่อน)	หมายเหตุ
0.25 0.45 0.25	DB28	0.95	6		
0.25 1.5	DB25	1.75	4		
1.0 0.8	DB25	1.8	3		
0.3 3.45	DB20	3.75	3		
0.25 0.25 0.8 0.8	DB16	3.2	3		
0.25 0.15 0.2 0.5	DB12	1.4	4		
3.0	RB9	3	2		
5.0	RB6	5	2		
2.3 0.5 0.5 2.3 3.8	RB6	9.4	1		

รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโจทย์ปัญหาการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น

โจทย์ปัญหาที่ใช้ ประกอบด้วยเหล็กเส้นรูปร่างต่างๆกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นต่างๆกัน 7 ขนาด ได้แก่ DB28, DB25, DB20, DB16, DB12, RB9, และ RB6 ความยาวท่อนและ

จำนวนท่อนที่ต้องการใช้ต่างๆกัน แม้ว่าเหล็กเส้นที่ใช้ในงานก่อสร้างจะมีความยาวมาตรฐานที่จำหน่ายอยู่ 2 ขนาดคือ 10 เมตรและ 12 เมตร แต่การวิจัยนี้ได้กำหนดให้ผู้ตอบแบบสอบถามจัดรูปแบบการตัดตามโจทย์โดยใช้เหล็กเส้นที่มีความยาวมาตรฐาน 12 เมตรเท่านั้น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ผลคำตอบที่ได้จะไม่มีการแยกพิจารณารูปร่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นที่ต่างกัน แต่จะพิจารณาเหล็กเส้นต่างรูปร่างและต่างขนาดเส้นศูนย์กลางเหล่านี้ไปพร้อมกัน ดังนั้นข้อมูลสำคัญของโจทย์ที่ใช้แบ่งแยกรายการคือขนาดความยาวท่อน (L_i) ที่แต่ละขนาดจะมีความต้องการใช้เป็นจำนวนท่อน (B_i) ต่างๆกัน โจทย์ปัญหาที่ใช้ประกอบด้วย L_i ทั้งสิ้น 33 ขนาด รวมความยาวของเหล็กเส้นทั้งหมดที่ต้องการตัด 297.31 เมตร สามารถสรุปเป็นรูปตารางข้อมูลดังแสดงข้างล่างนี้

i	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*
1	0.26	4	5	1.00	2	11	2.26	4	16	3.00	5	21	4.50	4
2	0.75	1	6	1.07	3	12	2.55	4	17	3.20	3			
3	0.85	4	7	1.40	4	13	2.70	4	18	3.50	2			
4	0.95	6	8	1.75	4	14	2.76	3	19	3.60	3			
			9	1.80	3	15	2.98	4	20	3.75	3			
			10	1.88	4									

i	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*	*i*	*Li*	*Bi*
22	5.00	2	26	6.00	2	28	7.00	1	30	9.40	1	32	10.20	2
23	5.32	2	27	6.76	2	29	7.19	1	31	9.70	1	33	10.58	1
24	5.40	1												
25	5.99	3												

รูปที่ 2.17 สรุปโจทย์ปัญหาการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น

2.7.2 ผลการทำโจทย์ปัญหาและการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

จากการเก็บข้อมูลด้วยแบบสอบถาม และนำคำตอบการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นตามโจทย์ปัญหาของวิศวกรและช่างเหล็กแต่ละรายมาคำนวณหาปริมาณความสูญเสียและวิเคราะห์เปรียบเทียบ ดังแสดงผลปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการตัดแต่ละรูปแบบ (T_j) (รูปแบบการตัด 1 รูปแบบ สำหรับการตัดเหล็กเส้นเต็มความยาวมาตรฐาน 12 เมตร 1 เส้น) ในรูปตารางข้างล่างนี้ พบว่าคำตอบจากผู้ตอบทั้งหมด 60 ราย มีการใช้เหล็กเส้นเต็ม (nLS) ต่ำที่สุดเป็น 29 เส้น และสูงที่สุดเป็น 36 เส้น โดยผู้ตอบส่วนใหญ่คือ วิศวกร 24 ราย และช่างเหล็ก 24 ราย รวม 48 ราย มีการใช้เหล็กเส้นเต็ม (nLS) ไป 29 เส้น ผู้ตอบที่เหลือมีการใช้เหล็กเส้นเต็มเกินกว่า 29 เส้น ปริมาณเศษการตัดของเหล็กเส้นเต็ม (T_j) สั้นที่สุดเป็น 0.00 เมตร และยาวที่สุดเป็น 11.15 เมตร เท่ากันทั้งกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็ก ส่วนผลคำตอบของกลุ่มวิศวกรจะมีค่าเฉลี่ยและค่า S.D. มากกว่าของกลุ่มช่างเหล็กเล็กน้อย ค่า S.D. ที่ได้ค่อนข้างสูงแสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบไม่ปกติ มีการเอียงไปด้านขวา (right skewed or positively skewed distribution) ค่าต่างๆเหล่านี้แสดงในรูปตารางสรุปผลข้างล่าง

	nLS		Tj			
	Min	Max	Min	Max	Avg.	S.D.
EN	29	36	0.00	11.15	1.90	2.64
SW	29	30	0.00	11.15	1.82	2.60
ALL	29	36	0.00	11.15	1.86	2.62

รูปที่ 2.18 สรุปผลคำตอบปริมาณเศษการตัดจากกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็ก

	Trim Loss (m.) of Standard Length Stock																	
no.	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
EN01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.08	0.10	0.16	0.19	0.41	0.45	0.46	0.61	0.70	0.80
EN02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.18	0.18	0.36	0.42	0.46	0.61	0.74	0.74	0.80
EN03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.10	0.11	0.12	0.16	0.16	0.16	0.16	0.18	0.18	0.20	0.41	0.53
EN04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.11	0.12	0.15	0.19	0.20	0.30	0.41	0.45	0.46	0.53	0.71
EN05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.10	0.16	0.16	0.16	0.42	0.46	0.50	0.61	0.68	0.70	0.74	0.80
EN06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.24	0.35	0.36	0.41	0.41	0.42	0.46	0.55	0.57	0.70
EN07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.35	0.36	0.41	0.41	0.42	0.45	0.46	0.55	0.57	0.70
EN08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.08	0.11	0.16	0.36	0.41	0.45	0.46	0.61	0.70	0.80	1.20
EN09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.15	0.20	0.30	0.41	0.41	0.44	0.60	0.71	0.93	1.20	1.61
EN10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.15	0.35	0.41	0.41	0.51	0.57	0.61	0.74	0.74	0.80	0.85	0.98
EN11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.11	0.15	0.35	0.40	0.41	0.46	0.57	0.93	0.96	1.08	1.20	1.36
EN12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.08	0.15	0.40	0.41	0.46	0.74	0.74	1.01	1.06	1.24	1.26
EN13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.12	0.16	0.36	0.41	0.51	0.57	0.61	0.70	0.74	0.84	1.60	1.74
EN14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.15	0.20	0.35	0.53	0.57	0.74	0.74	0.85	1.06	1.11	1.36	1.58
EN15	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.12	0.16	0.16	0.46	0.47	0.53	0.61	0.69	0.69	0.70	0.74	0.77
EN16	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.11	0.15	0.46	0.74	0.74	0.77	0.85	0.93	1.06	1.08	1.20	1.21
EN17	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.11	0.11	0.15	0.20	0.35	0.46	0.61	0.74	0.74	0.80	0.93
EN18	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.11	0.11	0.15	0.20	0.35	0.74	0.74	0.93	1.08	1.24	1.26
EN19	0.00	0.00	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.15	0.20	0.35	0.40	0.41	0.42	0.46	0.66	0.74	0.85	0.93
EN20	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.05	0.08	0.11	0.15	0.20	0.35	0.36	0.41	0.41	0.57	0.74	0.74	0.93
EN21	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.15	0.35	0.41	0.41	0.53	0.74	0.74	0.75	0.85	0.96	0.98	1.11	1.26
EN22	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.08	0.20	0.36	0.41	0.42	0.45	0.61	0.71	0.93	1.15	1.20	1.20	1.36
EN23	0.00	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.15	0.16	0.20	0.30	0.36	0.41	0.46	0.61	0.75	0.85	0.93	1.08
EN24	0.00	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.11	0.12	0.15	0.20	0.41	0.42	0.61	0.74	0.75	0.93	1.20	1.24
EN25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.11	0.12	0.12	0.16	0.16	0.41	0.46	0.74	0.85	0.98	1.58
EN26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.18	0.20	0.30	0.74	0.74	1.21	1.40	1.80	2.00	2.04
EN27	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.20	0.51	0.61	0.74	0.74	0.75	0.80	0.98	1.20	1.20	1.42	1.60	1.80
EN28	0.00	0.00	0.02	0.08	0.41	0.45	0.47	0.51	0.98	1.20	1.20	1.42	1.46	1.64	1.80	1.80	2.00	2.09
EN29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.11	0.20	0.20	0.42	0.51	0.60	0.74	1.36	1.50	1.60	1.74
EN30	0.00	0.00	0.02	0.08	1.20	1.20	1.25	1.35	1.36	1.42	1.80	1.80	1.80	2.00	2.05	2.30	2.40	2.60
SW01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.11	0.15	0.36	0.41	0.63	0.85	1.20	1.20	1.25	1.26	1.69
SW02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.12	0.16	0.41	0.45	0.46	0.55	0.57	0.60	0.61	0.71	0.74	0.74
SW03	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.16	0.16	0.41	0.45	0.46	0.47	0.53	0.57	0.60	0.61	0.74	0.74	0.75
SW04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.08	0.15	0.16	0.20	0.30	0.36	0.41	0.46	0.61	0.75	0.85	1.25
SW05	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.15	0.41	0.41	0.53	0.57	0.66	0.75	0.85	1.24	1.25	1.26	1.53	1.69
SW06	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.15	0.20	0.35	0.36	0.41	0.41	0.46	0.75	0.85	1.25	1.26
SW07	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.19	0.20	0.35	0.41	0.41	0.45	0.46	0.57	0.75	0.96	1.20
SW08	0.00	0.01	0.02	0.02	0.05	0.05	0.08	0.15	0.35	0.41	0.46	0.75	0.85	1.20	1.20	1.24	1.26	1.64
SW09	0.00	0.00	0.02	0.08	0.10	0.20	0.36	0.41	0.42	0.46	0.57	0.74	0.74	0.90	1.40	1.48	1.50	1.50
SW10	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.08	0.11	0.15	0.51	0.57	0.85	0.98	1.06	1.20	1.20	1.25	1.36	1.46
SW11	0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.08	0.26	0.35	0.36	0.41	0.42	0.51	0.57	0.61	0.62	0.70	0.74	0.80
SW12	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.16	0.16	0.30	0.41	0.45	0.46	0.48	0.53	0.61	0.62	0.70	0.74
SW13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.11	0.18	0.18	0.36	0.46	0.61	0.74	0.74	0.80	0.93
SW14	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.05	0.08	0.18	0.18	0.44	0.61	0.63	0.70	0.75	0.80	1.01	1.20
SW15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.10	0.16	0.19	0.41	0.45	0.46	0.61	0.70	0.80	1.01
SW16	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.05	0.16	0.30	0.36	0.42	0.53	0.61	0.63	0.63	0.80	0.93	1.20
SW17	0.00	0.00	0.02	0.02	0.08	0.12	0.18	0.18	0.46	0.53	0.61	0.69	0.70	0.74	0.74	0.75	0.75	0.80
SW18	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.05	0.44	0.55	0.61	0.66	0.68	0.74	0.74	0.80	1.06	1.08	1.13
SW19	0.00	0.00	0.02	0.05	0.05	0.08	0.10	0.16	0.26	0.57	0.61	0.70	0.71	0.74	0.80	0.85	1.20	1.57
SW20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.03	0.10	0.16	0.16	0.46	0.61	0.70	0.74	0.74	0.80	0.90
SW21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.24	0.35	0.36	0.41	0.41	0.42	0.46	0.55	0.57	0.70	0.74	1.08
SW22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.12	0.35	0.36	0.41	0.42	0.46	0.57	0.70	0.74	0.74
SW23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.24	0.35	0.36	0.41	0.41	0.42	0.46	0.55	0.57	0.70	0.74	1.08
SW24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.08	0.11	0.24	0.35	0.36	0.41	0.41	0.42	0.46	0.55	0.57	0.70
SW25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.20	0.26	0.35	0.41	0.46	0.48	0.57	0.74	0.74	0.77	1.10	1.24	1.26
SW26	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.36	0.41	0.41	0.45	0.61	0.70	0.75	0.93	1.06	1.08	1.20	1.25	1.26
SW27	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.45	0.51	0.61	0.70	0.74	0.74	0.80	0.98	1.36	1.40	1.42	1.46	1.78
SW28	0.00	0.01	0.02	0.02	0.10	0.11	0.16	0.41	0.74	0.74	0.75	0.85	0.93	1.11	1.40	1.42	1.56	1.80
SW29	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.16	0.19	0.41	0.45	0.46	0.53	0.61	0.74	0.74	0.80
SW30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.11	0.12	0.12	0.16	0.16	0.41	0.46	0.74	0.77	0.85	0.98	1.58

รูปที่ 2.19 ผลคำตอบปริมาณเศษการตัดที่เกิดจากรูปแบบการตัดที่จัดขึ้นโดยแต่ละคน

	Trim Loss (m.) of Standard Length Stock																	
no.	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**	**25**	**26**	**27**	**28**	**29**	**30**	**31**	**32**	**33**	**34**	**35**	**36**
EN01	1.20	1.74	1.74	2.00	2.37	2.41	3.00	4.48	9.20	9.24	9.30							
EN02	1.01	1.20	1.42	2.95	3.00	3.20	3.96	4.24	7.00	8.80	9.20							
EN03	0.74	0.74	1.53	1.80	2.96	3.06	3.20	4.46	9.24	9.30	11.15							
EN04	0.74	1.26	1.48	1.80	2.67	3.00	3.36	3.49	9.24	9.30	10.60							
EN05	0.90	0.92	0.92	2.77	3.00	3.44	4.22	4.24	4.24	9.30	11.15							
EN06	0.74	1.74	2.00	2.20	2.22	3.00	3.96	5.00	5.60	9.24	10.30							
EN07	0.74	1.74	2.00	2.01	2.20	3.00	3.96	5.00	5.60	9.24	10.30							
EN08	1.40	1.74	1.74	2.00	2.41	2.45	3.00	4.22	7.80	9.24	9.30							
EN09	1.70	1.74	1.74	2.00	2.30	2.45	2.60	3.00	6.48	9.30	10.30							
EN10	1.20	1.26	1.60	2.01	2.50	2.60	3.00	3.20	7.00	8.80	10.30							
EN11	1.48	1.74	1.74	1.80	2.11	2.30	2.30	3.00	6.60	9.24	10.30							
EN12	1.80	2.00	2.00	2.11	2.24	2.30	3.00	3.20	6.60	8.60	9.24							
EN13	1.80	2.00	2.05	2.20	2.41	2.60	3.00	4.22	6.65	7.00	8.30							
EN14	1.80	2.24	2.30	2.60	2.90	3.00	3.20	4.70	5.60	6.01	7.00							
EN15	0.80	0.85	1.48	1.57	1.69	2.25	2.29	4.46	9.24	9.30	10.60							
EN16	1.26	1.36	1.74	1.74	2.29	2.30	2.40	3.20	6.60	9.20	9.24							
EN17	1.08	1.20	1.58	1.58	2.24	2.30	3.00	3.10	8.80	9.24	11.15							
EN18	1.53	1.58	1.58	1.61	1.80	2.24	3.00	3.10	7.80	8.17	11.15							
EN19	1.08	1.64	2.01	2.11	2.20	2.30	3.00	4.12	6.60	9.24	10.60							
EN20	1.26	1.53	1.80	2.45	3.00	3.10	3.12	3.81	5.60	9.24	10.60							
EN21	1.30	1.40	1.53	1.80	2.01	2.25	2.40	2.50	6.60	9.24	10.30							
EN22	1.50	1.50	1.53	1.69	1.74	2.30	3.76	3.96	6.01	8.30	9.24							
EN23	1.20	1.26	1.64	1.74	2.01	2.25	2.30	3.12	8.30	9.24	11.15							
EN24	1.69	1.70	1.80	2.15	2.31	2.60	2.74	3.08	6.48	8.80	10.30							
EN25	1.60	1.74	2.20	2.30	2.40	3.00	3.06	4.46	6.60	9.24	9.74	10.60						
EN26	2.08	2.10	2.11	2.41	2.50	2.60	2.77	3.06	4.24	8.80	9.20	10.12						
EN27	2.04	2.25	2.50	2.60	2.96	3.00	3.00	3.20	6.01	6.68	7.00	8.80						
EN28	2.30	2.40	2.60	3.00	3.00	3.00	3.44	4.40	4.61	4.81	5.00	6.60						
EN29	1.80	2.41	2.60	2.96	3.00	4.12	4.40	4.80	6.70	7.00	7.50	9.00	9.30					
EN30	2.96	3.00	3.72	4.48	4.81	5.00	5.00	5.24	5.24	6.00	6.01	6.40	6.60	7.25	8.60	8.79	10.00	10.96
SW01	1.74	2.00	2.01	2.40	2.60	3.00	3.00	3.12	4.81	6.48	10.30							
SW02	0.80	0.93	1.08	1.20	2.01	3.00	3.20	4.46	8.80	9.24	9.75							
SW03	1.24	1.30	1.48	2.09	2.31	3.20	3.34	3.40	6.10	9.24	10.30							
SW04	1.26	1.30	1.69	1.74	2.00	2.01	2.25	3.12	9.24	9.30	11.15							
SW05	1.74	2.01	2.24	2.25	2.30	2.81	2.90	3.40	3.40	7.00	9.24							
SW06	1.42	1.69	1.74	1.80	2.00	2.01	2.25	3.12	9.24	9.30	9.45							
SW07	1.48	1.74	1.74	1.80	2.00	2.25	2.30	2.37	9.24	9.30	10.30							
SW08	1.74	1.81	2.00	2.01	2.24	2.25	2.40	2.81	5.00	9.24	9.45							
SW09	1.60	1.80	2.01	2.11	2.30	2.80	3.46	3.96	4.80	6.80	8.17							
SW10	1.64	1.74	2.00	2.30	2.40	2.60	2.81	3.00	5.00	6.60	9.75							
SW11	1.20	1.69	1.74	1.80	2.00	2.60	3.00	3.96	6.60	9.30	10.30							
SW12	0.74	0.80	1.48	1.52	1.54	2.08	3.20	3.96	9.24	9.30	11.15							
SW13	1.01	1.08	1.20	1.26	2.95	3.00	3.12	3.20	8.80	9.24	10.60							
SW14	1.69	1.74	2.00	2.00	2.25	2.30	2.60	3.03	6.48	9.30	10.60							
SW15	1.08	1.20	1.74	1.74	2.00	2.37	3.00	4.48	8.17	9.30	10.60							
SW16	1.25	1.52	1.53	1.54	1.63	1.64	1.74	3.96	8.80	9.24	11.15							
SW17	1.01	1.26	1.48	1.50	2.00	2.37	3.20	3.36	8.60	9.24	9.30							
SW18	1.20	1.20	2.00	2.00	2.30	2.60	3.06	3.15	6.03	8.80	9.75							
SW19	1.64	1.74	2.00	2.55	2.60	3.00	3.39	3.72	4.48	7.80	9.30							
SW20	0.92	1.01	1.01	1.57	3.06	3.20	4.24	4.48	7.00	9.30	9.45							
SW21	1.69	2.00	2.11	2.22	2.25	3.00	3.60	3.96	5.00	8.17	10.30							
SW22	1.20	1.36	1.69	2.00	2.25	3.00	3.96	5.00	5.60	9.24	10.30							
SW23	1.69	2.00	2.22	2.25	2.30	2.81	3.00	3.96	5.60	8.17	10.30							
SW24	0.74	1.69	2.00	2.22	2.25	3.00	3.96	5.00	5.60	9.24	10.30							
SW25	1.58	1.80	2.00	2.11	2.31	3.20	3.72	5.53	6.00	7.30	8.24	10.30						
SW26	1.42	1.50	1.80	2.25	2.60	3.12	4.95	5.24	5.24	7.10	8.30	8.60						
SW27	1.80	1.81	2.00	2.09	2.30	2.60	3.00	3.40	5.00	6.60	9.30	9.74						
SW28	1.80	1.80	2.05	2.25	2.31	2.60	2.90	4.48	5.60	6.40	8.17	10.20						
SW29	1.01	1.20	1.48	2.37	2.60	3.06	3.10	4.12	8.17	8.80	10.60	10.93						
SW30	1.60	1.74	2.20	2.30	2.31	2.40	3.00	4.46	6.60	9.24	9.74	10.60						

รูปที่ 2.20 ผลคำตอบปริมาณเศษการตัดที่เกิดจากรูปแบบการตัดที่จัดขึ้นโดยแต่ละคน (ต่อ)

		Number of Trim Loss (T) in Different Ranges						
no.	nLS	T = 0	(0, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 1.00]	(1.00, 2.00]	(2.00, 4.00]	T > 4.00
EN01	29	5	7	3	3	4	3	4
EN02	29	5	6	3	4	3	4	4
EN03	29	4	12	1	3	2	3	4
EN04	29	4	8	4	3	3	4	3
EN05	29	4	6	3	8	0	3	5
EN06	29	4	5	6	4	2	4	4
EN07	29	4	4	7	4	2	4	4
EN08	29	4	6	4	3	5	3	4
EN09	29	4	5	4	3	6	4	3
EN10	29	4	3	3	8	3	5	3
EN11	29	4	4	4	3	7	4	3
EN12	29	4	5	3	2	7	5	3
EN13	29	4	4	2	6	4	5	4
EN14	29	4	4	1	5	5	6	4
EN15	29	3	6	2	9	3	2	4
EN16	29	3	5	1	5	8	4	3
EN17	29	2	9	2	5	4	4	3
EN18	29	2	9	1	3	8	3	3
EN19	29	2	7	5	4	2	5	4
EN20	29	2	8	4	4	3	5	3
EN21	29	2	4	3	7	6	4	3
EN22	29	2	5	4	3	9	3	3
EN23	29	1	8	4	4	5	4	3
EN24	29	1	9	2	4	5	5	3
EN25	30	4	8	2	3	3	5	5
EN26	30	4	6	1	2	4	9	4
EN27	30	3	3	0	7	5	8	4
EN28	30	2	2	3	2	8	8	5
EN29	31	4	6	1	3	5	4	8
EN30	36	2	2	0	0	10	7	15
SW01	29	4	5	2	2	7	6	3
SW02	29	4	4	3	9	2	3	4
SW03	29	3	4	4	7	3	5	3
SW04	29	3	7	4	3	6	3	3
SW05	29	3	3	2	5	6	8	2
SW06	29	3	6	5	2	7	3	3
SW07	29	3	6	5	3	6	3	3
SW08	29	1	7	3	2	8	5	3
SW09	29	2	4	4	4	6	6	3
SW10	29	3	5	0	4	9	5	3
SW11	29	3	3	5	7	5	3	3
SW12	29	3	5	5	7	3	3	3
SW13	29	5	6	2	5	4	4	3
SW14	29	3	7	1	5	6	4	3
SW15	29	5	6	3	3	6	2	4
SW16	29	2	6	3	6	8	1	3
SW17	29	2	6	1	9	5	3	3
SW18	29	3	4	1	7	7	4	3
SW19	29	2	6	1	7	5	5	3
SW20	29	4	7	1	7	3	2	5
SW21	29	4	3	6	4	3	6	3
SW22	29	4	5	5	4	4	3	4
SW23	29	4	3	6	4	3	6	3
SW24	29	4	5	6	4	2	4	4
SW25	30	4	2	5	4	6	4	5
SW26	30	3	2	4	4	8	3	6
SW27	30	3	2	1	7	8	5	4
SW28	30	1	6	1	5	7	5	5
SW29	30	3	7	3	5	3	4	5
SW30	30	4	7	2	4	3	5	5
SUM EN	883	97	176	83	124	141	137	125
	100%	11%	20%	9%	14%	16%	16%	14%
SUM SW	876	95	149	94	149	159	123	107
	100%	11%	17%	11%	17%	18%	14%	12%

รูปที่ 2.21 การกระจายของเศษการตัดในช่วงความยาวต่างๆ

	Total Trim Loss in Different Ranges (SUMIF)								
no.	T = 0	(0, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 1.00]	(1.00, 2.00]	(2.00, 4.00]	T > 4.00	SUMIF <12	SD
EN01	0.00	0.58	1.32	2.11	6.68	7.78	32.22	50.69	2.82
EN02	0.00	0.58	1.24	2.89	3.63	13.11	29.24	50.69	2.61
EN03	0.00	1.57	0.41	2.01	3.33	9.22	34.15	50.69	3.07
EN04	0.00	0.89	1.62	1.98	4.54	12.52	29.14	50.69	2.95
EN05	0.00	0.68	1.38	6.27	0.00	9.21	33.15	50.69	2.74
EN06	0.00	0.46	2.41	2.56	3.74	11.38	30.14	50.69	2.70
EN07	0.00	0.22	2.86	2.56	3.74	11.17	30.14	50.69	2.69
EN08	0.00	0.40	1.68	2.11	8.08	7.86	30.56	50.69	2.66
EN09	0.00	0.47	1.56	2.24	9.99	10.35	26.08	50.69	2.62
EN10	0.00	0.25	1.17	5.80	4.06	13.31	26.10	50.69	2.61
EN11	0.00	0.36	1.62	2.46	10.40	9.71	26.14	50.69	2.60
EN12	0.00	0.28	1.27	1.48	10.37	12.85	24.44	50.69	2.44
EN13	0.00	0.38	0.77	3.97	7.14	12.26	26.17	50.69	2.22
EN14	0.00	0.45	0.35	3.43	6.91	16.24	23.31	50.69	1.96
EN15	0.00	0.50	0.93	6.38	4.74	4.54	33.60	50.69	2.92
EN16	0.00	0.32	0.46	4.03	10.65	10.19	25.04	50.69	2.46
EN17	0.00	0.79	0.81	3.82	5.44	10.64	29.19	50.69	2.92
EN18	0.00	0.79	0.35	2.41	11.68	8.34	27.12	50.69	2.72
EN19	0.00	0.57	2.04	3.18	2.72	11.62	30.56	50.69	2.70
EN20	0.00	0.67	1.53	2.98	4.59	15.48	25.44	50.69	2.67
EN21	0.00	0.27	1.17	5.55	8.40	9.16	26.14	50.69	2.57
EN22	0.00	0.36	1.64	2.25	12.87	10.02	23.55	50.69	2.38
EN23	0.00	0.73	1.53	3.14	6.92	9.68	28.69	50.69	2.85
EN24	0.00	0.74	0.83	3.03	7.63	12.88	25.58	50.69	2.57
EN25	0.00	0.73	0.87	2.57	4.92	12.96	40.64	62.69	3.05
EN26	0.00	0.47	0.30	1.48	6.41	21.67	32.36	62.69	2.73
EN27	0.00	0.30	0.00	5.13	7.22	21.55	28.49	62.69	2.27
EN28	0.00	0.10	1.33	1.49	12.52	21.83	25.42	62.69	1.71
EN29	0.00	0.63	0.42	1.85	8.00	10.97	52.82	74.69	2.84
EN30	0.00	0.10	0.00	0.00	15.18	19.03	100.38	134.69	2.94
SW01	0.00	0.38	0.77	1.48	10.34	16.13	21.59	50.69	2.27
SW02	0.00	0.38	1.32	6.25	2.28	8.21	32.25	50.69	2.80
SW03	0.00	0.36	1.79	4.54	4.02	14.34	25.64	50.69	2.62
SW04	0.00	0.64	1.53	2.21	9.24	7.38	29.69	50.69	2.95
SW05	0.00	0.25	0.82	3.36	8.71	21.31	16.24	50.69	2.07
SW06	0.00	0.57	1.99	1.60	11.16	7.38	27.99	50.69	2.75
SW07	0.00	0.61	2.08	2.28	9.96	6.92	28.84	50.69	2.83
SW08	0.00	0.38	1.22	1.60	12.09	11.71	23.69	50.69	2.39
SW09	0.00	0.40	1.65	2.95	9.28	16.64	19.77	50.69	2.02
SW10	0.00	0.41	0.00	2.91	12.91	13.11	21.35	50.69	2.17
SW11	0.00	0.15	1.80	4.55	8.43	9.56	26.20	50.69	2.65
SW12	0.00	0.38	2.10	4.74	4.54	9.24	29.69	50.69	2.98
SW13	0.00	0.59	0.82	3.82	4.55	12.27	28.64	50.69	2.88
SW14	0.00	0.56	0.44	3.49	9.64	10.18	26.38	50.69	2.66
SW15	0.00	0.57	1.32	2.11	8.77	5.37	32.55	50.69	2.85
SW16	0.00	0.28	1.08	4.13	12.05	3.96	29.19	50.69	2.90
SW17	0.00	0.60	0.46	6.31	7.25	8.93	27.14	50.69	2.67
SW18	0.00	0.11	0.44	4.78	9.67	11.11	24.58	50.69	2.46
SW19	0.00	0.46	0.26	4.98	8.15	15.26	21.58	50.69	2.27
SW20	0.00	0.50	0.46	5.41	3.59	6.26	34.47	50.69	2.69
SW21	0.00	0.34	2.41	2.56	4.77	17.14	23.47	50.69	2.48
SW22	0.00	0.34	2.00	2.75	6.25	9.21	30.14	50.69	2.69
SW23	0.00	0.34	2.41	2.56	4.77	16.54	24.07	50.69	2.49
SW24	0.00	0.46	2.41	2.56	3.69	11.43	30.14	50.69	2.70
SW25	0.00	0.22	1.96	2.82	8.98	11.34	37.37	62.69	2.71
SW26	0.00	0.10	1.63	2.99	10.57	7.97	39.43	62.69	2.50
SW27	0.00	0.10	0.45	5.08	13.03	13.39	30.64	62.69	2.50
SW28	0.00	0.42	0.41	4.01	10.89	12.11	34.85	62.69	2.51
SW29	0.00	0.51	1.32	3.42	3.69	11.13	42.62	62.69	3.22
SW30	0.00	0.71	0.87	3.34	4.92	12.21	40.64	62.69	3.03
SUM EN	0.00	15.64	33.87	91.16	212.50	367.53	956.00	1676.70	2.64
	0%	0.93%	2.02%	5.44%	12.67%	21.92%	57.02%	100%	
SUM SW	0.00	12.12	38.22	105.59	238.19	337.74	860.84	1592.70	2.60
	0%	0.76%	2.40%	6.63%	14.96%	21.21%	54.05%	100%	

รูปที่ 2.22 ผลรวมของปริมาณเศษการตัดในช่วงความยาวต่างๆและค่า S.D.

	Total Trim Loss in Different Ranges (SUMIF)						
	T = 0	(0, 0.25]	(0.25, 0.50]	(0.50, 1.00]	(1.00, 2.00]	(2.00, 4.00]	T > 4.00
P value	N.A.	0.03	0.21	0.10	0.16	0.18	0.13
	N.A.	Reject Null	Accept Null	Accept Null	Accept Null	Accept Null	Accept Null

รูปที่ 2.23 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเศษการตัดระหว่างกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็กด้วย t-Test

t-Test: Two-Sample Assuming Unequal Variances		
	Variable 1	*Variable 2*
Mean	0.521333	0.404
Variance	0.083274	0.027466
Observations	30	30
Hypothesized Mean Difference	0	
df	46	
t Stat	1.931209	
P(T<=t) one-tail	0.029816	
t Critical one-tail	1.67866	
P(T<=t) two-tail	0.059633	
t Critical two-tail	2.012896	

รูปที่ 2.24 t-Test ของปริมาณเศษในช่วง (0, 0.25] ระหว่างกลุ่มวิศวกรและช่างเหล็ก

เศษการตัดที่เกิดจากรูปแบบการตัด (T_j) ได้ถูกนำการจัดเรียงเป็นกลุ่มตามช่วงความยาวต่างๆ กัน 7 ช่วง ได้แก่ T=0; 0 < T <= 0.25; 0.25 < T <= 0.50; 0.50 < T <= 1.00; 1.00 < T <= 2.00; 2.00 < T <= 4.00; และ T > 4.00 โดยเป็นการนับจำนวนท่อน และหาผลรวมความยาวของเศษการตัด แสดงผลในรูปตารางข้างบน พบว่าเศษการตัดของกลุ่มวิศวกรจะมีขนาดท่อนสั้นๆในช่วง [0, 0.25] และขนาดท่อนยาวๆ ในช่วง 2.00 เมตรขึ้นไป เป็นจำนวนมาก ในขณะที่ของกลุ่มช่างเหล็กจะมีขนาดท่อนในช่วงกลางๆ [0.25, 2.00] เป็นจำนวนมาก

เมื่อทำการเปรียบเทียบด้วยผลรวมปริมาณเศษในช่วงความยาวต่างๆ ก็พบแนวโน้มในลักษณะเดียวกันคือ เศษการตัดของกลุ่มวิศวกรจะมีขนาดท่อนสั้นๆในช่วง [0, 0.25] และขนาดท่อนยาวๆ ในช่วง 2.00 เมตรขึ้นไป เป็นจำนวนมาก ในขณะที่ของกลุ่มช่างเหล็กจะมีขนาดท่อนในช่วงกลางๆ [0.25, 2.00] เป็นจำนวนมาก ส่วนค่า Standard deviation (S.D.) ของเศษการตัดของแต่ละกลุ่ม พบว่า ของกลุ่มวิศวกรมีค่า S.D. สูงกว่าของช่างเหล็กเล็กน้อย แสดงถึงว่าเศษการตัดของวิศวกรจะประกอบไปด้วยท่อนที่มีขนาดต่างกันมากคือท่อนสั้นกับท่อนยาว แต่เศษการตัดของช่างเหล็กจะประกอบไปด้วยท่อนที่มีขนาดต่างกันน้อยกว่า การวิเคราะห์อีกมุมหนึ่ง คือหากกำหนดนิยามของเศษการตัดที่นำกลับไปใช้อีกไม่ได้ (scraps) เป็นเศษที่มีขนาดสั้นกว่า 4 เมตร จะพบว่ากลุ่มวิศวกรทำให้เกิดเศษปริมาณ (0 + 15.64 + 33.87 + 91.16 + 212.50 + 367.53) เท่ากับ 720.70 เมตร (หรือ 8.08% ของปริมาณเหล็กเส้นที่ต้องการใช้) ซึ่งน้อยกว่าปริมาณเศษที่เกิดจากกลุ่มช่างเหล็ก (0 + 12.12 +

38.22 + 105.59 + 238.19 + 337.74) เท่ากับ 731.86 เมตร (หรือ 8.21% ของปริมาณเหล็กเส้นที่ต้องการใช้)

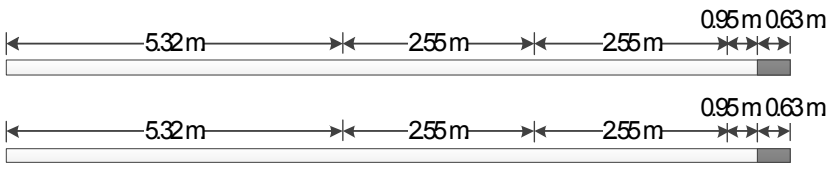
เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของเศษการตัดที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวต่างๆ จากสองกลุ่มตัวอย่างพบความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญเพียงในช่วงความยาว (0, 0.25) ที่กลุ่มวิศวกรทำให้เกิดเศษในช่วงนี้มากกว่ากลุ่มช่างเหล็ก อย่างไรก็ตามในช่วงความยาวอื่นๆที่เหลือไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยคิดเป็นปริมาณเศษเหล็ก (scraps) โดยเฉลี่ย 8.15% ของปริมาณเหล็กเส้นที่ต้องการใช้

2.7.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ

ข้อมูลเชิงคุณภาพที่ได้จากการสัมภาษณ์กลุ่มผู้ปฏิบัติงานจริงคือกลุ่มช่างเหล็กในเชิงลึก จำนวน 30 คน ถึงวิธีการจัดรูปแบบการตัด (cutting algorithms) ของแต่ละบุคคล เพื่อใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคลทั่วไป ได้แก่ อายุ ประสบการณ์ทำงาน และการให้ความสำคัญของผู้บริหารโครงการเกี่ยวกับการสูญเสียเหล็กเส้น จึงทำให้ทราบถึงปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อวิธีการจัดรูปแบบการตัดและปริมาณการสูญเสียเหล็กเส้น ข้อมูลอายุของช่างเหล็กถูกแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ 20-25 ปี, 26-30 ปี, 30-35 ปี และมากกว่า 35 ปี และข้อมูลประสบการณ์ทำงานที่เกี่ยวข้องกับการตัดเหล็กแบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือ 1-5 ปี, 6-10 ปี, 10-15 ปี และมากกว่า 15 ปี

ผลข้อมูลจากการสัมภาษณ์ช่างเหล็กถึงวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของแต่ละบุคคล พบว่า วิธีการจัดรูปแบบการตัด (cutting algorithms) มีลักษณะที่เป็นความคิดกระจัดกระจายที่ไม่ได้ถูกเรียบเรียงไว้ (tacit knowledge) แต่ละรายมีวิธีการที่ไม่แน่นอนชัดเจนขึ้นอยู่กับตัวโจทย์และประสบการณ์ส่วนบุคคล และไม่มีการสอนหรือถ่ายทอดให้กัน อย่างไรก็ตามวิธีการที่ช่างเหล็กเหล่านี้นำมาใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 มีวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น โดยจะตัดรายการเหล็กที่ต้องการใช้ก่อน ได้แก่ เหล็กเสริมหลักของโครงสร้าง และให้มีการเลือกจับคู่ท่อนความยาวที่ยาวมากกับที่สั้นมากไว้ด้วยกัน ตัวอย่างเช่น ต้องการเหล็ก DB28 ความยาว 5.32 เมตร จำนวน 2 ท่อน, ความยาว 2.55 เมตร จำนวน 4 ท่อน, ความยาว 0.95 เมตร จำนวน 2 ท่อน โดยใช้เหล็กเส้นเต็มความยาวมาตรฐาน 12 เมตร จะได้ลำดับการตัดดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มที่ 1

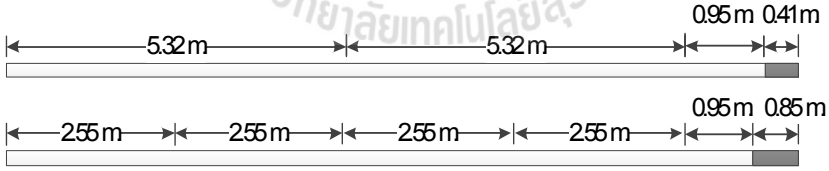
กลุ่มที่ 1 นี้ยังมีรายละเอียดของวิธีการที่ต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยได้อีก 3 กลุ่มย่อย ดังนี้

1. วิธีการเลือกการตัดเหล็กเส้นที่มีขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง) ใหญ่ก่อน เพราะเหล็กที่มีขนาดใหญ่เป็นเส้นตรงไม่ม้วนเหมือนเหล็กขนาดเล็ก ทำให้ตัดได้สะดวกกว่าเหล็กขนาดเล็ก และเลือกตัดรายการเหล็กที่เป็นเส้นตรง (ไม่ต้องมีการดัดเป็นรูปร่าง) ก่อน เพราะทำงานได้สะดวกและรวดเร็ว

2. วิธีการเลือกการตัดเหล็กเส้นที่มีขนาดใหญ่ก่อน เพราะเหล็กที่มีขนาดใหญ่เป็นเส้นตรงไม่ม้วนเหมือนเหล็กขนาดเล็ก ทำให้ตัดได้ง่ายกว่าเหล็กขนาดเล็ก และเลือกตัดรายการเหล็กที่ต้องนำมาดัดเป็นรูปร่างอีกก่อน เพราะรายการเหล็กที่ต้องดัดเป็นรูปร่างต่างๆ จะต้องเสียเวลาทำงานอีก จึงควรตัดรายการเหล่านี้ออกไว้ก่อน เพื่อให้ชุดคนงานที่มีหน้าที่ดัดเหล็กสามารถนำท่อนความยาวเหล่านี้ไปทำงานต่อไปโดยไม่ว่างงาน

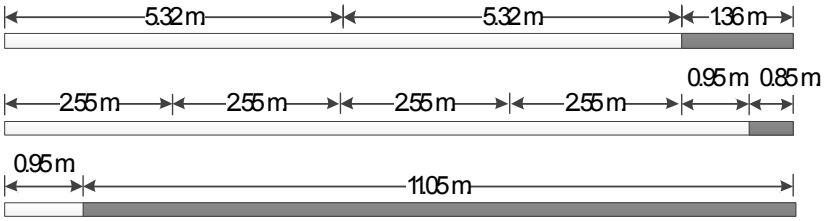
3. วิธีการเลือกการตัดเหล็กเส้นที่มีขนาด (เส้นผ่านศูนย์กลาง) เล็กก่อน เพราะเหล็กที่มีขนาดเล็กสามารถตัดได้ครั้งละหลายเส้นพร้อมกัน จึงทำให้ทำงานได้อย่างรวดเร็วและเลือกตัดรายการเหล็กที่ต้องนำมาดัดเป็นรูปร่างอีกก่อน เพราะรายการเหล็กที่ต้องดัดเป็นรูปร่างต่างๆ จะต้องเสียเวลาทำงานอีก จึงควรตัดรายการเหล่านี้ออกไว้ก่อน

กลุ่มที่ 2 มีวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น โดยจะตัดรายการเหล็กที่ต้องการใช้ก่อน มีการเลือกจับคู่ท่อนความยาวที่ต่างกันไม่เกิน 2 ขนาดความยาว เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย การวัดขนาดและทำการตัดได้ง่ายลดความผิดพลาดในการทำงาน ตัวอย่างเช่น ต้องการเหล็ก DB28 ความยาว 5.32 เมตร จำนวน 2 ท่อน, ความยาว 2.55 เมตร จำนวน 4 ท่อน, ความยาว 0.95 เมตร จำนวน 2 ท่อน จะได้ลำดับการตัดดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มที่ 2

กลุ่มที่ 3 มีวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น โดยยึดตามลำดับในรายการความต้องการ (bar cut list) ที่ได้มา จึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นการตัดที่ไม่มีการพิจารณาเลือกจับคู่ แต่จะตัดตามลำดับที่ปรากฏในรายการความต้องการ ที่ก็ไม่ได้เรียงลำดับไว้เพื่อให้การสูญเสียจากการตัดน้อย การตัดด้วยวิธีการนี้จึงไม่ได้คำนึงถึงความสูญเสียจากเศษการตัดที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ต้องการเหล็ก DB28 ความยาว 5.32 เมตร จำนวน 2 ท่อน, ความยาว 2.55 เมตร จำนวน 4 ท่อน, ความยาว 0.95 เมตร จำนวน 2 ท่อน จะได้ลำดับการตัดดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2.27 ตัวอย่างวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นของกลุ่มที่ 3

นอกจากนี้ ผลการเก็บข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อวิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้น มีปัจจัยต่างๆที่ศึกษา ได้แก่ อายุ ประสบการณ์ทำงาน (ที่เกี่ยวข้องกับการตัดเหล็กเส้น) และนโยบายของผู้บริหาร (ที่ให้ความสำคัญกับการสูญเสียเหล็กเส้นจากการตัด)

ผลการศึกษาปัจจัยส่วนบุคคลพบว่า อายุแปรผันตรงกับประสบการณ์การทำงาน คือผู้มีอายุน้อยจะมีประสบการณ์ทำงานน้อย และตรงข้าม พบว่าผู้ตอบแบบสอบถามช่วงอายุ 20-25 ปีและมีประสบการณ์ 1-5 ปี ใช้วิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่ก่อให้เกิดอัตราการสูญเสียมากกว่าร้อยละ 20 และยังพบว่าผู้ตอบแบบสอบถามช่วงอายุ 26-30 ปี, 30-35 ปี และมากกว่า 35 ปี ใช้วิธีการจัดรูปแบบการตัดเหล็กเส้นที่ก่อให้เกิดอัตราการสูญเสียใกล้เคียงกัน ประมาณร้อยละ 18 ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า อายุและประสบการณ์การทำงานของช่างเหล็ก มีส่วนทำให้กระบวนการคิดในการจัดรูปแบบและการจับคู่การตัดเหล็กเส้น มีความซับซ้อน และคำนึงถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการตัด และจากข้อมูลที่ได้จากการสำรวจยังชี้ให้เห็นว่าอุตสาหกรรรมการก่อสร้างของไทยยังมีอัตราการสูญเสียเหล็กเส้นจากการตัดที่สูงมาก

อีกทั้งยังพบว่าถ้าผู้บริหารมีนโยบายให้ความสำคัญกับการสูญเสียเหล็กเส้น มีการวางแผนการใช้งานวัสดุเหล็กเส้น และมีการจัดรูปแบบการตัด-ดัดเหล็กเส้นให้กับช่างเหล็กด้วยความช่วยเหลือจากวิศวกร การควบคุมการสูญเสียเหล็กเส้นและติดตามผลการทำงาน มีการปลูกฝังให้บุคลากรในองค์กรให้ความสำคัญเกี่ยวกับการจัดการเหล็กเส้น ก็จะช่วยให้ลดอัตราการสูญเสียเหล็กเส้นลงได้

2.7.4 สรุปผลการศึกษาสำรวจ

จากการศึกษาสำรวจโดยการตอบแบบสอบถามของผู้รับผิดชอบการตัดเหล็กเส้นจำนวน 60 คน แบ่งเป็นกลุ่มวิศวกรและกลุ่มช่างเหล็กอย่างละ 30 คน จากโครงการก่อสร้างจำนวน 17 โครงการ เพื่อศึกษาวิธีการจัดรูปแบบการตัด–ดัดเหล็กของวิศวกรและช่างเหล็ก และปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อวิธีการจัดรูปแบบการตัดที่ใช้ การสูญเสียเหล็กเส้นที่ศึกษานี้พิจารณาจากการจัดรูปแบบการตัดจากรายการความต้องการ (bar cut list) ที่เตรียมไว้เป็นโจทย์ปัญหา พบว่าโครงการก่อสร้างทั้งหมดมอบหมายให้ช่างเหล็กเป็นผู้ทำการจัดรูปแบบการตัด โดยวิศวกรเป็นผู้เตรียมรายการความต้องการเหล็กเส้นโดยไม่ได้มีการพิจารณาจัดเรียงลำดับให้เหมาะสมกับการตัด (ที่ยังไม่จัดเรียงลำดับเพื่อให้เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด) ดังนั้นช่างเหล็กของโครงการจึงเป็นผู้ทำหน้าที่พิจารณาจัดรูปแบบการตัดเพื่อให้

เกิดเศษมากน้อยตามวิธีการที่ตนเองสร้างขึ้น ซึ่งผลการศึกษาชี้ว่ามีปริมาณเศษการตัดรวมกันทุกขนาดความยาวสูงถึงประมาณ 18% ของปริมาณเหล็กที่ต้องการใช้ หรือหากพิจารณาปริมาณเศษการตัดเฉพาะแบบ scraps (ขนาดความยาวน้อยกว่า 4 เมตร) จะได้ปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยเป็น 8.15% ของปริมาณเหล็กที่ต้องการใช้ โดยเศษการตัดที่ได้จากกลุ่มวิศวกรและกลุ่มช่างเหล็กมีปริมาณไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญในแต่ละช่วงความยาวของเศษ ยกเว้นช่วงเศษขนาดสั้นมากที่ยาวน้อยกว่า 0.25 เมตร พบว่ากลุ่มวิศวกรทำให้เกิดเศษในช่วงนี้มากกว่ากลุ่มช่างเหล็กอย่างมีนัยยะสำคัญ และยังสังเกตุแนวโน้มได้ว่ากลุ่มวิศวกรจะสร้างเศษการตัดที่ประกอบด้วยขนาดท่อนที่สั้นมากและยาวมากผสมกัน โดยมีค่า S.D. ของขนาดเศษมากกว่าของช่างเหล็กเล็กน้อย แต่เศษการตัดของกลุ่มช่างเหล็กจะประกอบด้วยขนาดท่อนช่วงกลางๆ ซึ่งลักษณะเศษการตัดที่ประกอบด้วยขนาดท่อนที่ต่างกันมากๆหรือมี S.D. มากจะเป็นที่ปรารถนามากกว่า เนื่องจากหมายถึงเศษที่สามารถนำกลับไปใช้ได้อีกมีปริมาณมากกว่านั่นเอง

นอกจากนี้ผลการศึกษายังชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างอายุและประสบการณ์การทำงานของช่างเหล็ก กับปริมาณเศษการตัดที่เกิดขึ้น โดยช่างเหล็กที่มีอายุและประสบการณ์ทำงานมากกว่าจะมีอัตราการสูญเสียต่ำกว่า และนโยบายผู้บริหารก็มีส่วนช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานคือช่างเหล็กเกิดความคิดคำนึงถึงความสูญเสียเหล็กเส้น และกระตุ้นให้ช่างเหล็กคิดหาวิธีการจัดรูปแบบการตัดที่ช่วยลดเศษการตัดลงได้มากขึ้น

จากการพิจารณาวิธีการจัดรูปแบบการตัดของช่างเหล็ก พบว่าวิธีการจัดรูปแบบที่ซับซ้อนกว่าและมีการพิจารณาจับคู่จะช่วยให้เกิดอัตราการสูญเสียที่ต่ำกว่า วิธีการจัดรูปแบบที่ไม่มีการพิจารณาจับคู่หรือใช้การจัดรูปแบบเพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการตัดเพียงอย่างเดียว วิธีการจัดรูปแบบการตัดที่สำรวจพบได้ยังมีความหลากหลายไม่มีมาตรฐานหรือการสอนให้กันอย่างชัดเจน แต่กลับเป็นวิธีการที่ช่างเหล็กแต่ละบุคคลสร้างขึ้นเองตามประสบการณ์ทำงาน อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าวิธีการจัดรูปแบบที่ใช้ยังคงเป็นแบบอย่างง่าย ไม่มีความซับซ้อนเพียงพอที่จะทำให้ลดการสูญเสียจากการตัดได้อย่างมีนัยยะสำคัญ

2.8 สรุปการทบทวนวรรณกรรม

วัสดุคงคลังเชิงเส้นที่นำมาใช้เป็นกรณีศึกษาคือ วัสดุเหล็กเส้น ซึ่งเป็นวัสดุหลักอย่างหนึ่งในงานก่อสร้าง โดยเฉพาะโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่นิยมในประเทศไทย เหล็กเส้นที่มีปริมาณการใช้และราคาต้นทุนต่อหน่วยสูงเมื่อเทียบกับวัสดุเชิงเส้นอื่นๆของโครงการ ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ ท่อเหล็ก ท่อพีวีซี และไม้ เป็นต้น เหล็กเส้นเป็นวัสดุที่มีปริมาณงานอย่างสำคัญที่ต้องจัดให้มีชุดคนงานเฉพาะประจำเพื่อดำเนินการคือ กลุ่มคนงานช่างเหล็ก ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นจึงเป็นปัญหาที่สำคัญและท้าทายสำหรับการบริหารงานโครงการก่อสร้าง

2.8.1 บทวิจารณ์ลักษณะโมเดลปัญหา

เนื่องจากงานก่อสร้างมีหลากหลายขนาดและประเภทของโครงการ จึงทำให้ปัญหาการตัดของงานก่อสร้างอาจจัดอยู่ในกลุ่มประเภท (1/V/I/M) และ/หรือ (1/V/I/R) ตามระบบของ (Dyckhoff 1990) หรือเป็นแบบ Single Stock Size Cutting Stock Problem (SSSCSP) และ/หรือ Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ตามระบบการจำแนกของ (Wäscher, Haußner, and Schumann 2007)

ปัญหาการตัดวัสดุเชิงเส้นนี้ เป็นโมเดลปัญหาที่มีลักษณะเชิงซ้อน เสมือนกับมีปัญหา 2 ปัญหาซ้อนกันอยู่ คือปัญหาการหารูปแบบการตัดที่ดี (formation of efficient cutting patterns) และปัญหาการหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบที่ดีเหล่านั้น (optimization of cutting times) ซึ่งคำตอบจากปัญหาแรกจะเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาที่สอง จึงส่งผลต่อกันโดยตรง นอกจากนี้ความซับซ้อนของปัญหายังทำให้ต้องเกี่ยวข้องกับค่า parameters เป็นจำนวนมาก จึงทำให้มีแนวทางในการสร้างโมเดลปัญหาที่หลากหลาย และการพิจารณาเงื่อนไขต่างๆที่เกี่ยวข้อง เช่น contiguity, lot size, due date, availability of stock, leftovers

2.8.2 บทวิจารณ์วิธีการแก้ปัญหา

เนื่องจากโมเดลปัญหามีหลากหลายประเภท แต่ละประเภทก็เหมาะสมกับวิธีการแก้ปัญหาที่ต่างๆกัน แนวทางวิธีการแก้ปัญหาอาจแบ่งออกได้กว้างๆเป็นสองแนวทาง item-based approach และ pattern-based approach (Dyckhoff 1990) แนวทางทั้งสองนี้เหมาะสมกับลักษณะโจทย์ปัญหาที่ต่างกัน

Item-based approach เป็นการพิจารณาตัดวัสดุคงคลังที่ละเส้น โดยไม่มีการสร้างรูปแบบการตัดไว้ ซึ่งจะเหมาะโจทย์ปัญหาขนาดเล็ก หรือกลุ่มประเภท (1/V/I/R) หรือ Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ที่มี B_i เป็นตัวเลขน้อยๆ และ/หรือมีเงื่อนไขอื่นๆที่ซับซ้อน เช่น วัสดุคงคลังมีความยาวต่างๆกัน มีจำนวนวัสดุคงคลังไม่เพียงพอ แนวทางการแก้ปัญหานี้จะใช้ Heuristic algorithms แบบต่างๆที่คิดค้นขึ้น ได้แก่ First fit decreasing, Next-fit decreasing, Best fit decreasing, Sequential Heuristic Procedure (SHP), Exhaustive Repetition Heuristic อย่างไรก็ตาม Heuristic algorithm ของ SHP มีความยุ่งยากซับซ้อนในการโปรแกรม

Pattern-based approach เป็นการตัดวัสดุซ้ำตามรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นไว้ก่อน จะเหมาะกับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่ หรือกลุ่มประเภท (1/V/I/M) หรือ Single Stock Size Cutting Stock Problem (SSSCSP) ที่มี B_i เป็นตัวเลขมากๆ ประเด็นของแนวทางการแก้ปัญหานี้ คือจะสร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้อย่างไรและควรมีจำนวนเท่าไรดี ซึ่งหากสร้างรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้ทั้งหมดออกมาก็จะทำให้หาคำตอบในขั้นต่อไปได้ยากลำบาก แต่หากสร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้แล้ว การหาคำตอบที่เป็น

จำนวนการตัดซ้ำจะเป็นปัญหาที่มีลักษณะเป็น Optimization problem model โดยทั่วไป ซึ่งจะสามารถหาคำตอบได้หลายวิธี ได้แก่ Linear Programming (LP) Relaxation of Integer Problem (IP), Sequential Heuristic Procedure (SHP), Genetic Algorithm (GA), Evolutionary Programming (EP) อย่างไรก็ตามวิธี LP Relaxation of IP เป็นวิธีที่มีความยุ่งยากเพราะใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน วิธี Genetic Algorithm (GA) เป็นวิธีการค้นหาคำตอบประสิทธิภาพเหมาะสำหรับโจทย์ปัญหาขนาดใหญ่และต้องการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูง ซึ่งคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั่วไปในปัจจุบันก็มีศักยภาพในระดับที่ต้องการนั้น ดังนั้นวิธี GA จึงเป็นวิธีการหาคำตอบที่น่าสนใจ

2.8.3 บทวิจารณ์สภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นของไทย

สภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นของประเทศไทย มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับขนาดและประเภทของโครงการก่อสร้าง และการแบ่งงวดงานการตัดวัสดุคงคลังให้สอดคล้องกับแผนงานของโครงการ อย่างไรก็ตามสภาพที่เหมือนกันที่พบในการศึกษาสำรวจคือ หน้าที่การจัดรูปแบบการตัดวัสดุเป็นความรับผิดชอบของช่างเหล็ก ที่มีตำแหน่งเป็นหัวหน้าชุดหรือคนงาน ซึ่งอาจมีวิธีการในการจัดรูปแบบการตัดวัสดุหรือไม่มี ขึ้นอยู่กับอายุ ประสบการณ์ และนโยบายของผู้บริหาร โดยที่วิศวกรยังไม่มีบทบาทในการทำหน้าที่จัดรูปแบบการตัดวัสดุให้กับช่างเหล็ก เพียงแต่เตรียมรายการความต้องการ (bar cut list) ให้เท่านั้น ทั้งที่ปัญหาการตัดวัสดุเป็นปัญหาที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องกับการคำนวณขั้นสูงจึงจะสามารถหาคำตอบที่ดีได้ วิธีการที่ช่างหล็กใช้จึงเป็นเพียงการจัดรูปแบบด้วย algorithm อย่างง่ายที่คิดขึ้นเองโดยช่างเหล็กแต่ละคน มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Next Fit Decreasing Algorithm ที่ไม่สมบูรณ์ และเป็นวิธีการที่ไม่ใช้เครื่องช่วยคำนวณจึงมีข้อจำกัดในประสิทธิภาพของการหาคำตอบ หรือในกรณีร้ายคือไม่มีการจัดรูปแบบการตัดวัสดุเลย โดยมีทัศนคติเพียงเพื่อให้สะดวกต่อการทำงาน และให้เหตุผลว่าวัสดุเชิงเส้นเหล่านี้มีการคิดราคาเผื่อความสูญเสียไว้เพียงพอแล้ว แต่จากการศึกษาสำรวจพบว่าอัตราการสูญเสียที่เป็นจริงสูงมาก (มากกว่า 10%) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงวิธีการตัดวัสดุเชิงเส้นเพื่อลดการสูญเสียและชี้นำให้เห็นถึงผลประโยชน์ที่จะได้รับจากการตัดวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3 โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง

3.1 แนวคิดและหลักการ

โดยทั่วไปการใช้งานวัสดุคงคลังเช่นเหล็กเส้นในงานก่อสร้าง จะมีความต้องการใช้หลากหลายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งจำเป็นต้องแบ่งการพิจารณาปัญหาแยกออกจากกันเป็นขนาดละข้อ ไม่สามารถรวมการพิจารณาปัญหาที่มีวัสดุคงคลังหลายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางได้ อีกทั้งความต้องการใช้งานยังมีความหลากหลายไม่แน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแบบก่อสร้าง ประเภทและขนาดของสิ่งก่อสร้าง นอกจากนี้การตัดใช้วัสดุคงคลังยังมีการแบ่งทำงานเป็นงวดๆ ซึ่งทำให้ปริมาณความต้องการใช้ถูกแบ่งออกเป็น Lot ต่างๆ ตามกำหนดเวลาที่ต้องการนำไปใช้ ทั้งนี้อาจมีการวางแผนการตัดวัสดุคงคลังให้สอดคล้องกับแผนงานของโครงการก่อสร้าง ดังนั้นการจำแนกประเภทของปัญหาจึงอาจกว้างขวางครอบคลุมหลายประเภท

ลักษณะปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง สามารถจำแนกได้เป็นประเภท (1/V/I/M) และ/หรือ (1/V/I/R) ตามระบบการจำแนกของ (Dyckhoff 1990) หรือเป็นแบบ Single Stock Size Cutting Stock Problem (SSSCSP) และ/หรือ Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ตามระบบการจำแนกของ Wäscher et al. (2007) ซึ่งหมายถึงว่ามีสมมติฐานของโจทย์ปัญหาเป็นดังนี้

- วัสดุคงคลังเชิงเส้นมีความยาวมาตรฐานเพียงขนาดเดียว และมีจำนวนไม่จำกัด
- ท่อนความยาวที่ต้องการจำเป็นต้องตัดให้ได้ครบจำนวนตามที่ต้องการทั้งหมด
- ท่อนความยาวที่ต้องการมีลักษณะของขนาดคละคือ มีขนาดความยาวหลากหลายต่างๆกัน แต่ละขนาดอาจต้องการเป็นจำนวนมาก หรืออาจต้องการจำนวนเพียงไม่กี่ชิ้น

เนื่องจากความหลากหลายของลักษณะความต้องการใช้งานวัสดุคงคลังในงานก่อสร้างดังกล่าวข้างต้น ทำให้การ generalize โจทย์ปัญหาทำได้ยาก ผู้วิจัยอาจต้องทำการประดิษฐ์โจทย์ขึ้นใช้เอง โดยเทียบเคียบจากข้อมูลที่ได้จากโครงการก่อสร้างกรณีศึกษา ในทางตรงข้าม ประสิทธิภาพของวิธีการแก้ปัญหาโจทย์ขึ้นอยู่กับตัวโจทย์เองในบางส่วนด้วย นี่จึงเป็นข้อจำกัดของการวิจัยนี้

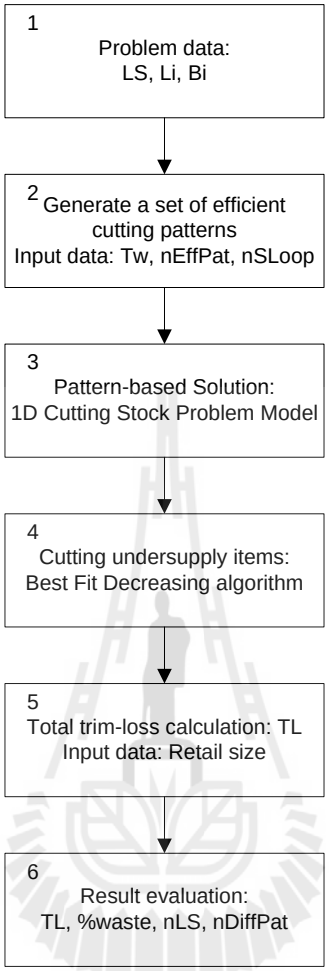
แนวทางวิธีการแก้ปัญหาจะเลือกใช้แบบที่เป็น pattern-based approach เนื่องจากเป็นแนวทางที่เหมาะสมกับลักษณะโจทย์ปัญหาที่มีวัสดุคงคลังที่มีความยาวมาตรฐานเพียงขนาดเดียวและมีจำนวนไม่จำกัด (1/V/I/M) และ/หรือ (1/V/I/R) จึงสามารถสร้างรูปแบบการตัดที่ดีเพื่อใช้ตัดซ้ำๆได้ นอกจากนี้ลักษณะโจทย์ที่อาจต้องการท่อนความยาวแต่ละขนาดเป็นจำนวนมากก็ยังเหมาะสมกับ pattern-based approach เพราะทำให้สามารถตัดท่อนความยาวที่ขนาดหนึ่งได้เป็นจำนวนมากๆ

แนวทางวิธีการแก้ปัญหาแบบ pattern-based approach นี้ ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักที่ต่อเนื่องกันอยู่ ได้แก่ ขั้นตอนการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี (Formation of Efficient Cutting-Patterns) และ ขั้นตอนการหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบการตัดที่ดี (Optimization of Cutting Stock Problem) ซึ่งขั้นตอนแรกนั้นจะส่งผลโดยตรงอย่างยิ่งต่อขั้นตอนที่สอง เนื่องจากหากสามารถสร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้จำนวนที่เหมาะสม ก็น่าจะทำให้การหาจำนวนครั้งของการตัดเป็นไปได้อย่างดี ได้ผลลัพธ์เหลือเป็นเศษการตัดที่น้อยตามที่ประสงค์ แต่การสร้างรูปแบบการตัดที่ดีนั้นเป็นประเด็นที่ซับซ้อน ต้องเริ่มจากการกำหนดวิธีการประเมินว่ารูปแบบการตัดหนึ่งๆ “ดี” เพียงไร และในโจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นหนึ่งโดยทั่วไป อาจมีรูปแบบการตัด “ที่ดี” เป็นไปได้อยู่เป็นจำนวนมากมายมหาศาล และจะเลือกนำมาใช้อย่างไร การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่การหาวิธี “สร้าง” รูปแบบการตัดที่ดีอย่างเหมาะสม

ส่วนขั้นตอนที่สองนั้น มีแนวทางการแก้ปัญหาสามทางหลักคือ วิธีแบบ Mathematical approach, Heuristic approach, และ Stochastic approach ซึ่งมีข้อดีข้อเสียดังนี้ วิธีแรกเป็นวิธีที่ใช้การคำนวณแก้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ด้วย Linear Programming หรือ Integer Programming ซึ่งทำให้ได้คำตอบโดยประมาณ วิธีนี้เป็นวิธีที่ยุ่งยาก วิธีที่สองเป็นการใช้ Heuristic algorithms อย่างง่ายๆในการหาคำตอบ เช่น Best Fit Decreasing, Worst Fit Decreasing แต่คำตอบที่ได้ไม่สามารถยืนยันได้ว่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และได้คำตอบเหมือนเดิมทุกครั้งสำหรับโจทย์หนึ่งข้อ วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก ใช้งานง่าย แต่จะทำให้ได้คำตอบดีเพียงพอหรือไม่ นอกจากนี้วิธีการใช้ Heuristic algorithms ยังมีวิธี Sequential Heuristic Procedure (SHP) (Haessler and Sweeney 1991) ที่ใช้การสร้างรูปแบบการตัดที่ดีเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งรูปแบบ โดยรูปแบบการตัดที่ดีที่สร้างขึ้นแล้วจะถูกนำมาใช้ตัดซ้ำให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ จากนั้นจึงปรับปรุงจำนวนความต้องการส่วนที่ยังเหลือ และสร้างรูปแบบการตัดเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งรูปแบบให้สอดคล้องกับจำนวนความต้องการส่วนที่ยังเหลือ นำไปตัดซ้ำให้มากที่สุด วนรอบเช่นนี้จนกระทั่งรายการความต้องการได้รับการตอบสนองทั้งหมดแล้ว วิธีนี้มีข้อเสียที่ให้คำตอบที่ไม่สม่ำเสมอในการหาคำตอบแต่ละครั้ง (runtime) ขึ้นอยู่กับรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นในแต่ละรอบซึ่งได้จากการสุ่มสร้างขึ้น และมักปรากฏว่าในรอบท้ายๆของการวนรอบจะเกิดเศษการตัดขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม่สามารถสร้างรูปแบบการตัดที่ดีได้จากรายการความต้องการที่เหลืออยู่ ทั้งสองเหตุผลนี้ทำให้อาจให้ผลลัพธ์สุดท้ายที่ดีมากหรือแย่มากก็ได้

วิธีที่สามเป็นการหาคำตอบด้วย Stochastic algorithms เช่น Genetic Algorithm ซึ่งเป็นวิธีที่กำลังเป็นที่นิยมในการวิจัย เนื่องจากมีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่ดีในเซ็ตของคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมากๆ อย่างไรก็ตามคำตอบที่ได้ก็ไม่ยืนยันว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด และคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งก็อาจเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งการวิจัยนี้เลือกใช้วิธีที่สามนี้ เนื่องจากเห็นว่าเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการหาคำตอบของปัญหาขนาดใหญ่ที่ซับซ้อน และไม่ใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ยุ่งยากซับซ้อนจึงเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

การแก้ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาขึ้นโดยการวิจัยนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ 6 ขั้นตอน ดังแสดงในแผนภาพข้างล่าง โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนจะนำเสนอแบ่งหัวข้อต่างๆ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการแก้ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาขึ้น

3.2 โจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง

ข้อมูลเบื้องต้นของโจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังสำหรับงานก่อสร้าง มีแหล่งที่มาจากแบบก่อสร้างโดยการถอดปริมาณความต้องการวัสดุออกมา รวมทั้งยังอาจมีการแบ่งงวดการทำงานตามแผนงานของโครงการ ซึ่งโจทย์ปัญหาหนึ่งโจทย์จะหมายถึง งวดงานการตัดวัสดุหนึ่งงวดที่แบ่งแยกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุให้มีเพียงขนาดเดียวแล้ว ข้อมูลโจทย์ประกอบด้วย

LS คือ ความยาวมาตรฐานของวัสดุคงคลัง,

L_i คือ ความยาวของท่อนที่ต้องการท่อนที่ i มีความยาวต่างๆกัน n ความยาว: (L_1, L_2, L_3, ..., L_n),

B_i คือ จำนวนที่ต้องการของแต่ละท่อนความยาว L_i หรือ Demand โดยที่ B_i จะต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม: (B_1, B_2, B_3, ..., B_n),

คำตอบของโจทย์ปัญหาคือวิธีการตัดวัสดุคงคลังเพื่อให้ได้จำนวนท่อนความยาวต่างๆครบถ้วนตามความต้องการ โดยให้เกิดเศษการตัดน้อยที่สุด

3.3 การสร้างรูปแบบการตัดที่ดี

แนวทางวิธีการแก้ปัญหาแบบ pattern-based approach จำเป็นต้องเริ่มจากการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี (Formation of Efficient Cutting-Patterns) ไว้เป็นจำนวนหนึ่ง เป็นขั้นตอนแรกที่สำคัญของการแก้ปัญหา รูปแบบการตัดที่เป็นไปได้จะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังนี้

P_j คือ รูปแบบการตัดแบบที่ j ใดๆ $P_j = [A_{1j}, A_{2j}, ..., A_{nj}]$ โดยที่

A_{ij} คือ จำนวนท่อนของการตัด L_i ดังนั้น A_{ij} จึงเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ศูนย์ขึ้นไป

T_j คือ เศษการตัดของรูปแบบ P_j ซึ่งคำนวณได้จาก $T_j = L_s - \sum_i^n (L_i \cdot A_{ij})$

ซึ่งรูปแบบการตัดที่เป็นไปได้จะมีอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่ง Pierce (1964) ได้เสนอ algorithm ที่ใช้ในการสร้างรูปแบบการตัดที่หลากหลายออกมาจำนวนมาก เกือบจะทั้งหมดที่เป็นไปได้ ซึ่งรูปแบบการตัดจำนวนมากมายเหล่านี้อาจทำให้ยากในการนำไปหาจำนวนตัดซ้ำ รูปแบบการตัดที่เป็นไปได้เหล่านี้จะถูกประเมินได้อย่างไรว่ารูปแบบใดเป็นรูปแบบที่ดี วิธีการประเมินที่ Vahrenkamp (1996) เสนอคือ รูปแบบการตัดที่ดี (efficient pattern) จะต้องมี $T_j \leq Min\ (L_i)$ หมายถึงเศษการตัดของ P_j จะต้องสั้นกว่าหรือเท่ากับ ท่อนความต้องการที่สั้นที่สุด และเขาได้เสนอ algorithm ที่ใช้หลักการค้นหาแบบสุ่ม (Random Search) ในการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีขึ้นมาจำนวนหนึ่งได้ นอกจากนี้เขายังได้กำหนดให้มีขอบเขตของเศษการตัดที่ยอมรับได้ขึ้น (acceptable trim of a pattern: T_w) ผลการวิจัยพบว่า Random Search นี้สามารถสร้าง รูปแบบการตัดที่ดีและที่ยอมรับได้เป็นจำนวนมากได้อย่างรวดเร็ว

3.3.1 หลักการของ Intensive Search Algorithm

อย่างไรก็ตาม รูปแบบการตัดที่ดีและที่ยอมรับได้อาจจะไม่ทำให้ได้คำตอบของปัญหาที่ดีเสมอไป เพราะการตัดวัสดุคงคลังจำเป็นต้องตัดให้ได้จำนวนครบตามท่อนความยาวที่ต้องการต่างๆ ความหลากหลายของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นน่าจะช่วยให้มีโอกาสทำให้ได้คำตอบที่ดีมากกว่า แต่การสุ่มโดยสมบูรณ์อาจทำให้เกิดการค้นหาที่สะเปะสะปะ และมักพบว่ากรณีที่มีจำนวนท่อนความยาวที่ต่างกัน (n) จำนวนมาก จะสร้างรูปแบบการตัดที่ได้ไม่ครบทุก L_i หมายถึงว่า L_i ที่ไม่มีในรูปแบบการตัดจะไม่สามารถถูกตัดได้ และมีแนวโน้มจะสร้างรูปแบบการตัดที่มี L_i ขนาดท่อนสั้นๆจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนา algorithm ที่ใช้สร้างรูปแบบการตัดที่ดีขึ้นใหม่ โดยอาศัยหลักการของการค้นหา

แบบสุ่ม Random Search ที่มีความสามารถในการสร้างรูปแบบการตัดที่หลากหลายไม่ซ้ำกันในแต่ละครั้ง โดยให้โอกาสการใช้ L_i ใดๆไปสร้างรูปแบบการตัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนความต้องการ B_i

ในทางตรงข้ามหากเพิ่มการควบคุมการสุ่มให้เป็นไปในทิศทางที่ต้องการ น่าจะช่วยให้ได้รูปแบบการตัดที่หลากหลายสอดคล้องกับโจทย์ความต้องการตัดนั้น เรียก algorithm ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ว่า Intensive Search มีขั้นตอนดังแสดงในรูปแผนภาพข้างล่างนี้

โดยที่ให้ T_w คือ เศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัดใดๆ

T_c คือ เศษการตัดปัจจุบันจากรูปแบบปัจจุบัน

P_c คือ รูปแบบการตัดปัจจุบันที่ได้จากการสุ่ม

L_c คือ ความยาวปัจจุบันของวัสดุ

L_S คือ ความยาวของวัสดุคงคลัง

L_i คือ ขนาดความยาวที่ต้องการ สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n

B_i คือ จำนวนท่อนของความยาว L_i ที่ต้องการ

P_j คือ รูปแบบการตัดที่กำลังสร้างที่ได้จากการสุ่ม

A_{ij} คือ จำนวนท่อนของการตัดท่อนความยาว L_i ของรูปแบบการตัด P_j

Min (L_i) คือ ขนาดที่สั้นที่สุดของท่อนความยาวที่ต้องการ

T_j คือ เศษการตัดของรูปแบบการตัด P_j

nEffPat คือ จำนวนรูปแบบการตัดที่ต้องการสร้างไว้

nSLoop คือ จำนวนการวนรอบเพื่อสร้างรูปแบบการตัดที่ดี

ขั้นตอนที่แสดงนี้เป็นการสร้างรูปแบบการตัดที่ให้เศษที่ยอมรับได้ ไม่เกินกว่า T_w และค้นหาไม่เกินจำนวนรอบการค้นหาที่กำหนดไว้เท่ากับ *nEffPat* และรูปแบบการตัดทั้งหมดที่สร้างขึ้นจะต้องไม่ซ้ำกันเลย อย่างไรก็ตามหากค้นหาจนเกินจำนวนรอบที่กำหนดอาจจะให้รูปแบบการตัดที่มี T_j มากกว่า T_w ได้

Pseudo-code ของ Intensive Search Algorithm มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Input T_w, *nEffPat*, *nSLoop*

FOR j = 1 TO *nEffPat*

Construct the j^{th} pattern (P_j)

Construct a current pattern (P_c)

DO WHILE not exceed *nSLoop*

$L_c = L_S$; $P_c = 0$; $A_{ic} = 0$

DO WHILE $L_c >= \text{Min}(L_i)$

Consider only L_i which $L_i <= L_c$

Pick one L_i using a weighted random wheel* (using V_i)

Choose randomly integer k in range [1, $Min(L_c/L_i, B_i - A_{ic})$]

Update $A_{ic} = A_{ic} + k$

Update $L_c = L_c - kL_i$

LOOP

The current pattern is completed

Evaluate the current pattern

IF ($T_c <= T_w$) AND (P_c differs from the existing P_j)

THEN

Accept P_c; $P_j = P_c$

ELSE

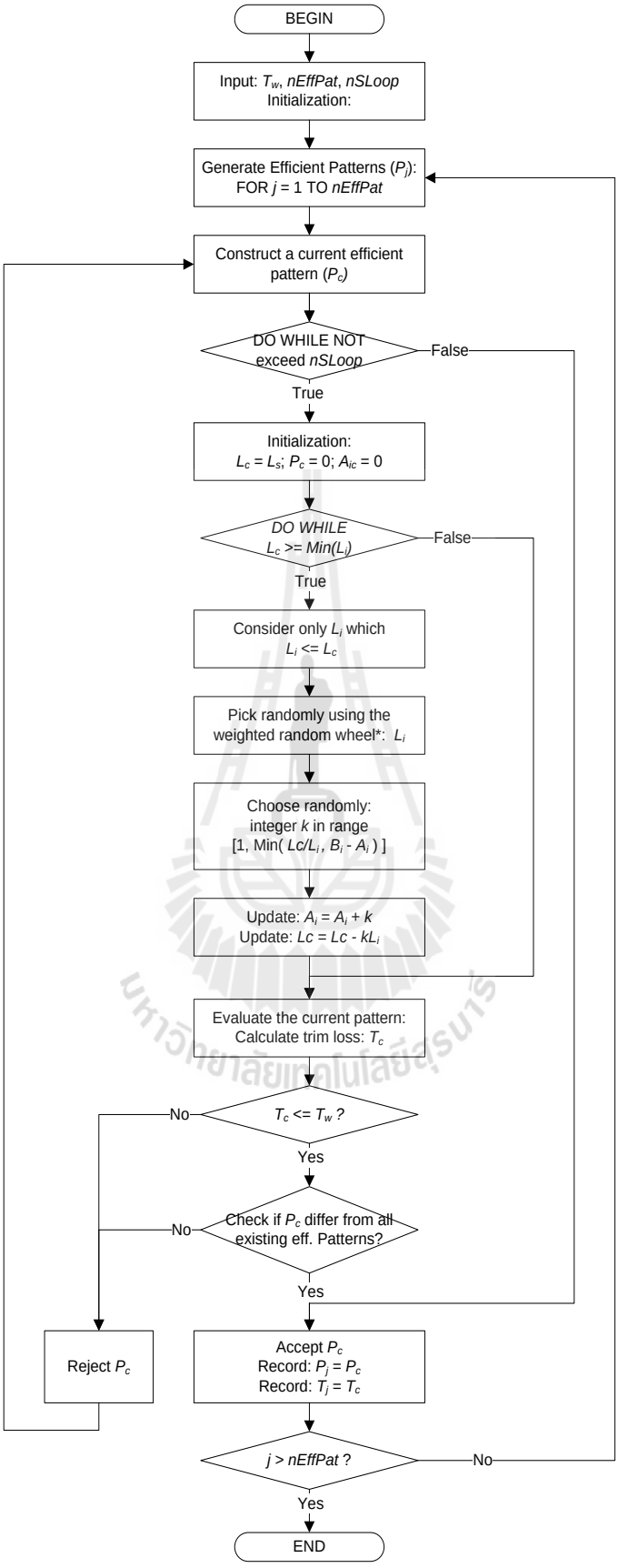
Reject P_c; Start over P_c

END IF

LOOP

NEXT *j*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.2 Flowchart ของ Intensive Search Algorithm

ขั้นตอนย่อยที่สำคัญในการสร้างรูปแบบการตัดคือ การสุ่มหยิบ L_i ด้วยการใช้ล้อหมุนสุ่มแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted random wheel) ซึ่งการวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการขึ้นมาใหม่โดยใช้ค่าดัชนี V_i (Availability Index) ในการควบคุมการสุ่มแบบถ่วงน้ำหนักนี้ ค่าดัชนี V_i นี้คือสัดส่วนระหว่างจำนวนท่อนความยาวที่ i ที่ต้องการกับผลรวมจำนวนตัดที่เกิดขึ้นในรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นแล้วในขณะนั้น แต่ละ L_i จะมีค่า V_i ที่คำนวณได้ของตัวเอง และค่า V_i นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆตลอดช่วงเวลาของกระบวนการสร้างรูปแบบการตัด

$$V_i = \begin{cases} B_i / \sum_i^c A_{ij}; \text{if } \sum_i^c A_{ij} > 0 \\ \text{else } 10000 \text{ or big number} \end{cases}$$

ซึ่งหากค่า V_i มีค่ามากหมายถึงว่า ในเซ็ตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นแล้วยังคงมี L_i นี้อยู่น้อย จึงควรเพิ่มโอกาสในการนำ L_i นี้ มาสร้างเป็นรูปแบบการตัดปัจจุบัน (current cutting pattern) ดังนั้นการสร้างรูปแบบการตัดปัจจุบันจึงใช้การสุ่มแบบถ่วงน้ำหนักเพื่อเพิ่มโอกาสการเลือกหยิบ L_i ที่มีค่าดัชนี V_i ที่มากกว่า ในทุกครั้งของการสุ่มหยิบ ในทางตรงข้ามหาก L_i ใดถูกนำไปใช้สร้างเป็นรูปแบบการตัดแล้วหลายครั้ง ก็ควรลดโอกาสการถูกเลือกอีกในการสร้างรูปแบบอันถัดๆไป ด้วยการปรับปรุงค่า V_i ให้น้อยลง และค่า V_i ของแต่ละ L_i นี้จะเปลี่ยนแปลงไปในทางลดลงเรื่อยๆเมื่อมีการสร้างรูปแบบการตัดที่ j ใหม่ๆขึ้น มีรายละเอียดดังตัวอย่างข้างล่างนี้

ตัวอย่าง กำหนดให้ L_i = {0.95, 1.40, 1.75, 1.80, 1.88} และ Bi = {25, 18, 14, 23, 7} สมมติให้รูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นได้แล้วมีจำนวน 10 รูปแบบ และสามารถนำมาคำนวณหา $\sum_j^c A_{ij}$ = {8, 3, 9, 4, 5} (เป็นผลรวมของค่า A_{ij} ของรูปแบบทั้ง 10 รูปแบบนั้น)

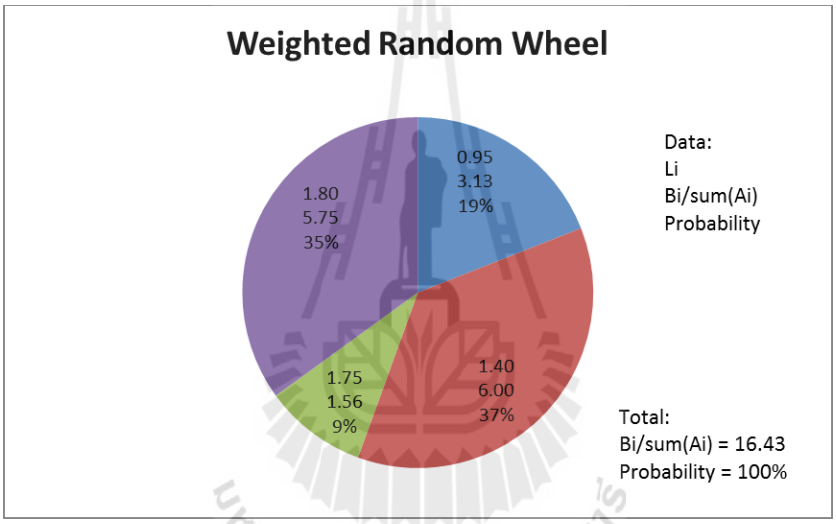
ปัจจุบันเป็นการสร้างรูปแบบการตัดที่ 11 ซึ่งคำนวณค่าดัชนี V_i ณ ขณะนี้ได้ V_i = {3.13, 6.00, 1.56, 5.75, 1.40} (ในกรณีที่หาก $\sum_j^c A_{ij}$ ใดเป็น 0 จะให้ V_i นั้นมีค่าเท่ากับ 10000 หรือเป็นค่า big number ทั้งนี้เพื่อบังคับให้ทุก L_i ต้องถูกเลือกอย่างรวดเร็วและปรากฏอยู่ในรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นอย่างน้อย 1 รูปแบบ)

หมายความว่า ท่อนความยาว 1.40 มีโอกาสถูกเลือกนำไปใช้ในการสร้างรูปแบบการตัดมากกว่าการเลือกท่อนความยาว 1.88 เนื่องจากมีค่าดัชนี V_i มากกว่า ขั้นตอนการสุ่มเลือกแบบถ่วงน้ำหนักทำโดย

กำหนดให้ ณ ขณะนั้น L_c = 1.85 เมตร นั้นหมายถึง L_i ที่สามารถเลือกใช้ได้เพียง 4 ความยาว ยกเว้นท่อนความยาว 1.88 เพราะยาวเกินกว่า L_c ล้อหมุนสุ่มแบบถ่วงน้ำหนัก (weighted random wheel) จะถูกสร้างขึ้นโดยแต่ละ L_i จะมีความน่าจะเป็นในการถูกเลือกเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าดัชนี V_i ของตัวเอง

นำค่าดัชนี V_i ของ 4 ความยาวที่เป็นไปได้มาหาค่าผลรวมได้ Sum(V_i) = 3.13 + 6.00 + 1.56 + 5.75 = 16.43 ตัวอย่างเช่น L_i = 0.95 มี Picking Probability = 3.13/16.43 = 19% เป็นต้น ดังนั้นในตัวอย่างนี้ จึงมีโอกาสสุ่มหยิบได้ L_i = 1.40 มากที่สุดด้วย Picking Probability = 6.00/16.43 = 37% หากถูกเลือกจริงก็จะเป็นการเพิ่ม L_i = 1.40 นี้ในรูปแบบการตัดปัจจุบันที่กำลังสร้างขึ้นใหม่

หลักการของการสุ่มหยิบ L_i ในการสร้างรูปแบบการตัดขึ้นใหม่จึงใช้ Weighted Random Wheel ที่ถ่วงน้ำหนักด้วยค่าดัชนี V_i ของ L_i นั้นเอง ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการสุ่มหยิบนี้คือ ได้รูปแบบการตัดที่ประกอบขึ้นด้วย L_i ที่หลากหลายที่สุดและเป็นสัดส่วนกับจำนวนที่ต้องการ (B_i) ในทางตรงข้ามวิธีการสุ่มหยิบโดยสมบูรณ์แบบที่เสนอโดยงานวิจัยที่ผ่านมา (Vahrenkamp 1996) ที่จะทำให้ได้รูปแบบการตัดที่ไร้ทิศทางและค่อนไปในทางที่ประกอบไปด้วย L_i ท่อนสั้นๆ เนื่องจากขนาดท่อนสั้นสามารถตัดได้หลายครั้ง



รูปที่ 3.3 ตัวอย่าง Weighted Random Wheel ในการสุ่มหยิบ L_i

3.3.2 การทดสอบและผล

การทดสอบ Intensive Search Algorithm ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำโดยใช้โจทย์ทดสอบที่เตรียมขึ้นจากโครงการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโครงการหนึ่ง โดยโจทย์ทดสอบนี้เป็นรายการความต้องการใช้เหล็กเส้นที่ใช้เป็นตัวแทนของงานการตัดเหล็กเส้นโดยทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลหลัก คือ ความยาวท่อนต่างๆ (L_i) จำนวนท่อนที่ต้องการ (B_i) และ ความยาวของเหล็กเส้นคงคลังมาตรฐาน (L_s) ดังแสดงในรูปตารางข้างล่าง กำหนดให้เหล็กเส้นคงคลังมาตรฐานมีจำนวนไม่จำกัด ขนาดความยาวเส้นละ 10 เมตร ความยาวท่อนต่างๆกัน (n) 15 ขนาด แต่ละขนาดมีความต้องการใช้เป็นจำนวนท่อนต่างๆกัน รวมทั้งสิ้น 261 ท่อนที่ต้องตัด หรือเฉลี่ย 17.4 ท่อนต่อความยาวหนึ่งขนาด ขนาดคละ (assortment) ของรายการนี้แบ่งช่วงความยาวเป็น 3 ช่วงด้วยอัตราส่วน (L_s/L_i) คือ >5, >2 และ <=

2 มีจำนวนท่อนที่ต้องการในแต่ละช่วงเหล่านี้เท่ากัน รวมความยาวเหล็กเส้นที่ต้องการในรายการทั้งสิ้น 918.73 เมตร

i	L_i	B_i
1	0.95	25
2	1.40	18
3	1.75	14
4	1.80	23
5	1.88	7
6	2.67	22
7	2.88	10
8	3.05	36
9	3.20	4
10	3.75	15
11	5.00	26
12	5.40	19
13	6.35	7
14	7.00	23
15	7.19	12

รูปที่ 3.4 รายการความต้องการของโจทย์ทดสอบ

Intensive Search Algorithm ที่พัฒนาขึ้นนี้ยังต้องการค่าพารามิเตอร์บางตัวสำหรับใช้กำหนดในกระบวนการสร้างรูปแบบอีกด้วย ได้แก่ เศษการตัดที่ยอมรับได้ (allowable trim loss: T_w) จำนวนรูปแบบในเซ็ตของรูปแบบการตัด (number of cutting patterns in the set: *nEffPat*) และจำนวนการวนรอบสูงสุดสำหรับการค้นหา (maximum searching loop: *nSLoop*) โดยในการทดสอบนี้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้ไว้ดังนี้ T_w = 0.20 เมตร; *nEffPat* = 30; และ *nSLoop* = 500 รูปตารางข้างล่างแสดงตัวอย่างเซ็ตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นด้วย Intensive Search Algorithm เป็นรูปแบบการตัดต่างๆ (P_j) ที่ไม่ซ้ำกันเลยจำนวน 30 รูปแบบ (j = 1 to 30) ที่แต่ละรูปแบบมีเศษเกิดขึ้น (T_j) ไม่เกิน (T_w = 0.20) และยังแสดงคอลัมน์ของค่า $\sum_j^c A_{ij}$ และค่า V_i ที่คำนวณขึ้นใช้ในระหว่างกระบวนการสร้าง

i	*Li*	*Bi*	*Pc*	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	*Sum(Aij)*	*Vi*
1	0.95	25				1		1				1	9	1		1		3									2	1			1	7	1	29	0.86
2	1.40	18			2								1			1	1			2	1		1	2		3				1	2		1	18	1.00
3	1.75	14		2							1						2							4				1						10	1.40
4	1.80	23					1					2		1				1	2											3				10	2.30
5	1.88	7				1									2							1				3						4	11	0.64
6	2.67	22					3				1							2				1			1		1							9	2.44
7	2.88	10						2																					1					3	3.33
8	3.05	36							2						2						1									1	2			8	4.50
9	3.20	4						1															1									1		3	1.33
10	3.75	15							1							2																		3	5.00
11	5.00	26								2							1																	3	8.67
12	5.40	19									1	1									1	1	1				1							6	3.17
13	6.35	7		1															1															2	3.50
14	7.00	23				1														1									1					3	7.67
15	7.19	12			1									1											1			1						4	3.00
			Tc	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30		
			10.00	0.15	0.01	0.17	0.19	0.09	0.15	0.00	0.18	0.05	0.05	0.06	0.14	0.15	0.10	0.01	0.05	0.20	0.15	0.05	0.00	0.20	0.14	0.16	0.03	0.11	0.12	0.15	0.15	0.15	0.13		

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างเซ็ตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นได้

เนื่องจากวิธีการสร้างรูปแบบการตัดมีพื้นฐานจากการสุ่ม ทำให้ผลที่ได้จากการสร้างในแต่ละคราวไม่เหมือนเดิม การทดสอบจึงแบ่งออกเป็น 6 ชุด โดยที่ ชุดที่ 1, 2, และ 3 จะใช้ Random Search Algorithm ในกระบวนการสร้าง โดยจะใช้สามชุดนี้เป็นกลุ่มควบคุม และชุดที่ 4, 5, และ 6 จะใช้ Intensive Search Algorithm ในแต่ละชุดจะกำหนดให้สร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดขึ้นเป็นจำนวน 100 เซ็ต ซึ่งใน 1 เซ็ต จะมีรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นต่างกัน 30 รูปแบบ รวมเป็น 3000 รูปแบบต่อหนึ่งชุดทดสอบ ผลการทดสอบจะถูกนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกันในประเด็นต่างๆ

ประเด็นที่หนึ่ง คือปริมาณเศษการตัดของรูปแบบ (T_j) ดังแสดงผลสรุปในรูปตารางข้างล่างนี้ จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการสร้างรูปแบบการตัดด้วย algorithms ทั้งสอง หรือในกระบวนการสร้างแต่ละคราว ให้ค่าเฉลี่ยและค่า S.D. ของเศษการตัดไม่แตกต่างกัน algorithms ทั้งสองจึงให้ผลลัพธ์ที่สม่ำเสมอน่าเชื่อถือด้วย ทั้งนี้ขนาดของเศษการตัดถูกควบคุมโดยการกำหนดขนาดของเศษการตัดที่ยอมรับได้ (T_w = 0.20) และผลค่าเฉลี่ยและค่า S.D. ที่ได้มีค่าต่ำแสดงถึงผลลัพธ์ที่ดี

Testset	Average	S.D.
1	0.097	0.063
2	0.097	0.063
3	0.099	0.062
4	0.099	0.062
5	0.099	0.063
6	0.099	0.062

รูปที่ 3.6 ค่าเฉลี่ยและค่า S.D. ของเศษการตัดของรูปแบบ (T_j) ที่สร้างขึ้น

รูปตารางข้างล่างแสดงจำนวนรูปแบบการตัดที่ให้เศษในช่วงต่างๆกัน ได้แก่ ช่วง $T_j = 0$; $0 < T_j <= 0.1$; $0.1 < T_j <= 0.2$; $0.2 < T_j <= 0.3$; $0.3 < T_j <= 0.4$; และ $T_j > 0.4$ โดยจะพบว่ารูปแบบการตัดที่ถูกสร้างขึ้นทั้งหมดให้เศษการตัดไม่เกิน T_w = 0.20 แสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมเศษการตัดของ algorithms ทั้งสอง และทั้งสอง algorithms ยังสร้างรูปแบบการตัดที่ให้เศษการตัดแตกต่างกันเล็กน้อย

Testset	=0	(0, 0.1]	(0.1, 0.2]	(0.2, 0.3]	(0.3, 0.4]	>0.4	Sum
1	339	1185	1476	0	0	0	3000
2	345	1188	1467	0	0	0	3000
3	331	1172	1497	0	0	0	3000
4	332	1118	1550	0	0	0	3000
5	343	1095	1562	0	0	0	3000
6	350	1086	1564	0	0	0	3000

รูปที่ 3.7 การกระจายของขนาดเศษการตัดของรูปแบบ (T_j)

ประเด็นทีสอง คือการตรวจวัดและวิเคราะห์ความหลากหลายของขนาดท่อนความยาว (L_i) ในรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น ดัชนี Shannon-Weiner' richness index (Spellerberg and Fedor 2003) เป็นค่าดัชนีที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการวิจัยเกี่ยวกับความหลากหลายของประชากรสิ่งมีชีวิต และได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์นี้ richness index จะตรวจวัดปริมาณความหลากหลายของประเภทในชุดข้อมูล รวมทั้งจำนวนประชากรที่มีอยู่ในแต่ละประเภทเหล่านั้น ค่าของดัชนีจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนประเภทและจำนวนประชากรเพิ่มขึ้น สำหรับจำนวนประเภทที่กำหนดจำนวนหนึ่ง ค่าของดัชนีจะสูงที่สุดเมื่อแต่ละประเภทมีจำนวนประชากรอยู่เป็นจำนวนมากอย่างละเท่าๆกัน สมการคำนวณค่าดัชนีเป็นดังนี้

$$H = -\sum_{i=1}^{n} Q_i \cdot \ln(Q_i)$$

เมื่อให้

H = Shannon-Weiner' richness index

Q = สัดส่วนของจำนวนประชากรประเภทที่ i^{th} ของชุดข้อมูล

i	*Li*	*Bi*	*Qi* = *Bi*/Sum(*Bi*)	*ln(Qi)*
1	0.95	25	0.096	-0.225
2	1.40	18	0.069	-0.184
3	1.75	14	0.054	-0.157
4	1.80	23	0.088	-0.214
5	1.88	7	0.027	-0.097
6	2.67	22	0.084	-0.208
7	2.88	10	0.038	-0.125
8	3.05	36	0.138	-0.273
9	3.20	4	0.015	-0.064
10	3.75	15	0.057	-0.164
11	5.00	26	0.100	-0.230
12	5.40	19	0.073	-0.191
13	6.35	7	0.027	-0.097
14	7.00	23	0.088	-0.214
15	7.19	12	0.046	-0.142
Sum(*Bi*)		261	1.000	2.585

รูปที่ 3.8 ผลค่าดัชนี richness ของโจทย์รายการความต้องการ

นอกจากที่เซ็ตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นควรจะมีเศษการตัดน้อยแล้ว ยังต้องมีความหลากหลาย ซึ่งหมายถึงเป็นรูปแบบที่ประกอบได้ด้วยขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่างๆกันในปริมาณที่สัมพันธ์กับจำนวนชิ้นที่ต้องการ จึงจะทำให้เซ็ตของรูปแบบการตัดที่ได้นี้นำไปใช้ในงานการตัดเพื่อให้เกิดเศษการตัดโดยรวมต่ำที่สุด ดังนั้นค่าความหลากหลายของเซ็ตรูปแบบการตัดจึงควรถูกตรวจวัดและวิเคราะห์ด้วย โดยโจทย์รายการความต้องการที่กำหนดขึ้นนั้นมีค่าดัชนี richness เท่ากับ 2.585 ดังแสดงในรูปข้างบน

เซ็ตรูปแบบการตัดที่ดีควรจะมีค่าดัชนี richness ที่ใกล้เคียงกับโจทย์เพื่อให้มีความหลากหลายของขนาดท่อนความยาวและจำนวนกระจายอยู่ในเซ็ตเป็นสัดส่วนคล้ายคลึงกับโจทย์ ในการทดสอบนี้แต่ละชุดทดสอบมีจำนวนเซ็ตรูปแบบการตัดอยู่ 100 เซ็ต ซึ่งแต่ละเซ็ต (ประกอบด้วยรูปแบบการตัด 30 รูปแบบ) จะสามารถหาค่าดัชนี richness (*H*) ได้หนึ่งค่า รูปตารางข้างล่างนี้แสดงผลค่าเฉลี่ยของ *H* ของชุดทดสอบต่างๆทั้ง 6 ชุด

Testset	Complete	Incomplete	Avg. H
1	86	14	2.367
2	83	17	2.379
3	79	21	2.379
4	100	0	2.526
5	100	0	2.530
6	100	0	2.530

รูปที่ 3.9 ผลค่าเฉลี่ยของดัชนี richness ของชุดทดสอบ

ผลของเซ็ตรูปแบบการตัดในชุดการทดสอบที่ 1, 2, และ 3 ที่ได้จาก Random Search Algorithm นั้น มีความไม่สมบูรณ์อยู่ คือมีบางเซ็ตรูปแบบการตัดที่มีท่อนความยาวไม่ครบทุกขนาดตามที่ต้องการ (ในโจทย์รายการความต้องการมีขนาดท่อนความยาวที่ต้องการต่างๆกันอยู่ 15 ขนาด) เซ็ตเหล่านี้จึงเป็นเซ็ตที่ไม่สมบูรณ์ เพราะไม่สามารถนำไปใช้ในงานการตัดเพื่อให้ได้ชิ้นงานครบทุกชิ้นตามรายการความต้องการได้ เซ็ตที่ไม่สมบูรณ์จึงเป็นเซ็ตรูปแบบการตัดที่ใช้ไม่ได้ (invalid) ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าในชุดทดสอบที่ใช้ Random Search Algorithm นั้น ให้เซ็ตที่ไม่สมบูรณ์อยู่จำนวนหนึ่ง ประมาณ 17% ในขณะที่ชุดทดสอบที่ใช้ Intensive Search Algorithm กลับให้ผลคำตอบเป็นเซ็ตที่สมบูรณ์ทั้งหมด จึงแสดงถึงประสิทธิภาพของ Intensive Search Algorithm ที่เหนือกว่า ทั้งนี้เพราะตัว algorithm มีการควบคุมการเลือกท่อนความยาว L_i มาใช้ในการสร้างรูปแบบการตัด แบบสุ่มแต่ไม่สะเปะสะปะ นอกจากนี้ค่าดัชนีเฉลี่ย *H* ของชุดทดสอบที่ได้จาก Intensive Search Algorithm ยังมีค่ามากกว่าและใกล้เคียงกับค่าดัชนี *H* ของโจทย์มากกว่าอีกด้วย จึงหมายถึงรูปแบบการตัดที่ได้มีความหลากหลายของท่อนความยาวที่ดีกว่าใกล้เคียงกับของโจทย์

สรุปผลการพัฒนาและทดสอบ Intensive Search Algorithm สำหรับการสร้างรูปแบบการตัดได้ว่า algorithm นี้ให้ผลที่ดีขึ้น โดยยังคงใช้ข้อดีของการสร้างรูปแบบการตัดด้วยการสุ่มค้นหา แต่

เพิ่มส่วนการควบคุมการสุ่มให้เป็นแบบถ่วงน้ำหนักตามสัดส่วนความมีอยู่ของท่อนความยาวต่างๆ แทนที่จะเป็นการสุ่มอย่างอิสระ โดยการถ่วงน้ำหนักนี้ทำโดยการใช้ล้อหมุนถ่วงน้ำหนักไปตามค่าดัชนี Availability Index ของแต่ละขนาดท่อนความยาวที่ต้องการ ทำให้รูปแบบการตัดที่ได้มีความหลากหลายและประกอบด้วยท่อนความยาวที่ต้องการครบทุกขนาด สามารถนำไปใช้ในงานการตัดได้ และยังควบคุมให้รูปแบบการตัดที่ได้ไม่ซ้ำกันและมีเศษการตัดไม่เกินกว่าขนาดที่ยอมรับได้ ซึ่งผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า Intensive Search Algorithm สามารถใช้สร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดที่ดีได้ตามประสงค์ และมีความสม่ำเสมอในแต่ละครั้ง Intensive Search Algorithm นี้ถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรมกระดานคำนวณเป็นแบบ embedded macros

3.4 การหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบการตัดที่ดี

ขั้นตอนการหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบการตัดที่ดี เป็นขั้นตอนต่อจากการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี โดยอาจเรียกว่าเป็นส่วนหลักของ โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้าง (Optimization of Cutting Stock Problem) วิธีการหาจำนวนครั้งของการตัดมีได้หลายแนวทาง ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมสรุปว่า วิธีที่จะให้ผลคำตอบได้ดีเพียงพอ ไม่ต้องการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน และได้คำตอบที่ดีสม่ำเสมอทุกครั้ง คือวิธี Stochastic algorithms ด้วย Genetic Algorithm ดังนั้นโมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นในการวิจัยนี้จึงถูกพัฒนาขึ้น

ส่วนประกอบหลักของโมเดลปัญหาแบ่งเป็น 3 ส่วนเหมือนกับโมเดลปัญหาการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยทั่วไป (Optimization problem) คือ ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function) และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งรายละเอียดของส่วนประกอบหลักของโมเดลที่สร้างขึ้นมีดังนี้

3.4.1 ตัวแปรตัดสินใจ

หรือตัวแปรที่เป็นคำตอบของโมเดลปัญหานี้คือ จำนวนครั้งของการตัดรูปแบบการตัด ซึ่งเป็นตัวแปรตัดสินใจของโมเดลปัญหาที่ใช้แนวทางวิธีการแก้ปัญหาที่เป็นแบบ pattern-based approach กำหนดให้เป็น

Decision variables: X_j

โดยที่: X_j คือ จำนวนครั้งการตัดวัสดุคงคลังตามรูปแบบ P_j สำหรับ j ตั้งแต่ 1 ถึง m

อย่างไรก็ตามในความเป็นจริง ตัวรูปแบบการตัดที่ดี (efficient cutting patterns) ที่สร้างขึ้นได้จากขั้นตอนแรก (P_j) ก็ถือได้ว่าเป็นส่วนหนึ่งของคำตอบของโมเดลปัญหา

ช่วงของค่าตัวแปรตัดสินใจ (ranges of decision variables) การกำหนดช่วงของค่าตัวแปรตัดสินใจช่วยให้การ optimization เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วมีประสิทธิภาพขึ้นมาก เพราะเป็นการจำกัด

ขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ให้แคบลง ทั้งนี้งานของ Salem et al. (2007) ที่ใช้ GA เป็นเครื่องมือในการ optimization ก็มีการกำหนดช่วงของค่าตัวแปรตัดสินใจเช่นกัน

เนื่องจากตัวแปร X_j คือ จำนวนครั้งการตัดวัสดุคงคลังตามรูปแบบ P_j ดังนั้น X_j ต้องเป็นตัวเลขจำนวนเต็มที่มากกว่าเท่ากับศูนย์ และใช้รูปแบบการตัด P_j ใดๆตัดซ้ำได้สูงสุดโดยไม่ทำให้เกินปริมาณท่อนความยาวที่ต้องการ นั่นคือค่าที่น้อยที่สุดของตัวเลขจำนวนเต็มที่ได้จาก B_i/A_{ij} หรือ Min(int(B_i/A_{ij})); สำหรับ i ตั้งแต่ 1 ถึง n

ดังนั้นช่วงของค่าตัวแปรตัดสินใจคือ 0 <= X_j <= Min(int(B_i/A_{ij}))

3.4.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด

คือเงื่อนไขที่กำหนดขอบเขตของคำตอบที่เป็นไปได้ กำหนดให้เป็น

Constraint function: $S_i \leq B_i$

โดยที่: S_i คือ จำนวนท่อนความยาวที่ตัดออกมาทั้งหมด (Supply) ของแต่ละ Li: (S_1, S_2, S_3, ..., S_n), ซึ่งคำนวณได้จาก Si = $\sum_j (A_{ij} \cdot X_j)$

แนวทางวิธีการแก้ปัญหาแบบ Pattern-based approach ที่เลือกใช้นั้นมีข้อดีคือ สามารถจำกัดเศษจากการตัดด้วยรูปแบบได้ไม่เกินกว่า $\sum_j (T_w \cdot X_j)$ ซึ่งหากกำหนดให้ T_w เป็นค่าน้อยๆ ก็จะทำให้เกิดเศษการตัดทั้งหมดเป็นปริมาณน้อยได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็มีข้อด้อยคือ อาจไม่สามารถตัดด้วยรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นเพื่อให้ได้จำนวนท่อนความยาวต่างๆครบถ้วนตามความต้องการ (Demand) หรือได้ทุก Li ครบตามจำนวน Bi พอดี

กรณีที่ Si = Bi หรือ Supply = Demand เป็นกรณีที่ต้องการเพราะสามารถตัดวัสดุได้ครบตามต้องการพอดี จึงถือว่างานแล้วเสร็จได้ แต่กลับมีโอกาสเกิดกรณีนี้ได้ยากมาก สิ่งที่ปรากฏจากการทดลองคือ จำนวนท่อนความยาวที่ตัดออกมา (Supply): Si จะมากกว่าหรือต่ำกว่าจำนวนที่ต้องการ Bi (Si > Bi, or Si < Bi) เสมอ และการกำหนดเงื่อนไขด้วยเครื่องหมาย “=” นั้นจะทำให้โมเดลปัญหาขาดความยืดหยุ่นในการหาคำตอบที่ดี

กรณีที่ Si => Bi หรือ oversupply จำนวนท่อนความยาวที่ตัดออกมาเกินกว่าความต้องการ อาจพิจารณาได้ว่าเป็นความสูญเสียหรือเป็นเศษ ซึ่งเป็นกรณีที่ควรหลีกเหลี่ยงเนื่องจากเป็นการสิ้นเปลืองทั้งวัสดุและเวลาทำงานของคนงาน พบได้ในงานวิจัยของ Salem et al. (2007) ที่กำหนดฟังก์ชันข้อจำกัดด้วยกรณีนี้

กรณีที่ Si <= Bi หรือ undersupply จำนวนท่อนความยาวที่ตัดออกมายังไม่พอกับความต้องการ เป็นการกำหนดเงื่อนไขที่ให้ความยืดหยุ่นในการหาคำตอบ แต่เป็นกรณีที่หมายถึงว่าการตัดวัสดุแบบ pattern-based นี้ยังไม่เสร็จสิ้น ยังคงเหลืองานที่ต้องทำต่อไป จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 1 เป็น

กรณีที่ปรารถนาที่สุดแต่ก็เกิดขึ้นได้ยากมาก จึงต้องพิจารณาเลือกระหว่างกรณีที่ 2 (oversupply) หรือ 3 (undersupply) ซึ่งจะได้ว่ากรณีที่ 3 เป็นกรณีที่ดีกว่ากรณีที่ 2 เนื่องจากยังไม่ได้ทำให้เกิดการสูญเสียวัสดุ อย่างไรก็ตาม หากเลือกใช้กรณีที่ 3 จะต้องจัดการกับความต้องการส่วนที่ยังเหลือ (Bi – Si) ซึ่งจากการทดลองพบว่า หากใช้ Best Fit Decreasing ที่เป็น Heuristic algorithm เพื่อตัดความต้องการส่วนที่เหลือนั้น จะเป็นวิธีที่ให้ผลได้ดี ดังรูปที่ 3.1 ที่แสดงขั้นตอนการแก้ปัญหาการตัดที่ใช้ 1D CSP model ร่วมกับ Best Fit Decreasing algorithm ในการหาคำตอบตามลำดับ

3.4.3 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

หรือฟังก์ชันที่ใช้ในการประเมินผลคำตอบว่าดีเพียงใด (performance measurement) กำหนดให้เป็นแบบ Multi-objective ซึ่งเป็นการรวมเป้าหมาย 2 ด้านเข้าด้วยกันได้แก่ เศษการตัดของรูปแบบ (pattern trim loss) และค่าปรับ (penalty) ของการผิดเงื่อนไขข้อจำกัดที่เป็น undersupply

Multi-objective function: $Minimize\left[(TL_{pat})^2 + \sum_i (L_i \cdot US_i)^2 \right]$

เป้าหมายด้านแรก คือการลดเศษที่เกิดจากการตัดตามรูปแบบการตัด (pattern trim loss) ให้น้อยที่สุด เมื่อมีการตัดวัสดุคงคลังตามรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น จะทำให้เกิดเศษเหล่านี้ขึ้น คำนวณได้จาก $TL_{pat} = \sum_j (T_j \cdot X_j)$

โดยที่: T_j คือ เศษเหลือของรูปแบบการตัด P_j

การใช้พจน์ $(TL_{pat})^2$ ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทำให้ได้ผลคำตอบที่ดีขึ้น เนื่องจากเป็นการขยายขนาดของตัวเลขให้เกิดผลกระทบในฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากขึ้น

เป้าหมายด้านที่สอง คือการลดปริมาณ undersupply ที่เกิดขึ้นจากการหย่อนข้อจำกัดให้น้อยที่สุด พจน์ที่สองนี้จึงทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันค่าปรับ (penalty) ของการผิดเงื่อนไขข้อจำกัด ที่ไม่สามารถตัดวัสดุได้ครบจำนวนตามที่ต้องการได้ มีลักษณะเป็นค่า Sumsquare ของปริมาณ undersupply ที่เกิดขึ้น โดยคำนวณจำนวนท่อนที่ undersupply (US_i) ได้จาก: $US_i = B_i - S_i$

การใช้ค่า Sumsquare ของปริมาณ undersupply ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ทำให้ได้ผลคำตอบที่ดีขึ้น เนื่องจากจำนวนท่อนที่ undersupply จะเกิดการกระจายไปในหลากหลาย L_i โดยไม่ขึ้นกับว่าเป็นขนาดท่อนที่สั้นหรือยาว ซึ่งช่วยให้การหาคำตอบในขั้นต่อไป ที่นำปริมาณ undersupply ที่เหลือไปหาคำตอบด้วย Best Fit Decreasing algorithm ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นอย่างมาก

3.5 การตัดความต้องการส่วนที่เหลือด้วย Best Fit Decreasing Algorithm

จากการทดลองพบว่า การหาคำตอบด้วยโมเดล 1D-CSP ในขั้นตอนก่อนหน้านั้น จะทำให้เกิดสภาวะ undersupply จำนวนหนึ่งเสมอ ยังคงเหลือรายการความต้องการที่ยังไม่ได้ถูกตัด จึงยังคงถือ

ว่างานการตัดของงวดนี้ยังไม่เสร็จสิ้น ความต้องการส่วนที่ undersupply จึงจะถูกนำมาตัดด้วย Best Fit Decreasing algorithm ซึ่งพบว่าให้ผลคำตอบที่ดี

ตัวอย่างหนึ่งของรายการความต้องการส่วนที่ undersupply หลังจากผ่านการหาคำตอบด้วย 1D-CSP แล้ว เป็นดังนี้

i	Li	Bi	Si	USi	OSi	Li·USi
1	0.95	25	24	1	0	0.95
2	1.40	18	16	2	0	2.80
3	1.75	14	9	5	0	8.75
4	1.80	23	17	6	0	10.80
5	1.88	7	7	0	0	0.00
6	2.67	22	18	4	0	10.68
7	2.88	10	7	3	0	8.64
8	3.05	36	34	2	0	6.10
9	3.20	4	2	2	0	6.40
10	3.75	15	13	2	0	7.50
11	5.00	26	24	2	0	10.00
12	5.40	19	17	2	0	10.80
13	6.35	7	5	2	0	12.70
14	7.00	23	22	1	0	7.00
15	7.19	12	11	1	0	7.19

รูปที่ 3.10 ตารางแสดงตัวอย่างรายการความต้องการส่วนที่ undersupply

Best Fit Decreasing (BFD) มีขั้นตอนเริ่มจากการจัดเรียงท่อนความยาวที่ต้องการตัดตามลำดับจากมากไปน้อย แล้วจึงหยิบท่อนความยาวนี้มาทีละหนึ่งรายการ เพื่อนำมาตัดด้วยวัสดุคงคลังมาตรฐานเส้นต่างๆ จากตัวอย่างนี้จะได้ผลลัพธ์การตัดด้วย BFD ดังนี้

			Cutting Details (Qk)									
i	Li	USi	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
1	0.95	1						1				
2	1.40	2										2
3	1.75	5							1		3	1
4	1.80	6								4	2	
5	1.88	0										
6	2.67	4	1						2	1		
7	2.88	3		1				1	1			
8	3.05	2						2				
9	3.20	2			1							
10	3.75	2				1						
11	5.00	2					2					
12	5.40	2				1						
13	6.35	2			1							
14	7.00	1		1								
15	7.19	1	1									
		Tk	0.14	0.12	0.45	0.85	0.00	0.07	0.03	0.13	1.15	5.45
		Yk	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1

รูปที่ 3.11 ตารางแสดงผลลัพธ์การตัดด้วย BFD กับรายการ undersupply

ผลลัพธ์ที่ได้คือ รายละเอียดการตัดแบบต่างๆ (Q_k) แสดงการตัดท่อนความยาว L_i เป็นจำนวนท่อนต่างๆกัน ซึ่งทำให้เหลือเศษเป็น T_k และจะต้องใช้วัสดุคงคลังมาตรฐานรวมจำนวน $\sum_k Y_k$ = 12 เส้น

เศษการตัดจากการหาคำตอบด้วย BFD นี้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$TL_{BFD} = \sum_k (T_k \cdot Y_k)$$

3.6 การคำนวณเศษการตัดทั้งหมด

เนื่องจากขั้นตอนในการหาคำตอบประกอบ 2 ขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน คือการหาคำตอบจากโมเดล 1D-CSP และคำตอบที่ได้จาก BFD ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณวัสดุคงคลังที่ต้องใช้ทั้งหมดได้ = $(\sum_j X_j + \sum_k Y_k)$ เส้น (แต่ละเส้นมีความยาว LS) ส่วนการหาเศษการตัดทั้งหมดจะได้การจากรวมเศษการตัดจากทั้งสองขั้นตอนเข้าด้วยกัน

ในการวิจัยนี้ได้กำหนดสมการที่มีประสิทธิภาพในการคำนวณหาเศษการตัดทั้งหมด (Total trim loss: TL) ของงวดงานการตัดที่เป็นโจทย์ปัญหา ด้วยสมการดังนี้

$$TL = TL_{pat} + TL_{BFD} - \sum RT = \sum_j (T_j \cdot X_j) + \sum_k (T_k \cdot Y_k) - \sum RT$$

ซึ่งจะต้องเท่ากับ

$$TL = \left(\sum_j X_j + \sum_k Y_k\right) \cdot LS - \sum_i (L_i \cdot B_i) - \sum RT$$

โดยที่ $\left(\sum_j X_j + \sum_k Y_k\right) \cdot LS$ คือ ปริมาณวัสดุคงคลังที่ใช้ทั้งหมด

$\sum_i (L_i \cdot B_i)$ คือ ปริมาณความต้องการทั้งหมด

$\sum RT$ คือ ปริมาณท่อน Retails ที่เกิดขึ้น

เศษการตัดทั้งหมด หากนิยามว่าหมายถึง ผลต่างของปริมาณวัสดุคงคลังที่ใช้ทั้งหมดกับปริมาณความต้องการทั้งหมด จะได้ว่า

Total trim loss* = $\left(\sum_j X_j + \sum_k Y_k\right) \cdot LS - \sum_i (L_i \cdot B_i)$

แต่เนื่องจาก LS และ $\sum_i (L_i \cdot B_i)$ เป็นค่าคงที่ สำหรับโจทย์หนึ่ง ดังนั้นค่าที่แปรผันจะมีเพียง $(\sum_j X_j + \sum_k Y_k)$ เท่านั้น ซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม จะทำให้ค่าตัวเลขของเศษทั้งหมดจากสมการนี้เป็นตัวเลขที่ห่างกันคราวละ LS หน่วยเสมอ เช่น ได้เศษทั้งหมดเป็น 21.27, 31.27, 41.27, ..., (LS ใช้เป็น 10 เมตร) จึงทำให้ค่าเศษการตัดทั้งหมดที่ได้เป็นเลขที่กระโดดและทิ้งช่วงที่ห่างกันมาก หมายถึงสมการ Total trim loss นี้จะเป็นเครื่องมือการประเมินคำตอบได้อย่างหยาบ ไม่สามารถแยกแยะคำตอบที่ต่างกันได้ละเอียดเพียงพอ

ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้นำหลักการพิจารณาท่อนส่วนที่เหลือ (leftover) ที่เสนอโดย Cherri et al. (2009) โดยกำหนดให้ leftover ที่สามารถเก็บไว้ใช้ในคราวต่อไปและไม่จัดว่าเป็นเศษ เรียกว่า Retail ที่กำหนดให้เป็น leftover มีความยาวมากกว่าท่อนความยาวที่ต้องการที่สั้นที่สุด (Min(Li))

$$RT = T_k; \quad if\ T_k > Min(L_i)$$

ซึ่ง Retail ที่เกิดขึ้นทั้งหมด จะเกิดขึ้นจากการหาคำตอบในขั้นตอนที่ 2 ที่ได้จาก BFD algorithm (เนื่องจากการตัดในขั้นตอนที่ 1 ที่ได้จาก 1D-CSP มีการควบคุมเศษที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการตัดอยู่ให้ไม่เกินกว่า T_w)

3.7 การประเมินคำตอบ

การประเมินประสิทธิภาพของคำตอบนั้น ดัชนีหลักที่ใช้คือ ค่าเศษการตัดทั้งหมด (TL) อย่างไรก็ตามยังมีดัชนีอื่นๆที่สามารถช่วยชี้วัดประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้อีก ดังต่อไปนี้

TL คือ เศษการตัดทั้งหมด

%waste คือ เปอร์เซ็นการสูญเสีย โดยให้ $\%waste = \frac{TL}{\sum_i (L_i \cdot B_i)} \times 100$

nLS คือ จำนวนเส้นของวัสดุคงคลังมาตรฐานที่ใช้ทั้งหมด โดยที่

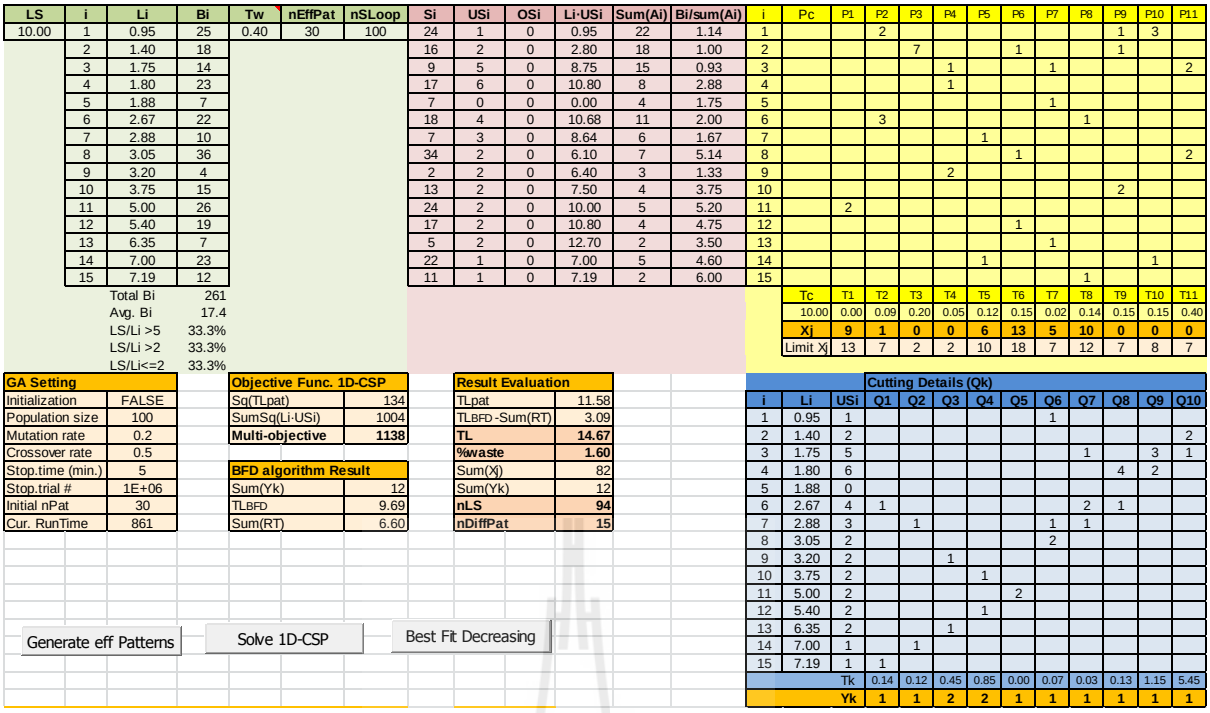
$$nLS = \left(\sum_j X_j + \sum_k Y_k\right)$$

nDiffPat คือ จำนวนรูปแบบการตัดที่ต่างกันที่ใช้

ดัชนีเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลคำตอบที่ได้จากการทดลองต่อไป คำตอบที่ดีกว่าคือคำตอบที่มีค่าดัชนีเหล่านี้ต่ำกว่า

3.8 การสร้างโมเดลด้วย Spreadsheet

โมเดลปัญหาที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel™ ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปประเภท Spreadsheet ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยตัวโมเดลปัญหาจะถูกบันทึกเป็นไฟล์หนึ่งไฟล์ ที่ประกอบด้วยแผ่นงาน (Sheet) แผ่นเดียวที่ใช้ป้อนบันทึกสูตรของสมการต่างๆทั้งหมดของโมเดล และจัดวางอย่างเป็นระเบียบเพื่อความสะดวกในการป้อนข้อมูลนำเข้า (input) และแสดงข้อมูลผลลัพธ์ (output) ให้เข้าใจได้ง่าย แผ่นคำนวณที่ใช้พื้นที่เป็นตัวโมเดลทั้งหมดแสดงในรูปข้างล่าง



LS	i	Li	Bi	Tw	nEffPat	nSLoop
10.00	1	0.95	25	0.40	30	100
	2	1.40	18			
	3	1.75	14			
	4	1.80	23			
	5	1.88	7			
	6	2.67	22			
	7	2.88	10			
	8	3.05	36			
	9	3.20	4			
	10	3.75	15			
	11	5.00	26			
	12	5.40	19			
	13	6.35	7			
	14	7.00	23			
	15	7.19	12			
		Total Bi	261			
		Avg. Bi	17.4			
		LS/Li >5	33.3%			
		LS/Li >2	33.3%			
		LS/Li<=2	33.3%			

Si	USi	OSi	Li·USi	Sum(Ai)	Bi/sum(Ai)
24	1	0	0.95	22	1.14
16	2	0	2.80	18	1.00
9	5	0	8.75	15	0.93
17	6	0	10.80	8	2.88
7	0	0	0.00	4	1.75
18	4	0	10.68	11	2.00
7	3	0	8.64	6	1.67
34	2	0	6.10	7	5.14
2	2	0	6.40	3	1.33
13	2	0	7.50	4	3.75
24	2	0	10.00	5	5.20
17	2	0	10.80	4	4.75
5	2	0	12.70	2	3.50
22	1	0	7.00	5	4.60
11	1	0	7.19	2	6.00

i	Pc	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1			2							1	3	
2				7			1			1		
3					1			1				2
4					1							
5								1				
6			3						1			
7						1						
8							1					2
9					2							
10										2		
11		2										
12							1					
13								1				
14						1					1	
15									1			
Tc		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
10.00		0.00	0.09	0.20	0.05	0.12	0.15	0.02	0.14	0.15	0.15	0.40
Xj		9	1	0	0	6	13	5	10	0	0	0
Limit Xj		13	7	2	2	10	18	7	12	7	8	7

GA Setting	
Initialization	FALSE
Population size	100
Mutation rate	0.2
Crossover rate	0.5
Stop.time (min.)	5
Stop.trial #	1E+06
Initial nPat	30
Cur. RunTime	861

Objective Func. 1D-CSP	
Sq(TLpat)	134
SumSq(Li·USi)	1004
Multi-objective	**1138**

BFD algorithm Result	
Sum(Yk)	12
TL_{BFD}	9.69
Sum(RT)	6.60

Result Evaluation	
TLpat	11.58
TL_{BFD}-Sum(RT)	3.09
TL	**14.67**
%waste	**1.60**
Sum(Xj)	82
Sum(Yk)	12
nLS	**94**
nDiffPat	**15**

Generate eff Patterns | Solve 1D-CSP | Best Fit Decreasing

			Cutting Details (Qk)									
i	Li	USi	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
1	0.95	1						1				
2	1.40	2										2
3	1.75	5							1		3	1
4	1.80	6								4	2	
5	1.88	0										
6	2.67	4	1						2	1		
7	2.88	3		1				1	1			
8	3.05	2						2				
9	3.20	2			1							
10	3.75	2				1						
11	5.00	2					2					
12	5.40	2				1						
13	6.35	2			1							
14	7.00	1		1								
15	7.19	1	1									
		Tk	0.14	0.12	0.45	0.85	0.00	0.07	0.03	0.13	1.15	5.45
		Yk	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1

รูปที่ 3.12 โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Excel

ส่วนประกอบของโมเดลบน Excel แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ตามขั้นตอนการแก้ปัญหาที่แสดงในรูปที่ 3.1 ได้แก่

1. ข้อมูลโจทย์ปัญหา
2. การสร้างรูปแบบการตัด
3. การหาคำตอบขั้นแรกด้วย 1D-CSP Model
4. การหาคำตอบขั้นที่สองด้วย BFD algorithm
5. การคำนวณดัชนีสำหรับประเมินผลคำตอบ

แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

3.8.1 ข้อมูลโจทย์ปัญหา

ในระหว่างการพัฒนาโมเดลได้ใช้ข้อมูลจากโครงการก่อสร้างจริงที่เป็นกรณีศึกษาเพื่อใช้เป็นโจทย์ปัญหา โดยนำแบบก่อสร้างส่วนที่เป็นรายละเอียดการเสริมเหล็กเส้นของฐานรากและคานของอาคารสูง มาคิดรายการปริมาณเหล็กเส้นที่ต้องใช้ และมีการปรับแต่งข้อมูลนี้เล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสมกับการนำมาทดสอบความถูกต้องและประสิทธิภาพของโมเดลที่พัฒนาขึ้น อย่างไรก็ตามโจทย์ปัญหาที่ใช้นี้น่าจะใกล้เคียงกับรายการความต้องการใช้เหล็กเส้นในงานก่อสร้างทั่วไป

ข้อมูลโจทย์ปัญหาที่ต้องการหาคำตอบเป็นส่วนที่ต้องนำเข้าจากผู้ใช้งาน ที่เตรียมได้จากข้อมูลของโครงการก่อสร้าง เป็นขนาดความยาวของวัสดุคงคลังมาตรฐานและปริมาณท่อนความยาวทั้งหมดที่ต้องการตัด (Demand) ข้อมูลโจทย์ปัญหาประกอบด้วย LS, L_i, และ B_i

LS	i	Li	Bi
10.00	1	0.95	25
	2	1.40	18
	3	1.75	14
	4	1.80	23
	5	1.88	7
	6	2.67	22
	7	2.88	10
	8	3.05	36
	9	3.20	4
	10	3.75	15
	11	5.00	26
	12	5.40	19
	13	6.35	7
	14	7.00	23
	15	7.19	12
		Total Bi	261
		Avg. Bi	17.4
		LS/Li >5	33.3%
		LS/Li >2	33.3%
		LS/Li<=2	33.3%

รูปที่ 3.13 ข้อมูลโจทย์ปัญหา

โจทย์ปัญหาที่แสดงในรูปตารางนี้จะนำมาใช้ทดสอบโมเดลที่พัฒนาขึ้น ให้ LS = 10 เมตร มีจำนวนท่อนความยาวที่ต่างกัน 15 ขนาด หรือ n = 15 และมีจำนวน Bi รวมทั้งหมด 261 ท่อน ซึ่งมีสัดส่วนของขนาดคละ (ในช่วงความยาว 3 ช่วงคือ LS/Li > 5; > 2; และ <= 2) เท่ากันเท่ากับ 33.3% รวมเป็นปริมาณความยาวที่ต้องการทั้งหมดเท่ากับ 918.73 เมตร

3.8.2 การสร้างรูปแบบการตัด

ส่วนการสร้างรูปแบบการตัด แบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย คือส่วนที่เป็นข้อมูล parameters และส่วนที่เป็นการแสดงผลการสร้างรูปแบบการตัดที่ได้จากโปรแกรม

ส่วนข้อมูล parameters ของการสร้างรูปแบบการตัด ได้แก่ T_w, nEffPat, และ nSLoop ซึ่งต้องกำหนดโดยผู้ใช้

Tw	nEffPat	nSLoop
0.40	30	100

รูปที่ 3.14 ส่วนข้อมูล parameters ของการสร้างรูปแบบการตัด

ส่วนแสดงผลการสร้างรูปแบบการตัด ได้แก่ Sum(A_{ij}), และ B_i/Sum(A_{ij}) เป็นค่าที่ใช้ใน Intensive Search Algorithm ที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้ เพื่อใช้สร้างรูปแบบการตัดให้เกิดความหลากหลายสอดคล้องกับโจทย์ความต้องการ และตัวรูปแบบการตัดที่ดี (P_j) ตามจำนวนที่กำหนดให้สร้างขึ้น j = 1 to 30 และรวมทั้งเศษของรูปแบบ (T_j) ทั้งนี้ T_j จะถูกควบคุมให้ไม่เกินกว่า T_w (แต่หากค้นหาจนเกินจำนวนรอบที่กำหนดอาจจะให้รูปแบบที่ T_j มากกว่า T_w ได้)

Sum(Ai)	Bi/sum(Ai)	i	Pc	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30
22	1.14	1			2							1	3		1		1	1					1	1	1					9	1		
18	1.00	2				7			1			1									1	1					1	1	1	1		2	1
15	0.93	3					1			1				2		1		2						2		1					5		
8	2.88	4					1									3	1					2	1										
4	1.75	5								1					1				1										1				
11	2.00	6			3						1					1		2	1		1			1									1
6	1.67	7						1													1			1				1					2
7	5.14	8							1					2						2	1					1							
3	1.33	9					2																				1						
4	3.75	10										2								1					1								
5	5.20	11		2																		1			1	1							
4	4.75	12							1										1								1	1					
2	3.50	13								1																			1				
5	4.60	14						1					1		1									1								1	
2	6.00	15									1						1																
			Tc	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30
			10.00	0.00	0.09	0.20	0.05	0.12	0.15	0.02	0.14	0.15	0.15	0.40	0.17	0.18	0.06	0.21	0.05	0.15	0.00	0.00	0.25	0.00	0.30	0.20	0.00	0.32	0.37	0.05	0.30	0.20	0.17

รูปที่ 3.15 ส่วนแสดงผลการสร้างรูปแบบการตัด

3.8.3 การหาคำตอบขั้นแรกด้วย 1D-CSP Model

การหาคำตอบขั้นแรกด้วย 1D-CSP Model ซึ่งจัดเป็น Optimization problem model โดยทั่วไป ประกอบด้วยส่วนที่แสดงคำตอบหรือค่าตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables) ก็คือค่า X_j และช่วงของค่าตัวแปรตัดสินใจ (ranges of decision variables) ก็คือค่า Limit X_j ซึ่งข้อมูลทั้งสองชุดถูกแสดงไว้ที่สองแถวบรรทัดสุดท้ายในรูปข้างล่าง

Si	USi	OSi	Li·USi	i	Pc	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30
24	1	0	0.95	1			2							1	3		1		1	1					1	1	1				9	1		
16	2	0	2.80	2				7			1			1									1	1				1	1	1	1		2	1
9	5	0	8.75	3					1			1				2		1		2						2		1				5		
17	6	0	10.80	4					1									3	1					2	1									
7	0	0	0.00	5								1					1				1											1			
18	4	0	10.68	6				3					1					1		2	1		1			1								1
7	3	0	8.64	7						1													1			1				1				2
34	2	0	6.10	8							1					2					2		1					1						
2	2	0	6.40	9					2																				1					
13	2	0	7.50	10									2								1						1							
24	2	0	10.00	11		2																		1			1	1						
17	2	0	10.80	12							1										1								1	1				
5	2	0	12.70	13								1																			1			
22	1	0	7.00	14						1					1		1										1						1	
11	1	0	7.19	15									1						1															
					Tc	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30
					10.00	0.00	0.09	0.20	0.05	0.12	0.15	0.02	0.14	0.15	0.15	0.40	0.17	0.18	0.06	0.21	0.05	0.15	0.00	0.00	0.25	0.00	0.30	0.20	0.00	0.32	0.37	0.05	0.30	0.20	0.17
					Xj	**9**	**1**	**0**	**0**	**6**	**13**	**5**	**10**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	**1**	**2**	**9**	**1**	**0**	**16**	**0**	**4**	**2**	**2**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**
					Limit Xj	13	7	2	2	10	18	7	12	7	8	7	7	7	12	7	7	15	10	11	23	7	15	14	4	10	7	2	2	9	5

รูปที่ 3.16 ส่วนแสดงผล 1D-CSP Model

ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันข้อจำกัด ประกอบไปด้วยค่า

S_i คือ จำนวนท่อนความยาวที่ตัดได้แล้วของท่อนความยาวที่ i

US_i คือ จำนวนท่อนที่ Undersupply ของท่อนความยาวที่ i มีค่าเท่ากับ $US_i = B_i - S_i$ และ

OS_i คือ จำนวนท่อนที่ Oversupply ของท่อนความยาวที่ i มีค่าเท่ากับ $OS_i = S_i - B_i$

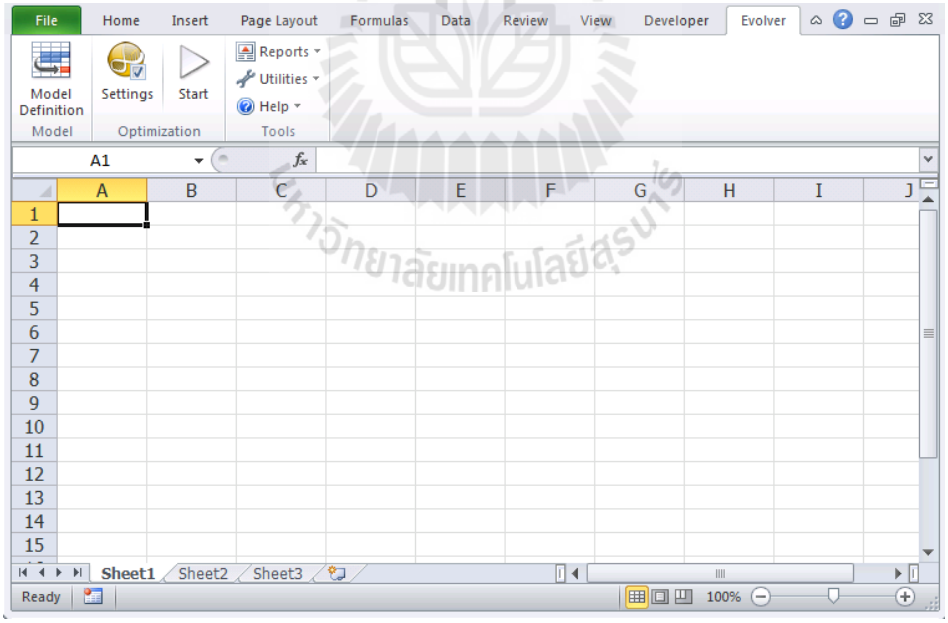
เนื่องจากฟังก์ชันข้อจำกัดของโมเดลถูกกำหนดให้ $S_i <= B_i$ ดังนั้นจะทำให้ได้ว่าค่า US_i จะต้อง => 0 เสมอ ส่วนค่า OS_i จะต้อง = 0

ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดให้เป็นแบบ Multi-objective ที่ประกอบไปด้วยค่า $(TL_{pat})^2$, และ $\sum_i (L_i \cdot US_i)^2$ เป็นการใช้ผลรวมแบบไม่ถ่วงน้ำหนัก

Objective Func. 1D-CSP	
Sq(TLpat)	134
SumSq(Li·USi)	1004
Multi-objective	**1138**

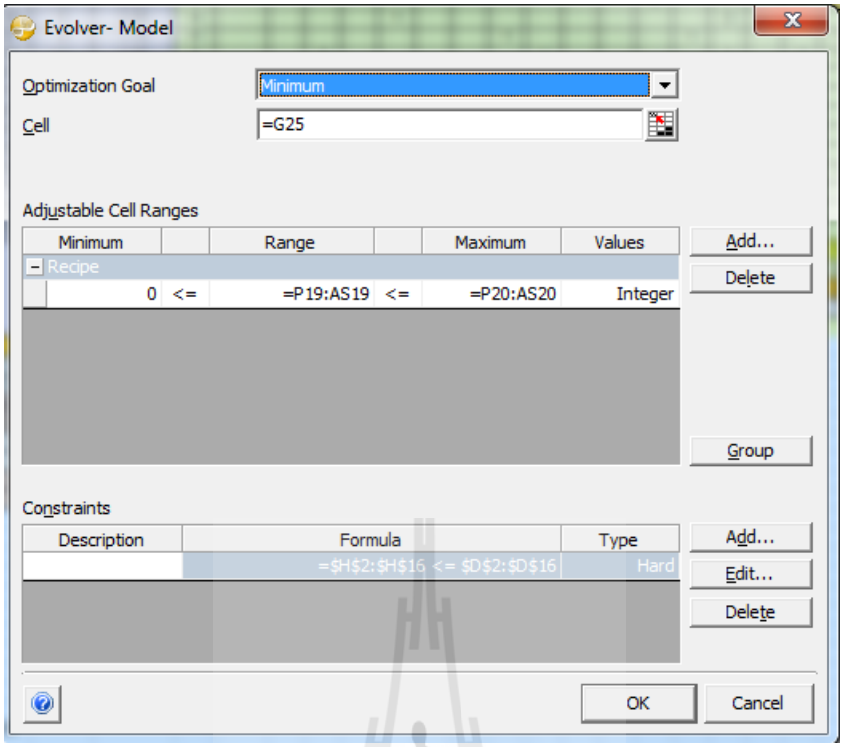
รูปที่ 3.17 ส่วนการคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์

โมเดล 1D-CSP Model ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้เลือกใช้วิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms (GA) ซึ่งเป็นวิธีการหาคำตอบแล้วค้นหาแบบสุ่ม Stochastic algorithm จึงทำให้คำตอบที่ได้ในการหาแต่ละครั้งมักไม่เหมือนกัน การวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่เรียกว่า Evolver™ ของบริษัท Palisade Corp. ซึ่งเป็นโปรแกรม Add-in ใน Microsoft Excel ขั้นตอนการใช้งาน Evolver คล้ายคลึงกับโปรแกรม Solver คือเริ่มจากการกำหนดส่วนประกอบหลักของโมเดลซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ตัวแปรตัดสินใจ และฟังก์ชันข้อจำกัด หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลนำเข้าของโมเดลทั้ง 3 ส่วนนี้แสดงดังในรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.18 เมนู Ribbon ของ Evolver ที่ได้ติดตั้ง Add-in แล้ว

กำหนดค่า Optimization Goal แบบการ Minimization เนื่องจากต้องการหาคำตอบที่ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด และโดยการกำหนดเซลที่จะใช้คำนวณค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์



รูปที่ 3.19 หน้าต่างสำหรับป้อนข้อมูลส่วนประกอบหลักของ 1D-CSP Model

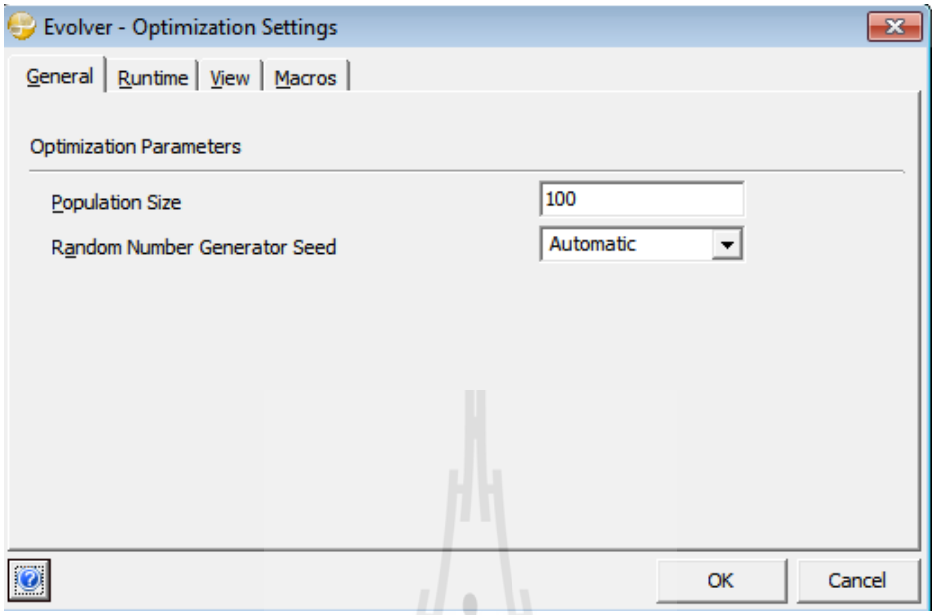
ตัวแปรตัดสินใจกำหนดให้เป็นกลุ่มเซลที่เรียกว่า Adjustable Cell Ranges ซึ่งโปรแกรม Evolver จะบังคับให้กำหนดขอบเขตบนและล่างของค่าตัวแปรตัดสินใจต่างๆทั้งหมดด้วย นอกจากนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของค่าตัวแปรเป็นจำนวนเต็มหรือจำนวนจริงก็ได้

ฟังก์ชันข้อจำกัดสามารถป้อนข้อมูลแบ่งเป็นชุดๆตามต้องการได้ โดยอ้างอิงไปที่กลุ่มเซลที่มีสูตรฟังก์ชันข้อจำกัดที่ต้องการ จากนั้นกำหนดขอบเขตบนและล่างที่เหมาะสม ทั้งนี้ยังสามารถกำหนดชนิดของฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นแบบ Soft หรือ Hard constraints ก็ได้

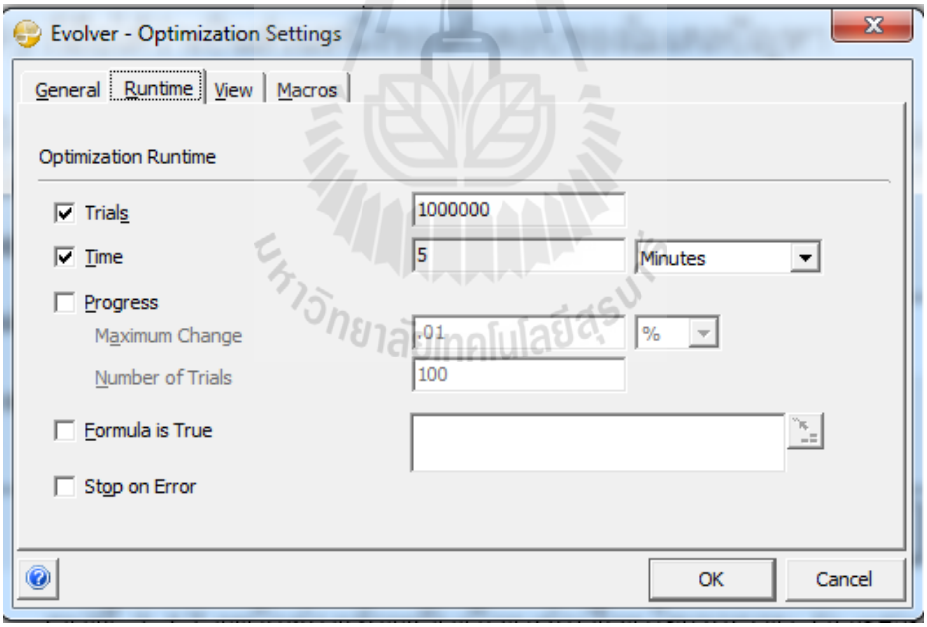
หลังจากที่ได้กำหนดส่วนประกอบหลักของโมเดลเสร็จแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GA ที่จะใช้ในการหาคำตอบ ได้แก่ ค่า Population size, Random seed, Crossover rate, Mutation rate, และเงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime)

ค่า Population Size จะเป็นตัวกำหนดความหลากหลายของกลุ่มคำตอบที่เป็นไปได้ในแต่ละรุ่นประชากร ค่า Random Number Generator Seed เป็นวิธีการหาตัวเลขสุ่มที่ต้องใช้ในการหาคำตอบ ค่า Crossover rate และ Mutation rate เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมปฏิบัติการทางพันธุกรรม ในกระบวนการวิวัฒนาการของ GA รวมทั้งการกำหนดเงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) ที่ช่วยให้ผู้ใช้สามารถบังคับความพยายามในการค้นหาคำตอบให้เป็นไปตามต้องการได้อีกด้วย เงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) สามารถเลือกใช้ได้หลายลักษณะได้แก่ การกำหนดจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ที่ถูก

พิจารณา (Trials) การกำหนดระยะเวลาของการค้นหา หรือการกำหนดเปอร์เซ็นต์การปรับปรุงของคำตอบที่ดีขึ้นภายในจำนวน Trials ที่กำหนด



รูปที่ 3.20 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าพารามิเตอร์ Population Size ของ GA



รูปที่ 3.21 หน้าต่างสำหรับป้อนค่าเงื่อนไขการจบ Runtime

จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ GA ที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการหาคำตอบของโมเดลต่อไป ได้ค่าที่เหมาะสมดังนี้ Population Size = 100; Random Number Generator Seed = Automatic; Crossover rate = 0.5; Mutation rate = 0.2

เงื่อนไขการสิ้นสุด (Runtime) ที่เหมาะสมกำหนดให้ใช้เป็นเวลาในการค้นหาคำตอบ = 5 นาที ภายในจำนวน Trials = 1,000,000

GA Setting	
Initialization	FALSE
Population size	100
Mutation rate	0.2
Crossover rate	0.5
Stop.time (min.)	5
Stop.trial #	1E+06
Initial nPat	30
Cur. RunTime	861

รูปที่ 3.22 ส่วนป้อนค่าพารามิเตอร์ของ GA

3.8.4 การหาคำตอบขั้นที่สองด้วย BFD algorithm

การหาคำตอบขั้นที่สองด้วย BFD algorithm ซึ่งจัดเป็น Heuristic Algorithm ซึ่งจะหาคำตอบได้เพียงชุดคำตอบเดียวเสมอสำหรับโจทย์ปัญหาหนึ่ง ซึ่งโจทย์ที่ใช้มาจากข้อมูลหลังจากการหาคำตอบในขั้นแรก เนื่องจาก 1D-CSP Model ได้ถูกกำหนดด้วยฟังก์ชันข้อจำกัด ให้คำตอบที่ได้อยู่ในสภาพ undersupply (และกำหนดไม่ให้เกิดสภาพ oversupply) ดังนั้นโจทย์ปัญหานี้จึงเป็นรายการความต้องการส่วนเหลือที่ยังไม่ได้ตัด (US_i) นั่นเอง

			Cutting Details (Qk)									
i	Li	USi	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
1	0.95	1						1				
2	1.40	2										2
3	1.75	5							1		3	1
4	1.80	6								4	2	
5	1.88	0										
6	2.67	4	1						2	1		
7	2.88	3		1				1	1			
8	3.05	2						2				
9	3.20	2			1							
10	3.75	2				1						
11	5.00	2					2					
12	5.40	2				1						
13	6.35	2			1							
14	7.00	1		1								
15	7.19	1	1									
		Tk	0.14	0.12	0.45	0.85	0.00	0.07	0.03	0.13	1.15	5.45
		Yk	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1

รูปที่ 3.23 ส่วนการแสดงรายละเอียดคำตอบการตัดที่ได้จาก BFD algorithm

ส่วนที่แสดงคำตอบที่ได้คือค่า Y_k , และรายละเอียดการตัด Q_k รวมทั้งเศษที่ได้จากการตัด US_i ตัดด้วย BFD จนหมดคือค่า TL_{BFD} นอกจากนี้ยังแสดงการคำนวณค่า $\sum RT$ ที่ได้จากการตัดในขั้นที่สองนี้ โดยกำหนดขนาดของ Retails ไว้ที่ Min(L_i)

BFD algorithm Result	
Sum(Yk)	12
TL_{BFD}	9.69
Sum(RT)	6.60

รูปที่ 3.24 ส่วนการแสดงคำตอบของ BFD algorithm

3.8.5 การคำนวณดัชนีสำหรับประเมินผลคำตอบ

หลังจากสิ้นสุดการหาคำตอบทั้งสองขั้นตอนแล้ว รายการความต้องการทั้งหมดจะต้องถูกตัดแล้วจึงได้ผลการคำนวณดัชนีสำหรับประเมินผลคำตอบ ซึ่งได้แก่ ค่า TL (ผลรวมของ TL_{pat} + TL_{BFD} – Sum(RT)), %waste, nLS (ผลรวมของ Sum(X_j) + Sum(Y_k)), และ nDiffPat ดัชนีเหล่านี้จะมีค่าเฉพาะตัวขึ้นกับคำตอบที่หาได้จากทั้งสองขั้นตอนดังกล่าว จากนั้นค่าดัชนีเหล่านี้จึงถูกบันทึกไว้เพื่อการวิเคราะห์ต่อไป

Result Evaluation	
TLpat	11.58
TL_{BFD} -Sum(RT)	3.09
TL	**14.67**
%waste	**1.60**
Sum(Xj)	82
Sum(Yk)	12
nLS	**94**
nDiffPat	**15**

รูปที่ 3.25 ส่วนการแสดงค่าดัชนีสำหรับประเมินผลคำตอบ

3.9 การทดสอบ

โมเดลที่สร้างขึ้นได้ถูกทดสอบกับโจทย์ปัญหาที่ปรับปรุงจากข้อมูลที่ได้จากโครงการก่อสร้างกรณีศึกษาดังกล่าวข้างต้น ทั้งนี้เพื่อการอ้างอิงเปรียบเทียบผลประสิทธิภาพที่ชัดเจน โจทย์ปัญหาจะกำหนดให้ใช้เพียงโจทย์เดียว เนื่องจากคำตอบของปัญหาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของโจทย์โดยตรง ขนาดคละของโจทย์ (สัดส่วนของ B_i สำหรับแต่ละขนาดท่อนความยาว L_i) จะมีผลต่อการจับคู่กันเองเพื่อให้เกิดเศษตัดต่างๆ ดังนั้นโจทย์ปัญหาจึงแบ่งขนาดคละออกเป็นสามช่วงความยาวคือ กลุ่มขนาดท่อนสั้น (LS/Li > 5); กลุ่มขนาดท่อนปานกลาง (2 < LS/Li <= 5); และกลุ่มขนาดท่อนยาว (LS/Li <= 2) ให้มีจำนวนท่อน B_i รวมของแต่ละกลุ่มความยาวเป็นสัดส่วนที่เท่ากัน คือกลุ่มละ 33.3% รวมจำนวน B_i ทั้งหมด 261 ท่อน แต่ละขนาดความยาวมี B_i เฉลี่ย 17.4 ท่อน ซึ่งทำให้โจทย์ปัญหานี้จัดอยู่ในประเภท (1/V/I/M) ตามระบบการจำแนกของ (Dyckhoff 1990) หรือเป็นแบบ Single Stock Size Cutting Stock Problem (SSSCSP) ตามระบบการจำแนกของ Wäscher et al. (2007) และรวมเป็นปริมาณความต้องการทั้งหมดของงวดงานการตัด 918.73 เมตร ซึ่งเป็นขนาดของงานที่ทำได้แล้วเสร็จภายในหนึ่งวันทำการ

ในระหว่างการพัฒนาโมเดลนี้ขึ้นมาได้มีการทดสอบเบื้องต้นในด้านต่างๆเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลคำตอบต่างๆที่ได้ และเนื่องจากโมเดลปัญหานี้มีความซับซ้อนสูงและมีขั้นตอนการหาคำตอบถึงสองขั้นตอน และยังเกี่ยวข้องกับค่า parameters จำนวนมาก การทดสอบโมเดลในเบื้องต้นจึงมีความจำเป็นเพื่อปรับแต่งให้โมเดลมีประสิทธิภาพที่ดีเพียงพอ ประเด็นที่ทำการทดสอบเบื้องต้นได้แก่ โจทย์ปัญหา ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ใน GA ดังนั้นค่าต่างๆเหล่านี้ที่กำหนดให้กับโมเดลจึงเป็นค่าที่ผ่านการทดสอบเบื้องต้นแล้วว่าให้ผลลัพธ์ที่ดี

การทดสอบโมเดลในขั้นต่อไปจะเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพและ robustness ของโมเดลด้วยการ vary ค่า parameters ที่สำคัญต่างๆ และตรวจสอบความต่อเนื่องของผลคำตอบที่โมเดลให้ และเนื่องจากวิธีการหาคำตอบแบบ Genetic Algorithms (GA) ที่เลือกใช้ในการวิจัยนี้ เป็นการค้นหาคำตอบด้วยหลักการ Stochastic search จึงทำให้คำตอบที่ได้ในการ run แต่ละครั้งไม่เหมือนเดิม แม้ว่าจะเป็นโจทย์ปัญหาและค่า parameters เหมือนกันทุกประการ ดังนั้นการทดสอบจึงจำเป็นต้องใช้ผลจาก runtime หลายๆครั้ง กับชุดการทดลองแต่ละชุด

การทดสอบโมเดลกับค่า parameters ที่สำคัญที่มีผลต่อคำตอบของโมเดลโดยตรง แบ่งออกเป็น 3 ประเด็น ได้แก่

1. ความต่อเนื่อง (consistency) ของคำตอบที่ได้จากโมเดล จาก runtime หลายๆครั้ง เนื่องจากวิธีการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี ใช้หลักการสร้างแบบสุ่ม (Intensive Search Algorithm) และการหาคำตอบแบบ GA ก็มีการการค้นหาด้วยการสุ่มเช่นกัน ทำให้ได้คำตอบที่ดีที่สุดแบบประมาณและอาจไม่เหมือนกันในแต่ละครั้ง (runtime) ประเด็นทดสอบนี้จึงใช้พิจารณาว่าคำตอบที่ได้ในแต่ละครั้งว่าเหมือนเดิมหรือต่างจากครั้งก่อนหน้าอย่างไร แบ่งชุดทดสอบออกเป็น 5 ชุด แต่ละชุดจะใช้เซ็ตของรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้นเซ็ตเดียวกัน จึงมีการสร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดรวม 5 ชุดที่ต่างกัน แต่ละชุดทำการหาคำตอบซ้ำเป็นจำนวน 30 runtimes โดยใช้ค่า parameters ที่สำคัญ คือ nEffPat = 30 และ T_w = 0.20 เมตร ส่วนค่า parameters อื่นๆคงที่ทั้งหมด

2. จำนวนรูปแบบการตัด (nEffPat) ที่สร้างขึ้นและใช้ในการหาคำตอบ โดยการกำหนดใช้ nEffPat ต่างๆกัน 5 ชุดทดสอบ ได้แก่ 10, 20, 30, 40, 50 แต่ละชุดทำการหาคำตอบซ้ำเป็นจำนวน 30 runtimes เพื่อหาว่าค่า nEffPat ที่เหมาะสมควรเป็นเท่าใด ทั้งนี้ใช้ค่า T_w = 0.20 เมตร ส่วนค่า parameters อื่นๆคงที่ทั้งหมด

3. ขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_w) โดยการกำหนดใช้ T_w ต่างๆกัน 5 ชุดทดสอบ ได้แก่ 0.00, 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 เมตร แต่ละชุดทำการหาคำตอบซ้ำเป็นจำนวน 30 runtimes เพื่อหาว่าค่า T_w ที่เหมาะสมควรเป็นเท่าใด ทั้งนี้ใช้ค่า nEffPat = 30 ส่วนค่า parameters อื่นๆคงที่ทั้งหมด

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ เริ่มจากการป้อนข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหาใส่ลงในแผ่นคำนวณที่เป็นพื้นที่ของโมเดลปัญหาในโปรแกรม Microsoft Excel จากนั้นจึงเรียกโปรแกรม Evolver เพื่อทำการกำหนดกลุ่มเซลต่างๆที่ใช้เป็นส่วนประกอบหลักของโมเดล พร้อมทั้งการกำหนดค่าพารามิเตอร์อื่นๆของโมเดลที่ไม่ได้ใช้เป็นประเด็นทดสอบ ให้เป็นค่าคงที่ และกำหนดเงื่อนไขการสิ้นสุดการค้นหาคำตอบของ GA เป็นระยะเวลาการค้นหา 5 นาที ภายในจำนวน Trials = 1,000,000

3.10 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดสอบที่ได้ทั้งหมดจะถูกนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ เพื่อประเมินความถูกต้องและประสิทธิภาพของโมเดลที่สร้างขึ้น การเปรียบเทียบผลคำตอบขั้นต้นจะใช้การเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จาก Best Fit Decreasing (BFD) algorithm ทั้งนี้เนื่องจาก Heuristic algorithm นี้เข้าใจง่ายและนำไปใช้ได้สะดวก ต้องการการคำนวณที่ไม่ยุ่งยาก และให้คำตอบที่แน่นอนเพียงคำตอบเดียวเท่านั้นสำหรับโจทย์ปัญหาหนึ่ง จากการทดลองใช้กับโจทย์ปัญหาที่ใช้ในการวิจัยพบว่าให้คำตอบที่มีประสิทธิภาพดีมากเกินความคาดหมายคือ %waste = 3.71% และมี Retail หนึ่งท่อนขนาด 7.15 เมตร ใช้วัสดุคงคลังรวม 96 เส้น ดังนั้นผลคำตอบที่ได้จากโมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้จึงไม่ควรให้ผลคำตอบที่แย่กว่าที่ได้จาก BFD รูปข้างล่างนี้แสดงรายละเอียดการตัดและผลคำตอบของโจทย์ปัญหาที่ได้จาก BFD algorithm

		Cutting Details (Qk)																		
i	**Li**	**Q1**	**Q2**	**Q3**	**Q4**	**Q5**	**Q6**	**Q7**	**Q8**	**Q9**	**Q10**	**Q11**	**Q12**	**Q13**	**Q14**	**Q15**	**Q16**	**Q17**	**Q18**	**Q19**
1	0.95				1									1	1			3	10	3
2	1.40								1							2	7	5		
3	1.75														5	4				
4	1.80												3	5						
5	1.88				1							2	2							
6	2.67	1		1																
7	2.88		1																	
8	3.05						1		1		3	2								
9	3.20					1														
10	3.75							1												
11	5.00									2										
12	5.40							1	1											
13	6.35					1	1													
14	7.00		1	1	1															
15	7.19	1																		
	Tk	0.14	0.12	0.33	0.17	0.45	0.60	0.85	0.15	0.00	0.85	0.14	0.84	0.05	0.30	0.20	0.20	0.15	0.50	7.15
	Yk	**12**	**10**	**10**	**3**	**4**	**3**	**15**	**4**	**13**	**9**	**1**	**1**	**4**	**2**	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**

รูปที่ 3.26 รายละเอียดการตัดที่ได้จาก Best Fit Decreasing Algorithm

TLpat	0.00
TL_{BFD} -Sum(RT)	34.12
TL	**34.12**
%waste	**3.71**
Sum(Xj)	0
Sum(Yk)	96
nLS	**96**
nDiffPat	**0**

รูปที่ 3.27 ผลคำตอบที่ได้จาก Best Fit Decreasing Algorithm

การวิเคราะห์ผลคำตอบใช้วิธี ANOVA เนื่องจากคำตอบที่ได้จากโมเดลปัญหาเป็นผลจาก runtimes จำนวน 30 runtimes ต่อชุดทดสอบแต่ละชุด ดังนั้นค่าเฉลี่ยและค่า variance ของค่าดัชนีต่างๆของผลคำตอบ ไม่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบความเหมือนและความต่างกันได้โดยตรง การวิเคราะห์ผลคำตอบด้วยวิธี ANOVA เป็นการนำเอาหลักทางสถิติมาใช้เปรียบเทียบผลคำตอบแต่ละชุดทดสอบ เพื่อหาความเหมือนและความต่างกันที่มีนัยยะสำคัญ โดยกำหนดใช้ค่า alpha = 0.05

วิธีการวิเคราะห์ผล ANOVA (Analysis of Variance) เป็นเครื่องมือการวิเคราะห์ผลคำตอบด้วยค่า variance ของกลุ่มคำตอบหลายกลุ่มตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งหลักการวิเคราะห์จะเป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าแต่ละกลุ่มคำตอบนั้นมีความเหมือนกันเสมือนกับมีการกระจายของข้อมูลอยู่บน probability distribution อันเดียวกัน หรือมาจากประชากรเดียวกัน เรียกว่า Null Hypothesis เปรียบเทียบกับ Aternative Hypothesis ที่ชี้ว่ากลุ่มคำตอบเหล่านั้นไม่ได้เหมือนกันทั้งหมดอย่างน้อยหนึ่งคู่ที่ไม่เหมือนกัน (http://www.statsoft.com/textbook/anova-manova/)

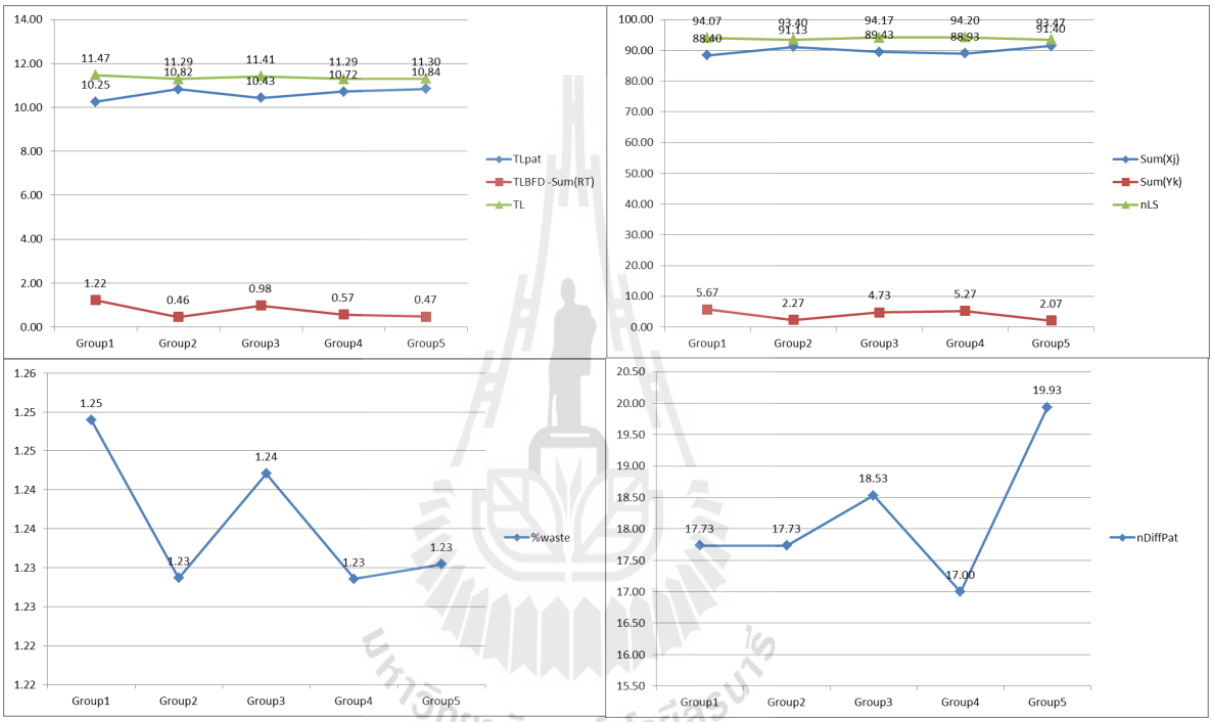
ข้อมูลสรุปผลการทดสอบทั้งหมดทั้ง 3 ประเด็นแสดงเป็นตารางและกราฟต่างๆข้างล่างต่อไปนี้ เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ในแต่ละประเด็นดังต่อไปนี้ เพื่อความสะดวกในการอ่านให้เข้าใจได้ง่ายจึงอธิบายผลการวิเคราะห์เป็นข้อๆ

3.10.1 ประเด็นที่ 1 ความต่อเนื่อง (consistency) ของคำตอบ

คำตอบของชุดทดสอบทั้ง 5 ชุด ในประเด็นที่ 1 แสดงในรูปตารางและกราฟข้างล่างนี้ ซึ่งแสดงผลค่าเฉลี่ย (ของคำตอบจาก 30 runtimes) และค่า variance ของค่าดัชนีต่างๆรวม 8 ค่า ได้แก่ TL_{pat}, T_{LBFD} – Sum(RT), TL, %waste, Sum(X_j), Sum(Y_k), nLS, และ nDiffPat นอกจากนี้ยังแสดงผลการวิเคราะห์ชุดคำตอบด้วย ANOVA พร้อมทั้งสรุปผลการวิเคราะห์ (verdict)

	Indexes	Group1	Group2	Group3	Group4	Group5	Average	F	P-value	F crit	Verdict
Average	TLpat	10.25	10.82	10.43	10.72	10.84	10.61	16.50	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.08	0.04	0.20	0.13	0.16					
Average	TLBFD -Sum(RT)	1.22	0.46	0.98	0.57	0.47	0.74	10.07	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.49	0.20	0.43	0.29	0.33					
Average	TL	11.47	11.29	11.41	11.29	11.30	11.35	0.66	0.62	2.43	Fail to Reject Null
Variance		0.54	0.21	0.39	0.19	0.34					
Average	%waste	1.25	1.23	1.24	1.23	1.23	1.24	0.66	0.62	2.43	Fail to Reject Null
Variance		0.01	0.00	0.00	0.00	0.00					
Average	Sum(Xj)	88.40	91.13	89.43	88.93	91.40	89.86	47.20	0.00	2.43	Reject Null
Variance		1.21	0.74	1.22	1.31	1.21					
Average	Sum(Yk)	5.67	2.27	4.73	5.27	2.07	4.00	47.30	0.00	2.43	Reject Null
Variance		1.54	1.65	1.93	1.86	2.27					
Average	nLS	94.07	93.40	94.17	94.20	93.47	93.86	22.81	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.13	0.25	0.21	0.17	0.26					
Average	nDiffPat	17.73	17.73	18.53	17.00	19.93	18.19	21.79	0.00	2.43	Reject Null
Variance		1.24	1.58	1.71	1.72	2.34					

รูปที่ 3.28 ผลคำตอบค่าดัชนีของการทดสอบประเด็นความต่อเนื่องของคำตอบ



รูปที่ 3.29 กราฟดัชนีของการทดสอบประเด็นความต่อเนื่องของคำตอบ

- ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ชี้ถึงการ Fail to reject null hypothesis สำหรับค่าดัชนี TL และ %waste (ค่าดัชนีทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อกัน) หมายถึงว่าค่าเฉลี่ยของดัชนีทั้งสองที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความมั่นใจ (alpha 5%) แต่ค่าดัชนีอื่นๆได้ผลเป็นการ Reject null hypothesis หมายถึงว่าค่าเฉลี่ยของดัชนีอื่นๆ ที่ได้จากชุดคำตอบแต่ละชุดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความมั่นใจ (alpha) 5% และชี้ให้เห็นถึงว่า การสร้างรูปแบบการตัดที่ดีในแต่ละชุดที่สร้างขึ้นจะสามารถนำไปใช้หาคำตอบได้ผลดีแตกต่างกันบ้าง โมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้จึงมีความ robustness พอสมควร สามารถนำไปใช้หาคำตอบที่มั่นใจได้ว่าจะได้คำตอบที่ดีแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในการหาคำตอบทุกๆครั้ง

- ค่าเฉลี่ย (ทั้ง 150 runtimes จาก 5 ชุดทดสอบ) ของค่า TL = 11.35 ซึ่งเป็นผลรวมของค่าเฉลี่ย TL_{pat} = 10.61 และ ค่าเฉลี่ย TL_{BFD} = 0.74
- ค่าเฉลี่ย (ทั้ง 150 runtimes จาก 5 ชุดทดสอบ) ของค่า %waste = 1.24 ซึ่งน้อยกว่าคำตอบที่ได้จากการใช้วิธี BFD algorithm อย่างเดียว (ให้ %waste ถึง 3.71%)
- ค่าเฉลี่ย (ทั้ง 150 runtimes จาก 5 ชุดทดสอบ) ของค่า nLS = 93.86 ซึ่งเป็นผลรวมของค่าเฉลี่ย $Sum(X_i)$ = 89.86 และ ค่าเฉลี่ย $Sum(Y_k)$ = 4
- ค่าเฉลี่ย (ทั้ง 150 runtimes จาก 5 ชุดทดสอบ) ของค่า nDiffPat = 18.19 ซึ่งทำให้สัดส่วนจำนวนรูปแบบการตัดที่ถูกนำมาใช้กับที่มี (nDiffPat/nEffPat) โดยเฉลี่ย = 60%

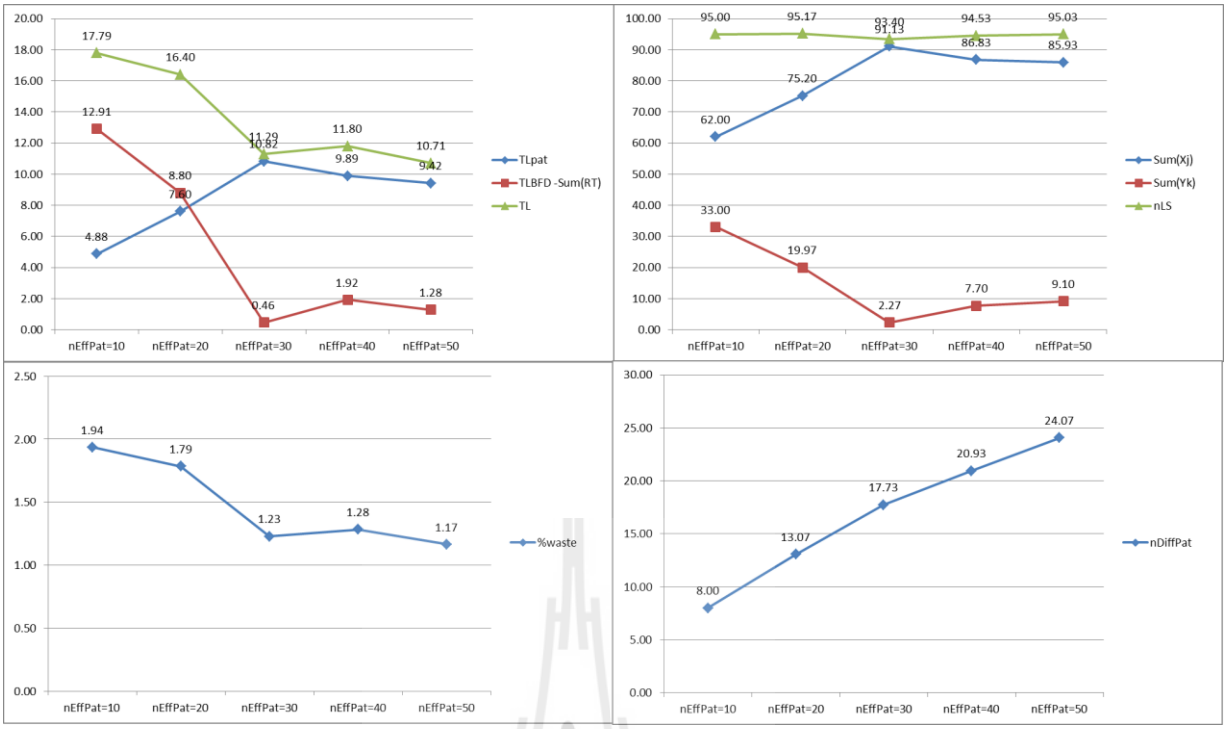
3.10.2 ประเด็นที่ 2 จำนวนรูปแบบการตัด (nEffPat)

คำตอบของชุดทดสอบทั้ง 5 ชุด ในประเด็นที่ 2 แสดงในรูปตารางและกราฟข้างล่างนี้

	Indexes	nEffPat=10	nEffPat=20	nEffPat=30	nEffPat=40	nEffPat=50	F	P-value	F crit	Verdict
Average	TLpat	4.88	7.60	10.82	9.89	9.42	1617.84	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	0.02	0.04	0.14	0.32				
Average	TLBFD -Sum(RT)	12.91	8.80	0.46	1.92	1.28	1290.53	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	1.22	0.20	1.25	0.84				
Average	TL	17.79	16.40	11.29	11.80	10.71	442.98	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	1.15	0.21	1.34	0.88				
Average	%waste	1.94	1.79	1.23	1.28	1.17	442.98	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	0.01	0.00	0.02	0.01				
Average	Sum(Xj)	62.00	75.20	91.13	86.83	85.93	1745.58	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	0.44	0.74	3.18	7.51				
Average	Sum(Yk)	33.00	19.97	2.27	7.70	9.10	1108.50	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	0.79	1.65	4.56	13.20				
Average	nLS	95.00	95.17	93.40	94.53	95.03	34.87	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	0.70	0.25	0.33	1.00				
Average	nDiffPat	8.00	13.07	17.73	20.93	24.07	592.73	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.00	0.34	1.58	3.79	4.55				

รูปที่ 3.30 ผลคำตอบค่าดัชนีของการทดสอบประเด็นจำนวนรูปแบบการตัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.31 กราฟดัชนีของการทดสอบประเด็นจำนวนรูปแบบการตัด

- ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ชี้ถึงการ Reject null hypothesis หมายถึงว่าค่าเฉลี่ยของชุดคำตอบแต่ละชุดมีความต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความมั่นใจ (alpha) 5% ชี้ให้เห็นถึงว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า nEffPat ส่งผลต่อคำตอบที่ได้
- แนวโน้มของค่า TL ลดลงเมื่อ nEffPat เพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีจุดเปลี่ยนอัตราการลดลงที่บริเวณ nEffPat = 30 แปลความหมายได้ว่า คำตอบที่ได้จะดีขึ้นเมื่อใช้ nEffPat มากขึ้น อย่างไรก็ตามหลังจาก nEffPat มากกว่า 30 จะให้คำตอบที่ดีขึ้นเพียงเล็กน้อย
- แนวโน้มของค่า %waste ลดลงเมื่อ nEffPat เพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีจุดเปลี่ยนอัตราการลดลงที่บริเวณ nEffPat = 30 แปลความหมายได้ว่า คำตอบที่ได้จะดีขึ้นเมื่อใช้ nEffPat มากขึ้น อย่างไรก็ตามหลังจาก nEffPat มากกว่า 30 จะให้คำตอบที่ดีขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ให้แนวโน้มเหมือนกับของค่า TL เนื่องจาก %waste มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ TL
- แนวโน้มของค่า nLS มีช่วงการผันแปรไม่กว้างมาก แม้ผลวิเคราะห์ ANOVA จะชี้ว่าแตกต่างกัน ในแต่ละชุดคำตอบ คำตอบที่มี nLS ต่ำที่สุดเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อ nEffPat =30
- คำตอบที่ให้ค่า %waste ต่ำที่สุด = 1.17% เป็นชุดทดสอบที่ใช้ nEffPat = 50 แต่คำตอบของชุดทดสอบนี้กลับไม่ได้ให้ค่า nLS ที่ต่ำที่สุด แปลความหมายได้ว่า คำตอบที่ได้จะเกิด Retails ขึ้นจำนวนหนึ่ง ซึ่งมากกว่าคำตอบของชุดทดสอบที่ใช้ nEffPat = 30 แสดงว่าชุด

ทดสอบ nEffPat = 30 ให้คำตอบที่มีค่า nLS ต่ำที่สุด เกิด Retails ขึ้นน้อยกว่า ในขณะที่ให้ %waste มากกว่าเล็กน้อยที่ = 1.23%

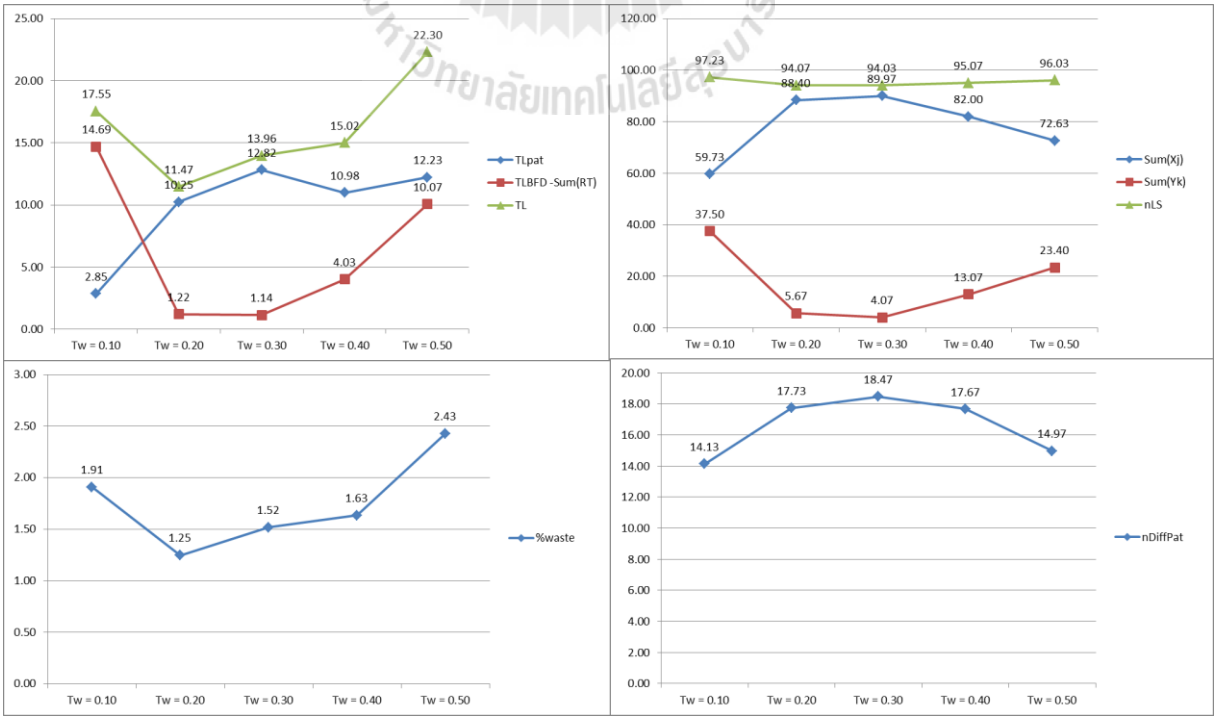
- คำตอบของชุดคำตอบทั้งหมดให้ค่า %waste น้อยกว่าคำตอบที่ได้จากการใช้วิธี BFD algorithm อย่างเดียว (ให้ %waste ถึง 3.71%)
- แนวโน้มของค่า nDiffPat เพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อ nEffPat เพิ่มขึ้น แปลความหมายได้ว่ารูปแบบการตัดที่มีเพิ่มขึ้นก็จะถูกนำไปใช้ตัดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้สัดส่วนจำนวนรูปแบบการตัดที่ถูกนำมาใช้กับที่มี (nDiffPat/nEffPat) จะมีแนวโน้มลดลง

3.10.3 ประเด็นที่ 3 ขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_w)

คำตอบของชุดทดสอบทั้ง 5 ชุด ในประเด็นที่ 3 แสดงในรูปตารางและกราฟข้างล่างนี้

	Indexes	Tw = 0.10	Tw = 0.20	Tw = 0.30	Tw = 0.40	Tw = 0.50	F	P-value	F crit	Verdict
Average	TLpat	2.85	10.25	12.82	10.98	12.23	1506.16	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.07	0.08	0.49	0.24	0.74				
Average	TLBFD -Sum(RT)	14.69	1.22	1.14	4.03	10.07	583.80	0.00	2.43	Reject Null
Variance		3.94	0.49	0.55	2.94	1.22				
Average	TL	17.55	11.47	13.96	15.02	22.30	255.83	0.00	2.43	Reject Null
Variance		4.52	0.54	0.64	2.25	1.98				
Average	%waste	1.91	1.25	1.52	1.63	2.43	255.83	0.00	2.43	Reject Null
Variance		0.05	0.01	0.01	0.03	0.02				
Average	Sum(Xj)	59.73	88.40	89.97	82.00	72.63	3333.26	0.00	2.43	Reject Null
Variance		1.65	1.21	0.93	1.59	1.69				
Average	Sum(Yk)	37.50	5.67	4.07	13.07	23.40	3167.16	0.00	2.43	Reject Null
Variance		3.57	1.54	1.10	1.72	1.21				
Average	nLS	97.23	94.07	94.03	95.07	96.03	124.66	0.00	2.43	Reject Null
Variance		1.43	0.13	0.03	0.13	0.52				
Average	nDiffPat	14.13	17.73	18.47	17.67	14.97	56.44	0.00	2.43	Reject Null
Variance		3.02	1.24	2.12	1.89	1.48				

รูปที่ 3.32 ผลคำตอบค่าดัชนีของการทดสอบประเด็นขนาดเศษที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด



รูปที่ 3.33 กราฟดัชนีของการทดสอบประเด็นขนาดเศษที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด

- ผลการวิเคราะห์ด้วย ANOVA ชี้ถึงการ Reject null hypothesis หมายถึงว่าค่าเฉลี่ยของชุดคำตอบแต่ละชุดมีความต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความมั่นใจ (alpha) 5% ชี้ให้เห็นถึงว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า T_w ส่งผลต่อคำตอบที่ได้
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า TL กับ T_w มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ทั้งนี้มีจุดวกกลับที่บริเวณ T_w = 0.20 แปลความหมายได้ว่า คำตอบที่ได้จะดีเมื่อใช้ T_w ขนาดเหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป โดย T_w ที่ให้คำตอบดีที่สุดคือที่ = 0.20
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า %waste กับ T_w มีลักษณะเป็นเส้นโค้งหงาย ทั้งนี้มีจุดวกกลับที่บริเวณ T_w = 0.20 แปลความหมายได้ว่า คำตอบที่ได้จะดีเมื่อใช้ T_w ขนาดเหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป โดย T_w ที่ให้คำตอบดีที่สุดคือที่ = 0.20 ทั้งนี้ให้แนวโน้มเหมือนกับของค่า TL เนื่องจาก %waste มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ TL
- แนวโน้มของค่า nLS มีช่วงการผันแปรไม่กว้างมาก แม้ผลวิเคราะห์ ANOVA จะชี้ว่าแตกต่างกัน ในแต่ละชุดคำตอบ คำตอบที่มี nLS ต่ำที่สุดเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเมื่อ T_w = 0.30 แต่ก็ใกล้เคียงกับคำตอบที่ T_w = 0.20 มาก
- คำตอบที่ให้ค่า %waste ต่ำที่สุด = 1.25% เป็นชุดทดสอบที่ใช้ T_w = 0.20 และยังเป็นชุดทดสอบที่ให้ค่า nLS ที่ต่ำมากด้วย = 94.07 แปลความหมายได้ว่า คำตอบที่ได้จะเกิด Retails น้อยด้วย
- คำตอบของชุดคำตอบทั้งหมดให้ค่า %waste น้อยกว่าคำตอบที่ได้จากการใช้วิธี BFD algorithm อย่างเดียว (ให้ %waste ถึง 3.71%)
- ความสัมพันธ์ระหว่างค่า nDiffPat กับ T_w มีลักษณะเป็นเส้นโค้งคว่ำ ทั้งนี้มีจุดวกกลับที่บริเวณ T_w = 0.30 แปลความหมายได้ว่า จำนวนรูปแบบการตัดที่ถูกนำมาใช้ไม่ได้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตาม T_w แต่ T_w ที่เหมาะสมคือประมาณ = 0.30 จะทำให้เกิดรูปแบบการตัดที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด สัดส่วน (nDiffPat/nEffPat) สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม สัดส่วน (nDiffPat/nEffPat) สูงที่สุดนี้ไม่ได้ทำให้เกิดคำตอบที่มี %waste ต่ำที่สุด

3.11 สรุปผลการพัฒนา

การสร้างโมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังเชิงเส้นสำหรับงานก่อสร้างที่พัฒนาขึ้นใหม่ในการวิจัยนี้เพื่อที่จะได้เครื่องมือใหม่ ที่สามารถใช้สร้างแบบแผนการตัดที่ดีมีประสิทธิภาพ เกิดความสูญเสียน้อย และนำไปใช้งานจริงได้สะดวก เรียนรู้การใช้งานโมเดลได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในวงการงานก่อสร้างของ

ประเทศไทยปัจจุบันยังไม่ได้ตระหนักถึงความสำคัญของการสร้างและการใช้แบบแผนการตัดวัสดุที่มีประสิทธิภาพ หากแต่กลับปล่อยให้หน้าที่นี้เป็นความรับผิดชอบของคนงานช่างเหล็ก ผลจึงทำให้แบบแผนการตัดวัสดุที่เป็นอยู่โดยทั่วไปเกิดจากการสั่งสมประสบการณ์ส่วนบุคคล และใช้การคิดคำนวณเองอย่างง่ายเกินไป โดยไม่มีเครื่องมือช่วยเหลือ จึงทำให้อัตราการสูญเสียวัสดุจากการตัดในงานก่อสร้างสูงมากกว่า 10% ทั้งที่วัสดุก่อสร้างเชิงเส้น เช่น เหล็กเส้น เหล็กรูปพรรณ ไม้ เป็นวัสดุก่อสร้างที่มีราคาต่อหน่วยแพงมาก โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับอัตราค่าแรงที่คนงานได้รับ ค่าแรงหนึ่งวันของคนงานสามารถเทียบได้กับเหล็กเส้น 12 กิโลกรัม (ค่าแรง 300 บาท/วัน ราคาเหล็กเส้น 25 บาท/กิโลกรัม)

ลักษณะโจทย์ปัญหาการตัดวัสดุสำหรับงานก่อสร้างจัดเป็นโจทย์ปัญหาที่มีวัสดุคงคลังที่มีความยาวมาตรฐานเพียงขนาดเดียวและมีจำนวนไม่จำกัด และต้องการท่อนความยาวหลากหลายขนาดแต่ละขนาดเป็นจำนวนมาก โดยต้องตัดให้ครบกับความต้องการ แนวทางวิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมกับโจทย์ปัญหาลักษณะคือ pattern-based approach ซึ่งเป็นแนวทางที่เลือกใช้ในการวิจัย ประกอบได้ด้วยสองขั้นตอนหลัก คือการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี และการหาคำตอบจำนวนครั้งการตัดรูปแบบ การพัฒนาโมเดลจึงถูกจัดทำขึ้นเป็นลำดับดังนี้

ขั้นตอนการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี การวิจัยได้พัฒนาวิธีการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีด้วย Intensive Search algorithm ซึ่งเป็นวิธีการสร้างรูปแบบการตัดที่บังคับให้เกิดความหลากหลายของรูปแบบและมีทิศทางที่กระจาย L_i ในรูปแบบการตัดในสัดส่วนสอดคล้องกับจำนวนความต้องการ B_i เป็นผลให้สามารถสร้างรูปแบบการตัดที่ประกอบด้วย L_i ที่หลากหลาย จึงช่วยเพิ่มโอกาสให้การนำรูปแบบไปตัดซ้ำได้ครบกับจำนวนความต้องการ

ขั้นตอนการหาคำตอบจำนวนครั้งการตัดรูปแบบ แบ่งออกเป็นอีกสองขั้นตอนย่อย คือ การหาคำตอบด้วย 1D-CSP model และการหาคำตอบส่วนที่เหลือด้วย BFD algorithm เริ่มจากการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของโมเดลปัญหา 1D-CSP สำหรับการหาคำตอบที่ดีที่สุด ทั้งนี้สมการที่สร้างขึ้นจะสะท้อนเงื่อนไข ข้อจำกัด รวมทั้งสมการที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพของคำตอบ และได้เลือกใช้เทคนิค Genetic Algorithm (GA) เพื่อช่วยค้นหาคำตอบที่ดี เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก ขั้นตอนย่อยต่อมาคือการนำรายการความต้องการส่วนที่เหลือ (undersupply) มาหาคำตอบต่อไป ด้วย BFD algorithm ที่เรียบง่ายแต่มีประสิทธิภาพสูงมาก ซึ่งวิธีการหาคำตอบจำนวนครั้งการตัดรูปแบบ ที่แบ่งเป็นขั้นตอนย่อยสองขั้นนี้ เป็นสิ่งที่พัฒนาขึ้นใหม่ในการวิจัยนี้

หลังจากได้สมการต่างๆของโมเดลแล้วจึงทำการโปรแกรมลงใน Spreadsheet ที่เลือกใช้คือ Microsoft Excel ได้ผลเป็นไฟล์โปรแกรมที่ใช้คำนวณค่าของโมเดลปัญหาและเพื่อการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วย

คำตอบที่ได้จากโมเดลนี้จะถูกประเมินด้วยค่าดัชนีต่างๆ เพื่อตรวจวัดประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้ ได้แก่ ค่าเศษการตัดทั้งหมด (TL), เปอร์เซ็นการสูญเสีย (เทียบกับปริมาณความต้องการ) (%waste), จำนวนเส้นของวัสดุคงคลังมาตรฐานที่ใช้ทั้งหมด (nLS), และจำนวนรูปแบบการตัดที่ต่างกันที่ใช้ (nDiffPat)

การทดสอบโมเดลที่สร้างขึ้นแล้ว ได้ทำการทดสอบกับโจทย์ปัญหาตัวอย่างที่อ้างอิงมาจากโครงการก่อสร้าง โดยออกแบบการทดสอบออกเป็น 3 ประเด็น เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อคำตอบ ได้แก่ ความต่อเนื่อง (consistency) ของคำตอบ, จำนวนรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น (nEffPat), และขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_w) ได้ผลสรุปดังนี้

ประเด็นความต่อเนื่อง (consistency) ของคำตอบ ด้วยการใช้วิธี ANOVA ในการวิเคราะห์ความเหมือนกันของชุดข้อมูลคำตอบ 5 ชุดที่เกิดจากรูปแบบการตัดที่ต่างกันรวม 5 ชุดทดสอบ พบว่าคำตอบที่ได้จากชุดทดสอบทั้ง 5 ชุดมีความเหมือนกันอย่างมีนัยยะทางสถิติ สำหรับค่าดัชนี TL และ %waste ที่ระดับความมั่นใจ alpha = 5% จึงหมายความว่า การนำโมเดลนี้ไปใช้กับโจทย์ปัญหาจะสามารถทำให้ได้คำตอบที่ไม่แตกต่างกัน แม้ว่าจะมีการสร้างรูปแบบการตัดขึ้นจากหลักการแบบสุ่ม (Intensive Search Algorithm) และหาคำตอบด้วยการค้นหาแบบสุ่มด้วย GA ทั้งนี้ผลสรุปของการทดสอบนี้เกิดขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่กำหนดใช้ในการทดสอบเท่านั้น

ประเด็นจำนวนรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น (nEffPat) พบว่าค่า nEffPat ส่งผลต่อคำตอบที่ได้ โดยค่า nEffPat ที่มากกว่า 30 รูปแบบขึ้นไปจะทำให้ได้คำตอบที่ดี ทั้งนี้อธิบายได้ว่ายิ่งมีรูปแบบการตัดที่หลากหลายยิ่งเพิ่มโอกาสการนำรูปแบบการตัดมาใช้สร้างเป็นคำตอบที่ให้ผลคำตอบที่ดีกว่า

ประเด็นขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_w) พบว่าค่า T_w ส่งผลต่อคำตอบที่ได้ โดยค่า T_w ที่ให้ผลคำตอบที่ดี จะเป็นค่าที่ไม่มากไม่น้อยเกินไป ได้ค่าที่เหมาะสมประมาณ = 0.20 เมตร ทั้งนี้อธิบายได้ว่า ค่า T_w ที่น้อยเกินไปจะทำให้สร้างรูปแบบการตัดได้ยากลำบาก ซึ่งอาจทำให้ไม่สามารถสร้างได้ด้วยจำนวนวนรอบที่กำหนด (nSLoop) ซึ่งเมื่อเกินจำนวนวนรอบที่กำหนด จะทำให้โปรแกรมสร้างรูปแบบการตัดที่เกินกว่า T_w ที่กำหนดไว้ได้ หมายถึงจะทำให้ได้รูปแบบการตัดที่ไม่ดี รวมถึงทำให้ได้รูปแบบที่ไม่หลากหลาย ไม่ครอบคลุมทุกค่า L_i หรือไม่ได้ L_i ที่เป็นสัดส่วนที่สอดคล้องกับจำนวน B_i ในทางตรงข้ามกรณีที่กำหนดให้ค่า T_w มากเกินไปจะทำให้ได้รูปแบบการตัดที่เกิดเศษการตัดมาก ซึ่งก็ส่งผลต่อคำตอบที่ได้

ผลการทดสอบทั้งหมดยังชี้ให้เห็นว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถให้คำตอบเป็นแผนการตัดวัสดุที่ดีกว่า คำตอบที่ได้จาก BFD algorithm ที่ใช้เป็น Benchmark พื้นฐาน ดังนั้นโมเดลนี้จึงสามารถเป็นเครื่องมือช่วยวางแผนการตัดวัสดุเชิงเส้นของงานก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง สามารถช่วยลด

การสูญเสียวัสดุที่เกิดขึ้นจากการตัดใช้ได้ ทั้งยังสามารถนำไปใช้ได้สะดวกเพราะเป็นโมเดลที่ถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Spreadsheet (Microsoft Excel) ที่คุ้นเคย

บทที่ 4 บทสรุป

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานก่อสร้างเป็นงานที่ต้องการใช้วัสดุก่อสร้างหลากหลายประเภทและเป็นจำนวนมาก วัสดุก่อสร้างกลุ่มหนึ่งที่มีปริมาณการใช้มากคือ วัสดุเชิงเส้นหรือวัสดุ 1 มิติ ได้แก่ เหล็กเส้น ซึ่งได้มาในขนาดความยาวมาตรฐาน (หรือเรียกว่าวัสดุคงคลัง) แต่มีความต้องการใช้หลากหลายขนาดความยาวในจำนวนที่ต่างๆกัน ดังนั้นการใช้งานเหล็กเส้นจึงต้องมีการตัดให้ได้ขนาดตามความต้องการ และจะเหลือเศษจากการตัดขึ้นจำนวนหนึ่ง แต่เนื่องจากเหล็กเส้นเป็นวัสดุที่มีราคาต่อหน่วยสูงมาก โดยเฉพาะเมื่อเทียบกับอัตราค่าแรงของคนงานที่ตัดเหล็กเส้น ดังนั้นการสร้างแบบแผนการตัดวัสดุคงคลังที่มีประสิทธิภาพเพื่อช่วยลดเศษสูญเสียจากการตัด จึงเป็นประเด็นที่คุ้มค่าในการทำอย่างยิ่ง

จากการศึกษาสำรวจเพื่อตรวจวัดอัตราการสูญเสียเหล็กเส้นจากการใช้งานในโครงการก่อสร้างทั่วไป และ algorithms ที่ผู้ปฏิบัติงานใช้ในการสร้างแบบแผนการตัด การตรวจวัดอัตราการสูญเสียแบบโดยตรง เช่น การนำเศษวัสดุที่หน้างานมาชั่งหาน้ำหนัก เป็นวิธีการที่ไม่สะดวกต่อการดำเนินการ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงใช้โจทย์ปัญหาการตัดวัสดุที่สร้างขึ้น เพื่อนำไปใช้สัมภาษณ์และหาคำตอบเป็นแบบแผนการตัดจากผู้ปฏิบัติงานจริงที่เป็นกลุ่มวิศวกรและกลุ่มช่างเหล็ก แล้วนำคำตอบมาคำนวณหาอัตราการสูญเสีย เป็นวิธีโดยอ้อมที่สะดวกต่อการดำเนินการมากกว่า ผลจากการศึกษาสำรวจโครงการก่อสร้างจำนวน 17 โครงการ ตัวอย่างกลุ่มวิศวกรและกลุ่มช่างเหล็กกลุ่มละ 30 คน พบว่าในทางปฏิบัติคนงานช่างเหล็กเป็นผู้รับผิดชอบสร้างแบบแผนการตัดเหล็กเส้นเอง ไม่ใช่วิศวกรที่เป็นผู้จัดเตรียมรายการความต้องการใช้เท่านั้น อย่างไรก็ตามผลการสร้างแบบแผนการตัดโดยคนทั้งสองกลุ่มมีลักษณะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยยะสำคัญ โดยบางคนมีวิธีการจัดรูปแบบการตัดในลักษณะคล้าย Next Fit Decreasing Algorithm อย่างง่าย เป็นคำนวณด้วยตนเองที่ไม่ได้ใช้เครื่องมือคำนวณอื่นช่วย เป็นการเลือกจับคู่กันของรายการที่อยู่ใกล้ๆกัน บางคนมีวิธีการจัดรูปแบบเพื่อให้ทำงานได้รวดเร็ว เช่น ตัดรายการซ้ำๆกัน แต่ไม่ได้เป็นเพื่อเป้าหมายให้เกิดเศษน้อย บางคนก็ไม่ได้จัดรูปแบบเลย อัตราการสูญเสียเศษการตัดจากคำตอบของวิศวกรและช่างเหล็กจำนวนทั้ง 60 คน เฉลี่ยแล้วได้มากกว่า 10% ซึ่งเป็นอัตราที่สูงมาก หรือหากพิจารณาเฉพาะเศษเหล็กที่เป็น scraps (ขนาดความยาวน้อยกว่า 4 เมตร) จะได้ปริมาณโดยเฉลี่ย 8.15% ของปริมาณเหล็กเส้นที่ต้องการใช้ ส่วนค่า Standard deviation (S.D.) ของเศษการตัดของแต่ละกลุ่มพบว่า ของกลุ่มวิศวกรมีค่า S.D. สูงกว่าของช่างเหล็กเล็กน้อย แสดงถึงว่าเศษการตัดของวิศวกรจะประกอบไปด้วยท่อนที่มีขนาดต่างกันมากคือท่อนสั้นกับท่อนยาว แต่เศษการตัดของช่างเหล็กจะประกอบไปด้วยท่อนที่มีขนาดต่างกันน้อยกว่า นอกจากนี้ในส่วนของทัศนคติของผู้ปฏิบัติงานและผู้บริหารอาจมองไม่เห็นถึงผลจากการปรับเปลี่ยนแบบแผนการตัดเหล็กเส้นว่าจะทำให้สามารถลดอัตราการสูญเสียลงได้อย่างมาก จึงไม่ได้ให้ความสำคัญและปล่อยให้ช่างเหล็กเป็น

ผู้ดำเนินการเอง ผลของวัตถุประสงค์ข้อที่หนึ่งจึงทำให้เห็นถึงความสำคัญของปัญหาการตัดวัสดุคงคลังในงานก่อสร้าง

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือการพัฒนาโมเดลปัญหาการตัดวัสดุก่อสร้างเชิงเส้นและวิธีการหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพดี และสร้างโปรแกรมต้นแบบเพื่อทดสอบการใช้งานและประเมินผลประสิทธิภาพ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าโมเดลปัญหานี้มีความซับซ้อนมาก และสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ซึ่งแต่ละประเภทก็มีวิธีการหาคำตอบได้หลายวิธี พบว่าลักษณะโจทย์ปัญหาการตัดวัสดุคงคลังสำหรับงานก่อสร้างจัดอยู่ในกลุ่มประเภท (1/V/I/M) และ/หรือ (1/V/I/R) ตามระบบของ (Dyckhoff 1990) หรือเป็นแบบ Single Stock Size Cutting Stock Problem (SSSCSP) และ/หรือ Single Bin Size Bin Packing Problem (SBSBPP) ตามระบบการจำแนกของ (Wäscher, Haußner, and Schumann 2007) ซึ่งแนวทางวิธีการหาคำตอบที่เหมาะสมคือ pattern-based approach จึงทำให้ได้โมเดลปัญหาที่เสมือนกับมี 2 ปัญหาซ้อนกันอยู่ คือปัญหาการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี และปัญหาการหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบเหล่านั้นที่ดีที่สุด จากการทบทวนวรรณกรรมทำให้เห็นถึงช่องว่างในการพัฒนาวิธีการหาคำตอบแบบ pattern-based approach นี้

ปัญหาการสร้างรูปแบบการตัดที่ดี เป็นส่วนที่สำคัญเนื่องจากเซ็ตของรูปแบบการตัดที่ดีจะส่งผลให้ได้คำตอบของปัญหาที่ดี ซึ่งเซ็ตของรูปแบบการตัดที่ดีคือจะต้องให้เศษที่น้อยและมีส่วนผสมของ L_i ที่หลากหลาย และรวมทั้งควรมี A_{ij} ที่เป็นสัดส่วนที่สอดคล้องกับ B_i ดังนั้นการวิจัยนี้จึงได้สร้าง Intensive Search Algorithm ขึ้นเพื่อให้สามารถสร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดให้มีลักษณะดังกล่าว โดยจากผลการทดสอบ algorithm นี้พบว่าทำให้ได้เซ็ตของรูปแบบการตัดที่มีความหลากหลายและประกอบไปด้วยขนาดท่อนความยาวต่างๆครบทุกขนาดที่ต้องการ พร้อมทั้งยังสามารถกำหนดขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้ของรูปแบบที่สร้างขึ้นได้อีกด้วย

ปัญหาการหาจำนวนครั้งของการตัดรูปแบบเหล่านั้นที่ดีที่สุด เนื่องจากข้อจำกัดของวิธีการหาคำตอบที่ใช้ จึงจำเป็นต้องแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนย่อย คือการหาคำตอบด้วย 1D-CSP model และการหาคำตอบส่วนที่เหลือด้วย Best-Fit-Decreasing algorithm ซึ่งเป็นวิธีการที่การวิจัยนี้พัฒนาขึ้นใหม่ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการหาคำตอบ โมเดลปัญหา 1D-CSP นี้ใช้วิธีแก้ปัญหาด้วย Genetic Algorithm (GA)

ตัวโมเดลปัญหาและการหาคำตอบทั้งหมดนี้ ถูกพัฒนาบนโปรแกรม Spreadsheet คือ Microsoft Excel ที่มีความสามารถในการคำนวณที่ซับซ้อนได้ และเป็นที่นิยมใช้แพร่หลาย จึงช่วยให้ผู้ใช้ที่คุ้นเคยกับโปรแกรมนี้อยู่เดิมสามารถเรียนรู้การทำงานกับโมเดลปัญหานี้ได้อย่างรวดเร็วนำไปสู่ความสำเร็จในการนำไปใช้งาน รวมถึงการใช้เงินลงทุนกับโปรแกรมนี้ต่ำ

โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาเสร็จสมบูรณ์ได้ถูกนำมาทดสอบกับโจทย์ตัวอย่างที่เตรียมขึ้นจากข้อมูลของโครงการก่อสร้าง เพื่อประเมินผลความถูกต้องและประสิทธิภาพของโมเดล

การทดสอบได้ถูกออกแบบไว้ 3 ประเด็น ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลักที่มีผลต่อคำตอบ ได้แก่ ความต่อเนื่อง (consistency) ของคำตอบ, จำนวนรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น (nEffPat), และขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_w) ด้วยการทดสอบซ้ำหลายๆครั้งกับชุดทดสอบจำนวนมาก แล้วนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างกันของผลคำตอบที่ได้จากแต่ละ runtime ด้วยวิธี ANOVA ทำให้ได้ข้อสรุปจากการทดสอบว่า โมเดลปัญหานี้สามารถสร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดและหาคำตอบที่มีความต่อเนื่องกันได้ หรือไม่มีความแตกต่างกันได้จาก runtime ที่ต่างๆกัน (มีค่า parameters เหมือนเดิม) และจำนวนรูปแบบการตัดที่สร้างขึ้น (nEffPat) มีผลต่อคำตอบที่ได้ โดยยิ่งมีจำนวน nEffPat มากจะยิ่งทำให้ได้คำตอบที่ดี เพราะเป็นการหาคำตอบจากรูปแบบการตัดที่หลากหลาย นอกจากนี้ขนาดเศษการตัดที่ยอมรับได้จากรูปแบบการตัด (T_w) ก็มีผลต่อคำตอบที่ได้เช่นกัน โดย T_w ประมาณ 0.20 จะให้คำตอบที่ดี หากน้อยกว่าหรือมากกว่านี้จะให้คำตอบแย่กว่า เนื่องจากเป็นการบีบคั้นด้วย T_w ที่ต่ำเกินไป หรือการปล่อยอิสระด้วย T_w ที่สูงเกินไป จะทำให้สร้างเซ็ตของรูปแบบการตัดที่ไม่ดีพอ

ผลการทดสอบทั้งหมดยังชี้ให้เห็นว่าโมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถให้คำตอบเป็นแผนการตัดวัสดุที่มีอัตราการสูญเสียเฉลี่ยเพียง 1.24% ซึ่งดีกว่าคำตอบที่ได้จาก BFD algorithm เพียงอย่างเดียวที่มีอัตราการสูญเสียที่ 3.71% (ต่ำกว่าถึง 3 เท่า) และดีกว่าวิธีปฏิบัติที่เป็นอยู่ที่มีอัตราการสูญเสียมากกว่า 10% จากการสำรวจ (ต่ำกว่าถึง 8 เท่า) แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อช่วยสร้างแบบแผนการตัดวัสดุคงคลังสำหรับงานก่อสร้าง ให้เกิดอัตราการสูญเสียวัสดุคงคลังจากการตัดให้น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดต้นทุนค่าก่อสร้างลงได้เป็นจำนวนมากและเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมด้วยการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและลดขยะ

4.2 ข้อจำกัด

ข้อจำกัดของโมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังที่พัฒนาขึ้นนี้ ประการแรกเกิดจากหลักการสร้างรูปแบบการตัดที่ดีและหลักการหาคำตอบด้วย GA ซึ่งทำให้ผลคำตอบที่ได้จาก runtime แต่ละครั้งไม่เท่าเดิมแต่จะได้คำตอบใหม่เสมอ ถึงแม้ว่าจะทำการทดสอบวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือทางสถิติคือ ANOVA เพื่อยืนยันความเหมือนกันอย่างมีนัยยะสำคัญที่ระดับความมั่นใจ alpha = 5% แล้วก็ตาม ผู้ใช้งานอาจเกิดความลังเลในการเลือกใช้คำตอบ อย่างไรก็ตามปัญหาการตัดวัสดุนี้เป็นปัญหาที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ มีจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้จำนวนมาก จัดเป็นปัญหาแบบ NP-hard การหาคำตอบหลายๆครั้งจากหลาย runtimes อาจเป็นโอกาสให้เจอคำตอบที่ดีกว่า ซึ่งความเร็วในการประมวลผลหาคำตอบแต่ละ runtime ใช้ระยะเวลาประมาณ 5 นาที บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลทั่วไป การใช้เวลาสักชั่วโมงในการเตรียมแบบแผนการตัดที่ดีนั้นไม่ควรจะเป็นปัญหาในการรอคอย อีกทั้งการเตรียมแบบแผนการตัดยังทำเป็นครั้งคราว ไม่ได้ทำอย่างต่อเนื่องตลอด

ข้อจำกัดของโมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลังนี้ อีกประการคือการจัดเตรียมข้อมูลนำเข้าที่เป็นโจทย์ปัญหารายการปริมาณความต้องการใช้หรือ bar cut list ที่ได้จากการถอดปริมาณงานจากแบบก่อสร้าง โดยตัวโปรแกรมไม่ได้ครอบคลุมถึงขั้นตอนการถอดปริมาณงานให้โดยอัตโนมัติ ดังนั้นขั้นตอนนี้จึงยังคงต้องดำเนินการเองเหมือนเดิม นอกจากนี้รายการปริมาณความต้องการใช้เหล็กเส้นในงานก่อสร้างแต่ละงวดการตัดยังประกอบไปด้วยขนาดเหล็กเส้นหลายเส้นผ่าศูนย์กลาง แต่โมเดลนี้จะทำงานได้คราวละเพียงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเดียว ตัวโจทย์ปัญหาที่มีเหล็กเส้นหลายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจะต้องถูกจัดแบ่งออกเป็นโจทย์ปัญหาคนละข้อ

ข้อจำกัดที่สำคัญอีกประการคือ การทดสอบโมเดลปัญหาที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้ ได้ทำกับโจทย์ปัญหาเพียงโจทย์เดียว ซึ่งคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้จากโมเดล ทิศทางและความสัมพันธ์ของค่า parameters ต่างๆ อาจขึ้นอยู่กับตัวโจทย์ปัญหาอย่างมาก จึงไม่อาจใช้บทสรุปที่ได้อธิบายไว้เป็นบทสรุปทั่วไปสำหรับทุกโจทย์ปัญหาได้ อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปใช้กับโจทย์ปัญหาจริงข้ออื่นๆ ก็ควรมีคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้ ทิศทางและความสัมพันธ์ของค่า parameters ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ควรเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล ไม่ต่างจากผลสรุปการทดสอบที่ได้จากการวิจัยนี้

4.3 ข้อเสนอแนะ

สภาพปัญหาการตัดวัสดุคงคลังในงานก่อสร้างของประเทศไทยเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยต่อไปได้ เนื่องจากธุรกิจก่อสร้างของประเทศไทยมีขนาดใหญ่มีจำนวนโครงการก่อสร้างที่กำลังดำเนินการและบริษัทก่อสร้างที่ต้องทำการตัดวัสดุเชิงเส้นอยู่เป็นจำนวนมาก อัตราการสูญเสียที่สำรวจได้อยู่บนตัวอย่างข้อมูลที่จำกัด อีกทั้งยังคงมีคำถามว่าหากให้วิศวกรเป็นผู้จัดรูปแบบการตัดเองโดยใช้วิธีการของตนเองจะทำให้เกิดการสูญเสียน้อยกว่าที่ช่างเหล็กทำหรือไม่เพียงใด ผลจากการศึกษาประเด็นนี้ต่อไปจะช่วยให้เห็นสภาพปัญหาที่เป็นอยู่ เพื่อให้เกิดความตระหนักถึงความสำคัญ

โมเดลปัญหาการตัดวัสดุคงคลัง เป็นปัญหาที่ซับซ้อนเกี่ยวข้องกับค่า parameters จำนวนมาก อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวโจทย์ปัญหาด้วย ทำให้โมเดลนี้ยังสามารถถูกพัฒนาต่อไปได้อีก โดยนำเอาประเด็นปัจจัยเหล่านี้มาศึกษาต่อ ตัวอย่างเช่น ลักษณะขนาดคละของโจทย์ปัญหา, วัสดุคงคลังที่มีหลายขนาด (มีท่อน Retials รวมอยู่ด้วย), ประเด็น contiguity, วิธีการแบ่งงวดงานการตัด, การคำนึงถึงกำหนดวันส่งมอบ หรือวันที่ต้องการใช้เป็นสำคัญ, การบริหารการใช้ทรัพยากรในการตัด (เครื่องจักรตัด และคนงานตัด) มีขั้นตอนปลายน้ำคือการดัด (หากเป็นเหล็กเส้น) หรือการประกอบ เป็นต้น

รูปลักษณ์ของโมเดลที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นไปเพื่อการวิจัย ยังคงมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ (User interface) ที่ไม่สวยงามเหมือนกับโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีอยู่ โดยเฉพาะไม่มีส่วนการแสดงผลลัพธ์เป็น

รูปกราฟ หรือกราฟฟิคต่างๆ อย่างอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามการวิจัยต่อไปอาจเลือกที่จะพัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้เพื่อให้เหมาะสำหรับการนำไปใช้จริงในวงกว้างมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

Cherri, A. C, M. N Arenales, and H. H Yanasse. 2009. “The One-dimensional Cutting Stock Problem with Usable leftover-A Heuristic Approach.” *European Journal of Operational Research* 196 (3): 897–908.

Coffman Jr, E. G, M. R Garey, and D. S Johnson. 1984. “Approximation Algorithms for Bin-packing: An Updated Survey.” *Algorithm Design for Computer System Design*: 49–106.

Dyckhoff, H. 1990. “A Typology of Cutting and Packing Problems.” *European Journal of Operational Research* 44 (2): 145–159.

Gilmore, P. C, and R. E Gomory. 1961. “A Linear Programming Approach to the Cutting-stock Problem.” *Operations Research* 9 (6): 849–859.

Gilmore, P. C., and R. E. Gomory. 1963. “A Linear Programming Approach to the Cutting Stock problem-Part II.” *Operations Research* 11 (6): 863–888.

Gradisar, Miro, Joze Jesenko, and Gortan Resinovic. 1997. “Optimization of Roll Cutting in Clothing Industry.” *Computers & Operations Research* 24 (10) (October): 945–953. doi:16/S0305-0548(97)00005-1.

Gradisar, Miro, Miroljub Kljajic, Gortan Resinovic, and Joze Jesenko. 1999. “A Sequential Heuristic Procedure for One-dimensional Cutting.” *European Journal of Operational Research* 114 (3) (May 1): 557–568. doi:16/S0377-2217(98)00140-4.

Gramani, Maria Cristina N., and Paulo M. França. 2006. “The Combined Cutting Stock and Lot-sizing Problem in Industrial Processes.” *European Journal of Operational Research* 174 (1) (October 1): 509–521. doi:16/j.ejor.2004.12.019.

Haessler, R. W, and P. E Sweeney. 1991. “Cutting Stock Problems and Solution Procedures.” *European Journal of Operational Research* 54 (2): 141–150.

Hinterding, Robert, Robert Hinterding, Lutfar Khan, and Lutfar Khan. 1994. “Genetic Algorithms for Cutting Stock Problems: With and Without Contiguity.” http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.52.4023.

“Introduction to ANOVA / MANOVA.” 2012. Accessed May 29. http://www.statsoft.com/textbook/anova-manova/?button=1.

Kulatunga, U., D. Amaratunga, R. Haigh, and R. Rameezdeen. 2006. “Attitudes and Perceptions of Construction Workforce on Construction Waste in Sri Lanka.” *Management of Environmental Quality: An International Journal* 17 (1): 57–72.

Liang, Ko-Hsin, Xin Yao, Charles Newton, and David Hoffman. 2002. "A New Evolutionary Approach to Cutting Stock Problems with and Without Contiguity." *Computers & Operations Research* 29 (12) (October): 1641–1659. doi:16/S0305-0548(01)00039-9.

Pierce, J. F. 1964. *Some Large-scale Production Scheduling Problems in the Paper Industry*. Prentice-Hall.

Reinertsen, Harald, and Thomas W.M. Vossen. 2010. "The One-dimensional Cutting Stock Problem with Due Dates." *European Journal of Operational Research* 201 (3) (March 16): 701–711. doi:16/j.ejor.2009.03.042.

Salem, O., A. Shahin, and Y. Khalifa. 2007. "Minimizing Cutting Wastes of Reinforcement Steel Bars Using Genetic Algorithms and Integer Programming Models." *Journal of Construction Engineering and Management* 133: 982.

De Silva, N., and S. Vithana. 2008. "Use of PC Elements for Waste Minimization in the Sri Lankan Construction Industry." *Structural Survey* 26 (3): 188–198.

Spellerberg, I. F., and P. J. Fedor. 2003. "A Tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a Plea for More Rigorous Use of Species Richness, Species Diversity and the 'Shannon–Wiener' Index." *Global Ecology and Biogeography* 12 (3): 177–179.

Vahrenkamp, R. 1996. "Random Search in the One-dimensional Cutting Stock Problem." *European Journal of Operational Research* 95 (1): 191–200.

Wäscher, Gerhard, Heike Haußner, and Holger Schumann. 2007. "An Improved Typology of Cutting and Packing Problems." *European Journal of Operational Research* 183 (3) (December 16): 1109–1130. doi:16/j.ejor.2005.12.047.

Yanasse, Horacio Hideki, and Maria José Pinto Lamosa. 2007. "An Integrated Cutting Stock and Sequencing Problem." *European Journal of Operational Research* 183 (3) (December 16): 1353–1370. doi:16/j.ejor.2005.09.054.

ประวัตินักวิจัย

หัวหน้าโครงการ

ชื่อสกุล : ดร. วชรภูมิ เบญจโอฬาร (Dr. Vacharapoom Benjaoran)

ตำแหน่ง : รองศาสตราจารย์

ที่อยู่หน่วยงานที่ติดต่อได้ : สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย
อ.เมืองจ.นครราชสีมา30000
โทรศัพท์ 044-224172, โทรสาร 044-224607
E-mail: vacharapoom@sut.ac.th

ประวัติการศึกษา :

2005 – Doctor of Philosophy in Construction Management and IT,
School of Science and Technology, University of Teesside, Middlesbrough, UK.

2002 –Master of Engineering in Construction Engineering and Management,
School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

1997 – Bachelor of Engineering in Civil Engineering Program,
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รางวัล :

2002 – Research Studentship to pursue PhD in Construction Management and IT at
School of Science and Technology, University of Teesside, UK.

2002 – Mahesh Varma Prize awarded for the most outstanding academic performance among graduating master's students in Construction Engineering and Management Program.

2000 – AIT-STAR Foundation full scholarship to pursue Master'sDegree

at School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand.

1997 – Second Honour, Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

ประสบการณ์ทำงาน :

2007 to present Full-time lecturer, School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand.

2005 – 2007 Full-time lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand.

2002 – 2005 Research Assistant, Centre for Construction Innovation and Research (CCIR), University of Teesside, Middlesbrough, UK.

1997 – 2000 Civil Engineer, Italian-Thai Development Public Company Limited, Bangkok, Thailand.

หัวข้อวิจัยที่สนใจ :

- Artificial intelligence, optimization, simulation, visualization and process modeling;
- Information and communication technology for construction industry;
- Cost accounting and control;
- Material waste reduction;

ผลงานทางวิชาการ :

[1] Benjaoran, V. and BhoKha, S. (2010) “An Integrated Safety Management with Construction Management Using 4D CAD Model.” Safety Science, 48(3), 395-403.

[2] Benjaoran, V. and BhoKha, S. (2009) “Enhancing visualization of 4D CAD model compared to conventional methods.” Engineering, Construction and Architectural Management, 16(4), 392-408.

[3] Benjaoran, V. (2009) “A cost control system development: A collaborative approach for small and medium-sized contractors.” International Journal of Project Management, 27(3), 270-277.

[4] Benjaoran, V. and Dawood, N. (2006) “An intelligence approach to production planning system for bespoke precast concrete products.” Automation in Construction, 15(6), 737-745.

[5] Benjaoran, V., Dawood, N. and Hobbs, B. (2005) “Flowshop scheduling model for bespoke precast concrete production planning.” Construction Management and Economics, 23(1), 93-105.

[6] Benjaoran, V. (2008) “A development of a cost control system for small and medium-sized contractors.” Suranaree Journal of Science and Technology, 15(1), 1-11.

[7] Benjaoran, V. and Dawood, N. (2006) “Integration of 4D Visualization Plans with Construction Safety Requirements” Journal of Research in Engineering and Technology, 3(2), 95-106 (A Publication of Faculty of Engineering, Kasetsart University, Thailand).

[8] วชรภูมิ เบญจโอหาร (2009) เอกสารประกอบการสอนรายวิชาการบริหารงานก่อสร้าง (Construction Management), พิมพ์ครั้งที่ 4, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 180 หน้า